平成３１年度

放射性廃棄物共通技術調査等事業

放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務（国庫債務負担行為に係るもの）

報　告　書

（２０１９年度分）

２０２０年３月

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

本報告書は、経済産業省からの委託事業として、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した「平成３１年度放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務）（国庫債務負担行為に係るもの）」※の 2019 年度の成果を取りまとめたものです。

（※本事業は 2022 年度までの４ヵ年の事業である）

【 目 次 】

1．はじめに 1

1.1 調査目的と調査内容 1

1.1.1 調査目的 1

1.1.2 調査内容 1

1.2 調査の計画立案と実施方針 1

1.2.1 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理・成果の取りまとめ等に関する 作業計画 3

1.2.2 人材育成プログラムの実施・作成に関する作業計画 4

2．萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の 進捗管理・成果の取りまとめ 5

2.1 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発テーマの 2019 年度の成果概要 6

2.1.1 実施研究 1　研究者：北海道大学　胡桃澤 清文 6

2.1.2 実施研究 2　研究者：電力中央研究所　田中真悟 8

2.1.3 実施研究 3　研究者：山形大学　湯口貴史 10

2.1.4 実施研究 4　研究者：埼玉大学　富樫陽太 12

2.1.5 実施研究 5　研究者：東京大学　鈴木庸平 14

2.1.6 実施研究 6　研究者：早稲田大学　王海龍 16

2.1.7 実施研究 7　研究者：日本原子力研究開発機構（JAEA）　渡辺勇輔 18

2.2 評価委員会による 2019 年度の研究成果に対する評価 20

3．人材育成プログラムの実施・作成 28

3.1 実施方針 28

3.1.1 背景 28

3.1.2 関連機関の協力の実施 29

3.1.3 人材育成プログラムの対象者（ジェネラリスト）の定義の検討 30

3.2 2019 年度の実施内容の検討 32

3.2.1 地層処分スキルアップ研究会での検討 32

3.2.2 2019 年度の人材育成セミナーの企画 32

3.3 2019 年度人材育成セミナーの実施結果 44

3.3.1 開催概要 44

3.3.2 モニターの属性等 45
3.3.3 各分野の講義・招待講演・演習の結果概要 47
3.3.4 グループワークの開催結果 49
3.4 アンケート等の分析 63
3.4.1 各講義に対するアンケート結果の分析 63
3.4.2 人材育成セミナーに対する意見の分析 67
3.5 外部有識者による評価 77
3.6 今後に向けて-アンケート等の分析・結果等の反映について- 78
3.6.1 人材育成プログラムの方向性について 78
3.6.2 セミナーの運営関連の改善点等 80
3.6.3 セミナーの内容、構成等に関する改善点 81

別添資料１　実施研究報告
別添資料２　2019 年度人材育成セミナー講義資料集
別添資料３　人材育成プログラムモニターアンケート用紙
別添資料４　人材育成プログラムモニターアンケート集計結果

1 . はじめに

1.1 調査目的と調査内容

1.1.1 調査目的

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って放射性廃棄物が発生しており、その処理処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物の地層処分や長半減期低発熱放射性廃棄物（ＴＲＵ廃棄物）をはじめとする低レベル放射性廃棄物の処理処分等に係る政策立案や研究開発については、国や関係機関、処分実施主体（原子力発電環境整備機構：ＮＵＭＯ）等の適切な役割分担のもとで進めていくことが重要である。

これらの背景を踏まえて、本事業では高レベル放射性廃棄物の地層処分を中心とした萌芽的・先進的な研究開発または重要な調査を実施し、地層処分実施主体が将来地層処分事業を進めるに当たり必要な知見の整備を目的とする。なお、本事業は、萌芽的・先進的な研究開発の実施を通じた幅広い分野の研究者・技術者の人材育成に資することを念頭に2019 年度から 4 カ年程度で実施する。

1.1.2 調査内容

上記の調査の目的を踏まえ本事業では、放射性廃棄物の地層処分を中心とした萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理を実施するとともに、研究の実施に係る進捗管理や成果のとりまとめを行う。さらに、長期にわたる地層処分事業を、研究開発並びに事業実施の両側面から支える人材を育成するプログラムの調査・作成を実施する

1.2 調査の計画立案と実施方針

前述した調査内容に基づき、具体的な作業内容について表 1.2-1 に示す。

表 1.2-1 本事業における作業内容

（１）萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理・成果の取りまとめ等

平成３０年度放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務）で選定した７つの研究開発テーマに対して、進捗管理と成果の取りまとめや所定の研究開発資金の配賦を実施する。

具体的には、受託事業者は、有識者委員会を設置し、研究テーマの実施状況についてチェックアンドレビューを行う。チェックアンドレビューに際しては、以下の方針で実施する。なお、有識者の選定に際しては、資源エネルギー庁と相談・調整の上、検討し決定措置する。

- 有識者委員会については、地層処分に係る地質環境、工学技術、安全評価等の専門的な知識を有するメンバー４名以上とする。
- 有識者委員会については、年２回程度実施し、各委員会において、年間計画、事業の成果を確認する。
- 有識者委員会については、各研究テーマの実施者が発表し、有識者からの発表内容の妥当性や今後の更なる発展に向けた助言が出やすくなるように工夫する。
- 有識者委員会実施後、議事要旨を作成し、各研究テーマの実施者への助言が明確にトレースできるようにする。

なお、各研究テーマでの金額の使用状況については、年度末に研究開発資金の使途の妥当性等の観点から現地で書面等をもって確定検査を実施し、適切に運用がなされていることを確認する。各研究テーマについては、2020 年度に、その後の継続期間、中止等今後の対応について、資源エネルギー庁と相談・調整の上、中間評価を行う。

（２）人材育成プログラムの実施・作成

地層処分事業の着実な遂行に向けては、研究開発分野並びに地層処分の実施主体ともに、地質学、土木工学や放射線化学等、幅広い専門的な知識を有する人材（ジェネラリスト）が必要不可欠である。しかしながら、我が国の当該分野におけるジェネラリストの育成プログラムは存在しない。そこで重要な調査の一環として長期にわたる地層処分事業を、研究開発並びに事業実施の両側面から支える人材を育成するプログラムの調査・作成を実施する。

具体的には、以下の方針に基づき地層処分に係る講習会や研修会等の実施、人材育成プログラムの更新を繰り返し行い、最終的な人材育成プログラムを作成する（例えば、学習資料や学習指導要領のような形式として取りまとめる)。

- 講習会や研修会は年間３～４日程度実施する（受講者数としては、２０～４０名を想定)。
- 講習会や研修会の実施に際しては、（１）に示す萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の実施者等も含め、受講者を募集する。
- 毎年度、講習会や研修会の結果をアンケート等により理解度等を把握し、その結果に基づき問題点の洗い出し、解決策を立案する。
- 上記結果や実施内容に関する有識者委員会からの助言に基づき、個々に専門性を有する受講者に対する最適なジェネラリスト育成プログラムを改善する。

（３）事業報告書の作成

（１）（２）の実施内容について、取りまとめた事業報告書を作成する。なお、報告書作成に際しては、過去の同種の公開されている事業報告書[1]を参考にする。

[1] http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/library05.html

表 1.2-1 に示した作業内容についてまとめると、以下のように整理される。

(1) 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理・成果の取りまとめ等

- 研究開発テーマ実施に関する進捗管理・取りまとめを行い、その一環として有識者委員会等を設置し、研究者によるプレゼン報告に対してチェックアンドレビューを実施

(2) 人材育成プログラムの実施・作成

- ジェネラリスト育成のためのプログラムの検討を行い、講習会・研修会を毎年度開催し、アンケートなどで受講者からのフィードバックを得る
- 受講者からのフィードバック、外部有識者による評価結果などを反映しプログラムを改善する
- 上記のサイクルを 4 年間の事業期間中に繰り返し行う。

次節で、2019 年度に実施する作業計画を整理する。

1.2.1 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理・成果の取りまとめ等に関する作業計画

前述の作業内容を踏まえて、2018 年度に選定した萌芽的・先進的かつ重要な研究開発に関する進捗管理・取りまとめについて以下を実施することを計画した。

① 評価委員会において年度途中に中間報告を、また年度末に最終報告を行い、進捗状況等について各研究に委員から意見を頂くことにより進捗管理を行う

② 電子メールや研究者の所属する大学等へ訪問し意見交換を実施することにより進捗管理を行う

③ 各研究者から提出された研究報告書の概要を取りまとめる

①については、大学等の外部有識者からなる評価委員会を設置し、各委員会において、対応する研究開発内容・進捗状況に関する報告を研究実施者に行わせ、チェックアンドレビューを行う。

②については、上記のように、電子メールや各大学等への訪問により意見交換を実施し、研究の進捗について管理する。

③については、各研究者から 1 月頃に研究報告書のドラフト版を、3 月中旬に研究報告書の最終版の提出を受けることにより、研究の進捗管理を行う。また、研究報告書の概要をとりまとめる。

1.2.2 人材育成プログラムの実施・作成に関する作業計画

前述の作業内容及び資源エネルギー庁との協議を踏まえて、以下を実施することを計画した。

- 人材育成プログラムの作成のための検討に際しては、資源エネルギー庁委託事業実施機関及び地層処分事業の実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）の協力を得て実施する
- これらの機関との協力体制については、各機関との協議に基づき決定する
- 放射性廃棄物処分に関連した既存の人材育成プログラムや NUMO の包括的技術報告書の教材としての活用なども検討する
- 今年度に関しては、60 人規模のセミナーを開催する。開催に際しては、受講者にアンケートへ回答してもらい、その内容を分析、翌年度以降のプログラムに反映する

2 . 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理・成果の取りまとめ

2018 年度に選定された 7 件の研究テーマについて、年度途中、及び年度末頃に有識者による委員会に対して研究開発内容・進捗状況に関する報告を研究実施者に行わせ、チェックアンドレビューを行うため、評価委員会を設置した。

また、上記評価委員会の他に、研究実施者との間で電子メールや各研究者が所属する大学等に訪問して意見交換を行うことにより、進捗管理を実施した。

以下の 2.1 節において、7 件の研究テーマの 2019 年度の成果概要について整理する。

2.1 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発テーマの 2019 年度の成果概要

2.1.1 実施研究 1　研究者：北海道大学　胡桃澤 清文

研究テーマ：ジオポリマー技術による人工バリア構築のための基礎的検討

（背景・目的）

放射性廃棄物処分施設では、人工バリアの一部としてコンクリートを含むセメント系材料の使用が想定されているが、現在のセメント系材料は長期にわたり地下水に接することによって主要な生成物である水酸化カルシウム及び C-S-H（カルシウムシリケート水和物）中のカルシウム成分が溶出し多孔化することが問題視されている。そこで人工バリアの一部としてジオポリマー硬化体の適用が可能かどうかの基礎的検討を行う。特に強度などの機械的特性、収着性能、溶出特性、及び物質移動特性について定量的に明らかにすることを目的とする。

＊＊＊＊＊

（2019 年度の実施計画）

2019 年度は、ジオポリマー硬化体の適切な配合を検討する。メタカオリン及びアルカリ刺激剤の配合条件を決定し、流動性、強度、収着特性に優れた硬化体の作製を行う。強度試験では、圧縮強度、引張強度及び弾性係数の測定を行い、機械的特性を明らかにする。収着試験としては、硬化体にヨウ素等を吸着させその収着特性について検討を行う。また、2 年間にわたる核種の溶出・溶脱試験の測定を開始する。これらの作製した試験体のキャラクタリゼーションや、硬化体内部の水分の状態分析を行う。塩化セシウム溶液に浸漬させた拡散試験、さらには透水試験も行う。

＊＊＊＊＊

（2019 年度の成果概要）

3 種類のメタカオリン及びアルカリ刺激剤を用いてジオポリマー硬化体を作製し、各種物性試験とその微細構造測定を行った。その結果、異なるメタカオリンを用いた場合、圧縮強度などの機械的物性が大きく異なることを明らかにした。このことから放射性廃棄物処分での適用のためには、適切なメタカオリンを選定する必要があることが示された。また、

これらの物性の違いはメタカオリンの反応性に起因することを明らかにした。養生温度の影響は微細構造試験結果には大きく影響を及ぼさなかったが、圧縮強度や収縮特性に影響を与えることが示された。このことからアルカリ刺激剤の違いによりジオポリマー硬化体の構造変化が生じている可能性が示唆された。

圧縮強度と弾性係数の関係は比例関係で表すことが可能であり、圧縮強度測定結果から弾性係数の推定を行うことが可能であることが示唆された。

ヨウ化セシウム溶液に浸漬させた吸着試験の結果、セシウムの吸着量はナトリウムを刺激剤とした試料が最も高い結果であり、カリウム型であると吸着量が低下する傾向にあった。なお、陰イオンであるヨウ素イオンは全く吸着しなかった。このことからジオポリマーは陽イオンのみの吸着しか行われないことが示唆された。

拡散試験の結果、硬化体内部へのセシウムの拡散係数はナトリウム型が 10^{-13}（m^2/s）程度であり、カリウム型は一桁高い係数であった。また、塩化物イオンは全く浸透せず、ジオポリマーが選択的にカチオンを浸透する性能を有することが示唆された。

透水試験の結果、ジオポリマー試験体の透水係数はおおよそ 10^{-11}(m/s)であり、同程度の圧縮強度のセメントモルタルと比較して 2 桁高い値であったことから、ジオポリマーは水の浸透に対する抵抗性が低いことが示唆された。

今後、ジオポリマー硬化体の適切な配合を明らかにし、それを用い溶出試験を継続的に行い、長期にわたる溶出特性について明らかにすることが課題である。また、溶出試験やカルシウム吸着試験を行った試験体のキャラクタリゼーションを行うことにより変質状態を分析することが課題である。

2.1.2 実施研究 2　研究者：電力中央研究所　田中真悟[2]

研究テーマ：新規析出促進法によるベントナイト緩衝材中の二次鉱物が拡散および透水挙動に与える影響評価

（背景・目的）

セメント―ベントナイト相互作用等によるベントナイト緩衝材の変質により、緩衝材の主要鉱物モンモリロナイトの変質・溶解や、二次鉱物の析出等が生じ、緩衝材のバリア性能（膨潤性、透水性、拡散性など）に影響を及ぼすことが懸念されている。一方で、処分環境（低動水勾配かつ圧縮系）では、緩衝材の変質反応が極めて緩慢であるため、緩衝材の長期変質評価において現実的な実験期間内（数年程度）で観測可能な変質を生じさせることが困難である。

本研究では、緩衝材に及ぼす二次鉱物の影響を評価するための新たな手法を提案する。具体的には、電場により様々な析出形態で二次鉱物を析出させた変質緩衝材を調製し、これ用いた拡散試験及び透水試験から、析出量や析出形態の違いが緩衝材の拡散係数及び透水係数に与える影響を明らかにすることを目的とする。

＊＊＊＊＊

（2019 年度の実施計画）

2019 年度は、二次鉱物として石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）とカルサイト（$CaCO_3$）を対象とし、事前解析で選定した初期条件において、電場により様々な析出形態でこれらの鉱物を析出させた変質緩衝材を調製する。次に二次鉱物が析出した変質緩衝材試料を用いて透過拡散試験を実施し、析出した二次鉱物が核種の拡散に及ぼす影響を調べる。さらに、二次鉱物の析出を予測するための数値解析、及び変質緩衝材中の核種拡散挙動を評価するための数値解析を実施する。

[2] 研究実施者の異動により、2019 年度前半は国立大学法人北海道大学にて、後半は一般財団法人電力中央研究所にて研究を実施している。

＊＊＊＊＊

（2019 年度の成果概要）

変質緩衝材の調製については、電場によりベントナイト中に鉱物（石膏及びカルサイト）を析出させることができた。また、これを用いた透過拡散試験を行い、実効拡散係数を取得することができた。これにより鉱物析出から拡散係数の取得までの一連の実験手法を確立した。石膏の場合は、再膨潤及び透過拡散試験中に全て溶解し、拡散試験に供することが適当ではないことが明らかとなった。カルサイトの場合は、拡散試験後にも十分なカルサイトが残留していることが明らかとなり、今後は二次鉱物としてカルサイトに着目するのが適当であることが分かった。一方、カルサイトが析出した緩衝材を用いた透過拡散試験により、カルサイトが実効拡散係数に与える影響を考察したところ、今回の析出条件ではカルサイトが拡散係数に与える影響は限定的であることが分かった。

カルサイト層により拡散係数が局所的に変化した場合を想定し、透過拡散試験から局所的な拡散係数の変化を把握するための手法を解析的に検討した。その結果、定常状態における試料内部の濃度勾配を調べることで、実効拡散係数の相対的な違いを把握できる可能性が見出された。

2.1.3 実施研究 3　研究者：山形大学　湯口貴史

研究テーマ：結晶質岩形成時に内包された割れ目発生・分布の潜在性の解明

（背景・目的）

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価において、地下水シナリオ(地下水によって放射性物質が処分施設から人間環境に運ばれるシナリオ)を想定した場合、結晶質岩(花崗岩)では、割れ目が地下水流動や物質移動の経路になることから、その分布を知ることが重要な課題となる。割れ目分布の将来変化を推定するためには、割れ目がどのように形成されたかを理解することが必要である。そこで、本研究では、花崗岩体の冷却過程に割れ目を形成する要因が隠されていることに着目し、岩石学的現象の理解を深め、花崗岩体中の現在の割れ目分布に加えて、将来的な割れ目発生の潜在性(将来的な発現の有無)を評価する手法の構築を目指す。この課題解決のため、本研究では花崗岩体の冷却の際に生じる岩石学的現象に着目する。特に 700-300℃の温度条件で生じる熱水変質の度合いのパラメータ化を実施する。このデータと冷却を示す既存データ、割れ目頻度データ（物資移動に寄与する肉眼スケールの割れ目と顕微鏡観察によるマイクロスケールの割れ目）の比較を通じて、「規則性」を見出し、概要調査に際して効率的な評価手法の構築に資することを目的とする。

＊＊＊＊＊

（2019 年度の実施計画）

2019 年度は、中部日本の土岐花崗岩体を対象とし、熱水変質現象の岩石記載に基づき、熱水変質パラメータの抽出、熱水変質現象の生成温度・年代の決定を検討し、変質パラメータと岩体の冷却と割れ目データの比較検討を行う。熱水変質パラメータの抽出については、岩石薄片試料の電子顕微鏡の組成像を画像解析することにより、初生的な斜長石と変質領域の面積比を求め、斜長石の変質パラメータの導出方法を検討する。熱水変質現象の生成温度・年代決定に関しては、溶解-沈殿反応で生じるイライト、固相反応で生じるカリ長石の K-Ar 年代測定を実施する。変質パラメータと岩体の冷却と割れ目データの比較検討については、求めた変質パラメータと岩石のラージスケール割れ目頻度の関係を検討する。

＊＊＊＊＊

（2019 年度の成果概要）

熱水変質パラメータの抽出については、画像解析による斜長石の変質パラメータを求めた後に、薄片試料の対角線上の領域から 15 の斜長石を選択して、各斜長石の変質パラメータの平均値と標準偏差を取り、試料を代表する変質パラメータを求めた。また昨年度実施した黒雲母緑泥石化に関する変質パラメータもデータ拡充を行い、今年度は 25 の岩石試料に対して 18 試料の変質パラメータを求めた。

熱水変質現象の生成温度・年代決定については、イライトとカリ長石の K-Ar 年代測定を実施し、さらに試料採取領域の温度-時間履歴から温度推定を行った結果、黒雲母の緑泥石化の生成温度と生成年代はそれぞれ 180-380℃、50-70Ma（百万年）となり、斜長石の固相反応は 62.2±1.4Ma、307-325℃で生じ、溶解-沈殿反応は 59.2±1.4Ma、290-305℃で生じることが明らかとなった。この結果は、黒雲母の緑泥石化と斜長石の変質は整合的な温度条件・年代で生じることを示唆する。

変質パラメータと岩体の冷却と割れ目データの比較検討については、割れ目頻度が約 40 本/5m以下のケースでは変質パラメータが低いほど割れ目頻度が低く、パラメータが高いほど割れ目頻度が高い傾向が観察された。一方、割れ目頻度が約 40 本/5mを超えるケースでは、変質パラメータと割れ目頻度の間に相関は無かった。このことは割れ目頻度が約 40 本/5mを境に異なるメカニズムが働くことを示唆した。来年度はさらなるデータの拡充を図り、最終的な傾向を把握する。

2.1.4 実施研究 4　研究者：埼玉大学　富樫陽太

研究テーマ：飽和度の変化に伴う堆積岩の変形異方性と放射性廃棄物の合理的な埋設方法に関する研究

（背景・目的）

堆積岩は堆積構造に依存して方向によって異なる変形特性を示すことが知られており、このような堆積岩の地層に構造物を建造する場合には、その安定性を正確に評価するため、変形異方性を高精度に特定することが工学的に重要な課題となっている。異方性をもつ堆積岩の応力とひずみは非共軸なため特定の方向に変形が卓越することが考えられるが、そのような点に着目して検討を行った既往研究はほとんど見当たらない。異方性岩盤の最も剛性が大きい方向（異方性の主軸）とその構成パラメータを正確に特定することができれば、処分坑道の安定性評価に大きく寄与できるだけでなく、廃棄物の埋設方法に応用できる可能性があると考えられる。

本研究では、掘削による乾燥にともなって不飽和状態に移行する堆積岩の異方的な力学挙動を詳細に把握し、異方性を考慮した高レベル放射性廃棄物の埋設方法へと応用することを目的として、室内試験やスイスのモン・テリ岩盤研究所における現地計測を通して、飽和度によって変化する堆積岩の変形異方性を詳細に特定することを試みる。

＊＊＊＊＊

（2019 年度の実施計画）

2019 年度は堆積岩の変形異方性の程度を把握するため、来待砂岩、幌延泥岩、相模原泥岩の三種類の新第三紀堆積岩試料を用いた三軸試験を実施する。また、飽和度の変化に伴うひずみの進展を検討するために、田下凝灰岩を用いた乾燥収縮実験と湿潤膨張実験を、また、飽和度の変化に伴う力学特性を把握するために、飽和度を変化させた田下凝灰岩供試体の一軸圧縮試験を行う。

さらに、スイスのモン・テリ岩盤研究所において現地調査を行い原位置で不飽和透気・透水現象をモニタリングして、そのパラメータ取得を試みる。

＊＊＊＊＊

（2019 年度の成果概要）

既往検討の整理の結果、新第三紀堆積岩の変形異方性はヤング率の比で 0.83~7.9 倍異なることがわかった。また、堆積岩の採取位置や環境によって結果は様々な値をとるが、異方性の主軸の傾斜方向は層理面の方向を向くことがわかった。

田下凝灰岩の乾燥収縮・湿潤膨張実験の結果、層理面とその直交方向にコアリングした供試体の三次元のひずみテンソルの応答は、等方材料では生じないせん断ひずみを伴い、異方的な応答を示すことがわかった。さらに、乾燥収縮・湿潤膨張時の主ひずみ方向は、飽和度の変化にともなって変化することがわかった。剛性が最も小さい最大主ひずみ方向は、湿潤状態では層理面に近い方向にあるが、乾燥状態では層理面の直交方向を向く結果となった。

飽和度を変化させた田下凝灰岩の一軸圧縮試験では、飽和度の増加に伴い強度と変形特性が小さくなることがわかった。特に剛性は、乾燥状態では層理面方向の値が直交方向に対して大きくなるのに対して、飽和状態では傾向が逆転した。

モン・テリ岩盤研究所におけるボーリング孔内の気温・気圧・湿度の計測では、ボーリング孔内の気圧応答が、孔外に比べて異なってくることがわかった。これは、岩盤内の透気現象によるものと考えられるため、非線形熱方程式である透気現象の支配方程式を一次元有限要素法によって解く試みを行った結果、境界条件を適切に設定すれば、現地で測定された遅れ応答を表現できることがわかった。

2.1.5 実施研究 5　研究者：東京大学　鈴木庸平

研究テーマ：メタンをエネルギー源とした微生物生態系の地質環境への影響評価

（背景・目的）

処分場閉鎖直後の酸化環境から処分場建設前の還元環境に回復する過程において、物質移動の場となる化学環境の形成の観点から微生物の役割は非常に重要である。地下深部に豊富に存在するメタンが、微生物による触媒的反応を介して還元剤となれば化学環境の回復を保証でき地層処分の安全性を高めることにつながる。地質環境に生息するメタン酸化微生物は、硝酸、鉄、硫酸等の多様な酸化剤を用いて代謝することが常圧条件下の試験により明らかになっている。しかし、地下の高圧条件下でメタン酸化古細菌が用いる酸化剤の種類や反応速度、形成される化学環境については未解明である。本研究の目標として、地下環境を模擬した室内高圧試験により、メタン酸化古細菌による酸化剤の利用選択性や代謝速度、形成される化学環境の評価を行うと共に、酸化剤の代謝反応が放射性核種の移行に与える影響についても考察する。

＊＊＊＊＊

（2019 年度の実施計画）

2019 年度は、昨年度実施した瑞浪超深地層研究所の地下坑道内で封入した高圧培養容器から、培養後分取した試料の分析を実施する。また、幌延深地層研究所における高圧培養実験によるメタン酸化速度の測定についても検討する。さらに、処分場操業時から埋め戻し直後で想定される環境を考慮して、常圧付近での培養と、セメントの影響を受けたアルカリ高カルシウム条件での培養を行う。

＊＊＊＊＊

（2019 年度の成果概要）

瑞浪超深地層研究所の現場で封入した高圧培養容器から、メタン酸化反応に影響を及ぼす水素濃度を分析したところ、高圧培養容器の間で大きなばらつきが確認された。これは地下坑道で湧出する地下水を高圧状態で直接高圧培養容器に封入した際、圧力低下が発生した気相が多く入った容器と少なく入った容器で大きな違いを生じたためと考えられた。

また、酸化剤として硫酸を用いた場合に発生する硫化水素が、ステンレス製の高圧培養容器に吸着している可能性が示唆された。これらの課題を解決するために、テトラバックを用いた実験室での高圧培養容器への圧力を一定とした封入作業を行うことによる培養実験系を確立した。酸化剤として硫酸の他に硝酸、亜硫酸、チオ硫酸、元素状硫黄、三価鉄を用いて高圧培養したところ、瑞浪超深地層研究所の地下水の酸化剤が硫酸ではなく元素状硫黄が重要であることが示唆された。

幌延深地層研究所から採取した地下水を用いたメタン酸化試験では、酸化剤として三価鉄（フェリハイドライト）を用い、^{13}C でラベルしたメタンからメタン酸化で生成した溶存無機炭素の炭素安定同位体組成を分析したところ、幌延深地層研究所の地下水はフェリハイドライトのような反応性の高い三価鉄ではなく、懸濁物に含まれる地下環境で長期間安定な酸化剤が用いられている可能性が示唆された。

また、常圧及び高アルカリ条件による培養試験の結果、培養前後の溶存二価鉄濃度は高圧力条件より常圧条件で高い濃度で検出された。また高アルカリ条件では培養前後で二価鉄が検出されたが、これは鉄の固液分配がアルカリまたは高カルシウム条件に影響を受けていることを示唆している。

2.1.6 実施研究 6　研究者：早稲田大学　王海龍

研究テーマ：ナチュラルアログ手法 による締固めたベントナイトの膨潤特性・自己シール性能の年代変化に関する評価

（背景・目的）

放射性廃棄物の処分において利用が想定されている緩衝材は、内部にて膠結作用（モンモリロナイトや随伴鉱物が溶解し、間隙内で再結晶化して土粒子同士を固着させること）が発生し、自己シール性・膨潤性や圧密（圧縮）性などの材料特性が低下する可能性が考えられる。緩衝材の要求性能に関連する材料特性の長期健全性を評価する上で、膠結作用によるベントナイトの材料特性の経年変化の定量評価は極めて重要である。本研究では地質年代が数千万～数億年のベントナイト原鉱石を用いて、ナチュラルアナログ研究手法に基づき、締固めたベントナイトのベントナイト系緩衝材の膠結作用による膨潤特性・自己シール性の年代変化を定量的に評価し、ベントナイト系緩衝材の仕様設計に反映させる手法を提案することを目的とする。

＊＊＊＊＊

（2019 年度の実施計画）

2019年度は、月布産、中国産、アメリカ産のベントナイト原鉱石試料を粉砕して粒径0.425 mm 以下、及び粒径を 0.850～2 mm に調整した粉末試料を作製し、それぞれを締固めて作製した再構成供試体に対して膨潤圧試験、一次元膨潤変形試験を実施する。また、膨潤性能へのセメンテーション物質による抑制影響を調べるために、XRD・膨潤圧連携試験を行う。さらに原鉱石のモンモリロナイト以外の随伴鉱物組成について X 線回折等の化学的な検討を行う。

＊＊＊＊＊

（2019 年度の成果概要）

膨潤圧試験の結果、再構成試料の膨潤圧は原鉱石試料と比較して高くなった。また、乾燥密度が高くなるにつれて、粒径の大きい 0.850～2 mm の再構成供試体の値と粒径～0.425 mm の供試体の膨潤圧の値の差が大きくなる傾向が見られた。すなわち、乾燥密度が高く

なるにつれて、間隙が小さくなり、粒子の有する固結の影響が大きくなることが分かった。また、膨潤変形試験の結果、粒径 0.850～2 mm の再構成供試体の方が、粒径～0.425 mm に比べて最終的な膨潤変形率が低い傾向が見られた。

月布産試料に対して XRD・膨潤圧連携試験を実施した結果、従来の膨潤圧試験と同様、不攪乱供試体の膨潤圧は再構成供試体に比べて低く留まる結果が得られると同時に、モンモリロナイトの底面間隔には大きな差異がないことが分かった。しかし、同一の含水比の試料についてピークを抽出して比較したところ、不攪乱供試体の方がモンモリロナイトの結晶層間に存在する水分子の量が少ないことを示す結果が得られた。このことから、セメンテーションの影響によりモンモリロナイト層間への水の浸入とそれに伴う膨潤が阻害されうることが実験的に示された。

随伴鉱物組成については、随伴鉱物の洗い出しと XRD 分析による定性評価、及び内部標準法による随伴鉱物の定量評価を実施し、随伴鉱物として石英、カルサイト、斜長石、クリストバライト、ドロマイトについて含有割合を算出することができた。また、これらの中でも石英、斜長石の含有割合が高いことが分かった。今後は 5 種類以外の鉱物についても同様に内部標準を実施し、重量割合を算出して精度を上げること、また、鉱物組成の差異が諸特性に及ぼす影響を地質学的観点も踏まえて考察することが課題である。

2.1.7 実施研究 7　研究者：日本原子力研究開発機構（JAEA）　渡辺勇輔

研究テーマ：断層周辺の地下水流動特性および物質移行特性に関する包括的研究

（背景・目的）

断層周辺の地下水流動は主にダメージゾーン内の水みちとなる割れ目で生じると考えられることから、断層ガウジやダメージゾーンに存在するこれらの鉱物と地下水の水 - 鉱物反応は物質移行を評価する上で重要である。特に、スメクタイトなどの粘土鉱物は花崗岩に含まれる造岩鉱物よりも高い元素収着能力を持っており健岩部とは異なる物質移行特性を持つと予想される。岩盤中の物質移行特性を適切に把握し、物質移行現象を精度良く予測するためには、対象となる岩石の元素収着特性を把握した上で、サイト周辺における水理特性や鉱物組成の空間変化を考慮した解析を行う必要があると考えられる。また、元素の収着挙動は、対象元素の濃度や, 液相の pH やイオン強度などの地球化学特性によって異なるため、これらを考慮した吸着モデルを作成する必要がある。

本研究では、断層周辺の物質移行特性を精度よく評価する手法を構築することを目的として、断層によって形成されるコンパートメント構造などの地質構造を考慮した地下水流動解析・物質移行解析や、断層活動によって変質した岩石への元素収着試験を実施する。

＊＊＊＊＊

（2019 年度の実施計画）

2019 年度は、平行する 2 枚の断層系が直交することで形成されるコンパートメント領域を有する仮想水理地質モデルを用いて、低透水性の断層ガウジやキャップロックの有無などの条件を変化させたモデルを作成し、地下水流動解析を行うことにより、断層の有無及びキャップロックが地下水流動に及ぼす影響を検討する。また、地下水流動解析で得られた地下水流動場に基づき、コンパートメント構造内部に埋設廃棄された廃棄体に含まれる放射性核種が移行することを想定した反応輸送解析を実施する。

さらに、瑞浪超深地層研究所のボーリング孔で採取された花崗岩について、断層周辺岩石の鉱物組成分析を行い、また収着試験を実施して元素収着特性を調べる。

＊＊＊＊＊

（2019 年度の成果概要）

地下水流動解析の結果、断層が存在しキャップロックを含まないモデルでは、地下水は主に透水性の高いダメージゾーンを通り、低透水性の断層ガウジ周辺ではガウジを乗り越えるような地下水流動が生じることが認められた。コンパートメント構造に加えて低透水性のキャップロックが存在する場合には、浅部から深部への地下水の浸透が制限された。断層とキャップロックの両方を含む系で解析した結果、ダメージゾーンを有する断層から構成されるコンパートメント領域でも、キャップロックが存在する場合には地下水流動や物質移行を抑制する構造として機能しうる可能性が示された。

断層周辺で粘土鉱物を含有させた系でのセシウムの反応輸送解析を実施した結果、断層ガウジに加えてダメージゾーンで粘土鉱物による収着が生じるモデルでは、収着が断層ガウジのみで生じる場合に比べ物質移行が抑制された。さらに、低透水性のキャップロックが存在する場合の反応輸送解析を実施した結果、粘土鉱物の分布範囲や粘土鉱物の種類に関わらず、核種がほとんど移行しなかった。この理由として、そもそも低透水性のキャップロックにより地下水流動が抑制されたことで移行が生じにくく、加えて粘土鉱物による収着で移行が抑制されたものと考えられる。

ボーリング試料を X 線回折にて分析を行ったところ、断層部に近い試料では粘土含有率が高くなる傾向となった。含まれる粘土鉱物としてはスメクタイト、イライト、緑泥石等であった。また、断層近傍では黒雲母や長石類が少なくなる傾向が示された。

粉砕した岩石試料を用いてセシウム（Cs）、ユウロピウム（Eu）の収着試験を実施した結果、粘土鉱物が比較的多く存在している断層部や母岩の変質を伴う割れ目帯では Cs、Eu ともに粘土鉱物によって収着され、鉱物表面でそれぞれ内圏型表面錯体、外圏型表面錯体を形成していることが示唆された。しかしながら、Eu は未変質部の試料の方が、収着が高くなる結果となり、未変質部に含まれる黒雲母などの影響も考えられるため、今後は収着を支配する鉱物同定が課題となる。

2.2　評価委員会による 2019 年度の研究成果に対する評価

7 件の研究テーマについて、設置した評価委員会（主査：杤山修（(公財）原子力安全研究協会)）において 2019 年度実施内容等のチェックアンドレビューを以下の中間報告と最終報告の日程で行った。

- 中間報告

2019 年度　第 1 回評価委員会
日時：2019 年 9 月 9 日（月）　13：30～18：15
場所：原環センター第 1,2 会議室

中間報告では、各研究者から 2019 年度の研究進捗状況について 20 分間の発表を行い、その後委員からの質疑、及び委員による評価記入を 15 分間行った。

評価では、2019 年度の研究の進捗状況に対する意見、当該年度残りの期間における研究の進め方等に対する助言等を自由意見として記入する形式で行った。委員による意見については今後の研究に役立てられるようにとりまとめて各研究者に通知した。

- 最終報告

2019 年度　第 2 回評価委員会
日時：2020 年 2 月 26 日（水）　10：00～16：10
場所：原環センター第 1,2 会議室

最終報告では、各研究者から 2019 年度の研究成果について、中間評価における評価コメントへの対応等を含めて 25 分間の発表を行い、その後委員からの質疑、及び評価記入を 15 分間行った。

評価では、以下の項目について評価点数を付け、また 2019 年度の研究に対する意見、次年度の研究の方向性等に対する助言等を自由意見として記入する形式で行った。

- 実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか
- 実施研究は新規性・独創性があるか
- 地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか
- 次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か

以下に、各研究テーマに対する第 2 回評価委員会（最終報告）での評価結果を整理する。

2019 年度第 2 回評価委員会　評価結果（その 1）

研究テーマ	ジオポリマー技術による人工バリア構築のための基礎的検討 胡桃澤 清文（北海道大学）

評価項目	評価（平均）
・実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか。	4.0
・実施研究は新規性・独創性があるか	3.6
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.4
・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	4.0

自由意見	・ ジオポリマーの長期耐久性について、地層処分の観点（ex. 温度、圧力、pH、Eh など）での情報の整理をぜひお願いしたい。 ・ セメント材料の弱点を補うものとして、ジオポリマーの処分への利用は期待される。それに対し、現在基礎的なデータがとられており、早期の充実が望まれる。 ・ セメントに比べて利点を強調した方が良い。 ・ アルカリ溶出量については mol/(㎡・S)で整理すべき。 ・ 収着特性や拡散性から言えば、Na 型の方が良い。他方、流動性は K 型が良い。どの様にこれらの特性を処分においても活用するのか。特に陰イオンの排除効果が使えるのではないか。 ・ Cl^-を排除する機能がありそうです。表面電位を、例えば流動電位として測定できないでしょうか。 ・ セメントに比べて勝る点はどういうものがあるのですか。良い所とそうでない所をうまく整理して進めて下さい。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2019 年度第 2 回評価委員会　評価結果（その 2）

研究テーマ	新規析出促進法によるベントナイト緩衝材中の二次鉱物が拡散および透水挙動に与える影響評価 田中 真悟（電力中央研究所）

評価項目	評価（平均）
・実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか。	3.8
・実施研究は新規性・独創性があるか	3.8
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.9
・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	3.5

自由意見	・ EPMA での元素プロファイルとカッティングによる分析プロファイルの空間的合致性についての検討が必要か。また、プロファイルのピークについての検討も課題と考える。 ・ この研究の地層処分における位置付けをもう少し明記する/クリアーにすることも検討ください。 ・ 実験は計画通りに実施され、目標に向けて進展していることは分かるが、今までに分かったこと、これから何が必要かということを強調して欲しい。 ・ カルサイト等の析出がある場合の拡散係数が大きくなる理由をミスリードしないように説明する必要がある。 ・ 析出解析における流速と析出量との関係をどの様に結びつけているのか説明要。また、拡散係数と析出量との関係もどの様に扱っているのか。それらの説明を常に加えておいてほしい。 ・ 局所的な pH の影響、浸透圧の移流効果への影響について、問題は無いだろうとの回答でしたが、前者についてはやや気になっております。CO_3 の壁を作る試験体系は、Calcite 生成量を増やす為には良いアイディアだと思います。 ・ 結晶成長と溶解速度との関係を整理して進めてください。成果が出つつあります。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2019 年度第 2 回評価委員会　評価結果（その 3）

研究テーマ	結晶質岩形成時に内包された割れ目発生・分布の潜在性の解明 湯口 貴史（山形大学）

評価項目	評価（平均）
・実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか。	3.8
・実施研究は新規性・独創性があるか	3.6
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.0
・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	3.3

自由意見	・ マイクロクケールとラージスケール割れ目、相関についてかなり整理されてはきているものの、まだそれぞれのスケール間、発達過程、同じものをみているのか、等々の相関が今一つ不明瞭感がぬぐえない。次年度はその辺も含めての検討を行ってほしい。 ・ もう 1 つは､岩体評価における一手法としての適用性の検討もお願いしたい。 ・ 割れ目の形成と地層処分との関係を考えた時、時間的に整合する現象なのか疑問。割れ目の形成時間が出せれば、処分場の評価に役立てられるが、それができるか。 ・ 割れ目頻度の単位を示す必要がある ・ 「割れ目の種」は析出、結晶成長の点ともなりえるのではないか。 ・ （斜長石の変質について）Type B Core alteration はなぜ生じるのか。 ・ （変質パラメータとラージスケール割れ目相関図において）変質パラメータが 0.6 まで上昇して、その後は減少するのはなぜか。 ・ ラージスケールの割れ目頻度と変質パラメータの間の関係で、傾向が大きく変わっている点がありますが、ラージスケールの割れ目の方向性は区別しているのでしょうか。 ・ ラージスケール割れ目の方位依存性等と仮定している割れ目発生機構の関係が説明できるように､「発生した」割れ目と熱水変質の関係が、相関であるのか、因果であるのかを考察してください。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2019 年度第 2 回評価委員会　評価結果（その 4）

研究テーマ	飽和度の変化に伴う堆積岩の変形異方性と放射性廃棄物の合理的な埋設方法に関する研究 富樫 陽太（埼玉大学）

評価項目	評価（平均）
・実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか。	4.0
・実施研究は新規性・独創性があるか	3.6
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.0
・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	3.2

自由意見	・ 堆積異方性と応力との相関についての知見の蓄積は認められるものの、モン・テリサイトとの原位置試験とのリンクも含め、地層処分とのつながりを、次年度検討をお願いしたい。 ・ 昨夏もコメントしましたが変形異方性の研究が実際のトンネルの掘さくや廃棄物の処分、埋積にどう影響するのかイメージとして良く分かりません。 ・ モン・テリ岩盤研究所の現地計測と本研究のかかわりが余り良く分かりませんでした。 ・ 三相モデルによる乾燥現象モデル化において、A の気液平衡状態の m_w において「気液平衡状態」とは何をさしているかを明らかにして下さい。また、$dm_w/dt=-k\ (V_w-A)$ とすると V_w と A の単位が異なることになるので記載の仕方は要注意です。また乾燥面積にも効きますので式に入れておくべきではないか。 ・ 浸水過程においてε_1方向と層理面距離の関係図を見ると距離が振動しています。これは何を意味しているのでしょうか。乾燥過程とは異なる様に見えます。 ・ もともとの堆積岩の変形異方性の影響の大きさと飽和度の違いによる変形異方性の影響の大きさがどのようになっているのかを示して下さい。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2019 年度第 2 回評価委員会　評価結果（その 5）

研究テーマ	メタンをエネルギー源とした微生物生態系の地質環境への影響評価 鈴木　庸平（東京大学）

評価項目	評価（平均）
・実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか。	3.8
・実施研究は新規性・独創性があるか	4.4
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.2
・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	3.3

自由意見	・ メタン酸化菌の特性調査・評価は、機器開発も含めて進められていると判断する。一方で、地層処分のサイト特性評価の観点として、どうリンクするか（ex. 全菌数との割合や地質調査、構造との絡みなど）をもう少し、次年度具体的に検討していただければと考える。 ・ 人工バリア材との反応についても、閉錯系において、このメタン菌がどのような影響、効果(プラス、マイナス両面で)があるのかの検討も重要なので、次年度に検討してほしい。 ・ 地下環境での古細菌の影響評価は重要と思うが、地下処分において（H_2S ができるとして）その影響の大きさはどのくらいなのかを想定するにはどうすれば良いのかを考えて欲しい。逆に処分場を作ったときに、古細菌はどのくらい処分環境に影響を与えることができるのかを検討できないか。 ・ メタン古細菌の酸化速度は、nM/(Cell･year)としなくていいのかをご教示頂きたい。Cell を入れない場合は菌体数が疑定常にあると考えている。少なくても菌体数についての言及が必要。 ・ 栄養塩の供給はどの様に考えているのかも考察を加えてほしい。 ・ 幌延の地下水を用いた実験では、懸濁物質の影響が見られます。これが天然起源なのか、堀削時に持ち込んだ人工的起源なのかで、後々の評価が変わってくると思われますので、次年度行われる分析に期待しています。 ・ 着目している微生物を含め、一般的に微生物が地下の酸化還元環境にどのように寄与しているのか。 調査において何を調べればよいのか。 微生物の活性は（圧力を含め）、何に支配されているのか を整理して、今何を調べているのかを示してください。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2019 年度第 2 回評価委員会　評価結果（その 6）

研究テーマ	ナチュラルアログ手法 による締固めたベントナイトの膨潤特性・自己シール性能の年代変化に関する評価 王 海龍（早稲田大学）

評価項目	評価（平均）
・実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか。	3.4
・実施研究は新規性・独創性があるか	3.4
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.2
・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	3.3

自由意見	・ ベントナイトセメンテーションの状態の時間変化を見るという目的において、まずは産状（偏光顕微鏡、SEM など）ももう少し整理してみてはいかがでしょう。 ・ 基本、時間変化があまり影響しないという結果も大きな成果と思います。 ・ 実験方法や成果の提示はわかりやすいのでたいへん良い。 ・ 地層処分への寄与についても具体的で活用方法を考えることも可能で、役に立つ研究になると思う。 ・ シーリングのメカニズムについても議論できれば、さらにすばらしい研究になると思う。 ・ アメリカ産、中国産も地名で呼称した方がいいのではないか。 ・ 初期乾燥密度に依存せず、試験終了時乾燥密度で決まることは興味深い。この理由を明らかにしてほしい。またこの知見を地層処分に適用する場合に留意する点はないか。 ・ セメンテーションの程度を知る上でセメントを入れることも考えられるという話だが、カルサイトやシリカの析出や再分配だとすると高アルカリ水でいいのではないか。いずれにせよ、セメントにも様々あるのでわかりやすい系で進めてほしい。 ・ セメンテーションの程度を示す指標として、XRD の 2 水和・3 水和のピーク高さの違いが使えそうだというのは面白い発見ですが、2 水和のピークは本来原鉱石のどこに存在する水なのでしょうか。セメンテーションを起こす環境の違いが 3 種類の試料の間にあるのかどうか、一度整理すると良いでしょう。 ・ 「セメンテーション」という用語で何を意味しているのかを明確にして、何を調べたいかを示して下さい。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2019 年度第 2 回評価委員会　評価結果（その 7）

研究テーマ	断層周辺の地下水流動特性および物質移行特性に関する包括的研究 渡辺 勇輔（日本原子力研究開発機構）

評価項目	評価（平均）
・実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか。	3.4
・実施研究は新規性・独創性があるか	2.8
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.2
・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	2.9

自由意見	・ 地下水流動モデル及び断層粘土の収着とを組み合わせた評価手法としての取組は分かるものの、少々焦点が絞れていない感がぬぐえないので、この手法から将来のサイト特性調査に何が役立つのかの観点での取りまとめを考えてもらいたい。 ・ 包括ではなく、内容についてポイントを絞った方がよい。流動についてイメージを高めて欲しい。 ・ （難透水層がない場合の)「断層ガウジのみ粘土鉱物が存在しても抑制効果が見られない」という表現は水を流しにくいという効果があり、物質が地上に移動していくことを丁寧に説明する必要があると思われる。 ・ 収着試験について、岩石ブロックを入れて振動することもできる。たとえば、大きめのキャップ付きの容器を用いて振とう器に入れる。 ・ 核種の収着と地下水水理を同時に考えよりも、むしろ収着しない I^- や $C\ell^-$ を流れの中に閉じ込める、という考え方に進展しませんか。 ・ 地下水流動の話と収着遅延の話があまりつながりがなく、進められています。全体を整理して研究を再構築して下さい。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

3 . 人材育成プログラムの実施・作成

3.1 実施方針

3.1.1 背景

地層処分に関する研究開発については、資源エネルギー庁の主導の下で（国研）日本原子力研究開発機構をはじめとする関係研究機関が参画する「地層処分研究開発調整会議」（以下「調整会議」）において審議され、実施主体を含むわが国における地層処分に関する研究開発計画が「地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～平成 34 年度）」（以下「全体計画」）として、平成 30 年 3 月に取りまとめられた。この全体計画では、主要な 3 つの技術分野に関する 5 ヵ年研究開発計画が整理されるとともに、中長期的に研究開発を進める上での重要事項として人材育成に係る取組の必要性が示されている。[1)]

このような状況を踏まえ、全体計画を取りまとめた調整会議の参加機関を始めとする有志が協力し、長期的な地層処分事業の進展段階を見据えた人材確保に資する取組の一環として、効果的な人材育成プログラムの開発や長期的な運用方法の開発に資するべく、2018 年度に、「平成 30 年度人材育成セミナー」を試行的に有志が共同で開催した。

平成 30 年度人材育成セミナーでは、受講者に放射性廃棄物処分に係る広範な視野を与えるとともに、地質環境・工学・安全評価までの一通りの技術分野の知見を習得してもらうことを目的として、3 日間のスケジュールで合計 20 の講義を行った。

2019 年度より、資源エネルギー庁事業（平成 31 年度放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務（国庫債務負担行為に係るもの）（本事業）において、人材育成プログラムの作成・実施が組み込まれ、地層処分に係る幅広い専門的な知識とスキルを有する人材（ジェネラリスト）の育成プログラムを作成することとなった。この事業は、2019～2022 年の 4 ヵ年で、講習会や研修会等の企画・実施を繰り返すことを通じて、その参加者にモニターとしての役割を担ってもらい、地層処分に係る知識（形式化された）とスキル（暗黙知）を見える化するとともに、それらの習得に役立つ人材育成プログラムを構想することを目指している。

本事業の実施要項（仕様書）では、人材育成プログラムの実施・作成の方針として、以下のことが述べられている。

幅広い専門的な知識を有する人材（ジェネラリスト）を育成するためのプログラムを開発するため、4 年間の事業期間において以下の方針に従い、地層処分に係る講習会や研

修会等の実施、人材育成プログラムの更新を繰り返し行い、最終的な人材育成プログラムを作成する。(例えば、学習資料や学習指導要領のような形式として取りまとめること)。

- *受講者が 20～40 名の講習会や研修会を年間 3～4 日程度実施する*
- *講習会や研修会の実施に際しては、2.1 に示した研究テーマ実施者等も含め、受講者を募集する*
- *毎年度、講習会や研修会の結果をアンケート等により理解度等を把握し、その結果に基づき問題点の洗い出し、解決策を立案する*
- *上記結果や実施内容に関する有識者委員会からの助言に基づき、個々に専門性を有する受講者に対する最適なジェネラリスト育成プログラムを改善する*

3.1.2 関連機関の協力の実施

実施要項（仕様書）で求められているように、4 年間の事業期間において人材育成プログラムの作成を実現するためには、講習会や研修会を開催し、参加者からのフィードバックを得て、プログラムの改良を進めていくことが不可欠である。講習会や研修会では、地層処分の関連分野において高度に専門性を有す講師による講義・実習を行うことが必要である。また、本事業で開催する講習会や研修会は、作成する人材育成プログラムの実証試験の場と位置付けており、受講者は人材育成プログラムのいわゆるモニターとして参加するもので、参加者からは、地層処分分野における幅広い専門的な知識を有すジェネラリストを育成するためのプログラムの作成という観点から、講習会や研修会の内容に対するフィードバックを得る必要がある。従って、講師及び参加者は、地層処分の事業主体や関連した研究機関等の研究者・技術者が主な対象となり、講習会や研修会の実施のためには、研究機関等との協力が不可欠である。

そこで、本事業における人材育成プログラム作成のため、地層処分事業の実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO)、国の基盤研究機関である、(国研）日本原子力研究開発機構、(国研）産業技術総合研究所、(公財）原子力環境整備促進・資金管理センター及び（一財）電力中央研究所から人材育成プログラムの作成、講習会・研修会への講師・参加者（モニター）の派遣に関して協力を得ることし、これらの機関の代表者からなる作業グループとして、「地層処分スキルアップ研究会」を設置することとした。

この地層処分スキルアップ研究会は、本事業において委員会形式で設置することとし、以下の機関で構成される。

表 3.1-1　地層処分スキルアップ研究会構成機関

メンバー	国立研究開発法人　日本原子力研究開発機構
	一般財団法人　電力中央研究所
	国立研究開発法人 産業技術総合研究所
	原子力発電環境整備機構
オブザーバ	公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

3.1.3 人材育成プログラムの対象者（ジェネラリスト）の定義の検討

前述のように、本事業の実施要項（仕様書）では、地層処分に関する幅広い専門的な知識を有する人材（ジェネラリスト）を育成するためのプログラムとされている。しかし、人材育成プログラムの作成においては、その対象を明確にしなければ、具体的なプログラムのコンテンツを検討することはできない。本事業において、ジェネラリストといった場合のジェネラリストの定義を明確にする必要があるため、その検討を行った。以下のその検討過程及び結果を整理する。

NUMO は、2017 年に公表した包括的技術報告書（レビュー版）に関連して、市民等との対話のあり方について、「読者の関心にあわせた階層的な資料整備の考え方」として以下を示している。

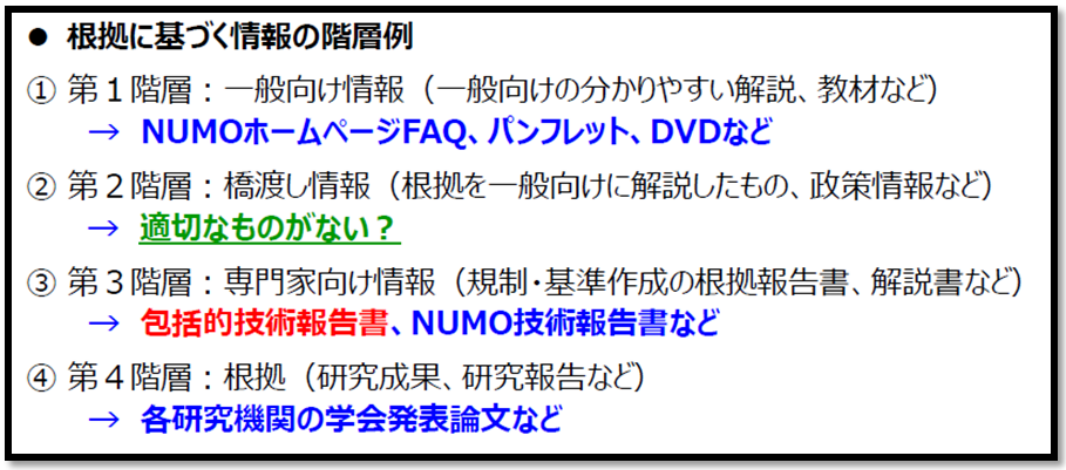


図 3.1-1　地層処分に関する階層的な資料整備の考え方 [2)]

地層処分事業に対する理解促進、公衆受容の促進のためには、一般公衆の地層処分に対する不安を取り除くことが重要であり、そのためには地層処分の安全性を理解してもらう必要がある。このためには、NUMO が図 3.1-1 において示しているように、専門家向けの安全評価・セーフティケースなどの情報と NUMO のパンフレットなどの一般向け情報をつなぐ情報が必要であると考えられる。同様に、これらの情報を適切に説明できる人材も必要であると考えられる。上記の 4 つの階層の情報に対応する人材は表 3.1-2 に示すような対応であると考えられる。

表 3.1-2　階層別情報と対応する人材

第 1 階層　一般向け情報	⇒	NUMO 広報担当者など
第 2 階層　橋渡し情報	⇒	？？？
第 3 階層　専門家向け情報	⇒	NUMO 技術部職員など
第 4 階層　根拠（研究結果、研究報告など）	⇒	NUMO 技術部職員など

第 2 階層の橋渡し情報に対応可能な人材は、NUMO の包括的技術報告書などの専門家向け情報の各分野を理解し、一般向けに分かりやすく説明できることが求められる。このためには、地層処分分野の 3 つの分野（地質環境、工学技術、安全評価）についての理解が必要であることから、各分野の専門家（＝スペシャリスト）ではなく、各分野を広く浅く理解するジェネラリストであることが求められる。

以上のことから、本事業で作成する人材育成プログラムの対象は、当面（今年度）は、上記第 2 階層「橋渡し情報」に対応できる人材とすることとした。ただし、第 2 階層に対応できる人材にもレベル（サブ階層）があると考えられることから、検討を行った結果、第 2 階層に対応できる人材を以下の二つのレベルに分けることとし、本事業ではレベル 1 を主たる対象としてプログラムの作成を行う方針とした。

- レベル 1：地層処分の技術的内容の概要について一般層に説明が出来る人材育成
- レベル 2：事業、研究開発の進め方についての舵取り・提言、対話型説明会等で説明が出来る人材育成

さらに、一般向けに説明することも必要とされることから、コミュニケーション能力も重要であると考えられ、一般との対話に関するコミュニケーションの技術に関してもプログラムに取り入れることした。

3.2 2019 年度の実施内容の検討

3.2.1 地層処分スキルアップ研究会での検討

今年度、地層処分スキルアップ研究会は 4 回開催した。表 3.2-1 に開催日、各研究会での議論概要を示す。

表 3.2-1 2019 年度の地層処分スキルアップ研究会開催概要

	日時	概要
第 1 回	2019 年 9 月 24 日（火）	人材育成の方向性や 2019 年度に実施予定の研修会の内容等を議論
第 2 回	2019 年 10 月 9 日（火）	2019 年度の人材育成セミナーの実施内容等について議論
第 3 回	2019 年 11 月 19 日（火）	2020 年 1 月開催の人材育成セミナーの準備状況の確認、セミナーのグループワーク案、アンケートの内容、今後 4 年間の人材育成の方向性などについて議論
第 4 回	2020 年 1 月 28 日（水）	2020 年 1 月に開催した人材育成セミナーの振り返り、アンケート結果などを議論

3.2.2 2019 年度の人材育成セミナーの企画

(1) 開催日時・会場の検討

地層処分スキルアップ研究会での議論の結果、また、資源エネルギー庁との協議の結果、2019 年度の人材育成セミナーは、2020 年 1 月 8 日（水）から 10 日（金）の 3 日間で行うこととした。

会場は、都内からも比較的アクセスが良く、セミナーに集中できる環境として千葉県成田市のホテルとした。

(2) モニターのカテゴリと募集方法の検討

地層処分スキルアップ研究会での議論を踏まえ、今年度の人材育成セミナーは、単分野に専門性を有す若手にモニターとして参加してもらい、一般層との対話ができるような 3 分野をジェネラルにカバーする人材の育成を指向するプログラムとして実施し、このプログラムに対してモニターから意見を聴取することを目的とした。

モニターについては、協力機関である、原子力発電環境整備機構、(国研) 日本原子力研究開発機構、(国研) 産業技術総合研究所、(一財) 電力中央研究所、(公財) 原子力環境整備促進・資金管理センターからだけでなく、地層処分事業に関連のある民間企業、本事業における大学委託研究を実施している大学等の教員や学生にも参加を呼び掛けることとした。モニターの合計数としては会場のキャパシティの関係などから 60 名程度とした。

その結果、参加が想定されたモニターのカテゴリの定義及び参加の狙いを以下のように設定した。

- 若手研究者・技術者

  地層処分事業関連の自身の専門分野以外については知識等があまりないもの。

  狙い：今回のセミナーではモニターとして参加し、一般層との対話ができるための前段として、地層処分技術に関する全般的な知識の習得を促す。

- 大学関係者（大学院生、大学教員）

  当センター事業において委託研究を実施している研究室所属で、地層処分関係の研究経験を有する大学院生等。

  狙い：地層処分における各研究分野を紹介し地層処分技術に関する全般的な知識の習得を促すとともに、関心を持ってもらうことで、将来的な地層処分事業の人材確保に貢献する。

- 民間企業の技術者

  地層処分事業に関わるゼネコン等において、自社関連技術以外の地層処分技術に関する知識等があまりない技術者 (一般公募ではなく、地層処分関連事業に関わる民間企業に声かけを行う)。

  狙い：今回のセミナーではモニターとして参加し、地層処分技術に関する全般的な知識の習得を促すとともに、地層処分事業が進んだ際に必要となる技術者のすそ野拡大に貢献する。

- 一部講義の講師も兼ねる中堅研究者・技術者

  将来的に地層処分関連の 3 分野連携を推進することができるようになると期待されるもの。

  狙い：今回のセミナーでは、自身の専門分野では講師を担い、他分野ではモニタ

ーとして参加することで、一般層との将来的な対話に資する経験を得るとともに、必要な地層処分技術に係る広範な知識の獲得を促す。

モニターの募集に関しては、公募はせず、協力機関からの参加者については、地層処分スキルアップ研究会メンバーを介して各機関内で調整を行った。また、大学関係者については、本事業で委託研究を実施している大学研究者等に個別に連絡し参加者を募った。さらに、民間企業に関しては、地層処分スキルアップ研究会メンバーからの推薦、他の地層処分関連の調査研究事業で関連のある企業等に開催案内を送付し、モニター登録者を募った。

(3) セミナーのプログラムの検討

地層処分スキルアップ研究会での議論を踏まえ、今年度の人材育成セミナーは、昨年度実施した人材育成セミナーを踏襲し、放射性廃棄物処分や地層処分に係る政策、地層処分の基礎となる放射性廃棄物の発生や地層処分の安全確保の考え方などの導入編に続き、地層処分の技術として、「地質環境・調査技術」、「工学技術」及び「安全評価技術」の 3 分野からなる合計 19 の講義で構成することとした。

また、今回のセミナーでは、以下の試みも含めて実施することとした。

- 人材育成プログラムを構成する「講義」を成立させる講師役の人材を育てるとの観点から、講師の一部については、各協力機関のベテラン技術者・研究者だけでなく、中堅に任せる
- 一般との対話が可能となることを目的の一つとするため、サイエンスコミュニケーション（技術コミュニケーション）に関する講義・演習を組み込む
- 座学だけではなく、実際に手を動かすために演習を組み込む

このような方針に従い、地層処分スキルアップ研究会参加機関内において、講義テーマに合った講師の人選を進めた。また、講義のほかに、招待講演として技術コミュニケーションに関する講演（詳細は後述）、サイトのモデリングに関する演習（詳細は後述）及びグループワークを検討し、プログラムに組み入れた（表 3.2-2、講義資料は別添資料 2 参照）。

表 3.2-2　2019 年度人材育成セミナープログラム

講師の所属機関の略称は次の通り。

METI：経済産業省、NUMO：原子力発電環境整備機構、AIST：（国研）産業技術総合研究所、JAEA：（国研）日本原子力研究開発機構、CRIEPI：（一財）電力中央研究所、RWMC：（公財）原子力環境整備促進・資金管理センター

1 日目

時間	講義分野	タイトル
9 ：30～	受付	
10：00～10：10	開会挨拶・連絡事項説明	
10：10～10：50（40 分）	0.導入編	01.わが国の地層処分事業の制度・政策・進め方
10：50～11：30（40 分）		02.放射性廃棄物の発生と管理
11：30～12：10（40 分）		03.地層処分における安全確保の考え方
12：10～13：00		**昼食（50 分）**
13：00～14：30（90 分）	1.地層処分の技術 I 地質環境・調査技術	04.地層処分に望まれる地質環境と 3 段階の調査 1（3 段階の調査・評価）
14：30～15：00（30 分）		05.地層処分に望まれる地質環境と 3 段階の調査 2（地層処分に好ましい地域の科学的特性）
15：00～15：15		**休憩（15 分）**
15：15～16：15（60 分）		06.調査・評価技術各論-自然現象 1（火山・火成活動、深部流体）
16：15～17：15（60 分）		07.調査・評価技術各論-自然現象 2（隆起運動、侵食作用、断層活動）
17：15～17：40		**休憩（25 分）**
17：40～19：10（90 分）	招待講演	「技術と社会」の関係認識から技術コミュニケーションへ
19：20～21:30	グループワーク（オリエンテーション・組織・分野間交流の促進）	

2 日目

時間	講義分野	タイトル
9：00～10：00 （60 分）	1.地層処分の技術 I 地質環境・調査技術	08.調査・評価技術各論-地質環境特性 1（地質・岩盤）
10：00～11：00 （60 分）		09.調査・評価技術各論-地質環境特性 2（地下水）
11：00～11：15		**休憩（15 分）**
11：15～12：15 （60 分）		10.調査・評価事例（幌延を事例とした物質移行調査技術）
12：15～13：00		**昼食（45 分）**
13：00～14：00 （60 分）	2.地層処分の技術 Ⅱ 工学技術	11.安全確保に向けた処分場設計の考え方
14：00～15：00 （60 分）		12.建設・操業技術（製造・施工品質の確保、操業安全）
15：00～15：15		**休憩（15 分）**
15：15～17：15 （120 分）	演習 ※沿岸部処分高度化開発の成果を利用した講義資料作成の試み	タイトル：サイトのモデリング
17：15～17：30		**休憩（15 分）**
17：30～21：00	グループワーク（NUMO FAQ の質問への回答づくり・ディスカッション）	

3 日目

時間	講義分野	タイトル
9：00～9：20 （20 分）	3.地層処分の技術 Ⅲ 安全評価技術	13.安全評価の考え方と枠組み（前半）
9：20～10：00 （40 分）		14.線量基準の考え方
10：00～10：45 （45 分）		15.安全評価の考え方と枠組み（後半）
10：45～11：00		**休憩（15 分）**
11：00～12：00 （60 分）		16.処分場構成要素の変遷挙動
12：00～13：00		**昼食（60 分）**
13：00～13：40 （40 分）		17.核種移行解析モデル
13：40～14：20 （40 分）		18.核種移行データ・モデル整備と パラメータ設定手法
14：20～15：00 （40 分）		19.最新の安全評価のための取り組み
15：00～16：00	グループディスカッション（セミナーの振り返り）	
16：00～16：15	閉会挨拶・事務連絡	

各講師に対しては、講義資料の作成に関して、事前に以下の依頼を行った。

- 資料はマイクロソフト・パワーポイントで作成する
- 講義はプロジェクタ・スクリーンを用いて実施するが、配布資料は、A4、ツーアップ、両面カラーで全講義資料をファイル綴じしモニターに配布する
- 資料作成では、既存資料等を有効に活用することとし、書式等の統一は行わない（各組織の書式等で構わない）
- ページ番号を先頭ページより、右下に記載する
- モニターに講義全体のイメージを提供するため、講義資料の冒頭１ページ目に、講義の狙いやポイントを記載する
- モニターには、地層処分などの専門知識があまりないと考えられる大学院生を含んでいるため、専門的な内容の場合でも、しっかりとした導入・説明する
- 専門外の分野は研究開発に携わる人でも理解できない場合があるため、基礎知識の説明や用語解説を挿入する
- イメージがつかみやすく理解向上につながるため、具体的事例での説明を積極的に採用する
- 外国事例の概念的なトピック（国際原子力機関（IAEA） や国際放射線防護委員会（ICRP）の文献引用）は、原文だけを用いて紹介するのではなく、かみ砕いた平易な説明も挿入する
- スライドの中の文字は小さすぎないようする配慮する（目安 20pt 以上）

また、講義資料中で使われる図表、データなどは、必ずしも全てについて使用許諾が取れていない状態であるため、配布資料から外部に流出しないように言質を取ることを目的とし、全モニターから二次利用しない旨の誓約書の提出を受けた。同様に、事務局も講義資料の二次利用しないことを参加案内文書において宣言した。

以下にセミナープログラムの中の分野内での講義内容の調整、19 コマの講義以外の招待講演、演習、アンケートの設計及びグループワークなどについての事前の検討内容等を示す。

a. 安全評価分野の講義内容の調整

今年度の人材育成セミナーでは、各講師に対して前ページで示した講義資料作成における依頼を行った。しかし、分野内での講義内容の重複、全体の流れ、各講義のつながりなどの内容を調整するため、安全評価分野の講義を担当する全講師が集まり 2019 年 11 月 12 日に打ち合わせを行った。打ち合わせの結果、内部で事前に講義資料を確認し、内容の確認を行うことなどを決定し、セミナー開催前に確認等を実施した。

b. 演習のためのデータ処理等

座学による講義だけでなく、各参加者が実際に考え、手を動かす演習を含めることとして、（国研）産業技術総合研究所の協力の下、資源エネルギー庁事業「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（沿岸部処分システム高度化開発）」（平成 27～30 年度）の取りまとめ報告書（以下、H30 報告書という）[3]を題材として、演習を実施することとした。

まず、H30 報告書に含まれる図表、データから演習用データの作成を行った。ただし、この演習用データは、あくまで将来のセミナーでの使い方や可能性を後々に地層処分スキルアップ研究会メンバーで議論できるようにする「試作品」づくりを意図したものであり、今年度の人材育成セミナーでの活用を意図したものではない。

データ整理では、将来の講義資料としての活用を意図して、マイクロソフト・パワーポイントのスライド 1 枚に対して、H30 年度報告書に含まれる図（表）を 1 枚抜粋し、それに対する関連文章（説明）を付随させ、それらの基となるデータを埋め込めるようなデザインとした（図 3.2-1）。なお、このスライドの将来的な講義や演習資料としての活用方法は今後検討する。

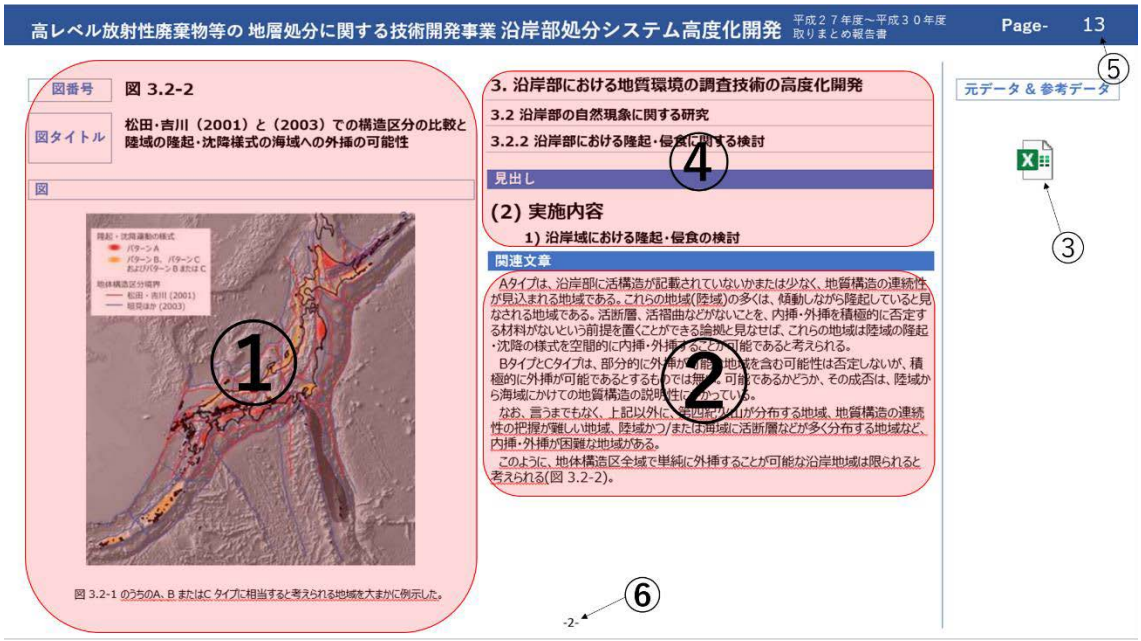


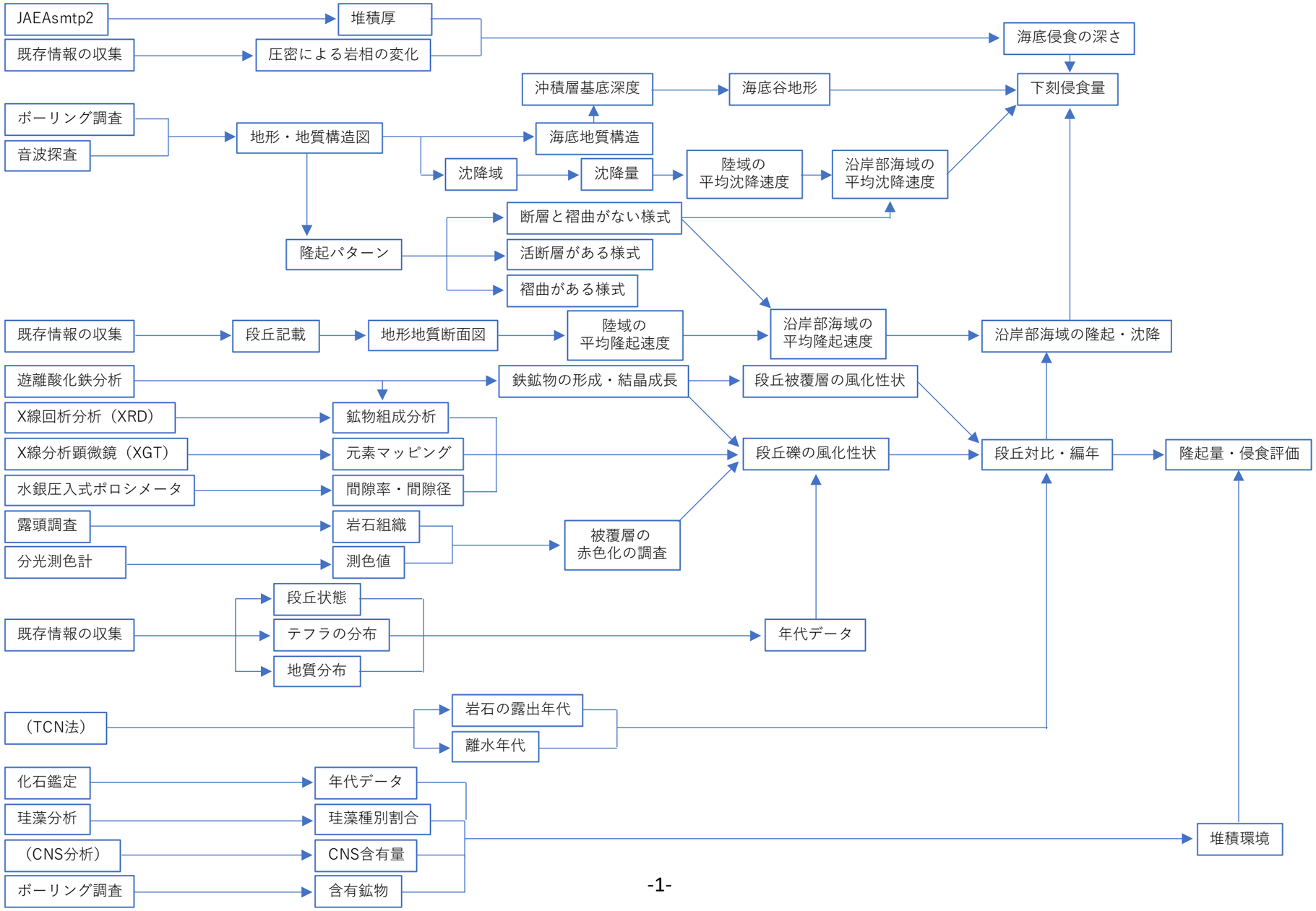
図 3.2-1　沿岸部データの見せ方の検討例

① H30 報告書に記載されている図（表）、図（表）番号、図（表）タイトル
② 図（表）に関連のある文章
③ 図（表）の基となるデータ、または、参考となるデータ
④ 各章とその見出し
⑤ H30 報告書のページ番号
⑥ 作成した講義教材のページ番号（ファイル別）

図（表）の基となるデータ、または、参考となるデータ（上図の③）については、スライド上でマイクロソフト・エクセルのファイルアイコンを実行（ダブルクリック）することで、実際のデータを閲覧させるようにできることを確認した。スライドの将来的な活用方法により、エクセルファイルに収納すべきデータの種類・見せ方などが変わるため、今後、収納するデータの検討が別途必要である。

また、H30 報告書へ記された研究内容の関連性を簡潔に再整理するため、研究の手法やその成果、考察をもとにキーワードを抜粋、関連性をマップとして整理した。マップ化については、地質環境調査技術分野、工学技術分野、安全評価技術分野のそれぞれについて実施した。

3. 沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発　1/3



-1-

図 3.2-2　沿岸部データの整理の例（マップ化）

今年度のセミナーにおける演習では、H30 報告書のデータなどを用いて、地質調査から地質モデルの作成、地下水解析の流れを学ぶとともに、解析ソフトである Geo-Graphia®（viewer）を用い、実際にパソコン上でサイトモデルを見るものとした。

c. 招待講演

技術コミュニケーションに関する招待講演として、東北大学名誉教授（現テムス研究所所長）の北村正晴氏に依頼した。講演は、「「技術と社会」の関係認識から技術コミュニケーションへ」のタイトルで 90 分間で行うこととした。

ただし、本来の講演では、以下のように、ステップ 1～4 までで構成されるが、今回は、時間の関係から主にステップ 1 と 3 の範囲を対象とした。

- ステップ１：問題意識の共有
- ステップ２：コミュニケーションの枠組み設定（フレーミング）
- ステップ３：コミュニケーション実践への基礎（１）
- ステップ４：コミュニケーション実践への基礎（2）

d. グループワーク

グループワークは、セミナーの開催期間中の各日に実施することとして、その実施内容を検討した。また、全体的な実施の狙いとしては、招待講演の内容を受け、異なるバックグランドを有す参加者間での対話・ディスカッションを行うこと、さらに、参加者により多様な意見があることを参加者が認識することとした。

このため、年齢、専門分野、所属機関など多様なバックグランドからなるモニターで構成されるように、事前に 7 つのグループにグループ分けを行った。各グループには、NUMO からの参加者及び事務局が 1 名ファシリテータとして参加した。なお、グループは、3 日間通じて同じメンバーとした。

1 日目のグループワークでは、初めて会うグループのメンバーを良く知ることで、以降のグループワークでの対話・議論を円滑に行えるようにすること、招待講演の直後に行うため、招待講演の内容を受けて、伝え方・伝わり方の改善や問題意識を持つことを目的とした。具体的には、アイスブレーキングとして自己紹介を行うとともに、グループワーク①「1 枚プラスでバージョンアップ」として実際の講義資料を用いた内容とした（実施内容の詳細は 3.3 参照）。

2 日目のグループワークでは、招待講演で紹介された内容の実践を行うこととし、NUMO ウェブサイトに掲載されている「よくあるご質問（https://www.numo.or.jp/q_and_a/）」[4]を題材として、質問者及び回答者が対話を行う形式とした（3.3 参照）。

3 日目のグループワークは、全ての講義の終了後に行い、各分野の講義全体、招待講演、演習やグループワーク自体の「おすすめ度」をモニターに評価してもらい、その内容について議論するものとした（詳細は 3.3 参照）。

表 3.2-3　グループワークの構成と実施の狙い

		実施の狙い
➢　グループワーク全体		➢ **異なるバックグランド（所属、専門性、年齢など）を有す参加者との間での対話・ディスカッションを経験すること** ➢ **参加者により多様な意見があることを認識する**
1 日目（1 月 8 日） 19：20～21：50	オリエンテーション(自己紹介など)	*3 日間同じグループでグループワークを実施するため、同じグループ内の参加者のことをよく知るとともに、各参加者が自由に意見を述べ合うことができるような雰囲気を作ること、また、同じグループの参加者との間で所属組織、分野などを超えた横のつながりを作ることに資する。*
	ワーク①　「1 枚プラスでバージョンアップ」	*北村先生の招待講演の直後に行うワークであり、講演からの流れを切ることなく、講演内容を踏まえ、実際の対話でも使われるスライドを多く含む講義資料を題材とし、伝え方・伝わり方の改善の余地や問題意識を考える。*
2 日目（1 月 9 日） 17：30～21：00	**ワーク②「その回答の意味分かりません」**	*実際の対話の場面を想定し、異なるバックグランドを持つ参加者が質問者と回答者に分かれ質疑を行うことで、立場等の違いにより、質問者によって質問の意図が多様であり、求める回答が異なる可能性もあることを理解する。また、この方法が一般公衆等に対してだけでなく、異なる業界・分野との対話でも有効であることを理解する。*
3 日目（1 月 10 日） 17：30～21：00	**ワーク③「アンケートを基にしたセミナー振り返り」**	*参加者に対して 3 日間のセミナーの振り返り、自身にとってプラスとなったものを理解するよう促すとともに、個々の講義ではなく全体印象を把握する。また、良かった点等を議論することで、来年度以降のセミナーへのフィードバックを得る。*

また、グループワークに関しては、招待講演を依頼していた北村先生の参加の下、事前に事務局内で実施内容の確認等を行った。

(4) アンケートの設計

前述のように、今回のセミナーは、人材育成プログラムの作成に資する意見等を得るために試行的に開催することとしており、参加者はモニターと位置づけた。このため、モニターからの率直な意見を得るためのアンケートを実施することとした。アンケートの設問は、以下の方針に基づき、検討を行った。

- セミナーの振り返りに関する質問
  主にセミナーの講義や内容の振り返り・再確認を促し、講義内容の理解向上に資する
- セミナーの内容、進め方、構成等に対する質問
  主に来年度以降のセミナーの改善等に資する
- セミナーを受講した後での処分分野への関心に関する質問
  主に各モニターがどのような点に関心を持ったのか、役に立ったのか把握し、来年度以降のセミナーの改善等に資する

検討した結果、以下の質問を用意した（アンケートについては別添資料 3 参照）。

- 基本属性（専門分野等）に関する質問
- 各講義に対する質問（各モニタカテゴリ共通）
- 演習・招待講演に対する質問（各モニタカテゴリ共通）
- 人材育成セミナー（の内容）全体に対する質問（各モニタカテゴリ共通）
- 各モニターカテゴリ固有の質問

アンケートの記入については、事前にモニターにファイルを送付し、休憩時間や昼食中に記入してもらうとともに、後日記入後返送してもらうこととした。

3.3　2019 年度人材育成セミナーの実施結果

3.3.1　開催概要

地層処分事業における技術人材の育成『2019 年度人材育成セミナー』を以下のとおり開催した。

①開催日時：2020 年 1 月 8 日（水）～10 日（金）、2 泊 3 日

②開催場所：成田ビューホテル（会議施設＋宿泊・食事施設）

③参加者総数：57 名（講師を含む）

1 日目：52 名

2 日目：53 名

3 日目：52 名

図 3.3-1　モニター（参加者）の機関別内訳

No	機関名	参加人数 （講師の数）
1	原子力発電環境整備機構（NUMO）	12 (5)
2	日本原子力研究開発機構（JAEA）	12 (4)
3	産業技術総合研究所（AIST）	3 (2)
4	電力中央研究所（CRIEPI）	4 (2)
5	原子力環境整備促進・資金管理センター（RWMC）	8 (1)
6	民間企業	13
7	大学	5
	合計	57

3.3.2　モニターの属性等

参加者の放射性廃棄物処分関連研究等の従事年数が、0～5 年の従事経験年数の短いモニターが全体の約 57%を占めており、従事年数を 10 年以下として区切った場合には、全モニターの 75%が含まれていた（図 3.3-2）。

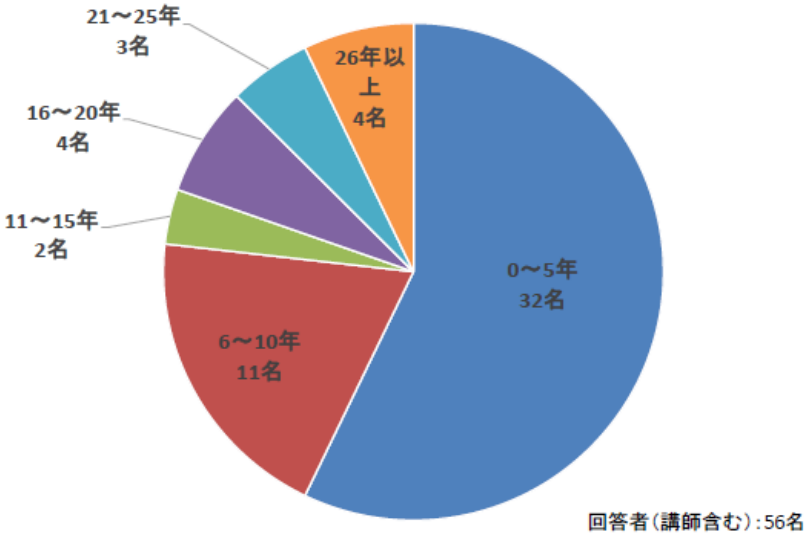


図 3.3-2　モニター（講師を含む）の放射性廃棄物処分関連研究等の従事経験年数

また、モニターの専門分野としては、地層処分関連の 3 分野である地質環境、工学技術及び安全評価を専門とするモニターが、3 割前後ずつを占め、残りが広報・広聴などを専門とするモニターで構成されていた（図 3.3-3、図 3.3-4）。

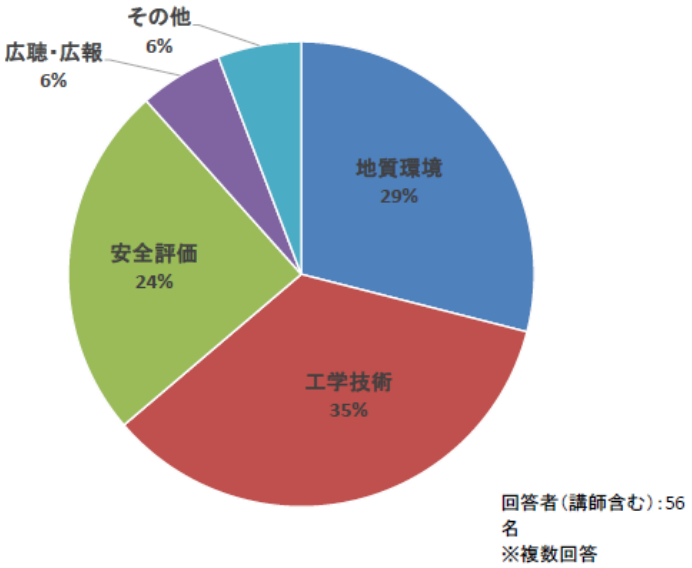


図 3.3-3　モニター（講師を含む）の専門分野

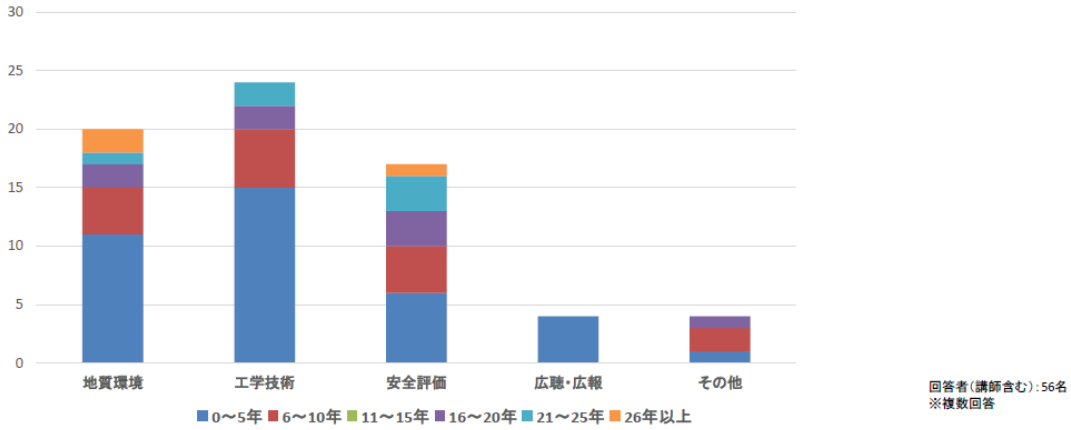


図 3.3-4　モニター（講師を含む）の専門分野別従事経験年数

また、各モニターの将来の目標設定を以下から選択したもらった結果、全般的に広く浅く理解するジェネラリスト、特定分野のスペシャリスト、全分野を深く理解し処分プロジェクトを牽引できる専門家がほぼ同程度の割合であった（図 3.3-5）。

- 全般的に広く浅く理解するジェネラリスト
- 特定分野のスペシャリスト
- 全分野を深く理解し処分プロジェクトを牽引できる専門家
- その他

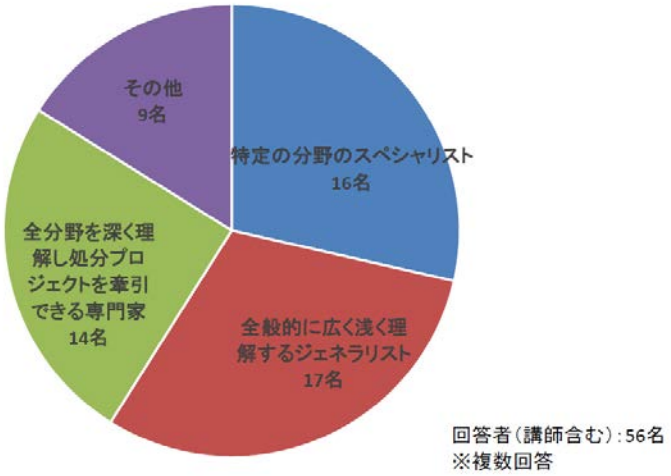


図 3.3-5　モニターの将来の目標設定

3.3.3　各分野の講義・招待講演・演習の結果概要

プログラムに示したように、導入編を含め、地層処分の主要 3 分野（地質環境調査技術、工学技術、安全評価技術）を対象とした合計 19 の講義を実施した。

講義の進行については、概ね予定したスケジュール通りに進行することができた。各講義では､最後の 5 から 10 分間を質疑の時間として確保するようにした｡各講義の質疑では、活発な議論が行われたが、質問者はある程度限定されていた。

次に、技術コミュニケーションに関する招待講演は、概ね以下のような内容であった（図 3.3-6）。

- 社会受容性の問題の背景には、科学技術・原子力への懸念・疑念があり、科学技術が無条件で支持されていた時代ではなくなっているため、社会的意思決定の透明性を高めるための市民参加意思決定への期待が高まっている
- しかし、市民参加意思決定の導入には、新たに様々な課題が生じている
- 対話の場では、受け手の意図が多様であり、「傾聴」が重要であること、説明重視から対話を重視する必要があり、そのための手法として、DIE（Description（描写）・Interpretation（解釈）・Evaluation（評価））法がある

ただし、招待講演は、3.2.2 に示したように、本来ステップ 1 から 4 で構成されているものを、時間の関係からステップ 3 までの内容とした。

図 3.3-6　招待講演の様子

また、演習に関しては、サイトのモニタリングに関する演習を実施した（図 3.3-7，図 3.3-8）。この演習では、導入のための講義のほか、各モニターがパソコンを使い、Geo-Graphia®の viewer を用い、3 次元でのサイトのモデルを表示し、含まれている様々なデータを表示するなどを行った。ただし、各モニターにパソコンの持参を依頼したが、用意できなかったモニターやパソコンの性能が十分でなく、十分に演習を行うことができなかったモニターもいた。

図 3.3-7　サイトモデリングの演習の様子

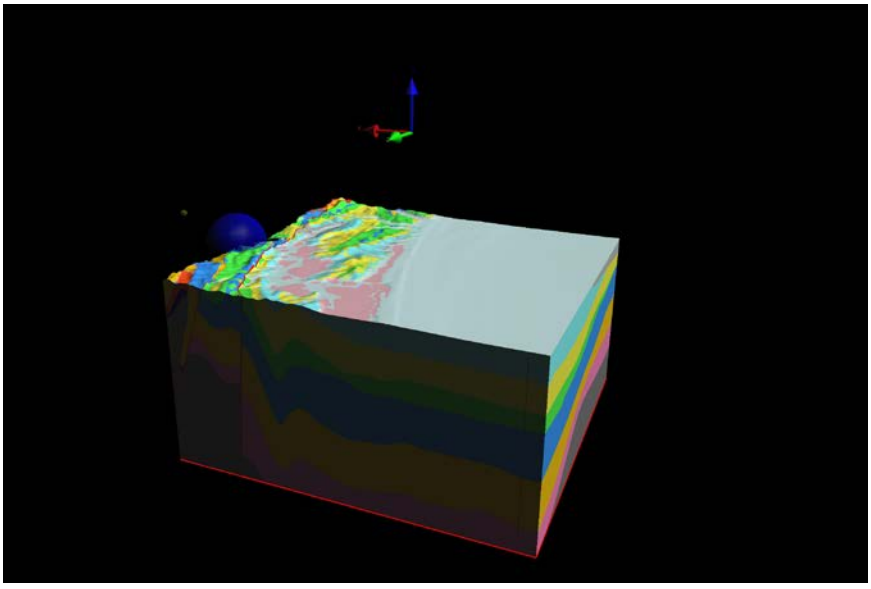


図 3.3-8　Geo-GraphiaⓇでの 3 次元モデル

3.3.4　グループワークの開催結果

前述のように、グループワークは 3 日間それぞれで実施したが、グループワーク全体を通しての実施に際し、ルールとして以下を設定し周知した。特に、話への割り込みを防ぐため、ぬいぐるみなどのアイテムを持った人だけが話すことができるというルールを設定した。

・他の人の意見を否定したり批判するのはやめましょう。
・他の人が話している時に割り込むのはやめましょう。
・発言者の意見に賛同するのは大歓迎。
・他の人の意見をよく聞きましょう。
・考えが変わった場合は、意見を変えても構いません。

以下にグループワークの各プログラムでの各実施内容などをまとめる。

(1) 1 日目（19：20～21：50）のグループワークの結果

a. オリエンテーション

3 日間同じメンバーでグループワークを行うため、オリエンテーションにおいて互いにメンバーのことを良く知り、お互いに意見が言いやすい雰囲気を作ることが重要であることから、自己紹介がアイスブレークとなるように、実施方法を工夫した。具体的には、各自が自分自身を車のパーツに例え、その理由を述べるとともに、自己紹介を行った（図 3.3-9）。

また、単にグループ A、B などと呼ぶのではなく、メンバーが親しみを持って呼べるように各グループで相談しグループ名を設定した。

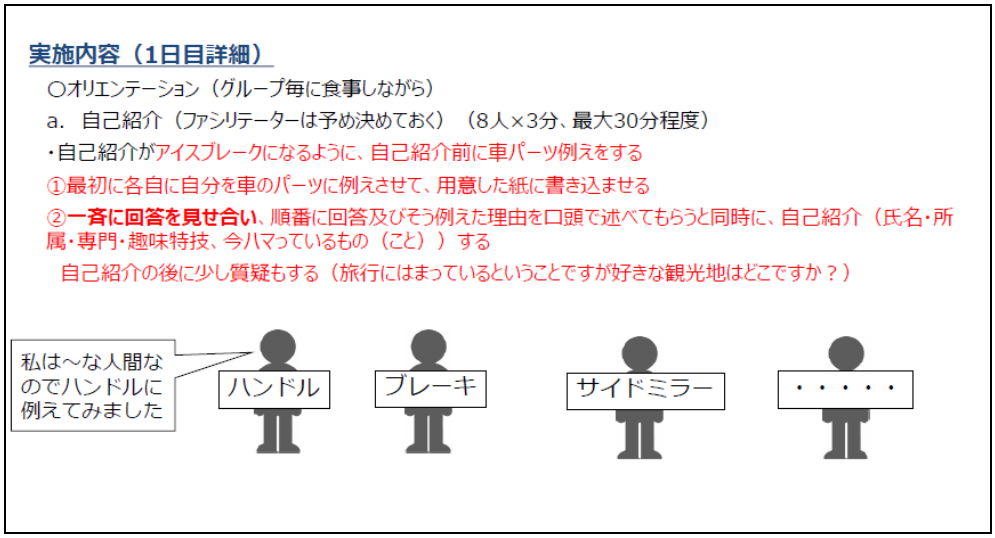


図 3.3-9　オリエンテーションの実施内容のイメージ

b. ワーク①「1 枚プラスでバージョンアップ」

自己紹介に引き続き、ワーク①「1 枚プラスでバージョンアップ」を実施した。このワークは、説明資料を作成する際に重要と思うことを 3 点あげたうえで、それらのポイントを踏まえ、「03.地層処分における安全確保の考え方」の資料に追加するスライド 1 枚（どこに入れるかも含め）を考えるというものである。講義資料を読んで理解して議論することを超えて、グループワークとして、資料中で重要と思うことの共有を促すことを目的としていた。また、この講義資料を題材とした理由は以下のとおりである。

- NUMO の対話説明会などで実際に使われているスライドを多く含んでいること
- 地質環境分野、工学技術、安全評価の 3 分野の連携を提案していること
- 今回のセミナー講義構成全体の重要なポイントであること
- 安全評価分野以外を専門とするモニターに地質系、工学系との関係性の理解を深めて欲しいこと

以下に、説明資料において重要な点として挙げられていた主なものを示す。

- スライド 1 枚に含めるテーマは一つに絞る
- 説明する対象をはっきりさせ、対象にあった内容、情報量とする
- 文字の大きさ、グラフなどの情報量を適切なものとする
- まとめ・要約のスライドを入れるなどして伝えたいことをはっきりさせる

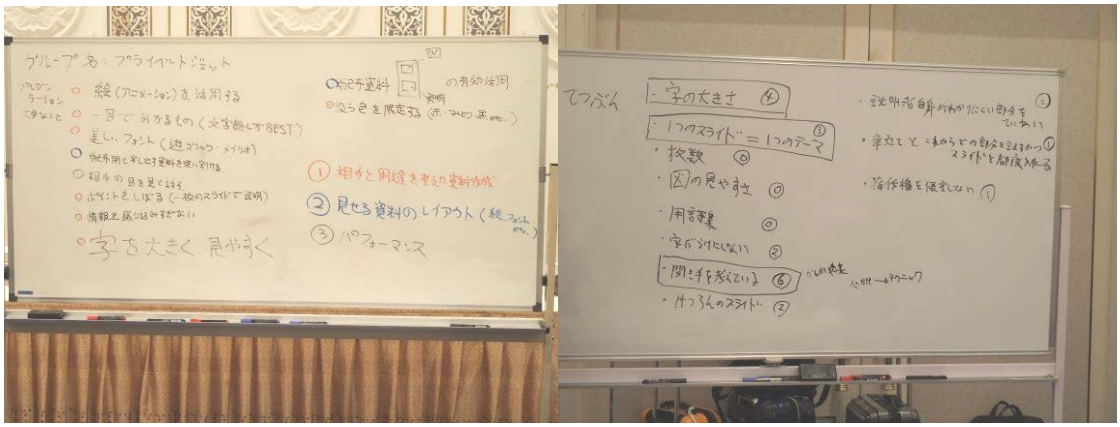
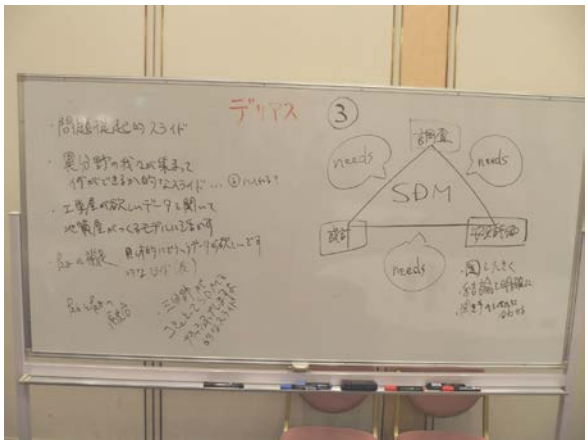
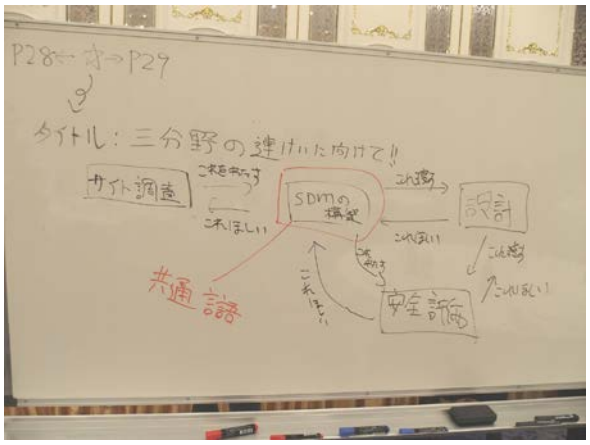


図 3.3-10　ワーク①「1 枚プラスでバージョンアップ」の結果 1
- 説明資料作成時に重要な点 -

次に、各グループにおいて、議論した説明資料作成時に重要と考えられる点を踏まえ、講義 03 の講義資料への追加スライドの検討を行った。

グループ間で共通して出された意見の一つに、「調査段階においては SDM が三分野の Hub となる」と題したスライドの前後などにスライド（別添資料 2 参照）を追加し、Site Description Model（SDM）を中心とした 3 分野の連携に関する説明を加えるというものがあった。





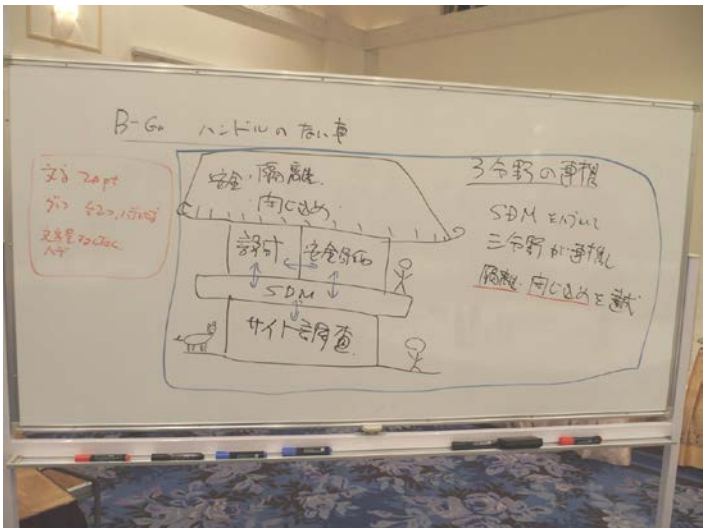


図 3.3-11 「1 枚プラスでバージョンアップ」の結果
- 1 枚追加するスライドに関する検討状況 -

この他に、講義資料で示された 1 枚目のスライドの 3 つの狙い（別添資料 2 参照）の関連性の解説図を含むスライドを入れるという意見や包括的技術報告書の概要・説明のスライドを入れるといったものもあった。

(2) 2 日目（17：30～21：00）のグループワークの結果

2 日目のグループワークでは、資源エネルギー庁や NUMO のウェブサイト上に公開されている、原子力発電、核燃料サイクル、地層処分などに関する想定質問とその回答を用い、様々な立場でこれらの質問とそれに対する回答を実践することで、対話やコミュニケーションにおける立場の違いを理解する重要性や難しさを実感することを目的として、ワーク②「その回答の意味分かりません」を行った。

ワークは以下の流れで行った。

1. グループで質問者と回答者、メモ取りなどの役割分担を行い、ファシリテータの進行でやり取りをする。
2. 質問者が質問を読み上げる。
3. 質問に対して、まずは各回答者に 3 分の時間で回答を考えてもらい、付箋に記入してもらう（質問者への質問の背景などの更問も可として実施）。
4. ファシリテータが付箋をホワイトボードでグルーピングなどを行い議論する。
5. ある程度対話が行われた後に、NUMO などの回答を示し、変更があれば意見を取りまとめる。

質問者と回答者を変え、各グループで 3 つの質問に対する議論を行った。なお質問は、下図の「原子力発電」、「地層処分（政策的）」及び「地層処分（技術的）」中から抽選で一問ずつ割当を行った。

○原子力発電（処分関係の対話でも、この場は処分の議論をします、との設定でも必ず質問がある）
（a-1）原発が稼働していない時でも、電気は足りていたように感じます。原発の再稼働は本当に必要なのでしょうか。
（a-2）原発の再稼働に向けた動きが進んでいるように思います。政府は本気で原発依存度を減らそうと取り組んでいるのですか？
（a-3）福島第一原発の事故処理や、「核のゴミ」の問題など、原発はコストがかさむと思います。本当に「安い」と言えるのでしょうか。

○地層処分（政策的）
（b-1）なぜ、地上管理では問題があり、人の管理を必要としない「最終処分」が必要なのですか？
（b-2）地層処分は日本で実現可能ですか？
（b-3）なぜ使用済燃料をそのまま最終処分（直接処分）しないのですか？
（b-4）いま、高レベル放射性廃棄物の処分をやらなければいけないのですか？
（b-5）将来の人間が、地層処分したものを掘り出してしまうことはありませんか？
（b-6）地層処分以外の処分方法はないのですか？
（b-7）将来、地層処分費用が不足しませんか？

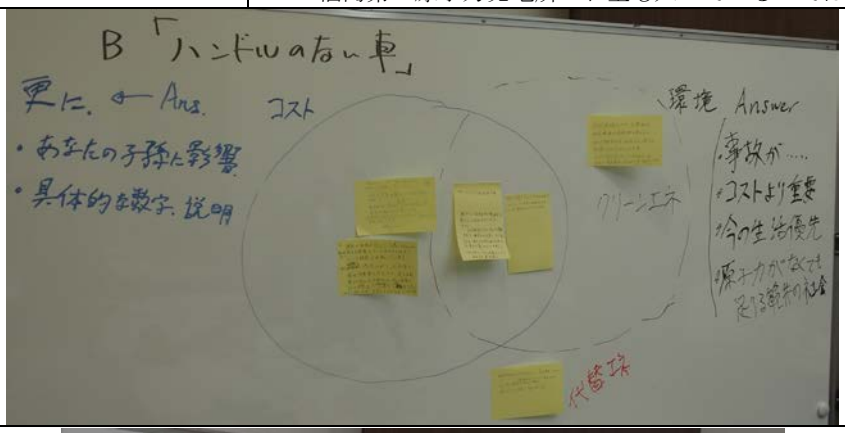
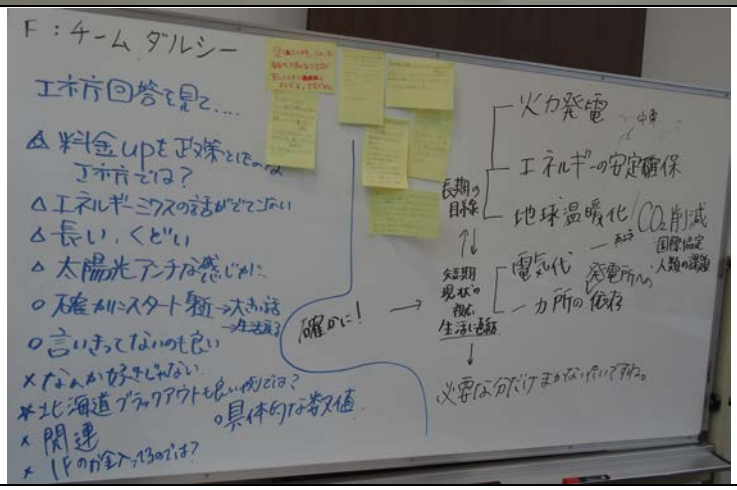
○地層処分（技術的）
（c-1）ガラス固化体を熱源として利用できないのですか？
（c-2）地層処分が地上管理より優れている点は何ですか？
（c-3）処分場を横切るような断層活動が発生したらどうなりますか？
（c-4）地層処分の技術が確立しているのに、なぜ研究開発をするのですか？
（c-5）処分施設閉鎖後、放射線モニタリングは行いますか？
（c-6）将来、埋設した高レベル放射性廃棄物は取り出せますか？
（c-7）テロによる影響を想定していますか？

図 3.3-12　グループワークで資料した質問 [5)]

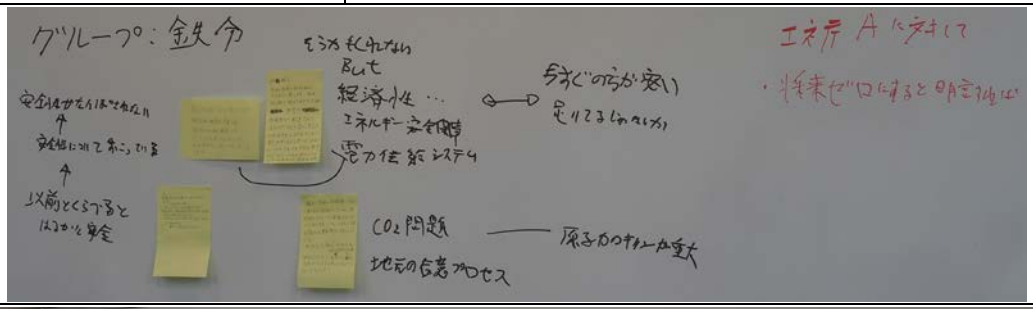
a. 原子力発電に関する質問に対する質問と議論内容

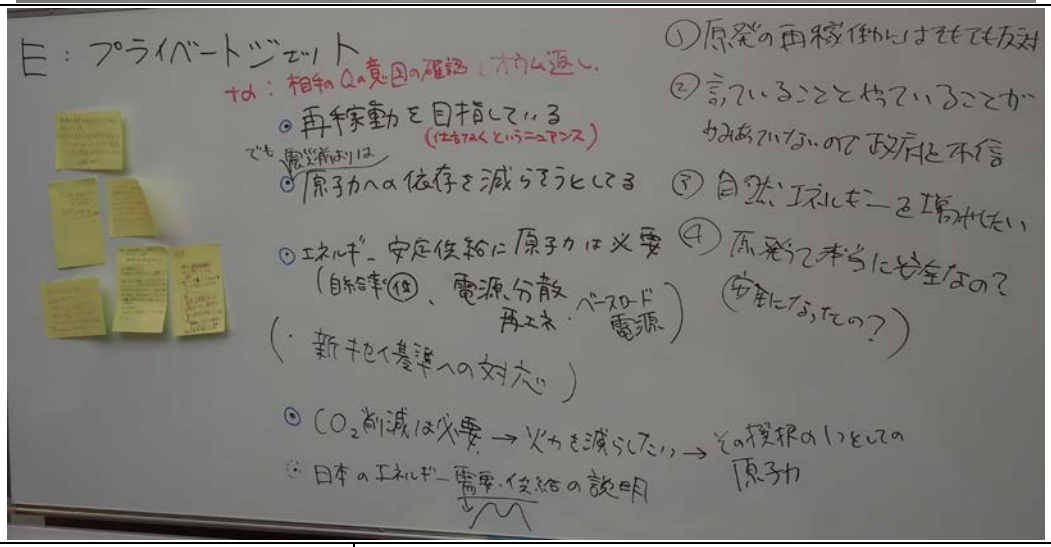
以下に、各グループが取り組んだ質問と資源エネルギー庁の回答への各グループの意見等を示す。

表 3.3-1 各グループの原子力発電に関する質問への回答と議論の内容

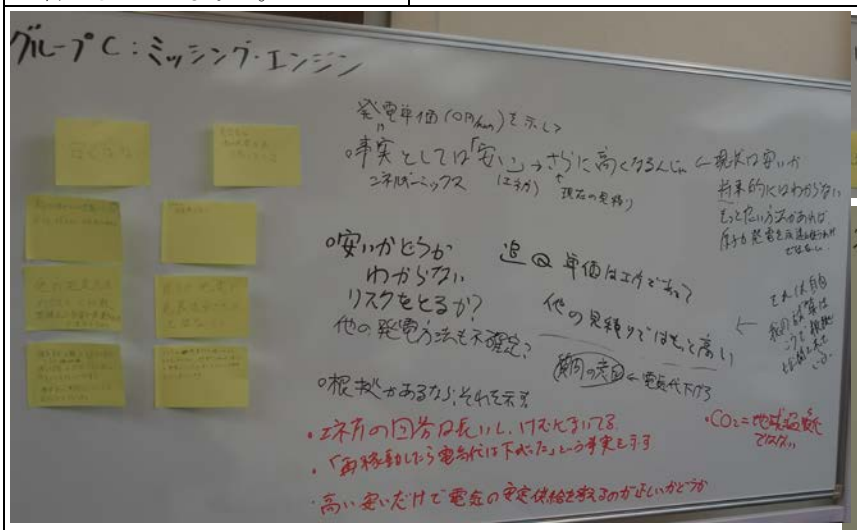
質問	既存エネ庁回答への意見
(a-1)　（グループ B、F が選択） 原発が稼働していない時でも、電気は足りていたように感じます。原発の再稼働は本当に必要なのでしょうか。	➢ 自分の目に見えるコスト（個人、国）で示されると納得感がある ➢ 回答が長すぎる ➢ 安全性への取り組みについて ➢ 将来世代への影響を考慮 ➢ 必要とされるエネルギーについて共通認識を持てるように ➢ 料金アップを政策としたのはエネ庁では？ ➢ エネルギーミックスの話が出てこない ➢ エネ庁の回答は長いし、くどい ➢ 太陽光アンチな印象を受ける。 ➢ 最初は身近な話をして、次に大きな話をして、また身近な生活の話に戻っているのが良い。 ➢ 言い切っていないのも良い。 ➢ なんか好きではない。 ➢ 北海道のブラックアウトも良い例ではないか。 ➢ 具体的な数値 ➢ 福島第一原子力発電所のお金も入っているのではないか
	
	

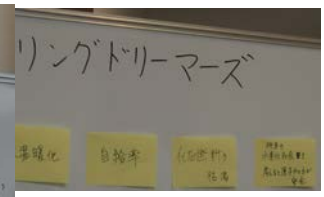
(a-2)　（グループ E、G 選択） 原発の再稼働に向けた動きが進んでいるように思います。政府は本気で原発依存度を減らそうと取り組んでいるのですか？	➢ 再エネ導入による電力安定供給までの「モラトリアム」であることの説明不足。 ➢ 将来ゼロにすると、明言するのはどうか。←公式には言えない。

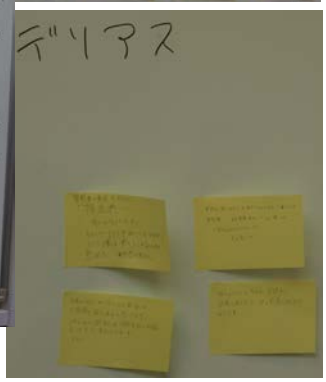




(a-3)　（グループ A、C、D 選択） 福島第一原発の事故処理や、「核のゴミ」の問題など、原発はコストがかさむと思います。本当に「安い」と言えるのでしょうか。	➢ エネ庁の回答は長いし、けむに巻いている。 ➢ 「再稼働したら電気代は下がった」という事実を示す ➢ 安定供給を考えると、高い安いだけで決めるのはどうか



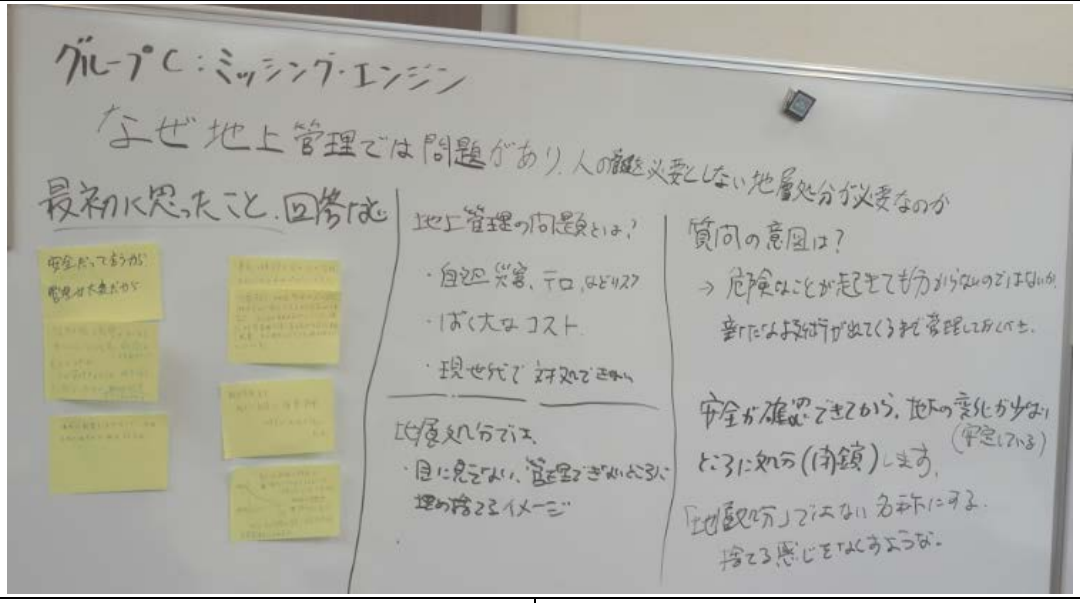
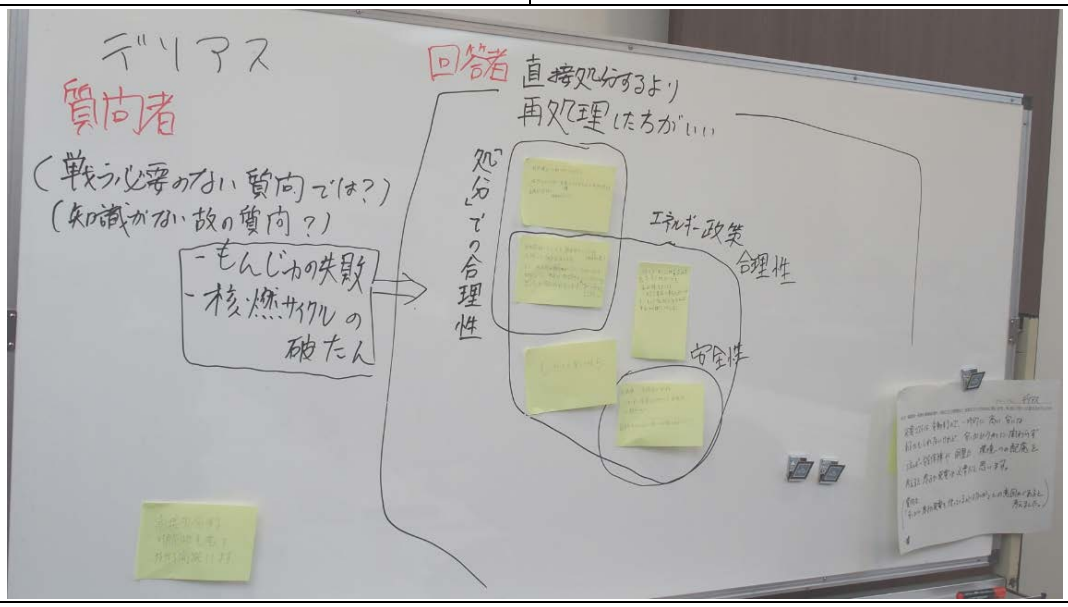


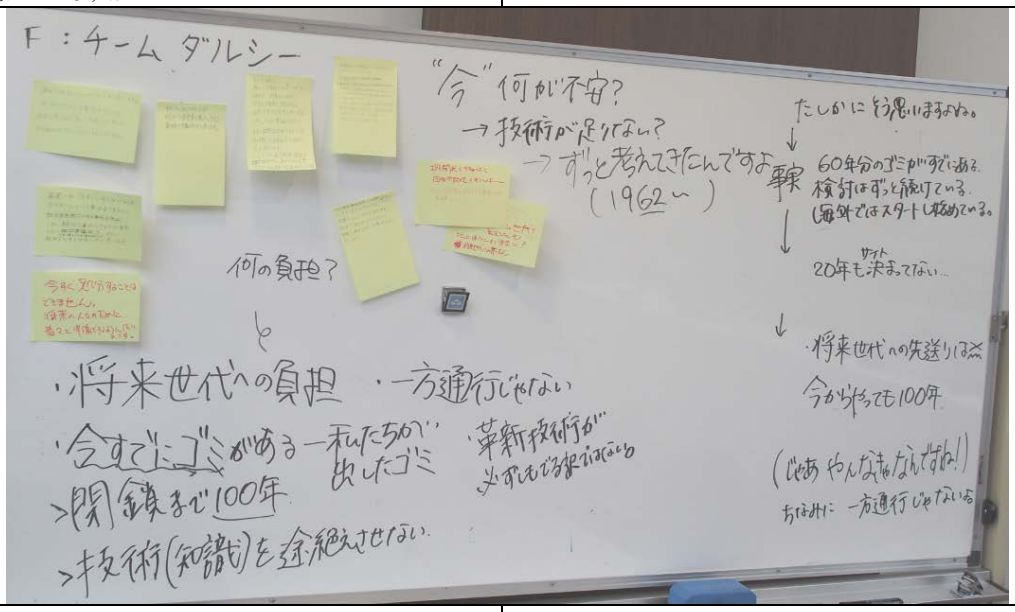
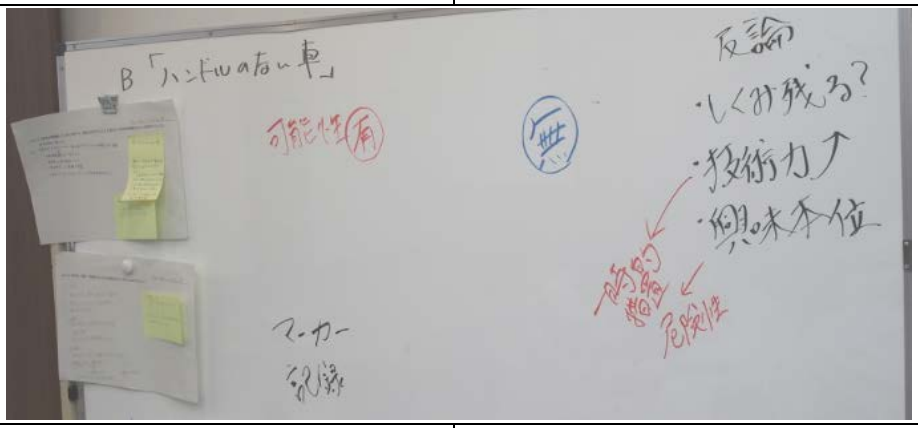
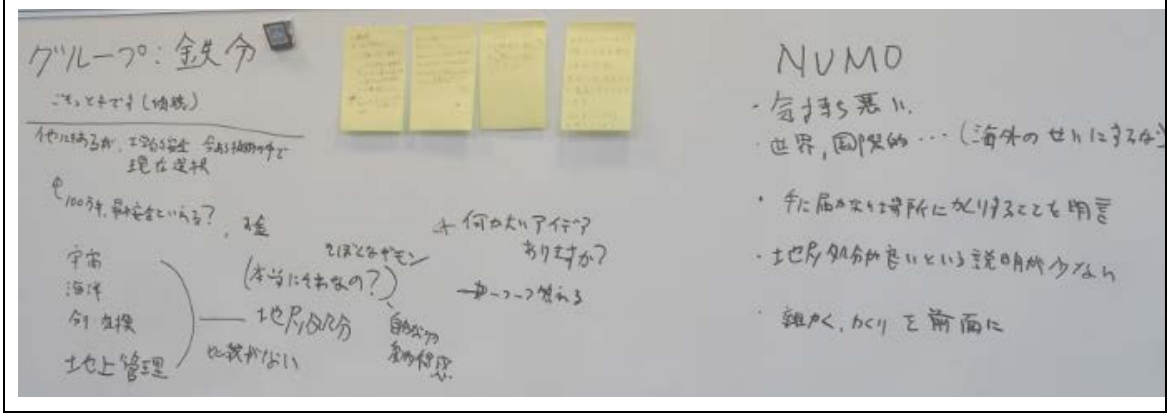


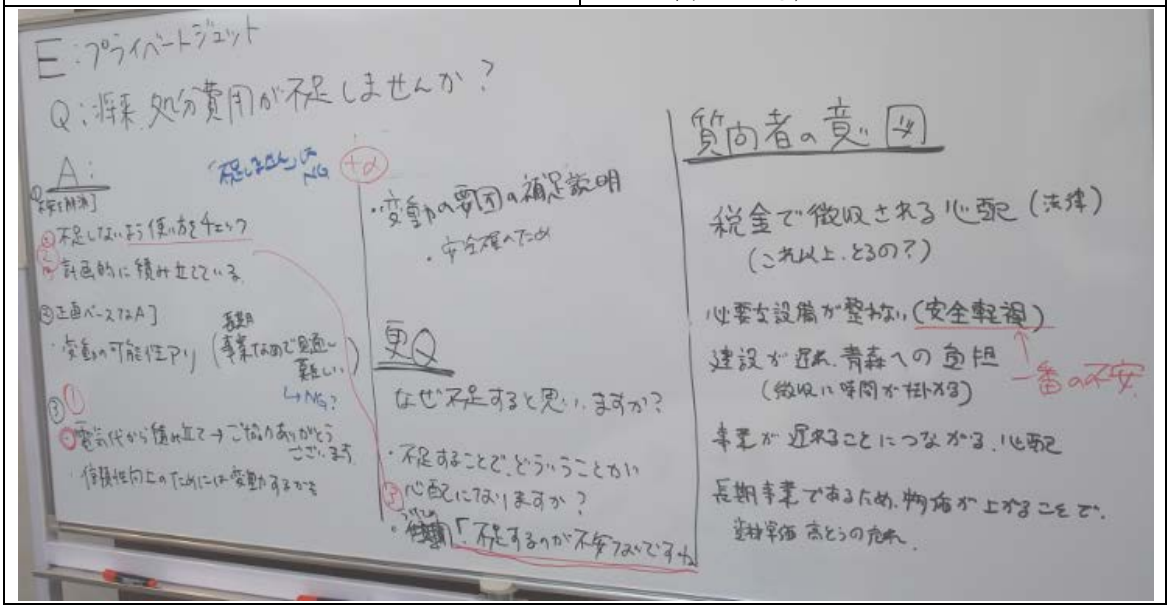
b. 地層処分（政策的）に関する質問と議論内容

以下に各グループが取り組んだ質問と、NUMO の回答への各グループの意見等を示す。

表 3.3-2　各グループの地層処分に関する質問への回答と議論の内容　その 1

質問	既存 NUMO 回答への意見
(b-1) なぜ、地上管理では問題があり、人の管理を必要としない「最終処分」が必要なのですか？	➢ 「現実的ではない」⇒何が現実的でないのかが明らかでない ➢ 「共通した認識」⇒多数決？根拠は？ ➢ 「現世代」とは？⇒事業 100 年としたら我々はいない。道筋をつけるところまでになるのか
	
(b-2) 地層処分は日本で実現可能ですか？	－
(b-3) なぜ使用済燃料をそのまま最終処分（直接処分）しないのですか？	➢ NUMO の回答でＯＫ。ただし、一段目の回答のみで、二段目は言わないこと
	

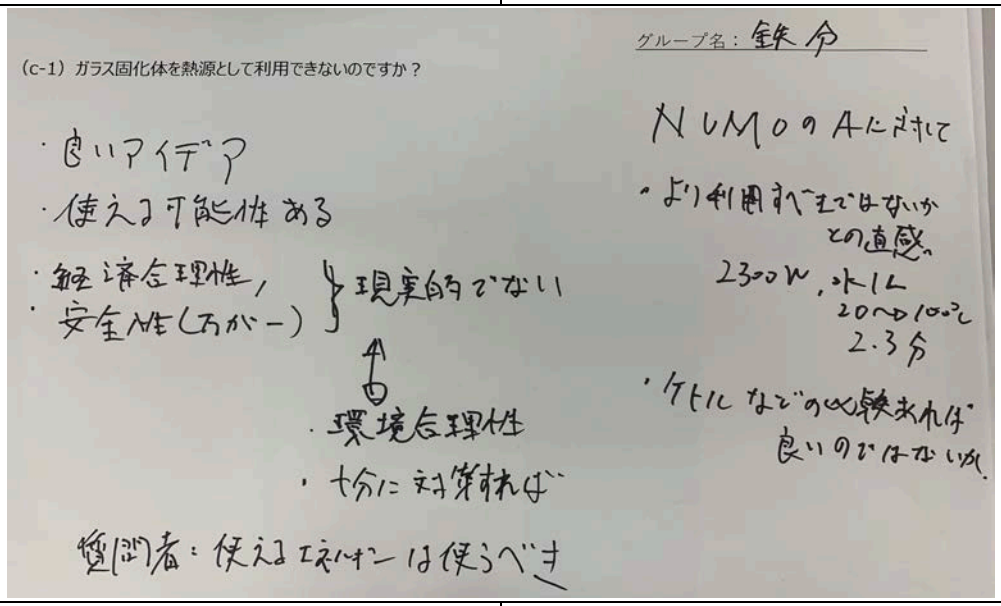
(b-4) いま、高レベル放射性廃棄物の処分をやらなければいけないのですか？	―
	
(b-5) 将来の人間が、地層処分したものを掘り出してしまうことはありませんか？	➢ 可能性が低い場所を探す＝鉱物 ➢ 図やシンボルなど＝分かり易く ➢ 掘削を制限
	
(b-6) 地層処分以外の処分方法はないのですか？	➢ 気持ち悪い。 ➢ 海外におしつけ ➢ 地層処分の良さの説明が少ない ➢ 離隔・隔離を前面に
	

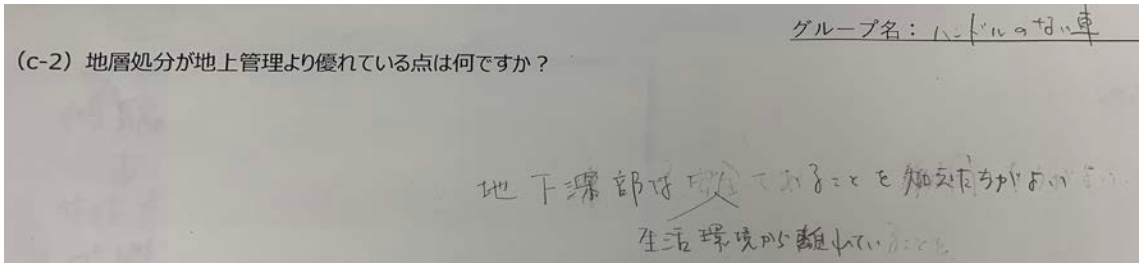
(b-7) 将来、地層処分費用が不足しませんか？	➢ 費用変動の補足説明あると良い（※算出結果を公開している）
	

c. 地層処分（技術的）の質問と議論内容

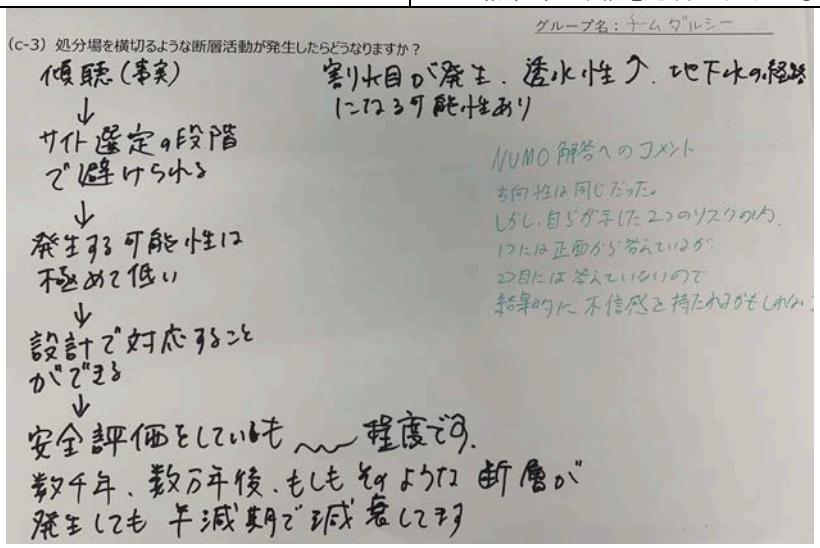
以下に各グループが取り組んだ質問と、NUMO の回答への各グループの意見等を示す。

表 3.3-3　各グループの地層処分に関する質問への回答と議論の内容　その 2

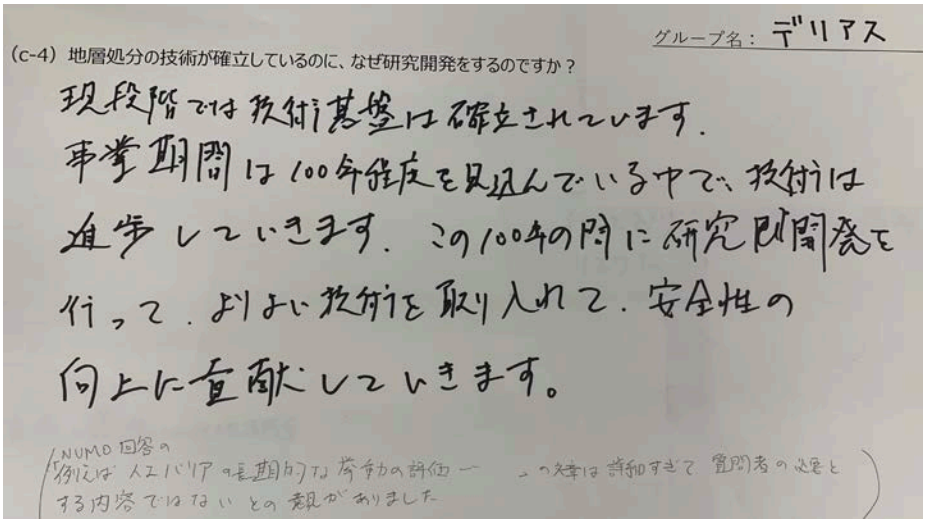
質問	既存 NUMO 回答への意見
(c-1) ガラス固化体を熱源として利用できないのですか？	➢ 発熱量についてケトルなどとの比較を示せばよい
	
(c-2) 地層処分が地上管理より優れている点は何ですか？	➢ 回答に地下深部は人間の生活環境から離れていることを加えたほうが良い



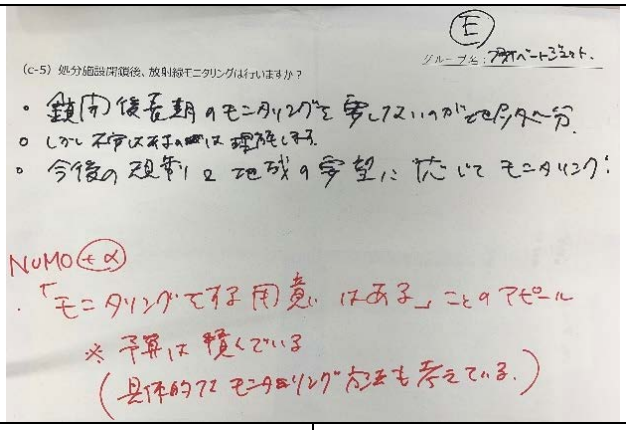
(c-3) 処分場を横切るような断層活動が発生したらどうなりますか？	➢ 回答の方向性は同じ。 ➢ しかし、NUMO 自らが示した 2 つのリスクのうち、1 つには正面から答えていない。 ➢ 結果的に不信感を持たれるかもしれない



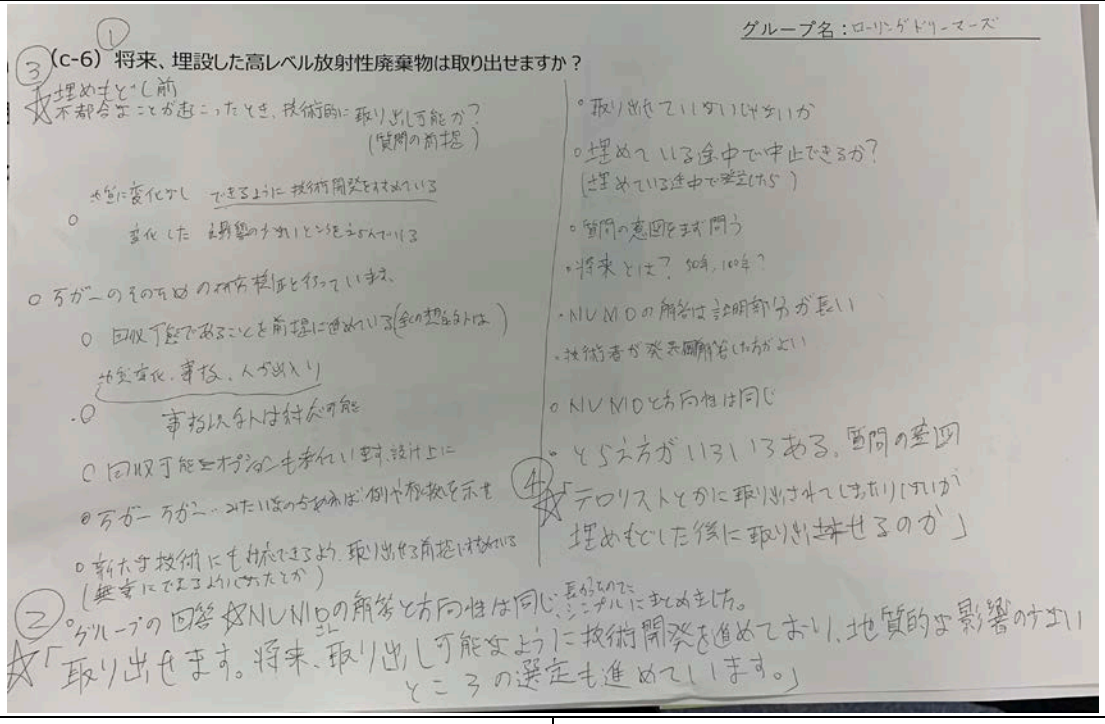
(c-4) 地層処分の技術が確立しているのに、なぜ研究開発するのですか？	➢ 「例えば、人工バリアの長期的な挙動の評価・・・」などの具体的な研究課題については詳細すぎ、質問者の聞きたい内容ではない



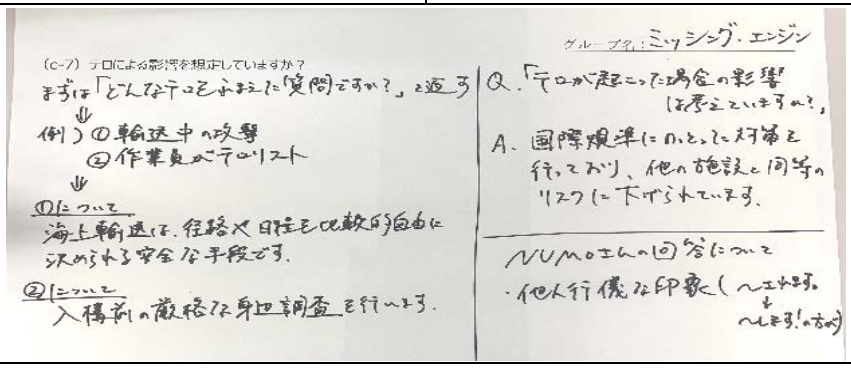
(c-5) 処分施設閉鎖後、放射線モニタリングは行いますか？	➢ モニタリングのための予算は確保しており、実施方法も検討しており、実施する用意はあることをアピールすべき



(c-6) 将来、埋設した高レベル放射性廃棄物は取り出せますか？	➢ 方向性は同じ ➢ 長いのでシンプルにまとめる 例、「取り出せます。将来、取り出し可能なように技術開発を進めており、地質的な影響の少ないところの選定も進めています。」



(c-7) テロによる影響を想定していますか？	➢ 他人行儀な印象 「～されます」を「～します」としたほうが良い



(3) 3 日目（15：00～16：00）のグループワークの結果

最終日のグループワークでは、ワーク③としてセミナーの振り返りを行った。このワークでは、個々の講義ではなく、分野カテゴリ別の全体的な印象を把握すること、モニターにセミナーの振り返りを促すことなどを目的として、モニターがシールをはることで印象を表現するという手法を用いた。グループワークの流れは以下のとおり。

- ◆ 各自が受講のお勧め度をカテゴリ別（①地質環境、②工学技術、③安全評価、④地下水流動演習、⑤特別講演技術コミュニケーション、⑥グループワーク）に投票する（各参加者に 10 票（シール）を渡し、投票用模造紙に自由に投票）（図 3.3-13）。
- ◆ 投票後、グループでカテゴリを一つ挙げ、おすすめ（おすすめじゃない）のポイントを 3 点議論し提示。
- ◆ 各グループ 1～2 分で上記結果を発表

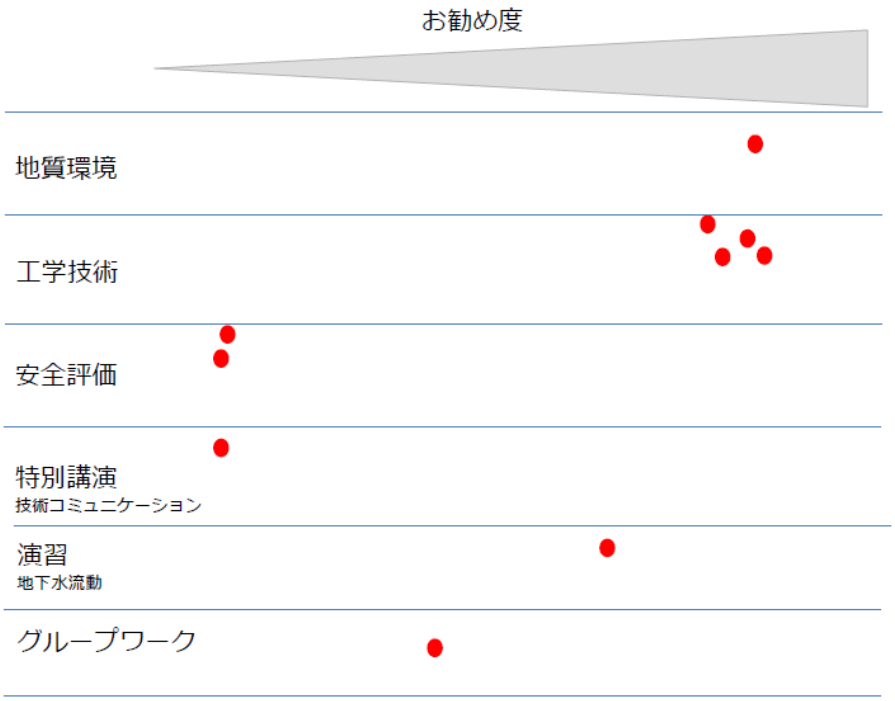


図 3.3-13　ワーク③の実施イメージ

各グループの結果を以下に示す。

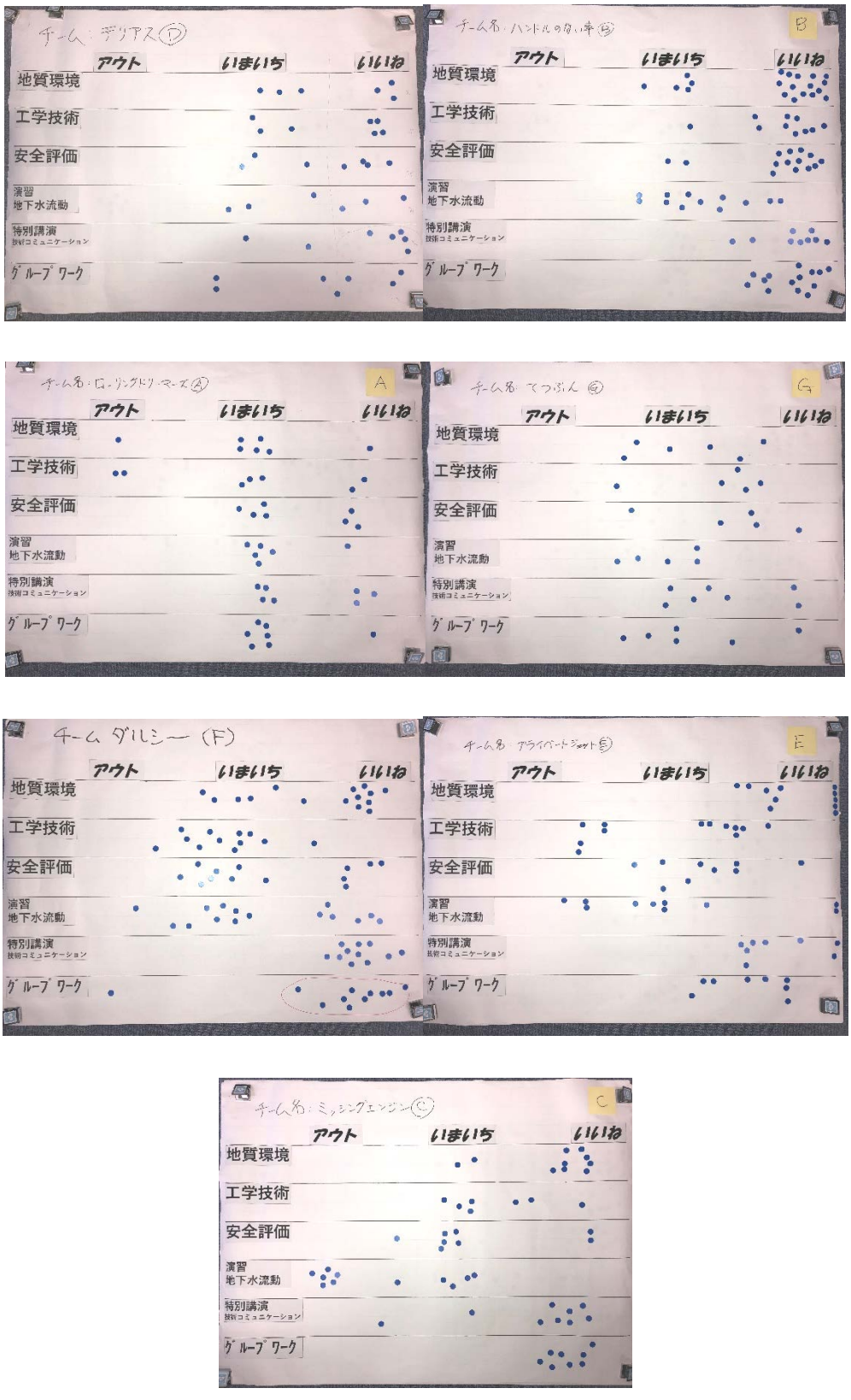


図 3.3-14　ワーク③の各グループの結果

ワーク③の結果は、概ね以下のようにまとめることができる（図 3.3-14）。

- セミナーの各要素に対する評価には、各グループ、またカテゴリごとにかなりばらつきがあるが、完全な否定的な意見は少なく、セミナーとしては多くの参加者にとって有用なものであったと考えられる
- 技術コミュニケーションに関する招待講演及びグループワークに対しては、概ね高い評価が得られたことから、これらのテーマ・内容が、参加者にとっても適切な内容であったと考えられる。
- 地質環境、工学技術、安全評価の 3 分野で言えば、地質環境のおすすめ度が比較的高い結果であった。この結果については、3 分野の講義数（地質環境分野：7、工学技術分野：2、安全評価分野：7）や参加者のバックグランドなども影響していると考えられるが、地質環境分野の講義内容・資料が理解しやすいものであったと考えられる。

3.4 アンケート等の分析

人材育成プログラムの作成、来年度以降のプログラムへの反映のため、アンケートにより今年度の人材育成セミナーに対するモニターの意見を聴取した。全てのモニター（講師を含む）に対して、アンケートを配布し、記入を依頼した。

アンケートは、2020 年 1 月 20 日（月）を期限として、電子メールで回収した。回答者数は、合計で 56 名であった。アンケートの全回答結果は別添資料 4 に掲載した。

以下にアンケートの分析結果をまとめる。

3.4.1 各講義に対するアンケート結果の分析

アンケート結果における各講義の識別を容易にするため、下表に示すように、各講義に ID を付した。また、各講義のタイトルを下表に再掲する。

表 3.4-1 講義プログラムの講義番号

ID	分野	タイトル
Lec01	導入	わが国の地層処分事業の制度・政策・進め方
Lec02		放射性廃棄物の発生と管理
Lec03		地層処分における安全確保の考え方
Lec04	地質環境･調査技術	地層処分に望まれる地質環境と 3 段階の調査 1（3 段階の調査・評価）
Lec05		地層処分に望まれる地質環境と 3 段階の調査 2（地域の科学的特性）
Lec06		調査・評価技術各論-自然現象 1（火山・火成活動、深部流体）
Lec07		調査・評価技術各論-自然現象 2（地震・断層・隆起・侵食）
Lec08		調査・評価技術各論-長期安定性 1（地質・岩盤）
Lec09		調査・評価技術各論-長期安定性 2（地下水）
Lec10		調査・評価事例（幌延を事例とした物質移行調査技術）
Lec11	工学技術	安全確保に向けた処分場設計の考え方
Lec12		建設・操業技術（製造・施工品質の確保、操業安全）
Lec13	安全評価技術	安全評価の考え方と枠組み（前半）
Lec14		線量基準の考え方
Lec15		安全評価の考え方と枠組み（後半）
Lec16		処分場構成要素の変遷挙動
Lec17		核種移行解析モデル
Lec18		核種移行データ・モデル整備とパラメータ設定手法
Lec19		シナリオ構築に資するニアフィールド構成要素の現象理解

(1) モニターの専門分野別の各講義の理解度

モニターの専門分野により、各講義の理解度に差があったか確認するために、モニターの専門分野別の各講義の理解度の平均値の比較を行った。地層処分の主要 3 分野を専門とするモニターの比較のため、3 分野のみを抽出して理解度の平均値の比較を行った。

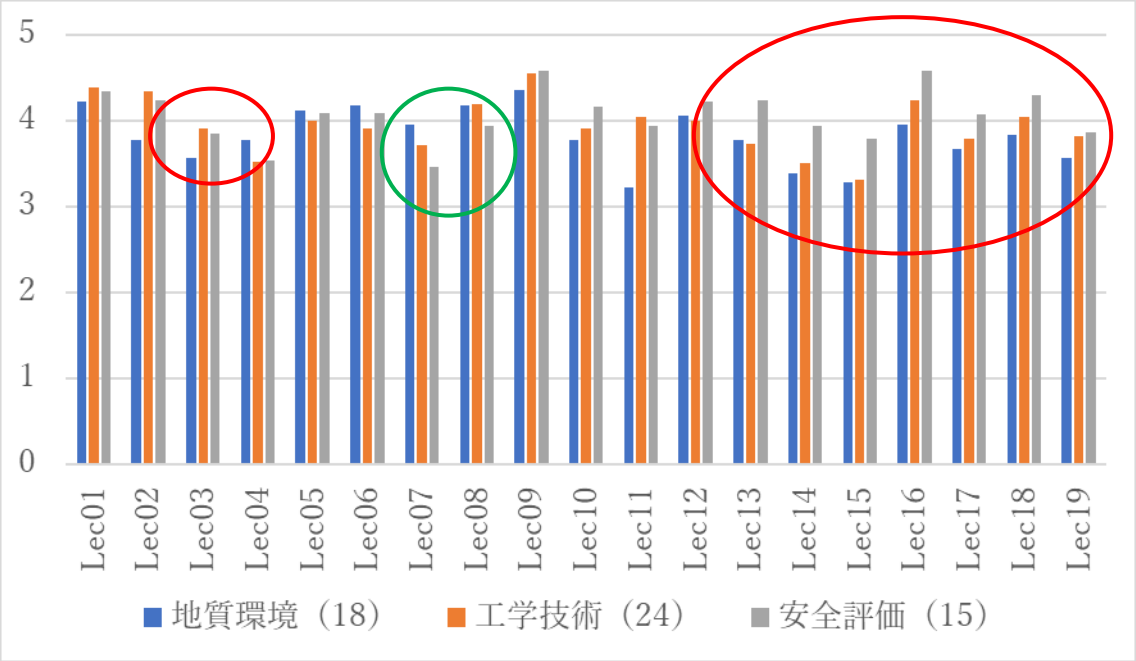


図 3.4-1 各講義の理解度（平均値）の比較（モニターの専門分野別）
専門分野名の後ろのカッコ内の数字は最大の回答者数（講師が自身の講義は評価していないなど各講義で回答者数は異なる）。

専門分野が安全評価分野としたモニターの理解度は、地質環境調査技術分野の講義である講義番号 Lec7 及び Le8 で他の 2 分野に比べかなり低くなっている（図 3.4-1 の緑丸で囲んだ部分）。一方、地質環境分野を専門分野とするモニターは、講義番号 Lec2 及び 3（導入編）、Lec11（工学技術分野）で理解度が他の 2 分野より低い傾向がある。さらに、講義番号 Lec13～16（安全評価分野の講義）では、地質環境及び工学技術を専門とするモニターの理解度が安全評価を専門とするモニターよりも低い結果となった。

(2) モニターの専門分野別の各講義の有用性

次に、モニターの専門分野により、各講義を有用であったと考えたかに差があったかどうか比較するため、モニターの専門分野別に各講義の有用性の平均値の比較を行った。地層処分の主要 3 分野を専門とするモニターの比較のため、3 分野のみを抽出して理解度の平均値の比較を行った。

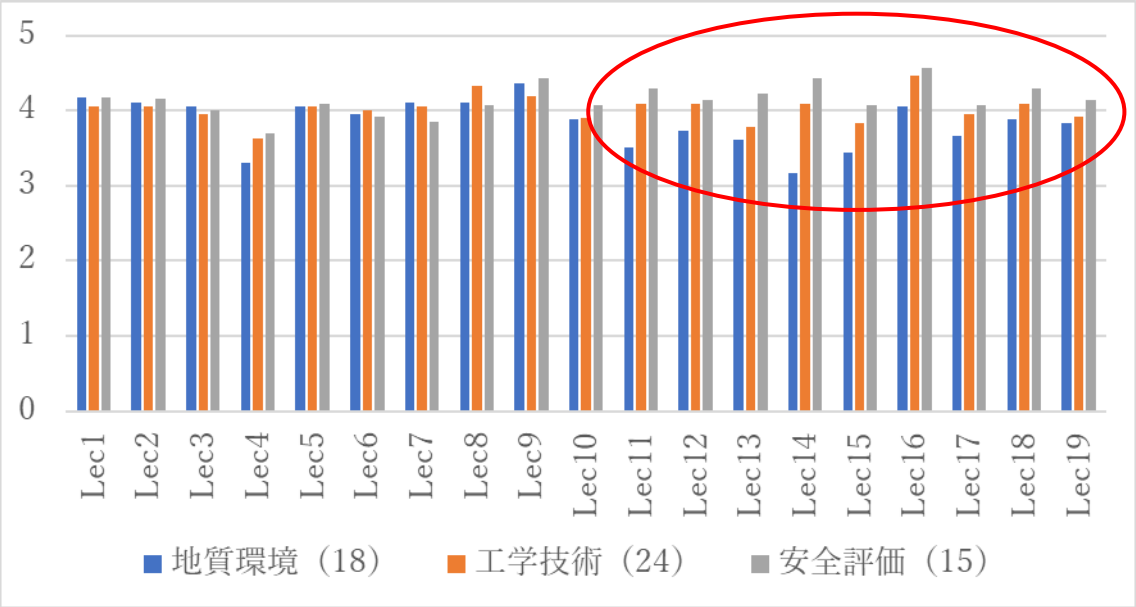


図 3.4-2　各講義の有用性（平均値）の比較（モニターの専門分野別）
専門分野名の後ろのカッコ内の数字は最大の回答者数（講師が自身の講義は評価していないなど各講義で回答者数は異なる）。

平均値を比較した結果、講義番号 Lec11～19（工学技術及び安全評価）にかけて、地質環境を専門分野とするモニターが他の分野にくらべ有用性を低く評価していた。

(3) モニターの将来の目標別の各講義の評価

モニターの将来の目標設定（3.3 参照）により、各講義の理解度に差が出たか確認するために、モニターの目標設定別に講義ごとの理解度の平均値を計算し比較を行った。その結果、講義番号 Lec17～19 について、「全般的に広く浅く理解するジェネラリスト」の理解度が他の 2 つのカテゴリに比べ低い傾向が示された（図 3.4-3）。

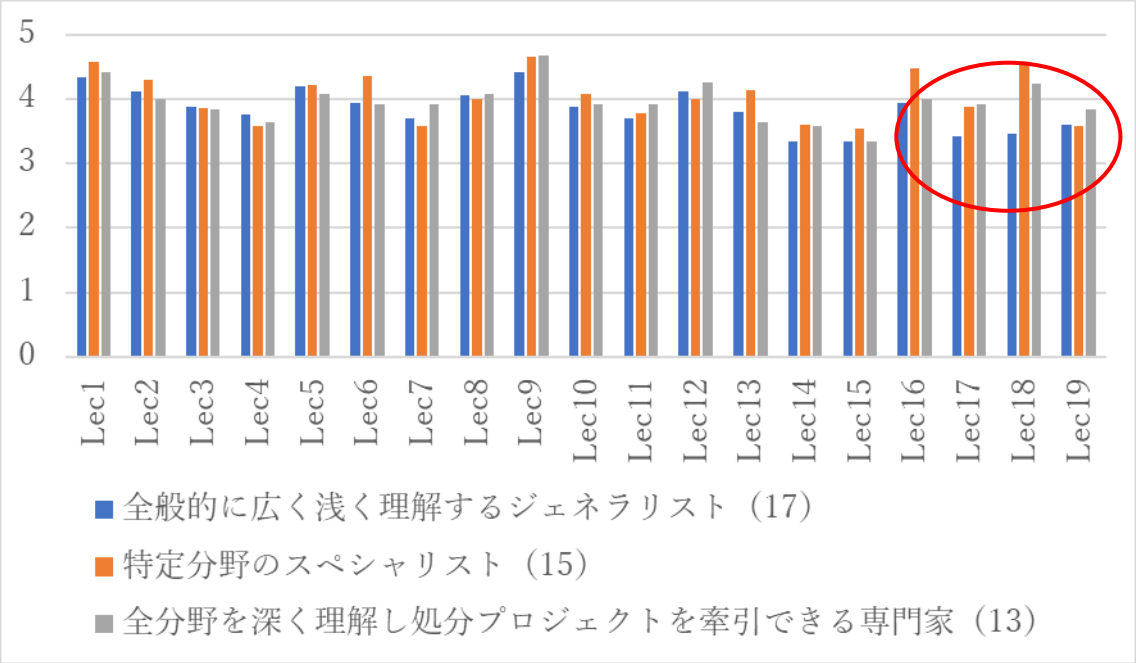


図 3.4-3　モニターの将来の目標別の各講義の理解度
将来の目標の後ろのカッコ内の数字は最大の回答者数（講師が自身の講義は評価していないなど各講義で回答者数は異なる）。

次に、モニターの将来の目標設定別に各講義の有用度の比較を行った。有用度の各カテゴリの平均値に比較的大きな差があるのは、講義番号 Lec05～Lec9、及び Lec17～19 と言える。これらの有用度については、「全般的に広く浅く理解するジェネラリスト」が低く評価していた（図 3.4-4）。

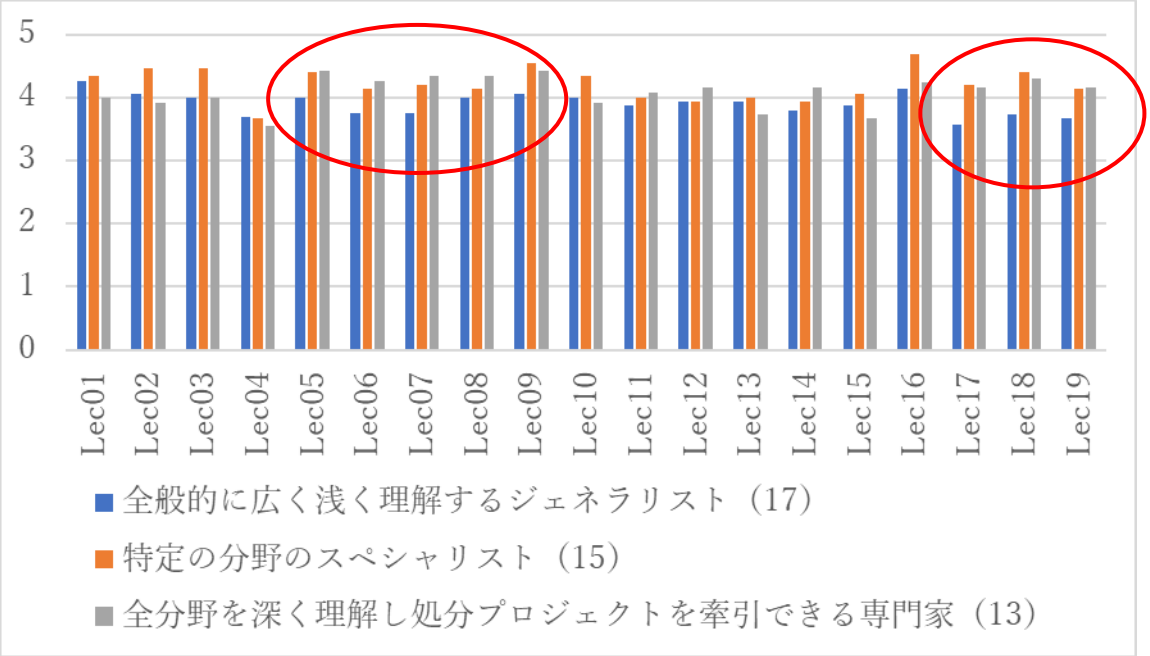


図 3.4-4　モニターの将来の目標別の各講義の有用度
将来の目標の後ろのカッコ内の数字は最大の回答者数（講師が自身の講義は評価していないなど各講義で回答者数は異なる）。

これら 2 つの結果から、特に講義番号 Lec17～19 については、「全般的に広く浅く理解するジェネラリスト」を志向するモニターは、講義をあまり理解できず、かつ、自身にとってあまり有用であると思わなかったことが示唆される。このことは、これら 3 つの講義の内容が、全般的に広く浅く理解するジェネラリストを育成するという観点では、専門的すぎた（難しかった）可能性がある。

3.4.2 人材育成セミナーに対する意見の分析

アンケートは、人材育成セミナー全体に対する質問、人材育成セミナーの振り返りの質問、各講義の評価・質問、グループワーク、招待講演及び演習に対する質問に分かれていた。これらのうち、特に来年度以降の人材育成プログラムの作成・セミナーの実施に反映可能な事項を取り上げ、特徴的な回答などを抜粋し、以下に示す。

(1) 人材育成セミナー全体への意見の分析

a. 人材育成セミナーに対する満足度

アンケートの設問「今回のセミナーでは事前に期待していた内容・テーマがカバーされていましたか」に対する回答では、以下のように、90%以上のモニターが肯定的な答えを示していた（図 3.4-5）。このことは、モニターのほとんどが今回のセミナーの内容には概ね満足していたものを言える。

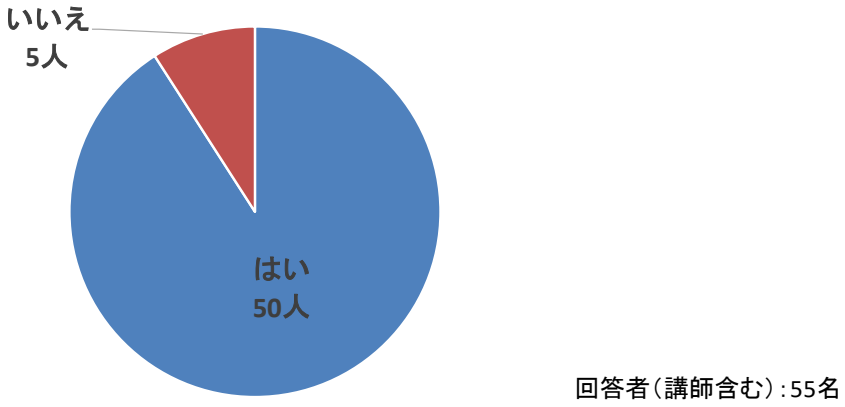


図 3.4-5 「セミナーに事前に期待していた内容・テーマが含まれていたか」との問いに対する回答

ただし、「いいえ」と回答したモニター5 名いた。これらの 5 名の意見を以下に示す。

- 知識を習得するためだけの座学は求めていない。求めるものが違っていた。
- 工学技術や安全評価の部分については、概ねカバーされていたと感じるが、地質環境調査の部分が地質に偏っており、水理や化学、力学などの紹介が薄いと感じた。
- 現地入りしてから気づいたのですが、放射線の基礎知識に関する講義が抜けています。この知識がないと、なぜ放射性核種が生活圏に出てきては困るのか、どの程度の被ばく線量なら許容されるか（どのように線量の基準値が設定されているか）が理解できないような気がします。あわせて、主要核種については、化学的・放射線学的挙動の紹介があったほうがよかったように思います。
- もう少し政策決定の背景や、それにもとづく各プロジェクトの関係性や内容について話してほしかった。
- 地質分野：自然現象等の評価手法（地層処分にとって好ましくない場所をどのように

回避するのか）に関する内容があまりなかったように思う

b. セミナー全体に対するアンケートの質問の分析

3.2.2 で示したように、今回の人材育成セミナーのアンケートでは、セミナー全体の改善に資するための設問である、セミナーの内容、進め方、構成等に対する質問、及びセミナー受講後のモニターの関心に関する質問を用意していた。これらの質問から来年度以降のセミナーの内容への示唆を得るため、以下に主な回答などをまとめる。

表 3.4-2 アンケートの質問と回答例 1
括弧内は回答者の専門分野と経験年数

質問	講義の内容をより理解できるようにするためには、講義のやり方、講義資料などをどのように改善したらよいと思いますか。
回答	➢ セミナーの方向性を明確に示す（文書で示す）（地質環境、25 年） ➢ コンテンツについてもっと練る必要性。欠けている項目、正しくない内容もある。プログラムを練ってから教材を集めるべき（地質環境、26 年） ➢ 対象者のレベルを絞る。講義により難易度に差がある（工学技術、2 年ほか） ➢ 地層処分分野全体の枠組みを図示しておいて、「その枠組みのどの部分をどの視点から話すのか」を明確にして頂けると、少しわかりやすくなるかなと思います（工学技術、2 年） ➢ 講義の課題を絞ることが必要。短時間で多くの内容を詰め込みすぎる（地質環境、17 年） ➢ 事前に講義資料を予習した上で受講したい（地質環境、1 年ほか） ➢ 講義だけでは飽きるので、手を動かすことも（演習）を加える（工学技術、1 年ほか） ➢ 演習やグループワークが有効（地質環境、10 年/その他、20 年） ➢ 講義時間が長いので休憩を多くしてほしい（安全評価、9 年ほか） ➢ スライドの情報量・文字が多すぎる資料がある（広聴・広報、4 年ほか） ➢ 2 泊 3 日かつ夜 21:30 までというのは、ボリュームが多すぎると感じた（地質環境、1 年）

表 3.4-3　アンケートの質問と回答例 2
括弧内は回答者の専門分野と経験年数

質問	今回のセミナー全体を受講した結果、あなたはこの分野において成長したと思いますか。
回答	➢ 全体的な知識の向上になったと思う。特に地質調査や安全評価などはあまりなじみのない分野の知識を講義によって知ることができたことはより成長できたと思う。（工学技術、1 年） ➢ 安全評価技術については、具体的にどのようなことをするのかを教えていただき、大変役にたちました。（地質環境、3 年） ➢ 地層処分全体の概要を把握することができた。（地質環境、10 年/その他、20 年） ➢ 地層処分事業・研究に関連する幅広い分野の知識・情報を得ることができる良い機会であった。（安全評価、25 年） ➢ コミュニケーション理論の基礎の基礎を学べた点（地質環境、5 年） ➢ 地質環境に比べて、工学設計や安全評価については相対的に講義の内容も難しく、時間もタイトだと感じた。（地質環境、17 年） ➢ 最終的に地層処分事業が信頼を得られるかどうかは安全評価についてどれだけ適切に伝えることができるかにかかっていると思うので、もう少し、安全評価にウエイトを置いてもよいと思う。 （地質環境、17 年） ➢ 今回のセミナーについては、技術者でないものにとってかなり難解であった。講義では一部の内容で、分野外の人でも理解できるように丁寧な説明をする講師もいたが、全体的に専門家が同じ分野の専門家を相手にしているような状況だった。（その他、7 年）

表 3.4-4 アンケートの質問と回答例 3
括弧内は回答者の専門分野と経験年数

質問	地質環境調査技術、工学技術、安全評価技術の各分野で全体を振り返っての気づき、役立った点、改善すべき点を教えてください。
回答	＜地質環境調査評価技術＞ ➢ 今回のセミナーでの個別の講義はいずれも質の高いものであったが、分野全体としての構成の検討は不十分であり、内容の重複も多かった。（安全評価、25 年） ➢ 地質や地下水の調査から SDM の作成までの手順を知ることができ、この分野の理解を深めるのに役立った。（安全評価、9 年） ➢ 人材育成セミナーの講義として、専門外の人に向けた難易度の講義になっており、図や実例を活用した説明で理解し易かった。しかし、演習の時間がもう少し長いとよかった。 （工学技術、2 年） ➢ 全体的に基礎的な内容が多く、わかりやすい構成になっていたと思う。一方で、地質学概論のような講義になっていて、地層処分事業において、まだ現在の研究結果や技術では明らかになっていないところはどこで、今後、期待される技術や将来の方向性が示されるとよかったと思う。（地質環境、17 年） ＜工学技術＞ ➢ 地層処分の設計に関する考え方が分かりやすく整理されており、包括的技術報告書では理解できなかった点がわかりました。特に動画は情報量が多く、新たに気が付いたこともあり勉強になりました。（広聴・広報、2 年） ➢ 情報量が講義時間に対して過多に感じた。もう少し時間を長くとるとともに、各トピックを掘り下げても良いように感じた。 （工学技術、20 年/安全評価、20 年） ➢ SDM との関連性や他の分野との連携、今後、期待される技術や将来の方向性が示されるとよかったと思う。（地質環境、17 年） ➢ 工学の設計は、設計要件が整理されているが、専門用語が非常に多く、専門外の方には理解できない。（工学技術、7 年） ＜安全評価技術＞ ➢ 最初に安全評価の概要が紹介されたことは、その後の講義を理解する上で役立ちました。（地質環境、18 年） ➢ SDM を介した分野連携という観点からは、母岩中の核種移行の評価手法、評価モデル構築手法の講義が重要であると考えます。（安全評価、25 年） ➢ 重要な内容なので、講義時間（質疑時間）が大きく不足していたと感じました。（地質環境、25 年） ➢ 3 つの分野の中では相対的に、難しい内容の講義が多く、資料も改善が必要だと感じた。 （地質環境、17 年） ➢ 専門的な内容を簡単に伝える難しさを感じました。地質や工学がどのように関連するのかがわかるとセミナーのまとまりがあるのかなと思いました。 （工学技術、1 年/安全評価、4 年）

(2) 招待講演「「技術と社会」の関係認識から技術コミュニケーション」の狙い、アンケート結果と評価

ここでは、招待講演「「技術と社会」の関係認識から技術コミュニケーション」の実施の狙い、アンケート結果、それらを受けての当センターとしての評価結果を示す。

今回の人材育成セミナーにおいて、この招待講演を実施した狙いは、地層処分事業における一般の方などとの対話の重要性を理解すること、また、処分事業において対話の相手となる一般の方は、さまざまなバックグランドを持っており、それらの異なるバックグランドを有す人との異文化コミュニケーションの枠組み（特徴、留意すべき点）を学ぶことであった。

モニターからの招待講演に対するアンケート結果では、講演の中で出てきた対話における「傾聴」の重要性、相手の立場や思いを理解することの重要性を理解したといった意見が非常に多くあった。また、地層処分に対する社会の信頼・理解を得るための研究者・技術者の役割について、専門的な知見から誠実に正確な情報を提供するなど、研究者や技術者の立場からの役割を果たしていくことが重要であると理解したことが示されていた。一方で、少数意見ではあるが、傾聴についても使い分けが重要であり、どういった条件の時に有用であるかを説明すべきであったといった意見も見られた。こういった意見は、時間の関係で今回の講演がステップ４まであるうちのステップ 3 程度までで終わったことも関連している可能性もあり、講義時間の延長、また、講師との演習・ディスカッションの時間をより長く設けることでさらに講義内容に対する理解が進むことが期待できる。

「傾聴」の重要性の理解、対話の重要性の理解など多くの意見ではコミュニケーション、傾聴や対話の重要性を理解したことが示され、概ね、当初の狙い通りの結果が得られたと考えられる。

今後は、ステップ３以降の話を中心とした講義・演習を実施することを検討する。

表 3.4-5　招待講演「「技術と社会」の関係認識から技術コミュニケーション」の狙いとアンケート結果、及びその評価のまとめ
括弧内は回答者の専門分野と経験年数

狙い	地層処分事業での一般の方、社会との対話の重要性を認識し、異なるバックグランドを有す人との異文化コミュニケーション・技術コミュニケーションの枠組みを理解する
回答（抜粋）	➢ 対社会コミュニケーションにおいて、研究者・技術者がおちいりがちな傾向を的確に指摘されており、私自身にも思い当たることが少なくなかった（安全評価、25 年） ➢ 傾聴が大切。相手の意図を確認しながら回答することが重要（工学技術、3 年） ➢ 現在そしてこれからは,「コミュニケーションの専門家でなくても，コミュニケーションの勉強をする必要がある」時代だということ（地質環境、1 年） ➢ 一般の人に対し、専門用語を使って説得するやり方は不適切で、まずは「傾聴」が重要であるという点が印象的であった。講師である北村先生の長年のご経験が凝縮した実りある講義であったと思います(工学技術、2 年/安全評価、7 年） ➢ 様々な意見を持つ方々とのコミュニケーションの難しさとその対処方法の事例について、実際のご経験に基づいたお話が印象に残りました（地質環境、10 年/その他、20 年） ➢ 実体験に基づいた話の進め方。一方で、利益優先で生じた民間企業における技術者の不祥事と国の事業における技術者の不祥事を混同して話すことについては疑問を感じた（地質環境、17 年） ➢ ”傾聴”や”技術革新の不連続”の話をされていたときは、ずいぶんと極端な話をしているように感じました。傾聴については、使い分けが重要であり、どういった条件の時に有用であるかを説明すべきであったと思います（安全評価、2 年） ➢ 個人的には講演の続きが気になるので、何らかの機会にもう 1 度お話を伺えると幸いです（広聴・広報、2 年）
評価	上記の例だけでなく、多くの意見ではコミュニケーション、傾聴の重要性を理解したことが示され、概ね、当初の狙い通りの結果が得られたと考えられる。 今回の続き・演習を含む、講演（実践編）を実施する方向で検討を行う。

(3) 演習 :「サイトのモデリング」の狙い、アンケート結果と評価

3.3 に示したように、今回の人材育成セミナーでは、資源エネルギー庁事業「平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地等処分技術に関する調査等事業（沿岸部処分システム高度化開発)」のデータを用いた演習を実施した。

この演習は、講義による知識の習得だけでなく、実際に手を動かし、作業をする時間を設けること、また、地質環境分野が専門ではない参加者に、サイトモデリングの演習を行うことで、地質構造部などの作成方法や読み方についてもイメージを持ってもらうこととしていた。

難易度の評価については、容易であったとするモニター、難しかったと評価したモニターなど様々であった。モニターの専門分野にも依存した結果と考えられる。

演習で使用したソフトウェアのインストールの問題、パソコンのスペックの問題などがあり、全てのモニターが十分に参加できなかった点は、事前準備や連絡が足りなかったためであり、事務局としての反省点である。ただし、3 次元で可視化してサイトのモデルを見ることができたことが良かったとする意見は複数あり、また、下表に示したように他分野を専門とするモニターがさらに学んでみたいと思ったことなど、ある程度の成果があったと言える。

表 3.4-6　演習「サイトのモデリング」の実施の狙いとアンケート結果、及びその評価のまとめ
括弧内は回答者の専門分野と経験年数

狙い	座学による講義だけでなく、手を動かす演習を組み込みこむ。また、地質分野になじみのない参加者に、サイトモデリングのデモ的な演習を通じて地質構造図などの作成方法や読み方についてのイメージを持ってもらう
回答（抜粋）	➢ 講演者が SDM と概念モデルの定義を誤解していた（地質環境、25 年） ➢ 講義時間に対して手を動かす時間が足りない（安全評価、25 年ほか） ➢ ビューアで三次元で可視化して見ることができたのは良かった（地質環境、10 年/その他、20 年） ➢ ソフトウェアのインストールがスムーズに出来なかった。PC のスペックによりインストールできなかった(工学技術、2 年/安全評価、7 年ほか) ➢ 演習と言いながら講義が半分以上で効果が薄い（地質環境、4 年） ➢ 演習はやや消化不良であったことは事実であるが、さらに詳細に学んでみたいと思った。SDM をどのように作っているのか、データの提供のためにどのような作業が必要であるか、データがどのくらいの確度で提供されるかを学ぶことで工学技術の側から欲しいデータとのミスマッチが少なくなるようにしたいと思う（工学技術、2 年） ➢ さらに深く学びたいと思います。具体的には、地質図の読み方、地質図から三次元地質モデルの作成、沿岸域の隆起・沈降のメカニズムなどです（工学技術、7 年） ➢ Geo-graphia® を使った演習は分かりやすくて良かった(工学技術、2 年/安全評価、7 年)
評価	三次元構造図などの作成についてはイメージを持ってもらえたなどの一定の効果もあったが、全体的に事前の調整不足 60 人規模の一般向け演習としては、パソコンのスペックなどの事情で難しさがある。少人数、専門向けコースとしては有望 一般向けコースの演習内容については代案の検討が必要。

(4) グループワークの狙い、アンケート結果及び評価

今回の人材育成セミナーでは、3 日間の日程中の各日にグループワークを実施した（詳細は 3.3.4 参照)。3 日間のグループワーク全体としての事務局の実施の狙いは、異なるバックグランドを有す参加者との間で対話・議論を行うことで、バックグランドの違いによって多様な意見があることを認識してもらうことであった。

グループワークに対するアンケート結果では、技術コミュニケーションに関する招待講演の内容を受け、分野の異なる人の間での傾聴の姿勢の重要性が理解できたこと、グループ内での意見の統一の難しさを認識したことなどが示されており、当初想定していた目的

（狙い）がある程度達成できたものと考えられる。

一方で、グループ内での議論において異文化を感じなかったとの意見も複数あった。今回のセミナーのモニターは、所属機関において地層処分事業に関わっており、このことが異文化と感じられなかった要因である可能性がある。特に、今回のグループワークの主要な取組みであった 2 日目のグループワークでは、NUMO の「よくある質問」を題材に議論を行った。このことが地層処分という共通のバックグランドが反映された結果となった可能性もある。

この他に、グループワークにおけるファシリテータの重要性を指摘する意見も複数あった。今回、事務局及び NUMO からの参加者が各グループにファシリテータとして参加したが、大半がファシリテータとしての訓練を受けたことがなかったため、グループ内でうまく議論を回すことができなかった場合もあった。

表 3.4-7　グループワークの実施の狙いとアンケート結果、及びその評価のまとめ
括弧内は回答者の専門分野と経験年数

狙い	異なるバックグランド（所属、専門性、年齢など）を有す参加者との間での対話・ディスカッションを経験すること、参加者により多様な意見があることを認識する
回答（抜粋）	➢ 題材としてはよく練られており、この分野の初心者でも取り組める課題であると同時に、経験者でも長い時間熟考したり議論したりすることが必要な点は、グループワークの趣旨に合っていたと思う（地質環境、4 年/工学技術、1 年/安全評価、20 年） ➢ 数人のグループワークでも意見を完全に統一することは難しいと感じた（安全評価、6 年） ➢ 傾聴の姿勢は、分野の異なる人同士では、とても重要だと感じました（工学技術、1 年） ➢ 比較的属性が近いと思われる受講者（グループメンバー）でも、考え方や意見に相違があることを再認識した（安全評価、25 年/その他、5 年） ➢ 地層処分にかかわる研究者が多くを占めていたため、あまり異文化を感じることがなかった（地質環境、10 年ほか） ➢ 各グループのファシリテータの力量にもかなり差があり、積極的にファシリテートし議論を回せる人とそうでない人がいた(その他、7 年)
評価	バックグランドの異なる人の間で、様々な意見があることを理解することはできたと考えられ、概ね、当初の狙い通りの結果が得られた。 ただし、ファシリテータの技術が十分でなかったため十分な議論ができなかった点があるとともに、参加者全員は地層処分に関連した背景を有しているため、必ずしも「異文化」とならなかった可能性がある。

3.5 外部有識者による評価

今年度の外部有識者による評価の一環として、招待講演を依頼した、東北大学名誉教授北村正晴先生（現テムス研究所所長）に、3 日間を通してセミナーに参加してもらい、グループワークやその他セミナー全般に対する評価を依頼した。以下にその評価結果を示す。

① 「コミュニケーション」への着眼：

今回のセミナー実施にあたり、「対社会コミュニケーション」の重要性に着目し、セミナー内容に組み込んだことは、時宜を得た判断と評価する。技術開発が無条件に肯定されていた 20 世紀前半までに比べると、現代社会には、技術への不安・不満が溢れている。この時代に、対社会コミュニケーションに真摯に取り組まない技術セクターは、社会から否定的評価を受け、退場を余儀なくされる事態さえ起こりうる。

② 「コミュニケーション」のセミナーへの取り込み方：

「コミュニケーション」に関する今回の試みは、初回であったことも勘案すると、まずは妥当な形で実施できたと考える。しかし将来的には、「コミュニケーション」を独立テーマとしてではなく、講演された主要なテーマについて、「このテーマの内容を一般の社会人にわかりやすく伝えるには、どのようなやり方が考えられるか」という設定で、講演者、聴講者がグループ討論するようなやり方も検討されて良い。（このやり方は、マイクロインサーションとして、よく知られている）

③ グループワークとファシリテータ：

一方的な受講でなく、グループワークの時間を設けられたセミナー設計は、妥当なものと高く評価する。ただし、グループワークの成否は、ファシリテータの能力に依存するところ大である。

より高いレベルを目指すのであれば、ファシリテータのやり方の相互バラツキを減らすための事前打ち合わせ（15 分もあれば良い）があればより良かった。

④ グループワークの素材の提供：

講義 03 の講師の方には、ご自身の講義資料をグループワークの素材にご提供いただいた。いろいろ批判的なコメントを受けることを覚悟の上でのご提供と考える。深く感謝したい。

なお、このような姿勢は、①でも述べたように、これからの研究者、技術者にとって不可欠なものと考える。

⑤ セミナーの構成：

このテーマでのセミナーや講習会のテーマ構成は、以下のような順序で構成されていることが多い。

(1) 地質環境・調査技術

(2) 処分場の設計

(3) 安全評価

しかし、地層処分に懐疑的な市民（ならびに専門家）の多くは、「(3) 安全評価」のあり方に様々な疑問を持っていて、そこを出発点として議論を展開する場合も少なくない。その経験からは、まず(3) についてごく簡単に説明し、次いで、(1)→(2)→(3) （改めて詳しく）という流れでの説明をする、というやり方が、専門家向きのセミナーであっても試行されても良いのではないかと感じた。

3.6 今後に向けて-アンケート等の分析・結果等の反映について-

人材育成プログラムの作成に向け、今後の方向性を検討するため、まずは、地層処分や放射性廃棄物処分に関する既存の人材育成に関連したセミナーやプログラムとそれらの対象とする人物について整理する。そのうえで、今年度のセミナーのアンケート結果や有識者の評価結果の来年度以降のセミナーへの反映等の検討事項をまとめる。

3.6.1 人材育成プログラムの方向性について

今後の人材育成プログラムの方向性を検討するため、地層処分に関する人材のキャリアパスのイメージを図示（図 3.6-1）するとともに、講義や研修会などの既存の人材育成プログラムとの関係などを整理した（表 3.6-1）。

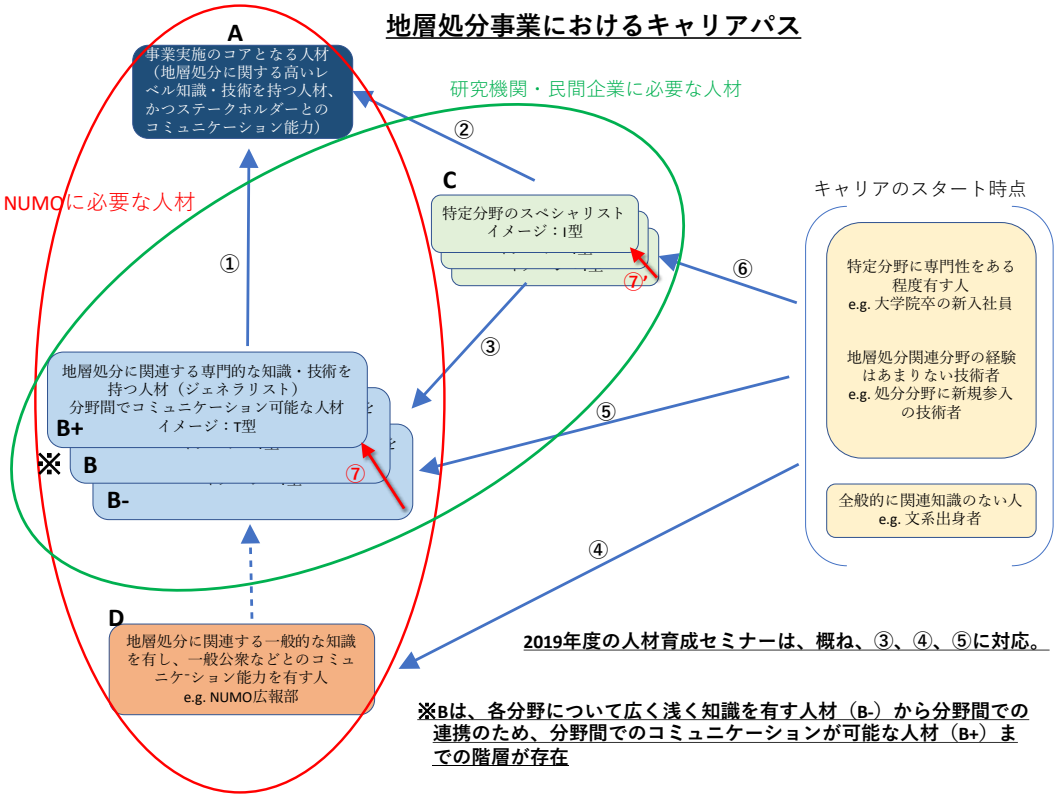


図 3.6-1　地層処分におけるキャリアパス

表 3.6-1　放射性廃棄物処分に関する国内外の既存人材育成プログラム等
※必ずしも 3 分野を対象としたものではない

	構成	対象	活用
オープン教材の作成・活用による実践的原子力バックエンド教育	専門教育コース・講義 基礎教育コース・実験 専門教育コース・実験 施設見学 フィールド実習 国際セミナー	高専生・大学生・社会人	③④⑤ ※
原子力学会バックエンド部会週末基礎講座	講義 施設見学 グループディスカッション	学生・新規参入者からあらためて知識の確認をする人	③④⑤ ※
原環センターセミナー ※安全評価分野	放射性廃棄物処分の安全評価の基礎 I	安全評価の入門的知識を基礎から習得したい技術者・研究者向け	③⑤
	放射性廃棄物処分の安全評価の基礎 II	安全評価の基礎知識を持ち、それを深めたいと考えている技術者・研究者	③⑤
	放射性廃棄物処分の安全評価の基礎 III	安全評価の基礎的知識を持ち、これを更に深めたいと考えている技術者・研究者	③⑥
産総研・ジオスクール ※地質環境調査分野	地質調査研修 地形判読実習 鉱物肉眼鑑定研修 地震・津波・火山に関する自治体職員用研修プログラム	企業・自治体職員・大学関係者	③⑥
JAEA　原子力人材育成センター	「原子力エネルギー技術者の養成」の一つの講義：放射性廃棄物管理	原子力関係業務従事者又はこれから従事される方	④
E-learning: IAEA Spent Fuel and Radioactive Waste Management, Decommissioning and Environmental Remediation Curriculum, Course on Geological Disposal	E-learning (ウェブ上での講義、確認のテスト)	若手、及びこの分野への新規参入者	③④⑤
IAEA Training Workshop on Planning and Implementing Site Investigations for Geological Disposal ※サイト調査	講義・参加者（講師）間でのディスカッション	処分実施主体、規制機関、技術支援機関、大学等の若手専門家	③⑤⑥
SKB, SKB・SKB Int. 「地層処分技術研修スクール」	講義	実施主体、規制当局、処分技術関連企業などに所属し、安全評価、人工バリアの開発、処分場設計等の分野で数年の経験ある方々	③
既存パンフレット等による学習（OJT等）	印刷物	若手、及びこの分野への新規参入者	④

整理結果から、既存の人材育成を目的としたプログラムで必ずしも対応できていない部分のうち、本事業の仕様（対象範囲）である、ジェネラリストの育成を考慮に入れ、以下について、来年度以降のセミナー等の企画を検討する。

- 地層処分に関連する専門的な知識・技術を持つ人材（ジェネラリスト）のレベルアップを目的としたセミナー・演習（図 3.6-1 の B+の人材育成、主に⑦に対応、以下、上級編という）
- ジェネラリスト育成を目的とした全分野を対象としたセミナー（2019 年度実施のセミナーのイメージ）（図 3.6-1 の B-の人材育成、主に③～⑤に対応、以下、初級編という）

以降では、今年度のセミナーでのアンケート結果等を踏まえた改善点等をまとめた。ただし、今年度のセミナーが上記の初級編に相当するため、アンケート結果の反映先は、主に初級編のセミナーが主となっている。

3.6.2 セミナーの運営関連の改善点等

日程やスケジュールを含むセミナーの開催・運営に関連した事項で、今後反映することを検討すべきと考えられるものには、以下などがある。

① 講義時間を短くする、休憩時間の頻度・時間を増やす。講義内容・範囲を縮小する。
② 各日の講義・プログラム等の終了時間を早める
③ 受講者のレベルを分ける
④ スライドの情報量を少なくする（文字サイズを大きくする）
⑤ 演習等を多くする
⑥ 事前に教材を配布しモニターに予習を促す

今年度のセミナーでは 2 泊 3 日で、夜までグループワークを行うスケジュールで開催したが、上記のうち、①及び②については、モニター（受講者）の講義等への集中力を維持し、学習効果の向上につながると考えられる。ただし、実現のためには、セミナーのプログラム構成の見直し、特に、各分野の講義のうち、中心的なもの（基本的なもの）に絞るなどの対応が必要である（この点については後述）。

③については、今回、対象者を比較的地層処分分野の従事経験の少ないものと設定しセミナーを準備したが、実際には、講師を含め地層処分分野でのある程度の従事経験を有すモニターも含まれていた。セミナーの規模を縮小し、モニターに関しても専門分野別にするなど、上記の講義の内容を絞ることと連動したセミナーのスリム化が必要であるかもしれない。

④については、今回、各講師に対して、スライドで用いるフォントサイズを 20pt 以上にするよう依頼はしていたが、必ずしも徹底はされていなかった。今後のセミナーでは各講師がこの原則を順守するようにする必要がある。

⑤についても、今回のセミナーでは、演習を組み込んでいたが、実際には演習時間のうち、大半は講義であった。この点については、今後のセミナーでは実際に手を動かす演習を多く組み入れることでセミナーの効果を上げることを検討する。

今回のセミナーのアンケートでは、事前に講義資料を予習したうえで受講したいとの意見も複数あった。講義資料を早めに準備する必要があるため、実現のためには講師の協力も必須となり、難しい可能性もある。しかし、講義の内容を一般化することで、特定の講師でなくとも講義ができるようにする、またそのための講義資料を準備することで、対応可能になると考えられる。

3.6.3 セミナーの内容、構成等に関する改善点

(1) 各分野の講義の構成・内容について

今回の人材育成セミナーでは、19 コマの講義のほかに、グループワーク、技術コミュニケーションに関する講演、サイトモニタリングに関する演習で構成されていた（表 3.4-1 参照)。また、19 の講義は、（１）導入編、（２）地質環境調査技術、（３）工学技術、（４）安全評価技術の分野で構成されており、この順で講義が行われた。

外部有識者の評価においても、公衆にとって最も関心のある安全に関する分野であることから、講義の順番として、安全評価技術分野を最初に持ってくる提案がなされた。また、地質環境及び工学技術の分野は、最終的には安全評価に反映されるものであり、安全評価の内容をまず講義することで、地質環境や工学技術の内容・技術が安全評価のどこに反映され、どのように活かされているのかより良く理解できる可能性がある。

また、講義日程・スケジュールとの関係などから、各分野の中心的な講義に絞り実施することも検討する。内容としては、今年度のセミナーで行った講義のうち、「安全確保の考

え方」、「地質環境特性と三段階調査」、「処分場設計の考え方」、「安全評価の考え方と枠組み」などを含むようなものを検討する。さらに、基本的な内容などの講義が含まれなくなる可能性も考えられるため、既存のプログラム（表 3.6-1）の活用・連携も検討する。例えば、原子力学会バックエンド部会の週末基礎講座と共同で開催することで、講義内容の切り分け・分担などを行うことができると考えられる。

さらに、今年度のセミナー（幅広い知識の習得を企図）と、来年度のセミナー（講義を中心的なものに限定し、モニターの思考力・応用力の育成を企図）について、その結果等の対比を行うことで、セミナープログラムの最適化を図る。

(2) 講義の難易度・対象について

講義の構成・内容とも関連するが、各講義に対するアンケート結果（3.4.1 参照）で明らかとなったように、今回のセミナーでの講義内容の一部は、各分野を広く浅く理解するジェネラリストにとっては、難易度の高いものだったと考えられる。特に、安全評価分野の内容は、各分野を広く浅く理解するジェネラリストを志向するモニターは、理解度・有用性ともに低く評価していた（3.4.1 参照）。このことから、各分野を広く浅く理解するジェネラリスト育成を主たる目標とするプログラム開発のためのセミナーを開催する場合には、特に安全評価分野の内容をより基本的なものに変更する必要がある。このことに関連し、受講者のレベルをより統一するため、専門分野や事業への従事年数に対応したセミナーを開催することも検討する。

(3) 技術コミュニケーションに関する講演及びグループワーク

今回の人材育成セミナーでは、地層処分事業での一般の方、社会との対話の重要性を認識し、異なるバックグランドを有す人との異文化コミュニケーション・技術コミュニケーションの枠組みを理解することを目的として、技術コミュニケーションに関する招待講演を行った。また、招待講演と連動し、異文化コミュニケーションを実際に体験するために、グループワークを実施した。

技術コミュニケーションに関する講演に関しては、前述のように、ステップ 4 までで構成されるにもかかわらず、時間の関係からステップ 3 までを範囲とした。アンケート結果でも、最後まで聞きたいとの意見もあり、来年度以降のセミナーにおいて続きの講演を行うことを検討する。また、グループワークでは、アンケートの複数の意見で、ファシリテ

ータの重要性が示唆された。また、外部有識者による評価でも同様のコメントがあった。そのため、次年度以降のセミナーにおけるグループワークにおいては、ファシリテータとして専門的な知識や技術を持つ人材の活用することを検討する。ただし、ファシリテータとして専門的な知識を持った人材が必ずしも地層処分に関して精通しているわけではないため、この点には注意が必要である。また、ファシリテータの間で、事前にグループワークの進め方の確認、予行の実施などを行うことで、ファシリテーション技術の向上や注意点の共有など行うことができ、より効果的なグループワークの実施が可能となると考えられる。

また、今年度のセミナーでは、図 3.6-2 に示すように、各講義は講義と質疑で構成されていた。モニターをより能動的に参加させる試みとして、各講義を講義、ディスカッション、まとめなどで構成されるように変更することを検討する。講義の内容などについて、グループで理解が難しい点などをディスカッションすることで、能動的な参加を実現するとともに、内容の理解促進につながると考えられる。

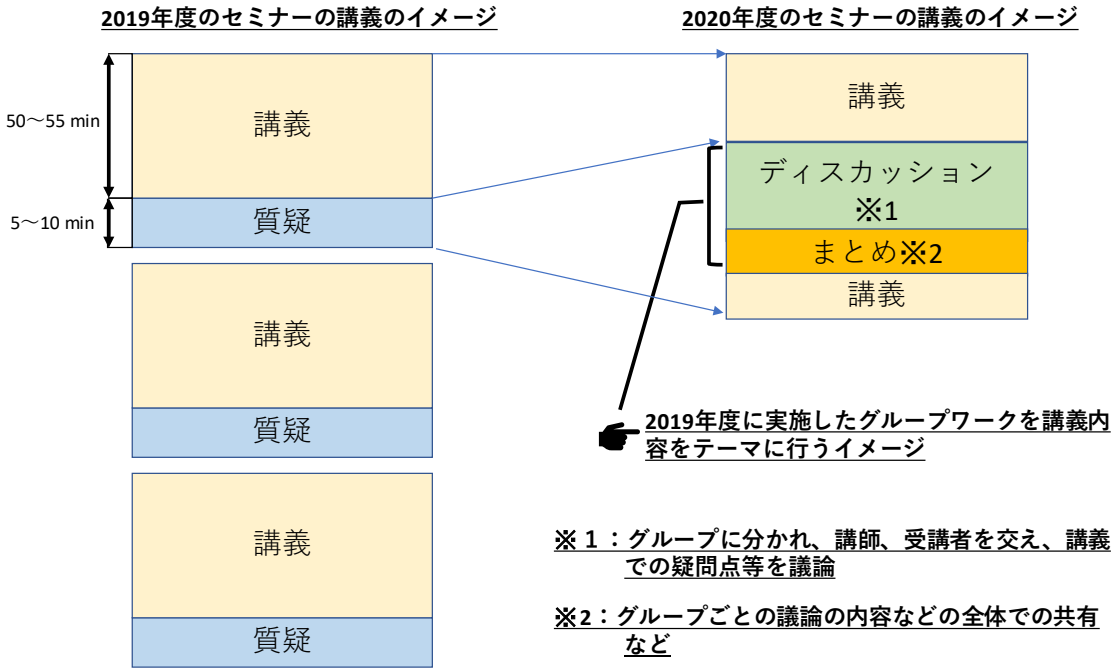


図 3.6-2　来年度のセミナー講義時間の構成案（イメージ）
（質疑に代わりディスカッションの時間を導入）

(4) 演習について

本年度のセミナーでは、サイトのモデリングに関する演習（3.3 参照）を試行的に実施した。また、演習実施のため、沿岸部処分システム高度化開発のデータの整理を行った。3.4 のアンケートの分析でも示したが、今回のセミナーでの演習は、準備不足な面があった（詳細は 3.4 参照)。十分なスペックのノートパソコンの用意、実習を支援することが可能な講師補助者をある程度の人数手配することなど、今回のセミナーの規模で行うには、課題が存在している。

このため、今年度実施したデータ整理の成果については、引き続き、実習での活用などを検討していくが、特に、小規模のより専門性の高いセミナーでの活用を検討する。

また、アンケート結果からは、幌延深地層研究センターのような実サイトでの調査・実験の模様の見学、地質調査のフィールドワーク（実サイトの見学)、核種移行解析のような机上での演習などが可能性としては考えられる。これらを含めて、来年度以降の実施、プログラムへの組み込みを検討する。

参考資料

1) 地層処分研究開発調整会議、「地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～平成 34 年度）」（平成 30 年 3 月）、https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/data/pdf/20180329001_01.pdf
2) 原子力発電環境整備機構、「包括的技術報告 安全な地層処分の実現」の概要」（平成 31 年 4 月 20 日）
3) 国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、一般財団法人電力中央研究所,「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業沿岸部処分システム高度化開発 平成２７年度～平成３０年度取りまとめ報告書」, 平成 31 年 3 月
4 原子力発電環境整備機構、「よくあるご質問」、https://www.numo.or.jp/q_and_a/
5) 資源エネルギー庁、「資源エネルギー庁がお答えします！～原発についてよくある 3 つの質問」、https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/qa_nuclear.html

別添資料 1

（各実施研究の 2019 年度報告）

研究報告１

ジオポリマー技術による人工バリア構築のための基礎的検討

北海道大学　大学院工学研究科

胡桃澤 清文

1. 背景・目的

我が国では原子力発電所等から排出される放射性廃棄物の処分が現在の課題となっている。また、福島第一原子力発電所の事故に伴い廃炉に向けた技術開発も急務となっており、多くの放射性廃棄物が発生しその減容や適切な処分方法の検討がなされている。現状における放射性廃棄物の処分概念を図 1 に示す。放射性廃棄物の処分方法は廃棄物のレベルに応じてトレンチ処分、ピット処分、中深度処分、地層処分の 4 つに分類される。また、図 2 に示すような低レベル放射性廃棄物のうち、一部については処分がすでに行われている。処分方法の放射性廃棄物の埋設処分に関する基本概念は、人工・天然バリアの多重防護によって核種の移行を抑制するとともに、天然バリアの核種の拡散・移行・遅延効果によって生活環境への影響が十分小さくなるまで安全に放射性物質を閉じ込め、段階的に管理を軽減するである。これらの埋設処分施設を構成する図 3 に示す人工バリア材料には、表 1 に示すように廃棄物の放射能濃度、特性および評価に応じた核種閉じ込め機能に対する性能が要求される。

中深度処分施設の人工バリアの一部として図 4 に示すようにコンクリートを含むセ

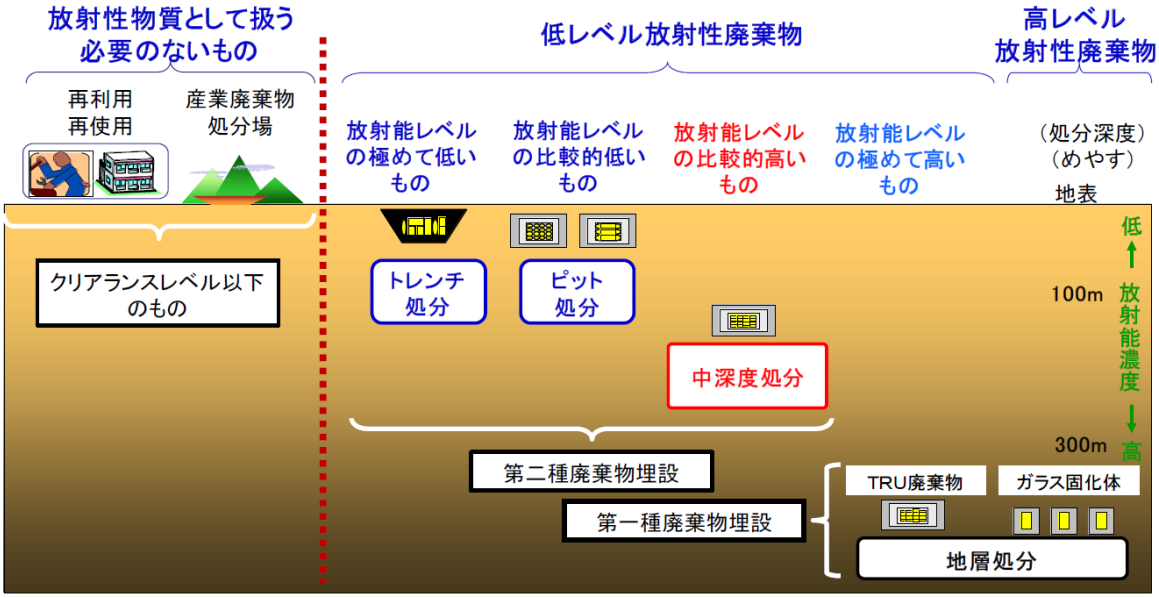


図 1　放射性廃棄物の処分概念[1]

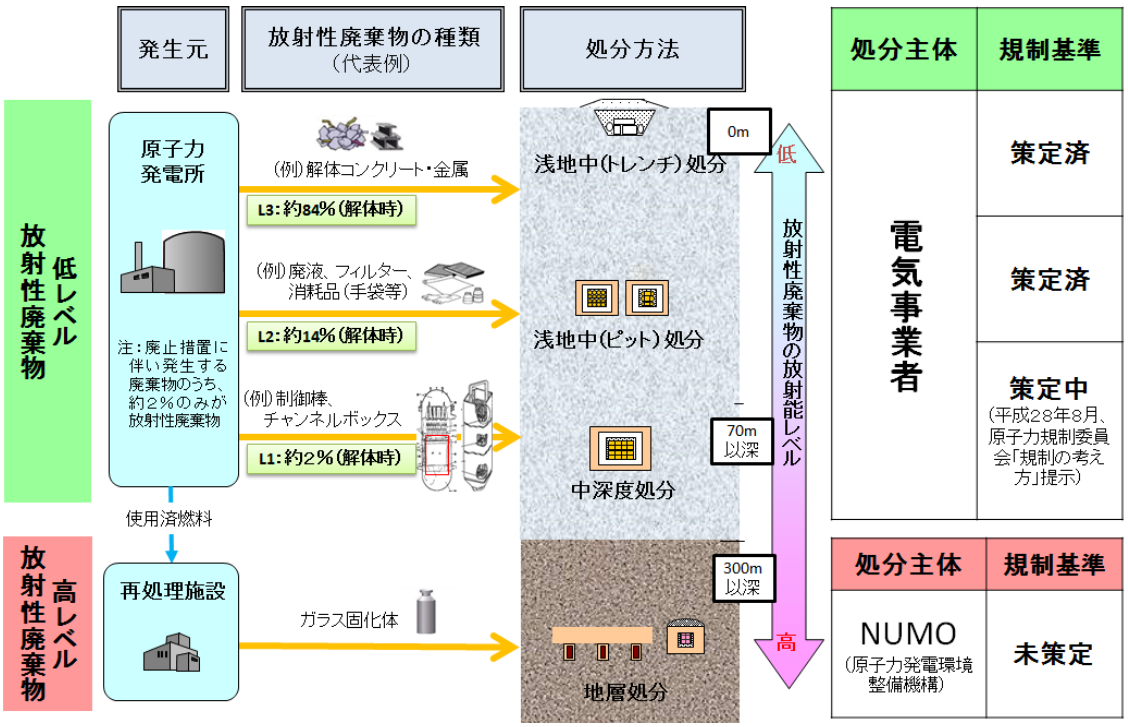


図 2　放射性廃棄物の種類に応じた処分方法[2]

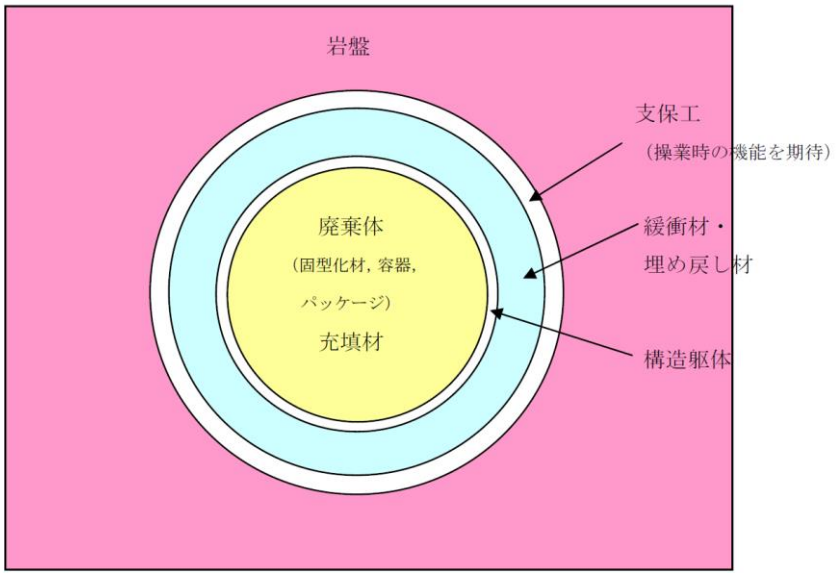


図 3　人工バリアの基本構成[3]

メント系材料の使用が想定されているが、現在のセメント系材料は長期にわたり地下水に接することによって主要な生成物である水酸化カルシウムやケイ酸カルシウム水和物（C-S-H）中のカルシウム成分が溶出し多孔化することが問題視されている。筆者らは図５に示すようにセメント系材料の溶脱に伴う拡散性能の変化を明らかにしている。溶脱による拡散係数の変化はセメント硬化体中の水酸化カルシウムの溶出によるものであるが、フライアッシュや高炉スラグ微粉末を混和し水酸化カルシウムの生成量が少

表 1　各人工バリアの設計上考慮すべき機能の整理[3]

区分	安全要件との対応		機　能	機能の内容	廃棄体		充填材	構造躯体	緩衝材	埋戻し材	支保工
					固型化材	容器（パッケージ）					
操業期間	操業中の安全確保	③，⑦	空洞安定性	坑道の形状維持及び壁面剥離防止	—	—	—	—	—	—	●
		③，⑦	廃棄体の定置	廃棄体定置及び充填材施工の効率化	—	●	—	●	—	—	—
		③，⑦	廃棄体の強度	廃棄体の耐埋設荷重強度	○	○	●	—	—	—	—
		③，⑦	汚染拡大防止	放射性核種の漏出防止	●	●	●	—	—	—	—
閉鎖後	溶出・移動の抑制	②	地下水移動の抑制	地下水浸入量の抑制	—	—	○	○	●	○	—
		②，⑥	放射性核種の溶出制限	放射性核種の物理的な閉じ込め	○	○	○	○	○	—	—
		②		化学的緩衝性	○	—	○	○	○	—	—
		②	放射性核種の収着	放射性核種の人工バリア材への収着	○	—	○	○	○	—	—
		②	自己シール性	発生空隙の充填	—	—	—	—	○	○	—
	力学的安定性	①	応力緩衝性	外力に対する緩衝性	—	—	—	—	○	○	○
		①	力学的支持性	廃棄体／構造躯体の支持	—	—	○	—	●	—	—
		①	坑道の安定性	処分坑道の力学的安定性	—	—	○	○	○	○	○
	化学的安定性	⑤	化学変質に対するバリア機能維持	長期的変質の考慮	○	○	○	○	●	—	○
	その他	④	熱伝導性	廃棄体発熱の放散	○	○	○	○	○	○	—
		④	透気性	ガス透過性／自己修復性	—	○	○	○	○	○	—
		④	コロイドの移動抑制	コロイドのろ過	—	—	—	—	○	—	—

●設計上考慮すべき機能

○設計上考慮せずに，設定された仕様によりその効果を確認する機能

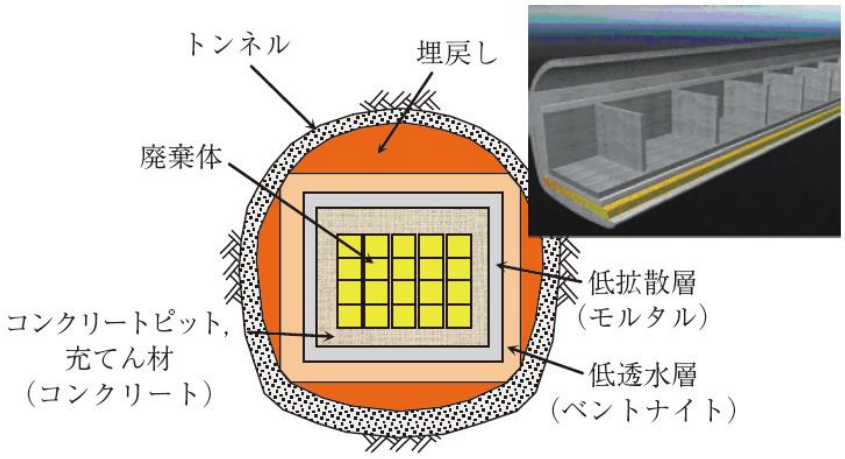


図 4　余裕深度処分施設の構成[4]

ない混合セメントにおいても拡散係数が高くなることが示された。したがってセメント系材料を用いた場合には溶脱による性能変化が生じることになる。そこで本研究においては人工バリアの一部としてジオポリマー硬化体の適用が可能かどうかの基礎的検討を行う。ジオポリマー硬化体は図 6 に示すような特性を有し、1988 年にフランスの Joseph Davidovits により提唱された、活性フィラーとアルカリ溶液との反応によって形成される硬化体の総称であり、元来は燃えやすい有機物ポリマーに対して耐火性を持っている物質として研究されてきた物質であるが、近年土木建築分野での利用や産業廃棄物や放射性廃棄物の固型化材としての使用が考えられている。

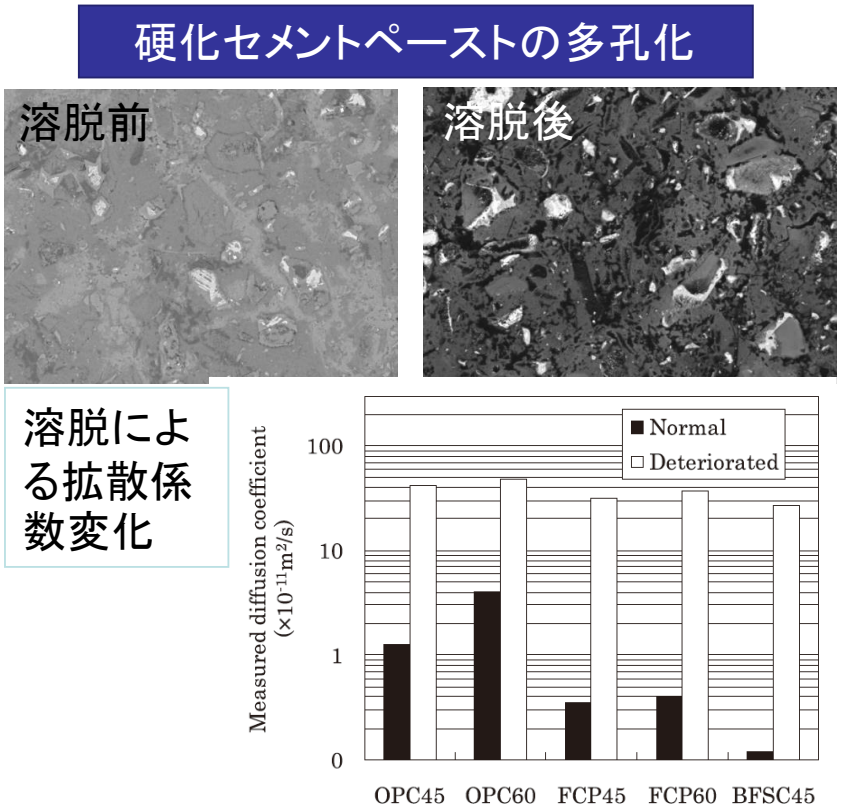


図 5　セメント硬化体の溶脱に伴う構造変化と拡散係数変化[5]

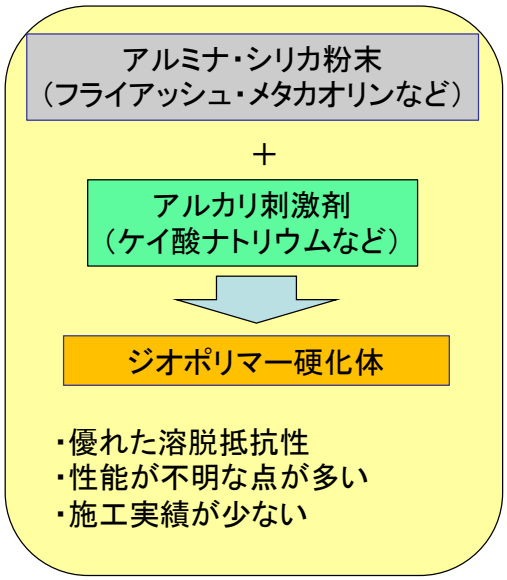


図 6　ジオポリマー硬化体の概要

特徴として、産業副産物である高炉スラグやフライアッシュとアルカリ溶液を反応させることにより作製可能であり、その硬化反応は脱水を伴う重縮合反応であるため硬化時の収縮が大きく、耐酸性が強い。加えて、普通ポルトランドセメントと比較して、耐火性に優れ、アルカリ骨材反応を生じにくい。一方、高炉スラグのみをアルカリ溶液で

反応させるだけでは一次元構造の C-S-H ゲルが生成されるだけであり、それらはジオポリマーと定義されず、アルカリアクティベートスラグ(AAS)と定義される。

ジオポリマー硬化体の構造は天然ゼオライトの構造に類似しており、アルミニウムとシリコンが 3 次元 4 面体形に連なったアルカリアルミノシリケート構造（-Si-O-Al-O-, Mn[-(SiO2)z-AlO2]n・wH2O、M は陽イオン）が生じて硬化したものである。ジオポリマー硬化体はセメント製造時に発生する CO2 排出が少なく、ジオポリマー硬化体は優れた溶脱抵抗性を持つことが報告されているが、使用する材料によって異なる物性を示すことが報告されており、施工実績がセメント系材料に比べると圧倒的に少ない。また、圧縮強度発現や硬化体がどのような微細構造であるかなど不明な点が残されている。そこで本研究においてはジオポリマー硬化体の流動特性、強度などの機械的特性、収着性能、溶出特性、及び物質移動特性について定量的に明らかにすることを目的とする。特に、機械的特性、収着性能、溶出特性および物質移動特性に優れるジオポリマーの最適な配合を固体 NMR やその他の最新の手法を用い微細構造の解析結果に基づき決定を行う。その結果に基づいた最適な配合条件からジオポリマーを作製し人工バリアに要求される各種性能について明らかにし、ジオポリマー配合をいろいろな環境条件と要求性能に基づきバリエーションをもたせられるジオポリマー材料の設計手法を提案する。

本研究で検討を行うジオポリマー技術が人工バリアとして適用可能であることが明らかとなればセメント系材料とともに多くの異なる環境条件下における使用可能な材料として検討を行うことができるためその選択肢が広がり社会への波及効果は高いといえる。また、ジオポリマー硬化体が核種の収着に有用であることが明らかとなれば、多くの有害金属の除去に有用である可能性も見いだせるため、本成果が異なる分野においても有用な知見を与えることができる。一方、本研究ではカオリンを焼成したメタカオリンを原材料として用いるが、同様の化学組成や微細構造を有していれば他の産業から排出される副産物においても同様の性能を得ることが可能であることが想定され、それらの利用によって廃棄物低減を行うことが可能となる。

参考文献

[1]原子力規制委員会：炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について、平成 28 年 8 月 31 日

[2] 資源エネルギー庁ホームページ：http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html

[3] 電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構:TRU 廃棄物処分技術検討書―第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめー、JNC TY1400 2005-13,2005

[4] 庭瀬一仁、月永洋一、辻幸和：低レベル放射性廃棄物書部におけるセメント系材料の設計と施工に関する基礎的検討、日本コンクリート工学会誌、Vol.50,No.7,pp.585-

592、2012
[5] 青山 琢人, 胡桃澤 清文, 名和 豊春, 大和田 仁, セメント硬化体の 3 次元イメージモデルによる塩化物イオンの拡散予測, セメント・コンクリート論文集, 2010, 64 巻, 1 号, pp. 66-73

2. 全体研究計画（3 ヵ年における全体計画）

ジオポリマー硬化体はアルミノシリケートの粉体とアルカリ刺激剤によって重合することによって硬化する材料である。国内においてはフライアッシュ及び高炉スラグ微粉末にケイ酸ナトリウム溶液を使用した材料が検討されている。しかしながらフライアッシュは化学成分が一様ではなく取り扱いが困難であるためその使用が限定される。一方、高炉スラグ微粉末の化学組成は安定しているが、カルシウムを多く含むため長期間の地下水における暴露によって溶脱が進行する恐れがある。したがって、高炉スラグの使用をおさえるためにカオリンを焼成したメタカオリンの使用を試みる。メタカオリンは反応性が高いためアルカリ刺激剤によって早期に重合が進み硬化するため、このメタカオリンをベースとした硬化体の適切な配合を設定する。また、2 年間にわたる核種収着性能強度、及び溶出挙動について検討を行う。強度試験では圧縮強度、引張強度および弾性係数の測定を行い、機械的特性を明らかにし強度に及ぼす影響を明らかにする。

一方、作製した試験体のキャラクタリゼーションを ^{29}Si および ^{27}Al 固体核磁気共鳴装置によって行いシリカやアルミの結合状態の違いについて明らかにしそれが機械的特性や収着、溶脱性能に及ぼす影響を定量的に分析する。さらに硬化体内部の水分の状態分析を行うためにプロトン NMR による緩和時間測定を行い、プロトンがどのような状態で結合し、それらが収着や溶脱に及ぼす影響を明らかにする。収着や溶脱によって変質する硬化体内部の状態変化は、元素分布の状態を EPMA 測定によって把握する。さらには詳細な元素分布を ppm レベルにて分析するために LA-LIBS を用いて測定を行い定量的な評価を行う。以上の検討結果よりジオポリマー硬化体の微細構造に基づく材料設計手法について提案を行い、要求された性能を兼ね備えた硬化体の配合を導く。3 年間の全体計画を表 2 に示す。

初年度はジオポリマー硬化体の適切な配合を検討する。メタカオリン及びアルカリ刺激剤の配合条件を決定し、流動性、強度、収着特性に優れた硬化体の作製を行う。強度試験では圧縮強度、引張強度および弾性係数の測定を行い、機械的特性を明らかにする。収着試験としては硬化体にセシウムやヨウ素等を吸着させその収着特性について検討を行う。また、2 年間にわたる核種の溶出・溶脱試験を開始する。これらの作製した試験体のキャラクタリゼーションを ^{29}Si および ^{27}Al 固体核磁気共鳴装置によって行う。さらに硬化体内部の水分の状態分析を行うためにプロトン NMR による緩和時間測定を行う。初期の元素分布の状態を測定するために EPMA によってマッピングを行う。さらには ppm レベルでの元素の分布を分析するために LA-LIBS を用いてマッピングを行う。

次年度では、ジオポリマー硬化体の収着試験を継続的に行い、長期にわたる収着特性について検討を行う。2 年間にわたる溶出・溶脱試験の 1 年目における試験を行う。また、溶出試験や収着試験を行った試験体のキャラクタリゼーションを固体

核磁気共鳴装置によって同様に行い変質状態を分析する。さらに硬化体内部の水分の状態分析を行うためにプロトン NMR による測定も継続する。また、収着後および溶出試験後の元素分布の状態を測定するために EPMA によってマッピングを行う。さらには ppm レベルでの元素の分布を非乾燥状態にて分析するために LA-LIBS を用いてマッピングを継続して行う。

3 年目では、ジオポリマー硬化体の収着試験を継続的に行い、長期にわたる収着特性について検討を行う。2 年間にわたる溶出試験の 2 年における測定を行う。また、溶出試験や収着試験を行った試験体のキャラクタリゼーションを固体核磁気共鳴装置によって同様に行う。さらに硬化体内部の水分の状態分析を行うためにプロトン NMR による測定を行う。また、収着後および溶出試験後の元素分布の状態を測定するために EPMA によってマッピングを行う。さらには ppm レベルでの元素の分布を非乾燥状態にて分析するために LA-LIBS を用いてマッピングを行う。以上の結果から収着、溶出、物質移動特性に優れたジオポリマー硬化体の特性を定量的に明らかにしジオポリマー硬化体の材料設計手法を提案する。

表 2　全体研究計画

	2018 年度	2019 年度	2020 年度
最適配合	各種材料による配合条件の設定	→	
キャラクタリゼーション	各配合条件におけるキャラクタリゼーション	収着溶脱後の試料のキャラクタリゼーション	→
機械的物性	圧縮強度、弾性係数引張強度の測定	→	
収着性能	いくつかの配合にて核種の吸着性能測定	→	分配定数の決定
溶脱特性	溶脱開始	1 年溶脱量測定	1.5 年溶脱量測定
材料設計			要求性能に基づく材料設計手法の提案

3. ２０１９年度研究実施内容

3.1 ２０１９年度の計画、実施方法

ジオポリマー硬化体の適切な配合を検討する。メタカオリン及びアルカリ刺激剤の配合条件を決定し、流動性、強度、収着特性に優れた硬化体の作製を行う。強度試験では圧縮強度、引張強度および弾性係数の測定を行い、機械的特性を明らかにする。収着試験としては硬化体にヨウ素等を吸着させその収着特性について検討を行う。また、2 年間にわたる核種の溶出・溶脱試験の測定を開始する。これらの作製した試験体のキャラクタリゼーションを ^{29}Si および ^{27}Al 固体核磁気共鳴装置によって行う。さらに硬化体内部の水分の状態分析を行うためにプロトン NMR による緩和時間測定を行う。初期の元素分布の状態を測定するために EPMA によってマッピングを行う。

3.1.1 実験概要

（1）使用材料と試験体

本研究では、表３に示すメタカオリンをアルミナ・シリカ粉末として使用した。メタカオリンは 3 種類使用し、MK-A は、平均粒形 1.3μm、BET 比表面積 12.9m^2/g、嵩比重は 260kg/m^3 であり、MK-B は、平均粒形 1.2μm、BET 比表面積 14.0m^2/g、嵩比重 320kg/m^3 であり、MK-C は、平均粒形 1.0μm、BET 比表面積 12.9m^2/g、嵩比重 260kg/m^3 であるまた、アルカリ刺激剤作製のために、ケイ酸カリウム溶液、ケイ酸ナトリウム溶液、水酸化カリウム、水酸化ナトリウムおよび精製水を用いた。表 4 に配合を示す。表中の M_2O は K_2O,Na_2O を示し、それぞれモル比で示されている。また、NaK の試料では M_2O として Na_2O と K_2O を 0.5mol ずつとしている。この組成によって作製したアルカリ刺激剤をメタカオリンと練混ぜを行った。練り混ぜはミキサーを用いて 15 分間練り混ぜ、所定の型枠に打設し試験体に含まれているエアーを振動機によって抜いた。養生は室温にて封緘養生を行い、MK-B の水が 11mol の試料では 40℃の加温養生を行った。なお、いくつかの試料は材齢 3 日以降に 50℃、80℃の加温養生を行った。

表 3　メタカオリン及び高炉スラグの化学組成

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI
MK-A	52.48	1.62	45.21	0.34	0.02	0.4	0.12	0.07	0.64
MK-B	52.69	1.5	45.4	0.39	0.02	0.43	0.11	0.06	1.0
MK-C	53.09	1.01	45.77	0.46	0.02	0.29	0.16	0.06	1.28

表 4　試験体の配合

Sample	Metakaolin	Alkali activator(mol/mol)				Sand(g)
		M_2O	M_2O/Al_2O_3	SiO_2/Al_2O_3	H_2O/Al_2O_3	
A-K	MK-A	K_2O	0.93	1.0	11.5	Metakaolin×3
B-K	MK-B	K_2O				
C-K	MK-C	K_2O				
A-Na	MK-A	Na_2O	1.0		11.0	
A-NaK		$0.45K_2O+0.5Na_2O$	0.97		11.3	
A-K9		K_2O	0.93		9.5	
A-K1.5			0.90	1.5	11.6	
A-0.8K			0.75	1.0	11.3	

（2）測定方法

a. フロー試験

JASS 15M-103 にしたがって測定を行った。直径 50 ㎜、高さ 50 ㎜の円筒形型筒に試料を入れ引き抜いた直後のフローを直交する 2 方向の長さを測定しその平均値をフロー値とした。スランプフローの経時変化は、写真 1 に示すように練り混ぜ直後のスランプフロー値を測定した。

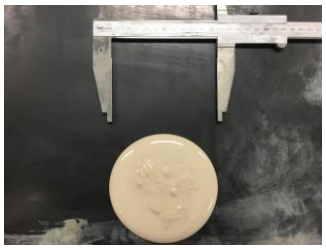


写真 1　フローの測定

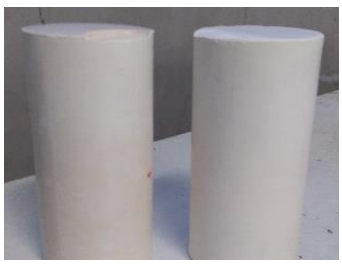


写真 2　作製したジオポリマー試験体

b. 圧縮強度試験および静弾性係数測定

測定試料は型枠を用いて写真 2 に示すような試料φ50×100㎜の硬化体試料を 3 本用いて、表面乾燥条件で一軸圧縮強さを測定した。測定により得られた破壊時の最大応力を端面の断面積で除すことにより一軸圧縮強度を算出した。また、ひずみゲージを側面に貼り付け載荷中のひずみを測定し弾性係数の測定を同時に行った。

c.割裂引張り強度試験

測定試料は型枠を用いて作製した試料φ50×100㎜の硬化体試料を用いて、表面乾燥条件で割裂引張り試験を行った。測定により得られた破壊時の最大応力と供試体の直径、長さにより割裂引張強度を算出した。

d.超音波伝播速度試験

Φ50㎜×100㎜のモールド缶を用いて作製した試験体を測定試料とし、超音波速度をマルイ製超音波非破壊試験器で測定した。測定試料は測定前に、端面にグリスを塗ることで、測定面の状態に左右されないようにした。測定器は測定直前にゼロ距離と較正試料を用いて較正した。測定した透過時間により試料長さを除すことによって超音波速度を算出した。

e.電子顕微鏡観察（SEM）

試料をエポキシ樹脂で包埋し、その表面の研磨を行った。その後白金蒸着を施して走査型電子顕微鏡観察用試料とした。加速電圧 15keV、ワーキングディスタンス 11㎜にて測定を行った。

f.溶脱量測定

2 から 5 ㎜に粉砕した試料および直径 50 ㎜、高さ 50 ㎜程度に成型した試験体を固体と液体の重量比を 10 倍に設定した精製水に浸漬し、一定期間ごとにその精製水を入れ替えた。入れ替えの際に質量変化を測定し、溶液に含まれる元素濃度を ICP－AES によって測定を行った。

g.プロトン NMR 測定

直径 8 ミリのガラス管に試料を打設し密閉することにより試験体を作製した。測定は CPMG 法による測定と Solid echo 法による測定をそれぞれ 2 本ずつ行った。

h.固体 NMR 測定

^{29}SiMASNMR と ^{27}AlMASNMR 測定を行った。

i.XRD 測定

粉砕した試料を凍結乾燥によって反応停止後、ボールミルにて微粉砕し、内部標準試料であるコランダム(α－Al203)を試料質量に対し内割りで10%混合した。測定条件は角度 5～70°、スキャンスピード 3°/min にて測定を行った。

j. EPMA 測定

SEM 観察と同様の試料を用いて硬化体表面の元素分布を EPMA によって測定を行った。測定条件は、加速電圧 15kV、試料電流 5×10^{-9}A とした。

k. 低温 DSC 測定

容量が 15μl のステンレス容器に試料を打設し、密閉後に低温 DSC 測定を行った。測定条件は、室温から-60℃までの凍結過程と-60℃から 10℃までの融解過程にて行った。

l. 吸着量測定

2 から 5 ㎜程度に粉砕した試料を濃度の異なるヨウ化セシウム溶液に浸漬し一定期間後に溶液濃度を ICP―MS やイオンクロマトグラフによって測定を行った。

m. 収縮量測定

材齢 3 日後からダイヤルゲージ法によって収縮量を測定した。

n. 拡散試験

材齢 3 日後の試験体を塩化セシウム 50ｍｍｏｌ/l の溶液に浸漬し、一定期間浸漬後に切断面を EPMA によって観察した。

o. 透水試験

透水試験には主に定水位法、変水位法、トランジェントパルス法、フローポンプ法の 4 つの試験法があり、定水位法は 10^{-2}～10^{-5}m/s、変水位法は 10^{-5}～10^{-9}m/s、トランジェントパルス法は 10^{-9}～10^{-14}m/s、フローポンプ法は 10^{-5}～10^{-14}m/s が適用範囲である。本研究ではフローポンプ法とトランジェントパルス法によって透水係数を測定した。試験体は直径 50 ㎜、高さ 25 ㎜の円柱型の試験体を用い、熱収縮チューブにて漏水を防ぎ測定を行った。

3.2 平成 31 年度の成果内容

3.2.1 測定結果

（1）フロー試験結果

図 7 に練り混ぜ直後にフロー値を測定した結果を示す。MK-B の試料よりも MK-A の試料のほうが高いフロー値を示した。ナトリウムをアルカリ刺激剤として使用した試料のフロー値が低い値であり、水が 9mol の試料も値が低下した。このことから施工性を考慮した場合、カリウムを刺激剤として使用し、水量は 11mol を使用したほうがよいことが示された。これはモルタル試料においても同様の傾向であった。

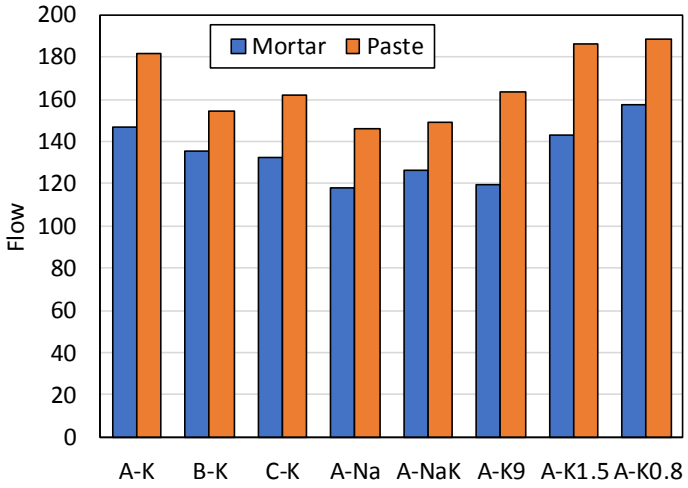


図 7　練混ぜ直後のフロー値

図 8 に砂の量を変化させた際のフロー値変化の結果を示す。砂の量を増加することによってフロー値は低下した。したがって施工性を考慮する場合には砂の量を減少させたほうがよいことがわかる。ただし、砂の量を低減するとマトリックス部分が増加するため経済性の面では考慮する必要がある。

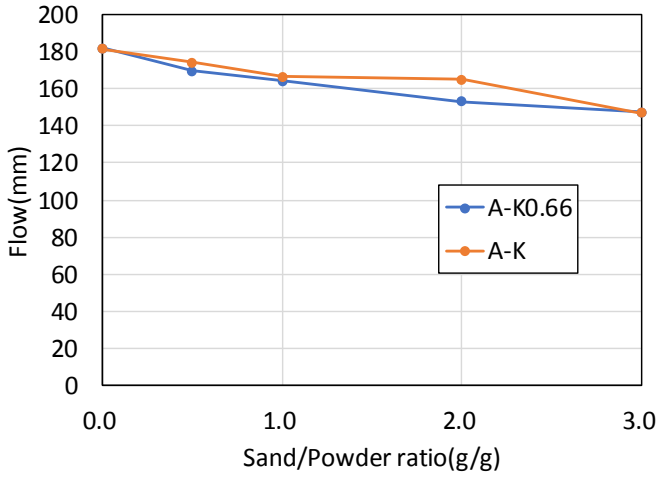


図 8　フロー値に及ぼす砂量の影響

（２）含水量、強熱減量測定結果

含水量の測定結果を図 9 に示す。含水量は NaK の試料では多い結果となった。加温養生を行うことによって含水量は低下した。

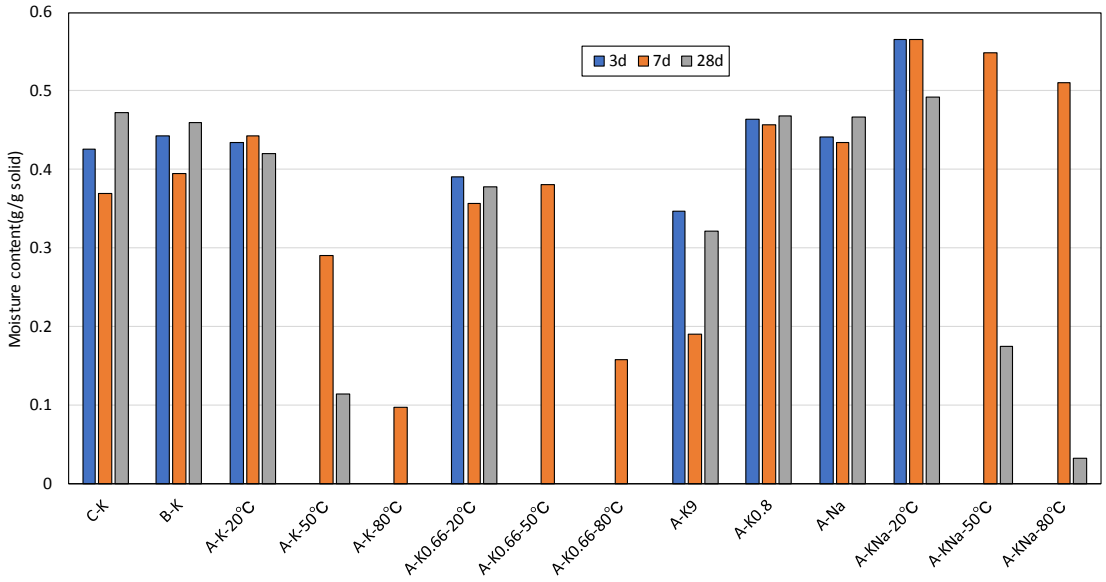


図 9　試験体の含水量

強熱減量を図 10 に示す。強熱減量の測定結果はいずれの試料でも 0.1 程度の値であり、試料間で大きく異なる結果は得られなかった。一部値が低かった試料もあるがこれは再度実験を行う必要がある。

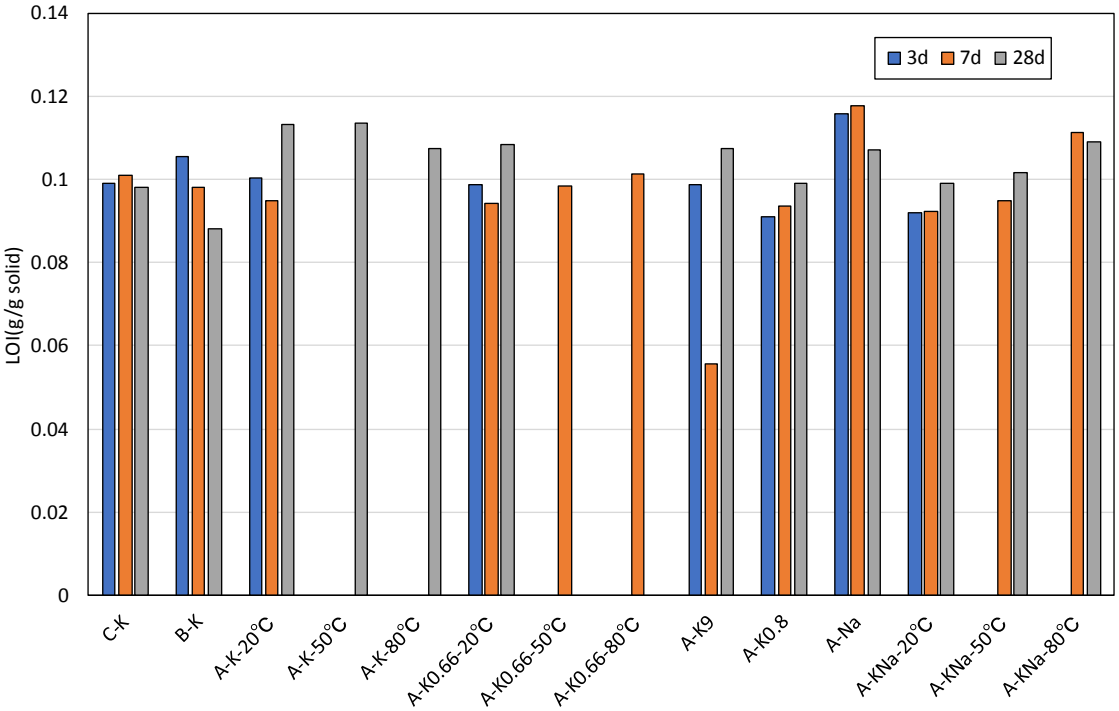


図 10　強熱減量測定結果

（３）圧縮強度試験結果

図 11 に圧縮強度試験結果を示す。水量の少ない試験体と Na 系の試験体の強度が高い傾向にあった。また、加温を行った試験体では 20℃の試験体と比較すると強度が低下するものと増加しているものも見られたことから試験体の配合によって温度の影響は異なることが考えられる。強度はセメントを用いたモルタルにおいて水セメント比 40%で 80N/mm2、50%で 60N/mm2 であることから普通強度のセメント程度の強度発現が見られた。

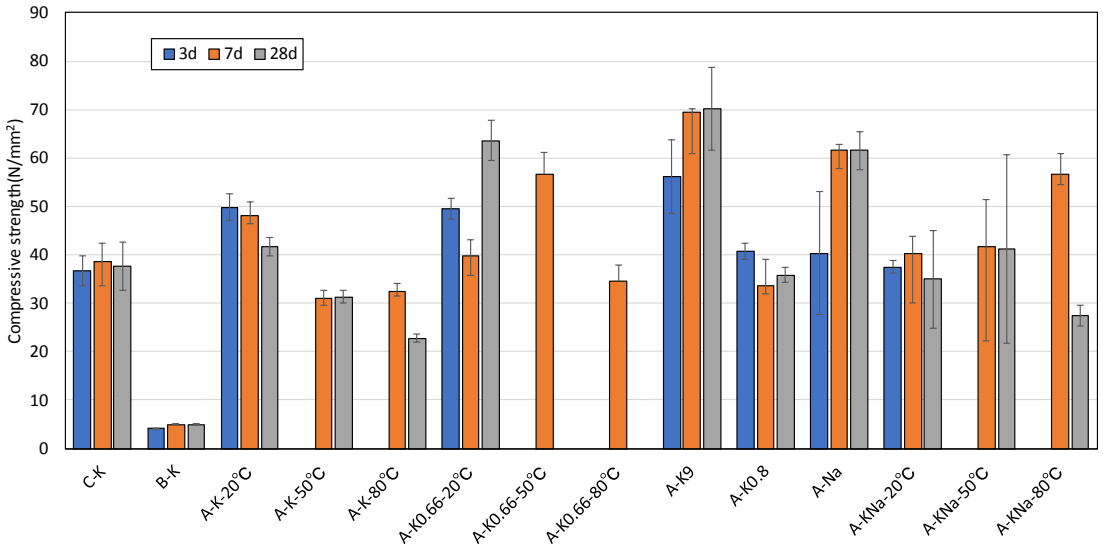


図 11　圧縮強度試験結果

（４）割裂引張強度試験結果

図 12 に材齢 3 日における割裂引張強度試験結果を示す。引っ張り強度は圧縮強度試験と同様の傾向が見られた。圧縮強度と引っ張り強度の関係を図 13 に示す。両者には直線関係が見られ、引っ張り強度は圧縮強度の 15 分の 1 程度である。

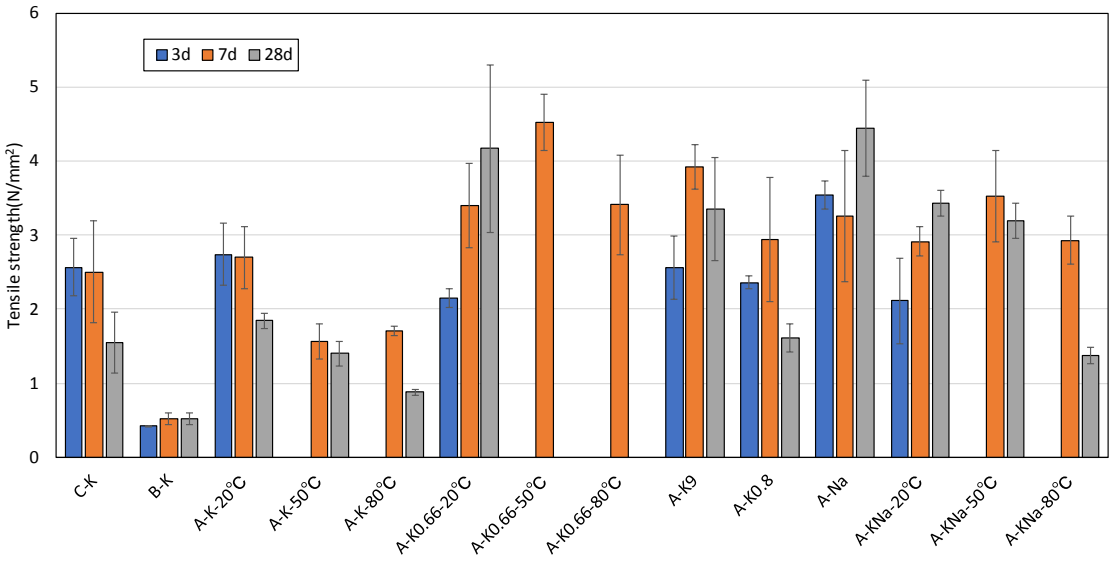


図 12　割裂引張強度試験結果

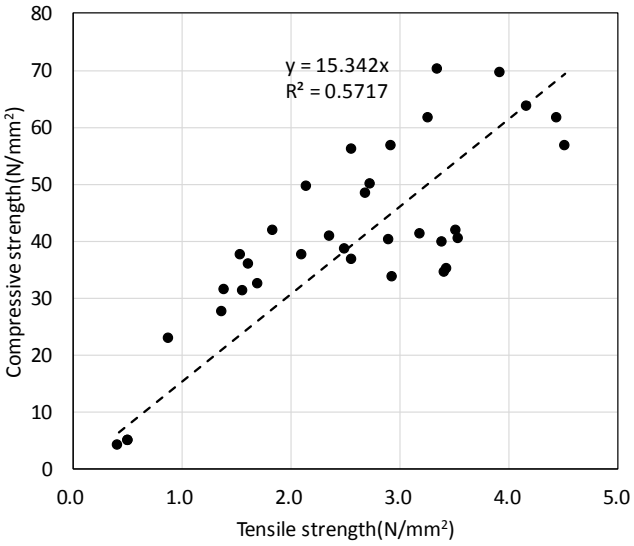


図 13　割裂引張強度と圧縮強度の関係

（５）超音波伝播速度

図 14 に超音波伝播速度測定結果を示す。圧縮強度試験の結果と同様の傾向が見

られた。

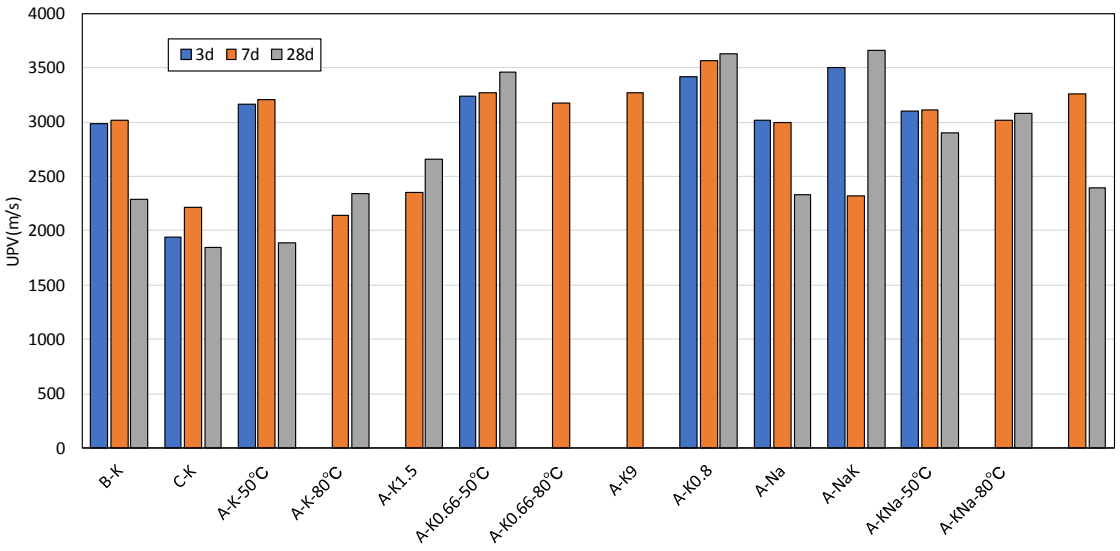


図 14　超音波伝播速度測定結果

（６）弾性係数測定結果

図 15 にジオポリマー硬化体の静弾性係数測定結果を示す。これらの結果も圧縮強度試験結果と同様の傾向であり、圧縮強度の高い試料ほど高い弾性係数を示す結果となった。

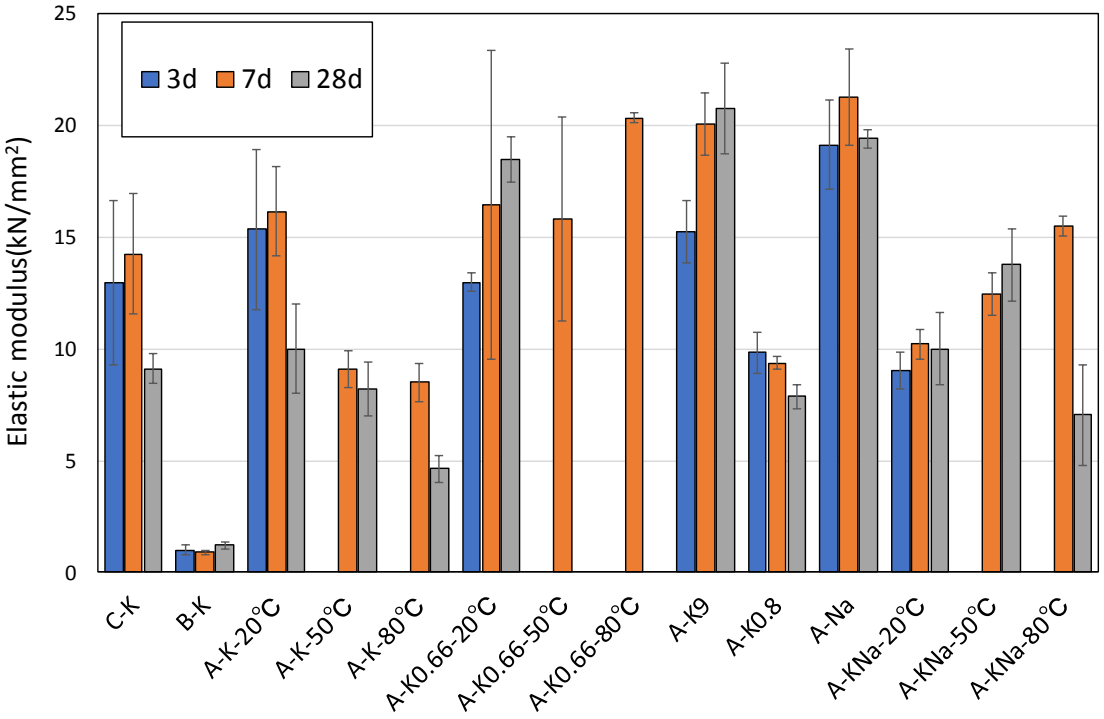


図 15　弾性係数測定結果

図 16 に弾性係数と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度と弾性係数の関係は比例関係で表すことが可能であり、圧縮強度測定結果からおおよそ弾性係数の推定を行うことが可能である。

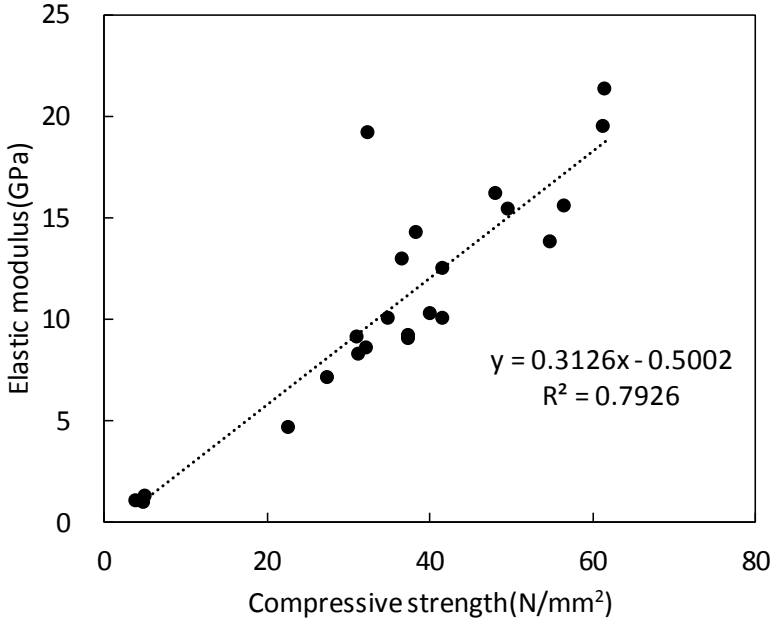


図 16　弾性係数と圧縮強度の関係

（7）収縮量試験結果

収縮量測定結果を図 17 に示す。収縮量は配合条件によって変化し、加温を行った試験体ほど収縮量が増加した。これは加温によって重縮合が進行したためであると考えられる。

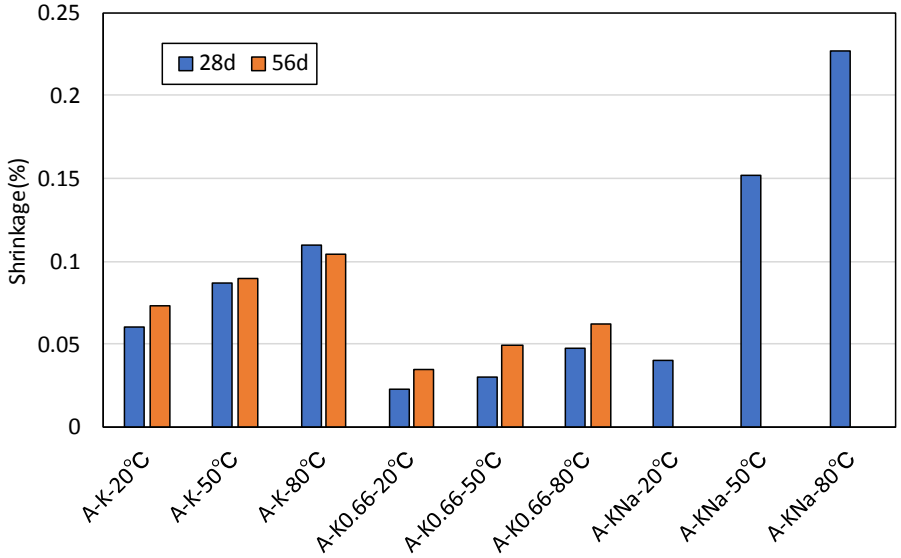


図 17　収縮量測定結果

（８）プロトン NMR 測定結果

図 18 にプロトン NMR を用いて緩和時間測定を行った結果を示す。上図に示す Solid echo 法では固体中に含まれるプロトンとそれ以外の比較的自由に動くことのできるプロトンに分離することができる。カリウムを用いた試験体では緩和時間が長いことから比較的自由に動ける水が多く試験体内部に存在していることがわかる。また、ナトリウムを用いた試験体と水量を 9mol まで減少させた試料では同程度であった。

下図は CPMG 法によって測定した結果であり、自由水中のプロトンの分布を示している。この結果においても Solid echo 法の結果と同様の結果であった。このことからナトリウム系と水を低減させることによって自由に動くことが可能な水を低減させることができる可能性が示された。

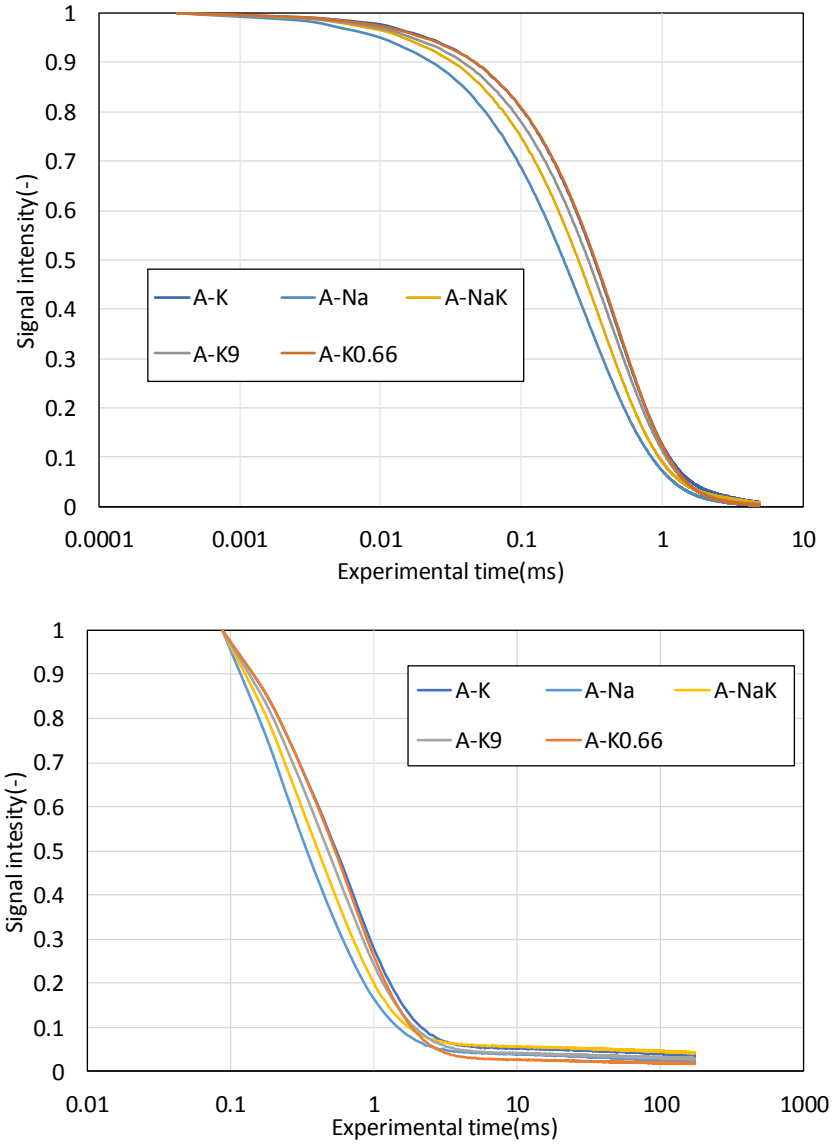


図 18　プロトン NMR 測定結果（上図：Solid echo 法、下図：CPMG 法）

（９）固体 NMR 測定結果

図 19 に材齢 3 日における固体 NMR 測定の結果を示す。上図は ^{27}Al MAS の測定結果を示しており、下図は ^{29}Si MAS の測定結果を示している。^{27}Al MAS の測定結果において B-K の試料のみ 57ppm 付近と 7ppm 付近にピークがみられている。これはそれぞれアルミの配位数が４配位と６配位を示している。これは MK-B の試料では６配位のアルミを持つ構造のものが反応せず残存していることを示している。加温した試料の結果の右図に示す。いずれの試料においてもこの１つのピークのみが検出されており温度の影響は Al の微細構造に大きく影響を及ぼさないと考えられる。

^{29}Si MAS の測定結果より B-K では２つのピークが見られた。これは反応性の低い物質が-95ppm 付近に残っている可能性がある。加温の影響を右図に示す。温度の影響は Al と同様に明確には示されなかった。

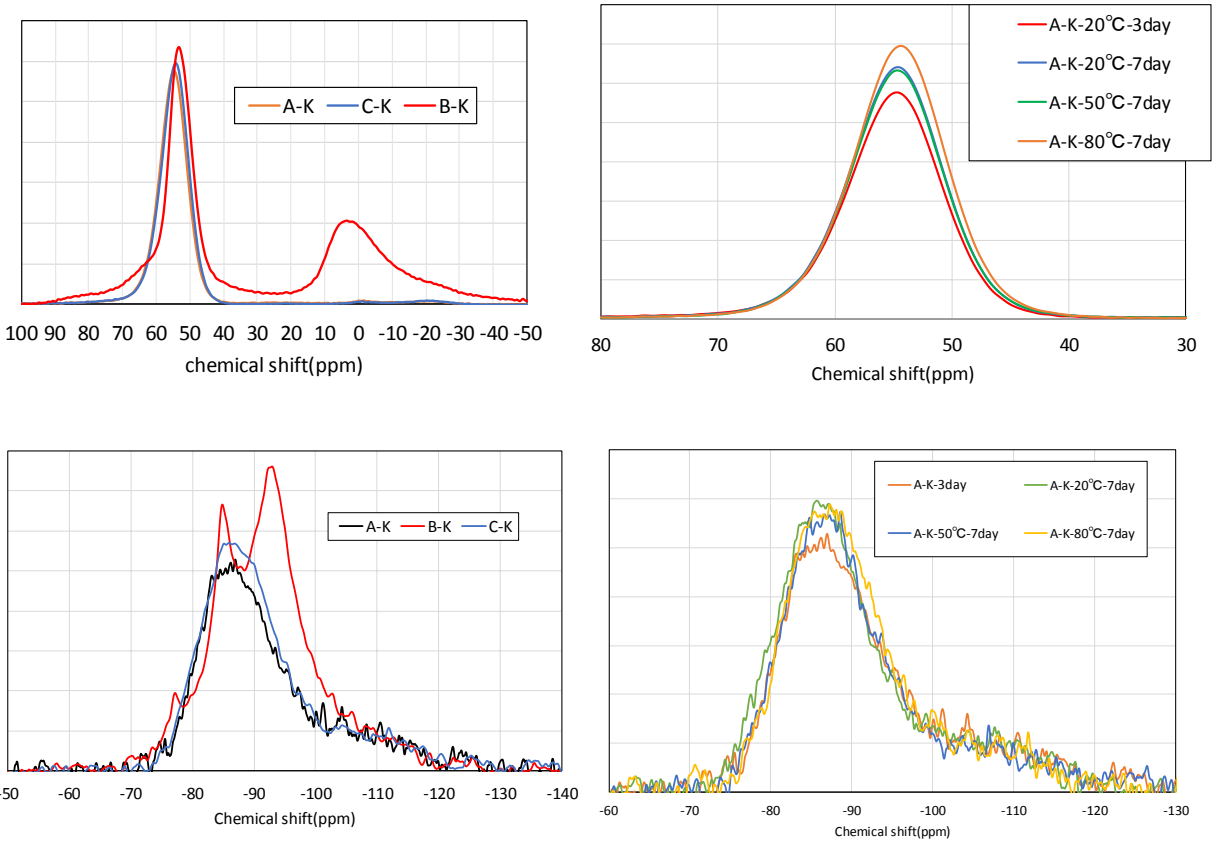


図 19　固体 NMR 測定結果（上図：27Al、下図：29Si）

（１０）XRD 測定

図 20 に材齢 28 日の XRD 測定結果を示す。明確に検出されているピークは内部標準として混和した α-Al_2O_3 であり、それ以外は明確なピークはほとんど見られず、25 から 35° 付近に大きなブロードなピークが見られた。これは未反応のメタカオリンと反応後の生成物によるものであると考えられ生成物の多くが非晶質物質であることが示された。加

温の影響はほとんど見られなかった。また、下図に示すようにメタカオリンの種類によってピークが異なることがわかる。よってメタカオリンの選定は重要であることが示された。

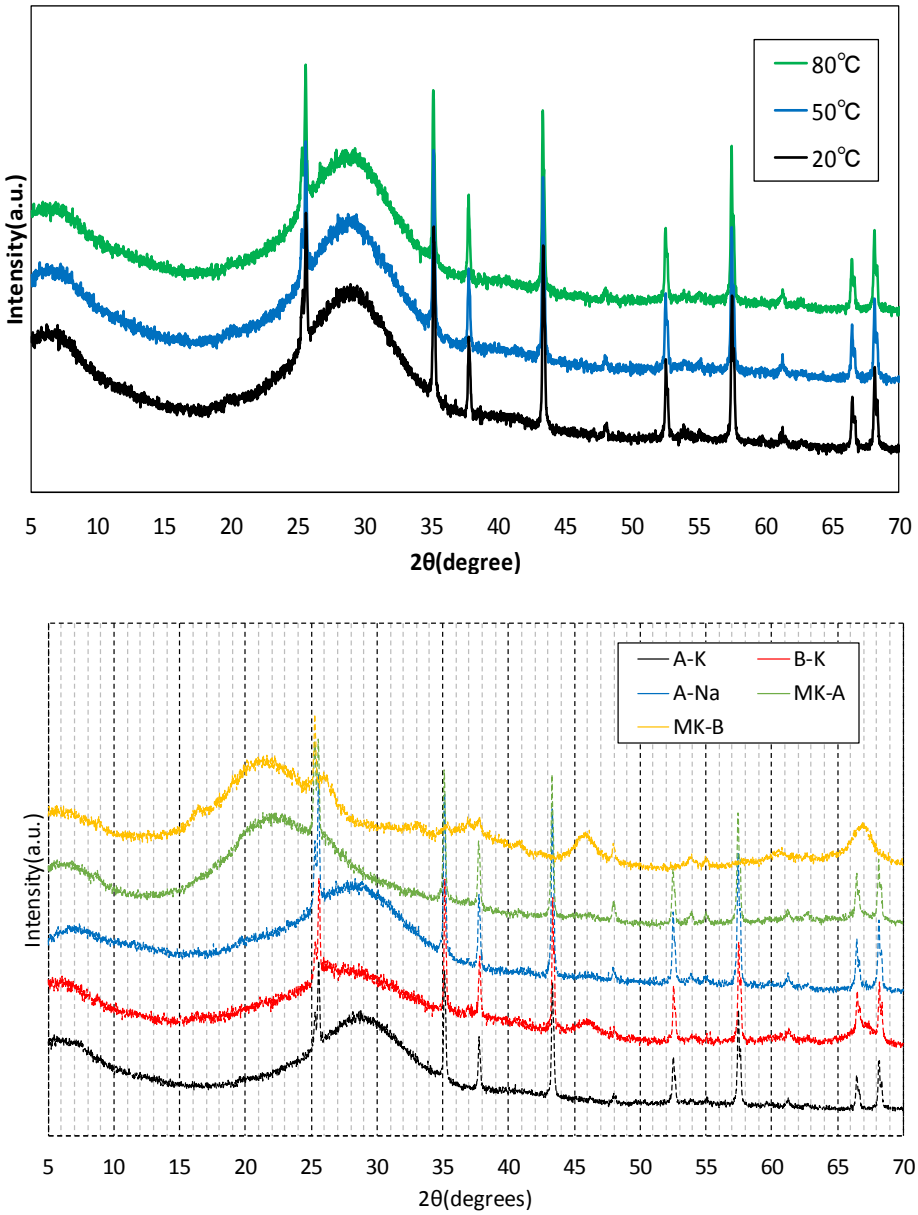


図 20　XRD 測定結果（上図：A-K　28day、下図：メタカオリンの影響）

（１１）EPMA 測定

飽和水酸化カルシウム溶液に 1 か月間浸漬したナトリウム型のジオポリマーの元素分布測定結果を図 21 に示す。浸漬によってカルシウムがジオポリマーの周辺部に存在していることからカルシウムとナトリウムが置換して存在していると考えられる。

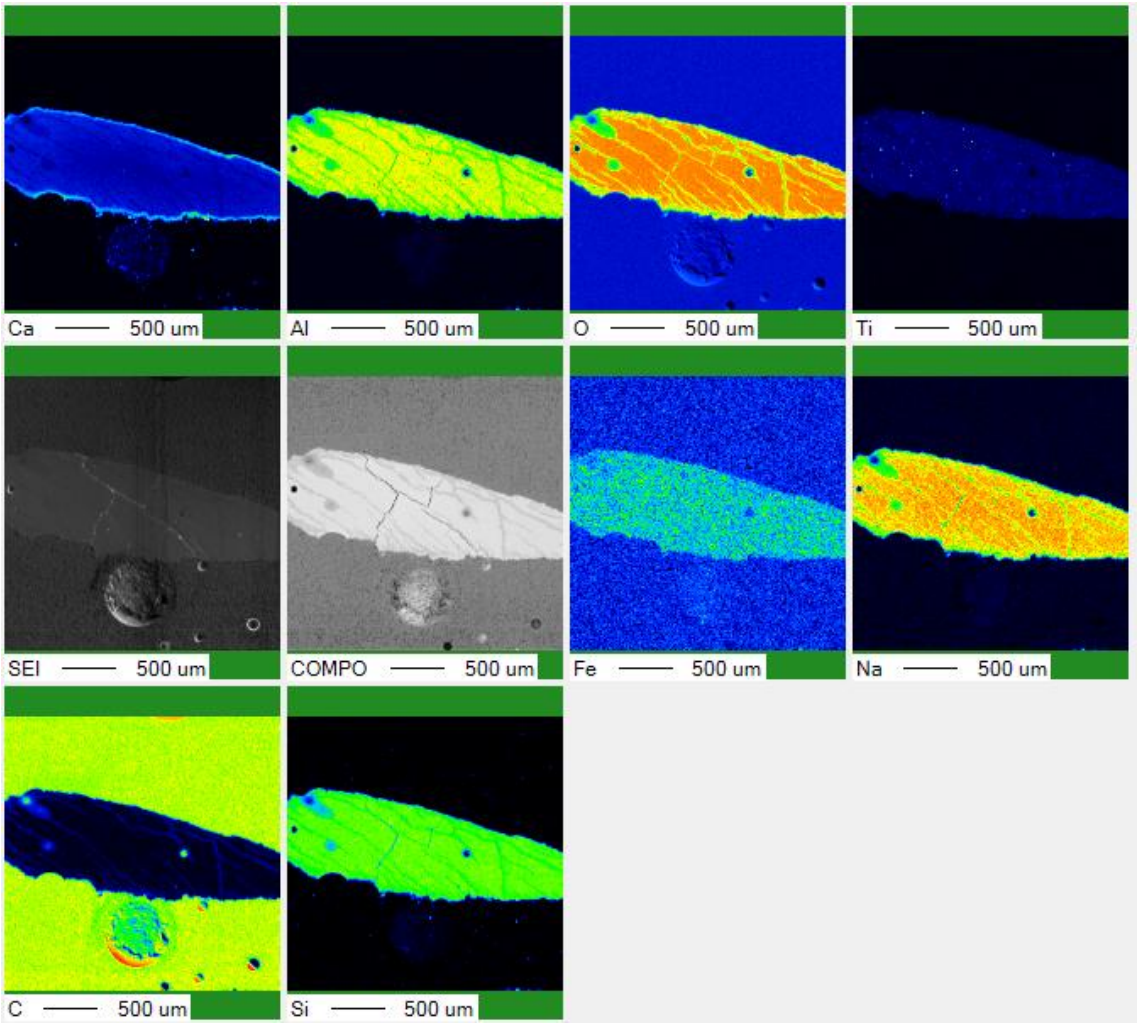


図 21　ナトリウム型ジオポリマー中の EPMA による元素分布測定結果

（１２）低温 DSC 測定

図 22 に低温 DSC 測定結果を行った結果を示す。カリウムを使用した試料では-20℃から-30℃にかけて大きなピークが観察された。したがって比較的大きな空隙中に水が存在していることがわかる。ナトリウムを試料した試料では大きなピークが見られたかった。したがって含まれている水分が表面に大きく影響されていると考えられる。これはプロトン NMR と同様の結果であった。

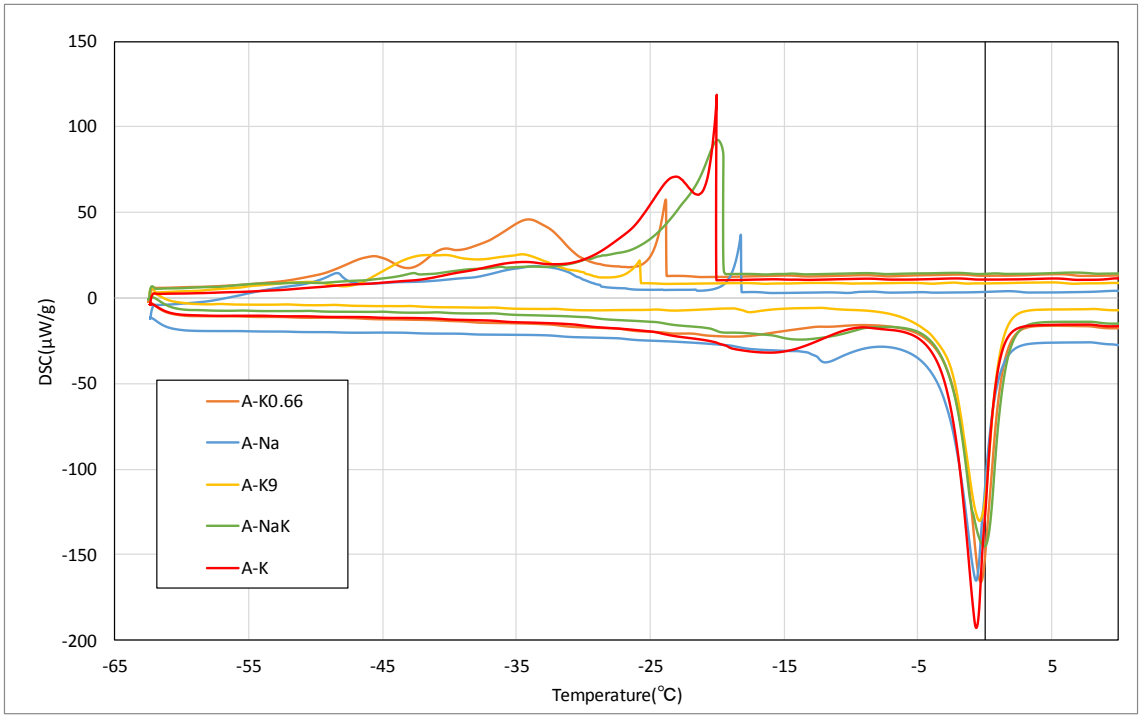


図 22　低温 DSC 測定による硬化体内部の水分の状態

（１３）イオン拡散測定

図 23 に塩化セシウムに浸漬した試料中のセシウムの濃度分布を示す。上からセシウムが浸透し内部に浸透していく様子が観察できる。浸透深さはカリウムを用いた試験体の方が深く、ナトリウムの方が深く浸透しなかった。したがってカリウムがセシウムと置換しやすく深くまで浸透していると考えられる。よって、アルカリ刺激剤の選択が重要であることが示された。一方、アニオンである塩化物イオンはまったく浸透していない結果であった。このことからメタカオリンジオポリマーは選択的にカチオンを浸透する性能があると考えられる。また、セシウムの拡散係数は、5 週間浸漬において A-Na では 4.2×10^{-13}、A-K9 では 2.8×10^{-12} m^2/s であり、ナトリウム型が 1 桁小さい拡散係数であった。

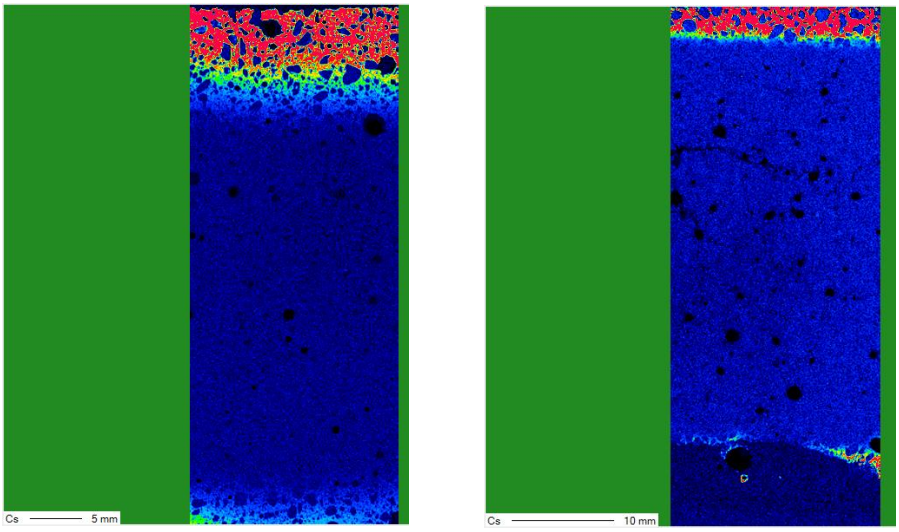


図 23　ジオポリマーのセシウムイオン拡散試験結果（左図：A-K9、右図：A-Na、浸漬 5 週間）

（１４）偏光顕微鏡測定

図 24 に偏光顕微鏡によって観察した結果を示す。いずれの試料においても砂である石英の部分が結晶質として観察されたが、マトリックス部分であるジオポリマーは結晶としては観察されなかった。温度を 80℃とした試料においても A-K では結晶は確認できなかった。

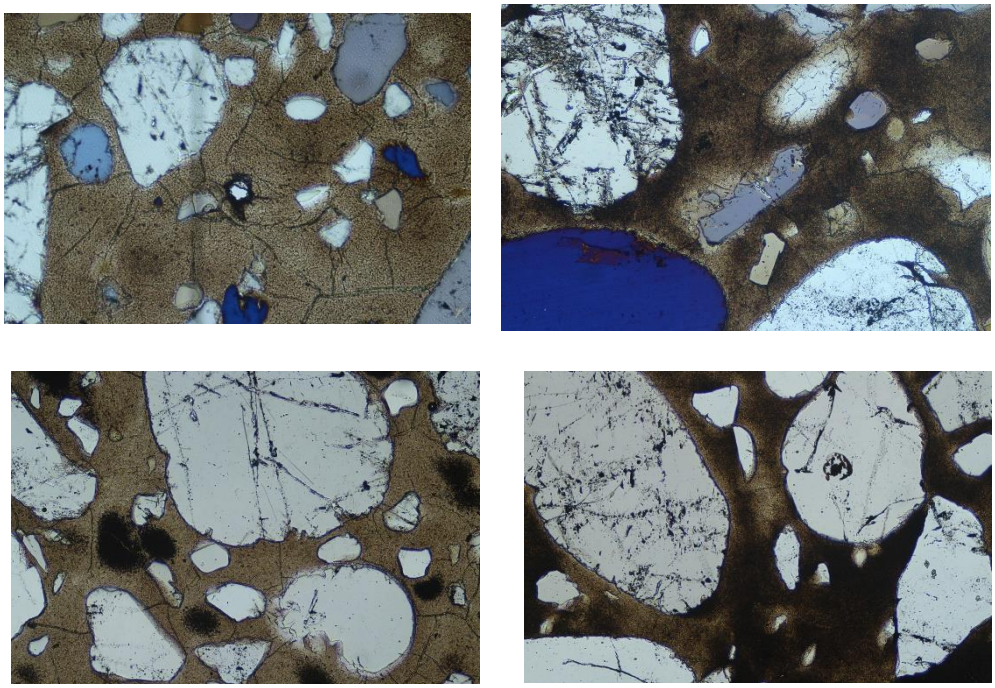


図 24　偏光顕微鏡測定結果（上図：A-K 7day 20℃、A-K 7day 80℃、下図：A-K 28day 20℃、A-K 28day　80℃）

（１５）吸着量測定結果

セシウムイオンの吸着量測定結果を図 25 に示す。セシウムの吸着量はナトリウムを刺激剤とした試料が最も高い結果であり、カリウム型であると吸着量が低下する傾向にあった。なお、陰イオンであるヨウ素イオンは全く吸着しなかった。このことからジオポリマーは陽イオンのみの吸着しか行われないことが示唆された。

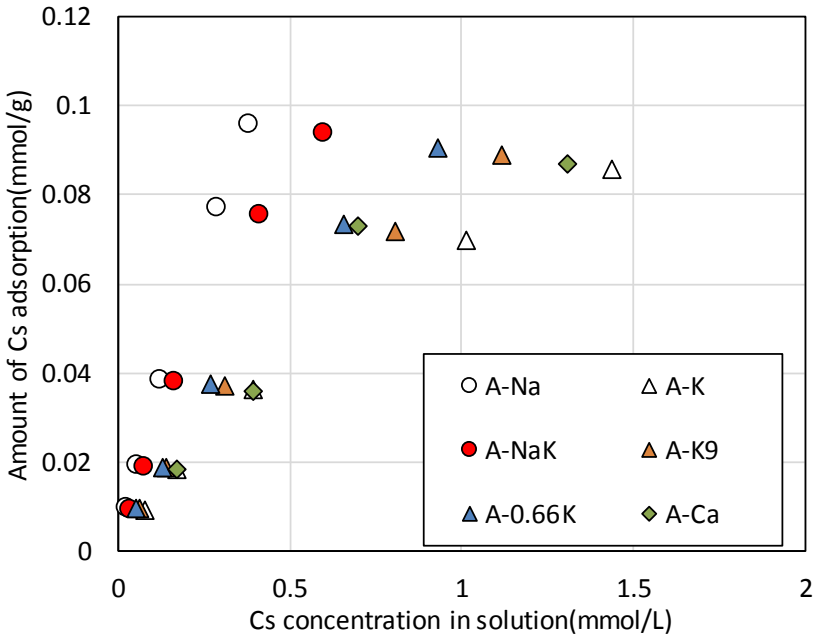


図 25　セシウムイオンの吸着等温線

（１６）溶出量測定結果

図 26 に 6 か月間純水に浸漬した溶液中の累積濃度を示す。アルカリの溶出量はナトリウムを刺激剤とした試料の方が高い結果となった。また、Al と Si の溶出量もナトリウムを刺激剤とした試料が高い結果であった。一方、Si の量が高い試料でも Si の溶出量が多くなることからカリウム型のジオポリマーでも Si の量を適切に設定する必要がある。

図 27 に質量減少率を示す。イオンなどの溶出量はナトリウムが高かったが、質量減少ではナトリウム型は低い減少率であった。また、水量を低下させた A-K9 も低い減少率であることから水量を低減させたカリウム型のジオポリマーが溶脱抵抗性は高いといえる。

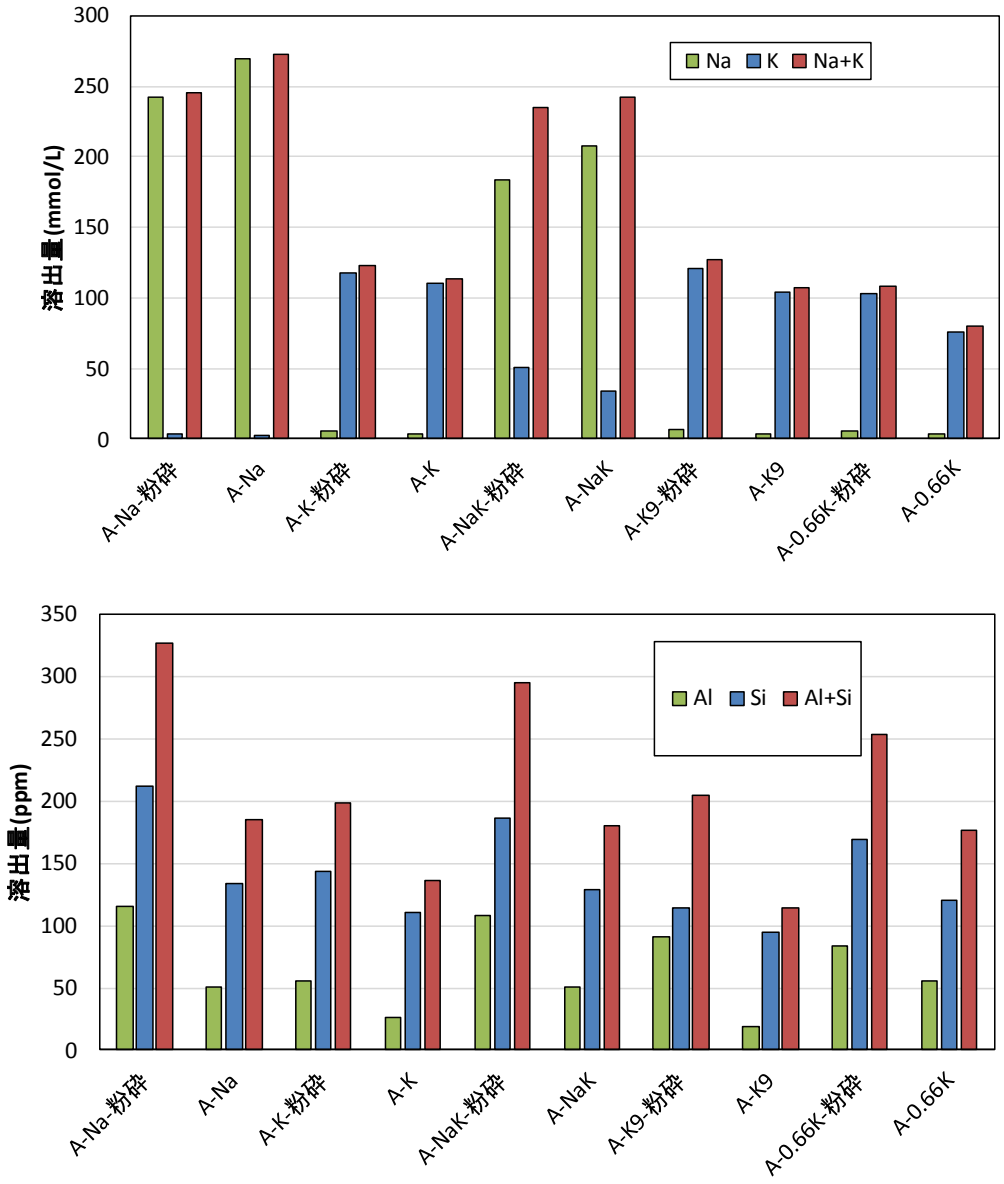


図 26　溶出量測定結果（6 か月累積）

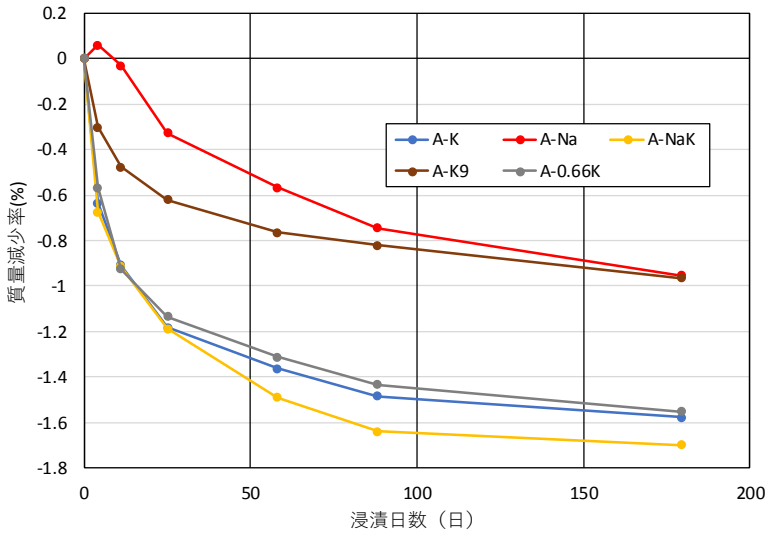


図 27　質量減少率の推移

（１７）透水試験結果

透水試験の結果を表 5 に示す。本研究で作製したジオポリマーはおおよそ 10^{-11}(m/s)程度の透水係数であった。同程度の圧縮強度であるセメントモルタルと比較すると 2 桁高い値であった。このことからメタカオリンジオポリマーにおいては水の浸透に対する抵抗性は低いと考えられる。

表 5　透水係数試験結果

試料	透水係数(m/s)
A-0.33K(ジオポリマー)	1.3e-11(TP法)
A-Na(ジオポリマー)	2.5e-11(FP法)
40N/mm²のOPCモルタル*)	1.0e-13
28.7N/mm²のOPCモルタル*)	1.0e-12

*)宮原ら，“トランジェントパルス法及び水銀圧入法を用いた難透水性モルタルの透水係数,” 土木学会第 57 回年次学術講演会，2002.

3.3　残された課題と今後の計画

2019 年度では使用するメタカオリン、アルカリ刺激剤および温度の影響を明らかにしたが、一部の試験体にのみ適用したものもあるため、今後さらに組成の異なる試験体に対して測定を行う必要がある。また、温度の影響は物性には影響を及ぼしているが、微細構造の観点からは明確に違いを明らかにすることができなかった。したがってさらに微細構造測定に関して詳細な検討を行う必要がある。

今後の計画として、ジオポリマー硬化体の適切な配合を明らかにし、それを用い溶出試験を継続的に行い、長期にわたる溶出特性について検討を行う。また、溶出試験やカルシウム吸着試験を行った試験体のキャラクタリゼーションを固体核磁気

共鳴装置によって同様に行い変質状態を分析する。さらに硬化体内部の水分の状態分析を行うためにプロトン NMR による測定も継続する。また、収着後および溶出試験後の元素分布の状態を測定するために EPMA によってマッピングを行う。

4. まとめ

３種類のメタカオリンおよびアルカリ刺激剤を用いてジオポリマー硬化体を作製し、各種物性試験とその微細構造測定を行った結果、異なるメタカオリンを用いた場合、圧縮強度などの機械的物性が大きく異なることを明らかにした。このことから適切なメタカオリンを選定する必要があることが示された。また、これらの物性の違いはメタカオリンの反応性に起因することを明らかにした。養生温度の影響は微細構造試験結果には大きく影響を及ぼさなかったが、圧縮強度や収縮特性に影響を与えることが示された。このことからアルカリ刺激剤の違いによりジオポリマー硬化体の構造変化が生じている可能性が示唆された。

以下にそれぞれの物性に及ぼす影響程度について示す。

	メタカオリンの種類	アルカリ刺激剤の種類	水量	温度
フロー	◎	○	○	―
機械的特性	◎	○	○	○
拡散係数	―	○	―	―
収縮	―	○	○	◎
吸着量	―	◎	○	―
透水係数	―	○	―	―

・外部発表リスト

2019 年度　外部発表

【学術論文】

【口頭発表】

1. 胡桃澤 清文、小島 真実：メタカオリンを原料としたジオポリマーの創製、資源・素材 2019、京都、2019．9
2. 胡桃澤 清文、小島 真実：メタカオリンジオポリマーの各種物性に関する検討、資源・素材 2019、京都、2019．9

研究報告 2

新規析出促進法によるベントナイト緩衝材中の二次鉱物が拡散および透水挙動に与える影響評価

電力中央研究所　原子力技術研究所

田中 真悟

目次

1. 背景・目的 1

2. 全体研究計画（3ヵ年における全体計画） 3

2.1 【課題 1】二次鉱物が析出した変質緩衝材の調製 3

2.1.1. 数値解析による実験条件の事前検討 3

2.1.2. 二次鉱物の析出促進と制御 3

2.1.3. 析出形態の観察 3

2.2. 【課題 2】二次鉱物が拡散係数および透水係数に与える影響評価 3

2.2.1. 変質緩衝材を用いた拡散試験 3

2.2.2. 数値解析による二次鉱物の影響評価 4

2.2.3. 変質緩衝材を用いた透水試験 4

3. ２０１９年度の研究実施内容 4

3.1. 実施計画 4

3.2. 2019 年度の成果内容 5

3.2.1. 二次鉱物の析出促進と制御（実験方法） 5

3.2.2. 拡散試験手法 7

3.2.3. 実効拡散係数の取得 8

3.2.4. 二次鉱物の析出促進と制御（改良版） 14

3.2.5. 析出形態の観察 17

3.2.6. 数値解析による二次鉱物の影響評価 19

3.3 残された課題と今後の計画 26

4. まとめ 27

2019 年度外部発表リスト 28

参考文献 29

図リスト

図 1 モンモリロナイト（ベントナイト）試料の膨潤.....5

図 2 析出実験装置の概念図.....6

図 3 循環型透過拡散システム.....7

図 4 二次鉱物の析出が無い場合の HTO および Cl-36 相対濃度の経時変化と最適化曲線.....9

図 5 二次鉱物の析出が無い場合の透過拡散試験後の含水率分布.....9

図 6 石膏が析出した場合の HTO および Cl-36 相対濃度の経時変化と最適化曲線.....10

図 7 石膏が析出した場合の透過拡散試験後の含水率および陽イオン当量濃度分布.....10

図 8 カルサイトが析出した場合の HTO および Cl-36 相対濃度の経時変化と最適化曲線...11

図 9 カルサイトが析出した場合の透過拡散試験後の含水率および陽イオン当量濃度分布 11

図 10 HTO および Cl-36 実効拡散係数と拡散試験後の乾燥密度との関係.....13

図 11 析出実験装置（改良版）の概念図.....15

図 12 珪砂を混合したベントナイトにおける通電後の各イオン分布.....16

図 13 初期 Ca 当量分率 0.50 における実験後の試料の EPMA 観察結果 17

図 14 初期 Ca 当量分率 0.75 における実験後の試料の EPMA 観察結果 18

図 15 数値解析により最適化した初期濃度条件.....22

図 16 最適化した初期濃度条件におけるカルサイト析出挙動の解析結果（2 mA, 10 日）..23

図 17 最適化した初期濃度条件におけるカルサイト析出挙動の解析結果（4 mA, 5 日）....24

図 18 透過拡散試験において、実効拡散係数が局所的に変化した場合の
試料内部濃度の経時変化.....25

表リスト

表 1　全体計画 4

表 2　2019 年度前半の月次計画 4

表 3　2019 年度後半の月次計画 5

表 4　透過拡散試験　条件一覧 8

表 5　透過拡散試験　結果一覧（試験後の含水率および乾燥密度） 12

1. 背景・目的

放射性廃棄物処分事業を合理的に推進するためには、科学的知見の拡充により不確実性や過度な保守性を低減し、より現実的なシナリオ、モデル、パラメータに基づいて安全評価を行う必要がある。高レベル放射性廃棄物（JNC 2000）および TRU 廃棄物の地層処分（JNC-FEPC 2005）や、原子炉解体廃棄物の中深度処分では、天然の岩盤と人工バリアからなる多重バリアシステムにより放射性物質を生物圏から隔離するため、これらのバリア性能の長期的な変遷を精度よく評価することが重要となる。人工バリアの 1 つであるベントナイト緩衝材は、低透水性、核種収着性および物理的・化学的な緩衝性等の核種移行の抑制につながる特性を有する。TRU 廃棄物や原子炉解体廃棄物の中には、陰イオンの化学形が支配的となる C-14 や I-129 が多く含まれ、これらの核種はバリア材による収着性が見込めないことから、物理的なバリア性能の指標となる拡散係数や透水係数が安全評価上重要なパラメータとなる。処分場閉鎖後、地下水成分や併設される他の人工バリア（オーバーパック、セメント系材料等）との長期的な相互作用により、緩衝材の主要鉱物モンモリロナイトの変質・溶解や、二次鉱物の析出等が生じ、緩衝材の拡散係数や透水係数が変化する可能性がある。このうち、セメントと緩衝材との相互作用においては、セメント系材料の溶脱に伴う Ca^{2+} イオンや OH^- イオンが、地下水中の重炭酸イオンや炭酸イオンと反応し、緩衝材中にカルサイトが二次鉱物として析出する可能性がある。このとき、析出したカルサイトが緩衝材中の空隙を閉塞（クロッギング）することで、緩衝材の拡散係数が低下しバリア性能が向上する場合もあり得る一方で、粘土粒子が結合（セメンテーション）して膨潤性が低下することで透水性が増大し、トータルの性能がむしろ低下する可能性も考えられる。他方で、二次鉱物の析出によるバリア性能向上の可能性については、科学的知見の不足と保守性の確保のため、現行の安全評価（NUMO, 2018）では考慮されていないのが現状である。したがって、緩衝材中の二次鉱物によるバリア性能変遷の可能性を実験的に明らかにすることは、安全評価の保守性の低減や信頼性向上に貢献できると考えられる。

緩衝材の長期変質評価については、変質シナリオに基づき、処分環境下で発生する可能性のある変質現象を抽出・列挙し、検討するアプローチが取られている（柴田ほか 2004、笹本ほか 2013, 小田ほか 2013）。これに関連し、ナチュラルアナログの観点からは、二次鉱物の閉塞作用により緩衝材のバリア性能が向上する可能性も報告されている（藤井ほか、2014）。その一方で、室内試験により、緩衝材の変質がバリア性能に与える影響を定量的に示すことは容易ではない。この理由として、処分環境（低動水勾配かつ圧縮系）では、緩衝材の物質移行が極めて緩慢であり、現実的な実験期間内（数年程度）で観測可能な変質を生じさせることが困難なことが挙げられる。

透水試験による既往の研究では、動水勾配やアルカリ溶液の濃度（または接触量）を処分環境よりも大きく設定し、変質を促進させた試験が行われている。例えば、セメントと緩衝材を直列に配置した透水試験（柴田ほか 2011）では、セメント中の $Ca(OH)_2$ 溶脱に伴い、緩衝材中に Ca を含む二次鉱物が析出していることが示唆されている。また様々なアルカリ

溶液（NaOH, KOH, $Ca(OH)_2$）に長時間（１年程度）浸漬した圧縮ベントナイトを用いた透水試験からは、Na 型モンモリロナイトから K 型または Ca 型モンモリロナイトへのイオン交換、モンモリロナイトのアルカリ溶解、二次鉱物の析出等、複合的な現象が透水性に影響を及ぼすことが報告されている（横山ほか 2010）。

拡散試験による既往の研究では、透過拡散試験装置を用いた相互拡散法（Counter diffusion 法）にて粘土質岩中に鉱物を析出させ、鉱物が析出した試料を用いた拡散研究が行われている。例えば、Chagneau ら(2015)は、illite 中に Celestite ($SrSO_4$)を析出させた試料を用い、HTO および Cl^-の透過拡散試験を行っている。その結果、Cl^-の実効拡散係数は HTO よりも顕著に小さいと報告しており、析出物が大きな空隙を閉塞した結果、illite 表面の負電荷による陰イオン排除により Cl^-の拡散が選択的に抑制されていると考察している。また Rajyaguru ら(2019)は相互拡散法にて石灰岩中に $BaSO_4$(Barite)および $CaSO_4$(石膏、Gypsum)を析出させ、HTO の実効拡散係数を比較している。これによると、空隙率の低下がほぼ等しいにもかかわらず Barite が析出した試料の方が小さな拡散係数を示すと報告している。このことは、空隙率のみならず、空隙構造が拡散係数に大きな影響を与えていることを示唆している。一方、相互拡散法による鉱物析出には長時間（３ヶ月以上）を要する、析出形態の制御が困難、残留イオン（とくに未反応の陽イオン）を排除できない、等の課題がある。

上述のように、透水試験や拡散試験では、緩衝材の変質に長い実験期間（数ヶ月～１年程度）を要するため、実験結果の再現性の確認や様々な条件下でのデータ取得が困難である。とくに、高アルカリ溶液による透水試験では、モンモリロナイトのアルカリ溶解、鉱物学的な変質、二次鉱物の析出等が複合的に生じるため、実験結果の解釈が難しく、実験結果を直接的に変質現象のモデル化に繋げるには未だ課題が多いと考えられる。柴田ら(2004)による緩衝材の長期変質評価の考え方によると、『抽出した現象に関する理解が不十分な場合は、発生を仮定した際の緩衝材性能へのインパクトを評価する』、とされている。したがって、複雑なベントナイト変質現象を紐解き、二次鉱物による空隙閉塞の影響のみを抽出し評価できれば、実環境での現象理解が進み、科学的な裏付けのある安全評価モデルの構築に貢献できると考えられる。

そこで本研究では、緩衝材に及ぼす二次鉱物の影響を評価するための新たな手法を提案する。具体的には、セメントと緩衝材の相互作用で析出の可能性が報告されている石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）とカルサイト ($CaCO_3$)を対象（例えば Tinseau et al., 2006）とし、電場により様々な析出形態でこれらの鉱物を析出させた変質緩衝材を調製する。さらに、変質緩衝材を用いた拡散試験および透水試験から、鉱物の析出量や析出形態の違いが緩衝材の拡散係数および透水係数に与える影響を明らかにする。昨年度は、移流分散と析出を考慮した数値解析により実験条件（電流、通電時間、Ca 当量分率、など）を最適化したのち、電場による二次鉱物の析出促進法（Tanaka, 2018）を適用し、析出形態（析出量、サイズ、範囲、位置など）が異なる変質緩衝材を調製した。今年度は、これらの変質緩衝材を用いた透過拡散試験から、主に二次鉱物が拡散係数に与える影響を明らかにすることを目的とする。

2. 全体研究計画（3 ヵ年における全体計画）

2.1. 【課題 1】二次鉱物が析出した変質緩衝材の調製

2.1.1. 数値解析による実験条件の事前検討

二次鉱物析出の制御に必要な基礎データを整備するため、既に得られている電位勾配下における圧縮モンモリロナイト中での水、SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, Na^+, Ca^{2+}等の移動速度および分散係数（Tanaka, 2011, 2018）のデータをもとに、様々な電流値およびモンモリロナイト密度における各イオンの移動速度と分散係数を設定する。

これらのパラメータに基づき、各イオンの移動速度、分散および析出を考慮した Fortran による数値解析モデルを構築し、通電後のイオン濃度分布と析出範囲および位置を推定する。解析結果をもとに、二次鉱物の析出形態を制御するための最適な実験条件（電流値、通電時間、モンモリロナイト密度、初期 Ca 当量分率、初期の CO_3^{2-}および SO_4^{2-}濃度など）を見出す。

2.1.2. 二次鉱物の析出促進と制御

事前解析で選定した初期条件になるように、Na/Ca 混在型モンモリロナイトと、Na_2SO_4 溶液または Na_2CO_3 溶液で飽和させた Na 型モンモリロナイトを接触させ、所定の時間、通電を行う。電場により Ca^{2+}をカソード側へ、SO_4^{2-}または CO_3^{2-}をアノード側へ移動させ、難溶性の $CaSO_4・2H_2O$（石膏）または $CaCO_3$（カルサイト）として析出させる。析出実験後、各元素の濃度を分析し、析出範囲および析出物の濃度分布を取得する。また、拡散試験および透水試験に供するため、石膏およびカルサイトが析出した変質緩衝材を調製する。

2.1.3. 析出形態の観察

析出実験で得られた析出物の鉱物種を XRD にて同定するとともに、二次鉱物の析出形態を SEM および EPMA にて観察する。

2.2. 【課題 2】二次鉱物が拡散係数および透水係数に与える影響評価

2.2.1. 変質緩衝材を用いた拡散試験

二次鉱物の析出形態が異なる変質緩衝材試料を用いた拡散試験を透過拡散法にて行う。具体的には、二次鉱物が析出した緩衝材を用い、トレーサー（水、陰イオン等）を高濃度側から低濃度側へ拡散させる。透過拡散法では低濃度側の濃度の経時変化から実効拡散係数および保持因子を評価する。また拡散係数の局所的な変動を評価するため、透過拡散試験終了後の試料をスライスし、トレーサーの内部濃度プロファイルを取得する。さらに、拡散試験終了後の含水率および Na、Ca 濃度分布等を取得し、試験終了後における析出物の量および範囲を確認する。

2.2.2. 数値解析による二次鉱物の影響評価

透過拡散試験における試料内部のトレーサー濃度分布について解析的に検討し、ベントナイト中にカルサイトが析出し、拡散係数が局所的に変化した際の影響を評価する。

2.2.3. 変質緩衝材を用いた透水試験

二次鉱物の析出形態が異なる変質緩衝材試料を用いた透水試験を、加圧定水位法にて行う。具体的には、析出実験後の緩衝材試料を成型し、窒素ガスで試験溶液を加圧することで所定の時間、溶液を透過させる。試験溶液としては脱イオン水または NaCl 溶液を用いる。また二次鉱物が析出していない試料を用いた比較実験を行う。透水試験後、試料をスライスし、含水率および Na、Ca 濃度分布等を取得し、試験終了後における析出物の量および範囲を確認する。

表１　全体計画

実施項目	2018年度	2019年度		2020年度	
	後期	前期	後期	前期	後期
課題1. 二次鉱物が析出した変質緩衝材の調製					
１－１. 数値解析による実験条件の事前検討					
１－２. 二次鉱物の析出促進と制御					
１－３. 析出形態の観察					
課題2. 二次鉱物が拡散係数・透水係数に与える影響評価					
２－１. 変質緩衝材を用いた拡散試験					
２－２. 数値解析による二次鉱物の影響評価					
２－３. 変質緩衝材を用いた透水試験					
総括報告書の作成					

■ ■ ■ ■ ■ ■ 必要に応じて実施

3. ２０１９年度の研究実施内容

3.1 実施計画

全体計画（表１）に基づき、2019 年度は【課題１】に加えて、新たに【課題２】に着手し、表 2～3 の月次計画に基づいて研究を実施した。[1]

表２　2019 年度前半の月次計画

項　目	2019/4	5	6	7	8	9
(1)二次鉱物の析出促進と制御		→	→	→	→	
(2)拡散試験手法の確立			→	→	→	
(3)実効拡散係数の取得			→	→	→	
報告書作成（中間報告書）					→	→

[1] 著者の職場の異動に伴い、2019 年度前半は国立大学法人北海道大学にて、後半は一般財団法人電力中央研究所にて研究を実施した。なお、後述の 3.2.1～3.2.3 の内容は北海道大学にて、3.2.4～3.2.6 の内容は電力中央研究所にて実施した。

表 3　2019 年度後半の月次計画

項　目	2019/12	2020/1	2	3
(4)二次鉱物の析出促進と制御（改良版）	→	→	→	
(5)析出形態の観察		→	→	
(6)数値解析による二次鉱物の影響評価	→	→	→	
2019 年度報告書作成			→	→

3.2. 2019 年度の成果内容

3.2.1. 二次鉱物の析出実験方法

モンモリロナイト（クニミネ工業社製、クニピア F）を Na 型および Ca 型に精製したモンモリロナイトを混合し、Na/Ca 混在型モンモリロナイトを調製した。Ca^{2+}イオン当量濃度は 0.25 に設定した。これを乾燥密度 1.0 kg/dm^3 に圧縮成形した。試料の形状は、直径 20 mm, 長さ 10 mm または 20 mm の円柱状とした。これらの試料を脱イオン水にて図 1 のように浸し、真空デシケータにて脱気したのち、長さ 10 mm の試料については 7 日間以上、長さ 20 mm の試料については 30 日以上膨潤させた。

SO_4^{2-}またはCO_3^{2-}の源として、長さ 10mm の Na 型モンモリロナイトを 1.0 M Na_2SO_4 溶液または 1.0 M Na_2CO_3 溶液（pH = 11.5）に浸し、7 日間以上飽和させた。

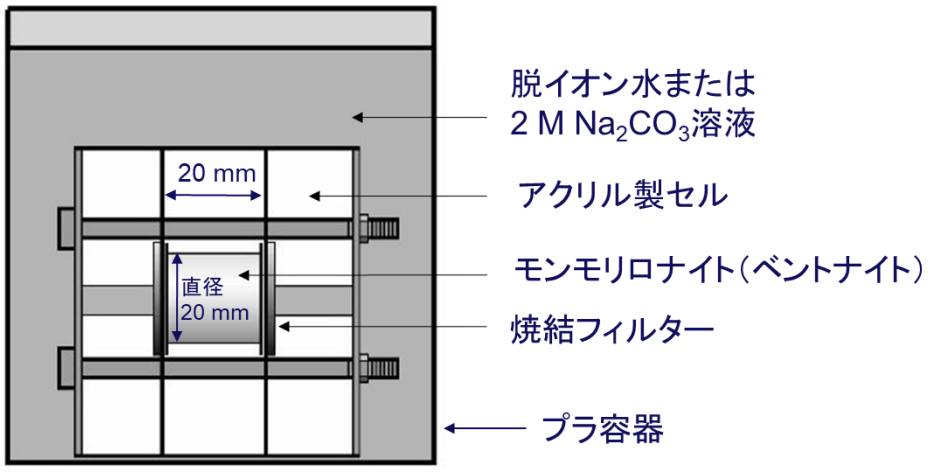


図 1　モンモリロナイト（ベントナイト）試料の膨潤（図は長さ 20 mm の場合）

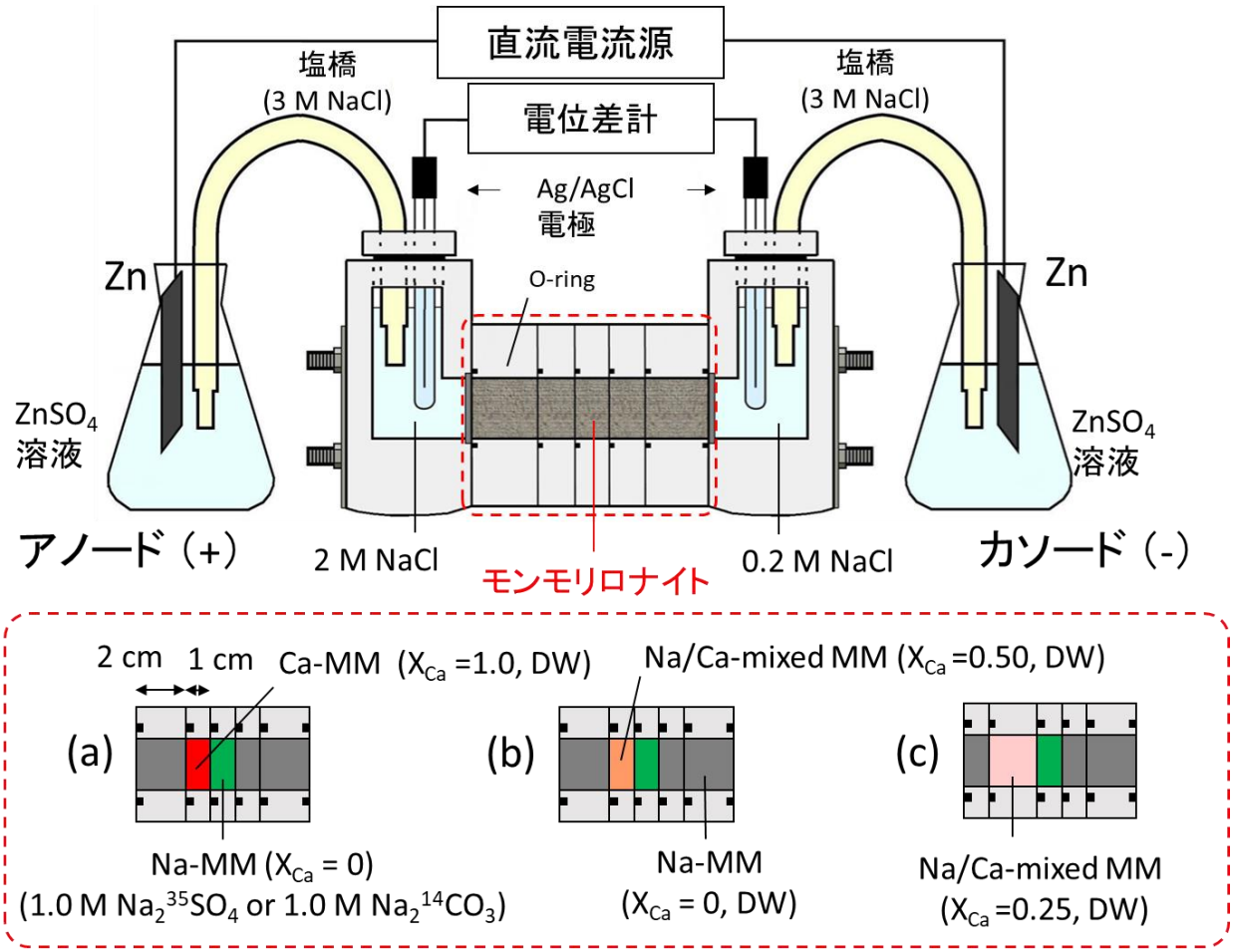


図２　析出実験装置の概念図（MM：モンモリロナイト、DW：脱イオン水）

図２に析出実験装置を示す。図中のモンモリロナイト部は、３種類の試料、(i)Na/Ca 混在型モンモリロナイト（脱イオン水で飽和）、(ii) 1.0 M Na_2SO_4 溶液または 1.0 M Na_2CO_3 溶液で飽和させた Na 型モンモリロナイト、(iii)Na 型モンモリロナイト（脱イオン水で飽和）、から構成される。これらの組み合わせを図２(a), (b)および(c)に示す。今年度は(c)の条件のみで実験を行った。モンモリロナイト試料の両側には、2 M NaCl 溶液（アノード側）および 0.2 M NaCl 溶液（カソード側）で満たされたリザーバを配置し、これと $Zn/ZnSO_4$ 溶液とを NaCl 塩橋を用いて接続した。モンモリロナイトにかかる電位差は Ag/AgCl 電極を用いて計測した。

電流値および通電時間は昨年度と同様に、15 mA、86,400 s（24 h）とした。通電後、装置を解体し、二次鉱物が析出した部分を 10 mm 切り出し、再度、７日間以上膨潤（図１）させて透過拡散試験の供試体とした。なお、膨潤溶液には 0.01M の NaCl 水溶液を用いた。

3.2.2. 拡散試験手法

透過拡散試験装置は、鈴木ら(2002)により報告されている循環型システムを採用した。装置概念図を図３に示す。このシステムは、高濃度側溶液（500 mL）、低濃度側溶液（100 mL）、送液ポンプ（EYELA, MP-2110）、シリコンチューブ、拡散セルで構成される。このシステムの利点としては、(1)焼結フィルター内に溶液を循環させるためフィルターの拡散抵抗を無視できること、(2)溶液がベントナイトに直接接触するため、境界条件を濃度一定として制御できること、の２点が挙げられる。

はじめに予備試験および析出物が無い場合のデータ取得を目的として、Na 型モンモリロナイトを乾燥密度 1.0 kg/dm^3 に圧縮成形（試料厚さ 1.0 cm）し、0.01 M の NaCl 溶液にて 7 日間飽和させた試料を調製した。これを図３のように組み上げ、高濃度側および低濃度側に所定量の NaCl 溶液（0.01 M）を加えた。その後、高濃度側に HTO（放射能濃度約 200 Bq/mL）を添加して拡散試験を行った。低濃度側溶液を約 12 時間置きに 1mL サンプリングし、その放射能から相対濃度の経時変化を得た。この操作を約 10 日間継続した。HTO 拡散試験後、高濃度側溶液を Cl-36 で標識した NaCl 溶液、低濃度側溶液をトレーサーを含まないフレッシュな NaCl 溶液（0.01 M）に変更し、再度、HTO と同様の手順で拡散試験を行った。なお、Cl-36 の放射能測定の際は、HTO の β 線最大エネルギーが 18.6 keV であることを考慮し、エネルギー幅を 20 keV～710keV（Cl-36 の β 線最大エネルギー）に設定することで、Cl-36 の放射能のみを正確に測定した。拡散試験後、試料を 0.5mm でスライスし、乾燥前後の重量差から含水率分布を得た。また、乾燥後の試料を 1M HCl 溶液または 1M NH_4Cl 溶液で懸濁させ、試料中のすべての陽イオン（Na^+および Ca^{2+}）を抽出し、ICP-AES にて Na および Ca 濃度を測定した。

上述の操作を、石膏またはカルサイトが析出した試料についても同様に実施した。

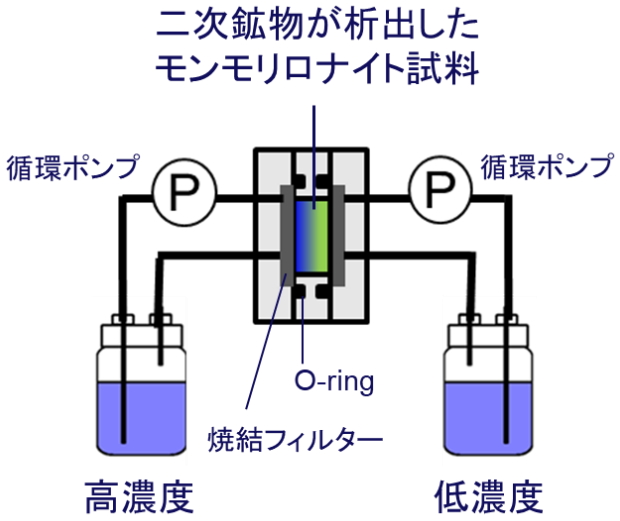


図３　循環型透過拡散システム（概念図）

3.2.3. 実効拡散係数の取得

昨年度に見出した初期条件（図２(c)）にて石膏およびカルサイトの析出促進・制御を行った。その後、析出箇所を切り出し、3.2.2 の手順に従い透過拡散試験を行い、HTO および Cl-36 の相対濃度の経時変化を得た。透過拡散試験は 6 回行い、それらの試験条件を表４に示す。

実効拡散係数の評価の際には、一般的に用いられている多孔質媒体中の拡散モデルを用いた。放射性核種の拡散は以下の式で記述できる（Vanloon et al., 2003）。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_e}{\alpha}\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \qquad (1)$$

$$\alpha = \varepsilon + \rho K_d \qquad (2)$$

ここで、t は時間、x は距離、C は濃度、D_e は実効拡散係数、α は保持因子、ε は空隙率、ρ は乾燥密度、K_d は分配係数を表している。透過拡散試験の初期条件、境界条件は以下の式で記述できる。

$$C(x,t) = 0 \quad t = 0 \qquad (3)$$

$$C(0,t) = C_0 \quad x = 0 \qquad (4)$$

$$C(L,t) = 0 \quad x = L \qquad (5)$$

ここで、C_0 は初期濃度、L は試料長さ（1cm）である。このとき、解析解は以下の式となる。

$$\frac{C(L,t)}{C_0} = \frac{SD_e}{V_{out}L}t - \frac{\alpha SL}{6V_{out}} - \frac{2\alpha SL}{\pi^2 V_{out}}\sum_{j=1}^{\infty}\frac{(-1)^j}{j^2}\exp\left(-\frac{D_e j^2 \pi^2 t}{L^2 \alpha}\right) \qquad (6)$$

ここで、V_{out} は低濃度側溶液量、S は試料断面積である。低濃度側溶液の相対濃度の経時変化に対し、Origin2019 で最適化し、実効拡散係数（D_e）と保持因子（α）を評価した。

表４　透過拡散試験　条件一覧

No.	乾燥密度	イオン強度	析出条件	二次鉱物	トレーサ
1	1.0 kg/dm^3	0.01 M NaCl 水溶液	–	無し	HTO
2					Cl-36
3			・X_{Ca} = 0.25 (2cm)	石膏	HTO
4			・1 M Na_2CO_3 溶液(1cm)	($CaSO_4$・$2H_2O$)	Cl-36
5			・電流値 15 mA	カルサイト	HTO
6			・24 時間通電	($CaCO_3$)	Cl-36

図４に二次鉱物の析出が無い場合の透過拡散試験における HTO および Cl-36 相対濃度の経時変化および（６）式による最適化曲線を示す。いずれの相対濃度も（６）式でよく再現できていることがわかる。HTO は、D_e = （2.0±0.1）×10^{-10}（m^2/s）、Cl-36 は D_e = （6.3±0.1）×10^{-12}（m^2/s）となり、両者の実効拡散係数は２桁程度異なる結果となった。これは Tachi ら(2014)により報告されているモンモリロナイト中の HTO および I^-の傾向とおおむね整合的であり、陰イオン排除効果の影響と考えられる。

図５に試験後の含水率分布を示す。試料の両端すなわち溶液と接触している箇所の含水率がやや高くなっているが、概ね一定であるといえる。また試験後の平均含水率は 43.7 wt%

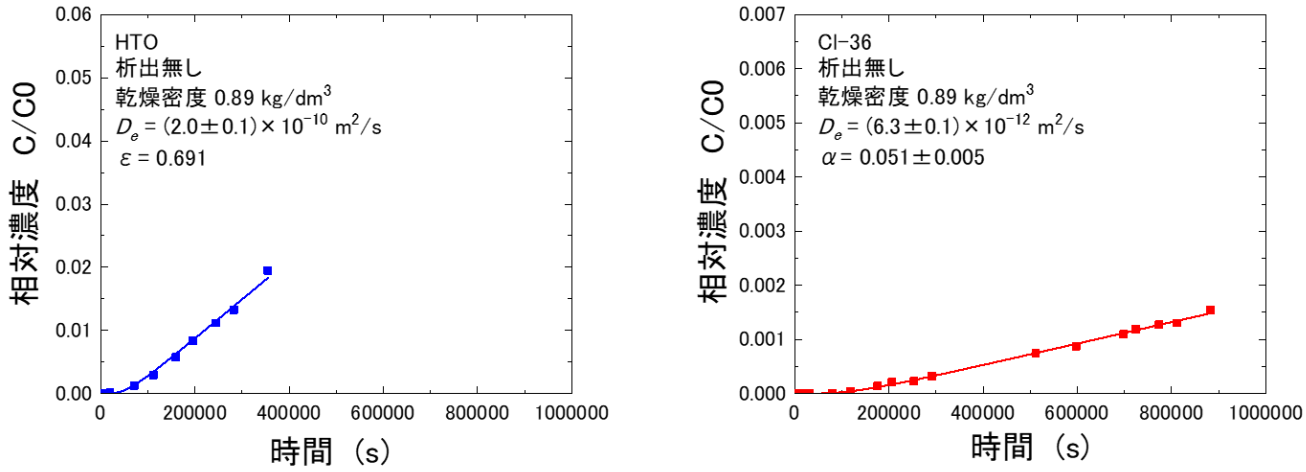


図４　二次鉱物の析出が無い場合の HTO および Cl-36 相対濃度の経時変化と最適化曲線

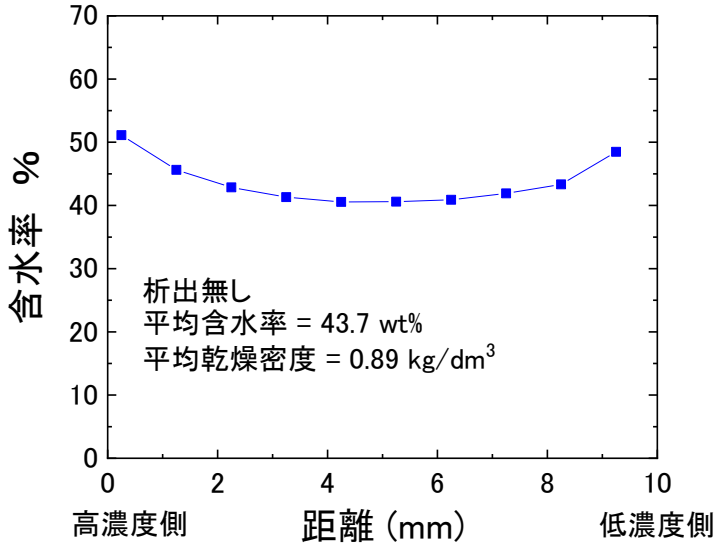


図５　二次鉱物の析出が無い場合の透過拡散試験後の含水率分布

であり、これに対応する平均乾燥密度は 0.89 kg/dm^3 であった。初期乾燥密度 1.0 kg/dm^3 と比較してやや低くなることが明らかとなり、拡散係数を比較する際は、乾燥密度の変化を考慮する必要があることが分かった。

図 6 に石膏が析出した試料における HTO および Cl-36 相対濃度の経時変化および（6）式による最適化曲線を示す。いずれの相対濃度も（6）式でよく再現できていることがわかる。HTO は、D_e = （2.9±0.1）×10^{-10}（m^2/s）、Cl-36 は D_e = （2.3±0.1）×10^{-11}（m^2/s）となり、二次鉱物の析出が無い場合と同様の傾向が認められた。

図 7 に石膏が析出した試料における透過拡散試験後の含水率分布および Na, Ca 濃度分布を示す。平均含水率は 49.1 wt%でこれに対応する平均乾燥密度は 0.76 kg/dm^3 であった。ま

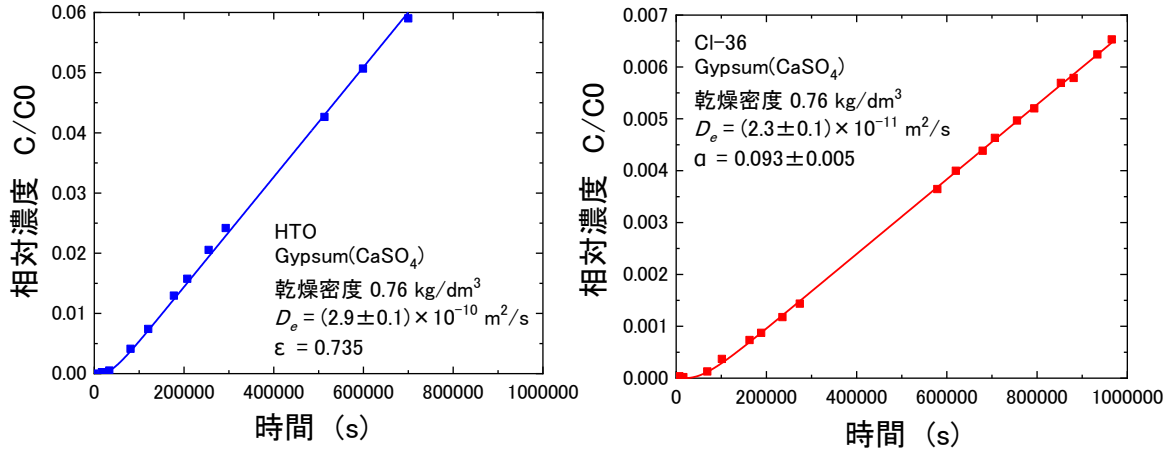


図 6　石膏が析出した場合の HTO および Cl-36 相対濃度の経時変化と最適化曲線

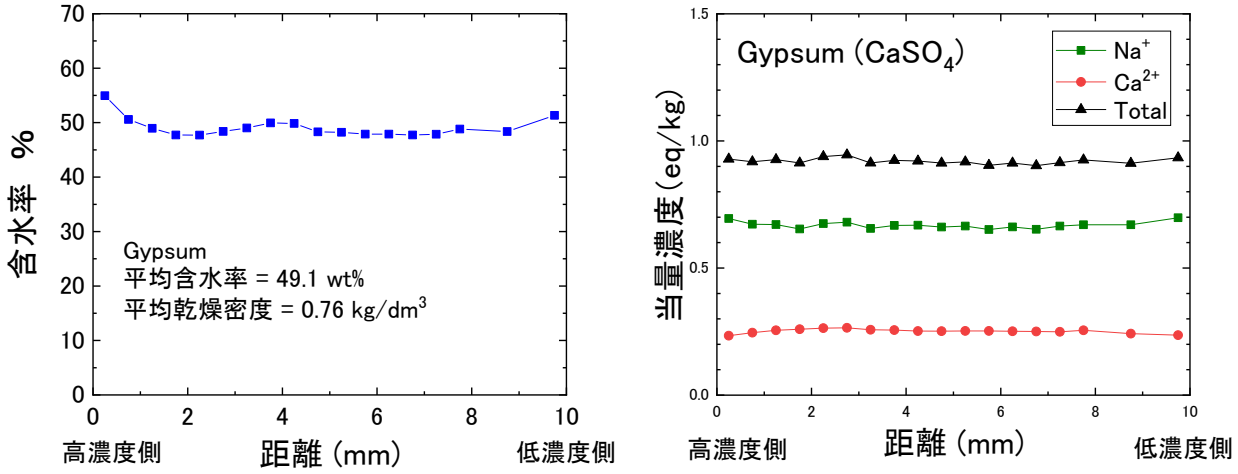


図 7　石膏が析出した場合の透過拡散試験後の含水率および陽イオン当量濃度分布

た、拡散試験後の Na および Ca 分布をみると、均一であることがわかる。これは析出した石膏が再膨潤中あるいは透過拡散試験中に全て溶解し、モンモリロナイト中に均一に拡散したことを意味している。このことから、溶解度が比較的高い石膏の場合は、石膏が拡散係数に与える影響を評価することが困難であることが分かった。

図８にカルサイトが析出した場合の HTO および Cl-36 相対濃度の経時変化および（６）式による最適化曲線を示す。いずれの相対濃度も（６）式でよく再現できていることがわかる。HTO は、D_e = （2.2±0.1）×10^{-10}（m^2/s）、Cl-36 は D_e = （1.0±0.1）×10^{-11}（m^2/s）となり、二次鉱物の析出が無い場合と同様の傾向が認められた。

図９にカルサイトが析出した場合の透過拡散試験後の含水率分布および Na, Ca 濃度分布を示す。平均含水率は 44.4 wt%でこれに対応する平均乾燥密度は 0.87 kg/dm^3 であった。また、Na および Ca 分布をみると、Ca 濃度に特異的なピークが存在することがわかる。これ

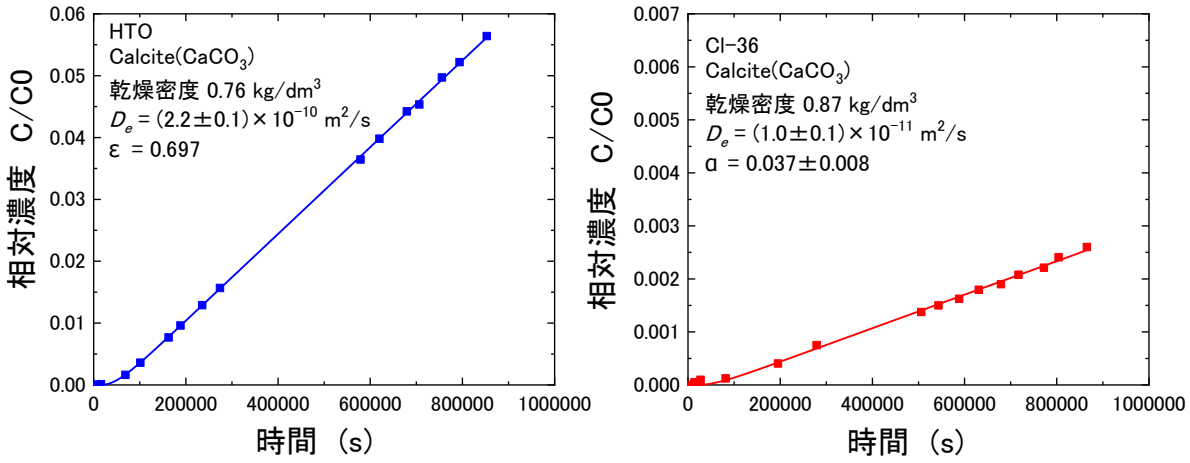


図８　カルサイトが析出した場合の HTO および Cl-36 相対濃度の経時変化と最適化曲線

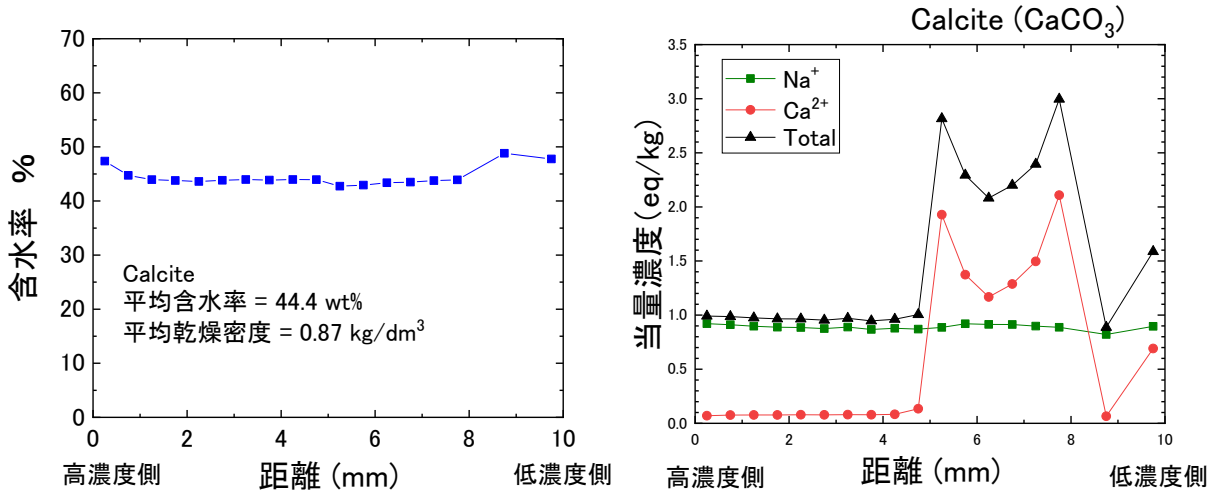


図９　カルサイトが析出した場合の透過拡散試験後の含水率および陽イオン当量濃度分布

は溶解度が比較的低いカルサイトの場合は、電場により析出させたカルサイトが再膨潤中および透過拡散試験後においても溶解せずに残存していることを意味している。このことから、拡散および透水挙動に影響を及ぼす二次鉱物としてカルサイトに着目するのが良いことが分かった

表５に、透過拡散試験で得られた実効拡散係数、保持因子（有効空隙率)、試験後の含水率および試験後の乾燥密度を示す。電場による二次鉱物の析出、透過拡散試験用の試料成型、再膨潤、および透過拡散試験の過程で、乾燥密度は初期の 1.0 kg/dm^3 から若干減少することがわかった。試料の乾燥密度は実効拡散係数に大きな影響を及ぼすため、拡散係数に及ぼす析出物の影響を比較検討する際は、二次鉱物の有無だけではなく、乾燥密度の変化の影響に十分留意する必要がある。そこで、実効拡散係数と拡散試験後の平均乾燥密度の関係を考察することとした。

表５　透過拡散試験　結果一覧（試験後の含水率および乾燥密度）

二次鉱物	平均含水率	試験後の乾燥密度	Cl-36		HTO	
	(wt%)	(kg/dm^3)	実効拡散係数 (m^2/s)	有効空隙率 (−)	実効拡散係数 (m^2/s)	空隙率 (-)
析出無し	43.7	0.89	6.3×10^{-12}	0.051	2.0×10^{-10}	0.69
石膏（全て溶解）	49.1	0.76	2.3×10^{-11}	0.093	2.9×10^{-10}	0.74
カルサイト（残留）	44.4	0.87	1.0×10^{-11}	0.037	2.2×10^{-10}	0.70

図１０に HTO および Cl-36 の実効拡散係数と、試験後の平均乾燥密度との関係を示す。乾燥密度の増加に伴い､HTO および Cl-36 の実効拡散係数は両者ともに緩やかに減少した。これは一般的な傾向であり、二次鉱物の有無による特異的な傾向の変化は認められなかった。このことから、今回のカルサイト析出量では、カルサイトが拡散係数に与える影響は限定的であることを示唆している。

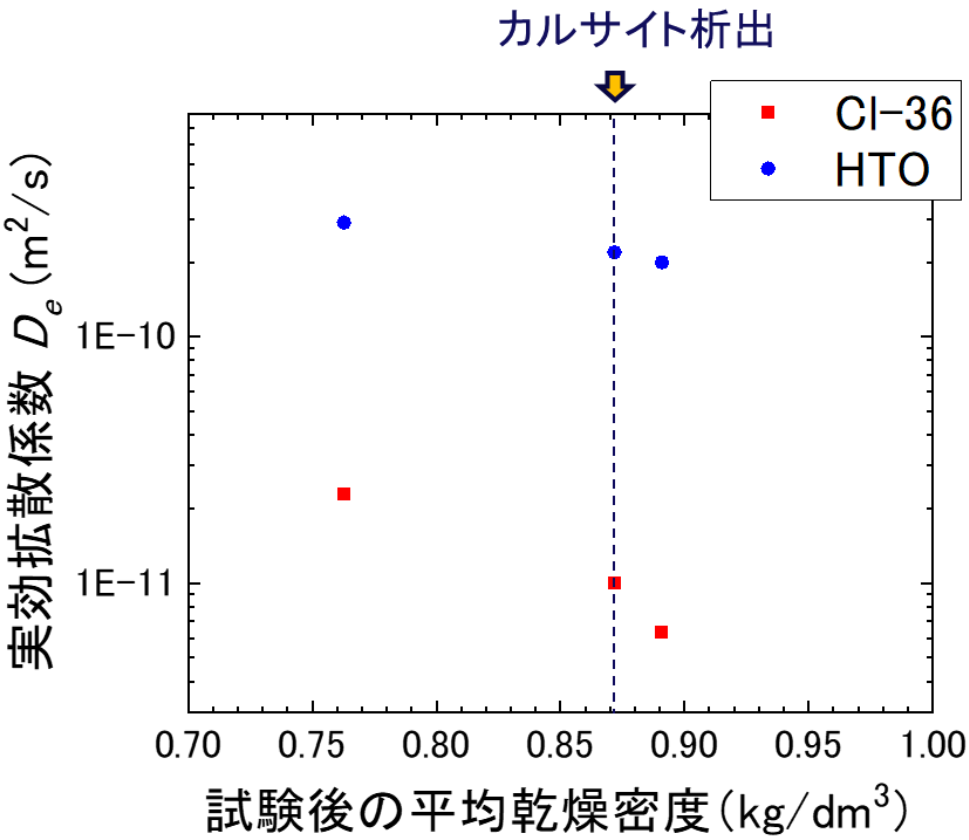


図１０　HTO および Cl-36 実効拡散係数と拡散試験後の乾燥密度との関係

3.2.4. 二次鉱物の析出促進と制御（改良版）

2019 年度前半の研究およびその中間評価において、バリア性能に影響を及ぼす可能性のある二次鉱物としてカルサイトが重要であること、および珪砂が二次鉱物の析出に重要な役割を果たす可能性が見出されたことから、純粋なモンモリロナイト（クニピアＦ）に珪砂を混合した試料（以後、ベントナイトと呼称する）を実験に使用し、これにカルサイトを析出させることとした。まず初めに、クニピア F を Na 型および Ca 型に精製したモンモリロナイトと、石英（SiO_2）の純度が 99%の珪砂（株式会社トウチュウ、アルバニー９０、平均粒径 150μm）を混合し、乾燥密度 1.2 kg/dm^3、モンモリロナイト部分密度 0.7 kg/dm^3 となるように圧縮成型した。このとき Na/Ca 混在型ベントナイトの Ca イオン当量濃度は 0.5 または 0.75 に設定し、長さは 4 cm とした。なお、モンモリロナイト部分密度（ρ_m）は以下の式で定義される（Liu et al., 2003, 佐藤、2009）。

$$\rho_m = \frac{f\rho}{1-\frac{(1-f)\rho}{\rho_s}} \qquad (7)$$

ここで、f(= 0.432)はモンモリロナイト重量割合（wt%）、ρ は乾燥密度（1.2 kg/dm^3）、ρ_s は珪砂の真密度（2.63 kg/dm^3）である。試料の形状は、直径 20 mm, 長さ 10 mm または 20 mm の円柱状とした。これらの試料を脱イオン水にて図 1 のように浸し、真空デシケータにて脱気したのち、長さ 10 mm の試料については 7 日間以上、長さ 20 mm の試料については 30 日以上膨潤させた。CO_3^{2-}の源として、長さ 10mm の Na 型ベントナイトを 2.0 M Na_2CO_3 溶液（pH = 11.5）に浸し、7 日間以上飽和させた。これらのモンモリロナイトを組み合わせてセルを組み立てた。

図１１に電極部を改良した析出実験装置を示す。従来の装置（図２）で使用していた塩橋と Zn/$ZnSO_4$ 電極の代わりに、新たに Ag/AgCl 電極を採用した。これにより実験装置を簡略化するとともに、小型化により省スペースが実現した。なお、Ag/AgCl 電極は Ag をアノード（＋）、白金をカソード（－）として 1 M HCl 中で電解して作製した。Ag/AgCl 電極を NaCl 溶液中にて用いた場合の支配的な酸化還元反応は、アノード部（＋）では $Ag + Cl^- \rightarrow AgCl + e^-$の酸化反応が生じ、カソード部（－）では $AgCl + e^- \rightarrow Ag + Cl^-$の還元反応となる。図中のベントナイト部は、３種類の試料、(i)Na/Ca 混在型ベントナイト（脱イオン水で飽和）、(ii) 2.0 M Na_2CO_3 溶液で飽和させた Na 型ベントナイト、(iii)Na 型ベントナイト（脱イオン水で飽和）、から構成される。ベントナイト試料の両側には、2 M NaCl 溶液（アノード側）および 0.2 M NaCl 溶液（カソード側）で満たされたリザーバを配置した。

電流値および通電時間は、交換性陽イオンの含有量および移動距離との関係を考慮し、10 mA、172,800 s（48 h）とした。通電後、試料を 0.5mm でスライスし、乾燥前後の重量差から含水率分布を得た。また、乾燥後の試料を 0.5 M HCl 溶液で懸濁させ、試料中のすべての陽イオン（Na および Ca）を抽出し、ICP-AES にて Na および Ca 濃度を測定した。さらに、

一部の試料は電子プローブマイクロアナライザ（EPMA）分析に供した。

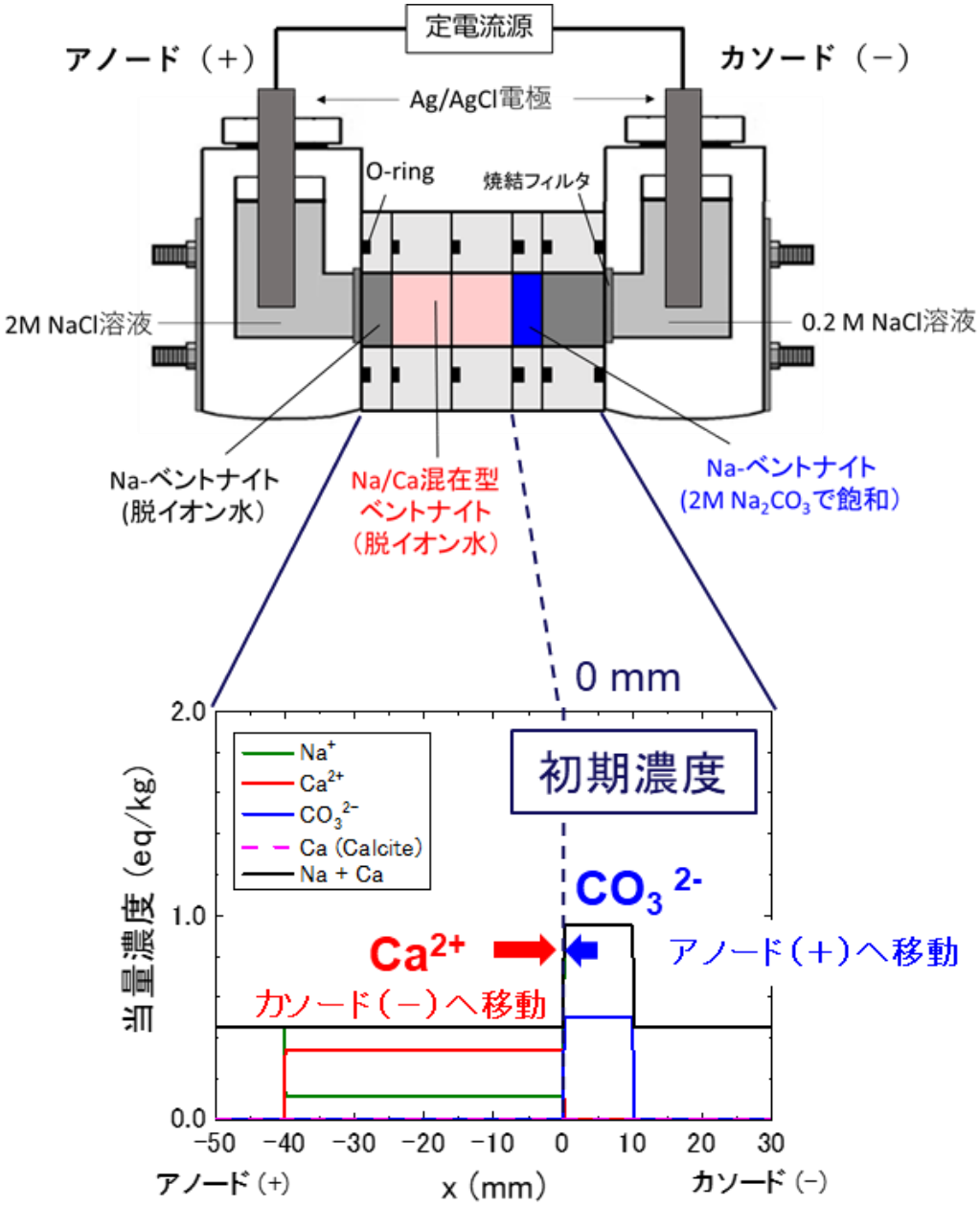


図１１　析出実験装置（改良版）の概念図　（図中の濃度は Ca 当量分率 0.75 の場合）

図１２にモンモリロナイトと珪砂を混合したベントナイトにおける、通電後の各イオン分布を示す。図の点線は陽イオン交換容量（CEC = 0.45 eq/kg）を示している。また上段が実験結果、下段が解析結果である。今回の実験ではカルサイト中の Ca と、交換性陽イオンとして存在している Ca^{2+}の分離を行っていないため、解析結果におけるカルサイト析出範

囲（図１２下の破線）に着目することで実験データを補完できる。

図１２左の初期 Ca 当量分率 0.50 において、交換性陽イオンとして存在していた Ca^{2+}が電場によりカソード側へ移動し、CO_3^{2-}と反応することで、ほぼ全ての Ca^{2+}がカルサイトとして沈殿している可能性が示された。一方、Ca 濃度が高い初期 Ca 当量分率 0.75 においては、交換性陽イオンとして存在していた Ca^{2+}のカソード側への移動に伴いカルサイトとして沈殿するとともに、余剰の Ca^{2+}がさらにカソード側へ移動していることが示唆された。なお、カルサイトが広範囲に析出する理由としては、これまでの研究から、Ca^{2+}のカソード側への移動速度が CO_3^{2-}のアノード側への移動速度よりも５倍程度大きい、すなわち CO_3^{2-}の移動は拡散支配で初期の位置に留まっていることが主な原因として挙げられる。実験結果と解析結果を比較すると、実験で得られた Ca 濃度分布の全体的な傾向を数値解析で再現することができ、数値解析が実験結果の予測に有効であることを確認した。一方で、数値解析により厳密に実験結果を再現するには課題があることが分かる。具体的には、実験では-5mm 付近に Ca ピークが生じているが、解析では 0mm 付近に生じており、位置の違いが認められた。また、実験では 10mm 付近にも Ca ピークが生じているが、このピークについては解析では再現できなかった。これらの結果は解析的に考慮できていない事象が複数存在することを示唆しており、解析の精度向上が今後の課題である。

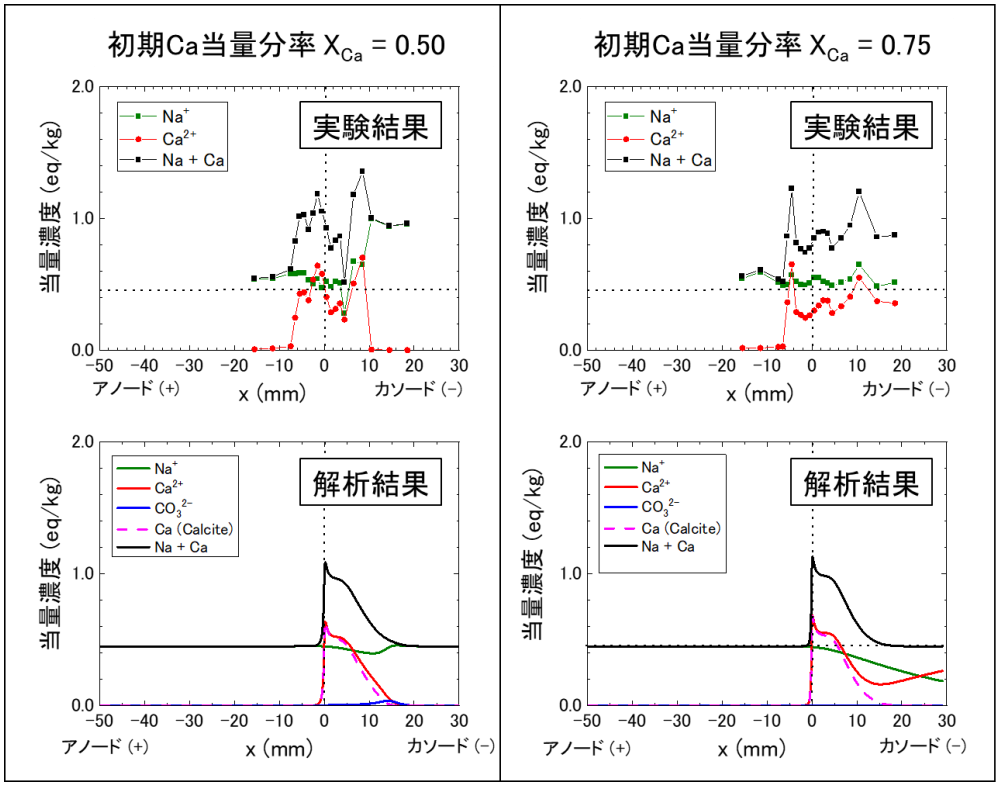


図１２　珪砂を混合したベントナイトにおける通電後の各イオン分布
（左：初期 Ca 当量分率 0.50、右：初期 Ca 当量分率 0.75）

3.2.5. 析出形態の観察

析出形態の観察については EPMA を用いて行った。析出実験後、試料を 5 mm 四方にて切り出し、室温にて真空乾燥した。その後、エポキシ樹脂(EpoFix, Struers)にて樹脂埋めしたのち、*x* 軸に平行な面を SiC 研磨紙で研磨した（最小粒径 4 μ m）。研磨後の表面を炭素蒸着したのち、EPMA (JXA-8530F, JEOL) にて反射電子像と元素マッピング（Al, Si,および Ca）のデータを取得した。

図１３および図１４に、モンモリロナイトに珪砂を混合した系における EPMA 観察結果を示す。Al はモンモリロナイトを、Si はモンモリロナイトおよび珪砂を、Ca は主にカルサイトを示している。Si に着目すると、珪砂（オレンジ）がまばらに存在することが分かり、それらのサイズは平均粒径が 150 μ m であることと整合的である。また Al に着目すると、モンモリロナイトが珪砂の間に存在していることが分かる。カルサイト（Ca）は主に接触界面にて空隙を埋めるように析出し、さらに Ca 濃集部から離れたところにもカルサイトがまばらに点在する様子が見て取れる。このことは、実験結果の Ca^{2+}イオン分布（図１２上）にて、-5 mm 付近に Ca ピークが存在することと、その後、カルサイトが広範囲に析出していることが示唆されたことと整合的である。すなわち、EPMA 観察にて Ca が濃縮している箇所は図１２における-5mm 付近に相当すると考えられる。なお、カルサイトの凝集体は Ca が濃縮しているため明るく（赤、オレンジ、黄色）、交換性陽イオンの Ca は薄く広く分布しているため青色として観察される。

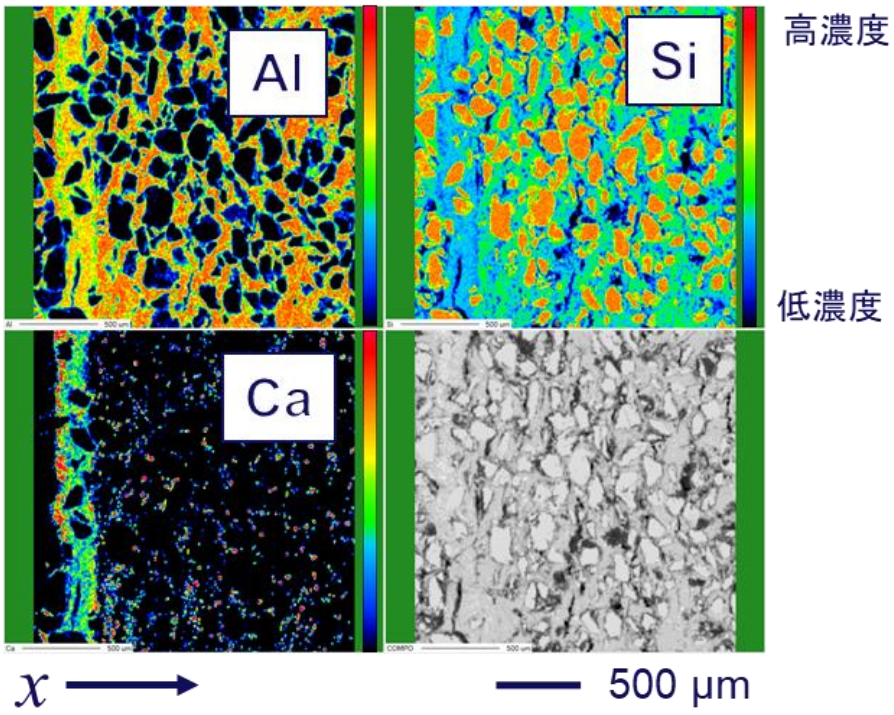


図１３　初期 Ca 当量分率 0.50 における実験後の試料の EPMA 観察結果

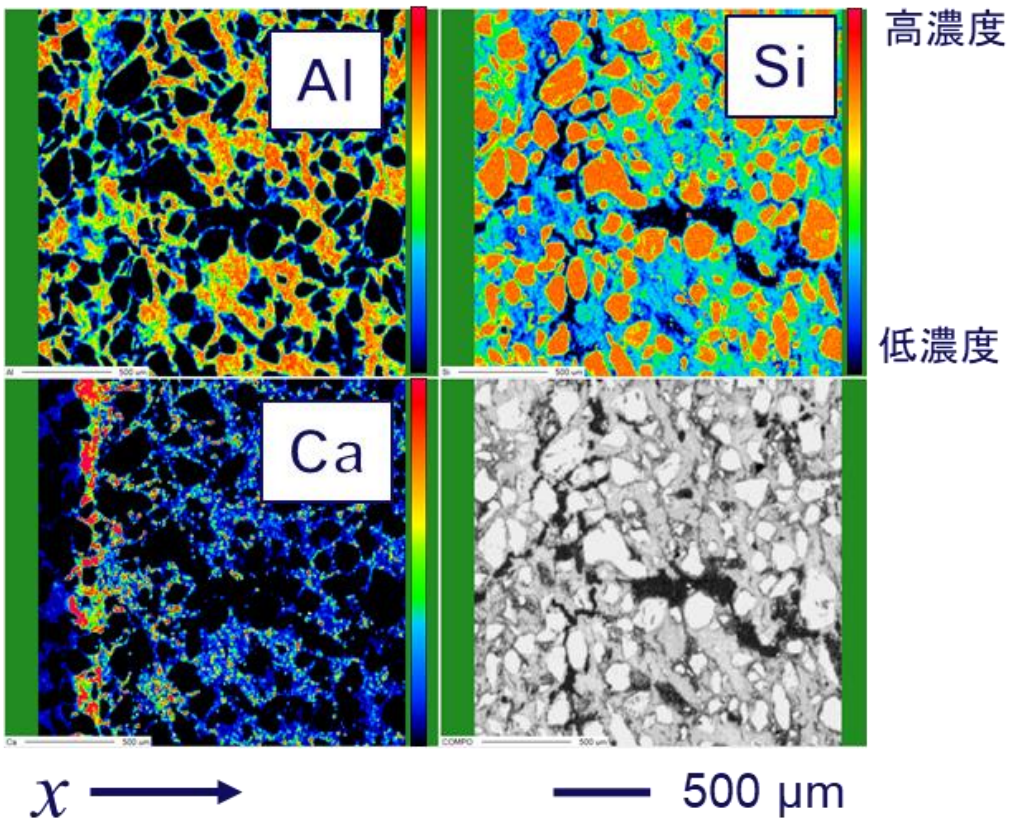


図１４　初期 Ca 当量分率 0.75 における実験後の試料の EPMA 観察結果

3.2.6. 数値解析による二次鉱物の影響評価

カルサイトの析出実験を効率的に実施するため、昨年度に開発した数値解析プログラムを用いて解析を行った。プログラムは Fortran で記述した。電位勾配下での Ca^{2+}、SO_4^{2-}および CO_3^{2-}の移動挙動は移流分散型の式に従う（Tanaka, 2018）ため、(8)式を有限差分法（時間微分は前進差分、拡散項は中心差分、移流項は後退差分）で離散化し、(9)式を得た。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{h,i} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V_{a,i} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \tag{8}$$

$$\frac{C_j^{k+1} - C_j^k}{\Delta t} = D_{h,i} \cdot \frac{C_{j+1}^k - 2C_j^k + C_{j-1}^k}{\Delta x^2} - V_{a,i} \cdot \frac{C_j^k - C_{j-1}^k}{\Delta x} \tag{9}$$

ここで、$D_{h,i}$ は化学種iの水理学的分散係数(m^2/s)、$V_{a,i}$ は化学種iの見かけの移動速度(m/s)、j および k は空間および時間の格子点番号、ΔxおよびΔtはそれぞれ位置ステップ幅および時間ステップ幅である。また、C_j^k は格子点j, kにおけるCa^{2+}、SO_4^{2-}およびCO_3^{2-}イオンの当量濃度(eq/kg)を表す。なお、それぞれの化学種は溶液中においてはfreeのイオン（Ca^{2+}など）やイオン対（$CaSO_4^0$）など、様々な化学形で存在していると考えられるが、実験からは全ての化学種の平均の移動速度および分散係数のみが取得可能なことから、ここではトータルとしての（すなわち全Ca、全SO_4および全CO_3としての）挙動として取り扱う。ステップ幅および格子数は、Δx = 0.1 mm (j = 1,000まで), Δt = 10 s (k = 100,000まで)を基準として設定した。また、Ca^{2+}、SO_4^{2-}およびCO_3^{2-}イオンはそれぞれ一定の移動速度および分散係数で移動し（すなわち、析出物によるパラメータ変動は考慮しない）、電気的中性条件はNaにより補償されると仮定した。なお、解析で用いた移動速度と分散係数はモンモリロナイト密度1.0 kg/dm^3, 5mAの条件にて取得されている値（Tanaka, 2018）をベースとし、移動速度は電流値に比例しモンモリロナイト密度に反比例する（Tanaka et al., 2011）とし、分散係数は5mA条件から不変として設定した。

圧縮ベントナイト中の析出反応をモデル化する際には、空隙構造とそこでのイオン分布を仮定する必要がある。これについては陰イオン排除モデルやドナンモデルなど、様々なモデルが提案されているが(例えば、Vanloon et al. (2007), Birgersson and Karnland (2009), Tournassat and Appelo (2011)) 、統一的なモデル構築には至っていない。そこで本研究では、陰イオン排除をベースとした既報のモデル(Tanaka, 2018)に基づき、空隙構造としてはモンモリロナイト部（層間＋外表面）と粒子間空隙の存在を仮定し、陰イオンは外部溶液と等しい濃度で粒子間空隙中に存在すること（陰イオン完全排除)、および層間・外表面と粒子間空隙との間には陽イオン交換平衡が成立すると仮定した。計算手順の概要は以下の通りである。まず、粒子間空隙中のSO_4^{2-}およびCO_3^{2-}イオンのモル濃度(mol/ dm^3)を、それぞれのイオン当量濃度(eq/kg)から以下のように計算した。

$$\left[M_i^{2-}\right] = \frac{C_i \rho}{z_i \varepsilon_{acc}} \tag{10}$$

ここで、$[M_i^{2-}]$はSO_4^{2-}およびCO_3^{2-}イオンのモル濃度（mol/ dm^3)、C_i はイオン当量濃度(eq/kg)、

ρは乾燥密度（1.0 kg/dm^3）、z_iは価数（= 2）、ε_{acc}は層間および外表面を除いた粒子間空隙率であり、Tanaka, (2018)に基づき0.20を仮定した。

次に粒子間空隙中のCa^{2+}イオンを見積もる。全てのCa^{2+}がモンモリロナイト部（層間＋外表面）に交換性陽イオンとして存在する場合を初期条件とすると、free なNa^+イオンのモル濃度はSO_4^{2+}のモル濃度を用いて以下の式となる（電気的中性条件）。

$$[\mathrm{Na^+}] = 2\left[\mathrm{M}_i^{2-}\right] \tag{11}$$

また陽イオン交換平衡定数(K_{GT})はGaines-Thomasの定義を用いると以下のように記述できる。

$$2\mathrm{NaX} + \mathrm{Ca^{2+}} \Leftrightarrow 2\mathrm{Na^+} + \mathrm{CaX_2} \tag{12}$$

$$K_{\mathrm{GT}} = \frac{X_{\mathrm{Ca}} \cdot a_{\mathrm{Na}^+}^2}{(1-X_{\mathrm{Ca}})^2 \cdot a_{\mathrm{Ca}^{2+}}} \tag{13}$$

$$X_{Ca} = C_{Ca}/CEC \tag{14}$$

ここでX_{Ca}はCa当量分率（陽イオン交換容量に占めるCa割合）、a_iは活量、CECはベントナイトの陽イオン交換容量である（CEC = 0.45 eq/kg, ρ = 1.2 kg/dm^3, ρ_m = 0.7 kg/dm^3）。(13-14)式より、平衡時の粒子間空隙中におけるCa^{2+}濃度は以下のように見積もることができる。

$$\left[\mathrm{Ca^{2+}}\right] = \frac{X_{\mathrm{Ca}} \cdot \gamma_{\mathrm{Na}^+}^2 \cdot [\mathrm{Na^+}]^2}{(1-X_{\mathrm{Ca}})^2 \cdot \gamma_{\mathrm{Ca}^{2+}} \cdot K_{\mathrm{GT}}} \tag{15}$$

ここで、γ_iは活量係数である。なおK_{GT}の値としては、Tanaka (2018)による圧縮系での推定値であるK_{GT} = 200を用いた。

析出量を見積もる際には、厳密には核形成、結晶成長などの速度論的な取扱いや、イオン対形成反応による free なCa^{2+}の消費を考慮する必要があると考えられる。一方、石膏および方解石の析出反応は比較的速いこと（山本、2005）から、瞬時平衡を仮定して析出量を算出した。また、石膏および方解石は難溶性であるためイオン対形成反応よりも析出反応が支配的に進行すると考えられることから、今年度の解析ではイオン対形成を考慮せず、析出反応のみを考慮して計算を行った。石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）および方解石（$CaCO_3$）のイオン活量積（IAP: Ion activity product）は、それぞれ以下のように記述できる。

$$IAP = a_{\mathrm{Ca}^{2+}} \cdot a_{\mathrm{SO}_4^{2-}} a_{\mathrm{H_2O}}^2 = \gamma_{\mathrm{Ca}^{2+}}\left[\mathrm{Ca^{2+}}\right]\gamma_{\mathrm{SO}_4^{2-}}\left[\mathrm{SO}_4^{2-}\right] \cdot a_{\mathrm{H_2O}}^2 \tag{16}$$

$$IAP = a_{\mathrm{Ca}^{2+}} \cdot a_{\mathrm{CO}_3^{2-}} = \gamma_{\mathrm{Ca}^{2+}}\left[\mathrm{Ca^{2+}}\right]\gamma_{\mathrm{CO}_3^{2-}}\left[\mathrm{CO}_3^{2-}\right] \tag{17}$$

ここで水の活量は 1 と仮定する。$IAP > K_{sp}$（溶解度積）の場合、以下の式を解くことで析出量 xを計算できる。

$$\left(\left[\mathrm{Ca^{2+}}\right] - x\right)\left(\left[\mathrm{SO}_4^{2-}\right] - x\right) = \frac{K_{\mathrm{sp}}}{\gamma_{\mathrm{Ca}^{2+}} \cdot \gamma_{\mathrm{SO}_4^{2-}}} \tag{18}$$

$$\left(\left[\mathrm{Ca^{2+}}\right] - x\right)\left(\left[\mathrm{CO}_3^{2-}\right] - x\right) = \frac{K_{\mathrm{sp}}}{\gamma_{\mathrm{Ca}^{2+}} \cdot \gamma_{\mathrm{CO}_3^{2-}}} \tag{19}$$

析出量は時間ステップごとに全ての格子点で計算し、析出したCa、SO_4およびCO_3の再溶解は無いと仮定した。なお、活量係数の計算にはTruesdell-Jonesの式を用い、必要なパラメー

タはPHREEQC Ver. 2.18のデータベースから引用した（Parkhurst and Appelo 1999）。

二次鉱物の析出解析と同様に、透過拡散試験におけるトレーサーの内部濃度の経時変化を Fortran による拡散解析により検討した。水および陰イオンの拡散は、拡散係数の空間依存性がある場合の拡散方程式で記述できる（20 式）。これを有限差分法（時間微分は前進差分、拡散係数の空間依存性は後退差分、拡散項は中心差分）で離散化し、(21)式を得た。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial x}\left(D_a \frac{\partial C}{\partial x}\right) = \frac{\partial C}{\partial x} \cdot \frac{\partial D_a}{\partial x} + D_a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \qquad (20)$$

$$\frac{C_j^{k+1} - C_j^k}{\Delta t} = \frac{C_j^k - C_{j-1}^k}{\Delta x} \cdot \frac{D_{a,j} - D_{a,j-1}}{\Delta x} + D_{a,j} \cdot \frac{C_{j+1}^k - 2C_j^k + C_{j-1}^k}{\Delta x^2} \qquad (21)$$

ここで、D_a は各トレーサーの見かけの拡散係数(m^2/s)、j および k は空間および時間の格子点番号、Δx および Δt はそれぞれ位置ステップ幅および時間ステップ幅である。また、C_j^k は格子点 j, k における各トレーサーの相対濃度を表す。ステップ幅および格子数は、Δx = 0.1 mm (j = 1,000 まで), Δt = 10 s (k = 100,000 まで)を基準として設定した。

モンモリロナイトに珪砂を混合した系において、図１１に示した今回の実験条件ではカルサイトが広範囲に広がることが明らかとなった。一方、カルサイトが析出した緩衝材を拡散試験および透水試験に供し、カルサイト析出量が拡散係数および透水係数に与える影響を評価するためには、カルサイトが局所的に多量に析出している場合についても検討する必要がある。したがって数値解析により初期濃度条件、電流値および通電時間をパラメータとした検討を行い、実験条件を最適化した。図１５に最適化した初期濃度条件を示す。Na/Ca混在型ベントナイトの Ca 当量分率を 0.50 とし、長さを 6cm としている。この条件では、カソード側溶液を 2M Na_2CO_3 溶液に変更することで、10mm における CO_3^{2-}濃度が一定となるように工夫している。

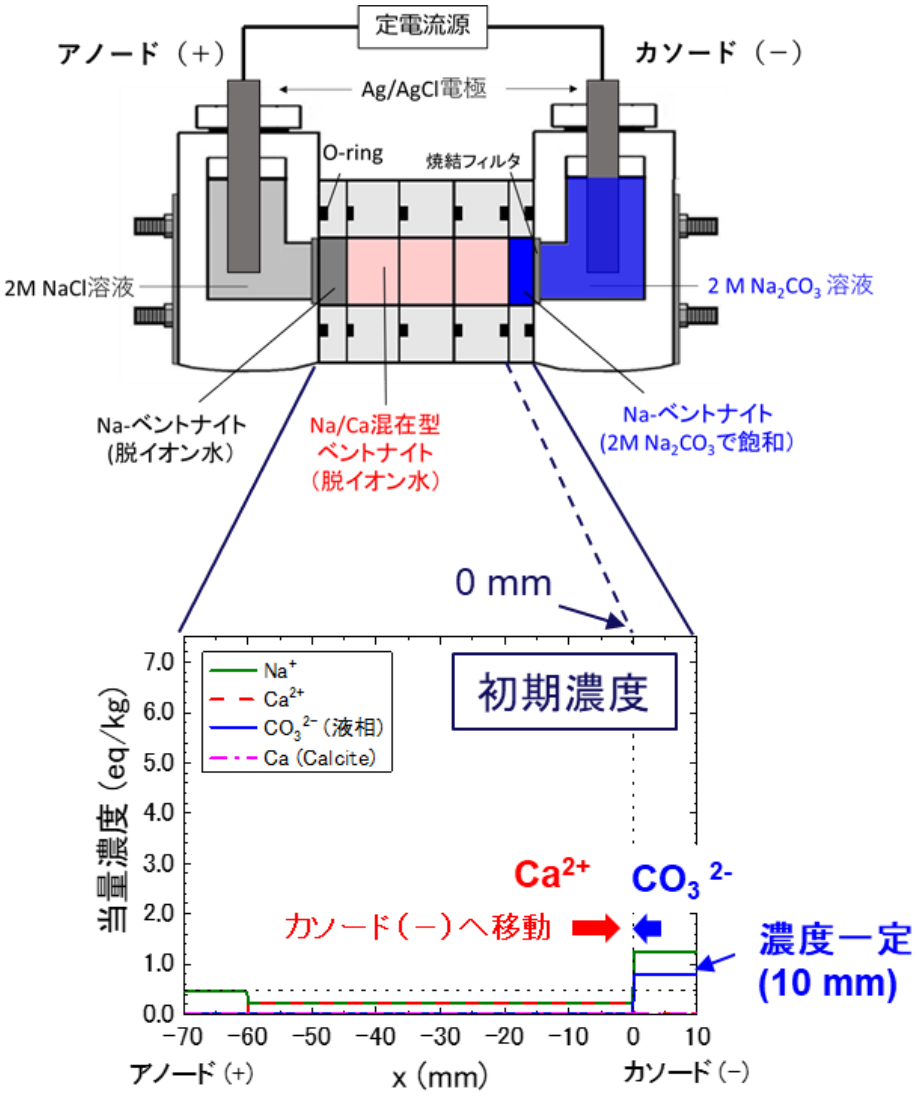


図１５　数値解析により最適化した初期濃度条件

図１６に、最適化した初期濃度条件（図１５）において、電流値を 2 mA、通電時間を 10 日間とした場合の解析結果を示す。電場により交換性陽イオンの Ca^{2+} がカソード側（－）へ移動し、カルサイトが局所的に析出することが示唆された。すなわち、CO_3^{2-} のアノード側への移動量（主に拡散による）が、Ca^{2+} のカソード側への移動量（主に電気的移動による）とおおよそ釣り合うことで、この付近に選択的にカルサイトを析出する可能性が見出された。また通電時間に比例してカルサイトの局所的な析出量が大きくなり、ピークの高さが増加する傾向が認められた。この結果は、実験条件を最適化することで、カルサイトの局所的な析出量を制御できる可能性を示唆している。

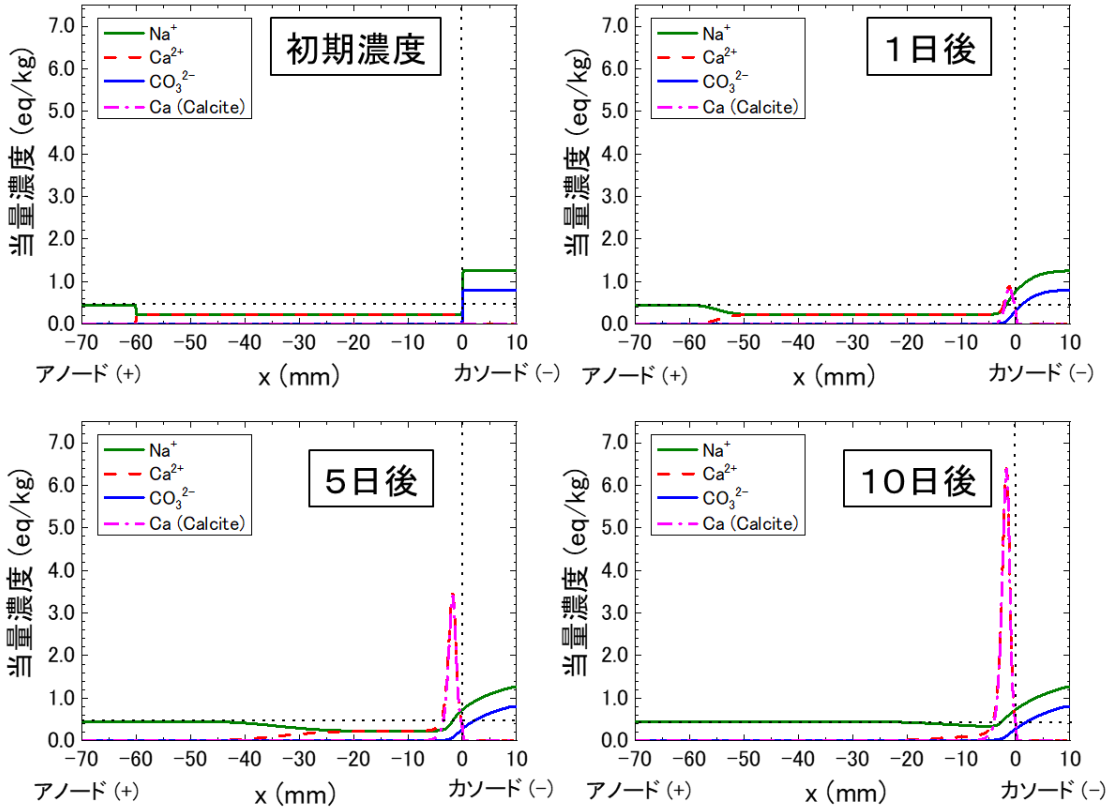


図１６　最適化した初期濃度条件におけるカルサイト析出挙動の解析結果
（2 mA にて, 10 日間通電した場合）

図１７に電流値を 2 倍の 4 mA とし、通電時間を半分の 5 日間とした場合の解析結果を示す。１日後において、2mA の場合よりも鋭いカルサイトのピークが出現する一方で、時間の経過とともに析出位置がカソード側へシフトしていることが分かる。５日後においては二つのピークが出現し、カルサイトが 2 mA のときと比較して広範囲に析出する結果となった。すなわち CO_3^{2-}のアノード側への移動量が Ca^{2+} のカソード側への移動量よりも少ないことを意味している。これらの解析結果から、カルサイトを局所的に析出させるためには、CO_3^{2-}のアノード側への移動量（主に拡散による）と、Ca^{2+}のカソード側への移動量（主に電気的移動による）が釣り合う条件（とくに電流値と初期 Ca 濃度）を見出すことが重要であることが分かった。

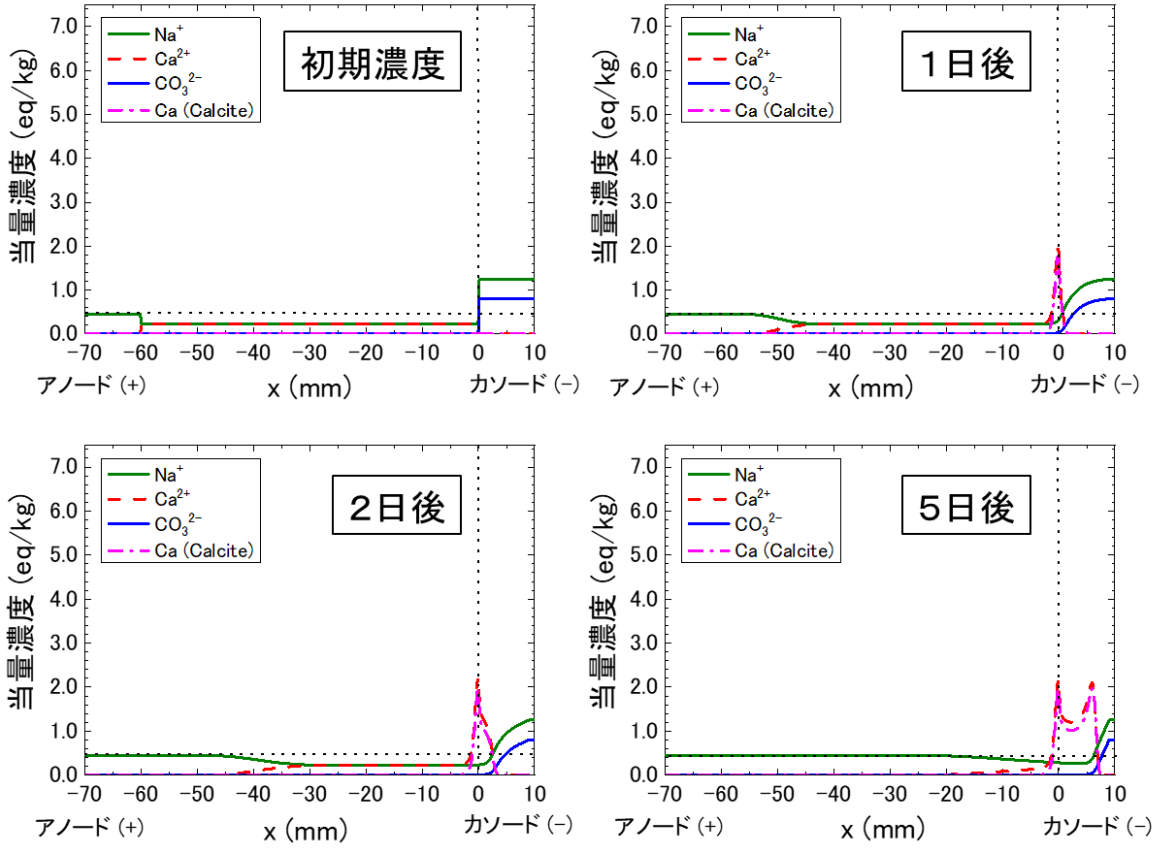


図１７　最適化した初期濃度条件におけるカルサイト析出挙動の解析結果
（4 mA にて, 5 日間通電した場合）

次に、緩衝材中にカルサイト層が析出した場合を想定した拡散解析を行い、拡散係数の局所的な変化を把握するための手法について検討した。このとき、カルサイト層が高濃度側から 4.5 mm～5.5 mm（1.0mm 厚）に析出し、拡散係数が 1 桁低下した場合を仮定した。具体的には、ベントナイト中の水の実効拡散係数として 3×10^{-10} m²/s, 析出部の拡散係数をその 1/10 として解析を行っている。図１８に、透過拡散試験におけるトレーサーの試料内部濃度の経時変化を示す。図１８から、高濃度側から拡散してきたトレーサーが、３日程度で定常状態に達していることが分かる。このとき、各領域の拡散フラックスが一定となっているため、フィックの第１法則と比較することで、拡散係数と濃度勾配の積が一定という関係式が得られる。すなわち、定常状態の濃度勾配と実効拡散係数との積が一定という条件から、定常状態における試料内部の濃度勾配を調べることで、実効拡散係数の相対的な違いを検討することができる。

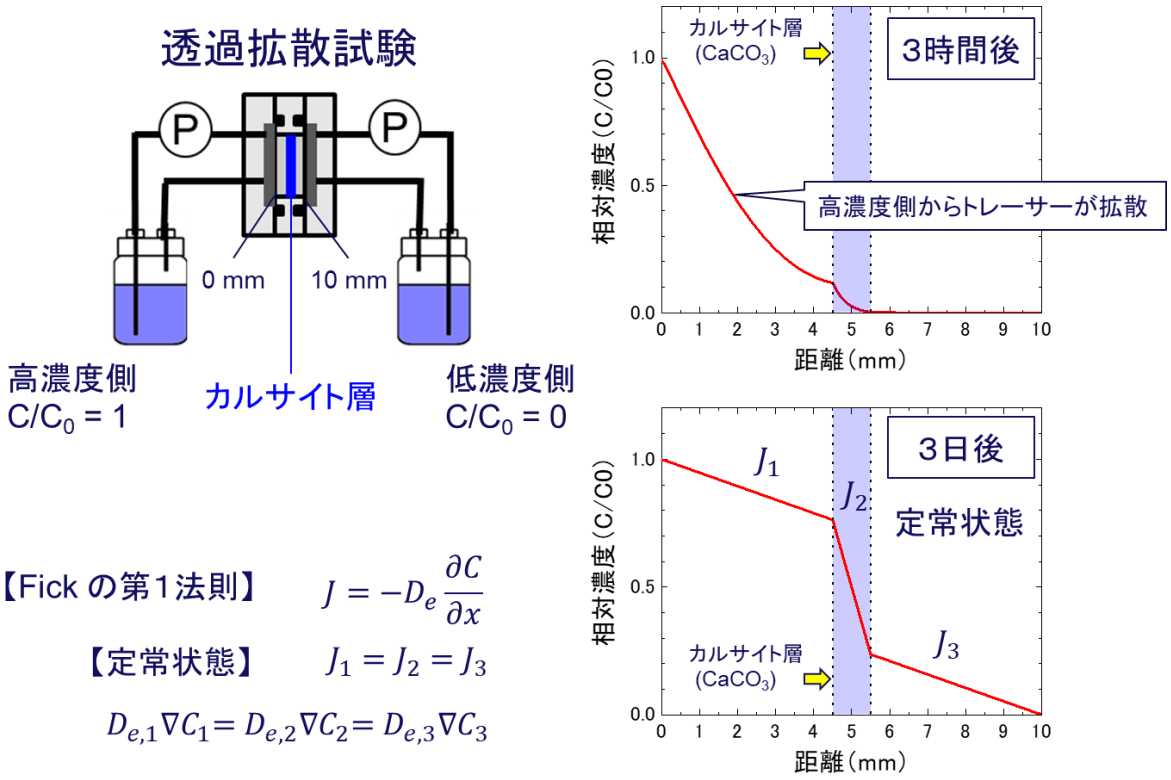


図１８　透過拡散試験において、実効拡散係数が局所的に変化した場合の試料内部濃度の経時変化

3.3 残された課題と今後の計画

今年度の主な成果としては、電場により $CaSO_4 \cdot 2H_2O$(石膏、Gypsum)および $CaCO_3$(カルサイト、Calcite)を析出させた変質緩衝材を調製し、透過拡散試験から実効拡散係数を取得するまでの一連の手法を確立した。石膏の場合は、再膨潤中の約 7 日間および透過拡散試験期間の約 10 日程度で全て溶解し、拡散試験に供することが適当ではないことが明らかとなった。カルサイトの場合は、拡散試験後にも十分なカルサイトが残留していることが明らかとなり、今後は二次鉱物としてカルサイトに着目するのが良いことが分かった。一方、カルサイトが析出した緩衝材を用いた透過拡散試験により、カルサイトが実効拡散係数に与える影響を考察したところ、今回の析出条件ではカルサイトが拡散係数に与える影響は限定的であることが分かった。

中間評価において、ベントナイトに含まれる珪砂がカルサイトの析出に重要な役割を果たしていることが見出されたことから、モンモリロナイトに珪砂を混合した系で析出実験を行ったところ、カルサイトはベントナイトに含まれる珪砂の隙間を埋めるように析出していることが明らかとなった。一方で、カルサイトは広範囲に析出していたことから、数値解析によりカルサイトを局所的に多量に析出させるための実験条件を検討し、有望な実験条件を見出した。

さらに、カルサイト層により拡散係数が局所的に変化した場合を想定し、透過拡散試験から局所的な拡散係数の変化を把握するための手法を解析的に検討した。その結果、定常状態における試料内部の濃度勾配を調べることで、実効拡散係数の相対的な違いを把握できる可能性が見出された。

次年度は、珪砂を含むベントナイトを対象とし、最適化した初期濃度条件（図１５）および実験条件（図１６）でカルサイト析出実験を行い、実験結果と解析結果の整合性を確認する。さらに、様々な条件にてカルサイト層を析出させた試料を用いた拡散試験・透水試験を行い、カルサイト析出量が拡散係数および透水係数に与える影響を評価する。

4. まとめ

本年度は主に二次鉱物の析出促進試験と拡散試験を行い、以下のことを明らかにした。

- 電場によりベントナイト中に鉱物（石膏およびカルサイト）を析出させ、これを用いた透過拡散試験を行い、実効拡散係数を取得できた。これにより鉱物析出から拡散係数の取得までの一連の実験手法を確立した。
- 透過拡散試験後、石膏は全て溶解してしまうが、カルサイトは十分に残留していることが分かった。
- カルサイトが水および陰イオンの拡散係数に与える影響を明らかにするには、析出物を局所的に増やす必要があることが分かった。
- モンモリロナイトに珪砂を混合したベントナイト試料でカルサイトを析出させたところ、珪砂の隙間を埋めるようにカルサイトが析出していることが分かった。
- 数値解析によりカルサイト析出実験結果を概ね再現することができ、数値解析が実験結果の予測に有効であることを確認した。
- 数値解析により、カルサイト析出量を制御できる最適な実験条件を見出した。
- 拡散解析の結果、透過拡散試験における定常状態後の試料内部濃度プロファイルを調べることで、相対的な拡散係数の違いを明らかにできる可能性があることが分かった。

2019 年度外部発表リスト

【学術論文】

Tanaka, S. Electrokinetic control of the growth of gypsum aggregates in compacted montmorillonite, Applied Clay Science 181, 105206 (2019).

【国際会議発表】

Tanaka, S. Electrokinetic control of the growth of secondary minerals in compacted montmorillonite, Migration 2019, PA2-4 (poster), September 15th-20th, Kyoto, Japan (2019).

参考文献　(abc 順)

・Birgersson, M., Karnland, O., Ion equilibrium between montmorillonite interlayer space and an external solution—Consequences for diffusional transport, Geochimica et Cosmochimica Acta 73, 1908-1923 (2009).

・Chagneau, A., et al., Complete Restriction of $^{36}Cl^-$ Diffusion by Celestite Precipitation in Densely Compacted Illite, Environmental Science & Technology Letters 2, 139-143 (2015).

・藤井直樹ほか、フィリピン国・ルソン島北西部に分布するザンバレスオフィオライトで生成されたアルカリ溶液との反応によって変質されたベントナイトの地球化学的・鉱物学的特性、地質学雑誌、第 120 巻、第 10 号、361-375 (2014).

・JNC（核燃料サイクル開発機構） わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性−地層処分研究開発第 2 次取りまとめ− (2000).

・JNC-FEPC（核燃料サイクル開発機構－電気事業連合会） TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－(2005).

・NUMO 包括的技術報告書（レビュー版）(2018).

・小田治恵ほか、セメント系材料由来のアルカリ性条件における緩衝材の鉱物学的変遷シナリオに基づく化学反応・物質移動連成解析、粘土科学、第 51 巻、第 2 号、34-49 (2013).

・Parkhurst, D.L., and Appelo, C.A.J., User’s guide to PHREEQC (Version 2) –A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations (1999).

・ Liu, J., et al., Effect of silica sand on activation energy for diffusion of sodium ions in montmorillonite and silica sand mixture, Journal of Contaminant Hydrology 61, 85-93 (2003).

・Rajyaguru, A., et al., Experimental characterization of coupled diffusion reaction mechanisms in low permeability chalk. Chemical Geology 503, 29-39 (2019).

・笹本広ほか、鉄との相互作用による緩衝材への変質影響評価 : 影響要因に関する解析的検討、原子力バックエンド研究、Vol.20, No.2 39-52 (2013).

・佐藤治夫、高レベル放射性廃棄物地層処分における緩衝材の核種移行抑制機能、Journal of MMIJ、Vol.125, 1-12 (2009).

・柴田真仁ほか、圧縮ベントナイトとセメント界面における相互作用の評価、日本原子力学会和文論文誌、Vol.10, No.2, 91-104 (2011).

・柴田雅博ほか、緩衝材の長期安定性評価技術の現状（研究報告）、核燃料サイクル開発機構、JNC TN8400 2004-010 (2004).

・鈴木覚、佐藤治夫、循環型透過拡散試験システムの製作と透過拡散試験方法の改良（技術報告）、JNC TN8410 2001-028 (2002).

・ Tachi Y., et al., Diffusion and sorption of Cs+, Na+, I－ and HTO in compacted sodium montmorillonite as a function of porewater salinity: Integrated sorption and diffusion model. Geochimica et Cosmochimica Acta 132, 75-93 (2014).

・Tanaka, S. Gypsum precipitation enhanced by electrokinetic method and porewater chemistry in

compacted montmorillonite. Applied Clay Science, 161, 482-493 (2018).
・Tanaka, S., et al., Electrokinetic study of migration of anions, cations, and water in water-saturated compacted sodium montmorillonite. Journal of Nuclear Science and Technology, 48, 454-462 (2011).
・Tinseau, E., et al., Mineralogical characterization of the Tournemire argillite after in situ interaction with concretes. Waste Management 26, 789-800 (2006).
・Tournassat, C., Appelo, C.A.J., Modelling approaches for anion-exclusion in compacted Na-bentonite, Geochimica et Cosmochimica Acta 75, 3698-3710 (2011).
・Van Loon, L.R., et al., Diffusion of HTO, 36Cl- and 125I- in Opalinus Clay samples from Mont Terri Effect of confining pressure. Journal of Contaminant Hydrology 61, 73-83 (2003).
・Van Loon, L.R., et al., Anion exclusion effects in compacted bentonites: Towards a better understanding of anion diffusion, Applied Geochemistry 22, 2536-2552 (2007).
・山本肇、地下水－岩石反応を考慮した水理・物質移行解析　－解析コード TOUGHREACT と CO2 地下貯留への適用－、大成建設技術センター報　第 38 号(2005).
・横山信吾、中村邦彦、放射性廃棄物処分におけるベントナイト系材料のアルカリ溶液による変質挙動（その１）－アルカリ性の各種溶液に浸漬した締固めベントナイトの鉱物学的な変質と透水性の変化－、電力中央研究所報告、N09015 (2010).

研究報告 3

結晶質岩形成時に内包された割れ目発生・分布の潜在性の解明

山形大学　理学部

湯口　貴史

1. 背景・目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価において、地下水シナリオ(地下水によって放射性物質が処分施設から人間環境に運ばれるシナリオ)を想定した場合、結晶質岩(花崗岩)では、割れ目が地下水流動や物質移動の経路になる（図 1)。このことから、結晶質岩内の割れ目の分布を把握すること、さらにその将来変化を評価することは重要な課題である。割れ目分布の将来変化を推定するためには、割れ目がどのように形成されたかを理解することが必要である。そこで本研究では、花崗岩体の冷却過程に割れ目を形成する要因が隠されていることに着目し、岩石学的現象の理解を深めることによって、花崗岩体中の現在の割れ目分布ひいては将来的な割れ目発生の潜在性（将来的な発現の有無）を評価する手法を構築する。このメリットとして、高レベル放射性廃棄物の処分地選定の際（特に概要調査の際）に、本研究によって提案する手法を用いることで、将来的に割れ目が多く発生する可能性がある領域を推定することが可能となる。

結晶質岩（花崗岩）の地質環境特性の将来予測には、数値計算に基づく、長期的な地質構造モデルや地下水流動モデル等の構築が検討されている（例えば、平成 29 年度地層処分技術調査等事業・地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書)。本研究で得られる「将来的な割れ目発生の潜在性」の評価手法に基づくデータは地質環境の長期変遷のモデル化（特に地下水流動モデル）に必要不可欠な情報になり得る。さらに、入力情報を精緻化することにより、数値モデルや解析結果の不確実性を低減でき、ひいては地層処分の長期安全性に対する信頼性を向上することが期待できる。

既存研究において、Yuguchi et al. (2012)では、土岐花崗岩体（図 2）の微小組織であるミルメカイトやパーサイトに着目し、それらの微小組織の発達の程度（発達パラメータ）が示す冷却挙動と割れ目頻度との間に関連があることを見出した（図 3)。これらの微小組織はおおよそ 700℃から 300℃の間で生成されることが分かっている（Yuguchi et al., 2011A and B)。Yuguchi et al. (2019A)では、熱年代学的な手法によって、岩体内部の位置ごとの冷却挙動を解明した（図 4)。熱年代学的な手法とは、放射年代測定法を用いて試料が経験した温度時間履歴を推定する手法である。それぞれの年代

測定法には閉鎖温度という年代を刻み始める固有の温度条件がある。この温度条件と年代を一対とし、それを複数取得することで、岩石の温度－時間履歴を得ることができる。Yuguchi et al. (2019A)では、ジルコン U-Pb 年代、黒雲母 K-Ar 年代、ジルコンフィッション・トラック年代、アパタイトフィッション・トラック年代、フィッション・トラックデータに基づく逆解析から構成される熱年代学的手法により取得した冷却挙動（700-300℃）と割れ目頻度の間に関連があることを見出した（図 5）。このように、これらの既存研究（Yuguchi et al., 2012; 2019A)から、700℃から 300℃の間の岩体の冷却と割れ目分布の間に関連があることを見出している。

本研究では花崗岩体の冷却の際に生じる岩石学的現象に着目する。特に 700-300℃の温度条件で生じる熱水変質現象に着目し、その変質の程度をパラメータとして抽出する。熱水変質とは、結晶質岩のようなマグマに由来する岩石が固結した後に、高温の流体が岩体内を循環し、もともとの鉱物を異なる鉱物に置き換える現象である。この変質パラメータと冷却を示す既存データ、割れ目データの比較を通じて、「規則性」を見出し、概要調査に際して効率的な評価手法の構築を目指すものである。

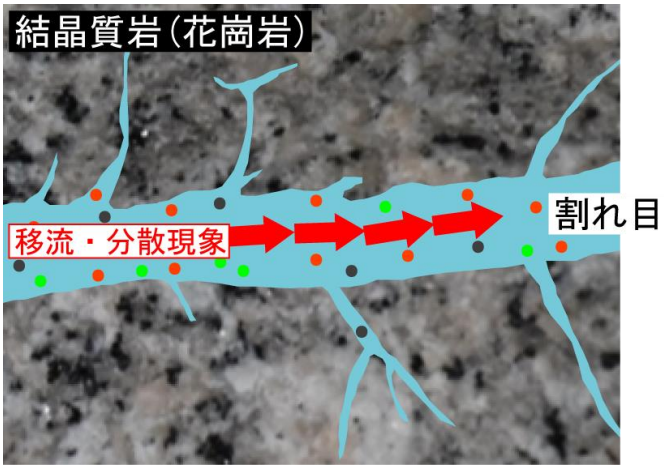


図 1　結晶質岩中の地下水流動および物質移動の経路となる割れ目の概念図

結晶質岩中の地下水流動および物質移動は、割れ目を移動経路とした移流・分散現象に強く支配される。

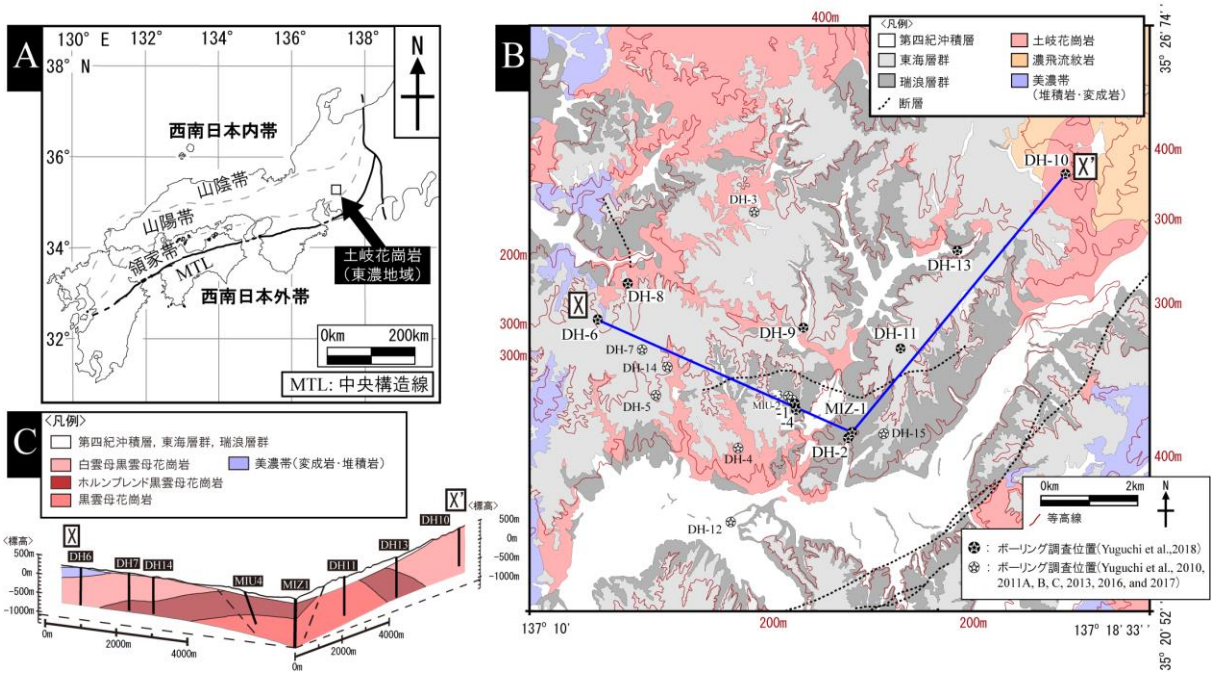


図 2　土岐花崗岩体の位置図（A）、土岐花崗岩体が位置する東濃地域の地質図（B：赤色部分が土岐花崗岩の分布領域を示す）、土岐花崗岩体中の岩石種の違いを示す断面図（C：B の X から X'までの断面図であり、色の相違は岩石種の違いを表す）

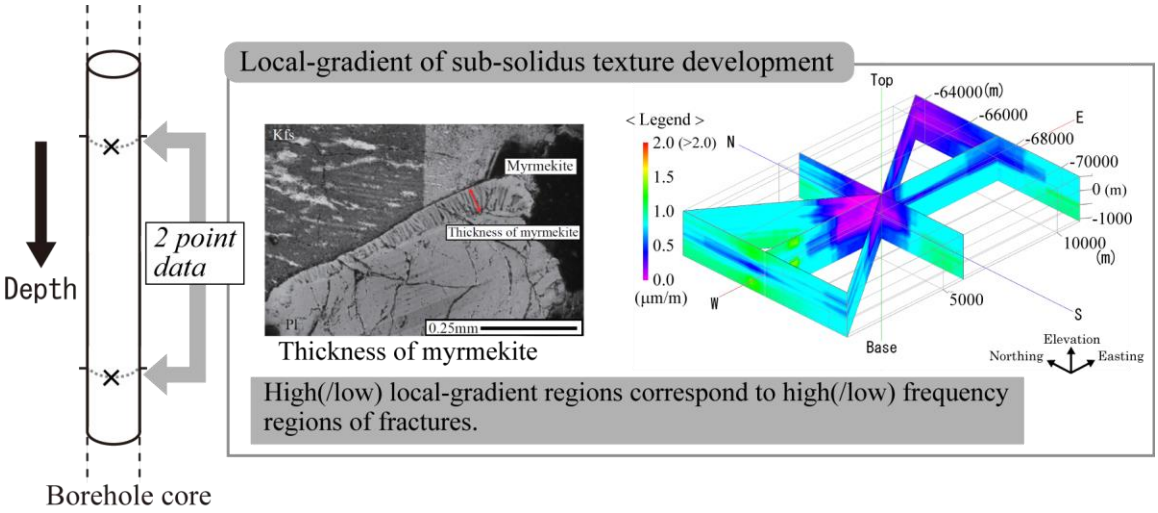


図 3　結晶質岩中の微組織（ミルメカイト）を用いた割れ目分布評価手法の概念図（Yuguchi et al., 2012）

ボーリング孔の 2 地点から微小組織の発達の程度の差を取得し、その大小を 3 次元コンタ図で表示。図中の寒色域は冷却速度が大きいことを示し、割れ目頻度も高い傾向を持つ。また暖色域は冷却速度が小さいことを示し、割れ目頻度も低い傾向を持つ。

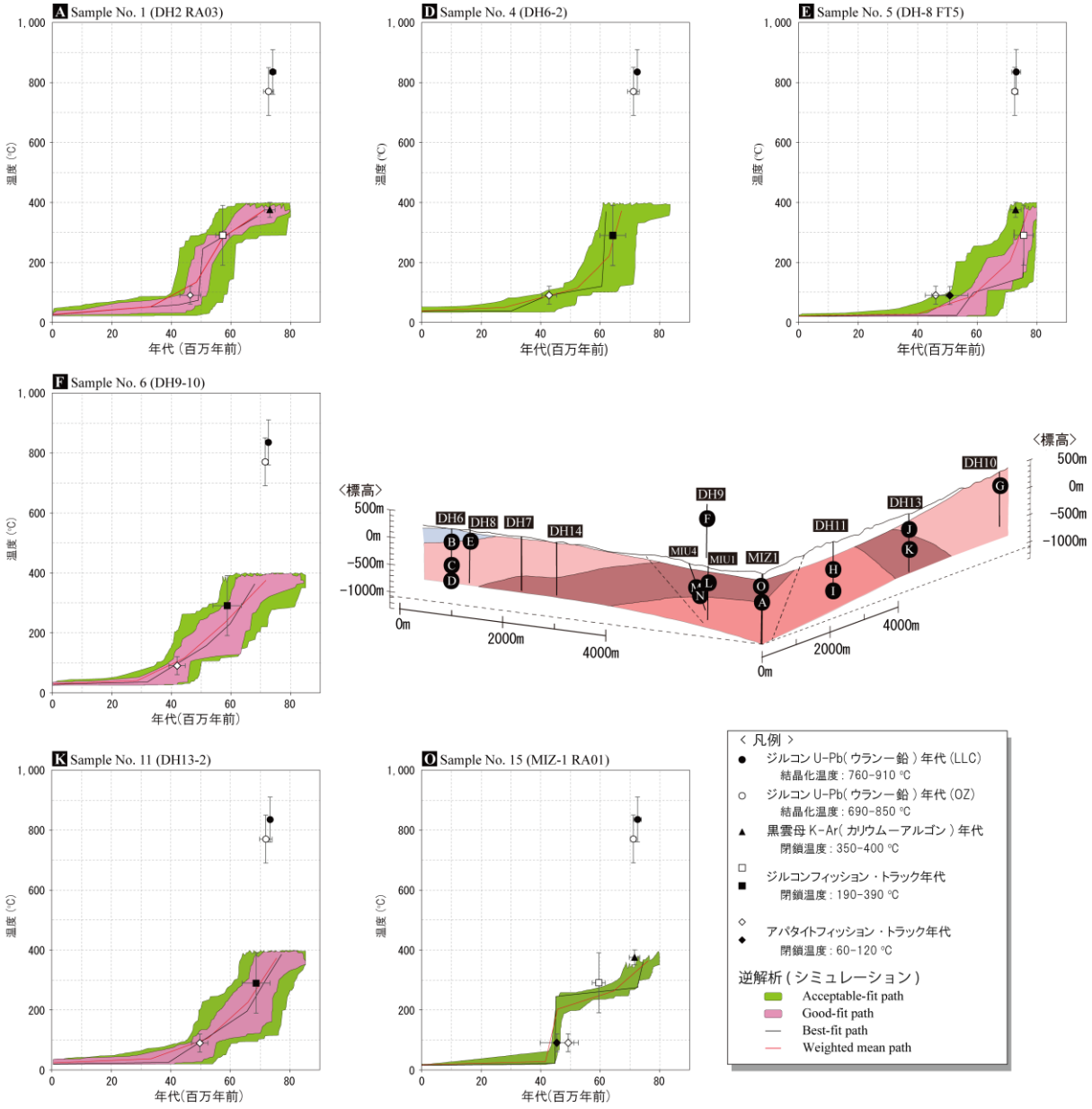


図 4　土岐花崗岩体中の領域ごとの温度－時間履歴（Yuguchi et al., 2019A を一部改編）

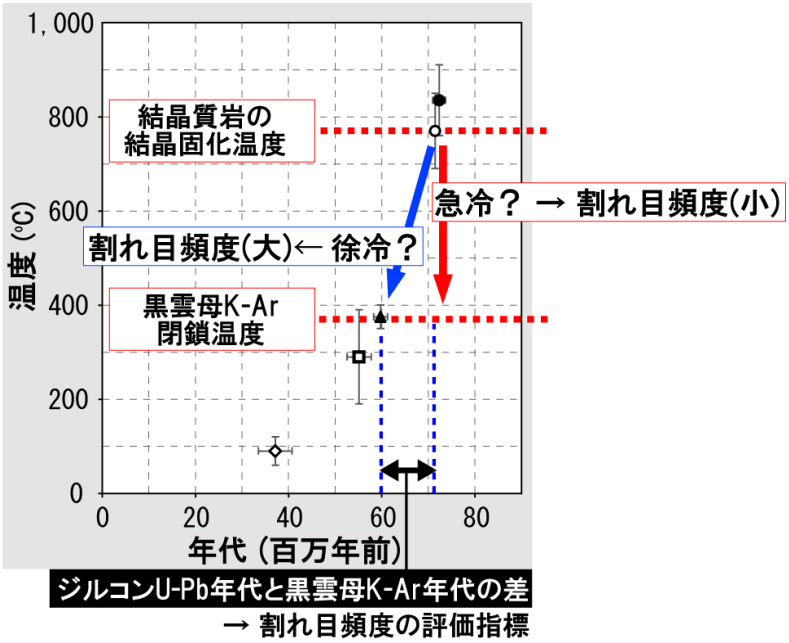


図 5　温度－時間履歴と割れ目頻度との関係を示した概念図

（Yuguchi et al., 2019A を一部改編）

1. 全体研究計画（3 ヵ年における全体計画）

本研究は中部日本の土岐花崗岩体を対象とし、以下の 4 つの STEP を設定し、段階的に研究を実施する。

STEP1　熱水変質現象の記載岩石学的研究（パラメータ化）

STEP2　熱水変質現象の生成温度・年代の決定（パラメータ化）

STEP3　熱水変質現象と Yuguchi et al. (2012；2019A)で得た冷却データ、現在の割れ目データとの比較検討

STEP4　花崗岩体中の現在の割れ目分布ひいては将来的な割れ目発生の潜在性の評価手法の体系化

研究対象とするのは中部日本（岐阜県東濃地域）に位置する土岐花崗岩体（図 2）である。土岐花崗岩体は著者らの既存研究（湯口ほか，2010，Yuguchi et al., 2011A, 2011B, 2012, 2013, 2016, 2017, 2019A）によって形成過程に関する知見が蓄積されている。また西本ほか(2008)や Nishimoto and Yoshida (2010)、Yuguchi et al. (2015)によって花崗岩体中の熱水変質に関する知見も報告されている。また土岐花崗岩体では日本原子力研究開発機構によって 19 本の広域ボーリング調査（核燃料サイクル開発機構，2000）（図 2）や瑞浪超深地層研究所（核燃料サイクル開発機構，2002）（図 6）を活用した研究開発が行われており、ここで得られた岩石試料を用いることにより、深成岩体中の三次元的な岩石試料を取得することができる。また土岐花崗岩体のボーリング調査では、BTV(Bore hole television)を用いた調査が実施されており（図 7）、物資移動に寄与する肉眼スケールの割れ目の分布や頻度を精度良く取得可能である点も土岐花崗岩体を研究対象とする利点である。

STEP1 では、岩体の冷却（700℃から 300℃）の際に生じる熱水変質現象の記載岩石学的研究に基づき、熱水変質現象の程度を、冷却を反映する現象としてパラメータ化する。図 8A と図 8B はそれぞれ黒雲母の緑泥石化、ホルンブレンドの緑泥石化を示した偏光顕微鏡写真である。マグマから晶出した黒雲母やホルンブレンドが、鉱物の粒間や鉱物内の劈開に沿って流入した熱水によって緑泥石に変質している。また図 9 は斜長石の変質（ソーシュライト化）を示した偏光顕微鏡写真である。干渉色の高い領域が変質によって生じたソーシュライト領域を示しており、図 9A では変質領域が中心部分のみであるのに対して、

図 9B では変質領域が粒子全体に広がっている。このように変質の程度には差があり、その程度の差をパラメータとして抽出する。STEP2 では、STEP1 で取り扱う変質現象の温度条件あるいは年代の決定を行う。このことは、どの変質現象が割れ目の分布と関連するのかの解明を通じて、どの温度条件（年代）が割れ目形成に関連するかを評価可能となる。STEP3 では、BTV で得られた「今日の割れ目データ」および顕微鏡スケールのマイクロクラックと、STEP1 と STEP2 で得たパラメータ（岩石学的・年代学的なデータ）との比較を行い、両者の関連性を定量的に評価する。STEP4 では、花崗岩体中の現在の割れ目分布ひいては将来的な割れ目発生の潜在性の評価手法の体系化を実施する。この冷却過程中の岩石学的現象の解明は、「将来的な割れ目発生の潜在性」の評価にも有効である。それは冷却過程において割れ目の種が形成され、その後の断層活動などによって、この種から割れ目が発現するという概念(Yuguchi et al., 2012)に基づく。つまり、割れ目の種の分布を明らかにできれば、将来的な割れ目分布の潜在性を評価できることを意味し、さらには割れ目の種が分布する領域を避けることが出来れば、将来的に割れ目が多く発達する領域を避けることが出来ることを意味する。

本研究では、顕微鏡で観察されるマイクロスケールの割れ目が、物質移動に大きく寄与する肉眼で観察されるラージスケールの割れ目の種として働くのではないかという作業仮説のもと検討を進める。このマイクロスケールの割れ目が熱水変質をもたらす流体の経路であることが既存研究にて論じられている（例えば Nishimoto and Yoshida, 2010; Yuguchi et al., 2015）。一連の研究を通じて「熱水変質のパラメータ」「BTV で得られるラージスケールの割れ目」「顕微鏡サイズのマイクロスケールの割れ目」そして「岩体の冷却」の間の「関連性」の検討に基づいて、将来的な割れ目発生の潜在性を評価する手法の構築を目指す（図 10）。図 11 は，研究対象となる土岐花崗岩体の研究調査領域を代表する温度－時間履歴（*t-T* path）を示したものであり，対象領域の冷却挙動を示している。ここで，岩体の冷却とマイクロスケール割れ目とラージスケール割れ目の関係を整理する。この冷却挙動を反映する地質学的なイベントとして，約 1,000℃から 700℃の間に花崗岩質マグマの地殻浅部への貫入・マグマ溜りとしての定置・結晶固化（ソリダス）が相当する。約 700℃以下がサブソリダス期と称され，700℃から 300℃の間に熱水変質が生じる。本研究の作業仮説では，この温度条件においてマイクロスケール割れ目が形成される。一方、ラージスケール割れ

目は，岩体の冷却が進み延性のある状態（ductile）からブリットル（brittle）な状態に変化した以降，断層運動や岩体の隆起に伴う徐荷により発達する。

2018 年度は試料選定や試料採取・成形を第一に実施した。その後 STEP1 と STEP2 を実施した。2019 年度は STEP1 と STEP2 を継続しつつ、後半期に STEP3 に着手する。花崗岩体中に普遍的に観察される 2 つの現象（黒雲母の緑泥石化、斜長石のソーシュライト化: Nishimoto and Yoshida, 2010; Yuguchi et al., 2015）に着目し、岩石記載と化学分析、温度条件の決定を実施し、割れ目高頻度域と低頻度域における相違を基本とし、パラメータの抽出に資する変質現象に対して記載岩石学的なアプローチを行う。2020 年度は STEP1 と STEP2 の不足データを補いつつ、STEP3 および STEP4 を中心に実施する。

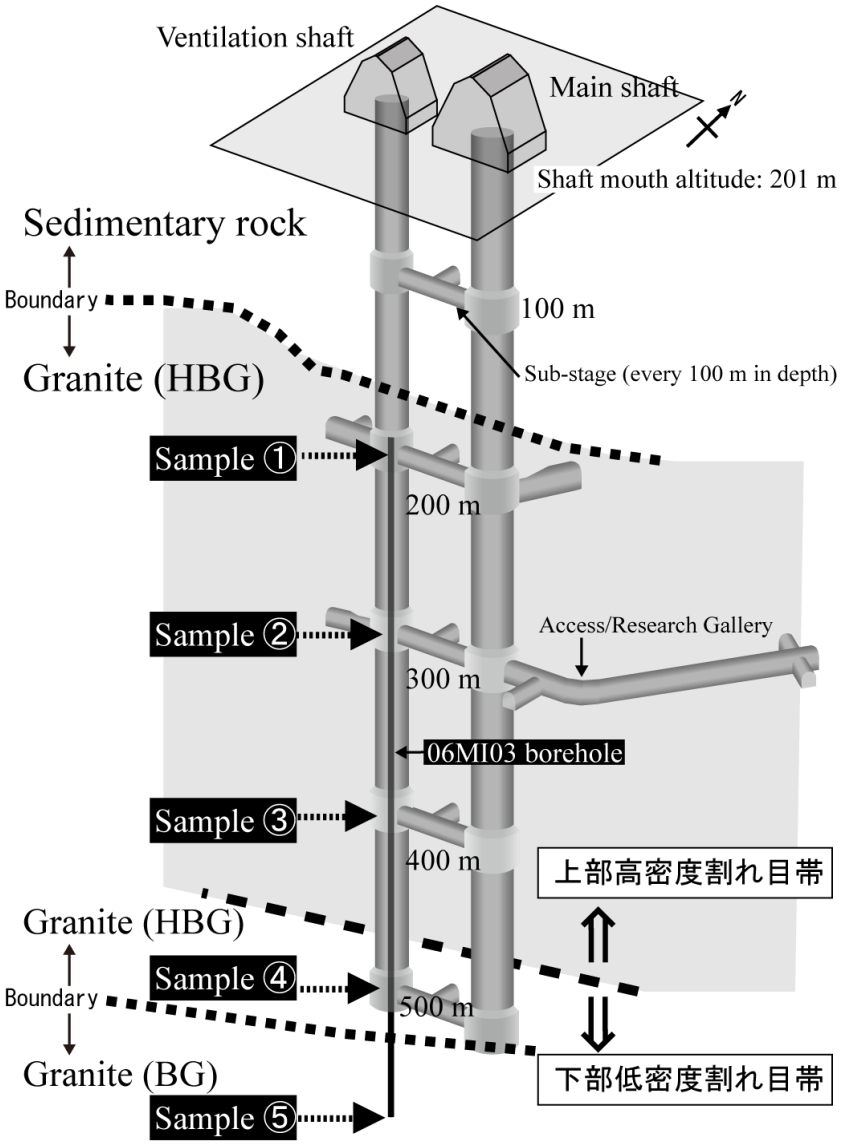


図 6 土岐花崗岩体に位置する瑞浪超深地層研究所の研究坑道の概念図

（Yuguchi et al., 2015 を一部改編）

上部高密度割れ目帯と下部低密度割れ目帯の境界は深度 460m に位置する。

Sample ①～⑤は等間隔のサンプリングを実施する際の概念を示す。

06MI03 号孔は換気立坑が深度 200m まで掘削された際、パイロットボーリングとして実施。

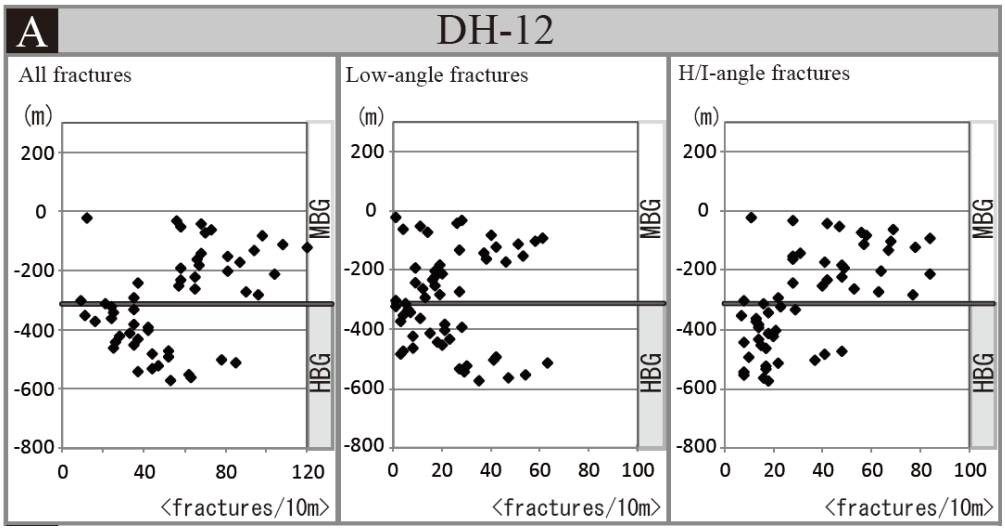


図 7 BTV を用いて得られた土岐花崗岩体の DH-12 号孔の鉛直方向（標高）

に対する割れ目頻度の変化（Yuguchi et al., 2012）

MBG は白雲母黒雲母花崗岩(Muscovite Biotite Granite)、HBG はホルンブレンド黒雲母花崗

岩(Hornblende Biotite Granite)の略称、太横線は岩相の境界を示す。

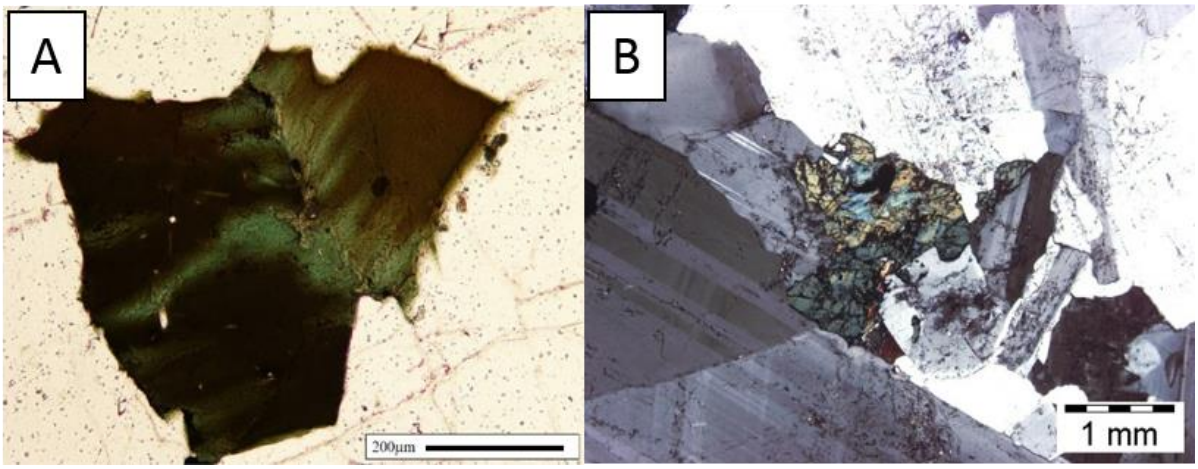


図 8 土岐花崗岩体中の緑泥石化を示した偏光顕微鏡写真

A. 黒雲母の緑泥石化、B. ホルンブレンド（角閃石）の緑泥石化

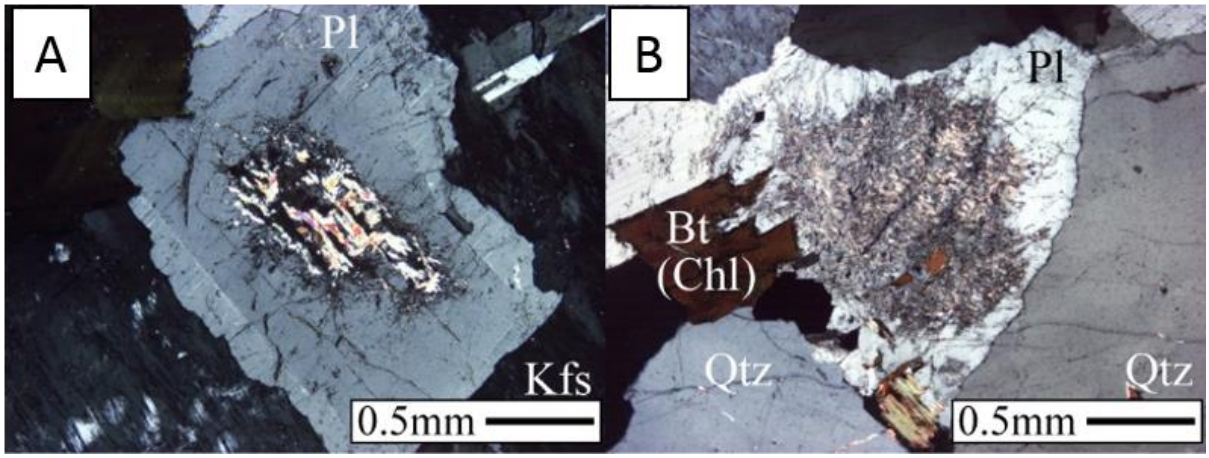


図 9 土岐花崗岩体中の斜長石の変質（ソーシュライト化）を示した偏光顕微鏡写真

A. 変質領域はコア部分のみ、B. 変質領域は粒子全体に広がる。

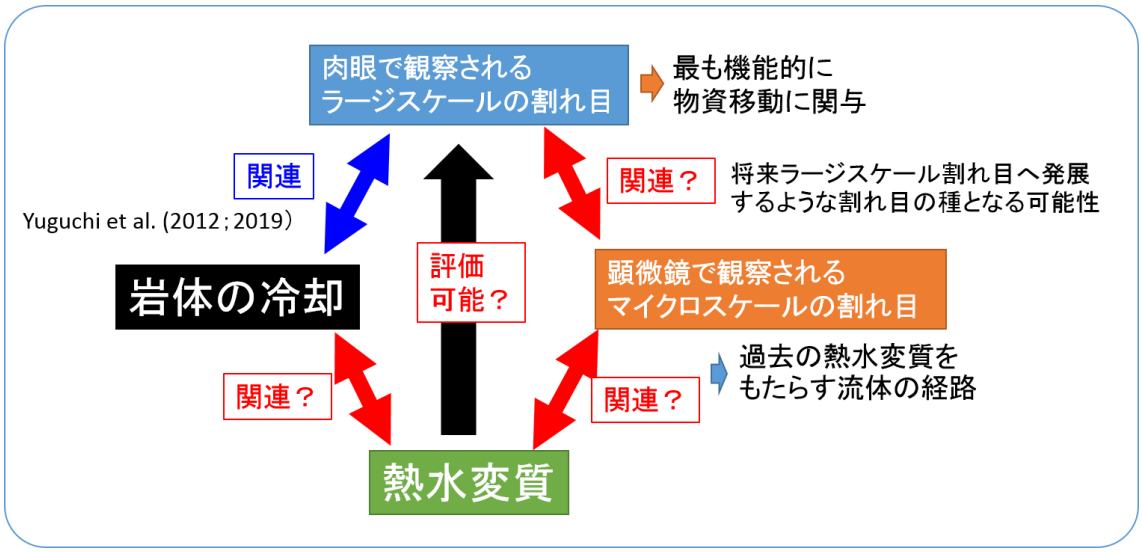


図 10 「熱水変質のパラメータ」「BTV で得られるラージスケールの割れ目」「顕微鏡サイズのマイクロスケールの割れ目」そして「岩体の冷却」の間の「関連性」の検討

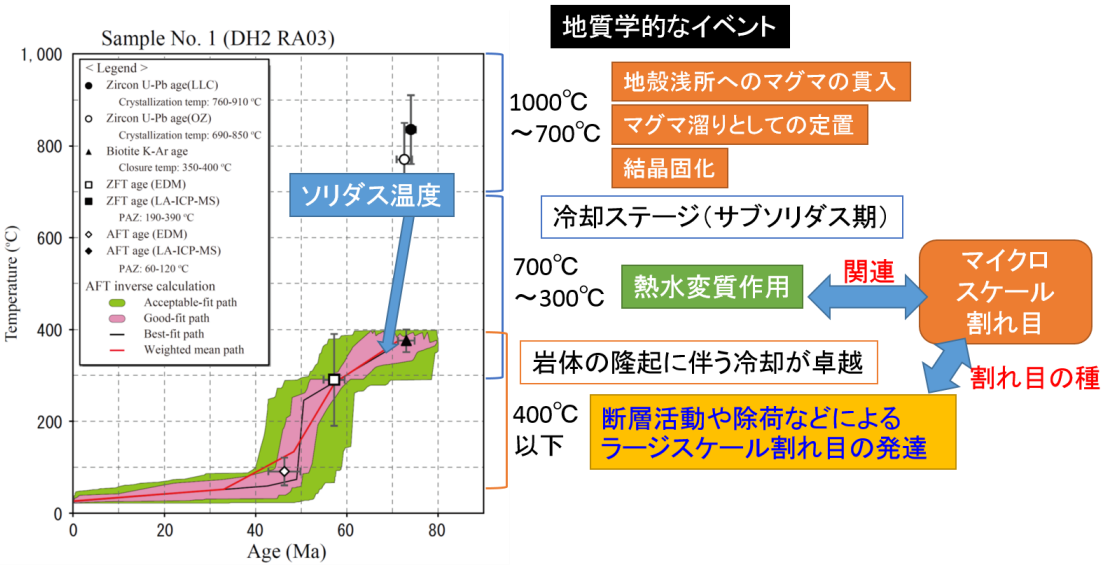


図 11　土岐花崗岩体の研究調査領域を代表する温度－時間履歴（*t-T* path）と「熱水変質」「マイクロスケール割れ目」「ラージスケールの割れ目」との関連性

3. 平成 30 年度成果概要

平成 30（2018）年度は、研究対象とする試料選定を実施した。選定に当たっては既存の割れ目情報を整理し、最終目標である熱水変質パラメータと割れ目との間の関連を議論するために、最も効率的な試料を選択した。瑞浪超深地層研究所の換気立坑（06MI03 号孔）では深度 460m を境として上部高密度割れ目帯と下部低密度割れ目帯が分布する。割れ目低密度帯に位置するサンプル No.1～12（表 1）、割れ目の高密度帯に位置するサンプル No.A1～A13（表 2）を研究対象として選択した。得られた試料は、観察や分析に資する薄片に成形した。その後、STEP1「熱水変質現象の記載岩石学的研究」と STEP2「熱水変質現象の生成温度・年代の決定」に着手した。花崗岩体中の変質には、普遍的に緑泥石化、斜長石の変質（ソーシュライト化）の 2 つの変質現象が観察される。平成 30 年度は特に緑泥石化に着目し、岩石記載と化学分析、温度条件の決定を実施し、変質パラメータの導出に関して検討を行った。

割れ目低密度帯に位置するサンプル No.1～12 では、3 種類の緑泥石化が観察される。それは黒雲母の緑泥石化、ホルンブレンドの緑泥石化ならびに充填緑泥石化である。ホルンブレンドの緑泥石化に対して、反応式を構築し、緑泥石化をもたらす物質移動について明らかにした。ホルンブレンドの緑泥石化に伴う本質的な物質移動としてはチタン、アルミニウム、鉄、マンガン、マグネシウムの流入とカルシウム、ナトリウム、カリウム、フッ素、塩素の流出を伴う。黒雲母の緑泥石化に伴う本質的な物質移動としてはアルミニウム、鉄、マンガン、カルシウムの流入とケイ素、カリウム、フッ素の流出を伴う（Yuguchi et al., 2015）。つまり、ホルンブレンドの緑泥石化と黒雲母の緑泥石化では、アルミニウム、鉄、マンガンの流入とケイ素、カリウム、フッ素の流出は一致する。黒雲母の緑泥石化、ホルンブレンドの緑泥石化および充填緑泥石の生成温度は概ね 200℃から 350℃の幅で一致する。しかしながら，分析値の妥当性の検討および新規追加を行う必要があり、この温度条件もまた再検討を必要とする。

また、黒雲母の緑泥石化に資する変質パラメータの導出手法を提示した。本報告ではオリジナルの初生鉱物（黒雲母）と変質領域（緑泥石）の面積比を提案し、その導出方法について提示した。変質していない黒雲母では、この変質パラメータは 0 となり、完全に緑

泥石化した黒雲母において変質パラメータは 1 となる。

表 1　06MI03 号孔サンプル No. A1～A13 試料採取情報

サンプル No.	06MI03 号孔口からの採取位置（mabh）	割れ目本数（N/5m）
A1	21.00-21.02	48
	21.10-21.25	48
A2	44.00-44.16	31
A3	49.00-49.22	40
A4	77.10-77.25	7
A5	99.13-99.31	35
A6	106.05-106.17	31
A7	121.01-121.17	28
A8	132.82-132.96	11
A9	156.79-157.00	6
A10	175.80-176.00	2
A11	193.00-193.19	3
A12	222.00-222.16	18
A13	253.00-253.14	3

表 2　06MI03 号孔サンプル No. 1～12 試料採取情報

サンプル No.	06MI03 号孔口からの採取深度（mabh）	割れ目本数（N/5m）
1	309.00	0
2	284.00	2
3	289.00	2
4	294.00	2
5	299.00	2
6	304.00	2
7	309.00	0
8	314.00	8
9	319.00	16
10	324.00	3
11	329.00	10
12	334.00	0

4. 2019 年度研究実施内容

4.1 2019 年度の計画、実施方法

4.1.1 2019 年度の実施計画

2019 年度は、中部日本の土岐花崗岩体を対象とし、熱水変質現象の岩石記載に基づく「STEP1 熱水変質パラメータの抽出」、「STEP2 熱水変質現象の生成温度・年代の決定」を実施し、「STEP3 変質パラメータと岩体の冷却と割れ目データの比較検討」に着手する。データの取りまとめを行い、報告書を作成する。

(1) 熱水変質現象のパラメータ抽出
変質現象の形成メカニズムの解明を実施しつつ、斜長石のソーシュライト化に関する変質パラメータの提案、さらに低密度割れ目帯・高密度割れ目帯試料に対してデータの拡充を実施する。

(2) 熱水変質現象の生成温度・年代の決定
変質現象の生成温度・年代条件の決定を行い、パラメータ化した現象の理解を深める。これは提案するパラメータの妥当性を評価する上で重要となる。

(3) 変質パラメータと岩体の冷却、割れ目データとの比較検討
得られた変質パラメータと岩体の冷却、今日の割れ目データ（肉眼スケールのラージスケール割れ目と顕微鏡スケールのマイクロスケールの割れ目）の比較検討に着手する。

(4) 2019 年度取りまとめ
得られた知見の取りまとめを行い、報告書の執筆、委員会報告を行う。

4.1.2 電子顕微鏡観察および鉱物化学分析

偏光顕微鏡による光学的な観察を実施し、その後、電子顕微鏡観察および鉱物化学分析を実施する。組成（BSE）像および組成マッピングには山形大学理学部に設置された電子顕微鏡装置（JEOL IT-100A + Gatan Mini CL）を使用した。分析条件は加速電圧 15kV、電流値 1.0nA。鉱物化学分析には山形大学理学部に設置された波長分散型X線分析装置(WDS)内臓の電子プローブマイクロアナライザー(EPMA: JEOL JXA-8900）を用いた。分析条件は加速電圧 15kV、電流値 20nA とした。

4.2　2019 年度の成果内容

4.2.1　熱水変質現象のパラメータ抽出（STEP1）

4.2.1.1　サンプル No.A1-A13 の岩石記載

土岐花崗岩体は、深度に対して上部高密度割れ目帯と下部低密度割れ目帯が分布する（石橋・笹尾，2016）。土岐花崗岩体に位置する瑞浪超深地層研究所は、坑口からの深度 500m の主立坑と換気立坑、および鉛直方向に 100m 間隔の横抗から構成されている(図 2)。この研究坑道において、高密度割れ目帯と低密度割れ目帯の境界はおおよそ深度 460m の間に相当する(図 2)。上部高密度割れ目帯と下部低密度割れ目帯における試料を用いることにより、比較的狭い領域において割れ目頻度の高い試料と低い試料を効率的に採取することができる。下部低密度割れ目帯試料（サンプル No. 1～12）の岩石記載は 2018 年度報告書に記した。上部高密度割れ目帯試料（サンプル No. A1～A13）の岩石記載を以下に記す。

サンプル No.A1 から No.A13 までの岩石記載の結果を表 3 に示す。サンプル No.A1 から No.A13 までの試料はホルンブレンド黒雲母花崗岩に相当する（図 2）。ホルンブレンド黒雲母花崗岩は完晶質の等粒状花崗岩であり、ホルンブレンドの出現をもって定義づけられる（湯口ほか，2010）。

No.A1 から No.A13 の岩石サンプル中においても、熱水変質による緑泥石化ならびに斜長石の変質（ソーシュライト化）が普遍的に観察される。構成鉱物は、石英、斜長石、カリ長石、黒雲母、ホルンブレンド、白雲母、チタン石、蛍石、黄鉄鉱、磁鉄鉱およびチタン鉄鉱からなり、副成分鉱物として緑簾石、褐簾石、ジルコン、アパタイトが観察される。斜長石は、粒径 1-20mm の半自形から他形結晶である。特に粒径 1-7mm 程度の半自形結晶が広く認められ、コアからリムに向けて Ab70 から Ab82 へアルバイト成分（Na 成分）が増大する累帯構造を持つ（湯口ほか，2010）。斜長石のコア部分には細粒な白雲母（イライト）から構成されるソーシュライト化が高い頻度で観察される。またソーシュライト化はコア部分のみにとどまらず、リム部分までの広範囲で観察されるケースも散見される（図 12）。カリ長石は、パーサイト構造を有し粒径 1-12mm の他形を呈する。カリ長石はコアおよびリムともに Or95 前後の平均組

成を有する（湯口ほか，2010）。斜長石とカリ長石の間にはミルメカイトや反応縁が普遍的に認められる。黒雲母は粒径 1-5mm で半自形から自形を示し、annite と siderophyllite の中間的な組成を有する(湯口ほか，2010)。緑泥石化が進んでおり、一部をあるいは全体を緑泥石に置換される黒雲母が広く観察される（図 8A）。特に著しく緑泥石化した黒雲母には二次的な変質鉱物として黄鉄鉱、チタン鉄鉱、蛍石、チタン石が形成されている。

ホルンブレンドは細粒なものが多く、粒径 1-2.5mm で半自形から自形を示す。多色性が強く、軸色は X において無色、Y と Z においては淡緑色である．カルシウム角閃石分類図で ferropargasite ないし ferroedenite に相当する (湯口ほか，2010)。角閃石の緑泥石化も観察される（図 8B）。白雲母は粒径 0.2-0.9mm 程度の細粒な他形から半自形結晶である。チタン鉄鉱は、黒雲母などの有色鉱物の近傍に産出することが多く、粒径 0.8-2.0mm 程度の半自形結晶である。熱水変質の二次鉱物として、緑泥石化や斜長石のソーシュライト化も普遍的に観察される。また、初生鉱物を切る緑泥石脈や方解石脈も観察される。

表 3　サンプル No.A1 から No.A13 までの岩石記載（その 1）

〈試料名〉		〈深度 (m)〉	〈標高 (m)〉	〈構成鉱物とモード〉		〈岩石記載〉					岩相
A1	06MI03 号孔 19mabh'	210	−9	Qtz	vol%	石英	他形	波状消光　包有物(Bt, Pl, Alla)			ホルンブレンド黒雲母花崗岩
				Pl	vol%	斜長石	半自形～他形	一部でソーシュライト化	リム部:ミルメカイト		
				Kfs	vol%	カリ長石	他形	パーサイト卓越	包有物(Cal, Chl)		
				Bt	vol%	黒雲母	他形	リム部が Chl に部分的に置換	包有物(Zr, Apt, Py)	Zr の周囲でハロー	
				Chl	vol%	緑泥石	他形（黒雲母のリム部を置換）	粒間にあるものは細粒，黒雲母を置換する Chl は比較的粗大			
				Hb	vol%	ホルンブレンド	自形	変質領域多い			
				Other	vol%	その他	Zr, Ill, Apt, Alla, Ep, Py, Mgt	Bt の周囲および劈開沿いに Py が生成			
A2	06MI03 号孔 44mabh	235	−34	Qtz	vol%	石英	他形	波状消光　包有物(Bt)			
				Pl	vol%	斜長石	半自形～他形	顕著なソーシュライト化+ Bt，Chl および蛍石の包有物		リム部:ミルメカイト	
				Kfs	vol%	カリ長石	他形	パーサイト卓越	包有物(Bt, Pl)		
				Bt	vol%	黒雲母	他形	大部分が Chl に置換	包有物(Zr, Apt, Py)	Zr の周囲でハロー	
				Chl	vol%	緑泥石	他形（黒雲母を置換）	Bt を置換			
				Other	vol%	その他	Zr, Ill, Apt，蛍石, Py	Py は Bt 中または Pl の割目に生成		変質が顕著な薄片	
A3	06MI03 号孔 49mabh	240	−39	Qtz	vol%	石英	他形	波状消光　包有物(Bt，Pl, Zr)			
				Pl	vol%	斜長石	半自形～他形	顕著なソーシュライト化+Bt，Chl および Cal の包有物		リム部:ミルメカイト	
				Kfs	vol%	カリ長石	他形	パーサイト卓越	包有物(Pl)		
				Bt	vol%	黒雲母	他形	リム部が Chl に部分的に置換	包有物(Zr, Apt, Alla, Mgt)		
				Chl	vol%	緑泥石	他形（黒雲母のリム部を置換）	粒間にあるものは細粒，黒雲母を置換する Chl は比較的粗大			
				Hb	vol%	ホルンブレンド	自形	変質領域多い			
				Other	vol%	その他	Zr, Ill, Apt, Alla, Py, Mgt	Py は Hb 中に生成		変質が顕著な薄片	
A4	06MI03 号孔 74mabh	265	−64	Qtz	vol%	石英	他形	波状消光　包有物(Bt，Pl，Kfs)			
				Pl	vol%	斜長石	半自形～他形	一部でソーシュライト化+Bt，Chl,および Ep の包有物		リム部:ミルメカイト	
				Kfs	vol%	カリ長石	他形	パーサイト卓越	包有物(Bt, Pl, Qtz)	Zr の周囲でハロー	
				Bt	vol%	黒雲母	他形	リム部が Chl に部分的に置換	包有物(Zr, Apt, Alla, Mgt, Ilm)		
				Chl	vol%	緑泥石	他形（黒雲母のリム部を置換）	粒間にあるものは細粒，黒雲母を置換する Chl は比較的粗大			
				Other	vol%	その他	Zr, Ill, Apt, Alla, Ep, Mgt, Ilm				

Qtz（石英）、Pl（斜長石）、Kfs（カリ長石）、Chl（緑泥石）、Zr（ジルコン）、Apt（アパタイト）、Ill（イライト）、Alla（褐廉石）、Cal（カルサイト）、Py（黄鉄鉱）、Mgt（磁鉄鉱）、Ilm（チタン鉄鉱）

表 3　サンプル No.A1 から No.A13 までの岩石記載（その 2）

〈試料名〉		〈深度 (m)〉	〈標高 (m)〉	〈構成鉱物とモード〉		〈岩石記載〉				岩相
A5	06MI03 号孔 99mabh	290	−89	Qtz	vol%	石英	他形	波状消光　包有物(Bt, Pl)		ホルンブレンド黒雲母花崗岩
				Pl	vol%	斜長石	半自形～他形	顕著なソーシュライト化+Bt, Chl, Cal および Py の包有物	リム部:ミルメカイト	
				Kfs	vol%	カリ長石	他形	パーサイト卓越	包有物(Bt, Pl, Alla)	
				Bt	vol%	黒雲母	他形	大部分が Chl に置換	包有物(Zr, Apt, Py, Ilm)　Zr の周囲でハロー	
				Chl	vol%	緑泥石	他形(黒雲母を置換)	粒間にあるものは細粒，黒雲母を置換する Chl は著しく粗大		
				Hb	vol%	ホルンブレンド	自形	ほとんどが変質領域		
				Other	vol%	その他	Zr, Ill, Apt, Alla, Py, Ilm, Cal	薄片全体を横切るカルサイト脈が卓越	変質が非常に顕著な薄片	
A6	06MI03 号孔 104mabh	295	−94	Qtz	vol%	石英	他形	波状消光　包有物(Bt, Pl, Cal, Alla)		
				Pl	vol%	斜長石	半自形～他形	一部でソーシュライト化+Bt, Chl および Py の包有物	リム部:ミルメカイト	
				Kfs	vol%	カリ長石	他形	パーサイト卓越	包有物(Bt, Pl, Alla)	
				Bt	vol%	黒雲母	他形	リム部が Chl に部分的に置換	包有物(Zr, Apt, Py, Ilm)　Zr の周囲でハロー	
				Chl	vol%	緑泥石	他形(黒雲母のリム部を置換)	粒間にあるものは細粒，黒雲母を置換する Chl は比較的粗大		
				Other	vol%	その他	Zr, Ill, Apt, Alla, Py, Ilm, Cal，蛍石	Chl 化著しい Bt 中に蛍石が生成		
A7	06MI03 号孔 119mabh	310	−109	Qtz	vol%	石英	半自形～他形	波状消光　包有物(Bt, Pl)		
				Pl	vol%	斜長石	半自形～他形	顕著なソーシュライト化+Bt, Chlおよび Py の包有物	リム部:ミルメカイト	
				Kfs	vol%	カリ長石	他形	パーサイト卓越	包有物(Bt, Pl)	
				Bt	vol%	黒雲母	他形	大部分が Chl に置換	包有物(Zr, Apt, Alla, Ilm，チタン石，蛍石)　Zr の周囲でハロー	
				Chl	vol%	緑泥石	他形(黒雲母を置換)	Bt を置換		
				Other	vol%	その他	Zr, Ill, Apt, Alla, Py, Ilm, Cal，蛍石，チタン石	マイクロクラックに沿ってカルサイト脈が卓越	変質が非常に顕著な薄片	
A8	06MI03 号孔 134mabh	325	−124	Qtz	vol%	石英	他形	波状消光　包有物(Bt, Pl, Alla, Mgt, Hb)		
				Pl	vol%	斜長石	半自形～他形	一部でソーシュライト化+Bt, Chl および Ep の包有物	リム部:ミルメカイト	
				Kfs	vol%	カリ長石	他形	パーサイト卓越	包有物(Bt, Pl)	
				Bt	vol%	黒雲母	他形	リム部が Chl に部分的に置換	包有物(Zr, Apt, Py, Ilm)　Zr の周囲でハロー	
				Chl	vol%	緑泥石	他形(黒雲母のリム部を置換)	粒間にあるものは細粒，黒雲母を置換する Chl は比較的粗大		
				Hb	vol%	ホルンブレンド	自形	変質領域多い		
				Other	vol%	その他	Zr, Ill, Apt, Alla, Ep, Py, Mgt, Ilm, Cal	マイクロクラックに沿ってカルサイト脈が卓越		

Qtz（石英）、Pl（斜長石）、Kfs（カリ長石）、Chl（緑泥石）、Zr（ジルコン）、Apt（アパタイト）、Ill（イライト）、Alla（褐簾石）、Cal（カルサイト）、Py（黄鉄鉱）、Mgt（磁鉄鉱）、Ilm（チタン鉄鉱）

表 3　サンプル No.A1 から No.A13 までの岩石記載（その 3）

〈試料名〉		〈深度 (m)〉	〈標高 (m)〉	〈構成鉱物とモード〉		〈岩石記載〉					岩相
A9	06MI03 号孔 154mabh	345	−144	Qtz	vol%	石英	他形	波状消光　包有物(Bt, Pl, Hb)			ホルンブレンド黒雲母花崗岩
				Pl	vol%	斜長石	半自形～他形	一部でソーシュライト化+Bt, Chl の包有物		リム部:ミルメカイト	
				Kfs	vol%	カリ長石	他形	パーサイト卓越	包有物(Bt, Pl, Alla)		
				Bt	vol%	黒雲母	他形	リム部が Chl に部分的に置換	包有物(Zr, Apt, Py, Ilm)	Zr の周囲でハロー	
				Chl	vol%	緑泥石	他形（黒雲母のリム部を置換）	粒間にあるものは細粒，黒雲母を置換する Chl は比較的粗大			
				Hb	vol%	ホルンブレンド	自形	変質領域多い			
				Other	vol%	その他	Zr, Ill, Apt, Alla, Py, Ilm, Cal	マイクロクラックに沿ってカルサイト脈が卓越			
A10	06MI03 号孔 174mabh	365	−164	Qtz	vol%	石英	他形	波状消光　包有物(Bt, Pl, Kfs)			
				Pl	vol%	斜長石	半自形～他形	顕著なソーシュライト化+Bt, Chl および蛍石の包有物		リム部:ミルメカイト	
				Kfs	vol%	カリ長石	他形	パーサイト卓越	包有物(Bt, Pl, Alla)		
				Bt	vol%	黒雲母	他形	リム部が Chl に部分的に置換	包有物(Zr, Apt, Py, Ilm)	Zr の周囲でハロー	
				Chl	vol%	緑泥石	他形（黒雲母のリム部を置換）	粒間にあるものは細粒，黒雲母を置換する Chl は比較的粗大			
				Hb	vol%	ホルンブレンド	変質領域多い				
				Other	vol%	その他	Zr, Ill, Apt, Alla, Py, Ilm, Mgt				
A11	06MI03 号孔 194mabh	385	−184	Qtz	vol%	石英	他形	波状消光　包有物(Bt, Pl, Py)			
				Pl	vol%	斜長石	半自形～他形	顕著なソーシュライト化+Bt, Chlおよび Py の包有物		リム部:ミルメカイト	
				Kfs	vol%	カリ長石	他形	パーサイト卓越	包有物(Bt, Pl, Alla)		
				Bt	vol%	黒雲母	他形	大部分が Chl に置換	包有物(Zr, Apt, Alla, Cal, チタン石, 蛍石)	Zr の周囲でハロー	
				Chl	vol%	緑泥石	他形（黒雲母を置換）	Bt を置換			
				Hb	vol%	ホルンブレンド	自形	変質領域多い			
				Other	vol%	その他	Zr, Ill, Apt, Alla, Py, Cal, Ep, 蛍石, チタン石	マイクロクラックに沿ってカルサイト脈が卓越		変質が顕著な薄片	
A12	06MI03 号孔 219mabh	410	−209	Qtz	vol%	石英	他形	波状消光　包有物(Bt, Pl, Kfs)			
				Pl	vol%	斜長石	半自形～他形	顕著なソーシュライト化+Bt, Chl および Py の包有物		リム部:ミルメカイト	
				Kfs	vol%	カリ長石	他形	パーサイト卓越	包有物(Hb, Pl, Chl, Alla)		
				Bt	vol%	黒雲母	他形	リム部が Chl に部分的に置換	包有物(Zr, Apt, Py, Alla)	Zr の周囲でハロー	
				Chl	vol%	緑泥石	他形（黒雲母のリム部を置換）	粒間にあるものは細粒，黒雲母を置換する Chl は比較的粗大			
				Hb	vol%	ホルンブレンド	自形	変質領域多い			
				Other	vol%	その他	Zr, Ill, Apt, Alla, Py, Cal	マイクロクラックに沿ってカルサイト脈が卓越		変質が顕著な薄片	

Qtz（石英）、Pl（斜長石）、Kfs（カリ長石）、Chl（緑泥石）、Zr（ジルコン）、Apt（アパタイト）、Ill（イライト）、Alla（褐簾石）、Cal（カルサイト）、Py（黄鉄鉱）、Mgt（磁鉄鉱）、Ilm（チタン鉄鉱）

表 3　サンプル No.A1 から No.A13 までの岩石記載（その 4）

〈試料名〉		〈深度 (m)〉	〈標高 (m)〉	〈構成鉱物とモード〉		〈岩石記載〉					岩相
A13	06MI03 号孔 254mabh	445	−244	Qtz	vol%	石英	他形	波状消光　包有物(Bt, Pl)			ホルンブレンド黒雲母花崗岩
				Pl	vol%	斜長石	半自形〜他形	一部でソーシュライト化+Bt, Chl および蛍石の包有物		リム部:ミルメカイト	
				Kfs	vol%	カリ長石	他形	パーサイト卓越	包有物(Bt, Pl)		
				Bt	vol%	黒雲母	他形	リム部が Chl に部分的に置換	包有物(Zr, Apt, Py, Ilm, Alla)	Zr の周囲でハロー	
				Chl	vol%	緑泥石	他形（黒雲母のリム部を置換）	粒間にあるものは細粒，黒雲母を置換する Chl は比較的粗大			
				Other							
					vol%	その他	Zr, Ill, Apt, Alla, Ilm, Mgt, チタン石，蛍石	マイクロクラックに沿ってカルサイト脈が卓越	Py は Chl 化著しい Bt 中に生成		

Qtz（石英）、Pl（斜長石）、Kfs（カリ長石）、Chl（緑泥石）、Zr（ジルコン）、Apt（アパタイト）、Ill（イライト）、Alla（褐廉石）、Cal（カルサイト）、Py（黄鉄鉱）、Mgt（磁鉄鉱）、Ilm（チタン鉄鉱）

4.2.1.2　斜長石の変質メカニズム

斜長石の変質は、変質領域の分布により 3 つのタイプに分類される。3 つのタイプは Type A は斜長石全体に変質が及ぶもの（Overall alteration）、Type B は斜長石のコアの部分に変質が生じるもの（Core alteration）、Type C は斜長石のリム部分に変質が生じるもの（Rim alteration）からなる（図 12）。この現象はサンプル No.1-12（Yuguchi et al., 2019B）だけではなく、サンプル No. A1-A13 において生じることを確認した。

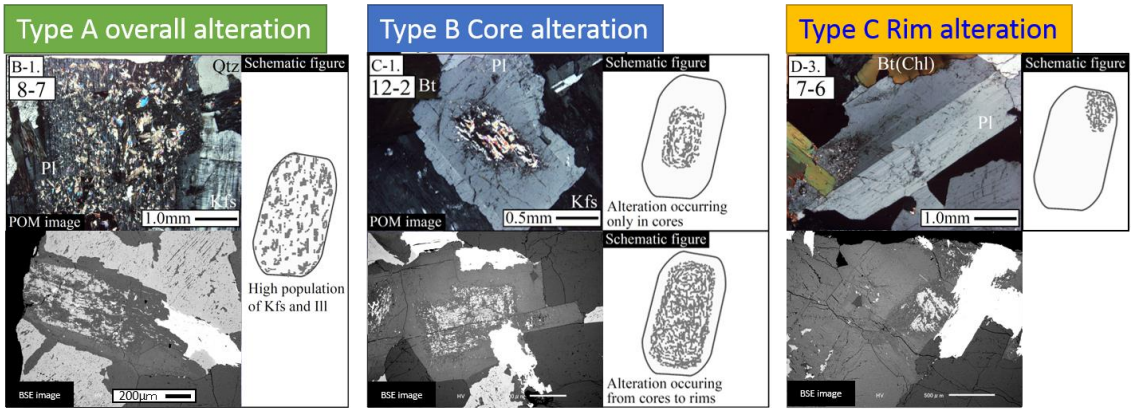


図 12　斜長石変質の 3 つのタイプ（Type A-C）

斜長石の変質はアルバイト化とカリ長石化の固相反応（Solid state reaction）とイライト，蛍石，カルサイトの晶出をもたらす溶解-沈殿反応（Dissolution and precipitation）からなる（Yuguchi et al., 2019B）。斜長石の変質は微小孔の形成を伴う。微小孔とは斜長石などの鉱物中に観察される孔状の微小（数マイクロメートル程度）な空隙を示す。変質領域中の微小孔と変質領域の面積比を Adobe Photoshop を用いて導出した（Yuguchi et al., 2019B）。図 13A は処理前の組成像、図 13B は微小孔領域を黒色で示した図、図 13C は変質領域を黒色で示した図である。このケースで微小孔面積/変質領域面積の比は 0.059 となる。図 14 は複数の斜長石に対する変質領域面積と微小孔領域面積の比を示した図である（Yuguchi et al., 2019B）。この図は変質領域面積と微小孔領域面積が正の相関を示す。このことは微小孔が変質に大きな影響を与えることを示唆する。つまり熱水の斜長石内部への浸透に微小孔が大きな役割を担うことを示す。

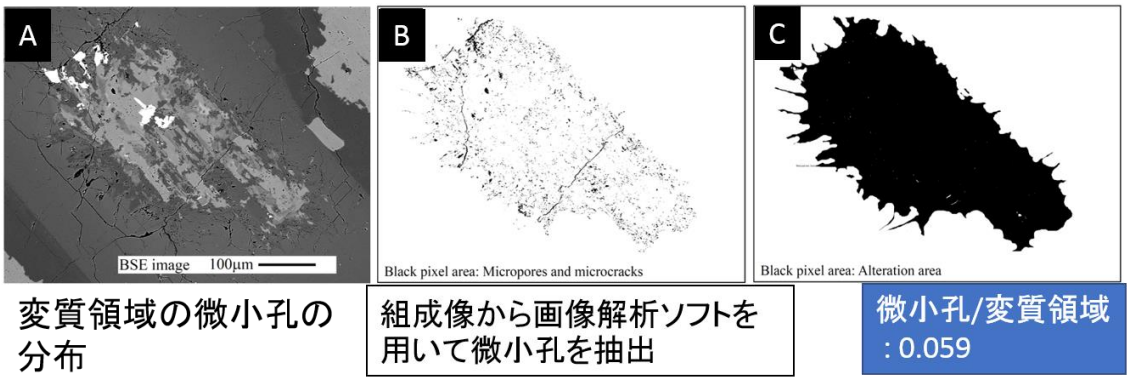


図 13　微小孔領域面積と変質領域面積の比

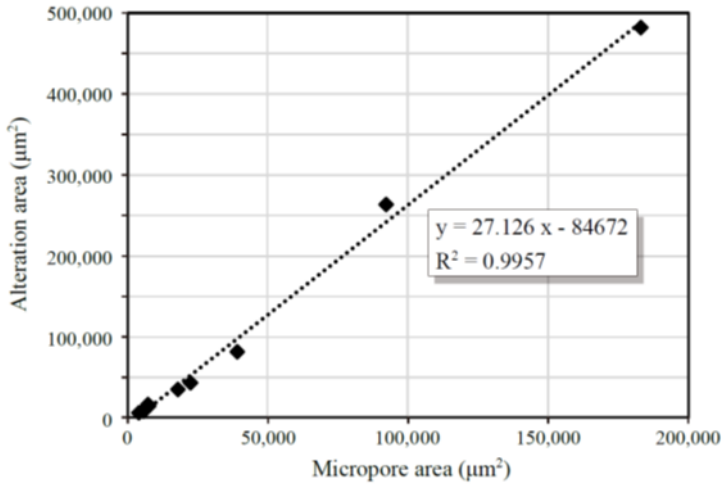


図 14　変質領域面積と変質領域面積の相関関係（Yuguchi et al., 2019B）

次に、斜長石の変質に伴う反応物（マグマ起源の斜長石）と生成物（アルバイト、カリ長石、イライトなど）の化学組成、生成物の面積比、微小孔の形成（反応物から生成物への体積減少）から反応物と生成物、熱水間の反応関係を導出した（図 15）。反応物に熱水からの流入成分として Si^{2+}，K^{+}，Al^{3+}，Fe^{2+}，Mn^{2+}，Mg^{2+}が加わり，生成物（アルバイト、カリ長石、イライトなど）と熱水への流出成分として Ca^{2+}，F^{-}が伴うものである。この物質移動の傾向は、サンプル No.1-12（Yuguchi et al., 2019B）とサンプル No. A1-A13 において共通して生じることを確認した。

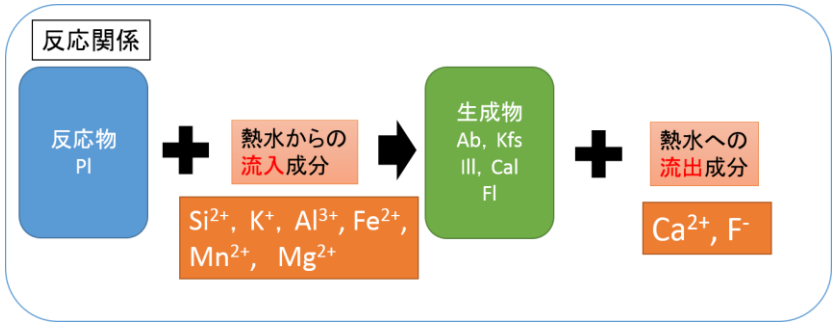


図 15　反応物と生成物、熱水間の反応関係の概略図

また Yuguchi et al. (2015)で示した黒雲母の緑泥石化，2018 年度報告書に記した角閃石の緑泥石化と併せて，緑泥石化から斜長石の変質へと至る物質移動について検討を行った。図 16 は緑泥石化から斜長石の変質へと至る反応物、生成物および熱水間の物質移動を示した概念図である。緑泥石化に際して熱水から Al^{3+}，Fe^{2+}，Mn^{2+}，Ca^{2+} が流入し、Si^{2+}，K^{+}，F^{-}が流出する。緑泥石化に伴う流出成分 Si^{2+}，K^{+}，F^{-}と熱水中の Al^{3+}，Fe^{2+}，Mn^{2+}，Mg^{2+}が斜長石中に流入し，斜長石の変質をもたらす。斜長石の変質の結果として，Ca^{2+}，F^{-}が流出する（図 16）。つまり熱水の化学成分として熱水変質が進むにつれ，Al^{3+}，Fe^{2+}，Mn^{2+}，Mg^{2+}が減少し，Ca^{2+}，F^{-}が増大することを意味する。

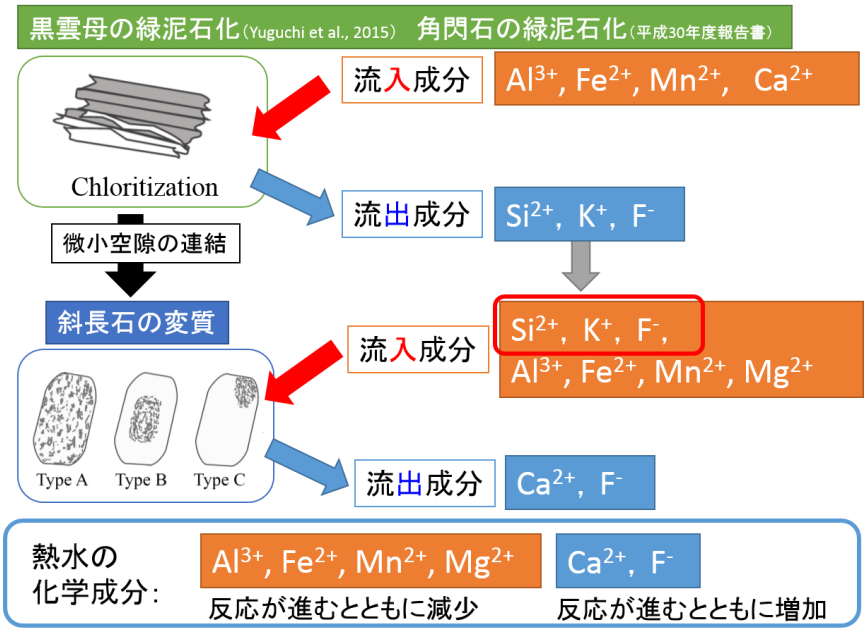


図 16　緑泥石化から斜長石の変質へと至る物質移動を示した概念図

4.2.1.3　変質パラメータの抽出

4.2.1.3.1　斜長石からの変質パラメータの抽出

2018 年度は黒雲母の緑泥石化に関する変質パラメータの提案を行った。そこではオリジナル鉱物（黒雲母）と変質領域の面積比を提案した。面積比はソフトウェア Adobe Photoshop を用いた画像解析により導出する（図 17）。これは領域の選択と二値化に基づく。手法としては、電子顕微鏡による組成像を取得し、黒雲母の緑泥石化を生じる粒子の周囲の領域を白色化する（図 17A）。次に粒子全体（黒雲母と緑泥石を含む）とその他の領域（白色領域）との二値化を行い、それぞれのピクセル数を取得する。さらに緑泥石領域(白色領域)とその他の領域(黒雲母領域を含む黒色領域)で二値化し、それぞれのピクセル数を取得する（図 17B）。緑泥石が観察される領域も元々は黒雲母が分布したことが推定される。このため変質の程度を示すパラメータとして、緑泥石領域を初生的な黒雲母領域（緑泥石領域と現在の黒雲母領域の和）で割った値を提案した。

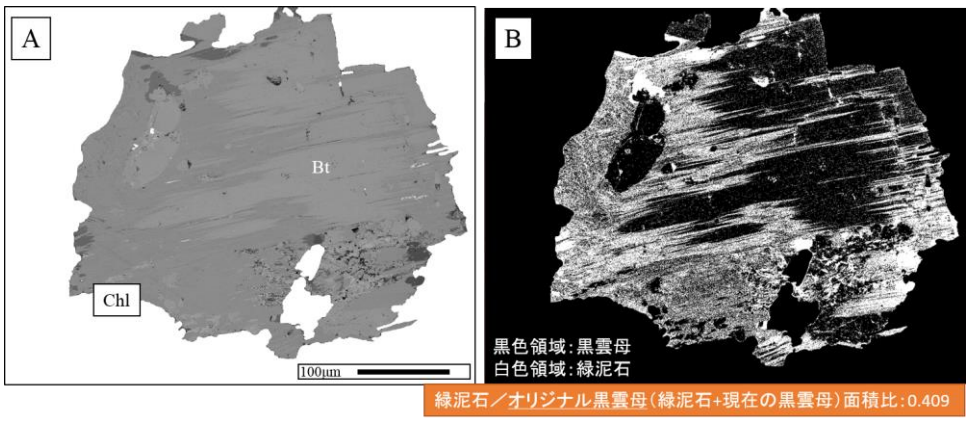


図 17　画像解析による黒雲母の緑泥石化の変質パラメータの導出

（A）電子顕微鏡による組成像、（B）画像解析により二値化された像

斜長石の変質（ソーシュライト化）の発達の程度のパラメータとして、2019 年度報告ではオリジナル鉱物（斜長石）と変質領域の面積比を提案し、その導出方法の検討を行う。面積比はソフトウェア Adobe Photoshop を用いた画像解析により導出する（図 18）。これは Adobe Photoshop による領域の選択と二値化に基づく。手法

としては、電子顕微鏡による組成像を取得（図 18A）、Adobe Photoshop により斜長石の周囲の領域を黒色化する（図 18B）。次に斜長石粒子とその他の領域との二値化を行い、それぞれのピクセル数を取得する（図 18C）。さらにアルバイト化している領域とそれ以外の領域で二値化を行い、アルバイト領域のピクセル数をカウントする（図 18D）。次にカリ長石やイライト等が分布する変質鉱物領域とその他の領域で二値化し、それぞれのピクセル数を取得する（図 18E）。アルバイト化領域と変質鉱物領域のカウント総数が、斜長石の変質領域の面積を表す。

現在の変質領域も元々は斜長石が存在していたことが推定できるため、変質の程度を示すパラメータとして、斜長石の変質領域（図 18 の②と③の領域）を初生的な斜長石領域面積（図 18 の①の領域）で割った値を提案する。図 18 のケースでは 0.29（サンプル No.A1 Pl-4）となる。変質していない斜長石では、この変質パラメータは 0 となり、変質強度が強くなるほど、変質パラメータは 1 に近づく。

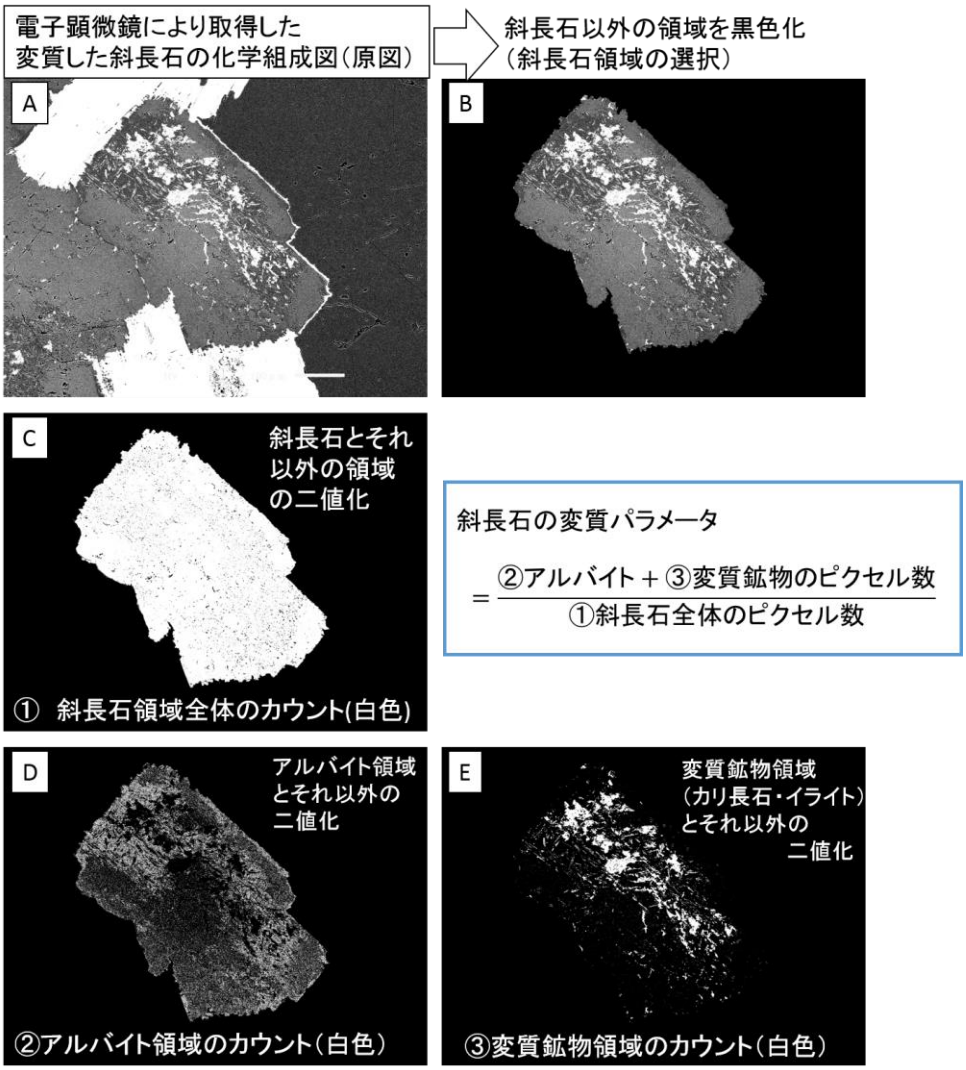


図 18　画像解析による斜長石の変質パラメータの導出

：サンプル No. A1-1（Pl-4）

（A）電子顕微鏡による組成像、（B）斜長石以外の領域を黒色化した像

（C）画像解析により斜長石とそれ以外の領域を二値化した像

（D）画像解析によりアルバイト領域とそれ以外の領域を二値化した像

（E）画像解析により変質鉱物（カリ長石やイライト等）領域とそれ以外の領域を二値化した像

4.2.1.3.2　サンプルを代表する変質パラメータ決定の基準

2018 年度報告書に記した黒雲母の緑泥石化のパラメータの導出手法、および 4.2.1.3.1 節に記した斜長石の変質パラメータの導出手法により、各鉱物の導出手法は構築できた。次の課題として，試料を代表するパラメータを決定するために、サンプル中のいずれの鉱物を選択するのかという点が挙げられる。またパラメータ抽出後、サンプルを代表するパラメータとするための処理についてもここで論じる。

薄片試料中の鉱物の変質の程度は、それぞれの鉱物で異なる。このため、試料を代表するパラメータを決定するためには、サンプル中のいずれの鉱物を選択するのかという基準が必要となる。黒雲母の緑泥石化に関しては、以下の基準を設ける。まず薄片試料の対角に 2 本の 3.1 mm の幅を有する線を設定する（図 19）。その対角線の幅に含まれる 20 粒子の黒雲母を選択する。それぞれの対角線を①、②とすると、まず線①に含まれる黒雲母は全て選択する。線①で 20 粒子に満たない場合は、線②の黒雲母を追加選択する。20 粒子に到達した時点で選択を終了する（図 19）。対象とした 20 粒の黒雲母に対して画像解析による変質パラメータの導出を行う。次に、各黒雲母の変質パラメータ（N=20）の平均値と標準偏差を取り、試料を代表する値とする。

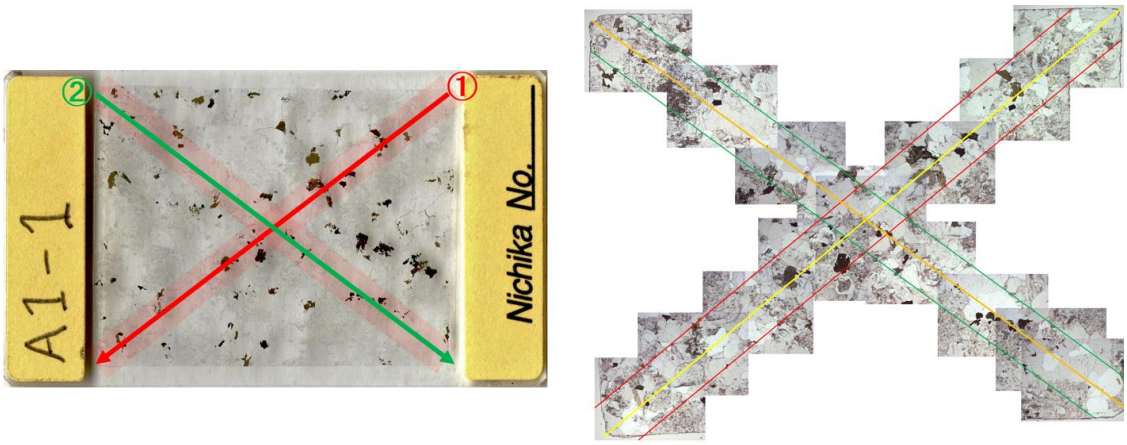


図 19　サンプル中での黒雲母（緑泥石）粒子の選択

斜長石の変質に関しては、以下の基準を設ける。まず薄片試料の対角に 2 本の 0.2 mm の幅を有する線を設定する（図 20）。斜長石は黒雲母と比較してその分布領域が広い

（個々の斜長石が粗粒である）。このため、対角線の幅を狭く設定した。また同様の理由で、黒雲母と比較し取り扱う粒子の数を少なくしても、試料を代表する値を得ることが出来る。そこで対角線に含まれる 15 粒子の斜長石を選択する。それぞれの対角線を①、②とすると、まず線①に含まれる斜長石は全て選択する。線①で 15 粒子に満たない場合は、線②の斜長石を追加選択する。15 粒子に到達した時点で選択を終了する（図 20）。対象とした 15 粒の斜長石に対して画像解析による変質パラメータの導出を行う。次に、各斜長石の変質パラメータ（N=20）の平均値と標準偏差を取り、試料を代表する値とする。

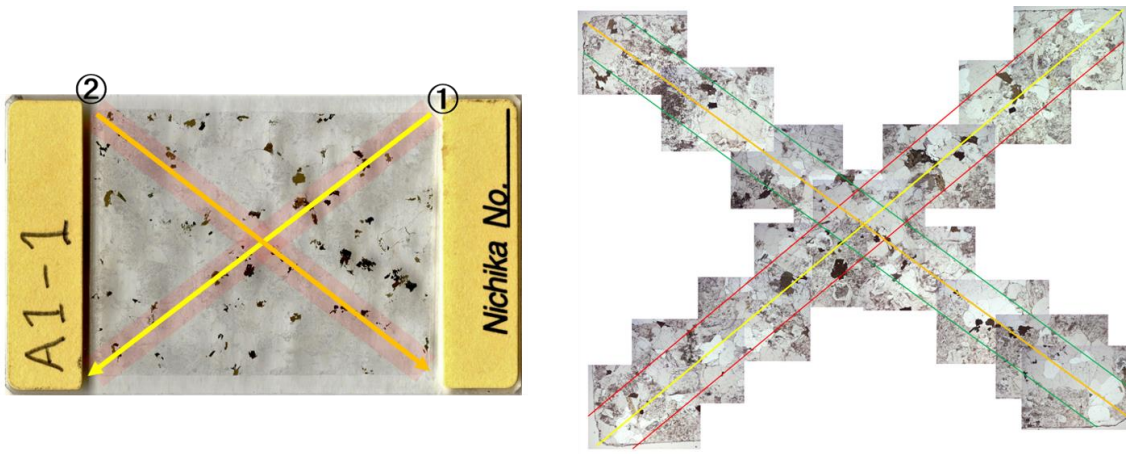


図 20　サンプル中での斜長石粒子の選択

4.2.2　熱水変質現象の生成温度・年代の決定（STEP2）

4.2.2.1　黒雲母の緑泥石化の生成温度・年代

緑泥石化は 3 タイプの分類される。1 つ目は黒雲母の緑泥石化（図 21）、2 つ目は角閃石の緑泥石化（図 22），3 つ目は割れ目への充填緑泥石（図 23）である。

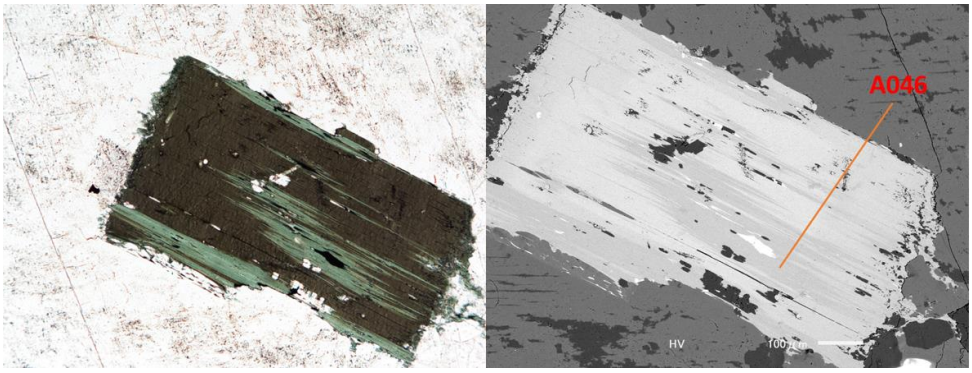


図 21　部分的に緑泥石化した黒雲母

（左図は偏光顕微鏡像，右図は電子顕微鏡・組成像）

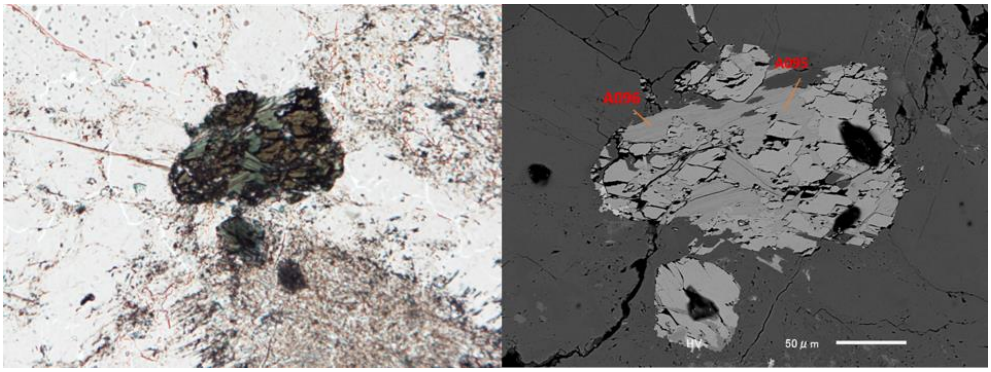


図 22　部分的に緑泥石化した角閃石

（左図は偏光顕微鏡像，右図は電子顕微鏡・組成像）

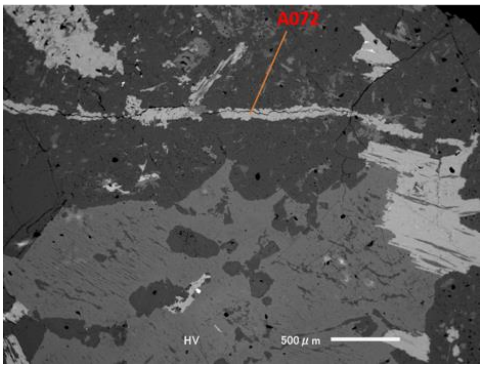


図 23　割れ目に充填した緑泥石（電子顕微鏡・組成像）

2018 年度の報告書においても 3 つのタイプの温度条件を提示した。しかし得られた化学組成データを用いて計算した温度条件には，150℃を下回る結果を伴っていた。このような温度条件は熱水変質が生じる温度とは乖離している。このため、データポイントの見直し（特に分析点の二次電子像を確認し、分析値のコンタミネーションの有無を評価）を行った。またデータの新規追加を行った。図 24 は黒雲母起源緑泥石、ホルンブレンド起源緑泥石、充填緑泥石の生成温度を示したものである。

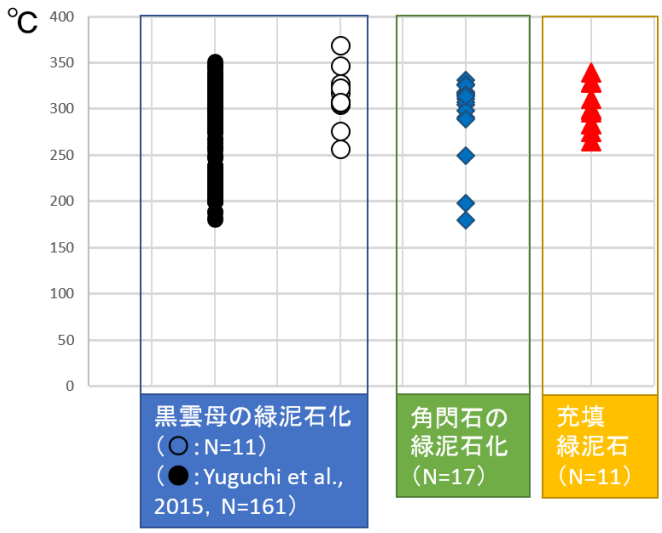


図 24　黒雲母起源緑泥石、ホルンブレンド起源緑泥石、充填緑泥石の生成温度

緑泥石温度は米田・前田（2008）の地質温度計を利用

その結果、黒雲母の緑泥石化は 250℃から 380℃の温度条件を有する。この温度条件は Yuguchi et al. (2015)で示された黒雲母の緑泥石化温度（180～350℃）と整合的であり、このことは今回の分析結果の妥当性を示す。角閃石の緑泥石化の生成温度条件は 180℃から 330℃となり、充填緑泥石は 250℃から 350℃の温度条件を示す。上記の結果は、3 つの緑泥石化タイプそれぞれの温度条件に大きな相違はなく、冷却する岩体中において 380℃から 180℃の温度条件で緑泥石化が生じたことを示す。

次に、得られた緑泥石化の温度条件 180℃～380℃から、緑泥石の生成年代を推定する。推定には試料採取領域の温度－時間履歴（*t-T* path）を利用する。温度-時間履歴は Yuguchi et al. (2019A)で得られたサンプル : DH2RA03 の *t-T* path を利用する（図

25)。この *t-T* path の中で逆解析によって得られた加重平均の履歴（weighted mean path）と生成温度幅を重ね合わせる。これらの交点は開始年代 70Ma、収束年代 50Ma となり，緑泥石化の生成期間は 2,000 万年間という結果が得られた。

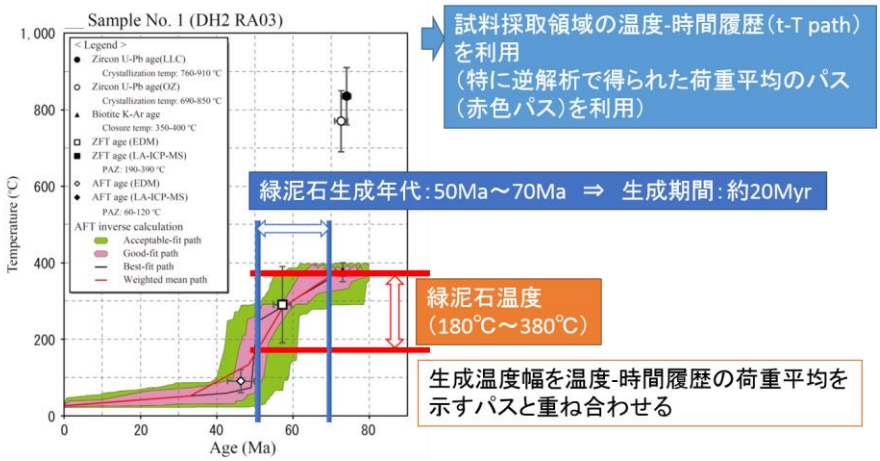


図 25　緑泥石化温度から生成年代の推定

土岐花崗岩体のサンプリング地点の温度-時間履歴（*t-T* path）からの推定

4.2.2.2　斜長石の変質温度・年代

斜長石の変質はアルバイト化とカリ長石化の固相反応（Solid state reaction）とイライト、蛍石、カルサイトの晶出をもたらす溶解-沈殿反応（Dissolution and precipitation）からなる（Yuguchi et al., 2019B）。ここで斜長石の変質で生じる鉱物に対して，適用可能な地質温度計は存在しない。そこで、溶解-沈殿反応を反映するイライト、および固相反応を反映するカリ長石の K-Ar 年代測定を実施した。年代測定の結果、イライト K-Ar 年代は 59.2±1.4Ma（Yuguchi et al., 2019B）、カリ長石 K-Ar 年代は 62.2±1.4Ma が得られた。特に斜長石中の微細なカリ長石の分離は新規性の高い手法を用いた。この手法と成果は、今後論文化し公表する予定である。

次に、得られたイライト K-Ar 年代 59.2±1.4Ma から、生成温度を推定する。Yuguchi et al. (2019A)で得られたサンプル：DH2RA03 の *t-T* path を利用し、温度条件の推定を行った（図 26）。この *t-T* path の中で逆解析によって得られた加重平均パスと生成年代を重ね合わせる。これらの交点は開始温度：約 305℃、収束温度：約 290℃となり、

生成温度間隔は約 15℃となる。

カリ長石 K-Ar 年代 62.2±1.4Ma と温度-時間履歴から、生成温度を推定する（図 27）。逆解析によって得られた加重平均パスと生成年代を重ね合わせる。これらの交点は開始温度：約 325℃、収束温度：約 307℃となり、生成温度間隔は約 18℃となる。

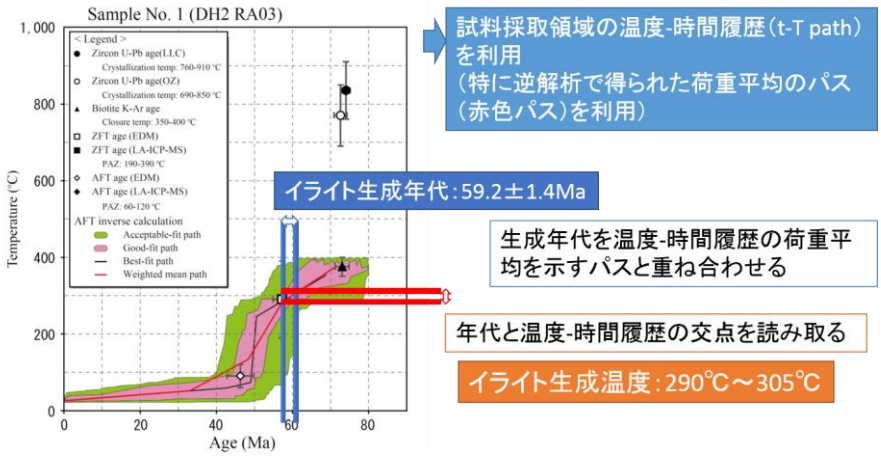


図 26　イライト K-Ar 年代から生成温度の推定

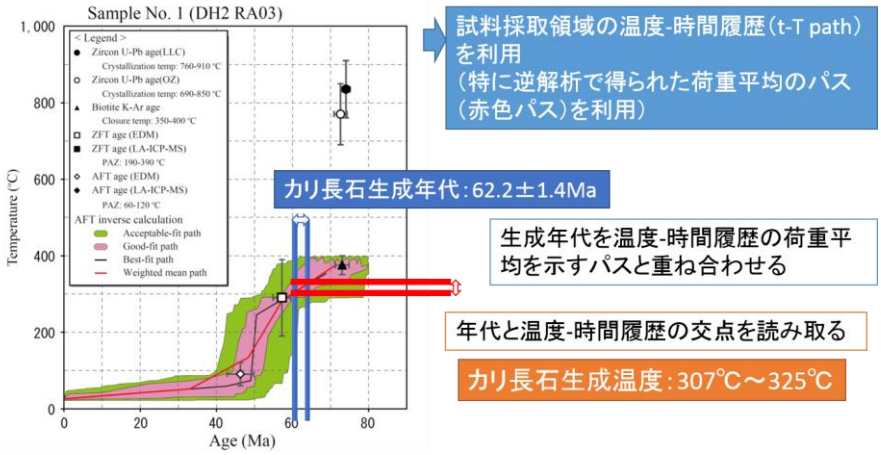


図 27　カリ長石 K-Ar 年代から生成温度の推定

Yuguchi et al. (2019B)において、岩石記載より斜長石の変質現象は固相反応と溶解-沈殿反応の順で生じることを論じた。今回得られた固相反応の物理化学条件（62.2±1.4 Ma　/　307-325℃）と溶解-沈殿反応の物理化学条件（59.2±1.4 Ma　/　290-305℃）はそのことを裏付ける。

さらに 4.2.2.1 および 4.2.2.2 の検討により，土岐花崗岩体中の緑泥石化と斜長石の変質現象の物理化学条件の比較が可能となった。本来、緑泥石は地質温度計の適用が可能であるが，年代を得ることは出来ない。一方、イライトやカリ長石は年代を取得することができるが，温度計への適用はできない。今回の温度-時間履歴を用いる手法は、両者の物理化学条件を比較することを可能にする。

斜長石の変質温度・年代は、緑泥石化の温度・年代条件（180℃～380℃ / 70-50 Ma）に含まれ、整合的である。このことは緑泥石化と斜長石の変質は同じ温度条件・期間に生じることを示唆する。

4.2.3　変質パラメータと岩体の冷却、割れ目データとの比較検討（STEP3）

4.2.3.1　変質パラメータとラージスケール割れ目との比較検討（N=18）

2018 年度報告書に記した緑泥石化の変質パラメータの抽出手法、4.2.1.3.1 で記した斜長石からの変質パラメータの抽出手法、4.2.1.3.2 で記したサンプルを代表するパラメータの決定の基準に基づいて、変質パラメータの導出を行った。2019 年度は、全 25 試料中 18 試料に対して、黒雲母の緑泥石化と斜長石の変質パラメータの取得が完了した（図 28）。

割れ目低密度帯サンプルNo. 1～12

サンプル No.	06MI03 号孔口からの採取深度（mabh）	黒雲母の緑泥石化	斜長石の変質
1	309.00	●	●
2	284.00	●	●
3	289.00	●	●
4	294.00	●	●
5	299.00	●	●
6	304.00	●	●
7	309.00		
8	314.00	●	●
9	319.00		
10	324.00	●	●
11	329.00		
12	334.00	●	●

割れ目高密度帯サンプルNo. A1～A13

サンプル No.	06MI03 号孔口からの採取位置（mabh）	黒雲母の緑泥石化	斜長石の変質
A1	21.00-21.02	●	●
	21.10-21.25		
A2	44.00-44.16	●	●
A3	49.00-49.22	●	●
A4	77.10-77.25	●	●
A5	99.13-99.31	●	●
A6	106.05-106.17		
A7	121.01-121.17	●	●
A8	132.82-132.96		
A9	156.79-157.00		
A10	175.80-176.00	●	●
A11	193.00-193.19		
A12	222.00-222.16	●	●
A13	253.00-253.14	●	●

現在データ取得済みのものに○:
黒雲母の緑泥石化は18サンプル，斜長石の変質は18サンプルに対して完了

図 28　取得済みの変質パラメータ

図 29 は変質パラメータ（黒雲母の緑泥石化、斜長石の変質）とラージスケール割れ目の関係を示した図である。その結果、割れ目頻度が約 40 本/5m以下のケースでは変質パラメータが低いほど，割れ目頻度が低く，パラメータが高いほど割れ目頻度が高い傾向が観察された。一方，割れ目頻度が約 40 本/5mを超えるケースでは，変質パラメータと割れ目頻度の間に相関はなくなる。これらは両方の現象（黒雲母の緑泥石化、斜長石の変質）において共通に観察される傾向である。このことは割れ目頻度が約 40 本/5mを境に異なるメカニズムが働くことを示唆する。来年度はさらなるデータの拡充を図り、最終的な傾向を把握する。

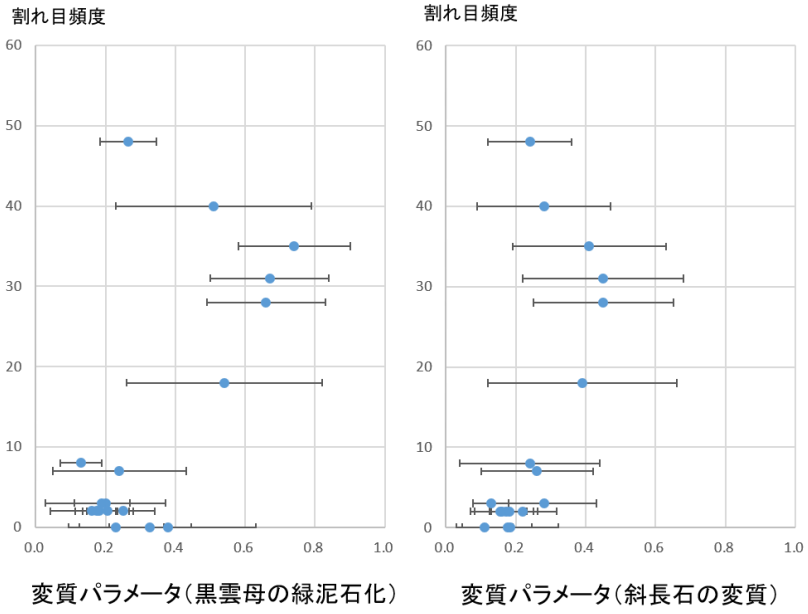


図 29　変質パラメータとラージスケール割れ目の関係

4.3　残された課題と今後の計画

最終年度となる 2020 年度は STEP1 の不足データを補いつつ、STEP3 および STEP4 を中心に実施する計画である。STEP1 として、①低密度割れ目帯試料（サンプル No.1–12）と高密度割れ目帯試料（サンプル No.A1–A13）の変質パラメータのうち不足データを補完する。次に STEP3 として、②取得した変質パラメータとラージスケール割れ目（肉眼スケール）との関連を解明する。次に③変質鉱物周囲のマイクロスケール割れ目（顕微鏡スケール）の取得方法の構築を行う。その手法により、④変質鉱物周囲のマイクロスケール割れ目を定量化し，変質パラメータとの比較検討を行う。最後に⑤マイクロスケール割れ目とラージスケール割れ目との関連性を議論する。それらの知見を統合し、STEP4 として⑤花崗岩体中の現在の割れ目分布そして将来的な割れ目発生の潜在性の評価手法の構築を行う。

5. まとめ

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価において、地下水シナリオを想定した場合、結晶質岩(花崗岩)では、割れ目が地下水流動や物質移動の経路になることから、その分布を知ることは重要な課題である。割れ目分布の将来変化を推定するためには、割れ目がどのように形成されたかを理解することが必要となる。そこで、本研究では花崗岩体の冷却過程に割れ目を形成する要因が隠されていることに着目し、岩石学的現象の理解を深め、花崗岩体中の現在の割れ目分布に加えて、将来的な割れ目発生の潜在性を評価する手法の構築を目指す。この課題解決のため、本研究では花崗岩体の冷却の際に生じる岩石学的現象に着目する。特に 700-300℃の温度条件で生じる熱水変質の程度のパラメータ化を実施する。変質パラメータと冷却を示す既存データ、割れ目頻度データ（顕微鏡スケールのマイクロクラックと肉眼スケールの割れ目）の比較を通じて、「規則性」を見出し、概要調査に際して効率的な評価手法を構築する。

本年度は、STEP1「熱水変質現象のパラメータ抽出」として、1-①斜長石の変質メカニズム（特に物質移動メカニズム）の解明、1-②斜長石の変質に関するパラメータの導出手法の構築、1-③変質パラメータの導出にあたり鉱物選定の基準とサンプルを代表する変質パラメータ決定方法の構築、1-④黒雲母の緑泥石化と斜長石の変質に関する変質パラメータの拡充（2019 年度は全 25 試料中 18 試料完了）を実施した。

STEP2「熱水変質現象の生成温度・年代の決定」として、2-①黒雲母の緑泥石化の生成温度と生成年代の解明、2-②斜長石の変質温度と年代の解明を実施した。黒雲母の緑泥石化の生成温度と生成年代はそれぞれ 180-380℃、50-70Ma となる。斜長石の固相反応は 62.2±1.4Ma、307-325℃で生じ、溶解-沈殿反応は 59.2±1.4Ma、290-305℃で生じる。黒雲母の緑泥石化と斜長石の変質は整合的な温度条件・年代で生じる。

STEP3「変質パラメータと岩体の冷却、割れ目データとの比較検討」として、3-①現有の変質パラメータ（2019 年度は全 25 試料中 18 試料完了）とラージスケール割れ目との関連

を議論した。その結果、割れ目頻度が約 40 本/5m以下のケースでは変質パラメータが低いほど，割れ目頻度が低く，パラメータが高いほど割れ目頻度が高い傾向が観察された。一方，割れ目頻度が約 40 本/5mを超えるケースでは，変質パラメータと割れ目頻度の間に相関はなくなる。これらは両方の現象（黒雲母の緑泥石化、斜長石の変質）において共通に観察される傾向である。このことは割れ目頻度が約 40 本/5mを境に異なるメカニズムが働くことを示唆する。来年度はさらなるデータの拡充を図り、最終的な傾向を把握する。

引用文献

石橋正祐紀，笹尾英嗣，2016．研究坑道におけるボーリング調査によって確認された割れ目データ集．JAEA-Data/Code 2016-009, 10pp.

Japan Nuclear Cycle Development Institute (2000) Regional Hydrogeological Study Project Result from 1992-1999. JNC Technical Report, JNC TN7400 2003-007, Tono Geoscience Center.

Japan Nuclear Cycle Development Institute (2002) Master Plan of the Mizunami Underground Research Laboratory Project. JNC Technical Report. JNC TN7410 2003-001, Tono Geoscience Center.

Nishimoto, S., Yoshida, H. 2010. Hydrothermal alteration of deep fractured granite: Effects of dissolution and precipitation. Lithos, 115, 153-162.

西本昌司，鵜飼恵美，天野健治，吉田英一，2008．地下深部花崗岩の変質プロセス解析 ： 土岐花崗岩を例にして．応用地学雑誌，49，94-104.

米田哲朗，前田寛之，2008．熱水性鉱床に産する緑泥石の化学組成と緑泥石地質温度計の適用性．Journal of MMJ，124，694-699.

Yuguchi, T., Sasao, E., Ishibashi, M. and Nishiyama, T. 2015. Hydrothermal chloritization process from biotite in the Toki granite, Central Japan: Temporal variation of chemical characteristics in hydrothermal fluid associated with the chloritization. American Mineralogist, 100, 1134-1152.

Yuguchi, T., Shoubuzawa, K., Ogita, Y., Yagi, K., Ishibashi, M., Sasao, E., Nishiyama, T., 2019B. Role of micropores, mass transfer, and reaction rate in the hydrothermal alteration process of plagioclase in a granitic pluton. American Mineralogist, 104, 536-556.

Yuguchi, T., Sueoka, S., Iwano, H., Izumino, Y., Ishibashi, M., Danhara, T., Sasao, E. Hirata, T., Nishiyama, T. 2019A. Region-by-region cooling paths within the Toki granite, central Japan: their constrained factors and the relation with fracture population in a pluton. Journal of Asian Earth Sciences,169, 47-66.

Yuguchi, T., Tagami, M., Tsuruta, T., Nishiyama, T. 2012. Three-dimensional fracture distribution in relation to local cooling rate in a granitic body: An example from the Toki granitic pluton, Central Japan. Engineering Geology 149–150, 35–46.

湯口貴史，鶴田忠彦，西山忠男，2010．中部日本土岐花崗岩体の岩相と化学組成の累帯変化，岩石鉱物科学, 39, 50-70.

Yuguchi, T., Tsuruta, T., Nishiyama, T. 2011A. Three-dimensional cooling pattern of a granitic pluton I: The study of exsolution sub-solidus reactions in the Toki granite, Central Japan. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 106, 61-78.

Yuguchi, T., Tsuruta, T., Nishiyama, T. 2011B. Three-dimensional cooling pattern of a granitic pluton II: The study of deuteric sub-solidus reactions in the Toki granite, Central Japan. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 106, 130-141.

Yuguchi, T., Tsuruta, T., and Nishiyama, T. 2013. The spatial variation of initial 87Sr / 86Sr ratios in the Toki granite, Central Japan: Implications for the intrusion and cooling processes of a granitic pluton. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences. 108, 1-12.

Yuguchi, T., Sueoka, S., Iwano, H., Danhara, T., Ishibashi, M., Sasao, E. and Nishiyama, T., 2017. Spatial distribution of the apatite fission-track ages in the Toki granite, central Japan: Exhumation rate of a Cretaceous pluton emplaced in the East Asian continental margin. Island Arc, 26, 1-15.

2019 年度　外部発表

【学術論文】

Yuguchi, T., Shoubuzawa, K., Ogita, Y., Yagi, K., Ishibashi, M., Sasao, E., Nishiyama, T., 2019. Role of micropores, mass transfer, and reaction rate in the hydrothermal alteration process of plagioclase in a granitic pluton. American Mineralogist, 104, 536-556.

【口頭発表】

記載事項なし

研究報告 4

飽和度の変化に伴う堆積岩の変形異方性と放射性廃棄物の合理的な埋設方法に関する研究

埼玉大学　大学院理工学研究科

富樫　陽太

1. 背景・目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分では，廃棄物を埋設する環境として周辺岩盤の変形が小さいことが求められる[1)]。そのため，処分坑道の掘削に伴って生じる掘削影響領域（EDZ）を定量的に把握することが極めて重要である。特に，堆積岩の地層が処分地として選択された場合には，掘削された坑道に大気が流入することで岩盤の乾燥収縮が進んで微細なクラックが生じることが懸念される。そのため，掘削による応力開放だけでなく，乾燥によって不飽和状態に変化していく岩盤坑道に生じる EDZ の評価が極めて重要となってきている。実際に，田中[2)]は，トンネルなどの岩盤構造物の安定性を議論するため，泥岩の乾燥収縮実験を行い，飽和度の変化に伴うひずみの進展を観察している。Ghortbani et al.[3)]は，地層処分や岩盤斜面の大規模崩壊のメカニズム解明のため，乾燥収縮過程における泥岩コアの超音波速度の変化を計測し，乾燥に伴って剛性が変化することを指摘している。

ところで，堆積岩は堆積構造に依存して方向によって異なる変形特性を示すことが知られている[4)]。このような堆積岩の地層に構造物を建造する場合には，その安定性を正確に評価するため，変形異方性を高精度に特定することが工学的に重要な課題となっている。特に地層処分においては，人工バリアや廃棄物そのものの高い安定性が要求される[1)]ので，上述した不飽和状態における EDZ の評価に加えて，変形異方性を正確に評価することが肝要である。このような背景から，長田と Adikaram[5)]は，層理方向とその直交方向にサンプリングした凝灰岩供試体を用い，乾燥収縮に伴うひずみの進展を測定するとともに，超音波速度の測定を行って飽和度と層理の方向に応じて変化する P 波 S 波速度を計測している。

以上のような検討が進められている一方で，異方性をもつ堆積岩の応力とひずみは非共軸なため特定の方向に変形が卓越することが考えられるが，そのような点に着目して検討を行った既往研究はほとんど見当たらない。異方性岩盤の最も剛性が大きい方向（異方性の主軸）とその構成パラメータを正確に特定することができれば，処分坑道の安定性評価に大きく寄与できるだけでなく，廃棄物の埋設方法に応用できる可能性があると考えられる。

そこで本研究では，掘削による乾燥にともなって不飽和状態に移行する堆積岩の異方的な力学挙動を詳細に把握し，異方性を考慮した高レベル放射性廃棄物の埋設方法へと応用することを目的として，室内試験やスイス・モンテリ岩盤研究所における現地計測を通して，飽和度によって変化する堆積岩の変形異方性を詳細に特定することを試みる。

研究代表者らの既往検討[4)]によって新第三紀の堆積岩の飽和状態での変形異

方性が特定されており，堆積層方向の剛性がその直交方向に比べ 1.5～2.7 倍大きいことが示されている。地層処分をはじめとする岩盤構造物の建設・保守においては，岩盤の含水状態は必ずしも飽和しているとは限らない。本研究では，研究代表者らが開発した三軸試験方法[6]を用いて，不飽和状態での変形異方性を正確に特定し，より実現象に近い詳細な岩盤剛性の評価を試みる。これに加え，本研究では，モンテリ岩盤研究所での湿度・気圧・温度の常時モニタリングをおこなって，掘削に伴う岩盤の含水状態の変化を取得する。これにより，掘削に伴って乾燥が進んで不飽和状態に変化していく領域を原位置において特定できると考えている。さらに，以上の成果に基づいて，有限要素法などを用いた変形シミュレーションを行って，坑道（トンネル）の変形特性を把握することで，地層処分における処分坑道の安定性評価や廃棄体の埋設方法に応用できる知見を得ていく。

2. 全体研究計画（3 ヵ年における全体計画）

平成 30 年度には，文献調査を行い，変形異方性や飽和度の変化に伴う岩石挙動に関する既往検討を整理し，実験条件や解析条件を決定するとともに，長田と Adikaram [5)]を参考に乾燥収縮実験を行い，乾燥に伴う変形メカニズムを詳細に観察する。試料は，スイス・モンテリ研究所で採取されたボーリングコア，田下凝灰岩やベレア砂岩などの明確な変形異方性が確認されている堆積岩を用いる。ここでは，岩石供試体の飽和度を効果的に調整する方法についても検討を行う。モンテリ岩盤研究所では，ボーリング深さの異なる水平孔のなかで湿度・気圧・温度の計測を常時行っており，この継続的なデータにより乾燥にともなって変化する岩盤の含水状態を長期に観察する。現地に行って計測器のメンテナンスなどを行うとともに，坑道の変形特性（内空変位，孔壁ひずみ）を測定する方法について検討を進める。

2019 年度には，平成 30 年度に行った検討や準備状況を踏まえ，研究代表者らが開発した三軸試験装置 [6)]をもちいて飽和度を変化させた堆積岩供試体の一軸圧縮試験を行って，掘削に伴う乾燥が進行していく状況を想定した不飽和変形異方性を特定する。開発方法による実験結果をとりまとめ，堆積軟岩の最も剛性の大きい方向を特定するとともに，処分坑道の変形シミュレーションのためのパラメータ整理や有限要素法での数値計算の環境整備を行う。モンテリ岩盤研究所の現地調査では，平成 30 年度に行ってきた計測を継続するとともに新規の計測器を随時設置する。また，計測機器は問題が生じれば更新し，長期のデータを確実に取得できるようにメンテナンスする。

2020 年度には，2019 年度に環境整備した数値解析の実施を通して，処分抗の掘削および高レベル放射性廃棄物の埋設に伴う堆積岩地層の主ひずみ方向を分析し，岩盤の最も硬い方向の変化を捉えていく。モンテリ岩盤研究所の現地計測では，引き続き長期計測を続けるとともに計測器のメンテナンスを随時行う。最後に得られた成果を整理するとともに，地層処分事業に応用できる知見として取りまとめる

3. 2019 度研究実施内容

3.1 実施方法

(1) 堆積軟岩の変形異方性の整理

研究代表者らがこれまでに実施してきた堆積軟岩（**図 1**）の試験結果 [6)-8)]をとりまとめ，変形異方性の程度や主軸方向と堆積方向の関係などを議論するものである。試料は，新第三紀の堆積岩である，幌延泥岩，相模原泥岩，田下凝灰岩，来待砂岩である。

図 1 堆積岩供試体（左：相模原泥岩，中：来待砂岩，右：幌延泥岩）

(2) 乾燥収縮・湿潤膨張試験

図 2 に示す堆積岩から作製した円柱供試体を用いて，乾燥収縮実験（**図 3**）と湿潤膨張実験（**図 4**）を行う。乾燥収縮試験は，飽和状態の岩石供試体を気乾させ，その変形量と質量の変化を計測するもので，既往検討 [5), 9)-14)]によれば，乾燥収縮時の供試体の境界条件は，直応力とせん断応力が作用せず（$\sigma_{ij} = \sigma_{ii} = 0$ $(i,j = X, Y, Z)$），毛管圧力 p だけが等方的に作用する条件になる。供試体は 10 日以上浸水させたものを飽和状態として（地盤工学会基準 [15)]では 48 時間以上浸水で飽和とみなす），気乾による変形を計測するとともに水分の蒸発量を小数点下二桁まで測定可能な電子天秤（島津製作所 TX3202N）で測定した。

図 2　田下凝灰岩供試体（直径 50mm，高さ 100mm）

図 3　乾燥収縮実験の様子

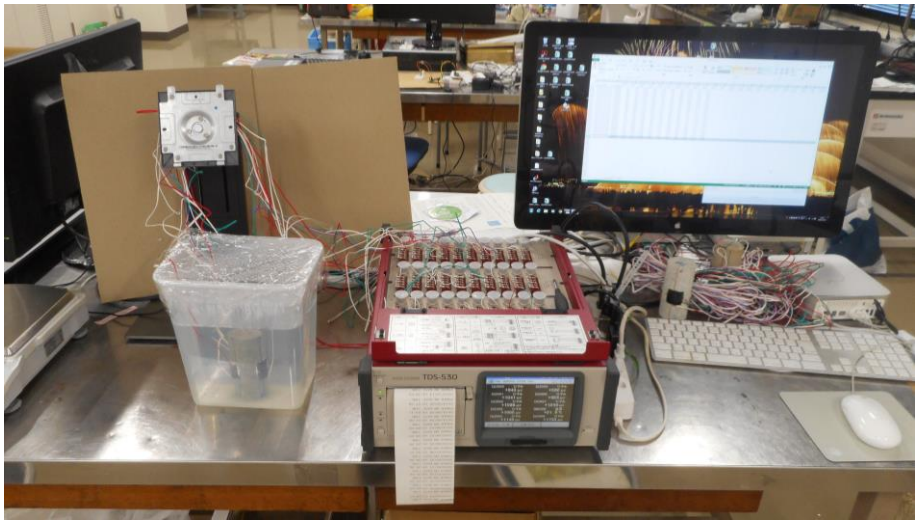


図 4　湿潤膨張実験の様子

湿潤膨張実験では，10 日以上乾燥させた堆積岩試料を純水の中に浸し，湿潤過程における変形特性を調べるものである。供試体は覆いを付けずに浸水させるので，浸水時の静水圧σ_sは間隙水圧 u に等しく，有効応力σ'はゼロである。そのため，水圧（拘束圧）による変形は生じない。浸水による堆積岩の構造の変化に伴って生じる変形だけを捉えられる条件である。なお，供試体の中心から水面までの距離は 10cm 以下になるようにした。

これらの実験では，**図 5** に一例を示すように，供試体側面に 3 枚～9 枚のロゼットゲージ（東京測器，FRA-10T-11 と FRA-10T-11-3TLJBT を併用）を貼りつけて 3 次元のひずみテンソルを測定することで詳細に変形を計測している。いま層理の傾斜 ξが X 軸の回転のみで表されるように直交座標系（X, Y, Z）を設定すると，9 枚のひずみゲージ（3 枚のロゼットゲージ）で計測した直ひずみ成分x^n ($n = 1 \sim 9$)と列ベクトルで成分表示した微小ひずみテンソルε_{ij}（$i, j = X, Y, Z$）の関係は次式で表される [4].

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{E}^{\mathrm{T}}\mathbf{E})^{-1}\mathbf{E}^{\mathrm{T}}\mathbf{x} \tag{1}$$

ここに，

$$\mathbf{x}^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} x^1 & x^2 & x^3 & x^4 & x^5 & x^6 & x^7 & x^8 & x^9 \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{XX} & \varepsilon_{YY} & \varepsilon_{ZZ} & 2\varepsilon_{XY} & 2\varepsilon_{ZY} & 2\varepsilon_{ZX} \end{pmatrix}$$

である．また，E は 9 枚のひずみゲージの単位方向ベクトルから定まる 9 行 6 列の行列で，本研究の座標軸の設定において次式で与えられる．

$$\mathbf{E}=\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.75 & 0.25 & 0 & -0.43 & 0 & 0 \\ 0.38 & 0.13 & 0.5 & -0.22 & -0.25 & 0.43 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.75 & 0.25 & 0 & 0.43 & 0 & 0 \\ 0.38 & 0.13 & 0.5 & 0.22 & -0.25 & -0.43 \end{pmatrix}$$

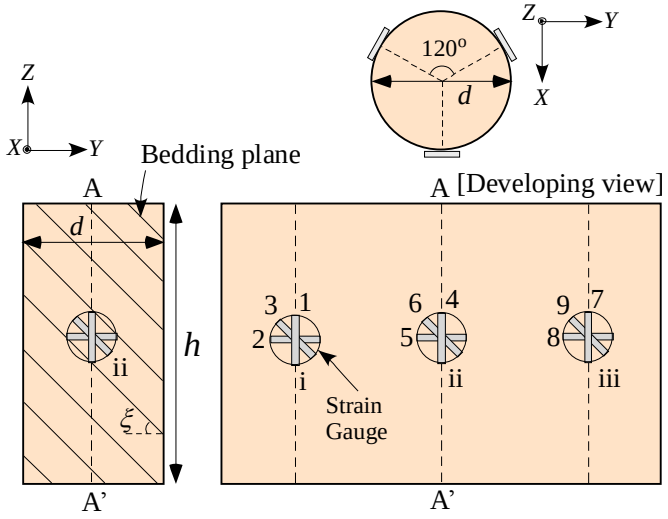


図 5　ひずみゲージの貼付け方法の一例

式(1)は計測値 **x** からひずみテンソル成分 **ε** を最小二乗法により定めているため，ひずみゲージの枚数が多いほど測定誤差や電気ノイズによる許容誤差の影響を低減する効果を期待できる．式(1)で得たひずみテンソルを対角化して三主ひずみおよび主ひずみ方向を取得して，考察を加えていく。なお，本検討では測温式ひずみゲージ（FRA-10T-11-3TLJBT）を用いて供試体の温度変化を測定する。

(3) 不飽和変形異方性を特定する一軸圧縮試験

H30 年度の成果で，田下凝灰岩が乾燥収縮するに伴って異方性の主軸方向が 90 度回転し，湿潤と乾燥状態で全く異なる変形異方性を呈することがわかっている。2019 年度には，飽和度を調整した田下凝灰岩供試体を用いた一軸圧縮試験を行ない，飽和度の変化に伴う堆積岩の変形異方性を定量的に把握

していく。なお，飽和度の設定は気乾によって行うものとし，乾燥収縮・湿潤膨張試験と同様に，10 日以上気乾させた供試体を「乾燥」，10 日以上浸水させた供試体を「飽和」として円柱供試体を作製し，一軸圧縮試験を行なっている。変形の計測は，**図 5** と同様の方法を用いており，軸応力の増加に伴うひずみテンソルの変化を測定した。

(4) モンテリ岩盤研究所での現地計測

図 6 に示すモンテリ岩盤研究所において，2018 年 7 月より，**図 7** のように深さの異なる水平孔のなかに Arduino による環境センサを設置し，湿度・気圧・温度の長期計測を行っている。この継続的なデータにより岩盤が乾燥することによる影響がおよぶ範囲を観察していく。本年度も，坑道の変状調査と計測器のメンテナンスを行うとともに，坑道の変形特性（内空変位，孔壁ひずみ）を測定する方法についても検討を進める。

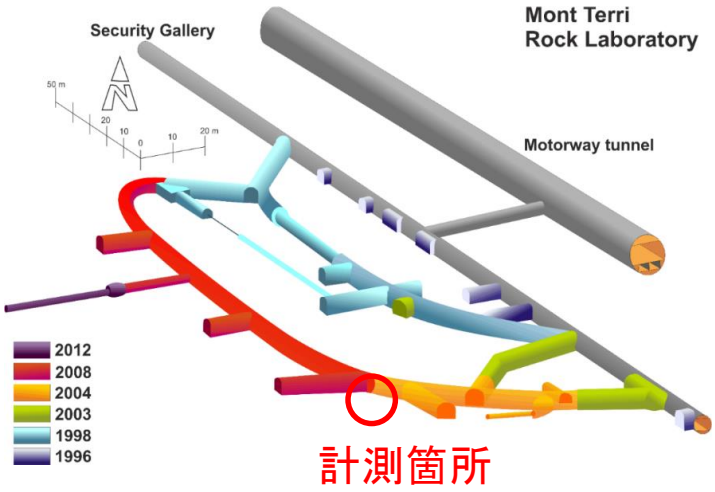


図 6　モンテリ岩盤研究所

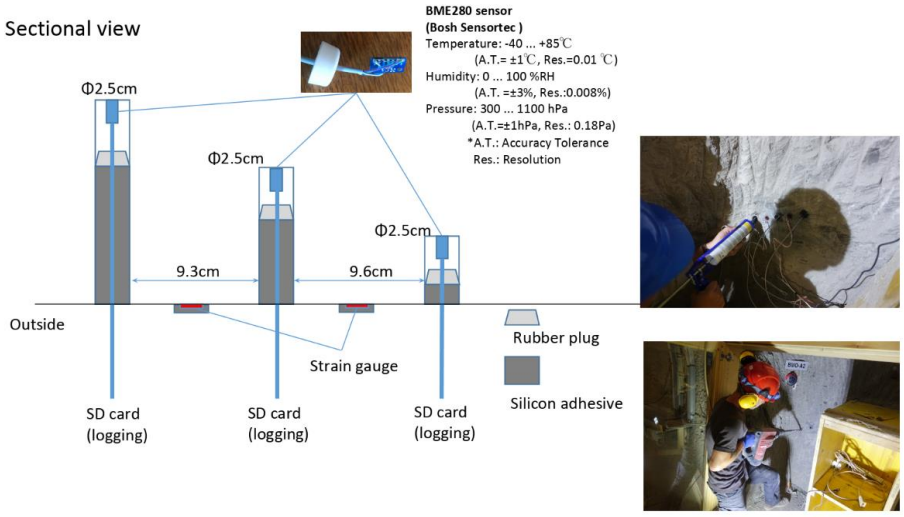


図 7　環境センサの設置状況

3.2 2019 年度の成果内容

(1) 堆積軟岩の変形異方性の整理

表 1 には研究代表者らが開発した三軸試験方法[6)]を用いてこれまでに変形異方性を取得してきた試料の諸元[16)-22)]を示している。なお，田下凝灰岩の結果については(3)で結果を示す。

表 1 堆積岩試料の諸元

名称	採取位置	地質年代	採取深度 (m)	土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	湿潤密度 ρ_t (g/cm^3)	*間隙率* n (%)
相模原泥岩	相模原市	鮮新世	50	-	1.83	35
幌延泥岩	幌延町	鮮新世	350	-	1.84	41.6
来待砂岩	松江市	中新世	-	2.7	2.08	16.5
田下凝灰岩	宇都宮市	中新世	100	2.6	1.72	28.8

相模原泥岩は上総層群の砂質泥岩[16)]であり，東急建設(株)の地下実験場より採取したブロックサンプルである。幌延泥岩は日本原子力開発機構より提供を受けた幌延地下研究所の地下 350m における更別層の泥岩である[17),18)]。来待砂岩は大森層の凝灰質砂岩であり[19), 20)]，田下石は大谷石層の流紋岩質緑色凝灰岩である[21), 22)]。これらの試料に対して圧密排水三軸試験を行なって，面内等方弾性を想定した変形異方性を取得した。

表 2 は等方圧密時のひずみテンソルと主ひずみを表す。

表 2 等方圧密時のひずみテンソルと主ひずみ

Case	σ'_c (MPa)	ε_{ij} (%) $(i,j = X,Y,Z)$					
		XX	YY	ZZ	XY	ZY	ZX
相模原泥岩1	1.00	0.1367	0.1340	0.2043	0.0026	-0.0210	0.0016
相模原泥岩2	1.00	0.2113	0.1043	0.4165	-0.1070	-0.0560	-0.0496
来待砂岩	2.00	0.0322	0.0186	-0.0458	0.0184	0.0156	0.0490
幌延泥岩	2.75	0.0012	0.0009	0.0009	-0.0002	0.0001	0.0003

Case	σ'_c (MPa)	ε_i (%) $(i = 1,2,3)$		
		1	2	3
相模原泥岩1	1.00	0.2101	0.1376	0.1273
相模原泥岩2	1.00	0.4314	0.2765	0.0243
来待砂岩	2.00	0.0699	-0.0078	-0.0670
幌延泥岩	2.75	0.0014	0.0010	0.0006

幌延泥岩は有効等方圧密応力σ'_cを 1.0~5.0 MPa まで段階的に増加させてから軸圧縮したが，平均値を示した。ひずみテンソルについて，等方的な性質を示す材料では直ひずみが同じ値を示し，せん断ひずみはゼロとなるが，ここで検討した試料は，直ひずみはそれぞれ異なる値を示し，せん断ひずみが生じていることがわかる。これにより，検討した堆積岩試料は変形異方性を示していると言えよう。三主ひずみについては，等方性材料では，各成分が同じ値を示す。検討した試料は異方的な性質を示すのでそれぞれが異なる値を示している。さらに，**図 8** に示す Wulff ネット下半球投影によって等方圧密時の主ひずみ方向を**図 9** に表す。図には層理面の方向も記載している。等方圧密時の主ひずみ方向は異方性の主軸と一致するが，相模原泥岩の中間主ひずみ方向と最小主ひずみ方向，すなわち最大主ひずみ方向に直交する面は層理面に近い。ここから層理面の方向に応じて変形異方性が変化していることが見てとれる。一方で，来待砂岩と幌延泥岩では，最大主ひずみ方向に直交する面の傾斜方向は層理面に近いものの，鉛直軸に対して回転している。試料が完全に平行な積層体でないことが理由として挙げられるが，その原因は幌延泥岩ではかなり深部から採取した試料であり，来待砂岩は隆起してきた露頭から採取した試料なので地殻変動による影響を受けている可能性もある。

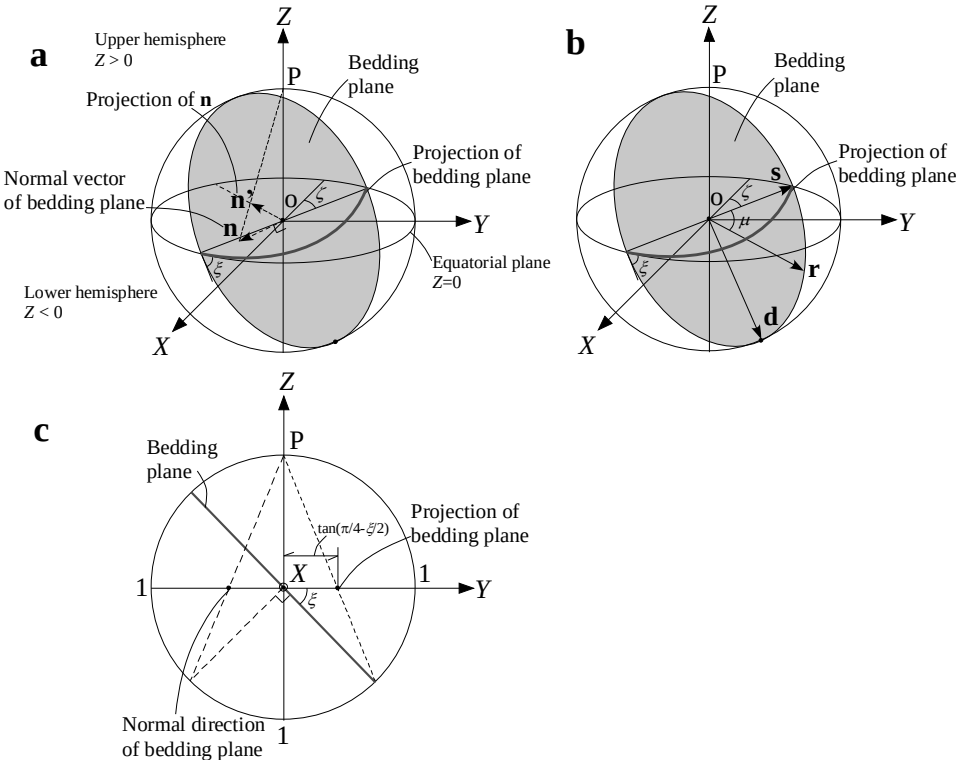


図 8　下半球投影のウルフネットの概念

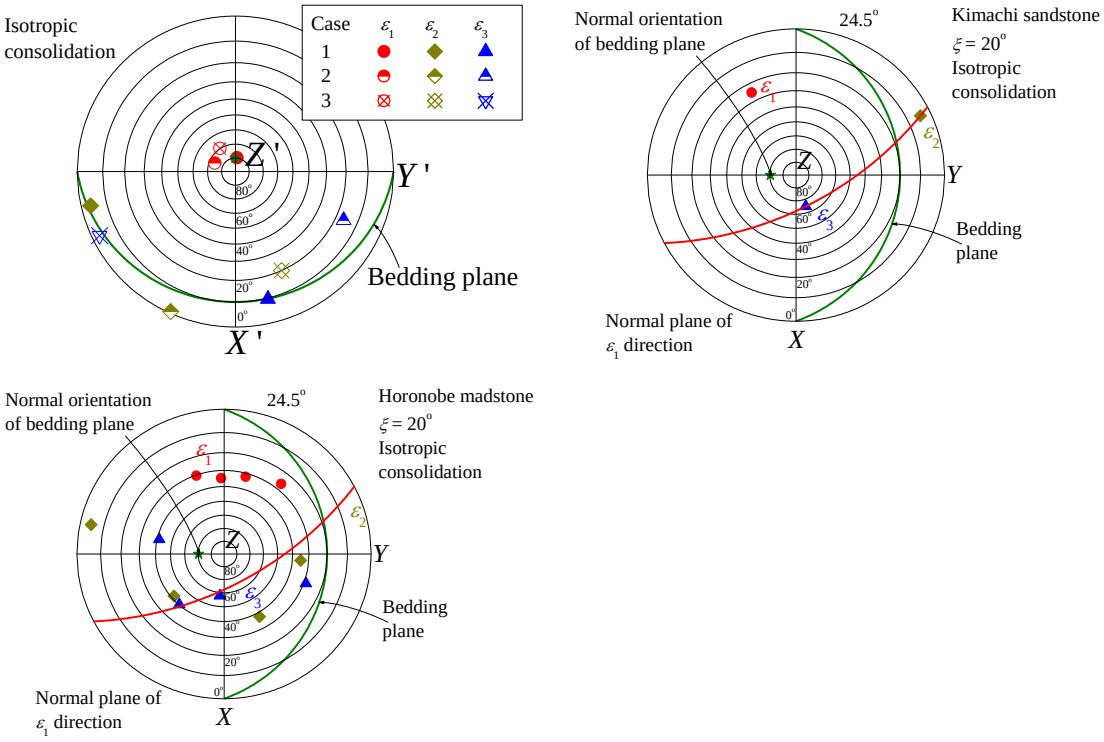


図 9　等方圧密時の主ひずみ方向
（左上：相模原泥岩，右上：来待砂岩，左下：幌延泥岩）

図 10 には軸圧縮時のひずみテンソルを，**図 11** には主ひずみを示している。ひずみテンソルについては，主応力を制御する条件なので等方性材料であればせん断ひずみは生じないし，側方の直ひずみは同じ値を示す。今回検討した変形異方性を示す試料はいずれもせん断ひずみが生じているし，側方の直ひずみの値が異なっている。三主ひずみについても，異方的な性質が見受けられる。

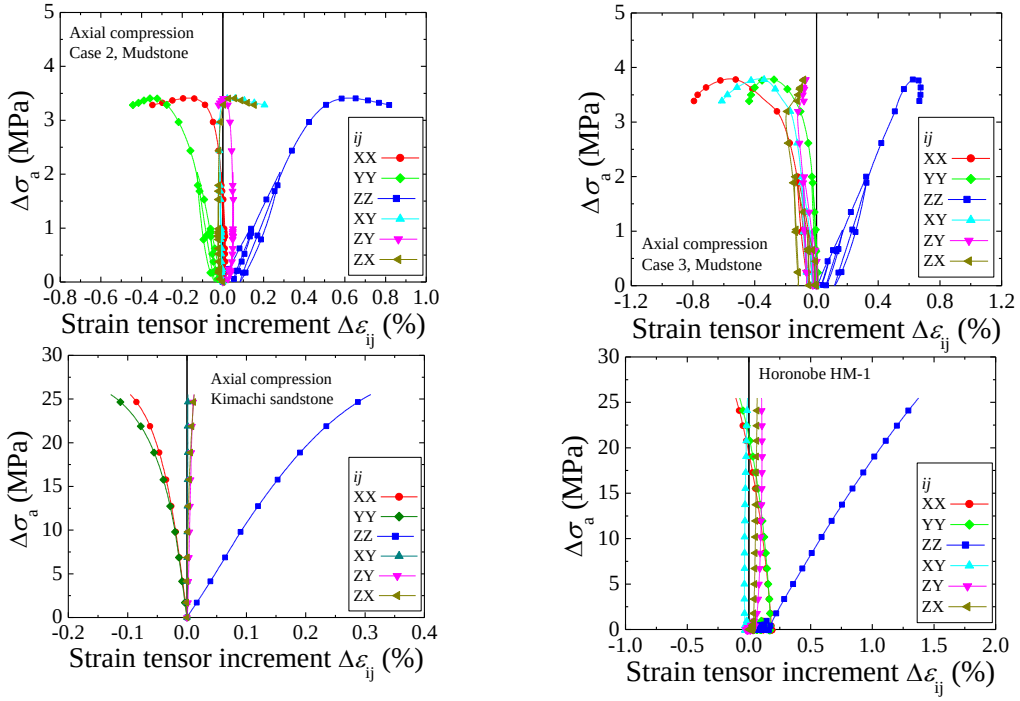


図 10　軸圧縮時のひずみテンソル

（上段：相模原泥岩，下段左：来待砂岩，下段右：幌延泥岩）

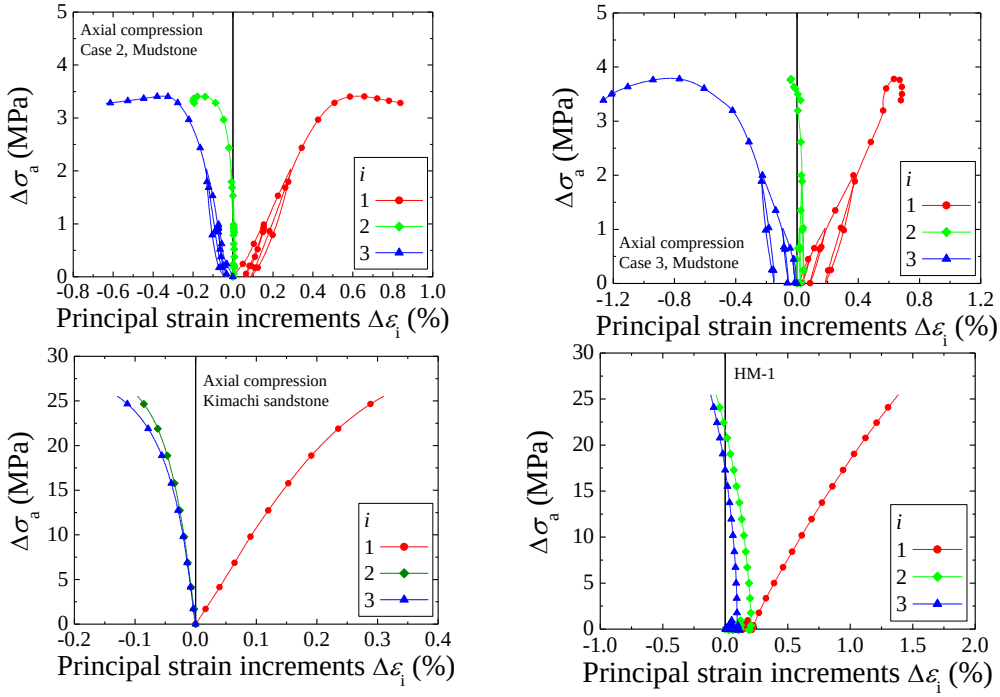


図 11　軸圧縮時の主ひずみ

（上段：相模原泥岩，下段左：来待砂岩，下段右：幌延泥岩）

以上の結果を用いて，研究代表者らの開発方法により特定した変形異方性を**表 3** にまとめている。等方圧密時の最大主ひずみ方向に直交する *xy* 面は概ね層理面に一致することを確認しており，その剛性を添え字 *x* で表し，最大主ひずみ方向の剛性を添え字 *z* で表す。*E, ν, G* はそれぞれヤング率，ポアソン比，せん断剛性率である。相模原泥岩の結果では，*x* 方向のヤング率 E_z が *z* 方向に対して 1.9~2.8 倍大きい異方性を示している。来待砂岩も同様に 7.9 倍大きい異方性を示す。幌延泥岩は逆の傾向を示していて，*x* 方向のヤング率 E_x が *z* 方向に対して 0.83 倍小さい。このように，同じ年代の堆積岩でも，採取位置によって様々な値を示す。

表 3　堆積軟岩の面内等方弾性

Case	Anisotropic stiffness				
	E_z (MPa)	ν_z	G_z (MPa)	E_x (MPa)	ν_x
相模原泥岩1	440	0.07	243	824	-0.17
相模原泥岩2	230	0.02	503	653	0.04
来待砂岩	1495	0.27	4138	11761	0.34
幌延泥岩	2787	0.02	990	2316	0.15

(2) 乾燥収縮・湿潤膨張に伴う堆積岩の変形挙動

表 4 に示すように 2 つの異なる方向にサンプリングした田下凝灰岩を用いて乾燥収縮・湿潤膨張実験を行った。Case1 は層理面が供試体の円柱軸に直交し，Case2 は平行なケースである。同一ブロックよりサンプリングしたので，密度はほぼ等しい。

表 4　試験ケース

No.	Bedding orientation	Dry density after 10 days drying ρ (g/cm3)	Wet density after 10 days soaking ρ (g/cm3)
1	Perpendicular	1.75	2.03
2	Parallel	1.77	2.04

まず，乾燥収縮実験の結果を示す。**図 12** にはそれぞれのケースでの飽和度の時系列変化の関係を示している。飽和度 S_r は既往検討を参考に次式で計算している。

$$S_r = \frac{m_p - m_d}{m_{sat} - m_d} \times 100 \tag{2}$$

ここに，m_p, m_d, m_{sat} はそれぞれ現在，乾燥，飽和状態の質量である。乾燥収縮に伴って S_r の値は小さくなる。2 日経過するまでの S_r の低下が最も激しく，その後はなだらかに減少していく。

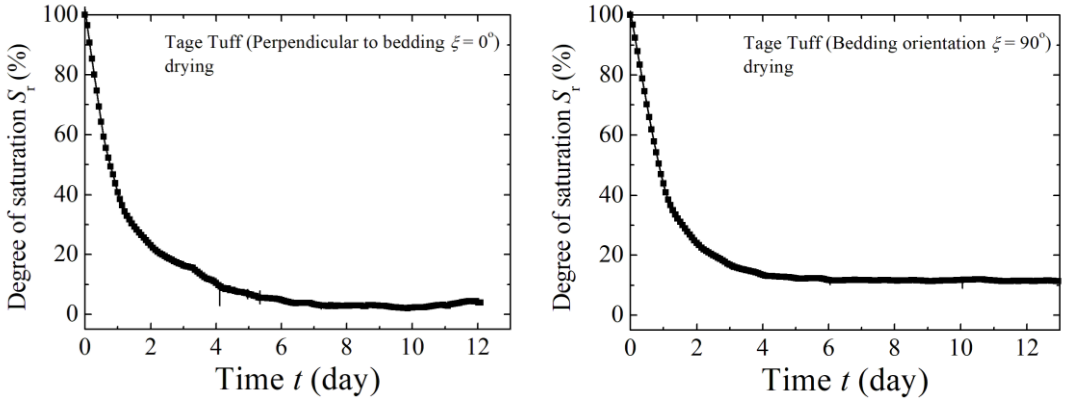


図 12　飽和度の時系列変化（左：Case1，右：Case2）

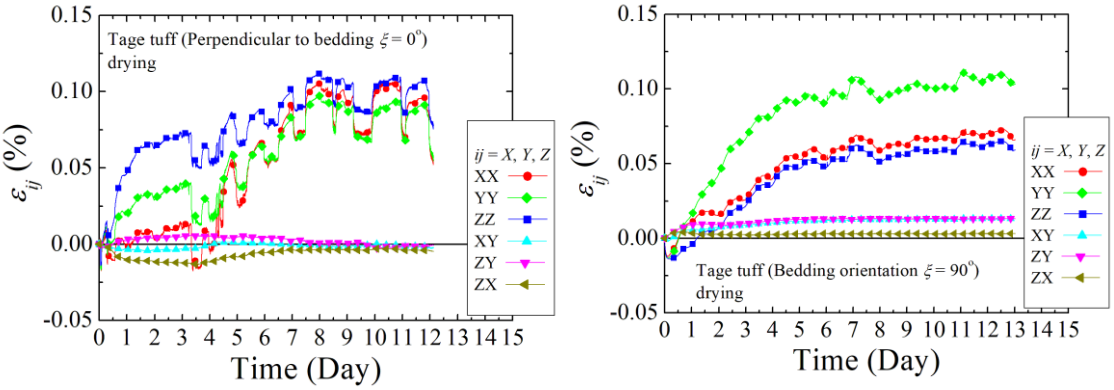


図 13　ひずみテンソルの時系列変化（湿潤→乾燥）

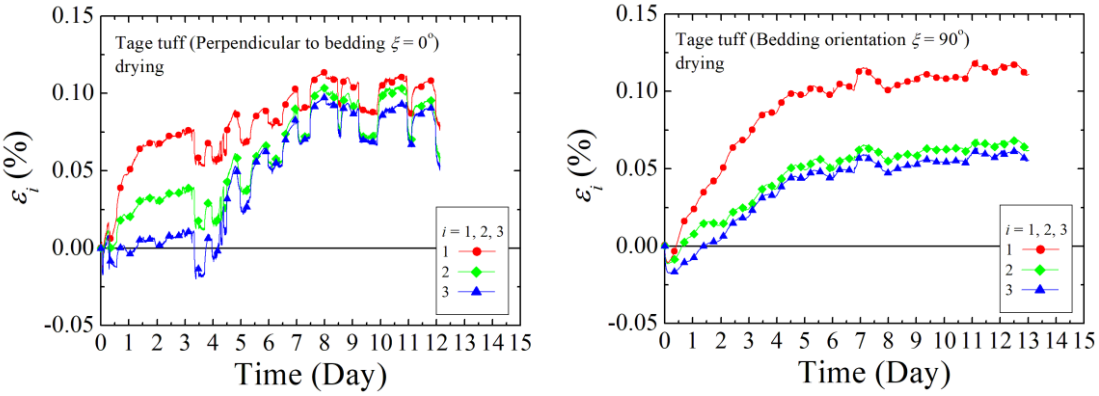


図 14　三主ひずみの時系列変化（湿潤→乾燥）

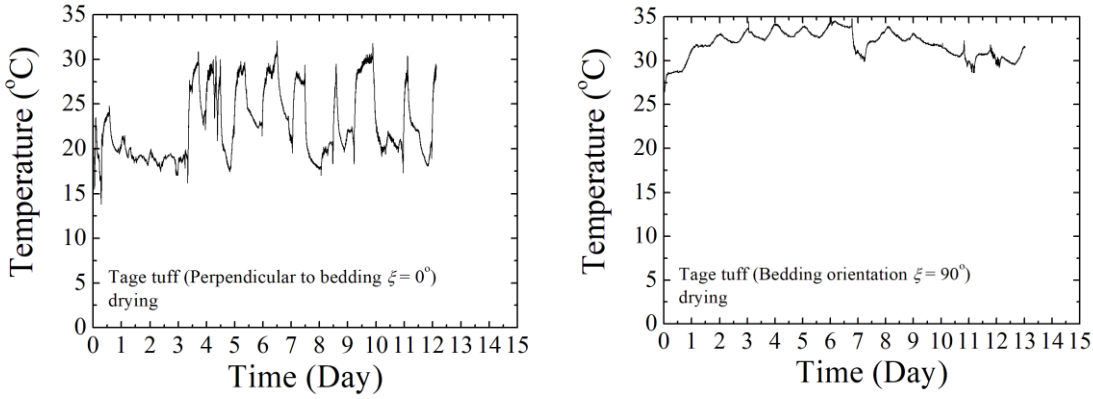


図 15　温度の時系列変化（湿潤→乾燥）

図 13 はひずみテンソルの時系列変化を示す。ここでは，岩盤力学の慣例にならって直ひずみとせん断ひずみのそれぞれを圧縮方向と反時計回りに正として示している。いずれのケースでも直ひずみε_{ii}が正の値を示すことから，乾燥に伴って供試体が収縮している。また，直ひずみε_{ii}が異なる値を示し，せん断

ひずみε_{ij} $(i \neq j)$が生じていることがわかる。既往検討[4]においても田下凝灰岩は層理面の方向に応じて異方的な変形挙動を示すことが報告されており, 毛管圧力に起因して供試体が概ね等方な応力下であることを踏まえると, 本試験で確認されたひずみテンソルの挙動は異方的と言えよう。層理面に直交する方向（Case1 では Z 方向，Case2 では Y 方向）の直ひずみが特に大きい値を示すことから，乾燥収縮に伴って，層理面が閉口していると考えられる。Case1 にくらべ層理面方向の供試体ではせん断ひずみが大きいことも特徴的である。続いて**図 14** には，三主ひずみの応答を示す。ほとんどのデータで圧縮変形を示していることがわかる。三主ひずみの方向は，異方性の主軸と一致すること[23]が示されており，層理面の方向によって変化することが指摘されている[4]。**図 15** には測温式ひずみゲージの熱電対で測定した温度変化を示す。温度変化に応じてひずみの値は増減しているが, 乾燥によって生じる変形に対して温度変化に伴う変形は 1/3 程度である。また，直ひずみは温度変化による変化が大きいが，せん断ひずみに関してはほとんど変化がないことがわかった。

本研究では，**図 8** に概念を示している下半球投影のウルフネットを用いて乾燥収縮に伴う三主ひずみ方向を議論する。**図 16** には，それぞれのケースにおける三主ひずみ方向を比較する。この図では，（X, Y, Z）座標系を基準として，丸，ひし形，三角のプロットをそれぞれ最大，中間，最小主ひずみ方向として示している。最大主ひずみ方向の動きを A→B→C であらわしている。オリーブ色のラインは層理面方向である。Case1 では，試験開始直後に最大主ひずみε_1 方向が層理面に近い方向を向いているが, 乾燥に伴って層理面に直交する Z 方向に近づいていく。これに対し，Case2 のε_1 方向についても，次第に層理面方向に近づいていく。また，ε_2 とε_3 方向の方向は概ね層理面上に位置している。最大主ひずみ方向が最も剛性が低い方向と考えれば, 長田と Adikaram[5]が示したように，飽和状態では層理面よりもその直交方向の剛性が大きいが, 乾燥に伴って，直交方向の剛性が層理面よりも大きくなることと調和した結果であると言える。

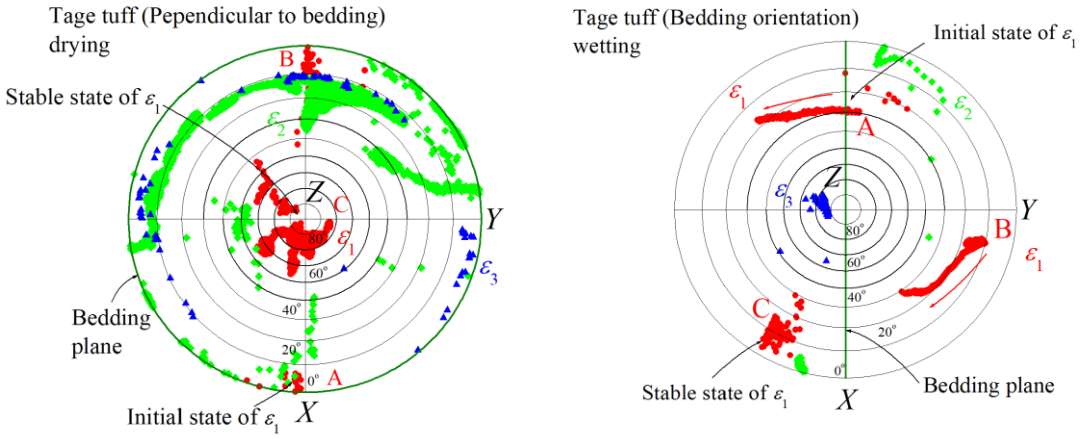


図 16　三主ひずみの方向（湿潤→乾燥）

さらに，層理面と主ひずみ方向の位置関係を定量的に把握するため，**図 17** に示すように Wulff net 下半球投影上での，層理面と主ひずみベクトルの距離 | **b** |を分析する。すなわち，| **b** |がゼロであれば主ひずみ方向は層理面方向と一致し，| **b** |が 1 であれば層理面と直交する。**図 18** には最大主ひずみ方向に関する| **b** |を算出した結果を示す。いずれのケースにおいても，主ひずみ方向は層理面方向から直交方向に回転している。実験開始から 1~3 日の回転が急激であり，その後は落ち着く。

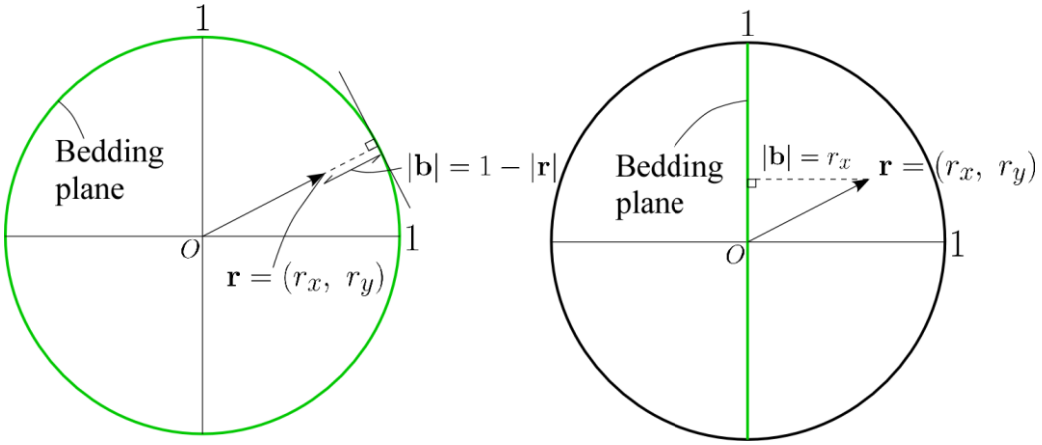


図 17 層理面と主ひずみ方向ベクトルの距離

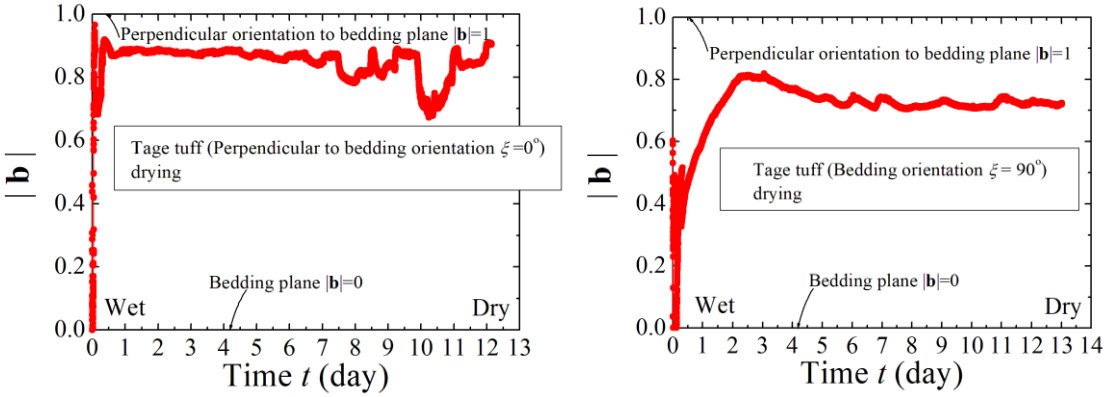


図 18　最大主ひずみ方向と層理面の Wulff net 上の位置関係

つづいて，湿潤膨張試験の結果を議論する。**図 19** には湿潤過程におけるひずみテンソルを示している。乾燥収縮に対して湿潤膨張過程においては引張方向に変形が生じている。浸水が進んで定常状態になったときの直ひずみの絶対値は乾燥収縮過程における定常状態とほぼ同程度の 0.1%程度である。乾燥過程における議論と同様に，直ひずみが異なる値を示し，せん断ひずみが生じていることから，供試体が異方的な変形特性を示す。湿潤過程においても層理面方向のケースでせん断ひずみの値が大きい。**図 20** には，湿潤過程における三主ひずみを示している。いずれのケースでも三主ひずみの値がそれぞれ異なることから，異方的な挙動を示している。**図 21** には実験時の温度変化を表すが，湿潤過程においては乾燥過程に比べ，温度の影響が極めて小さいように思える。**図 22** には三主ひずみ方向の変化を Wulff net で示している。乾燥過程とは逆で，湿潤が進むに従い層理面方向に主ひずみ方向が回転しているようである。**図 23** には最大主ひずみ方向と層理面の位置関係の変化を示している。乾燥過程とは逆で最大主ひずみの方向は層理面に直交する方向から層理面方向に変化していることがわかる。この結果についても長田と Adikaram [5)]の検討と同じ結論が導き出せる。

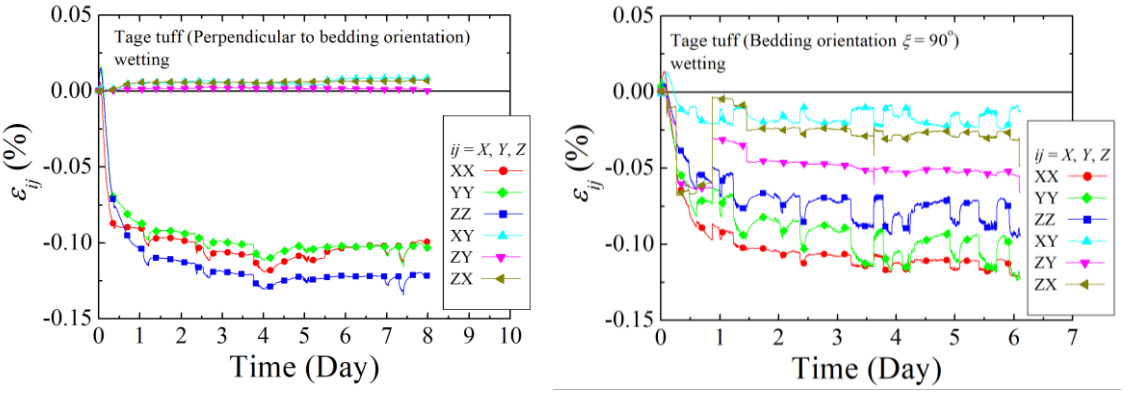


図 19　ひずみテンソルの時系列変化（乾燥→湿潤）

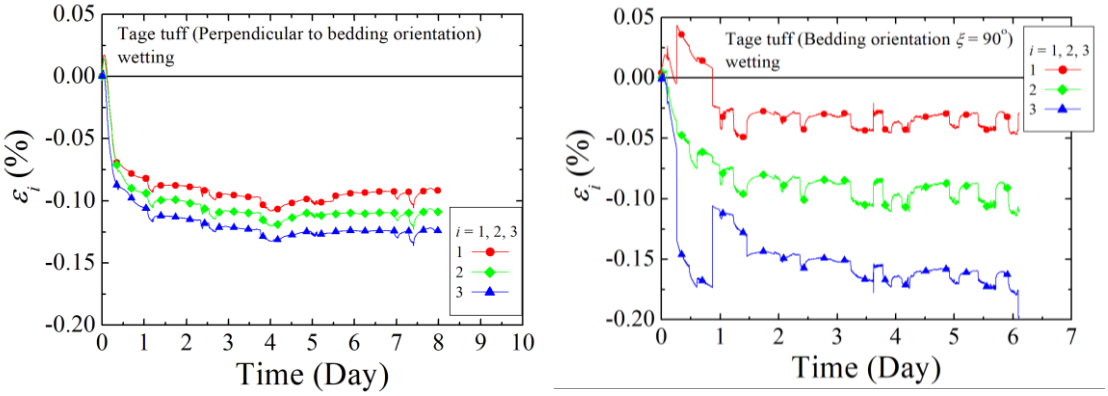


図 20　三主ひずみの時系列変化（乾燥→湿潤）

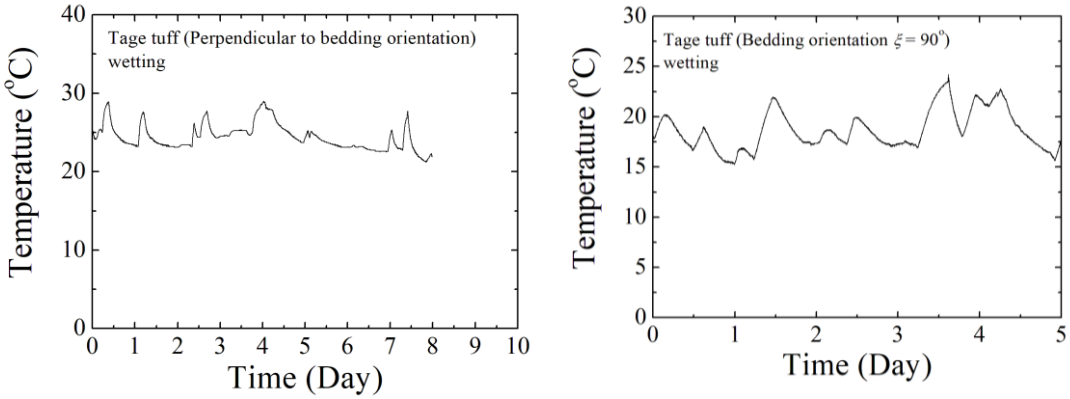


図 21　温度の時系列変化（乾燥→湿潤）

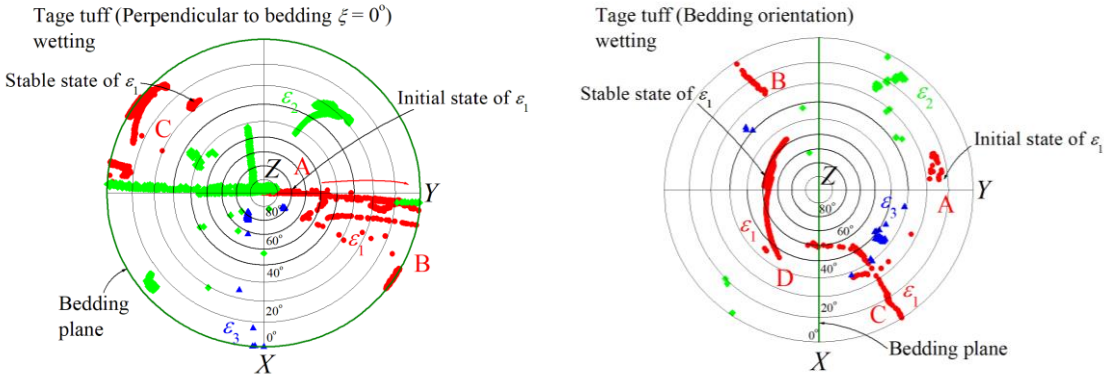


図 22　三主ひずみの方向（乾燥→湿潤）

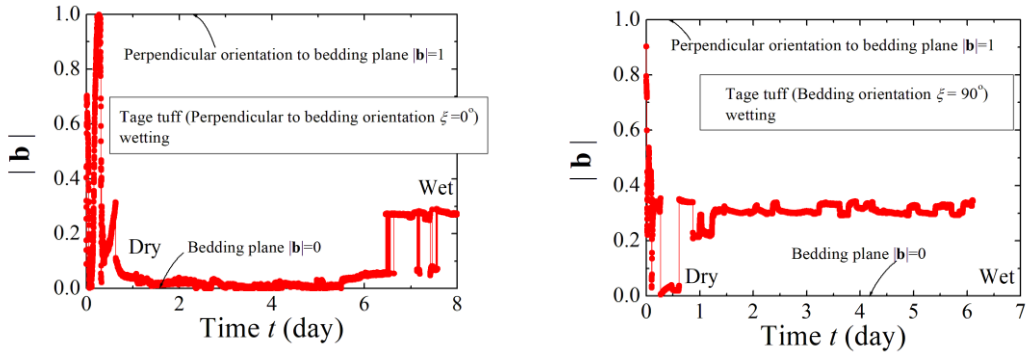


図 23　最大主ひずみ方向と層理面の Wulff net 上の位置関係

(3) 不飽和変形異方性を特定する一軸圧縮試験

表 5 に示す実験ケースで，飽和から不飽和，そして乾燥状態における応力ひずみ特性を比較した。乾燥収縮・湿潤膨張試験で用いた田下凝灰岩のブロックから，**図 24** に示すような円柱供試体を直交三方向(x, y, z)にサンプリングした。ここでは，x, y 方向は層理面方向であり，z 方向は層理面の直交方向である。飽和度 S_r は上に示した式を用いて算出しており，10 日以上気乾させた供試体を S_r=0 とし，10 日以上浸水させた供試体を S_r=100%としている。

表 5　一軸圧縮試験の実験ケース

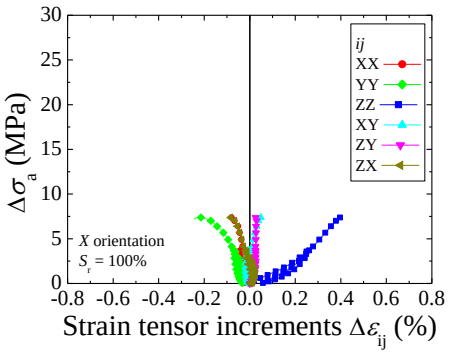
No.	Sampling orientation	Air dried time (hour)	Density after air drying 10 days ρ (g/cm^3)	Density after water soaking 10 days ρ (g/cm^3)	Density before testing ρ (g/cm^3)	S_r (%)
1	*x*	0	1.76	-	1.76	0
2	*y*	0		-		0
3	*z*	0	1.746	-	1.746	0
4	*x*	20	1.769	2.049	1.808	13.7
5	*y*	20	1.768	2.068	1.844	25.2
6	*z*	20	1.781	2.062	1.821	14.3
7	*x*	72	1.797	2.075	1.948	54.3
8	*y*	72	1.803	2.073	1.936	49.5
9	*z*	72	1.816	2.077	1.926	42.4
10	*x*	over 240	1.803	2.08	2.08	100
11	*y*	over 240	1.807	2.044	2.044	100
12	*z*	over 240	1.781	2.063	2.063	100

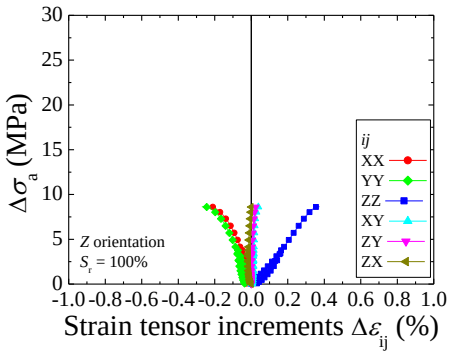
図 24　一軸圧縮試験で用いた田下凝灰岩供試体

軸圧縮の載荷速度は 0.1%/min であり，3 秒ピッチで軸応力およびひずみを測定している。載荷の経路は，各試験ケースでの弾性域において一度，載荷・除荷の繰返しを行っている。乾燥と湿潤状態では強度や変形特性が大きく異なる。乾燥状態の力学特性は湿潤状態よりも大きい値を示すので，単調載荷

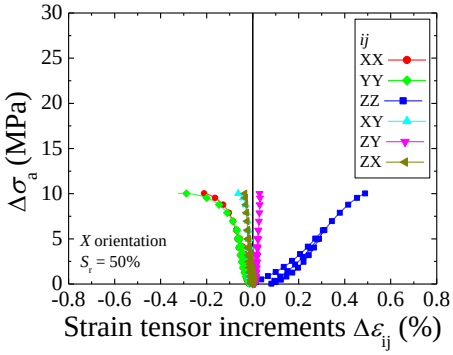
での予備試験をもとに除荷時の軸応力を，Case1~3 では 4MPa，Case4~6 では 6MPa，Case7~9 では 8MPa，Case10~12 では 10MPa に設定した。なお，湿潤状態における供試体は載荷時に飽和度が変化しないようにゴムスリーブを被せて載荷している。ゴムスリーブによる拘束が生じないように，厚さが薄いものを用いている。

図 25 はひずみテンソル応答の一部を示す。左の列が層理面方向，右の列が層理面に直交した方向の供試体の結果である。全体の傾向を見ると，飽和に近い状態になるほど，強度も変形特性が大きくなる。また，層理面方向と直交方向では，それぞれの飽和度において強度や変形特性が異なっているようである。**図 26** はひずみテンソルより計算した三主ひずみの応答を示している。**図 27** には一軸圧縮強さ，ヤング率と飽和度の関係を示している。ヤング率は繰返し載荷におけるピーク応力を用いて割線ヤング率を求めた。直交三方向の強度・剛性はそれぞれ異なっていることがわかる。飽和度の増加に伴い，強度も剛性も小さくなっていることが見て取れる。特に剛性は，乾燥状態では層理面方向の値が直交方向に対して大きいのに対して，飽和状態では傾向が逆転している。これは既往検討[5)]に調和する結果である。

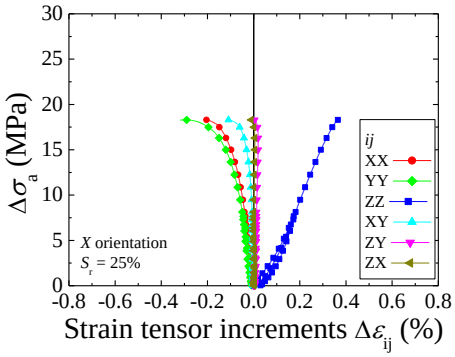


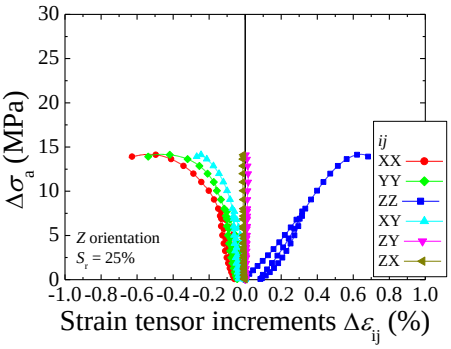


Case1 と 3（乾燥せず）

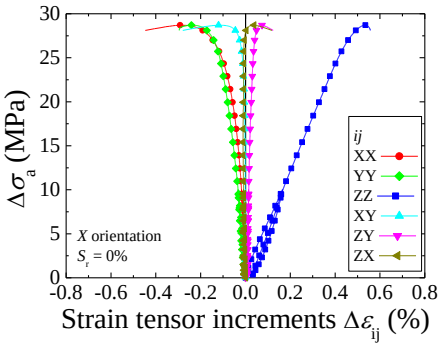


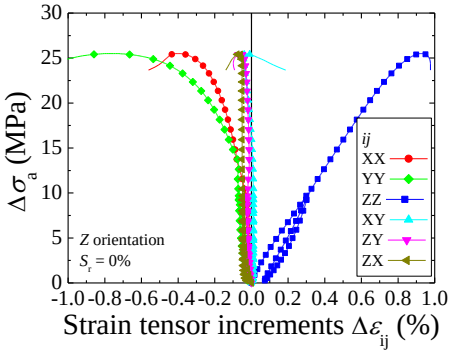
Case4 と 6（20 時間乾燥）





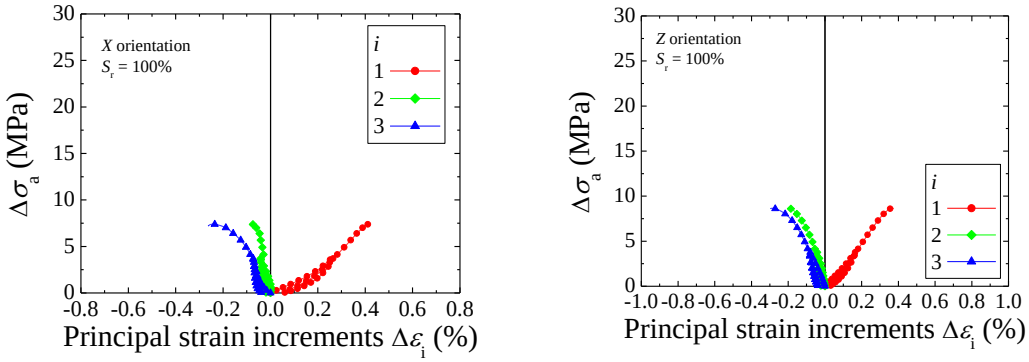
Case7 と 9（72 時間乾燥）



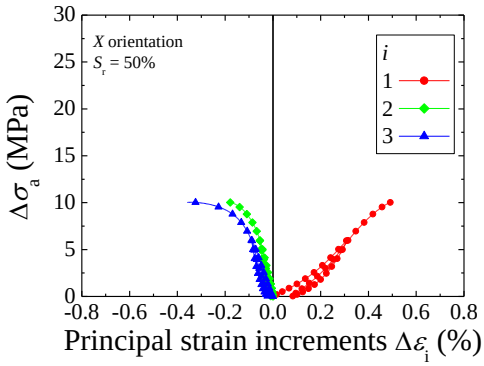


Case10 と 12（240 時間以上乾燥）

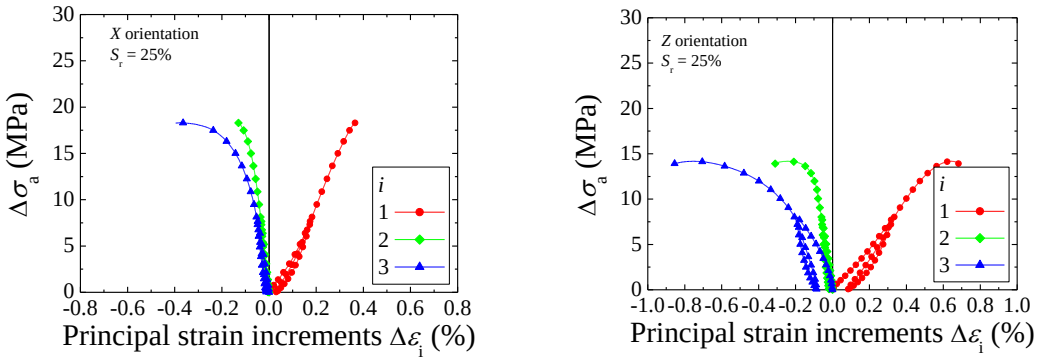
図 25　ひずみテンソルの応答（左：層理面方向，右：直交方向）



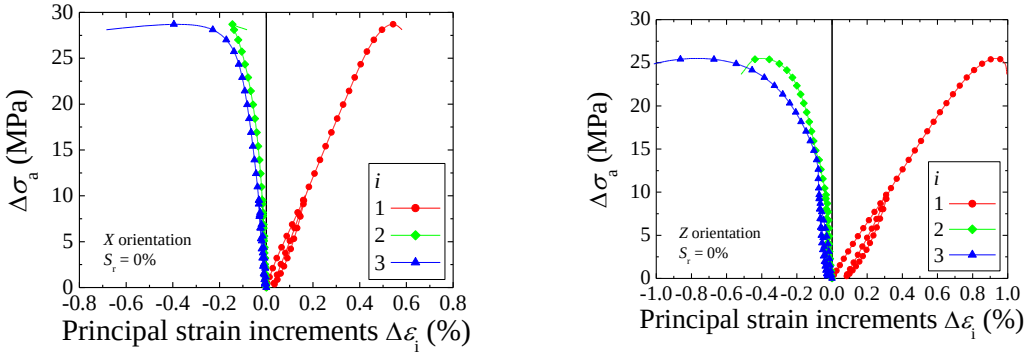
Case1 と 3（乾燥せず）



Case4 と 6（20 時間乾燥）



Case7 と 9（72 時間乾燥）



Case10 と 12（240 時間以上乾燥）

図 26　三主ひずみの応答（左：堆積面方向，右：直交方向）

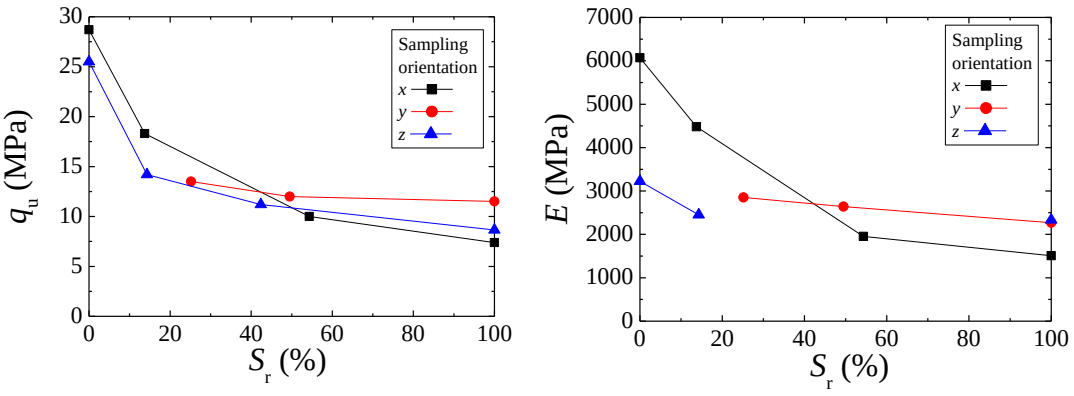


図 27　力学特性と飽和度の関係（左：一軸圧縮強さ，右：割線ヤング率）

(4) モンテリ岩盤研究所での現地計測

2019 年 9 月 2 日～9 月 7 日にモンテリ岩盤研究所において現地調査を行い，計測データの回収，計測機器などのメンテナンスを実施した。**図 28** には，2018 年 7 月 1 日から 2018 年 12 月中旬までに計測された**図 7** のボーリング抗の一番浅い位置（5cm）の温度・相対湿度・気圧・絶対湿度を示す。

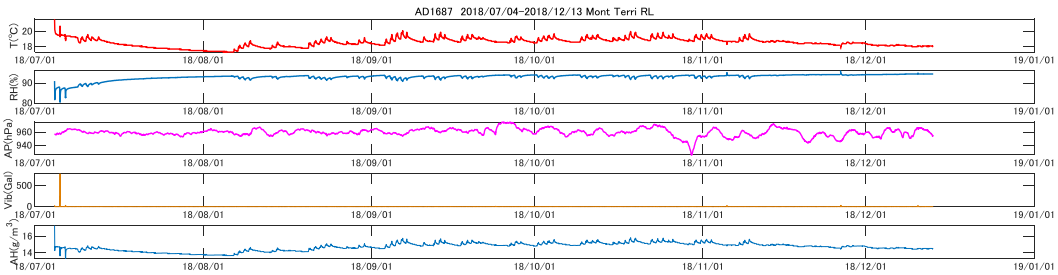


図 28　ボーリング孔の外での計測結果

なお，ボーリング抗の外側は**図 6** に示す坑道と空間がつながっていて，研究所の坑口の開閉などで気圧・湿度・温度が変動することがわかっている。**図 29** には，ボーリング抗の外側とボーリング坑内 5cm の深さにおける気圧の応答を比較する。

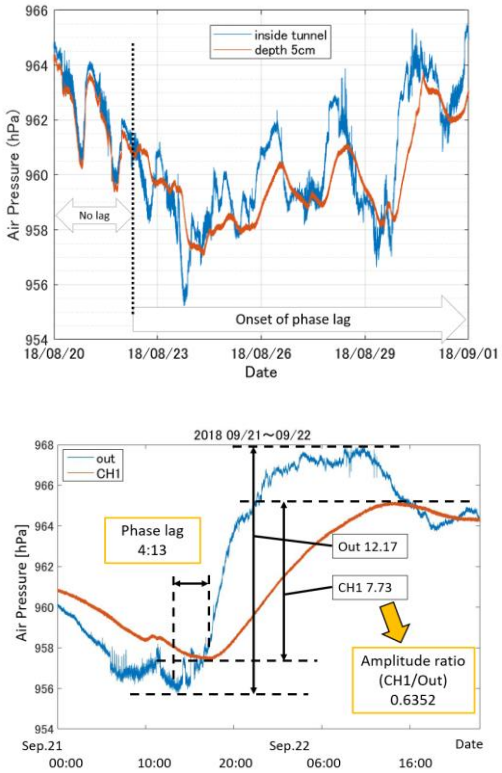


図 29　ボーリング孔内外での計測結果の比較

これは，2018 年 8~9 月にかけて計測したデータであるが，ボーリング抗の外側で計測した気圧に対して，ボーリング坑内では応答が遅れていることがわかる。これは，岩盤の透気現象によるものと考えられ，岩盤内での応答の遅れが，乾燥に伴って生じる不飽和領域や不飽和透水係数の特定につながる可能性がある。

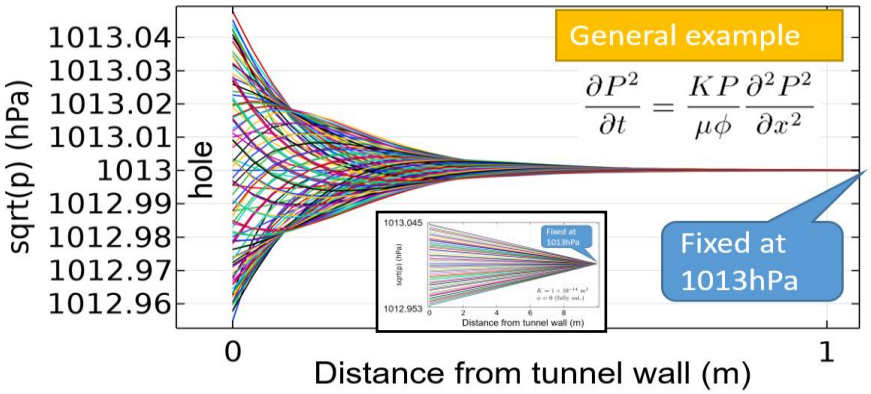


図 30　有限要素法による試計算

図 30 のように，本年度は非線形熱方程式である透気現象の支配方程式を一次元有限要素法によって解く試みをおこなっており，境界条件を適切に設定すれば，現地で測定された遅れ応答を表現できることがわかった。

残された課題と今後の計画

堆積岩の変形異方性の程度を把握するため，来待砂岩，幌延泥岩，相模原泥岩の三種類の新第三紀堆積岩試料を用いた三軸試験の結果を整理し，面内等方弾性を仮定した弾性パラメータを取得した。

田下凝灰岩を用いた乾燥収縮実験と湿潤膨張実験では，飽和度の変化に伴うひずみの進展を詳細に取得した。既往検討では確認されていない新しい知見として，主ひずみ方向の変化を確認するとともに，乾燥収縮と湿潤膨張でまったく逆の傾向を示すことがわかった。同様に，飽和度を変化させた田下凝灰岩供試体の一軸圧縮試験を行って，飽和度の変化に伴う力学特性を取得した。

現地計測では，計測を行っていたデータを回収した。さらに，岩盤内部での気圧の応答がボーリング坑外部の応答と一致しないことを表現するために非線形の一次元熱方程式を有限要素法によって解いた。引き続き，データの取得を行っていくとともに，データの回収や，計測機器のメンテナンス，新しい計測機器の設置を行っていく。また，坑道における乾燥に伴う不飽和領域の形成についても評価する方法を考案する予定である。

2020 年度には，今年度に得た不飽和変形異方性の変化を記述するモデルを構築するとともに，不飽和領域の進展を測定する新しい実験を行う。さらに，構築した力学モデルと移動境界条件を考慮できる領域の進展モデルを用い，有限要素法で坑道の安定性を検討していく。モンテリ岩盤研究所では，引き続き計測を続けていくとともに，新しい計測機器の設置を試みるとともに，岩盤の透気現象を把握し，室内試験との整合が取れるデータ解析方法についても検討する。

4. まとめ

本研究では，掘削による乾燥にともなって不飽和状態に移行する堆積岩の異方的な力学挙動を詳細に把握し，異方性を考慮した高レベル放射性廃棄物の埋設方法へと応用することを目的として，既往検討における堆積岩の変形異方性の程度しめすとともに，室内試験を実施して乾燥収縮・湿潤膨張過程における変形特性の詳細な調査と一軸試験によって飽和度の変化に対する力学特性の変化を取得した。さらに，スイス・モンテリ岩盤研究所において現地調査を行い原位置で不飽和透気・透水現象をモニタリングして，そのパラメータ取得を試みた。

既往検討の整理により，新第三紀堆積岩の変形異方性はヤング率の比で 0.83~7.9 倍異なることがわかった。採取位置や環境によって結果は様々な値をとるが，異方性の主軸の傾斜方向は層理面の方向を向くことがわかった。

田下凝灰岩の乾燥収縮・湿潤膨張実験からは，層理面とその直交方向にコアリングした供試体の三次元のひずみテンソルの応答は，等方材料では生じないせん断ひずみを伴い，異方的な応答を示すことがわかった。さらに，乾燥収縮・湿潤膨張時の主ひずみ方向は，飽和度の変化にともなって変化することがわかった。剛性が最も小さい最大主ひずみ方向は，湿潤状態では層理面に近い方向にあるが，乾燥状態では層理面の直交方向を向く。

飽和度を変化させた田下凝灰岩の一軸圧縮試験からは，飽和度の増加に伴い強度と変形特性が小さい値を示すことがわかった。とくに剛性に関しては，湿潤状態において層理面の直交方向が層理面方向よりも大きい値を示すが，乾燥状態では逆に層理面方向が大きい値を示すことがわかった。これは既往検討 [5] とも調和する結果であるし，乾燥収縮・湿潤膨張実験で得た結論とも整合する結果である。

スイス・モンテリ岩盤研究所におけるボーリング孔内の気温・気圧・湿度の計測では，ボーリング孔内の気圧応答が，孔外に比べて異なってくることがわかった。これは，岩盤内の透気現象によるものと考えられるため，非線形熱方程式を解く一次元 FEM 解析を行って，原位置のモニタリング結果より透気・不飽和透水係数を特定する方法を検討していく予定である。引き続き，計測を進めるとともに，計測データから乾燥に伴う不飽和領域の進展を評価する方法を構築する。

謝辞

幌延泥岩試料は日本原子力開発機構の青柳和平氏より，相模原泥岩試料は東急建設の高倉望氏・田中悠一氏より，来待砂岩試料は産業技術総合研究所の高橋学氏より提供いただいた。来待砂岩ブロックの運搬に関しては三井住友建設の高橋直樹氏にお世話になった。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1) 総合エネルギー調査会地層処分 WG：地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果，p.39, 2004.
2) 田中芳則 : 水分ポテンシャルからみた泥岩の乾燥収縮と湿潤膨張, 応用地質, 21(3), pp.13-21, 1980.
3) Ghorbani A., Zamora M. and Cosenza P.: Effects of desiccation on the elastic wave velocities of clay-rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 46 (8), pp. 1267-1272, 2009.
4) Togashi Y., Kikumoto M., Tani K., Hosoda K. and Ogawa K.: Detection of deformation anisotropy of tuff by a single triaxial test on a single specimen, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 108, pp. 23-36, 2018.
5) 長田昌彦, Adikaram NM : 田下凝灰岩の力学的異方性と飽和度の変化に伴う弾性波速度および変形の変化傾向，第 41 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.300-304, 2012.
6) Togashi Y., Kikumoto M. and Tani K.: An Experimental Method to Determine the Elastic Properties of Transversely Isotropic Rocks by a Single Triaxial Test, *Rock Mech. Rock Eng.*, 50(1), pp.1-15, 2017.
7) Togashi Y., Kikumoto M. and Tani K.: Determination of anisotropic deformability parameters of tuff by a single triaxial test, Proc. 16th Asian Regional Conference of ISSMGE, JGS-66 (4pages), 2019.
8) Togashi Y., Kikumoto M., Tani K., Hosoda K. and Ogawa K.: Anisotropic deformation char- acteristics of soft mudstone via measuring full strain tensor components during triaxial compression, Proc. 14th ISRM Congress, 2268-2275, 2019.
9) 長田昌彦，山辺正：堆積岩の乾燥変形過程と多孔質弾性論的解釈，第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.335-338, 2007.
10) 長田昌彦 : 各種岩石の乾燥変形現象の比較によるその支配要因の検討，第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.397-400, 2011.
11) 長田昌彦，高橋学，竹村貴人：堆積岩の乾燥変形現象とそれに起因した現象と課題，J.MMIJ, 127, pp.127-131, 2011.
12) Soe AKK., Osada M., Takahashi M. and Sasaki T.: Characterization of drying-induced deformation behavior of Opalinus Clay and tuff in no-stress regime, *Environ. Geol.*, 58, pp.1215-1225, 2009.
13) Soe AKK., Osada M. and Win TTN.: Drying-induced deformation behaviour of Shirahama sandstone in no loading regime, *Eng. Geol.*, 114, pp.423-432, 2010.
14) Soe AKK., Osada M. and Win TTN.: Evaluating the deformation behaviour of Shirahama sandstone in moisture transfer process, Int. J. JCRM, 5(2), pp.69-76,

2009.
15) 地盤工学会：岩石の圧密排水三軸圧縮試験方法，JGS2534-2009.
16) 越智健三, 壺内達也, & 龍岡文夫. (1993). 立坑掘削と原位置試験による堆積軟岩の変形特性. 土木学会論文集, (463), 143-152.
17) 秦光男，対馬坤六：遠別地域の地質，地域地質研究報告，地質調査所，1974.
18) 青柳和平, 石井英一, & 石田毅. (2017). 幌延深地層研究センターの 350 m 調査坑道における掘削損傷領域の破壊様式の検討. Journal of MMIJ, 133(2), 25-33.
19) 藤井幸泰, 朴赫, 竹村貴人, 高橋学, & 高橋直樹. (2012). 来待砂岩の力学異方性と堆積構造に関する研究, その 1. 応用地質, 53(2), 64-69.
20) 高田迪彦, 藤井義明, & 児玉淳一. (2011). 間隙水圧・変形連成問題への最近の取り組み 三軸圧縮破壊過程における岩石の透水性に封圧が及ぼす影響に関する研究. Journal of MMIJ, 127(3), 151-157.
21) 清木隆文. (2017). 大谷石の紹介. 材料, 66(11), 793-798.
22) 谷和夫. (2006). 原位置岩盤三軸試験によって評価された大谷石のせん断強さの位置付け. 材料, 55(5), 483-488.
23) Allirot, D., Boehler, J. P., & Sawczuk, A. (1977, March). Irreversible deformations of an anisotropic rock under hydrostatic pressure. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 14, No. 2, pp. 77-83). Pergamon.

平成 31 年度　外部発表

【口頭発表】

1. Togashi Y., Kikumoto M., Tani K., Hosoda K. & Ogawa K. (2019). Non-axisymmetric and/or non-elementary response of anisotropic tuff in axisymmetric, elementary triaxial test. 7th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials (IS-Glasgow 2019).

2. Togashi Y., Kikumoto M., Tani K., Hosoda K. & Ogawa K. (2019). Anisotropic deformation char- acteristics of soft mudstone via measuring full strain tensor components during triaxial compression. Rock Mechanics for Natural Resouces and Infrastructure Development (14th ISRM Congress).

研究報告 5

メタンをエネルギー源とした微生物生態系の地質環境への影響評価

東京大学　大学院理学系研究科

鈴木　庸平

1. 背景・目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分に関わる研究開発では、瑞浪や幌延の地下研究所での研究により、物質移動特性に関わる化学環境の形成に微生物が重要な役割を果たすことが明らかになりつつある。特に、最近の研究でメタンをエネルギー源とした地下微生物が化学環境に与える影響の重要性が明らかになりつつある。最初に、瑞浪超深地層研究所と幌延深地層研究所で行われた先行研究について整理する。研究の目的・実施意義について説明した後、地層処分事業における位置付け・研究実施により期待される波及効果について記載する。

1.1. 瑞浪超深地層研究所における調査事例

２０１８年度研究成果報告書では、水理地質学および生物地球化学の特性についての先行研究の事例についてとりまとめた。２０１９年度研究成果報告書では、まず研究の前提となる微生物特性について先行研究の事例についてとりまとめる。

微生物特性の評価については、地下 300 m の水平掘削孔の 09MI20 と 09MI21 を用いて行われてきた。09MI20 は花崗岩の亀裂密度の高い高密度割れ目帯(highly fractured domain)に掘削されたボーリング孔(HFDB)であるのに対し、09MI21 は亀裂密度の低い低密度割れ目帯(sparesely fractured domain)に掘削されたボーリング孔(SFDB)である(図 1.1.1a-b)。割れ目の密度と相関して透水係数も大きく異なり、HFDB では硫酸と DIC の濃度が高く、SFDB ではこれらの濃度が著しく下がり水素とメタンに富むことが明らかとった(図 1.1.1. c)。DIC とメタンの濃度と炭素同位体組成をプロットしたところ、HFDB は DIC 濃度が高く同位体が軽いのに対し、SFDB は濃度が低く同位体が重かった(図 1.1.1. d)。DIC とは反対に、HFDB はメタン濃度が低く同位体が重いのに対し、SFDB は濃度が高く同位体が軽かった(図 1. 1. 1. e)。以上の結果は、HFDB でメタン酸化が、SFDB でメタン生成がより卓越して微生物により行われているという解釈を支持した。

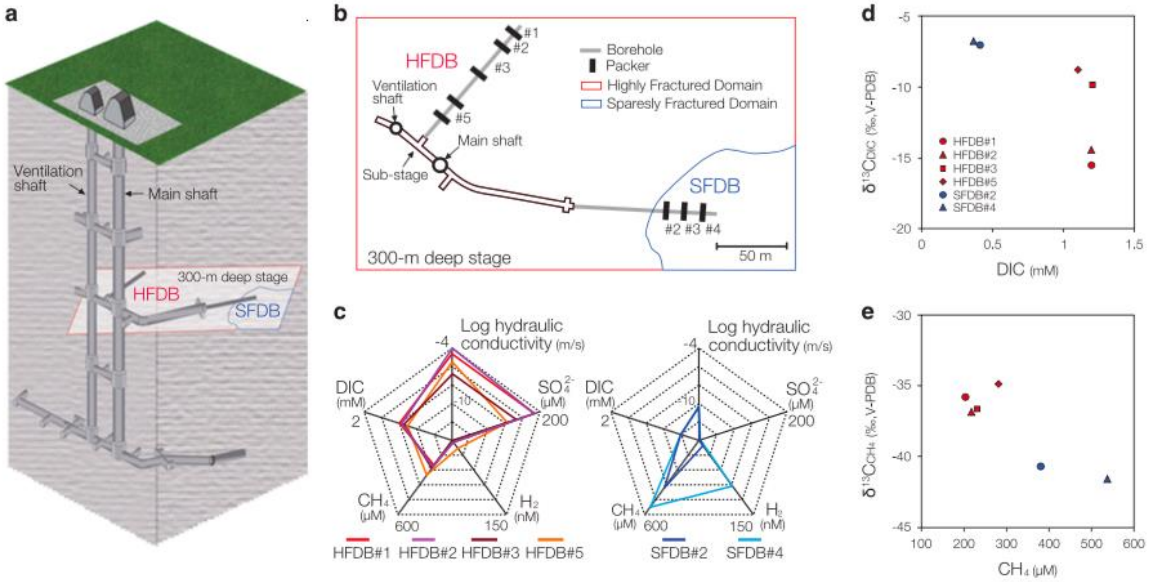


図 1.1.1. 瑞浪超深地層研究所深度 300 メートルのステージの特徴。(a) 地下 300m 掘削孔 HFDB と SFDB、(b) HFDB は岩石の亀裂が多い地域に存在し、SFDB は岩石の亀裂が少ない地域に存在する、(c) 2012 年に採水した地下水中の SO_4^{2-}、H_2、CH_4 および DIC、 (d および e) DIC とメタン濃度の同位体比。(Ino et al., 2018 より引用)

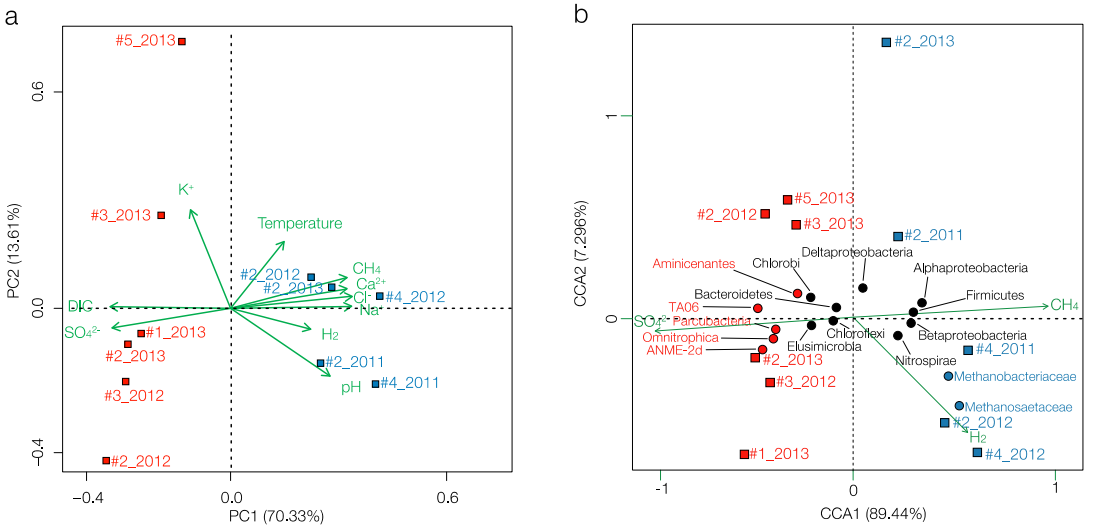


図 1.1.2. 環境因子と微生物群集組成の多変量解析。(a) 掘削孔 HFDB と SFDB の各区間における環境因子と水質の主成分分析(PCA)。矢印と四角は環境因子と各区間を示す。(b)環境因子と微生物間の正準コレスポンデンス分析(CCA)。円と四角は、微生物の分類群と各区間における微生物群集を示す。HFDB は赤、SFDB は青で示した。(Ino et al., 2018 より引用)

次に、微生物の群集組成を 16S rRNA 遺伝子配列を用いて解析した結果、HFDB にメタン酸化古細菌が、SFDB にはメタン生成古細菌が優占していることが明らかになり、DIC とメタンのプロファイルから得られた解釈と整合的であった。環境因子の主成分分

析により代表的な環境因子を選択し(図 1.1.2. a)、その環境因子と微生物間の正準コレスポンデンス分析を行った(図 1.1.2. b)。その結果、メタン酸化古細菌の存在度は硫酸濃度と強い相関性を示したため、硫酸を酸化剤としてメタン酸化していることが推察された。

硫酸を酸化剤としたメタン酸化が HFDB に生息する微生物により行われているかを明らかにするために、^{13}C でラベルされたメタンを常圧条件で添加して２週間の培養を行った。その結果、^{13}C でラベルされた DIC と硫化水素が生成された(図 1.1.3)。一方、硫酸を酸化剤とした呼吸をモリブデンにより阻害したところ反応が進行しなかったため、微生物が硫酸を酸化剤としてメタン酸化を行っていることが明らかとなった。また DIC の濃度と同位体組成から計算されたメタン酸化速度は 3.7 nM/year であり、硫酸の濃度と同位体組成から計算された硫酸還元速度とほぼ一致した(Suzuki et al. 2014)。

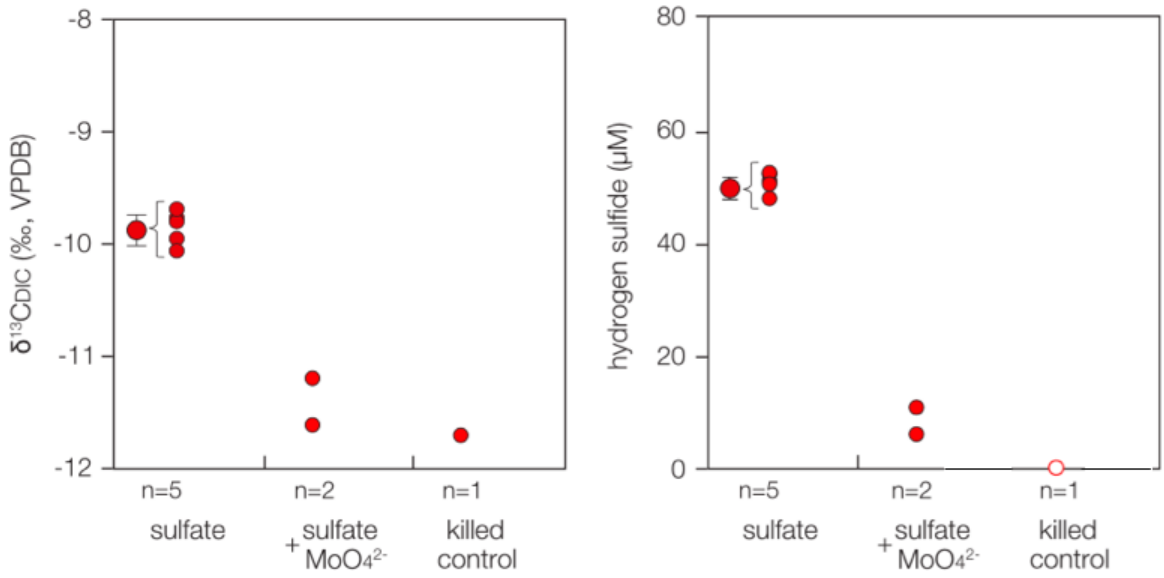


図 1.1.3. 安定同位体標識による炭素同位体比率と硫化水素生成の測定. SFDB 地下水に～400 μM の ^{13}C ラベルしたメタン、～60 nM の水素、～70μM の硫酸に加え、SFDB からの生きた微生物細胞と死滅させた微生物細胞を用いて、2 週間の培養を行った。モリブデンは、硫酸還元の阻害剤であるとして添加した。赤で示した丸は、DIC の安定炭素同位体組成と硫化水素の濃度。未検出の場合は、白い丸で示した。n は測定回数を示す。(Ino et al., 2018 より引用)

陸域の地下深部はメタンまたは硫酸濃度が低いため、これまで微生物によるメタン酸化が起きないと考えらえてきた(LaRowe et al., 2008)。しかし、以上の研究により、瑞浪の花崗岩に代表されるような淡水起源の地下水が主要な深部地質環境では、微生物によるメタン酸化が重要であることが示された。

1.2. 幌延深地層研究所における調査事例

幌延深地層研究所についても、２０１８年度研究成果報告書では、水理地質学および生物地球化学の特性についての先行研究の事例についてとりまとめた。２０１９年度研究成果報告書では、まず研究の前提となる微生物特性について先行研究の事例についてとりまとめる。

幌延深地層研究所の地下施設を用いた微生物調査は換気立坑側のボーリング孔 V140m と V250m、東立坑側のボーリング孔 E160m、E185m、E215m で行われた(図 1.2.1)。微生物調査の結果については Hernsdorf(2017)に報告されており、メタン酸化古細菌に関連する部分について詳述する。

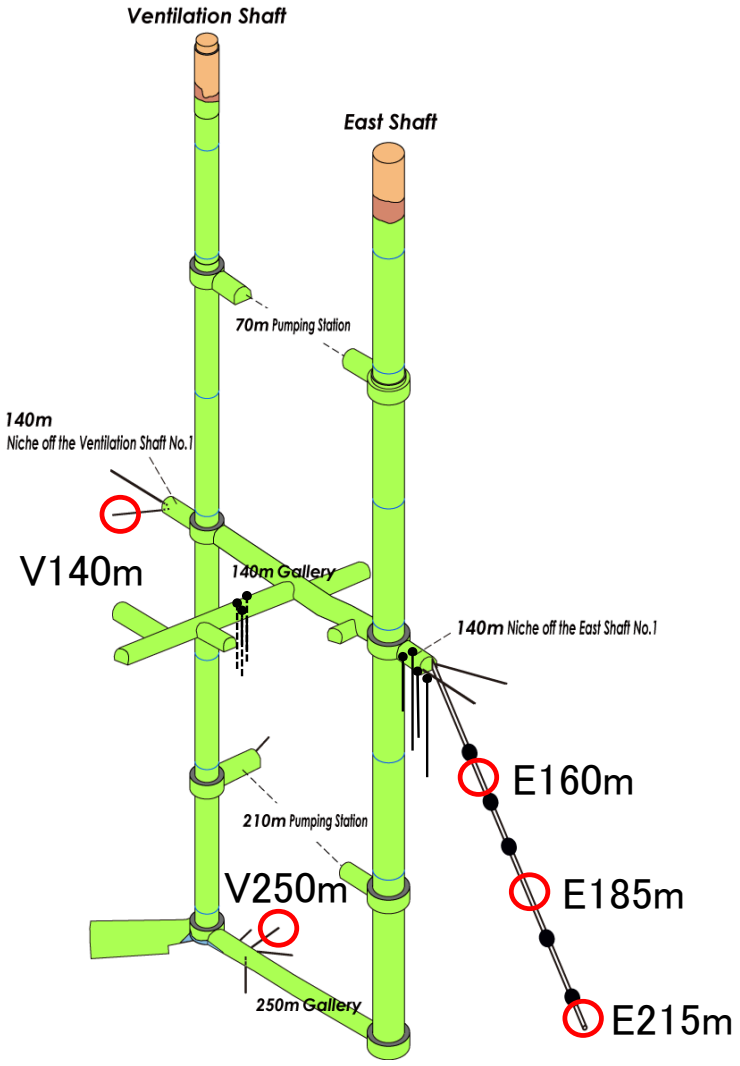


図 1.2.1. 幌延深地層研究所の地下施設における東立孔(East Shaft)と換気立孔(Ventilation Shaft)およびボーリング孔とサンプリング区間。(Ise et al., 2017 より改変して引用)

次に、微生物の群集組成を 16S rRNA 遺伝子配列を用いて解析した結果、メタン酸化古

細菌(HGW-Methanoperedenaceaea-1)が、E215m で全体の 30%程度をしめることが明らかとなった(図 1.2.2.)。

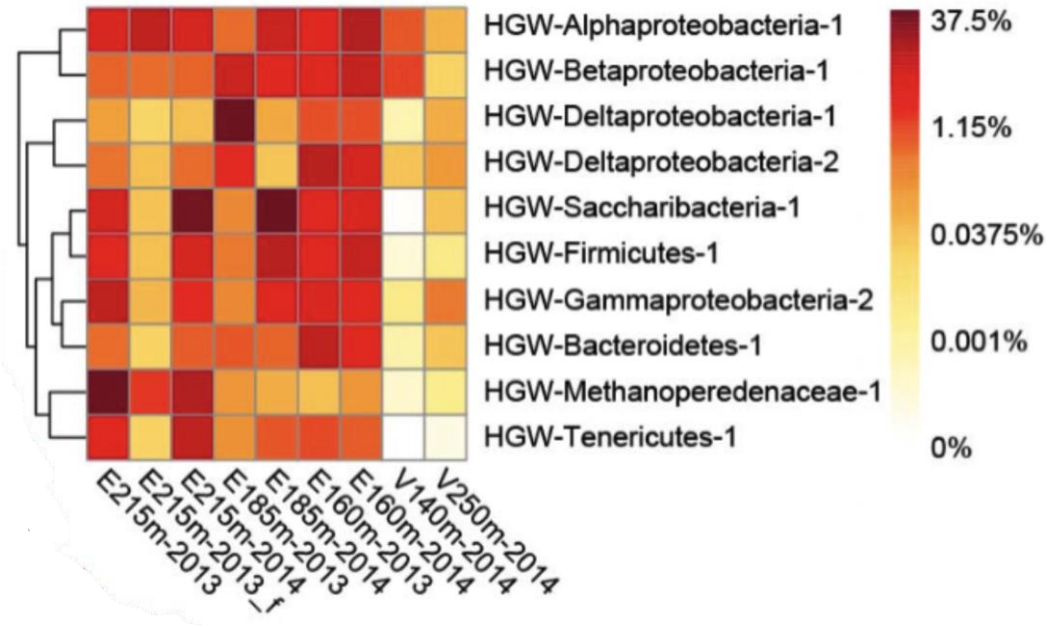


図 1.2.2.　16S rRNA 遺伝子配列解析で検出した微生物データを東立孔(E)および換気立孔(V)の地下水試料ごとにヒートマップ解析した結果。(Hernsdorf et al., 2017 より引用)

瑞浪と同様に環境因子の主成分分析により代表的な環境因子を選択し(図 1.2.3a)、その環境因子と微生物間の正準コレスポンデンス分析を行った(図 1.2.3b)。その結果、メタン酸化古細菌の存在度は鉄濃度と強い相関性を示したため、三価鉄を酸化剤としてメタン酸化していることが推察された。

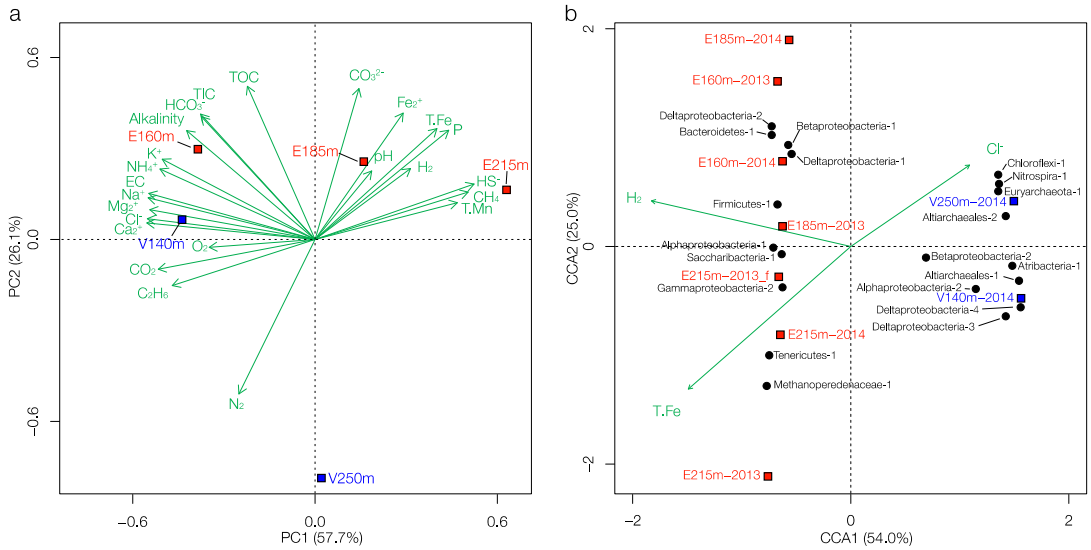


図 1.2.3. 環境因子と微生物群集組成の多変量解析。(a) 東立孔(E)の深度 165 m、185 m、215 m、および換気立孔(V)の 140 m 、250 m の環境因子と水質の主成分分析(PCA)。(b) 地下水試料中に存在する微生物の群衆組成と環境要因の正準コレスポンデンス分析(CCA)。円と四角は、微生物の分類群と各区間における微生物群集を示す。東立孔は赤、換気立孔は青で示した。(Hernsdorf et al., 2017 より引用)

しかし、幌延のメタン酸化古細菌のメタン酸化の活性測定は常圧でも行われていないため、実際にメタン酸化しているのかは不明である。

1.3. メタン酸化古細菌のゲノム特性

２０１８年度研究成果報告書では、メタン酸化古細菌ゲノムに関して瑞浪(Mizunami Methanoperedens)と幌延(Horonobe Methanoperedens)のゲノム特性の比較を行った。まずサイズを調べた結果、表層の *Methanoperedens niroreduces* と *Methanoperedens* sp. BLZ1 と比べて 100 万塩基(Mbp)を超えるほど縮小していることが明らかとなった(表 1. 3. 1)。ゲノムサイズの縮小は生存に不必要な遺伝子を喪失し、より過酷な環境に適応する上で必要な生物進化であることが知られているため(Madigan & Martinko, 2005)、瑞浪と幌延の深層地下水環境が表層と比べると生物にとっては存在が困難であることが伺える。

表 1. 3. 1. 表層環境と瑞浪と幌延の地下水から得られたメタン酸化古細菌のゲノム比較

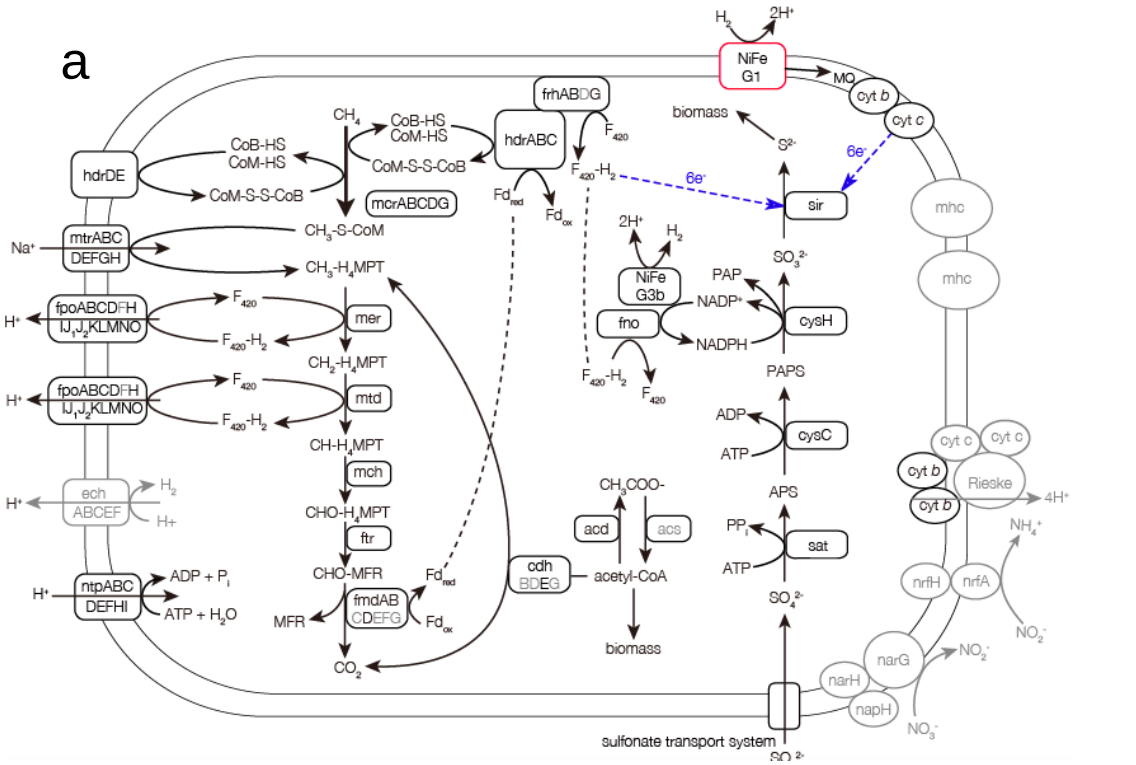
Organisms	Bin size (Mbp)	GC content (%)	Contigs #	Gene #	Competion (%)
Mizunami*Methanoperedens*	2.04	44.7	161	2468	98.8
Horonobe *Methanoperedens*	1.93	43.2	100	2213	96.8
Methanoperedens nitroreducens	3.20	43.2	10	3254	98.8
Methanoperredens sp. BLZ1	3.74	40.2	514	4528	96.8

メタン酸化に関わる遺伝子群の比較については報告されているが(Haroon et al. 2013、Arshad et al. 2015、Ino et al. 2018、Hernsdorf et al. 2017)酸化剤の比較に関してはまだ行われていない。硝酸を酸化剤としたメタン酸化については、硝酸が検出下限をしたまわる瑞浪と幌延のゲノム中には硝酸に関連した代謝遺伝子が無いのに対し、表層環境のゲノム中には硝酸から亜硝酸、および亜硝酸からアンモニアへの反応に関わる遺伝子が存在した(表 1. 3. 2)。窒素固定に関する遺伝子も表層環境のゲノムにのみ含まれるため、窒素代謝の遺伝子群が大きくことなることが判明した。深層地下水にはアンモニアが高濃度で含まれていることが一般的であるため、地下では不必要な遺伝子であったと考えられる。

表 1. 3. 2. 表層環境と瑞浪と幌延の地下水から得られたメタン酸化古細菌のゲノム中の窒素関連遺伝子群の比較

	Mizunami *Methanoperedens*	Horonobe *Methanoperedens*	*Methanoperedens nitroreducens*	*Methanoperredens* sp. BLZ1
M00175 Nitrogen fixation				
K02588 Nitrogenase iron protein nifH			1	1
K02586 Nitrogenase molybdenum-iron protein alpha chain nifD			1	1
K02591 Nitrogenase molybdenum-iron protein beta chain nifK			1	1
M00530 Dissimilatory nitrate reduction				
K00370 Nitrate reductase / nitrite oxidoreductase, alpha subunit narG, narZ, nxrA			1	2
K00371Nitrate reductase / nitrite oxidoreductase, beta subunit narH, narY, nxrB			1	2
K00374 Nitrate reductase gamma subunit narI, narV				1
K03385 Nitrite reductase (cytochrome c-552) nrfA			2	1
K15876 Cytochrome c nitrite reductase small subunit nrfH			2	1

一方、硫酸を酸化剤として利用するための遺伝子群は、瑞浪だけでなく幌延や表層環境のゲノムにも含まれている(図 1. 3. 1)。しかし、亜硫酸から硫化水素の反応に関わる遺伝子が、通常の硫酸を酸化剤として理由する微生物の遺伝子と異なるため(Ino et al. 2018)、メタン酸化古細菌が硫酸を酸化剤としてメタン酸化を行うかは今後決定していく必要がある。また、三価鉄やウラン等の放射性核種を酸化剤にする際に用いる遺伝子(図中で mhc と記す)は、瑞浪のゲノムには含まれないが幌延と表層環境では含まれているため、花崗岩深部では三価鉄等の酸化剤が欠乏していること伺える。加えて、表層環境のゲノムには硝酸、硫酸、三価鉄等の多様な酸化剤を用いるために必要な遺伝子が含まれており、様々な環境に適応する潜在能力が高いことが推察される。


a
NiFe G1
MQ
cyt b
cyt c
frhABDG
hdrABC
hdrDE
mcrABCDG
mtrABC DEFGH
fpoABCDFH IJ1J2KLMNO
mer
mtd
mch
ftr
fmdAB CDEFG
ech ABCEF
ntpABC DEFHI
CoB-HS
CoM-HS
CoM-S-S-CoB
CH3-S-CoM
CH3-H4MPT
CH2-H4MPT
CH-H4MPT
CHO-H4MPT
CHO-MFR
MFR
CO2
ADP + Pi
ATP + H2O
biomass
sir
NiFe G3b
fno
cysH
cysC
sat
PAP
NADP+
NADPH
PAPS
APS
ADP
ATP
acd
acs
CH3COO-
acetyl-CoA
odh BDEG
mhc
cyt c
Rieske
4H+
nrfH
nrfA
narG
narH
napH
sulfonate transport system
b
NiFe G1
MQ
cyt b
cyt c
frhABDG
hdrABC
hdrDE
mcrABCDG
mtrABC DEFGH
fpoABCDFH IJ1J2KLMNO
mer
mtd
mch
ftr
fmdAB CDEFG
ech ABCEF
ntpABC DEFHI
CoB-HS
CoM-HS
CoM-S-S-CoB
CH3-S-CoM
CH3-H4MPT
CH2-H4MPT
CH-H4MPT
CHO-H4MPT
CHO-MFR
MFR
CO2
ADP + Pi
ATP + H2O
biomass
sir
NiFe G3b
fno
cysH
cysC
sat
PAP
NADP+
NADPH
PAPS
APS
ADP
ATP
acd
acs
CH3COO-
acetyl-CoA
odh BDEG
mho
cyt c
Rieske
4H+
nrfH
nrfA
narG
narH
napH
sulfonate transport system

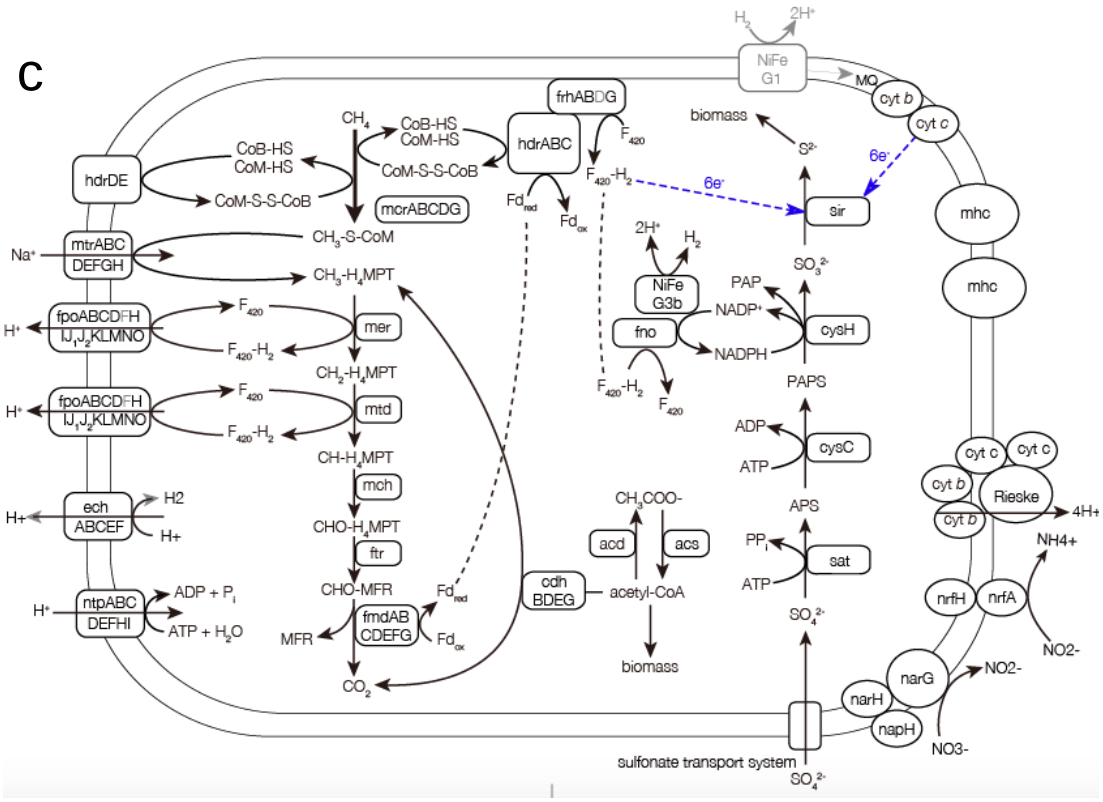


図 1. 3. 1. ゲノムから構築されたメタン酸化古細菌の代謝マップ（a）瑞浪地下水、(b)幌延地下水、(c)表層環境。(Ino et al., 2018 より一部改変して引用)

2. 全体研究計画(3 ヵ年における全体計画)

瑞浪超深地層研究所と幌延深地層研究所の母岩は花崗岩と海成堆積岩と大きく異なるが、地下坑道から掘削した水平ボーリング孔から採取される高品質な地下水試料中には、無酸素条件下でメタンをエネルギー源にして増殖する嫌気的メタン酸化古細菌が主要な微生物として存在していた。これらの結果から、微生物によるメタン酸化が化学環境の形成に重要であることを世界に先駆けて示した。しかし、先行研究では常圧条件で ^{13}C ラベルしたメタンを添加して、メタン酸化速度を測定するに留まった。微生物の代謝活動とメタンの溶解度は圧力に敏感に変化するため、正確な代謝速度を測定するには現場と同じ高圧条件で培養を行う必要がある。本提案研究では、嫌気的メタン酸化古細菌が生息する両サイトの地下水試料を用いて、高圧培養実験手法の開発と微生物代謝速度を測定する。

2.1. 高圧培養実験手法の開発

地下水を掘削孔から採取する際に圧力低下を防ぐため、高圧容器に地下水を採取し、高圧状態を維持しながら高圧容器に硝酸・三価鉄・硫酸を任意の量を添加する手法を確立する。地下水中のメタン濃度は微生物のメタン酸化で減少する濃度変化量に比べて大きいため、メタン濃度の減少を測定して、メタン酸化速度を測定するのは不可能である。

そのため、^{13}C ラベルされた CH_4 を溶存ガス濃度の 10 分の 1 量添加して培養し、メタン酸化で生じる ^{13}C ラベルされた無機炭酸の量を測定して酸化速度に換算する。

2.2. 硝酸・三価鉄・硫酸を酸化剤として用いたメタン酸化速度の測定

瑞浪と幌延の地下水は、硝酸と硫酸の濃度が低いため、メタン酸化により消費される硝酸と硫酸の量については濃度変化の測定により明らかにできる。しかし、幌延の地下水には二価鉄が高濃度で含まれるため、安定同位体ラベルされた三価鉄(^{57}Fe)を加えることでメタン酸化と同様に、三価鉄の還元速度の測定が可能となる。硝酸と硫酸を高濃度で添加する場合は、代謝産物である亜硝酸、亜酸化窒素、窒素、硫化水素等の生成量を測定して酸化速度に換算する。

2.3.1. ２０１８年度実施内容

(a) 瑞浪超深地層研究所における高圧培養手法の確立およびメタン酸化速度の測定

溶存ガス濃度が低く、高水圧状態で地下水を扱いやすい瑞浪の地下水を用いて高圧培養手法を確立する。瑞浪地下水の溶存メタン濃度は 300 μM 程度であるため、^{13}C メタン 30 μM を高圧容器に加える。硝酸・三価鉄・硫酸の濃度条件を変えてメタン酸化速度を測定し、微生物代謝速度を加味した安全評価に必要なパラメーター(最大代謝速度 Vmax、半飽和濃度 Ks)を取得する。三価鉄は実験室で合成した ^{57}Fe ラベルしていない非晶質三価鉄(フェリハイドライト)を用いて速度を測定する。

(b) 幌延深地層研究所における三価鉄を用いたメタン酸化速度の測定手法の確立

^{57}Fe を主成分とする金属鉄を塩酸溶液中で溶解し、その後中和して非晶質三価鉄を合成する。マルチコレクタ ICP-MS による $^{56}Fe/^{57}Fe$ の同位体比測定は既に立ち上がっているので利用する。

2.3.2. ２０１９年度実施内容

(a) 幌延深地層研究所における高圧培養手法の確立およびメタン酸化速度の測定

幌延地下水の溶存メタン濃度は 30 mM 程度と高いため、^{13}C メタン 3 mM を高圧培養容器に加える。硝酸と硫酸は瑞浪と同様に測定し、三価鉄に関しては ^{57}Fe でラベルされた非晶質三価鉄を加えて培養を行う。

(b)メタン濃度条件ごとのメタン酸化速度の測定

現場メタン濃度に近い条件で酸化剤の種類と濃度を変えて測定した 2018 年度(a)と 2019 年度(a)の実施結果を加味して、酸化剤濃度を固定した条件でメタン酸化速度を測定する。メタン濃度はヘッドスペースと呼ばれる容器中の気体の体積を変えて、メタン濃度に応じたメタン酸化速度を測定し、安全評価に必要な最大代謝速度 Vmax と半飽和濃度 Ks

を取得する。

2.3.3. ２０２０年度実施内容

(a) 異なる三価鉄鉱物を用いたメタン酸化速度の測定

幌延深地層研究所の堆積岩中には三価鉄を含む粘土鉱物が含まれることが明らかになっているため、岩石コア中の粘土鉱物を用いてメタン酸化速度を測定する。地上に保管されている酸化された岩石を用いてメタン酸化速度の測定を行い、埋め戻し後の回復過程への影響を評価する。

(b)取りまとめと成果発信

微生物の鉄還元はウラン、ネプツニウム等の放射性核種の還元反応を促進し、溶解度制限固相の形成に影響を及ぼす。また、微生物は硝酸を用いて窒素ガスや亜硝酸を生成し、地質環境へ影響を与える。これらの影響についても取りまとめ、成果発信として地層処分関連学会での発表と国際誌への論文投稿を行う。

3. ２０１８年度の成果内容

3.1. 瑞浪超深地層研究所における高圧培養手法の確立およびメタン酸化速度の測定

地質環境に生息するメタン酸化古細菌は、硝酸、鉄、硫酸等の多様な酸化剤を用いて代謝することが常圧条件下の試験により明らかになっているが、地下の高圧条件下でメタン酸化古細菌が用いる酸化剤の種類や反応速度、形成される化学環境については未解明である。本計画では、瑞浪超深地層研究所の地下水を高圧条件下で培養して、地質環境のメタン酸化古細菌による酸化剤の利用選択性や代謝速度、形成される化学環境の評価を行うと共に、酸化剤の代謝反応が放射性核種の移行に与える影響についても考察することを目的とした。地下環境を模擬した室内高圧試験では、地下深部から湧出する高圧地下水を圧力維持して高圧容器に直接採取し、容器内の高圧状態を維持した状態で、^{13}Cメタン及び酸化剤を任意の濃度で添加した後、室温で保存して高圧培養を行う。高圧培養した地下水を分析する為に高圧容器から真空バイアル瓶へ採取するが、経時間変化を追う際は高圧培養の途中で地下水を分取する必要がある。従来の耐圧容器では、容器内への試料の添加や容器からの採取の際に圧力が低下するという問題があった為、本年度は内部の圧力を調整可能な高圧培養容器を準備し、高圧培養実験の手法確立を行った。高圧培養実験の準備を行った後、瑞浪超深地層研究所の地下水を採取し、メタンと酸化剤をそれぞれ添加して、高圧培養を開始した。

3.1.1. 封圧培養容器の準備と高圧培養実験手法の開発

本研究では、高圧培養用に容量 300 ml のステンレス製高圧培養容器 12 体を準備した。高圧培養容器は、内部の圧力を任意に調節する為に、内部をシャフトで連結されたピス

トンにより下流側と上流側の 2 室に分けた構造にし、下流側と上流側のそれぞれ配管接続用クイックコネクター(Swagelock 製)を取り付けた(図 3.1.1.1)。機密性を高め、容器内の試料を分取する際の流量を調節する為に、下流側と上流側に無回転ステム式ニードル・バルブ(Swagelock 製)を取り付けた。保存中や採水時における容器内部の圧力を測定する為、地下水試を採水する下流側にアナログ式の圧力計を設置した。

準備した高圧培養容器に地下水試料を採水する際は、下流側のクイックコネクターを介して封入する。その際、ピストンの下流側に加圧ポンプにて水を送り込むとピストンは上流側に移動し、ピストンが上流側まで完全に移動した後、さらに水を送り込むと下流側は加圧状態となる。下流側の圧力が高い状態では、上流側の採取口のみを開けてもピストンは移動しない。また、下流側の採取口を解放すると、圧力が低下してピストンが下流側に戻り上流側には水が流入する。上流側にポンプを取り付け加圧しながら下流側のバルブを開けることで、圧力を保ったまま内部の地下水を分取することが可能となる。

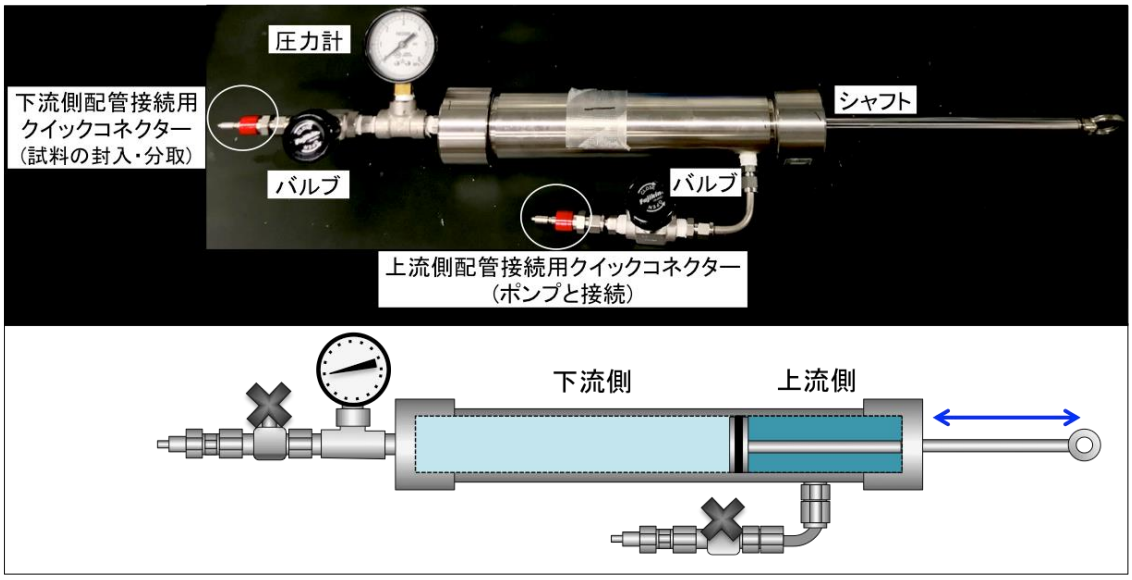


図 3.1.1.1. ステンレス製高圧培養容器と内部構造

高圧培養容器の耐圧性と機密機密性、及び気体成分の散逸や容器内における気体成分の発生の有無を確認する為の性能試験を実施した。耐圧性と機密機密性に関しては、高圧培養容器の下流側にクイックコネクターを介して超純水を 5.0MPa の圧力で採取した後、室温(21 度)で 1 週間保存して容器内部における圧力の変化を調べ、採取時の圧力に対して±10%以内で、内部の圧力がある程度保たれること確認した(表 3.1.1.1)。

表 3.1.1.1. 高圧培養容器の耐圧・気密試験

	数値
超純水採取後の圧力指示値(MPa)	5.0
1 週間保存後の圧力指示値(MPa)	5.0
変動率(%)	0.0

地下水試料中に溶存する気体成分の散逸や容器内における気体成分の発生の有無に関しては、高圧培養容器で地下水を一週間保持した後に容器内試料を大気非接触で真空バイアルに採取し、抽出された地下水に溶存する気体成分(水素、メタン、一酸化炭素)の測定して確認した。試験には瑞浪超深地層研究所の地下水を用い、メタンの測定にはガスクロマトグラフ水素炎イオン検出器 GC-FID を用いた。真空バイアルに採取した地下水試料をそれぞれ測定した結果、3 成分とも一週間の変動率は±20%以内で、気体成分の散逸や容器内における気体成分の発生は殆どないことが示された(表 3.1.1.2)。

表 3.1.1.2. 高圧培養容器の気体成分の散逸・生成確認試験

	保存開始時間濃度	保存後濃度	変動(%)
水素 (nM)	8.0	9.3	+16
メタン (μM)	178	197	+10.7
一酸化炭素 (nM)	40.7	34.7	-14.8

高圧培養容器の性能を確認できたので、2019 年 2 月に、瑞浪超深地層研究所内の地下坑道の深度 300m に位置する 09MI20 の区間 1(09MI20-1)にて、地下水の採水と高圧培養を実施した。高圧培養容器に地下と ^{13}C メタン、酸化剤などを添加する際は、大気の混入を防ぐ必要があったので、両端に配管接続用クイックコネクターを接続したチューブを用いて封入する手法を開発した。添加剤は事前に準備し、嫌気グルーブボックス内で注射器を用いて、クイックコネクツを両端に付けたチューブ内に封入した。^{13}C 及び ^{12}C メタンは、密閉したバイアル瓶に準備し、ガスタイトシリンジを封入経路に三方コックに接続し、その三方コックを介して封入した。高圧培養用の微生物は、09MI20-1 から湧出する地下水を孔径 0.2 μm のメンブレンフィルターにステンレスホルダーを用いて高圧状態を維持して回収した。回収後、ステンレスホルダーから微生物を逆流させ、接続した両端に付けたチューブに封入した。添加剤、メタン、微生物、地下水は、図 3.1.1.2 に示した接続状態で、硝酸、三価鉄および硫酸を含まないフィルター濾過した 09MI21 区間 2 の地下水で高圧培養容器に封入した。

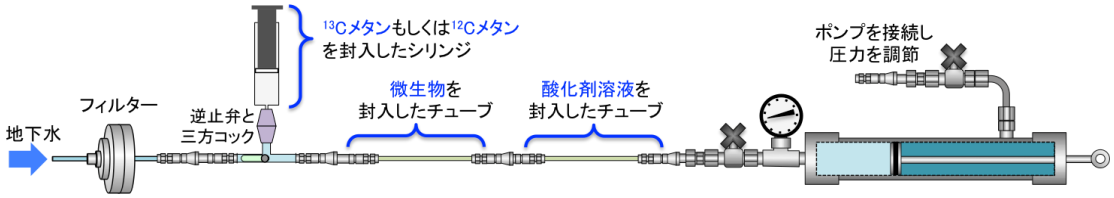


図 3.1.1.2. 地下で高圧培養容器に、添加剤、微生物、酸化剤を封入するシステム。

図 3.1.1.3. 瑞浪超深地層研究所内の地下坑道の深度 300m に位置する 09MI20 号孔(区間 1)で添加剤を封入したチューブを取り付けて高圧培養容器に直接採水した。

本実験では、酸化剤として硫酸を濃度 0.1～5 mM、硝酸を濃度 5mM、0.1 g/L の非晶質三価鉄(フェリハイドライト)を表 3.1.1.3 に示す条件で、12 本の高圧培養容器にそれぞれ添加して高圧培養を開始した。硫酸は安定同位体 ^{34}S で標識した試薬と標識してない試薬を用いて、134 μM のメタンも安定同位体 ^{13}C で標識した試薬と標識してない試薬を用いた。瑞浪地下水の溶存メタン濃度は 300 μM 程度であるため、添加する ^{12}C または ^{13}C メタンの濃度は 30 μM とした。

表 3.1.1.3. 瑞浪超深地層研究所における現場高圧培養実験の条件

Sample ID.	Final concentration	S stable isotope label	CH_4 concentration	C stable isotope label	Cell suspension	Pressure	Culture start day
M1902_1	0.1 mM sulfate	^{34}S	30 μM	^{13}C	○	1.4 Mpa	2019/2/6
M1902_2	0.1 mM sulfate	^{34}S	30 μM	^{13}C	○	1.4 Mpa	2019/2/6
M1902_3	0.1 mM sulfate	^{34}S	30 μM	^{13}C	○	1.4 Mpa	2019/2/6
M1902_4	0.1 mM sulfate	^{34}S	30 μM	^{13}C	-	1.4 Mpa	2019/2/6
M1902_5	0.1 mM sulfate	^{34}S	30 μM	^{13}C	○	1.4 Mpa	2019/2/6
M1902_6	0.1 mM sulfate	^{32}S	30 μM	^{12}C	○	1.4 Mpa	2019/2/6
M1902_7	0.1 mM sulfate	^{32}S	30 μM	^{12}C	-	1.4 Mpa	2019/2/6
M1902_8	0.5 mM sulfate	^{32}S	30 μM	^{12}C	○	1.4 Mpa	2019/2/6
M1902_9	5 mM sulfate	^{32}S	30 μM	^{12}C	○	1.4 Mpa	2019/2/6
M1902_10	5 mM sulfate	^{32}S	30 μM	^{13}C	○	1.4 Mpa	2019/2/6
M1902_11	5 mM nitrate	-	30 μM	^{13}C	○	1.4 Mpa	2019/2/6
M1902_12	0.1 mM Fe(III)	-	30 μM	^{13}C	○	1.4 Mpa	2019/2/6

現場で封入した高圧培養容器を実験室に高圧状態を維持して持ち帰り、内部の圧力を水圧ポンプで維持しながら、配管接続用クイックコネクターを介してポンプと注射針をそれぞれ接続し、採水用の真空バイアル瓶に培養した地下水を分取した(図 3.1.1.4)。

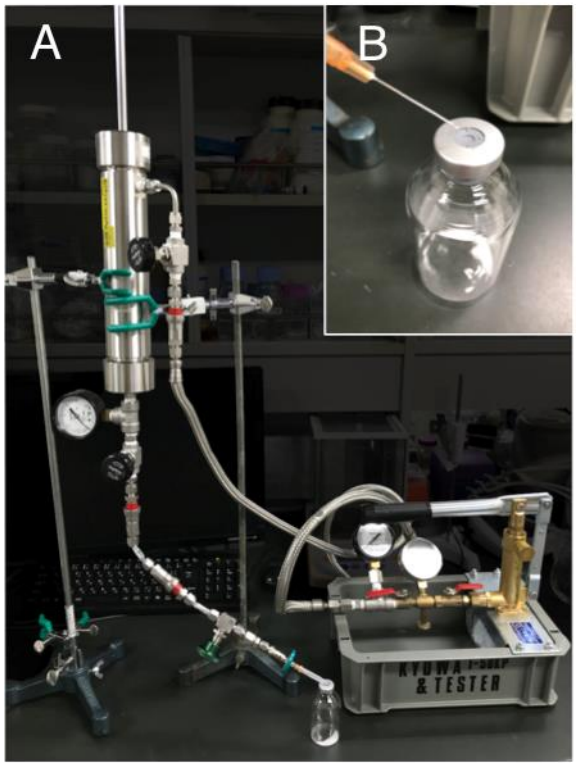


図 3.1.1.4. 高圧培養容器内の圧力を下げずにガス測定用の試料を分取する系(A)と真空バイアル瓶に採水する様子(B)

4. ２０１９年度の計画、実施方法

【２０１９年度の成果内容】

本年度は、2018 年度に実施した瑞浪超深地層研究所の地下坑道内で封入した高圧培養容器から分取した試料の分析を実施した。ガス分析の結果、現場で封入した培養試料中では水素濃度の値に大きなばらつきがあり、現場で地下水を封入した際に高圧状態を維持できなかったことが原因として考えられた。この問題を解決するために、地下水の封入を実験室で行った結果、水素濃度のばらつきの問題は解消されたが、高圧培養容器の素材がステンレスであるため硫化水素が吸着する問題が生じた。この問題を解決するために、ポリフッ化ビニル製のテドラバックと呼ばれるガス分析用サンプリングバック内に培養液を詰めて、その培養液入りのテドラバックを高圧培養容器に封入して培養する方法を検討した。この改良法で、瑞浪超深地層研究所だけでなく幌延深地層研究所の地下水も対象に高圧培養を実施した。

4.1. 瑞浪超深地層研究所における高圧培養手法の確立およびメタン酸化速度の測定

4.1.1 現場封入による高圧培養実験の試料分析

本年度は、２０１９年２月に現場で封入した高圧培養容器から分取した試料を分析した。水素はメタン酸化反応を阻害することが知られるため、試料中の濃度を一定にする必要がある。水素濃度は高感度還元ガス分析装置(TRA-1, 株式会社ジェイサイエンス)を用いて測定した。その結果、高圧培養容器の間で大きなばらつきが確認された(図 4.1.1.1.)。水素濃度の大きなばらつきの原因として、地下坑道で湧出する地下水を高圧状態で高圧培養容器に封入した際、圧力低下に発生した気相が多く入った容器と少なく入った容器で大きな違いを生じたためと考えられる。この結果を受けて、2019 年度は、水素濃度を一定に保ち高圧培養するための手法を改良した。

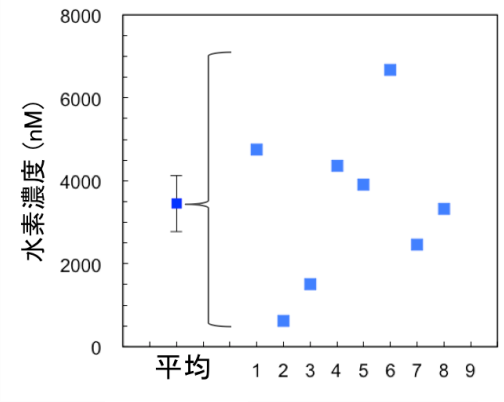


図 4.1.1.1. 09MI20-1 の地下水を現場で封入した際の水素濃度

4.1.2. 実験室内での封入方法の検討

封入した培養液の水素濃度を一定にする方法を確立するために、地下坑道で湧出する地下水を直接封入せずに、現場で採取した地下水を実験室に持ち帰り、微生物細胞の封入を試みた。２０１９年 8 月に、瑞浪超深地層研究所内の 09MI21-2 のフィルター濾過した地下水を、1L ポリエチレン製実験容器(NALGENE)に入れて実験室に輸送した。高圧培養用の微生物は、09MI20-1 から湧出する地下水を孔径 0.2 μm のメンブレンフィルターにステンレスホルダーを用いて高圧状態を維持して回収して、高圧状態を維持して冷蔵で実験室まで輸送した。採水した地下水は実験室で、滅菌したゴム栓付きの 1L ガラス瓶を用いて、真空排気とアルゴンガス置換を繰り返して酸素を取り除いた。酸化剤とメタンは、２０１９年２月の現場封入と同じ方法で準備した。アルゴンガスで充填したグローブボックス内で、ステンレスホフルダーから微生物を 100 ml 程度の 09MI21-2 地下水に回収した後、クイックコネクツを両端に付けたチューブ内に注射器を用いて封入した。酸化剤、微生物、メタンを高圧培養容器へ封入する際は、図 4.1.2.1 に示す系で行い、表 4.1.2.1 に示す現場での封入した際の高圧培養実験の条件を再現した。違いとしては、134 μM のメタンを ^{12}C と ^{13}C でそれぞれ添加して高圧培養を開始した。

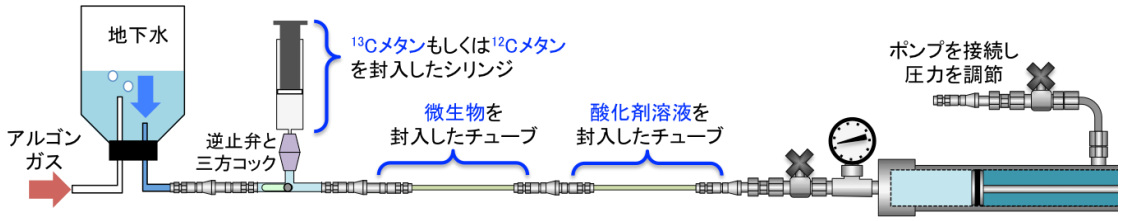


図 4.1.2.1. 実験室で一定の圧力で地下水、添加物等を封入する系。

表 4.1.2.1. 瑞浪超深地層研究所内の地下水を実験室で封入し高圧培養する際の培養条件

Sample ID.	Final conc.	S stable isotope label	CH_4 conc.	C stable isotope label	Cell suspension	Pressure	Culture start day	Culture period
M1908_1	0.1 mM sulfate	^{34}S	134 µM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/8/5	0 days
M1908_2	0.1 mM sulfate	^{34}S	134 µM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/8/5	7 days
M1908_3	0.1 mM sulfate	^{34}S	134 µM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/8/5	7 days
M1908_4	0.1 mM sulfate	^{34}S	134 µM	^{13}C	-	1.4 MPa	2019/8/5	7 days
M1908_5	0.5 mM sulfate	^{34}S	134 µM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/8/5	7 days
M1908_6	0.1 mM sulfate	-	134 µM	-	○	1.4 MPa	2019/8/5	0 days
M1908_7	0.1 mM sulfate	-	134 µM	-	-	1.4 MPa	2019/8/5	7 days
M1908_8	0.5 mM sulfate	-	134 µM	-	○	1.4 MPa	2019/8/5	7 days
M1908_9	5 mM sulfate	-	134 µM	-	○	1.4 MPa	2019/8/5	7 days
M1908_10	5 mM sulfate	-	134 µM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/8/5	7 days
M1908_11	5 mM nitrate	-	134 µM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/8/5	7 days
M1908_12	0.1 mM Fe(III)	-	134 µM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/8/5	7 days

3 日間の高圧培養を行った後、現場で封入した実験と同様に分析用試料を分取した。培養した試料中の水素濃度を測定した結果、各容器で水素濃度のばらつきは小さかった。しかし、^{13}C メタンを添加した容器の水素濃度は、^{12}C メタンを添加した容器の水素濃度に比べて、水素濃度が高い傾向が確認された(図 4.1.2.2.)。

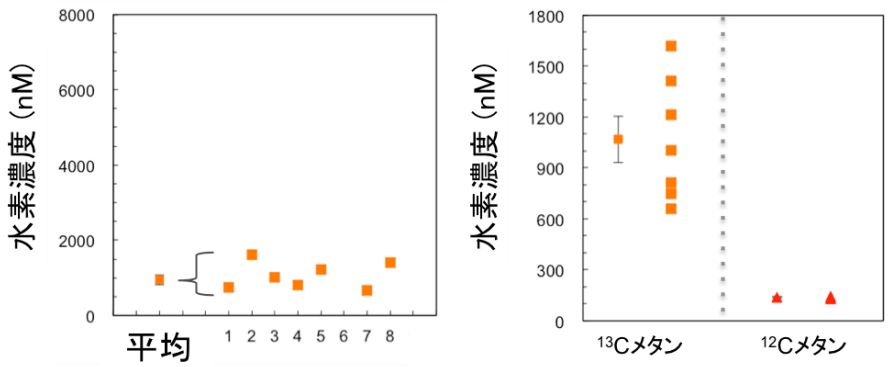


図 4.1.2.2. 瑞浪超深地層研究所内の地下水を実験室で高圧培養容器に封入し高圧培養を行った試料中の水素濃度(左)と ^{13}C 及び ^{12}C メタンで異なる水素濃度(右)。

0.2 μm フィルターにより濾過した試料をイオンクロマトグラフ (Shimadzu, Prominence) を用いて硫酸濃度の分析を行った。その結果、培養開始時と終了時で硫酸濃度の減少はみられなかった。硫化水素は封入時に混入する酸素を除去するために、数十μg/L 程度添加した。メチレンブルー吸光光度法で、Hach 社製分光光度計 DE/2010 を用いて硫化水素濃度を測定を行った。その結果、硫酸はほぼ一定なのに対し、硫化水素は培養 3 日ほどで急激に減少していた(図 4.1.2.3.)。硫化水素は、微生物活動の有無に関係なく減少していることから、硫化水素はステンレス製の高圧培養容器に吸着した可能性が考えられた。

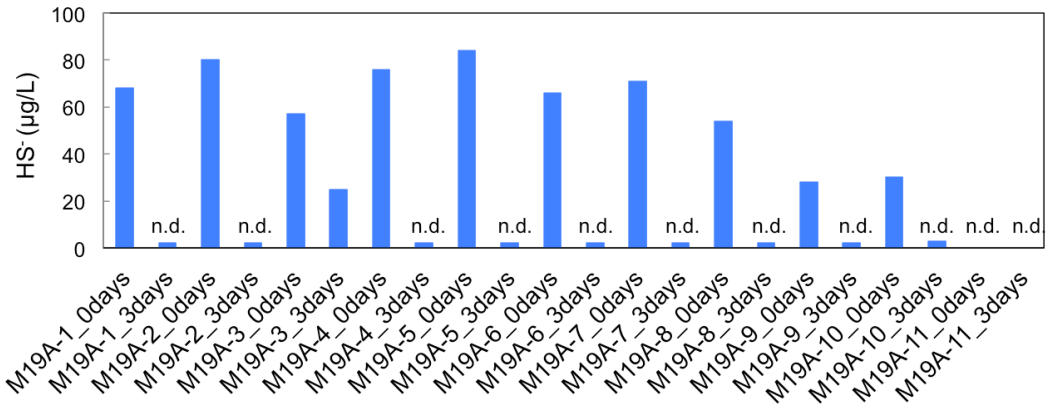


図 4.1.2.3. 瑞浪超深地層研究所内の地下水を実験室で高圧培養容器に封入し高圧培養を行った試料中で確認された硫化水素濃度の減少。n.d.は検出限界以下。

実際に容器に硫化水素と硫酸を添加して、濃度の経時変化を調べたところ、硫化水素の減少が確認されたため、容器への付着を防いだ培養方法の改良が必要となった(図 4.1.2.4)。

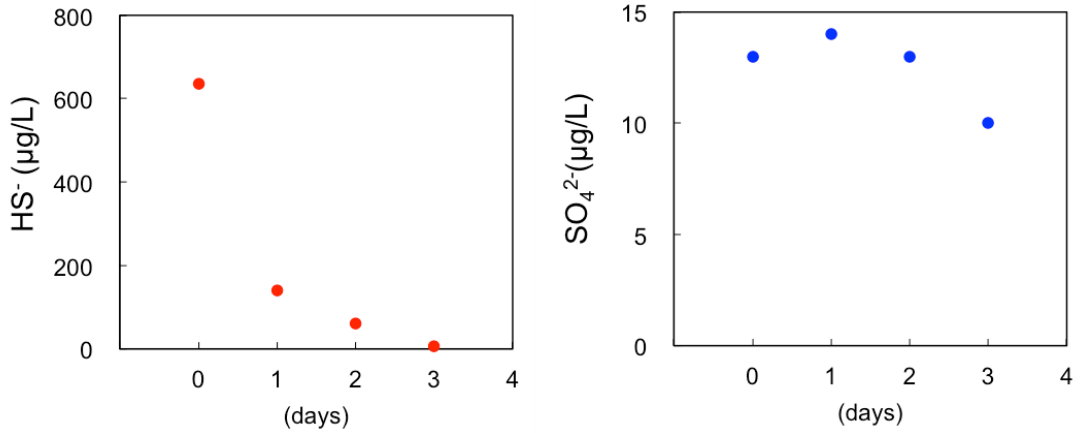


図 4.1.2.4. 微生物細胞添加なし培養試料中の硫化水素(左)と硫酸(右)の経時変化。

4.1.3. テドラバックを用いた高圧培養手法の改良

^{13}C メタン中の高い水素濃度の問題とステンレス製容器への硫化水素の吸着問題を解決する必要が判明した。ポリフッ化ビニル製のガス分析用サンプリングバックであるテドラバックは酸素以上の分子量を持つ気体の透過性は低いが、それ未満の気体の透過性は高いため、^{13}C メタンをテドラバックで 11 日間保存した。水素濃度の変化は高感度還元ガス分析装置(TRA-1, 株式会社ジェイサイエンス)で測定した。その結果、11 日後に水素濃度だけが著しく減少することが明らかとなった。そこで後述する高圧培養実験では、テドラバックで保存して水素濃度の減少を確認した ^{13}C メタンを用いた。

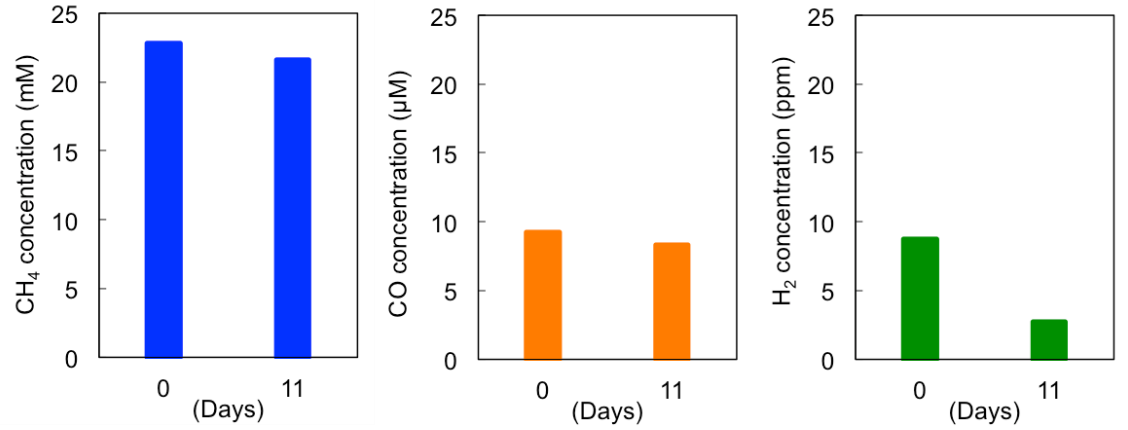


図 4.1.3.1. テトラバッグで 11 日間放置した ^{13}C メタン、一酸化炭素、水素の濃度。

テドラバックは深海調査でも用いられており、高圧耐性だけでなく硫化水素の吸着能が低いことが知られている。そこで図 4.1.3.2 に示したように、培養液をテドラパックにアルゴンガスで充填したグローブボックス内で詰めて、その後高圧培養容器に入れて加圧する実験方法を考案した。加圧はアルゴンガスボンベと圧力調整器で行うことが可能である。

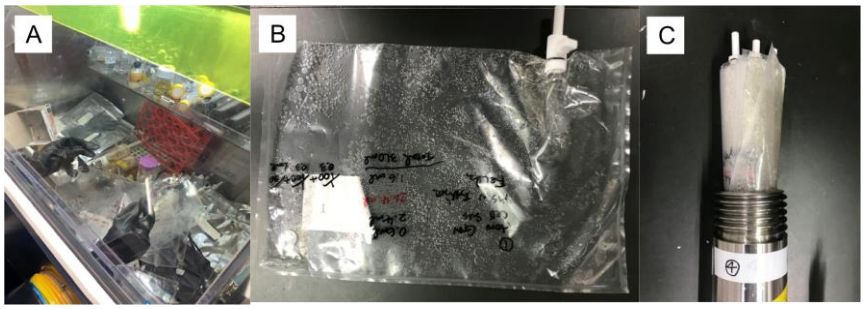


図 4.1.3.2. **アルゴンガスを充填したグローブボックス内(A)で、地下水や添加剤をテトラバックに封入し(B)、高圧培養容器内に入れた。**

4.1.4. テドラバックを用いた高圧培養実験

テドラバックを用いた高圧培養実験方法が確立できたので、2019 年 10 月に採水した 09MI21-2 の地下水と 09MI20-1 の地下水から取得した微生物を用いて高圧培養実験を実施した。09MI21-2 の地下水は実験室で封入する前に、真空排気とアルゴンガスパージを繰り返して酸素を除去した。ガス置換した 09MI21-2 の地下水、酸化剤、濃縮した微生物と共にメタンガスを、グローブボックス内で表 4.1.4.1.に示す条件でテトラバックに封入した。大気下で一つの高圧培養容器へテドラバックを 2 または 3 枚入れた後、アルゴンガスで高圧培養容器内の大気を置換して、現場圧力である 1.6 MPa で 7 日間培養した。上述のテドラバックを用いない高圧培養で硫化水素が生成しない理由が、高圧条件では硫酸を酸化剤として硫化水素を生成しない可能性もあるため、不均化反応で硫化水素が生成することが知られる亜硫酸、チオ硫酸、元素状硫黄も酸化剤として添加した(Canfield 2001)。培養開始時と終了時で硫化水素濃度を測定した結果、微生物添加の有無にかかわらず終了時には検出限界未満であった。テドラバックに吸着された可能性や、培養液に含まれていた酸素に消費されたか、原因については不明である。テドラバックを用いない高圧培養と比較して、三価鉄を添加した条件で硫化水素が検出されたのに対し、硫酸と硝酸の添加した条件では同様に硫化水素が検出されなかった。対照的に元素状硫黄の添加条件では、高濃度の硫化水素が測定されて、高圧条件では元素状硫黄が酸化剤として重要であることが明らかになった。チオ硫酸と亜硫酸に関しては、硫化水素は検出されたが、酸化剤として利用される程度は低いと考えられる。

表 4.1.4.1. 瑞浪超深地層研究所内の地下水をテトラバッグに封入し高圧培養する際の培養条件

Sample ID.	Final conc.	S stable isotope label	CH_4 conc.	C stable isotope label	Cell suspension	Pressure	Culture start day	Culture period
M1911_1	0.1 mM sulfate	^{34}S	1.8 mM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	0 days
M1911_2a	0.1 mM sulfate	^{34}S	1.8 mM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	7 days
M1911_2b	0.1 mM sulfate	^{34}S	1.8 mM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	7 days
M1911_2c	0.1 mM sulfate	^{34}S	1.8 mM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	7 days
M1911_3	0.1 mM sulfate	^{34}S	1.8 mM	^{13}C	-	1.4 MPa	2019/11/14	0 days
M1911_4	0.1 mM sulfate	^{34}S	1.8 mM	^{13}C	autoclaved	1.4 MPa	2019/11/14	0 days
M1911_5	0.1 mM sulfate	^{34}S	1.8 mM	^{13}C	autoclaved	1.4 MPa	2019/11/14	7 days
M1911_6	-		1.8 mM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	0 days
M1911_7a	-		1.8 mM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	7 days
M1911_7b	-		1.8 mM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	7 days
M1911_7c	-		1.8 mM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	7 days
M1911_8	0.5 mM sulfate	^{34}S	1.8 mM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	7 days
M1911_9	0.5 mM nitrate	-	1.8 mM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	7 days
M1911_10	0.1 g/L Fe(III)	-	1.8 mM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	7 days
M1911_11	0.5 mM elemental sulfur	-	1.8 mM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	7 days
M1911_12	0.5 mM sulfurous acid	-	1.8 mM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	7 days
M1911_13	0.5 mM tiosulfate	-	1.8 mM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	7 days
M1911_14	0.1 mM sulfate	^{32}S	1.8 mM	^{12}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	7 days
M1911_15	0.1 mM sulfate	^{34}S	-	-	○	1.4 MPa	2019/11/14	7 days
M1911_16	0.1 mM sulfate	^{34}S	1.8 mM	^{13}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	7 days
M1911_17	0.1 mM sulfate	^{34}S	1.8 mM	H_2, CO-rich ^{13}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	7 days
M1911_18	0.1 mM sulfate	^{34}S	1.8 mM	CO-rich ^{13}C	○	1.4 MPa	2019/11/14	7 days

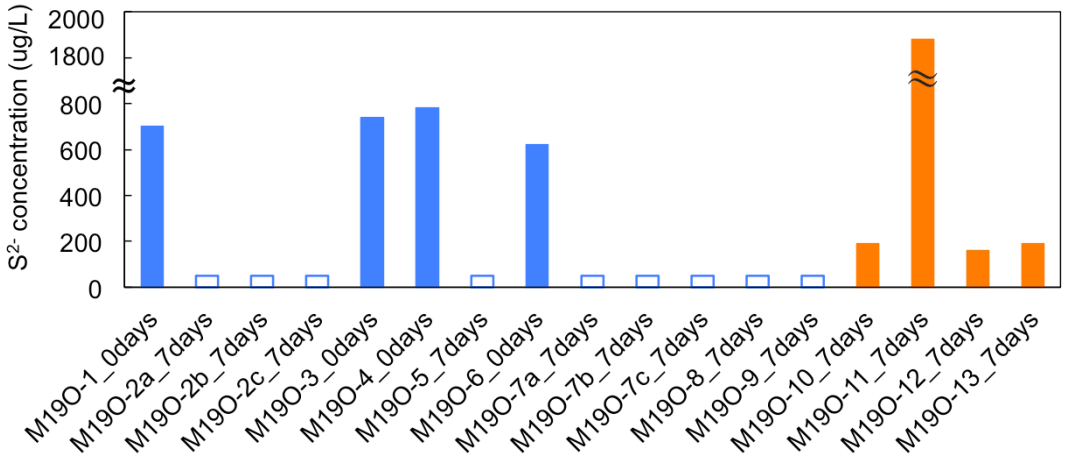


図 4.1.4.1. 瑞浪超深地層研究所内の地下水をテトラバッグに封入し高圧培養した際の硫黄濃度の変化。青は硫酸、橙は亜硫酸、チオ硫酸、元素状硫黄を添加した試料。白は検出限界以下。

4.2. 幌延深地層研究所における高圧培養実験によるメタン酸化速度の測定

4.2.1 テドラバックを用いた高圧培養実験

鉄還元型のメタン酸化古細菌が生息する幌延深地層研究所の東立坑付近の 08E140C01 号孔の深度 185 から 215 メートルの E215 区間 より 2019 年 9 月に採水した。瑞浪超深地層研究所の試料を対象としたテドラバックを用いた高圧培養実験との違いとして、現場で採取した地下水は溶存無機炭素(DIC)濃度が高いため、^{13}C メタンから生成した DIC が少量の場合、メタン酸化速度を高感度で測定できない恐れがある。そこで、現場地下水の塩分濃度と pH を合わせた人工地下水を作成した。人工地下水は pH 7.4 で 50 mM NaCl を含み、瑞浪の 09MI21-2 の地下水と同様に脱酸素処理を行い実験に用いた。ガス置換した人工地下水、酸化剤、濃縮した微生物と共にメタンガスを、グローブボックス内で表 4.2.1.1 に示す条件でテトラバックに封入した。その後、高圧培養容器に入れ、現場圧力である 1.6 MPa で 7 日間培養した。瑞浪で地下水をろ過したフィルターは無色であったが、幌延の地下水ろ過後のフィルターには厚く懸濁物がのっているのがグルーブボックス内で観察された(図 4.2.1.1)。

酸化剤としてフェリハイドライトを添加した条件と酸化剤添加なしの条件で、培養前後の溶存二価鉄濃度をフェナントロリン吸光光度法で Hach 社製分光光度計 DE/2010 を用いて分析した。その結果、培養開始時に添加した溶存二価鉄 (10 mg/L)が、 7 日後には検出限界未満に減少した。この減少は微生物添加の有無に関わらずみられたため、テドラバックまたは懸濁物への吸着、または培養液に含まれていた酸素による消費が原因であると考えられる。メタン酸化が起きているかを確認するために、0.2 μ m 孔径フィルターでろ過した培養液をアミド硫酸入りの真空バイアル瓶に注入して、高純度 He ガ

スで常圧に満たした後に、CO_2 に変換された溶存無機炭素の炭素安定同位体組成を茨城高専所有の高解像度同位体分析装置 MICAL3c (Ishimura et al., 2008) で測定した。フェリハイドライトと ^{13}C メタンを添加した二重実験で、ほぼ同じ DIC の同位体組成が得られた。＋2000‰と非常に同位体組成の重いことが判明し(図 4.2.1.2.)、瑞浪の常圧培養で得られた＋2‰の変化(図 1.1.3)に比べて桁違いに大きい結果となった。フェリハイドライト無添加、^{13}C メタン添加の条件では＋3000‰超えのさらに同位体組成の重い DIC が生成し、フェリハイドライトを添加したことでメタン酸化反応が阻害された可能性がある。懸濁粒子に含まれる三価鉄が酸化剤になった可能性が高いため、どのような固相が含まれるのか明らかにする必要がある。

表 4.2.1.1. 幌延深地層研究所内の地下水を実験室でテドラバッグに封入し高圧培養する際の培養条件(令和元年 9 月実施)

Sample ID.	Final conc.	CH_4 conc.	C stable isotope label	Cell suspension	Pressure	Culture start day	Culture period
H19S_1	10 mM Fe(III)	18 mM	^{13}C	○	1.6 MPa	2019/9/21	0 days
H19S_2	10 mM Fe(III)	18 mM	^{13}C	○	1.6 MPa	2019/9/21	7 days
H19S_3	10 mM Fe(III)	18 mM	^{13}C	○	1.6 MPa	2019/9/21	7 days
H19S_4	-	18 mM	^{13}C	○	1.6 MPa	2019/9/21	7 days
H19S_5	-	18 mM	^{13}C	Autoclaved	1.6 MPa	2019/9/21	7 days
H19S_6	10 mM Fe(III)	18 mM	^{12}C	-	1.0 MPa	2019/9/21	0 days
H19S_7	10 mM Fe(III)	18 mM	^{12}C	○	1.6 MPa	2019/9/21	7 days
H19S_8	-	18 mM	^{12}C	○	1.6 MPa	2019/9/21	7 days
H19S_9	-	18 mM	^{12}C	Autoclaved	1.6 MPa	2019/9/21	7 days
H19S_10	10 mM Fe(III)	18 mM	^{12}C	-	1.6 MPa	2019/9/21	0 days, 7days

図 4.2.1.1. 幌延深地層研究所の地下水を濾過した孔径 0.2 μm のポリカーボネートフィルターとステンレスホルダー。

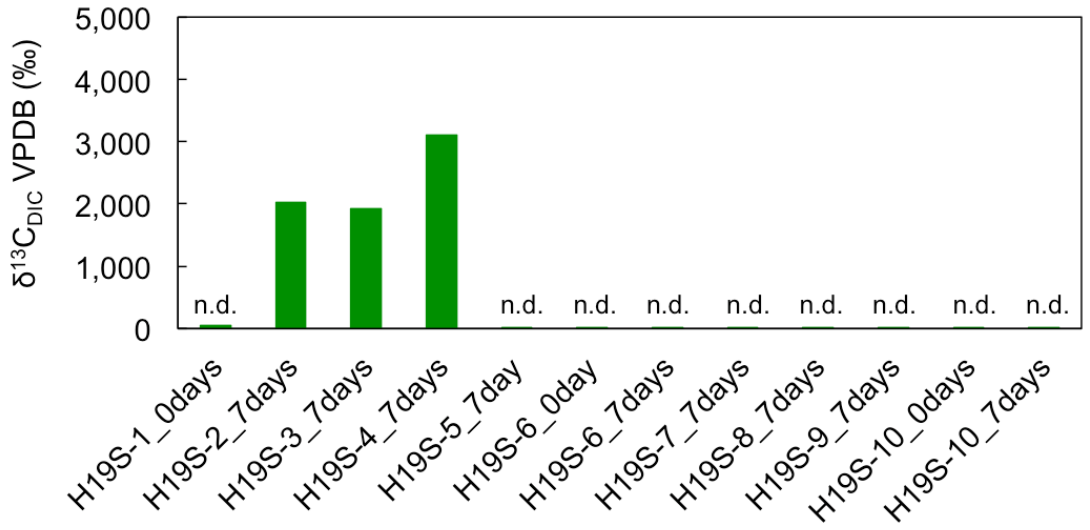


図 4.2.1.2. 幌延深地層研究所内の地下水をテトラバッグに封入し高圧培養した地下水中の溶存無機炭素。n.d.は検出限界以下を示す。

4.2.2. 常圧付近とアルカリ高カルシウム条件におけるメタン酸化速度の測定

2019 年 11 月に 08E140C01 号孔 E215 区間より採取した試料を用いて、酸化剤無添加実験の再現性や多重実験による実験誤差を評価した。また、中間発表会で委員から指摘のあった処分事業とより関連した実験条件を検討し、処分場操業時から埋め戻し直後で想定される常圧付近での培養と、セメントの影響を受けたアルカリ高カルシウム条件での培養を行った。アルカリ高カルシウム条件での培養のため、人工地下水（pH 7.4、50 mM NaCl）に 100 mM の $CaCl_2$ を添加し、pH10 への調整を行った。グローブボックス内で表 4.2.2.1 に示す条件でテトラバックに封入し、現場圧力の 1.6 MPa と常圧付近の 0.2 MPa で 7 日間培養した。

表 4.2.2.1. 幌延深地層研究所内の地下水を実験室でテドラバッグに封入し高圧培養する際の培養条件(2019 年 12 月実施)

Sample ID.	Final concentration	CH_4 concentration	C stable isotope label	Cell suspension	Pressure	Culture start day	Culture period
H19D_1	-	9 mM	^{13}C	○	1.6 MPa	2019/12/3	0 days
H19D_2	-	9 mM	^{13}C	○	1.6 MPa	2019/12/3	0 days
H19D_3	-	9 mM	^{13}C	○	1.6 MPa	2019/12/3	7 days
H19D_4	-	9 mM	^{13}C	○	1.6 MPa	2019/12/3	7 days
H19D_5	-	9 mM	^{13}C	-	1.6 MPa	2019/12/3	7 days
H19D_6	-	9 mM	^{13}C	Autoclaved	0.1 MPa	2019/12/3	7 days
H19D_7	-	9 mM	^{13}C	○	0.1 MPa	2019/12/3	7 days
H19D_8	0.5 mM sulfate	9 mM	^{13}C	○	1.6 MPa	2019/12/3	7 days
H19D_9	0.5 mM nitrate	9 mM	^{13}C	○	1.6 MPa	2019/12/3	7 days
H19D_10	0.5 mM O_2	9 mM	^{13}C	○	1.6 MPa	2019/12/3	7 days
H19D_11	100 mM $CaCl_2$ (pH 10.0)	9 mM	^{13}C	○	1.6 MPa	2019/12/3	0 days
H19D_12	100 mM $CaCl_2$ (pH 10.0)	9 mM	^{13}C	○	1.6 MPa	2019/12/3	7 days

培養前後で溶存二価鉄濃度を測定した結果、酸化剤無添加の高圧状態では検出限界未満であったが、圧力以外は同じ条件の常圧付近の培養後は、比較的高い濃度で検出された(図 4.2.2.1)。また、アルカリ条件は前後で二価鉄が検出され、鉄の固液分配がアルカリまたは高カルシウム条件に影響を受けたことが示唆された。

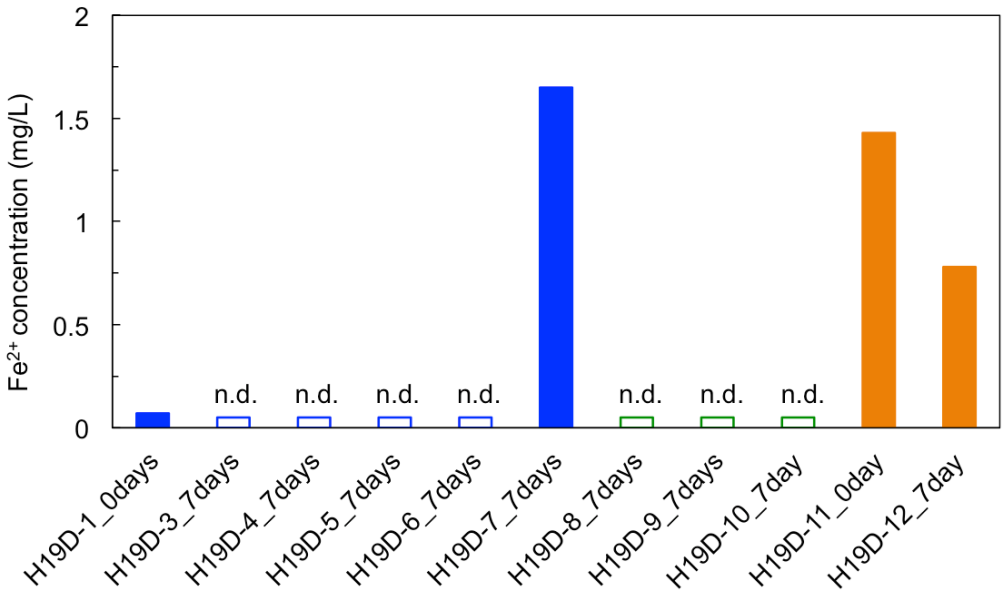


図 4.2.2.1. 幌延深地層研究所内の地下水をテトラバッグに封入し高圧培養した地下水中の溶存二価鉄濃度。青は酸化剤無添加と硫酸、亜硝酸を添加した培養、橙はアルカリ高カルシウム条件での培養。n.d.は検出限界以下を示す。

5. 残された課題と今後の計画

本年度は現場で封入した培養の分析からはじまり、テドラバックを用いた実験室での封入作業により、現場圧力条件でのメタン酸化速度の評価手法が確立された。常圧付近の培養により推定されていた瑞浪超深地層研究所の地下水の酸化剤が硫酸ではなく元素状硫黄であること、幌延深地層研究所の地下水はフェリハイドライトのような反応性の高い三価鉄ではなく、懸濁物に含まれる地下環境で長期間安定な酸化剤が用いられている可能性もデータから示された。また、圧力の違いが微生物代謝や酸化還元状態へ与える影響についても評価できた。残された課題として、酸化剤は固体のため濃度を振ることはできないが、メタン濃度を振ることはできるので、メタン濃度をふった実験を行い、速度乗数を算出する。また、メタン酸化微生物の活動の地下環境での有無を予測するために、幌延深地層研究所の地下水に含まれる懸濁物の固体解析を行い、微生物の酸化剤になっている固相の特定を行うとともに、放射性核種移行に及ぼす微生物影響について考察する。

6. まとめ

本年度は現場で封入した培養の分析からはじまり、テドラバックを用いた実験室での封入作業により、現場圧力条件でのメタン酸化速度の評価手法が確立された。常圧付近の培養により推定されていた瑞浪超深地層研究所の地下水の酸化剤が硫酸ではなく元素状硫黄であること、幌延深地層研究所の地下水はフェリハイドライトのような反応性の高い三価鉄ではなく、懸濁物に含まれる地下環境で長期間安定な酸化剤が用いられている可能性もデータから示された。また、圧力の違いが微生物代謝や酸化還元状態へ与える影響についても評価できた。

6. 参考文献

Arshad A, Speth DR, de Graaf RM, Op den Camp HJM, Jetten MSM, Welte CU. (2015) A metagenomics-based metabolic model of nitrate-dependent anaerobic oxida- tion of methane by Methanoperedens-like archaea. Front Microbiol 6, 1423.

Canfield DE (2001) Biogeochemistry of sulfur isotopes. Rev Min Geochem 43: 607–636.

Haroon MF, Hu S, Shi Y, Imelfort M, Keller J, Hugenholtz P et al. (2013) Anaerobic oxidation of methane coupled to nitrate reduction in a novel archaeal lineage. Nature, 500(7464), 567–570.

Hernsdorf AW, Amano Y, Miyakawa K, Ise K, Suzuki Y, Anantharaman K, Probst A., Burstein D, Thomas BC, Banfield JF (2017) Potential for microbial H2 and metal transformations associated with novel bacteria and archaea in deep terrestrial subsurface sediments. The ISME Journal, 11(8), 1915-1929.

Ishimura T, Tsunogai U, Nakagawa F. (2008). Grain-scale heterogeneities in the stable carbon and oxygen isotopic compositions of the international standard calcite materials (NBS 19, NBS 17, IAEA-CO-1, and IAEA-CO-8). Rapid Commun Mass Spectrom 22: 1925–1932.

Ino K, Hernsdorf AW, Konno U, Kouduka M, Yanagawa K, Kato S,Fukuda A (2018) Ecological and genomic profiling of anaerobic methane-oxidizing archaea in a deep granitic environment. The ISME journal, 12(1), 31.

Ise K, Sasaki Y, Amano Y, Iwatsuki T, Nanjo I, Asano T & Yoshikawa H (2017) The Succession of Bacterial Community Structure in Groundwater from a 250-m Gallery in the Horonobe Underground Research Laboratory. Geomicrobiology journal, 34(6), 489-499.

LaRowe DE, Dale AW, Regnier P (2008) A thermodynamic analysis of the anaerobic oxidation of methane in marine sediments. Geobiology, 6(5), 436-449.

Madigan MT, Martinko JM. Brock biology of microorganisms (11th edn), Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ (2005).

Suzuki Y, Konno U, Fukuda A, Komatsu DD, Hirota A, Watanabe K et al. (2014). Biogeochemical Signals from Deep Microbial Life in Terrestrial Crust. PLoS ONE, 9(12), e113063.

研究報告 6

ナチュラルアログ手法による締固めた ベントナイトの膨潤特性・自己シール性能の 年代変化に関する評価

早稲田大学　理工学術院総合研究所

王　海龍

目次

1　背景・目的 1

2　全体研究計画（3 ヵ年における全体計画） 4

3　2019 年度研究実施内容 7

3.1　2019 年度の計画、実施方法 7

3.1.1　使用した試料の概要 8

3.1.2　不攪乱供試体および再構成供試体の作製方法 11

3.1.3　膨潤圧測定試験の概要 14

3.1.4　XRD・膨潤圧連携試験の概要 16

3.1.5　一次元膨潤変形試験の概要 20

3.1.6　ベントナイト原鉱石の鉱物組成の定量評価に向けた化学的検討の概要 22

3.2　2019 年度の成果内容 26

3.2.1　再構成供試体における膨潤圧挙動 26

3.2.2　再構成供試体における膨潤変形挙動 38

3.2.3　月布産原鉱石における XRD・膨潤圧連携試験の結果 53

3.2.4　ベントナイト原鉱石の鉱物組成の定量評価に向けた化学的検討 69

3.3　残された課題と今後の計画 79

4　まとめ 81

参考文献 82

図・表リスト

図 1-1　地層処分システムの概念図 1
図 3-1　原鉱石サンプルの様子（左から，月布産，中国産，アメリカ産，富岡産）
..... 8
図 3-2　各原鉱石の粉末試料の鉱物組成分析結果（1 段目左：月布産，1 段目右：
中国産，2 段目左：アメリカ産，2 段目右：富岡産） 10
図 3-3　不攪乱供試体（左）と再構成供試体（右）の作製概念図 11
図 3-4　再構成供試体の作用荷重―乾燥密度の関係（上段：月布産，中段：アメ
リカ産，下段：中国産） 12
図 3-5　フレーム型膨潤圧試験装置の概略図 15
図 3-6　小型膨潤圧試験装置の概要 17
図 3-7　本研究における不攪乱供試体の膨潤圧低下メカニズムの推察 18
図 3-8　モンモリロナイト単位結晶の底面間隔と層間の水分子量の関係 [23] 18
図 3-9　XRD 測定面の定義 19
図 3-10　XRD 測定の概念図 19
図 3-11　一次元膨潤変形試験装置 21
図 3-12　蒸留水中に静置した原鉱石試料の様子（左　4 つの内，左から月布産，
アメリカ産，中国産および富岡産）と中国産原鉱石の洗い出し中のふるい
上残留分の様子（右） 22
図 3-13　検量線を用いた石英の重量含有割合の算出例 24
図 3-14　粒径～0.425 mm（上），0.850～2 mm の再構成供試体（中）および不攪
乱供試体（下）の膨潤圧の経時変化曲線 28
図 3-15　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の
試験終了時の供試体乾燥密度と最大膨潤圧の関係 29
図 3-16　粒径～0.425 mm の再構成供試体（上），0.850～2 mm の再構成供試体
（中）および不攪乱供試体（下）の膨潤圧の経時変化曲線 32
図 3-17　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の
試験終了時の供試体乾燥密度と最大膨潤圧の関係 33
図 3-18　粒径～0.425 mm の再構成供試体（上），0.850～2 mm の再構成供試体
（中）および不攪乱供試体の膨潤圧の経時変化曲線 36
図 3-19　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の
試験終了時の供試体乾燥密度と最大膨潤圧の関係 37
図 3-20　粒径～0.425 mm の再構成供試体（上），0.850～2 mm の再構成供試体
（中）および不攪乱供試体の一次元膨潤変形率の経時変化曲線 40
図 3-21　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の

試験開始時の供試体乾燥密度と最大一次元膨潤変形率の関係 41
図 3-22　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の試験開始時の供試体乾燥密度と試験終了時の供試体乾燥密度の関係 42
図 3-23　粒径～0.425 mm の再構成供試体（上），0.850～2 mm の再構成供試体（中）および不攪乱供試体（下）の一次元膨潤変形率の経時変化曲線 45
図 3-24　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の試験開始時の供試体乾燥密度と最大一次元膨潤変形率の関係 46
図 3-25　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の試験開始時の供試体乾燥密度と試験終了時の供試体乾燥密度の関係 47
図 3-26　粒径～0.425 mm の再構成供試体（上）および 0.850～2 mm の再構成供試体（下）の一次元膨潤変形率の経時変化曲線 50
図 3-27　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の試験開始時の供試体乾燥密度と最大一次元膨潤変形率の関係 51
図 3-28　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の試験開始時の供試体乾燥密度と試験終了時の供試体乾燥密度の関係 52
図 3-29　高さ 2mm，フレーム型，7 日間の XRD および膨潤圧の経時変化曲線 54
図 3-30　高さ 4mm，小型，5 日間の XRD および膨潤圧の経時変化曲線 56
図 3-31　高さ 6mm，小型，2 日間の XRD および膨潤圧の経時変化曲線 58
図 3-32　高さ 4mm，小型，5 日間の XRD および膨潤圧の経時変化曲線 60
図 3-33　不攪乱高さ 4mm，小型，6 日間の XRD および膨潤圧の経時変化曲線 62
図 3-34　月布産原鉱石　時間-膨潤圧関係..... 64
図 3-35　供試体の試験後乾燥密度と最大膨潤圧の関係..... 65
図 3-36　供試体の含水比とモンモリロナイトの底面間隔の関係..... 65
図 3-37　不攪乱供試体と再構成供試体のピーク比較（w=15.5～15.7%） 66
図 3-38　不攪乱供試体と再構成供試体のピーク比較（w=17.0%） 67
図 3-39　不攪乱供試体と再構成供試体のピーク比較（w=18.7～18.8%） 67
図 3-40　月布産原鉱石の随伴鉱物の XRD 結果 69
図 3-41　アメリカ産原鉱石の随伴鉱物の XRD 結果 70
図 3-42　中国産原鉱石の随伴鉱物の XRD 結果 70
図 3-43　富岡産原鉱石の随伴鉱物の XRD 結果 71
図 3-44　月布産原鉱石＋CaF_2 10％混合試料の XRD 結果 72
図 3-45　アメリカ産原鉱石＋CaF_2 10％混合試料の XRD 結果 72
図 3-46　中国産原鉱石＋CaF_2 10％混合試料の XRD 結果 72
図 3-47　富岡産原鉱石＋CaF_2 10％混合試料の XRD 結果 73

図 3-48　CaF_2 単体試料の XRD 結果 73
図 3-49　各鉱物の重量割合に関する棒グラフ 77

表 2-1　本研究の実施計画（2018 年度時点） 5
表 2-2　本研究の実施計画（2019 年度初頭時点） 5
表 2-3　本研究の実施計画（2020 年度初頭時点） 6
表 3-1　2019 年度の研究スケジュール 7
表 3-2　原鉱石の基本的性質 9
表 3-3　測定条件 9
表 3-4　測定条件 19
表 3-5　測定条件 23
表 3-6　各鉱物の検量線データ 24
表 3-7　XRD の測定条件 25
表 3-8　月布産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の諸元 26
表 3-9　月布産原鉱石の再構成供試体（粒径 0.850～2 mm）の諸元 27
表 3-10　月布産原鉱石の不攪乱供試体の諸元 27
表 3-11　アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の諸元 30
表 3-12　アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径 0.850～2 mm）の諸元 31
表 3-13　アメリカ産原鉱石の不攪乱供試体の諸元 31
表 3-14　中国産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の諸元 34
表 3-15　中国産原鉱石の再構成供試体（粒径 0.850～2 mm）の諸元 35
表 3-16　中国産原鉱石の不攪乱供試体の諸元 35
表 3-17　月布産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の供試体諸元 38
表 3-18　月布産原鉱石の再構成供試体（粒径 0.850～2 mm）の供試体諸元 39
表 3-19　月布産原鉱石の不攪乱供試体の供試体諸元 39
表 3-20　アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の供試体諸元 43
表 3-21　アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径 0.850～2 mm）の供試体諸元 43
表 3-22　アメリカ産原鉱石の不攪乱供試体の供試体諸元 44
表 3-23　中国産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の供試体諸元 48
表 3-24　中国産原鉱石の再構成供試体（粒径 0.850～2 mm）の供試体諸元 48
表 3-25　中国産原鉱石の不攪乱供試体の供試体諸元 49
表 3-26　試験ケース 53
表 3-27　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前） 54
表 3-28　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験後） 56
表 3-29　d_{001} に関する結果 58

表 3-30　d_{001} に関する結果 61
表 3-31　d_{001} に関する結果 62
表 3-32　月布産原鉱石の内部標準法による鉱物組成定量結果 74
表 3-33　アメリカ産原鉱石の内部標準法による鉱物組成定量結果 74
表 3-34　中国産原鉱石の内部標準法による鉱物組成定量結果 75
表 3-35　富岡産原鉱石の内部標準法による鉱物組成定量結果 75
表 3-36　2020 年度の研究スケジュール 80

1　背景・目的

現代のわが国において，原子力発電における使用済み燃料から生じる高レベル放射性廃棄物（以下 HLW）の処分は未だ実現しておらず，解決されるべき極めて重要な課題である． HLW の処分方法として， 2000 年に成立した「特定放射性廃棄物の最終処分による法律」において，地表から 300m 以深の深い地層中に埋設する地層処分が定められている．HLW 地層処分では，HLW に含まれる放射性核種が地表へ接近することをできるだけ遅延させるため，地層が有する物質移動を遅延させる機能（天然バリア）と，バリア機能を向上させるために HLW の周囲に人工的に施工される人工バリアを組み合わせた，多重バリアシステムが採用される [1)]．人工バリアは，ガラス固化体（使用済み燃料の処理過程で生じる極めて放射能レベルの高い廃液を，ガラスと溶かし合わせたあとに冷やして固めたもの），オーバーパック（ガラス固化体を格納する金属製の容器）および緩衝材によって構成される．そのうち緩衝材の要求性能として，自己シール性，止水性，核種吸着性，応力緩衝材など 11 項目が挙げられている [2)]．これらの性能を総合的に満たす材料として，吸水膨潤性や低透水性，イオン交換性を有する，ベントナイトと呼ばれる粘土系材料を用いることが極めて有力となっている [3)]．図 1-1 に地層処分システムの概念図を示す．

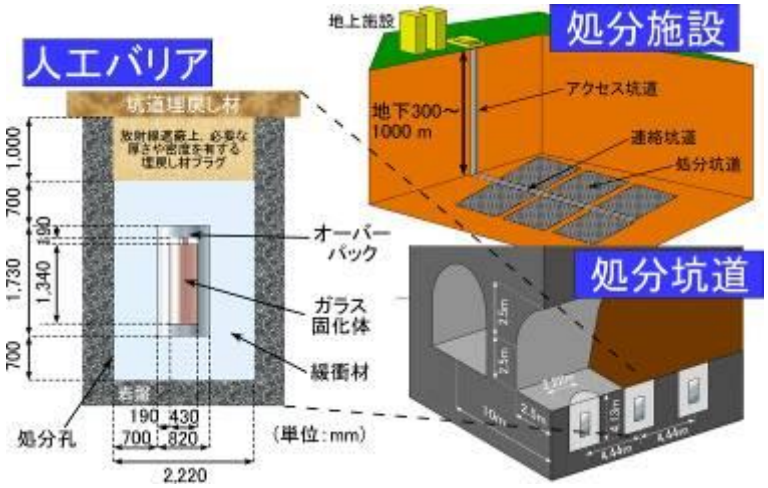


図 1-1　地層処分システムの概念図 [4)]

HLW に含まれる放射性核種の放射能の十分な低下には，数万年を要するため，ベントナイト系緩衝材の設計にあたっては長期的な健全性が求められる．緩衝材はそのような長期間にわたって，処分場の深度に起因する高い土圧の作用や，海水由来の塩分を含む地下水の流入を始めとする，緩衝材の健全性に対する阻害要因に晒される．この時，緩衝材内部にて膠結作用（モンモリロナイトや随

伴鉱物が溶解し，間隙内で再結晶化して土粒子同士を固着させること）が発生する可能性がある[5]．この時，緩衝材の土粒子骨格が緻密となり，強度や低透水性が向上すると考えられる一方で，自己シール性や応力緩衝性に関連する膨潤性や圧密（圧縮）性の材料特性が低下する可能性が考えられる．緩衝材の要求性能に関連する材料特性の長期健全性を評価する上で，膠結作用によるベントナイトの材料特性の経年変化の定量評価は極めて重要である．

緩衝材の長期挙動評価に向けて，これまでに各研究機関においてバッチ型[6]やカラム型[7]の実験装置を用いた変質加速試験や，遠心力模型試験[8]などを活用した取り組みが行われてきた．しかし，前者は経年と変質状況の相関に関する定量評価が困難であり，後者は時間スケールにおける加速可能期間が 100～200 年程度に留まることが課題である．このような室内試験によるアプローチの一方，地質学的観点からナチュラルアナログ研究と呼ばれる研究手法も数多く実施されている．これは，廃棄物やバリア材の天然の類似体（ナチュラルアナログ）を自然界から見出し，類似体における物質移動のプロセスとメカニズムを評価する研究手法である[9]．自然現象を研究対象とするため，数億年といった超長期間の変質現象についても評価することが可能であるが，ナチュラルアナログ研究の多くは，バリア材料の類似体の変質状況の鉱物学的観点に基づく定性評価にとどまっている[10]．故に，膨潤特性や透水特性等の物理特性の評価まで至っておらず，処分事業における緩衝材の設計に直接的に資することは難しい現状にある．

以上のような背景から，本研究では地質年代が数千万～数億年のベントナイト原鉱石を用いて，ナチュラルアナログ研究手法に基づき，締固めたベントナイトのベントナイト系緩衝材の膠結作用による膨潤特性・自己シール性の年代変化を定量的に評価し，ベントナイト系緩衝材の仕様設計に反映させる手法を提案することを目的とする．そのために，まずベントナイト原鉱石および原鉱石を粉砕した後に締固めて作製した再構成試料の膨潤圧，膨潤変形特性および自己シール性能評価試験を実施し，上記に関するデータベースを作成する．続いて，作成したデータベースに基づき，ベントナイトにおける膠結作用の影響の定量評価方法を構築すると同時に，原鉱石の地質年代と膨潤圧，膨潤変形特性および自己シール性の低下関係の定量評価を行う．最後に，以上を総括してベントナイト系緩衝材（締固めたベントナイト）の性能評価に向けたナチュラルアナログを活用した工学的評価方法を構築する．

本研究は，ベントナイト系緩衝材における膨潤特性・自己シール性の年代変化を定量評価して設計に反映するものであり，本研究から得られる成果によって緩衝材，ひいては地層処分システム全体の安全性，技術的信頼性を大いに担

保することができる. これにより, 21 世紀の我が国における重大な課題である, HLW の地層処分事業の実現に寄与することができる.

2　全体研究計画（3 ヵ年における全体計画）

ベントナイトの透水性は極めて低いため，各試験の測定期間は非常に長くなることが予想される．そのため，本研究では表 2-1～2-3 に示すように，基本的に原鉱石の種類ごとに試験を行い，各年度の試験結果を整理した上で，次年度の実施計画の見直しを行っている．また，各原鉱石の膠結作用の程度やメカニズムを解明するために，X 線回析，化学分析及び電子顕微鏡観察などを随時行っている．以下は，2019 年度時点での実施計画（表 2-2）に基づく，各年度の実施内容に関する詳細な説明である．

（1）2018 年度実施内容：本年度は，4 種類のベントナイト原鉱石試料（月布産，富岡産，中国産，アメリカ産）を対象に，膨潤圧試験，一次元膨潤変形試験および自己シール性能評価試験を行い，原鉱石の特性に関するデータベースを構築した．また，月布産原鉱石の再構成試料（粒径：1～2 ケース）を対象に各試験を行った．その結果，原鉱石試料のデータは全体的にバラつきがあるものの，アメリカ産原鉱石においては比較的良好な密度との相関性を有することが分かった．また，Ca 型ベントナイトである富岡産原鉱石においては，その他の 3 種類の Na 型ベントナイト原鉱石に比べて測定値が著しく低く，傾向が大きく異なることが予想された．これらの結果を踏まえて，次年度の実施計画を見直した．

（2）2019 年度実施内容：本年度は，3 種類の Na 型ベントナイト原鉱石の再構成試料を対象として，膨潤圧・膨潤変形特性に関するデータベース（粒径：1～2 ケース）を構築した．前年度の月布産原鉱石の再構成試料（粒径：0.425 mm 以下）の試験を続けると共に，アメリカ産，中国産の 2 種類の原鉱石の再構成試料（粒径：0.425 mm 以下）の試験を行った．また，月布産・アメリカ産・中国産の 3 種類の Na 型ベントナイト原鉱石から，粒径を 0.850～2 mm に調整した再構成試料を作製し，膨潤圧・膨潤変形特性に関する試験を行った．また，下半期より，3.1.4 で後述する XRD・膨潤圧連携試験を実施し，試験方法を構築しつつ，月布産原鉱石試料・再構成試料を用いた測定を行い，本試験方法が妥当性を有することを示す結果が得られた．また，上記と並行して鉱物組成に関する化学分析を実施した．これらを踏まえ，次年度の実施計画を見直した．

（3）2020 年度実施内容：本年度は，上半期において 3 種類の Na 型ベントナイト原鉱石の再構成試料（2～4.75 mm）を作製し，膨潤圧・膨潤変形特性に関する試験を行った．また，下半期においてはアメリカ産原鉱石および中国産原鉱石の原鉱石試料・再構成試料の XRD・膨潤圧連携試験を実施する．また，一年を通して，可能な限り 3 種類の Na 型原鉱石のデータを補強するとともに，膨

潤変形試験について，試験方法および精度向上に関する検討を行う．以上の全てを踏まえ，3 か年の実験により得られた結果をもとに，原鉱石の地質年代や鉱物組成と膠結作用の程度の関係について検討する．

表 2-1　本研究の実施計画（2018 年度時点）

	2018 年度	2019 年度	2020 年度
上半期	・月布産原鉱石試料 ・アメリカ産原鉱石試料 ・中国産原鉱石試料	・月布産原鉱石の再構成試料（粒径 1～2 ケース） ・中国産原鉱石の再構成試料（粒径 1～2 ケース）	・富岡産原鉱石の再構成試料（粒径 1～2 ケース） ・アメリカ産原鉱石の再構成試料（粒径 1～2 ケース）
下半期	・富岡産原鉱石試料 ・月布産原鉱石の再構成試料（粒径 1～2 ケース）	・中国産原鉱石の再構成試料（粒径 1～2 ケース） ・富岡産原鉱石の再構成試料（粒径 1～2 ケース）	・アメリカ産原鉱石の再構成試料（粒径 1～2 ケース） （※以上の試験結果に応じて，いずれかの試料において 1～2 ケースの粒径を追加して行う）

表 2-2　本研究の実施計画（2019 年度初頭時点）

	2018 年度	2019 年度	2020 年度
上半期	・月布産原鉱石試料 ・アメリカ産原鉱石試料 ・中国産原鉱石試料	・月布産原鉱石の再構成試料（粒径 1～2 ケース） ・アメリカ産原鉱石の再構成試料（粒径 1 ケース）	・中国産原鉱石の再構成試料（粒径 1～2 ケース） ・富岡産原鉱石の再構成試料（粒径 1～2 ケース）
下半期	・富岡産原鉱石試料 ・月布産原鉱石の再構成試料（粒径 1～2 ケース）	・中国産原鉱石の再構成試料（粒径 1～2 ケース） ・アメリカ産原鉱石の再構成試料（粒径 1 ケース）	・富岡産原鉱石の再構成試料（粒径 1～2 ケース） （※以上の試験結果に応じて，いずれかの試料において 1～2 ケースの粒径を追加して行う）

（※赤字：成果報告委員会にて委員のコメントおよび 2018 年度の研究結果を踏まえて，前年の計画から変更した部分）

表 2-3　本研究の実施計画（2020 年度初頭時点）

	2018 年度	2019 年度	2020 年度
上半期	・月布産原鉱石試料 ・アメリカ産原鉱石試料 ・中国産原鉱石試料	・月布産原鉱石の再構成試料（粒径 1～2 ケース） ・アメリカ産原鉱石の再構成試料（粒径 1 ケース）	・月布産原鉱石の再構成試料（粒径 1 ケース） ・アメリカ産原鉱石の再構成試料（粒径 1 ケース） ・中国産原鉱石の再構成試料（粒径 1 ケース）
下半期	・富岡産原鉱石試料 ・月布産原鉱石の再構成試料（粒径 1～2 ケース）	・中国産原鉱石の再構成試料（粒径 1～2 ケース） ・アメリカ産原鉱石の再構成試料（粒径 1 ケース） ・月布産原鉱石試料，再構成試料の XRD・膨潤圧連携試験	・中国産原鉱石試料，再構成試料の XRD・膨潤圧連携試験 ・アメリカ産原鉱石試料，再構成試料の XRD・膨潤圧連携試験

（※赤字：成果報告委員会にて委員のコメントおよび 2019 年度の研究結果（3.3 節参照）を踏まえて変更した部分.）

3　2019 年度研究実施内容

3.1　2019 年度の計画、実施方法

2019 年度においては，まず月布産，中国産，アメリカ産の原鉱石試料を粉砕して粒径 0.425 mm 以下の粉末試料を作製し，締固めて作製した再構成供試体の膨潤圧試験，一次元膨潤変形試験を実施した．その後，粒径を 0.850～2 mm に調整した試料により作製した再構成供試体を作製し，同様に膨潤圧，一次元膨潤変形試験を実施した．原鉱石の鉱物組成について X 線回折等の化学的な検討を行った．表 3-1 に 2019 年度の研究スケジュールを示す．

表 3-1　2019 年度の研究スケジュール

項　目	2019/4	5	6	7	8	9	10	11	12	2020/1	2	3
再構成試料（粒径：～0.425 mm）の膨潤圧・膨潤変形特性の評価		→	→	→	→	→	→					
再構成試料（粒径：0.850～2 mm）の膨潤圧・膨潤変形特性の評価					→	→	→	→	→	→		
XRD･膨潤圧連携試験の実施（月布産原鉱石試料・再構成試料）						→	→	→	→	→		
原鉱石の鉱物組成などの化学的検討						→	→	→	→	→		
2019 年度報告書作成										→	→	

また，本項では使用した試料の基本的性質，不攪乱供試体と再構成供試体の作製方法，膨潤圧測定試験，XRD・膨潤圧連携試験，一次元膨潤変形試験および原鉱石の鉱物組成の化学的検討の概要について述べる．

3.1.1　使用した試料の概要

本研究で使用したベントナイト原鉱石は，山形県月布産の Na 型ベントナイト（以下月布産），群馬県富岡産の Ca 型ベントナイト（以下富岡産），中華人民共和国吉林省劉房子産の Na 型ベントナイト（以下中国産），アメリカ合衆国ワイオミング州 Ten Sleep 産の Na 型ベントナイト（以下アメリカ産）の計 4 種である．これらの原鉱石はいずれも続成変質作用により生成されたと考えられており，地質学的検討から地質年代として月布産は約 1000 万年，富岡産は約 1500 万年，中国産は約 1 億 5000 万年，アメリカ産は約 1 億年と考えられている[11),12),13),14)]．図 3-1 に使用した原鉱石サンプルの様子を示す．

図 3-1　原鉱石サンプルの様子（左から，月布産，中国産，アメリカ産，富岡産）

本研究では，原鉱石の基本的性質として土粒子の密度，液性限界，塑性限界，モンモリロナイト含有率，膨潤力，陽イオン交換容量（CEC）および交換性陽イオン容量（EXC）の測定を実施した．これらの測定に際しては，伊藤らの研究[15)]を参考とし，各原鉱石を粒径 0.425 mm 以下になるまで粉砕し，110℃に設定された乾燥炉内にて 24 時間乾燥した粉末試料を用いた．土粒子の密度および液性限界の測定は，小峯らの研究[16)]に則って行った．塑性限界の測定は日本工業規格「土の液性限界・塑性限界試験方法」（JIS A 1205：2009）[17)]にしたがって行った．メチレンブルー（MB）吸着量の測定は，ベントナイトの MB 吸着量試験（クニミネ工業株式会社認定試験方法）を参考として行った．モンモリロナイト含有率は，MB 吸着量試験により得られた MB 滴定量から純モンモリロナイト含有率を 140 mmol/100 g[18)]として算出した．また，膨潤力に関しては日本ベントナイト工業会標準試験方法[19)]の膨潤力（容積法）に基づいて実施した．また，CEC（陽イオン交換容量）および EXC（交換性陽イオン容量）の測定は，「地盤工学会基準（JGS0261-2009）：土の陽イオン交換容量（CEC）の試験方法」[20)]に基づいて行った．表 3-2 に以上の各試験から得られた，使用した原鉱石の基本的性質を示す．

表 3-2　原鉱石の基本的性質

	月布産	中国産	アメリカ産	富岡産
土粒子の密度(Mg/m^3)	2.77	2.73	2.67	2.61
液性限界(%)	438.5	541.6	588.2	83.1
塑性限界(%)	28.0	35.6	57.2	42.2
塑性指数	410.5	506.0	531.0	40.9
モンモリロナイト含有率(%)	44.7	51.1	50.4	45.8
膨潤力(ml/2g)	12	13	16	5.5
陽イオン交換容量 (meq/100g)	39.3	39.4	38.8	54.8
交換性 Na^+イオン容量 (meq/100g)	42.5	42.3	53.8	2.52
交換性 Ca^{2+}イオン容量 (meq/100g)	10.2	20.1	17.8	55.9
交換性 Mg^{2+}イオン容量 (meq/100g)	0.8	3.7	0.4	定量下限値以下
交換性 K^+イオン容量 (meq/100g)	定量下限値以下			

また，各原鉱石の鉱物組成を分析するため，粉末試料に対して X 線回折を実施した．今回用いたのは早稲田大学物性計測センターラボが保有する Rigaku 社製 RINT-UltimaⅢである．また，本試験の測定条件を表 3-3 に示す.

表 3-3　測定条件

光学系	集中法
測定範囲	5°～60°
ステップ	0.02°
スキャンスピード	10°/min
発散スリット	2/3°
散乱スリット	8.00mm
受光スリット	13.00mm

以上より得られた各原鉱石の X 線回折分析結果を図 3-2 に示す.

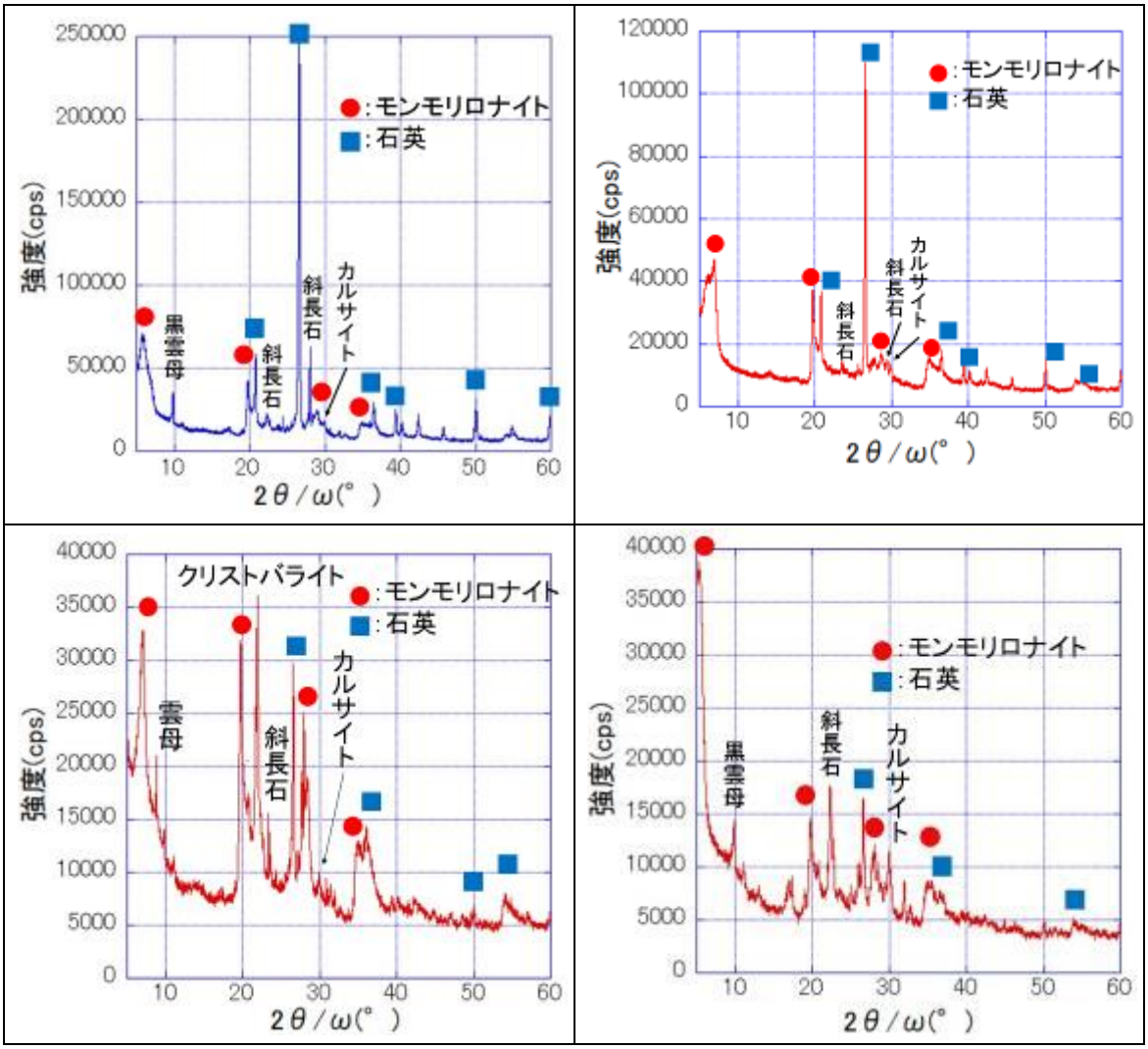


図 3-2　各原鉱石の粉末試料の鉱物組成分析結果（1 段目左：月布産，1 段目右：中国産，2 段目左：アメリカ産，2 段目右：富岡産）

3.1.2　不攪乱供試体および再構成供試体の作製方法

不攪乱供試体は，カッターリング，包丁，トリマーなどのトリミング用器具を用いて，直径 28 mm，高さ 10 mm の円柱形を目標に成形し，作製した．その際，亀裂やリングと岩片との間に隙間が生じないように留意した．一方，再構成供試体は岩片をメノウ乳鉢，乳棒もしくは破砕機を用いてすりつぶした後に任意の目のふるいにかけ，通過した粉末試料に対し，静的荷重を 15 分間作用させることにより締固め，作製した．粒径 0.425 mm 以下の試料は 0.425 mm ふるいを通過したものを，粒径 0.850～2 mm の試料は 2 mm ふるいを通過かつ 0.850 mm ふるい上に残存した試料をそれぞれ指す．図 3-3 に不攪乱供試体と再構成供試体の作製概念図を示す．

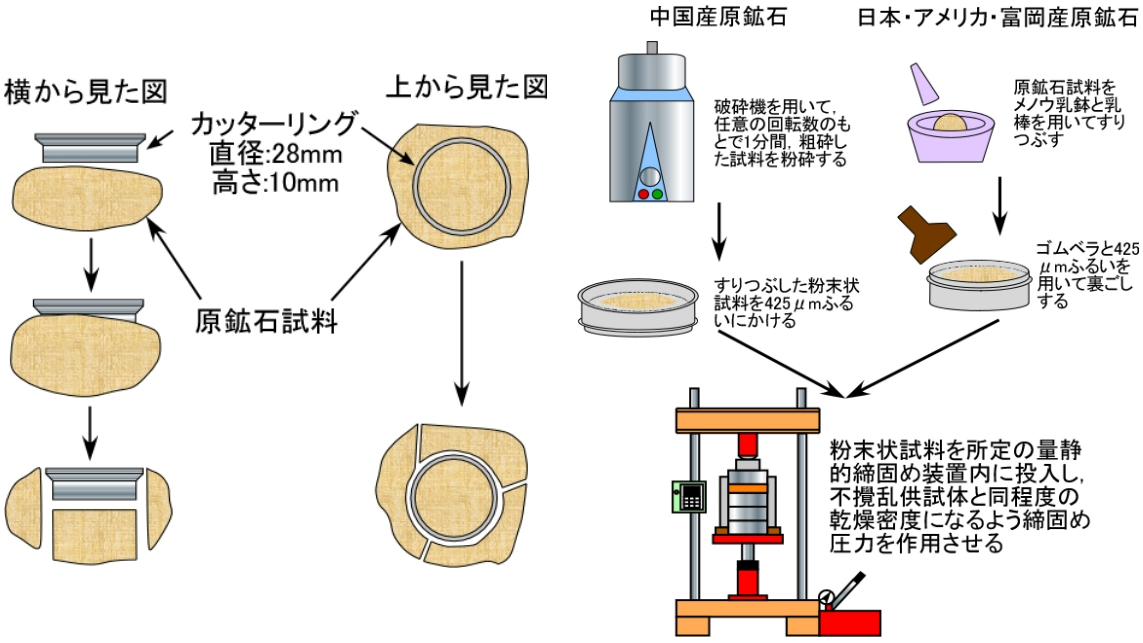


図 3-3　不攪乱供試体（左）と再構成供試体（右）の作製概念図

再構成供試体を作製した際の，締固め時の作用荷重（単位：kN）と供試体の乾燥密度（Mg/m^3）の関係を，月布産，アメリカ産，中国産のそれぞれについて図 3-4 に示す．

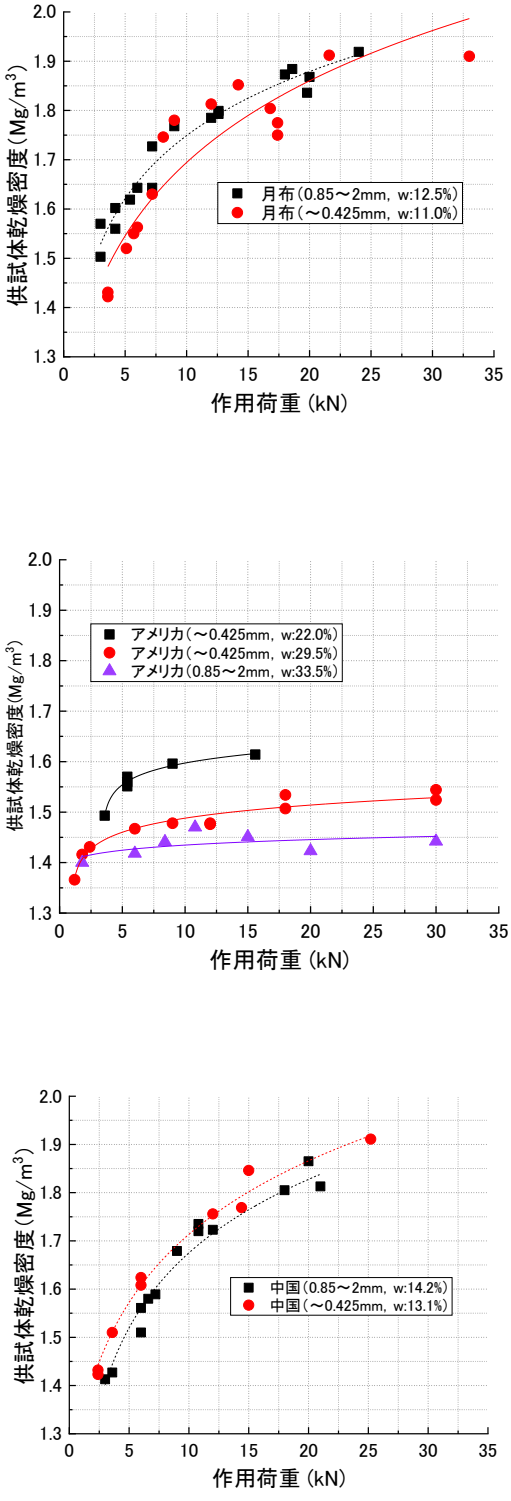


図 3-4　再構成供試体の作用荷重―乾燥密度の関係（上段：月布産，中段：アメリカ産，下段：中国産）

図 3-4 より，月布産，中国産原鉱石においては，作製後の供試体乾燥密度にバラつきが見られるものの，粒径 0.425 mm 以下および 0.85～2 mm のいずれもほぼ同様の曲線をしめすことが分かった．これより，今回作製した 2 種類の粒径においては，締固め性においてほぼ差異がないことが示唆された．一方で，アメリカ産原鉱石においては，粒径 0.425mm 以下の試料において，含水比 22.0％と 29.5%の曲線を比較すると，含水比の高い 29.5%の方が同一の荷重において低い供試体乾燥密度となることが分かった．これは，含水比が高い場合の方が，低い乾燥密度において飽和に近い状態となるためであると考えられる．また，粒径 0.425 mm（含水比 29.5%）と 0.850～2 mm を比較すると，0.850～2 mm の方が同一の荷重において低い乾燥密度となることが分かった. 0.850～2 mm の曲線では，作用荷重を上昇させても乾燥密度が 1.45 Mg/m^3 付近でほぼ横ばいになっており，後述する各種試験開始時の供試体の諸元を見ても，この付近でほぼ飽和に至っているものと考えられる. 膨潤圧・一次元膨潤変形試験においては，これらの作用荷重－乾燥密度関係を参考として供試体の作製を行った.

3.1.3　膨潤圧測定試験の概要

ベントナイト系緩衝材の吸水膨潤に伴い発生する膨潤圧に関して，過大である場合は他の人工バリアの損傷を引き起こす可能性があり，過小である場合地下水との接触に伴い流出による層厚の減少が考えられ，いずれの場合においてもバリア性能が低下を引き起こす可能性が考えられる．故に，緩衝材が膠結作用に伴い固結した場合の膨潤圧特性の変化を評価し，バリア性能の著しい低下が生じるかを照査することは非常に重要である．そこで本研究では，不攪乱供試体と再構成供試体を用いて膨潤圧測定試験を実施し，膨潤圧特性における膠結作用の影響に関して評価を行った．

本試験においては，図 3-5 に示す装置（以下，フレーム型と呼称）を用いた．本試験方法は参考文献 21)を参考として行ったものである．供試体下部から蒸留水を供給し，供試体の吸水膨潤に関して側方方向は SUS316L 製リングにより拘束し，鉛直方向の変形はクランプノブを締めることで抑制した．すなわち，本試験で測定する膨潤圧は，鉛直方向の膨潤変形を抑制するのに必要な圧力を指す．以下に本試験の手順を示す．まず，3.1.2 で述べた方法により作製した供試体を SUS316L 製リングに移し替え，供試体の上下端に定性ろ紙（No.5A）を設置し，膨潤特性実験容器を組み立てた．実験容器底板の下部給水口と二重管ビュレットをシンフレックスチューブにより接続した．次に，ベロフラムシリンダーの空気圧を調整することによりピストンを供試体上部に接触させ，クランプノブを締めることで鉛直方向の変位を固定した．そのまま 5 分程度放置した後，供試体への給水とロードセルによる膨潤圧および変形量の測定を開始した．また，試験開始時には 20～40 kPa の鉛直圧を作用させ，ピストンと供試体上端が確実に接触するよう留意した．膨潤圧の測定には，最大容量 50 kN，最小目盛 0.012 kN のロードセルを用いた．また，鉛直方向の変位は完全には抑制できないため，最大容量 25 mm，最小目盛り 0.002 mm の変位計を用いて変位量（膨潤変形量）を測定し，式(1)を用いて乾燥密度を補正した．

$$\rho_{d0} = \frac{m}{A \times (H_0 + \Delta d)} \times 1000 \qquad (1)$$

ここに，ρ_{d0}：乾燥密度補正値(Mg/m^3)，m：供試体乾燥質量(g)，A：供試体断面積(mm^2)，H_0：供試体初期高さ(mm)，Δd：供試体変位量(mm)である．

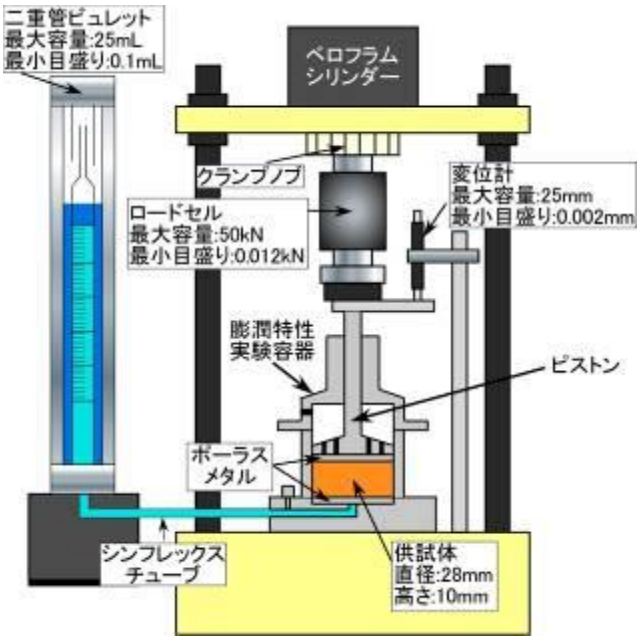


図 3-5　フレーム型膨潤圧試験装置の概略図

3.1.4　XRD・膨潤圧連携試験の概要

―本試験実施の背景―

ベントナイト系材料の膨潤圧試験はこれまでに，国内外の諸研究機関において数多く行われており，データベースが構築されてきた．しかし，参考文献 22)で報告されている通り，試験方法や試験装置の剛性の差異による影響や，同一の試験方法においても結果にバラつきが生じるなどの問題点が依然として存在する．本研究では，より小型・簡易で，かつ精度の高い試験方法および装置を構築することを目的として，図 3-6 に示す小型膨潤圧試験装置を製作した [23].

また，本研究ではこれまでに，不攪乱供試体における膨潤性低下のメカニズムとして，図 3-7 に示すように，セメンテーション物質の存在によるモンモリロナイト結晶層間の吸水に伴う膨潤変形が抑制されることを推察してきた．すなわち，不攪乱供試体と再構成供試体において，供試体の含水比は同等でありながら，モンモリロナイト結晶の底面間隔に差異が生じていると考えた．一般的に，ベントナイトの膨潤特性は，2 枚の Si と O で構成される四面体シートが Al と OH で構成される八面体シートを挟み込む構造である，モンモリロナイトの単位結晶間に水が浸入することに因ると考えられている．この単位結晶間の水は層間水を呼ばれており，単位結晶間の距離（底面間隔）は相対湿度や含水比に応じて層間水の量が変化することにより増減することが分かっている（図 3-8）．既往の研究の例として，粉体ベントナイトを異なる相対湿度下に置いて層間の水分子の量の変化を実験的に測定したもの [24]や，締固めたベントナイトに蒸留水を供給し，供試体の含水比と底面間隔の関係を実験的に評価したもの [25] などがある．本研究ではこの内参考文献 25)を参考とし，不攪乱供試体と再構成供試体の膨潤圧試験前後の含水比および XRD によるモンモリロナイト結晶の底面間隔の測定を行うことで，推察が正しいかを立証できると考えた．

―本試験方法の概要―

本試験方法は参考文献 23)および 25)を参考として行ったものである．小型膨潤圧試験装置の概要は図 3-6 に示すとおりである. 試験中は供試体下部より給水した．供試体の吸水膨潤に関して，側方方向は SUS303 製リング（直径 28 mm，厚さ 2 mm）により拘束し，鉛直方向の変形は試験装置下部のネジを締め，250～300 kPa の鉛直圧を作用させることで供試体下端と底板を確実に接触させるとともに，上部も 4 か所ネジ止めを行うことで拘束した．本試験では，厚さ 2 mm のリングを 2～3 枚重ね，リング間に厚さ 0.25～0.30 mm の 2 枚組リングを挟み込んでモールドとした．供試体は，3.1.2 で述べた方法により作製し，モールド内に移し替えた．その後，表 3-4 に示す測定条件のもとで，XRD によるモンモリロナイトの底面間隔（d_{001}）の測定を行った．XRD の測定後，供試体上下端に

定性ろ紙（No.5A）およびステンレスメッシュを設置し，装置を組み立てた．なお，供試体上端側のろ紙はあらかじめ圧縮しておいた．実験容器底板の下部給水口と二重管ビュレットをシンフレックスチューブにより接続した．次に，装置下部のネジを締め，250～300 kPa の圧力を作用させ，底板と供試体の下端を確実に接触させた．そのまま 2 時間程度放置した後，供試体への給水とロードセルによる膨潤圧の測定を開始した．今回，月布産原鉱石の不攪乱供試体と再構成供試体（粒径：～0.425 mm）を対象として試験を行った．供試体の諸条件および給水期間に関しては，後述する 3.2.3 の表 3-26 に示した．

膨潤圧の測定終了後に，試験装置を解体し，モールドおよび供試体を取り出した．その後，2 枚組リングを取り出し，厚さ 0.20～0.25 mm の糸鋸を用いて供試体を厚さ 2 mm ずつに切断した．切断後の供試体は XRD 測定時までパラフィルムを用いて密閉して置き，水分が蒸発するのを防いだ．その後，表 3-4 に示す条件で再び XRD によりモンモリロナイトの底面間隔の測定を行った．なお，厚さ 2 mm の供試体の両面についてそれぞれ測定を行い，測定面は図 3-9 に示すように名づけ，区別した．また，図 3-10 に XRD 測定の概念図を示す．

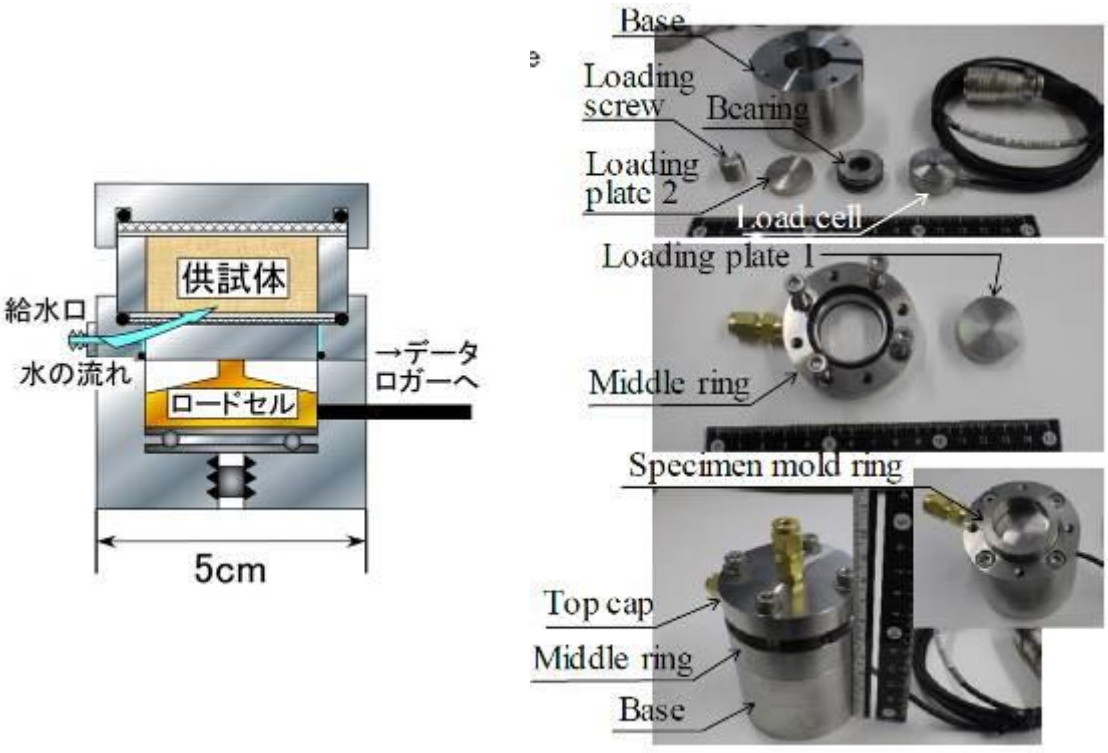


図 3-6　小型膨潤圧試験装置の概要

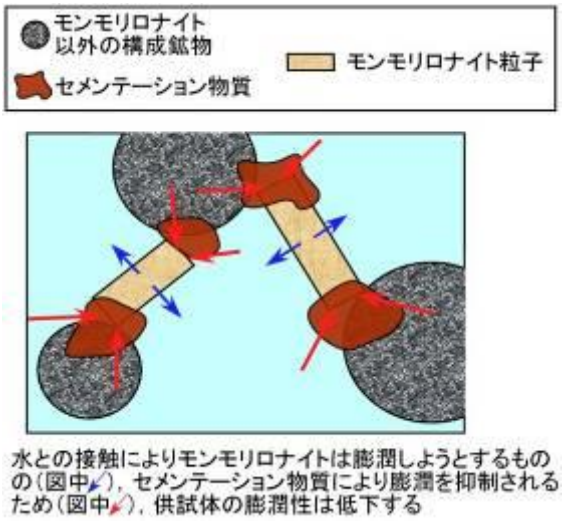


図 3-7　本研究における不攪乱供試体の膨潤圧低下メカニズムの推察

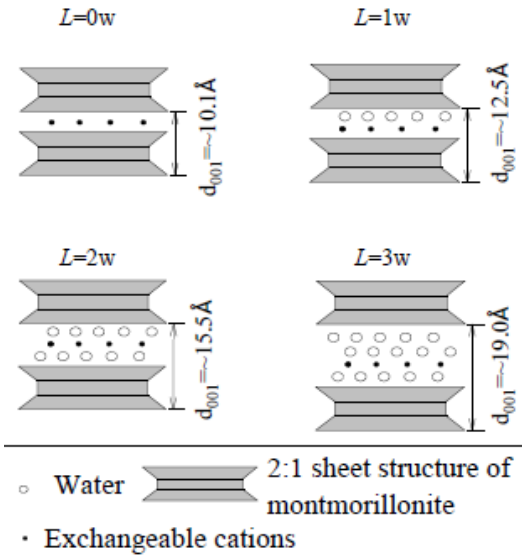


図 3-8　モンモリロナイト単位結晶の底面間隔と層間の水分子量の関係 [23)]

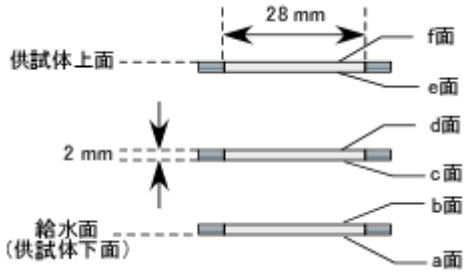


図 3-9　XRD 測定面の定義

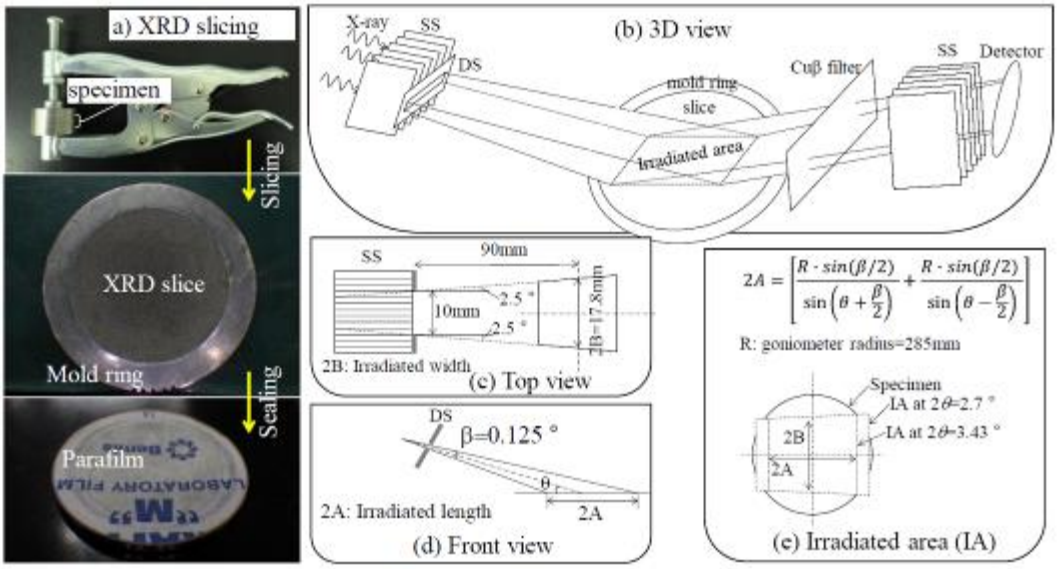


図 3-10　XRD 測定の概念図

表 3-4　測定条件

光学系	集中法
測定範囲	2.7°～45°
ステップ	0.02°
スキャンスピード	10°/min
発散スリット	1/8°
散乱スリット	8.00 mm
受光スリット	13.00 mm

3.1.5　一次元膨潤変形試験の概要

地層処分において廃棄体を埋設する際，施工上の観点から周辺岩盤とベントナイト系緩衝材の間には空隙が生じることが懸念される．故に，この空隙を地下水の吸水に伴う膨潤変形により充填すること（自己シール性）が，ベントナイト系緩衝材には期待されている．そこで本研究では，膠結作用による固結に伴う膨潤変形挙動の変化を評価するため，不攪乱供試体と再構成供試体を用いて，図 3-11 に示す装置により一次元膨潤変形率を測定した．3.1.3 および 3.1.4 で述べた膨潤圧測定試験装置との最大の違いは，本試験においては鉛直方向の膨潤変形を抑制せず, 鉛直圧 19.6 kPa のもとで膨潤変形量を測定する点である．本試験装置はステンレス製リング，ピストン，ペデスタル，載荷板から成る膨潤特性実験容器と，除震台，載荷用の重り，変位計，二重管ビュレットで構成される．載荷用の重りは載荷板，ピストンの重量と合わせて 19.6 kPa の載荷圧となるよう，ポリプロピレン製容器内に鉛玉を投入した．膨潤変形量の測定については，最大容量 25 mm，最小目盛り 0.002 mm の変位計を用いた．以下に本試験の手順を示す．まず，3.1.2 の方法で作製した供試体を SUS316L 製ステンレスリングに移し替え，その上下に定性ろ紙（No.5A）を設置し，膨潤特性実験容器を組み立てた．その後，載荷用の重りを載荷板上に載せ，供試体下部からの給水を開始すると同時に膨潤量の測定を開始した．また，膨潤変形量は初期供試体高さによる影響を受けるため，膨潤変形挙動の評価にあたっては変形量を初期供試体高さで除した値である，一次元膨潤変形率を式(2)により算出した．

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta S}{H_0} \times 100 \tag{2}$$

ここに，ε_s：一次元膨潤変形率（%），ΔS：膨潤変形量(mm)，H_0：供試体初期高さ(mm)である．

また，本試験においては，試験の終了のタイミングの目安として，参考文献 21）を参考に，一次元膨潤変形率の経時変化曲線が双曲線状となることに着目し，収束値の算出を行った．膨潤変形率の経時変化曲線を式(3)であらわされる双曲線で近似し，式(4)で求められる漸近線の切片を最大一次元膨潤変形率とし，その 80%の値を目安として実験を終了した．

$$\varepsilon_s(t) = \frac{t}{a + bt}\ (\%) \tag{3}$$

$$\varepsilon_{s\,max} = \lim_{t\to\infty} \varepsilon_s(t) = \frac{1}{b}\ (\%) \tag{4}$$

ここに，t：時間（min），ε_s(t)：時間 t における膨潤変形率（%），a，b：双曲線近似により求められる定数，$\varepsilon_{s\,max}$：最大膨潤変形率（%）である．

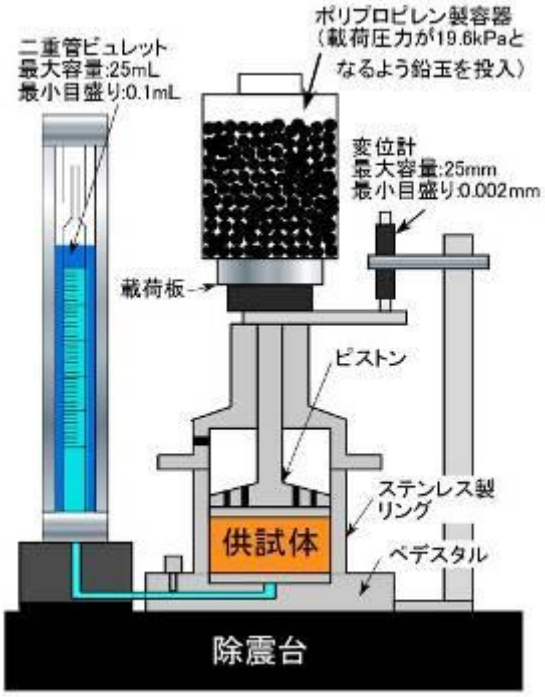


図 3-11　一次元膨潤変形試験装置

3.1.6　ベントナイト原鉱石の鉱物組成の定量評価に向けた化学的検討の概要

原鉱石の膨潤特性等の物理特性や，膠結作用のメカニズムを解明するために，原鉱石に含まれるモンモリロナイト以外の鉱物（以下，随伴鉱物と呼称する）を明らかにすることは重要である．そこで本研究では，随伴鉱物の定量評価に向けて，洗い出しによる定性評価と，内部標準法による定量評価の 2 つの方法を行った．本章ではその試験方法について述べる．

・洗い出しと XRD 分析による随伴鉱物の定性評価

本項では，ベントナイト原鉱石試料から随伴鉱物を洗い出しにより取り出し，XRD 分析により定性評価を行った実験的検討について述べる．

洗い出しの方法

まず, 湿潤状態の原鉱石試料 30 g を蒸留水 200 mL 中に 1 週間以上静置した. 静置した試料を 20 μm ふるい上に移し，流水を用いてモンモリロナイトとその他の鉱物の分離を行った．その後，ふるい上に残った試料に対し，更に 5 分程度，水道水によりモンモリロナイトを洗い流した．その後，40℃に設定したインキュベータ内で 3 時間程度乾燥させ，ふるい上の試料を回収した．

図 3-12　蒸留水中に静置した原鉱石試料の様子（左　4 つの内，左から月布産，アメリカ産, 中国産および富岡産）と中国産原鉱石の洗い出し中のふるい上残留分の様子（右）

XRD 分析の詳細

洗い出しにより得た試料に対し，XRD 分析を行い，随伴鉱物を定性的に同定した．今回用いたのは早稲田大学物性計測センターラボが保有する Rigaku 社の RINT-Ultima Ⅲである．XRD 分析の際には，スライドガラスを用いてガラス試料板に試料を充填した．また，測定結果にバラつきが生じることが予想されたため，各試料の随伴鉱物に対してそれぞれ 3 回ずつ測定を行った．XRD 分析を行った際の条件は以下のとおりである．

表 3-5　測定条件

光学系	集中法
測定範囲	2.7°～45°
ステップ	0.02°
スキャンスピード	10°/min
発散スリット	1/8°
散乱スリット	8.00mm
受光スリット	13.00mm

・内部標準法による随伴鉱物の定量評価

XRD を用いた試料中に含まれる鉱物の含有量を定量的に評価する方法の一つとして，内部標準法がある．内部標準法では，測定対象とする試料中の各鉱物の標準試料に対して一定量の既知物質を加え，回折強度面積を測定し，両者の面積比と鉱物の標準試料の割合との関係（検量線）を作製する．この検量線の関係をもとに，未知の測定対象試料に対して既知物質を加えて，試料中の各鉱物と既知物質の回折強度比を計算することで，試料中の各鉱物の含有割合を算出することができる [26]．ベントナイトに対して内部標準法を実施した研究事例として，伊藤らの研究 [18]や諸留らの研究 [27]がある．図 3-13 に一例として，検量線を用いた石英の重量含有割合の求め方を示す．

本研究では今回，諸留らの研究 [27]において得られた，石英・クリストバライト・斜長石・カルサイト・ドロマイト・クリノプチロライトの各鉱物のニチカ

製標準試料を用いた検量線データをもとに，各原鉱石中のこれらの鉱物の含有量を定量的に評価した．また，既知物質として諸留らの研究と同様，CaF_2 を用いた．表 3-6 に各鉱物の検量線データを示す．

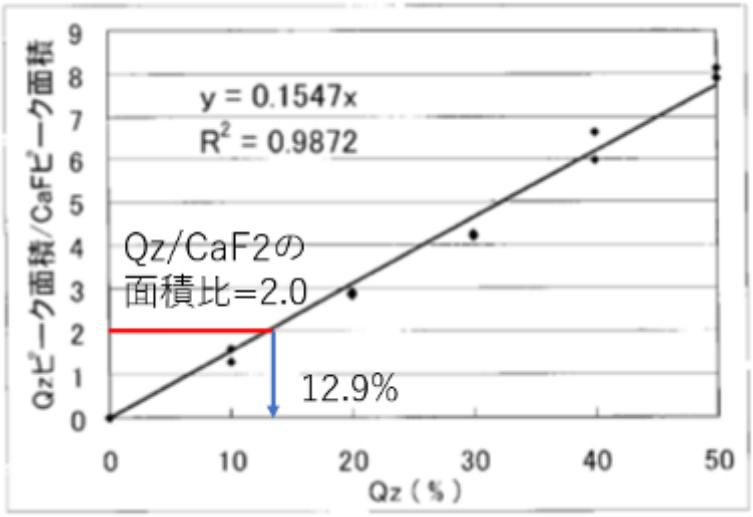


図 3-13　検量線を用いた石英の重量含有割合の算出例

表 3-6　各鉱物の検量線データ

鉱物名	検量線（x：各鉱物の重量割合，y：各鉱物のピーク面積/CaF_2 の面積）
石英	y=0.1547x
クリストバライト	y=0.1238x
斜長石	y=0.0496x
カルサイト	y=0.0815x
ドロマイト	y=0.1105x
クリノプチロライト	y=0.01x
パイライト	y=0.0196x

試料の準備に当たっては，まず乾燥させたベントナイト試料 0.5 g に対して，重量比で 10%となる 0.05 g の CaF_2 を添加した．この混合試料をメノウ乳鉢・乳棒を用いて，少なくとも 5 分間粉砕・混合を行い，XRD の測定に供した．今回使用したのは早稲田大学物性計測センターラボが保有する Rigaku 社製 RINT-UltimaⅢである．表 3-7 に XRD の測定条件を示す.

表 3-7　XRD の測定条件

方法	集中法
測定範囲	2.7～60°
スピード	10°/min
ステップ幅	0.02°

次に，XRD により得られた結果の解析方法について述べる．今回は Rigaku 社の統合粉末 X 線解析ソフトウェアである PDXL を用いた．本ソフトを用いて，バックグランド値の処理，ピークの平滑化および積分強度の算出を一括で実施した．また，各鉱物の積分強度から重量比の含有割合を算出する上で基準値とする CaF_2 のピークとして，諸留らの研究を参考とし，47°付近に存在する第二ピークを用いた．また，各試料について 2 回ずつ測定を行った.

3.2　2019 年度の成果内容

本項では，膨潤圧試験，一次元膨潤変形試験および XRD・膨潤圧連携試験により得られた結果について述べる．また，鉱物組成の定量評価に向けた化学的検討の結果についても述べる．

3.2.1　再構成供試体における膨潤圧挙動

・月布産原鉱石

表 3-8, 3-9, 3-10 に月布産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm, 0.850～2 mm）および不撹乱供試体の供試体諸元を示す．また，図 3-14 に粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体および不撹乱供試体の膨潤圧の経時変化曲線をそれぞれ示す．

表 3-8　月布産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の諸元

試験名	膨潤圧試験(月布～0.425mm)						
試料名	再構成 1	再構成 2	再構成 3	再構成 4	再構成 5	再構成 6	再構成 7
試験開始時の乾燥密度(Mg/m^3)	1.69	1.80	1.83	1.42	1.55	1.76	1.91
最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m^3)	1.67	1.71	1.81	1.42	1.54	1.73	1.90
初期含水比(%)	9.1	6.1	9.3	10.8	10.8	10.8	10.8
初期飽和度（%）	39.4	31.2	50.7	31.7	38.4	52.1	66.9
試験終了時含水比（%）	24.2	20.9	21.4	33.6	28.8	21.6	17.0
試験終了時飽和度（%）	105.0	104.7	114.8	97.7	100.7	98.8	102.8
最大膨潤圧(kPa)	1155	1593	2680	458	597	1861	4653

表 3-9　月布産原鉱石の再構成供試体（粒径 0.850～2 mm）の諸元

試験名	膨潤圧試験(月布 0.850～2mm)						
試料名	再構成 1	再構成 2	再構成 3	再構成 4	再構成 5	再構成 6	再構成 7
試験開始時の乾燥密度(Mg/m^3)	1.50	1.72	1.79	1.87	1.87	1.62	1.48
最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m3)	1.50	1.72	1.77	1.86	1.85	1.61	1.48
初期含水比(%)	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	11.2
初期飽和度（%）	41.0	57.2	63.3	72.4	71.8	48.8	35.7
試験終了時含水比（%）	31.1	22.9	20.2	19.0	18.2	25.2	32.0
試験終了時飽和度（%）	102.3	103.6	98.8	107.0	101.5	97.3	102.4
最大膨潤圧(kPa)	657	1433	1923	2181	2320	956	598

表 3-10　月布産原鉱石の不攪乱供試体の諸元

原鉱石	膨潤圧試験（月布不攪乱）				
試料名	不攪乱 1	不攪乱 2	不攪乱 3	不攪乱 4	不攪乱 5
試験開始時の乾燥密度(Mg/m^3)	1.72	1.85	1.73	1.71	1.73
最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m3)	1.71	1.81	1.72	1.69	1.72
初期含水比(%)	12.3	10.4	10.0	9.4	13.9
初期飽和度(%)	56.0	57.8	46.1	42.0	64.1
試験終了時含水比(%)	22.9	19.9	25.0	21.8	21.6
試験終了時飽和度(%)	102.5	108.6	113.8	94.3	98.8
最大膨潤圧(kPa)	480	757	1036	833	677

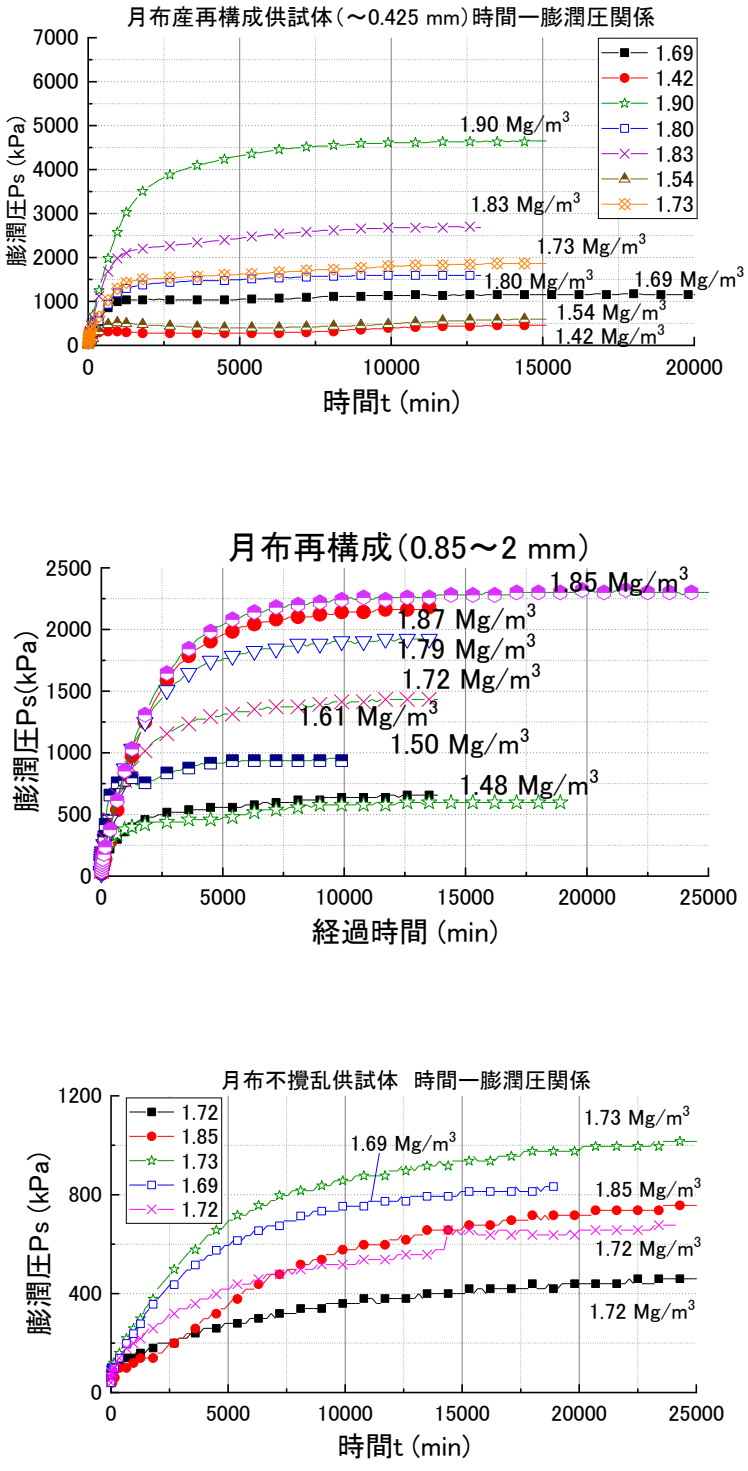


図 3-14　粒径～0.425 mm（上），0.850～2 mm の再構成供試体（中）および不攪乱供試体（下）の膨潤圧の経時変化曲線

粒径～0.425 mm の再構成供試体において，膨潤圧は試験開始直後に急激に上昇した後に，約 2000 分経過後は一定値に収束する傾向であった．乾燥密度が比較的低い 1.42～1.69 Mg/m^3 の供試体においては，約 1000 分経過後に一度膨潤圧のピークを迎えた後，約 5000 分経過時まで値が緩やかに下降し，その後また緩やかに上昇する挙動が見られ，これは小峯らの研究 [25]と一致する挙動であった．

粒径 0.850～2 mm の再構成供試体において，膨潤圧は試験開始直後に急激に上昇した後に，約 5000 分経過後は一定値に収束する傾向であった．一定値に収束するまでに要する時間は粒径～0.425 mm のケースに比べて長く，これはベントナイトの透水性が低いために，粒径が大きい方が粒子全体の飽和とそれに伴う膨潤圧の発現により長時間を要するためと考えられる．なお，粒径～0.425 mm の低乾燥密度の供試体において見られた，開始直後のピークを迎えた後の膨潤圧の一次的な低下は見られなかった．

不攪乱供試体において，膨潤圧の上昇は再構成供試体に比べて緩やかであることが分かり，いずれの供試体においても値が一定値に収束するまでに約 15000 分以上要した．これは，不攪乱供試体において，セメンテーションにより土粒子構造が複雑となっており，膨潤圧の発現に時間を要したものと推察する．

図 3-15 に粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体および不攪乱供試体における，供試体の試験終了時の乾燥密度と最大膨潤圧の関係を示す．

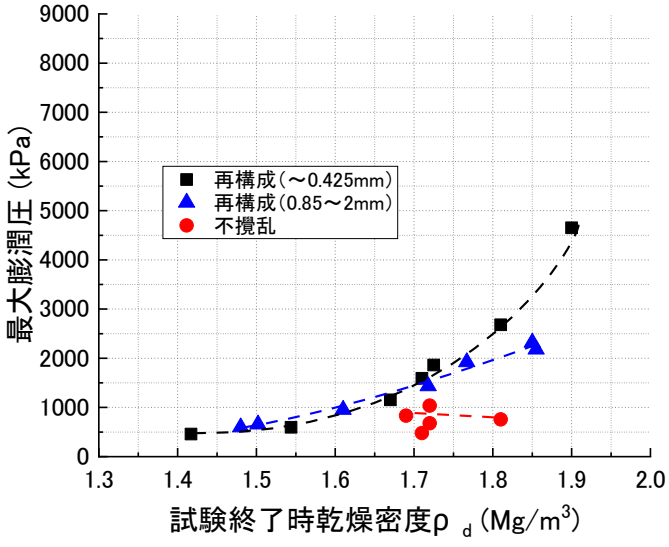


図 3-15　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の試験終了時の供試体乾燥密度と最大膨潤圧の関係

これより，再構成供試体においては粒径に因らず，乾燥密度の上昇に応じて最大膨潤圧が上昇する傾向が見られた．加えて，1.4～1.7 Mg/m^3 の範囲において

は粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の値に大きな差異は見られないが，1.8 Mg/m^3 よりも高乾燥密度の領域において，膨潤圧の差異が広がる傾向が見られた．これは，乾燥密度が高い場合には初期状態の空隙が小さく，粒子の吸水膨潤に伴う変形が許容されないために，粒子が有する固結の影響が残存したものと推察する．不攪乱供試体の値はバラつきが大きく，再構成供試体に比べて膨潤圧の値が小さい傾向が見られた．

・アメリカ産原鉱石

表 3-11，3-12，3-13 にアメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm，0.850～2 mm）および不攪乱供試体の供試体諸元をそれぞれ示す．図 3-16 に粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の粉末状試料を締固めて作製した再構成供試体および不攪乱供試体の膨潤圧の経時変化曲線をそれぞれ示す．

表 3-11　アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の諸元

試験名	膨潤圧試験(アメリカ～0.425mm)										
試料名	再構成 1	再構成 2	再構成 3	再構成 4	再構成 5	再構成 6	再構成 7	再構成 8	再構成 9	再構成 10	再構成 11
試験開始時の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.48	1.55	1.49	1.55	1.60	1.61	1.30	1.42	1.43	1.48	1.52
最大膨潤圧発生時の乾燥密度 (Mg/m3)	1.47	1.52	1.48	1.51	1.58	1.59	1.36	1.40	1.42	1.46	1.51
初期含水比 (%)	22.9	22.9	22.0	22.0	22.0	22.0	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5
初期飽和度（%）	76.6	84.7	74.8	81.5	87.5	90.0	61.6	66.6	68.0	72.9	103.7
試験終了時含水比（%）	31.0	30.9	34.1	31.1	30.2	29.2	38.9	37.0	36.3	33.9	30.0
試験終了時飽和度（%）	102.0	109.5	112.6	108.8	116.5	115.6	108.4	108.7	109.8	108.9	104.4
最大膨潤圧 (kPa)	3902	3683	3027	3901	4660	4819	1613	1970	2201	3332	3924

表 3-12　アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径 0.850～2 mm）の諸元

試験名	膨潤圧試験(アメリカ 0.850～2mm)				
試料名	再構成 1	再構成 2	再構成 3	再構成 4	再構成 5
試験開始時の乾燥密度(Mg/m^3)	1.40	1.46	1.44	1.47	1.52
最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m3)	1.38	1.44	1.44	1.45	1.50
初期含水比(%)	33.5	33.5	33.5	27.8	27.8
初期飽和度（%）	98.3	109.0	105.4	90.9	98.0
試験終了時含水比（%）	38.2	33.8	31.9	33.2	32.4
試験終了時飽和度（%）	109.4	106.8	99.6	105.6	111.7
最大膨潤圧(kPa)	1872	2647	2627	2408	2776

表 3-13　アメリカ産原鉱石の不攪乱供試体の諸元

試験名	膨潤圧試験（アメリカ不攪乱）			
試料名	不攪乱 1	不攪乱 2	不攪乱 3	不攪乱 4
試験開始時の乾燥密度(Mg/m^3)	1.50	1.46	1.49	1.52
最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m3)	1.48	1.46	1.48	1.51
初期含水比(%)	32.2	32.2	29.0	27.0
初期飽和度（%）	110.1	103.4	97.5	95.6
試験終了時含水比（%）	36.3	36.8	34.1	31.2
試験終了時飽和度（%）	120.6	118.2	113.5	107.8
最大膨潤圧(kPa)	678	678	892	1134

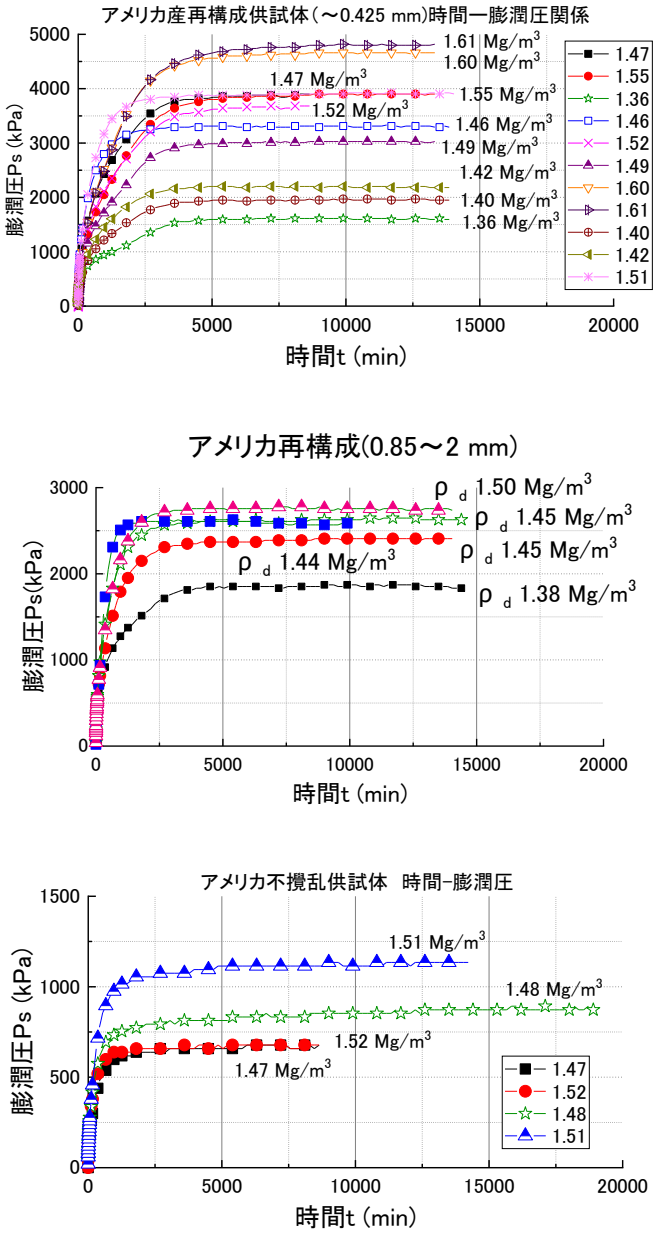


図 3-16 粒径～0.425 mm の再構成供試体（上），0.850～2 mm の再構成供試体（中）および不撹乱供試体（下）の膨潤圧の経時変化曲線

粒径～0.425 mm の再構成供試体において，膨潤圧は試験開始直後に急激に上昇した後に，約 5000 分経過後は一定値に収束する傾向であった．供試体の乾燥密度に因らず，約 1000 分まで急上昇した後に勾配が緩やかになり，約 3000 分以降は一定値に収束するという，2 段階に分かれた上昇過程が見受けられた．

粒径 0.850～2 mm の再構成供試体において，試験開始直後に急激に上昇した後に，約 3000 分経過後は一定値に収束する傾向であった．粒径～0.425 mm において見られた，2 段階に分かれた上昇は見られなかった．

不攪乱供試体においても再構成供試体（粒径：0.850～2 mm）と同様，約 3000 分まで膨潤圧が急激に上昇し，その後一定値に収束する挙動であった．

図 3-17 に粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体および不攪乱供試体における，供試体の試験終了時の乾燥密度と最大膨潤圧の関係をそれぞれ示す．

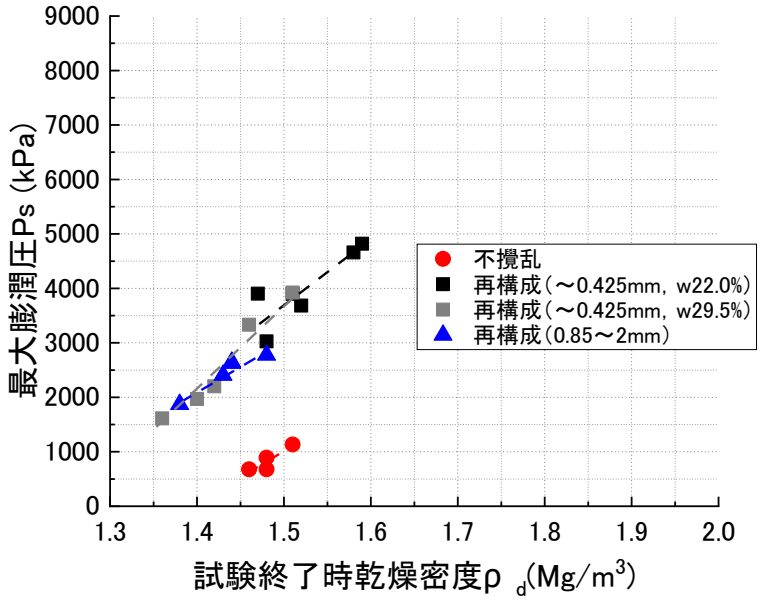


図 3-17　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の試験終了時の供試体乾燥密度と最大膨潤圧の関係

これより，粒径によらず再構成供試体においては，乾燥密度の増加に応じて膨潤圧が一直線状に上昇する傾向が見られた．なお，月布産原鉱石や後述する中国産原鉱石に比べて供試体の乾燥密度が低い傾向であるが，これは初期含水比が他の 2 つに比べ 22～30%と極めて高く，低乾燥密度において飽和度が 100%に近くなることによるものである．乾燥密度 1.4～1.5 Mg/m^3 において，粒径～0.425 mm（含水比 29.5%）および 0.850～2 mm を比べると，粒径～0.425 mm の方が乾燥密度の増加に対する増加率が高い傾向が見られ，これは月布産原鉱石と同様の傾向である．なお，不攪乱供試体の値は再構成供試体に比べて約 1/3 程度に留まる傾向であった．

・中国産原鉱石

表 3-14，3-15，3-16 に再構成供試体（粒径～0.425 mm，0.850～2 mm）および不攪乱供試体の供試体諸元を示す. また, 図 3-18 に粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の粉末状試料を締固めて作製した再構成供試体の膨潤圧の経時変化曲線をそれぞれ示す.

表 3-14　中国産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の諸元

試験名	膨潤圧試験(中国～0.425mm)									
試料名	再構成 1	再構成 2	再構成 3	再構成 4	再構成 5	再構成 6	再構成 7	再構成 8	再構成 9	再構成 10
試験開始時の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.90	1.90	1.90	1.90	1.43	1.62	1.76	1.90	1.77	1.63
最大膨潤圧発生時の乾燥密度 (Mg/m3)	1.87	1.89	1.87	1.89	1.42	1.60	1.71	1.88	1.76	1.62
初期含水比 (%)	12.0	12.0	12.0	12.0	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1
初期飽和度（%）	69.9	72.0	70.7	71.2	39.4	52.7	64.5	82.7	66.1	53.3
試験終了時含水比（%）	NA	NA	20.3	20.5	37.5	29.4	25.8	21.7	23.2	29.8
試験終了時飽和度（%）	NA	NA	120.6	126.2	111.5	114.1	118.9	131.3	115.2	119.5
最大膨潤圧 (kPa)	5777	6220	8007	7867	635	1431	2604	6123	4105	1493

NA：未測定

表 3-15　中国産原鉱石の再構成供試体（粒径 0.850～2 mm）の諸元

試験名	膨潤圧試験(中国 0.850～2mm)						
試料名	再構成 1	再構成 2	再構成 3	再構成 4	再構成 5	再構成 6	再構成 7
試験開始時の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.56	1.59	1.73	1.81	1.84	1.43	1.89
最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m3)	1.56	1.59	1.71	1.80	1.84	1.43	1.86
初期含水比 (%)	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2
初期飽和度（%）	51.8	54.2	67.6	76.7	79.7	42.5	86.7
試験終了時含水比（%）	32.0	29.4	25.8	23.5	22.8	36.8	21.5
試験終了時飽和度（%）	116.2	111.2	117.4	125.2	128.6	110.0	126.0
最大膨潤圧 (kPa)	837	1154	1805	2142	2657	535	4264

表 3-16　中国産原鉱石の不攪乱供試体の諸元

試験名	膨潤圧試験（中国不攪乱）		
試料名	不攪乱 1	不攪乱 2	不攪乱 3
試験開始時の乾燥密度(Mg/m^3)	1.84	1.84	1.84
最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m3)	1.82	1.84	1.83
初期含水比(%)	15.8	16.7	15.0
初期飽和度（%）	83.1	91.1	82.1
試験終了時含水比（%）	NA	NA	NA
試験終了時飽和度（%）	NA	NA	NA
最大膨潤圧(kPa)	2086	560	2452

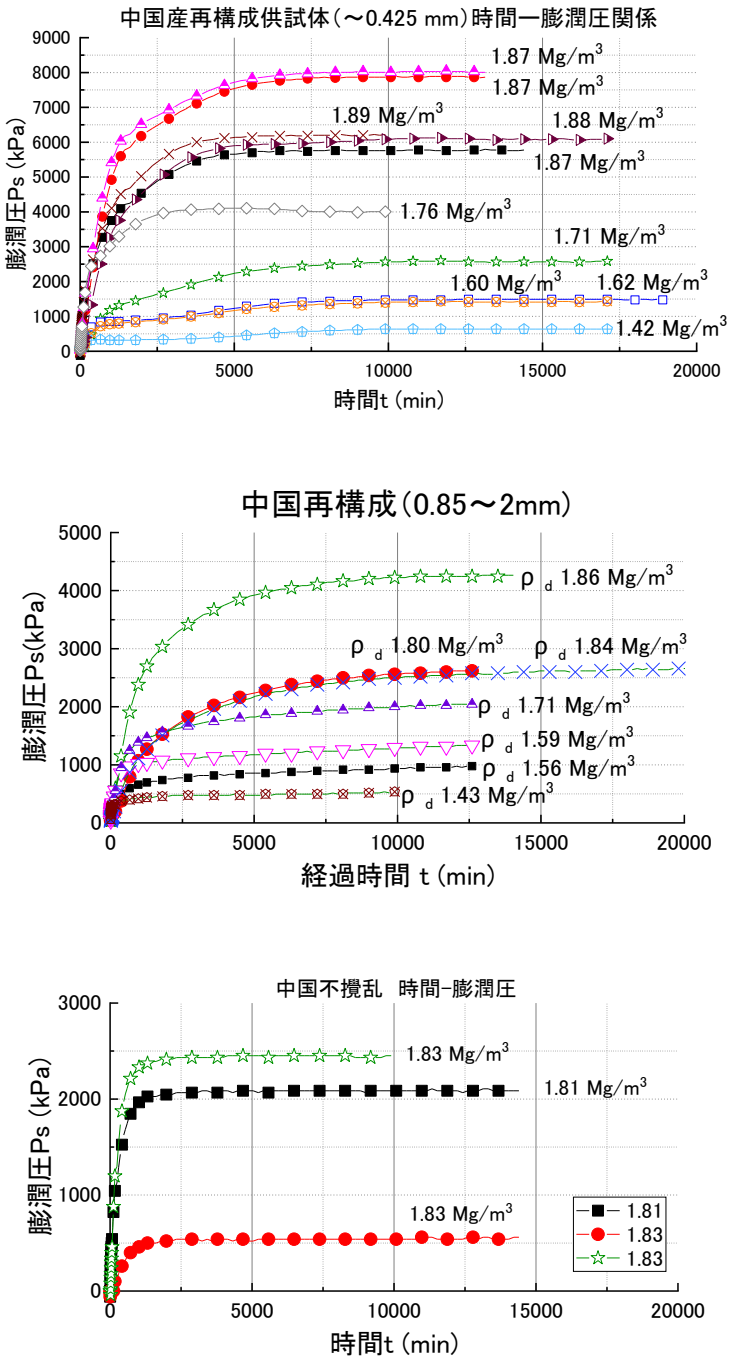


図 3-18　粒径～0.425 mm の再構成供試体（上），0.850～2 mm の再構成供試体（中）および不撹乱供試体の膨潤圧の経時変化曲線

粒径～0.425 mm の再構成供試体において，膨潤圧は試験開始直後に急激に上昇した後に，約 5000 分経過後は一定値に収束する傾向であった．乾燥密度が 1.42～1.62 Mg/m^3 の比較的低乾燥密度の供試体においては，圧力の上昇ピークの後

に一度圧力が低下する挙動が見られ，これは月布産原鉱石の粒径～0.425 mm と同様の傾向であった．なお，乾燥密度によらず一定値に収束するまでに要する時間に大きな差異や傾向は見られなかった．

粒径 0.850～2 mm の再構成供試体において，試験開始直後に急激に上昇した後に，約 5000 分経過後は一定値に収束する傾向であった．なお，一定値に収束するまでに要する時間は，乾燥密度が高くなるほど長くなる傾向であった．

図 3-19 に粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体および不攪乱供試体における，供試体の試験終了時の乾燥密度と最大膨潤圧の関係をそれぞれ示す．

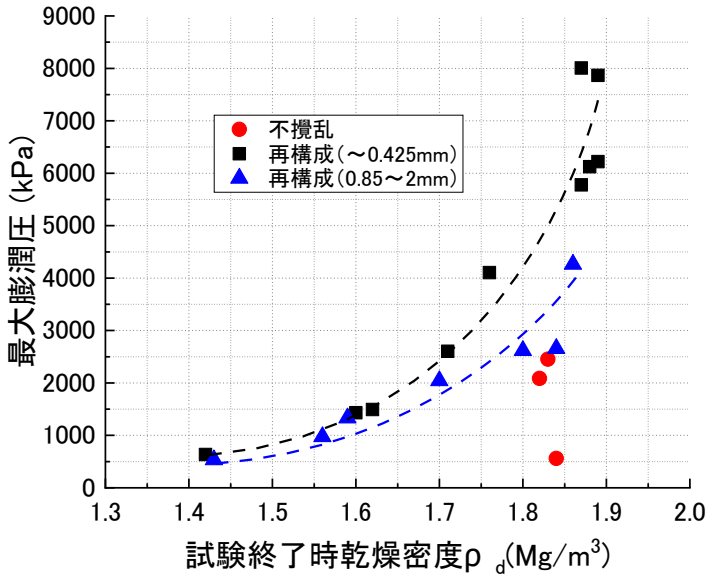


図 3-19　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の試験終了時の供試体乾燥密度と最大膨潤圧の関係

再構成供試体においては，粒径に因らず乾燥密度が大きくなるにつれて，最大膨潤圧が上昇する傾向が見られた．粒径～0.425 mm と 0.850～2 mm を比較すると，月布産原鉱石と同様，比較的乾燥密度の低い 1.4～1.7 Mg/m^3 の領域においては両者の値はほぼ同程度であるが，1.7 Mg/m^3 よりも高乾燥密度においては差異が大きくなる傾向であった．また，不攪乱供試体においては値のバラつきが大きく，再構成供試体に比べて値が小さい傾向であった．

3.2.2 再構成供試体における膨潤変形挙動

・月布産原鉱石

表 3-17，3-18，3-19 に再構成供試体（粒径～0.425 mm，0.850～2 mm）および不攪乱供試体の供試体諸元を示す. また, 図 3-20 に粒径～0.425 mm, 0.850～2 mm の再構成供試体および不攪乱供試体の一次元膨潤変形率の経時変化曲線をそれぞれ示す.

表 3-17　月布産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の供試体諸元

	膨潤変形試験（月布～0.425mm）							
試料名	再構成 1	再構成 2	再構成 3	再構成 4	再構成 5	再構成 6	再構成 7	再構成 8
試験開始時の乾燥密度(Mg/m^3)	1.80	1.57	1.62	1.43	1.56	1.81	1.91	1.76
試験終了時の乾燥密度(Mg/m^3)	0.64	0.72	0.61	0.58	0.60	0.66	0.64	0.68
試験終了時含水比（%）	NA	NA	NA	132.0	129.7	116.1	121.3	124,6
試験終了時飽和度（%）	NA	NA	NA	96.6	99.0	101.5	101.6	111.6
初期含水比(%)	10.3	10.4	11.2	11.0	11.0	11.0	11.0	10.3
初期飽和度（%）	65.4	38.1	53.9	32.7	39.6	57.8	68.1	49.7
最大一次元膨潤変形率(%)	196.1	122.0	185.2	169.5	188.7	208.3	243.9	200.0

表 3-18　月布産原鉱石の再構成供試体（粒径 0.850～2 mm）の供試体諸元

	膨潤変形試験（月布 0.850～2mm）				
試料名	再構成 1	再構成 2	再構成 3	再構成 4	再構成 5
試験開始時の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.56	1.79	1.92	1.66	1.46
試験終了時の乾燥密度 (Mg/m^3)	0.63	0.66	0.68	0.71	0.63
試験終了時含水比（%）	122.5	119.7	113.9	119.2	126.0
試験終了時飽和度（%）	100.9	103.5	103.0	113.3	103.0
初期含水比(%)	12.5	12.5	12.5	11.2	11.2
初期飽和度（%）	44.7	63.7	78.2	46.7	34.6
最大一次元膨潤変形率(%)	169.5	204.1	217.4	158.7	156.3

表 3-19　月布産原鉱石の不攪乱供試体の供試体諸元

原鉱石	膨潤変形試験（月布不攪乱）							
試料名	不攪乱 1	不攪乱 2	不攪乱 3	不攪乱 4	不攪乱 5	不攪乱 6	不攪乱 7	不攪乱 8
試験開始時の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.83	1.61	1.69	1.76	1.77	1.74	1.69	1.72
試験終了時の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.54	0.77	0.62	0.65	0.76	1.19	0.69	0.66
試験終了時含水比（%）	26.3	61.2	81.4	NA	98.2	66.2	117.8	117.7
試験終了時飽和度（%）	91.9	65.9	64.5	NA	103.9	138.7	109.4	102.2
初期含水比(%)	10.5	12.7	14.7	11.2	10.1	15.6	12.4	13.4
初期飽和度（%）	48.7	56.3	59.6	54.2	49.3	71.9	53.9	60.9
最大一次元膨潤変形率(%)	18.3	107.6	173.8	173.0	131.0	80.0	156.3	166.7

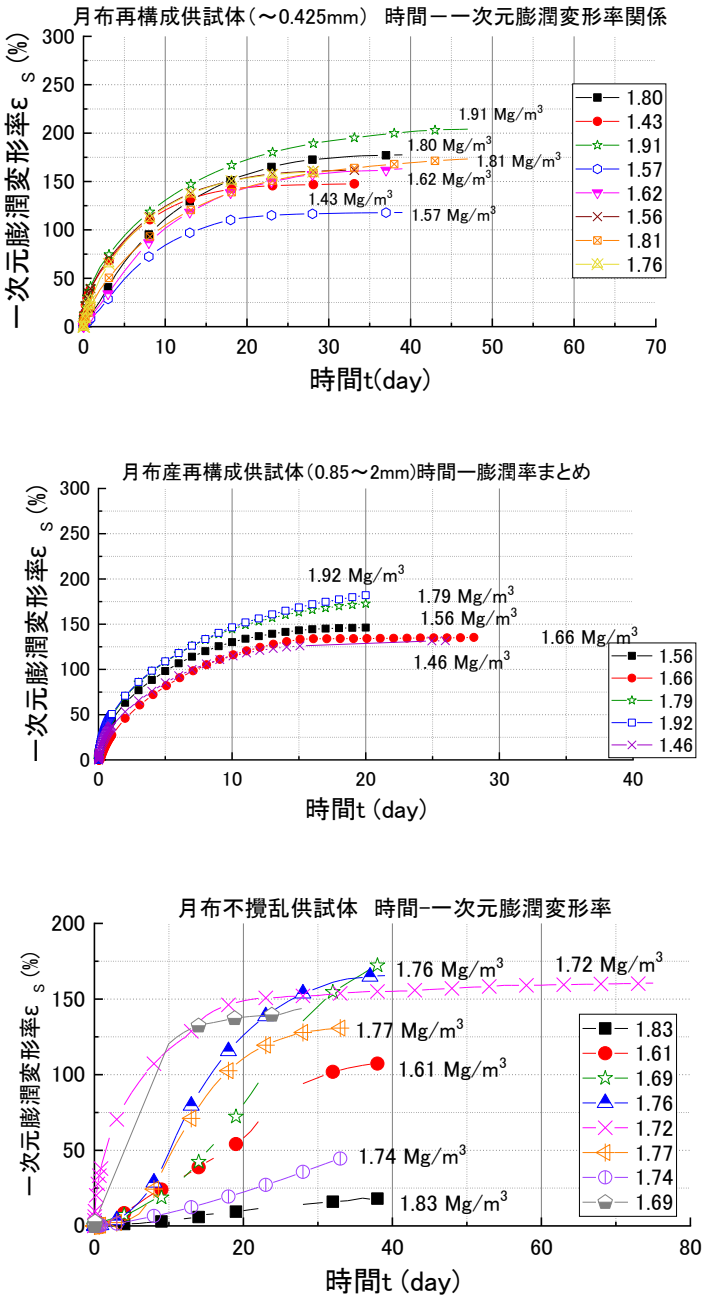


図 3-20 粒径～0.425 mm の再構成供試体（上），0.850～2 mm の再構成供試体（中）および不攪乱供試体の一次元膨潤変形率の経時変化曲線

粒径～0.425 mm および 0.85～2 mm の再構成供試体において，時間の経過に応じた一次元膨潤変形率の増加挙動は双曲線状であることが分かる．また，一定値に収束するまでに要する時間を比較すると，粒径～0.425 mm の方が 10 日程長い傾向が見受けられた．

不攪乱供試体において，一次元膨潤変形率の増加挙動についてはバラつきが

あるものの，大半の供試体においては，再構成供試体に比べて試験開始直後の増加分が小さく，10～20 日程度遅れて双曲線状に上昇する傾向が見受けられた．このことから，不攪乱供試体においては，膠結作用の影響により水分と接触しても即座に膨潤変形するのではなく，水分と接触してモンモリロナイトが徐々に膨潤し，それとともにセメンテーションが消失して膨潤変形挙動を開始する挙動が生じていると推察する．

また，図 3-21 に不攪乱供試体と再構成供試体の乾燥密度と最大一次元膨潤変形率の関係を示す．

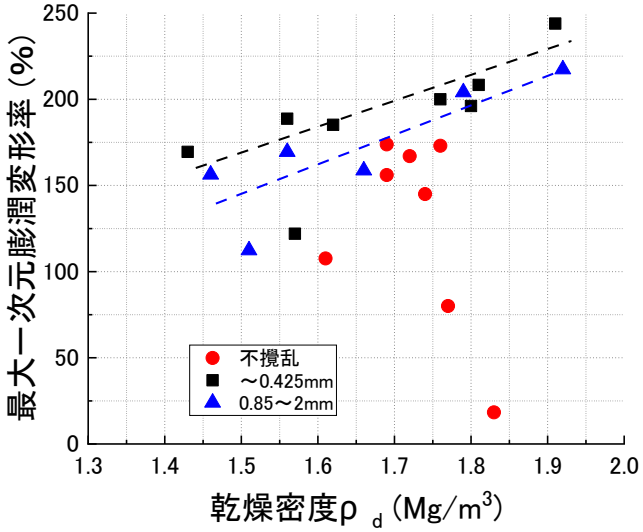


図 3-21　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の試験開始時の供試体乾燥密度と最大一次元膨潤変形率の関係

これより，再構成供試体においては，粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm のいずれにおいても，乾燥密度の増加に応じて最大一次元膨潤率が直線的に増加している傾向が見受けられる．なお，粒径～0.425 mm と 0.850～2 mm を比べると，若干ではあるが粒径 0.850～2 mm の方が最大一次元膨潤変形率の値が小さい傾向であり，これは粒子径が大きいことで固結の影響が残存し，膨潤変形挙動が若干低下したものと推察される．一方，不攪乱供試体では乾燥密度が 1.7 Mg/m^3 までの領域では増加傾向であることが分かるが，1.7 Mg/m^3 より高い領域では逆に低下する傾向が見られた．この挙動のメカニズムについては現在分かっておらず，今後の研究課題である．

また，図 3-22 に再構成供試体と不攪乱供試体における，試験開始時の供試体乾燥密度と試験終了時乾燥密度の関係を示す．

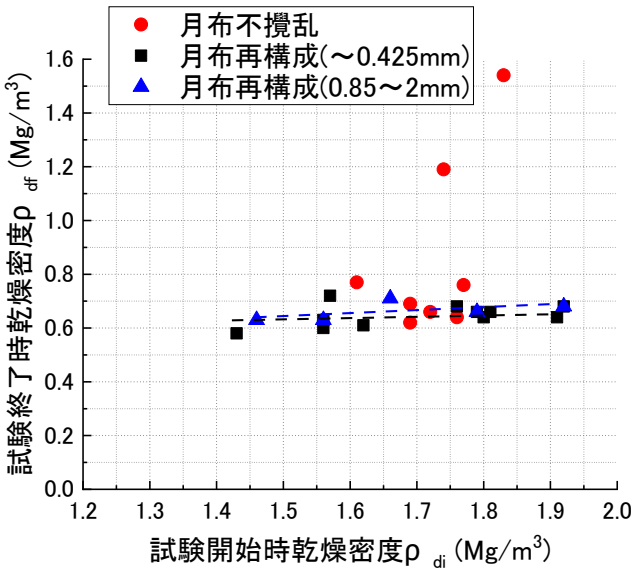


図 3-22　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の試験開始時の供試体乾燥密度と試験終了時の供試体乾燥密度の関係

これより，再構成供試体においては，粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm のいずれにおいても，試験開始時の供試体乾燥密度に因らず試験終了時の乾燥密度が 0.6～0.7 Mg/m^3 の範囲に収まることが分かる．一方で，不攪乱供試体においては，大半の供試体が再構成供試体と同様の終了時乾燥密度に収まるものの，一部の供試体においてはバラつきが大きかった．これは，不攪乱供試体の内部におけるセメンテーションの程度にバラつきがあり，固結が強い部分においては膨潤変形が阻害され，試験終了時の乾燥密度が高く留まったものと推察する．

・アメリカ産原鉱石

表 3-20，3-21，3-22 に再構成供試体（粒径～0.425 mm，0.850～2 mm）および不攪乱供試体の供試体諸元を示す. また, 図 3-23 に粒径～0.425 mm, 0.850～2 mm の再構成供試体および不攪乱供試体の一次元膨潤変形率の経時変化曲線をそれぞれ示す.

表 3-20　アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の供試体諸元

	膨潤変形試験(アメリカ～0.425mm)				
試料名	再構成 1	再構成 2	再構成 3	再構成 4	再構成 5
試験開始時の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.48	1.53	1.39	1.48	1.52
試験終了時の乾燥密度 (Mg/m^3)	0.45	0.36	0.41	0.39	0.38
試験終了時含水比（%）	NA	240.9	240.6	229.1	224.4
試験終了時飽和度（%）	NA	102.0	117.4	104.3	100.5
初期含水比(%)	24.7	22.9	24.7	29.5	29.5
初期飽和度（%）	82.7	82.2	71.7	97.8	104.2
最大一次元膨潤変形率(%)	278	350.8	238.7	344.8	357.1

表 3-21　アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径 0.850～2 mm）の供試体諸元

	膨潤変形試験(アメリカ 0.850～2mm)			
試料名	再構成 1	再構成 2	再構成 3	再構成 4
試験開始時の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.42	1.45	1.49	1.51
試験終了時の乾燥密度 (Mg/m^3)	0.4	0.41	0.41	0.40
試験終了時含水比（%）	216.5	213.6	217.0	219.9
試験終了時飽和度（%）	102.0	104.5	104.1	104.2
初期含水比(%)	33.5	33.5	27.8	27.8
初期飽和度（%）	101.7	107.0	93.5	96.4
最大一次元膨潤変形率(%)	312.5	322.6	312.5	333.3

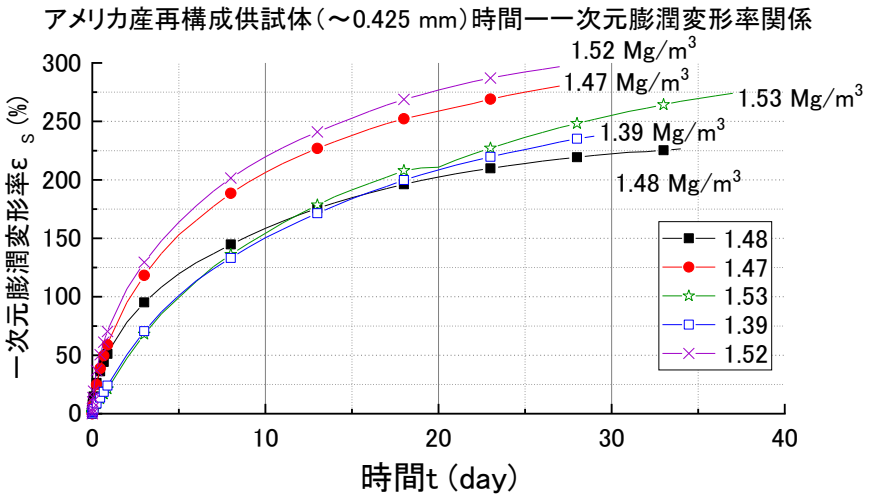
表 3-22　アメリカ産原鉱石の不攪乱供試体の供試体諸元

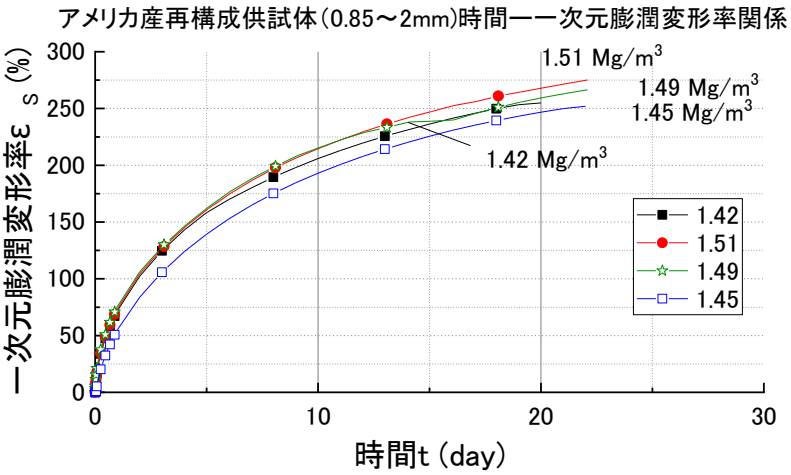
	膨潤変形試験（アメリカ不攪乱）				
試料名	不攪乱 1	不攪乱 2	不攪乱 3	不攪乱 4	不攪乱 5
試験開始時の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.41	1.46	1.46	1.51	1.47
試験終了時の乾燥密度 (Mg/m^3)	0.69	0.66	0.57	0.65	0.61
試験終了時含水比（%）	NA	NA	143.5	133.6	137.3
試験終了時飽和度（%）	NA	NA	103.7	114.3	108.0
初期含水比(%)	34.9	30.0	30.0	28.0	28.4
初期飽和度（%）	105.2	96.5	96.6	97.7	93.2
最大一次元膨潤変形率(%)	122.0	137.0	142.0	112.4	178.6

次ページの図 3-23 より，再構成供試体において，粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm のいずれにおいても，時間経過に応じて双曲線状に一次元膨潤変形率が増加する挙動であることが分かる．一定値に収束するのに要する時間はいずれも 20 日程度であり，大きな差異はなかった．

不攪乱供試体において，再構成供試体に比べて，いずれの供試体においても一次元膨潤変形率の増加が収束するのに要する時間が 40 日以上と極めて長いことが分かる．また，一部の供試体においては，再構成供試体のような双曲線状の増加挙動ではなく，緩やかかつ直線的な増加挙動であることも分かる．このことから，不攪乱供試体においては，膠結作用の影響により，水分との接触後も膨潤変形挙動が抑制されているものと推察する．

また，図 3-24 に再構成供試体（粒径：～0.425 mm，0.850～2 mm）および不攪乱供試体における，試験開始時の乾燥密度と最大一次元膨潤変形率の関係を示す．





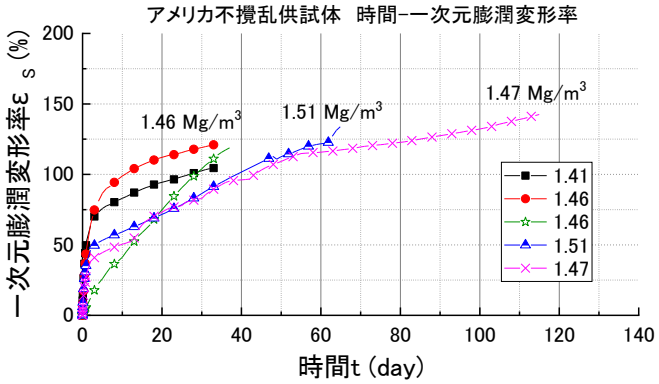


図 3-23　粒径～0.425 mm の再構成供試体（上），0.850～2 mm の再構成供試体（中）および不撹乱供試体（下）の一次元膨潤変形率の経時変化曲線

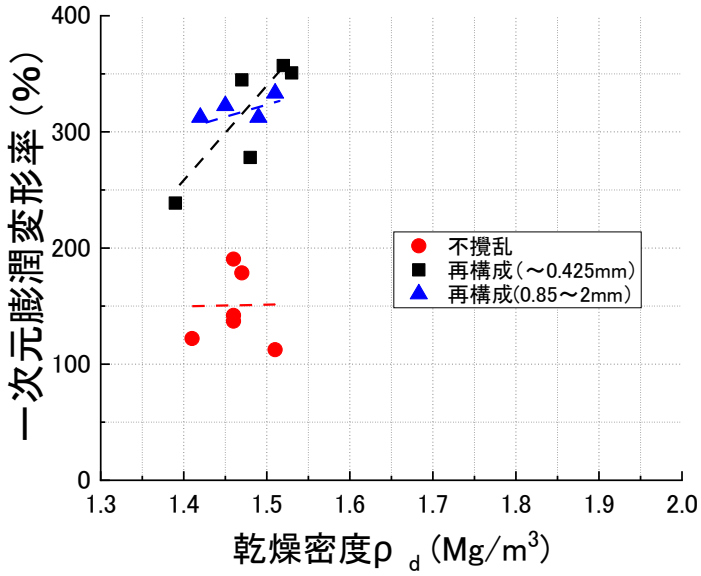


図 3-24　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の試験開始時の供試体乾燥密度と最大一次元膨潤変形率の関係

これより，再構成供試体においては，いずれの粒径においても乾燥密度の増加に応じて，最大一次元膨潤変形率が直線的に増加する傾向が見受けられた．なお，粒径～0.425 mm の供試体の方が近似直線の傾きが大きく，乾燥密度の増加に対する膨潤率の増加の感度が良いことが分かる．また，乾燥密度が高くなるにつれて粒径 0.850～2 mm の方が，値が小さくなる傾向が見受けられ，乾燥密度－最大膨潤圧関係と同様の傾向であった．一方で，不攪乱供試体において，最大一次元膨潤率は乾燥密度によらず，値にバラつきが生じていることが分かる．

また，図 3-25 に再構成供試体（粒径：～0.425 mm，0.850～2 mm）および不攪乱供試体における，試験開始時の乾燥密度と試験終了時の乾燥密度の関係を示す．

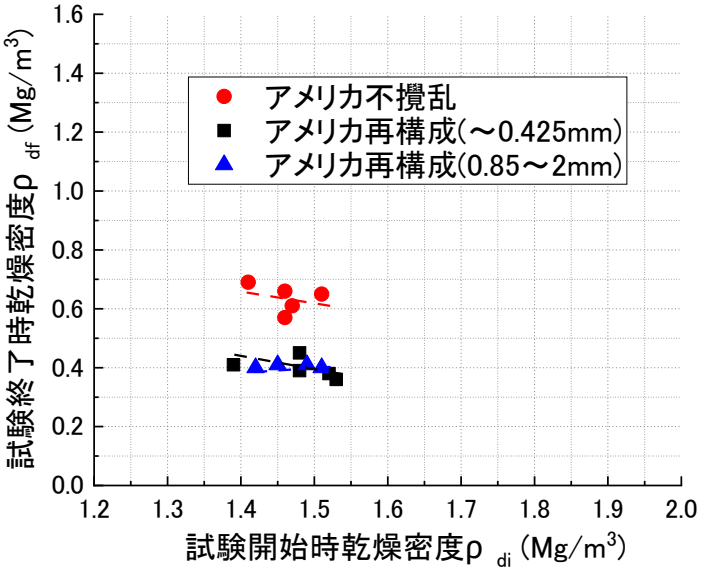


図 3-25　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の試験開始時の供試体乾燥密度と試験終了時の供試体乾燥密度の関係

これより，再構成供試体においては，粒径および試験開始時の乾燥密度に因らず，試験終了時の乾燥密度が 0.4 Mg/m^3 程度に収束する傾向が見られた．不攪乱供試体においては，試験開始時の乾燥密度によらず，いずれの供試体においても試験終了時の乾燥密度が 0.60～0.65 Mg/m^3 に収束する傾向が見られた．これより，不攪乱供試体においては，膠結作用の影響により膨潤変形が抑制され，試験終了時においても乾燥密度が高く留まったものと推察される．

・中国産原鉱石

表 3-23，3-24，3-25 に再構成供試体（粒径～0.425 mm，0.850～2 mm）および不攪乱供試体の供試体諸元を示す. また, 図 3-26 に粒径～0.425 mm, 0.850～2 mm の再構成供試体および不攪乱供試体の一次元膨潤変形率の経時変化曲線をそれぞれ示す.

表 3-23　中国産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の供試体諸元

	膨潤変形試験（中国～0.425mm）						
試料名	再構成 1	再構成 2	再構成 3	再構成 4	再構成 5	再構成 6	再構成 7
試験開始時の乾燥密度(Mg/m^3)	1.84	1.86	1.84	1.44	1.61	1.85	1.70
試験終了時の乾燥密度(Mg/m^3)	0.69	0.57	0.61	0.53	0.54	0.54	0.55
試験終了時含水比（%）	NA	NA	NA	158.1	151.7	152.9	148.0
試験終了時飽和度（%）	NA	NA	NA	104.1	102.8	103.8	103.3
初期含水比(%)	12.0	14.9	14.9	13.1	13.1	13.1	12.9
初期飽和度（%）	67.7	86.9	84.0	39.9	51.4	74.9	58.4
最大一次元膨潤変形率(%)	181.8	244.0	222.0	192.0	222.2	285.7	263.0

表 3-24　中国産原鉱石の再構成供試体（粒径 0.850～2 mm）の供試体諸元

	膨潤変形試験（中国 0.850～2mm）			
試料名	再構成 1	再構成 2	再構成 3	再構成 4
試験開始時の乾燥密度(Mg/m^3)	1.58	1.72	1.86	1.51
試験終了時の乾燥密度(Mg/m^3)	0.62	0.65	0.64	0.65
試験終了時含水比（%）	127.4	121.6	122.6	123.0
試験終了時飽和度（%）	103.2	104.4	102.4	104.7
初期含水比(%)	14.2	14.2	14.2	13.9
初期飽和度（%）	53.4	66.2	83.2	46.8
最大一次元膨潤変形率(%)	169.5	185.2	222.2	151.0

表 3-25　中国産原鉱石の不攪乱供試体の供試体諸元

	膨潤変形試験（中国不攪乱）		
試料名	不攪乱 1	不攪乱 2	不攪乱 3
試験開始時の乾燥密度(Mg/m^3)	1.83	1.89	1.92
試験終了時の乾燥密度(Mg/m^3)	1.00	0.97	1.25
試験終了時含水比（%）	NA	NA	NA
試験終了時飽和度（%）	NA	NA	NA
初期含水比(%)	16.0	15.8	13.3
初期飽和度（%）	89.0	97.3	99.3
最大一次元膨潤変形率(%)	106.4	101.0	63.8

次ページの図 3-26 より，再構成供試体において，粒径～0.425 mm および 0.85～2 mm のいずれも，一次元膨潤変形率は時間経過に応じて双曲線状に増加しており，20～30 日程度で一定値に収束する傾向が見られた．不攪乱供試体においては，一次元膨潤変形率の経時増加はより緩やかであり，一定値に収束するまでに 40～50 日と，約 2 倍程度を要した．このことから，不攪乱供試体においては，膠結作用の影響により，膨潤変形挙動が遅延されたものと推察される．

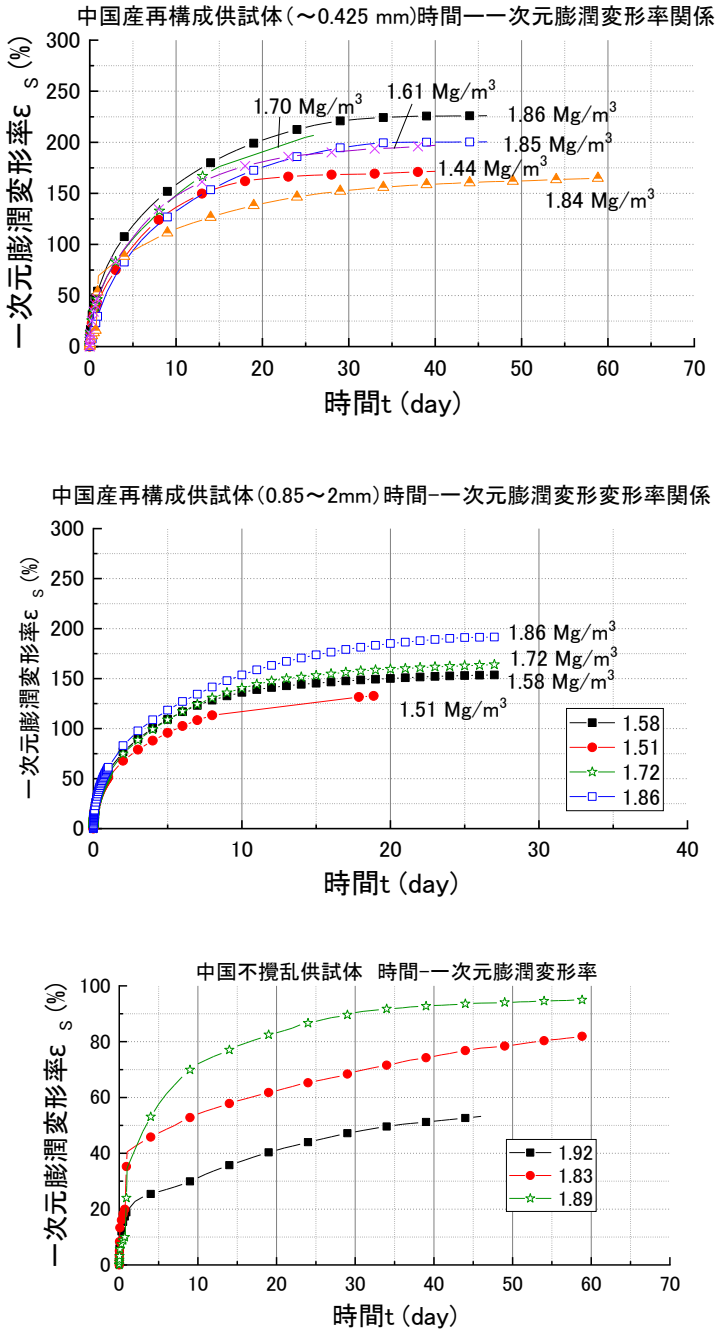


図 3-26 粒径～0.425 mm の再構成供試体（上）および 0.850～2 mm の再構成供試体（下）の一次元膨潤変形率の経時変化曲線

また，図 3-27 に再構成供試体（粒径：～0.425 mm，0.850～2 mm）および不攪乱供試体における，試験開始時の供試体乾燥密度と最大一次元膨潤変形率の関係を示す．これより，再構成供試体においては，いずれも乾燥密度の増加に応じて最大一次元膨潤変形率が直線的に増加する挙動であった．両者を比較す

ると，いずれの乾燥密度においても粒径 0.850～2 mm の方が，50%程度値が小さい傾向であった．これは粒子径が大きいことで膠結作用の影響が強まり，膨潤変形挙動の低下に寄与したものと考えられる．一方，不攪乱供試体については，乾燥密度に因らず，最大一次元膨潤変形率はほぼ横ばい，もしくは右下がりであり，再構成供試体に比べて 1/2 以下に留まった．

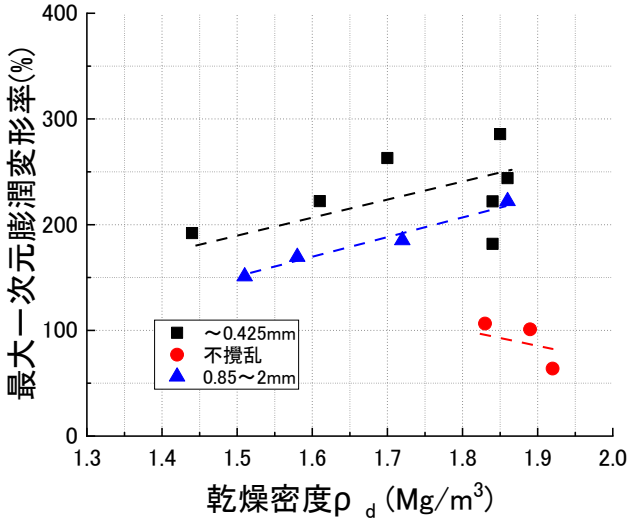


図 3-27　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の試験開始時の供試体乾燥密度と最大一次元膨潤変形率の関係

また，図 3-28 に再構成供試体および不攪乱供試体における，試験開始時の供試体乾燥密度と試験終了時の供試体乾燥密度の関係を示す．これより，再構成供試体においては，粒径および試験開始時の供試体乾燥密度に因らず，試験終了時の乾燥密度は 0.60 Mg/m^3 程度に収束している傾向が見られた．一方で，不攪乱供試体においては，試験終了時の乾燥密度にバラつきがあり，値も 1.0～1.2 Mg/m^3 と再構成供試体に比べて高く留まっていた．これより，不攪乱供試体においては，膠結作用の影響により膨潤変形が抑制され，試験終了時まで乾燥密度が高く留まったものと推察される．

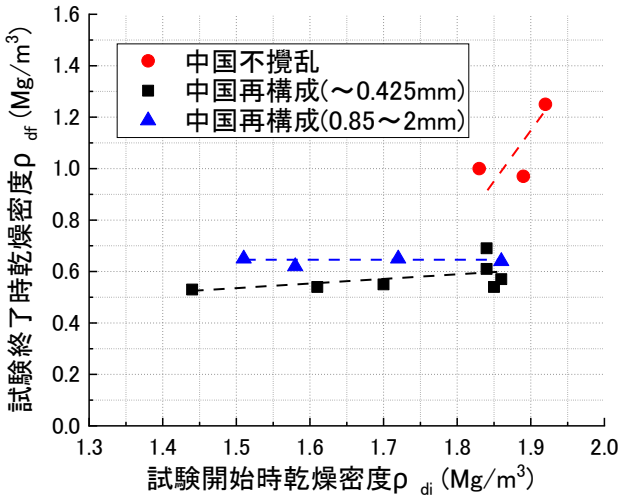


図 3-28　粒径～0.425 mm および 0.850～2 mm の再構成供試体と不攪乱供試体の試験開始時の供試体乾燥密度と試験終了時の供試体乾燥密度の関係

3.2.3　月布産原鉱石における XRD・膨潤圧連携試験の結果

本項では，3.1.4 で述べた方法に基づき，月布産原鉱石の不攪乱供試体および再構成供試体（粒径～0.425 mm）を用いて XRD・膨潤圧連携試験を実施した試験結果について述べる．まず，表 3-26 に実施した試験ケースについて，乾燥密度，供試体高さ（厚さ），試験日数，最大膨潤圧および XRD 測定条件を一覧で示す．今回，供試体の高さ（厚さ），試験日数をパラメータとして，ほぼ同程度の乾燥密度である不攪乱供試体と再構成供試体について同時に試験を行った．本項ではこれ以降，節番号を T-1～T-5 と振り，供試体高さ・日数の等しい不攪乱供試体および再構成供試体の試験結果を比較していく．なお，T-1 についてはフレーム型膨潤圧試験装置を用いた．

表 3-26　試験ケース

節番号	供試体種別	供試体試験後乾燥密度 (g/cm^3)	高さ(mm)	試験日数 (day)	試験機	最大膨潤圧(kPa)	膨潤圧試験前後の XRD 測定の有無
T-1	不攪乱	1.56	2	7	フレーム	416	前のみ
	再構成	1.65	2	7	フレーム	654	前のみ
T-2	再構成	1.77	4	5	小型	1242	後のみ
	不攪乱	1.79	4	5	小型	997	後のみ
T-3	不攪乱	1.74	6	2	小型	852	後のみ
	再構成	1.77	6	2	小型	1601	後のみ
T-4	再構成	1.84	4	5	小型	2125	前後
	不攪乱	1.75	4	5	小型	805	前後
T-5	不攪乱	1.72	4	6	小型	664	前後

・T-1（高さ 2mm，フレーム型，7 日間）

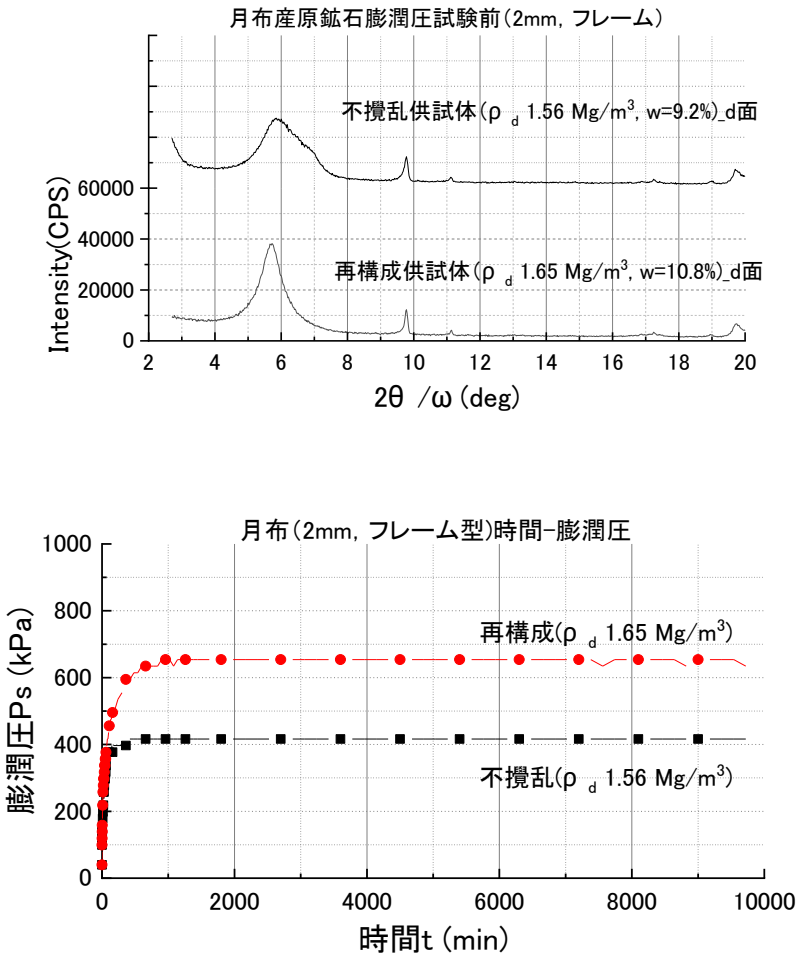


図 3-29　高さ 2mm，フレーム型，7 日間の XRD および膨潤圧の経時変化曲線

表 3-27　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前）

	d(Å)	2 θ (deg)	層間の水分子の存在数　L	含水比 (%)
不攪乱	15.1	5.86	2w	9.2
	12.7	6.98	1w	
再構成	15.4	5.74	2w	10.8

図 3-29 に XRD の測定結果（膨潤圧試験前）および膨潤圧の経時変化曲線を示す．これより，不攪乱供試体（1.56 Mg/m^3，w=9.2%）においては，2θ =5.8～7.0 deg 付近に 2 つのピークが重なったような形のピークが存在していることが分かる．これらはそれぞれ水分子がモンモリロナイトの結晶層間に 1 列（7.07 deg），2 列（5.7 deg）存在する場合の底面間隔の値に相当するものである．故に，本供試体においては，水分子を 1 列および 2 列有するモンモリロナイトが混在していることが分かる．

再構成供試体（1.65 Mg/m^3，w=10.8%）においては，2θ =5.8 deg 付近にピークが一つ存在していることが分かる．これは層間の水分子数が 2 列（5.7 deg）存在する場合の底面間隔の値に相当するものであり，本供試体におけるモンモリロナイトはほぼ全てが水分子を 2 列有する状態であるものと考えられる．

また，膨潤圧は不攪乱・再構成供試体のいずれも試験開始直後に急激に上昇した後，1000 分経過以降は一定値に収束する挙動であった．膨潤圧の収束値は，不攪乱供試体において約 400 kPa，再構成供試体において約 650 kPa であった．

・T-2（高さ 4mm，小型，5 日間）

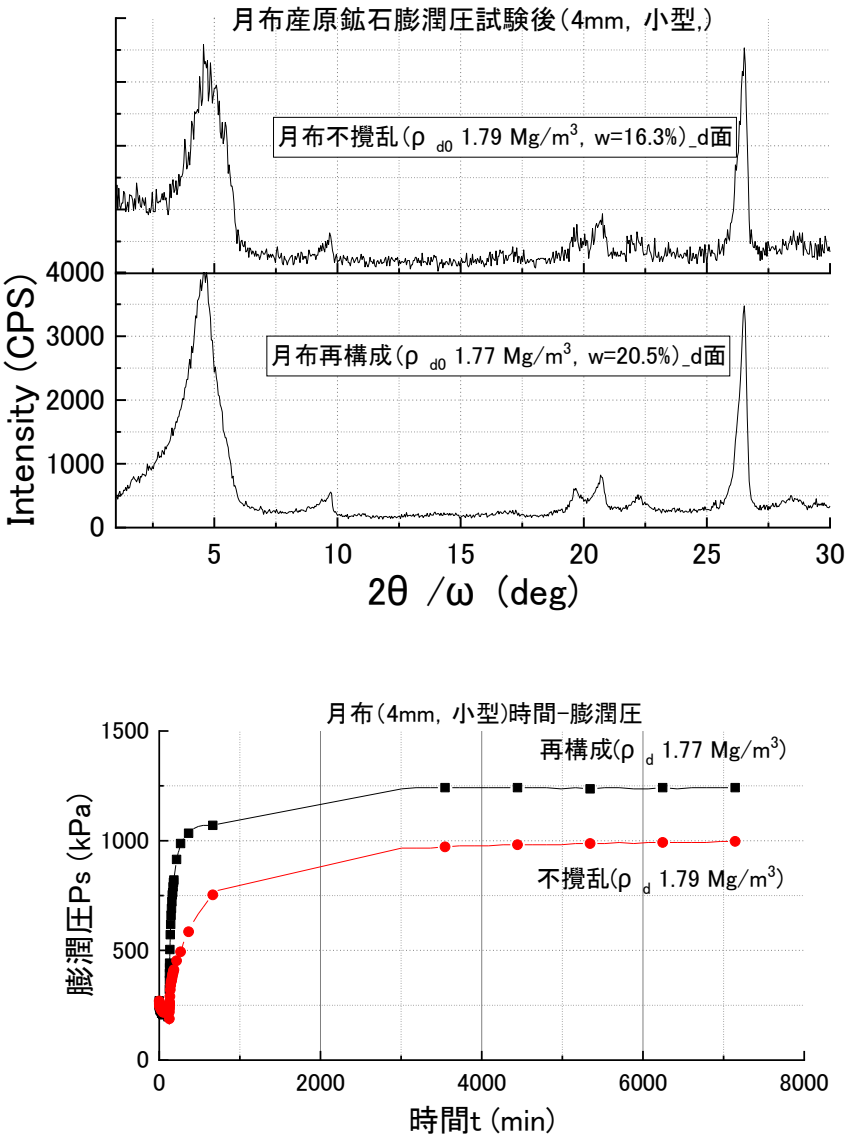


図 3-30　高さ 4mm，小型，5 日間の XRD および膨潤圧の経時変化曲線

表 3-28　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験後）

	d(Å)	2θ (deg)	層間の水分子の存在数　L	含水比(%)
不撹乱	19.4	4.56	3w	16.3
再構成	18.7	4.72	3w	20.5

図 3-30 に XRD の測定結果（膨潤圧試験後）および膨潤圧の経時変化曲線を示す．これより，不攪乱供試体（1.79 Mg/m^3，w=16.3%）においては，2θ =4.6 deg 付近にピークが存在していることが分かる．これは水分子がモンモリロナイトの結晶層間に 3 列（4.65 deg）存在する場合の底面間隔の値に相当するものである．故に，本供試体においては，水分子を 3 列有するモンモリロナイトが支配的であることが分かる．ただし，ピークの右肩部分が若干盛り上がっているように見えるため，僅かに水分子 2 列を有するモンモリロナイトも存在している可能性が考えられる．

再構成供試体（1.77 Mg/m^3，w=20.5%）においても，2θ =4.7 deg 付近にピークが一つ存在していることが分かる．これは層間の水分子数が 3 列（4.65 deg）存在する場合の底面間隔の値に相当するものであり，本供試体におけるモンモリロナイトはほぼ全てが水分子を 3 列有する状態であるものと考えられる．

また，膨潤圧は不攪乱・再構成供試体のいずれも試験開始直後に急激に上昇した後，4000 分経過以降は一定値に収束する挙動であった．T-1 における高さ 2 mm の供試体に比べると値の収束に時間を要しており，これは厚さが 2 倍になったことの影響によると考えられる．膨潤圧の収束値は，不攪乱供試体において約 1000 kPa，再構成供試体において約 1250 kPa であった．

・T-3（高さ 6mm，小型，2 日間）

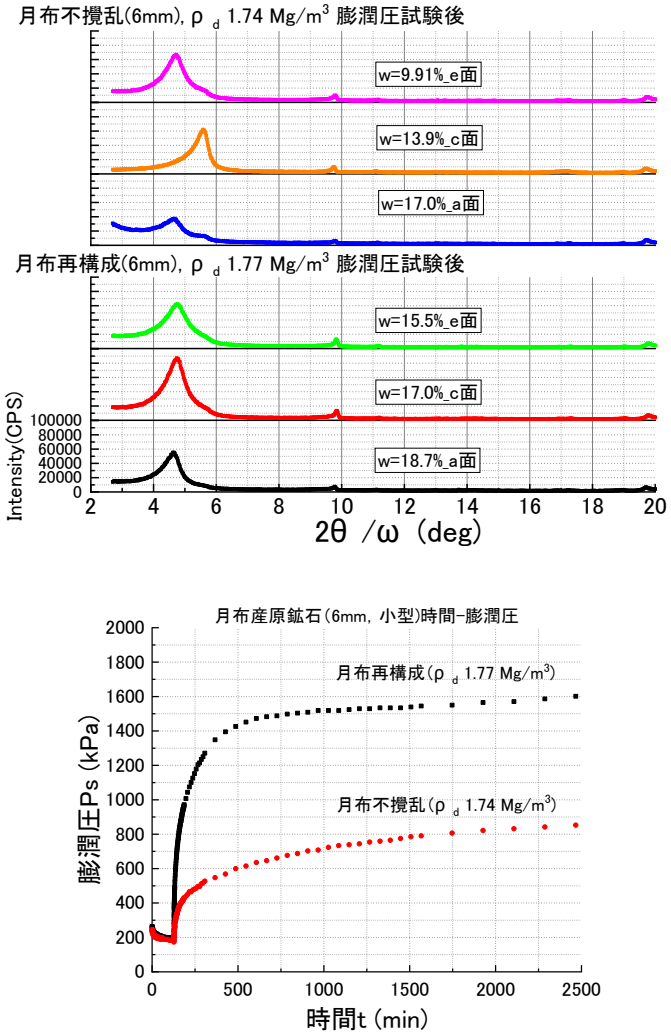


図 3-31　高さ 6mm，小型，2 日間の XRD および膨潤圧の経時変化曲線

表 3-29　d_{001} に関する結果

		d(Å)	2θ (deg)	層間の水分子の存在数　L	含水比(%)
不撹乱	上側	18.8	4.71	3w	9.9
	中間	15.9	5.56	2w	13.9
	下側(給水面)	19.0	4.66	3w	17.0
再構成	上側	18.5	4.77	3w	15.5
	中間	18.5	4.77	3w	17.0
	下側（給水面）	19.2	4.61	3w	18.7

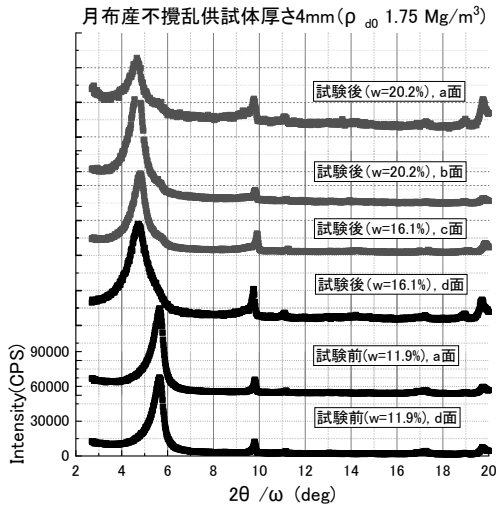
図 3-31 に XRD の測定結果（膨潤圧試験後）および膨潤圧の経時変化曲線を示す．これより，不攪乱供試体（1.74 Mg/m^3）においては，解体後の含水比は上側の 2 mm 分が 9.9%，中間の 2 mm 部分が 13.9%，下側（給水側）の 2 mm 部分が 17.0%であった．上側において 2θ =4.7 deg 付近，中間において 2θ =5.6 deg 付近，下側において 2θ =4.7 deg 付近にそれぞれピークが存在していることが分かる. これは, それぞれ水分子がモンモリロナイトの結晶層間に 3 列（4.65 deg），2 列（5.7 deg），3 列存在する場合の底面間隔の値に相当するものである．故に，本供試体においては, 上側 2 mm 部分が水分子を 3 列有するモンモリロナイトが支配的であり，中間 2 mm 部分が 2 列，下側 2 mm 部分が水分子 3 列有することが分かる．下側 2 mm 部分のピークでは，2θ =5.6 deg 付近にも若干ピークが存在することが分かり，僅かに水分子 2 列を有するモンモリロナイトも存在している可能性が考えられる．また，上側の 2 mm 部分においては，含水比が 9.9% と低いにも関わらず水分子 3 列分のピークとなっており，これは含水比が高くなるにつれて底面間隔も大きくなる傾向に反する結果である．この原因については不明であり，今後同様の条件で再度試験を行う予定である．

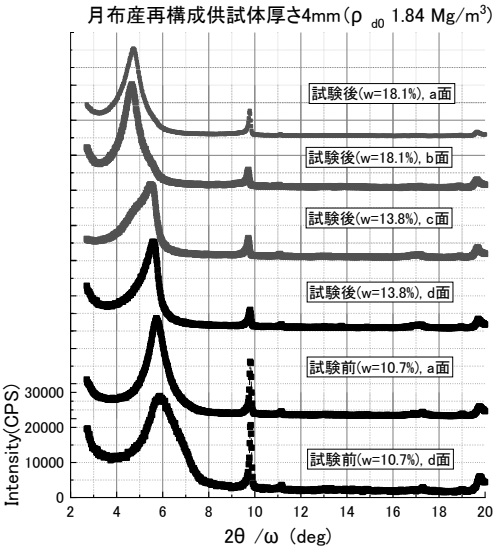
再構成供試体（1.77 Mg/m^3）において，解体後の含水比は上側の 2 mm 分が 15.5%，中間の 2 mm 部分が 17.0%，下側（給水側）の 2 mm 部分が 18.7%であった．上側，中間，下側において，いずれも 2θ =4.6～4.8 deg 付近にピークが存在していることが分かる．これは，水分子がモンモリロナイトの結晶層間に 3 列（4.65 deg）存在する場合の底面間隔の値に相当するものである．これより，本供試体におけるモンモリロナイトはほぼ全てが水分子を 3 列有する状態であるものと考えられる．

以上より，再構成供試体と不攪乱供試体を比較すると，不攪乱供試体の方が含水比の上昇およびモンモリロナイトの底面間隔に時間を要することが分かり，これは膠結作用が影響を及ぼしていることが推察される．

また，膨潤圧は不攪乱・再構成供試体のいずれも試験開始直後に急激に上昇した後，試験終了時（約 2 日経過時）まで緩やかに上昇を継続している挙動であった．膨潤圧の値は，不攪乱供試体において約 850 kPa，再構成供試体において約 1600 kPa であった．

・T-4（高さ 4mm，小型，5 日間）





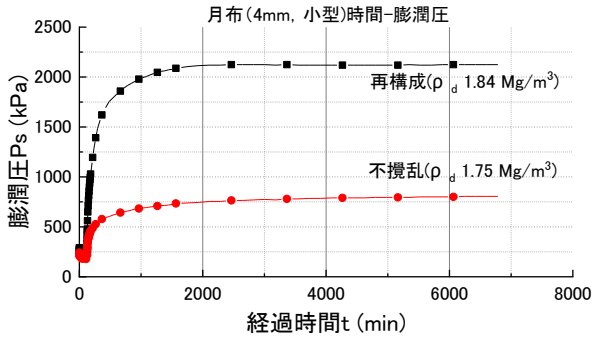


図 3-32　高さ 4mm，小型，5 日間の XRD および膨潤圧の経時変化曲線

表 3-30　d_{001} に関する結果

		d(Å)	2 θ (deg)	層間の水分子の存在数　L	含水比(%)
不攪乱	試験前上側	15.6	5.68	2w	11.9
	試験前下側	15.7	5.64	2w	
	試験後上側	18.6	4.74	3w	16.1
	試験後下側	19.0	4.66	2w と 3w 混在	20.2
再構成	試験前上側	15.1	5.86	1w と 2w 混在	10.7
	試験前下側	15.5	5.72	2w	
	試験後上側	15.9	5.56	2w と 3w 混在	13.8
	試験後下側	19.0	4.64	3w	18.1

図 3-32 に XRD の測定結果（膨潤圧試験前後）および膨潤圧の経時変化曲線を示す．これより，不攪乱供試体（1.75 Mg/m^3）においては，膨潤圧試験前において含水比 11.9%で，ピークは 2 θ =5.7 deg 付近にピークが存在している．試験後は上側 2 mm 部分が含水比 16.1%，ピークが 2 θ =4.7 deg 付近であり，下側（給水側）2 mm 部分が含水比 20.2%，ピークが 2 θ =4.7 deg 付近であった．これより，試験前はモンモリロナイトの結晶層間に水分子 2 列（5.7 deg），試験後は 3 列（4.65 deg）存在していることが分かる．

再構成供試体（1.84 Mg/m^3）において，膨潤圧試験前において含水比 10.7%で，ピークは 2 θ =5.7～5.8 deg 付近にピークが存在している．試験後は上側部分が含水比 13.8%，ピークは 2 θ =5.6 deg 付近にあり，下側（給水側）は含水比 18.1%，ピークは 2 θ =4.6 deg 付近に存在している．これより，試験前はモンモリロナイトの層間に水分子 2 列分存在しており，試験後は上側 2 mm において水分子 2 列分，下側 2 mm において水分子 3 列分存在していることが分かる．なお，試験前の下側 2 mm 部分のピークにおいて右肩部分が盛り上がっており，水分子 1 列分を有するモンモリロナイトも一定数存在していると考えられる．同様に，試験後の上側 2 mm の c 面のピークにおいても，4.65 deg 付近のピークが混在していることが見受けられ，水分子 3 列分を有するモンモリロナイトが存在していることが分かる．以上より，含水比の増加に応じて底面間隔が遷移していく様子が見える．

膨潤圧は不攪乱・再構成供試体のいずれも試験開始直後に急激に上昇した後，4000 分経過以降は一定値に収束する挙動であった．膨潤圧の収束値は，不攪乱供試体において約 750 kPa，再構成供試体において約 2250 kPa であった．

・T-5（不攪乱，高さ 4mm，小型，6 日間）

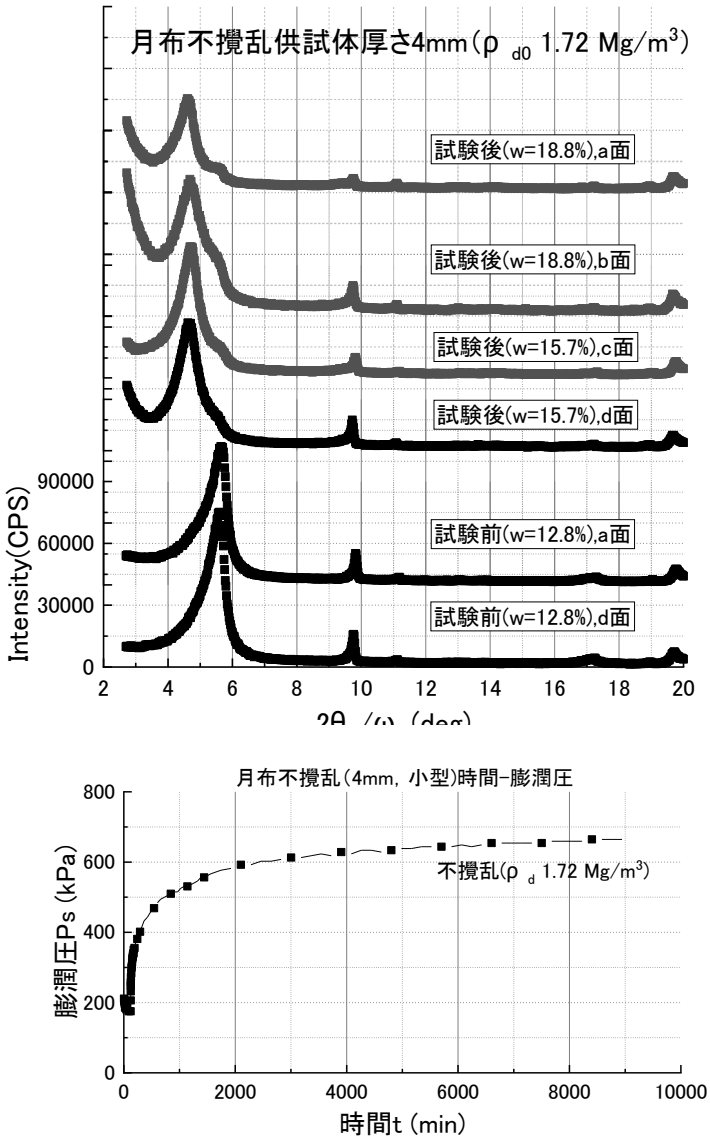


図 3-33　不攪乱高さ 4mm，小型，6 日間の XRD および膨潤圧の経時変化曲線

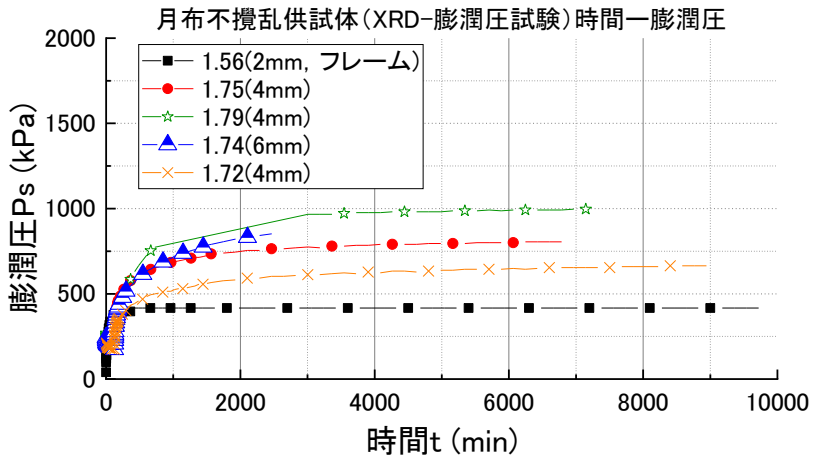
表 3-31　d_{001} に関する結果

	d(Å)	2 θ (deg)	層間の水分子の存在数　L	含水比(%)
試験前上側	15.8	5.58	2w	12.8
試験前下側	15.6	5.66	2w	
試験後上側	18.9	4.68	2w と 3w 混在	15.7
試験後下側	19.2	4.60	2w と 3w 混在	18.8

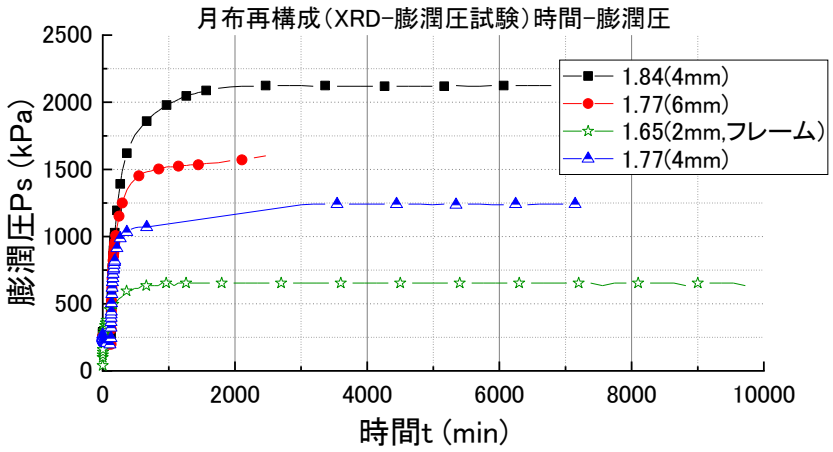
図 3-33 に XRD の測定結果（膨潤圧試験前後）および膨潤圧の経時変化曲線を示す．これより，不攪乱供試体（1.72 Mg/m^3）において，試験前において含水比 12.8%，ピークは 2 θ =5.6～5.7 deg 付近に存在している．試験後は上側 2 mm 部分において，含水比 15.7%，ピークは 2 θ =4.7 deg 付近に存在しており，下側（給水側）において，含水比 18,8%，ピークは 2 θ =4.6 deg 付近に存在している．これより，試験前においてはモンモリロナイト層間に水分子 2 列が存在しており，試験後は水分子を 3 列有するモンモリロナイトが支配的であることが分かる．なお，試験後の上側・下側のピークいずれにおいても，2 θ =5.7 deg 付近に若干盛り上がりが存在している様子が見て取れるため，一部のモンモリロナイトは水分子 2 列分を有していることが推察される．

また，膨潤圧は試験開始直後に急激に上昇した後，4000 分経過以降は一定値に収束する挙動であった．膨潤圧の収束値は，約 680 kPa であった．

図 3-34 に，不攪乱供試体および再構成供試体における膨潤圧の経時変化曲線を示す．これより，不攪乱供試体において乾燥密度が高くなるにつれて，膨潤圧の定常状態に至るまでの時間が長くなる傾向が見られた．高さ 6 mm，試験期間 2 日間のケースにおいては，不攪乱供試体，再構成供試体のいずれも膨潤圧の上昇途中である様子が見て取れる．また，不攪乱・再構成供試体のいずれにおいても，フレーム型膨潤圧試験装置を用いて実施したケースは，他の供試体に比べて乾燥密度・膨潤圧が低下していることが分かる．これは，フレーム型膨潤圧試験装置の方が試験装置の構造上，小型膨潤圧試験装置に比べて供試体の変形に対する剛性が低く，変形を許容しやすいことによって膨潤圧および供試体乾燥密度が低下したものと推察する．試験装置の剛性に着目した同様の検討および考察を田中 [29]も行っており，上記の結果はこれに一致するものと考える．



(a)不攪乱供試体　時間-膨潤圧関係



(b) 月布産再構成供試体　時間-膨潤圧関係

図 3-34　月布産原鉱石　時間-膨潤圧関係

図 3-35 に供試体の試験後乾燥密度と最大膨潤圧の関係を示す．これより，不攪乱供試体，再構成供試体のいずれにおいても，乾燥密度の増加に応じて最大膨潤圧が直線的に増加している傾向がみられる．また，供試体乾燥密度が 1.7 Mg/m^3 より高い領域において，不攪乱供試体の乾燥密度に対する最大膨潤圧の増加割合は，再構成供試体に比べて低くなっている．なお，図 3-34 で述べた通り，不攪乱・再構成供試体のいずれにおいても，フレーム型膨潤圧試験装置で実施したケースは，小型膨潤圧試験装置のケースに比べて乾燥密度，最大膨潤圧のいずれも低くなっている．

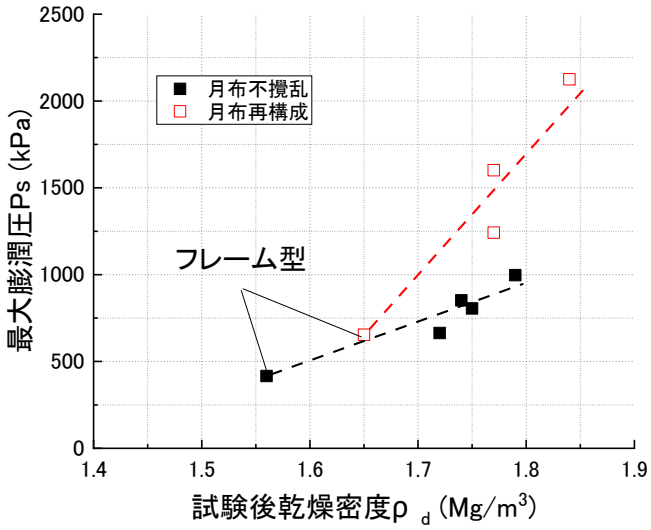


図 3-35　供試体の試験後乾燥密度と最大膨潤圧の関係

図 3-36 に供試体の含水比とモンモリロナイトの底面間隔（d_{001}）の関係を示す．なお，モンモリロナイトの底面間隔は，最も強度の高いピークの 2θ の値を用いている．

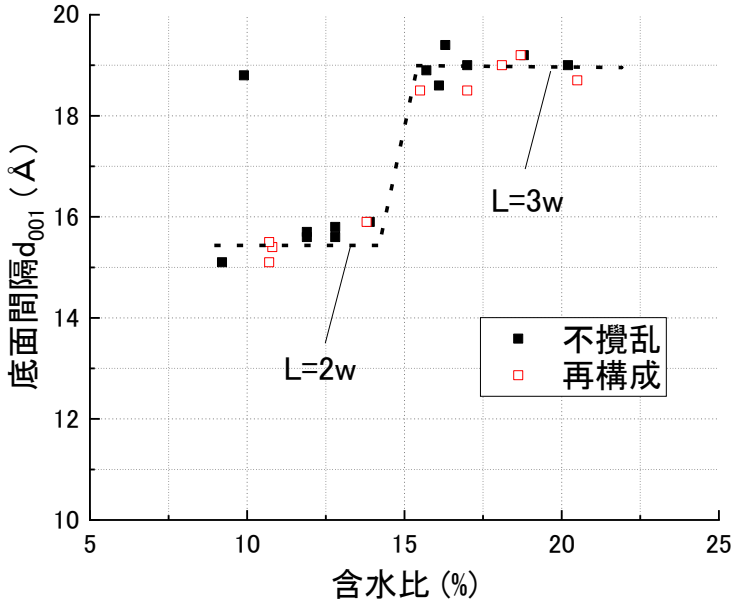


図 3-36　供試体の含水比とモンモリロナイトの底面間隔の関係

これより，不攪乱供試体および再構成供試体において，含水比が 10～15%の領域において底面間隔が約 15.5Å（水分子 2 層）付近にあり，含水比 15～20%の領域において底面間隔が約 19.0Å（水分子 3 層）付近にあることが分かる．なお，10～15%の領域においては，含水比の増加に伴い底面間隔が若干ではあるが右肩上がりになっていることが分かる．以上の結果から観ると，不攪乱供試体と再構成供試体内のモンモリロナイトへの水分子の浸入挙動については大きな差異がないように見えるが，これは水分子 2 列・3 列が混在している状況など，詳細な浸入状況を反映できていない点に留意されたい．同様の試験をアメリカ産，中国産原鉱石においても実施し，上記のような傾向がみられるか否かについて実験的に検討する．

図 3-37～3-39 では，不攪乱供試体と再構成供試体における，水分子の詳細な浸入状況の差異を比較するために，供試体の含水比の差異が±0.2%以内と，極めて近い状態の 2θ−Intensity 関係グラフをそれぞれ抽出し，比較して示す．

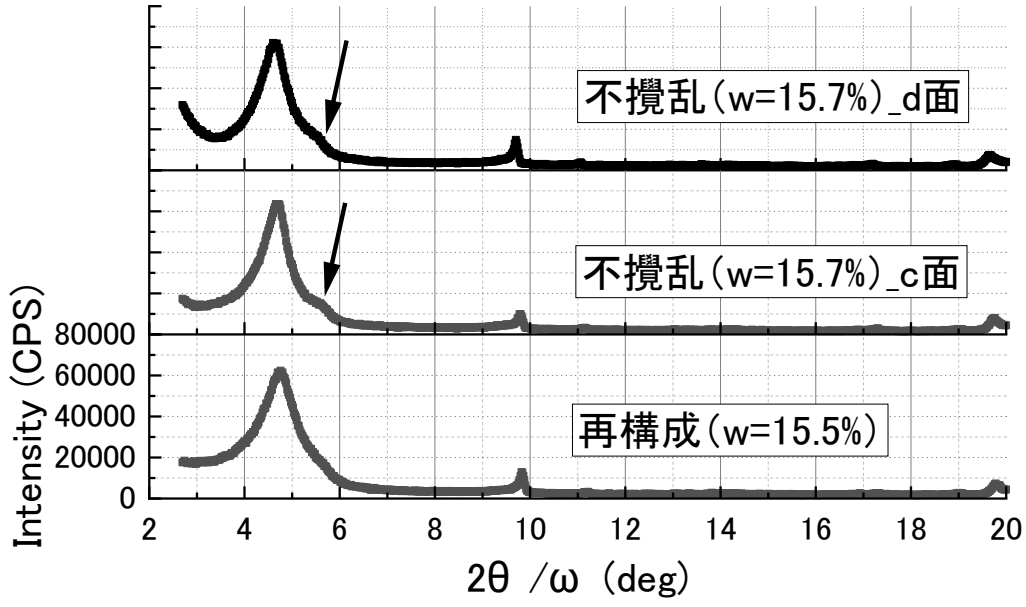


図 3-37　不攪乱供試体と再構成供試体のピーク比較（w=15.5～15.7%）

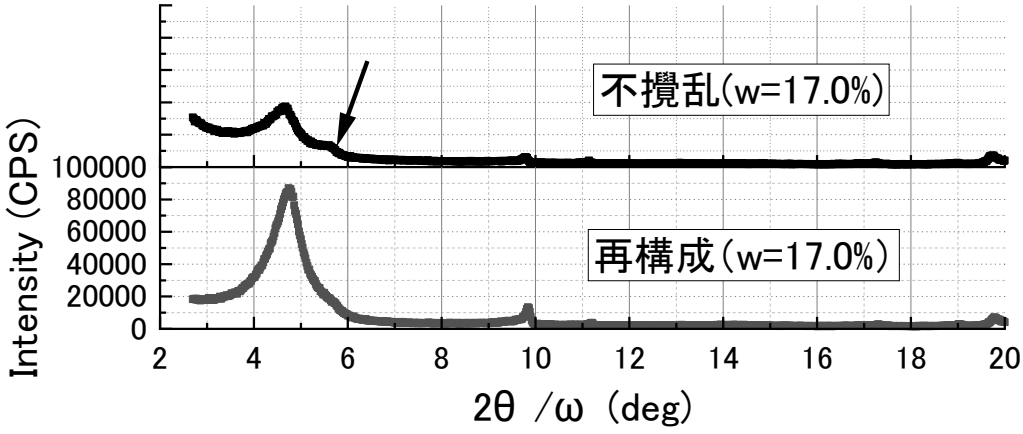


図 3-38　不攪乱供試体と再構成供試体のピーク比較（w=17.0%）

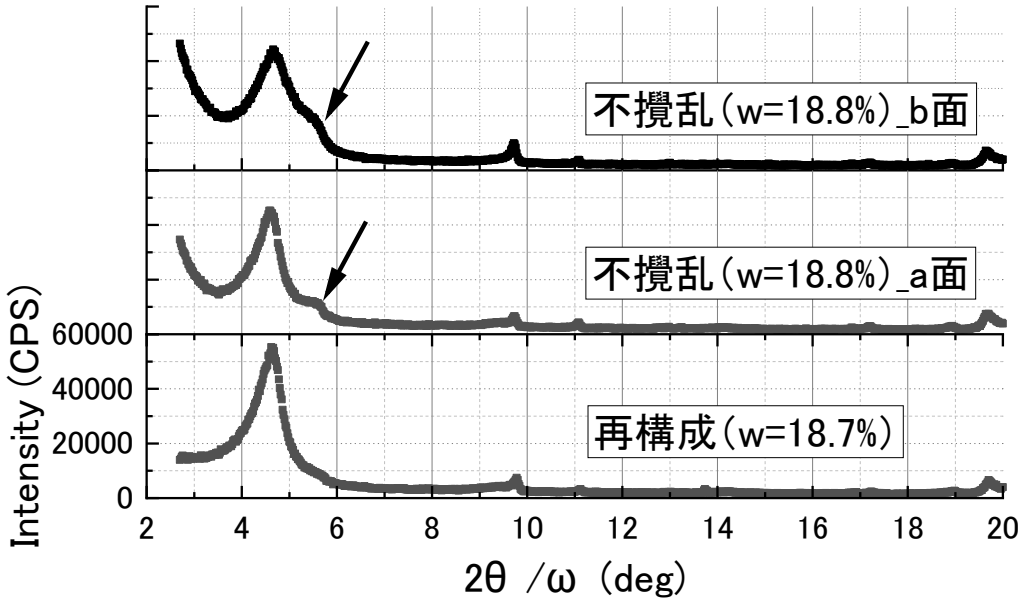


図 3-39　不攪乱供試体と再構成供試体のピーク比較（w=18.7～18.8%）

それぞれ, 図 3-37 では含水比 15.5～15.7%, 図 3-38 では含水比 17.0%, 図 3-39 では含水比 18.7～18.8%における不攪乱供試体と再構成供試体のピークを比較している．なお，これらの含水比においてはいずれも水分子が 3 列存在するモンモリロナイトが優勢である．以上のいずれのグラフにおいても，不攪乱供試体では水分子 3 列（2 θ =4.65 deg）のみならず，2 列を示す 2 θ =5.7 deg 付近にも

ピークが残存していることが明確に分かる．このことは，含水比が 15.5～18.8%の範囲において，同一の含水比であっても，不攪乱供試体の方がモンモリロナイトの層間に存在する水分子の量が少ないことを示唆している．これはすなわち，不攪乱供試体においてはセメンテーションの影響により，モンモリロナイトの結晶層間への水の浸入とそれに伴う膨潤変形が阻害されていることを意味するものと推察する．これゆえ，不攪乱供試体では再構成供試体よりも膨潤圧が低下したものと考えられる．以上は，本研究がこれまでに主張してきた，図 3-7 に示す膨潤特性低下のメカニズムを実験的に裏付ける一つの根拠となり得る．

3.2.4　ベントナイト原鉱石の鉱物組成の定量評価に向けた化学的検討

まず，本節では 3.1.5 で述べた方法により洗い出した，随伴鉱物の XRD 測定結果について述べる．図 3-40～43 に月布産，アメリカ産，中国産および富岡産原鉱石から取り出した随伴鉱物の XRD 分析結果をそれぞれ示す．

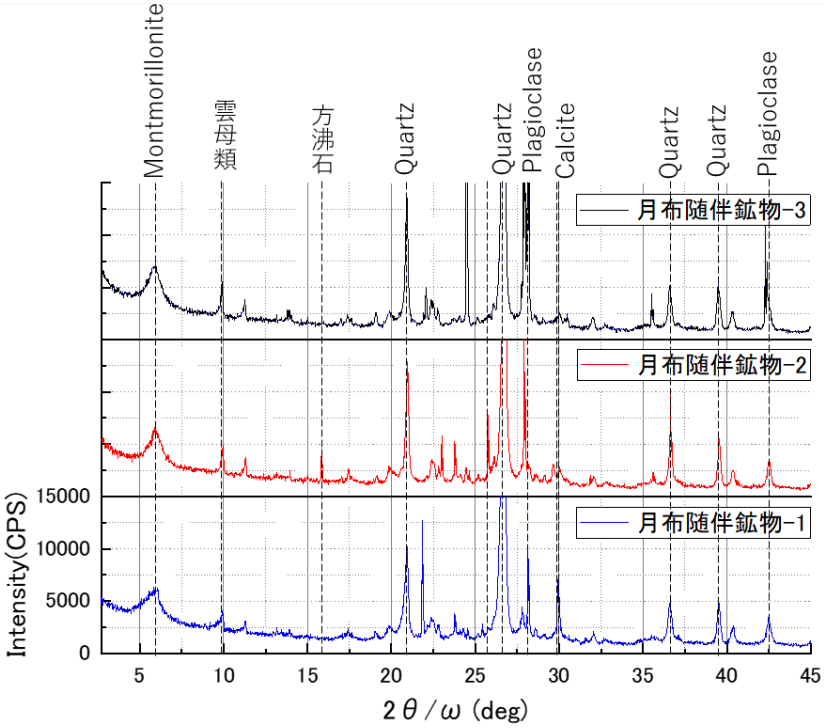


図 3-40　月布産原鉱石の随伴鉱物の XRD 結果

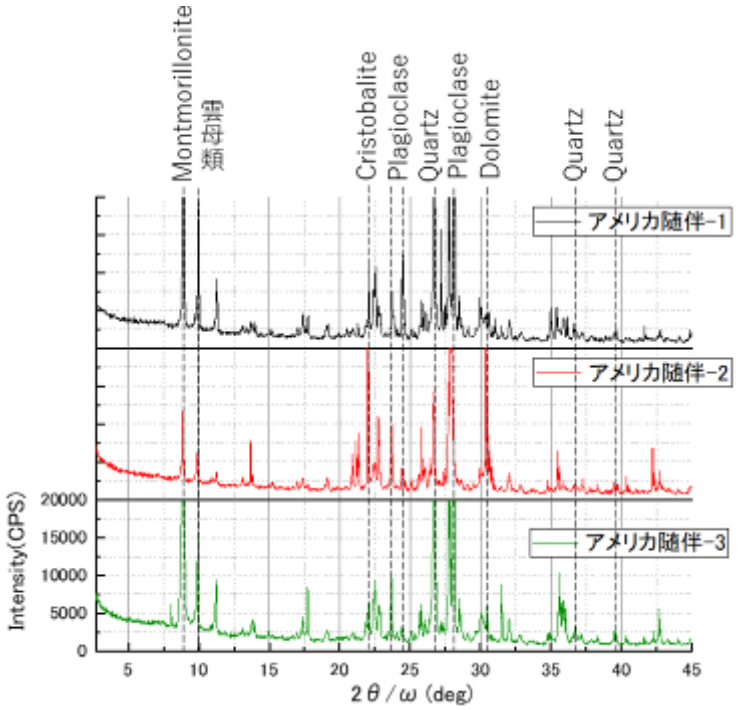


図 3-41　アメリカ産原鉱石の随伴鉱物の XRD 結果

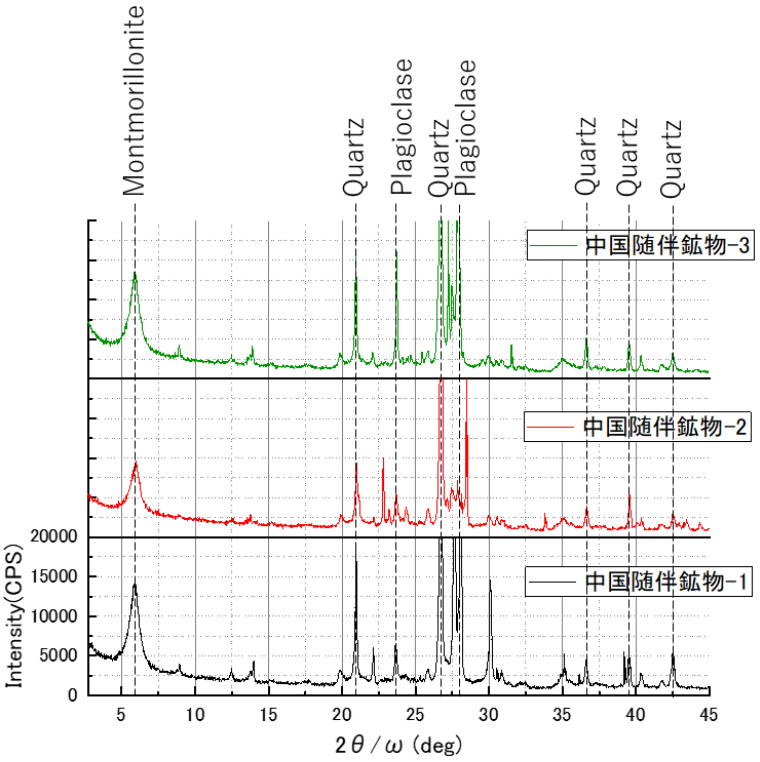


図 3-42　中国産原鉱石の随伴鉱物の XRD 結果

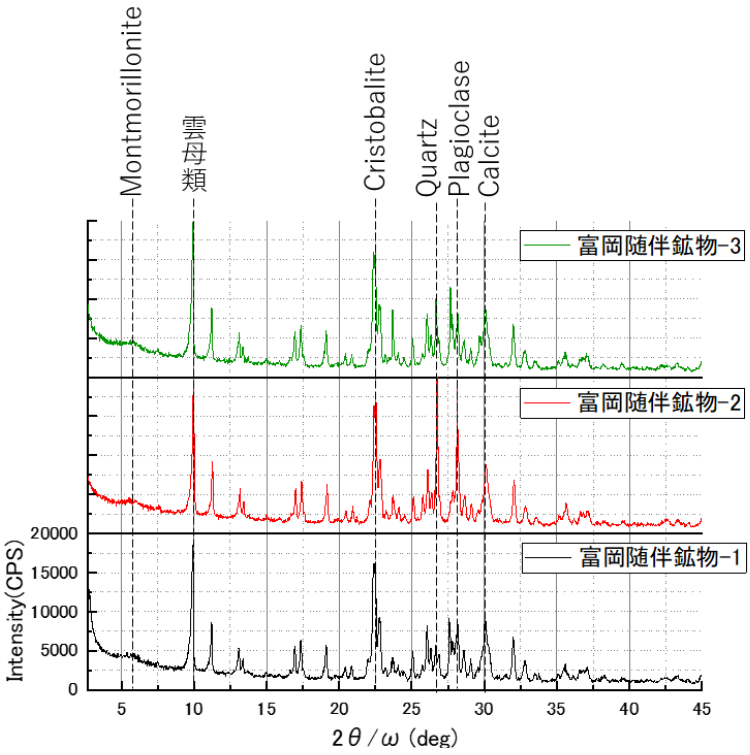


図 3-43　富岡産原鉱石の随伴鉱物の XRD 結果

これより，いずれの原鉱石試料においてもモンモリロナイトが残存していることが分かり，十分に洗い流すことができなかったと思われる．月布産原鉱石においては，雲母，方沸石，石英，斜長石，カルサイトが，アメリカ産原鉱石においては，雲母類，クリストバライト，斜長石，ドロマイトが，中国産原鉱石においては，斜長石，石英が，富岡産原鉱石においては雲母類，クリストバライト，斜長石，カルサイトがそれぞれ同定された．図 3-2 に示した洗い流しを行う前の XRD 分析結果に比べると随伴鉱物の同定が容易になったため，洗い出しには一定の効果があったものと考える．

次に，内部標準法による随伴鉱物の定量結果について述べる．まず，図 3-44～3-48 に，それぞれ月布産原鉱石＋CaF_2 10%混合試料，アメリカ産原鉱石＋CaF_2 10%混合試料，中国産原鉱石＋CaF_2 10%混合試料，富岡産原鉱石＋CaF_2 10%混合試料および CaF_2 単体の XRD 結果を示す．

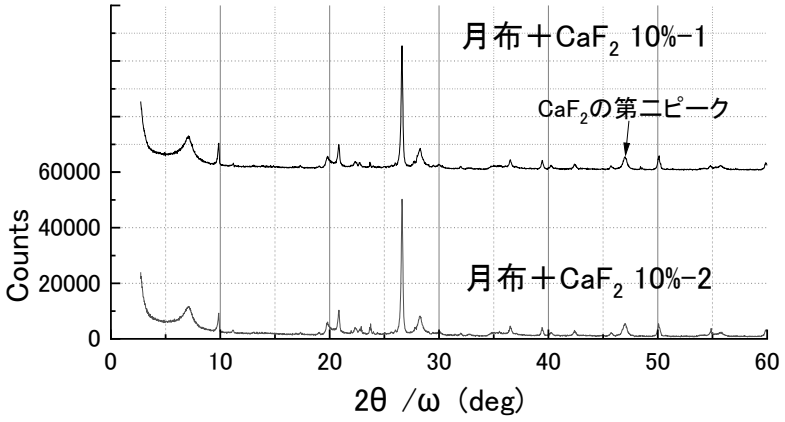


図 3-44　月布産原鉱石＋CaF_2 10％混合試料の XRD 結果

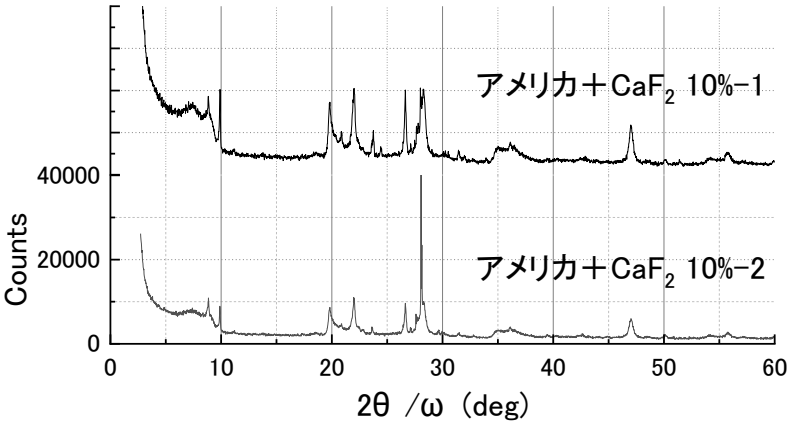


図 3-45　アメリカ産原鉱石＋CaF_2 10％混合試料の XRD 結果

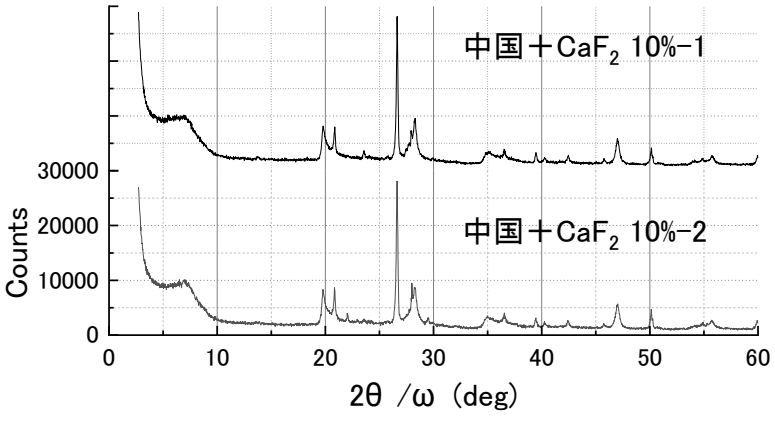


図 3-46　中国産原鉱石＋CaF_2 10％混合試料の XRD 結果

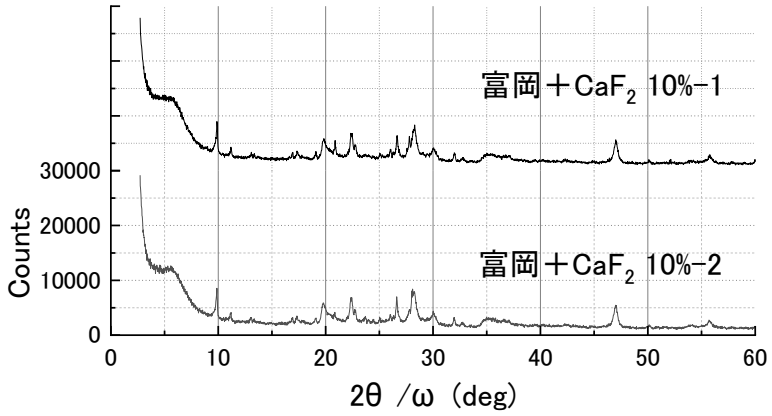


図 3-47　富岡産原鉱石＋CaF_2 10％混合試料の XRD 結果

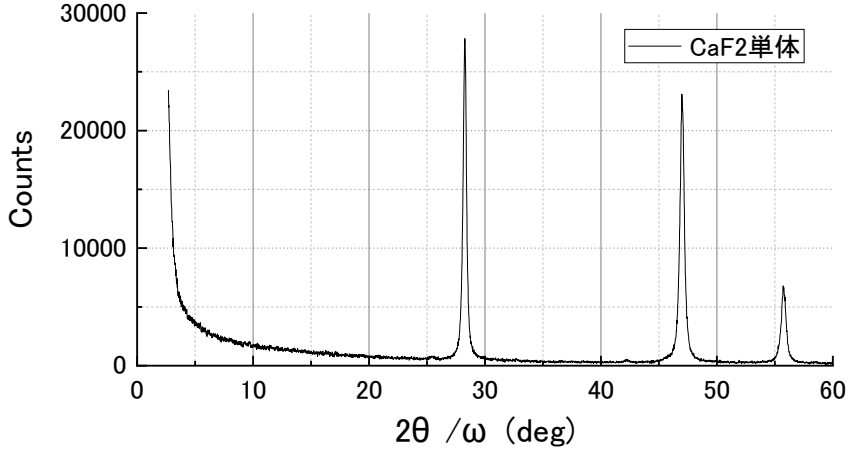


図 3-48　CaF_2 単体試料の XRD 結果

次に，表 3-32～3-35 に，各原鉱石の重量比による各鉱物の含有率の算出結果を示す．また，図 3-49 に各原鉱石における，各鉱物の重量割合に関する棒グラフを示す.

表 3-32　月布産原鉱石の内部標準法による鉱物組成定量結果

	月布−1	月布−2	平均	諸留ら [25)] (クニゲル V1)※
石英	25.9	27.8	26.9	18.9
カルサイト	2.8	3.9	3.4	2.5
斜長石	11.7	19.7	15.7	2.2
クリストバライト	-	-	-	0
ドロマイト	-	-	-	微量
クリノプチロライト	-	-	-	微量
※モンモリロナイト (MB 吸着量より算出)	44.7			57.3
合計	85.1	96.1	90.7	80.9

※クニゲル V1 は随伴鉱物を除去されており，月布産原鉱石の粉末試料とは異なるため，参考値

-：ピークが見られなかったことを意味する

表 3-33　アメリカ産原鉱石の内部標準法による鉱物組成定量結果

	アメリカ−1	アメリカ−2	平均
石英	4.3	4.9	4.6
カルサイト	-	4.9	2.5
斜長石	21.4	22.0	21.7
クリストバライト	11.7	10.2	11.0
ドロマイト	1.0	1.3	1.2
クリノプチロライト	-	-	-
※モンモリロナイト	51.1		
合計	89.5	94.4	92.1

表 3-34　中国産原鉱石の内部標準法による鉱物組成定量結果

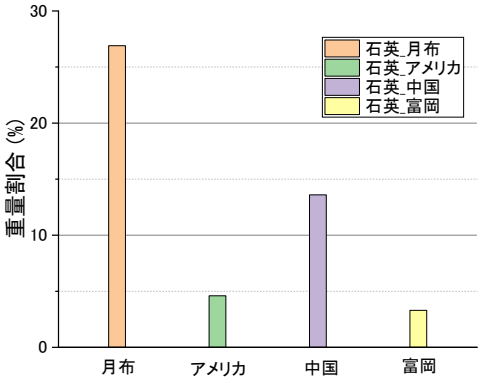
	中国−1	中国−2	平均
石英	14.1	13.1	13.6
カルサイト	-	3.0	1.5
斜長石	33.2	26.7	30.0
クリストバライト	-	0.7	0.4
ドロマイト	-	-	-
クリノプチロライト	-	-	-
※モンモリロナイト	50.4		
合計	97.7	93.9	95.9

表 3-35　富岡産原鉱石の内部標準法による鉱物組成定量結果

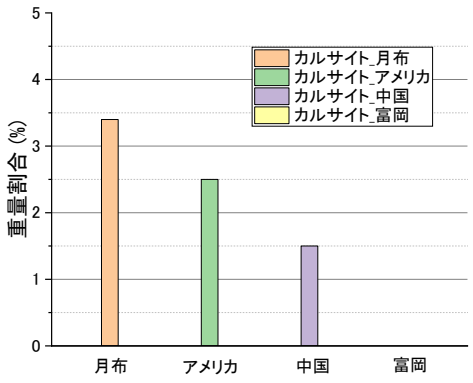
	富岡−1	富岡−2	平均
石英	3.5	3.0	3.3
カルサイト	-	-	-
斜長石	6.3	17.7	12.0
クリストバライト	5.7	6.0	5.9
ドロマイト	-	-	-
クリノプチロライト	-	-	-
※モンモリロナイト	45.8		
合計	61.3	72.5	67.0

Na 型ベントナイト原鉱石の 3 種類において，斜長石（28.2° 付近）のピークが強く，その結果含有量が 20%を超え，特に中国産では 30%程度と，極めて高い値を示した．このピークはモンモリロナイトのピークと重なっている可能性

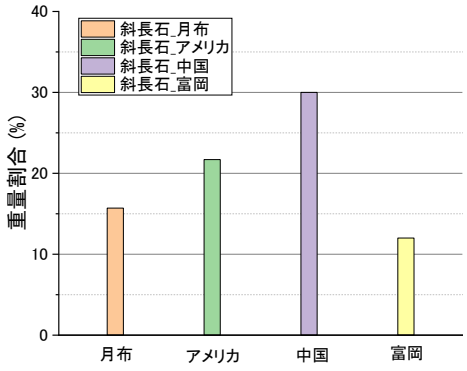
が考えられるため，水簸により精製したモンモリロナイトのピークからリストから該当するピークの積分強度を算出し，その面積を除くことで精度の高い含有率算出を行う．Ca 型ベントナイトである富岡産原鉱石では，全ての含有率を足しても 100%に大きく届かない値であり，今回検量した鉱物以外に含まれている鉱物が未だ多量に存在することが示唆された．前述した洗い出し後の試料の光学顕微鏡観察を行い，目視で含まれている鉱物の色調・形状を観察する．また，諸留らの研究においても，精製前のクニゲル V1 やその他のベントナイトにおいて，鉱物の値を合計しても 80～90%程度と，100%には届かない結果であった．



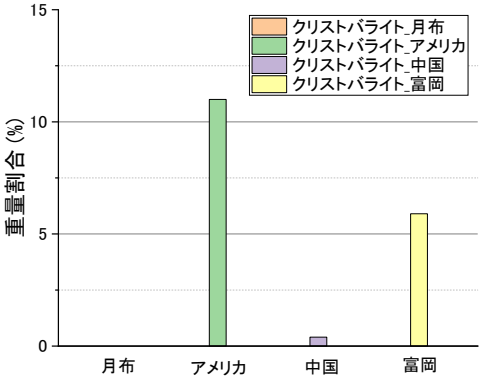
(a)石英の重量割合



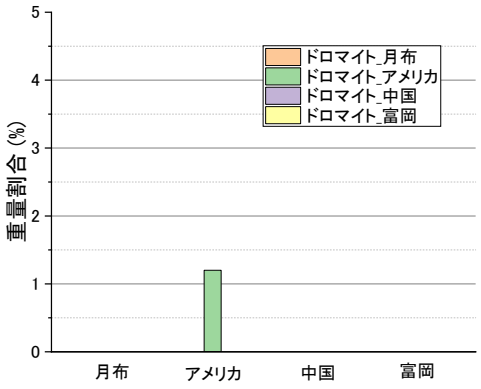
(b)カルサイトの重量割合



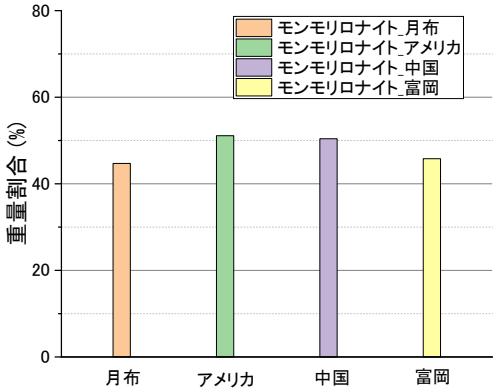
(c)斜長石の重量割合



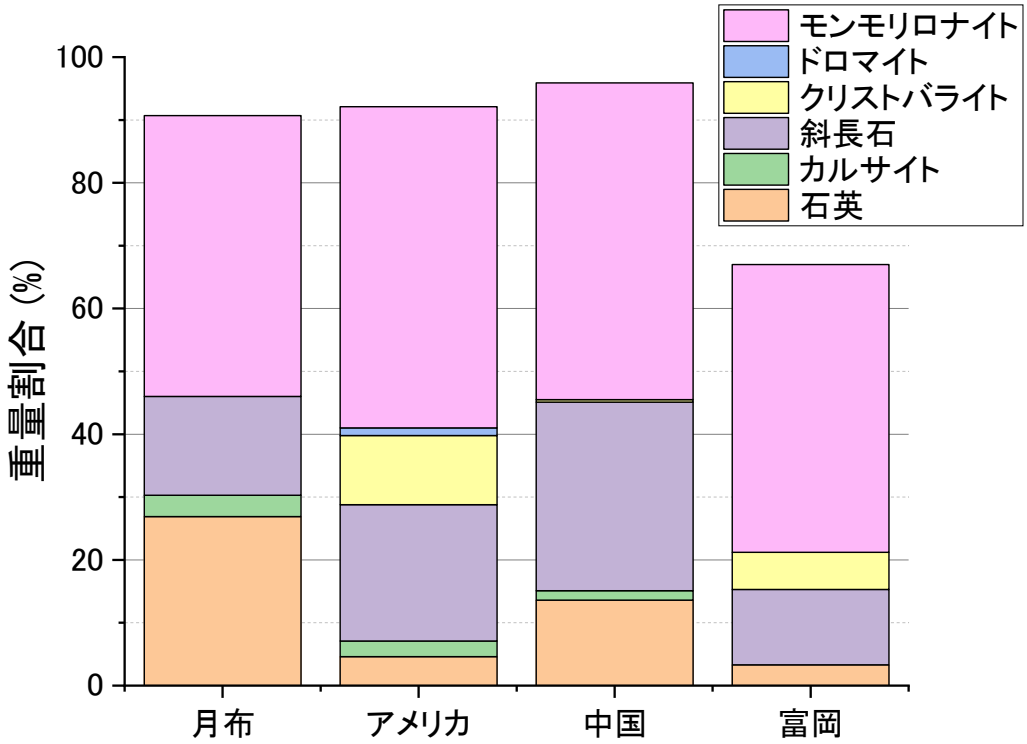
(d)クリストバライトの重量割合



(e)ドロマイトの重量割合



(f)モンモリロナイトの重量割合



(g)各鉱物の重量割合に基づく積み上げ棒グラフ

図 3-49　各鉱物の重量割合に関する棒グラフ

これより，石英については月布産原鉱石がその他の原鉱石の 2 倍以上多い割合で含有していることが分かる．カルサイトについては 1～3%と微量ではあるが，3 種類の Na 型ベントナイト原鉱石がいずれも含有していることが分かる．斜長石については，前述の通り，モンモリロナイトのピーク面積を含んでいると考えられている値で割合を算出しており，15～30%と非常に高い値が出ている．クリストバライトについては，アメリカ産および富岡産原鉱石において，5～10%程度含まれている結果となった．ドロマイトはアメリカ産原鉱石において約 1%含まれている以外は，ほぼ含まれていない結果であった．

今後，精度向上のために，洗い出し後の XRD 測定結果も踏まえて，今回取り上げた鉱物以外にも含有されていると考えられる雲母類等の鉱物について，同様に検量線を作成し，内部標準法による定量を行う．また，地質学的知見を踏まえながら，今回得られた鉱物組成の差異が膨潤特性など，諸特性に及ぼす影響を考察する．

3.3 残された課題と今後の計画

今年度の研究において残された課題を以下に示す.

1) 不攪乱供試体における膨潤圧, 膨潤変形特性のバラつきの原因を特定できていないため，引き続きデータ数を増やしていく．また，再構成供試体に関しては，本年度までに実施した粒径～0.425 mm，0.850～2 mm に加えて，2～4.75 mm など異なる粒径も増加して行い，各特性に対する膠結作用の影響評価に向けたデータベースをより充実させる必要がある.

2) 月布産原鉱石を対象とした XRD・膨潤圧連携試験の結果から，膠結作用の影響によりモンモリロナイト結晶層間への水の浸入と膨潤が阻害される可能性が示唆されたが，アメリカ産・中国産原鉱石については未実施であるため, 引き続き試験を実施し, 上記の推察の妥当性を必要していく必要がある.

3) 膨潤変形試験の装置および試験方法の向上に向けた検討を行う.

4) 3 か年の研究で得られた試験結果をまとめるとともに，膠結作用の程度と膨潤特性への影響を評価するための手法確立に向けた考察を行う.

上記の課題と表 2-1～2-3 に示した 3 か年の研究計画を踏まえて，2020 年度の研究スケジュールを表 3-36 に示す.

表 3-36　2020 年度の研究スケジュール

項　目	2020/4	5	6	7	8	9	10	11	12	2021/1	2	3
再構成試料（粒径：2～4.75 mm）の膨潤圧・膨潤変形特性の評価		→	→	→	→	→						
XRD･膨潤圧連携試験の実施（アメリカ産･中国産原鉱石試料･再構成試料）							→	→	→	→		
膨潤変形試験の試験方法および装置の向上		→	→	→	→	→	→	→	→	→		
まとめ・考察				→	→	→	→	→	→	→		
2020 年度報告書作成										→	→	

4　まとめ

今年度，本研究で得られた成果を以下に示す.

1) 3 種類の Na 型ベントナイト原鉱石から作製した，粒径の異なる再構成供試体の膨潤圧，膨潤変形特性を評価した．その結果，膨潤圧特性においては，乾燥密度が高くなるにつれて, 粒径の大きい 0.850～2 mm の再構成供試体の値と粒径～0.425 mm の供試体の値の差が大きくなる傾向が見られた．すなわち，乾燥密度が高くなるにつれて，間隙が小さくなり，粒子の有する固結の影響が大きくなることが分かった．また，膨潤変形特性においても，0.850～2 mm の再構成供試体の方が，粒径～0.425 mm に比べて最終的な膨潤変形率が低い傾向が見られた．今後，粒径 2～4.75 mm の試料など，粒度を変化させた試料を用いた実験的検討を継続して行い, 試験結果の精度向上と膠結作用の膨潤特性に及ぼす影響を定量的に評価することを目指す.

2) 月布産原鉱石の不攪乱供試体と再構成供試体を用いて，XRD・膨潤圧連携試験を実施した．その結果，従来の膨潤圧試験と同様，不攪乱供試体の膨潤圧は再構成供試体に比べて低く留まる結果が得られると同時に, モンモリロナイトの底面間隔には大きな差異がないことが分かった．しかし，同一の含水比の試料についてピークを抽出して比較したところ, 不攪乱供試体の方がモンモリロナイトの結晶層間に存在する水分子の量が少ないことを示す結果が得られた．このことから，セメンテーションの影響によりモンモリロナイト層間への水の浸入とそれに伴う膨潤が阻害されうることが実験的に示された．今後は，アメリカ産原鉱石と中国産原鉱石についても同様に試験を行う予定である.

3) 各原鉱石の鉱物組成の定量的な評価のため，XRD による内部標準法を実施した．その結果，石英，カルサイト，斜長石，クリストバライト，ドロマイトについて含有割合を算出することができ，中でも石英，斜長石の含有割合が高いことが分かった．今後は，既往の研究と比べて非常に高い値となった斜長石については割合の再算出を行うとともに, 洗い出しにより同定された, 上記の 5 種類以外の鉱物についても同様に内部標準を実施し, 重量割合を算出して精度を上げる．また，鉱物組成の差異が諸特性に及ぼす影響を，地質学的観点も踏まえて考察する.

また，次年度においては，セメンテーションのメカニズムを解明することを目的として，原鉱石試料と再構成試料の薄片試料の SEM 観察を行い，鉱物の構成する粒子構造について評価を行う.

参考文献

[1] 社団法人土木学会，エネルギー土木委員会，新エネルギー技術小委員会：土木技術者のための高レベル放射性廃棄物地層処分の現状と技術的課題 pp.26-27，1990.

[2] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性，－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－，分冊 2　地層処分の工学技術，JNC TN1400 99-022，p.Ⅳ-69，1999.

[3] 緒方信英，小崎明郎，植田浩義，朝野英一，高尾肇：高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術，－その 4　人工バリアの設計と製作－，原子力バックエンド研究，Vol.5，No.2，pp.103-121，1999.

[4] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構：日本原子力研究開発機構（JAEA）における地層処分技術に関する研究開発の現状について，地層処分研究開発調整会議（第 1 回会合）資料 2-2（平成 29 年 5 月 31 日），https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/chisou_shobun_chousei/pdf/001_02_02.pdf，p.29，2017.（2019 年 5 月 25 日アクセス）

[5] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性，－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－，分冊 3 地層処分システムの安全評価，JNC TN1400 99-023，p.Ⅳ-44，1999.

[6] 例えば，核燃料サイクル開発機構東海事業所：アルカリ性水溶液中で変質させたベントナイトの膨潤試験（試験報告），JNC TN8430，2005-003，pp.1-47，2005.

[7] 例えば，三好悟，木村志照，森上慎也，甚野智子，山本修一： 放射性廃棄物処分におけるベントナイト層の長期性能に関する研究，大林組技術研究所報 No.77，pp.1-10，2013.

[8] 西本壮志，岡田哲実，澤田昌孝：高レベル放射性廃棄物処分場ニアフィールド模型を用いた遠心力載荷装置による長期挙動評価試験，第 41 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，公益社団法人土木学会，pp.173-178，2012.

[9] 鹿園直建：放射性廃棄物の地層処分に対するシミュレーション研究とナチュラルアナログ研究の意義，地質ニュース 499 号，pp.13-22，1996.

[10] W. Russell Alezander, Heini M. Reijonen, Ian G. McKinley：Natural analogues:

studies of geological processes relevant to radioactive waste disposal in deep geological repositories，Swiss Journal of Geosciences, 108，pp.75-100，2015.

[11]寺田賢二，関根一郎，雨宮清，伊藤雅和：中国産ベントナイトの利用可能性調査報告書, 原環センター技術報告書 RWMC-TRJ-10002, pp.57-62, 2011.

[12]伊藤雅和，石井卓，中島均，平田征弥：ベントナイトの成因・生成環境に関する一考察，粘土科学第 38 巻第 3 号，pp.181-187，1999.

[13]関根一郎，伊藤雅和，山本卓也，雨宮清，佐藤泰，寺田賢二：海外産ベントナイトの特徴と放射性廃棄物処分への適用可能性調査，土木学会第 63 回年次学術講演会，CS05-23，pp.213-214，2008.

[14]澤田武夫：安中―富岡地域ベントナイト鉱床に関する被熱履歴の推定，粘土科学第 43 巻第 3 号，pp.137-144，2004.

[15]伊藤弘志，鈴木啓三，小峯秀雄：粒状ベントナイトの締固め・透水特性とその簡易評価方法，土木学会論文集 C Vol. 62，No. 4，pp. 803-813，2006.

[16]小峯秀雄，緒方信英：塑性限界を導入した粘土の締固め特性の評価法の提案，土木学会論文集 No. 436，Ⅲ-16，pp. 103-110，1991，9.

[17]地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説―二分冊の 1―, pp.137-142, 2009.

[18]動力炉・核燃料開発事業団東海事業所：ベントナイトの鉱物組成分析, PNC TN8430，93-003，pp.1-114，1993.

[19]日本ベントナイト工業会：日本ベントナイト工業会試験方法―ベントナイト（粉状）の膨潤試験方法―，JBAS-104-77，pp.7-9.

[20]地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説―二分冊の 1―, pp.361-367, 2009.

[21]H. Komine, N. Ogata, Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite, Canadian Geotechnical Journal, Vol.31, No. 4, pp.478-490, 1994.

[22]棚井憲治，菊池広人，中村邦彦，田中幸久，廣永道彦：ベントナイト系材料の標準的室内試験法構築に向けての試験法の現状調査と試験による検討―日本原子力研究開発機構/電力中央研究所共同研究成果報告―（共同研究），JAEA-Research 2010-025，pp.1-186，2010，8.

[23]H. Wang, T. Shirakawabe, D. Ito, H. Komine, Y. Watanabe, Designing an apparatus for swelling pressure measurement of compacted bentonite,

Geotechnique (to be published)

[24]例えば，S. Morodome, K. Kawamura, Swelling behavior of Na- and Ca montmorillonite up to 150℃ by IN SITU X-ray diffraction experiments, Clays and Clay Minerals, Vol. 57, No. 2, pp. 150-160, 2009.

[25]H. Wang, T. Shirakawabe, H. Komine, D. Ito, T. Gotoh, Y. Ichikawa, Q. Chen, Movement of water in compacted bentonite and its relation with swelling pressure, Canadian Geotechnical Journal, 2019.

[26]中井泉，泉富士夫編：粉末 X 線解析の実際（第 2 版），朝倉書店，pp. 65-68，2009．7.

[27]諸留章二，伊藤弘志：X 線内部標準法によるベントナイトの鉱物定量，第 55 回粘土科学討論会講演要旨集，P5，pp.162-163，2011.

[28]小峯秀雄，小山田拓郎，尾崎匠，磯さち恵：締固めた粉体状ベントナイト各種の水分移動特性と膨潤圧挙動に関する考察，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol. 74，No. 1，pp.63-75，2018.

[29]田中幸久：ベントナイトの吸水膨潤モデルによる膨潤圧試験における試験条件の影響評価，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.67, No. 4, pp. 513-531, 2011.

2019 年度　外部発表

【学術論文】

1. （査読付）H. Wang（筆頭），T. Shibue，H. Komine “Solid-state magic-angle spinning ^{1}H-NMR study of water/ montmorillonite interface”, (2019.10 投稿済み，査読中)

2. （査読付）H. Wang（筆頭），T. Shirakawabe, D. Ito, H. Komine, Y. Watanabe, E. Yoshikawa “Apparatus designed to measure swelling pressure of compacted bentonite”, (2019.10 投稿済み，査読中)

3. （査読付）H. Wang（筆頭），T. Shirakawabe, H. Komine, D. Ito, T. Gotoh, Y. Ichikawa, Q. Chen “Movement of water in compacted bentonite and its relation with swelling pressure”, Canadian Geotechnical Journal, doi:10.1139/cgj-2019-0219, 2019.8.

【口頭発表】

1. （招待講演）H. Wang「Movement of water in compacted bentonite and its relation with swelling pressure」 The Seminar on Isolation Technology for Significant Power Plant Structure and Engineering Behavior of Buffer in Deep Geological Repository for Waste，中国・上海大学，2019.

2. （招待講演）王海龍「吸水による締固めたベントナイトの水分移動」原子力発電環境整備機構研究交流会，2019.

3. 伊藤大知，小峯秀雄，後藤茂，王海龍，諸留章二，関口高志，北原慎也：固結したベントナイト系緩衝材の自己シール性の維持に関する一考察，第 54 回地盤工学研究発表会（さいたま），D-05，1066，pp.2131-2132，2019.

4. 伊藤大知，小峯秀雄，後藤茂，王海龍，諸留章二，関口高志，北原慎也：ベントナイト原鉱石の膨潤特性測定結果に基づく緩衝材への年代変化に関する推察，土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会，Ⅶ-134，2019.

5. 王海龍(筆頭)，小峯秀雄，白河部匠，伊藤大知，市川雄太.「締固めたベントナイトの吸水膨潤時における水分子の移動」，第 54 回地盤工学研究発表会，p.845-846, 2019.7.

研究報告 7

断層周辺の地下水流動特性および物質移行特性に関する包括的研究

日本原子力研究開発機構　東濃地科学センター

渡辺　勇輔

1. 背景・目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価では，廃棄体に含まれる放射性核種が地下水の作用で生物圏に移行することを想定する「地下水シナリオ」が重要な評価対象となる。そのため，地下深部での核種の移行挙動を評価するために重要な地下水流動や物質移行を支配する地質構造の働きを理解する必要がある。

断層は，その内部に存在するダメージゾーンや断層ガウジの透水性や収着特性，地下水流動の方向と断層面の相対的な位置関係などに応じて，地下水や物質の選択的な移行経路としても，それらの流動や移行を抑制する水理構造としても機能すると考えられる。例えば，大丸ほか（2012）は岐阜県東濃地域に分布する主立坑断層が，断層に直交する方向において透水性が低く，水理境界として機能していること，また，主立坑断層の北東側および南西側には揚水試験における揚水後に水位が回復しにくい領域が存在し，断層に囲まれることで周囲から地下水が流入しにくいコンパートメント領域となっていることを指摘した。さらに，断層近傍では断層活動により粘土鉱物などが生成し，周辺の母岩とは収着特性が異なるものと考えられる。このように，断層は地殻における地下水流動や物質移行を規制する重要な構造といえる。そのような観点から，これまでも多くの断層を対象として水理特性に関する検討が行われてきており，多くのケーススタディを通して各断層の水理特性や物質移行特性に関する詳細な知見が蓄積されているものの，断層周辺の地下水流動や物質移行における断層機能の一般的な理解には至っていない。そこで本研究では，断層個々の水理特性や物質移行特性を詳細に検討するものとは異なるアプローチとして，地下水流動や物質移行に関するパラメータを自由に設定できる仮想的な断層モデルを用いて地下水流動解析と反応輸送解析を行うことで，断層の水理特性や物質移行特性と周辺の地下水流動や物質移行との関係を明らかにすることを目指す。また，断層周辺の収着特性を把握するために，断層に生成した鉱物と地下水中の溶存イオンとの収着試験を行う。このような検討を通して，断層が地下水流動や物質移行を抑制する構造として機能しうるのか，また，断層がバリアとして機能することが期待できる場合には，どのような水理特性および物質移行特性を有する断層のバリア機能が大きいのかを把握することを目的とする。

2. 全体研究計画(3 ヵ年における全体計画)

2018 年度

断層ガウジ, ダメージゾーンの厚さや透水性, 枚数, 断層の走向や傾斜, 枚数, 地下水流動方向と断層の関係などを変化させ，様々な条件で仮想的な水理地質モデルを作成し，地下水流動解析と物質移行解析を行った。

また断層ガウジを含む断層破砕帯の岩石試料を用いた元素収着試験を実施した。2018 年度は試料の鉱物組成や化学組成分析によるキャラクタリゼーションと，収着試験の試験条件の検討を行った。

2019 年度

引き続き仮想モデルを用いて地下水流動解析を行い，周辺で測定される水圧データと比較することでモデルの修正を行う。さらに，トリチウムや水素酸素同位体，塩化物イオンなど，水—岩石反応を考慮する必要がない保存性トレーサーについて物質移行解析を行い，周辺の地下水における実測値と比較することでモデルの修正を行った。

前年度に検討した収着試験条件を参考に Eu および Cs の収着試験を実施し，各元素の収着特性を調べた。

2020 年度

前年度までに得られた収着試験の結果を物質移行解析に反映させ，岩石による収着反応を考慮した物質移行解析を実施する。

また，これまでのバッチ式収着試験に加えて，岩石試料の割れ目や鉱物分布を保持した試料を用いた収着試験を実施し，地下水の移行経路や経路上での元素収着特性について調べる。

3. 2018 年度の成果概要

2018 年度は断層周辺の地下水流動特性と地下水中元素の移行特性とをそれぞれ確認するため，以下の 2 点について試験および解析を実施した。

(1) 仮想的な水理地質モデルを用いた地下水流動解析および物質移行解析

コンパートメント構造が周辺の地下水流動や物質移行に及ぼす影響を明らかにするための予察的検討として，コンパートメント領域を含む仮想的な水理地質モデルを作成し，断層の特性を変化させて地下水流動解析と物質移行解析を実施した。さらに，地下水流動解析で算出された地下水流動状態を踏まえ，コンパートメント領域における物質移行解析を行った。今回の物質移行解析では，深度 300 m 以深のコンパートメント領域内にトレーサーの初期濃度を与え，トレーサーが 10 万年間でどのように移行するかを算出した。計算には，三次元多成分物質移行解析モデル MT3DMS(Zheng and Wang, 1999)を使用し，10 万年間の非定常解析を実施した。

解析の結果，コンパートメントを構成する断層の特性(断層ガウジの有無と，断層ガウジおよびダメージゾーンの厚さ)が変化することで周辺の地下水流動状態や物質移行状態が変化し，高透水性のダメージゾーンのみが分布する場合に比べて，低透水性の断層ガウジが存在する場合にはコンパートメント領域内の物質移行が抑制されることが示された。

(2) 断層周辺岩石のキャラクタリゼーションおよび Eu と Cs の収着試験

断層周辺の鉱物と元素の収着挙動を把握するため，瑞浪超深地層研究所研究坑道内の花崗岩の深度 300 m におけるボーリング調査(鶴田ほか, 2012)によって採取された 10MI22 号孔岩石コア試料を用いた鉱物組成，化学組成分析と収着試験を実施した。

試験の結果，Eu と Cs が花崗岩およびその変質岩石に対して異なる収着挙動を持つことが示唆された。また，収着挙動の違いは各試料に含まれる黒雲母，緑泥石，イライトやその他の粘土鉱物の含有量の違いによるものであると推察された。また，次年度以降の pH やイオン強度を変化させた収着実験に向けて，試験時間や岩石試料の処理方法などの諸条件を検討することできた。

4. 2019 年度研究実施内容

4.1 断層の有無，キャップロックの有無が地下水流動に及ぼす影響

本研究では，バリア機能を示す可能性が高い水理地質構造として主立坑断層の例（大丸ほか，2012）でも示されたようなコンパートメント構造に注目し，図 1 に示すような平行する 2 枚の断層系が直交することで形成されるコンパートメント領域を有する仮想水理地質モデルを用いた。本モデルにおいて，低透水性の断層ガウジやキャップロックの有無などの条件を変化させたモデルを作成し，地下水流動解析を行うことでそれらと断層およびコンパートメント領域周辺の地下水流動状態との関係について検討した。

今回使用した仮想的な水理地質モデルのグリッド数は水平方向に 151×151 グリッド，深度方向に 22 グリッドである（図 2）。1 グリッドの大きさは横方向が 10×10 m，深度方向が 20 m であることから，解析領域は 1510×1510 m，深度方向が 440 m に対応する。これらのグリッドで浅部の 3 層は風化帯，それ以深を健岩部とした。風化帯は断層を境に，上下方向に 1 グリッド分の変位が生じ，固定水頭の河川に向けて標高が低下するものとした。その結果，地形の勾配は 0.026 となり，第 2 次取りまとめで整理された山地の動水勾配 0.061 と低地の動水勾配 0.008 の中間の値となっている（JNC，1999）。モデルにキャップロックを設定する場合には，風化帯の下，すなわち 4 層目にキャップロックを設定した。このような水理地質構造を有する仮想モデルに，地下水涵養量 400 mm/年（日本における河川の渇水流量 1.1 mm/day（建設産業調査会，1998）から推定）を与え，モデルの 1 辺を河川に対応する固定水頭とすることで地下水流動を生じさせた。地下水流動解析には三次元有限差分地下水流動モデルである MODFLOW を使用した。

4.1.1 研究手法

断層の有無，キャップロックの有無が地下水流動に及ぼす影響について検討するため，断層もキャップロックも含まないモデル，断層を含みキャップロックを含まないモデル，キャップロックを含み断層を含まないモデル，断層とキャップロックの両方を含むモデルの 4 種類のモデル（図 3）を用いて地下水流動解析を行った。本検討で使用した水理地質モデルにおける水理パラメータを表 1 にまとめる。母岩と断層のダメージゾーンおよび断層ガウジの透水性は，Rawling et al.(2001)で報告された花崗岩の浸透率（図 4）を参考に設定した。断層近傍では断層面からの距離に応じて亀裂の頻度や浸透率が変化することが明らかとなっていることから（例えば，Faulkner et

al., 2010, 図 5), ダメージゾーン内の透水係数は断層からの距離に応じて変化し, 断層面近くで透水性が高く, 断層から離れるに従って母岩の透水係数まで低下するように設定した(図 6)。上述のような水理地質モデルを用いて定常解析を行い, 水頭の三次元分布を求めた上で, 粒子追跡法により流跡線を求めることで, 岩盤中の地下水流動状態を可視化した。図 7 に示すように, 粒子の移行開始地点はコンパートメント領域内の 3 箇所である。解析には米国地質調査所によって開発された MODPATH を使用した。

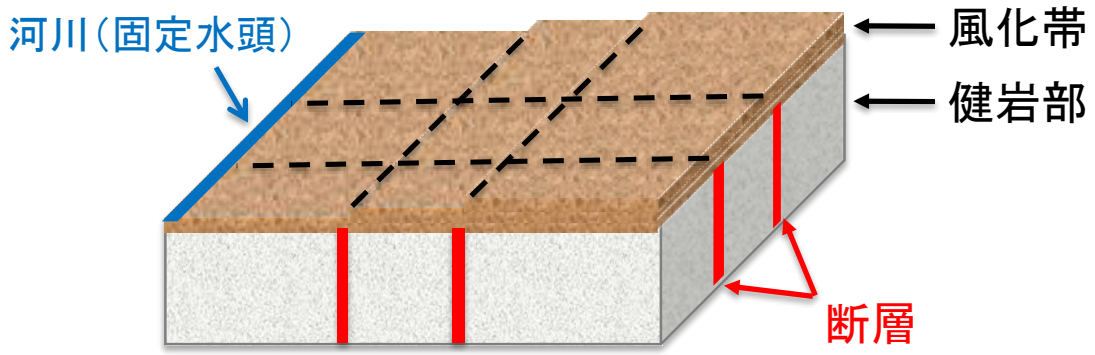


図 1 本研究で想定したコンパートメント領域を有する水理地質構造

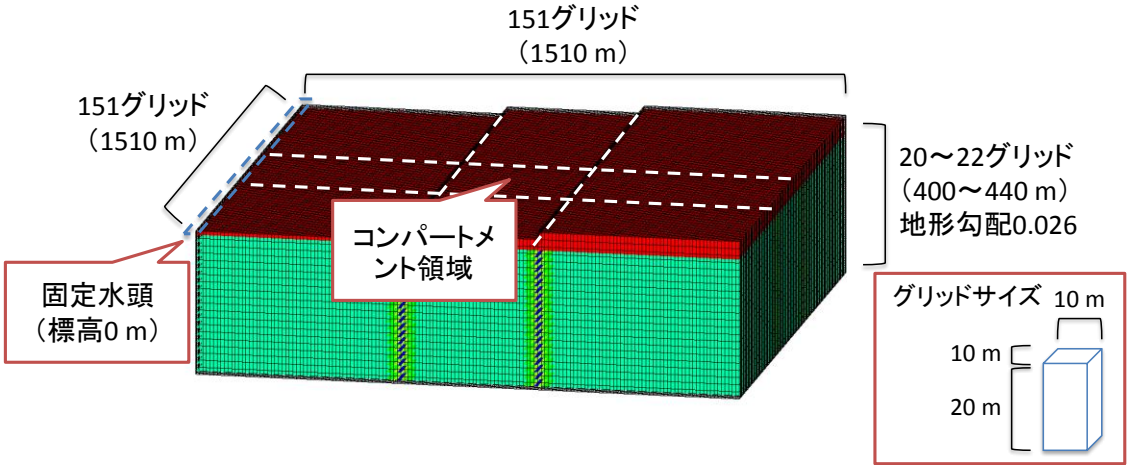


図 2 図 1 の水理地質構造に基づく仮想水理地質モデル

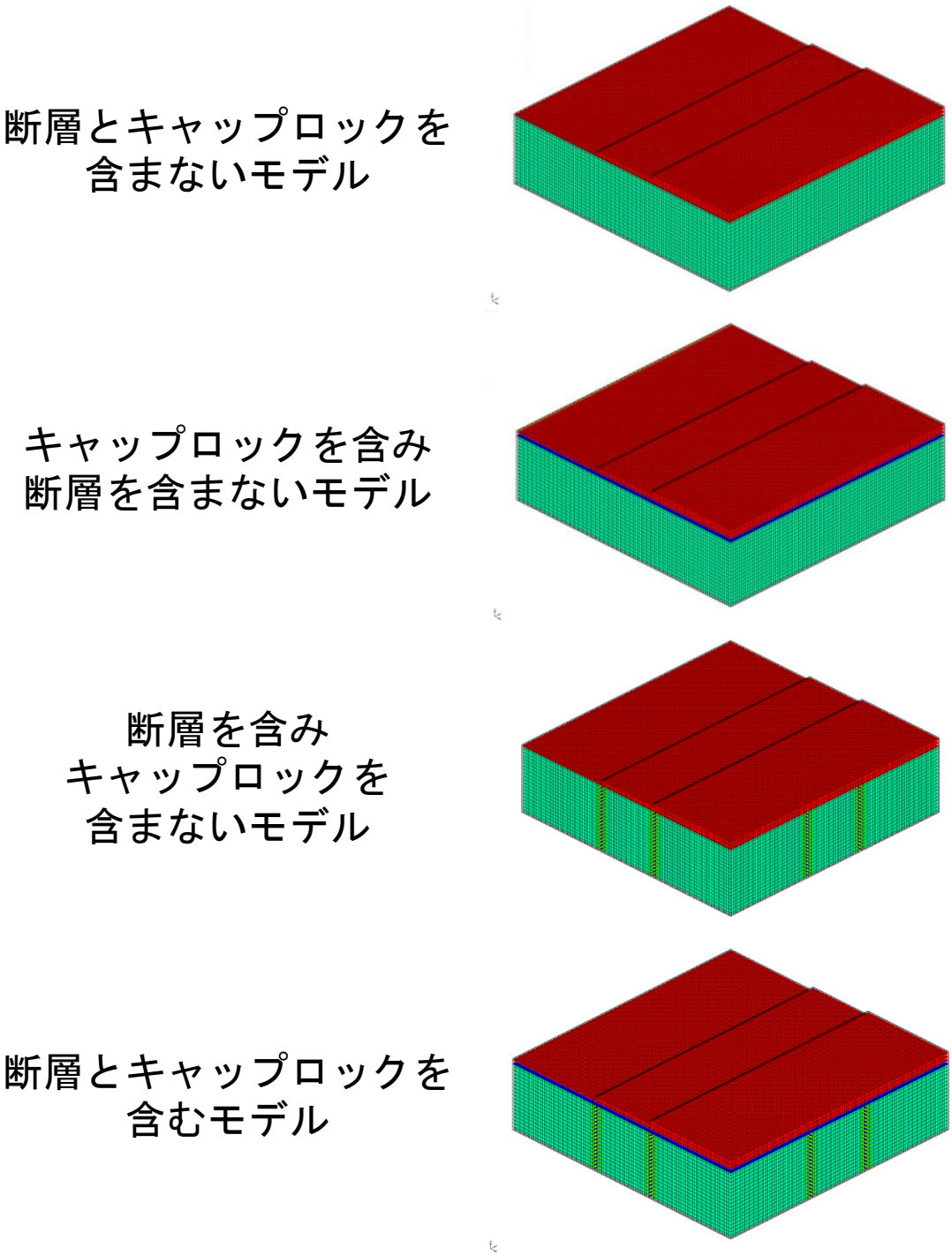


図 3 解析に用いた水理地質モデル

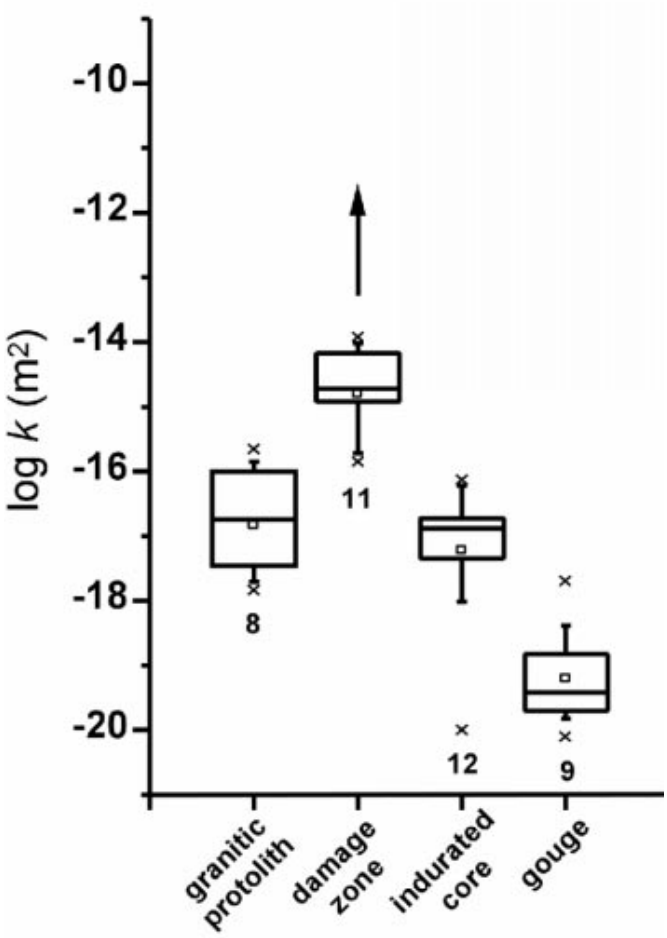


図 4 花崗岩体における断層周辺の浸透率（Rawling et al., 2001）

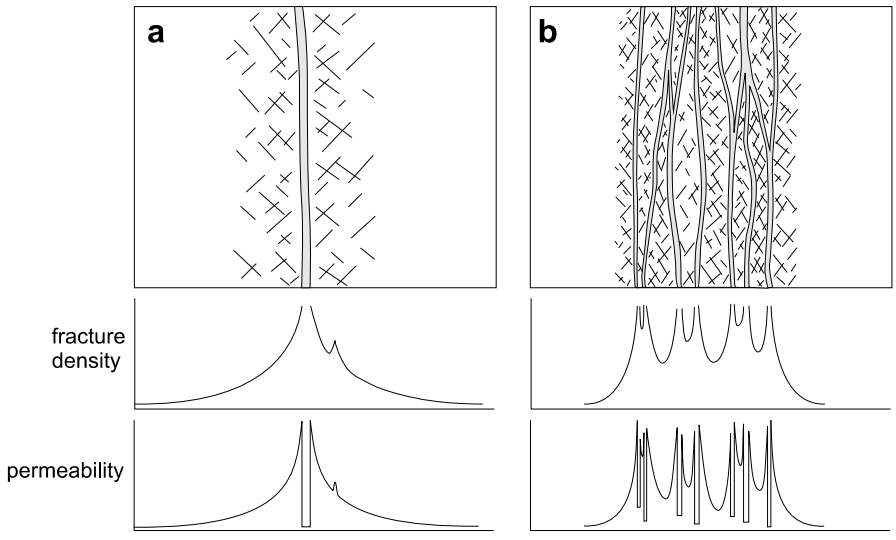


図 5 断層周辺における亀裂密度と浸透率分布の概念モデル
（Faulkner et al., 2010）

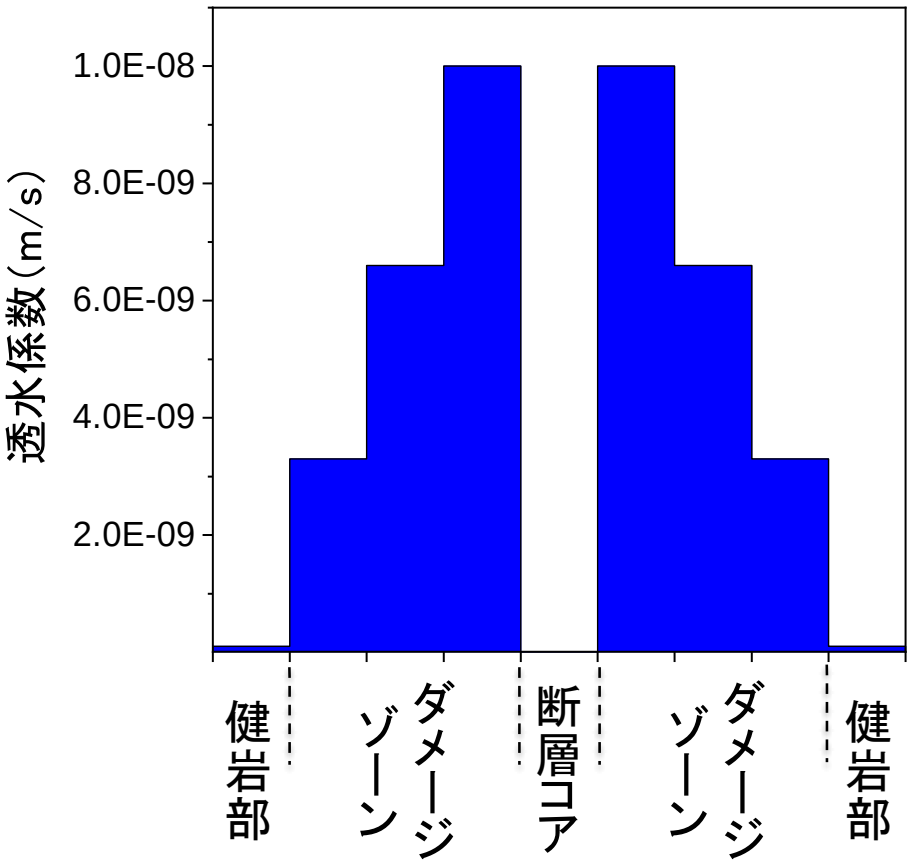


図 6 断層における透水係数の設定

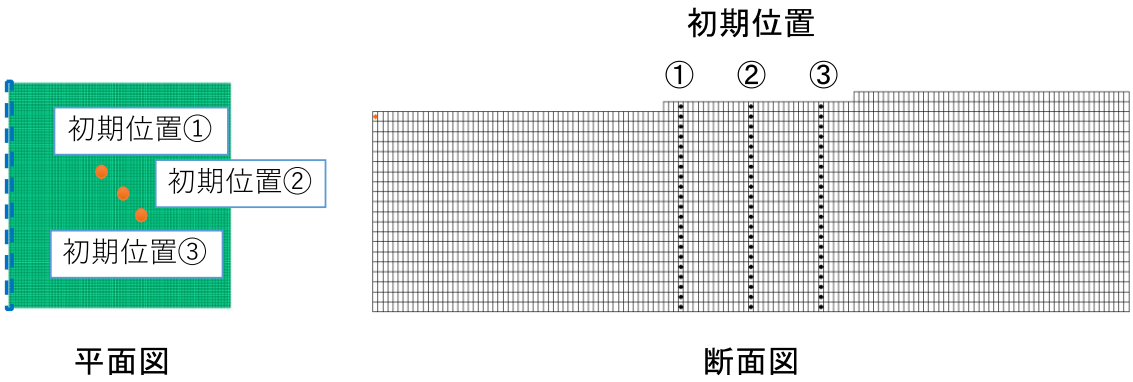


図 7 粒子追跡法による解析における粒子の移行開始地点

表 1　仮想水理地質モデルにおける設定値

涵養速度	1×10^{-8} m/s （日本の涵養速度 0.4 m/年）	
透水係数	風化帯	1×10^{-5} m/s
	健岩部	1×10^{-10} m/s
	キャップロック	1×10^{-11} m/s
	ダメージゾーン	1×10^{-8} m/s を最大とし，断層コアからの距離に応じて 1×10^{-11} m/s まで段階的に減少
	断層コア	1×10^{-11} m/s
間隙率	風化帯	0.3
	健岩部	0.03
	キャップロック	0.5
	ダメージゾーン	0.1
	断層コア	0.5

4.1.2　結果と考察

図 8 に示した，仮想的な水理地質モデルを用いて行った地下水流動解析の結果について述べる。今回実施した全ての解析では，相対的に標高の高い領域（モデル断面図で右側の領域）で水頭が高く，固定水頭のグリッド周辺（同様に左側の領域）で水頭が低い結果となった。断層とキャップロックを含まない水理地質モデル（図 9）では，このような水頭分布に依存し，標高の高い領域から固定水頭のグリッドに向けた地下水流動が生じていることが粒子追跡の流跡線から明らかである。浅部の風化帯では地表面と水平に固定水頭のグリッドに向かう速い流れが認められる一方で，高標高域深部の健岩部では地表から地下深部に向かう流れが，低標高域および固定水頭のグリッド周辺では深部から浅部へ向けた流れが認められ，それぞれ地下水流動における涵養域と流出域に対応していると考えられる。また，平面図に示された流跡線から明らかなように，地下水は粒子を配置した箇所から固定水頭グリッドが存在するモデルの左側へ向けて，直線的に移動していることがわかる。

次に，キャップロックを含み断層を含まないモデルの解析結果（図 9）でも，風化帯では地表に沿った流れが生じる，健岩部では高標高域が涵養域，固定水頭グリッドが流出域となっている，粒子追跡では移行開始地点から固定水頭グリ

ッドに向けた直線的な流れが生じるといった点で，キャップロックを含まないモデルと同様の結果となった。しかし，キャップロックを含まないモデル（図 8）に比べて 10 万年間の地下水流動を示す流跡線は短く，低透水性のキャップロックにより地下水流動が抑制されているといえる。

断層を含みキャップロックを含まないモデルの解析結果（図 10）でも，浅部の風化帯における地下水流動はこれまでに述べたモデルと同様である。その一方で，深部の健岩部における地下水流動は断層の影響を強く受けることが明らかとなった。モデル中央を移行開始地点とした場合には直線的に固定水頭グリッドにむけた流動が認められるが，低透水性の断層ガウジを乗り越えるような地下水流動が生じていることがわかる。また，コンパートメント領域の外側，すなわち断層近くに配置された粒子は断層のダメージゾーンを移行し，直線的に固定水頭グリッドへ向けて流動するのではなく，移行開始地点から固定水頭グリッドに向かう方向と直交する方向（モデル平面図における上下方向）の成分も有する。固定水頭グリッドに近い箇所に配置した粒子の移行状態について着目すると，健岩部内の比較的浅部に配置された粒子はダメージゾーン内を浅部に向かって移行した後に低透水性の断層ガウジを乗り越え，その後も主にダメージゾーン内を移行して 10 万年間のうちに固定水頭グリッドまで到達した。深部に配置された粒子は断層深部を通過した後，ダメージゾーンを移行してこちらも固定水頭グリッドに到達した。

最後に，断層とキャップロック両方を含むモデルでの解析結果を図 11 に示す。断層とキャップロックが存在する場合でも，断層近くに配置した粒子はダメージゾーンを通っており，移行経路に断層の影響を受けていることがわかるが，断層のみのモデルで見られたような断層を乗り越える流れは認められず，概ね地表面と平行に流動する。また，10 万年間の移行距離は，移行開始地点にもよるが，断層およびキャップロックが存在しない場合や，キャップロックのみが存在する場合に比べても短い。以上から，ダメージゾーンを有する断層から構成されるコンパートメント領域でも，キャップロックが存在する場合には地下水流動や物質移行を抑制する構造として機能しうる可能性が示された。

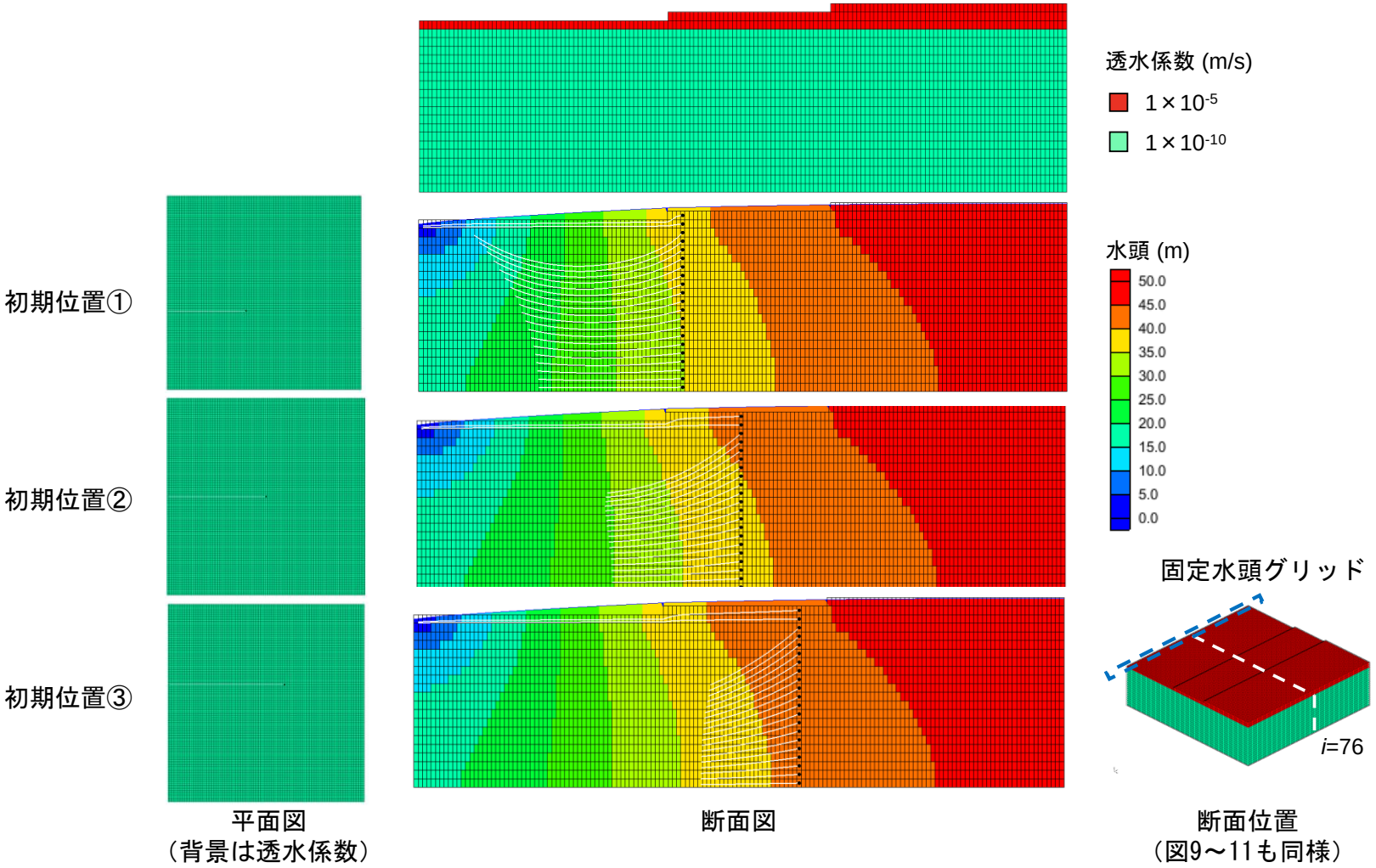


図 8 断層およびキャップロックを含まないモデルでの地下水流動解析結果

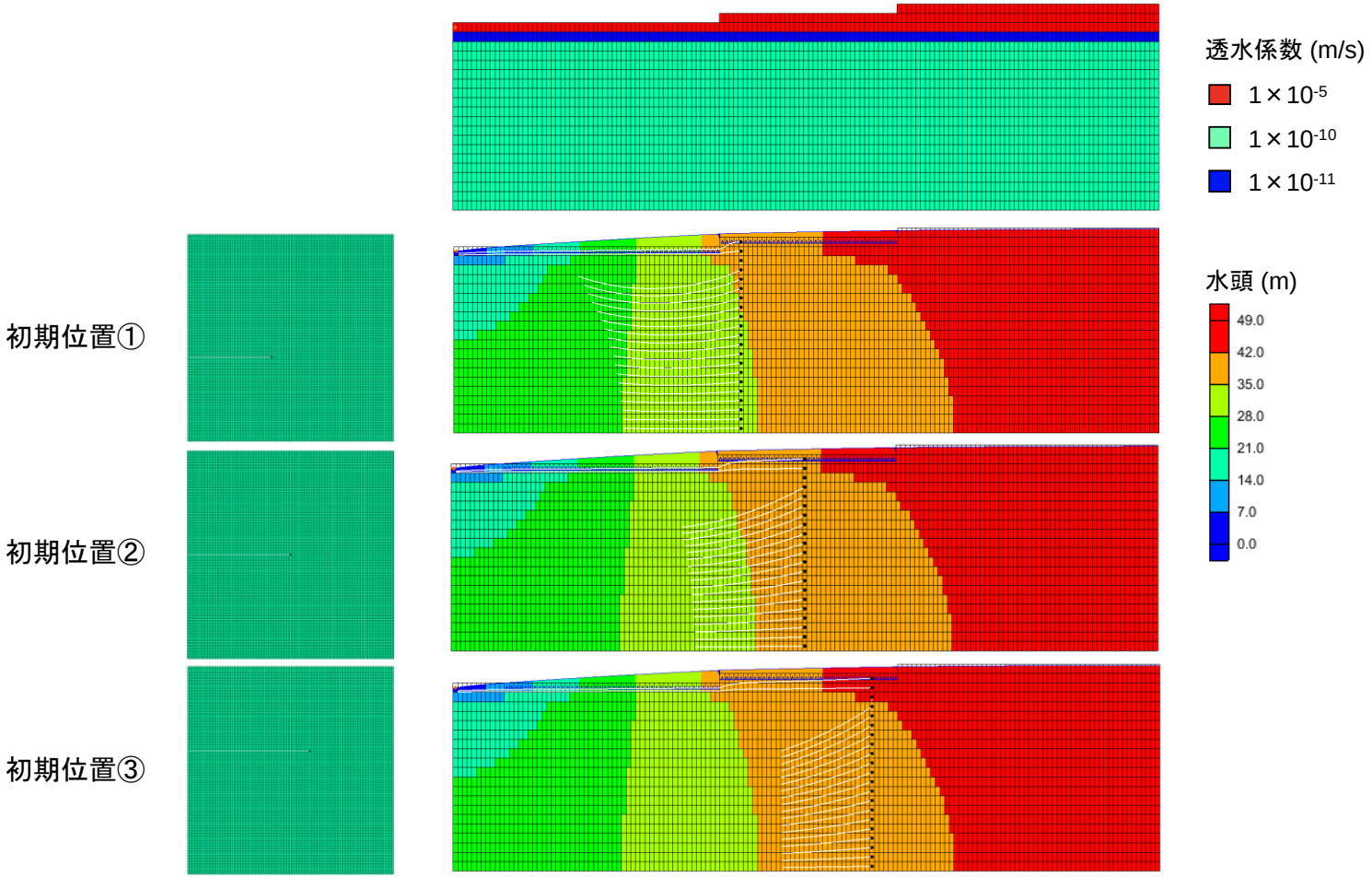


図 9 キャップロックを含むモデルでの地下水流動解析結果

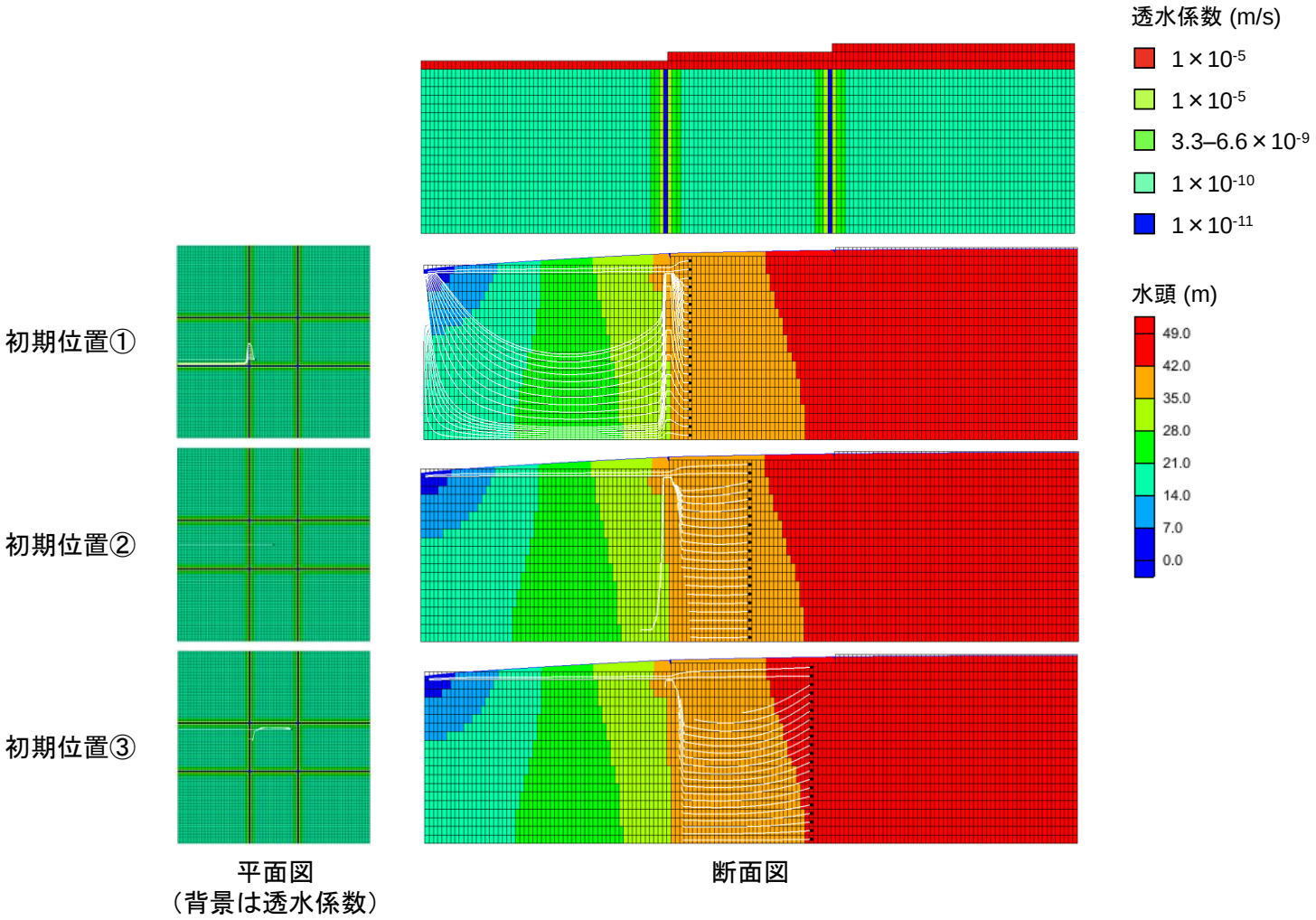


図 10 断層を含むモデルでの地下水流動解析結果

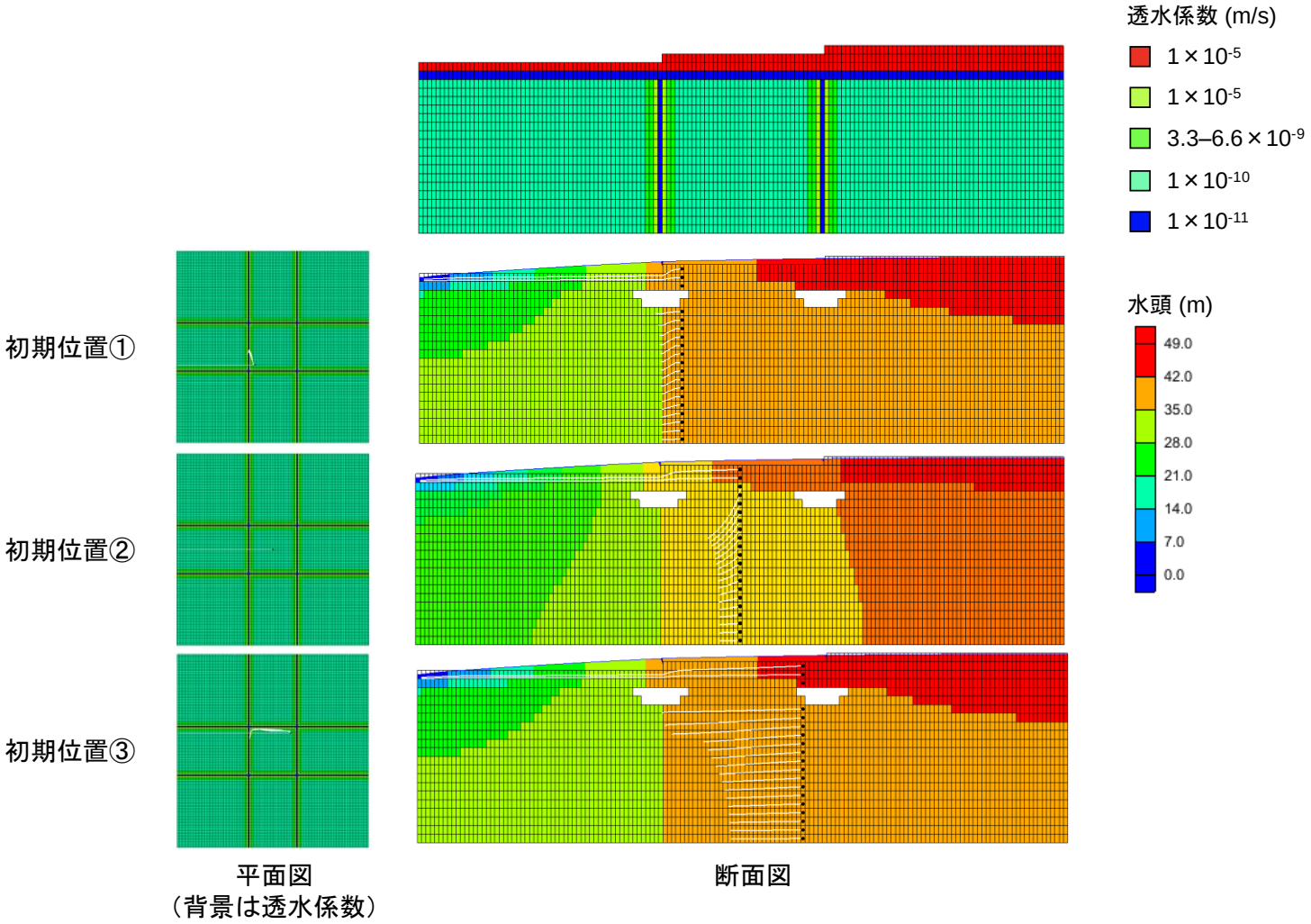


図 11 断層とキャッププロックを含むモデルでの地下水流動解析結果

4.2　断層周辺の鉱物組成を考慮した反応輸送解析

4.1 の地下水流動解析で得られた地下水流動場に基づいて，コンパートメント構造内部に埋設廃棄された廃棄体に含まれる放射性核種が移行することを想定した反応輸送解析を実施した。反応輸送解析では，断層と周辺の母岩の鉱物組成の違いを考慮した。具体的には，断層面近傍での粘土鉱物の含有量を変化させ，反応輸送解析で算出される物質移行状態との関係について検討した。

4.2.1　研究手法

4.1 で解析に用いたモデルを一部修正し，地下水流動解析を行うとともに，断層周辺における鉱物組成の変化，すなわち粘土鉱物の増加を考慮した反応輸送解析を行った。図 12 に示す通り，解析に用いた仮想的水理地質モデルは 4.1 で用いた水理地質モデルと同様に堅岩部，風化帯，断層（断層ガウジおよびダメージゾーン），キャップロックから構成されるが，計算時間を短縮するため，コンパートメント領域近傍の流れには影響の小さい地下水流動方向に直交する方向のグリッド数を 79 グリッド（790 m）とした。地下水流動方向と深度方向のグリッド数はそれぞれ 151 グリッド， 22 グリッドであり，グリッドサイズは同様（水平方向 10×10 m，深度方向 20 m）であることから，解析領域もそれぞれ 1510 m，440 m と同様である。また，断層の中心に断層ガウジを 1 グリッド，その両側にダメージゾーンを 2 グリッド設定し，断層全体での厚さは 5 グリッドとしている。

涵養速度，透水係数，間隙率は前述のモデルと同様であるが，ダメージゾーンの透水係数は断層ガウジに近いグリッドを 1×10^{-8} m/s に，堅岩部に近いグリッドを 1×10^{-9} m/s に設定した(表 2)。

表 2 収着を考慮する解析で用いた仮想水理地質モデル設定値

涵養速度	1×10^{-8} m/s （日本の涵養速度 0.4 m/年）	
透水係数	風化帯	1×10^{-5} m/s
	健岩部	1×10^{-10} m/s
	キャップロック	1×10^{-11} m/s
	ダメージゾーン	1×10^{-8} m/s（断層ガウジに隣接するグリッド） 1×10^{-9} m/s（堅岩部に隣接するグリッド）
	断層コア	1×10^{-11} m/s
間隙率	風化帯	0.3
	健岩部	0.03
	キャップロック	0.5
	ダメージゾーン	0.1
	断層コア	0.5

さらに，上述のようなモデルで計算された地下水流動場に基づいて，断層周辺で生じる収着を考慮した反応輸送解析を PHT3D を用いて実施した。今回は収着プロセスとして表面錯体反応を考慮した。また，例えば JNC（1999）などの解析において母岩を通って断層まで移行する主要な核種の一つとして ^{135}Cs が想定されていることから，Cs を移行核種とした。今回の解析の主眼は，コンパートメント構造を構成する断層周辺における移行核種の挙動を明らかにすることである。そのため，物質移行開始地点は図 12 に示すように，コンパートメント領域内の水平方向 29 グリッド×厚さ方向 1 グリッド（290×10 m），深度方向 9 グリッド（180 m）とし，これらグリッドにおける核種初期濃度を 0.005 mol/L と設定した。地下水の pH と pe は JNC(1999)における降水系地下水の値を参考に，それぞれ 8.5 と-4.75 とした。主立坑断層における分析結果を参考に断層内に存在する粘土鉱物としてイライトあるいはモンモリロナイトを仮定した。断層における粘土鉱物の含有率は断層ガウジで 2%，ダメージゾーンで 1%とした。また，断層以外（堅岩部，風化帯，キャップロック）については粘土鉱物の分布を考慮せず，収着は無視できるものとした。さらに，表面錯体反応を考慮するために必要となる粘土鉱物の交換容量は以下の式から求めた。算出に用いたサイト密度，比表面積（Cherif et al., 2017）と算出された交換容量 E を表 3 に示す。

$$E = \frac{N_s \cdot S \cdot M \cdot 10^{18}}{N_a}$$

ここで，N_s はサイト密度（nm^{-2}），S は比表面積（m^2/g），M は鉱物の分子量（g/mol），N_a はアボガドロ定数（mol^{-1}）である。これらの表面錯体反応に関するパラメータを LLNL による熱力学データベースに追加し，本データベースと PHT3D を用いて反応輸送解析を行った。

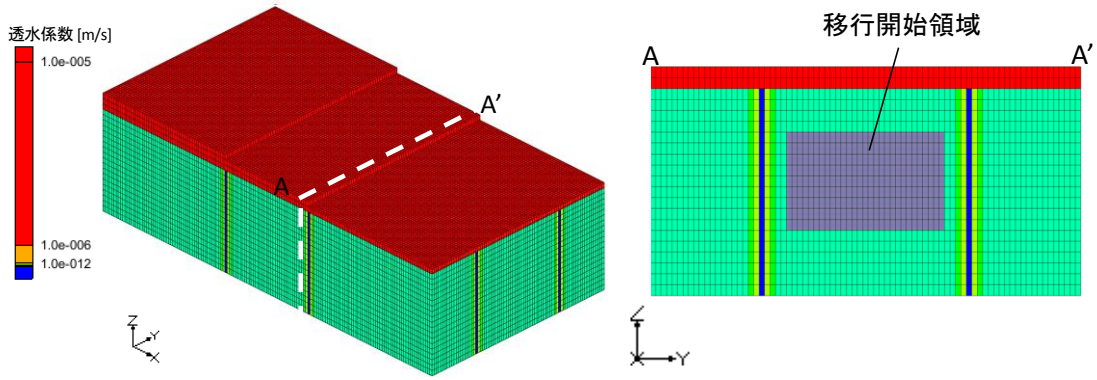


図 12 反応輸送解析における移行開始領域

左：仮想モデルにおける AA'断面の位置　　右：AA'断面における移行開始領域

表 3 Cs とイライトおよびモンモリロナイトの
表面錯体反応に関するパラメータ

	Illite	Montmorillonite
サイト密度（nm^{-2}）	2.7×10^{-3}	3.6×10^{-5}
比表面積（m^2/g）	97	800
交換容量	1.67×10^{-4}	1.76×10^{-5}

表面錯体反応式	収着平衡定数の対数値（log$K$）	
	Illite	Montmorillonite
$SO^{0.5-} + H^+ \leftrightarrow SOH^{0.5+}$	3.46	3.4
$SOH^{0.5+} + Cs^+ \leftrightarrow SOCs^{0.5+} + H^+$	5.2	4.3

4.2.2 結果と考察

図 13 は収着を考慮しない場合の物質移行解析結果である。断層やキャップロックが存在しない場合には，地下水流動によって移行開始地点から定水頭グリッドへ向けた移行が生じ，その範囲で移行核種の濃度が上昇していることがわかる。最終的に Cs は浅層の風化帯に到達し，定水頭グリッドに到達している。図は低透水性のキャップロックが存在する場合の結果で，4.1 で述べたようにキャップロックの存在により地下水流動が抑制され，移行核種の濃度が上昇する範囲が固定水頭のグリッドまで到達していない。断層を含み，キャップロックが存在しないモデルでは浅部から深部まで最も広い範囲に核種が移行しており，断層ガウジを乗り越える深部から浅部へ向かい，断層ガウジを乗り越えた後は再度深部に向かう地下水流動により，広い空間への核種移行が生じたものと考えられる。一方で，断層とキャップロックの両方が存在するモデルでは物質の移行範囲が最も小さい結果となり，これら低透水性の構造によって地下水流動が抑制されることで，物質移行が生じる範囲も限定されたものと考えられた。

次に，断層は存在するがキャップロックを含まず，断層で粘土鉱物による収着が生じる場合の反応輸送解析結果を図 14 に示す。断層ガウジのみにイライトあるいはモンモリロナイトを設定したモデルでは，収着を考慮しない場合と同様に浅部から深部まで広い範囲に核種が移行している。イライトとモンモリロナイトで比較すると，収着を考慮しない場合やモンモリロナイトを設定した場合に比べ，イライトでは断層下流側の深部で移行核種の濃度が低下していることがわかる。次に断層ガウジに加えてダメージゾーンで粘土鉱物による収着が生じるとするモデルでは，収着が断層ガウジのみで生じる場合に比べ物質移行が抑制されていることがわかる。さらに，断層ガウジとダメージゾーンでモンモリロナイトによる収着が生じる場合には，深部での移行が抑制されているのに対して，地下水流動に伴い浅層に到達した核種が風化部を移行し，定水頭グリッドまで到達していることがわかる。これに対して，イライトによる収着を考える場合にはイライトによって移行が抑制され，核種が風化部に達していない。

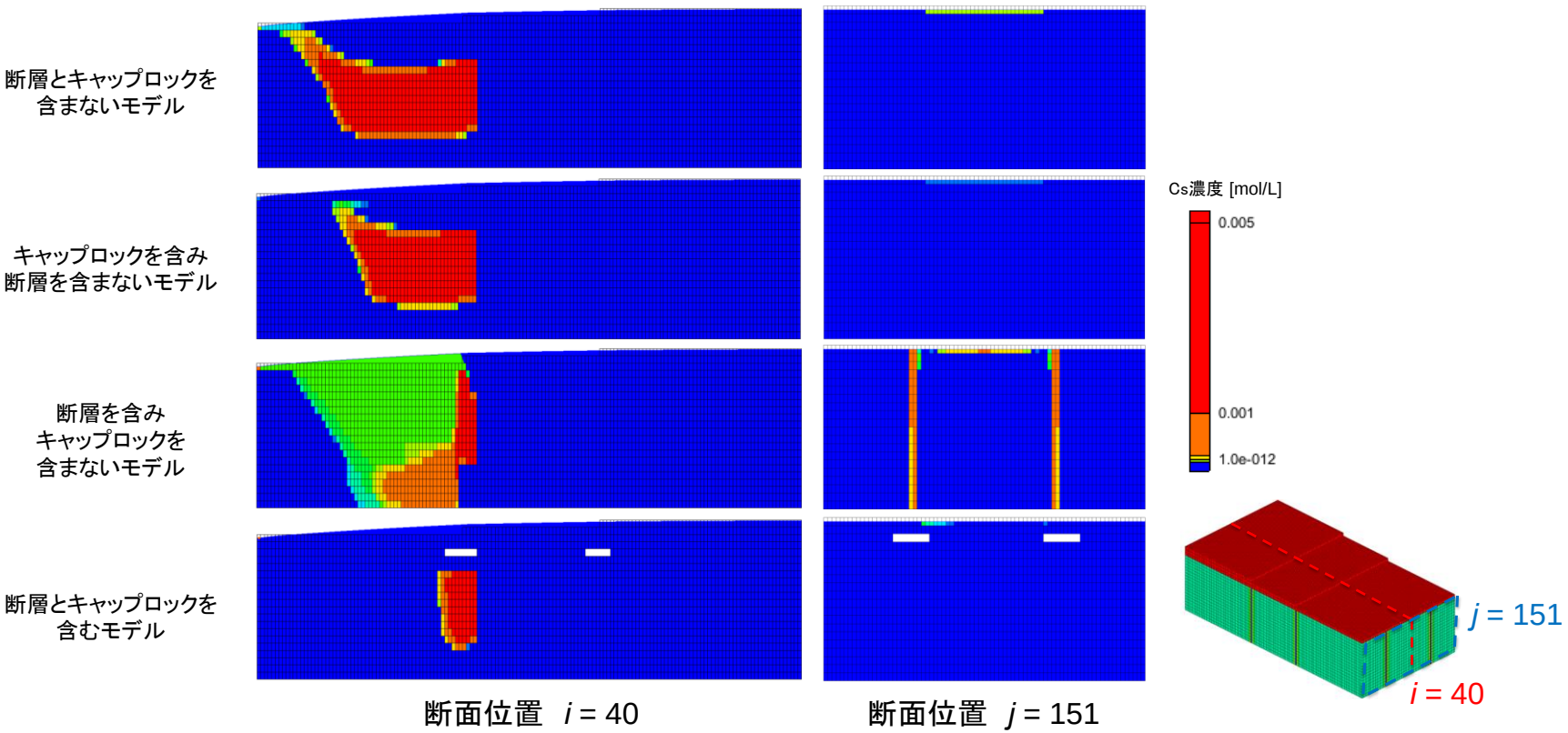


図 13 収着を考慮しない条件での反応輸送解析結果

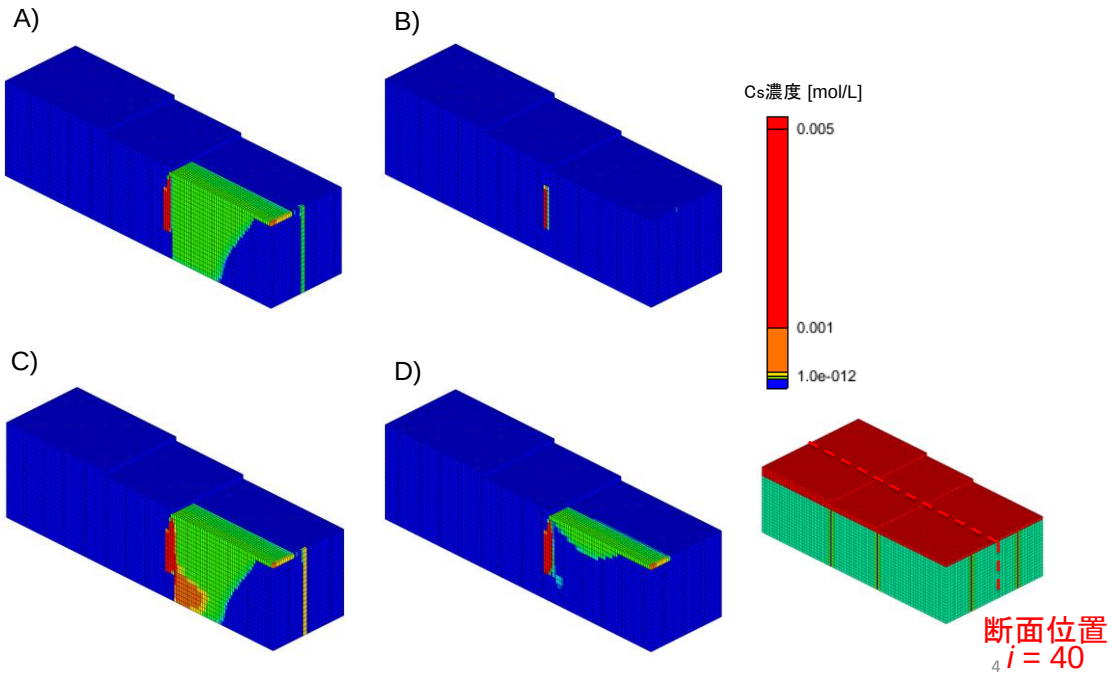


図 14 断層における収着を考慮した反応輸送解析結果
A）断層ガウジにイライトが分布
B）断層ガウジおよびダメージゾーンにイライトが分布
C）断層ガウジにモンモリロナイトが分布
D）断層ガウジおよびダメージゾーンにモンモリロナイトが分布
水理地質モデル：断層を含むがキャップロックは含まない

図 14 に示されている解析結果はそれぞれ同じ地下水流動場に基づいて計算されているため，反応輸送解析で認められた核種移行状態の違いは粘土鉱物による収着で生じたものと考えることができる。上述のように，粘土鉱物が断層ガウジのみに存在する場合に比べて断層ガウジとダメージゾーンの両方に存在する場合に収着の効果が大きい結果となった。4.1 で述べたように，透水性の高いダメージゾーンを有する断層が存在する場合，地下水流動は主にダメージゾーンで生じる。ダメージゾーンに粘土鉱物を設定することでモデル中に存在する粘土鉱物の絶対量が増えるが，それよりも選択的な地下水流動の経路となるダメージゾーンに粘土鉱物が存在することで，効果的に核種を収着し，移行を抑制できるものと考えられる。また，今回の解析では収着プロセスとして表面錯体反応のみを考慮したが，Cherif et al.（2017）によるサイト密度と比表面積から算出した交換容量はモンモリロナイトに比べてイライトで大きかった。そのため，収着による核種移行の効果はイライトを設定した場合により大きかったといえる。

さらに，断層に加えて低透水性のキャップロックが存在する場合の反応輸送解析結果を図 15 に示す。キャップロックが存在しない場合（図 14）に比べて，明らかに物質移行が抑制されており，粘土鉱物の分布範囲（断層ガウジのみか，断層ガウジとダメージゾーンの両方に分布するか）や粘土鉱物の種類に関わらず，ほとんど移行が生じていない。その理由としては，そもそも低透水性のキャップロックにより地下水流動が抑制されたことで移行が生じにくく，その上粘土鉱物による収着で移行が抑制されたものと考えられる。

以上の検討を通して，断層が存在しない場合と比べ，高透水性のダメージゾーンと低透水性の断層ガウジからなる断層が存在する場合には地下水流動とそれに伴う物質移行が速やかに進行するものの，断層に加えてキャップロックが存在する場合には地下水流動が抑制されることで，物質移行も生じにくい結果となることが明らかとなった。断層とキャップロックが存在するモデルで算出された物質移行範囲は，断層およびキャップロックが存在しない場合と比較して小さく，断層が内部構造として高透水性のダメージゾーンを有する場合でも，断層ガウジやキャップロックなどのような低透水性の構造が存在し，これらに囲まれたコンパートメント領域が成立している場合には，コンパートメント内と外部との地下水流動や物質移行を抑制する地質構造となりうる可能性が示された。

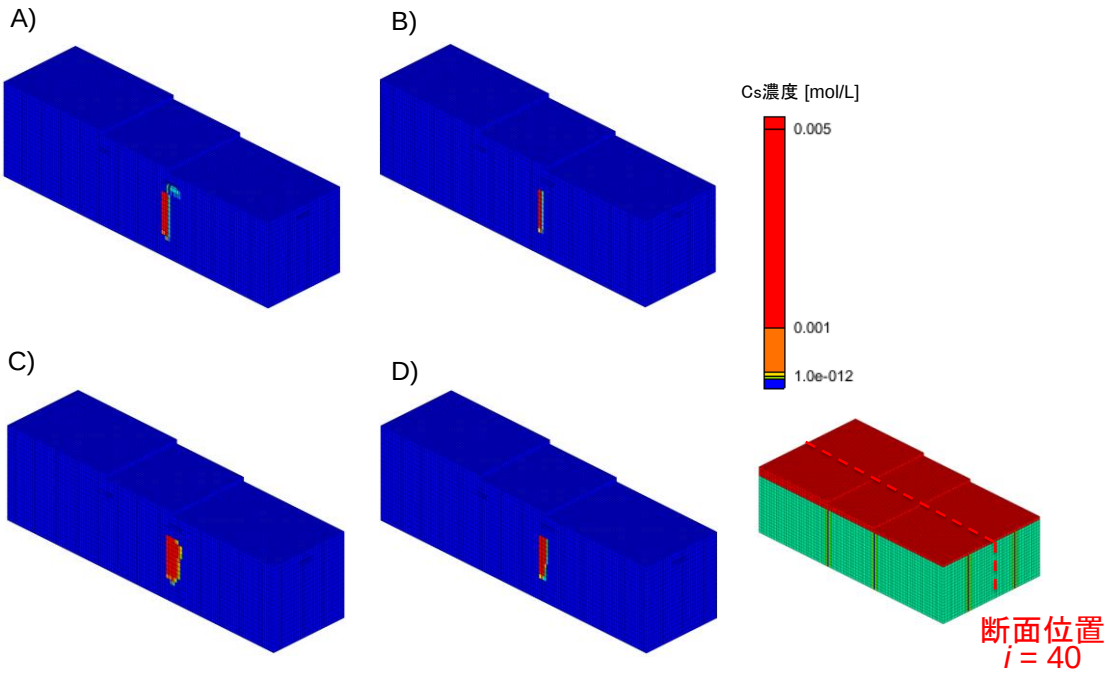


図 15 断層における収着を考慮した反応輸送解析結果

A）断層ガウジにイライトが分布

B）断層ガウジおよびダメージゾーンにイライトが分布

C）断層ガウジにモンモリロナイトが分布

D）断層ガウジおよびダメージゾーンにモンモリロナイトが分布

水理地質モデル：断層とキャップロックの両方を含む

4.3　断層周辺岩石の鉱物組成分析

2018 年度に実施した鉱物組成，化学組成分析を行った断層近傍試料について，試料に含まれる粘土鉱物の含有量や組成を明らかにするために水簸による鉱物分離を行った。得られた粘土含有率の結果は 4.2 の反応輸送解析や 4.4 の収着試験に使用した。

4.3.1　試料

瑞浪超深地層研究所の花崗岩の深度 300 m 坑道内で採取した 10MI22 号孔，10MI23 号孔を用いた。10MI22 号孔と 10MI23 号孔は主立坑断層および周辺岩盤の地質・地質構造の特徴と水理特性，地下水の水質分布を把握することを目的として掘削されたものである。10MI22 号孔は掘削長 76 m～111 m で主立坑断層を貫いており，断層ガウジ帯，カタクレーサイト帯，断層角礫帯，断層周辺の母岩の変質を伴う割れ目帯等が観察されている。10MI23 号孔は主立坑断層を貫いてはいないが，断層近傍における岩盤の変質や，ダメージゾーンにおける割れ目の鉱物充填が観察されている（鶴田他，2012）。各ボーリング孔および主立坑断層の位置について図 16 に示す。なお，本報告書中の試料名はボーリング孔の名称と坑道からの掘削長さを記載する。

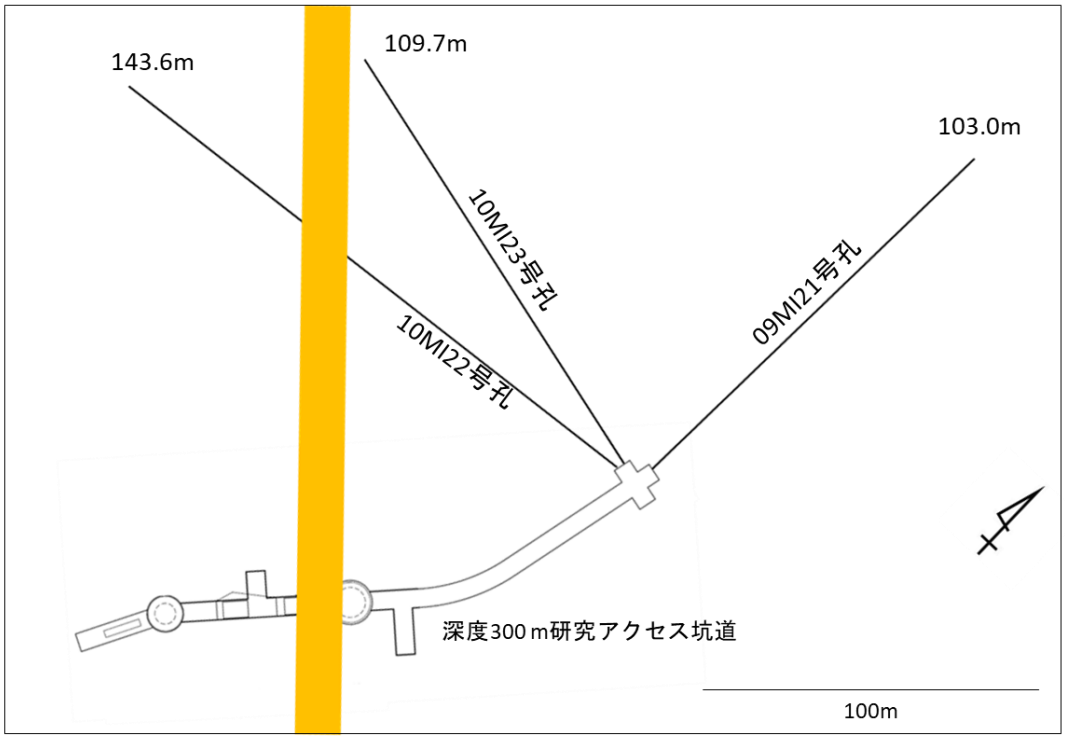


図 16　ボーリング孔位置図
（主立坑断層の厚さは鶴田ほか(2012)の記載による）

4.3.2 試験方法

断層に生成する粘土鉱物は，粒形 2 μm のフラクションで顕著に確認され，それよりも大きい粒径のフラクションにはほとんど含まれないと予想される（金折他，1982）。そこで本研究では，断層からの距離や変質の大きさに応じて各岩石に含まれる粘土鉱物の含有量や鉱物組成を調べるため，水簸によって 2 μm 以下の粒子(粘土分)の分離・回収を実施した。実施手順を以下に示す。

① 約 50 g の岩石試料をハンマーによって粉砕した。粉砕した試料は 250 μm の篩を通過した試料のみを回収した。篩を通過しなかった試料は再びハンマーで粉砕し，すべての試料が篩を通過するまで繰り返した。

② 粉砕した試料を蒸留水 1 L 中に懸濁させ，メスシリンダー内で 8 時間静置した。静置後，上澄み液 200 mL（水面から 10 cm）を採取した。沈降側のメスシリンダーに蒸留水を追加し， 再び懸濁させ上澄み液が透明になるまで同様の手順を繰り返した。

③ 予め重量を測定した 0.1μm フィルターに上澄み液を通水し，粘土粒子を回収した。フィルターを乾燥機に入れ 100℃, 24 時間の条件で乾燥させた。乾燥後のフィルター全体の重量を量り，フィルターの重量との差から粘土粒子の重量を計算した。

④ 回収した粒子は再度蒸留水中で懸濁させ，マイクロピペットを用いてスライドガラス状に塗布し，定方位試料とした後， X 線回折(XRD)分析装置(Smart Lab，リガク社製)を用いて鉱物組成を分析した。測定条件は Cu Kα 線，管電圧と管電流はそれぞれ 40 kV, 40 mA，走査範囲は 3°～45°，スキャン速度は 1 °/分，ステップ幅は 0.01°とした。

4.3.3 結果と考察

粘土粒子の懸濁液中での沈降速度 V_s は以下に示すストークスの式を用いて計算した。

$$V_s = \frac{D_p^2 (\rho_p - \rho_f) g}{18\eta} \quad (1)$$

ここで，D_p は粒子径，ρ_p は粒子密度，ρ_f は流体密度，g は重力加速度，η は流体密度であるので 20°C の純水中での粘土粒子の沈降速度（終端速度）は粒子密度を 2.6 g/cm^3 とすると 3.495×10^{-6} m/s と計算される。そのため，メスシリンダー内の懸濁液において，8 時間静置後に水面から 10 cm までの深さに粘土分の粒子が懸濁していると考えられる。

10MI22 号孔および 10MI23 号孔における各試料の全体重量に対する粘土分含有率を図 17 に示す。図中に示す地質区分は鶴田他(2012)のコア観察結果に基づく。

10MI22 号孔では非変質帯である掘削深度 0～12m, 136～140m に含まれる試料は粘土含有率が約 0.09～0.11%であった。断層部の外側の母岩の変質を伴う割れ目帯においては 0.10～0.99%であり, 断層部に近い程高い値となる傾向があった。断層部と断層部内側の母岩の変質を伴う割れ目帯においては 0.56～2.94%となった 10MI23 号孔では, 非変質帯では 0.09%, 母岩の変質を伴う割れ目帯では 0.11～1.12%となった。両ボーリング孔試料ともに断層部に近いと考えられる試料において粘土含有率が高い傾向が確認された。粘土分の XRD 測定結果を図 18 に示す。粘土含有率が少ない非変質帯の試料については十分な試料量が確保できずデータが取得できなかった。各試料の鉱物組成は断層からの距離や粘土含有量による違いは見られなかった。全ての試料において 6°付近のスメクタイトと考えられるブロードなピーク, 8.8°, 17.7°, 26.8°のイライトや絹雲母等の白雲母系のピーク, 12.5°, 36.1°の緑泥石の小さなピークが確認された。これらの粘土鉱物は花崗岩中では長石類や黒雲母の変質によって生成した二次鉱物であると考えられる。2018 年度に実施した全岩の鉱物組成分析では断層近傍では黒雲母や長石類のピークが減少しており, 断層周辺に形成した割れ目においてこれらの粘土鉱物が生成したと考えられる。

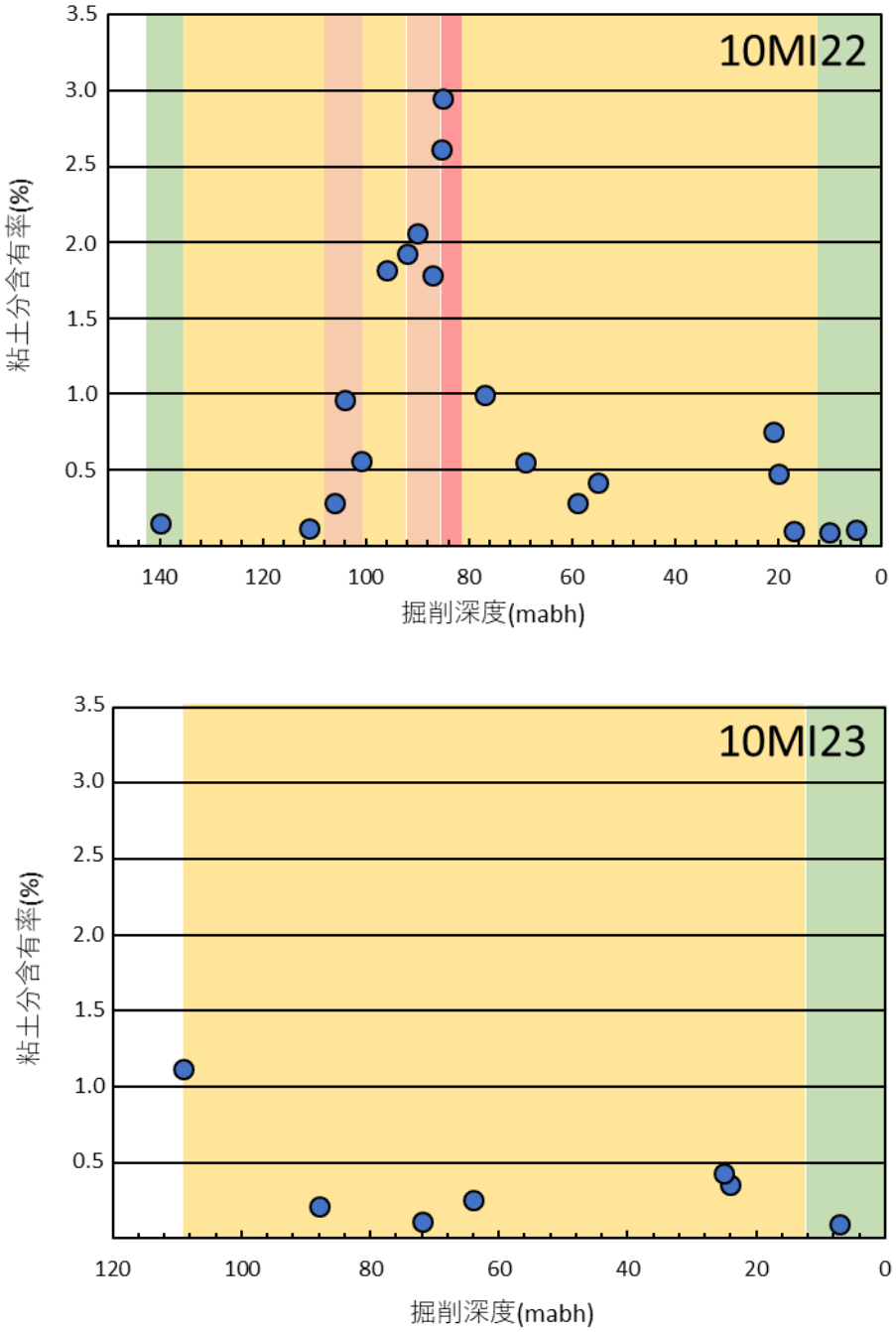


図 17 10MI22 号孔と 10MI23 号孔試料の粘土分含有率
(■: 非変質帯, ■: 母岩の変質を伴う割れ目帯, ■: 断層, ■: 貫入岩)

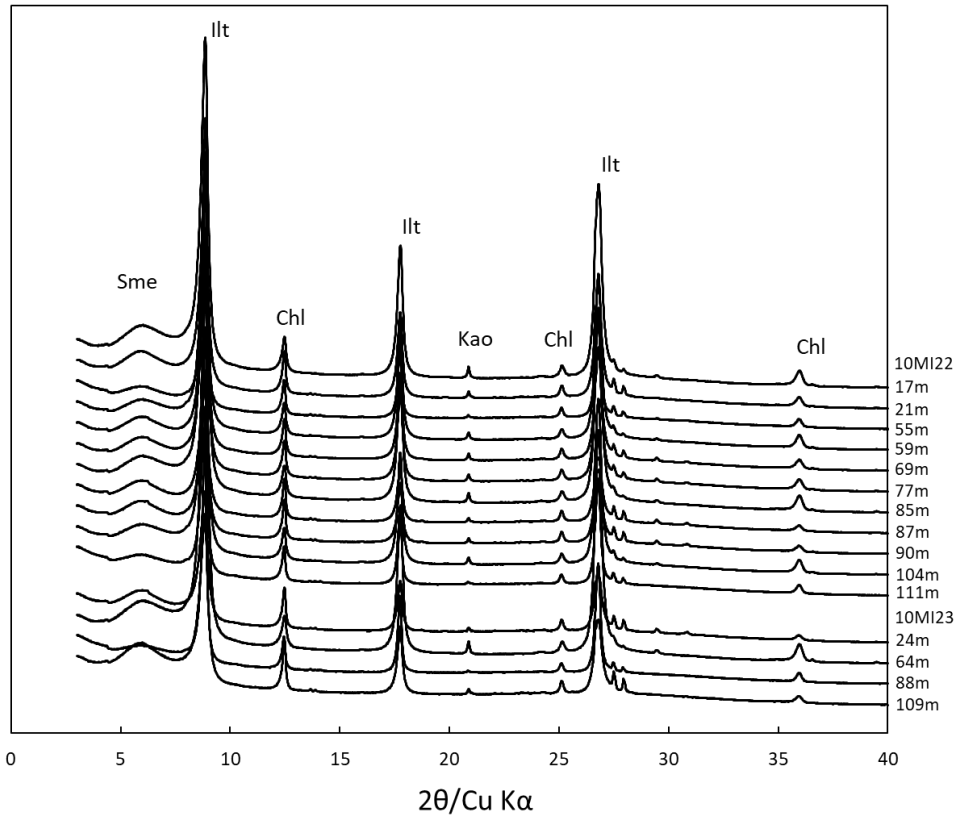


図 18 粘土分の XRD パターン
(Sme: スメクタイト，Ilt: イライト，Chl: 緑泥石，Kao: カオリナイト)

4.4 断層周辺岩石の元素収着特性

岩盤の持つ元素の収脱着能力に断層がどのような影響を与えるのか明らかにするために，Cs と Eu の収着試験を実施した。本年度は pH やイオン強度をパラメータとして Cs と Eu の収着メカニズムを調べた。4.3 で得られた各試料の粘土含有量の結果と組み合わせて考察を行った。

4.4.1 試料

4.4 章と同様の 10MI22 号孔，10MI23 号孔コア試料を使用した。

4.4.2 試験方法

岩石試料をハンマーによって粉砕した後，メノウ乳鉢によって細粒化した。粉砕した試料の一部は 2 mm, 0.25 mm, 0.10 mm の篩に段階的に通過させ，粒径別の試料を作成した。粒径別に分けた試料の表面積を Brunauer-Emmett-Teller(BET)ガス吸着法(Brunauer et al., 1938)によって測定した。作成した細粒化試料と粒径別試料 100 mg を試験容器に量りとった。

① 試験容器に超純水 50 mL を入れ，塩化ナトリウム（特級，富士フィルム和光純薬社製）を適宜添加してイオン強度を調整した。
② 塩酸および水酸化ナトリウム(多摩化学工業社製を適宜希釈)をマイクロピペットで適宜添加し pH を調整した。
③ 1 mmol/L 塩化ユウロピウム六水和物および 1 mmol/L 塩化セシウム溶液(富士フィルム和光純薬社製を超純水に溶解)を添加した。添加量は試験条件によって段階的に変化させた。
④ マグネチックスターラーで試料を撹拌しながら塩酸と水酸化ナトリウムで pH を目的の値の前後 0.1 の範囲に入るように調整した。
⑤ 試験開始から 24 時間後に試料 1.0 mL を採取し 0.45 μm メンブレンフィルターでろ過した。採取した試料を 2 wt.%硝酸（68 wt.%硝酸を希釈）を用いて適宜希釈した。
⑥ ICP 質量分析計(ICP-MS, Agilent 7700x, Agilent Technologies 社製)を用いて Eu および Cs 濃度を測定した。試料は内部標準試料による補正を行うため In および Bi を添加し，測定は同重体による干渉を防ぐためにコリジョンリアクションセルに He ガスを導入して実施した。
⑦ 収着試験開始時の Cs と Eu の添加量と，収着試験後の液相中の濃度から，各試料への Cs と Eu の収着量を求めた。試験終了時の液相中濃度と固相への収着量から分配係数(K_d)を算出した。

4.4.3 結果と考察

本年度は断層からの距離，粘土鉱物含有量，表面積について異なる特性を持つ試料に対して pH とイオン強度をパラメータとして Cs と Eu の収着試験を実施した。これらの結果を整理し，断層近傍の地質構造に対して陽イオンがどの程度収着し，その挙動がどのような要因で決定されるのか検討を行った。

試料ごとの収着挙動を比較するため，pH とイオン強度，添加濃度を揃えた条件での各試料の K_d 計算結果を図 19 と図 20 に示す。試験条件は pH=8.5，イオン強度=0.01，初期液相中の Cs と Eu 濃度は 20 μg/L とした。Cs は，10MI22 号孔，10MI23 号孔試料ともに断層に近い試料では K_d が高い傾向であった。一方，Eu は全体的に Cs より高い K_d を示したが，断層から離れた非変質帯の方が K_d は高い傾向が見られた。各試料で K_d が異なる原因としては，試料の鉱物組成の違いによるものと予想される。Cs の K_d の傾向については，4.3 の鉱物組成分析の結果から，断層周辺の岩石は断層に近い試料ほど粘土含有率が高い傾向にあったことから，粘土分の含有量によって収着量が変化した可能性がある。一方 Eu は粘土鉱物の含有量が少ない方が収着量が多くなる可能性がある。

粘土含有率の違いが Cs と Eu の収着量に与える影響は以下の 2 点が考えられ

る。一つは細粒な粒子が多く含まれることにより，鉱物粒子の表面積が増加し，イオンの吸着サイトが増加するため。もう一つは粘土分に含まれる粘土鉱物が，Cs や Eu の収着挙動を支配しており，その含有量が変化することによって各試料において支配的な収着メカニズムが異なるためと推察される。図 21 は 10MI23 号孔試料における粘土含有率と表面積の関係を示す。10MI23 号孔では粘土含有率と表面積の間に正の相関が見られた。一方，10MI22 号孔の断層部の表面積は 8.8 m^2/g と他の試料と比べて高い値であったが粘土分含有率は 0.96%という値であり相関関係は見られなかった。以上の結果から，断層近傍では粘土鉱物が多く存在することによって試料の表面積は増加する可能性はあるが，粘土分の含有量との明確な相関は確認されなかった。本年度表面積を比較した試料は，岩石を粉砕した後乳鉢で細粒化したものであり，実際の地下深部の岩盤中では鉱物の粒形が全く異なる状態にあると考えられる。そのため，各試料についてより原位置に近い状態での粘土含有量や表面積の比較が今後の課題である。

Cs と Eu の K_d が異なる傾向を示したのは，それぞれの元素の鉱物への収着メカニズムや収着しやすい鉱物層が異なるためであると予想される。図 22～図 25 に pH とイオン強度が異なる条件における 10MI22 号孔各試料の Cs と Eu の K_d 計算結果を示す。Cs と Eu を比較すると，Cs はどの試料においても pH とイオン強度の変化に対して K_d の変化は小さかった一方，Eu は pH，イオン強度の変化に対して K_d が大きく変化する傾向が見られた。この pH，イオン強度に対する応答の違いは各元素の粘土鉱物への吸着メカニズムの違いが影響している可能性がある。粘土鉱物は Si-O からなる四面体シートと Al-O や Mg-O からなる八面体シートが頂点酸素を共有して組み合わさった層状構造であり，それぞれ Si を Al が，Al と Mg を Fe 等の 2 価イオンが置換して負電荷を帯びる。Cs や Eu はその負電荷によって層間に引き寄せられて吸着する。吸着時，Cs はイオンが直接アクセスする四面体シートの頂点酸素と結合し，層間に強く取り込まれる。一方 Eu は溶存時の水分子を配位したまま静電気的な力によって層間に吸着する。これらの吸着挙動の違いは Cs のような吸着を内圏型表面錯体，Eu のような吸着を外圏型表面錯体と呼ぶ(図 26)。内圏型表面錯体では他の競合イオンやプロトンよりも強固に鉱物表面に吸着するため，比較的 pH やイオン強度の影響を受けずに吸着する。一方外圏型表面錯体では，鉱物と直接結合を持たないため pH やイオン強度によって吸着量が変化する。本試験で確認された Cs と Eu の収着挙動はこれらの吸着メカニズムを反映していると推察される。Eu の K_d については，非変質帯に位置する試料の方が高い傾向が見られた。これは断層部に多く存在するスメクタイトやイライトなどの粘土鉱物よりも未変質の岩盤に存在する黒雲母のほうが Eu をより多く収着するためである可能性がある。本年度実施した収着試験では試料を細粒化しているため，非変質帯の試料の表面積が実際の岩盤中で地下水から元素を収着する際の表面積よりも大きくなっている可能性がある。

そのため，非変質帯に比較的多く存在していると考えられる黒雲母による収着の影響が大きくなり，K_d が高くなっている可能性がある。

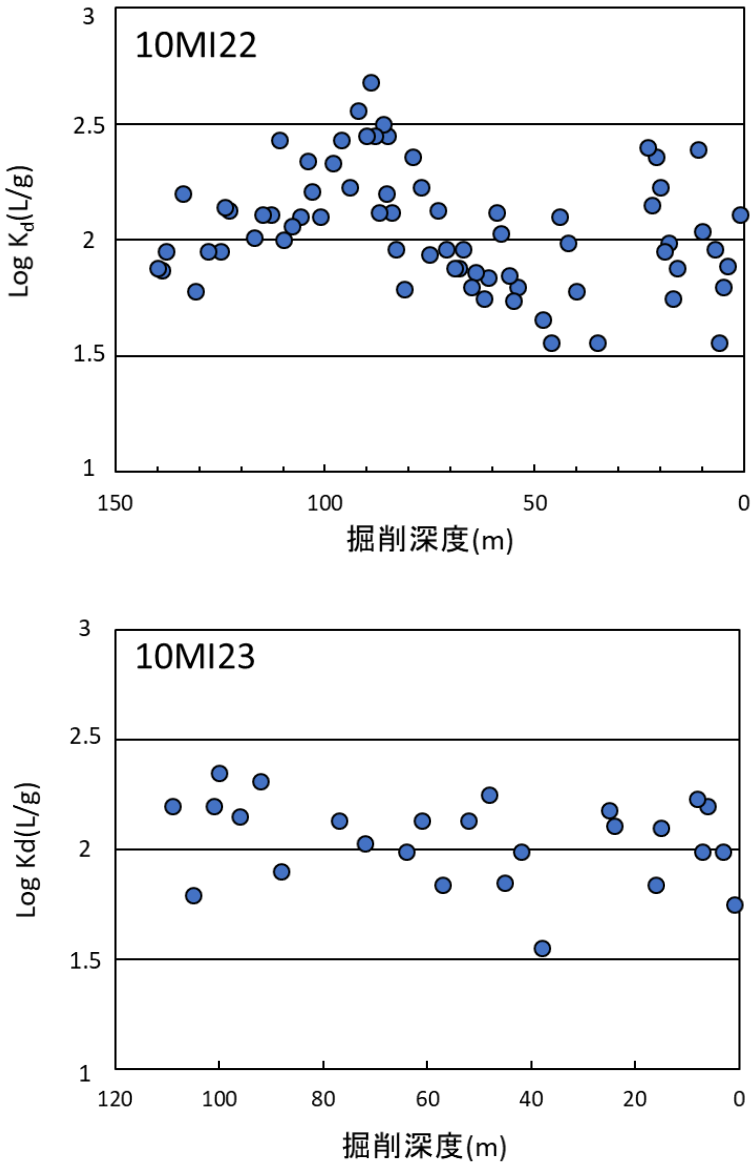


図 19 10MI22 号孔と 10MI23 号孔試料における Cs の収着分配係数

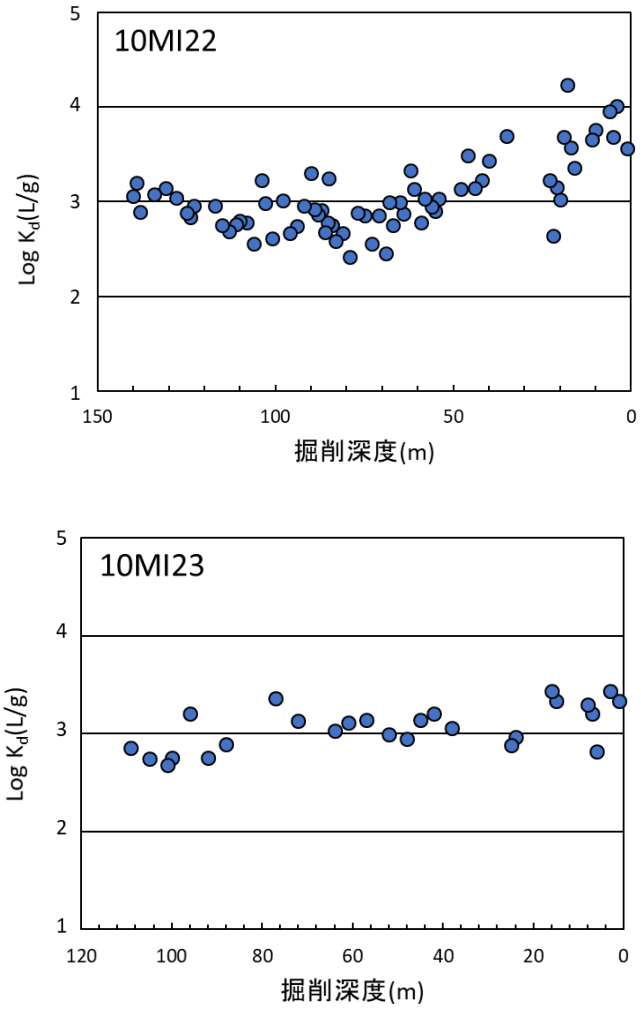


図 20 10MI22 号孔と 10MI23 号孔試料における Eu の収着分配係数

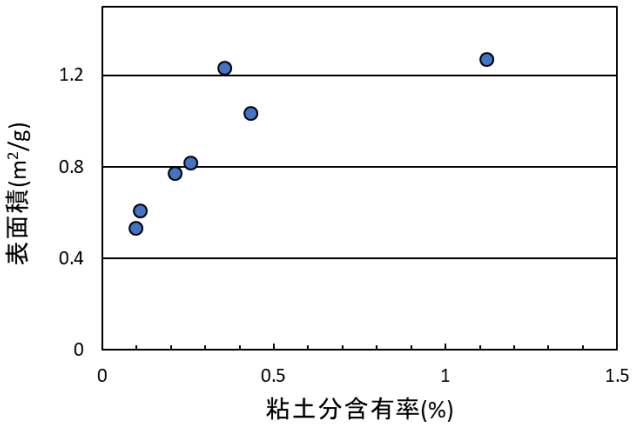


図 21 10MI23 号孔における表面積と粘土分含有率

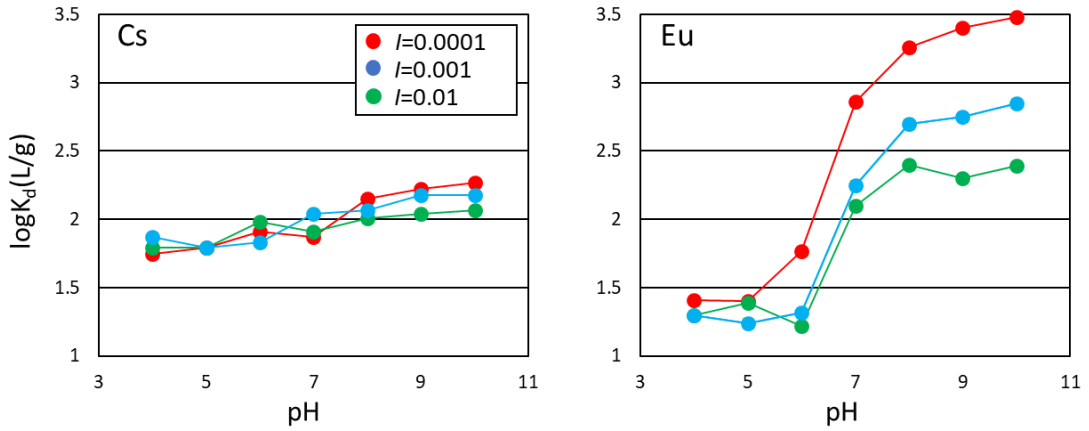


図 22 10MI22 号孔 69 m 試料の収着試験結果(*I*はイオン強度)

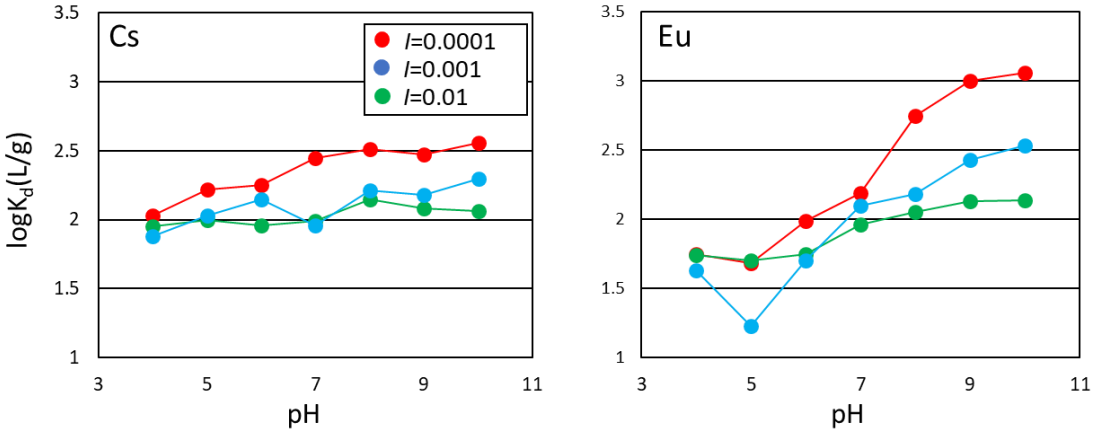


図 23 10MI22 号孔 85 m 試料の収着試験結果(I はイオン強度)

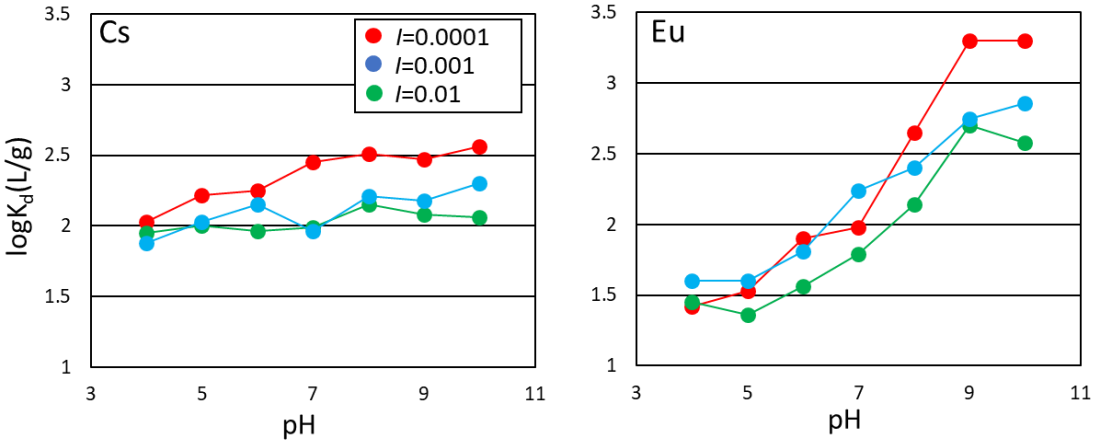


図 24 10MI22 号孔 104 m 試料の収着試験結果(I はイオン強度)

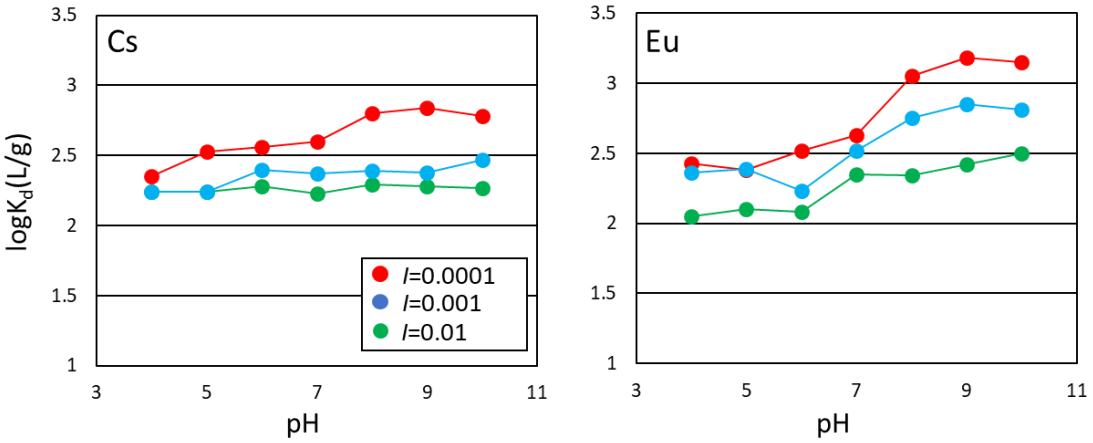


図 25 10MI22 号孔 141 m 試料の収着試験結果(I はイオン強度)

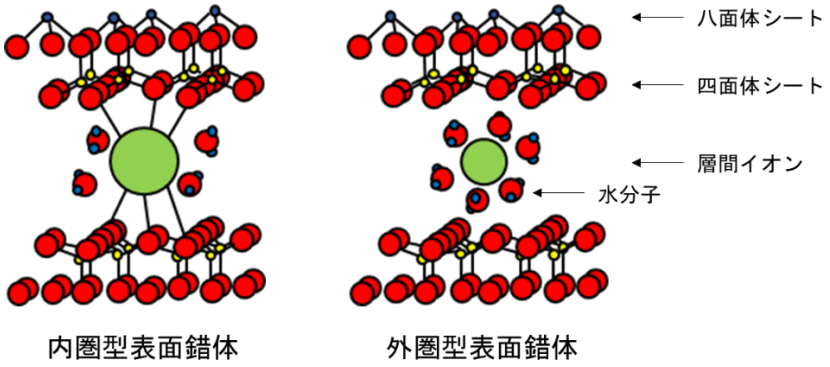


図 26 粘土鉱物層間における表面錯体構造の模式図

5. まとめと今後の計画

本年度は断層から構成されるコンパートメント領域を含む仮想的な水理地質モデルを用いて地下水流動解析を行うとともに，コンパートメントを形成する断層に移行核種の収着に寄与する粘土鉱物が含まれるとして反応輸送解析を行った。成果は以下のようにまとめることができる。

- 断層が存在しキャップロックを含まないモデルでは，主に透水性の高いダメージゾーンを通り，低透水性の断層ガウジ周辺ではガウジを乗り越えるような地下水流動が生じることが認められた。それに伴い核種は浅部から深部まで広がり，最終的に表層の風化帯を通って固定水頭グリッドに到達した。
- コンパートメント構造に加えて低透水性のキャップロックが存在する場合には，浅部から深部への地下水の浸透が制限され，深部における地下水流動が抑制された結果，反応輸送解析で算出される核種の移行範囲も移行開始地点の近傍に限定される結果となった。
- 断層に収着に寄与する粘土鉱物が存在する場合，断層ガウジに粘土鉱物が含まれるよりも，ダメージゾーンに粘土鉱物が含まれる場合の方が移行の抑制の効果が高いことが示された。その原因として，透水性の高いダメージゾーンは地下水の流動経路であり，そこに粘土鉱物が存在することで収着の効果が増大するためであると考えられる。
- 低透水性のガウジを有する断層とキャップロックから形成されたコンパートメント領域では，それら地質構造の透水性や収着特性などに応じて，断層が存在しない場合よりも核種移行が抑制される可能性がある。

今回は単純な地質構造を考慮し，断層ガウジ，堅岩部などのモデルを構成する地質要素それぞれで水理特性が均質であると仮定した。実際の断層周辺では亀裂の発達などにより透水性の空間分布は不均質であり，収着に寄与する粘土鉱物の量も空間的に変化するものと考えられる。今後は，実際の断層における透水係数や収着に寄与する鉱物の空間変化や不均質さに関するデータを収集し，モデルに反映することでより実際の水理地質環境に近い条件で解析を行い，断層などから構成されるコンパートメント構造が今回認められたようなバリア機能を有するか確認する必要がある。また，断層交差部の透水性や，キャップロックの空間的広がり，地質要素の透水係数の設定などがコンパートメント構造周辺の地下水流動特性や物質移行特性にどのように影響を及ぼすかについても，感度解析などを通して把握することが望ましい。

また，CsとEuの収着試験を実施し，これらの元素の収着挙動と各試料の鉱物組成から，各試料で起きている収着反応について考察を行った。粘土鉱物が比較的多く存在している断層部や母岩の変質を伴う割れ目帯では Cs，Eu ともに粘土鉱物によ

って収着され，鉱物表面でそれぞれ内圏型表面錯体，外圏型表面錯体を形成していることが示唆された。Cs は粘土鉱物表面に強く収着されるため，Eu と比較して岩盤中にとどまりやすい性質を持つ可能性がある。また，断層近傍の粘土含有量が異なる複数の収着挙動の比較の結果，花崗岩中の断層のような連続的に粘土鉱物の含有量が変化するような地質構造においては，粘土鉱物が収着挙動を支配する鉱物であるということが特定することで，粘土鉱物含有量を物質移行特性のパラメータとして活用できることが示唆された。

しかし本年度実施した収着試験では，実際に Cs や Eu の収着を支配している鉱物がスメクタイトやイライトであるのかという直接的な観察はできていない。ダメージゾーンでは地下水が通過する岩盤中の割れ目は粘土鉱物などの細粒な二次鉱物であるのに対し，健岩部では黒雲母や長石などの粗大な造岩鉱物であると予想される。そのため，原位置で起きている収脱着反応を観察するためには，粉砕した岩石試料だけでなく，割れ目などの状態を保持した非破壊試料に対して収着試験を実施し，割れ目の観察や元素の局所分析等を実施する必要がある。以上を踏まえて 2020 年度は非破壊の岩石試料や割れ目を含む薄片試料等に対して収着試験を実施し，岩石中での水の移行経路や割れ目中で元素を収着している鉱物の同定を行う。

引用文献

核燃料サイクル開発機構，1999，わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性−地層処分研究開発第 2 次取りまとめ−分冊 1 わが国の地質環境，JNC TN1400 99-021.

金折裕司 ,宮腰勝義，猪原芳樹，佐竹義典（1982）跡津川断層に伴う断層内物質（その 2）．応用地質，23，5-17.

大丸修二，尾上博則，竹内竜史，2012，超深地層研究所計画（岩盤の水理に関する調査研究）主立坑断層を対象とした水理学的調査，JAEA-Research 2012-008.

鶴田忠彦，武田匡樹，上野孝志，大丸修二，徳安真吾，尾上博則，新宮信也，石橋正祐紀，竹内竜史，松岡稔幸，水野崇，田上雅彦（2012）超深地層研究所計画 主立坑断層を対象としたボーリング調査結果報告書．JAEA-Technology 2012-001.

Brunaue, S., Emmeit, P. H., and Teller, E. (1938) Adsorption of gases in multimolecular layers. J. Am. Chem. Soc., 60, 309-319.

Cherif, M.A., Martin-Garin, A., Gérard, F., Bildstein, O. (2017) A robust and parsimonious model for caesium sorption on clay minerals and natural clay materials. Applied Geochemistry. 87, 22-37.

Faulkner, D.R., Jackson, C.A.L., Lunn, R.J., Schlische, R.W., Shipton, Z.K., Wibberley, C.A.J., et al. (2010) A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. Journal of Structural Geology. 32, 1557-1575.

Rawling, G.C., Goodwin, L.B., Wilson, J.L. (2001) Internal architecture, permeability structure, and hydrologic significance of contrasting fault-zone types. Geology. 29, 43-46.

Zheng, C., and P.P. Wang (1999) MT3DMS: A modular 3-D multispecies model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in ground- water systems. Documentation and user's guide. Contract Report SERDP-99-1. Vicksburg, Mississippi: Army Engineer Research and Development Center.

別添資料 2

（2019 年度人材育成セミナー講義資料集）

2019 年度人材育成セミナー講義資料集　目次

講義 01：わが国の地層処分事業の制度・政策・進め方

講義 02：放射性廃棄物の発生と管理

講義 03：地層処分における安全確保の考え方

講義 04：地層処分に望まれる地質環境と 3 段階の調査 1（3 段階の調査・評価）　※

講義 05：地層処分に望まれる地質環境と 3 段階の調査 2（地層処分に好ましい地域の科学的特性）

講義 06：調査・評価技術各論-自然現象 1（火山・火成活動、深部流体）

講義 07：調査・評価技術各論-自然現象 2（隆起運動、侵食作用、断層活動）　※

講義 08：調査・評価技術各論-地質環境特性 1（地質・岩盤）　※

講義 09：調査・評価技術各論-地質環境特性 2（地下水）　※

講義 10：調査・評価事例（幌延を事例とした物質移行調査技術）

講義 11：安全確保に向けた処分場設計の考え方

講義 12：建設・操業技術（製造・施工品質の確保、操業安全）

講義 13：安全評価の考え方と枠組み（前半）

講義 14：線量基準の考え方　※

講義 15：安全評価の考え方と枠組み（後半）

講義 16：処分場構成要素の変遷挙動

講義 17：核種移行解析モデル

講義 18：核種移行データ・モデル整備とパラメータ設定手法

講義 19：最新の安全評価のための取り組み

※講義資料全体については、知的財産権等保護のため掲載していません。

注）掲載している講義資料についても、一部図表について、知的財産権等保護のため白抜き処理をしているものがあります。また、講義資料の著作権・著作者人格権は、各著作者に属します。各著作者の許可なく二次利用はできません。

経済産業省

地層処分事業における技術人材の育成
2019年度人材育成セミナー

01.我が国の地層処分事業の制度・政策・進め方

2020年1月8日

資源エネルギー庁　電力・ガス事業部
放射性廃棄物対策課

課長補佐　江橋健

本講演資料は、使用許諾等が得られていない内容や原典図表・データが含まれている可能性があります。二次利用をしないようにお願いします。

本日お伝えしたいこと

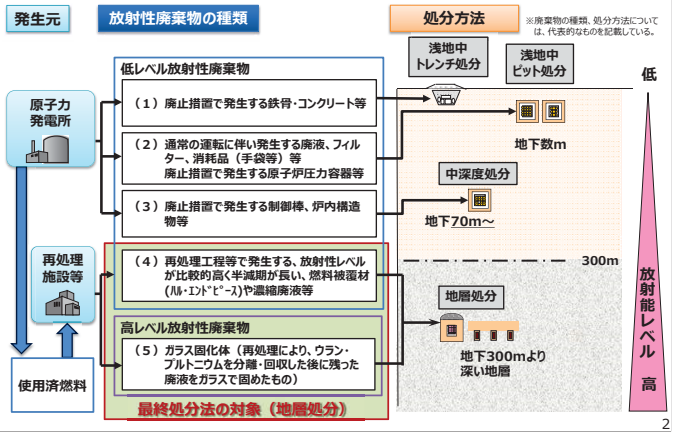
1．地層処分に関する政策について

2．対話活動の推進について

3．技術開発について

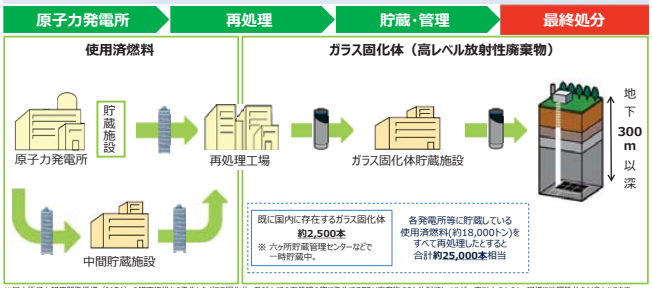
4．人材育成について

放射性廃棄物の種類と処分方法



高レベル放射性廃棄物の最終処分までの流れ

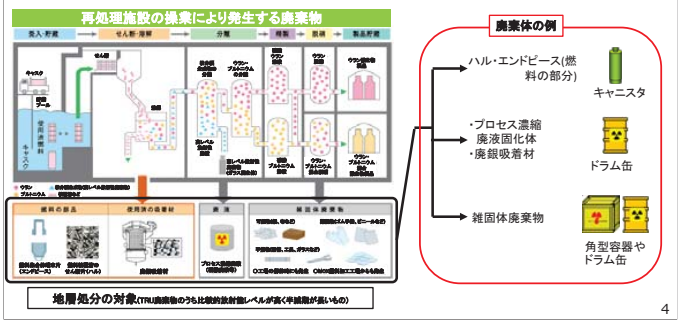
1. 原子力発電により発生した使用済燃料は、資源として利用できるウランとプルトニウムを回収（**再処理**）し、残った長半減期の放射性物質を含む廃液はガラス原料と高温で溶かし合わせて固化します（**ガラス固化体**）。
2. 放射能が高く発熱を伴うガラス固化体は30～50年程度、冷却のために貯蔵・管理した後で、地下深部の安定した岩盤に埋設します（**地層処分**）。



※日本原子力研究開発機構（JAEA）の研究施設から発生したガラス固化体、及び上記の再処理の際に発生するTRU廃棄物のうち放射能レベルが一定以上のものも、同様に地層処分の対象となります。
※六ヶ所再処理工場は2021年度上期竣工予定（実用化に向けた試験は実施済で、現在、原子力規制委員会の審査中）。

再処理等により発生するガラス固化体以外の廃棄物について

- 再処理工程では、ガラス固化体にして地層処分する廃液以外の廃棄物も生じます（地層処分対象TRU廃棄物）。その中には、使用済燃料を覆う金属部品などのように、放射能レベルが比較的高く半減期が長いものもあり、こうしたものはガラス固化体と同様に、地層処分の対象となります。



地層処分の選択（国際的な認識）

○高レベル放射性廃棄物の処分方法については、地層処分のみならず、長期地上管理、核種分離・変換、海洋底下処分、宇宙処分等の多様な処分方法が検討された結果、**「現時点で最も有望な処分方法は地層処分である」というのが国際的共通認識**（OECD/NEA、1977；DOE、1980）。

○高レベル放射性廃棄物については、**廃棄物を発生させた現世代の責任として、対策を講じること**（OECD/NEA、2006、2008）、その際に**可逆性も配慮**することとされている（OECD/NEA、1995）

<OECD/NEA 1977、DOE 1980以外におけるその他処分方法の国際的評価>

処分方式	概要	評価
氷床処分	南極大陸などの氷床に処分	・南極への処分は**南極条約により禁止**（1959） ・大きな氷床の地球物理学的特性等に関する情報が限定的(原子力部会 1999)
海洋底下処分	海上から海洋底下に処分	・**ロンドン条約により禁止**（1972）
宇宙処分	ロケットで宇宙空間へ処分	・**ロケット発射の信頼性**の問題(OECD/NEA 1977；原子力部会 1999)
長期地上管理	地上で超長期にわたり管理	・将来世代による積極的かつ継続的な管理が必要であり、**長い期間に対しては不確実**(NWMO 2005) ・地下深部に比べ、**自然事象やテロ行為に対し脆弱**(OECD/NEA 2008)
超深孔処分	数キロ深度のボーリング孔に埋設処分	・定置プロセスがコントロールできない(SKB 2011) ・人工バリアによる防護が期待できない(SKB 2011)
核種分離・変換	マイナーアクチノイド等の長寿命核種を短寿命核種に変換	・全ての長寿命核種を変換することは困難と見込まれるため、いずれにしろ地層処分が必要(OECD/NEA 2008),(SKB2011) ・原子炉プラント類似の施設が必要(SKB 2011)

地層処分の取組の経緯

- 日本においても、原子力発電の利用が開始される1966年よりも前から、高レベル放射性廃棄物の処分方法についての検討が開始されてきました。
- 1970年代からは、様々な専門分野の知見を取り入れて、地層処分の研究が進められ、**日本において地層処分は、技術的に実現可能**であることを国内外の専門家により確認されています。

1962年：原子力委員会報告書 **放射性廃棄物の処分方法の検討開始**

1966年：**原子力発電の利用開始**

1976年：原子力委員会決定 地層処分研究スタート

1999年：核燃料サイクル開発機構（現JAEA）研究開発成果「第2次取りまとめ」
日本において地層処分は技術的に実現可能であることを国内外の専門家により確認

2000年：**最終処分法制定**
事業主体としてNUMO（原子力発電環境整備機構）設立

2015年：最終処分に関する基本方針改定
- 現世代の責任として、地層処分に向けた取組を推進する
- 科学的により適性の高いと考えられる地域を提示するなど、国が前面に立って取り組む 等

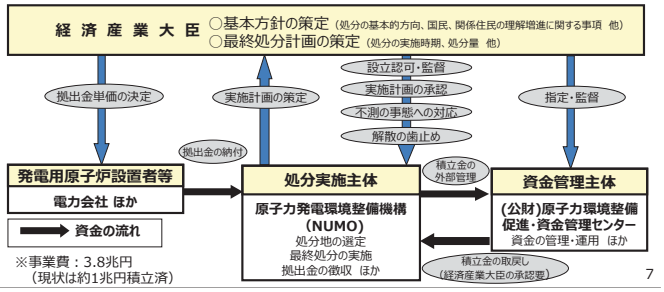
2017年：科学的特性マップの公表
地層処分に関する地域の科学的特性を一定の要件・基準に従って客観的に整理

2018年：NUMO包括的技術報告書のレビュー開始
日本の地質環境で安全な地層処分を実現するための技術的な取組の最新状況を提示

「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」概要

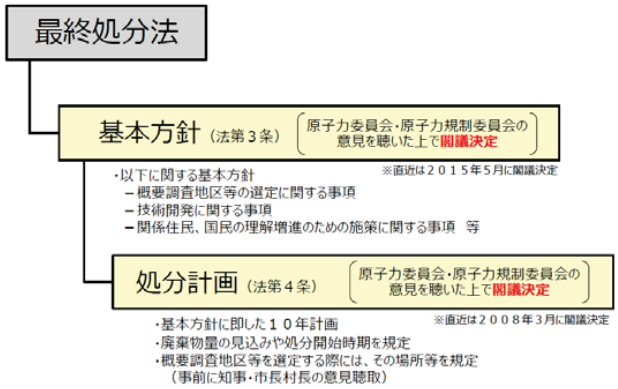
○高レベル放射性廃棄物等の処分に係る実施主体、処分地選定プロセス、処分計画、費用確保等、処分のための仕組みを整備する制度。（2000年制定）

①処分実施主体として原子力発電環境整備機構（NUMO）を設立し、処分を実施。
②3段階の調査（文献調査、概要調査、精密調査）を経て最終処分施設建設地を決定。
③10年を一期とする最終処分計画を5年毎に策定(ガラス固化体の発生量見込み、処分場の規模、処分スケジュール等)
④処分費用について、電力会社等が毎年の発電電力量等に応じNUMOに拠出（電気料金で費用回収）
⑤長期にわたる処分費用の透明性・安全性を確保するため、外部の資金管理法人にて積み立て、管理・運営。



※事業費：3.8兆円
（現状は約1兆円積立済）

（参考）法律に基づく基本方針及び処分計画の位置付け



高知県東洋町を巡る主な動き（２００７年）

＜主な経緯＞
2007年 1月25日 高知県東洋町が全国初の応募
3月28日 応募に伴う事業計画変更認可（平成19年度から文献調査開始可能）
4月 5日 民意を問うために町長が辞職し、出直し選挙への出馬を表明
4月22日 出直し町長選挙において、反対立場候補が当選（1,821票：761票）
4月23日 東洋町が応募取下げ
4月26日 応募取下げに伴う事業計画変更認可（文献調査取り止め）

高知県東洋町 町長、文献調査応募を表明

周辺自治体の反応

【高知県】
・知事：「お金でほっぺたを叩いてやるような国のやり方はおかしい」
・20市町村：「反対または慎重な対応を求める決議」「反対・慎重を求める意見書」を可決
・県議会：「文献調査を開始すべきでない」旨決議

【徳島県】
・1市3町：「反対決議」を可決

東洋町議会 町長辞職勧告決議

町長出直し選挙 反対立場候補当選、応募を取下げ

最終処分に関する基本方針の改定（2015年）のポイント

（１）現世代の責任と将来世代の選択可能性 ― 可逆性 回収可能性

○廃棄物を発生させてきた現世代の責任として**将来世代に負担を先送りしない**よう、地層処分に向けた対策を確実に進める。
○基本的に**可逆性・回収可能性**を担保し、将来世代が最良の処分方法を選択可能にする。幅広い選択肢を確保するため**代替オプション**を含めた技術開発等を進める。

（２）全国的な国民理解、地域理解の醸成 ― 代替処分オプション

○最終処分事業の実現に貢献する地域に対する**敬意や感謝**の念や社会としての利益還元の必要性が広く国民に共有されることが重要。
○国から全国の**地方自治体**に対する情報提供を緊密に行い、丁寧な対話を重ねる。

（３）国が前面に立った取組 ― 地方自治体との連携・対話

○国が科学的により適性が高いと考えられる地域（**科学的有望地**）を提示するとともに、理解活動の状況等を踏まえ、調査等への理解と協力について、関係地方自治体に**申入れ**を行う。

（４）事業に貢献する地域に対する支援 ― 国民理解・協力のため国が前面に

○地域の主体的な合意形成に向け、多様な住民が参画する**「対話の場」**の設置及び活動を支援する。
○地域の持続的発展に資する**総合的な支援措置**を検討し講じていく。

（５）推進体制の改善等 ― 地域における対話の場の設置と総合支援

○事業主体である**ＮＵＭＯ**（原子力発電環境整備機構）の体制を強化する。
○国、機構及び関係研究機関は、連携及び協力を行いつつ、最終処分の技術的信頼性等の定期的な評価を行うことを通じ、全体を俯瞰して総合的、計画的かつ効率的に当該技術開発等を進めるものとする。
○信頼性確保のために、**原子力委員会**の関与を明確化し、継続的な評価を実施する。**原子力規制委員会**は、調査の進捗に応じ、安全確保上の考慮事項を順次提示する。
○**使用済燃料**の貯蔵能力の拡大を進める。

NUMO強化
全体俯瞰した研究開発
使用済燃料
等

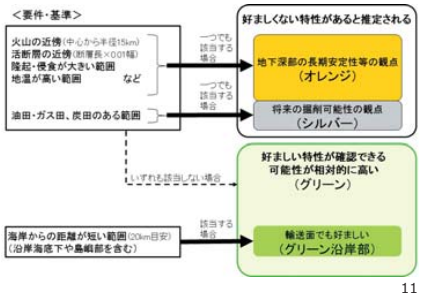
地層処分に関する「科学的特性マップ」の公表

○処分地選定に際して、どのような科学的特性を考慮する必要があるか、それらは日本全国にどのように分布しているかといった、**地層処分の仕組み**や**日本の地質環境**等について、関心や**理解を深めていただくことを目的と**して、「科学的特性マップ」を昨年７月に公表。
○このマップは、既存の全国データに基づき、**一定の要件・基準に従って**、地域の科学的特性を客観的に示したもの。

要件・基準の例

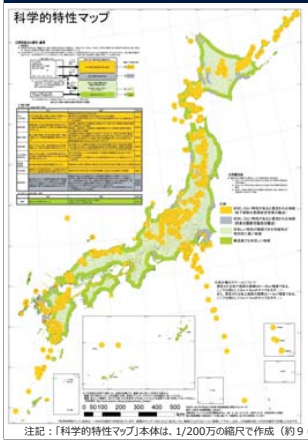
＜火山活動＞
1. 要件：火山の周囲（**マグマが処分場を貫くことを防止**）
2. 基準：火山（約260万年前から現在までに噴火して形成された火山）の中心から半径15km以内 等

＜断層活動＞
1. 要件：活断層の影響が大きいところ（**断層のずれによる処分場の破壊等を防止**）
2. 基準：主な活断層（断層長10km以上）の両側一定距離（断層長×0.01以内）



（注）
◆ **地下水の動きや岩盤の性質**なども考慮は必要ですが、地下深部の全国的なデータが存在しないため、**科学的特性マップに反映されていません。**
◆ マップへの記載の有無に関わらず、考慮すべき要素については、処分地選定前の**個別地点調査でその特性を明らかにしていきます。**

地層処分に関する科学的特性マップ



○日本全国の地域特性を４区分（色）で示す

○日本全国に占める面積割合

オレンジ	：約３０％
シルバー	：約　５％
グリーン	：約３５％
グリーン沿岸部（濃いグリーン）	：約３０％

○地域特性区分に一部でも含まれる自治体数

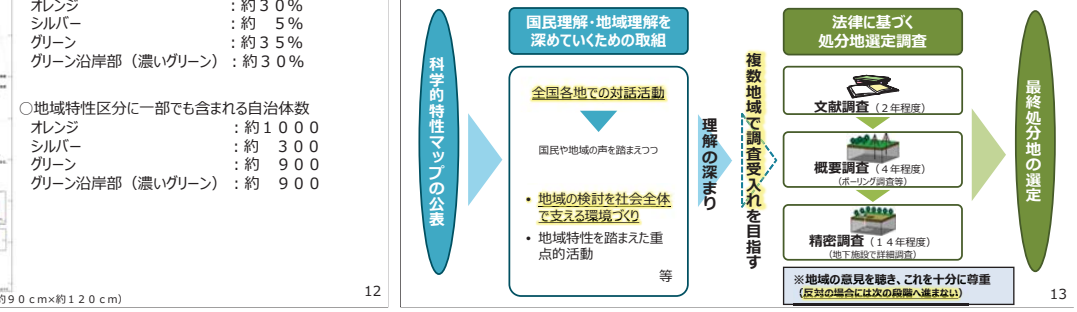
オレンジ	：約１０００
シルバー	：約　３００
グリーン	：約　９００
グリーン沿岸部（濃いグリーン）	：約　９００

注記：「科学的特性マップ」本体は、1/200万の縮尺で作成（約９０ｃｍ×約１２０ｃｍ）

今後の処分地選定に向けたプロセス

○マップ公表を契機に、日本でも地層処分に適した地下環境が広く存在するとの見通しを共有しながら、将来的に複数地域で調査に関心を持っていただける自治体が出てくることを期待し、全国各地で対話活動に引き続き取り組んでいく。

○今後、処分事業に関心を持っていただける自治体が出てきた場合には、地域の意見を聴きながら、法律に基づく処分地選定調査を一歩ずつ進め、最終処分地の選定につなげていく考え。



複数地域での文献調査の実施に向けた当面の取組方針

● 全国での対話活動を改善・継続しながら、**複数地域で文献調査の実施に向けて、以下の方針に基づき、取組を強化していく**こととしたい。

2019年内～	2020年目途	2020年～
<フェーズ１>	<フェーズ２>	<フェーズ３>
① **現役世代や若年層**等を含めた、**幅広い層の理解を促進**	①「より深く知りたい」**関心グループの数**を**2020年目途**に全国で**100程度に拡大**（現状約50）	① 関心を示していただいた複数地域の**文献調査実施を全面的に支援** （地域からの応募、または、地域の状況等を踏まえて国から調査を申入れ）
②「**より深く知りたい**」**関心グループ**に対し、ニーズに応じた**情報提供を強化**	② 地域の**発展ビジョンづくりを積極的に支援**（処分事業に伴う地域発展イメージの共有等） ※ 文献調査へ移行しようとする地域には、現地拠点を設置し、地域の発展ビジョンの具体化へ。	② 文献調査を実施する地域の**発展ビジョンの具体化**に最大限貢献 （**現地拠点をベース**として、地域の発展ビジョンを具体化（医療・教育・防災の充実、企業誘致、観光振興等に貢献））

（参考）フェーズ１：対話活動の継続・強化（2019年内～）

① **現役世代や若年層**等を含めた、**幅広い層の理解を促進**

● アプローチが十分に出来ていない**若年層等への情報発信を強化**するとともに、そうした方に関心を持ってもらえるような**情報やコンテンツを充実**。

● 具体的には、**地層処分の仕組み等に関する短時間動画**や、地層処分の実現に向けて様々な業務に取り組む**NUMO職員による顔の見える広報**、**地下にある多様な施設の紹介**等、地層処分を身近に感じてもらえるようなアプローチを試行。

地下にある多様な施設をSNS等で紹介

② **「より深く知りたい」関心グループ**に対し、ニーズに応じた**情報提供を強化**

● 一般的な説明に留まることなく、関心グループの**個別のニーズに応じた、よりきめ細かな情報提供を強化**（**カナダのLearn more活動**も参考に）。

● **関心グループ同士の交流の機会**を創出することで、**取組のネットワーク化を促進**。

● 関心グループが北欧先行国の地域住民の方々と対話し、その活動報告を発信。

関心グループによる北欧視察の様子

北欧で見聞きしたことを帰国後に他の関心グループに共有

（参考）フェーズ２：関心グループの拡大（2020年目途）

① 「より深く知りたい」**関心グループの数**を**2020年目途**に全国で**100程度に拡大**（現状約50）

② 地域の**発展ビジョンづくりを積極的に支援**（処分事業に伴う地域発展イメージの共有等）

◆ これまでの対話活動の中で、自らの地域に処分場を誘致するか否かではなく、**社会全体で解決すべき課題との観点**から、「より深く知りたい」と主体的に活動されているグループが**全国各地に広がりつつある状況**（全国で**約50のグループ**が多様な取組を実施）。

処分事業をより具体的に考えていただけるような情報提供を強化していく観点から、地域の発展ビジョンの策定に資するよう、**処分事業に伴う地域発展のイメージが共有できるような情報についても、積極的に提供**していく。

（例）
- 処分事業自体に要する費用が約3.8兆円規模と試算される**大規模事業に伴い発生する雇用や経済波及効果**
- 資材、工事、宿泊・食事等のサービスといった事業領域での**地元事業者参入機会の可能性**
- **インフラの整備**（道路や港湾の整備・拡充等）や**関連産業・関連施設の誘致**
- NUMO、電気事業者、国の連携による当該**地域の抱える課題への貢献**

経済団体や行政・議会関係者を含めた幅広い層に関心をもってもらえるよう取り組むことで、**2020年目途**に関心グループを**全国で100程度に拡大**することを目指して取り組んでいく。

（参考）フェーズ３：調査実施地域の発展ビジョンの具体化（2020年～）

① 関心を示した複数地域の**文献調査実施を全面的に支援**

② 文献調査を実施する地域の**発展ビジョンの具体化**に最大限貢献

文献調査について以下の趣旨をご説明しながら、関心を示していただいた複数地域での文献調査実施を支援していく。

● 関心を持っていただけた地域に、**事業をさらに深く知っていただく**とともに、更なる**調査**（概要調査）**を実施するかどうかを検討**してもらうための、地域の地質環境に関する**事前調査的な位置付け**であること。

● したがって、**処分場の受け入れを求めるものではなく**、今後、概要調査地区、精密調査地区及び施設建設地を選定しようとする際には、改めて**知事と市町村長の意見を聴き、反対の場合は先へ進まない**こと。

● 文献調査開始に伴い、NUMOは**地域に拠点を設置**し、**「対話の場」等を通じて継続的な対話**を進め、**処分事業に関する広報**、**文献調査の進捗説明**、**地域の発展ビジョンの具体化**等、**核となる機能**を果たしていくこと。

● これらの取組を通じて、**地域で時間をかけて事業を知っていただいた**上で、地域の地質環境について、**ボーリング調査等でさらに詳しく知りたいという地域**には、**地域の意見を伺った**上で、**概要調査地区の選定**を行っていくこと。

本日お伝えしたいこと

1．地層処分に関する政策について

2．対話活動の推進について

3．技術開発について

4．人材育成について

科学的特性マップに関する対話型全国説明会

- 2018年5月以降、「対話型全国説明会」を開催。2018年秋以降は、**グリーン沿岸部を中心に、都道府県庁所在地以外**の地域も含めて、全国各地できめ細やかな対話活動を開催中。
- 2019年12月末時点までに、69会場で開催（平均1会場あたり約20名）。

2018年

5/10（木）	夜	大阪府大阪市	6/30（土）	昼	高知県高知市	7/31（火）	昼	福井県福井市	11/10（土）	昼	京都府綾部市
5/17（木）	昼	茨城県水戸市	7/1（日）	昼	千葉県千葉市	8/1（水）	昼	滋賀県大津市	11/18（日）	昼	兵庫県豊岡市
5/19（木）	昼	島根県松江市	7/8（日）	昼	愛知県名古屋市	↓県庁所在地以外も含めた開催			11/18（日）	昼	山口県下関市
5/20（日）	昼	鳥取県鳥取市	7/9（月）	昼	北海道札幌市	10/13（土）	昼	石川県七尾市	11/21（水）	夜	高知県四万十市
5/25（金）	夜	兵庫県神戸市	7/14（土）	昼	青森県青森市	10/13（土）	昼	鳥取県米子市	11/26（月）	夜	秋田県能代市
5/26（土）	昼	香川県高松市	7/15（日）	昼	秋田県秋田市	10/14（日）	昼	島根県浜田市	12/1（土）	昼	京都府京丹後市
6/2（土）	昼	沖縄県那覇市	7/21（土）	昼	石川県金沢市	10/20（土）	昼	熊本県八代市	12/8（土）	昼	愛知県豊橋市
6/10（日）	昼	富山県富山市	7/28（土）	昼	群馬県前橋市	10/21（日）	昼	岩手県釜石市	12/9（土）	昼	静岡県浜松市
6/16（土）	昼	徳島県徳島市	7/29（日）	昼	新潟県新潟市	10/28（日）	昼	岐阜県岐阜市	12/18（火）	夜	神奈川県平塚市
6/17（日）	昼	岡山県岡山市	7/30（月）	昼	京都府京都市	11/1（木）	夜	熊本県熊本市			

2019年

1/19（土）	昼	長野県松本市	3/3（日）	昼	愛媛県松山市	6/19（水）	夜	北海道北見市	9/29（日）	昼	島根県出雲市
1/19（土）	昼	兵庫県姫路市	3/4（月）	夜	宮城県白石市	8/22（木）	夜	長崎県佐世保市	10/3（木）	夜	秋田県横手市
1/26（土）	昼	大分県佐伯市	3/9（土）	昼	福岡県北九州市	8/26（月）	夜	北海道釧路市	10/16（水）	夜	福井県敦賀市
2/3（日）	昼	岡山県倉敷市	3/10（日）	昼	滋賀県長浜市	8/27（火）	夜	富山県高岡市	10/23（水）	夜	茨城県つくば市
2/4（月）	夜	広島県広島市	3/14（木）	夜	徳島県阿南市	9/1（日）	昼	広島県福山市	10/27（日）	昼	山梨県富士吉田市
2/5（火）	夜	佐賀県唐津市	5/22（水）	夜	高知県安芸市	9/7（土）	昼	愛知県岡崎市	10/30（水）	夜	熊本県天草市
2/13（水）	夜	埼玉県熊谷市	5/26（日）	昼	鹿児島県霧島市	9/8（日）	昼	新潟県上越市	12/11（水）	夜	兵庫県西宮市
2/15（金）	夜	香川県丸亀市	5/30（木）	夜	北海道旭川市	9/12（木）	夜	福岡県久留米市	12/21（土）	昼	青森県八戸市
2/16（土）	昼	和歌山県新宮市	6/2（日）	昼	山口県周南市	9/18（水）	夜	北海道帯広市	12/22（日）	昼	青森県弘前市
2/24（日）	昼	山形県鶴岡市	6/4（火）	夜	北海道函館市	9/26（木）	夜	宮崎県延岡市	以降も順次開催		
3/2（土）	昼	愛媛県新居浜市	6/4（火）	夜	三重県四日市市	9/28（土）	昼	大阪府堺市			

対話型全国説明会における工夫

- 参加者の多様な関心・質問にきめ細かく応えられるよう、**膝詰めの少人数質疑を充実**。付箋・模造紙も使い、相互に関連づけながらご説明するとともに、**説明資料**や**Q＆A集を随時見直し**。
- 対話活動を重ねる中で、「科学的特性マップ」や「地層処分」そのものに関する意見・質問だけでなく、**「処分事業が地域にもたらすプラス・マイナス両面での社会的影響」**や、**「選定プロセスにおける地域住民の意見の反映方法」**、さらには、**「この地域の地質で、本当に安全な地層処分ができるのか」**、**「この地域に立地すると、どのような地域振興が図られるのか」**といった、地層処分事業を身近な問題として捉えていただいた上で、**より深く知ろうという観点からの具体的意見・質問**もいただいている。

膝詰めの少人数質疑で
付箋・模造紙を使った議論

Q&A
（よくいただくご質問への回答）

見直しの例

○**最終処分方法としての地層処分への疑問**（例：「原子力政策をきちんと見直すべき」「地層処分で良いのか疑問」）

⇒よくいただくご質問への回答で、エネルギー政策や他の処分方法との比較を説明

○**地域の関与や影響への声**（例：「地域住民の意見はどう反映されるのか」「受け入れた地域の将来のイメージを伝えることが重要」）

⇒諸外国における地域との対話活動や経済影響評価について、説明資料で紹介

○**地層処分の実現可能性について真摯でていねいな説明が必要との声**（例：「安全の根拠が薄い、しっかりとしたデータが欲しい。」「具体性に欠ける。市民の生活に沿ったわかりやすい資料が必要。」）

⇒今後の改善事項として、より分かりやすいリスク・安全性の説明内容へと改善

（参考）対話型全国説明回でよく頂く質問の例

1.エネルギー政策

Q．原子力発電所がなくても電気は足りているのではないか。

Q．原子力は本当に「安い」と言えるのか。

Q．核燃料サイクルは破綻しているのではないか。

Q．まずは原子力発電所を止めてから処分の議論をすべきではないか。

2.地層処分の概要

Q．原子力発電の利用開始する前から、廃棄物の問題を考えておくべきではないか。

Q．地下に埋設するよりも、地上で管理し続けた方が安心ではないか。

Q．暫く地上に保管して新たな技術開発を待った方が良いのではないか。

3.リスクと安全対策

Q．万年単位リスク対応・安全責任はどのように考えているのか。

Q．４つのプレートが重なる日本で地層処分は難しいのではないか。

4.科学的特性マップ

Q．マップにおいて、南海トラフなどの大地震によるリスクを考慮しなくても良いのか。

Q．マップにおいて、岩種についても基準化すべきではないか。

5.その他

Q．なぜ、フィンランドやスウェーデンでは事業が進んでいるのか。

Q．風評被害が広がらないような対策が必要ではないか。

➡ 回答はQ&Aに掲載して詳しくご説明するとともに、随時見直しを実施。

地層処分の理解を深めるための広報活動の考え方

最終処分の実現に向けた国際連携の強化

- 高レベル放射性廃棄物の処分の実現は、**原子力を利用する全ての国の共通の課題**。
- 長い年月をかけて地層処分に取り組む各国政府との**国際協力を強化**することが重要。このような観点から、**世界の原子力主要国政府が参加**する**初めての「国際ラウンドテーブル」の立ち上げ**について、本年６月の**G20軽井沢大臣会合で合意**。
- これまでの**各国の理解活動における経験・知見を共有化**するとともに、**各国地下研究所間の研究協力**や**人材交流を促進**することを通じて、**地層処分の実現に向けた各国の取組みを後押し**していく。

「最終処分国際ラウンドテーブル」共同記者会見
（2019年6月16日、G20軽井沢大臣会合）

（参考）第１回最終処分に関する政府間国際ラウンドテーブル

- 開催日：2019年10月14日（パリ）
- 参加国：ベルギー、カナダ、中国、フィンランド、フランス、ドイツ、日本、韓国、オランダ、ロシア、スペイン、スウェーデン、英国、米国、経済開発機構/原子力機関（OECD/NEA）、国際原子力機関（IAEA）
- 共同議長：資源エネルギー庁（日本）、エネルギー省（米国）
- 今後の予定：２回の会合での議論を踏まえて、最終処分に関する**政府間の国際連携強化に向けた基本戦略**や、**各国の対話活動の知見・経験・ベストプラクティス**や、**各国が有する研究施設等を活用した研究開発協力の方向性**等を盛り込んだ**最終報告書をとりまとめ予定**。

（参考）第１回最終処分に関する政府間国際ラウンドテーブルでの議論

①政府の役割と国際協力の意義

- **最終処分の実現は原子力利用国共通の課題**。長年の研究により最も安全な処分方法とされている地層処分の実現に向けて、各国が**透明で公正な理解活動を通じて社会的な信頼を得ながら**、**着実に取り組んでいく**ことが重要。
- 原子力政策・最終処分政策・地質環境など、国によって最終処分を取り巻く状況や政策的アプローチは異なるものの、**国家レベルで大きな方針を示すこと**、**国家としての意思決定を行うこと**、**安全規制を含めて国民理解を得ていくこと**、**長期の研究開発を支えること**など、**地層処分実現に向けて各国政府が果たすべき役割は重要**。
- これまで専門家レベルで技術面を中心とした国際連携は実施されてきたが、**国家戦略レベル・政策レベルでの国際連携はこれまで十分に実施されてこなかった**中で、**各国政府が参加する今回の国際ラウンドテーブルのイニシアティブを歓迎**。

②国民理解活動

- **様々なステークホルダーがいる中での信頼の醸成**、**安全性に関する地域の理解の獲得**、**地層処分事業の地域発展への貢献**などに分野において、**各国の知見・経験・教訓を学び合うことが重要**。
- 地層処分の実現に向けて、**各国が直面する課題**は、技術的というより、**社会的・政治的なもの**。一般の人々は放射性廃棄物にどう向き合うべきかわからないと考えており、それを乗り越えていくことが必要。
- **信頼獲得には、技術的な安全性を一般の人にも分かりやすい形で説明する努力を続ける**とともに、SNS上の情報が世論を左右し得ることも踏まえ、**常に丁寧な情報発信を心がけるべき**。
- **地域の学校やコミュニティと協働**しながら、**一般の方を研究施設に案内するなどして学んでもらう取組も効果的**。
- 技術的な検討だけでなく、**地域の関心や文化的な違いなどの社会的側面についても検討した上で、地域と向き合うことが重要**。

③研究開発

- **各国が自国の研究施設や人材や知見や資金を効率的に活用して研究開発を進めていくことが重要**であり、各国が**研究分野について具体的な関心がある領域を示し**、**各国間で協力を強化**していくべき。
- **各国のプロジェクトを海外の専門家にレビューしてもらうこと**は、**人々の信頼を高めることに役立つ**、**他国も同じ課題を抱えており**、**他の多くの国が同じ課題に同じ手法でアプローチしている事実**が、**ステークホルダーの納得感を高める**。
- 地下研究施設や放射性物質を扱える分析設備等は、全ての国が保有しているものではないため、**国際協力の余地が大きい**。

本日お伝えしたいこと

1．地層処分に関する政策について

2．対話活動の推進について

3．技術開発について

4．人材育成について

地層処分研究開発調整会議の概要

- 2005年の原子力政策大綱と受け、資源エネルギー庁主催の下「地層処分基盤研究開発調整会議」（以下、基盤調整会議）を開始（「地層処分基盤研究開発に関する全体計画」を策定」）。
- 最終処分法における基本方針に基づき設置された原子力委員会放射性廃棄物専門部会が2016年秋に取りまとめた評価報告書において、「**研究開発等における関係行政機関等の間の一層の連携強化**」、「**NUMOは一層のリーダーシップを発揮し**」、「**実施主体・基盤研究開発機関一体で『真の全体計画』を策定すること**」等が必要とされた。

  ⇒新たに「地層処分研究開発調整会議」を設置し以下の審議・調整を実施

（➢**研究開発全体計画**の作成　➢**成果の体系化**に向けた調整
➢研究開発の**連携**に関する調整　➢研究開発の**重複削除**の調整）

【参加機関】
経済産業省
文部科学省
原子力発電環境整備機構
日本原子力研究開発機構
産業技術総合研究所
電力中央研究所
量子科学技術研究開発機構
原子力環境整備促進・資金管理センター
電気事業連合会
日本原燃

【外部有識者】
出光一哉（九州大学）
大西有三（京都大学）
長田昌彦（埼玉大学）
小峯秀雄（早稲田大学）
田中和広（山口大学）
杤山修（原子力安全研究協会）
新堀雄一（東北大学）
松島潤　（東京大学）
山崎晴雄（首都大学東京）

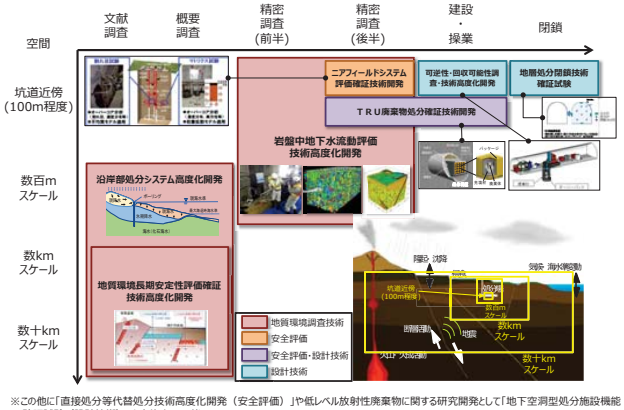
【開催日時】
第1回　2017年　5月
第2回　2017年　9月
第3回　2017年12月
第4回　2018年　3月
全体計画　2018年　3月

地層処分研究開発調整会議における決定内容（全体計画）

- ＮＵＭＯを中心とした関係研究機関が、計画的かつ効率的に連携して取り組むよう、２０１７年度に「地層処分研究開発調整会議」を設置し、2018年度からの５年間における「地層処分研究開発に関する全体計画」をとりまとめ。
- NUMOの包括的技術報告書を作成する過程で抽出された課題や対話型説明会で出た意見などを踏まえ、研究開発課題を設定（但し、2020年度以降の計画については2019年度末を目途に見直す予定）。

項目		研究開発テーマ等
地下環境選定技術	自然現象の影響	◆地層処分に**適した地下環境を評価する技術の高度化**
	地下環境の特性	◆**沿岸部の地下深部の特性を把握する技術**の整備 ◆**地下水年代を指標とした**地下水の動きを把握する技術の整備
設計・建設・埋戻し等の技術	人工バリア	◆**最適な人工バリア材料の検討**（例：炭素鋼鋳鋼品・銅コーティングのオーバーパック）
	地上・地下施設	◆**坑道の埋め戻し技術**の整備
	回収可能性	◆**回収技術の実証**
長期安全性評価技術	シナリオ構築	◆実際の地下環境を踏まえた、より現実的な評価方法の整備
	パラメータ整備	◆核種移行データベースの整備（特に、高炭酸地下水環境、沿岸海底下）
中長期的な重要事項	技術マネジメント 国際連携	◆国内外の関係機関等の連携促進 ・**研究基盤の長期確保と、研究成果・人材の継承・発展を図る** ・若手技術者を継続的育成。若年層が期待を持てる環境作り
	代替処分オプション	◆**直接処分の処分概念及びその他の代替オプション（超深孔処分等）に関する調査研究**

エネ庁委託事業の概要

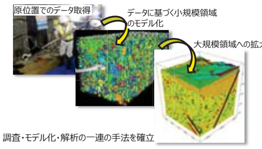


※この他に「直接処分等代替処分技術高度化開発（安全評価）」や低レベル放射性廃棄物に関する研究開発として「地下空洞型処分施設機能確認試験（設計技術）」を実施中不可能

（参考）各事業の概要①

岩盤中地下水流動評価技術高度化開発

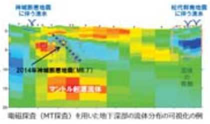
● 地下環境で取得した実測値から、地質・水理／水質を網羅的に再現可能なモデル化・解析手法の検討を実施する。
● 具体的には、原位置におけるボーリング調査、採水・分析、物質移行試験とその結果のモデル化・解析を実施する。



調査・モデル化・解析の一連の手法を確立

地質環境長期安定性評価技術高度化開発

● 変動帯に位置する我が国の地質環境の長期安定性を評価する上で重要な評価技術の高度化を行う。
● 具体的には、火山、断層、隆起・侵食や深部流体の性状把握手法の高度化（精度向上）を実施。



電磁探査（MT探査）を用いた地下深部の流体分布の可視化の例

地層処分閉鎖技術確証試験

● 地下環境に掘削した坑道の適切なシーリングシステムを構築することを目的として、原位置試験等を実施する。
● 具体的には、止水プラグ試験や実際の坑道充填技術の実証等を行い技術の妥当性を検証する。

原位置試験途中の状況と施行結果確認用の計測機器類の配置

ニアフィールドシステム評価確証技術開発

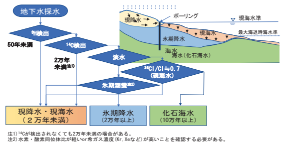
● 人工バリアから天然バリアと、様々な材料が配置するニアフィールドを対象として、原位置試験や室内試験に基づき、材料間の相互作用による現状の把握やその解析手法を開発・高度化する。

現象論の理解と数値解析手法高度化に向けた取り組み

（参考）各委託事業の概要②

沿岸部処分システム高度化開発

● 沿岸部固有の特性を考慮し、地質環境の調査技術、建設・操業技術、安全評価技術に関する技術開発とその体系化を行う。



流動性評価方法の概念図

TRU廃棄物処分確証技術開発

● TRU廃棄物固有の特徴を考慮した人工バリアとその周辺環境への影響技術に関する検討を実施する。
● 具体的には、ガス発生による人工・天然バリアへの影響評価技術や人工バリアの破壊耐性の検証等を実施する。

人工バリアの落下試験のイメージ　水素測定法によるハル・エンドピースの長期腐食試験

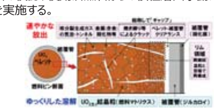
可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発

● 廃棄体定置後の回収技術の実証ならびに高度化に向け、模擬体廃棄体を地下坑道に定置、廃棄体周りのシーリング材の除去を含めた、廃棄体の回収技術の実証を行う。

幌延URLにおける回収可能性の実証試験予定坑道

直接処分等代替技術高度化開発

● 我が国における使用済燃料の直接処分の実現可能性の検討等として、我が国の地下水水質に着目した処分容器材料の検討、使用済燃料からの核種溶出挙動について検討を実施する。


使用済燃料からの核種放出に関する検討の概念図

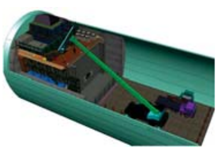
（参考）各庁委託事業の概要③

地下空洞型処分施設機能確認試験

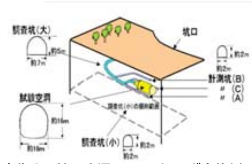
中深度処分における閉鎖後の長期的な管理に資するため、人工バリアや周辺岩盤の長期にわたる機能確認に関わる技術開発を実施する。

・人工バリア等の長期モニタリング技術（性能確認・管理のためのデータ取得）の実施設への適用検討を行う。
・実規模施設における地震時挙動評価やコンクリートピット等のひび割れに関する状況変化を調査する。

地下空洞型処分施設での試験実施イメージ



地下空洞内に構築した実規模試験施設



実物大の地下空洞でのモニタリング実施例

（参考）各事業の概要（調査事業）④

放射性廃棄物海外総合情報調査

放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務

本日お伝えしたいこと

1．地層処分に関する政策について

2．対話活動の推進について

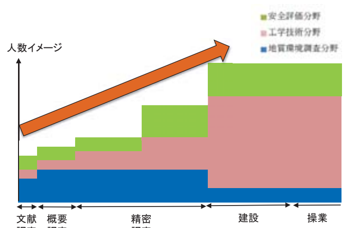
3．技術開発について

4．人材育成について

長期の事業を見据えた人材の育成と確保

● 地層処分事業は、調査から建設・操業を経て、閉鎖に至るまで長期にわたる事業。関係機関が連携して体制をしっかりと整備していく必要がある。そのため、**長期の事業を見据えた計画的な人材確保、技術継承といった継続的な人材育成**が行われることが重要。

＜地層処分事業の各段階と必要となる技術者数のイメージ＞



➢ プロセスの進展に伴い、必要な技術者は**工学技術分野を中心に**、逐次増加していく見込み。

＜若手向け人材育成研修の試行的な実施＞

➢ 2019年１月に、NUMO及び関係機関が連携し、合宿形式で若手向け人材育成研修を実施。
➢ 地層処分の抱える課題の解決に必要な人材やその育成方法等について議論。

（参考）キャリアプラン構築に向けた提案（１／２）

・I型人材→T型人材→Π型人材

→特定の専門分野を究めた高い専門性

I型人材：特定の分野（縦棒）に秀でたスペシャリスト

→国内外の様々な専門家との協働による問題解決

T型人材 ：縦棒＋視野の広さ（横棒）

Π型人材：T型の進化版，複数の専門分野（縦棒）に精通し，かつ全体の調整もできる人材へ

・異分野との協働/融合が新しい価値を生み出す。
・横棒が大きいほど、縦棒の数が多いほど、他分野の専門家と議論することが可能となり，問題解決につながる

（参考）キャリアプラン構築に向けた提案（２／２）

・専門家以外の人達とコミュニケーション経験の蓄積

・種々の知見を統合（Integration）する経験の蓄積

・放射性廃棄物処分の総合的な推進への貢献

（TRU廃棄物，発電所廃棄物，1F事故廃棄物も含む）

ご清聴いただき、ありがとうございました。

別添資料2
講義資料02

NUMO 原子力発電環境整備機構

地層処分事業における技術人材の育成『2019年度人材育成セミナー』

02.放射性廃棄物の発生と管理

2020年1月8日

原子力発電環境整備機構
石田　圭輔

本講演資料は、使用許諾等が得られていない内容や原典図表・データが含まれている可能性があります。二次利用をしようないようにお願いします。

本日の発表の狙い

- ***狙い①***
  - 講義で紹介される地層処分技術が、高レベル放射性廃棄物やTRU等廃棄物の処分に適切かを考えてほしい。（地層処分技術の個々人での評価、R&Dの種の発見）

  ⇒高レベル放射性廃棄物、TRU等廃棄物の特性の理解（放射能、発熱特性、化学特性など）
- ***狙い②***
  - 他の放射性廃棄物の処分で使用されている技術を地層処分へ転用できないかを考えてほしい。（たこつぼ化の回避）

  ⇒日本における放射性廃棄物と処分方法の理解
- ***狙い③***
  - 処分側で整備しなければならない廃棄体に関する技術を知ってほしい。

  ⇒廃棄体受入基準や法令上の取り扱いの理解

日本の原子力施設における放射性廃棄物

各原子力施設における平成２９年度末の保管量は以下のとおり。（括弧内は貯蔵設備容量）

- 実用発電用原子炉施設：約６８７，７００本[※1,2]（約９５９，４００本[※1]）
- 研究開発段階発電用原子炉施設：約　２６，２００本[※2]　（４４，５００本）
- 加工施設：約　５４，７００本[※2]　（約７４，１００本）
- 再処理施設
  - 低レベル放射性固体廃棄物：約１２１，７００本[※2]（約１８０，８００本）
  - 高レベル放射性固体廃棄物：約　６，８００本[※2]　（約１０，３００本）
  - せん断被覆片等：２２１本[※3]　（２，０００本）
  - ガラス固化体：６５２本　（３，６１５本）
- 廃棄物埋設施設
  - 均質固化体：約１４８，１００本[※2]　（２０４，８００本）
  - 充填固化体：約１４８，９００本[※2]（約２０７，４００本）
  - ＪＰＤＲ解体廃棄物：約１，６７０トン（埋設完了）
- 廃棄物管理施設
  - 低レベル放射性固体廃棄物：約　３１，７００本[※2]　（約４４，０００本）
  - 返還ガラス固化体：１，８３０本　（２，８８０本）
- 試験研究用等原子炉施設：約１３２，０００本[※2]（約１４４，４００本）
- 核燃料物質使用施設：約　８４，９００本[※2]（約１０８，３００本）

※1：東日本大震災前の福島第一原子力発電所の保管量及び貯蔵設備容量。約１８５，８００本（約２８４，５００本）を含む。
※2：２００リットルドラム缶換算値。
※3：１，０００リットルドラム缶換算値。

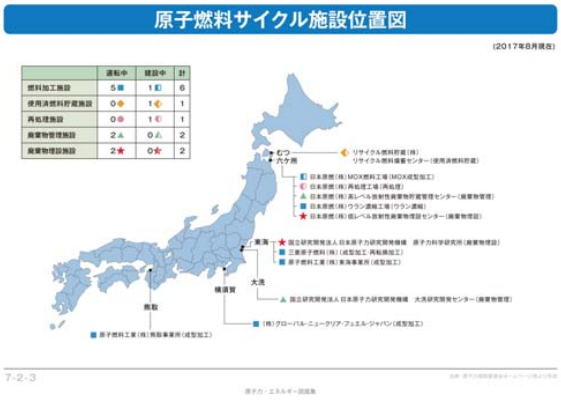
（次ページ）

- JAEA
  - もんじゅ
  - ふげん
- 東京都市大
- 東京大
- 東芝
- 日立
- 立教大
- 京都大
- 近畿大
- JAEA
- ニュークリアデベロップメント
- 日本核燃料開発
- 核管センター
- 京都大
- JAEA

埋設処分されていない廃棄物総量：約23万m^3

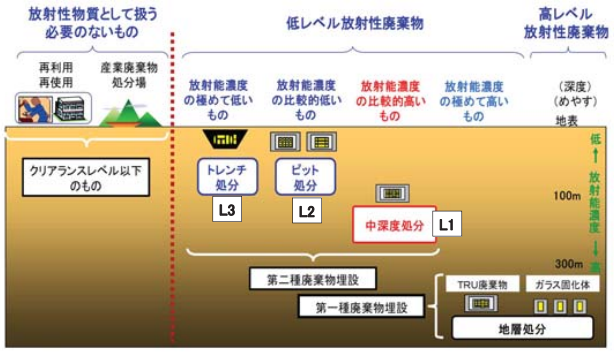
出典：原子力規制委員会（H30.10.17）資料

日本の核燃料サイクル施設



放射性廃棄物の処分概念

廃棄物の種類や放射能濃度等に応じた埋設の方法により最終的な処分を行う



出典：「炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について」（原子力規制委員会、平成28年8月）
https://www.nsr.go.jp/data/000173265.pdf

放射性廃棄物とその処分方法を規定する法律①

- 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（以下、炉規法）
  - ポイント1：濃度でのみ廃棄物が区分されている
  - ポイント2：第一種廃棄物の埋設事業者は、第二種廃棄物も処分することが可能

廃棄物		濃度区分	処分方法
第一種廃棄物		政令*1濃度上限値を超えるもの	（地層処分）
第二種廃棄物	放射能濃度の比較的高いもの	政令濃度上限値を超えないもの	中（余裕）深度処分（70メートル以深の処分、以下、L1）
	放射能濃度の比較的低いもの	第二種廃棄物埋設規則別表第一*2を超えないもの	ピット処分（70メートル以浅の処分、以下、L2）
	放射能濃度の極めて低いも	第二種廃棄物埋設規則別表第二*2を超えないもの	トレンチ処分（70メートル以浅の処分、以下、L3）

*1：核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律令
*2：核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則

参考スライド36,37

放射性廃棄物とその処分方法に関する法律②

参考スライド39,40

- 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（以下、特廃法）
  - ポイント1：物で指定されており放射能濃度で規定されない廃棄物もある。
  - ポイント2：炉規法における第一種廃棄物と第二種廃棄物の両方が存在する。

第一種特定放射性廃棄物（高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体））

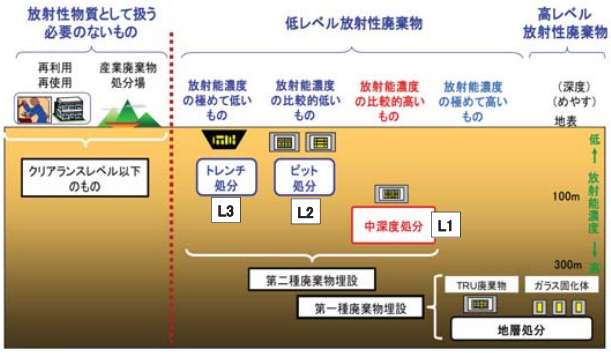
使用済燃料の再処理に伴い使用済燃料から核燃料物質その他の有用物質を分離した後に残存する物を固型化した物

第二種特定放射性廃棄物（TRU等廃棄物）

使用済燃料の再処理等に伴い使用済燃料、分離有用物質又は残存物によって汚染された物を固型化し、又は容器に封入した物であって、長期間にわたり環境に影響を及ぼすおそれがあるものとして政令で定めるもの
政令で定められている廃棄物は物で指定されたものと汚染されたもので、基準の濃度を超えるものがある。（*結果として炉規法における第二種廃棄物に該当するものも含まれる*）

放射性廃棄物の処分概念

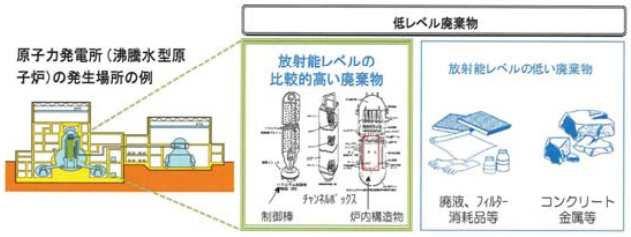
廃棄物の種類や放射能濃度等に応じた埋設の方法により最終的な処分を行う



出典「炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について」（原子力規制委員会、平成28年8月）
https://www.nsr.go.jp/data/000173269.pdf

中（余裕）深度処分（L1）：対象廃棄物の代表例

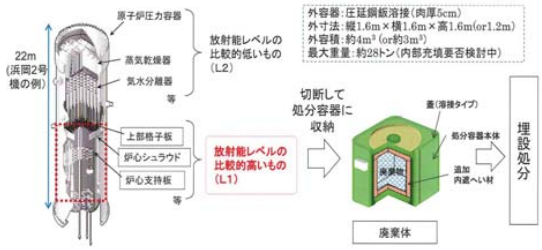
- ・BWR　制御棒、チャンネルボックス、使用済樹脂、炉内構造物
- ・PWR　制御棒、バーナブルポイズン、使用済樹脂、炉内構造物、炉近傍のコンクリート
- ・GCR　黒鉛ブロック、制御棒、炉内構造物
- ・再処理・MOX　チャンネルボックス、バーナブルポイズン、雑固体廃棄物



出典：原子力規制委員会　第2回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合　資料2-1（H27.2.12）抜粋

中（余裕）深度処分（L1）：処分容器

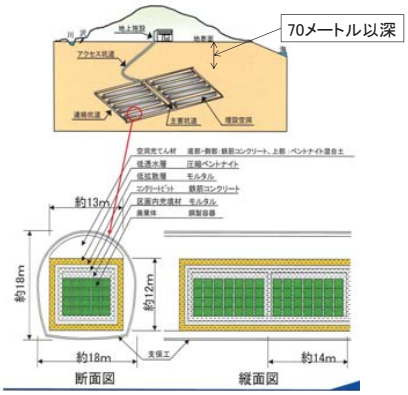
○L1廃棄物は炉内廃棄物等の大型機器や、制御棒等の長尺物が多く、細かく切断して、ドラム缶に収納することは非効率的。
○廃止措置を計画的に遂行するため、これらを安全・効率的に処分することが重要。



→廃棄体容器：収納効率を良くするため、大型角型容器への収納を採用する。
⇒規則等の見直しが望まれる。

出典：原子力規制委員会　第2回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合　資料2-1（H27.2.12）抜粋

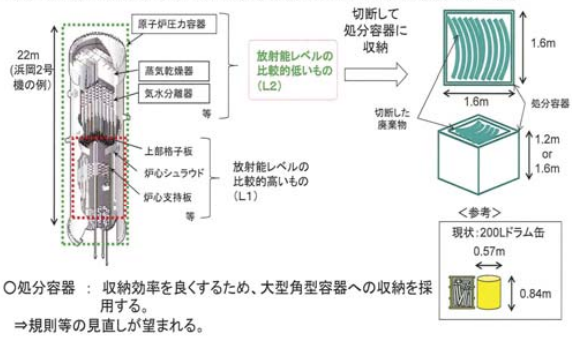
中（余裕）深度処分（L1）：処分概念・特徴



出典：原子力規制委員会　第2回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合　資料2-1（H27.2.12）抜粋

ピット処分（L2）：廃棄物の代表例と処分容器

○解体L2廃棄物は原子炉圧力容器（L1領域を除く）に代表される大型機器が多く、細かく切断して、ドラム缶に収納することは非効率的。
○廃止措置を計画的に遂行するため、廃棄物を安全・効率的に処分することが重要。

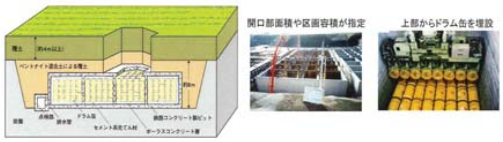


○処分容器　：　収納効率を良くするため、大型角型容器への収納を採用する。
⇒規則等の見直しが望まれる。

出典：原子力規制委員会　第2回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合　資料2-1（H27.2.12）抜粋

ピット処分（L2）：処分施設

現在のピット処分施設



開口部面積や区画容積が指定

上部からドラム缶を埋設

○大型廃棄体の効率的な収納 → 大容量の埋設区画を確保
○公衆被ばくを低減 → 横入れ方式の採用
○敷地の有効利用 → 多層式埋設施設の採用

新たな処分概念の例
横入れ方式の処分施設イメージ※

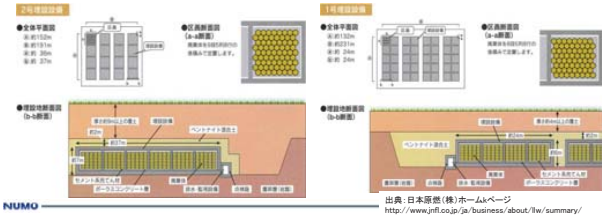
＊原子力学会2014年春の年会「新規廃棄体を想定した処分施設の概念検討」

○多様な施設形態に対応した規則等の見直しが望まれる。
（例：開口部面積制限、埋設容量制限の撤廃等）

電気事業連合会

出典：原子力規制委員会　第2回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合　資料2−1（H27.2.12）抜粋

ピット処分（L2）：日本原燃六ケ所低レベル放射性廃棄物埋設センター

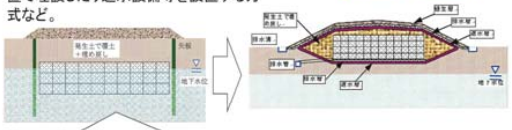


出典：日本原燃（株）ホームページ
http://www.jnfl.co.jp/ja/business/about/llw/summary/

トレンチ処分（L3）：概要

○解体L3廃棄物は、原子炉周辺設備の解体で発生し、給水熱交換器（大型）や配管・弁等多種多様であり、解体初期から多量に発生する。

○多様な立地条件に適合できる処分概念を海外事例も参考に検討している。
例えば、処分施設を地下水位より高い位置で埋設したり遮水設備等を設置する方式など。



地下水位が高い場所では、従来の素掘りトレンチ式は難しい。

従来の方式（素掘りトレンチ式）

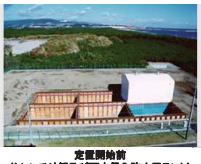
新たな処分概念の例（盛土式＋遮水設備）

⇒新たな処分概念に対する規則等の適用性について検討が望まれる。

電気事業連合会

出典：原子力規制委員会　第2回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合　資料2−1（H27.2.12）抜粋

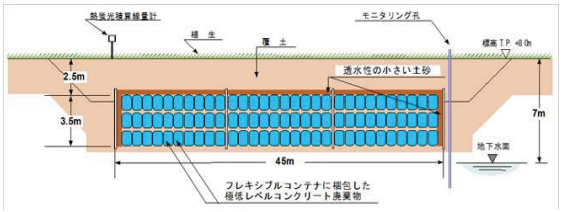
トレンチ処分（L3）：JPDR解体コンクリートの処分



定置開始前
（トレンチ外観及び雨水侵入防止用テント）

廃棄物定置作業

埋設終了（保全段階）



出典：JAEAホームページ
https://www.jaea.go.jp/04/ntokai/backend/backend_01_04_01.html

原子力発電所における区分例（PWR）

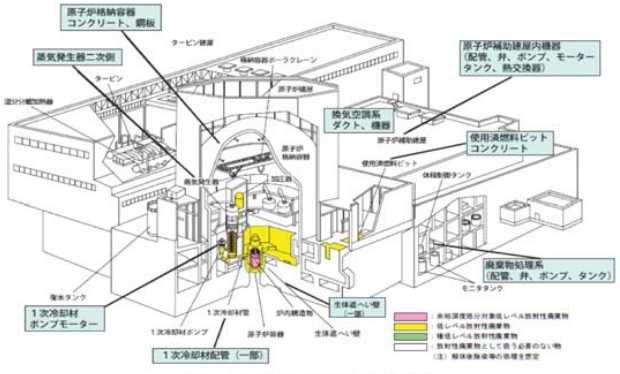


図２　PWRにおける廃棄物の区分例

出典「低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について」（原子力安全委員会、平成19年5月）http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9463636/www.nsr.go.jp/archive/nsc/shinsashishin/pdf/3/no3005.pdf

原子力発電所の廃止措置に伴い発生する廃棄物の量

単位：ton

区分	商業用原子力発電所（57プラント）の合計	
L1	約8,000	LLW合計：
L2	約63,000	約450,000
L3	約380,000	⇒約2%
CL	約890,000	CL：約5%
NR	約18,500,000	NR：約93%
合計	約20,000,000	合計：100%

【注】東海発電所，浜岡1,2号機は実態調査を反映。それ以外は標準プラント（BWR／PWR×大中小規模）の評価データをもとに積算・集計。（建設中の2プラントは含まない）

単位：ton

区分	BWR 小規模	BWR 中規模	BWR 大規模	PWR 小規模	PWR 中規模	PWR 大規模	GCR
L1	50	70	80	120	190	200	1,540
L2	760	830	850	710	1,230	1,720	8,950
L3	5,530	6,750	11,810	1,850	2,570	4,040	12,300
CL	9,710	9,750	28,490	3,970	8,080	11,660	41,100
NR	130,620	220,430	495,420	187,150	215,750	477,300	128,700
合計	146,670	237,830	536,650	193,810	227,820	494,920	192,400

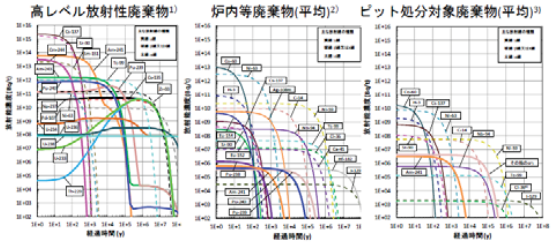
電気事業連合会

出典：原子力規制委員会　第2回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合　資料2−1（H27.2.12）抜粋

高レベル放射性廃棄物 vs L1廃棄物 vs L2廃棄物

NRA, Japan
Nuclear Regulation Authority

放射性廃棄物の放射能濃度と時間の関係

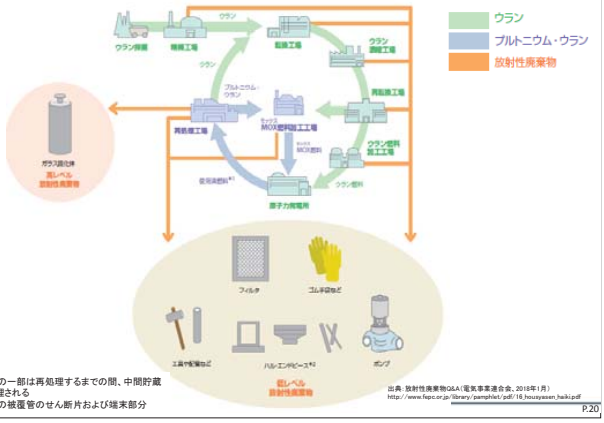


1)「高レベル放射性廃棄物ガラス固化体のインベントリ評価」核燃料サイクル開発機構東海事業所（平成11年11月）の核燃料の燃焼条件等に基づき、原子力規制庁が計算
2) BWR、PWR、GCRの運転及び解体廃棄物の平均放射能濃度（＝総放射能量／廃棄体総重量）（電気事業連合会「余裕深度処分対象廃棄物に関する基本データ集（一部改訂）」（平成28年8月23日）より作図）
3) JNFL2号埋設（ピット処分）事業許可申請書記載の平均放射能濃度（日本原燃株式会社「六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター 廃棄物埋設事業変更許可申請書」（平成9年1月）より作図）

山田 憲和 （2018）：中深度処分に係る規制基準の検討状況について

地層処分対象廃棄物
（高レベル放射性廃棄物、TRU等廃棄物）

原子燃料サイクルと放射性廃棄物

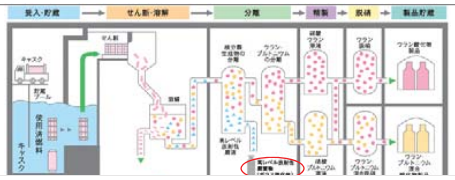


出典：放射性廃棄物Q&A（電気事業連合会、2018年1月）
http://www.fepc.or.jp/library/pamphlet/pdf/16_houyasen_haki.pdf

*1 使用済燃料の一部は再処理するまでの間、中間貯蔵施設で貯蔵・管理される
*2 使用済燃料の被覆管のせん断片および端末部分

高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）：発生プロセス

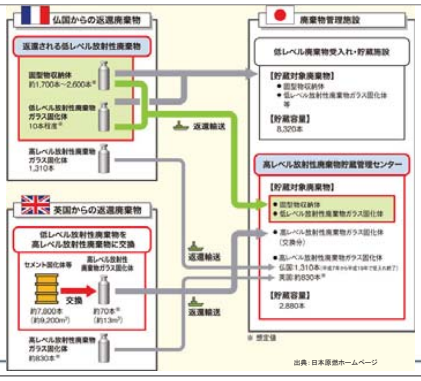
- 再処理する使用済燃料は炉取出し後、一定期間冷却した後、再処理
- ガラス固化体は製造後30年間～50年間貯蔵
- 40,000本以上のガラス固化体の地層処分を想定



ガラス溶融炉の全景（ガラス固化セル）@日本原燃六ケ所村再処理施設

高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）：発生場所

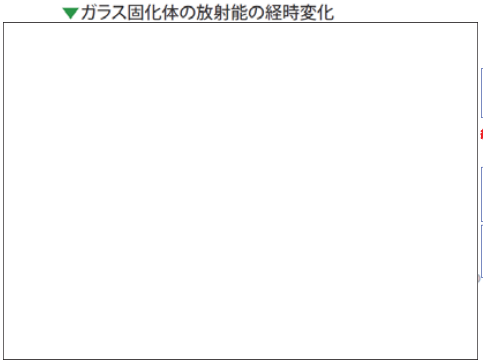
日本原燃、JAEA、Orano社（仏国）、Sellafield社（英国）でガラス固化体は製造される。



出典：日本原燃ホームページ

高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）：放射能

▼ガラス固化体の放射能の経時変化



ガラス固化体製造時
≧10^7GBq
（数千万ギガベクレル）

約1/1,000

製造後約1千年
≒10^4GBq
（約１万ギガベクレル）

約1/10,000

製造後1万年
≧10^3GBq
（数千ギガベクレル）

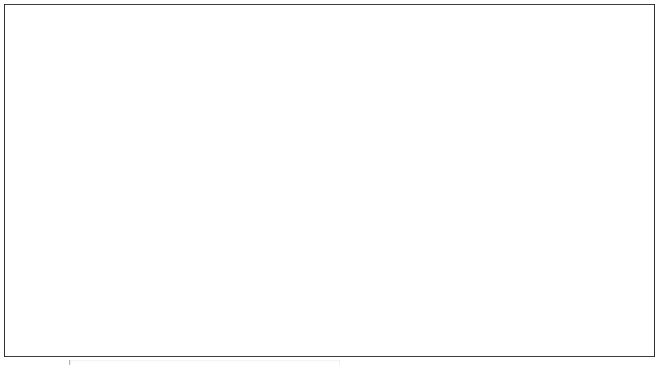
出典：NUMO（2019） 対話型全国説明会説明参考資料

高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）：主要な放射性核種

出典：NUMO（2019） 対話型全国説明会説明参考資料

高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）：放射線

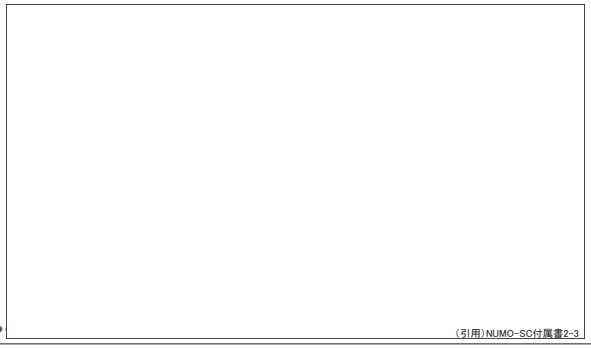
地層処分施設においても外部被ばくに対する適切な管理が必要



出典：NUMO（2019） 対話型全国説明会説明参考資料

高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）：発熱率

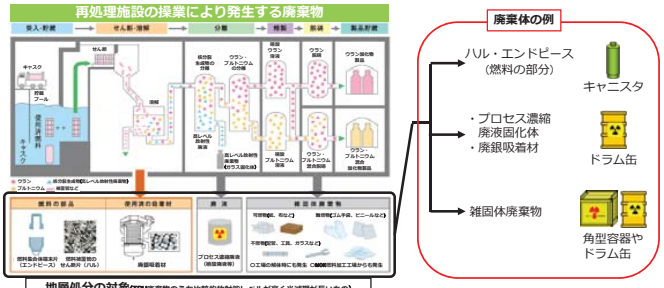
- 1,000年程度で、廃棄体1本の発熱率は埋設時に対して1/50～1/30程度となる。
- 数千年で1W/本以下となる。



（引用）NUMO-SC付属書2-3

TRU等廃棄物の発生（例：再処理施設）

- 再処理施設やMOX燃料加工施設の操業や施設の解体によって発生し、その性状は様々
- 約19,000m^{3}のTRU等廃棄体を地層処分予定
- 日本原燃、JAEA、Orano社（仏国）の施設で発生



出典：総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会放射性廃棄物小委員会報告書（平成19年5月）

TRU等廃棄物の分類

- 性状に応じて、4つのグループに分類

廃棄体グループ	1	2	3	4 低発熱性L	4 発熱性H
概要	廃銀吸着材 銀吸着材 排気 吸気 放射性のヨウ素を除去する吸着材料	エンドピース ハル 細断・圧縮	濃縮廃液など 硝酸系廃液 モルタルなど ペレット 乾燥・ペレット化	雑固体廃棄物 ゴム手袋（焼却・圧縮） 不燃性廃棄物 工具 金属配管	
主な廃棄体の形態	200L ドラム缶	キャニスタ	200L ドラム缶	角型容器 その他（ハル缶、インナーバレル） 200L ドラム缶	
特徴	・放射性ヨウ素（I-129）を含む ・セメント固化体	・発熱量が比較的大 ・放射性炭素（C-14）を含む	・硝酸塩を含む ・モルタル、アスファルトによる固化体など	・焼却灰、不燃物 ・セメント固化体など	
見込み発生量	319[m^3]	5,792[m^3]	5,228[m^3]	5,436[m^3]	1,309[m^3]
最大発熱量（発生時点）	1[W/本]未満	90[W/本]未満	1[W/本]	16[W/本]	210[W/本]

可溶性，非収着性，長寿命核種

緩衝材や母岩の収着性を低下させる

発熱量大

（引用）NUMO-TR-18-03

TRU等廃棄物：主要な放射性核種

（引用）NUMO-TR-10-04

TRU等廃棄物：発熱率

- 比較的発熱率が高い廃棄体についても、ガラス固化体よりは小さい発熱率となっている。
- 長期にわたって、発熱率が比較的高い廃棄体（グループ4H）もある。

（引用）NUMO-SC付属書2-3

処分事業者と廃棄体のかかわり

- **事業上の重要なポイント**
  - 受入れた廃棄体が、建設した地層処分施設で対応可能であるかを確認する必要がある。
  - 埋設する個々の廃棄体について処分事業者が、規制機関に申請する必要がある。（参考スライド38）
    - ✓ 放射性廃棄物を容器に封入し、又は容器に固型化してあること。
    - ✓ 放射能濃度が許可申請書等に記載した最大放射能濃度を超えないこと。
    - ✓ 廃棄体の健全性を損なうおそれのある物質を含まないこと。
    - ✓ 埋設された場合において受けるおそれのある荷重に耐える強度を有すること。
    - ✓ 著しい破損がないこと。
    - ✓ 容易に消えない方法により、廃棄体の表面の目につきやすい箇所に、当該廃棄体に関して前条の申請書に記載された事項と照合できるような整理番号を表示したものであること。

受入基準、受入検査の整備が必要

受入基準に関する試み

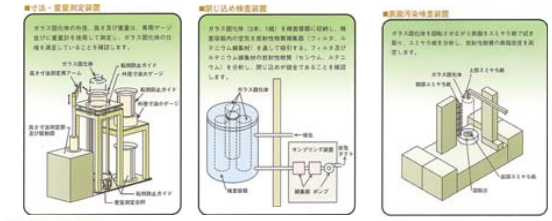
- 日本原子力学会「地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント」特別専門委員会（2010）
  - 原子力安全・保安院は、安全審査を合理的に行うため、ガラス固化体等の仕様につながる廃棄体製造時の記録やその取得方法について、提示することとした。
  - 原子力学会は原子力安全・保安院の要請をうけ、地層処分において必要と考えられるガラス固化体の25種の特性を整理し、
  - その把握のための製造時の記録やその取得方法を検討・提言した。

地層処分において必要と考えられるガラス固化体の特性

（引用）日本原子力学会「地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント」特別専門委員会（2010）：地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント～地層処分において必要と考えられる高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の特性～

地層処分施設における廃棄体の受入れ検査（イメージ）

（参考）海外返還廃棄物の六ケ所村における受入時の検査



1.外観検査
2.発熱量測定
3.寸法測定
4.重量測定
5.閉じ込め検査
6.表面汚染検査
7.放射能量測定

（出典：日本原燃ホームページ）

まとめ

- 日本の放射性廃棄物については、炉規法と特廃法の観点から、処分の方法が決められている。
  - 炉規法：第一種廃棄物、第二種廃棄物（中深度処分、ピット処分、トレンチ処分
  - 特廃法：第一種特定放射性廃棄物、第二種特定放射性廃棄物
- 高レベル放射性廃棄物とTRU等廃棄物の発生、放射能、発熱率について説明した。
- 地層処分事業における廃棄体の受入基準・受入検査に関して説明した。

以下、参考スライド

炉規法とその施行令における廃棄物埋設事業の記述

原子炉等規制法
（事業の許可）
第五十一条の二　次の**各号に掲げる廃棄**（製錬事業者、加工事業者、試験研究用等原子炉設置者、外国原子力船運航者、発電用原子炉設置者、使用済燃料貯蔵事業者、再処理事業者及び第五十二条第一項の**許可を受けた者が**製錬施設、加工施設、試験研究用等原子炉施設、発電用原子炉施設、使用済燃料貯蔵施設、再処理施設又は同条第二項第七号に規定する使用施設に付随する同項第九号に規定する**廃棄施設において行うものを除く。**）の事業を行おうとする者は、当該各号に掲げる廃棄の種類ごとに、政令で定めるところにより、原子力規制委員会の許可を受けなければならない。
一　核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物であつて、これらに含まれる政令で定める放射性物質についての放射能濃度が人の健康に重大な影響を及ぼすおそれがあるものとして当該放射性物質の種類ごとに**政令で定める基準を超えるもの**（次号において「**第一種廃棄物**」という。）の**埋設の方法による最終的な処分**（以下「**第一種廃棄物埋設**」という。）
二　核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物であつて**第一種廃棄物以外のもの**（第五十一条の二十四の二第一項において「第二種廃棄物」という。）の**埋設の方法による最終的な処分**（以下「**第二種廃棄物埋設**」という。）
三　核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物についての第一種廃棄物埋設及び第二種廃棄物埋設（以下「廃棄物埋設」という。）その他の**最終的な処分がされるまでの間において行われる**放射線による障害の防止を目的とした**管理その他の管理又は処理であつて政令で定めるもの**（以下「**廃棄物管理**」という。）

2　前項の規定による**第一種廃棄物埋設の事業の許可を受けた者**（以下「第一種廃棄物埋設事業者」という。）は、同項の規定による**第二種廃棄物埋設の事業の許可を受けないで、第一種廃棄物埋設施設**（第一種廃棄物埋設の事業に係る廃棄物埋設施設（廃棄物埋設地及びその附属施設をいう。以下同じ。）をいう。第五十一条の六第一項及び第五十一条の七第一項において同じ。）**において第二種廃棄物埋設を行うことができる。**

原子炉等規制法施行令
（政令で定める放射性物質の種類等）
第三十一条　法第五十一条の二第一項第一号の政令で定める放射性物質は次の表の上欄に掲げる放射性物質とし、同号の人の健康に重大な影響を及ぼすおそれがあるものとして**政令で定める基準は同欄に掲げる放射性物質の種類に応じ、それぞれ同表の下欄に掲げる放射能濃度とする。**

炭素十四	十ペタベクレル毎トン
塩素三十六	十テラベクレル毎トン
テクネチウム九十九	百テラベクレル毎トン
よう素百二十九	一テラベクレル毎トン
アルファ線を放出する放射性物質	百ギガベクレル毎トン

（廃棄物管理）
第三十二条　法第五十一条の二第一項第三号に規定する管理又は処理であつて政令で定めるものは、次のいずれかに該当するもの（廃棄物埋設事業者が廃棄物埋設施設において行うもの及び船舶において行わわるものを除く。）とする。
一　固体状の核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の管理であつて放射線による障害の防止を目的としたもの
二　液体状又は固体状の核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の処理であつて、容器に封入すること、容器に固型化することその他の方法によつてこれらを管理又は最終的な処分に適した性状にするもの

核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則

（別表第一）

炭素十四	百ギガベクレル毎トン
コバルト六十	一ペタベクレル毎トン
ニッケル六十三	十テラベクレル毎トン
ストロンチウム九十	十テラベクレル毎トン
テクネチウム九十九	一ギガベクレル毎トン
セシウム百三十七	百テラベクレル毎トン
アルファ線を放出する放射性物質	十ギガベクレル毎トン

（別表第二）

コバルト六十	十ギガベクレル毎トン
ストロンチウム九十	十メガベクレル毎トン
セシウム百三十七	百メガベクレル毎トン

炉規法における廃棄体確認

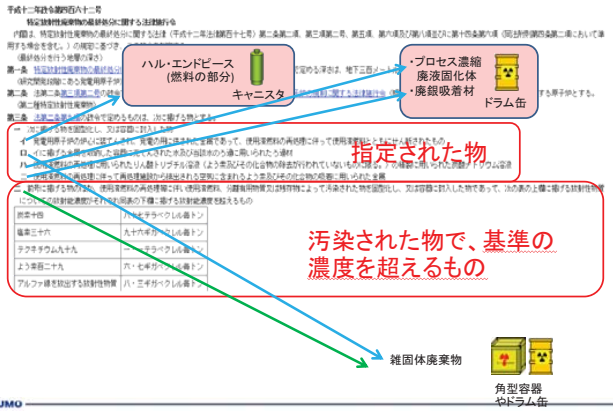
（炉規法）
第五十一条の六　第五十一条の二第一項の規定による廃棄物埋設の事業の許可を受けた者（以下「廃棄物埋設事業者」という。）は、廃棄物埋設を行う場合においては、その廃棄物埋設施設（第一種廃棄物埋設施設にあつては、次条第一項に規定する特定第一種廃棄物埋設施設を除く。）及びこれに関する保安のための措置が原子力規制委員会規則で定める技術上の基準に適合することについて、原子力規制委員会規則で定めるところにより、原子力規制委員会の確認を受けなければならない。
2　廃棄物埋設事業者は、廃棄物埋設を行う場合においては、埋設しようとする核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物及びこれに関する保安のための措置が原子力規制委員会規則で定める技術上の基準に適合することについて、原子力規制委員会規則で定めるところにより、原子力規制委員会の確認を受けなければならない。

（核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第一種廃棄物埋設の事業に関する規則）
第十二条　法第五十一条の六第二項に規定する技術上の基準（第一種廃棄物埋設の事業に係るものに限る。）は、次の各号に掲げるとおりとする。
一　埋設しようとする放射性廃棄物が廃棄体であること。
二　当該廃棄体が次に定めるとおりであること。
イ　放射線障害防止のため、放射性廃棄物を容器に封入し、又は容器に固型化してあること。
ロ　放射能濃度が許可申請書等に記載した最大放射能濃度を超えないこと。
ハ　廃棄体の健全性を損なうおそれのある物質を含まないこと。
ニ　埋設された場合において受けるおそれのある荷重に耐える強度を有すること。
ホ　著しい破損がないこと。
ヘ　容易に消えない方法により、廃棄体の表面の目につきやすい箇所に、当該廃棄体に関して前条の申請書に記載された事項と照合できるような整理番号を表示したものであること。

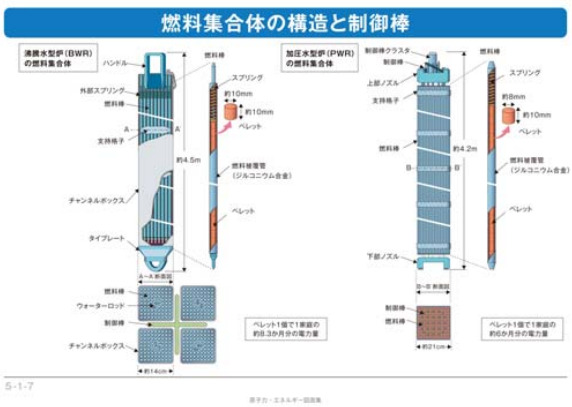
特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律

第二条　この法律において「特定放射性廃棄物」とは、第一種特定放射性廃棄物及び第二種特定放射性廃棄物をいう。
5　この法律において「使用済燃料の再処理等」とは、次に掲げるものをいう。
一　使用済燃料の再処理（使用済燃料から核燃料物質その他の有用物質を分離するために、使用済燃料を化学的方法により処理することをいう。以下同じ。）
二　特定加工（原子炉等規制法第二条第九項に規定する加工のうち、使用済燃料の再処理により使用済燃料から分離された核燃料物質の加工をいう。以下同じ。）
三　再処理施設等の解体（使用済燃料の再処理又は特定加工の用に供されたものの解体に限る。以下同じ。）
四　代替取得（発電用原子炉設置者が、その発電用原子炉の運転に伴つて生じた使用済燃料の国外における使用済燃料の再処理又は特定加工に伴い使用済燃料、分離有用物質又は残存物によつて汚染される物（以下「被汚染物」という。）に替えて、原子炉に燃料として使用した核燃料物質その他原子核分裂をさせた核燃料物質を化学的方法により処理することにより当該核燃料物質から核燃料物質その他の有用物質を分離した後に残存する物を国外において固型化した物（当該被汚染物を固型化し、又は容器に封入した場合における当該固型化し、又は容器に封入した物に比して、その量及び経済産業省令で定める方法により計算したその放射線による環境への影響の程度が大きくないものに限る。）を取得することをいう。以下同じ。）
6　この法律において「分離有用物質」とは、使用済燃料の再処理により使用済燃料から分離された核燃料物質その他の有用物質をいう。
7　この法律において「残存物」とは、使用済燃料の再処理に伴い使用済燃料から核燃料物質その他の有用物質を分離した後に残存する物をいう。
8　この法律において「第一種特定放射性廃棄物」とは、次に掲げる物をいう。
一　残存物を固型化した物
二　代替取得により取得した物
9　この法律において「第二種特定放射性廃棄物」とは、使用済燃料の再処理等（第五項第一号から第三号までに掲げるものに限る。）に伴い使用済燃料、分離有用物質又は残存物によつて汚染された物を固型化し、又は容器に封入した物（代替取得に係る被汚染物を固型化し、又は容器に封入した物を除く。）であつて、長期間にわたり環境に影響を及ぼすおそれがあるものとして政令で定めるものをいう。

特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律施行令



燃料集合体の構造と制御棒



別添資料2
講義資料03

地層処分事業における技術人材の育成『2019年度人材育成セミナー』

03.地層処分における安全確保の考え方

2020年1月8日

原子力発電環境整備機構
石田　圭輔

本講演資料は、使用許諾等が得られていない内容や原典図表・データが含まれている可能性があります。二次利用をしようないようにお願いします。

「地層処分における安全確保の考え方」の狙い

- ***狙い①***
  - 安全を確保するために地層処分で考慮されている要件について知ることで、三分野（サイト調査・評価、施設設計、安全評価）の役割やR&Dの方向性等を考えてほしい。

  ⇒安全確保のため地層処分で考慮される要件の理解
- ***狙い②***
  - 三分野の基本的考え方を知ることで、講義で説明される個々の処分技術の役割やR&Dを考えてほしい。

  ⇒各分野の基本的考え方の理解
- ***狙い③***
  - 三分野の連携を知ることで、各分野の専門家が、連携という観点から事業に係るマネジメントやマネジメントに関係するR&Dを考えてほしい。

  ⇒三分野連携のマネジメントの基本的考え方の理解

①安全確保のため地層処分において考慮すべき要件の整理

地層処分の対象となる放射性廃棄物（復習）

- 国の最終処分計画（2008）に基づき，高レベル放射性廃棄物は4万本以上、TRU等廃棄物は約19,000m3を前提としたR&Dや報告書の作成が日本ではされている。

高レベル放射性廃棄物

※貯蔵総本数2,485本（2018年9月現在）

TRU等廃棄物（地層処分相当低レベル放射性廃棄物）

可溶性，非収着性，長寿命核種

緩衝材や母岩の収着性を低下させる

発熱量大

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

地層処分の基本概念

○ 地下深部の一般的な特徴

- 人間の活動や地上でのさまざまな自然現象の影響を受けにくい
- 地下水の流れが極めて遅く，物質の移動速度が小さい
- 酸素が消費されているため腐食や溶解といった物質の変化が起こりにくい　など

⇨
- 地下深部は，本来的に放射性廃棄物を人間の生活環境から物理的に隔離する機能，廃棄物から地下水中への放射性物質の溶解や移行を抑制し，長期間にわたって放射性物質を岩盤中に閉じ込める機能を有する
- **地震・断層活動や火山活動が活発な場所を除けば，上記の地下深部の一般的な特徴はわが国でも観測される事実**

例えば，総合資源エネルギー調査会（2014）：「最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価－地質環境特性および地質環境の長期安定性について－」，地層処分技術WG

○ 地層処分の基本原理

➢ 地下深部の地質環境が有する天然のバリア機能に人工的なバリアを組み合わせた多重バリアを構築し，長期間にわたって放射性物質を処分場周辺に閉じ込める

➢ これにより，放射性物質が地表に到達するとしても非常に長い時間がかかり，その間に放射能が減衰し，将来の人間が放射線の影響を受けるリスクは十分に低くなる

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方 https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

処分場に求められる安全機能（①処分場の閉鎖前）

○ 放射線防護に関する安全機能

基本概念	安全機能	説明
操業時閉じ込め	廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止	操業期間中において廃棄体からの放射性物質の漏えいを防止すること
	施設外への放射性物質の放出の防止	操業期間中において放射性物質取り扱い施設からの放射性物質の放出を防止すること
放射線遮へい	放射線の遮へい	廃棄体からの外部放射線による空間線量率を遮蔽により低減すること

○ 一般労働安全に関する安全機能

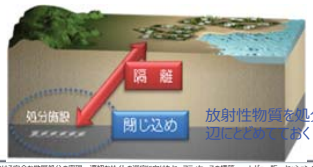
基本概念	安全機能	説明
労働災害防止	災害の発生・拡大の防止	労働災害の要因となる事象の発生防止と拡大の対策を有すること
	災害時の避難経路確保	災害時の避難経路が確保されていること
作業環境維持	作業環境の維持	労働に適する環境を維持すること

○ 処分場周辺の環境保全に関する機能（水質汚染防止，騒音振動防止，生態系保全など）

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方 https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

処分場に求められる安全機能（②処分場の閉鎖後長期）

基本概念	安全機能	説明
隔離	自然現象の著しい影響からの防護	自然現象の著しい影響により廃棄物が地表に接近あるいは露出しないように防護すること
	人の接近の抑制	人が特殊な技術を用いることなしに，廃棄物への偶発的な接近を困難にすること
閉じ込め	放射性物質の溶出抑制	廃棄体からの放射性物質の溶出を抑制することで，地下水への放出率を低下させること
	放射性物質の移行抑制	溶出した放射性物質の移行を抑制することにより，放射性物質の移行率を低下させること



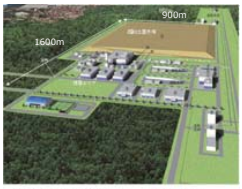
出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方
https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

安全機能を考慮する空間スケール

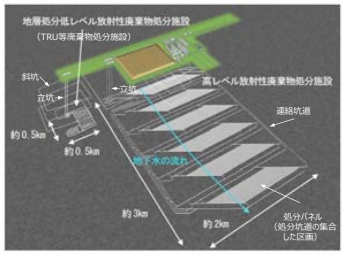
- 既往検討事例を参考に，以下の空間スケールに対する安全機能を考慮した処分場を検討
  - 地上施設：およそ1～2km四方程度
  - 地下施設：深度300m以深における数km×数km程度の広がりを有する母岩領域

※参考とした既往検討事例（NUMO（2011）：地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性，NUMO-TR-10-03）

地上施設の規模：1～2km四方程度



地下施設（併置処分）の規模：数km×数km程度



出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方
https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

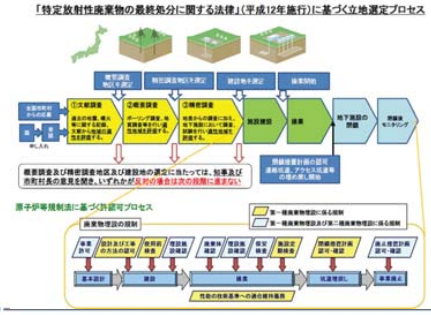
安全機能を考慮する空間スケール

基本概念	安全機能	安全機能を担う処分場の主な構成要素	処分場閉鎖前	処分場閉鎖後
			1年 10年 100年	1年 10年 100年 1000年 1万年 10万年 100万年
操業時閉じ込め	廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止	廃棄体 輸送・搬送容器	建設・操業・閉鎖	
	施設外への放射性物質の放出の防止	地上・地下施設		
放射線遮へい	放射線の遮へい	輸送・搬送容器 地上・地下施設		再冠水～還元環境回復 好ましい地質環境の維持 地質環境の長期変遷の予測に関する不確実性の増大
隔離	自然現象の著しい影響からの防護	地質環境		数十万年オーダー
	人の接近の抑制	地質環境		数十万年オーダー
閉じ込め	放射性物質の溶出抑制	廃棄体 人工バリア		地下水と廃棄体の接触防止 数百～数千年オーダー （ガラス固化体）ガラスマトリクスによる溶出抑制 数万年オーダー
	放射性物質の移行抑制	人工バリア 地質環境		数十万年オーダー

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方
https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

法令などに規定された処分事業の進め方

- 最終処分法に定められた三段階の調査（文献調査，概要調査，精密調査）によりサイトを選定
- 最終処分基本方針（2015）に示された可逆性・回収可能性の確保に対応できる技術を準備
- 今後整備される安全規制や環境規制にかかわる法令に的確に対応できるように技術を準備



総合資源エネルギー調査会（2014）：「放射性廃棄物WG中間とりまとめ」に基づき作成

②各分野（サイト調査・評価、施設設計、安全評価）の基本的考え方

地層処分における安全確保の基本的な考え方

- 処分場に重大な影響を与えるおそれのある自然事象（活断層や火山活動など）が及ぶ範囲や鉱物資源の存在範囲を避け，バリア機能が発揮される好ましい地質環境を有するサイトを調査・評価により慎重に選定
- そのような地質環境に対して，将来の変化も考慮して，十分な安全裕度を持たせて処分場（人工バリアや地下施設など）を設計
  - 人工バリアが将来，変質してバリア性能が低下することを見越し，変質が見込まれる厚さより十分大きな人工バリアの厚さを設定する
  - 将来の地層の隆起・侵食によって処分施設と地表までの距離が短くなることを見越し，地表まで十分な距離が確保できる深度に地下施設を設置する　…など

↓

- 将来の予測には不確実性が伴うことを考慮し，設計した処分場の安全性を損なうような事象がその発生可能性に応じて将来起こることを想定し，処分場からの放射性物質が将来地表に到達するとした場合の人間にもたらす放射線影響を解析によって評価

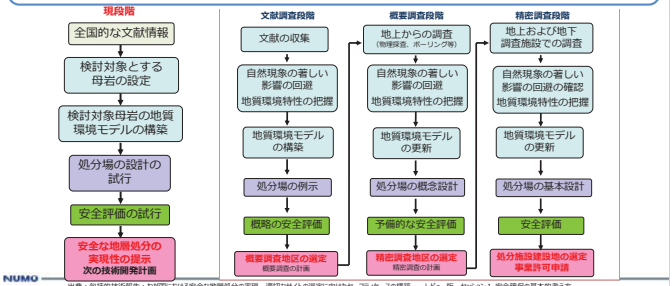
↓

- その影響が許容できる程度（通常は規制機関が安全基準として提示）に収まる場合は安全と判断し，収まらない場合は処分場の設計の見直しやサイトの変更などを実施

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方
https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

三段階の調査と段階的なセーフティケースの更新

- 三段階の調査によって，地質環境情報の詳細化や，これに応じた処分場の設計や工学技術の具体化などを通じて不確実性の低減を図りつつ，サイトの地質環境の調査・評価，処分場の設計，安全性の評価を繰り返し実施することで，信頼性を高めながら処分場の安全性を確保
- これらの結果をその都度，セーフティケースとして統合し安全性を説明
- NUMOが2018年に公表した包括的技術報告書は，段階的に更新していくセーフティケースの基本形となることを意図



出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方
https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

セーフティケースとは

- 地層処分は，将来数万年以上にわたる安全性を確保しなければならない，人類にとって初めてのプロジェクトであり，事業期間だけでも約100年
- 地層処分の安全性を確保し事業に対する信頼を確かなものとしていくためには，事業の各段階（サイトの調査前、調査中、許認可、建設・操業中、閉鎖時など）において，事業者はその時点の最新の科学技術的知見に基づいて「なぜ安全な処分場を構築できるといえるか」を説明し、
  - ステークホルダーが「次の段階に進んでよいか？」を判断するための材料を提供
  - 処分場の安全性に関する説明性を段階的に向上
- 事業者はこの説明を、根拠とともに報告書として取りまとめて社会に提示（この報告書は「セーフティケース（safety case ※）」と呼ばれる）
- セーフティケースは、**ステークホルダーとの対話の土台**

※ case：討論や論争あるいは訴訟事件の一方の当事者を支援する一連の事実や論拠（Oxford辞典）。元々は裁判で使われる証拠を意味

参考スライド P.31,32

サイト選定の基本的考え方 －閉鎖前の安全確保－

（１） 閉鎖前の安全確保に対するサイト選定の考え方

- 地下施設の建設・維持管理などに支障をきたす可能性がある第四紀未固結堆積物が深度300m以上の深さに分布する地域を除外
- 山はね，異常出水，有毒ガス突出などの事象，津波や火砕物密度流といった重大な自然災害が発生する可能性と影響の程度・範囲を把握し，必要に応じた工学的対策を検討。そのうえで，考慮事項※などに照らして適切な処分場の設置場所を選定

※ 考慮事項：法定要件や規制要件などを踏まえ，概要調査地区や精密調査地区，最終処分施設建設地を選定するうえで，考慮する事項とその評価の考え方などを事業者としてまとめたもの

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方
https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

サイト選定の基本的考え方 －閉鎖後長期の安全確保－

（２） 閉鎖後長期の安全確保に対するサイト選定の考え方

【隔離機能の確保】

- 調査区域の中から，長期の期間，処分場とその近傍の岩盤を含む数km×数km程度の領域が火山活動，著しい隆起・侵食といった著しい自然現象の影響から回避されるよう，また鉱物資源が賦存する地域を含めないよう，考慮事項などに照らして処分場の設置場所を選定
- さまざまな処分場概念オプションを考慮しても著しい影響を回避した処分施設建設地を確保できないと見込まれる場合は，当該サイトを選定候補から除外

【閉じ込め機能の確保】

- 熱環境，水理，力学，化学的な観点から好ましい地質環境特性について，外的な擾乱による長期的な変化の可能性も含めて調査により把握
- 調査・評価した地質環境特性を，処分場の設計・安全評価の基盤となる地質環境モデルとして統合
- 地質環境モデルに対して，多重バリアシステムとして十分な安全機能を有するように処分場の設計を行い，安全評価によって安全性を確認。必要に応じて，安全評価結果を設計にフィードバックして，処分場の安全機能を確保
- これらの結果，処分場の閉鎖前，閉鎖後長期とも安全性を確保できる見通しがあり，考慮事項などの適格性が示されれば，当該サイトを選定

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方
https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

科学的特性マップにおける「好ましくない範囲の要件・基準」

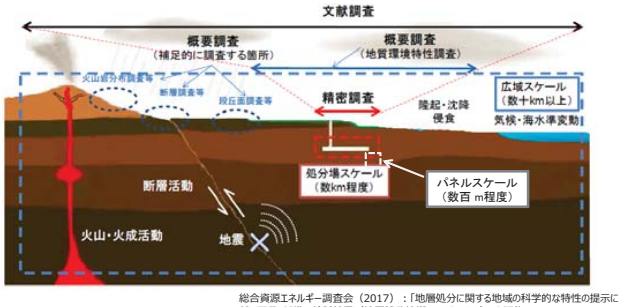
	（好ましくない範囲の）要件	（マップの色分けに考慮された）基準
火山・火成活動	マグマの処分場への貫入と地表への噴出により、物理的隔離機能が喪失されないこと	第四紀火山の中心から15km以内 第四紀の火山活動範囲が15kmを超えるカルデラの範囲
断層活動	断層活動による処分場の破壊、断層のずれに伴う透水性の増加等により閉じ込め機能が喪失されないこと	活断層に、破砕帯として断層長さ（活動セグメント長さ）の1/100程度（断層の両側
隆起・侵食	著しい隆起・侵食に伴う処分場の地表への著しい接近により、物理的隔離機能が喪失されないこと	全国
地熱活動	処分システムに著しい熱的影響を及ぼす地熱活動により、閉じ込め機能が喪失されないこと	処分深度において緩衝材の温度が100℃未満を確保できない地温勾配の範囲 ※「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ－」における検討を参照すると、約15℃/100mより大きな地温勾配の範囲
火山性熱水・深部流体	処分システムに著しい化学的影響を及ぼす火山性熱水や深部流体の流入により、閉じ込め機能が喪失されないこと	地下水の特性として、pH4.8未満あるいは炭酸化学種濃度0.5mol/dm^3（mol/L）以上を示す範囲
未固結堆積物	処分場の地層が未固結堆積物でないこと	深度300m以深まで更新世中期以降（約78万年前以降）の地層が分布する範囲
火砕流等	操業時に火砕物密度流等による影響が発生することにより施設の安全性が損なわれないこと	完新世（約1万年前以降）の火砕流堆積物・火山岩・火山岩屑の分布範囲
鉱物資源	現在認められている経済的価値の高い鉱物資源が存在することにより、意図的でない人間侵入等により地層処分システムが有する物理的隔離機能や閉じ込め機能が喪失されないこと	鉱業法で定められる鉱物のうち、全国規模で整備された文献データにおいて、技術的に採掘が可能な鉱量の大きな鉱物資源の存在が示されている範囲（ただし、当該地域内においては、鉱物の存在が確認されていない範囲もあり、調査をすればそうした範囲が確認できうることに留意する必要がある。）

サイトから避けるべき範囲：科学的特性マップにおける「好ましくない範囲の要件」を満たすことを三段階の調査で確認

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方
https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

サイト調査・評価の基本的考え方 －地質環境モデルの構築－

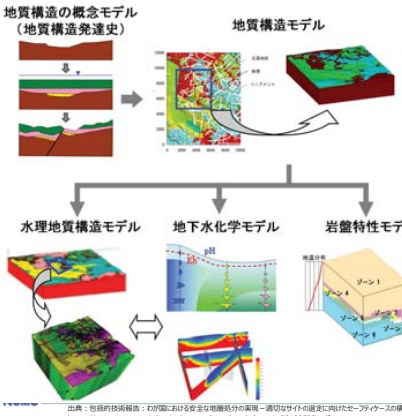
- 各調査段階で得られる空間の大きさによる地質環境情報の詳細度と，処分場の設計および安全評価の目的に応じた適切なスケールのバランスを考慮して，階層的な空間スケールの地質環境モデルを設定



総合資源エネルギー調査会（2017）：「地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果（地層処分技術WGとりまとめ）」を編集

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方
https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

地質環境モデル（Site Descriptive Model）とは



「地質環境モデル」：
調査で得られた地質環境の情報・データに基づいて，サイトの地質構造や熱・力学・水理・化学的な特性の空間的な分布や時間的な変化を表現したもの

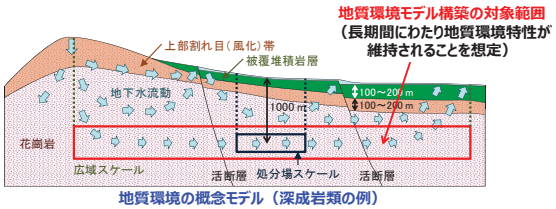
処分場の設計および安全評価を行うための「場」となる

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方
https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

ちなみに包括的技術報告書では・・・

- 隆起・侵食を含む地形や地質構造の長期的な変化，気候・海水準変動はサイトの条件に強く依存するため現段階では設定することが困難
- 安全評価対象とすべき時間スケールが現段階では規制機関から示されていない

⇒
- 地下深部の検討対象母岩に焦点を当てた地質環境モデルを構築
- 処分場は著しい隆起・侵食を避けた地域において十分深い深度に設置することを前提として，地質環境特性が長期間にわたって維持されることを想定した地質環境モデルを構築し，処分場の設計および安全評価の検討に活用



地質環境の概念モデル（深成岩類の例）

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方
https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

処分場の設計の基本的考え方（1/2）

（１） 段階的な処分場の設計と最適化

- 三段階の調査で取得される地質環境情報や，その時点の最新の技術開発成果などに基づき，処分施設の仕様を段階的に詳細化と最適化
- 段階的なサイト選定において，処分場に求められるさまざまな要件を整合的に考慮するための指標として設計因子（処分場閉鎖前安全性，閉鎖後長期安全性，工学的成立性，環境影響，社会経済的側面など）を導入し，これを基軸として処分場の要求事項を明確にし，処分施設の各構成要素に対する設計要件として具体化
- 多様な地質環境や，将来の科学技術の進歩などに柔軟に対応して処分場の設計を進められるよう設計のオプションを整備

（２） 工学技術の実現性の確認

- 設計した処分場を実現するための建設・操業・閉鎖にかかわる技術について，段階的に最適化と実証を進める

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方
https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

処分場の設計の基本的考え方（2/2）

（３） 事業期間中の回収可能性の確保，環境保全，モニタリングの考慮

- 回収可能性にかかわる具体的な実施方法や計画を提示するとともに，廃棄物を回収する技術的な手段を準備
- 精密調査段階の後半から処分場閉鎖までの期間を対象に，処分施設の周辺環境の維持，生物多様性の確保，環境への負荷低減などについて適切な対策を検討
- 操業中の放射線安全，作業環境，施設周辺環境，閉鎖までの人工バリアや周辺母岩の状態の観測などにかかわるモニタリングを実施するための計画を立案

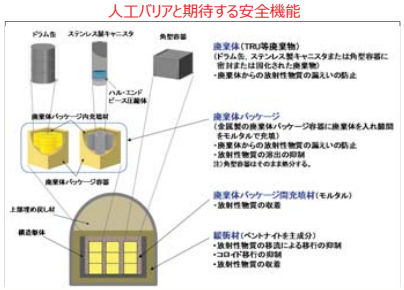
出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方
https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

ちなみに包括的技術報告書では・・・

- わが国でこれまで技術開発と知見の蓄積が進められてきた「第２次取りまとめ」，「第2次TRUレポート」で提示された処分場概念を出発点として設計を検討
- さらに，それらの概念に加え，高レベル放射性廃棄物では横置き・PEM方式、TRU等廃棄物では閉じ込め性を有する廃棄体パッケージを検討

高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリアと期待する安全機能

TRU等廃棄物処分場の人工バリアと期待する安全機能



出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方
https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

安全評価の基本的考え方

（１） 閉鎖前の安全性の評価

- 処分場の操業・閉鎖において，操業工程における周辺公衆および作業従事者に対する放射線影響を評価し，規制基準に照らして安全性が確保できることを確認
- 一般労働安全について，処分場の建設・操業・閉鎖段階で想定される災害リスクの発生や影響度を評価し，処分場の安全対策などに反映

（２） 閉鎖後長期の安全性の評価

- 選定されたサイトの地質環境と設計した処分場に対して，将来の処分場のシステムとしての振る舞いを想定し，その不確実性を踏まえてシナリオとして記述
- 規制機関から提示される安全規制の枠組み（考慮すべきシナリオ，安全性を評価する期間，放射線防護基準など）に沿って，設定したシナリオに基づき，廃棄体に含まれる放射性物質が将来の人間に与える放射線学的影響を解析的に評価
- これらの評価解析の結果を安全規制の基準と比較して，長期にわたる安全性を確保できるよう処分場が設計されていることを確認

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション１ 安全確保の基本的考え方
https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

ちなみに包括的技術報告書では・・・

（1） 閉鎖前安全評価

- ガラス固化体を取り扱う施設としての類似性を考慮して，事業許可基準規則など既存の原子力関連施設の安全規制などを参考に，操業工程における周辺公衆および作業従事者に対する放射線安全について，安全性を評価する考え方と方法を提示
- 現段階で設計される処分施設の仕様に対して，閉鎖前の安全性を評価

（2） 閉鎖後安全評価

- 国際的な指針などを参考に，さまざまな不確実性を適切に取り扱うためリスク論的な考え方を導入し，安全性を判断するめやすとなる基準を仮設定したうえで，定量的な安全評価を行うために必要な考え方や手法を提示
- 地質環境条件の違いや処分場の仕様の違いを反映し，異なる処分場が有するそれぞれの長期的な性能を合理的に比較・評価できる核種移行解析の手法を整備していることを提示
- これらに基づき，検討対象母岩の地質環境モデルおよび処分場の設計結果を対象として，発生可能性に応じた安全評価シナリオを設定し，閉鎖後長期の処分場の性能を解析。解析結果と仮設定した基準との比較を通じて，安全性を議論
  - 安全評価期間を設定せず，地下水シナリオについて廃棄体由来の一般公衆に対する最大影響を把握するため，線量の最大値が現れるまでの期間を対象として解析計算を実施
  - 現時点で利用可能な知識の限界や技術的な根拠の十分性などに留意し，モデルやパラメータの設定において保守性の確保に配慮した評価を実施

③三分野の連携

三分野連携のマネジメントの基本的考え方（1/2）

- 段階的なアプローチを通じた地質環境の調査・評価，処分場の設計，安全評価の繰り返しによる不確実性の低減と安全確保に対する信頼性の向上
- 科学技術の進歩や社会的な環境条件の変化に対応できる柔軟性の確保

⇒ これらに向けて，以下の取り組みが重要

- 各分野における技術者間のコミュニケーションを通じたサイトの地質環境の調査・評価，処分場の設計，安全評価の密接な連携
- 地層処分システムの理解や最新技術を適用していることを保証するための定期的なレビュー
- 事業の各段階における重要な意思決定を含む定期的なセーフティケースの評価および更新

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション1 安全確保の基本的考え方 https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

三分野連携のマネジメントの基本的考え方（2/2）

- 不確実性への対処
  - 段階的なサイト選定における地質環境情報の詳細化や処分場設計の具体化による低減
  - それでも残る不確実性を安全評価のシナリオ構築で考慮
  - 保守的なモデルやデータの設定　など
- 品質マネジメント
  - QMSの構築・運用，各分野の品質管理手引書整備
  - 人工バリア製作・施工プロセス管理，解析コード・データ・モデルの品質保証
  - 専門家レビュー，品質が保証された知見の導入　など
- 要件マネジメント
  - 要件を明確にした意思決定と業務展開，要件管理システム（RMS）の構築・運用　など
- 知識マネジメント
  - 透明性・追跡性・取出し容易性を確保した，知識・情報・データの管理システム整備など
- 技術開発のマネジメント
  - 定期的なセーフティケースの取りまとめによる課題抽出と技術開発計画への反映　など
- 人的資源に関するマネジメント
  - 海外実施主体や基盤研究開発機関との共同研究
  - セーフティケースの定期的な取りまとめによる人材育成，技術・知見の継承　など

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション1 安全確保の基本的考え方 https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

まとめ

- 安全確保のため地層処分で考慮される要件
  - 対象とする放射性廃棄物
  - 地層処分施設の安全機能
  - 地層処分施設が取り扱う時間スケール・空間スケール
  - 法令などに規定された処分事業の進め方
- 三分野の基本的考え方
  - 地層処分における安全確保の基本的な考え方
  - 三段階の調査と段階的なセーフティケースの更新
  - サイト選定の基本的考え方
  - サイト調査・評価の基本的考え方
  - 処分場設計の基本的考え方
  - 安全評価の基本的考え方
- 三分野連携のマネジメントの基本的考え方
  - 三分野の連携とそれに係る各種マネジメント（品質、要件、知識、技術開発、人的資源）
  - 三分野の中のSDMについて

参考スライド

セーフティケース(1)：定義

IAEA (IAEA Safety Glossary, 2007) :

施設又は活動の安全を裏づける論拠及び証拠を収集したもの。

- これには通常、安全評価の結果及びこれらの結果の信頼性の記述が含まれる。
- 処分場の場合、セーフティケースは所定の開発段階に関連していることがある。このような場合、そのセーフティケースは、何らかの未解決の課題の存在を認め、これらの課題を将来の開発段階において解決する作業のためのガイダンスを提供するものとすべきである。

ICRP (ICRP Publ.122, 2012) :

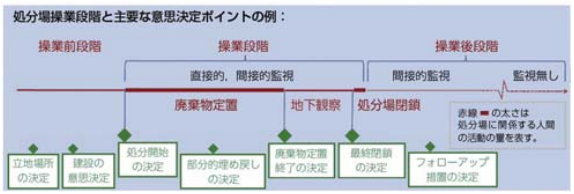
セーフティケースは、システムの安全性を実証する論拠や証拠の構造化されたセットである。より具体的には、セーフティケースは、具体的な目標と規準が満たされていることを示すことを目的としている。

OECD/NEA (NEA Report No. 6923, 2012) :

セーフティケースは、地層処分施設の安全と関連する信頼性のレベルを記述し、定量化し、立証する論拠と証拠を取りまとめたものである。セーフティケースにおいて、安全評価の結果－すなわち、安全指標に対する数値計算の結果－は、結論の背景を与え、定量的あるいは定性的な補完的安全論拠を提供する広い範囲の証拠によって補足される。セーフティケースとは、科学的および制度的プロセスの品質に信頼を与える基礎をなす証拠、モデル、設計及び、方法、および、結果として得られる、安全を支持する情報と解析を編纂したものである。

セーフティケース(2)：目的

- ✓ セーフティケースは規制機関を含むすべてのステークホルダーが行う様々な意思決定のための情報として事業者により提供されるもの
- ✓ 地層処分は長期にわたり段階的に進められる事業であり、段階毎に次の段階に進めるための意思決定がなされることとなるが、この意思決定ポイントごとにセーフティケースが(段階に応じて精緻化されて)作成される



(ICRP Publ.122, 2012)

別添資料2
講義資料05

地層処分に好ましい地域の科学的特性

（地層処分に望まれる地質環境と3段階の調査　2）

産業技術総合研究所
地層処分技術WG委員
丸　井　敦　尚

本講演資料は、使用許諾等が得られていない内容や原典図表・データが含まれている可能性があります。二次利用をしないようにお願いします。

はじめに

- 本資料では、高レベル放射性廃棄物を地下に処分する場合に適切な場所の科学的な特徴（処理する場所にふさわしい地質環境、地質条件とそれに関する調査）について解説します。
- 本資料は、地層処分に関する科学的な専門家以外の一般の方にもわかりやすい表現を用いて説明を心がけていますが、不明な用語が出てきた場合は、以下の用語集を参照してください。

用語	説明
地層処分	地下深部の地層が本来持っている「物質を閉じ込める力」を利用し、地下深部の地層に高レベル放射性廃棄物を埋設し、人間の生活環境に影響を及ぼさないように長期にわたって安全・確実に隔離し閉じ込める方法です。※出典：NUMOホームページ
人工バリア・天然バリア	地層には放射性物質を閉じ込める機能があり（天然バリア）、さらに放射性物質の閉じ込めをより確実にするためにさまざまな人工的な対策が施されます。この対策を「人工バリア」と呼び、「天然バリア」と「人工バリア」を組み合わせた多重バリアシステムで、長期間にわたり放射性物質を人間の生活環境から隔離し、その動きを抑え閉じ込めます。高レベル放射性廃棄物の「人工バリア」には、以下のように、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材（粘土）があります。※出典：NUMOホームページ
全国地熱ポテンシャルマップ	地理情報システムビューワーを利用して、日本全国の地熱資源（特に熱水系資源）のポテンシャルおよび特性に関連する様々な基礎的情報を、全国規模から縮尺 20 万分の 1 程度のスケールまで、シームレスに重ね合わせて表示することができる地熱資源表示ツールです。
酸化性雰囲気	雰囲気とは気体、空気のことをあらわします。酸化性雰囲気とは、酸化性の気体（酸素・オゾン・二酸化窒素等）を多く含む雰囲気をあらわします。
科学的特性マップ	火山活動や断層活動といった自然現象の影響や、地下深部の地盤の強度や地温の状況など地層処分に関する地域の科学的特性を、既存の全国データに基づき一定の要件・基準に従って客観的に整理し、全国地図の形で示すものです。 「科学的特性マップ」によって、地層処分を行う場所を選ぶ際にどのような科学的特性を考慮する必要があるのか、また、それらの科学的特性を有する地域は日本全国にどのように分布しているのか、といったことが、大まかに俯瞰（ふかん）できます。※出典：NUMOホームページ
第四紀火山	本資料においては、約260万年前から現在までの時代に活動した日本の火山を指します。
緩衝材	地層処分では、ガラス固化された高レベル放射性廃棄物を厚い金属製の容器（オーバーパック）に封入し、地下水との接触を防ぎます。また、その周囲を、水を通しにくく放射性物質などの物質を吸着する緩衝材（粘土：ベントナイト）で覆うことで、放射性物質が地下水に溶け出すことを最大限抑えることとしています。※出典：NUMOホームページ
活断層	数十万年前以降に繰り返し活動し、将来も活動すると考えられる断層のことを「活断層」と呼んでいます（第四紀（260万年前以後）中に活動した証拠のある断層すべてを「活断層」と呼ぶこともあります）。※出典：国土地理院ホームページ
破砕帯	断層に沿って岩石が破壊された帯状の部分。断層角礫や断層粘土が、ある幅で一定の方向に分布する。大規模な断層には大規模な破砕帯を伴う場合が多い。※出典：コトバンク

地質環境特性及び長期安定性確保に関する要件・基準

- 地層処分を行う場所を選ぶためには様々な要件や基準を設定し、私たちの生活に影響を及ぼさないための安全性を確保する必要がある。

地層処分技術WG中間とりまとめ　2014年5月　では

表 1　好ましい地質環境特性のまとめ

	人工バリア設置環境として好ましい主な地質環境特性	天然バリアとして好ましい主な地質環境特性
熱環境	地温が低いこと	—
力学場	岩盤の変形が小さいこと	—
水理場		地下水流動が緩慢であること
化学場	・地下水の水素イオン指数（pH）が高（pH あるいは低（pH ではないこと ・地下水が酸化性雰囲気でないこと ・地下水の炭酸化学種濃度が高くないこと	・地下水の水素イオン指数（pH）が高（pH あるいは低（pH ではないこと ・地下水が酸化性雰囲気でないこと

表 2　著しい影響を与える事象と天然現象の関係

		火山・火成活動等	断層活動	隆起・侵食	気候・海水準変動
閉じ込め機能の喪失	熱環境	地熱活動（非火山性を含む）	—	—	侵食の要因として評価
	力学場	—	処分深度に達する断層のずれ	—	
	水理場	—	断層のずれに伴う透水性の増加	—	
	化学場	火山性熱水や深部流体の移動・流入	断層のずれに伴う透水性の増加（条件による）	—	
物理的隔離機能の喪失		マグマの処分場への貫入と地表への噴出	—	著しい隆起・侵食に伴う処分場の地表への著しい接近	

出典：地層処分技術WGとりまとめ　2017年4月、
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/chiso_shobun/pdf/20170417001_1.pdf

日本列島の科学的特性マップ（July, 2017）

- 地層処分を行う場所を選ぶ際に考慮すべき科学的な特性を地図上に示した「科学的特性マップ」が2017年7月に公開された。科学的特性マップは、既存の全国データを用いて作成されており、各地域の詳細な調査は別途行う必要がある。

出典：「科学的特性マップ」（資源エネルギー庁）
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/maps/kagakutekitokuseimap.pdf

地下に隔離したり閉じ込めたりした場所に悪影響を与える自然現象

		火山・火成活動等	断層活動	隆起・侵食	気候・海水準変動
物理的隔離機能の喪失		①マグマの処分場への貫入と地表への噴出	—	②著しい隆起・侵食に伴う処分場の地表への著しい接近	侵食の要因として評価
閉じ込め機能の喪失	熱環境	③地熱活動（非火山性を含む）	—	—	
	力学場	—	⑤処分深度に達する断層のずれ	—	
	水理場	—	⑤断層のずれに伴う透水性の増加	—	
	化学場	④火山性熱水や深部流体の移動・流入	⑤断層のずれに伴う透水性の増加（条件による）	—	

・マグマの貫入：地層処分場に地下のマグマが入り込むこと。
・放射性廃棄物を長期的に閉じ込める機能（閉じ込め機能）に影響を与える地質環境特性は熱環境・力学場・ 水理場・化学場の4つであり、それぞれ以下のような影響を考慮する必要がある。
　熱環境：地層処分場周辺の地熱等による温度変化による影響
　力学場：地層処分場周辺の断層等による地震の変動による影響
　水理場：地層処分場周辺の地下水の流動による影響
　化学場：地層処分場周辺の海水等による化学組成の影響
・透水性：土などの物質が水を通す性質
・深部流体：地下300mよりも深い位置に存在する地下水

「好ましくない範囲」の要件・基準（1/2）

- 地層処分を行う場所を選ぶ際に求められる「要件」とその基準を以下に示す。

項目	要件	基準
火山・火成活動	マグマの処分場への貫入と地表への噴出により、物理的隔離機能が喪失されないこと	第四紀火山の中心から15 km 以内 第四紀の火山活動範囲が15 km を超えるカルデラの範囲 ※一部の火山については火山中心の精査が必要であることに留意が必要
隆起・侵食	著しい隆起・侵食に伴う処分場の地表への著しい接近により、物理的隔離機能が喪失されないこと	◆好ましくない範囲（直接指標から確認される範囲）の基準 過去 10 万年における最大侵食量が300 m を超えたことが明らかな範囲 ※ただし、基準を適用する全国規模で体系的に整備された文献・データが存在しないことから、当該範囲を判断することができない。 ◆好ましくない範囲（代替指標から推定される範囲）の基準 全国規模で体系的に整備された文献・データにおいて、将来10 万年間で隆起と海水準低下による侵食量が300 m を超える可能性が高いと考えられる地域（具体的には、海水準低下による最大150 m の侵食量が考えられる沿岸部のうち、隆起速度最大区分（90 m 以上/10 万年）のエリア）
地熱活動	処分システムに著しい熱的影響を及ぼす地熱活動により、閉じ込め機能が喪失されないこと	◆好ましくない範囲（直接指標から確認される範囲）の基準 処分深度で緩衝材の温度が長期に100oC を大きく超える範囲 ※ただし、基準を適用する全国規模で体系的に整備された文献・データが存在しないことから、当該範囲を判断することができない。 ◆好ましくない範囲（代替指標から推定される範囲）の基準 処分深度において緩衝材の温度が100oC 未満を確保できない地温勾配の範囲
火山性熱水・深部流体の移動・流入	処分システムに著しい化学的影響を及ぼす火山性熱水や深部流体の流入により、閉じ込め機能が喪失されないこと	◆好ましくない範囲（直接指標から確認される範囲）の基準 処分深度に火山性熱水または深部流体が存在し、かつ地層への影響が明らかな範囲 ◆好ましくない範囲（代替指標から推定される範囲）の基準 地下水の特性として、pH4.8 未満あるいは炭酸化学種濃度0.5 mol/dm3（mol/L）以上を示す範囲
断層活動	断層活動による処分場の破壊、断層のずれに伴う透水性の増加等により、閉じ込め機能が喪失されないこと	◆好ましくない範囲（直接指標から確認される範囲）の基準 活断層に、破砕帯として断層長さ（活動セグメント長さ）の1/100 程度（断層の両側合計）の幅を持たせた範囲 ◆好ましくない範囲（代替指標から推定される範囲）の基準 活断層に、破砕帯として断層長さ（起震断層長さ）の1/100 程度（断層の両側合計）の幅を持たせた範囲
地震によるゆれの影響	地震によるゆれについては、地質環境特性及びその長期安定性の確保に著しい影響を及ぼすとは言えないことから、要件・基準を設定しないこととした	

出典：地層処分技術WGとりまとめ　2017年4月、https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/chiso_shobun/pdf/20170417001_1.pdf

「好ましくない範囲」の要件・基準（2/2）

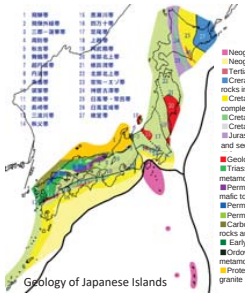
項目	要件	基準
津波による影響	津波については、地質環境特性及びその長期安定性の確保に著しい影響を及ぼすとは言えないことから、要件・基準を設定しないこととした	
地下水	処分場に対する塩水の影響については、塩水の影響がある地域については人工バリアの特性（緩衝材における透水性の低下やオーバーパックの腐食等）に影響が出る 可能性があるが、海水程度の濃度の塩水であれば工学的な対応は十分に可能であることが今までの研究成果等から知られている。 なお、こうした地下深部における地下水の挙動や特性については、その年代から見て古い地下水であることが好ましいが、現地調査等で個別地点ごとに調査・評価が必要であり、全国一律の明確な基準を設定することは難しいため、基準を設定しないこととした。	
鉱物資源	現在認められている経済的価値の高い鉱物資源が存在することにより、意図的でない人間侵入等により地層処分システムが有する物理的隔離機能や閉じ込め機能が喪失されないこと	◆好ましくない範囲（直接指標から確認される範囲）の基準 現在稼動中の鉱山あるいは残存鉱量が大きな閉山鉱山や未開発発見済み鉱床が存在する範囲 ◆好ましくない範囲（代替指標から推定される範囲）の基準 鉱業法で定められる鉱物のうち、全国規模で整備された文献・データにおいて、技術的に採掘が可能な鉱量の大きな鉱物資源の存在が示されている範囲（ただし、当該地域内においては、鉱物の存在が確認されていない範囲もあり、調査をすればそうした範囲が確認できうることに留意する必要がある。） ※炭田については、鉱量が示されているか否かに留意が必要 ※金属鉱物については、エリアで表現することが困難であることに留意が必要

「好ましい範囲」の要件・基準
　天然現象については、数万年以上におよぶ時間スケールを考慮しなければならないことや、
　個別地点で取得される十分なデータをふまえた総合評価が必要⇒一定の地域を好ましい範囲
　と評価することは困難

出典：地層処分技術WGとりまとめ　2017年4月　https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/chiso_shobun/pdf/20170417001_1.pdf

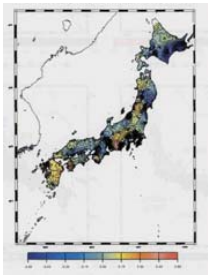
日本列島の地質と隆起（地殻変動）

- 前ページまでに示された要件や基準を満足する地域を選定するために、全国データの活用が必要となる。以下では、産総研等が保有するデータベースの事例を示す。



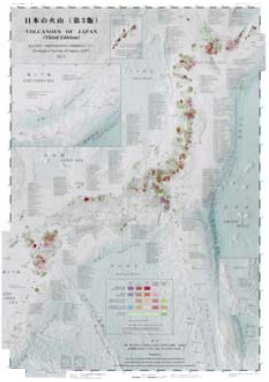
出典：産総研地質調査総合センターウェブサイト
（https://www.gsj.jp/geology/geology-japan/geology-japan/index.html）

水準測量データから求めた日本列島100年間の地殻上下変動



出典：国見利夫，高野良仁，鈴木実，斎藤正，成田次範，岡村盛（2001），「水準測量データから求めた日本列島100年間の地殻上下変動」国土地理院時報，29-32
（https://www.gsi.go.jp/common/000063221.pdf）

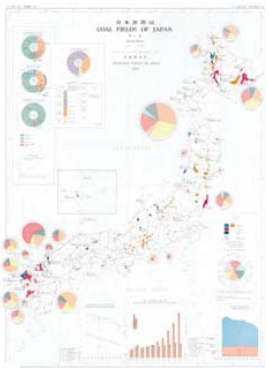
科学的特性関連データベース



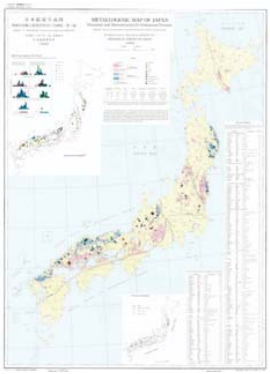
出典：200万分の1地質編集図11「日本の火山（第3版）」産総研地質調査総合センター
（https://www.gsj.jp/Map/jpeg/jm200/jm200_11_3rd.jpg）

出典：「全国主要活断層活動確率地図」産総研地質調査総合センター
（https://www.gsj.jp/Map/JP/docs/tect_doc/tect_14.htm）

科学的特性関連データベース

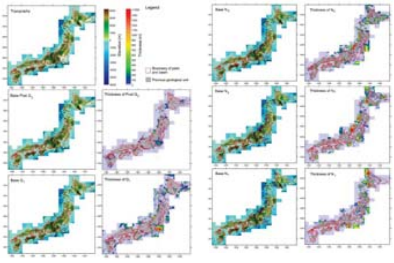


出典：200万分の1地質編集図5「日本炭田図」産総研地質調査総合センター
（https://www.gsj.jp/Map/jpeg/jm200/jm200_05.jpg）



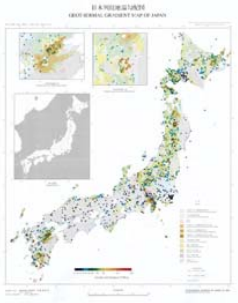
出典：200万分の1地質編集図14「日本鉱床生成図」産総研地質調査総合センター
（https://www.gsj.jp/Map/jpeg/jm200/jm200_14.jpg）

科学的特性関連データベース



日本列島堆積層分布図
※日本全国の地層種類を深度別に地図上に整理したもの
出典：越谷 賢・丸井敦尚(2012) 日本列島における地下水賦存量の試算に用いた堆積物の地層境界面と層厚の三次元モデル（第一版）．地質調査総合センター研究資料集，no.564．産業技術総合研究所地質調査総合センター、
https://www.gsj.jp/researches/openfile/openfile2012/openfile0564.html

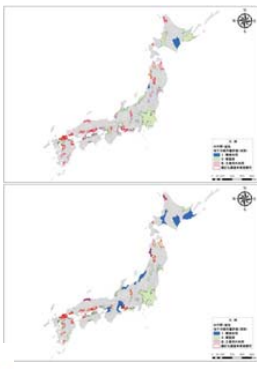
科学的特性マップに反映できていないデータもある！



日本列島地温勾配図　産業技術総合研究所
※日本全国の地下深度に対する温度上昇率を地図上に整理したもの
出典：「300万分の1日本列島地温勾配図」産総研地質調査総合センター
（https://www.gsj.jp/Map/jpeg/jm300-jm500/jm300_Geothermal.jpg）

地下水特性関連データベース

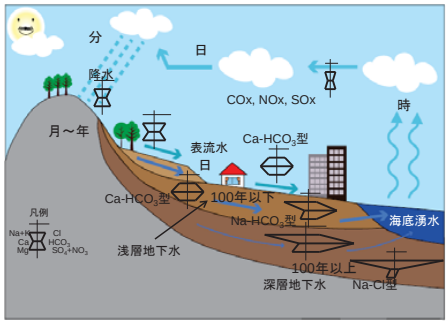
日本列島地下水賦存量マップ
※日本全国の地下水がたまっている水の量を整理したもの



海岸線通過地下水量図
※流域から海に地下水が流れ込む地下水量を整理したもの

出典：高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（沿岸部処分システム高度化開発）平成28年度報告書
（https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2016/28fy_enngannbu.pdf）

水の大循環



水循環基本法が定める水の循環プロセス

- 蒸発
- 降下（降雨・降雪）
- 地表移動
- 地下水としての移動

水循環のポイント

- 時間（各所の滞留時間）
- 水質（水が取り込むもの）
- 水量（ボリューム）

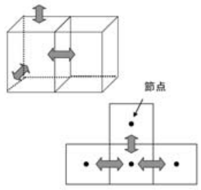
地下水の解析（シミュレーション）

工学系：
浸透流解析；堤防、ダム、トンネル技術者の間で使われている
移流拡散解析；平地のように比較的地下水の流が遅いところに使われる

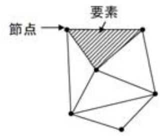
理学系：
地下水流動解析；流域単位の地下水流動などに使われている

計算手法：
有限要素法；微分方程式の近似解を数値的に説く方法、小領域ごとに補完関数で近似
有限差分法；微分方程式を解くために差分近似する方法（オイラーが考案）
有限体積法；領域をコントロール・ボリュームに分割し、各ボリュームに対して積分形の物理量の保存方程式を適用する

地下水の解析（シミュレーション）



差分法のイメージ：
隣り合う格子間の物理量の移動を取り扱う



有限要素法のイメージ：
要素内のすべての点における物質量及びその分布を計算する

地下水の解析（シミュレーション）

支配方程式：
ダルシーの法則；ポーラスメディア内の水の移動量を圧力で関数化
連続の式；領域を通過する水の移動量と貯留量変化を関数化
拡散式；物質や物理量のゆらぎからその移動が起こる（生成・消滅はない）
エネルギー保存の法則；位置エネルギーと運動エネルギーの和が保存される

連成解析と相互解析：
温度；圧力変化や体積変化が起こる
水質；混合であれば容易、組成の変化やイオン交換が起こると複雑になる
密度；圧力影響（塩水侵入解析が好例）

地下水の解析（シミュレーション）

ダルシーの法則

フランスの水道技師ヘンリー・ダルシーは図のような実験装置を用いて、帯水層内の地下水流は、その抵抗値である透水係数と水頭差（圧力差）によって決まることを見極めた。ダルシーの法則は、次式で示される；

$Q = AV = Ak\ dh/dL$
$V = ki$
ここで　$i = h/L \Rightarrow i = dh/dL$

Q：流量、A:断面積、h：水位差、L：観測距離

v：見かけの流速 [cm/sec]、k：透水係数 [cm/sec]、i：動水勾配

注）ダルシー則の場合、伝統的にcm/secを使う習慣がある。さらにこの流速は実流速でないことに注意。

移流拡散方程式

移流方程式と拡散方程式が組み合わされた、それらよりも一般的な流れを表す2階線型辺微分方程式である。物理量φ(t, $\boldsymbol{x}$)が、速度$\boldsymbol{c}$で流れ、かつ拡散係数Dで拡散する場合の移流拡散方程式は次の式で表される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{c}\phi) = \nabla \cdot (D \nabla \phi)$$

Cf.　ペクレ数とクーラン数

熱伝導方程式

$$C_V \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T$$

フーリエの法則（熱流束密度は温度勾配に比例）に基づいている。ここで、Cvは熱容量、λ/Cvを熱拡散率という。

地下水の解析（シミュレーション）

モデリングに必要なパラメータ

水の移動に関する主なパラメータ
・透水係数
・ポテンシャル（水頭・水位）
・間隙率（有効間隙率）
・拡散係数
・海水準などの環境データ（？）

連成問題にかかわる主なパラメータ
・温度
・熱伝導率（有効熱伝導率）
・熱容量（比熱）
・密度
・粘性

これらのうち、温度依存するものは？

文献や資料から得られるもの

⇒マスの中でのばらつきが少なく一般性の高いもの

現場で観測できるもの

⇒平均化されたデータで良いもの
・地層ごと、単位や区間ごとに取れるデータ
・時間変化のあるもの

室内実験で得るもの

⇒高度な測定を要するもの
・代表性の確認が必要

国が作る水関連データベース

	表流水	地下水
蒸発・降下	・過去の気象データ検索（国土交通省 気象庁） ・気象データベース地上観測 version3.10（気象業務支援センター） ・気象データベース・アメダス：フルセット版 version 3.20（気象業務支援センター） ・全国酸性雨データベース（国立環境研究所）	
浸透・流動	・地下水質測定結果（環境省） ・水調査（国土交通省） ・主要水系調査（一級水系）（国土交通省） ・都道府県水調査（二級水系）（国土交通省） ・水文水質データベース（国土交通省） ・ダム諸量データベース（国土交通省） ・河川環境データベース（国土交通省） ・日本の重要湿地500（環境省） ・[illegible]データベース（国立環境研究所） ・霞ヶ浦データベース（国立環境研究所） ・地質環境関連データベース（千葉県） ・給水装置データベース（厚生労働省） ・水道水質データベース（日本水道協会） ・森林降水渓流水質データベース（森林総合研究所）	・水基本調査（国土交通省） ・地下水調査（国土交通省） ・地下水（深井戸）資料台帳（国土交通省） ・地下水マップ（国土交通省） ・水文環境図／水理地質図（地質調査総合センター） ・全国[illegible]データベース（地質調査総合センター） ・地震に関連する地下水観測データベース Well Web（地質調査総合センター） ・深層地下水データベース（地質調査総合センター） ・いどじびき（地質調査総合センター：非公開） ・造水技術データベース（造水促進センター）
海岸・沿岸	・伊勢湾環境データベース（国土交通省） ・大阪湾環境情報クリアリングハウス（国土交通省近畿地方整備局）	

地質環境の理解に活用できるデータベース

日本温泉・鉱泉分布図　産業技術総合研究所
深層地下水データベース　高橋ほか（2011）
堆積物の地層境界面と層厚の三次元モデル（日本列島三次元堆積層分布図）越谷・丸井（2012）
沿岸域深部地層水データベース　奥山（2008）
日本列島地温勾配図　産業技術総合研究所
日本の火山（第3版）　産業技術総合研究所
日本炭田図、全国鉱床生成図　産業技術総合研究所
計測参照用岩石データベース　産業技術総合研究所
海洋地質構造図、沿岸海の基本図　海上保安庁
国内石油・天然ガス基礎調査（試錐・物理探査）　JOGMEC（石油公団含む）
海底地形ディジタルデータ　日本水路協会
海洋地質図、特殊地質図　産業技術総合研究所
日本の地球化学図　産業技術総合研究所
日本の熱水系アトラス　　産業技術総合研究所
＊）地方の一例
北海道農地開発深層地下水調査　北海道
関西地層分布図−大阪平野−　関西地盤情報活用協議会

地下水シミュレーションに使えるDBは？
今後自身で補足すべきデータは何か？

歴史

地質調査所の時代にさかのぼりますが、1957年に我が国初の全国版水理地質図が刊行されました。基本的には地質情報（表層地質図）に水文情報を添付したものであり、どこにどれだけの水資源があるかを図示していました。

後に、各地の水理地質図を41葉式発行し、さらには水文環境図の発行につながりました。また、工業用地下水資源の増水に始まり、地下水障害の解消、大規模災害時の支援、原子力問題への対応、国や地方自治体など各理事議会への貢献等広範囲の活動をしています。

日本水理地質図（1957年発行）

Table 7 Situation of water concerning laws in the South East Asian Countries

出典：200万分の1地質編集図7「日本水理地質図」産総研地質調査総合センター（https://www.gsj.jp/Map/jpeg/jm200/jm200_07.jpg）

旭山動物園にて　丸井撮影

『2019年度人材育成セミナー』

1. 地層処分の技術Ⅰ　地質環境・調査技術

06. 調査・評価技術各論

自然事象1（火山・火成活動，深部流体）

令和2年1月8日

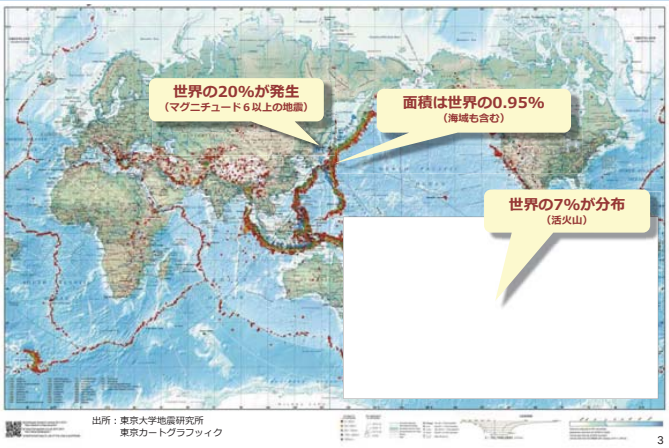
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター 地層科学研究部
ネオテクトニクス研究グループ
浅森　浩一

本講演資料は、使用許諾等が得られていない内容や原典図表・データが含まれている可能性があります。二次利用をしないようにお願いします。

講義の内容

- 日本列島の特徴と自然現象の発生メカニズム
- 地層処分において考慮すべき自然現象とその特徴
- 自然現象に関する将来予測の考え方
- 調査・評価技術に関する研究開発の事例
  －マグマ・深部流体の有無や分布の把握－

世界の地震・火山活動

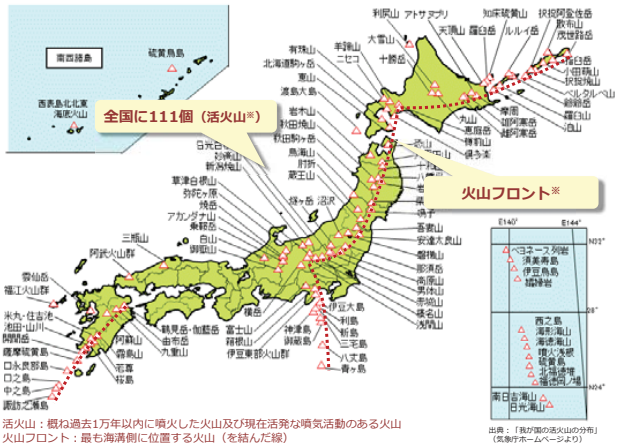


出所：東京大学地震研究所
東京カートグラフィック

日本列島における地震活動

「Hi-net自動処理震源マップ」防災科学技術研究所

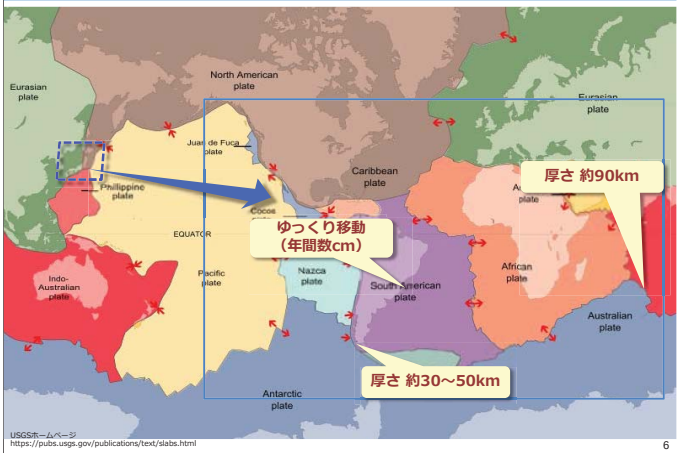
日本列島における火山活動



活火山：概ね過去1万年以内に噴火した火山及び現在活発な噴気活動のある火山
火山フロント：最も海溝側に位置する火山（を結んだ線）

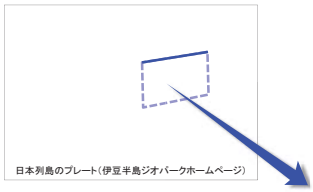
出典：「我が国の活火山の分布」
（気象庁ホームページより）

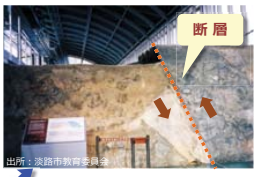
日本列島周辺のプレート運動

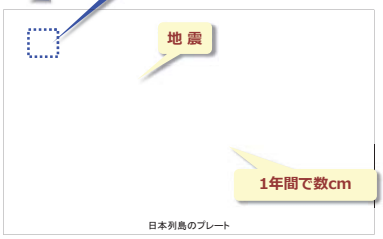


USGSホームページ
https://pubs.usgs.gov/publications/text/slabs.html

地震活動のメカニズム

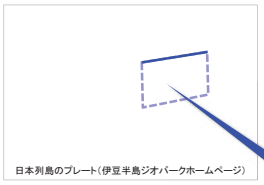


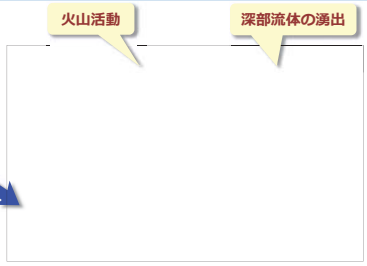




- プレートが沈み込むことで圧縮の力を受ける
- 地震の発生や地殻変動にはプレートの沈み込みが深く関与

火成活動のメカニズム





沈み込み帯における火成活動のメカニズム

① 含水化したプレートの沈み込みに伴う温度、圧力の上昇による脱水
② マントルに放出された水がカンラン岩の融点を下げ、メルトが生成
③ マントル・地殻内をメルトが上昇し、火山を形成

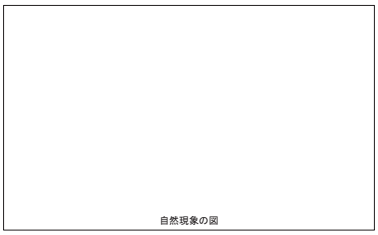
※ 深部流体：スラブあるいはマントルを起源とする深部上昇水や油田かん水などの長期停滞水

講義の内容

- 日本列島の特徴と自然現象の発生メカニズム
- 地層処分において考慮すべき自然現象とその特徴
- 自然現象に関する将来予測の考え方
- 調査・評価技術に関する研究開発の事例
  －マグマ・深部流体の有無や分布の把握－

地層処分において考慮すべき自然現象

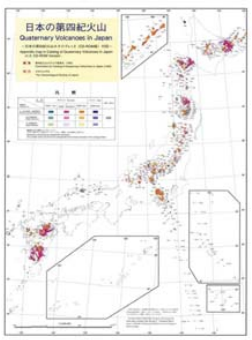
隆起・沈降・侵食／気候・海水準変動
- 生活環境と処分施設との離間距離の短縮
- 地下水の流動特性や水質の変化による放射性物質の移行への影響など

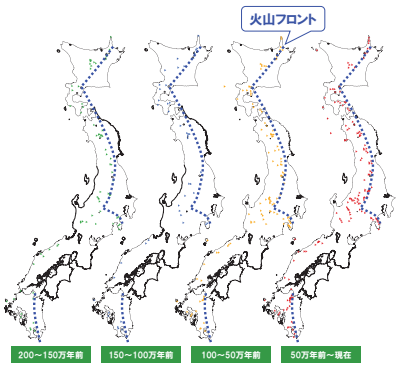


断層運動・地震活動
- 岩盤の破断・破壊による処分施設の破損
- 岩盤の破断・破損による地下水移行経路の形成、岩盤ひずみに起因する地下水の水理学的変化など

火山活動・熱水活動・深部流体
- マグマの貫入・噴出による処分施設の破損
- 地温上昇・熱水対流の発生、熱水・火山ガスの混入による地下水の水質の変化など

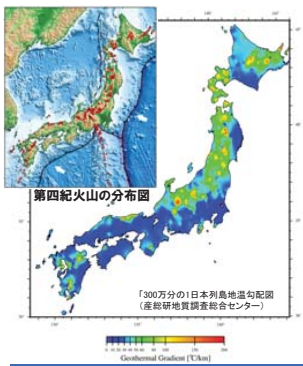
過去200万年間の火山活動の特徴



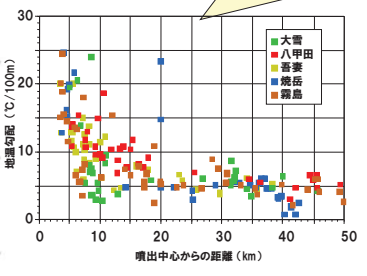


日本列島の50万年ごとの火山の発生状況（日本火山学会，1999を基に作成）
- 第四紀火山は、200万年以降、東日本火山帯および西日本火山帯に偏在して発生している。
- 太平洋側では火山活動が認められない。

火山活動が地質環境に及ぼす影響（地温の上昇）

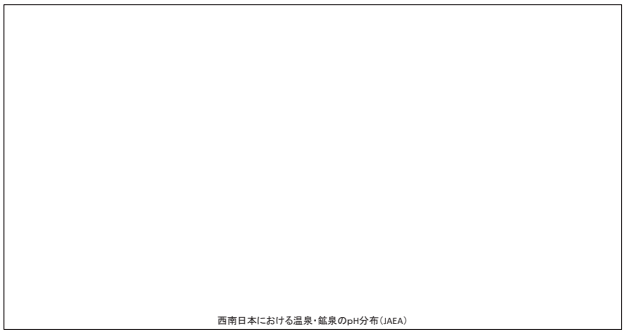


火山活動に伴う熱的な影響は、個々の火山によって異なるものの概ね20～30kmの範囲に限定



日本列島地温勾配図と火山周辺の坑井の地温勾配（梅田ほか，1999）
- 高温異常の背景となるバックグラウンドは東日本で3～5℃／100m、西日本で2℃／100m程度
- 火山周辺の地温勾配は一般的に高いが、噴出中心から離れるにしたがって低減

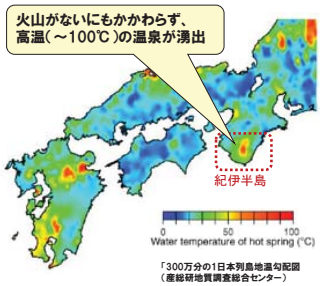
火山活動が地質環境に及ぼす影響（水質の変化）



西南日本における温泉・鉱泉のpH分布（JAEA）

日本列島温泉pH分布と火山周辺の温泉の距離とpHの関係（浅森ほか，2002）
火山周辺の温泉水のpHは，一般的に低く（酸性），噴出中心から離れるにしたがって中性に変化する。
pH＜4，8の酸性地下水は，噴出中心より概ね数km～20kmの範囲に多く分布する。

深部流体が地質環境に及ぼす影響



「300万分の1日本列島地温勾配図
（産総研地質調査総合センター）

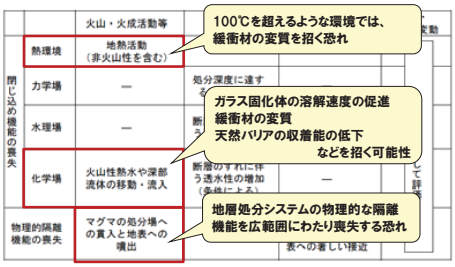
深部流体の上昇に関する概念モデル
（Morikawa et al., 2016）

- 深部流体は、沈み込むスラブやマントル起源の流体が断裂系等を通じて地表付近に上昇するもの。
- pHが低く炭酸化学種が高濃度に含まれる等の特徴があり、化学場に影響を与える。
- また、温度が高い場合には熱環境への影響もある。

地層処分システムへの影響とサイト選定による回避

- 最終処分法※によれば、特に著しい影響を与える天然事象の起こる可能性を概要調査の段階までに調査し、将来予測等も検討した上で、そのような影響を受ける可能性のある地域を処分地から回避することが求められている。
（地層処分技術WG，2014）

※ 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（平成12年法律第117号）



著しい影響を与える事象と天然現象の関係
（地層処分技術WG，2014）

講義の内容

- 日本列島の特徴と自然現象の発生メカニズム
- 地層処分において考慮すべき自然現象とその特徴
- 自然現象に関する将来予測の考え方
- 調査・評価技術に関する研究開発の事例
–マグマ・深部流体の有無や分布の把握–

地質学的現象の将来予測の方法論

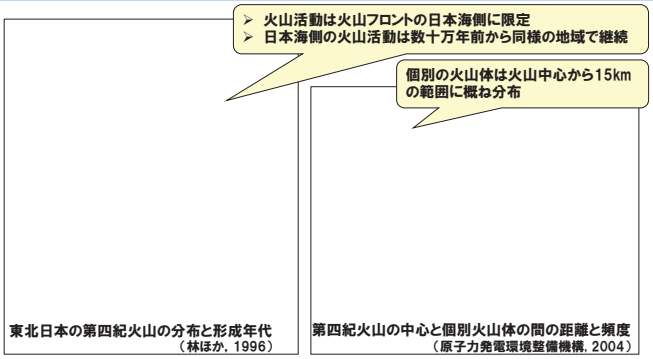
1）外挿法による予測
過去から現在までの変動の履歴を検討し、そのなかから時間的、空間的な変動の普遍性、法則性を見いだすことによって、その傾向を将来に延長（外挿）して予測する方法。プレート運動の枠組みで生じる永続性がある現象には、外挿法が特に有効（日本地質学会，2011；梅田ほか，2013）。

2）類推法による予測
予測しようとする現象と類似の事例を過去のデータから探索し、そのアナロジーによって将来の変動を予測する方法。

3）確率論による予測
過去から現在までに発生した現象の発生頻度、規模と範囲等から将来の発生確率を求める方法。

4）モデルを用いたシミュレーションによる予測
現象に関する物理法則を見いだして、物理（数学）モデルを作成し、それを用いた数値実験によって予測を行う。

火山活動の時空変遷に基づく回避の考え方

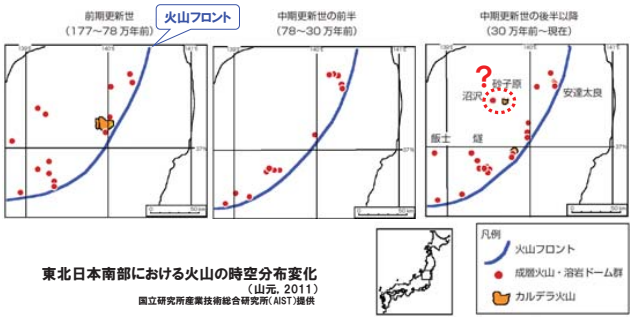


東北日本の第四紀火山の分布と形成年代
（林ほか，1996）

第四紀火山の中心と個別火山体の間の距離と頻度
（原子力発電環境整備機構，2004）

- 対象地区において、地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がないこと（最終処分法 第六条 概要調査地区の選定）
- 第四紀火山から半径15km以内を好ましくない範囲の基準とすることが適当
（地層処分技術WG，2017）

火山活動の時空変遷



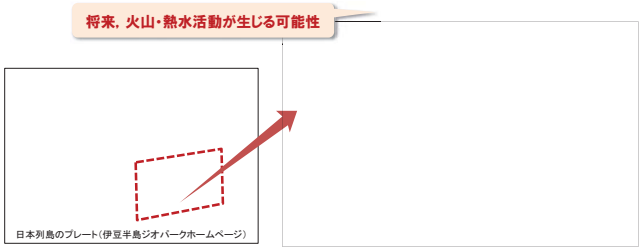
東北日本南部における火山の時空分布変化
（山元, 2011）
国立研究所産業技術総合研究所（AIST）提供

- 第四紀の期間中、火山フロントの位置はほとんど変化していない。
- 一方、火山フロントの背弧域では火山活動域が大きく変動し、特に30万年前以降では背弧域の第四紀火山空白域で火山が新規に出現した。

講義の内容

- 日本列島の特徴と自然現象の発生メカニズム
- 地層処分において考慮すべき自然現象とその特徴
- 自然現象に関する将来予測の考え方
- 調査・評価技術に関する研究開発の事例
  –マグマ・深部流体の有無や分布の把握–

火成活動のメカニズム



沈み込み帯における火成活動のメカニズム

- 第四紀火山が存在しない地域にあっても，現地調査の結果に基づいて評価した結果，将来新たな火山・火成活動が生じる可能性の高い地域は回避すべき（総合資源エネルギー調査会地層処分技術WG, 2017）
- 潜在的なリスクを回避するためには，その有無や分布（地殻構造）をあらかじめ確認しておくことが重要

マグマ・深部流体の把握に向けたアプローチ

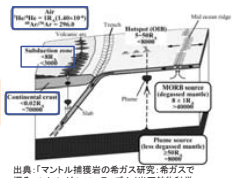
地殻構造の推定手法として汎用性の高い複数の手法を用いることで，地殻内のマグマや深部流体の有無や分布を総合的に推定

■ 地震波トモグラフィ

- ✓ 空間分解能：20–30 km
- ✓ 高温・流体分布域を低速度体としてイメージ

Zhao et al.（1992）

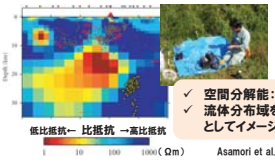
■ ヘリウム同位体（$^3He/^4He$）比



出典：「マントル捕捉岩の希ガス研究：希ガスで探るマントルメタンソマティズム（岩石鉱物科学（2005）34巻（173-185））

- ✓ 地下水溶存ガス・遊離ガスの$^3He/^4He$を測定
- ✓ 大気（R_A=1.4×10^{-6}）・地殻（0.02R_A）・マントル（<8R_A）で大きく異なる値
- ✓ 高ヘリウム同位体比はマントル起源ヘリウムの供給を示唆

■ 地磁気・地電流（MT）法

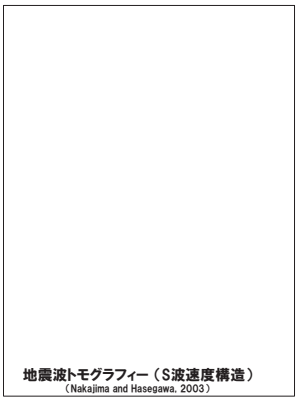


- ✓ 空間分解能：～10 km
- ✓ 流体分布域を低比抵抗体としてイメージ

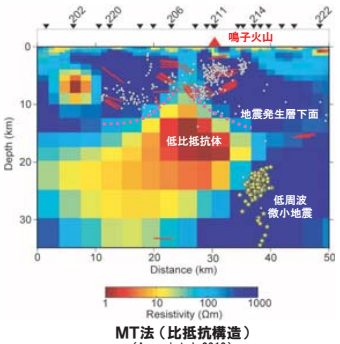
Asamori et al.（2010）

火山地域におけるマグマの検出事例

■ 鳴子火山



地震波トモグラフィー（S波速度構造）
（Nakajima and Hasegawa, 2003）

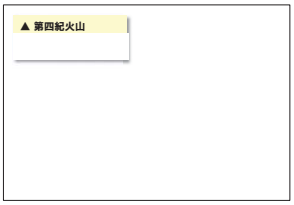


MT法（比抵抗構造）
（Asamori et al., 2010）

⇒ 火山下のマグマ・高温流体の存在を示唆

非火山地域におけるマグマの検出事例

■ 飯豊山地



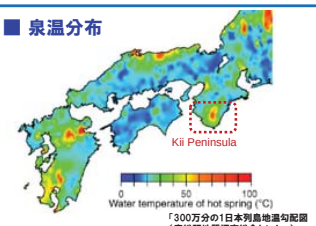
地震波トモグラフィ（S波速度構造）と
ヘリウム同位体比（Umeda et al., 2007）

MT法（比抵抗構造）
（Umeda et al., 2007）

⇒ 非火山地域にもマグマ・高温流体が存在することを示唆

非火山地域における深部流体の検出事例

■ 泉温分布



「300万分の1日本列島地温勾配図（産総研地質調査総合センター）

■ ヘリウム同位体（$^3He/^4He$）比

Umeda et al.（2007）

■ 地震波トモグラフィ

Asamori and Zhao（2015）

■ 地磁気・地電流（MT）法

Umeda et al.（2006）

⇒ プレートから脱水し、前弧域の地殻に流入する深部流体の存在を示唆

マグマ・深部流体の把握に向けたアプローチ

- それぞれの手法には，適用する場所によって精度や分解能の違いがある
- ボーリング掘削などによって直接的に確認することはできない

⇒ 複数の手法の組み合わせによって総合的に調査・評価する必要がある

地層処分に関する技術人材の育成

『2019年度人材育成セミナー』

1. 地層処分の技術Ⅰ 地質環境調査評価技術

10. 調査・評価事例

（幌延を事例とした物質移行調査技術）

令和2年1月9日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門
幌延深地層研究センター 深地層研究部
堆積岩処分技術開発グループ

武田 匡樹

本講演資料は、使用許諾等が得られていない内容や原典図表・データが含まれている可能性があります。二次利用をしないようにお願いします

本講義のキーワード

1. トレーサー試験
2. 物質移行特性

トレーサー試験

- 原位置環境でトレーサーと呼ばれる目印となる物質を流し、物質の振る舞い（収着、拡散、分散等）を調べる試験

地層処分の分野では・・・
天然バリア中の放射性核種の振る舞いを評価するために有効な調査

Grimsel Test Site（スイス，Nagra）での事例
出典：Hoehn et al (1998)：The Grimsel Migration Experiment: field injection–withdrawal experiments in fractured rock with sorbing tracers

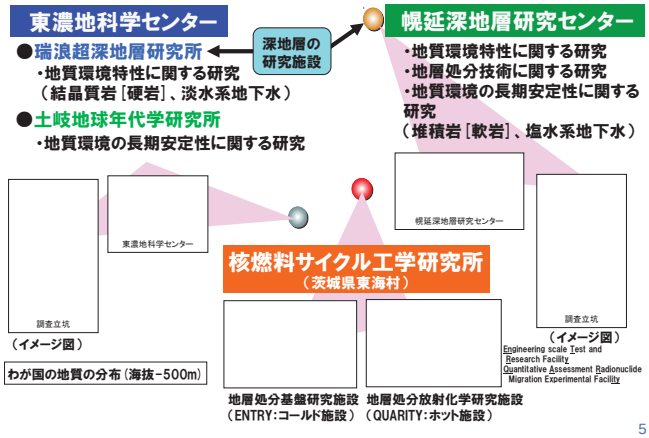
物質移行特性

- 物質は様々な駆動力によって、岩盤中を移動
  ・・・動水勾配、濃度勾配など
  流速　　拡散
- その過程でさまざまな化学的相互作用を受ける
  ・・・イオン交換反応など
  吸着（収着）
- さらに、岩盤そのものの特性、形状、割れ目の有無が物質の移動に影響
  ・・・**透水性、間隙率、割れ目の開口幅**など

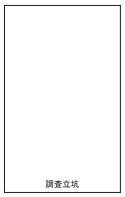
内容

- 幌延深地層研究センターについて
- 物質移行調査技術について
  ・調査技術開発事例
  ・評価事例
- まとめ

原子力機構における地層処分技術の研究開発拠点

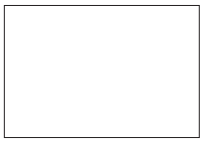


幌延深地層研究センターの地下施設の建設状況



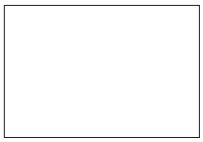
立坑掘削状況
- 東立坑　：掘削深度 380.0m
- 換気立坑：掘削深度 380.0m
- 西立坑　：掘削深度 365.0m

調査坑道掘削状況
- 深度140m調査坑道：掘削長　186.1 m
- 深度250m調査坑道：掘削長　190.6 m
- 深度350m調査坑道：掘削長　757.1 m

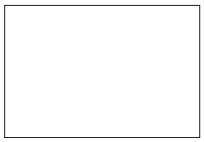


深度350m調査坑道
試験坑道4
人工バリア性能確認試験実施箇所
（平成27年1月13日撮影）

※ このイメージ図は今後の調査研究の結果次第で変わることがあります。



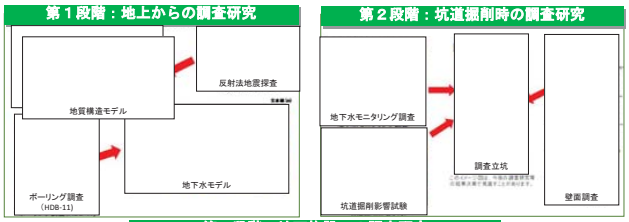
西立坑
（平成26年3月26日撮影）

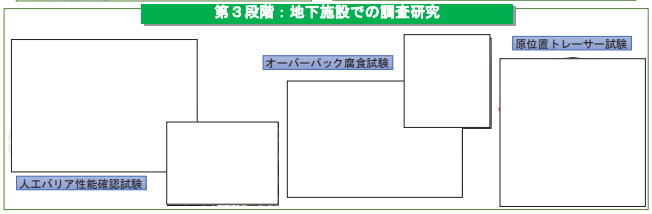


東立坑
（平成26年3月26日撮影）

深度350m調査坑道
（平成26年2月25日撮影）

幌延深地層研究計画の概要





内容

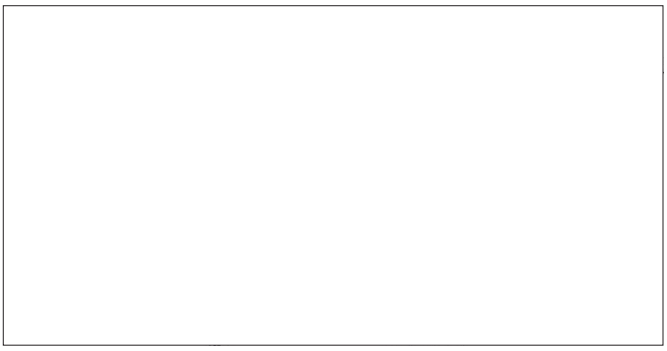
■ 幌延深地層研究センターについて

■ 物質移行調査技術について
- ・調査技術開発事例
- ・評価事例

■ まとめ

幌延深地層研究センター周辺の地質概要

- 研究坑道を主に声問層（珪質泥岩）および稚内層（珪藻質泥岩）に展開
- 間隙率が高く、かつ割れ目が発達することから、多孔質岩盤と亀裂性岩盤の両方の特徴をもつ



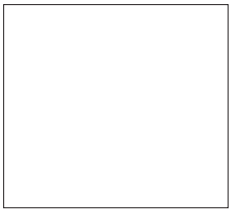
幌延泥岩で考慮すべき移行経路と移行現象

- 粒子間隙（マトリクス）中や割れ目の間隙中を主要な移行経路として移行

多孔質岩盤の特徴

粒子間隙中の核種移行プロセス
（主に堆積岩）

亀裂性岩盤の特徴



割れ目中の核種移行プロセス
（主に花崗岩）

出典：地層処分研究開発第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構, 1999）に追記

内容

■ 幌延深地層研究センターについて

■ 物質移行調査技術について
- ・調査技術開発事例
- ・評価事例

■ まとめ

幌延物質移行調査の目的と課題

- **泥岩を対象とした物質移行特性の評価手法の開発**

✓ **泥岩中の割れ目対象としたトレーサー試験の事例は（ほとんど）ない**

- 花崗岩中の割れ目（釜石鉱山、SKB、POSIVA等）、粘土質岩のマトリクス（Nagra、Andra等）を対象としたトレーサー試験（拡散試験）は国内外で事例あり

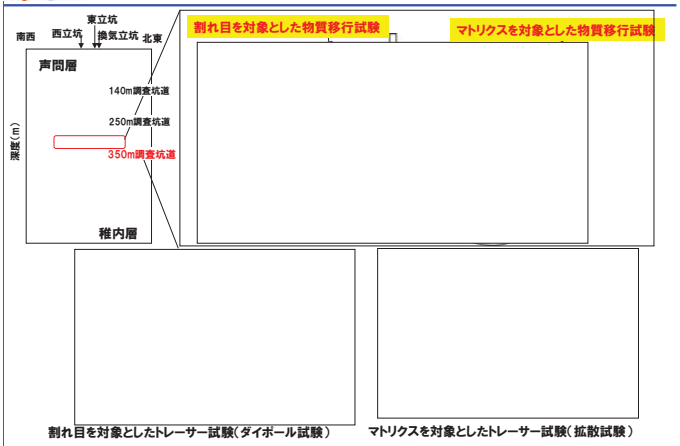
✓ **地下水中の溶存ガス（CH_4、CO_2）**

- 主に間隙水圧の低下により、地下水中から溶存ガスが脱ガス

✓ **放射性トレーサーが使用できない**

- 非放射性トレーサーを使用する場合、地下水の水質に応じ使用濃度、種類などが制限

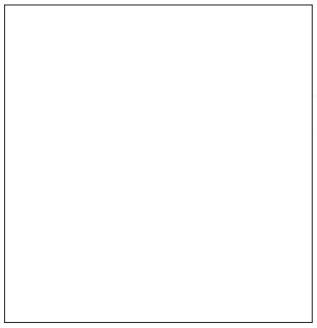
トレーサー試験実施箇所

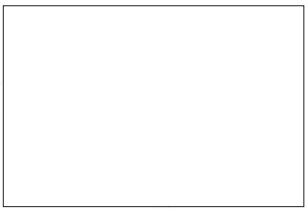


割れ目を対象としたトレーサー試験（ダイポール試験）　マトリクスを対象としたトレーサー試験（拡散試験）

ダイポール試験

- **2本のボーリング孔（注水孔、揚水孔）を使ったトレーサー試験**
- **主に割れ目の物質移行特性を調べるために用いられる試験手法**
- **揚水孔に到達したトレーサーの濃度から、孔間の物質移行特性を評価**





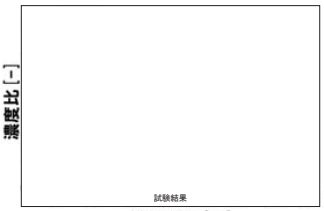
トレーサー試験の結果例

Hoehn et al (1998) : The Grimsel Migration Experiment: field injection–withdrawal experiments in fractured rock with sorbing tracers

拡散試験

- **マトリクスの物質移行特性を調べるために用いられる試験手法**
- **試験区間のトレーサーの濃度変化から主としてマトリクスの拡散、収着特性調べる試験**

試験のイメージ



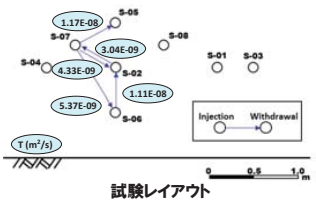
内容

■ 幌延深地層研究センターについて

■ **物質移行調査技術について**
- **調査技術開発事例**
- 評価事例

■ まとめ

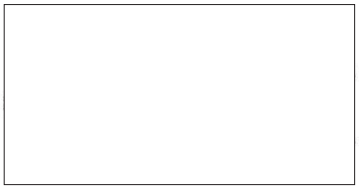
調査技術開発事例：事前調査



試験レイアウト

出典：原子力バックエンド研究 Vol.25.No.1 (p3-14)

割れ目分布

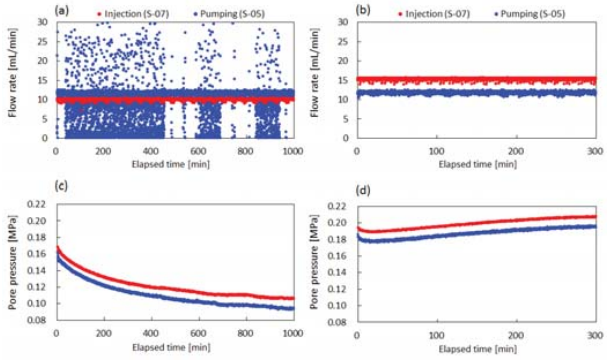


試験装置

- **割れ目分布および孔間の透水性から試験区間および試験孔を決定**
- **注水／揚水孔に試験装置（左図）を挿入し、トレーサー試験を実施**

調査技術開発事例:トレーサー試験手順の構築

- 脱ガスがトレーサー試験に与える影響を評価－試験条件の影響－

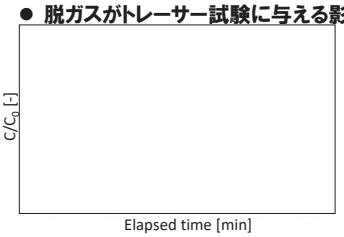


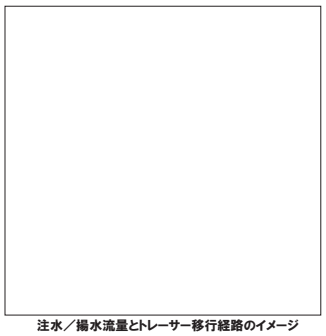
脱ガスの影響を低減するには、「注水流量＞揚水流量」が望ましい

出典:原子力バックエンド研究 Vol.25.No.1 (p3-14)

調査技術開発事例:トレーサー試験手順の構築

- 脱ガスがトレーサー試験に与える影響を評価－回収率への影響－





注水／揚水流量とトレーサー移行経路のイメージ

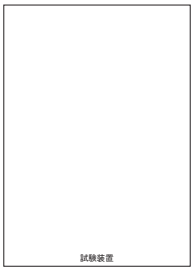
高いトレーサー回収率を達成するには「注水流量＜揚水流量」が望ましい

内容

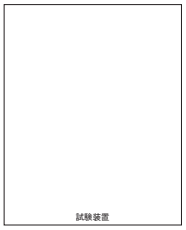
- 幌延深地層研究センターについて
- **物質移行調査技術について**
  - ・調査技術
  - ・評価
- まとめ

評価事例:拡散試験の概要

- 試験孔:350m坑道，05孔，孔径 φ76mm
- 試験期間:約1年
- トレーサー(模擬地下水にトレーサーを添加)を循環させ，定期的にトレーサー濃度を分析
- 試験後にオーバーコアを実施し，試験孔側面からプロファイルの取得



サンプリング箇所



評価事例:トレーサー試験手順の構築

- 安定同位体トレーサーを用いて原位置で信頼性の高いデータを取得するため，トレーサー元素と濃度は，地下水中に含まれるバックグラウンド濃度，地下水条件での溶解度などを考慮

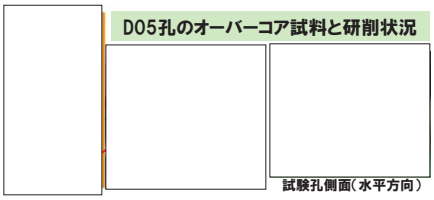
評価事例:トレーサー試験結果(トレーサー減衰データ)

- イオン種(陰イオン、陽イオン、中性)や電荷状態を反映した良好なデータを取得

評価事例:トレーサー試験結果(濃度プロファイルデータ)

- 岩石試料を数mづつ削りとり、酸浸漬→ICP-MSで濃度分析
- 試験区間の壁面から岩盤方向への濃度プロファイルを取得

D05孔のオーバーコア試料と研削状況



試験孔側面(水平方向)

評価事例:解析方法・結果

- 1次元の拡散方程式の厳密解から,トレーサー減衰曲線と濃度プロファイルに対して同時フィッティングすることにより,実効拡散係数De,収着分配係数Kdを決定

Zhang et al.(2006)の厳密解の適用

評価事例:物質移行特性(拡散・収着)の評価結果

- (一部整合しないものもあるが・・・)原位置試験,室内試験との間で拡散・収着特性が概ね整合

⇒室内で構築したモデル化/解析手法が原位置においても適用可能
⇒非放射性トレーサーによるトレーサー試験の適用性を確認

原位置:D-05/350m	室内:D-05/350m
ε;0.42, pH;7, $f_0$0.11, C; H	ε;0.42, pH; 8.5, $f_0$0.11, C;H

内容

- 幌延深地層研究センターについて
- 物質移行調査技術について
  - ・調査技術開発事例
  - ・評価事例
- まとめ

まとめ

- 幌延深地層研究センターについて
  - ✓ 幌延深地層研究センターの調査坑道は、の地層処分に関わる研究を進める国内唯一の地下研究施設
- 物質移行調査技術について
- □ 調査技術開発事例
  - ✓ ほとんど事例が無い、泥岩中の割れ目を対象としたトレーサー試験の概要を紹介
  - ✓ 泥岩中の割れ目を対象としたトレーサー試験技術として、脱ガス環境下での試験条件を設定する上での留意点を提案
- □ 評価事例
  - ✓ 幌延深地層研究計画における泥岩中のマトリクスを対象とした拡散試験の概要を紹介
  - ✓ 室内で構築した拡散・収着に関するモデル化/解析手法が原位置へも適用可能であることを確認したとともに、非放射性トレーサーによるトレーサー試験の適用性を確認

夏の幌延深地層研究センター

深度350mから見上げた西立坑

ご清聴ありがとうございました。

NUMO 原子力発電環境整備機構

11. 安全確保に向けた処分場設計の考え方

地層処分事業おける技術人材の育成
「2019年度人材育成セミナー」
2020年1月9日

原子力発電環境整備機構（NUMO）
技術部　後藤　考裕

本講演資料は、使用許諾等が得られていない内容や原典図表・データが含まれている 可能性があります。二次利用をしないようにお願いします。

工学技術に関する説明資料の構成

No.11　安全確保に向けた処分場設計の考え方

処分場設計の基本的考え方を示したうえで人工バリア・地下施設の設計例を示す。
- 処分場設計の考え方
- 処分場の構成要素と安全機能
- 地下施設設置深度の設定
- 人工バリアの設計
- 地下施設の設計

No.12　建設・操業技術

No.11で提示した、人工バリアの仕様、地下施設のレイアウトを対象に、建設と操業の進め方、操業安全対策などを検討する。
- 処分場の建設・操業における技術的課題
- 処分場の建設と操業の進め方
- 人工バリアの施工方法・施工技術
- 可逆性と回収可能性
- 操業安全対策

内容

- 処分場設計の基本的な考え方
- 処分場の構成要素と安全機能
- 地下施設設置深度の設定
- 人工バリアの設計
- 地下施設の設計

※説明内容は以下のNUMO技術報告書を参照しています。
包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現（NUMO-TR-18-03）
第4章　処分場の設計と工学技術

処分場設計の基本的な考え方

処分場の設計の基本的な考え方

○目的

処分場の**閉鎖前および閉鎖後長期の安全機能を確保**可能な処分施設（人工バリア，地上施設，地下施設など）の仕様を設定すること。

○段階的な処分場の設計と最適化

処分施設の仕様は，文献調査，概要調査，精密調査の各段階で取得される地質環境情報や，その時点の最新の技術開発成果などに基づき，**段階的に詳細化と最適化**を図る。

○設計の方法論

- 段階的にサイト選定を進める過程において，安全確保や工学的な実現などの面から**首尾一貫した設計の考え方を適用**できるようにするため，処分場に求められる多面的な要求事項を**設計因子※**として取りまとめそれらを総合的に考慮して最適化を行う。
- 多様な地質環境や，長い事業期間中における科学技術の進歩などに柔軟に対応して，処分場の設計を進められるように，**複数の設計オプション（設計の代替案）を整備**する。

※設計因子：
設計によって処分場に持たせようとする性質と能力を取りまとめたもの
閉鎖後長期の安全性，閉鎖前の安全性，工学的成立性，モニタリング，回収可能性，環境影響，社会経済的側面など

処分場に求められる安全機能（①処分場の閉鎖前）

○放射線防護に関する安全機能

基本概念	安全機能	説明
操業時閉じ込め	廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止	操業期間中において廃棄体からの放射性物質の漏えいを防止すること
	施設外への放射性物質の放出の防止	操業期間中において放射性物質取り扱い施設からの放射性物質の放出を防止すること
放射線遮へい	放射線の遮へい	廃棄体からの外部放射線による空間線量率を遮蔽により低減すること

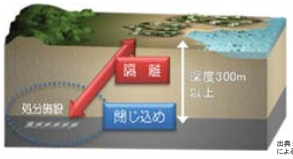
○一般労働安全に関する安全機能

基本概念	安全機能	説明
労働災害防止	災害の発生・拡大の防止	労働災害の要因となる事象の発生防止と拡大の対策を有すること
	災害時の避難経路確保	災害時の避難経路が確保されていること
作業環境維持	作業環境の維持	労働に適する環境を維持すること

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

処分場に求められる安全機能（②処分場の閉鎖後長期）

基本概念	安全機能	説明
隔離	自然現象の著しい影響からの防護	自然現象の著しい影響により廃棄物が地表に接近あるいは露出しないように防護すること
	人の接近の抑制	人が特殊な技術を用いることなしに，廃棄物への偶発的な接近を困難にすること
閉じ込め	放射性物質の溶出抑制	廃棄体からの放射性物質の溶出を抑制することで，地下水への放出率を低下させること
	放射性物質の移行抑制	溶出した放射性物質の移行を抑制することにより，放射性物質の移行率を低下させること



出典：地層処分事業の安全確保（2010年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－，NUMO-TR-11-01.

段階的な設計の方法論　～設計因子と要求事項～

段階的な事業推進において，サイトの地質環境や社会条件に対して，**首尾一貫して共通的に適用する処分場の設計の考え方として設計因子を設定する。**

設計因子とは，設計によって処分場に持たせようとする性質と能力を定義したもので，異なるサイトや異なる事業段階においても首尾一貫して適用可能な設計の思想となるものである。設計因子は以下の観点に基づいて設定する。

◆国際機関や関連する原子力施設の規制等で示されている処分場の安全確保の要件
◆最終処分基本方針など政策上の重要課題
◆処分場設計の実用性および合理性に係る要件

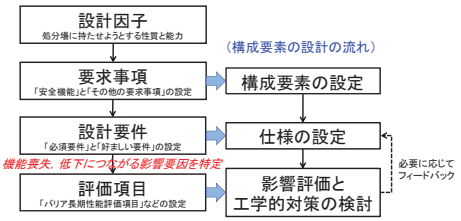
設計因子	処分場に必要な要求事項
閉鎖前の安全性	・廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止 ・施設外への放射性物質の放出の防止 ・放射線の遮蔽 ・作業環境の維持 ・災害の発生・拡大の防止 ・災害時の避難経路の確保
閉鎖後の安全性	・自然現象の著しい影響からの防護 ・人の接近の抑制 ・放射性物質の溶出抑制 ・放射性物質の移行抑制
回収可能性	・回収可能性の維持 ・回収可能性の維持による安全性への影響の防止・低減
工学的成立性	・実現可能な建設・操業・閉鎖の作業工程・方法 ・実証された技術の適用
経済的合理性	・処分場の建設・操業・閉鎖の合理性 ・調達性

安全機能と直接関係する事項

設計要件に基づいた体系的な設計

- 設計因子を基軸として設定した要求事項に対して，それを充足するための処分場の構成要素を設定する。
- 構成要素毎に**要求事項を満たすように設計要件を設定**し，設計要件を充足するように**基本となる仕様を設定**する。
- この仕様を対象として，操業期間中や閉鎖後に構成要素の**機能喪失や低下につながる可能性がある影響要因を特定**し，仕様の妥当性を判断する**影響評価**を行う。
- 有意な影響があると判断された場合には，影響を防止あるいは緩和するような工学的対策を追加するほか，必要に応じて仕様にフィードバックする。

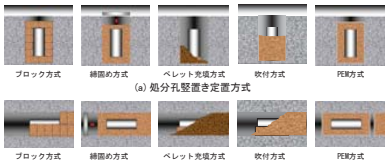
（設計要件および評価項目の設定の流れ）



設計要件の構成と構成要素の設計の関係

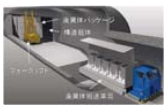
地質環境や社会条件への柔軟な対応　～設計オプションの整備～

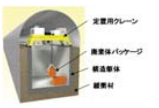
処分場概念，地下施設レイアウト，処分区画の配置，廃棄体の定置形態（竪置き，横置きなど），オーバーパックや緩衝材などの人工バリア構成要素の材料などに関する設計上の多様な選択肢



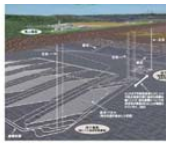
【 HLW人工バリアの定置・施工方法の例】

出典：地層処分事業の安全確保（2010年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－，NUMO-TR-11-01.

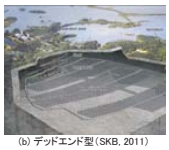




【 TRU廃棄体パッケージの定置方法の例】


(a) パネル型（NUMO, 2009）

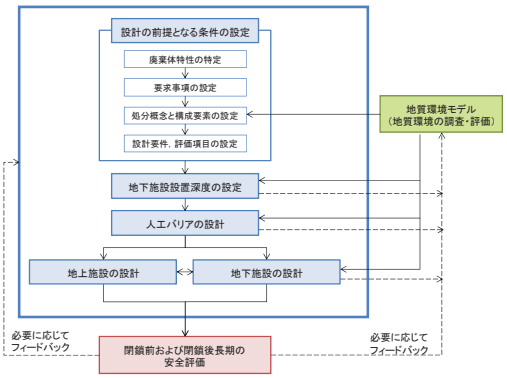
出典：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性－「処分場の概要」の説明資料－，NUMO-TR-04-01.


(b) デッドエンド型（SKB, 2011）

【 地下施設のレイアウトの例】

処分場の構成要素と安全機能

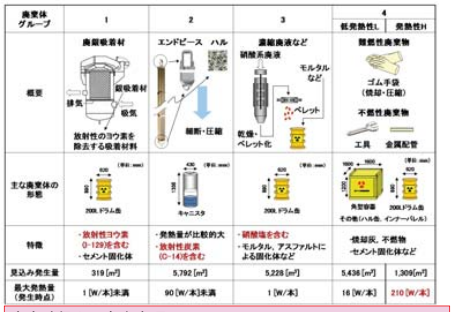
処分場の設計手順



対象廃棄物の分類・特性と安全確保上考慮すべき事項

高レベル放射性廃棄物

地層処分相当低レベル放射性廃棄物（以下，TRU等廃棄物）

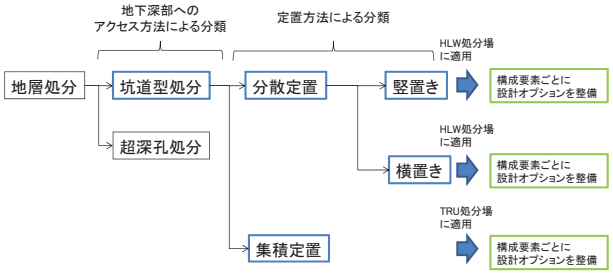


安全確保上の考慮事項
- 発熱性
- 高い放射能

安全確保上の考慮事項
- グループ2，4などの相対的に放射能が高く，発熱性の廃棄体
- グループ3に含まれる硝酸塩による人工バリアへの影響

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，セッション1 安全確保の基本的考え方
https://www.numo.or.jp/topics/senmonkamukesokuhou_1_20190522.pdf

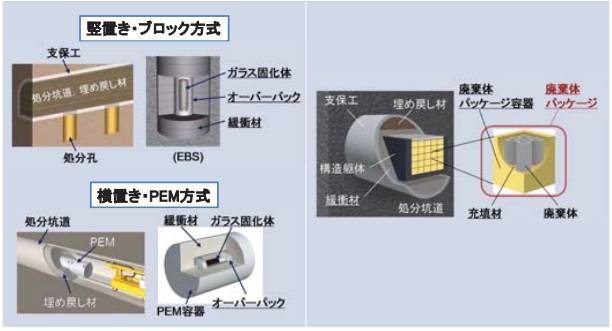
主な処分概念の分類



出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

人工バリアの構成要素

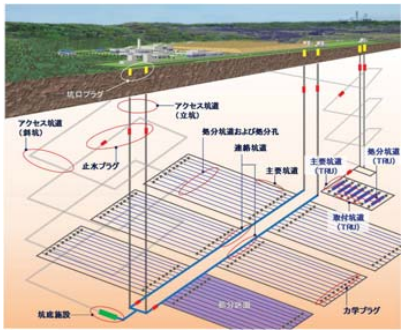
高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリア	TRU等廃棄物処分場の人工バリア



出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

地下施設の構成要素

さまざまな用途の坑道群（アクセス坑道，処分坑道，連絡坑道など），プラグ（止水プラグ，力学プラグ，坑口プラグ），坑内環境を維持するための設備などから構成



＋
- 支保工
- 埋め戻し材
- 構造躯体（TRU）
- 換気，排水，証明などの設備
- 搬送容器，搬送車両

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

地上施設の構成要素

廃棄体を受け入れ，地下に搬送して定置するための準備と事業管理に必要な施設，地下施設で行われる作業を支援するための一群の施設

＋
- 港湾施設
- 専用道路

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

閉鎖前の安全性に関する安全機能と構成要素の関係

＜放射線防護＞

基本概念	安全機能	構成要素
操業時閉じ込め	廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止	**ガラス固化体，オーバーパック** **廃棄体パッケージ**
	施設外への放射性物質の放出の防止	廃棄体受入施設 換気設備（排気フィルタも含む）
放射線遮蔽	放射線の遮蔽	**廃棄体パッケージ間充填材**，廃棄体受入施設の遮蔽壁，廃棄体搬送車両，定置装置などの設備・機器

＜一般労働安全＞

基本概念	安全機能	構成要素
作業環境の維持	換気能力	坑道の換気経路，換気設備（冷房設備含む）
	排水能力	坑道の排水経路，排水設備
	照明能力	坑道の照明設備
災害の発生・拡大の防止	防火対策	防火設備，消火設備
	坑道の力学的安定性	支保工
	そのほかの災害防止対策	落下・転倒防止装置，非常用貯水槽
災害時の避難経路確保	避難経路の確保	アクセス坑道（入気），連絡坑道，緊急待避所，風門，通信・連絡設備

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

閉鎖後長期の安全性に関する安全機能と構成要素の関係

基本概念	安全機能		構成要素 HLW	構成要素 TRU
隔離	自然現象の著しい影響からの防護		地質環境	地質環境
隔離	人の接近の抑制		地質環境（坑口プラグ）	地質環境（坑口プラグ）
閉じ込め	放射性物質の溶出の抑制		ガラス固化体 オーバーパック	廃棄体 廃棄体パッケージ
閉じ込め	放射性物質の移行の抑制	放射性物質の溶解の抑制	地質環境	地質環境
閉じ込め	放射性物質の移行の抑制	遅い地下水流速による放射性物質の移行の抑制	地質環境	地質環境
閉じ込め	放射性物質の移行の抑制	放射性物質の移流による移行の抑制	緩衝材	緩衝材
閉じ込め	放射性物質の移行の抑制	コロイド移行の抑制	緩衝材	緩衝材
閉じ込め	放射性物質の移行の抑制	放射性物質の収着	緩衝材 地質環境	緩衝材 廃棄体パッケージ 間充填材 地質環境
閉じ込め	放射性物質の移行の抑制	放射性物質の分散	地質環境	地質環境
閉じ込め	放射性物質の移行の抑制	坑道およびその周辺が卓越した放射性物質の移行経路となることの抑制	止水プラグ 埋め戻し材	止水プラグ 埋め戻し材

地下施設設置深度の設定

地下施設設置深度の設定

- **最終処分法**により，地下施設は地表から300m より深い位置にある岩盤に設置する。
- 300m以深であっても，安全評価期間内の**隆起・侵食を考慮すると，処分場が地表に向けて接近する**ことも想定されるので，評価期間における隆起・侵食を考慮した安全評価結果が目安値を満足することを確認した上で，**設置深度の上限（浅い側の限界）**を設定する。
- 一方で，処分場の**深度が深くなるにつれて，地圧や地温が上昇**することから，処分場を構成する要素に影響を及ぼし，合理的な処分場の設計が困難になることが想定される。そこで，処分場の設置深度を深くすることにより影響を受ける構成要素とその影響事象を考慮し，**処分場を設置することが可能な深度の下限（深い側の限界）を設定**する。

地下施設設置深度の設計要件

設計要件	内 容	深度を深くすることによる影響 構成要素	深度を深くすることによる影響 要求事項への影響
坑道の力学的安定性	現実的な支保工で坑道の力学的安定性を確保すること	坑道	地圧の増大に伴う空洞安定性の低下
緩衝材の制限温度	合理的な廃棄体占有面積で緩衝材の温度を制限温度（100℃）を超えないように抑えること	緩衝材	地温の増大に伴う廃棄体専有面積の増加
坑内の制限温度	現実的な換気設備により，坑内環境を労働安全衛生規則で定める制限温度（37℃）を超えないように抑えること	換気設備	地温の増大に伴う換気（冷房）容量の増加

地下施設設置可能深度（包括技術報告書（NUMO，2018）の例）
●深成岩類，●先新第三紀堆積岩類 ⇒ 1,000m
●新第三紀堆積岩類 ⇒ 500m

人工バリアの設計
～HLW（緩衝材・オーバーパック）の設計例～

人工バリアの設計要件の設定　～HLW緩衝材～

- 緩衝材には，**設計因子「閉鎖後長期の安全性」**に関する**要求事項（安全機能）として，「放射性物質の移流による移行の抑制」，「コロイド移行の抑制」，「放射性物質の収着」**を設定している。⇒**「放射性物質の収着」**は安全評価において考慮
- 緩衝材の安全機能の確保に必要な設計要件として，**「低透水性」，「コロイドろ過能」，「自己シール性」，「自己修復性」**を設定する。
- 設計因子「工学的成立性」に関する要求事項の確保に必要な設計要件に，「製作施工性」を設定する。
- 所定の期間**オーバーパックの設計要件「耐食性」，「構造健全性」**を維持するうえで緩衝材に必要な設計要件として，**「微生物影響の防止」，「物理的緩衝性」**を設定する。
- これらの設計要件に基づいて緩衝材の設計を実施し，材料の設定と形状，厚さ，密度などの基本となる仕様を設定する。

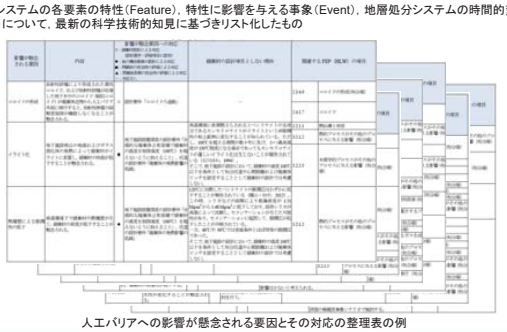
設計因子	要求事項	設計要件	内 容
閉鎖後長期の安全性（緩衝材）	放射性物質の移行の抑制 ・放射性物質の移流による移行抑制 ・コロイド移行の抑制	低透水性	緩衝材中の地下水の流れを抑制し，放射性物質の移行を遅延すること
		コロイドろ過能	放射性物質がコロイドとして移行することを防止すること
		自己シール性	オーバーパックや岩盤との隙間など，施工時にできる隙間を充填可能な膨潤性を有すること
		自己修復性	ガス発生による亀裂が生じたとしても閉塞できること
工学的成立性	実証された技術の適用	製作施工性	既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づき製作施工が可能であること
閉鎖後長期の安全性（オーバーパック）	放射性物質の溶出の抑制	微生物影響の防止	オーバーパックの腐食に影響を与える緩衝材中の微生物活動を抑制すること
		物理的緩衝性	オーバーパックの腐食膨張による力学的な影響を緩和して，オーバーパックを保護するように物理的な緩衝性を有すること

人工バリアの評価項目の設定①　～HLW緩衝材～

○影響が懸念される要因の抽出

- 緩衝材の**機能喪失や低下につながる可能性がある影響要因**を抽出する。⇒22の事象
- 影響要因の抽出にあたり，検討の網羅性を確保するための手段として，**FEPリスト※を活用**。

※FEPリスト
地層処分システムの各要素の特性（Feature），特性に影響を与える事象（Event），地層処分システムの時間的変遷の過程（Process）について，最新の科学技術的知見に基づきリスト化したもの



人工バリアへの影響が懸念される要因とその対応の整理表の例

人工バリアの評価項目の設定②　～HLW緩衝材～

○抽出した影響要因に対する対応の検討

- 抽出した影響要因に対して，**設計（緩衝材の設計，もしくはほかの構成要素の設計），閉鎖前の安全性の評価，閉鎖後長期の安全性の評価のいずれの対応とするかについて検討**したうえで，緩衝材の設計によって対応すべき事象に対して設定する。

○影響事象への対応の例

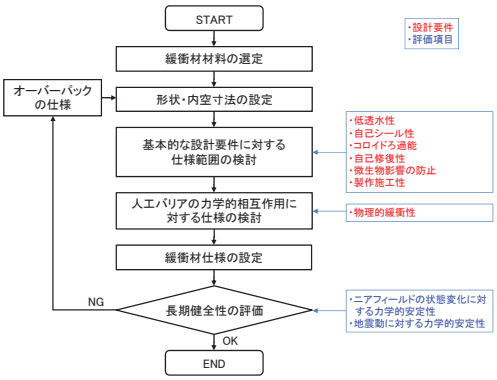
・イライト化⇒「緩衝材の温度を100℃以下に抑える」⇒地下施設設置深度，坑道の設計の設計要件に設定

・ガスの発生⇒緩衝材の設計要件「自己修復性」に設定

＜緩衝材の評価項目＞

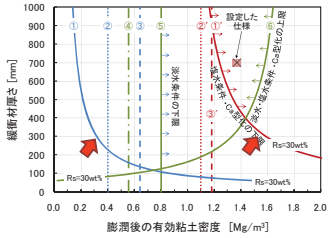
影響が懸念される要因	設計要件	内　容
オーバーパックの腐食膨張	ニアフィールドの状態変化に対する力学的安定性	長期的なニアフィールドの状態変化に対する力学的な相互作用を考慮しても，長期にわたり廃棄体を支持し，緩衝材の仕様成立範囲にあること
岩盤のクリープ変形		
オーバーパックの沈下		
地震動の作用	地震動に対する力学的安定性	大規模な地震動に対しても，オーバーパックや緩衝材が力学的な安定性を損なわないこと

緩衝材の設計フロー　～HLW～

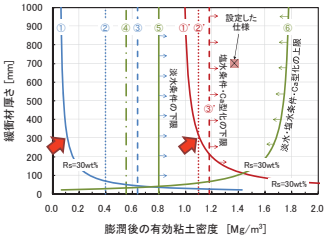


設計要件を満足する緩衝材の仕様範囲

① 自己シール性を有する下限（淡水）　① 自己シール性を有する下限（塩水，Ca型化）
② 低透水性を有する下限（淡水）　② 低透水性を有する下限（塩水，Ca型化）
③ 自己修復性を有する下限（淡水）　③ 自己修復性を有する下限（塩水，Ca型化）
④ 微生物影響を防止する下限（共通）　⑤ コロイドろ過能を有する下限（共通）
⑥ 製作施工性の上限（共通）



基本的な設計要件に対する緩衝材の仕様範囲
（HLW竪置き・ブロック方式）



基本的な設計要件に対する緩衝材の仕様範囲
（HLW横置き・PEM方式）

PEM方式の場合は緩衝材の外側の隙間が存在しない製作方法を採用可能であり，自己シール性の仕様成立範囲はより広範囲になる。

オーバーパックの設計

○期待する安全機能

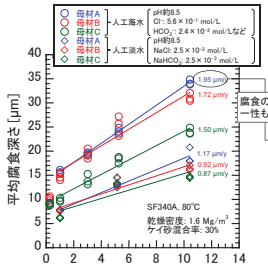
ガラス固化体の放射能が大きく減衰する少なくとも1,000年間はガラス固化体と地下水の接触を防止する。

＜設計要件＞

要求事項	設計要件	方法	指標	基準
操業中の廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止 放射性物質の溶出の抑制	耐食性	全面腐食であることを確認した上で，少なくとも1,000年間の最大腐食深さを見積り，その値以上の腐食代を設定する。	腐食代	＞1,000年間の最大腐食深さ
	構造健全性	オーバーパックに常時作用する荷重に対して，オーバーパックが許容状態以下となるように材料，形状，厚さを設定する。	オーバーパックの応力状態や変形状態	許容状態以下であること
	耐食性に対する放射線影響の抑制	オーバーパック表面の吸収線量率が，腐食速度が加速される吸収線量率のしきい値以下となるように，遮蔽代を設定する。	吸収線量率	≦3 Gy/h
実証された技術の適用	製作性	現在の技術で十分製作可能である材料および形状とする。	－	－
実現可能な作業工程・方法	遠隔封入性	遠隔操作によるガラス固化体の挿入が可能なように，クリアランスを設ける。また，遠隔操作による溶接が可能である溶接部構造とする。	－	－
	遠隔定置性	遠隔操作による定置が可能なオーバーパック形状および把持構造を設定する。	－	－

オーバーパックの必要厚さ

10年間の炭素鋼浸漬腐食試験や放射線分解生成物による腐食促進の評価など，耐食性に関する知見が拡充されたことを受け，オーバーパックに必要な厚さを見直した。



還元性環境における平均腐食速度の経時変化
（原環センター，2017）

単位：mm

	深成岩（竪置き方式）	
	平板部	円筒部
①必要腐食代（埋設後初期の酸化性環境における腐食）	≥11	≥11
②必要腐食代（埋設後長期の還元性環境における腐食）	≥6	≥6
③必要耐圧代（静水圧等への耐圧性）	≥104	≥44
④必要遮蔽代（放射線による腐食促進の防止）	≥80	≥80
オーバーパックの必要厚さ（①+Max(②+③,④)）	≥121	≥91

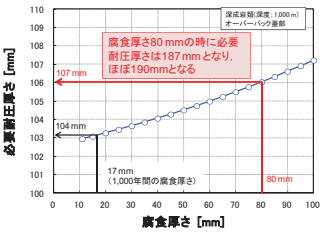
※ 必要厚さ≥ 約160mm
（第２次取りまとめ）

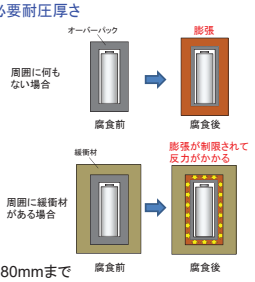
現状の設定値190mm

必要な安全機能の確保に対して設定値の余裕が高まった。

（参考）オーバーパック寿命の評価

- 腐食するとオーバーパック自身が膨張するため圧力（腐食膨張圧）が加わる。
- 深度に応じた水圧＋腐食膨張圧に耐えるために必要な厚さ（必要耐圧厚さ）が必要
- オーバーパックの厚さ＝腐食厚さ（酸化性・還元性）＋必要耐圧厚さ





オーバーパック厚さ190mmであれば，腐食厚さは最大80mmまで

- 酸化性環境における必要腐食代は 11 mm
- 還元性環境における平均腐食速度　2 μm/y（＝2×10^{-3} mm/y）
- 還元性環境における腐食表面の粗さ（最大腐食深さ/平均腐食深さ）= 2

⇒ (80－11) mm÷(2×10^{-3}) mm/y÷2 = 17,250年

地下施設の設計

～坑道、埋め戻し材・プラグおよびレイアウトの設計例～

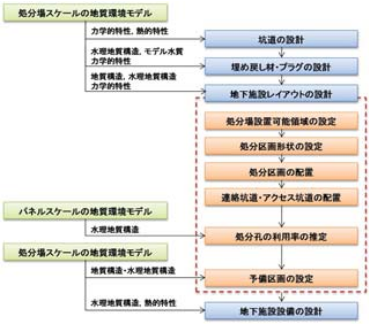
地下施設の設計手順

① 坑道の設計では，それぞれの坑道に必要な断面形状・寸法，および，設定した設置深度における空洞安定性の評価に基づいて支保を設計する。

② 埋め戻し材・プラグの設計では，坑道周囲の掘削損傷領域（EDZ）の地下水流動特性に対する影響を考慮したうえで，埋め戻し材の仕様，およびプラグの仕様とその設置位置を設定する。

③ 地下施設のレイアウトの設計では，坑道断面と埋め戻し材・プラグの仕様を踏まえ，処分区画の規模や形状，およびその配置に加え，連絡坑道の配置やアクセス坑道の数や配置などを検討し，地下施設全体のレイアウトを設定する。

④ 地下施設設備の設計では，換気・冷房設備，排水設備などについて，設定した地下施設レイアウトを対象として検討する。



出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

処分場の坑道の役割

役割	アクセス坑道（斜坑）	アクセス坑道（立坑※）	連絡坑道 主要坑道 取付坑道	処分坑道
廃棄体および操業関連機械などの搬送通路	●	–	●	●
作業従事者の移動通路	–	●	●	–
建設機械の移動通路	–	●	●	–
掘削土の搬出路	–	●	●	–
換気経路	●	●	●	–
排水経路・給水経路	–	●	●	–
給電・通信路	–	●	●	–
緊急時避難経路	●	●	●	–

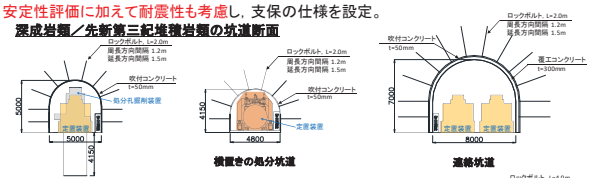
※ 立坑は複数配置し，各立坑の役割は配置に応じて割り当てる。

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

坑道の設計 ～HLWの処分坑道断面と支保仕様の検討例～

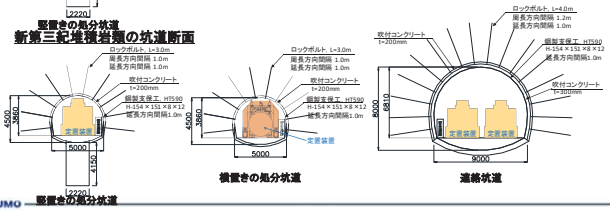
HLW処分の処分坑道は，人工バリアの構成と寸法，処分孔の掘削（竪置きの場合），安全かつ効率的な操業のスペースを考慮して内空断面を設定。岩盤の力学特性に応じた掘削時の空洞安定性評価に加えて耐震性も考慮し，支保の仕様を設定。

深成岩類／先新第三紀堆積岩類の坑道断面



竪置きの処分坑道

新第三紀堆積岩類の坑道断面



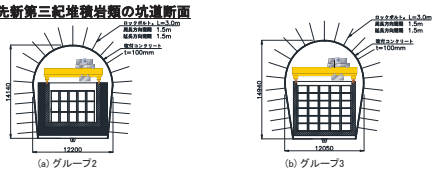
竪置きの処分坑道

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

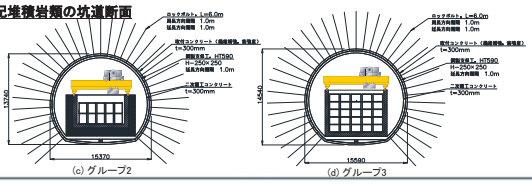
坑道の設計 ～TRU等廃棄物処分の処分坑道断面と支保仕様の検討例～

TRU廃棄物処分の処分坑道は，廃棄体の集積度，人工バリアの構成と寸法，安全かつ効率的な操業のスペースを考慮して内空断面を設定。岩盤の力学特性に応じた掘削時の空洞安定性評価に加えて耐震性も考慮し，支保の仕様を設定。

深成岩類／先新第三紀堆積岩類の坑道断面



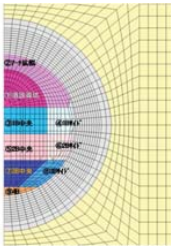
新第三紀堆積岩類の坑道断面



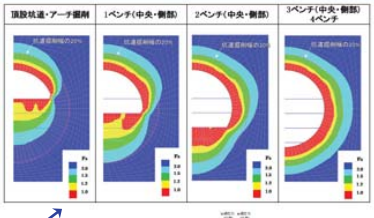
出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

坑道の設計 ～TRU等廃棄物処分施設の処分坑道の空洞安定性評価～

地山強度比が低い新第三紀堆積岩類において，断面が比較的大きいTRU廃棄物の処分坑道については，現実的な加背割（掘削断面の分割）を考慮した掘削ステップ毎に空洞安定解析を実施



考慮した加背割

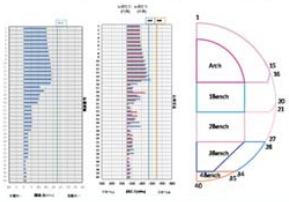


局所安全係数の分布

支保工応力度の分布

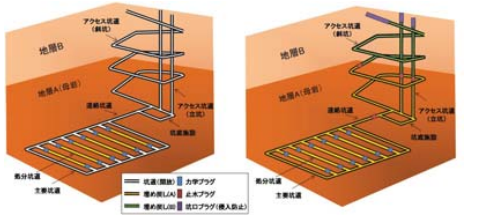
左：吹付けコンクリート

右：鋼製支保工



出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

埋め戻し材・プラグの設計



(a) 操業期間（処分坑道の埋め戻しと力学プラグの設置）　(b) 処分場の閉鎖（全坑道の埋め戻しと止水プラグの設置）

坑道の埋め戻しとプラグ設置位置のイメージ

- 廃棄体を定置した後の処分坑道は，操業期間中に埋め戻すことを想定。
- 閉鎖措置の段階では処分場を地上から隔離することを目的として，連絡坑道，アクセス坑道などの埋め戻しを行う。
- これらの埋め戻し材の施工と処分場の隔離を確実にするため，力学プラグと止水プラグを設置する。

坑道シーリングの構成要素に期待する機能と役割

構成要素	機能/役割
埋め戻し材	• 放射性物質の移行経路となるような地下水の流れを抑制する。 • 再冠水後の緩衝材や止水プラグ（粘土プラグ）の坑道への膨出を抑制する。
力学プラグ	• 処分坑道において埋め戻しの完了していない空間側への埋め戻し材の膨出を抑制する。
止水プラグ	• 埋め戻し材との組み合わせで閉鎖後のアクセス坑道およびその周辺が放射性物質の移行経路になることを防ぐ。

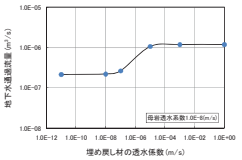
出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

埋め戻し材の設計要件

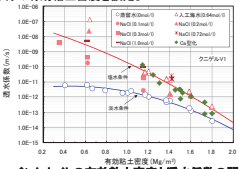
設計要件	確認方法	指標	基準
低透水性	坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないように，埋め戻し材の密度を設定する。	透水係数	1.0×10^{-8}m/s以下
製作施工性	坑道内での埋め戻し施工が可能な密度であることを確認する。	乾燥密度	1.8 Mg/m^{3}以下

評価項目	確認方法	指標	基準
緩衝材および止水プラグの膨出抑制	再冠水後の緩衝材および止水プラグの膨出を抑制し，これらの有効粘土密度が仕様成立範囲に収まることを，埋め戻し材仕様に対して確認する。	有効粘土密度（緩衝材，止水プラグ）	1.2 Mg/m^{3}以上

地下水流動解析により，埋め戻し材の透水係数をパラメータとした感度解析を実施。埋め戻しの「低透水性」の観点からは，母岩の透水係数を1.0×10^{-8}(m/s)としたケースでは，埋め戻し材の透水係数を1.0×10^{-7}(m/s)以下とすれば，性能に差が生じないことになる（下左図）。また，人工海水とCa型化（100%）した場合の透水係数は同程度と見なせる（下右図）。埋め戻し材に求める透水係数を保守的に1.0×10^{-8}(m/s)として，これを満足する埋め戻し材の有効粘土密度を設定。



坑道の地下水通過流量と埋め戻し材透水係数の関係



ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

埋め戻し材の仕様の設定例

No.	仕様	対象坑道	施工方法
1	配合：ベントナイト／ 掘削土 = 15% / 85% 乾燥密度：1.8 Mg/m^3 有効粘土密度：0.64 Mg/m^3	処分坑道（HLW竪置き方式），処分坑道（TRU），連絡坑道，取付坑道，主要坑道，アクセス斜坑，アクセス立坑	撒き出し・締固め工法
2	配合：ベントナイト／ 掘削土 = 50% / 50% 乾燥密度：1.6 Mg/m^3 有効粘土密度：1.15 Mg/m^3	処分坑道（HLW横置き方式）	吹付け工法

■ 仕様 No.1
- 対象とする坑道で作業空間の放射線遮蔽が確保されていることから，施工機械の運転など埋め戻し作業を直接人間が行うことが可能であり，幅広い実績と効率性から「撒き出し・締固め工法」を採用。
- 「膨出抑制」の観点から最も低圧縮になる（乾燥密度が高くなる）配合条件を設定。

撒き出し・締固め工法による坑道の埋め戻し作業のイメージ（竪置きブロック方式）

■ 仕様 No.2
- 緩衝材による放射線遮蔽効果が期待できるが，安全性の高い放射線防護の観点から，埋め戻し作業は遠隔操作による無人化施工で行うことを想定。PEM容器と坑道間の隙間が比較的大きいこと，砂分を多く含む場合の配合や密度に対して適用範囲の広い「吹付け工法」を採用。
- 遠隔操作による施工を想定することから，施工時の隙間充填性に対する品質の余裕を見込んで，直接施工による仕様No.1の場合よりも「膨潤性」と「低透水性」の高い仕様を設定。

吹付け工法による坑道の埋め戻し作業のイメージ（横置きPEM方式）

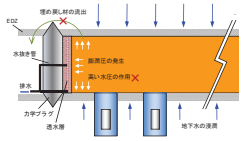
出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

力学プラグの設計

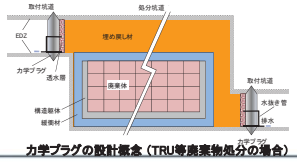
埋め戻しの完了していない空間側への埋め戻し材の膨出を抑制することを目的として，鉄筋コンクリート製の力学プラグを処分坑道端部に設置

設計概念の検討にあたり考慮した事項
- プラグに厳密な止水性を確保した場合に，プラグ周辺に極めて高い動水勾配が生じて，岩盤の亀裂を伝った埋め戻し材の望まない場所への回り込み・流出が生じないか。
- 処分深度相当の地下水圧に耐えうる構造とした場合に，合理性を確保できるか。
- 力学プラグの機能に厳密な止水性が必要か。

採用した設計の特徴
- プラグと埋め戻し材の間に透水層を設けて，プラグに厳密な止水性を求めない構造を採用。
- 操業期間中の埋め戻しの完了した処分坑道からの排水はプラグ内の水抜き管を通じて排水。このため，プラグに高い水圧が作用することや埋め戻し材の回り込み・流出を防止。
- 力学プラグに作用する荷重として，埋戻し材の静止土圧，緩衝材の膨潤圧，坑道高さ分の静水圧を考慮して応力度照査を実施。岩盤の切欠き部については，掘削影響領域の強度低下を考慮して岩盤の支圧とせん断に関する照査を実施。



力学プラグの設計概念（HLW竪置き方式の場合）



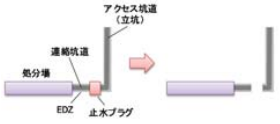
力学プラグの設計概念（TRU等廃棄物処分の場合）

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

止水プラグの設計

要求事項
- 閉鎖後のアクセス坑道およびその周辺が放射性物質の移行経路になることを防ぐ。

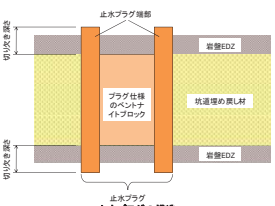
設計概念の特徴
- アクセス坑道に接続する連絡坑道に設置
- 止水プラグにより掘削前の母岩相当となる低透水性の領域を設けることで，連絡坑道とアクセス坑道間に天然バリアと同等の水理的な状態を創出
- EDZを含む坑道を通じた地上への移行経路を分断



止水プラグによる坑道シーリングの概念

設計要件

設計要件	内 容	対応
低透水性	坑道埋め戻し材との組み合わせで，坑道およびその周辺に沿った地下水の流動を抑制すること	・ベントナイトの使用（材料） ・EDZ幅を上回る切欠き（構造）
製作施工性	既存の技術または実現性の見通しのある技術で施工可能であること	・締固めたベントナイトブロックの積み上げ



止水プラグの構造

設計手順

材料選定 ➡ 材料仕様の設定 ➡ 構造仕様の設定

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

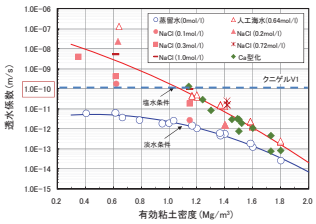
止水プラグの材料仕様の検討

材料の選定

ベントナイトとケイ砂の混合土（クニゲルV1）

設計要件の確認方法

設計要件	内 容	指標	基準
低透水性	止水プラグ中の放射性物質の移行が拡散によって支配されるように，密度を設定する。	ペクレ数	0.1以下
施工の実現性	ベントナイトブロックが製作可能な密度であることを確認する。	有効粘土密度	1.8Mg/m^{3}以下



ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係

材料仕様
- 塩水系地下水（沿岸部），Ca型化（残置物）を考慮

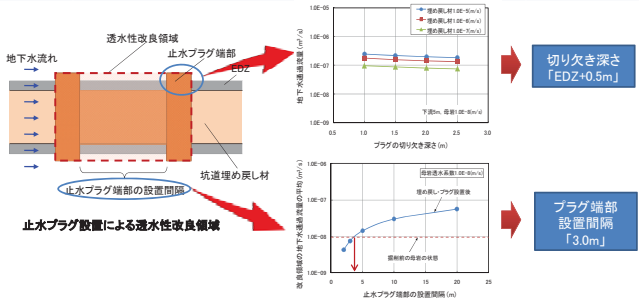
ベントナイト70wt%，ケイ砂30wt%
乾燥密度：1.60Mg/m^3
（有効粘土密度：1.37Mg/m^3）

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

止水プラグの構造仕様の検討

設計要件の確認方法

設計要件	内 容	指標	基準
低透水性	坑道およびその周辺に沿った地下水の流動を分断するように，掘削前の母岩に相当する低透水性の領域が設定されていることを，止水プラグの仕様に対して確認する。	地下水通過流量	掘削前の母岩以下



地下施設レイアウトの設計 ～断層，割れ目に対する対処～

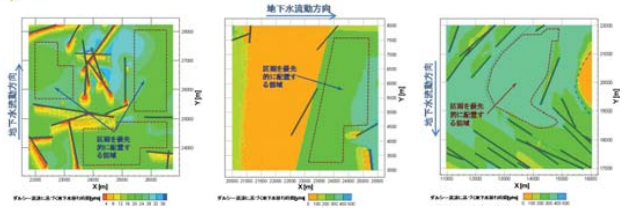
断層，割れ目の分類	地質環境モデルの構築における考え方	地下施設の設計での取り扱い
長さ10 km以上の断層	活断層の可能性がある断層と想定する。 文献調査から精密調査の前半の段階において除外する断層として取り扱う。 広域スケールの地質構造モデルで記載するが，処分場スケールのモデル領域からは除外するように扱う。	左記の対応により，地下施設レイアウトの検討では対象とならない。
長さ1～10 kmの断層	文献調査から精密調査の前半の段階においてその位置や特性を概ね把握できる断層。 広域スケールおよび処分場スケールの地質環境モデルにその分布が記載される断層。	異常出水などにより掘削に支障を生じる可能性があるため，断層が分布する領域に処分坑道を配置しない。 ⇒レイアウト決定特性（LDF）に設定
長さ1 km未満の断層	母岩中に普遍的に分布しているため，概要調査および精密調査の段階においてすべてを検出することは現実的ではなく，その性状の把握や統計量の算出を目的とした調査・評価を行うこととなる。 パネルスケールの地質環境モデルで記載される断層。	処分区画の設置領域に分布することを許容して取り扱う。湧水対策の観点から処分坑道または処分孔の掘削，緩衝材の施工に支障が生じる可能性がある場合には，分布箇所に人工バリアを施工しない。 ⇒定置位置決定特性（EDFに設定）

地下施設設置可能領域の設定 ～LDFの導入～

○レイアウト決定特性（Layout Determining Features）となる地質学的特性

リスクの分類	想定したリスク	考慮すべき地質学的な特性（LDF）
建設における想定リスク	坑道の切羽の崩落	断層
	異常出水	断層
操業における想定リスク	操業中の湧水の処理量（排水量）の増大	断層
閉鎖後長期の安全性に関する想定リスク	速い地下水流動による放射性物質の移行	断層 岩盤の透水性，地下水移行時間

地表からの調査により把握



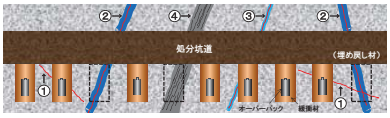
廃棄体の定置基準 ～EDFの導入～

○定置位置決定特性（Emplacement Determining Features）の例

リスクの分類	想定したリスク	考慮すべき水理学的特性（EDF）
操業における想定リスク	パイピングによる緩衝材の流出（処分孔）	断層，割れ目などからの湧水
操業における想定リスク	緩衝材および埋め戻し材の施工容易性（処分坑道）	断層，割れ目などからの湧水
建設・操業における想定リスク	排水処理量の増大	断層，割れ目などからの湧水

地下調査施設からの調査または建設段階の調査により把握

廃棄体を埋設する場所として好ましくない特性の例



①：湧水を伴わない断層・割れ目
②，③：湧水を伴う断層あるいは透水性割れ目
④：断層・割れ目が密集し，力学的な強度が低下している領域

EDFの基準値

対象	許容湧水量
処分孔	パイピングによる緩衝材の流出に対して 0.78L/min（深成岩類） 0.83L/min（新第三紀堆積岩類） ※定置から埋め戻しまでの時間で変動
処分坑道	掘削に支障となる切羽の湧水（トンネル施工実績より） 300L/(min･m)

処分区画，連絡坑道，アクセス坑道の配置に関する設計要件

処分区画の配置の設計要件

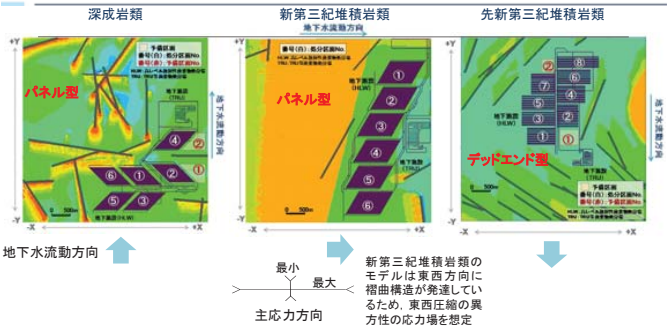
設計要件	扱い※	内 容	設計項目
処分坑道に沿った地下水流動の抑制	—	地下水流動方向に対して処分坑道の方向が直交であること コンフリクトする場合あり	処分坑道の配置方向
処分坑道の空洞安定性確保	—	最大主応力と処分坑道の方向が一致していること	処分坑道の配置方向 坑道仕様
排水経路の確保	—	放射線管理区域を通過した湧水がほかの処分区画へ移動しないよう，処分坑道の勾配および処分区画全体の傾斜が設定されていること 出来るだけ自然流下による排水が可能なこと	処分坑道の勾配
併置処分に伴う相互影響の低減	○	HLWおよびTRUの処分区画が相互に熱的あるいは化学的影響を与えることのないように，処分区画を配置すること	HLWおよびTRUの処分区画の配置

連絡坑道・アクセス坑道の配置の設計要件

設計要件	扱い※	内 容	設計項目
坑道の力学安定性の確保	○	連接した坑道において空洞安定性が確保できること	坑道離間距離
作業動線の独立性の確保	○	建設資機材搬入，掘削土の搬出，廃棄体定置，埋め戻しの各作業動線が独立していること（建設と定置・埋め戻しの動線が交差しない）	坑道の配置 立坑の本数と本数
換気経路の独立性の確保	○	作業動線に応じた換気経路が確保されていること，放射線管理区域と非管理区域で排気の経路が独立していること	坑道の配置 立坑の本数と本数
排水経路の独立性の確保	○	作業動線に応じた排水経路が確保されていること，かつ，放射線管理区域と非管理区域で排水経路が独立していること	連絡坑道の配置および勾配
避難経路の確保	○	建設・操業に伴う災害に備えて，避難経路が確保されていること，避難経路が確保できない場合に備えて，緊急退避所が備えられていること	避難経路 緊急待避所
アクセス斜坑の限界勾配		運搬方式に応じた限界勾配以下とすること	アクセス斜坑の勾配

※ ○：地下施設レイアウトの設計に必須の要件，ー：好ましい要件

地下施設レイアウトの設計例



- 地下水移行時間が短い位置，および断層破砕帯の分布位置を避けて定置区画を配置可能。
- TRU等廃棄物処分場との併置が可能（アクセス坑道はそれぞれに設置）。
- 処分坑道内の湧水による定置率が低い場合にも，予備区画を準備することで所定数量の廃棄体を埋設することは可能。

NUMO 原子力発電環境整備機構

12. 建設・操業技術

地層処分事業における技術人材の育成
2019年度人材育成セミナー
2020年1月9日

原子力発電環境整備機構（NUMO）
技術部　勝又　尚貴

本講演資料は、使用許諾等が得られていない内容や原典図表・データが含まれている 可能性があります。二次利用をしないようにお願いします。

内容

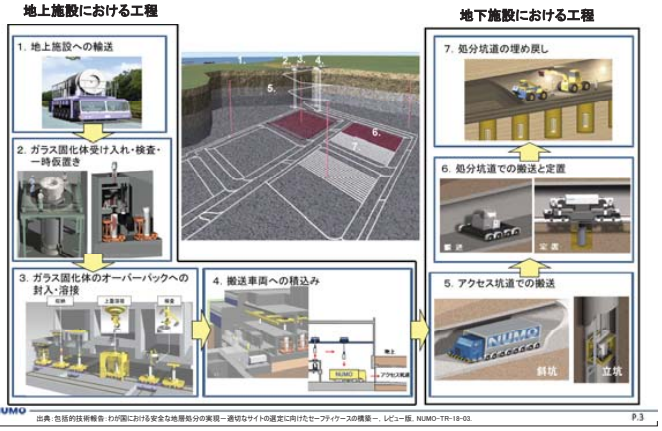
- 処分場の建設・操業における技術的課題
- 処分場の建設と操業の進め方
- 人工バリアの施工方法・施工技術
- 可逆性と回収可能性
- 操業安全対策

※説明内容は以下のNUMO技術報告書を参照しています。
包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現（NUMO-TR-18-03）
第4章　処分場の設計と工学技術、第5章　閉鎖前の安全性の評価
実証試験の動画は、RWMCおよび技術開発を実施した会社から提供いただきました。

処分場の建設・操業における技術的課題

処分場の建設・操業における技術的な課題は何か？

操業工程のイメージ図（高レベル放射性廃棄物の例）



出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－、レビュー版、NUMO-TR-18-03.

閉鎖前の安全性に関する関係法令

地層処分の安全規制は今後検討が進められる。現時点では，類似の原子力施設（例えば，高レベル放射性廃棄物管理施設）に対する基準や労働安全衛生法などを参照して，技術開発を進めている。

(1)放射線防護
- 原子炉等規制法（参考とした規制指針：廃棄物管理施設の新規制基準）
  - 安全機能：閉じ込め，遮蔽
  - 自然災害および人為事象の設計対策
  - 操業安全対策（落下、火災防止対策など）
  - 設計最大評価事故の評価

(2)一般労働安全
- 労働安全衛生法
  - 火災対策
  - 作業環境の維持（坑内温度、湿度、照度、粉じんなど）
- 鉱山保安法（地層処分事業は"鉱山保安法"の対象事業ではないが，安全確保の考え方を参考としている。）
  - メタンガス対策，換気の風速の基準など

技術的な検討が必要な事項

（1）処分場の建設と操業（人工バリア施工、埋め戻し）は同時並行で進行する予定。この間，作業者の安全をどうやって確保するか？

（2）人工バリア（オーバーパック，緩衝材）をどのように製作するのか？地下でどうやって施工するのか？

（3）回収可能性をどう確保するのか？

（4）操業中に何かあった場合に放射性物質が漏えいすることはないのか？

（1） 処分場の建設と操業の進め方

処分場の建設と操業は同時並行で進行する予定。この間，作業者の安全をどうやって確保するか？

地下施設レイアウトの設計要件（No.11再掲）

処分区画の配置の設計要件

設計要件	扱い※	内 容	設計項目
処分坑道に沿った地下水流動の抑制	—	地下水流動方向に対して処分坑道の方向が直交であること	処分坑道の配置方向
処分坑道の空洞安定性確保	—	最大主応力と処分坑道の方向が一致していること	処分坑道の配置方向 坑道仕様
排水経路の確保	—	放射線管理区域を通過した湧水がほかの処分区画へ移動しないよう，処分坑道の勾配および処分区画全体の傾斜が設定されていること 出来るだけ自然流下による排水が可能なこと	処分坑道の勾配
併置処分に伴う相互影響の低減	○	HLWおよびTRUの処分区画が相互に熱的あるいは化学的影響を与えることのないように，処分区画を配置すること	HLWおよびTRUの処分区画の配置

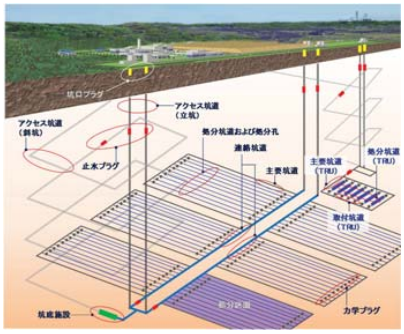
連絡坑道・アクセス坑道の配置の設計要件

設計要件	扱い※	内 容	設計項目
坑道の力学安定性の確保	○	連接した坑道において空洞安定性が確保できること	坑道離間距離
作業動線の独立性の確保	○	建設資機材搬入，掘削土の搬出，廃棄体定置，埋め戻しの各作業動線が独立していること（建設と定置・埋め戻しの動線が交差しない）	坑道の配置 立坑の本数と本数
換気経路の独立性の確保	○	作業動線に応じた換気経路が確保されていること，放射線管理区域と非管理区域で排気の経路が独立していること	坑道の配置 立坑の本数と本数
排水経路の独立性の確保	○	作業動線に応じた排水経路が確保されていること，かつ，放射線管理区域と非管理区域で排水経路が独立していること	連絡坑道の配置および勾配
避難経路の確保	○	建設・操業に伴う災害に備えて，避難経路が確保されていること，避難経路が確保できない場合に備えて，緊急退避所が備えられていること	避難経路 緊急待避所
アクセス斜坑の限界勾配		運搬方式に応じた限界勾配以下とすること	アクセス斜坑の勾配

※ ○：地下施設レイアウトの設計に必須の要件，－：好ましい要件

地下施設の構成要素

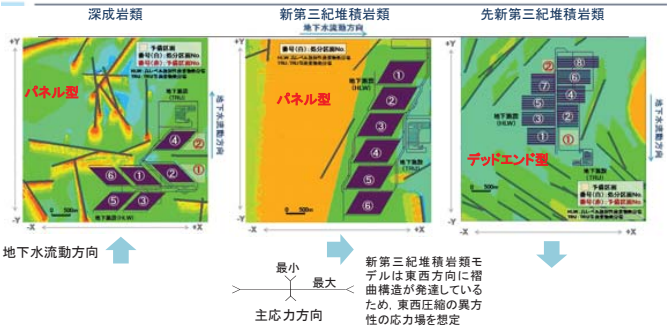
さまざまな用途の坑道群（アクセス坑道，処分坑道，連絡坑道など），プラグ（止水プラグ，力学プラグ），坑口プラグ，坑内環境を維持するための設備などから構成



＋

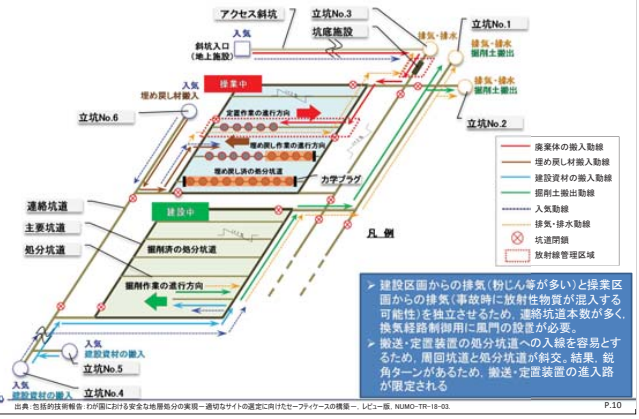
- 支保工
- 埋め戻し材
- 構造躯体（TRU）
- 換気，排水，照明などの設備
- 搬送容器，搬送車両

地下施設レイアウトの設計例（竪置き・ブロック方式）No. 11



パネル型（処分坑道を周回坑道で囲んだ処分区画）とデッドエンド型（行き止まりの処分坑道が連絡坑道に直接接続している処分区画）の2ケースの地下施設レイアウト例に対して処分場の建設・操業手順を換気経路，作業動線，排水経路の独立性を考慮して検討。

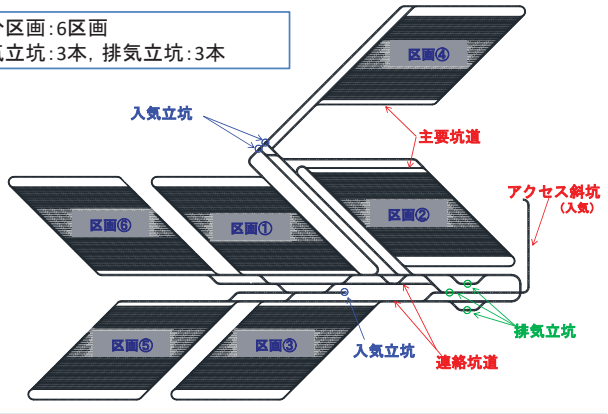
パネル型の作業動線・換気経路の考え方（概念）



- 建設区画からの排気（粉じん等が多い）と操業区画からの排気（事故時に放射性物質が混入する可能性）を独立させるため，連絡坑道本数が多く，換気経路制御用に風門の設置が必要。
- 搬送・定置装置の処分坑道への入線を容易とするため，周回坑道と処分坑道が斜交。結果，鋭角ターンがあるため，搬送・定置装置の進入路が限定される

処分パネル型の検討：地下施設のレイアウト

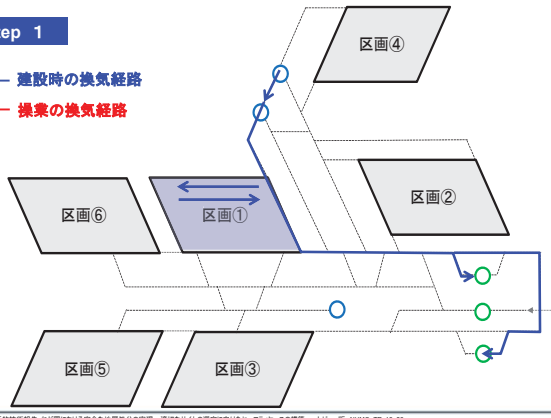
処分区画：6区画
入気立坑：3本，排気立坑：3本



換気経路の検討例（深成岩類，HLW竪置き方式の場合）

Step 1

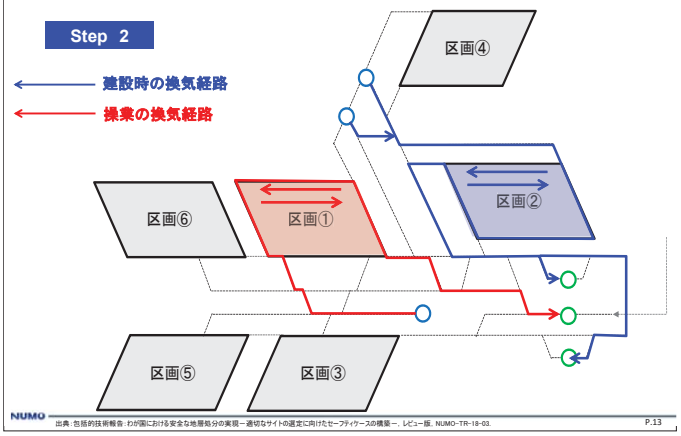
建設時の換気経路
操業の換気経路



換気経路の検討例（深成岩類，HLW竪置き方式の場合）

Step 2

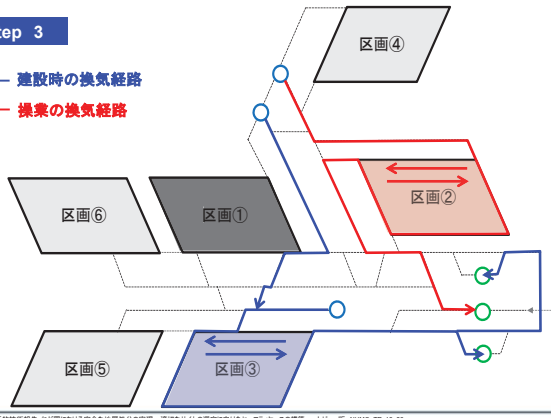
建設時の換気経路
操業の換気経路



換気経路の検討例（深成岩類，HLW竪置き方式の場合）

Step 3

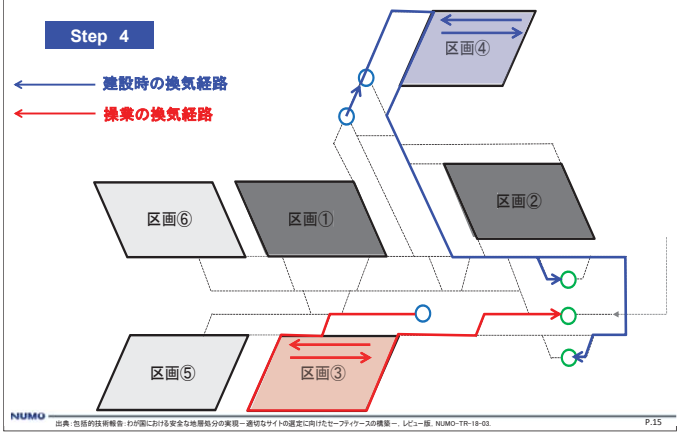
建設時の換気経路
操業の換気経路



換気経路の検討例（深成岩類，HLW竪置き方式の場合）

Step 4

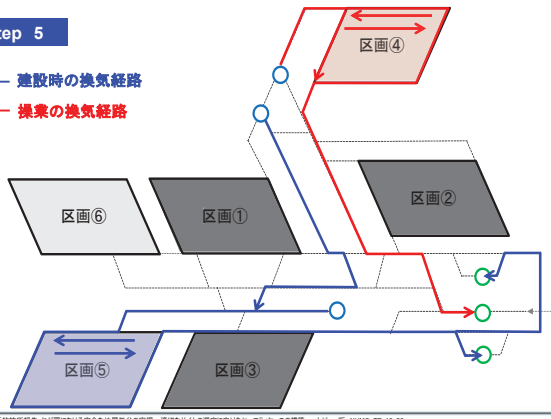
建設時の換気経路
操業の換気経路



換気経路の検討例（深成岩類，HLW竪置き方式の場合）

Step 5

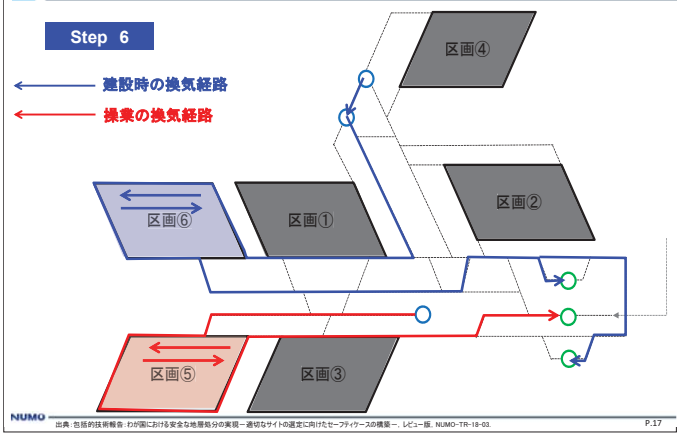
建設時の換気経路
操業の換気経路



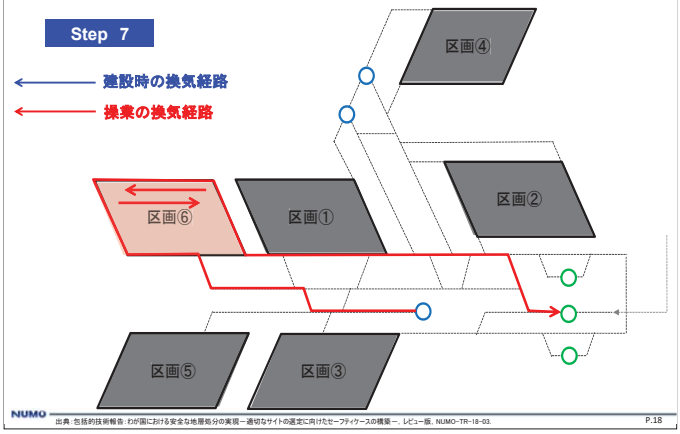
換気経路の検討例（深成岩類，HLW竪置き方式の場合）

Step 6

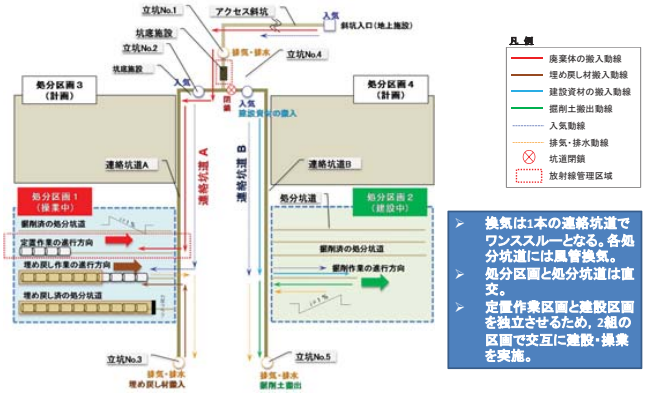
建設時の換気経路
操業の換気経路



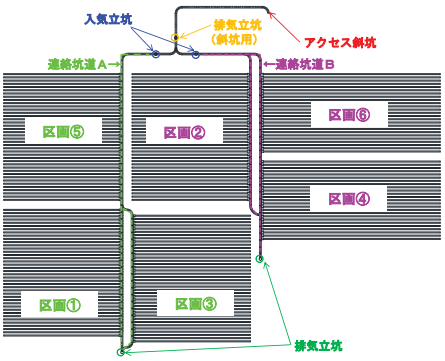
換気経路の検討例（深成岩類，HLW竪置き方式の場合）



デッドエンド型の作業動線・換気経路の考え方（概念）



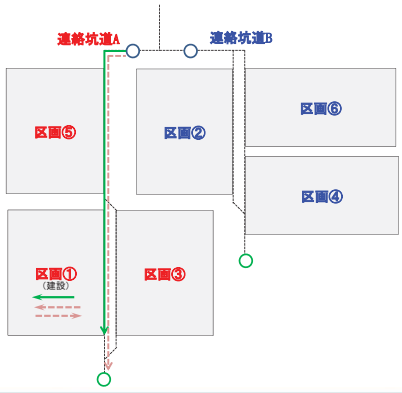
換気経路の検討例（深成岩類，デッドエンド型の場合）



換気経路の検討例（深成岩類，デッドエンド型の場合）

Step 1

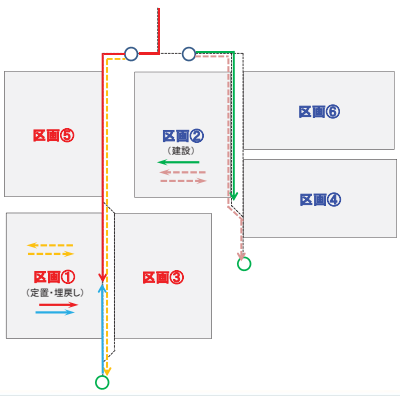
建設動線
定置動線
埋め戻し動線
建設時の換気経路
定置・埋め戻しの換気経路
○:入気立坑
○:排気立坑



換気経路の検討例（深成岩類，デッドエンド型の場合）

Step 2

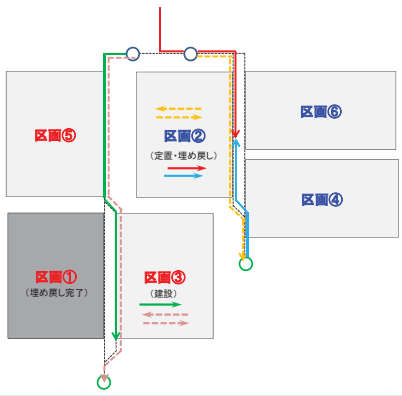
建設動線
定置動線
埋め戻し動線
建設時の換気経路
定置・埋め戻しの換気経路
○:入気立坑
○:排気立坑



換気経路の検討例（深成岩類，デッドエンド型の場合）

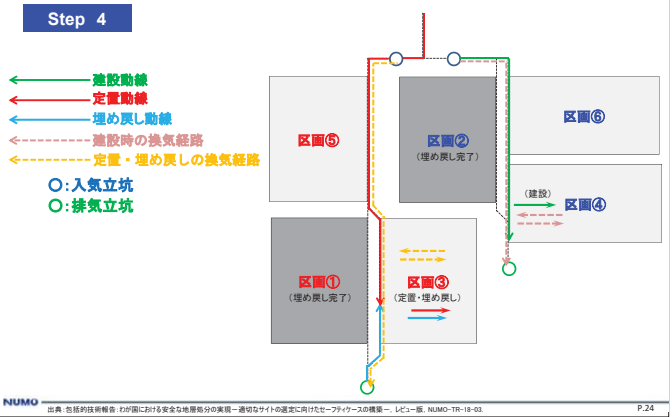
Step 3

建設動線
定置動線
埋め戻し動線
建設時の換気経路
定置・埋め戻しの換気経路
○:入気立坑
○:排気立坑



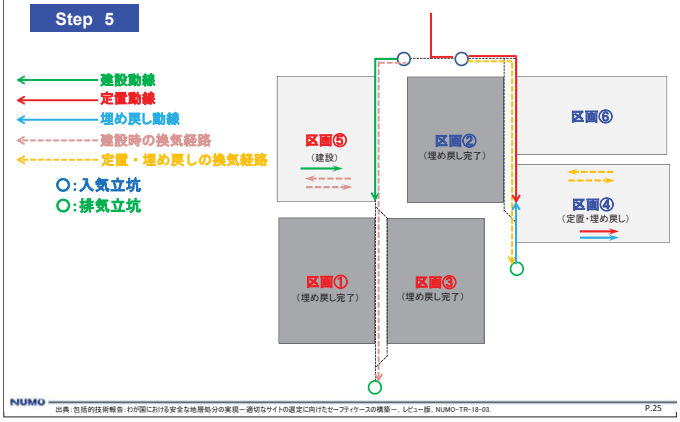
換気経路の検討例（深成岩類，デッドエンド型の場合）

Step 4



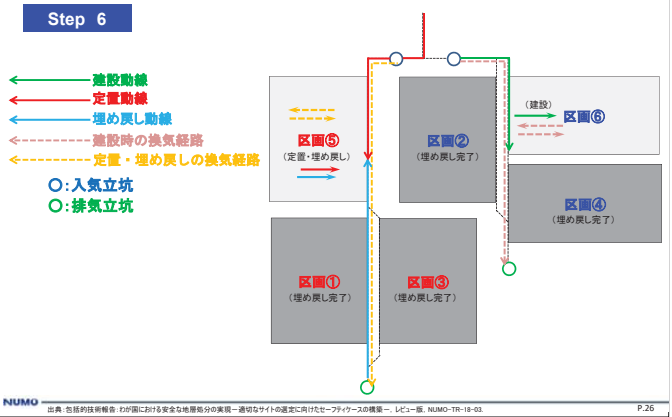
換気経路の検討例（深成岩類，デッドエンド型の場合）

Step 5



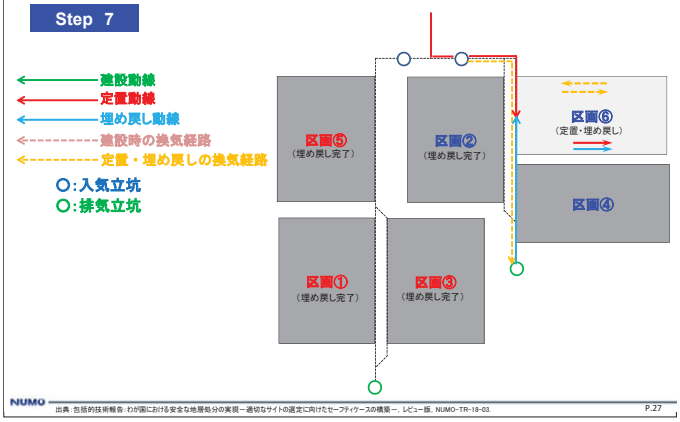
換気経路の検討例（深成岩類，デッドエンド型の場合）

Step 6



換気経路の検討例（深成岩類，デッドエンド型の場合）

Step 7



パネル型とデッドエンド型の特徴比較

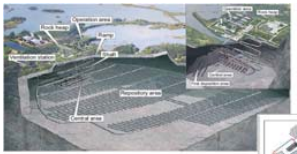
（パネル型の特徴）

- 換気経路の制御のため，風門を多く設置。温度維持のため，全ての処分坑道に空気を回すためには，相当な風量が必要。換気経路が複雑。
- 搬送・定置装置等の入線を容易とするため，処分坑道と主要坑道が斜交する。その結果，処分区画が平行四辺形となり，鋭角ターンが発生。換気の圧力損失が大きく，また，搬送・定置装置の進入路が限定されるため，定置と埋め戻し作業動線が複雑化。
- 埋め戻し開始時に，端部に力学プラグを設置するため，2方向避難は建設と操業時まで。

（デッドエンド型の特徴）

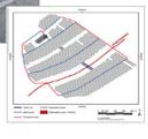
- 換気は1本の連絡坑道でワンススルーとなる。処分坑道には強制的な換気必要。
- 処分区画と処分坑道は直交。搬送・定置装置等の入線方法の技術開発必要。
- 定置作業区画と建設区画を独立させるため，2組の区画で交互に建設・操業を実施。作業動線，換気経路が単純。

（参考）諸外国の地下施設レイアウトの例

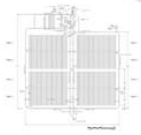


SKB (2009) : Underground design Forsmark Layout D2, SKB R-08-116.

スウェーデンの事例



カナダの事例



NWMO (2016) : Deep Geological Repository Conceptual Design Report Crystalline / Sedimentary Rock Environment, NWMO APM-REP-00443-0015 R001.

海外の実施主体（スウェーデン，フィンランド，英国，フランス，ベルギー，カナダ）はデッドエンド型を採用しており，パネル型を検討していたスイスでも最近の処分概念はデッドエンド型を示している。

（2） 人工バリアの施工方法・施工技術

人工バリア（オーバーパック，緩衝材）をどのように製作するのか？地下でどうやって施工するのか？

高レベル放射性廃棄物の人工バリアの定置方式

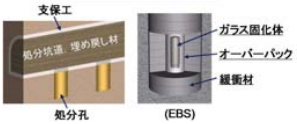
高レベル放射性廃棄物の人工バリア

ガラス固化体
- ガラスマトリクスにより地下水中への放射性物質の浸出を抑制

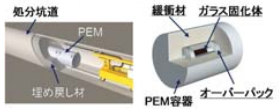
オーバーパック（金属製の容器）
- 短半減期核種の大半が減衰し，放射線と発熱量が低下するまでの期間，ガラス固化体と地下水が接触することを防止

緩衝材（ベントナイトを主成分）
- 廃棄体の周囲の地下水の流れを抑制し，物質移行を遅延
- 放射性物質のコロイドの移行抑制
- 放射性物質を収着することによる移行遅延
- 廃棄体定置・緩衝材施工時の隙間の閉塞
- 自己修復能
- 地下水組成の化学的緩衝作用
- 岩盤変形などの物理的緩衝作用

竪置き・ブロック方式



横置き・PEM方式



地層処分特有の要素であり，技術開発による実現性の確認が必要

オーバーパックの製造方法

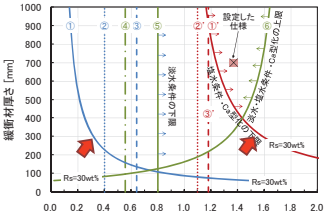
項目	仕様
材料	炭素鋼（SF340A）
厚さ（mm）	190
外径（mm）	820
内径（mm）	440
高さ	1750
高さ（把持部を含む）	1,900
溶接深さ	190

190 mmの厚さのオーバーパックをどう作るのか？
190 mmの深さで蓋を溶接できるのか？

動画へ

緩衝材の施工方法（竪置き・ブロック方式の場合）

① 自己シール性を有する下限（淡水）　①' 自己シール性を有する下限（塩水，Ca型化）
② 低透水性を有する下限（淡水）　②' 低透水性を有する下限（塩水，Ca型化）
③ 自己修復性を有する下限（淡水）　③' 自己修復性を有する下限（塩水，Ca型化）
④ 微生物影響を防止する下限（共通）　⑤ コロイド凝集を有する下限（共通）
⑥ 製作施工性の上限（共通）

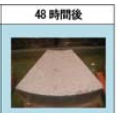
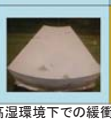


基本的な設計要件に対する緩衝材の仕様範囲
（HLW竪置き・ブロック方式）

緩衝材ブロックの製作動画へ

緩衝材の施工試験動画へ

竪置き・ブロック方式の課題

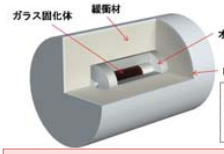
状態・条件		試験開始時	7時間後	48時間後
高温高湿環境下 問題なし	ベントナイト：50% ケイ砂：50% 含水比：7% 乾燥密度：1.9Mg/m³ 温度：45℃ 湿度：95%			
高温高湿環境下 7時間後より吸湿による剥離発生	ベントナイト：70% ケイ砂：30% 含水比：4% 乾燥密度：1.9Mg/m³ 温度：45℃ 湿度：95%			

高温高湿環境下での緩衝材ブロックの挙動（原環センター，2005を編集）

- 地下の高湿度環境や滴水などにより緩衝材の膨潤が計画外に発生すると品質の低下につながる。また，緩衝材ブロックに亀裂があると真空把持できない。
- 地下環境における遠隔操作でのオーバーパックの定置に対する適用性を向上させる必要がある。

水滴落下試験
（出典：Börgesson et al.，2005）

人工バリアの製作・搬送・定置技術（PEM方式の開発）



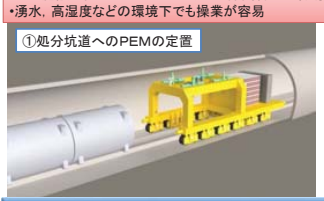
PEM仕様
- PEM容器：円筒形，無孔，厚さ 28 mm
- サイズ：直径 約2.3 m，長さ 約3.4 m
- 総重量：約37.2 トン
- 表面線量：1.3 μSv/h（50年冷却時）

Prefabricated Engineered barrier system Module

鋼殻リング方式によるPEM組立実証（RWMC，2011）

PEM方式の利点
- 地上施設で組立のため人工バリアの品質管理が容易
- 湧水，高湿度などの環境下でも操業が容易

①処分坑道へのPEMの定置



②処分坑道の埋め戻し

実規模大でPEMの製作技術，搬送・定置技術の開発が進められている。

緩衝材の施工方法（横置き・PEM方式の場合）

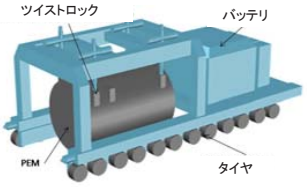
横置き・PEM方式については，鋼殻リング方式でのPEMの緩衝材施工および組み立て方法が実証的に確認されている。

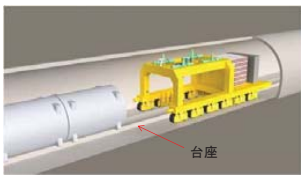
(1) 鋼殻リングへのベントナイトの締め固め　(2) 鋼殻リングの積み重ね　(3) オーバーパックの挿入

鋼殻リング方式の実証試験動画へ

門型クレーンを応用したPEM搬送・定置装置

- PEM搬送・定置装置は、電気駆動を想定し、ツイストロックでPEMを把持し、持ち上げ移動する装置とした。
- PEMはコンクリート製の台座に定置する概念。
- 残置物量の軽減と回収可能性を容易にするために、レール式ではなく、タイヤ式を採用。
- PEMと坑道壁面の隙間は、ベントナイトを主成分とする埋め戻し材で埋め戻す予定。埋め戻し方法としては、吹き付けベントナイトを想定しているが、ペレット充填も候補である。





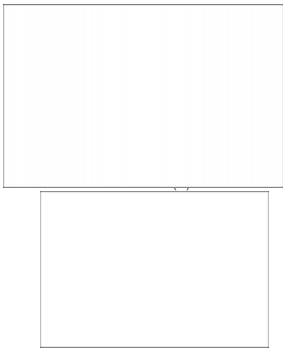
台座は搬送定置装置の走行ガイドの役目も果たす。

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

埋め戻し技術（SHOTCLAY® ）の場合

- 均一な圧縮ベントナイトを施工する技術として吹付けコンクリートの技術を応用した、吹き付けベントナイトという工法が開発されている（SHOTCLAY® ）。
- 超音速スプレーノズルで、含水したベントナイト粒を高速で吹付け、固着させる方法である。
- ベントナイトの密度は、含水率と空気－固相比を調節することでコントロールする。

動画は鹿島建設提供

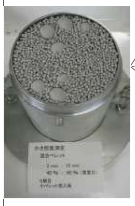


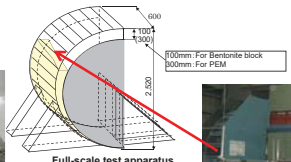
動画へ

I. Kobayashi, K. Suzuki, J. Eto and H. Asano (2015): "Application of the Shotclay Method in Construction Involving Backfill and Clay Plugs", PEBS

ペレット充填方式

•粒度調整した粒状ベントナイトを空気圧送やスクリューフィーダーで搬送し、自然落下で充填する技術の実証も実施されている。
•埋め戻し材の密度はクニゲルV1　100%で 1.5 Mg/m^3 を超える。





動画へ

人工バリアの施工と品質管理の考え方

- 閉鎖後長期の安全確保の観点から，建設・操業段階における性能を保証するための品質のプロセス管理が重要。
- 検査すべき特性（必要に応じて代替指標を用いる），検査方法（出来るだけ非破壊，ただし実証段階では破壊試験との対比で非破壊試験の正当性を確認），検査のタイミング，検査場所・頻度，管理基準の範囲とその妥当性の根拠，管理基準を外れた場合の対処方法などを予め設定する必要がある
- 事業の実施段階では，プロセス管理における合格の積み重ねで安全性を確保しつつ，モニタリングと併せて総合的に安全性を判断。
- プロセス管理の方法と妥当性については，精密調査段階の地下調査施設における実証試験までに準備を進め，当該試験において確立させる。

（3） 可逆性と回収可能性

回収可能性をどのように確保するのか？

回収可能性（最近の動向）

改定された最終処分基本方針（2015年5月22日閣議決定）

第4　特定放射性廃棄物の最終処分の実施に関する事項

最終処分事業は極めて長期にわたる事業であることを踏まえ，今後の技術その他の変化の可能性に柔軟かつ適切に対応する観点から，基本的に最終処分に関する政策や最終処分事業の可逆性を担保することとし，今後より良い処分方法が実用化された場合等に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする。このため，**機構は，特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても，安全な管理が合理的に継続される範囲内で，最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性（回収可能性）を確保するものとする。**

第5　特定放射性廃棄物の最終処分に係る技術の開発に関する事項

国及び関係研究機関は，最終処分の安全規制・安全評価のために必要な研究開発，深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発及び最終処分技術の信頼性の向上に関する技術開発等を積極的に進めていくものとする。合わせて，**最終処分施設を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等について調査研究を進め，最終処分施設の閉鎖までの間の特定放射性廃棄物の管理の在り方を具体化する。**当該技術開発等の成果については，最終処分事業や国の安全規制において有効に活用されることが重要である。

可逆性・回収可能性の定義

可逆性（Reversibility）

原則として，処分システムを実現していく間に行われる**決定を元に戻す，あるいは検討し直す能力**を意味する。後戻り（Reversal）とは，決定を覆し，以前の状態に戻す行為。

回収可能性（Retrievability）

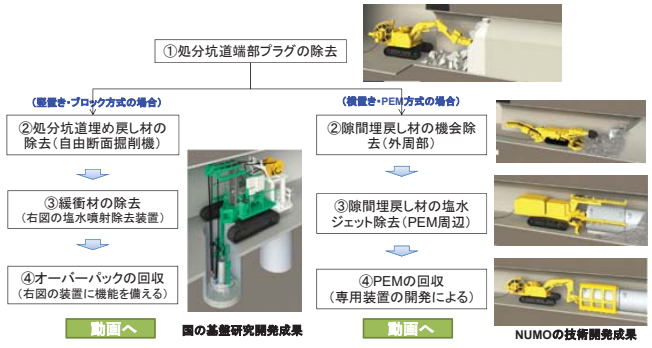
原則として，**処分場に定置された廃棄物あるいは廃棄物パッケージ全体を取り出す能力**を意味する。回収（Retrieval）とは，廃棄物を取り出す行為。

（出典：OECD/NEA,2011）

NUMOの取り組み

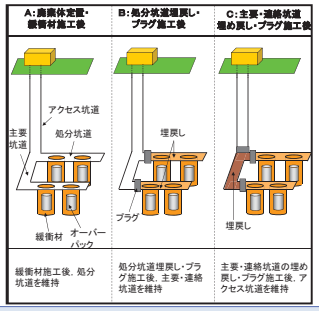
- 現状の設計に対して回収可能性が確保できる技術があることを提示
- 回収可能性の維持することが，閉鎖後長期の安全性に影響を与えない方法を検討

回収に適用する技術（処分概念に対応した回収技術の整備）



処分概念に対応した回収技術の概念を検討し，現状の設計で回収可能性を確保できることを確認。国の基盤研究開発との役割分担を明確にし，今後，装置開発や実証試験を実施。

回収可能性を維持する状態



回収可能性を維持する状態として3つの状態を想定し，回収可能性を維持することに伴う地層処分に対する影響（坑道の維持管理，人工バリアの温度，緩衝材の流出，オーバーパックの腐食等の観点）について比較評価。

回収可能性を維持した場合の影響評価　－各状態の比較－

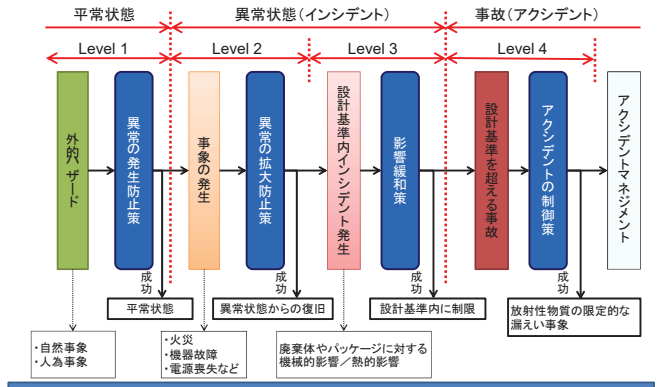
- **影響低減の観点からBの状態（処分坑道の端部のプラグまでを施した状態）が適当と判断**
- **今後，回収可能性を維持できる状態の定量的な把握に向けた検討を進める。**

回収可能性の維持による影響		状態A	状態B	状態C
回収手順の複雑さ		•緩衝材の除去 •廃棄体の回収	•処分坑道の埋め戻し除去 •緩衝材の除去 •廃棄体の回収	•主要坑道の埋め戻し除去 •処分坑道の埋め戻し除去 •緩衝材の除去 •廃棄体の回収
地質環境に対する影響	処分場周辺の地下水の流速	速い ←		→ 遅い
	処分場周辺の地下水位	低下範囲が大きい ←		→ 低下範囲が小さい
	処分場周辺の地下水の酸化還元電位	酸化性 ←		→ 還元性
人工バリアに対する影響	人工バリアの温度	高い ←		→ 低い
	緩衝材の流出	影響大 ←		→ 影響小
	オーバーパックの腐食	影響大 ←		→ 影響小
坑道の維持管理に対する影響	坑道類の維持管理の範囲	処分坑道，主要坑道 連絡坑道，アクセス坑道	主要坑道，連絡坑道 アクセス坑道	連絡坑道，アクセス坑道
	排水量	多い ←		→ 少ない

（4）　操業安全対策

操業中に何かあった場合に放射性物質が漏えいすることはないのか？

異常事象および事故対策の考え方



深層防護の考え方に準じて事故（放射性物質の漏洩）の発生防止対策を検討

異常状態に対する安全対策

深層防護レベル	異常状態の例		
	火災	廃棄体等の落下（廃棄体受入・検査・封入施設の場合）	その他機器故障（アクセス斜坑の搬送車両の故障・逸走の場合）
異常の発生防止策	➢着火源の最小化 ➢可燃物の排除，難燃性・不燃性材料の使用	➢把持装置のインターロック機構	➢搬送車両のインターロック機構
異常の拡大防止策	➢可燃物の排除，難燃性・不燃性材料の使用 ➢火災の検知（熱・煙感知機など） ➢消火設備および消火活動	➢（把持装置の故障に対して）把持具吊り上げワイヤ二重化	➢減速区間（水平区間）の設置 ➢搬送車両に衝撃緩和機構を設置
影響緩和策	➢緊急排気システム（放射性物質の漏えいが検知された場合）	➢吊上げ高さの制限 ➢負圧管理	➢速度緩和区間の設置 ➢緊急排気システム（放射性物質の漏えいが検知された場合）

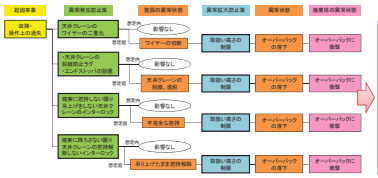
設計想定を超える事故が発生した場合には，上記に加えアクシデントマネジメント対策が必要となる。

設計想定を超える事故の発生可能性評価が必要

閉鎖前の安全性の評価の方法：評価シナリオの特定

処分施設で想定される異常状態（シナリオの出発点）
①火災
②爆発
③浸水・水没
④電源喪失
⑤設備・機械の故障・破損，人為的過失
⑥建屋・坑道の損傷

➢ 評価シナリオの網羅性確保のため，イベントツリーを作成。



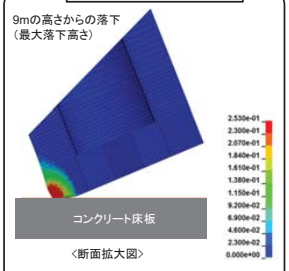
オーバーパックの落下事象のイベントツリーの例

➢ 安全対策の余裕，多重性，独立性を評価の上，廃棄体，オーバーパックなどの頑健性の評価対象とするシナリオを抽出。
➢ 評価方法を検討するため，オーバーパックおよび廃棄体パッケージの落下事象を評価。

評価事例

オーバーパックの落下

9mの高さからの落下（最大落下高さ）

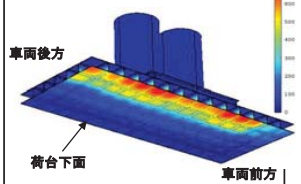


〈断面拡大図〉

- 表面は変形するものの，貫通亀裂の発生には至らない。
- 今後，実規模試験による評価が必要。

火災によるオーバーパックの過熱

➢ 搬送車両のブレーキ周りの故障によりタイヤが過熱されタイヤから発火・延焼することを想定。
➢ 荷台最高温度：649℃，火災継続時間：約90分



60分後（最高温度到達時）の温度分布

- 火災による温度上昇は部分的で短期間。ガラス固化体の健全性を失うほどの高温にはならない。
- 火災評価手法の標準化が課題

まとめ

（1）処分場の建設と操業は同時並行で進行する予定。この間，作業者の安全をどうやって確保するか？

→作業動線（建設、掘削土搬出、建設資機材搬入、廃棄体搬送、埋め戻し材搬入、作業員移動）、換気経路、排水経路の管理区域・非管理区域間の独立性を考慮して、地下施設レイアウト（特にアクセス坑道、連絡坑道）を検討

（2）人工バリア（オーバーパック，緩衝材）をどのように製作するのか？地下でどうやって施工するのか？

→人工バリアは地層処分オリジナルの設計（特に緩衝材）となるため地下の環境において、遠隔で実施可能な技術開発と実証が必要。

（3）回収可能性をどう確保するのか？

→回収技術として埋め戻し材や緩衝材の除去技術を開発し、実証しておく。また、閉鎖後の安全性に影響が出にくいように回収可能性を維持することが重要。

（4）操業中に何かあった場合に放射性物質が漏えいすることはないのか？

→操業中の廃棄体落下、火災等で放射性物質が漏えいする事態は現状ではないと考えられる。ただし、操業中に想定されるさまざまな異常状態のシナリオを網羅的に検討すること（思考停止しないこと）が大事。事故が起こった場合の対策も合わせて準備していく。

ご静聴ありがとうございました。

別添資料2
講義資料13

NUMO 原子力発電環境整備機構

安全評価の考え方と枠組み（前半）

地層処分事業における技術人材の育成
2019年度人材育成セミナー

2020年1月10日
於　成田ビューホテル

吉田　芙美子
原子力発電環境整備機構（NUMO）

本講演資料は、使用許諾等が得られていない内容や原典図表・データが含まれている 可能性があります。二次利用をしないようにお願いします。

はじめに

- 本日お伝えしたいこと
  - 安全評価の考え方
  - 安全評価の方法論
- 説明に際しての前提
  - 放射線学的な影響（線量やリスク）のみに着目（化学的な影響は考慮しない）
  - 国際機関や諸外国の安全規制機関や実施主体、国内類似事業に言及
  - ただし，NUMOの包括的技術報告書（第6章）を軸に説明

NUMO 原子力発電環境整備機構

安全評価の考え方

安全評価の役割：

＜いつ？＞
- 処分施設の開発および操業を通じて，またより精緻なサイトデータが利用可能になるのに応じて，実施され更新される

＜何のため？＞
- 研究課題，評価能力の開発，資源の配分や廃棄物受入れ規準の策定に関係する意思決定
- 安全と関連する重要なプロセスの特定と，処分施設の性能の理解の進展に寄与（最適化の議論に資するため）

IAEA（2011）：Disposal of Radioactive waste, Specific Safety Requirement SSR-5 Req.12:Preparation, approval and use of the safety case and safety assessment for a disposal facility

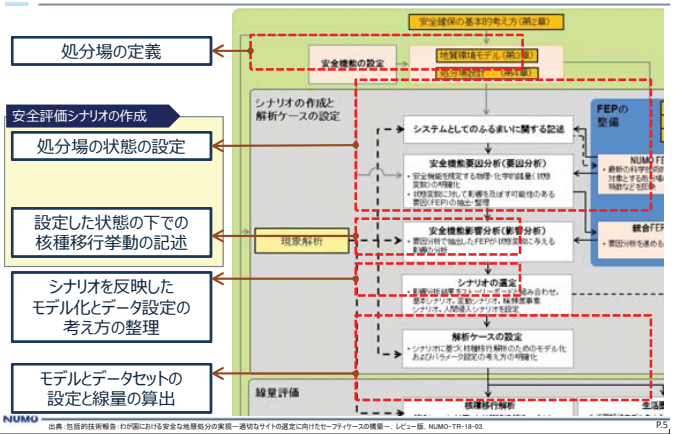
安全評価の役割：

＜示すもの＞
- 処分システム，その起こりうる変化および，それに影響を及ぼす可能性のある事象が十分に理解されているという証拠
- 設計の実現可能性を立証すること
- 処分システムの性能に関する説得力のある評価，および関連するすべての安全要件が遵守され，放射線防護が最適化されているという合理的なレベルの保証を示すこと
- 関連する不確実性の解析を特定し示すこと

＜取り扱うもの＞
- 処分システムの設計性能の予想される変化，および事象，並びに，それ程発生しそうにない変化および事象

IAEA（2011）：Disposal of Radioactive waste, Specific Safety Requirement SSR-5 Req.13:Scope of the safety case and safety assessment

安全評価のフロー



出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

安全評価の手順

どの程度，隔離・閉じ込め機能が発揮されるか？線量を指標として評価

処分場の性能

- 処分場の定義
- 16. 処分場の状態の設定
- 19. 設定した状態の下での核種移行挙動の記述
- シナリオを反映したモデル化とデータ設定の考え方の整理
- 17.
- 18. モデルとデータセットの設定と線量の算出

比較

- 将来，処分場はどのような状態になるのか？
- その状態の下，放射性核種はどのようにふるまい，生活圏に至るのか？
- モデル → 放射性核種の移行のふるまいを数式で表現**（様々な仮定を置いて簡略化）**
- データセット → モデルに入力する数値

14. **基準値**

- IAEAやICRPより地層処分向けの基準案は提示されている
- 諸外国では，規制機関より，基準が示されている
- 日本国内では，規制庁から地層処分向けの基準は示されていない

国際機関/諸外国における安全評価シナリオの取り扱い

シナリオの取り扱いについて

- 発生可能性ごとにシナリオを区別してとりあつかう（IAEA*1/ICRP*2/諸外国*3～*10）
- 発生可能性を有する自然事象の変遷を考慮したシナリオは，予測される変遷とそれに対して合理的な変動を考慮した変遷を含む（IAEA*1/ICRP*2）
- 発生可能性が極めて低い自然事象や人為事象は処分施設の頑健性を評価するために使用できる（IAEA*1/ICRP*2）

基準値の取り扱いについて

- 発生可能性を有する自然事象に基づいたシナリオ（最適化を確認するためのシナリオ）
  - 線量拘束値0.3mSv/y，またはリスク拘束値（10^{-5}/y）を基準（IAEA*1/ICRP*2）
  - 諸外国においては，0.25mSv/y以下の基準値を設定*3～*10
- 発生可能性が極めて低いシナリオ
  - 共通的な考え方は存在せず，線量基準値を設定しない場合と，設定する場合に分けられる。
  - 設定する場合，最適化されているかを確認するシナリオに対し，本シナリオは発生可能性が数桁程度小さいとして設定している。（フランス*10：確定的影響が発生する可能性を有する線量，フィンランド*9：期待値＜0.1mSv/y，または，確定的影響（0.5Sv））

線量拘束値
あるひとつの行為に関係する特定の線源（たとえば廃棄物処分場）からの被ばく線量をできるだけ低く（最適化）するための目標となる制限値をいう（宮原ほか，2006）。
宮原要，加藤智子（2006）：地層処分の安全規制に関する動向－原則，基準と適合性に関する主な論点を中心に－，JAEA，JAEA-Review 2006-030.

評価の枠組み（シナリオ区分，めやす線量）

■ ICRP等の国際機関の指針を基本にシナリオ区分とめやす線量を設定

発生可能性：科学的に想定し得る

シナリオ区分	各シナリオの定義	仮のめやす
基本シナリオ	●適切なサイト選定とそのサイトの地質環境条件を考慮した処分場の設計によって期待する安全機能を発揮できるように構築された地層処分システムに対して**発生する可能性が最も高いと想定されるシナリオ→（もしも被ばくが起きるとすれば，そのようなことをもたらす発生の可能性が高いとみなすべきもの）**	**安全性の確認：300μSv/y*2**（安全性を確認するめやす線量として線量拘束値を設定） 基本シナリオに対する事業者としての努力目標：10μSv/y*2（諸外国の安全規制に適用されている基準の最小値を設定）
変動シナリオ	●基本シナリオに対して，科学的知見に基づいて合理的に設定できる不確実性を考慮したシナリオ	

評価の枠組み（シナリオ区分，めやす線量）

発生可能性：極めて低い

シナリオ区分	各シナリオの定義とめやす基準の考え方	仮のめやす
稀頻度事象シナリオ	● 適切なサイト選定とそのサイトの地質環境条件を考慮した処分場の設計によって期待する安全機能を発揮できるように構築された地層処分システムに対しては発生可能性が極めて小さいと考えられる自然事象にかかわるシナリオ ● このようなシナリオを想定したとしても，著しい放射線学的影響がないことを示すためのシナリオであり，ICRPが示している同様のシナリオに対する被ばく状況の参考値の幅またはリスク拘束値を適用	20～100mSv*2（1年目） 1～20mSv/y*2（2年目以降）
人間侵入シナリオ	● 地層処分システムは本来的に人間侵入が生じる可能性を最小限とするようにサイトを選定し処分場を設計することによって構築されていることから，人間侵入シナリオが生ずる可能性は極めて小さい ● その発生を想定したとしても，著しい放射線学的影響がないことを確認するためのシナリオであり，ICRPが示している同様のシナリオに対する被ばく状況の参考値の幅またはリスク拘束値を適用	20～100mSv*2（1年目） 1～20mSv/y*2（2年目以降）

安全評価で対象とすべき評価期間

- 評価期間設定の観点*
  1. 一般公衆に対する評価線量が最大となる時期
  2. 時間の経過に伴い増大する評価の不確実性
  3. 廃棄体の放射能の低下
  4. 緩慢なプロセスおよび稀な事象の影響を検討できること
  5. ステークホルダーの懸念に応えられること
- 包括的技術報告書では
  - 最大の線量が現れる時期が確認できるように計算結果を提示

*：原子力安全委員会（2000）：高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第1次 報告）
：IAEA（2011）：Disposal of Radioactive waste, Specific Safety Requirement SSR-5
：OECD/NEA（2009）：Considering timescales in the post-closure safety of geological disposal of radioactive waste.

安全評価の考え方と枠組み（後半）

地層処分事業における技術人材の育成
2019年度人材育成セミナー

2020年1月10日
於　成田ビューホテル

吉田　芙美子
原子力発電環境整備機構（NUMO）

本講演資料は、使用許諾等が得られていない内容や原典図表・データが含まれている 可能性があります。二次利用をしないようにお願いします。

安全評価の方法論

- シナリオ作成と解析ケースの設定
- 線量評価

設定手順：ボトムアップアプローチvsトップダウンアプローチ

■ボトムアップアプローチ

- 安全に関するFeature, Event, Processを準備（FEP：地層処分システムの各要素の特性，特性に影響を与える事象，地層処分システムの時間的変遷の略）
- 処分システムに影響を与えるFEPを選定し、全ての組み合わせを検討して、安全に関するシナリオを作成
- 考慮しなければならない全てのFEPを対象にできる！
- 重要でないFEPもすべて考慮しなければならない。

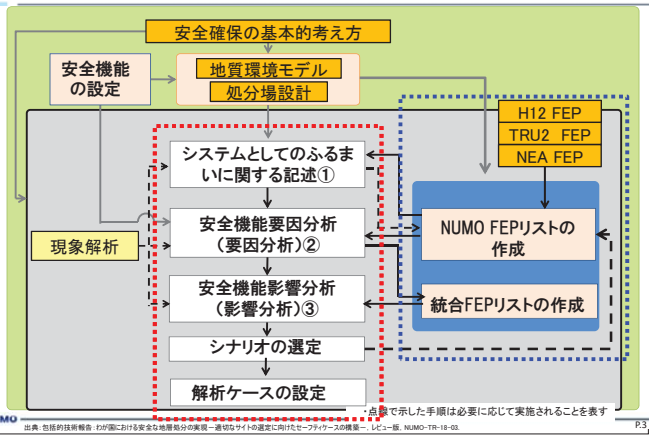
■トップダウンアプローチ

- 安全機能の発揮のされ方に着目して地層処分システムの変遷を分析
- 分析結果をもとに安全に関するシナリオを作成
- 安全に関するシナリオを効率的に作成できる！
- 考慮しなければならない事象を本当に全て拾えているのか？

ハイブリッドアプローチ

*：Radioactive Waste Management (2012) "Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste".

包括的技術報告書におけるハイブリッドアプローチ



・点線で示した手順は必要に応じて実施されることを表す

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

システムとしてのふるまいに関する記述 ①

- システムの状態が時間・空間的にどのように変遷するか
- 時間スケール・空間スケールで分けてストーリボードとして記述

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

安全機能要因分析 ②

- 処分場の安全機能に関連する物理的・化学的性質などを状態変数として抽出
- 状態変数に対して影響を及ぼす可能性があると考えられる要因をFEPリストから抽出して安全機能と関連付け

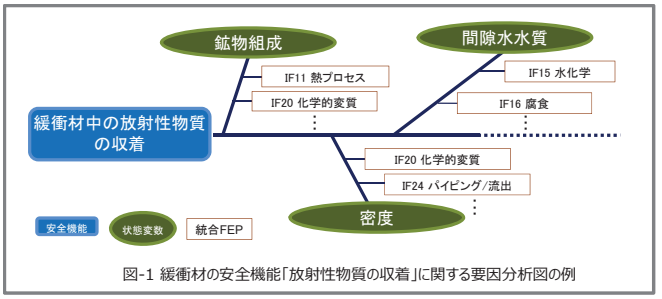
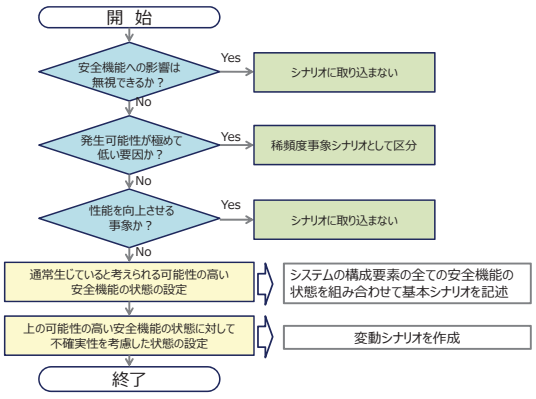


図-1 緩衝材の安全機能「放射性物質の収着」に関する要因分析図の例

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

FEPによる安全機能への影響分析

③



シナリオの選定と解析ケースの設定

- 影響分析における，発生可能性の分析に基づく各FEPのシナリオ解析上の取り扱い区分の欄への記述を統合し，安全評価期間における主要な時間枠ごとに，構成要素の安全機能に関する状態変遷とそれに応じた核種移行プロセスを整理したうえでシナリオを記述する。
- シナリオの記述に対応して，適用する核種移行解析モデルとデータセットの考え方を取りまとめる。

詳しくは，包括的技術報告書6.3を参照

解析ケース設定の例（閉鎖後から放射性核種移行開始まで）

期間：閉鎖後から放射性核種の移行の開始まで

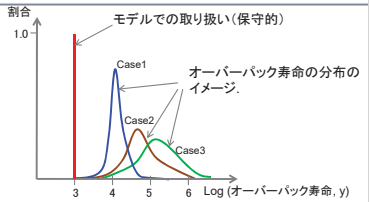
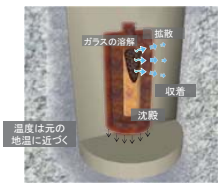


図 オーバーパック寿命の頻度分布の概念図

シナリオ	対応するモデル／データ
•緩衝材は100年程度で水で満たされる。 •廃棄体からの発熱により近傍の温度は一時上昇。1000年経過後には，ほぼ元の地温に近づく。 •オーバーパックは，坑道内に残存する酸素により表面から12mm程度腐食し，その後の還元環境下では腐食速度が低下し，1000年までに6mm程度進行する。最新の知見に基づけば，現在の設計厚さ190mmでは17,000年程度閉じ込め機能を維持する可能性が示唆されている。	•オーバーパックの寿命を，これまでに国際的なレビューを受けた値である1000年とし，この時期に4万本のオーバーパックがいっせいに閉じ込め機能を失うとする。

解析ケース設定の例（放射性核種の移行の開始以降）

期間：放射性核種の移行の開始以降



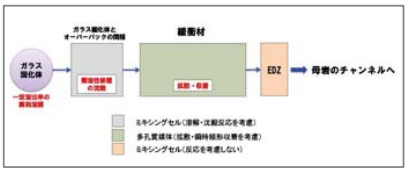
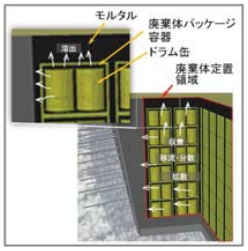


図 人工バリア中の核種移行解析モデルの概念図

シナリオ	対応するモデル／データ
•オーバーパックの開口部から侵入した地下水にガラス固化体が接触し，放射性核種がガラスの溶解とともにゆっくりと地下水に溶解。 •放射性核種の溶解は溶解度を上限として抑制。 •地下水中の放射性核種は緩衝材中を拡散により移行する。この際，放射性核種は鉱物に収着し移行が遅延される。 •緩衝材中を移行した放射性核種はやがて母岩に移行する。	•放射性核種の移行を一次元で表現。 •オーバーパックの存在は考慮しない（移行の抵抗なし）。 •ガラスの溶解速度は長期の浸出試験をふまえて設定。 •ガラス固化体の近傍での放射性核種の沈殿を考慮。 •緩衝材中の収着と拡散を考慮。

解析ケース設定の例　(TRU等廃棄物ニアフィールド)

期間：放射性核種の移行の開始以降



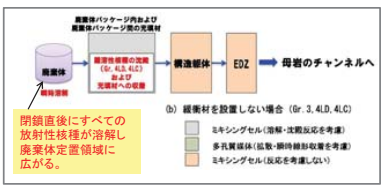


図 人工バリア中の核種移行解析モデルの概念図
（TRU等廃棄物処分場 緩衝材敷設なしのケース）

シナリオ	対応するモデル／データ
•廃棄体パッケージが地下水に接触し，廃棄体から溶出した放射性核種は，廃棄体や廃棄体パッケージ内に充填されたセメントに収着しつつ，母岩に向かい移行する。	•1次元のモデルで表現。 •廃棄体定置領域における核種の移行挙動を簡略化し，閉鎖後にすべての放射性核種が瞬時に溶解し，廃棄体定置領域に広がる。

シナリオと対応するモデルおよびデータ (HLW,TRU等廃棄物,処分場／広域スケール)

時期：放射性核種の移行の開始以降

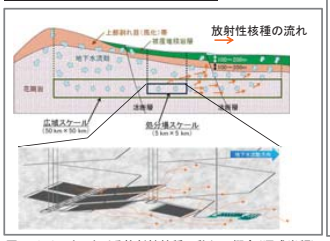


図-1 シナリオにおける放射性核種の移行の概念（深成岩類）

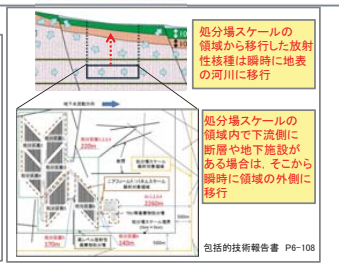


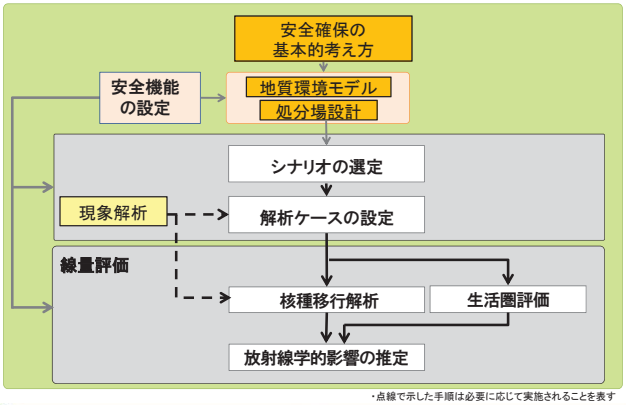
図-2 モデルにおける放射性核種の移行の取り扱い（深成岩類）

シナリオ	対応するモデル／データ
•放射性物質は，岩盤の亀裂ネットワーク中の移流・分散によって処分場の周囲に移行。 •処分場スケールの領域に大規模な断層などがある場合は，地下水の流れが変化し，一部の放射性核種はこの領域の外側に移行する。広域スケールの領域に移行した核種は地表まで到達する大規模な活断層などに沿って生活圏に移行する。	•処分場スケールの領域中の移行距離は，下流側の大規模な断層や地下施設までの距離とする。これらがない場合には，領域の下流端まで。 •処分場スケールの領域から外側に移行した放射性核種は瞬時に河川※に移行。河川への入り口は1箇所に設定（空間的な広がりを無視）。 ※河川流量：32m³/s（全国の一級河川の平均的な値（対数平均値））

安全評価の方法論

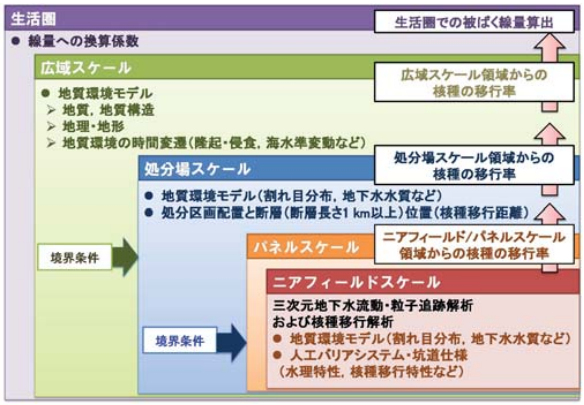
- シナリオ作成と解析ケースの設定
- 線量評価

線量評価の流れ



・点線で示した手順は必要に応じて実施されることを表す

空間スケールに対応した核種移行解析の概念

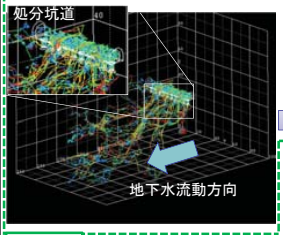


出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

核種移行解析モデル・データセットの設定

Partridgeによる粒子追跡解析

三次元の粒子追跡解析により下流端における粒子の移行率（$\phi_{3D}(t)$）を算出



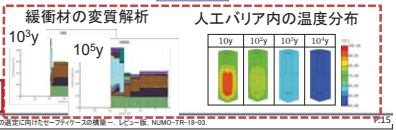
17.にて

粒子の移行率を一次元マルチチャンネルモデルで近似的に表現

$\phi_{3D}(t)$を各チャンネルの透水量係数から算出した移行率$\phi_i(t)$とチャンネルの比率W_iの積の和で近似してマルチチャンネルモデルを構築

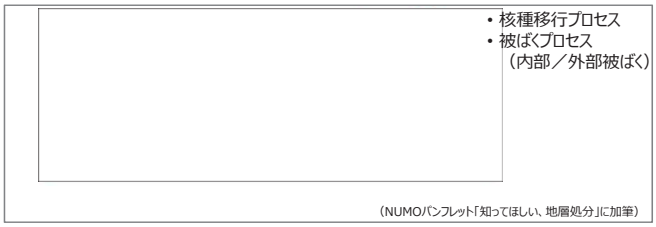
18.にて

データベース等を使用したパラメータの設定



16. 19.にて

生活圏評価のモデル



- 核種移行プロセス
- 被ばくプロセス
（内部／外部被ばく）

（NUMOパンフレット「知ってほしい、地層処分」に加筆）

- 核種移行プロセスのモデル化
- 人間の生活様式に基づく被ばく形態のモデル化
- モデルのアウトプット：核種ごとの線量への換算係数（[Sv/y] / [Bq/y]）

※GBI (Geosphere- Biosphere Interface)

生活圏評価

地表における核種移行プロセスの設定

人間の被ばくプロセスの設定

図-1　生活圏評価における核種移行プロセスの例
（河川水GBI※・温暖気候・農業従事者グループの場合）

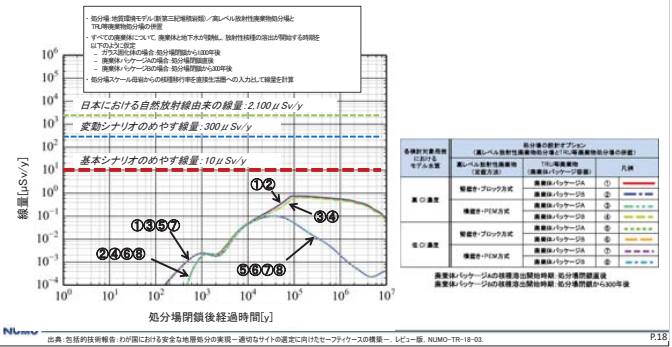
図-2　生活圏評価における被ばくプロセスの例
（河川水GBI・温暖気候・農業従事者グループの場合）

※　GBIを河川とした場合

放射線学的影響の推定①：めやす線量との比較

- 基本シナリオに対応した解析ケース（高レベル放射性廃棄物＋TRU等廃棄物）

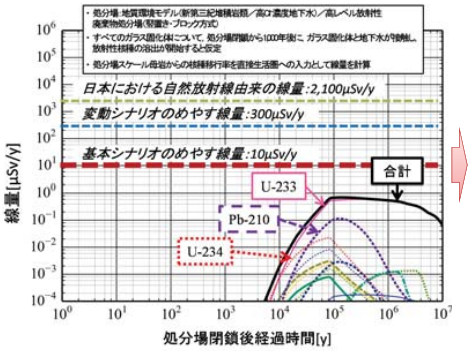
高レベル放射性廃棄物とTRU廃棄物の併置処分でも，基本ケースの最大線量の評価結果は，「めやす」として仮設定した目標値(年当たり10 μSv)を下回る



出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

放射線学的影響の推定②：支配核種の分析

- 基本シナリオに対応した解析ケース（高レベル放射性廃棄物）



評価上重要な核種を把握

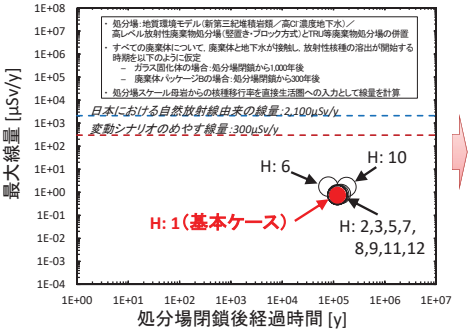
出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

変動シナリオに対応する解析ケース（変動ケース）一覧

No.	名　　称
1	基本ケース
2	ガラス溶解速度不確実性ケース
3	ハル・エンドピース腐食速度不確実性ケース
4	構造躯体の劣化不確実性ケース
5	硝酸プルームの広がりに関する不確実性ケース
6	母岩の割れ目の連結性に関する不確実性ケース
7	緩衝材への核種の収着分配係数の不確実性ケース
8	緩衝材中の核種の実効拡散係数の不確実性ケース
9	母岩への核種の収着分配係数の不確実性ケース
10	母岩中の核種の実効拡散係数の不確実性ケース
11	溶解度設定における温度影響の不確実性ケース
12	溶解度制限固相の熱力学データの不確実性ケース

放射線学的影響の推定③：不確実性を把握

- 変動シナリオに対応した解析ケース（包括的技術報告書）



重要な不確実性を把握

出典：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，レビュー版，NUMO-TR-18-03.

まとめ

- シナリオの発生可能性を勘案して、基準値を設けることが一般的であり、包括的技術報告書はそれにならって、めやすとなる線量を仮設定している
- ハイブリッドアプローチによるシナリオ構築が一般的であり、包括的技術報告書はそれにならっている
- 三次元の粒子追跡解析や変質解析等に基づいて核種移行解析モデルと核種移行パラメータを設定する方法を包括的技術報告書では採用している
- 包括的技術報告書における線量結果は、仮設定した基準値を満たしており、現在想定する処分システムで安全の見通しが得られた

スライド6の参考文献情報

- *1:IAEA（2011）："Disposal of Radioactive waste", Specific Safety Requirement SSR-5
- *2:ICRP（2013）：Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste. ICRP Publication 122.
- *3:NRC（2009）：10 CFR Part 63 DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES IN A GEOLOGIC REPOSITORY AT YUCCA MOUNTAIN, NEVADA
- *4:Environmental Agency and Northern Ireland Environment Agency（2009）：Geological disposal facilities on land for solid radioactive wastes, Guidance on requirements for authorisation.
- *5:ENSI（2009）：Specific design principles for deep geological repositories and requirements for the safety case, Guideline for Swiss nuclear installations, G03/e.
- *6:SSM（2008）：The Swedish radiation safety authority' s regulations concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste, SSMFS2008:21.
- *7: SSM（2008）：The Swedish Radiation Safety Authority' s Regulations Concerning the Protection of Human Health and the Environment in Connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste, SSMFS2008:37.
- *8: BMU（2010）：Safety requirements governing the final disposal of heat-generating radioactive waste.
- *9: STUK（2013）：Disposal of nuclear waste, STUK YVL D.5.
- *10: ASN（2008）：Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde.

2020年1月10日(金)
地層処分に関する 人材育成セミナー

16.処分場構成要素の状態の変遷(現象の理解)

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

大和田 仁

本公演資料は、使用許諾等が得られていない内容や原典図表・データが含まれている可能性があります。二次利用しないようにお願いします。

RWMC

本講義のポイント

本講義では、処分場が建設された後、核種が移行していくまでの過程での構成要素(人工バリア)の変遷過程について述べるとともに、各要素の変遷にもとづく処分場の状態変化および、それらを考慮した安全評価シナリオの成り立ちについて述べる。

これらは、各構成要素単独では成立せず、複雑な相互作用を伴うものであるが、安全評価においては、それらを様式化したシナリオを構築し、処分場の性能を示していくため、どのような現象を考慮するか/しないかの選択や、機能の変遷をどのように考慮していくかを判断するための基礎情報として、各要素、材料などの変遷を理解することが重要である。

本講義がその一助となれば幸いである。

RWMC

安全評価の流れと本講義の範囲

本講義では、地質環境・処分場の設計をもとに、シナリオの選定や解析ケースの設定へと繋がる処分場の状態設定に係る現象の理解について述べる

安全確保の基本的考え方

RWMC

本日の内容

1. 変遷とは?
2. 処分場(とくに地下)の環境の変遷の例
3. 処分場構成要素の変遷と環境との関係
   - Ⅰ 処分場の構成要素(例)とその機能
   - Ⅱ 個別の要素の変遷とその影響(材料ごとに)
     - A. セメント系材料の変遷
     - B. ベントナイト系材料の変遷
     - C. 金属材料の変遷
     - D. ガラス固化体の変遷
     - E. TRU廃棄物
4. 各構成要素間の相互作用
   - Ⅰ セメントーベントナイト相互作用
   - Ⅱ その他の相互作用
5. 各構成要素の変遷に伴う処分場(処分坑道)の変遷
6. 現象の理解と安全評価シナリオ

本発表は、以下に示す経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業の成果を含んでいます。

RWMC

本発表は、以下に示す経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業の成果を含んでいます。

平成17年度 地層処分技術調査等TRU廃棄物関連処分技術調査 人工バリア長期性能確証試験
平成17年度 地層処分技術調査等TRU廃棄物関連処分技術調査 廃棄体開発調査
平成18年度 地層処分技術調査等TRU廃棄物関連処分技術調査 人工バリア長期性能確証試験
平成20年度 地層処分技術調査等委託費TRU廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発
平成23年度 地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発
平成24年度 地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発
平成24年度 地層処分技術調査等事業TRU廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発
平成25年度 地層処分技術調査等事業 TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発
平成26年度 地層処分技術調査等事業 TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発
平成29年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発

RWMC

1. 変遷とは?

☆ **時間の経過に伴って**移り変わること。(大辞林 第三版)
- 類語 : 推移、変動、変転

地層処分においては?

時間とともに生じる
- 環境の変化
  - 飽和⇔不飽和
  - 酸化雰囲気→還元雰囲気
  - 海水系地下水⇔降水系地下水
  - 高温⇔低温
- 状態の変化
  - セメント系材料のRegion Ⅰ～Ⅲ
  - 緩衝材のNa型⇔Ca型
  - 金属の腐食態⇔不動態
- 性能の変化
  - 透水係数
  - 拡散係数
  - 分配係数

使われる材料や**要素の状態の変化**によって生じる

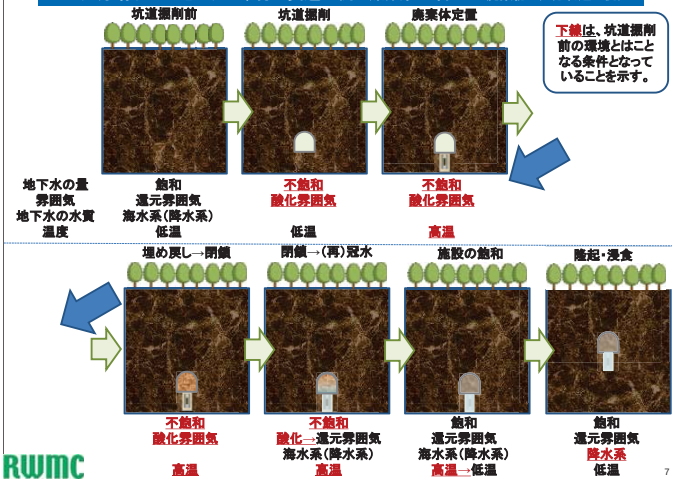
☆ これらは、ほとんどが**相互に関連している**ため、独立して議論することは難しい。

RWMC

安全評価の流れと本講義の範囲

本講義では、地質環境・処分場の設計をもとに、シナリオの選定
や解析ケースの設定へと繋がる処分場の状態設定に係る現象の理解について述べる

2. 処分場(とくに地下)の環境の変遷の例 (沿岸部での高レベル廃棄物の処分坑道の例)



2. 処分場(とくに地下)の環境の変遷

☆ 処分坑道(地下300m以深)の環境の変化

処分場建設前は、地下水で満たされている(飽和状態)。還元雰囲気(Eh≒-500mV)、地温＝地表温度＋最大3K/百m地下水質(塩濃度)は周辺の地質環境によって定まる。

処分場の建設のため、空洞(坑道)を設けて換気する(作業環境維持のため)と、坑道内は持ち込まれた大気によって酸化雰囲気に変わるとともに、坑道内の温度もそれに応じてやや低下する。流入してくる地下水は排出される。

廃棄体が発熱性を有する場合には、その影響で廃棄体定置後には坑道内の温度が上昇する。

坑道への廃棄体の定置が終了し、換気および排水が停止され、埋め戻しが行われると、地下水の流入によって坑道内の空隙が減少し、大気が減少する。併せて、廃棄体や構造材として持ち込まれた金属の酸化腐食によって酸素が消費され、次第に還元雰囲気に変化する。

処分場の閉鎖・(再)冠水後は、坑道内の酸素が消費され、処分場建設前の環境に次第に近づいていく。

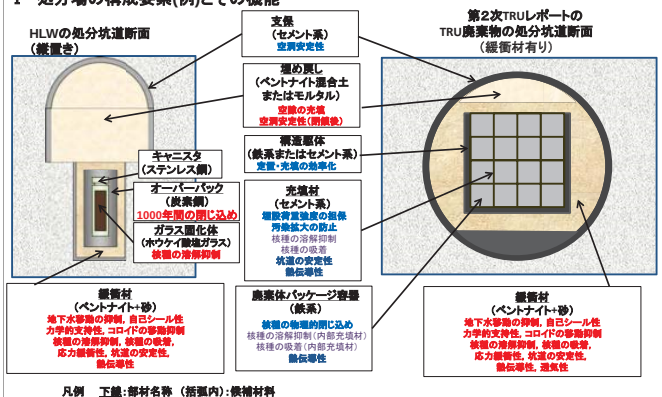
より長期的には、隆起・浸食等によって地下水質や温度がゆっくりと変化していく。

安全評価の流れと本講義の範囲

本講義では、地質環境・処分場の設計をもとに、シナリオの選定
や解析ケースの設定へと繋がる処分場の状態設定に係る現象の理解について述べる

3. 処分場構成要素の変遷と環境との関係

Ⅰ 処分場の構成要素(例)とその機能



凡例　下線:部材名称　(括弧内):候補材料
太字:設計で要求している機能
赤字:性能評価において考慮する機能(閉鎖後に期待する機能)
紫字:安全評価において必須ではないが期待できる機能
青字:建設・操業時に期待される機能

安全評価の流れと本講義の範囲

本講義では、地質環境・処分場の設計をもとに、シナリオの選定
や解析ケースの設定へと繋がる処分場の状態設定に係る現象の理解について述べる

Ⅱ 個別の要素の変遷とその影響
※ここでは、個別の要素毎にその変遷挙動とその影響について述べる。(相互の影響や時間軸との関係は後述)

A. セメント系材料の変遷
・処分場の建設時、および内部の構造材製作時に施工されたセメント系材料は、セメント鉱物の水和反応によって硬化し、100日以上に期間、強度が上昇し続ける。

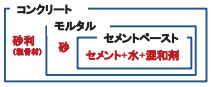
・セメント系材料は、支保、インバートの他、TRU廃棄物の容器内および容器間の充填材として使用される可能性がある。

・セメント系材料の変遷の原因もうち化学的なものは、主にa.地下水との接触による可溶性成分の溶解(溶脱)と、b.廃棄物の発熱による熱変質、c.その他の廃棄物成分や地下水成分との反応である。また、力学的には、d.他の要素から受ける応力や地圧等の応力による変形も考えられる。

・セメント系材料には、構造材としての耐力(強度)による空洞安定性の確保の他、核種の溶解抑制、核種の収着、熱伝導性等の機能が期待できるが、これら各機能も上記変遷に伴って変化する。

・セメント系材料の溶脱に伴って、周辺の地下水(間隙水)の組成も変化するため、他の要素の変化の原因になる。

Ⅱ 個別の要素の変遷とその影響
A. セメント系材料の変遷



a. 水和硬化 (変質前の初期の状態に係る)
・・・・ セメント系材料はプレキャスト材として持ち込む場合を除いて現場で打設する。
・・・・ セメント系材料は、クリンカー鉱物が水と反応して、水和物を生成することで硬化する。
→ 硬化体の物性は、セメントの種類、配合、養生時の環境(温度・湿度)の影響を受ける
→ 水和反応は、硬化後も継続するため、数ヶ月から数年程度にわたって、強度の増進、硬化収縮等の変化が継続する。

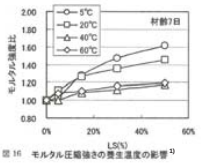


図 16 モルタル圧縮強さの養生温度の影響[1)]

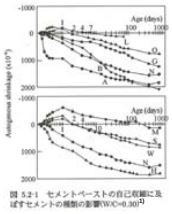


図 5.2-1 セメントペーストの自己収縮に及ぼすセメントの種類の影響(W/C=0.30)[1)]

出典:セメント硬化体研究委員会報告書(2001)

Ⅱ 個別の要素の変遷とその影響
A. セメント系材料の変遷
b. 地下水との接触による可溶性成分の溶解(溶脱)
溶脱する可溶性成分・・・水和物に取り込まれず、間隙に残存するアルカリ金属(Na, K)
水和物のうち、溶解度の高い鉱物
$Ca(OH)_2$→C-S-H(高Ca/Si比)→AFm*、AFt**
→ C-S-H(低Ca/Si比)の順に溶脱する

①アルカリ性成分の溶脱による、セメント系材料中の間隙水のpHの低下と、溶脱したアルカリ成分の浸出→周辺の間隙水のpHの上昇

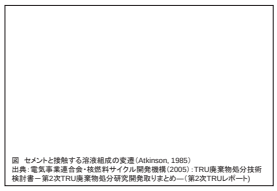


図 セメントと接触する溶液組成の変遷(Atkinson, 1985)
出典:電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構(2005):TRU廃棄物処分技術検討書ー第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめー(第2次TRUレポート)

アルカリ金属及び水和物(中のカルシウム)の溶脱により、セメント系材料の間隙水のpHは徐々に低下する。一方で、セメント系材料から浸出したアルカリ成分やカルシウムは周辺の間隙水に供給される。

→ 他の要素(主に緩衝材)のアルカリ変質の原因になる
※ 緩衝材のアルカリ変質については後述

＊:AFm アルミノフェライトモノサルフェート相
＊＊:AFt アルミノフェライトトリサルフェート相(Ettringite)

Ⅱ 個別の要素の変遷とその影響
A. セメント系材料の変遷
b. 地下水との接触による可溶性成分の溶解(溶脱)

②水和物の溶脱による空隙率の上昇
→透水係数、拡散係数の増大
→水和物の溶脱による強度の低下

・地下水との接触に伴って、セメント系材料から可溶性成分が溶脱すると、溶解した鉱物の体積分だけ、空隙が増加する(下左図)。セメント系材料の透水および拡散は、内部の連通空隙を通じて生じるため、溶脱の進行によって、空隙率が高くなった領域の拡散係数、透水係数は増大する(下中央図)。また、一般にセメント系材料の圧縮強度は空隙率の増大に応じて低下(下右図)するため、溶脱が進行すると、セメント系材料を用いた構造物の耐力も低下する。

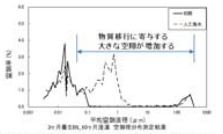


図 人工海水への10ヶ月浸漬前後の空隙径分布の変化(普通セメントペースト W/C=50 のブロック試験体)

図 セメント系材料の間隙率と物質移行特性の関係
出典:電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構(2005):TRU廃棄物処分技術検討書ー第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめー(第2次TRUレポート) 模擬資料2-4

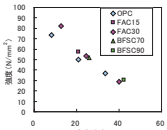


図 セメント系材料の全空隙率と圧縮強度の関係

Ⅱ 個別の要素の変遷とその影響
A. セメント系材料の変遷
c. 廃棄物の発熱等による熱変質
熱変質による変化
C-S-Hが結晶化する≒tobermoriteまたはJennite が生成
→ セメント系材料の間隙水のpHの低下
→ 結晶相の変化による分配係数の変化(ほとんどないと言われている)
→ 収縮による空隙率の上昇
→ 結晶成長による強度上昇

セメント系材料の間隙水のpHの低下
熱影響によって、$Ca(OH)_2$の減少と、C-S-Hの低Ca/Si比化及び結晶化(下左図)が起こり、間隙水のpHが低下する(下中央および右図)

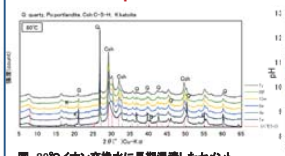


図 80℃イオン交換水に長期浸漬したセメントペーストのXRD分析結果

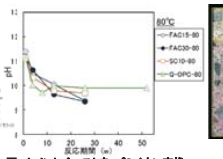


図 セメントペーストを80℃イオン交換水に浸漬した際の浸漬液のpHの変化

図 約50年間50~80度の熱を受けたコンクリートのフェノールフタレイン塗布後の色相

Ⅱ 個別の要素の変遷とその影響
(相互の影響や時間軸との関係は後述するが、アルカリ変質についてはここで述べる)

B. ベントナイト系材料の変遷
・内部の構造材製作時や廃棄体定置後の埋め戻し時に施工されたベントナイト系材料は上部に設置された施設(TRU廃棄物の処分坑道の構造躯体や定置された廃棄体パッケージ、充填材、埋め戻し材など)の自重によって偏かに沈下する。そのため、その沈下を考慮した設計、およびベンナイト混合率等の設定を行う必要がある。

・ベントナイト系材料は地下水の浸透に伴って膨潤して、緩衝材施工時に残存する隙間等を充填(自己シール性)し、処分場内を拡散場に保ち、放射性核種の移行を遅延させる。同時に内部からのコロイドの移行を防止する。

・HLWの処分孔の緩衝材として設置されたベントナイト系材料は、処分孔への地下水の流入により、一部はエロージョンによってパイピングが発生する可能性がある。
(TRU廃棄物の処分場での緩衝材のエロージョンについては、これまで検討されていない)

・ベントナイト系材料の変遷の原因のうち化学的なものは、主にa.セメント系材料からの浸出成分によるアルカリ変質、b.廃棄物の発熱による熱変質、c.その他の廃棄物成分や地下水成分との反応である。

Ⅱ 個別の要素の変遷とその影響

B. ベントナイト系材料の変遷

a. ベントナイト系材料の特徴

① 膨潤による空隙の充填

ベントナイトに含まれるモンモリロナイトの性質により、水の浸透に伴って膨潤し、空隙や構造物間の狭隘な隙間を充填するとともに、施設内の地下水の移動を抑制する。

長期的には、拡散場を維持することにより、核種の移行を抑制するとともに、緩衝材よりも内側で発生したコロイドの移動を防止する

② ベントナイト系材料の機能と有効粘土密度（有効モンモリロナイト密度）との関係

ベントナイト系材料（特に緩衝材）の主な機能である拡散場の維持（低透水性）機能は、ベントナイト系材料に含まれるベントナイト（の主成分であるモンモリロナイト）の正味の密度（有効粘土密度）によって変化する。また、後述するベントナイトのイオン型の変化や、間隙水のイオン強度でも変化する。

このような条件を加味しても、長期にわたり機能を維持できるよう設計する必要がある。

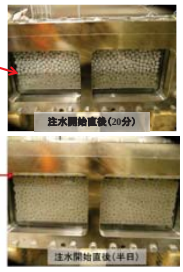


図3.2.1.2-4 各種ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係
出典：電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構（2005）：TRU廃棄物処分技術検討書－第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ－（第2次TRUレポート）

Ⅱ 個別の要素の変遷とその影響

B. ベントナイト系材料の変遷

b. 自重による沈下

第2次TRUレポートの記述

・・・・設定したが，底部緩衝材には，廃棄体，充填材，構造躯体の荷重が作用することから，沈下を考慮した厚さの設定を行うこととした。第1次TRUレポートにおける圧密沈下の検討では，乾燥密度1.6Mg/m3のとき圧密沈下量に対する余裕しろとして0.2mが設定されていることから，底部緩衝材の厚さは1.2mと設定した。

緩衝材の沈下を考慮した施設設計例

表3.2.1.2-3 緩衝材の仕様例
出典：電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構（2005）：TRU廃棄物処分技術検討書－第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ－（第2次TRUレポート）

Ⅱ 個別の要素の変遷とその影響

B. ベントナイト系材料の変遷

c. 湧水・流入水によるエロージョン（パイピングの発生の可能性）

地下水の流入時の流量によっては、緩衝材に含まれる粘土成分が削り取られ（エロージョン）て、水みちができる現象（パイピング）が起こる可能性がある。パイピングの発生は、緩衝材（および埋め戻し材）の機能の一つである地下水の移動抑制機能を低下させる。

（SKBでは縦置きの処分孔への湧水量が基準値を超える場合にはその処分孔への定置を行わないこととしている。）

Ⅱ 個別の要素の変遷とその影響

B. ベントナイト系材料の変遷

d. セメント系材料から浸出する間隙水の影響

① カルシウム型化

セメント系材料の変遷の項で述べたとおり、セメント系材料に含まれる可溶性成分の溶解によって間隙水に供給されるカルシウムによって、**ベントナイト系材料に含まれるモンモリロナイトはカルシウム型化する**。

カルシウム型化の影響

モンモリロナイトの膨潤性（膨潤圧・膨潤量）および物質移動特性（拡散係数・透水係数）は、相関イオンの種類（イオン型）によって異なっている。

そのため、セメント系材料からの浸出成分の影響を受けてカルシウム型化が起こると、ベントナイト系材料の特性も変化する。

カルシウム型化の場合、右図にあるように**透水係数・拡散係数は僅かだが（数倍程度）増大する**。

また、膨潤圧も変化する。

図3.2.1.2-5 Ca型化ベントナイトの有効粘土
出典：電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構（2005）：TRU廃棄物処分技術検討書－第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ－（第2次TRUレポート）

Ⅱ 個別の要素の変遷とその影響

B. ベントナイト系材料の変遷

d. セメント系材料から浸出する間隙水の影響

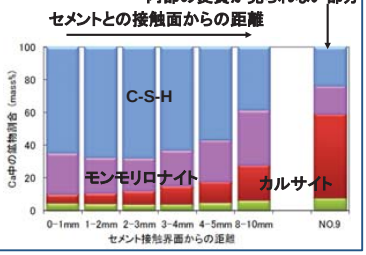
② スメクタイト（モンモリロナイト）の溶解

セメント系材料から浸出成分によってアルカリ性になった間隙水により、**スメクタイトは溶解する。また、反応の結果生じる主な2次鉱物はC-S-Hである。**

スメクタイトの溶解の影響

・ベントナイト系材料に含まれるモンモリロナイト量が減少する。

そのため、間隙比及び全体の密度が変化しなかったとしても、モンモリロナイトの正味の密度（有効モンモリロナイト密度）が低下するすため、主な機能である止水性が低下する。



Ⅱ 個別の要素の変遷とその影響

B. ベントナイト系材料の変遷

d. セメント系材料から浸出する間隙水の影響

③ 2次鉱物の生成と密度の変化

セメント系材料から浸出成分によってアルカリ性になった間隙水により、スメクタイトが溶解する一方で、反応の**結果2次鉱物が生成する**。セメント系材料から供給されるカルシウムとの反応で生成するC-S-Hの他、クリノプチロライトやヒューランダイトなどの生成が考えられる。

2次鉱物の析出による密度の変化は、生成する鉱物種（間隙水組成、温度によって異なる）によって異なるため、その影響も異なる。

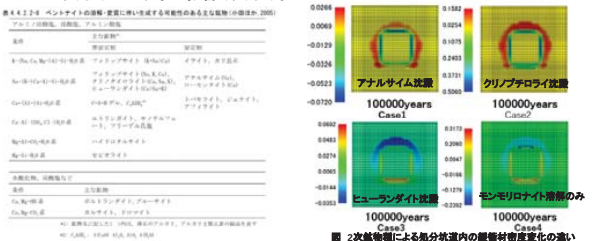


図 2次鉱物種による処分坑道内の緩衝材密度変化の違い

3. 処分場構成要素の変遷と環境との関係

Ⅱ　個別の要素の変遷とその影響

B.　ベントナイト系材料の変遷

e. 熱変質

ベントナイト系材料の熱変質に関しては、短期・長期の変質試験が多く行われてきた。その結果、**100℃を下回る温度では変質が起こりにくい**ことが示されている。

f. 地下水成分や廃棄物成分との反応

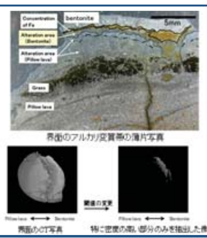
海水系地下水に含まれる、**カリウムやマグネシウムによっても、緩衝材のイオン型の変化が起こるほか、アルカリとの重畳による変質が起こることが懸念されて**おり、現在研究が進められている。

アルカリ＋鉄による2次鉱物析出の例

フィリピン　ルソン島でのナチュラルアナログサイトでは、ベントナイト鉱床を貫いた亀裂をアルカリ地下水（pH≒11）が貫通していた場所を発見した。

亀裂は、アルカリに加えて鉄が供給された結果として、**鉄サポナイトが生成することで閉塞**していた。

また、このサイトでのベントナイト変質部（厚さは数cm程度）で観察されたゼオライト鉱物は主にクリノプチロライト、ヒューランダイトであった。



3. 処分場構成要素の変遷と環境との関係

Ⅱ　個別の要素の変遷とその影響

C. 金属材料の変遷

・地層処分では、オーバーパックやTRU廃棄物のパッケージ容器の他、放射化した金属廃棄物（TRU廃棄物のグループ2（後述））、コンクリートの補強材（鉄筋）、構造躯体など**多くの金属が用いられる。**

金属材料は、周囲の環境（地下水のEh, pH, 温度, 塩濃度など）や、周囲から受ける応力などによって異なる形態で腐食する。

（1）　地層処分の処分坑道に持ち込まれる可能性のある金属材料

HLWでは、ガラス固化体を収納するキャニスタ、オーバーパック、TRU廃棄物の地層処分では、容器材料やグループ2の放射化金属廃棄物の他、坑道内の構造材料として金属が多く使われる。これら金属材料は、内包する**廃棄物の漏洩防止（閉じ込め）機能の維持の他に、腐食に伴うガス発生の原因となる**可能性があるため、その**腐食量及び腐及び腐食速度を知る**ことが必要である。

① 鉄系材料

炭素鋼：オーバーパック、TRU廃棄体パッケージ容器、鉄筋、構造躯体

ステンレス鋼：キャニスタ、TRU廃棄物（グループ2：エンドピース）

② 鉄以外の金属

ジルコニウム合金：TRU廃棄物（グループ2：燃料被覆管）

耐熱合金（インコネル）：TRU廃棄物（グループ2：被覆管内のバネ材料など）

その他の代替材料（オーバーパック、容器）：銅、チタン、ニッケル基合金

3. 処分場構成要素の変遷と環境との関係

Ⅱ　個別の要素の変遷とその影響

C. 金属材料の変遷

（2）金属の腐食の形態①

☆ 酸化腐食（酸素消費型）と還元腐食（水素発生型）

〇酸化腐食・・・酸素を消費して腐食する。建設・操業時には換気によって酸素が供給されるため、**持ち込まれた酸素が消費されるまでの期間は酸化腐食が主な腐食形態。酸素量から腐食量を推定できる。**

〇還元腐食・・・酸素が全て消費された後、酸化還元電位が水素よりも卑な（イオン化傾向が水素よりも大きい）金属では、水との反応によって水素を発生させて腐食が進行する。**地下水で満たされた環境のため腐食は停止しない。（寿命評価には腐食速度の特定が必要）**

☆ 不動態（不働態）

・不動態とは、**金属の腐食に抵抗する皮膜が表面に生成した状態**

・炭素鋼では表面にFe_2O_3が生じ（高アルカリ・還元性）、保護皮膜となった状態（高アルカリ・還元性）。

・酸化皮膜が不動態皮膜として作用するものの他に、表面に析出した鉱物が不動態皮膜として作用するもの（銅など）がある。

・塩化物イオンなどの地下水成分によって**脱不動態化**しやすくなる場合がある。

・皮膜が破壊された場合、**再不動態化が遅い／しにくい場合には局部腐食の原因**になる。

$Fe-H_2O$系の鉄の不動態領域

$Fe-H_2O$系の鉄の腐食態領域

鉄ー水系の電極電位-pH線図[1)]

1)M. Pourbaix: "Atlas of Electrochemical Equilibrium in Aqueous Solutions," Pergamon Press, p. 80 (1966)

3. 処分場構成要素の変遷と環境との関係

Ⅱ　個別の要素の変遷とその影響

C. 金属材料の変遷

（2）金属の腐食の形態②

☆ 均一腐食（全面腐食）と局部腐食

〇均一腐食・・・腐食に係る反応（酸化還元反応）が均一に起きている状態であり、金属**表面全体がほぼ同じ速度で腐食**する。

〇局部腐食・・・腐食に係る反応が不均一に起きている状態であり、局部的に腐食が進行するため、**腐食速度・腐食量と腐食深さの関係が一定ではない。（寿命評価に適さない）**

・すき間腐食・・・金属と金属、あるいは金属と非金属の合わさった、**すき間部が優先的に侵食される現象。**金属表面の電位がすき間腐食電位（Er,crev）を上回った場合に起きる。隙間内部と外側との濃度差によって腐食が進行するため、**深さ方向の腐食の進展速度の評価が難しい。その金属が置かれる環境が定まれば、孔食の評価が可能**　⇒　孔食係数による評価

・孔食・・・**不動態皮膜の破壊などの原因で、腐食に係る反応が局部的に起きる状態。**一般的に孔食電位はすき間腐食電位よりも高いため、すき間腐食感受性を持たない領域では発生しない。

・応力腐食割れ（SCC）・・・**亀裂の進行という形態をとる局部腐食**であり、変色皮膜破壊（TR）機構、活性経路腐食（APC）、水素脆化（HE）機構の三つに分類される。

応力腐食の亀裂進展機構とその特徴

機構	TR（変色皮膜破壊）	APC（活性経路腐食）	HE（水素脆化）
材料	厚い（~μm）不働態皮膜を持つ金属：Cu 合金、高温の炭素鋼／低合金鋼、ステンレス鋼、Ni 合金	薄い（~nm）不働態皮膜を持つ金属：炭素鋼／低合金鋼、ステンレス鋼、Al 合金、Ti 合金	高強度合金に多い
下限界応力	その温度での材料の降伏応力にほぼ等しい	降伏応力よりも著しく低い	材料強度の増大により低下する。切り欠き感受性が高い。
温度依存性	皮膜の厚くなる高温での例が多い	き裂進展速度の温度依存性が大きい	常温付近で最も感受性が高い
カソード防食	有効	有効	き裂進展を加速

3. 処分場構成要素の変遷と環境との関係

Ⅱ　個別の要素の変遷とその影響

C. 金属材料の変遷

（3）　炭素鋼の変遷

〇　鉄の腐食形態

・処分場建設から閉鎖・（再）冠水後、酸素が消費されるまで（酸化雰囲気）

酸素を消費して腐食：坑道内の酸素量から腐食量を算出

・処分場閉鎖・冠水後酸素が消費された後（還元雰囲気）

水を分解して腐食　：　腐食試験の結果から腐食速度を算出

・セメント影響下では？

処分場の還元環境（-500mV）では、高pH条件(pH≧11程度）では水及びFe_2O_3の安定領域に入る場合がある。　⇒　不働態化している。（孔食が起きる可能性がある）

鉄ー水系の電極電位-pH線図[1)]

水の酸化還元電位-pH線図[1)]

1)M. Pourbaix: "Atlas of Electrochemical Equilibrium in Aqueous Solutions," Pergamon Press (1966).

3. 処分場構成要素の変遷と環境との関係

Ⅱ　個別の要素の変遷とその影響

C. 金属材料の変遷

（4）　各種金属材料の腐食

表　各種金属材料の腐食形態

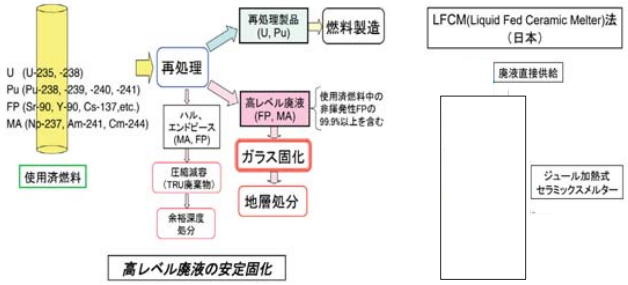
材料＼腐食形態	酸化雰囲気	還元雰囲気	局部腐食の可能性	その他
炭素鋼	全面腐食	高アルカリで不動態	不動態領域でAPC	
ステンレス鋼	不動態		TRおよびAPC すき間腐食起源のSCC	
ジルコニウム合金	不動態			
銅	不動態	還元腐食せず（硫化水素存在下では腐食性あり）	アンモニア／酢酸塩／NO_2^-の環境下でSCCの例がある。	硫酸塩・硫化水素との反応性 エロージョン・コロージョンへの感受性
チタン合金	不動態		海水濃度の塩水ですき間腐食の可能性（Pd0.1%以上の合金では回避できる）水素脆化SCCへの感受性	
ニッケル基合金	酸性～中性領域では不動態		高塩濃度ではすき間腐食の可能性があるが、Alloy59, Alloy2000等では回避可能。また、不動態被膜が破壊されても再不動態化する。	

Ⅱ 個別の要素の変遷とその影響

D. ガラス固化体の変遷

○ ガラス固化体とは？

高レベル廃棄物（ガラス固化体）は**高レベル濃縮廃液をホウケイ酸塩ガラスで固化**して製造される。



稲垣 八穂広,2017年度バックエンド週末基礎講座資料 実践講座Ⅱ『ガラス固化体の性能評価』より許可を受けて転載

Ⅱ 個別の要素の変遷とその影響

D. ガラス固化体の変遷

○ ガラス固化体とは？（2）

・核種は、**ガラスのネットワーク構造の一部に取り込まれる形で閉じ込め**られている。
（正確な構造は明らかになっていない。）

○ ガラス固化体の変遷（地下水との反応）

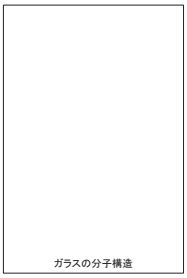
・ガラスは一般的には「水に溶けない」と認識されているが、液性によっては長期的には溶解する。

⇨ **・ガラスの溶解に伴って、ガラスに取り込まれた成分が溶出する。**
ガラス固化体の性能を知るためには、溶解挙動の評価が必要

ガラスと水との反応は，水の濃度やpH，ガラス組成などによって変化する。ホウケイ酸ガラスの水による溶出は，温度が10° C上がるごとに速度が1.5～2倍になる。また，アルカリが溶出するときにナトリウムが溶出するようなガラスでは，加水分解反応が促進されてホウケイ酸ガラスの溶出が促進される。水中に存在する少量の元素が溶出に強く影響を与えることが知られている。Na^+,Ca^{2+},$Mg2+$,Ni^{2+},Co^{2+}は水の作用を加速するが，Cu^{2+},Fe^{3+},Pb^{2+},Zn^{2+},Al^{3+}は水の作用を弱めさせる。例えば，1 ppmのCuは水の浸食速度を20%，10 ppmで50% 減少させる。

表 アルカリ及び酸による重量減少

土屋博之,日本分析科学会,ぶんせき,vol1,p32(2011).

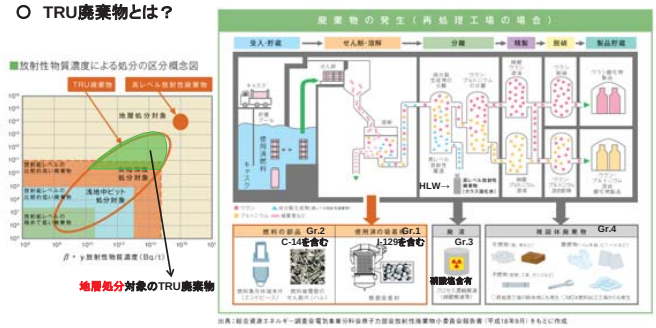


稲垣 八穂広,2010年度バックエンド週末基礎講座資料 実践講座Ⅱ『ガラス固化体の性能評価』より許可を受けて転載

Ⅱ 個別の要素の変遷とその影響

E. TRU廃棄物

○ TRU廃棄物とは？



グループ1：廃銀吸着材（セメント固化）　グループ2：放射化金属（ハル・エンドピース）
グループ3：低レベル濃縮廃液（セメント固化、アスファルト固化）
グループ4L：雑固体
グループ4H：溶融炉のメンテナンス廃棄物など

Ⅱ 個別の要素の変遷とその影響

E. TRU廃棄物からの核種の放出

○ 各グループの廃棄物からの核種の放出の考え方

a. グループ1
・吸着材は、硝酸銀を担持した多孔質アルミナの吸着材であり、ヨウ素を吸着し、AgIの形態で固定する。ヨウ化銀は酸化雰囲気では安定だが、**還元雰囲気では易溶性である。**

b. グループ2
・燃料集合体を分解、裁断した後、燃料を溶解して残った被覆管及び上下タイプレート等を圧縮処理したものである。そのため、被覆管等に付着した燃料成分（FP）や、金属中の不純物、添加物が放射化した核種（^{14}C,^{125}SbなどのAP）が含まれている。
・グループ2廃棄物中の核種の存在状態：
①金属表面の酸化物相に吸着しているもの：炉内の冷却水由来、溶解過程由来
②金属母材内に固定されているもの：金属材料等に含まれる

c. グループ3
・再処理工程のガラス固化体製造プロセス以外のラインで発生する低レベル濃縮廃液を固化したもので、セメント固化（まだ製造されていない）またはアスファルト固化されたもの

d. グループ4L
・再処理工場の操業及び解体によって発生する種々の固体廃棄物。
廃棄物自体が種々雑多であり、個別に取り扱えない。

e. グループ4H
・ガラス固化体製造の溶融炉のメンテナンスによって発生する、耐火レンガ等の廃棄物であり、発熱量、放射性物質含有量ともに大きい。

・ここまで、個別の構成要素の変遷について述べた。

・個別の要素の変遷によって生じる**間隙水の組成の変化、酸化還元電位の変化などは、他の要素の変遷の原因**となる。

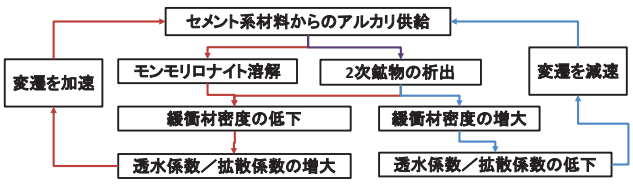
・そのため、処分場の状態、機能、性能の変化を考える際には、各要素間の相互作用を考慮する必要がある。

ここでは、特に処分場の機能の変化に大きい影響を及ぼす可能性のある、セメント－ベントナイトの相互作用を中心に、その影響について述べる。

Ⅰ セメント－ベントナイト相互作用

○ ベントナイト系材料のアルカリ変質の影響

・3.（2）で述べたように、セメント系材料から浸出するアルカリ成分により、ベントナイト系材料では、**モンモリロナイトの溶解、2次鉱物の析出、それらに伴う密度変化**が生じる。
・**モンモリロナイトの溶解は、直接有効モンモリロナイト密度の低下を意味する**ため、拡散係数、透水係数が増大する。
・2次鉱物の析出においては、そのモル体積の大きい2次鉱物が析出した場合、有効モンモリロナイト密度は上昇する（間隙比の低下による）が、モル体積の小さい2次鉱物が析出した場合、有効スメクタイト密度が低下する。
・有効モンモリロナイト密度の上昇、低下は、それぞれ透水係数・拡散係数の低下、増大を意味する。



4. 各構成要素間の相互作用

Ⅱ その他の相互作用

A 鉄-ベントナイトの相互作用

オーバーパックやTRUのパッケージ容器などに用いられた鉄の還元腐食によって間隙水に鉄が供給されることにより、ベントナイトのアルカリ変質によって供給されたアルミニウム、シリカ、マグネシウム等との反応によって**鉄を含むスメクタイトが生成し、空隙の閉塞（クロッギング）の原因となる可能性**がある。

B セメント-岩盤の相互作用

・岩盤に含まれる鉱物もまた、セメント系材料から供給されるアルカリ成分によって変質する。

・岩盤のアルカリ変質によって、考えられるのは、**a.鉱物の溶解による亀裂の拡大**、**b.間隙の増大、c.2次鉱物の生成に伴う亀裂、間隙の閉塞**などである。

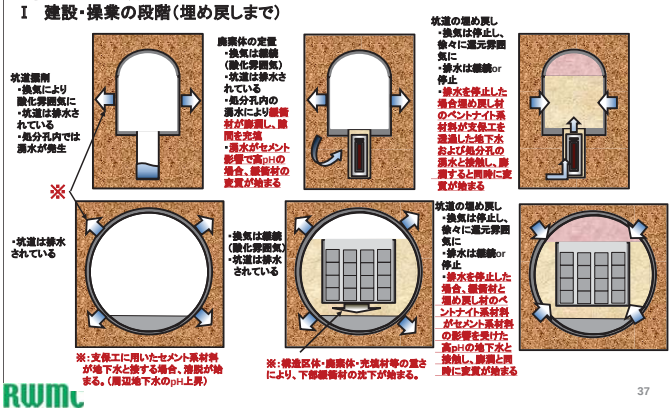
・一般論は存在しないが、これまでに行われた試験やナチュラルアナログ調査の結果からは、岩盤へのアルカリ成分の作用によって生じる現象は、2次鉱物の生成に伴う亀裂、間隙の閉塞が支配的*と考えられる。

*：Maqarinナチュラルアナログプロジェクト、Grinsel（スイス）でのHPFプロジェクトなどの結果では、空隙の閉塞やポアホール間の透水量の低下が観察されている。
実験室での試験では、条件によって透水性・拡散性が増大するケースも観察されている。

5. 各構成要素の変遷に伴う処分場（処分坑道）の変遷

これまで、個別の要素の変遷挙動及びそれらの相互作用に加え、それらの処分場の機能への影響について紹介した。ここでは、それらを受けた処分坑道の変遷について、時系列に従って整理し、簡単に述べる。

Ⅰ 建設・操業の段階（埋め戻しまで）

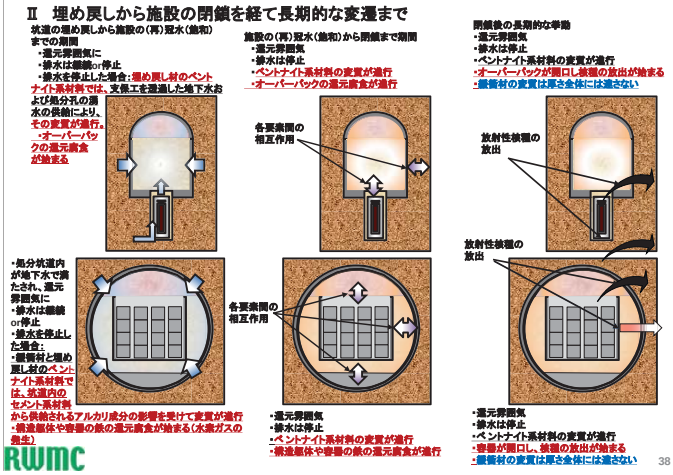


※：支保工に用いたセメント系材料が地下水と接する場合、溶脱が始まる。（周辺地下水のpH上昇）

※：構造区体・廃棄体・充填材等の重さにより、下部緩衝材の沈下が始まる。

5. 各構成要素の変遷に伴う処分場（処分坑道）の変遷

Ⅱ 埋め戻しから施設の閉鎖を経て長期的な変遷まで



安全評価の流れと本講義の範囲

本講義では、地質環境・処分場の設計をもとに、シナリオの選定や解析ケースの設定へと繋がる処分場の状態設定に係る現象の理解について述べる

6. 現象の理解と安全評価シナリオ

Ⅰ 現象の抽出（FEPリストとPID）

FEP（Feature Event Process）とは？

・**各要素／各段階ごとに起きる現象とその機能への影響を記述**したもの。

たとえば・・・・「閉鎖後長期の緩衝材の変質」「セメント系材料の変質」などについて個別に記述したもの

（本講義の「個別の要素の変遷とその影響」の記述に当たるもの）

図　FEPの例

FEPリスト（FEP辞書）

・FEPをまとめてリスト化したもの

PID（Process Influence Diagram）とは？

・各FEP間のつながり、**影響を示す相関図およびその相関に関する記述**。

（本講義の「各構成要素間の相互作用」の記述にあたるもの）

図　FEPリストの例

6. 現象の理解と安全評価シナリオ

Ⅰ 現象の抽出とシナリオの構築

〇シナリオとは？

放射性廃棄物の処分後に起こる現象をもとに、**放射性核種の放出から生物圏への影響に至るまでの過程を記述したもの**。

→理解した現象から必要なものを取捨選択し、核種の移行に影響を及ぼす事象を抽出し、時系列且つ廃棄体→人工バリア→ニアフィールド→ファーフィールド→生物圏の順に組み合わせ、放射性核種の影響がどのように及ぶか（処分場の性能）を示す。

〇シナリオ構築のアプローチ

☆ ボトムアップアプローチ

処分場において想定される**現象を網羅的に列挙したFEP及びそれらの相関（PID）の中から蓋然性の高い現象、影響の大きい現象、他の要素に影響を及ぼす現象を抽出**し、それらに基づいてシナリオを構築する方法。

網羅的に現象を列挙することから、抜け落ちが生じることはないが、**膨大なFEPおよびPIDを検証し、必要な現象を抽出する作業を行う必要**がある。

☆ トップダウンアプローチ

処分場の**安全機能に影響を及ぼす事象を始めに抽出し**、その事象および影響による性能の変動幅を分析し、**重み付けを行うことで、現象を抽出し、シナリオを構築**する方法。

影響の大きい事象を予め絞り込めるため、**効率的だが、全てを包含するシナリオとなっているか、抜け落ちが無いか検証する必要**がある。

安全評価の流れと本講義の範囲

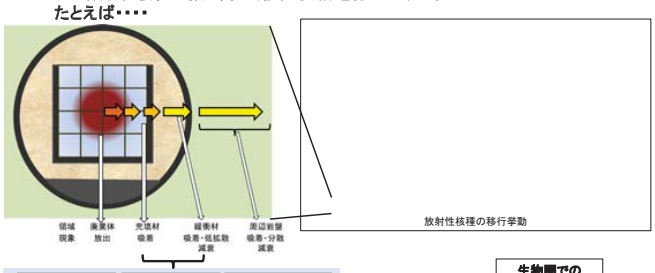
本講義では、地質環境・処分場の設計をもとに、シナリオの選定や解析ケースの設定へと繋がる処分場の状態設定に係る現象の理解について述べる

安全確保の基本的考え方

6. 現象の理解と安全評価シナリオ

Ⅱ 安全評価シナリオ（地下水シナリオを例に）

処分場の性能に影響を与える現象を抽出したうえで、それらに基づいて、処分場での放射性核種の振る舞い（移行挙動）を様式化する。
たとえば・・・・



廃棄体からの核種の放出 | **処分場内での核種の移行** | **ニアフィールドでの核種の移行** | **ファーフィールドでの核種の移行** | **生物圏での核種の移行と食物連鎖**

処分場の変遷によって変わる

地質環境の変遷によって変わる

6. 現象の理解と安全評価シナリオ

Ⅱ 現象のモデル化

処分場で起きる現象を理解しシナリオとして展開するとともに、長期的な挙動を理解・予測するためのモデルの構築が必要である。個別の現象のモデル化については、この後の講義で詳細に述べるが、ここではどのような現象をモデル化する必要があるか？ について述べる。

表 各構成要素において、安全評価のためにモデル化が必要な項目の例

	廃棄体		人工バリア	ニアフィールド	ファーフィールド
核種の状態	廃棄体の構造と核種の状態		pH、Eh、溶存化学種に応じた溶存核種の化学形態と溶解度	pH、Eh、溶存化学種に応じた溶存核種の化学形態と溶解度	pH、Eh、溶存化学種に応じた溶存核種の化学形態と溶解度
核種の放出	核種の溶出 ・廃棄体の溶解・変質 ・金属腐食 ・核種の溶出				
	核種の移動 ・変質相内の拡散 ・廃棄体内の拡散				
核種の移行		移行場の設定（変遷）	間隙水の変遷	地下水・間隙水の水質の変遷	地下水・間隙水の水質の変遷
			セメント系材料の変遷		
			緩衝材の変遷	岩盤の変遷	
		核種移行に係る現象およびパラメータの変化	緩衝材及びセメント系 透水挙動	岩盤の透水挙動	岩盤の透水挙動
			核種の拡散	多孔質媒体での核種の拡散	
			核種の収着	岩盤への核種の収着	岩盤への核種の収着
			ガスの移行（ガスの透過／汚染水の押し出し／ガス状核種の移行）	岩盤内部への核種の拡散（マトリックス拡散）	岩盤内部への核種の拡散（マトリックス拡散）
					移流・分散
			金属の腐食に伴うガス発生		
			廃棄体成分の影響	廃棄体成分の影響	
			有機物の影響	有機物の影響	有機物の影響

ご清聴ありがとうございました。

原環センターのホームページ
https://www.rwmc.or.jp/

地層処分に関する『令和元年度人材育成セミナー』

17　核種移行解析モデル

令和2年1月10日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門
核燃料サイクル工学研究所
環境技術研究開発センター基盤技術研究開発部
システム性能研究グループ
三原　守弘

目次

- はじめに
- 第2次取りまとめでの核種移行評価
- TRU廃棄物処分技術検討書での核種移行評価
- おわりに

はじめに

- 核種移行解析モデルは、**地下水による核種の溶解と輸送（地下水シナリオ）を評価**するための重要なモデルである。
- 核種の移行モデルは、核種が均一になろうとする移動（**拡散現象**）、地下水の流れによる移動と分散（**移流・分散現象**）からなる。
- 上記の現象に核種の**崩壊連鎖**、**固相への収着**、**溶解・沈澱現象**を考慮してモデルが開発されている。
- 本講義では、第2次取りまとめやTRU廃棄物処分技術検討書で用いられた核種移行解析モデルと解析事例を紹介する。

考慮された核種移行経路

出典：核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次とりまとめ－分冊３ 地層処分システムの安全評価JNC TN1400 99-023, p.V-14, 図5.1-3 レファレンスケースで考慮する核種移行経路

https://www.jaea.go.jp/04/tisou/houkokusyo/dai2jitoimatome.html

解析結果を表すために用いられた指標

- **人工バリアからの核種の移行率（Bq/y）：**
  - ガラス固化体1本に対して人工バリアからの核種移行率を示す。
- **母岩及び断層破砕帯からの核種移行率（Bq/y）：**
  - ガラス固化体1本あたりの人工バリアの移行率を入力とした母岩中での核種移行解析結果を母岩からの核種移行率として示す。
  - 母岩からの核種移行率を入力とした断層破砕帯中での核種移行解析結果を断層破砕帯からの核種移行率として示す。
- **処分場全体を対象とした核種移行率（Bq/y）から求められた線量（Sv/y）：**
  - ガラス固化体1本に対する解析結果を、ガラス固化体4万本に合わせて単純に4万倍して求める。これは、すべての固化体に対する解析において、母岩中の移行距離を100mと設定することに相当する。
  - 生活圏についての核種移行と被ばく経路の解析結果を用いて、放射性核種の移行率を線量に換算する。

人工バリア中の核種移行解析－解析モデルの前提条件－

高レベル放射性廃棄物の人工バリアシステム

- 緩衝材は、均質な低透水性のバリアとなる。緩衝材中の核種の移行は、移流に比べて拡散が卓越する。
- 人工バリアの外側の岩盤には、処分坑道の掘削伴い生じた透水性の高い領域（EDZ：Excavation Disturbed Zone）※が存在する。
- オーバーパックは、1,000年間破損しないように設計される。
- オーバーパック破損時には、緩衝材は地下水によって完全に飽和している。破損したオーバーパックは、核種の移行に影響しない。
- 地下水は、ガラス固化体と接触し、長期的なガラス溶解速度に従ってガラスの溶解が進む。固化体中に存在する核種の存在比によって核種が溶出する。
- 溶出した核種は、同位体の存在比に応じて分配された溶解により制限される。沈殿／溶解度は瞬時／可逆とする。
- 緩衝材中の核種は、緩衝材に収着する。収着反応として、瞬時／線形／可逆とする。

※：処分坑道を掘削すると応力が解放されることにより、坑道周辺の岩盤に亀裂などが生じ、透水性の高い領域が生じるとされている。

人工バリア中の核種移行解析−モデルの定式化−

出典：核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性−地層処分研究開発第2次とりまとめ−分冊３ 地層処分システムの安全評価−, JNC TN1400 99-023, p.V-23, 図5.3.1-1 人工バリアの構成および概念形状

緩衝材中の核種濃度の時間変化を表す式

$$\frac{\partial A_{ij}}{\partial t} = \underbrace{\varepsilon D_{pi}\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial C_{ij}}{\partial r}\right)}_{\text{拡散}} - \underbrace{\lambda_{ij}A_{ij}}_{\text{崩壊}} + \underbrace{\lambda_{IJ}A_{IJ}}_{\text{生成}}$$

$$A_{ij} = \underbrace{\varepsilon C_{ij}}_{\text{溶存種}} + \underbrace{(1-\varepsilon)S_{ij}}_{\text{収着種}} + \underbrace{P_{ij}}_{\text{沈澱種}}$$

$$S_{ij} = \rho K d_i C_{ij}$$ 固相への収着を表す式（線形収着）

上記、数学モデルを数値解法により解くMESHNOTEコード (Wakasugi and Makino, 1999)により核種移行解析を実施

- 1次元の円筒座標系で、核種移行モデルを定式化
- 人工バリア中の核種移行解析では、以下の4つの領域を考慮
  - ガラス固化体

    ガラス固化体の核種は、ガラスの溶解ともないガラスの仮想的な領域に溶出する。なお、ガラス固化体中での核種の移行は考慮しない。
  - ガラス固化体近傍の仮想的な領域

    ガラスの溶解をモデルとして取り組むための仮想的な領域。ガラス固化体から溶出した核種は、いったんこの領域に溶出し緩衝材中へ移行する。
  - 緩衝材領域

    核種は、収着、沈殿及び崩壊をともない緩衝材中を拡散より移行し、緩衝材外側の掘削影響領域へ移行する。
  - 掘削影響領域(EDZ)

    緩衝材と母岩の境界に到達した核種は、EDZを通過する地下水と瞬時に混合し、母岩の亀裂へ移行する。

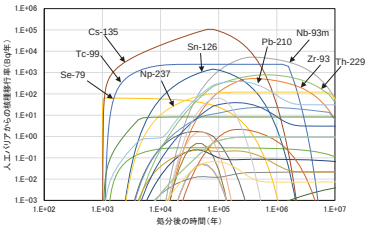
A_{ij}:緩衝材中の核種(元素iの同位体j)濃度[mol/m³]
ε :緩衝材の間隙率
D_{pi}:緩衝材間隙水中の元素iの拡散係数[m²/y]
λ_{ij}:核種(元素iの同位体j)の崩壊定数[1/y]
C_{ij}:緩衝材の核種(元素iの同位体j)の溶存種濃度[mol/m³]
S_{ij}:緩衝材の核種(元素iの同位体j)の収着種濃度[mol/m³]
P_{ij}:緩衝材の核種(元素iの同位体j)の沈澱種濃度[mol/m³]
ρ :緩衝材の密度[kg/m³]
Kd_i:緩衝材に対する元素iの収着分配係数 [m³/kg]

人工バリア中の核種移行解析−解析で必要となる入力パラメータ−

解析で必要となる入力パラメータ
・図中 赤文字，赤丸

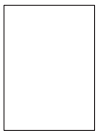
人工バリア中の核種移行解析−人工バリアからの核種の移行率−

	評価対象核種
放射化生成物/核分裂生成物	Se-79, Zr-93→Nb-93, Nb-94, Tc-99, Pd-107, Sn-126, Cs-135, Sm-151
4N系列	Pu-240→U-236→Th-232
4N+1系列	Cm-245→Pu-241→Am-241→Np-237→U-233→Th-229
4N+2系列	Cm-246→Pu-242→U-238→U-234→Th-230→Ra-226→Pb-210
4N+3系列	Am-243→Pu-239→U-235→Pa-231→Ac-227

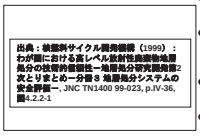


人工バリアからの核種移行率
（ガラス固化体1本を対象）

母岩中の核種移行解析−解析モデルの前提条件−



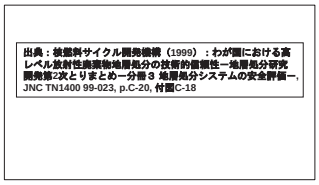
岩盤の亀裂



出典：核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性−地層処分研究開発第2次とりまとめ−分冊３ 地層処分システムの安全評価−, JNC TN1400 99-023, p.IV-36, 図4.2.2-1

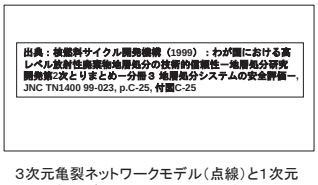
岩盤亀裂中の核種の移行

- 岩盤の亀裂が主要な地下水及び核種移行経路である亀裂性岩盤として取り扱う。
- 人工バリアから溶出した核種は、亀裂内を移流・分散によって移行する。その際、岩盤の基質部（マトリクス部）に核種は拡散で移行する。
- マトリックス部の鉱物表面への核種の収着は、瞬時／線形／可逆な収着とする。
- 亀裂表面への収着、亀裂充填鉱物への収着は考慮しない。
- 母岩中の亀裂は、ネットワーク状に連結し、地下水や核種が移行する。3次元の亀裂ネットワークモデルによる核種移行解析を近似的に評価可能な1次元平行平板モデルの重ね合わせモデルを適用する。



出典：核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性−地層処分研究開発第2次とりまとめ−分冊３ 地層処分システムの安全評価−, JNC TN1400 99-023, p.C-20, 付図C-18

3次元亀裂ネットワークモデルの例
（200m×200m×200m）



出典：核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性−地層処分研究開発第2次とりまとめ−分冊３ 地層処分システムの安全評価−, JNC TN1400 99-023, p.C-25, 付図C-25

3次元亀裂ネットワークモデル（点線）と1次元平行平板モデルの重ね合わせ（実線）による核種移行解析結果の比較

母岩中の核種移行解析−モデルの定式化と解析で必要となる入力パラメータ−

解析で必要となる入力パラメータ
・図中 赤下線
・動水勾配

出典：核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性−地層処分研究開発第2次とりまとめ−分冊３ 地層処分システムの安全評価−, JNC TN1400 99-023, p.V-55, 図5.3.2-1 1次元平行平板モデル概念図

●定常な地下水流れ下における１次元平行平板亀裂および断層中と岩石基質部における核種 n の移行支配方程式

亀裂部および断層部

$$R_n\frac{\partial C_n}{\partial t} + v\frac{\partial C_n}{\partial x} - D_l\frac{\partial^2 C_n}{\partial x^2} + R_n\lambda_n C_n - R_{n-1}\lambda_{n-1}C_{n-1} + \frac{F}{b}D^m\frac{\partial C_n^m}{\partial w}\Big|_{w=0} = 0$$

岩石基質部 m

$$R_n^m\frac{\partial C_n^m}{\partial t} - D^m\frac{\partial^2 C_n^m}{\partial w^2} + R_n^m\lambda_n C_n^m - R_{n-1}^m\lambda_{n-1}C_{n-1}^m = 0$$

R_n ：亀裂中および断層中遅延係数（=1），

R_n^m ：岩石基質部遅延係数 $=1+\frac{\rho^m Kd_n}{\eta^m}$

●初期条件

$C_n(x,0) = 0$

$C_n^m(x,0) = 0$

●核種流入境界条件

$$vC_0 - D_l\frac{\partial C_1}{\partial x} = f_1 \quad (x=0)$$

●岩石基質部境界条件

$C_n^m(x,t) = C_n^m(x,0,t)$ $(w=0)$

$$\frac{\partial C_n^m}{\partial w}\Big|_{w=d} = 0 \quad (w=d)$$

母岩中の核種移行解析−一次元並行平板モデルの重ね合わせ−

透水量係数の分布確率に従って人工バリアからの核種移行率を分割

出典：澤田 淳，井尻 裕二，坂本 和彦，夏真吾（1999）：亀裂性岩盤を対象とした天然バリア中の核種移行解析, JNC TN8400 99-093, p.43, 図3.1-1 1次元モデル重ね合わせ手法の模式図

母岩中の核種移行解析–母岩及び断層破砕帯からの核種移行率–

出典：核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次とりまとめ－分冊３ 地層処分システムの安全評価－, JNC TN1400 99-023, p.V-109, 図5.3.5-6(a)

出典：核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次とりまとめ－分冊３ 地層処分システムの安全評価－, JNC TN1400 99-023, p.V-109, 図5.3.5-6(b)

(a)母岩からの核種移行率　　(b)断層破砕帯からの核種移行率

ガラス固化体1本に対する核種移行率

生活圏モデル

出典：核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次とりまとめ－分冊３ 地層処分システムの安全評価－, JNC TN1400 99-023, p.V-92, 図5.3.3-5(a)

出典：核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次とりまとめ－分冊３ 地層処分システムの安全評価－, JNC TN1400 99-023, p.V-92, 図5.3.3-5(b)を基に作成した図

コンパートメント間での核種移行プロセス　　被ばく経路

- 移行に関わるパラメータ：地表環境における物質移行に関わるパラメータ（灌漑水量 など）
- 被ばくに関わるパラメータ：人間の生活習慣等に関わるパラメータ（食物摂取量 など）
- 元素固有パラメータ：元素に応じた特徴を有するパラメータ（農産物への移行係数，濃縮係数 など）

⇒ 生活圏モデルの評価ではあわせて100以上のパラメータ必要

➡ 核種移行解析の結果得られる「核種移行率」を線量に換算するための「線量への換算係数 （Sv y^{-1}）/（Bq y^{-1}）」を算出

レファレンスケースの線量評価結果

出典：核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次とりまとめ－分冊３ 地層処分システムの安全評価－, JNC TN1400 99-023, p.V-111, 図5.3.5-7のデータに基づき作成した図

様々なシナリオや不確実性に対応した解析ケース設定の具体例

人工バリア	データ不確実ケース	ガラス溶解速度	RCの1/10倍	
			RCの 10 倍	
		オーバーパック破損時期	1万年	
		EDZ流量	RCの1/10倍	
			RCの10 倍	
	モデル変更ケース	原食生成物での核種移行遅延を考慮		
		EDZ領域の岩盤への核種吸着を考慮		
		オーバーパック腐食膨張による緩衝材厚さの低減（内側半径410mmRC⇒610mm）		
天然バリア	データ不確実ケース	透水量係数分布	対数平均値をRCの10 倍	
			対数平均値をRCの1/10倍	
		亀裂開口幅	0.1 √T	
			10 √T	
		分散長	1m（移行距離/100）	
			100m(移行距離)	
		マトリックス拡散寄与面積率	10 %	
			100 %	
		マトリックス拡散深さ	0.03 m	
			1.0 m	
		間隙率(-) 乾燥密度(Mg/m³) 実効拡散係数(m²/s)	1, 2.67, 6e-14	
			3, 2.61, 1e-10	
		分配係数不確実性	最大値（元素毎）	
			最小値（元素毎）	
		断層内動水勾配	0.1	
			0.001	
	モデル変更ケース	コロイド影響考慮		
		処分場スケール効果を考慮	100～780 m	
			100～1486 m	
			100～2886 m	
		濃度緩衝効果を考慮		
		断層多孔質媒体モデル		

人工バリア	代替設計ケース	オーバーパック材料の変更	オーバーパック破損時期	処分後1万年
				処分後10万年
				処分後100万年
		緩衝材厚さの変更	RC700mm ⇒ 400mm	
	地質環境変更ケース	動水勾配変更	EDZ流量	
		堆積岩：コンクリート支保	緩衝材間隙水組成の変更	溶解度，分配係数，拡散係数の設定
		海水系地下水	地下水，緩衝材間隙組成の変更	溶解度，分配係数，拡散係数の設定
		海水系地下水（溶解度，分配係数，拡散係数は海水系の設定）＋オーバーパック緩損時期	オーバーパック破損時期	処分後1万年
				処分後10万年
				処分後100万年

天然バリア	地質環境変更ケース	ケース	動水勾配	岩種	間隙率 乾燥密度 実効拡散係数	地下水組成	断層内移行距離
		動水勾配多様性ケース	0.1 0.001	酸性結晶質岩	岩種に対応した代表値	降水系	800m
						海水系	
		岩種・地下水の多様性	0.01	塩基性結晶質岩		降水系 海水系	
				先新第三紀砂質岩			
				先新第三紀泥岩・凝灰質岩			300m
				新第三紀砂質岩			
				新第三紀泥岩・凝灰質岩			

変動シナリオ

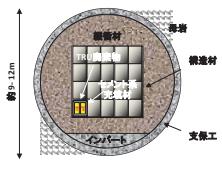
天然現象	・隆起・侵食による地下水流動と地下水水質の変遷 ・気候・海水準変動による地下水水質の周期的変遷
工学的対策に関する初期欠陥	・オーバーパックの不完全な密封によるオーバーパックの早期破損 ・シーリングミスによる卓越的な移行経路の発生
将来の人間活動	・井戸の掘削と揚水 ・ボーリングにより発生する掘削影響領域による酸化性地下水の浸入 ・ボーリングにより発生する掘削影響領域による核種の地表環境への卓越的な移行

様々な解析ケースの結果の比較

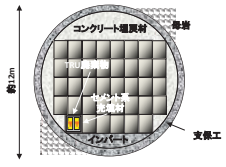
出典：核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次とりまとめ－分冊３ 地層処分システムの安全評価－, JNC TN1400 99-023, p.VII-9, 図7.2-1 システム性能の総合的解析の結果における最大線量とその時間

人工バリア中の核種移行解析–解析モデルの前提条件–

グループ1&グループ2



グループ3 &グループ4



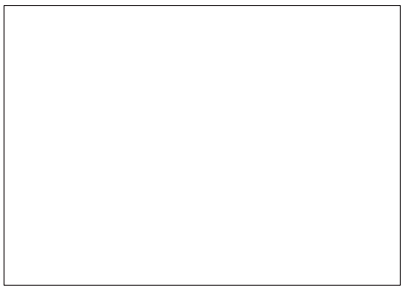
TRU廃棄物の人工バリアシステム

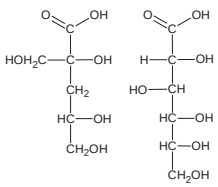
- グループ1及び2については、緩衝材を使用した概念を設定する。
- 廃棄物のパッケージには、閉じ込め性能を期待しない。
- 処分後、人工バリアは地下水に完全に飽和している。
- セメント系材料（セメントモルタルやコンクリート）には止水性を考慮しない。
- 廃棄物から溶出した核種は、セメント系充填材に収着する。

TRU廃棄物の処分におけるグルーピング
（左からグループ1、グループ2、グループ3、グループ4）

核種移行解析において考慮された影響因子

- **ガラス固化体と異なりTRU廃棄物には系を複雑にする成分を含有**
  - **セメント系充填材**：地下水の高pH化・高Ca濃度化（全グループ）
  - **硝酸塩**：硝酸イオンによる地下水の酸化・塩濃度の増大（グループ3のみ）
  - **有機物**：核種との錯生成による溶解度の増大やポリマー形成（グループ2のみ）





イソサッカリン酸　グルコン酸

有機物の例

セメント系充填材、硝酸塩、有機物の影響を核種移行解析で考慮

人工バリア中の核種移行解析−モデルの定式化−

- 1次元の直交座標系で、核種移行モデルを定式化
- 人工バリア中の核種移行解析では、以下の4つの領域を考慮
  - 廃棄物

    ハル・エンドピースについては、金属中に含まれる核種は、金属の腐食とともにセメント系充填材中に溶出する。その他の廃棄体については、固化体の核種の閉じ込め性能を期待せずに瞬時にセメント系充填材に溶出する。
  - セメント系充填材（コンクリート埋戻材）

    廃棄体から溶出した核種は、セメント系充填材に収着、沈殿する。セメント系充填材には、長期的にはひび割れなどが生じることから、止水性は考慮しない。モデル上は一つのセルとして扱う。緩衝材がない処分概念では、地下水による移流・分散を考慮し、核種の沈澱は考慮しない。
  - 緩衝材（グループ1＆グループ2）

    核種は、収着及び崩壊をともない緩衝材中を拡散より移行し、緩衝材外側の掘削影響領域へ移行する。
  - 掘削影響領域（EDZ）

    緩衝材と母岩の境界に到達した核種は、EDZを通過する地下水と瞬時に混合し、母岩の亀裂へ移行する。

出典：電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構（2005）：TRU廃棄物処分技術検討書－第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, p.4-129, 図4.5.2-2 人工バリア中核種移行解析モデルの1次元化の概念（廃棄体グループ2 の例）

https://www.jaea.go.jp/04/be/documents/doc_01.html

解析上の幾何形状

拡散　分散　移流　崩壊　生成

$$\frac{\partial A_{ij}}{\partial t} = \varepsilon D_{pi}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial C_{ij}}{\partial x}\right) + \alpha v\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial C_{ij}}{\partial x}\right) - v\frac{\partial C_{ij}}{\partial x} - \lambda_{ij}A_{ij} + \lambda_{Ij}A_{Ij}$$

上記、数学モデルを数値解法により解くTIGERコード(三原・大井, 2004)により核種移行解析を実施

人工バリア中の核種移行解析−人工バリアからの核種の移行率−

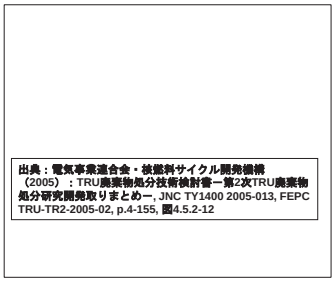
出典：電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構（2005）：TRU廃棄物処分技術検討書－第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, p.4-150, 図4.5.2-5

出典：電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構（2005）：TRU廃棄物処分技術検討書－第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, p.4-150, 図4.5.2-6

(a)グループ毎の結果　(b)核種毎の結果

TRU廃棄物処分の人工バリア（処分施設）からの核種の移行率

レファレンスケースの線量評価結果



出典：電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構（2005）：TRU廃棄物処分技術検討書－第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, p.4-155, 図4.5.2-12

出典：電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構（2005）：TRU廃棄物処分技術検討書－第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, p.4-155, 図4.5.2-13

(a)グループ毎の結果　(b)核種毎の結果

TRU廃棄物の地層処分における線量評価結果

おわりに

- 第2次取りまとめやTRU廃棄物処分技術検討書における核種移行解析モデルを紹介した。
- 地層処分の安全評価の研究は、
  1. 天然の地質環境という領域（空間的な不均質性）
  2. 数万年以上の長い時間スケール（時間的な不確実性）

  を対象としており、これらの不確実性にどのようない対処するかが重要である。
- 核種移行解析においてもこれらの不確実性に対処し、地層処分の安全性を評価する必要がある。

地層処分事業における技術人材の育成

『2019年度人材育成セミナー』

3. 地層処分の技術Ⅲ　性能評価・安全評価技術

18. 核種移行データ・モデル整備とパラメータ設定手法

令和2年1月10日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門　核燃料サイクル工学研究所
環境技術開発センター　基盤技術研究開発部
核種移行研究グループ
北村　暁

本講演資料は，使用許諾等が得られていない内容や原点図表・データが含まれている可能性があります。二次利用をしないようにお願いします。

目次

- はじめに
  - 元素と核種のちがい
  - ガラス（固化体）の溶解挙動
  - TRU廃棄物からの核種放出挙動
- 核種移行パラメータとデータベース
  - 溶解度
    - ✓熱力学データベース（TDB）
    - ✓溶解度実験・熱力学データ導出の例
    - ✓溶解度設定フロー
  - 収着分配係数（K_d）・実効拡散係数（D_e）
    - ✓収着データベース（SDB）
    - ✓拡散データベース（DDB）
    - ✓収着・拡散試験
    - ✓緩衝材に対する設定手法
    - ✓岩石中の核種移行研究のアプローチ
- まとめ

収着＝吸収＋吸着
- メカニズムはともかく，くっついている（ように見える）状態。

「核種（nuclide）」とは？　元素（element）との違いは？

- 「元素」は，陽子の数（＝原子番号）だけで性質が決められるもの。
  - 例：水素（原子番号1），ウラン（同92），プルトニウム（同94）
- 「核種」は，質量数（陽子数＋中性子数）を区別したもの。
  - 例：水素-1 / 2 / 3，ウラン-235 / 238
  - 同じ元素で質量数が異なるものを「同位体」という。

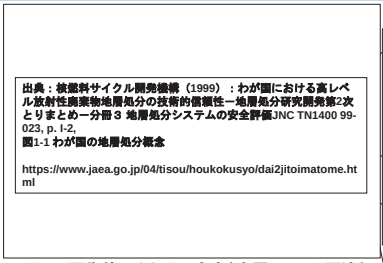
http://www.jamstec.go.jp/res/ress/nakadar/findings/Isotope/isotope.html

- 厳密には，同位体が異なれば（わずかながら）化学挙動が異なる。
  - ウラン濃縮，リチウム-6（^{3}H（トリチウム）の原料）の抽出などに利用。
- 地層処分で対象とする核種移行挙動では，同位体を区別する必要はないと判断。
  - このため（？）「元素」と「核種」の混同が時々発生。

目次

- はじめに
  - 元素と核種のちがい
  - ガラス（固化体）の溶解挙動
  - TRU廃棄物からの核種放出挙動
- 核種移行パラメータとデータベース
  - 溶解度
    - ✓熱力学データベース（TDB）
    - ✓溶解度実験・熱力学データ導出の例
    - ✓溶解度設定フロー
  - 収着分配係数（K_d）・実効拡散係数（D_e）
    - ✓収着データベース（SDB）
    - ✓拡散データベース（DDB）
    - ✓収着・拡散試験
    - ✓緩衝材に対する設定手法
    - ✓岩石中の核種移行研究のアプローチ
- まとめ

はじめに：地層処分における放射性核種の移行シナリオ



出典：核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次とりまとめ－分冊3 地層処分システムの安全評価 JNC TN1400 99-023, p. I-2,
図1-1 わが国の地層処分概念

https://www.jaea.go.jp/04/tisou/houkokusyo/dai2jitoimatome.html

ガラス固化体中の網目構造

- ガラス固化体はきわめて安定（金属イオンを固溶）
- 長期間の地下水との接触により溶解し，放射性核種が地下水に溶出（地下水シナリオ）
  - ガラス固化体との調和溶解
  - 地下水（緩衝材間隙水）への溶解・沈殿・錯生成
  - 緩衝材や岩石などに対する収着（吸着+吸収）・拡散（・移流・分散）

種々の放射性核種の移行挙動を評価する必要性

人工バリア中の核種移行解析-解析で必要となる入力パラメータ-

解析で必要となる入力パラメータ
・図中 赤文字，赤丸

ガラス固化体の溶解・変質挙動

- ガラス固化体の溶解速度式

$$Rate = k_0 \cdot 10^{\eta \cdot pH} \cdot \exp(-E_a/RT) \cdot [1-(Q/K)] + k_{long}$$

ガラス　間隙水組成　温度　間隙水組成　間隙水組成／温度／ガラス

有限量の水溶液中でのガラス固化体の溶解/変質量
（GLAMOR, EU commission, 2007）

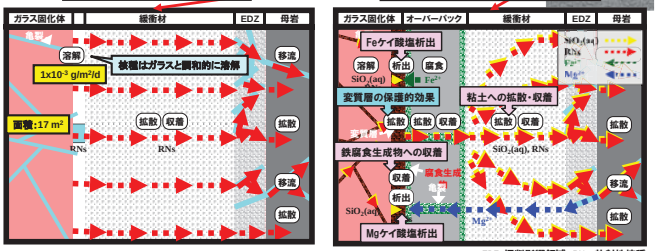
【H12における想定】

- ◆ ガラス固化体近傍の溶存ケイ酸濃度は次第に上昇し，長期的にはほぼ飽和に達する。
- ◆ 間隙水中の溶存ケイ酸濃度が高く維持されることにより，マトリクス溶解が抑制され、水和変質が進行する。（Stage II）
- ◆ 水和変質の考え方に基づくと，ガラス固化体の溶解速度は経時的に減少することになるが，これを保守的に無視し，一定の長期溶解速度によりガラス固化体が溶解する。

ガラス固化体の溶解に関するモデル

- ホウケイ酸ガラス：
  $Na_2O(10\%)$-$B_2O_3(14\%)$-$SiO_2(43〜47\%)$-$Al_2O_3(3.5〜5\%)$, 等

H12（第2次取りまとめ）　ケイ酸消費プロセスを考慮



EDZ：掘削影響領域，RNs：放射性核種

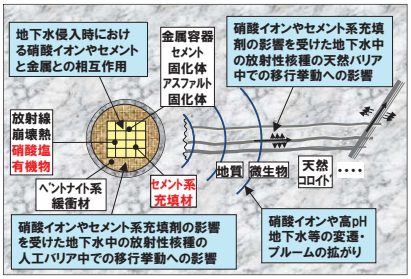
ケイ酸消費プロセスの影響の程度が大きい場合，ガラス固化体近傍の溶存ケイ酸濃度が長期的に低く維持され，ガラス固化体の溶解が高い速度で進行する可能性

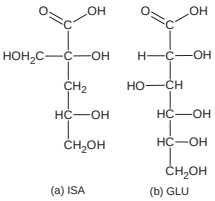
TRU廃棄物からの核種の放出

- グループ1
  （多孔質アルミナの吸着材により，I-129をAgIの形で固定化）
  - 還元雰囲気ではAgIが易溶性；地層処分環境ではI-129が廃棄体内に（瞬時に）放出。
- グループ2
  - 表面酸化物相への吸着物：固定の形態が不明なため「瞬時放出」扱い。
  - 母材内の固定物：母材（ジルカロイ，ステンレス鋼など）の腐食に伴って放出。
- グループ3
  - セメント固化体（未製造）：「瞬時放出」扱い。
  - アスファルト固化体：アスファルトの膨潤・溶解に伴って放出されるものの，現状では「瞬時放出」扱い。
- グループ4
  - 4L：個別の取り扱いが困難：保守性を考慮して「瞬時放出」扱い。
  - 4H：未定。

TRU廃棄物からの核種の移行において考慮される影響因子

- ガラス固化体と異なりTRU廃棄物には系を複雑にする成分を含有
  - セメント系充填材：地下水の高pH化・高Ca濃度化（全グループ）
  - 硝酸塩：硝酸イオンによる地下水の酸化・塩濃度の増大（グループ3のみ）
  - 有機物：核種との錯生成による溶解度の増大やポリマー形成（グループ2のみ）





有機物の例

多様な影響因子を考慮した核種移行パラメータの評価が必要

目次

- はじめに
  - 元素と核種のちがい
  - ガラス（固化体）の溶解挙動
  - TRU廃棄物からの核種放出挙動
- 核種移行パラメータとデータベース
  - 溶解度
    - ✓熱力学データベース（TDB）
    - ✓溶解度実験・熱力学データ導出の例
    - ✓溶解度設定フロー
  - 収着分配係数（K_d）・実効拡散係数（D_e）
    - ✓収着データベース（SDB）
    - ✓拡散データベース（DDB）
    - ✓収着・拡散試験
    - ✓緩衝材に対する設定手法
    - ✓岩石中の核種移行研究のアプローチ
- まとめ

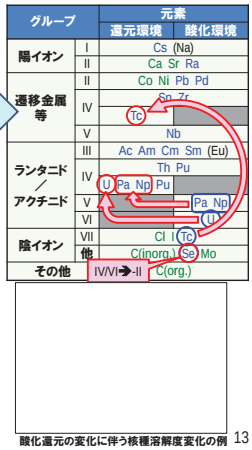
安全評価の対象元素

- 化学的性質が類似している元素をグループ化するとしても…

対象元素の特徴はさまざま

核種移行パラメータに影響を与える主な因子

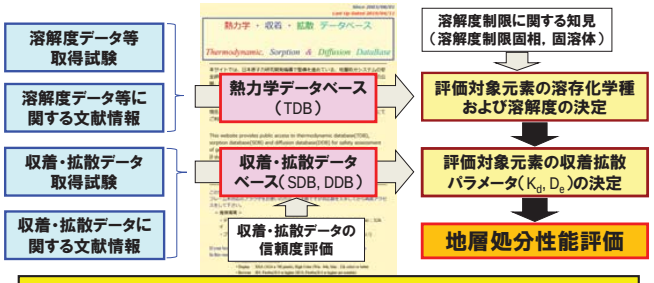
因子	影響範囲	溶解度	K_d	D_e
固相の種類	収着能力，pH依存性，等	–	○	○
酸化還元電位	酸化状態	○	○	–
pH	溶解・錯生成	○	○	○
	鉱物の静電相互作用	–	○	○
塩濃度	活量係数	○	–	–
	電解質イオンとの競合	–	○	–
	層間での濃集・排除効果	–	–	○
共存元素濃度 ➢ 無機炭素（炭酸），硫化物，有機物，等	錯生成	○	○	○



酸化還元の変化に伴う核種溶解度変化の例

パラメータ設定から性能評価への流れ

- 溶解度：水溶液中の元素の濃度上限値
- 収着分配係数（K_d）：鉱物等に対する元素の固液分配割合
- 実効拡散係数（D_e）：水溶液中における元素の広がる速さ

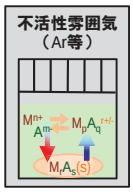


種々の環境条件に応じて適切なパラメータを設定するためにデータベースを整備

目次

- はじめに
  - 元素と核種のちがい
  - ガラス（固化体）の溶解挙動
  - TRU廃棄物からの核種放出挙動
- 核種移行パラメータとデータベース
  - 溶解度
    - ✓熱力学データベース（TDB）
    - ✓溶解度実験・熱力学データ導出の例
    - ✓溶解度設定フロー
  - 収着分配係数（K_d）・実効拡散係数（D_e）
    - ✓収着データベース（SDB）
    - ✓拡散データベース（DDB）
    - ✓収着・拡散試験
    - ✓緩衝材に対する設定手法
    - ✓岩石中の核種移行研究のアプローチ
- まとめ

溶解度：溶解度実験と熱力学データ導出の必要性



溶解度測定の模式図

図　Np溶解度測定結果の例（還元条件，$[C]_T$=0.1M，I = 2.0）

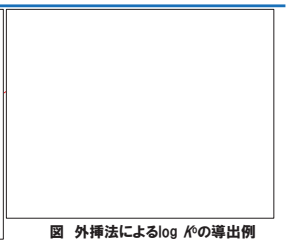


図　外挿法による$\log {}^{*}\beta^{0}$の導出例

- 溶解度：沈殿と溶解がバランス（平衡）した状態の溶存濃度
- 溶解度データ等の実測
- 適切な溶存化学種及び固相の設定・溶解度データの解釈（モデル化）
- イオン強度を補正するためのモデル化
- 溶解度以外の手法でも熱力学データを算出可（溶媒抽出，分光，滴定，等）

- ひとつの元素を見ただけでも，様々な化学種が混在

$$[Np]_T = Np^{4+} + NpOH^{3+} + Np(OH)_4(aq) + \ldots + Np(CO_3)_2(OH)_2^{2-} + Np(CO_3)_2(OH)_4^{4-} + \ldots + NpO_2^{+} + NpO_2OH(aq) + \ldots$$

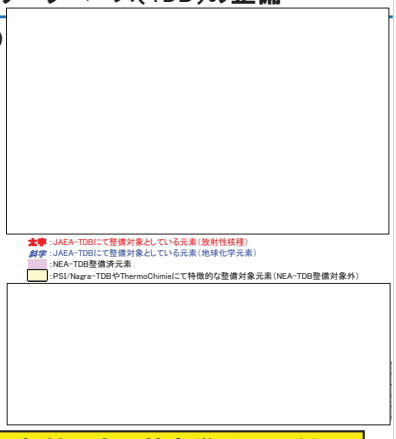
$$NpO_2(s) \rightleftarrows Np^{4+} + 4\,OH^- \quad K_{so} = [Np^{4+}][OH^-]^4$$

$$Np^{4+} + m\,CO_3^{2-} + n\,OH^- \rightleftarrows Np(CO_3)_m(OH)_n^{(4-2m-n)}$$

$$K_{1mn} = [Np(CO_3)_m(OH)_n^{(4-2m-n)}]/([Np^{4+}][CO_3]^m[OH^-]^n)$$

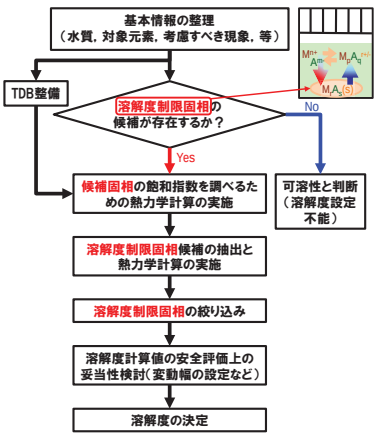
溶解度：熱力学データベース（TDB）の整備

- 熱力学データベース（TDB）
  - 多くの元素に対する種々の固-液や液-液反応の**平衡定数等の熱力学データを矛盾なく集積**したもの。
  - 熱力学データの選定にあたっては，専門家によるレビューを実施。
    - ✓採用否となるデータが発生する可能性。
  - JAEAでは，前身のPNC / JNC時代を含め，継続的にTDB整備を実施。最新のJAEA-TDBでは**約2,000件**のデータを収録。



信頼性の高いTDBには信頼性の高い熱力学データが必要

溶解度：溶解度設定フロー



- 溶解度制限固相の決定：種々の候補固相から最適なものを選定。
  - 参考データのひとつが「飽和指数（SI）」。
  - SIの高い固相から**現実的な**ものを選別。

現実のイオン濃度の積を溶解度積で割った値の**対数**。
>0：過飽和
0：飽和
<0：不飽和

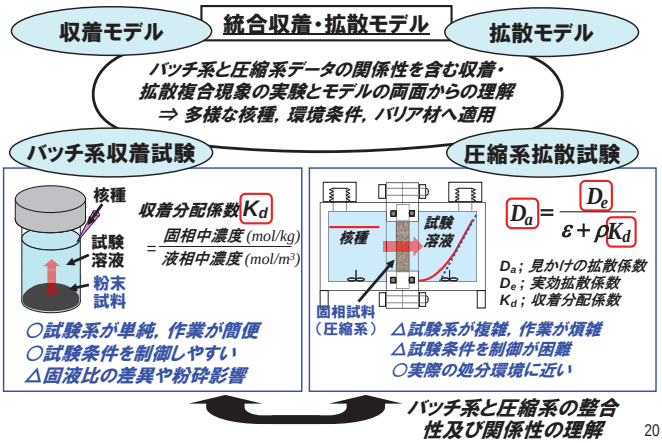
➢ 現状では専門家による判断が不可避。

➢ 選別に悩んだ場合は，保守側（溶解度が高くなる方）に設定。
  - 結晶 vs. 非晶質固相
  - 硫化物 vs. 酸化物
  - etc.

目次

- はじめに
  - 元素と核種のちがい
  - ガラス(固化体)の溶解挙動
  - TRU廃棄物からの核種放出挙動
- 核種移行パラメータとデータベース
  - 溶解度
    - ✓熱力学データベース(TDB)
    - ✓溶解度実験・熱力学データ導出の例
    - ✓溶解度設定フロー
  - **収着分配係数(K_d)・実効拡散係数(D_e)**
    - **✓収着データベース(SDB)**
    - **✓拡散データベース(DDB)**
    - **✓収着・拡散試験**
    - **✓緩衝材に対する設定手法**
    - **✓岩石中の核種移行研究のアプローチ**
- まとめ

K_d & D_e:収着および拡散の試験系

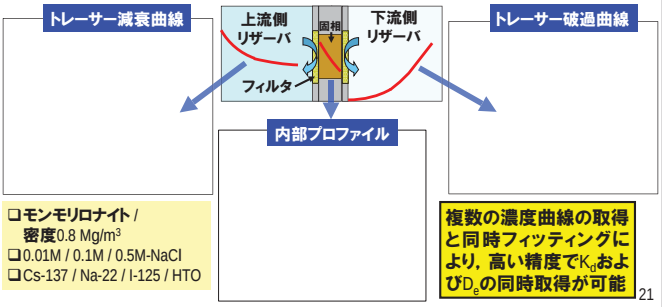


K_d & D_e:圧縮系拡散データ取得例(Cs)

拡張型の透過拡散法（上流/下流/プロファイル取得⇒同時フィッティング）

- ❑ 低～高収着性の多様な核種に柔軟に対応
  （高収着の場合，トレーサー減衰＋プロファイル評価）
- ❑ 環境条件を制御した多様な条件でのデータ取得
- ❑ 精度の高いデータと複雑な収着・拡散現象の把握

■2重フィルタ部に試験液を循環
■多様な環境条件を設定可能

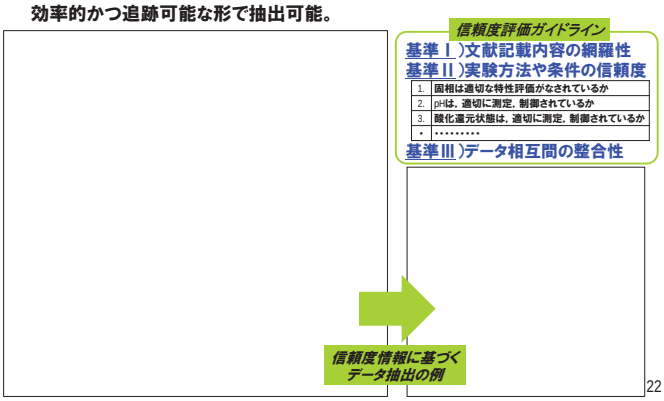


❑モンモリロナイト/密度0.8 Mg/m³
❑0.01M / 0.1M / 0.5M-NaCl
❑Cs-137 / Na-22 / I-125 / HTO

複数の濃度曲線の取得と同時フィッティングにより，高い精度でK_dおよびD_eの同時取得が可能

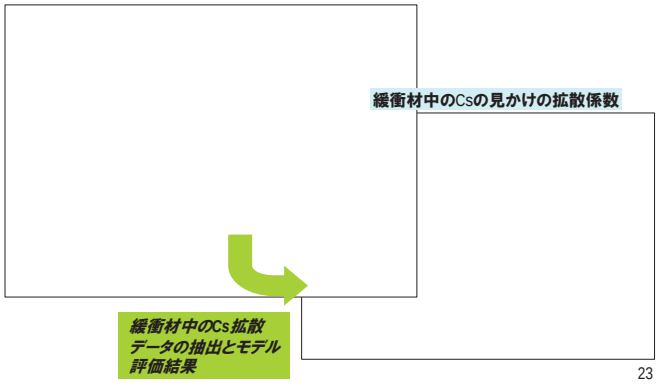
K_d & D_e:収着データベース(SDB)

- **国内外の岩石および緩衝材に対するK_dの文献情報を集積したもの。**
- **（もともとは玉石混交の）データに信頼度情報を付加し，信頼性の高いデータを効率的かつ追跡可能な形で抽出可能。**

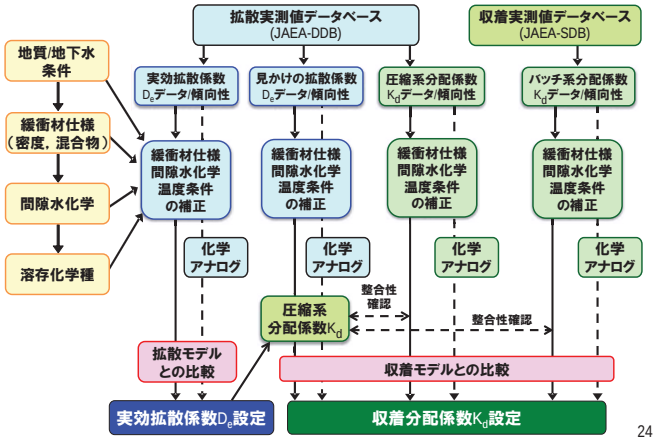


K_d & D_e:拡散データベース(DDB)

- **国内岩石および国内外の緩衝材中の拡散係数等を収集したもの。**
- **環境条件等によるデータ抽出/評価が可能なデータベースとして整備。**



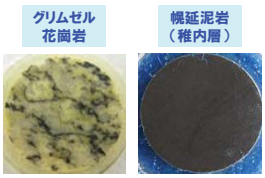
K_d & D_e:緩衝材に対するパラメータ設定手法

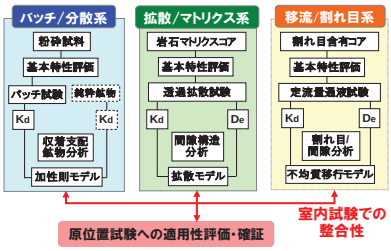


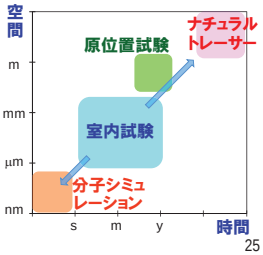
K_d & D_e：岩石中の核種移行研究のアプローチ

グリムゼル花崗岩/結晶質岩および幌延泥岩/堆積岩を対象に，以下の内容を実施。

- ❑ 健岩部～割れ目中の核種移行メカニズムの室内試験による把握。
- ❑ 原位置トレーサー試験による評価手法の確証と室内～原位置のアップスケール法の構築。
- ❑ ナチュラルトレーサーによる長期時間スケールでの確証。







まとめ

- ガラス固化体の溶解挙動：より現実的なモデル構築
- 核種移行パラメータの種類
  - 溶解度，収着分配係数（K_d）・実効拡散係数（D_e）
- 核種移行パラメータ設定手順
  - 現象の理解・モデル化
  - データベース整備（TDB, SDB, DDB）
  - 環境（入力）条件の確認（pH, E_h, 共存元素濃度，鉱物，等）
  - 計算／データ抽出・整理，等 ⇒ 設定

参考文献

- 受託事業報告書
  - 処分システム評価確証技術開発（H25-29）
- データベース（https://migrationdb.jaea.go.jp/ ※無料ですがユーザー登録をお願いします）
  - 熱力学（TDB）: A. Kitamura: JAEA-Data/Code 2018-018 (2019), 北村: 日本原子力学会誌2020年1月号.
  - 収着（SDB）: Y. Sugiura et al.: JAEA-Data/Code 2017-016 (2018).
  - 拡散（DDB）: 舘, 陶山: JAEA-Data/Code 2015-027 (2016).
- パラメータ設定
  - （溶解度, D_e）日本原子力研究開発機構: JAEA-Research 2015-016 (2015)（直接処分第1次取りまとめ）.
  - （K_d）舘ほか: 原子力バックエンド研究, 24(2), 109–134 (2017).

地層処分に関する『2019年度人材育成セミナー』

3. 地層処分の技術III

安全評価技術

19. 最新の安全評価のための取り組み

令和2年1月10日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門 核燃料サイクル工学研究所
環境技術開発センター 基盤技術研究開発部
ニアフィールド研究グループ
高山 裕介

本講演資料は、使用許諾等が得られていない内容や原典図表・データが含まれている可能性があります。二次利用をしないようにお願いします。

はじめに

本発表では，「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（ニアフィールドシステム評価確証技術開発）」での取り組みのうち，ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法に関するこれまでの成果・課題・現在の取り組みについて紹介する。

1.「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（ニアフィールドシステム評価確証技術開発）」での取り組みの概要
  1.現状認識
  2.課題設定
  3.課題解決の方策
2.研究事例
  1. ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法
    （1）過渡期におけるニアフィールドTHMC連成解析モデル開発
    （2）ニアフィールド長期力学解析コード開発

補足：ニアフィールドとは
人工バリアとその設置などにより影響を受けると考えられる人工バリア近傍の岩盤とを合わせた領域
（原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会：高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について,平成9年4月15日 用語解説より）

T：熱
H：水理
M：力学
C：化学

1.1.現状認識

【これまで】

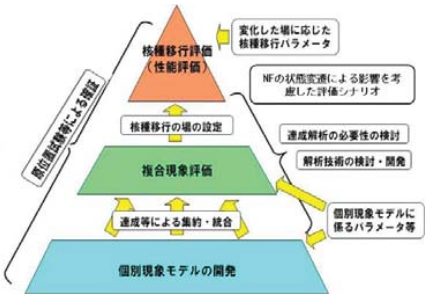
- これまでの高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全性の評価：
  - シナリオを構築し、熱、水理、力学、化学、核種移行など個別の現象に重点
  - 保守的な仮定の導入による評価の様式化、単純化のもとで評価
  - ⇒ 分かりやすさ・不確実性やあいまいさを回避することで、評価の頑健性を目指している。

【今後は】

- 処分事業の進展につれて、下記のような現実的な評価技術を用いて、経時的に充実するサイト条件等の情報を利用しつつ、サイト間の適切性の比較や、デザイン間の優劣の比較等を行いつつ、処分施設設計や安全評価が進められる。
  - サイト間の適切性やデザイン間の適切性を比較できる程度の分解能を持つ評価が必要
  - サイトの諸特性（地下水組成、水理特性、岩盤の力学特性等）が不均質に分布する地質環境の特徴に応じた評価が必要
  - 保守的な仮定の確認や、過度な保守性を排除した評価が必要
  - バリア構成要素間の相互作用を含むニアフィールド環境の長期変遷を適切に考慮した評価が必要

1.2.課題設定

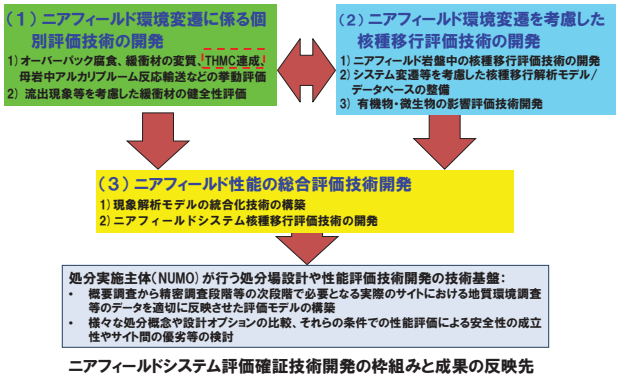
- より現実的な評価技術を開発する。
  - 実際のサイトにおける透水係数などの諸特性が不均質に分布する地質環境の特徴
  - バリア構成要素間の相互作用を含むニアフィールド環境の長期変遷



ニアフィールドにおけるより現実性のある
評価手法（総合評価技術）開発の概念図

1.3.課題解決の方策

ニアフィールドシステム評価確証技術開発事業での取り組み



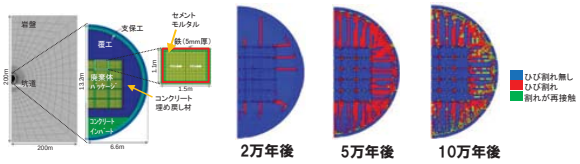
ニアフィールドシステム評価確証技術開発の枠組みと成果の反映先

2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

(1) 過渡期におけるニアフィールドTHMC連成解析モデル開発

THM連成コードTHAMESを用いた幌延人工バリア性能確認試験の再現解析

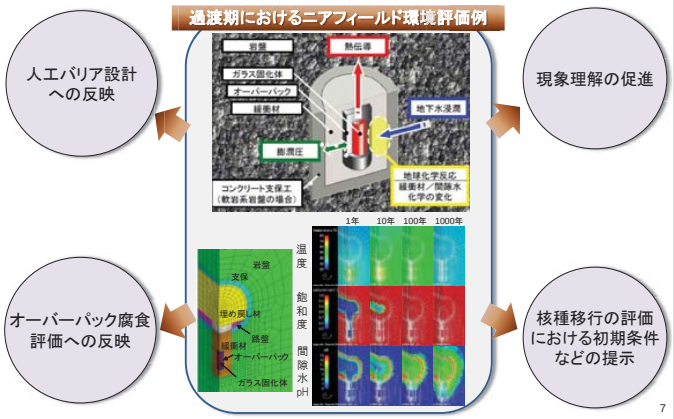
(2) ニアフィールド長期力学解析コード開発



長期力学解析コードMACBECEによるひび割れ発生挙動予測

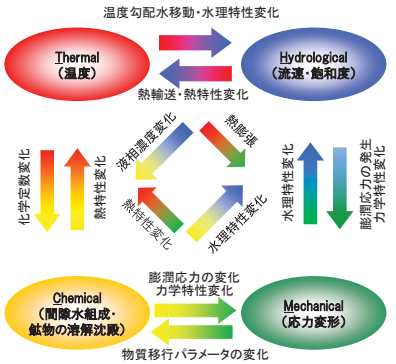
2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

(1)過渡期におけるニアフィールドTHMC連成解析モデル開発



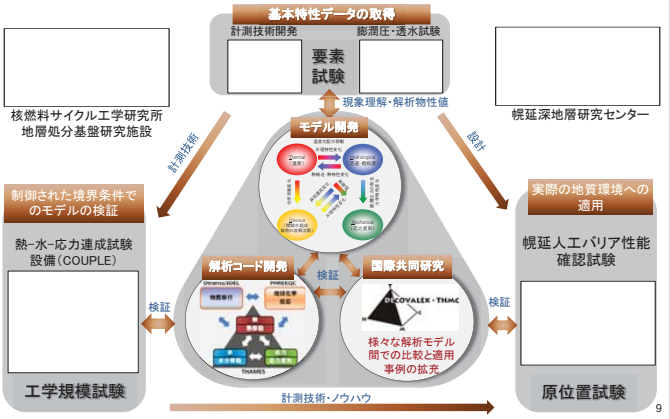
2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

(1)過渡期におけるニアフィールドTHMC連成解析モデル開発



2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

(1)過渡期におけるニアフィールドTHMC連成解析モデル開発

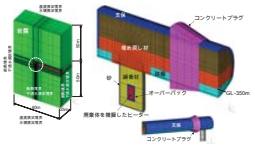


2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

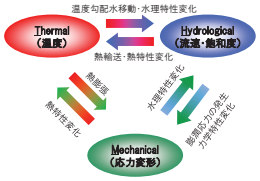
(1)過渡期におけるニアフィールドTHMC連成解析モデル開発

実際の地質環境への適用事例

幌延人工バリア性能確認試験の解析モデル



THM連成モデルの概念図



THAMESの支配方程式例

- Mechanical model

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial t} = \frac{1}{2} C_{ijkl} \frac{\partial \varepsilon_{kl}}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_{sw}}{\partial t} \delta_{ij} - \beta \frac{\partial T}{\partial t} \delta_{ij} + \chi \frac{\partial p_w}{\partial t} \delta_{ij}$$

弾性変形　膨潤　熱膨張

- Hydraulic model

$$q_i = -\rho_w k_r k_w h_{,j} - \rho_w (D_T)_{ij} T_{,j}$$

ダルシー則　温度勾配による流れ

$k_r = S_r^{\,n}$ ：比透水係数

$S_{re} = [1 + (\alpha s)^n]^{-m} \left[1 - {}^{s}/_{P_s}\right]^{\lambda_s}$ ：水分特性曲線

- Thermal model

$$q_i^h = S_r \rho_w c_w v_i T - \lambda_m T_{,i}$$

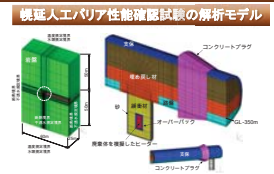
移流　分散

2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

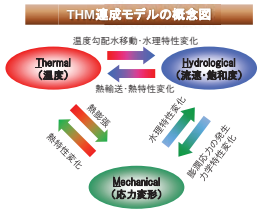
(1)過渡期におけるニアフィールドTHMC連成解析モデル開発

実際の地質環境への適用事例

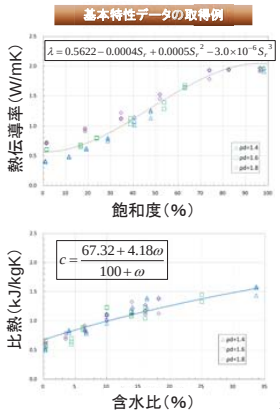
幌延人工バリア性能確認試験の解析モデル



THM連成モデルの概念図



基本特性データの取得例

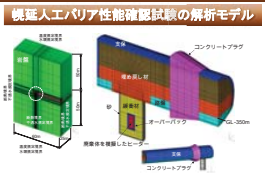


2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

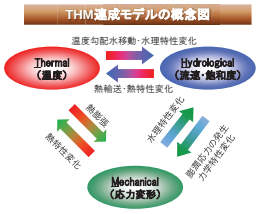
(1)過渡期におけるニアフィールドTHMC連成解析モデル開発

実際の地質環境への適用事例

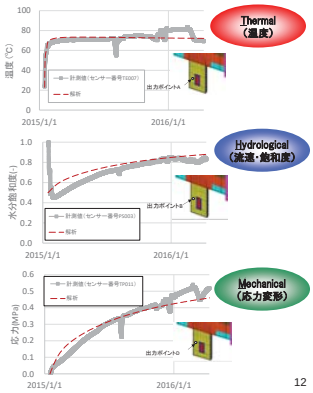
幌延人工バリア性能確認試験の解析モデル



THM連成モデルの概念図



計測結果と解析結果の比較の一例



2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

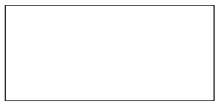
(1)過渡期におけるニアフィールドTHMC連成解析モデル開発

国際共同研究「DECOVALEX」

The DEvelopmentof COupledmodels and their VALidationagainst EXperiments

DECOVALEXプロジェクトの主な目的

- THMまたはTHMC連成コードの開発や検証のサポートを行う
- 地球科学や地盤工学分野におけるTHMおよびTHMC連成プロセスの理解を深める
- 原位置試験や室内試験結果と解析結果の比較を実施する。
- 解析コード開発をサポートするための新しい実験を設計する
- THM（THMC）連成モデルを地層処分施設の安全性評価に適用するための検討を実施



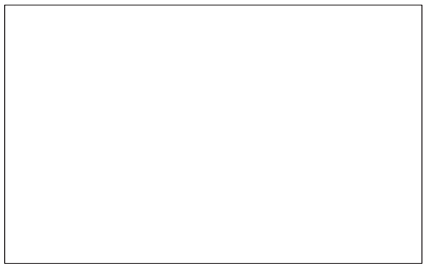
DECOVALEX 2019
- 7フェーズ目
- 2016年～2019年
- 7タスク

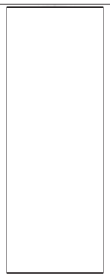
2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

(1)過渡期におけるニアフィールドTHMC連成解析モデル開発

国際共同研究「DECOVALEX」

ＦＥＢＥＸ試験
- 熱-水理-力学連成挙動（最高温度は100°C）
- グリムゼル試験サイト（granite）
- 試験期間: 18 年
- ベントナイトブロックを使用
- 岩盤からの自然冠水





2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

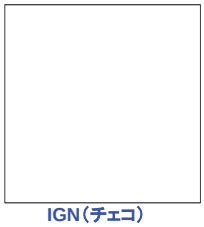
(1)過渡期におけるニアフィールドTHMC連成解析モデル開発

国際共同研究「DECOVALEX」

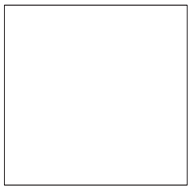
ＦＥＢＥＸ試験
- 熱-水理-力学連成挙動（最高温度は100°C）
- グリムゼル試験サイト（granite）
- 試験期間: 18 年
- ベントナイトブロックを使用
- 岩盤からの自然冠水

JAEA

KAERI（韓国）



IGN（チェコ）



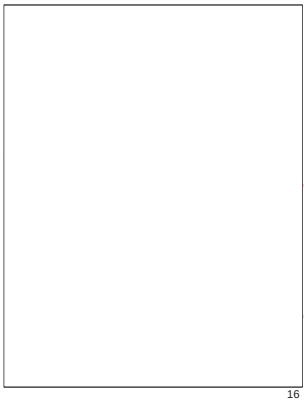
NCU（台湾）

2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

(1)過渡期におけるニアフィールドTHMC連成解析モデル開発

国際共同研究「DECOVALEX」

ＦＥＢＥＸ試験
- 熱-水理-力学連成挙動（最高温度は100°C）
- グリムゼル試験サイト（granite）
- 試験期間: 18 年
- ベントナイトブロックを使用
- 岩盤からの自然冠水

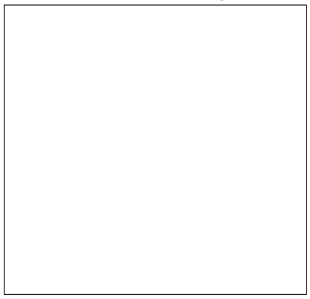


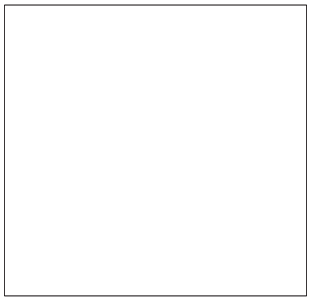
2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

(1)過渡期におけるニアフィールドTHMC連成解析モデル開発

国際共同研究「DECOVALEX」

- DECOVALEX 2019の概要や過去のフェーズのとりくみについて紹介

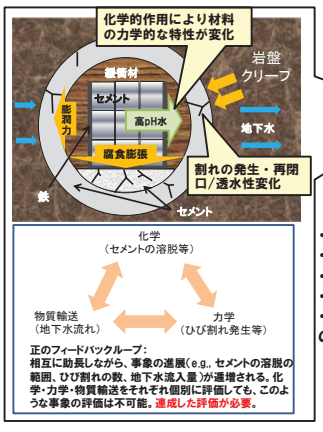


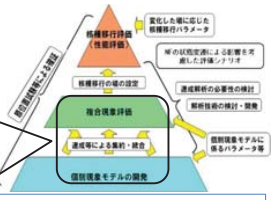


ウェブサイト：http://decovalex.org/

2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

(2)ニアフィールド長期力学解析コード開発





複合現象評価技術の開発

期待される効果
- より現実的な核種移行の場の設定
- 人工バリアに期待している安全機能の確認
- 保守的な設定による評価結果の妥当性確認
- 経済合理性等の観点からの適切な設計
- 核種移行や安全機能に与える影響が大きな因子の明示化に繋がり，効果的な研究開発の促進

化学および物質輸送と連携した力学挙動評価技術の開発が必要

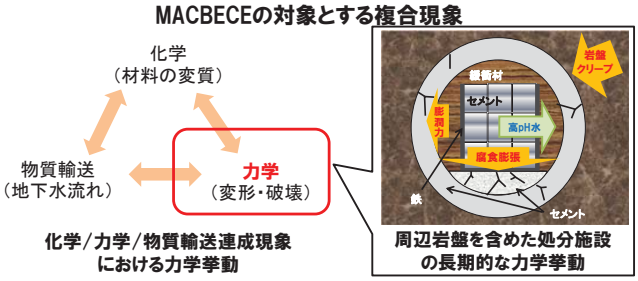
2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

(2)ニアフィールド長期力学解析コード開発

長期力学挙動解析コード「MACBECE」:Mechanical Analysis considering Chemical transition of BEntonite and CEment materials

セメント系材料やベントナイト系材料の化学的変遷情報を取り込み，周辺岩盤を含めた処分施設の長期的な力学挙動を解析し，処分施設の変形に関わる評価を行うと共に，それに伴う物質輸送特性の変化を評価することが可能な解析コード

MACBECEの対象とする複合現象



化学/力学/物質輸送連成現象における力学挙動

周辺岩盤を含めた処分施設の長期的な力学挙動

2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

(2)ニアフィールド長期力学解析コード開発

期間	MACBECEで取り扱う力学現象例	化学反応解析からの入力情報
処分施設建設・操業時	・岩盤の掘削による応力変化 ・岩盤クリープ ・支保工による岩盤の支持 ・緩衝材の膨潤圧発生	
処分施設閉鎖後	・岩盤クリープ ・金属の腐食膨張 ・変質によるセメント系材料の強度・剛性変化 ・セメント系材料のひび割れ ・変質による緩衝材の膨潤性の低下	・セメントの溶脱 ・スメクタイト部分密度，交換性ナトリウム率変化

各材料のモデル

材料	モデル
岩盤	大久保モデル（粘弾性モデル）
金属材料	腐食膨張モデル
セメント系材料	変質による剛性・強度の低下+ひび割れ解放応力載荷+ひび割れによる剛性変化
緩衝材	弾粘塑性構成モデル+変質による膨潤圧低下量を等価な節点荷重として載荷
材料間	ジョイント要素

2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

(2)ニアフィールド長期力学解析コード開発

岩盤の力学挙動解析モデル

大久保モデル（大久保ら,1987）
・コンプライアンス（弾性係数の逆数）が，一軸圧縮試験等の結果から得られる物理パラメータに応じて時間の経過とともに増加すると仮定したモデル
・岩石の時間依存性挙動を表現

金属材料の力学挙動解析モデル

・腐食の進展に伴う剛性の低下，膨張を表現
- ✓ 要素の剛性は，健全部と腐食部の割合に応じて算定
- ✓ 腐食膨張による応力増分（腐食速度，腐食膨張率から膨張ひずみ速度を算出し，それと剛性を掛け合わせて算出）を節点荷重として載荷

大久保誠介, 何昌栄, 西松裕一：一軸圧縮応力下における時間依存性挙動, 日本鉱業会誌, 103, pp.177-181 (1987).

2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

(2)ニアフィールド長期力学解析コード開発

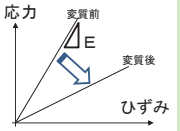
セメント系材料の力学挙動解析モデル

・変質による強度・剛性の低下およびそれに伴う変形を表現

変質により強度・剛性が変化

化学反応解析からの入力情報

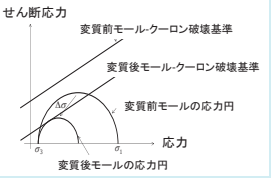
剛性低下による変形



$$\{F_e\} = \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon\} dV$$

$\{F_e\}$:等価節点外力
$[B]$:剛性マトリックス
$\{\varepsilon\}$:剛性低下によって発生するひずみ
$\{\sigma\}$:応力
$[B]$:変位からひずみを求めるマトリックス

強度低下による変形



$$\{F_e\} = \int_V [B]^T \{\Delta\sigma\} dV$$

$\{F_e\}$:等価節点外力
$\{\Delta\sigma\}$:超過応力

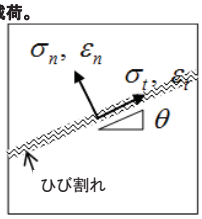
2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

(2)ニアフィールド長期力学解析コード開発

セメント系材料の力学挙動解析モデル

・ひび割れ発生による力学特性の変化や応力状態を表現
最小主応力が引張強度に達した場合
→ひび割れ判定
①ひび割れ判定要素にひび割れ解放力を載荷。
②ひび割れによる剛性変化。

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_n \\ d\sigma_t \\ d\tau_{nt} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_n & 0 & 0 \\ 0 & E_t & 0 \\ 0 & 0 & G_{nt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_n \\ d\varepsilon_t \\ d\gamma_{nt} \end{Bmatrix}$$



σ_n :ひび割れに直行方向の応力
σ_t :ひび割れ方向の応力
τ_{nt} :ひび割れ方向に作用するせん断応力
E_n :ひび割れ直行方向のヤング率
（割れが生じていない部位のヤング率に低減率を乗じたもの）
E_t :ひび割れ方向のヤング率
（割れが生じていない部位のヤング率と同等）
G_{nt} :せん断弾性係数
（割れが生じていない部位のせん断弾性係数に低減率を乗じ，ポアソン比を0と仮定したもの）
ε_n :ひび割れに直行方向のひずみ
ε_t :ひび割れ方向のひずみ
γ_{nt} :ひび割れ方向に作用するせん断ひずみ

2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

(2)ニアフィールド長期力学解析コード開発

ベントナイト系材料の力学挙動解析モデル

ＥＣモデル（大野ら,2006）：Exponential Contractancy Model
・コントラクタンシーの表現関数に指数関数を使用

変質による膨潤圧低下量を等価な節点荷重として載荷（Sahara et al.2006）

化学反応解析からの入力情報

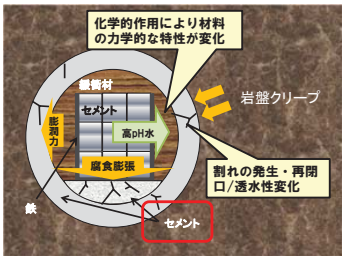
大野進太郎, 飯塚敦, 太田秀樹：非線形コントラクタンシー表現式を用いた土の弾塑性構成モデル, 応用力学論文集, 土木学会, 9, 407-414 (2006).
Sahara, F., Murakami, T. ,Ito, H, Kobayashi, I. and Yokozeki, K.: Development of a mechanical analysis system considering chemical transitions of barrier Materials, WM'06 Conference (2006).

2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

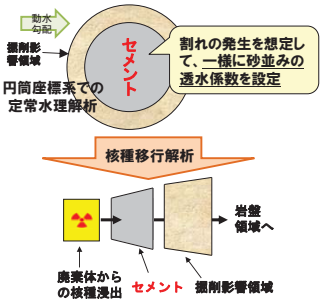
(2)ニアフィールド長期力学解析コード開発

TRU廃棄物処分施設の長期力学解析例

セメントの割れを伴う挙動が透水性の時空間変化に与える影響



第2次TRUレポートでの取り扱い



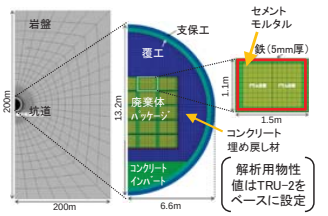
人工バリアにおける1次元核種移行解析の概念

2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

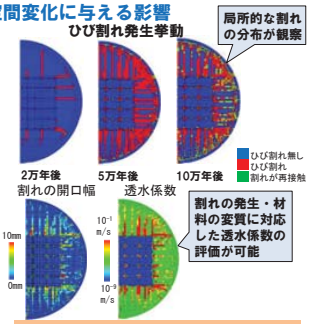
(2)ニアフィールド長期力学解析コード開発

TRU廃棄物処分施設の長期力学解析例

セメントの割れを伴う挙動が透水性の時空間変化に与える影響



部位	長期力学解析で扱った現象
セメント系材料(支保・埋め戻し材・充填材等)	○ 割れの発生 ○ Ca溶脱→剛性・強度低下に伴うひずみ増加
鉄(廃棄体パッケージ)	○ 腐食膨張
岩盤	○ 岩盤クリープ



場の状態変遷における局所的な割れの発生・進展とそれらによる透水係数の空間分布の評価が可能に

日本原子力研究開発機構：平成27 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発報告書，2016

2.1.ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法

(2)ニアフィールド長期力学解析コード開発

【残された課題】

- 処分施設の各材料および周辺岩盤の力学的な相互作用を，**過渡期から長期まで一貫して評価**する技術の開発。

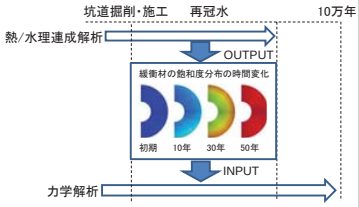
【課題解決に向けた方策】

- 不飽和土の力学モデルの導入による長期力学解析コードの拡張と熱/水理連成解析との連携方法の構築

【平成31年度の実施内容】

- 過渡期の処分施設の各材料および周辺岩盤の力学的な相互作用を考慮したニアフィールドの長期力学挙動評価を実施する。過渡期の力学挙動が、処分施設の長期の状態変遷に与える影響を把握する。

熱/水理連成解析と力学解析の連携の概念



長期力学挙動評価で考慮する力学現象例

期間	考慮する力学現象例
処分施設建設・操業時	・岩盤の掘削による応力変化 ・岩盤クリープ ・支保工による岩盤の支持
処分施設閉鎖後再冠水・長期	・過渡期の緩衝材の力学挙動 ・岩盤クリープ ・金属の腐食膨張 ・変質によるセメント系材料の強度・剛性変化 ・セメント系材料のひび割れ ・変質による緩衝材の膨潤性の低下

おわりに

本発表では，「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（ニアフィールドシステム評価確証技術開発）」での取り組みのうち，ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法に関するこれまでの成果・課題・現在の取り組みについて紹介した。

THMC連成挙動評価技術開発においては，**多様な専門家**（地質，化学，材料，土木，水理，計算工学 etc）の知識を集約して，研究開発を実施していくことが必要。
従って，多くの研究分野にまたがる裾野の広い研究開発であり，みなさんのご協力が求められている。

ご清聴ありがとうございました。

別添資料３

（人材育成プログラムモニターアンケート用紙）

地層処分事業における技術人材の育成

地層処分に関する『2019 年度人材育成セミナー』
アンケートのお願い

○人材育成セミナーにご参加いただきありがとうございます。

今回の人材育成セミナーは、ジェネラリスト育成のための人材育成プログラム開発の一環として試行的に開催したもので、皆様にはモニターとしてご参加いただきました。

モニターの皆様からの貴重なご意見を参考に、来年度以降、人材育成プログラムの改善を行ってまいります。

そのため、皆様には、以降のアンケートに回答をお願いいたします。

3 日目のグループワークで議題としますので、少なくとも赤字で「3 日目のグループワークで必要」とされている質問は、セミナー期間中に回答をお願いいたします。

それ以降の質問については、後日、電子ファイルを事務局宛にご送付下さい。**提出期限：１月２０日（月）期限厳守！**

また、一部の質問は特定の方を対象としています。該当する方のみが回答をお願いいたします。

【アンケート送付先】 jinzaiikusei@rwmc.or.jp　　（※頂いたアンケートは、事務局において記入者が特定されないような形で整理し活用いたします。

質問がたくさんあり大変だと思いますが、ご協力のほどよろしくお願いいたします。

なお、全ての質問に回答をお願いします。

では、アンケートへの回答をお願いいたします！！

- 記入者の基本情報について
- セミナー全体に対する質問
- セミナーの振り返りに関する質問
- 招待講演に対する質問
- 演習に対する質問
- 各講義に対する質問

はじめに：記入者の基本情報について

アンケート回答者の属性を記入して下さい。

1. 年齢	歳
2. 放射性廃棄物処分関連研究等の従事経験年数	年
3. 専門分野（従事経験のある技術分野）及び各専門分野の従事年数を（）内に記入	地質環境（）、工学技術（）、安全評価（）、広聴・広報（）、その他（）
4. 昨年のセミナーに参加したか	はい（）、いいえ
5. これまでに放射性廃棄物に関するセミナー・トレーニングコースなど（e-learning を含む）を受講したことがありますか。ある場合は名称を記入してください。	はい（）、いいえ
6. 個人の目標設定 将来的に地層処分分野においてどのような研究者・技術者になりたいと思いますか 学生の場合は、地層処分分野で就職することをイメージして回答	特定の分野のスペシャリスト、全般的に広く浅く理解するジェネラリスト、全分野を深く理解し処分プロジェクトを牽引できる専門家、その他（）

アンケート大項目①：人材育成セミナー全体に対する質問

今回の人材育成セミナー全般を振り返り、その内容に対する意見や今後のセミナーに対するご意見を教えてください。

	回答欄	
今回のセミナーでは事前に期待していた内容・テーマがカバーされていましたか	はい　　いいえ	いいえの場合、カバーされていなかったのは具体的にどのような分野・内容ですか
今回の講義の中でより深く勉強をしてみたい分野・テーマがあれば教えてください。		
講義の内容をより理解できるようにするためには、講義のやり方、講義資料などをどのように改善したらよいと思いますか。		
今回、サイトモデリングの実習を行いましたが、その他でどのような実習が自身にとって有用だと思いますか。		
座学のほか、施設見学や実際のサイトの研修などで行ってみたい場所・施設があれば教えて下さい。		

アンケート大項目②-1：セミナーの振り返りに関する質問

	回答欄
地層処分事業を進めていくにあたり、今後どのような研究開発課題があると思いますか	
一般の人に地層処分についてわかりやすく伝えるためには、どのような点が重要だと思いますか	
今回のセミナー全体を受講した結果、あなたはこの分野において成長したと思いましたか。その場合は具体的にどのような点であるか教えてください。もしそうでない場合は、セミナーで改善すべき点を教えてください。 （3 日目のグループワークで必要）	
地質環境調査評価技術、工学技術、安全評価技術の各分野毎に全体を振り返って気付いた点、役立った点、改善すべき点を教えて下さい。 （3 日目のグループワークで必要）	（地質環境調査評価技術分野）
	（工学技術分野）
	（安全評価技術分野）
今回の研修で具体的にどういった点の知識を新たに得ることができましたか。	
今回の研修は今後のあなたの業務に役立つと思いますか。具体的にどのような内容で、どのような点が役立つと思いますか	

自分自身の研究が他の分野や処分事業全体の中でどのように貢献できると思いますか	

	回答欄
【大学の先生・学生の方への質問】 興味をひかれた（携わってみたい）研究開発分野・テーマは何ですか	
【大学の先生への質問】 今回のセミナー資料に関して、次世代の人材確保に向けた資料作りとしての改善点がありましたら教えて下さい。	
【学生の方への質問】 地層処分分野において次世代の人材の確保（学生がこの分野に興味を持つ）するためには何が有効かアイデアを頂ければ幸いです。	
【民間企業の方への質問】 今後、所属する会社が、地層処分事業にどのような形でかかわっていくことができると思います。	
【民間企業の方への質問】 また、所属する会社が、地層処分事業に継続的に関わっていくためには何が重要でしょうか。	
【講師の方への質問】 講師をやってみて難しかった点、また、今後、講師をやる場合に、より分かりやすい講義のために改善したい点は何ですか	
【講師の方への質問】 分野間の連携を進めていくためには何が重要だと思いますか	

アンケート大項目②-2：1 月 8 日（1 日目）の招待講演「「技術と社会」の関係認識から技術コミュニケーションへ」について

（3 日目のグループワークで必要）

講演の内容でどういったところが印象に残りましたか。	
地層処分に対する社会の信頼・理解を得るために、研究者・技術者ができることがあると思いますか。また、あるとすれば何ができると思いますか。	
地層処分事業における地元などとの対話で重要なことは何だと思いますか。	

アンケート大項目②-3：1 月 9 日（2 日目）の演習「サイトのモデリング」について

（3 日目のグループワークで必要）

	回答欄
演習の難易度はどうでしたか。難しかった点を具体的に教えてください。	
ご自身の研究テーマは、今回の演習で実施した内容とどのようにかかわっていると思いますか。	
この分野についてさらに深く（詳細に）学んでみたいと思いますか。また、学びたい場合には、具体的にどのような点を学んでみたいですか。	

アンケート大項目②-4：1 月 9 日（2 日目）のグループワークについて

（3 日目のグループワークで必要）

	回答欄
グループワークを実施して気付いた点、今後の展望などありましたら教えてください。	
異文化コミュニケーションを体験してみたことで、一般の人との対話・コミュニケーションにおいて役に立つと考えられる点などありましたら教えてください。	

アンケート大項目③：1 月 8 日（1 日目）の講義について（各講義に対する質問）

各講座の研修内容の理解度などについて、5 段階評価を以下の表に記載願います。　（※表が数ページにまたがっても OK です）

講義 ID. 講義タイトル	**講師**	**5 段階評価（下部の注記を参照）**				**ご意見記載欄**；良かった点、或いは、ここの部分で理解が難しかった等の改善点や今後の要望などを**必ず記載して下さい**（5 段階評価に 1 や 2 を付した場合は、その理由なども記載して下さい）
		①理解度	②教材	③進め方	④有用性	
01.わが国の地層処分事業の制度・政策・進め方	江橋					
02.放射性廃棄物の発生と管理	石田					
03.地層処分における安全確保の考え方	石田					
04.地層処分に望まれる地質環境と 3 段階の調査 1（3 段階の調査・評価）	髙畑					
05.地層処分に望まれる地質環境と 3 段階の調査 2（地域の科学的特性）	丸井					
06.調査・評価技術各論-自然現象 1（火山・火成活動、深部流体）	浅森					
07.調査・評価技術各論-自然現象 2（地震・断層・隆起・侵食）	幡谷					

5 段階評価の指標

①受講者自身による内容の**理解度**　：5.よく理解できた　4.まあ理解できた　3.普通　2.あまり理解できなかった　1.まったく理解できなかった
②**教材**の適切性　：5.大変わかりやすかった　4.わかりやすかった　3.普通　2.わかりづらい部分があった　1.わかりづらかった
③講義の**進め方**（時間配分・説明方法）　：5.大変よかった　4.よかった　3.普通　2.あまりよくなかった　1.よくなかった
④今後の自身の業務への**有用性**　：5.大変役に立つ　4.役に立つ　3.普通　2.あまり役に立たない　1.まったく役に立たない

アンケート大項目③：1 月 9 日（2 日目）の講義について（各講義に対する質問）

各講座の研修内容の理解度などについて、5 段階評価を以下の表に記載願います。　（※表が数ページにまたがっても OK です）

講義 ID. 講義タイトル	**講師**	**5 段階評価（下部の注記を参照）**				**ご意見記載欄**；良かった点、或いは、ここの部分で理解が難しかった等の改善点や今後の要望などを**必ず記載して下さい**（5 段階評価に 1 や 2 を付した場合は、その理由なども記載して下さい）
		①理解度	②教材	③進め方	④有用性	
08.調査・評価技術各論-長期安定性 1（地質・岩盤）	幡谷					
09.調査・評価技術各論-長期安定性 2（地下水）	井川					
10.調査・評価事例（幌延を事例とした物質移行調査技術）	武田					
11.安全確保に向けた処分場設計の考え方	後藤					
12.建設・操業技術（製造・施工品質の確保、操業安全）	勝又					

5 段階評価の指標

①受講者自身による内容の**理解度**　：5.よく理解できた　4.まあ理解できた　3.普通　2.あまり理解できなかった　1.まったく理解できなかった
②**教材**の適切性　：5.大変わかりやすかった　4.わかりやすかった　3.普通　2.わかりづらい部分があった　1.わかりづらかった
③講義の**進め方**（時間配分・説明方法）　：5.大変よかった　4.よかった　3.普通　2.あまりよくなかった　1.よくなかった
④今後の自身の業務への**有用性**　：5.大変役に立つ　4.役に立つ　3.普通　2.あまり役に立たない　1.まったく役に立たない

アンケート大項目③：1 月 10 日（3 日目）の講義について（各講義に対する質問）

各講座の研修内容の理解度などについて、５段階評価を以下の表に記載願います。　（※表が数ページにまたがっても OK です）

講義 ID. 講義タイトル	**講師**	**５段階評価（下部の注記を参照）**				**ご意見記載欄**；良かった点、或いは、ここの部分で理解が難しかった等の改善点や今後の要望などを**必ず記載して下さい**（５段階評価に１や２を付した場合は、その理由なども記載して下さい）
		①理解度	②教材	③進め方	④有用性	
13.安全評価の考え方と枠組み（前半）	吉田					
14.（仮）線量基準の考え方	杉山					
15.安全評価の考え方と枠組み（後半）	吉田					
16.処分場構成要素の変遷挙動	大和田					
17.核種移行解析モデル	三原					
18.核種移行データ･モデル整備とパラメータ設定手法	北村					
19.シナリオ構築に資するニアフィールド構成要素の現象理解	高山					

５段階評価の指標

①受講者自身による内容の**理解度**　：5.よく理解できた　4.まあ理解できた　3.普通　2.あまり理解できなかった　1.まったく理解できなかった
②**教材**の適切性　：5.大変わかりやすかった　4.わかりやすかった　3.普通　2.わかりづらい部分があった　1.わかりづらかった
③講義の**進め方**（時間配分･説明方法）　：5.大変よかった　4.よかった　3.普通　2.あまりよくなかった　1.よくなかった
④今後の自身の業務への**有用性**　：5.大変役に立つ　4.役に立つ　3.普通　2.あまり役に立たない　1.まったく役に立たない

アンケートは以上です。ご協力ありがとうございました。

別添資料 4

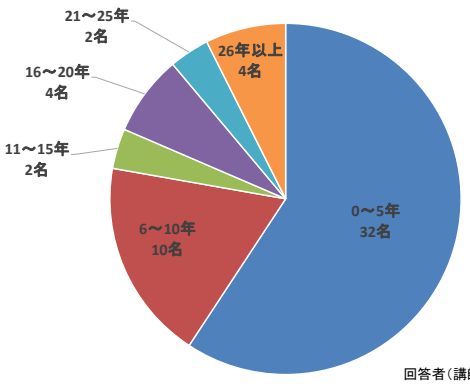
（人材育成プログラムモニターアンケート集計結果）

地層処分事業における技術人材の育成

「2019年度人材育成セミナー」
アンケート集計

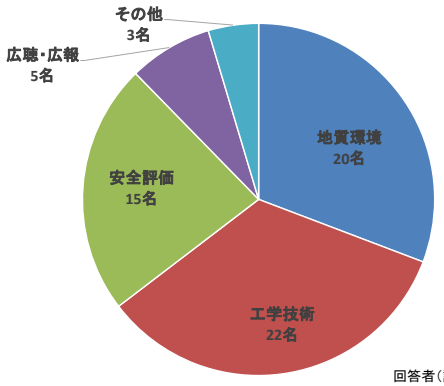
アンケート回答者の属性

放射性廃棄物処分関連研究等の従事経験年数



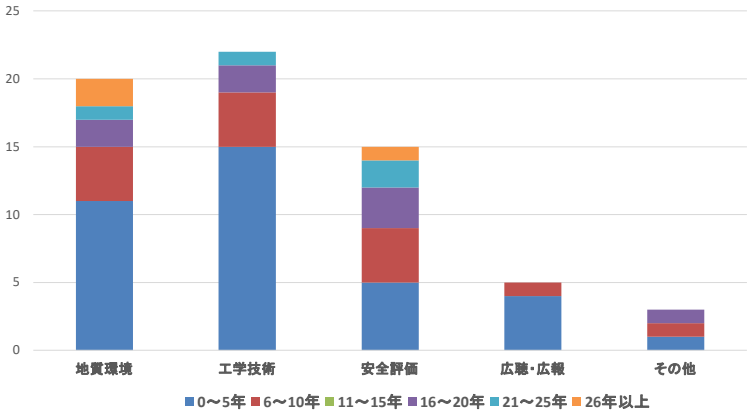
回答者（講師含む）：54名

専門分野



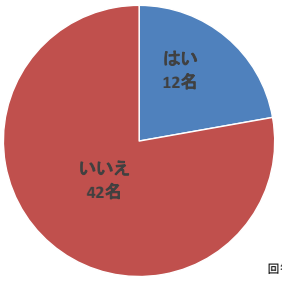
回答者（講師含む）：54名
※複数回答

専門分野別従事経験年数



回答者（講師含む）：54名
※複数回答

これまでに放射性廃棄物に関するセミナー・トレーニングコースなど（e-learnigを含む）を受講したことがありますか。

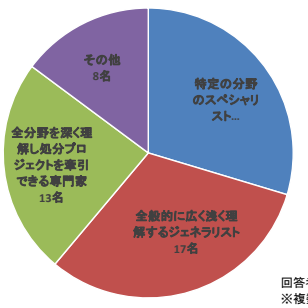


回答者（講師含む）：54名

受講したことがあるセミナー・トレーニングコースの名称

バックエンド週末基礎講座
SGD2019 by SKB @ Oskarshamn
原環センターセミナー
SKBIによるSchool of Geological Disposal
ナチュラルアナログのトレーニングコース
SKBトレーニングコースなど
原子力学会バックエンド部会夏期セミナー
組織内での研修等に参加
瑞浪超深地層研究所における地質環境特性調査に関する研修

個人の目標設定



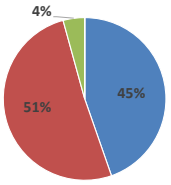
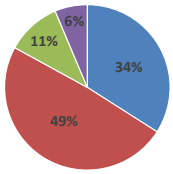
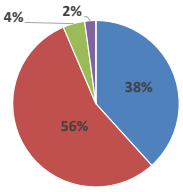
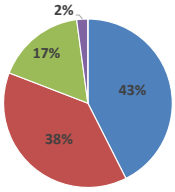
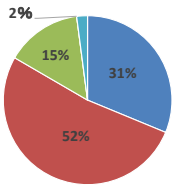
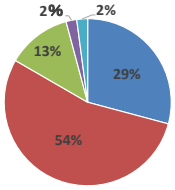
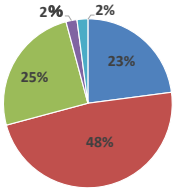
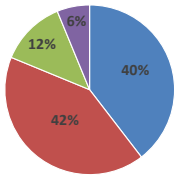
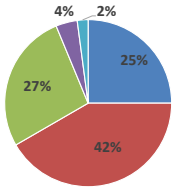
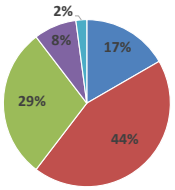
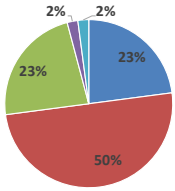
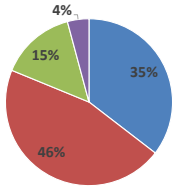
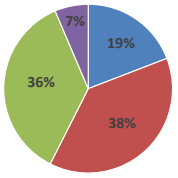
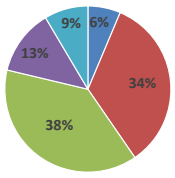
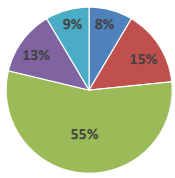
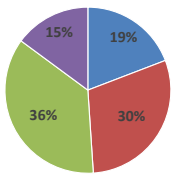
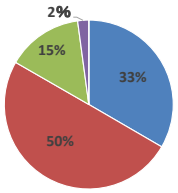
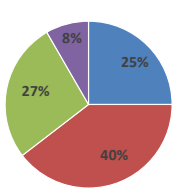
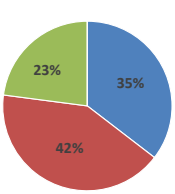
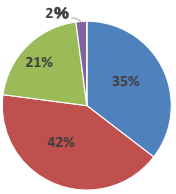
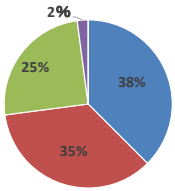
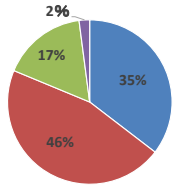
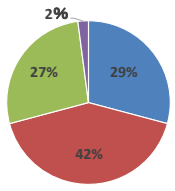
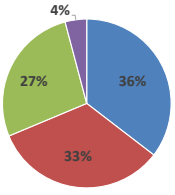
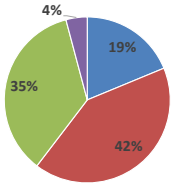
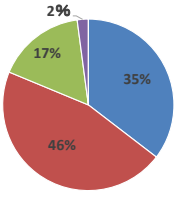
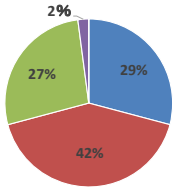
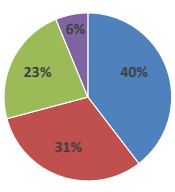
回答者（講師含む）：54名
※複数回答

個人の目標設定（その他の回答）

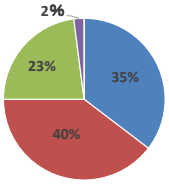
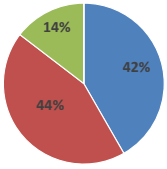
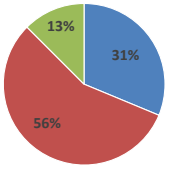
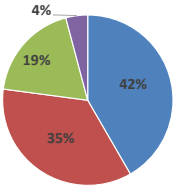
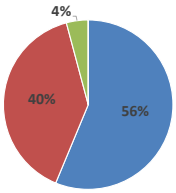
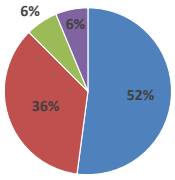
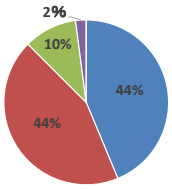
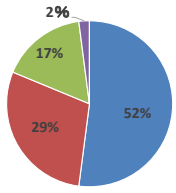
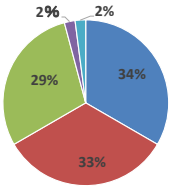
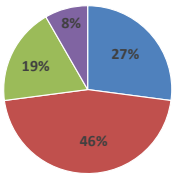
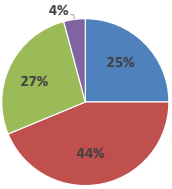
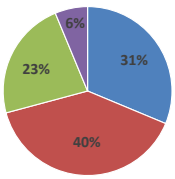
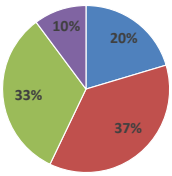
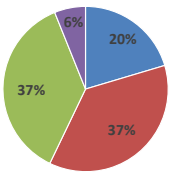
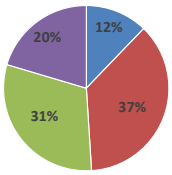
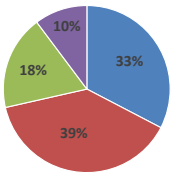
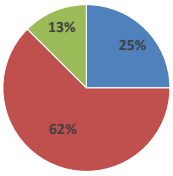
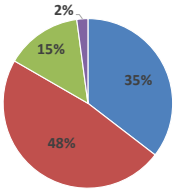
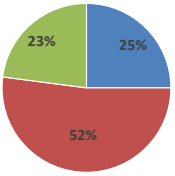
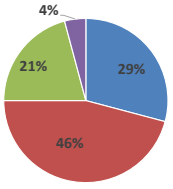
プラスアルファとして幅広い基礎知識も兼ね備えたい。
複数の分野のスペシャリストでありつつ、全般的に広く浅く理解するジェネラリストの側面も持つ、n型人材の研究者・技術者。
特定の分野のスペシャリスト、全般的に広く浅く理解するジェネラリスト、全分野を深く理解し処分プロジェクトを牽引できる専門家、その他（自らの専門分野に対する深い知識を持つとともに、プロジェクト全体における専門分野の立ち位置や必要性を的確に把握し、他分野と適切に連携していける研究者）
所属機関の地層処分研究の方向性を考える上で、地層処分全般を理解すること。
全般的な理解を持っている特定の専門分野のスペシャリスト：n型人材。
地質軸のサイエンスコミュニケーター。
自らが研究成果を挙げるだけでなく、皆のことを考えて地層処分分野全体を盛り上げていけるような研究者
事業推進に必要な課題を特定し解決のための方策を策定し、実行できる人。

地層処分事業における技術人材の育成

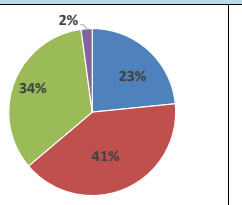
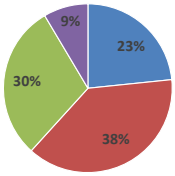
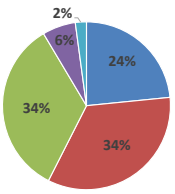
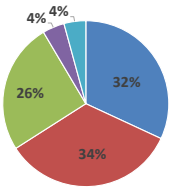
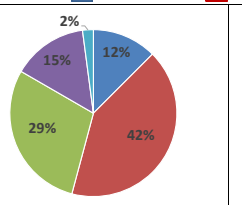
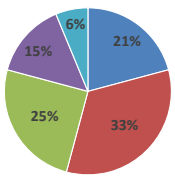
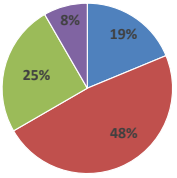
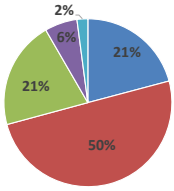
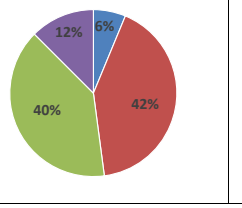
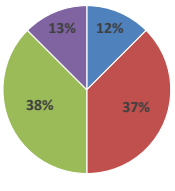
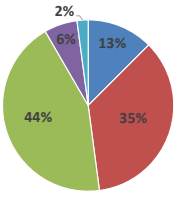
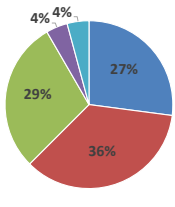
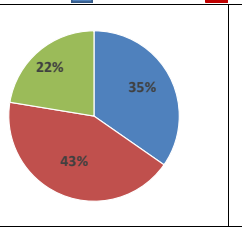
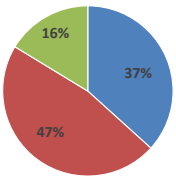
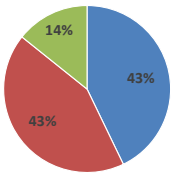
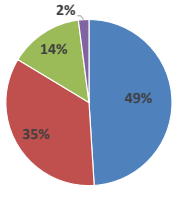
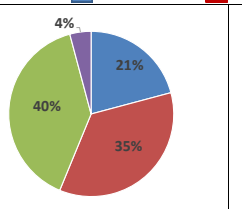
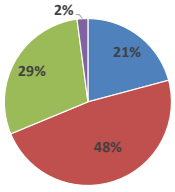
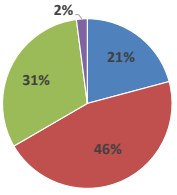
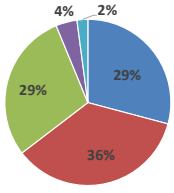
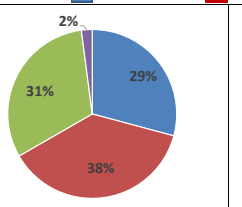
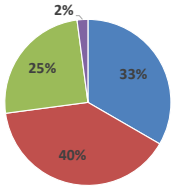
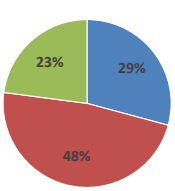
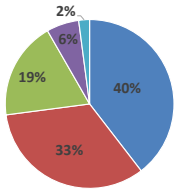
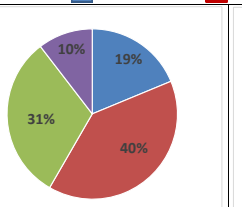
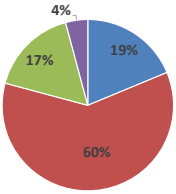
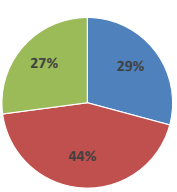
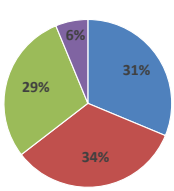
「2019年度人材育成セミナー」
アンケート集計

大項目③：1月8日（1日目）の講義について（各講義に対する質問）				
講義ID.講義タイトル	理解度	教材	進め方	有用性
01.わが国の地層処分事業の制度・政策・進め方				
	5. よく理解できた　4. まあ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった　回答者 47　名			
02.放射性廃棄物の発生と管理）				
	5. よく理解できた　4. まあ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった　回答者 48　名			
03.地層処分における安全確保の考え方				
	5. よく理解できた　4. まあ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった　回答者 48　名			
04.地層処分に望まれる地質環境と3段階の調査1（3段階の調査・評価）				
	5. よく理解できた　4. まあ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった　回答者 47　名			
05.地層処分に望まれる地質環境と3段階の調査2（地層処分に好ましい地域の科学的特性）				
	5. よく理解できた　4. まあ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった　回答者 48　名			
06.調査・評価技術各論-自然現象1（火山・火成活動、深部流体）				
	5. よく理解できた　4. まあ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった　回答者 48　名			
07.調査・評価技術各論-自然現象2（隆起運動、侵食作用、断層運動）				
	5. よく理解できた　4. まあ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった　回答者 48　名			

大項目③：1月9日（2日目）の講義について（各講義に対する質問）

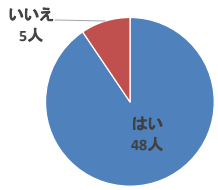
08.調査・評価技術各論−地質環境特性1（地質・岩盤）				
	5. よく理解できた　4. まあ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった			回答者 48　名
09.調査・評価技術各論−地質環境特性2（地下水）				
	5. よく理解できた　4. まあ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった			回答者 48　名
10.調査・評価事例（模延を事例とした物質移行調査技術）				
	5. よく理解できた　4. まあ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった			回答者 48　名
11.安全確保に向けた処分場設計の考え方				
	5. よく理解できた　4. まあ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった			回答者 49　名
12.建設・操業技術（製造・施工品質の確保、操業安全）				
	5. よく理解できた　4. まあ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった			回答者 48　名

大項目③：1月10日（2日目）の講義について（各講義に対する質問）

13.安全評価の考え方と枠組み（前半）				
	5. よく理解できた　4. ほぼ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった　回答者 47 名			
14.線量基準の考え方				
	5. よく理解できた　4. ほぼ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった　回答者 48 名			
15.安全評価の考え方と枠組み（後半）				
	5. よく理解できた　4. ほぼ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった　回答者 48 名			
16.処分場構成要素の変遷挙動（現象の理解）				
	5. よく理解できた　4. ほぼ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった　回答者 49 名			
17.核種移行解析モデル				
	5. よく理解できた　4. ほぼ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった　回答者 48 名			
18.核種移行データ・モデル整備とパラメータ設定手法				
	5. よく理解できた　4. ほぼ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった　回答者 48 名			
19.最新の安全評価のための取り組み				
	5. よく理解できた　4. ほぼ理解できた　3. 普通　2. あまり理解できなかった　1. まったく理解できなかった　回答者 48 名			

地層処分事業における技術人材の育成

「2019年度人材育成セミナー」
アンケート集計

大項目①：人材育成セミナー全体に対する質問	
質問項目	**意見・要望等**
今回のセミナーでは事前に期待していた内容・テーマがカバーされていましたか	 回答者（講師含む）：53名
	「はい」と答えた人の回答
	私は10年ほど地層処分研究に関わっていますが、そのような者にとってはちょうど良いレベルでした。人材育成セミナーの開催目的を考えると全体的にレベルが高すぎる感じがしました。ただ、前回も同様ですが、何をするための講義なのかが、講演者に事前に周知されていませんでした。この点は佐原さんが最初に具体化しておくべき点だと感じました。そのとき、例えば「ゼネラリスト育成が目的」というだけでは不十分で、ゼネラリストとは何か、何をするのか、誰がなるのか、についても講演者と出席者に対してくどいほどに説明して欲しいと思います。また、本講義資料は誰が使うのかも説明されていません。このあたりの条件設定が重要だと思います。（地質環境、25年）
	今後、モニタリングについてもテーマとして議論できると良いかと思いました。（工学技術/安全評価、24年）
	ただし、改善の余地はアリ。分野別へのコメントを参照のこと。（安全評価、25年）
	今回のセミナーでは、事前に期待している内容が共有されており、参加者がどのようなモチベーションで来ているのか知ることができてよかった。セミナー中のディスカッションや懇親会時にそれを用いた時間があってもよかったと思った（事前共有されただけに感じた）。（地質環境、1年）
	幅広い内容の講義が受けられたので参加してよかったと思っています。プラスアルファとして、工学技術について可能であ ればもう少し講義を受けたかったです。（工学技術、1）
	全体的に地質環境調査評価技術に関する講義内容が多い印象を受けた。地下水評価に関わる研究者としては、こういった機会に工学分野や安全評価に関するお話をもっと聞きたいと感じた。（地質環境、2年）
	「いいえ」と答えた人の回答
	知識を習得するためだけの座学は求めていない。求めるものが違っていた。（地質環境、26年）
	工学技術や安全評価の部分については、概ねカバーされていたと感じるが、地質環境調査の部分が地質に偏っており、水理や化学、力学などの紹介が薄いと感じた。 （地質環境、10年）
	現地入りしてから気づいたのですが，放射線の基礎知識に関する講義が抜けています。この知識がないと，なぜ放射性核種が生活圏に出てきては困るのか，どの程度の被ばく線量なら許容されるか（どのように線量の基準値が設定されているか）が理解できないような気がします。あわせて，主要核種については，化学的・放射線学的挙動の紹介があったほうがよかったように思います。（安全評価、20年）
	もう少し。政策決定の背景や、それにもどつく各プロジェクトの関係性や内容について話してほしかった。（地質環境、17年）
	地質分野：自然現象等の評価手法（地層処分にとって好ましくない場所をどのように回避するのか）に関する内容があまりなかったように思う （地質環境、7年）
質問項目	**意見・要望等**
今回の講義の中でより深く勉強をしてみたい分野・テーマがあれば教えてください。	安全評価について。講義16の説明で材料系のFEPについてはかなり理解できました。（地質環境、25年）
	地質環境・調査技術 （工学技術/安全評価、24年）
	社会学、政治、地方行政。放射性廃棄物政策を、より上位の視点からも理解したい。 （地質環境、26年）
	サイトのモデリング （工学技術、5年）
	SDMと安全評価の関係 （安全評価、25年）
	業務では関わりの少ない安全評価技術の内容は、本セミナーで初めて学ぶことができ、特に、核種移行の解析モデルに興味を持った。シミュレーションを用いた研究の発表が多かったが、元素・同位体分析を行っている自分として関わることができることがないか考え、より勉強してみたいと思った。 （地質環境、1年）
	核種移行。核種移行に係る安全評価は，核種移行試験の結果に基づいて行われている。私が専門とする地質環境分野でも，核種移行の考えを取り入れて，天然における物質移動の解明につなげたい。（地質環境、1年）
	安全評価の考え方と方法論 （地質環境、18年）
	地質環境調査の部分が隆起・侵食、火山影響など、どちらかといって地質の分野に偏っているきがしたので、他の分野（化学、水理等）についての研究事例を深く知りたいと感じた。 （地質環境、10年）
	安全評価分野 （地質環境、4年）
	地下水化学です。核種移行挙動評価と共通する部分が多いと思っております。（安全評価、20年）
	SDMについてより深く学びたいと感じており、地質環境の演習の内容をブラッシュアップして実施していただけると面白いかと思います。 （工学技術、2年）
	安全評価に係る処分場のTHMC連成解析に関する研究分野 （安全評価、1年）
	安全評価の考え方 （地質環境、17年）
	工学技術(施工など) （工学技術、3年）
	特に今回以上に深くという希望はないが、最近得られた新しい知見など、一般の方も興味を引くようなトピックスがあれば習得したい。（広聴・広報、5年）
	全般的、特に地質環境調査技術 （工学技術、10年/安全評価、5年）
	私は広報なので、一般の方々が不安に思うことで多く挙げられる「放射線についての安全性」について特に勉強してみたいです。（広聴・広報、4年）
	3段階の調査段階に応じたそれぞれの調査の目的・項目・得られるデータ、 SDMの構築・解析・実測値との比較・モデルへのフィードバックまでの流れを学びたい。（工学技術、7年）
	特別講演にあった技術コミュニケーションと地質環境モデル、地下水流動と核種移行解析について詳しく勉強したいと思いました。（広聴・広報、2年）
	地層分野：地層処分に好ましい地域の科学的特性（講義05等） →現地調査に進まなければ分からないことを承知の上、建設コストや地域性を考慮した現実的なサイト選定について、学んでみたい。 どの地域で事業が進むか分からないが、工学分野（特に建設工学）を学ぶものとして、工事に支障のない地下環境特性は 費用を積めば、ある程度カバーできると考えているが、より良い条件や仕様について、日本の地図を使いながら学んでみたい。（詳細地点として）（工学技術、1年）
	安全評価について（その他、7年）
	地質 （地質環境、7年）
	分野：安全評価技術 テーマ：処分場構成要素の状態変遷、地質環境モデル構築のより具体的な方法 （工学技術、7年）
	技術コミュニケーション （その他、8年）
	今までよくわからないで済ましてしまっていた地質関連の分野の基本的な部分を知ることができ、だいぶイメージをつけることが出来ました。この知見を活かして今後、評価分野に取り組みたいと思いました。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	安全確保に向けた処分場設計の考え方 SDM
	処分場のレイアウト設計 （安全評価、1年）
	地質環境モデルについて講義や演習や地下水流道についての講義で良く学ぶことができた。演習などを通してさらに学んでいけるとよいです。（安全評価、9年）
	調査技術、地下環境評価手法。今回の講義でも全体の概要を学ぶことはできたが、地質環境モデル構築の部分にもう少し時間を割いて学ぶ機会があるとよい。実際の処分場の安全性に必要な要件等を満たすかどうかを、実際に想定しながらモデルを作成し、不確実性をどのように補っていくのかについて、実習などを通じて考える機会があるとよい。（広聴・広報、1年）
	物質移行調査、核種移行について。実際の地層科学研究所での実施内容について。（安全評価、2年）
	地質モデリング・地下水シミュレーション （地質環境、9年）
	09.調査・評価技術各論−地質環境特性2（地下水） 11.安全確保に向けた処分場設計の考え方 12.建設・操業技術 （工学技術、1年）
	SDMを構成する情報や処理について （地質環境、10年/その他、20年）
	工学技術全般、特に回収可能性について （工学技術、1）
	地質環境と安全評価です。（私は工学技術が専門で、他の分野に詳しくないため）（工学技術、2年）
	地質環境 （工学技術、1年）
	地質環境の変遷 （地質環境、3年）
	講義05において，心理学を用いて，communicationすること。（工学技術、17年）
	核種移行解析。（工学技術、1）
	10．調査・評価事例（概証を事例とした物質移行調査技術）が最も興味があります．この講義で，初めてトレーサー試験について学び，どのように物質移行を評価するのか，勉強したいと感じました．（工学技術、2年）
	地質学，水文学，コミュニケーション理論，ディベート論，心理学 （地質環境、5年）
	地下水 地質と関連が深いので、地下水について深く勉強したいと思います。ですので、2日目の講義09はもう少し掘り下げた内容を聞きたかったです。（地質環境、3年）
	実務で取得した値がどう使われるかよく理解できた点から安全評価の「核種移行解析モデル」、「核種移行データ・モデル整備とパラメータ設定手法」について、深く勉強したいと思う。（地質環境、2年）
	安全評価と技術コミュニケーション （工学技術、2年/安全評価、7年）
	安全評価 （地質環境、3年）
	・安全評価分野 ・核種移行解析、ニアフィールドTHMC （工学技術、3年）
	実験室規模ではなく、実際のサイトにおける地下水流動解析や、トレーサー応答による物質物移行解析について学びたい。また、実際にそのような実験を行いたい。（安全評価、6年）
	コミュニケーション，地質，線量基準 （工学技術、20年/安全評価、20年）
	安全評価 （地質環境、30年）
	技術コミュニケーションの具体的事例。（安全評価、27年）
	地質環境調査、長期安定性に関する分野 （地質環境、2年/安全評価、1年）

質問項目	意見・要望等
講義の内容をより理解できるようにするためには、講義のやり方、講義資料などをどのように改善したらよいと思いますか。	まずは、人材育成セミナーの目的をはっきりとすることだと思います。今回のセミナーでは事務局が冒頭で趣旨説明をしましたが、パワーポイントを作成して開催目的を残る形にしておかないと、すぐに忘れられてしまいます。また、少し厳しい表現になりますが、前回、今回ともに研究者に依頼して（ボランティアで）講義資料を作らせていますし、多忙な人々をモニターとしての招集しているわけですから、本セミナーの方向性を明確にして、それを丁寧に説明することは事務局の義務だと思うのです。（地質環境、25年）
	質疑応答の時間を厚めにする　（工学技術/安全評価、24年）
	①広く浅く知識を学ぶ場と、特定のまとまった分野のスキルを身につける場とを分ける。後者→前者であるのが一般的。デマケしたほうが良い。 ②そもそも論ではあるが、コンテンツについてもっと練る必要がある。欠けている項目もあるし、正しいとは思えない内容もある。プログラムを練ってから、教材（既存のものの方が優れていることも多い）を集めるべき。少なくとも並行してやるべき。（地質環境、26年）
	理解度確認テストの実施や講義資料を穴埋め形式にする等を行えば、一方的に講義を聞くだけではなくなり、より理解が深まると感じた。（工学技術、5年）
	・分野毎に、その分野の講義の構成、各講義の役割を明確にして、その分野の講義に入る。 ・各講義では、当該講義の位置づけ、伝えたいことを明確にする。 （これらは、今回のセミナーでは、ある程度は、出来ていたようには思いますが、さらに徹底することが望まれると思います。） ・講義資料には、受講者が自ら追加的にさらなる学習ができるように、情報の引用元や、追加参考図書などの情報を記載しておくことが良いと思います。（安全評価、25年）
	セミナーの1週間前程度の時期に、講義資料のpdf版を手に入れられるとよかったと思った。 また、地層処分に今後関わる人を対象とした人材育成セミナーなので、今後伝えていかなければならないことを学ぶべきだと思う。そのため、講師は若手というより、（例えば）10年以上携わってきた人がやるべきかと思った。所属に講師依頼を出すという話を聞いたので、講師を絞って依頼するのがいいのではないかと思う。 2泊3日かつ夜21:30までというのは、ボリュームが多すぎると感じた。（地質環境、1年）
	●はじめに、地層処分事業や処分場・施設体のイメージを周知するところから始まると良いと思う。 例えば、「処分場には、瑞浪のような単一の垂直坑道だけでなく、らせん状の坑道や複数の排気口を設けること」等．今のところ考えられているイメージを参加者全体で共有しておくことが必要だと思う。 ●講義の位置づけをはっきり示す必要があると思う。 まず講義を行う方々に対して．参加者の想定をはっきり説明する。例えば．「地層処分に関する広く浅い一般知識を持っている方々」が対象だとか．「その分野に関して全くなじみがない方々」が対象だとか。 その上で．参加者（聴講者）に対して．「このようなレベル設定で講義をしていただく」旨を説明してから講義をスタートする。 ●講義を行う方々は．3分野（地質環境・工学設計・安全評価）の現状・課題を明確に提示するべきだと思う。　（地質環境、1年）
	知識・経験がほとんどない受講者のレベルに合わせた講義としてほしい。（地質環境、18年）
	今回の講義ではSDMの構築の重要性が一つのキーワードとしてあったように感じた。冒頭に、SDM構築の流れと、他の講義内容との関連性について説明する資料があったほうがよいと感じた。（地質環境、10年）
	各自のメインメッセージ、コアメッセージ、一番伝えたいこと…を明確にし、それらをはじめに整理してから講義を始めていただきたい。今回の講義にもわかりやすい方とそうでない方がいらっしゃったが、後者はスライドの情報量が多すぎて結局何を伝えたいのかわからなかったり、各スライドの論理的なつながり（なぜ次にそのスライド・話が来るのか）が不明瞭な傾向にあったと思う。（地質環境、4年）
	分野内での事前の発表内容の調整は，より必要と感じました。安全評価分野では事前調整を実施したにもかかわらず，結果的に重複が発生してしまいました。限られた時間ですので，効率よいものにすることは重要と考えます。アレンジ側は大変ですが…。（安全評価、20年）
	演習に割く時間をもう少し増やすことができれば、講義内容のより深い理解につながるかと思う。　（工学技術、2年）
	講義のやり方に異論はありませんが，講義の間の関係やつながりがわかる全体構成をどうえなおしたほうが良いのではないかと思います。各講義の位置づけがわからないことが多々ありました。　（安全評価、1年）
	講義の課題を絞ることが必要。短時間で多くの内容を詰め込みすぎる。資料については、事務局側からのコメント（20ポイント以上）などをきちんと守るようにした方がよい。また講師の選択についても、ベテラン、中堅、若手のどの層をターゲットにするのか明確にした方がよい。若手に経験を積ませたいのは理解できるが、今回でいえば、十分に質問に対応できていないケースも見られ、講義全体として、統一感のなさが目についた。（地質環境、17年）
	講義時間を短くして集中して聞けるようにする。（一日の講義＋グループワークの終了時間を早めてちゃんと休めるようにする。） 同じ分野の各講義のつながりがわかると理解しやすいと思う。 PC持参なら資料はUSB配布・ダウンロード・紙配布から選べるとよかったのではないかと思った。最近はPDFにPCやタブレットで書き込んでメモやノートを取る人もいるし、紙の削減にもなると思う。私の場合、予想以上に資料が分厚くて鞄に入らず持って帰るときに困ったので、データでもらえたほうが嬉しかった。（工学技術、3年）
	自己紹介があったのが良かった。講師の方が専門外の方にお伝えするときに気を付けていることなどをご紹介いただくと、より理解が深まったのではないか。（広聴・広報、5年）
	事前の配布や事前学習の指示があると予習して臨むことができるので効果が上がると思う（工学技術、10年/安全評価、5年）
	全体的に文字が多いと感じます。また、後方席だとスライドの文字が見辛いので、細かい内容が記載されているスライドについては資料にも入れておいていただけると助かります。 さらに、このセミナーは講師役についても人材育成の一環として実施していることをセミナーの冒頭に共有いただいた方が良いと感じました。講義によって説明者のレベルに差があったように感じました。それ自体は目的があって若手育成を兼ねていると承知していますが、知らない人にとっては消化不良だったのではないかと思います。ですので、初めに全参加者にそれを共有していれば、プレゼン内容や説明の仕方についても広くアドバイスがもらえると思いました。（広聴・広報、4年）
	・文字を可能な限り減らし、画像や動画をつかうこと。 ・知識レベルを一般レベルにおとすこと（専門用語を使った時点で理解困難になる）。 ・なぜそれをしなければいけないのか目的を具体化し、得られた成果と整合していること。（工学技術、7年）
	講義資料に記載の参考資料を事前に周知したりするなど、事前に学習できるようにしていただけると幸いです。また、質問票などを用意して講師の方に後日回答していただくなど、時間がなく当日の質疑が難しい場合の対応を用意していただけると有難いと思います。（広聴・広報、2年）
	1日目グループワークでもあった、内容によってだが、資料の見せ方にも注意が必要であると感じた。 具体的には、発表者が受講者に何を伝えたいのか、その情報を時間内でどこまで広げるのか、意外と難しいものと感じた。 概要や情報を多く載せても、講義として取り扱う意味がないので、時間制限に合わせた伝えたい情報を取りまとめていき、 説明は補足を交えながら程度がベストかと思った。（イメージさせるために、絵・図・写真は有効であった。） 過去の経験談など、事例を挟むことも理科促進に繋がる手法として、再認識した。（工学技術、1年）
	全体的に用語が難解であるため、専門外の人間には理解しづらい面がある。最初に各分野において、よく使用する用語の意味を一覧にしておくなど、分野外でも理解できるように説明資料での工夫をする必要があると感じた。あと2日目に行ったサイトモデリングの実習ではファイルのダウンどーどはできたものの、システムが正常に動作しなかったので、あらかじめ動作環境を示して頂ければよかった。（その他、7年）
	講義資料の字をできる限り減らし，図や写真を多く使ったほうがよい　（地質環境、7年）
	演習などでPCを使用する際には、あらかじめソフトをインストールすることやその際に必要なスペック等について、参加者へ事前に連絡された方が演習内容をより理解できるのではないかと思います。PCによっては、セキュリティ上PC本体にデータやソフトを保存・インストールすることができない場合や、PCのスペックが足りずソフトの動作に支障が生じる場合があるためです。（工学技術、7年）
	講師の方々の準備の都合もあるので難しいとは思いますが、もし可能なら、セミナーの2～3日前にでも講義資料を電子ファイルで受領できれば、幸いです。（その他、8年）
	今回は（前回もそうだったと聞いていますが）全講義を全員で聞きましたが、「ジェネラリストを育成する」という命題と、今回来ている受講者のレベルがある程度自分の専門分野を持つ人である考えると、自分の専門外の分野について個別受講するのも良いのかなと思いました（工学の人が地質、地質の人が評価、評価の人が工学の講義を受けるなど）。そうすると受講者のレベルが低いものとの前提で講師は偏差値35~40のプレゼンを作れば良いということでレベル感もそろうのではないかと思います。 また、今回若者が多いことにうれしく思いました。知識技術継承という意味では世代横断でのチーム分けが良いかと思いますが、世代ごとのチーム分けにして同世代でのつながりを強くするのも良いかなと思いました。その点でいうと1年（回）行ったからもう終わりとなるセミナーではなく3回セットで卒業できるようなスクール型などもいいかもしれません（負担は大きいですが…）。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	対象（モニター）のレベル（ある程度経験のある実務者かこの世界の入りたての若手か）を決めて、資料の難易度をある程度合わせたほうがいいのでは。 講義のやり方は特に問題ないと思います。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	私の知識不足からきていると思うが全体的にスライドの情報量が多く感じた。（安全評価、1年）
	講師の方がゆっくり話す方が理解しやすく感じました。午後の講義は集中力が低下してくるので、休憩の頻度を増やすとよいと思います。（安全評価、9年）
	・講義内容に関して、講師によって基礎的内容を重視するのか、やや専門的・実践的な内容を重視するのか、ばらつきがあったように思う。アンケートの結果を参考に、研修全体の方向性をどうするべきかもう少し練ったうえで、講演内容をリクエストしたほうが良いと思った。（講師の方も限られた時間のなかで準備するので難しいと思いますが・・・）（広聴・広報、1年）
	どういった人に向けての講義をしているかを考えると良くなるかと存じます。地層処分にかかわる研究者・技術者の人材育成セミナーとするのであれば、他分野の方々が多くおられることが予想できると思います。講義される方がその分野に見識の深い方の場合、一足飛びの説明になってしまう傾向にあるので、そのあたりを認識したうえで、必要以上に丁寧に説明することが求められると思います。また、講義をされる方々同士の連携が取れていないと感じました。発表順番、内容などなども少し打ち合わせをしたうえで実施すべきかと存じます。（安全評価、2年）
	非専門家にもより分かりやすい説明が良いと思った。 バランス的に工学技術のウェイトがもっと高いとよかったと思う。（地質環境、9年）
	講義だけでなく、実習の時間を増やしたり、地層処分の研究をしている施設に見学にいったりする。 講義だけではあきてしまうので、違うこともあればよいと思います。（工学技術、1年）
	演習やグループワークが有効だと思います。 3社連携における情報の需要と供給について、グループワークできるとよいと思いました。（地質環境、10年/その他、20年）
	出席者、講師の方、事務局の方、皆さんお忙しいとは思いますが、もう少しゆとりあるスケジュール（可能であれば、内容を減らすのではなく日数を 増やす）であれば理想的かと思いました。また、すでに実大規模での実験が行われている技術もあるようですので、それらの動画等も可能な範囲で 見せて頂けると他分野への理解もより一層増すと思います。（工学技術、1）
	地層処分分野全体の枠組みを図示しておいて、「その枠組みのどの部分をどの視点から話すのか」を明確にして頂けると、少しわかりやすくなるかなと思います。また、初学者が抱くような初歩的な疑問を最初に提示しておいて、講義の中でその答えが紐解かれるという流れにすると、聴講者が考えながら講義に臨むことができ、理解の助けになるかもしれないと思います。（工学技術、2年）
	講義の前段で用語等を先にご説明いただいた講義は、頭に入ってきやすかったように思います。（工学技術、1年）
	文字が多いパワーポイントは、理解の向上を妨げると感じた。（地質環境、3年）
	経験の多い方が講師として発表されるのは良いでは．Scheduleに対して内容が減らしてほしい．（工学技術、17年）
	出来る限り文章を少なく．分野に限られた専門用語を使わないでもらったほうが．理解しやすいです．（工学技術、1）
	難度が講義ごとで変わるなと感じました．異分野であっても．講義の内容に関しては理解することができる一方．専門用語が飛び交い全く内容が理解できない講義もありました．学生のお願いとしては．難度を少し下げていただけることで興味が沸き．勉強する意欲になることで．講義の内容以上のことを得ることができるのではないかと感じました．（工学技術、2年）
	「教科書」を作るのであれば．スライドではなくきちんと文章が書かれた本である必要があると感じた． 講義スライドを配布資料とするなら．もうすこし見やすいスライドを各人に期待したい．　（地質環境、5年）
	同じ分野で、専門単語を知っている講義については、多少速いペースでもついていけますが、異なる分野だと、理解が追い付かないことが多かった。その点、工学設計の勝又さんの講義で映像が流れたのは見ていて理解しやすかった。ですので、映像というのは、口で話し続けるよりも説得力があって良いと思った。（地質環境、3年）
	講義時間で入らない内容（初級者向けでない）資料は補足資料として、足して頂きたい。必要に応じて参考にしたいと思う。（地質環境、2年）
	重要な箇所についての予習を課して、それを講義で復習しながら分からないところを質問する時間をとると、理解度が高まると思います。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	一般の人にも説明しているレベルの資料があればいいのではと思います。 あるいは．実際に一般の人に説明しているのであれば．同じように説明していただければと思います。 特に専門外の人には．伝えたいことは何かを明確にすることは．重要であると思います。（地質環境、3年）
	難しいかもしれないが、手を動かすような内容（例えば演習、質問を一人一人紙に書いて対応する…等）があればより良いと思う。（工学技術、3年）
	実際に研究者が行っている、実験の様子や解析の様子を、概略図ではなく実際の写真等により示すことで、より身近に感じて理解しやすいと思う。（安全評価、6年）
	・休憩までいずれも2時間以上となる受講時間割であり．若干長すぎるように感じた（実習を除く）．集中力維持の面から．もう少し休憩頻度を多くしても良いように思う． ・スライド投影をもう少し大きく・見やすくできると良い．会場の中程で聴講したが．図やフォントが見づらいことが多々あった．投影の仕方．および資料作成で対応できる部分があると思う． ・今回は地層処分に特化した内容であったが．他の放射性廃棄物処分や．直接処分．核変換・群分離についてもある程度の知識が得られると良い． ・処分以外の．原子力に関連する知識も得られると良い．原子力発電．核燃料サイクル．核融合．日本のエネルギー利用の変遷．人材育成状況などなど．これは．一般の人たちに向けて処分について話していく際に．原子力に係る様々なことについて処分に限定することなく問われることを考慮した．関係者間では．例えば発電と処分は全く異なる世界だが．一般の人たちにとっては同じ原子力の世界である．加えて．処分関係者といっても様々なバックグランドを持っている方々であり．共通のベースを得る機会があっても良いと思った次第である． ・受講者として誰を想定するか．今回のセミナー内容は処分分野である程度経験を積んだ人向けのように感じた．例えば．初心者向けとしてはバックエンド部会の週末基礎講座もあり．他セミナーなどとの棲み分けができると良い．（工学技術、20年/安全評価、20年）
	座学だけではなく、演習もいれる。（安全評価、27年）
	参加者のレベルをもう少し絞った方が、初学者には理解がしやすくなるのではないでしょうか。 振り返ると、若手や初学者を対象としていても、会場に居たのはある程度の経験がある中堅どころが大半だったような気がします。 レベル別にコースを分けるというのも良いかもしれません。（地質環境、1年）
	専門用語が多いので、それらの説明に時間をかけたほうがよいと感じた。地質環境・調査技術に関する講義では専門の解説や教科書的な内容の資料が多いと感じたが、それでも門外漢の人はほとんど理解できなかったという意見を聞いた。各人が取り組んでいる具体的な内容の説明も重要だがそれを理解してもらうための基本的な部分の説明を増やしたほうがいいと感じた。（地質環境、2年/安全評価、1年）

質問項目	意見・要望等
今回、サイトモデリングの実習を行いましたが、その他でどのような実習が自身にとって有用だと思いますか。	今回の実習は、（説明は上手でしたが）講演者が概念モデルとSDMの区別がついていないため、あまり意味がありませんでした。サイトモデリングの実習は不可能だと思いますので不要だと思います。（地質環境、25年）
	野外実習、巡検・視察 （地質環境、26年）
	簡単なものでよいので、解析の実習等。例えば、講義10の発表資料P25に示してある実測事例に対する再現解析を実習で行い、各自実行拡散係数や収着分配係数を推定してみる等。推定したパラメータが人によってどの程度ばらつきがあるのかもみてみたい。（工学技術、5年）
	・安全評価（シナリオ検討） ・安全評価（核種移行解析） （安全評価、25年）
	例えば実験系であれば、実験の様子を紹介する講義＋データを計算する手法を紹介し実際やってみる実習があってもよいかと思った。 また、NUMOでは実際に地層処分の体験バス？（オーバーパック？緩衝材？の実物を見ることができる体験セット）のようなものがあると聞いたので、そのような実物が見れるとよかった。 （地質環境、1年）
	廃棄体から放射性核種が放出されて，人工バリアや天然バリアを通過して外に出るときの線量計算。 核種移行等のシミュレーションに必要な地質・工学の知識の理解につながりそう。 （地質環境、1年）
	受講者自身の業務と地層処分との関連について、簡単にまとめて発表 （地質環境、18年）
	安全評価の行う上で想定するシナリオを構築する上で必要なシナリオ解析の実習 （地質環境、10年）
	今回の三分野（その分野わけにこだわる必要はありませんが）それぞれでの演習を行っていただけたら、分野外の方の取り組みがより理解できると思います。具体的には、安全評価の部分でのシナリオ作りや、核種移行モデル解析、THMC解析など（業務そのままでなく、簡単なエッセンス程度でも）。（地質環境、4年）
	地質なら地下水組成の設定，工学ならTHMC連成挙動評価あたりでしょうか。ただ，手厳しいようですが，今回みたいな演習であれば，なくてもよいような気がします。 （安全評価、20年）
	安全評価の分野で実際に行っている作業（例えば、解析等）について、セミナーの時間の中で実習として実施できるものがあれば有用なものであると思います。（工学技術、2年）
	安全評価についての簡単なモデルを使った数値計算の実習があると良いかと思います。 （安全評価、1年）
	セミナーの目的によって異なるので、まずはセミナーのターゲットと目的を決定してから、必要な演習内容を決めた方がよい。今回はSDMと言いつつ、地質構造モデルの説明のみだったので、地質環境分野の方には不十分な内容であった思う。（地質環境、17年）
	わからない。講義室内でできる実習は難しいのではないかと思った。（工学技術、3年）
	特に思いつきません。（広聴・広報、5年）
	・地下水分析等の実習 ・露頭している現場での調査実習 （工学技術、10年/安全評価、5年）
	安全評価の分析をする時のパラメータの入れ方や考え方、根拠などが分かる内容も興味があります。よく「都合の良いデータを使っているのではないか」と指摘されることがあるので。（広聴・広報、4年）
	模擬応募区域を対象とした3段階の調査演習（3段階の調査の流れを理解したい） （工学技術、7年）
	ストーリーボードを作成する演習や、安全機能要因分析を扱った演習をしていただけるとより安全評価への理解が深まるため有用なのではないかと思います。（広聴・広報、2年）
	地質・工学・安全評価のどの分野においても、関連した業務を遂行する可能性があるため、どのような実習においても、学ぶ機会となるはず。その上で、優先順位として、地質→工学の順番に、地質環境や調査技術に関わる技術体験や実習を学ぶ機会が頂けたら、有意義な経験となる。（将来、時系列で近いものから学んでいきたい。） JAEAによる地下水流動（複合的観察）やコア観察など実習は以前、受講しており、それを深堀りする機会があれば尚うれしいです。（工学技術、1年）
	対話型全国説明会の実習、技術的な知識のない人にどのように専門的な話を伝えるかというロールプレイング（その他、7年）
	現地踏査 （地質環境、7年）
	核種移行解析に関する実習 （工学技術、7年）
	特に思い浮かびません。（その他、8年）
	今回の実習は大変有用だと思いました。必要だと思いながらSDMという用語は使用していましたが、実体がよく分からないままでした。今回の実習を通して、イメージが付きましたので今後工学や評価の検討をする中でもSDMを意識して実施できると思います。 その他の実習は3分野連携で行うものが良いと思います（今回のSDMは好例）。今回はある例で出来上がっているSDMを眺めるだけでしたが、SDMの入力などを実際にやってみるのもいいかと思います。また、処分事業は最終的に安全評価につながると思いますので、シナリオ作成のワークショップなどもやってみたいなと思いました。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	今回の続きにもなるが、SDMの作成。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	安全評価の分野での解析業務で、データベースの編集に必要な文献をどのように選定して引用しているのか具体的に見てみたい。（安全評価、1年）
	例えば、海水面が変わると地下水の流動が変わるのは専門外だと直観的にはわからない状況がありましたので、地層の断面に地下水の流れを書くなどの、各講義の中で図に何か書き込む作業を短時間ででも入れるのもいいかと思いました。（安全評価、9年）
	・自身の直接の業務ではないが、SDMは安全性確保のベースになるものだと考えているので、考え方、手法を知っておくことは必要だと感じている。（広聴・広報、1年）
	地質関係では巡検などを実施しても良いかと存じます。地学系以外の出身者は巡検をしたことがない方も多いでしょうし、実際にその場所をみて感じることも多いと思います。（安全評価、2年）
	特になし。 サイトモデリングにおいては、実際にモデルを作成することでより理解が深まると思った。（地質環境、9年）
	モデルの解析を自分たちでやってみて、どういった結果になったのかを考察するような実習。（工学技術、1年）
	サイトモデリングの実習は今後も必要だと思いました。まずは基本となる地形、地質からモデル化し、必要となる機能をアドオンして形作られていくのだろうと思いました。（地質環境、10年/その他、20年）
	画像で提示された地形から断層などの地学的変動の痕跡を探す実習 （工学技術、1）
	・処分場配置の検討実習 （狙い：よりよい処分場がどういうものか、考えるきっかけにする） ・自らの専門分野に関して、難しい内容を易しく伝える文章の実習 （狙い：伝え方のトレーニング、専門分野に関する自らの理解度を確認する） （工学技術、2年）
	ソフトの使い方だけではなく、データをどう解釈したかについて考える実習が有用と思う。（地質環境、3年）
	様々な分野の内容を組み込んで，総括的な内容であるとより有用と思います．（工学技術、1）
	サイトモデリングをあらかじめ設定したうえで，どのように安全評価をするか，設計を実施するのか三分野の連携について簡単に実習ができれば，SDMの重要性が確認することができるのではないかと感じました．私個人的には，SDMを活用することに関して，非常に興味があります．（工学技術、2年）
	コミュニケーション実践 （地質環境、5年）
	どれというより、まずは全部試してみるべきと思う。やってみて適切なものを実習としていけばよいと思う。（地質環境、3年）
	地下水に関する研究をしていることから、地下水流動調査・解析の結果がどのように線量計算に用いられているか実際に計算してみたいと考えている。そのため、線量計算に関する基礎知識と数値解析に関する実習が有用だと思う。
	核種移行モデル、パラメータ設定、シナリオ設定など、安全評価の一連の流れについて計算を含めた実習。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	人工バリアで使われる材料がどのような過程をへて，緩衝材になるかなど，あるいは緩衝材を直接触るなどして，できるだけ実物に触れるような機会があればと望みます。（地質環境、3年）
	例えば、核種移行解析の実践など。（工学技術、3年）
	流動解析や物質移行解析を行ってみたいと思った。（安全評価、6年）
	・実際の岩石試料などを用いた収着実験のような実習 ・核種移行評価 ・見学・研修とも関連して，実習や見学は座学セミナーとは別枠にした方が良いと思う．また，地質コースやパラメータ評価コース，解析コースなどのコース分け実習という形も面白いのではないか．（工学技術、20年/安全評価、20年）
	報告書の書き方、シミュレーションの方法。（地質環境、30年）
	モデルを作るという事自体が今後の業務の役に立ちそうな感じがしました。（地質環境、1年）
	安全評価に関する解析（計算？）方法に興味があった。（地質環境、2年/安全評価、1年）

質問項目	意見・要望等
座学のほか、施設見学や実際のサイトの研修などで行ってみたい場所・施設があれば教えて下さい。	まだ手を広げられる段階になっていないと思います。上述したように、座学を徹底的にブラッシュアップすべきだと思います。(地質環境、25年)
	一般のトンネル施工事例の学習や見学も参考になるかと思います。（工学技術/安全評価、24年）
	①前回今回のような座学であれば今後参加しない。 ②研修・巡検場所の選択は各分野の専門家に任せたほうが良い。(地質環境、26年)
	地質環境の講義で紹介された断層等の事例を見てみたい。（工学技術、5年）
	JAEA幌延、CRIEPI精須賀？（現地でどのようなものが見学できるのか理解していませんが…） ただし、研修の期間・目的を考慮した上で、この研修プログラムに入れるのが良いかは要検討 （安全評価、25年）
	六ケ所村あたりにある関連施設。 （見ることができるのかわからないが、実際に処分するものがどのようになっているか見ることができる？） 地質調査の仕方を学ぶ実習（地層処分地として検討していると誤解される可能性があるので、市町村への説明が大変かもしれないが…）。 （地質環境、1年）
	●幌延深地層研究センター ●素朴な疑問であるが，成田での開催の意図が気になる。原環センターさんやNUMOさんは東京に本拠があるのに，なにゆえ成田で行うのだろうかと思った。（地質環境、1年）
	海外の地下研究所 （地質環境、10年）
	「百聞は一見にしかず」ですので，開催場所もしくはその周辺施設の見学はあったほうがわかりやすいような気がします。成田であれば，ちょっと遠いですがJAEA東海（エントリー）とかでしょうか。地層処分そのものではないものの，つくば市にあるAIST（地質標本館など）という手もあるかもしれません。（安全評価、20年）
	実際の地質調査の状況等がみられると面白いかと思います。（工学技術、2年）
	幌延の地下研究所の見学に行ってみたいです。 （安全評価、1年）
	オーバーパックの製作見学 （工学技術、3年）
	落下試験や耐火試験、浸漬試験等の現場を確認したい。返還固化体の港湾における荷下ろしの様子と専用道路を確認したい。(広聴・広報、5年)
	・地下施設やトンネル工事現場の見学 ・物理探査等による調査現場の見学 （工学技術、10年/安全評価、5年）
	今のところ思い浮かびません。組織内の見学研修等で現状は網羅されていると感じています。(広聴・広報、4年)
	リニア新幹線のトンネル現場（TBMやグラウチング技術）、 串木野などの石油備蓄基地（大断面掘削・維持の技術、グラウチング技術）、 菱刈鉱山（換気・冷房、排水・水没対策などの操業安全対策技術）（工学技術、7年）
	幌延の地下研究施設や横須賀のボーリング試験などを見学してみたいです。また、博物館等を活用し、（地質系の講義をつくばの地質標本館で実施するなど）実物のある環境で講義を行うとより理解しやすいように思います。(広聴・広報、2年)
	瑞浪（閉鎖される前に行ってみたい）（安全評価、10年）
	・幌延深地層研究センター ・福島原子力関連施設 ・稼働中の原子力発電所 ・上記、原子力関連施設のPP設備や保安設備など（工学技術、1年）
	日本原燃の再処理施設、余裕深度処分の処分場予定地（その他、7年）
	幌延深地層研究センター （地質環境、7年）
	・地層処分に関する研究（実証試験、実験など）を実施している施設 ・原子力関連施設のPRセンター （工学技術、7年）
	幌延 （その他、8年）
	瑞浪URL（閉鎖前or閉鎖措置中） 日本原燃殿のL1坑道 地質調査を行っている場所（他分野） トンネル工事の現場（他分野） なにかの地下施設（地下発電所、貯水槽？） （工学技術、1年/安全評価、4年）
	他に行ける機会もあると思うので、特に必要ないのでは。ただ、上記の実習と合わせるなら、幌延（地質、工学）や東海（安全評価）もあってもいいが。(地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年)
	サイト調査結果(地質図や地下水流動)を実際の地形などと対比させて見る様な研修ができると理解が深まって良いと考えます。(安全評価、9年)
	その業務に携わる人だけでもよいかもしれないが、実際のフィールドを見学等したうえで、データや机上情報等を用いた地質環境モデル構築の機械があるとよい。(広聴・広報、1年)
	ラボスケールの実験を実施している所(JAEA、電中研、産総研)や、深地層研究をしている所(JAEA)。(安全評価、2年)
	行けるにであれば、幌延や東海村のJAEAの施設にいってみたい。(工学技術、1年)
	幌延における実験の様子等を見てみたいと思いました。(地質環境、10年/その他、20年)
	幌延深地層研究センター （工学技術、1）
	地質環境調査に関するフィールドワーク （工学技術、2年）
	幌延深地研究センターを是非見学させていただければと思います。(工学技術、1年)
	見学旅行などではなく、もっと広い分野から人材を集めるべきと感じた。(地質環境、3年)
	六ケ所村，地下研究所，再処理施設など原子力発電所以外関連の施設。(工学技術、17年)
	ガラス固化体や緩衝材ブロックなどを実際に作製する様子を見学したい．(工学技術、1)
	施設見学として，幌延深馳走研究センターを挙げます．私は，実務をしているわけではないので，実際の地層処分はなかなかイメージを浮かべることができない部分も多々ありましたので，実際に深地層を見学することで，自身の研究意欲はもちろんのこと，今後の地層処分技術に関わり方など多くのことが学べるのではないかと感じました．(工学技術、2年)
	六ケ所 （地質環境、5年）
	自分の分野ではない工学設計の施設を見てみたいです。現場を見たほうが、理解度が増すと思うからです。(地質環境、3年)
	瑞浪深地層研究所およびその周辺で業務を実施した経験はあるが、幌延ではないため機会があれば是非見学したい。(地質環境、2年)
	JAEA幌延深地層研究センター、地質環境の野外調査 （工学技術、2年/安全評価、7年）
	幌延，瑞浪，ジオミライ号。(地質環境、3年)
	フィンランド オルキルオト最終処分施設 （工学技術、3年）
	・幌延のような原位置の見学． ・処分に関する開発やパラメータ取得の，実際の実施状況の見学．(JEAEなどの研究施設) ・座学と関連させた形の見学や研修になると，より効果的と考える．(工学技術、20年/安全評価、20年)
	地下施設の見学と実際の実験の説明。(地質環境、30年)

大項目②-1：セミナーの振り返りに関する質問	
質問項目	意見・要望等
地層処分事業を進めていくにあたり、今後どのような研究開発課題があると思いますか	ニアフィールドについては講演19でハイレベルな将来を見据えた研究が続けられていることが分かりました。しかし、地質環境についてはあまり進んでいない印象があります。客観的にみても沿岸部については不十分という印象を受けました。なお、この質問に対する回答は、本来NUMOがおこなうべきものだと思います。(地質環境、25年)
	長期の地質環境変動と人工バリアの性能変遷を直接リンクした評価手法の開発 (工学技術/安全評価、24年)
	人工バリア・天然バリアを含む大規模領域を対象とした時の大容量・高速計算技術の開発 (工学技術、5年)
	・すでにそれなりに実施されて来ているとの認識ではあるものの、処分の事業段階を想定し、各段階で必要な技術・手法を洗い出した上で、その充足度をレビューして、必要な技術・手法などを着実に充足しているような体系的なアプローチが必要と考えます。 ・その際、従来は個別の現象について、それぞれに調査、研究、技術開発がなされて来ているような印象がありますが、さまざまな現象が相互に影響を及ぼすようなシステム全体としての振る舞いや、分野間の連携などにも留意した課題の設定が必要であると思います。 (安全評価、25年)
	地層処分地の決定。市町村民の理解を得ること。理解を得るために安全性を高めるための研究。(地質環境、1年)
	地下環境の詳細な解明。想定QAの一つである「地表より地下の方が不安」の声をクリアするべく、取り組みたい。(地質環境、1年)
	まずは分野間の議論が必要だと思います。 (地質環境、1年)
	・想定される規制要求を満足できるような研究開発 ・研究開発ではないが、地層処分事業に携わる人員の長期的な確保や人材育成に関わる仕組み、プログラム等の構築 (地質環境、10年)
	人工バリア等の処分技術の信頼性向上。埋め戻しに関する技術の確立やそれに伴い生じうる地質環境変化の現象理解に関する研究。 (地質環境、4年)
	漠然とした回答をお許しいただけるのであれば，長期挙動を予測する技術でしょうか。要素ごとにはある程度はできているようにも思うのですが，どうも全体としてしっくりくるものがないような気がします。(安全評価、20年)
	地層処分を実施する場所の地質環境が定まっていない現状においては、いろいろな状況に対応できるような技術オプションを開発するとともに安全性をでき得る限り向上させて、実施条件を緩和させていくことが重要だと思う。(工学技術、2年)
	安全評価について，シナリオ構築に関係する処分場の状態設定の理解促進に向けた基礎研究。 核種移行の計算について，より広い空間スケールにおける三次元空間の核種移行計算。 処分場の性能を評価するために，より現実に即した処分場および状態のモデル化の技術開発。 不確実性を考慮に入れた解析技術の開発。 (安全評価、1年)
	人工バリアを含めた安全評価を実施する上で、特に沿岸部において、どのような条件で地下水の水理的基盤(地下水流動の最下部)が形成れ、また将来的にどのような条件で動くのかを把握することが重要だと感じている。(地質環境、17年)
	人工バリアの隣接する分野間で連携した研究 (工学技術、3年)
	地下について、より測定精度や信頼性が増す調査手法の開発や改善。(広聴・広報、5年)
	施工品質や期待性能の実証 (工学技術、10年/安全評価、5年)
	実際に技術開発に携わっているわけでないので深くは分かりませんが、長期安全性についての評価技術は常に求めていく課題と考えます。(広聴・広報、4年)
	地層処分事業における ☆地上・地下火災対策技術 ☆環境影響評価 ・外部事象からの安全対策技術 ・建設・操業の遠隔自動化施工技術 ・モニタリング (工学技術、7年)
	川魚など、河川に生息する生物由来の食品を口にする人間の被ばくプロセスを考慮した生活圏評価を実施する必要があると思います。(広聴・広報、2年)
	各分野の専門家や技術者が、要件・ニーズの整理を整合していく必要があり、できていないことが大きな課題であると感じる。 処分場建設の候補地が見えた段階で、必要な研究・開発が限られてくると考えられるが、その際にも、関係する分野の担当にも 情報を共有しながら、都度課題を整理していくべきと考える。その他、技術者不足に陥らないか、不安になった。(工学技術、1年)
	10万年単位の安全性を説明するためのシミュレーション、安全評価について、一般の人々も安全性を感じることが出来る、理解できるようにするか。(その他、7年)
	地質・工学・安全評価の分野間の連携に関する課題 (地質環境、7年)
	・地質環境・調査技術：大深度岩盤を対象とした物理探査技術の高度化、長期間の事業におけるモニタリング技術・システムの開発 ・工学技術：地層処分場の地下施設における遠隔操作技術、装置開発 ・安全評価技術：処分場の状態変遷に関する理解と予測の信頼性向上 (工学技術、7年)
	日本の使用済燃料について、全量再処理が実施不可能になったときの代替オプションとして、使用済燃料の直接処分の研究開発が重要と思います。(その他、8年)
	各分野での用語の擦り合わせ、あるいは共通言語の整備。 今回メインで話されたSDMは3分野を統合して話すうえで有効だと思いました。しかし、より専門に近い地質分野の人からは今回の実習で行ったSDMはSDMではないといった趣旨の声も聞かれたのでより細かい部分でのすり合わせが必要かと思います。(工学技術、1年/安全評価、4年)
	TRU廃棄物に関する工学試験・原位置試験(地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年)
	処分地の選定で地域や国民の同意を得るのは課題となるが、地層処分は行われることでその地域に技術的発展や雇用増加による地域の活性化等のメリットもあると考えられる。 地層処分事業を進めていく中で蓄積した知見や技術が産業や他の分野で有効活用できないかの調査を研究開発の課題にできないかと思う。(安全評価、1年)
	設計や安全評価での活用を考慮したSDMの開発、安全評価や設計の照査に関連するFEPやストーリーボード等の処分場の状態変遷の設定、予測に関する手法や不確実性を低減する研究開発。(安全評価、9年)
	色々あるのだとは思いますが、今回のセミナーを通じて自身が感じたのは、 ・処分地選定の際の、サイト評価のための適切な調査技術、方法、プロセス ・3分野連携(サイト調査、工学、安全評価)の在り方 (広聴・広報、1年)
	シミュレーションの高精度化。モデルの確立。(安全評価、2年)
	地質環境の長期予測における不確実性の評価。(地質環境、9年)
	地下地盤でのことなので不確実性が伴ってしまうので、それを加味したうえでどうやって安全性を担保して、一般のひとに伝えていくこと。(工学技術、1年)
	モニタリング等の観測・監視システムに関する研究開発が必要ではないかと思いました(私が情報システムを専門としているという背景もありますが)。(地質環境、10年/その他、20年)
	ガラス固化体の中間貯蔵箇所(六ケ所？)から地層処分場への輸送時の安全確保(放射線漏れやテロ攻撃への対策) ・処分坑道への埋め戻し材の投入方法(地上での試験時と物理的、化学的性能を損なわずに投入する方法)、坑道内の輸送中の品質管理手法 (工学技術、1)
	回答の観点：地層処分場について、緊急時の対策について語られることが少ないと感じます。 地元の理解を得て文献調査以降のフェーズに進むためには、緊急時の対策(調査・建設・操業時)を万全にする必要があると考えました。 また、事故を起こしてしまうと地元の信頼を損ねるため、事故の未然防止対策も詳細に検討する必要があると考えました。 (間違った認識があれば申し訳ありません。) ・処分場への廃棄体の輸送に伴う以下のトピックに関して、陸上輸送・海上輸送に関わるインフラ施設をより詳細に検討する必要がある (公衆安全／核セキュリティ／災害時・緊急時の対応) ・大深度の立坑、水平坑道、斜坑に関する建設時の安全対策(特に緊急時)をより詳細に検討する必要がある ・アクセス坑道や換気立坑に関する緊急時の対応を明確にし、設備の冗長性を確保する必要がある (地下深くでの火災、停電、人身救護) (工学技術、2年)
	様々な分野から、多方面で研究・調査・計画が行われ、成果として挙げられている中で、次のステップとして、分野間、組織間での連携が重要になるのではないかと思います。(工学技術、1年)
	・遠隔操作技術 ・地盤の長期安定性の評価技術 (地質環境、3年)
	地層処分の信頼性を向上させ，地層処分の基礎知識を理解させるためのcommunication. (工学技術、17年)
	モニタリング技術。(工学技術、1)
	本講義を受講するうえで，多くの技術開発が同時に進められているため，いかに重複した技術開発がすすめられないように取りまとめを行い，更に取りまとめた内容が，私たちのような学生にも浸透することで，研究内容だけではなく事業の発展に関われるのではないかと感じました．私自身，まだ勉強不足なところがあり，今後の研究開発課題の重要度を判断するに至らなかったので，今後，取りまとめた内容についても更に勉強することが必要だと感じました．(工学技術、2年)
	地質環境モデル作成に含まれる不確実性 地下水解析領域の設定 (地質環境、5年)
	各分野間の連携。今回の講義を受けて、各分野でいろいろと調査をされていることが分かった。しかし、他の分野と連携がとれていないところがあり、せっかく調査していても生かし切れていない印象を受けた。(地質環境、3年)
	室内試験や原位置試験、広域での試験など色々な時間・空間スケールでの試験が実施されているが、それらの関係性については言及されていない。今後、より定量的に処分事業の成立性を説明するには、時間・空間スケールの関係性を示していく必要があると考える。(地質環境、2年)
	知識やノウハウの維持・継承・発展のためにも、これまでの網羅的な研究開発の枠組みは重要だと思います。これらに加え、地層処分事業の進展、世の中の情勢、政策を進めるうえで必要な課題を見極めて、適宜、テーマを立ち上げていけばよいと思います。(工学技術、2年/安全評価、7年)
	地下深部の可視化：地質調査による点と点でむすびつけている情報を，精度よく広げるのは数学的な週報と合わせ，物理探査との融合が必要。物理探査で，どこまでその補完ができるかが重要。(地質環境、3年)
	・回収可能性を担保するための方式 ・地盤中の核種移動シミュレーション (工学技術、3年)
	回収可能性とその回収方法に関する研究。(安全評価、6年)
	・社会受容性に関する研究． ・サイト候補があがってきた際の，サイトスペシフィックな研究． (工学技術、20年/安全評価、20年)
	分野間や一般人とのコミュニケーション理論。(地質環境、30年)
	地層処分技術の安全性向上に関する研究開発。(安全評価、27年)
	わかりません。サイトが絞られた後に見えてくるのではないでしょうか。(地質環境、1年)
	各分野の調査・研究結果をつないで一つの解析を行う技術体系の確立。(地質環境、2年/安全評価、1年)

質問項目	意見・要望等
一般の人に地層処分についてわかりやすく伝えるためには、どのような点が重要だと思いますか	『一般の方にわかりやすく伝えること』については既に努力がなされていると感じます（本セミナーやNUMOのHPなど）。それでも知ろうとしない人々に対してはあきらめるしかないと思います（招待講演の講義にもありました）。（地質環境、25年）
	ナチュラルアナログの適切な活用（工学技術/安全評価、24年）
	①プロフェッショナルであること／認められること。 ②論理性を身につけて、論理だけでは足りないことを自覚すること。 ③特定分野を任せられる専門家をフタッフ／協力者に抱え、マネージすること。今回のプレゼンを見ていて、話術は必要であるが、生半可な知識しか持ち合わせない方はいずれ火傷をすると感じる。個人でできる人は限られるので、組織力・組織としての信頼性を見せることが重要。 ④2日目の演習において、コミュニケーションの高度なテクニックを身につけ駆使しても、相手の理解は話し手の信用失墜行為ですぐに瓦解することを改めて感じた。（地質環境、26年）
	地下に大きな構造物を作れる土木技術や、いろいろな最先端技術が導入されている等、若者に興味を持ってもらえるよう地層処分事業の魅力も伝える。（工学技術、5年）
	・相手の立場、興味等に留意して、相手にわかる言葉を使い、先方の聞きたいことに答えているかを確認しながら話をする。（安全評価、25年）
	まずは傾聴すること。伝える側の意識として、一般の方に理解してもらうのではなく、一般の方のことを理解することを心がけること。安全性を示し積み重ねによって安心を与えることができるので、安全性を損なわないようにすること。（地質環境、1年）
	技術的に確立されていることを明確にすること。例えば，「地下500 m以深まで掘削する技術」，「ガラス固化体を製造する技術」，「廃棄体を安全に運搬する技術」など。一般の方々は（もしかしたら専門の方でも），どこまで進んでいるかを詳しく把握しているとは限らないと思う。（地質環境、1年）
	理解度に応じた資料の作成と説明が重要だと思います。（地質環境、18年）
	伝える側の論点をしっかりと理解することが必要。（地質環境、10年）
	相手の理解度を見ながら話を進める。演習の際に講師がおっしゃっていた「集団の偏差値40に向けて話す」。 （地質環境、4年）
	まずは「すでにガラス固化体が存在しており，地層処分は避けられない」という認識の共有だと思います。また，いきなり「地下300m以深に埋設処分」ではなく，生活圏での被ばくを避けるために天然事象や地下水シナリオの理解が必要といったことを，丁寧に説明する必要があるような気がします。（安全評価、20年）
	研究開発を進めていけばいくほど、安全性は向上させることができると思っているし、それを支える根拠や数値を出すことはできると思う。しかしながら、そういった根拠等が増えれば増えるほど研究者や技術者は一般の方々にわかる形で説明する責任があると思う。根拠や数値をただ提示するわけではなく、それを一度わかりやすく言語化してこちらの主張を理解してもらい納得につなげることが重要であり、根拠を振りかざして説明することでは理解が得られないと考えます。（工学技術、2年）
	分かり易さを優先するならば，馴染みのある日常生活に寄り添った説明が必要なのではないでしょうか。例えば，基準線量の話でも，数値を出してもそれがどれくらいの危険性にあたるのかはすぐに理解できないと思います。飛行機に乗った場合に浴びる放射線量と比較してどれくらい，といった想像のできる話と比較することが重要だと思います。 （安全評価、1年）
	実施者側が伝えたい・知ってもらいたいことを伝えるのではなく、聴講者・質問者（一般人）の知りたいことを伝えることが重要である。NUMOのQ&Aも質問に対して正面からは答えていない部分がある。また、地層処分事業が信頼を得ていくためにも、今、わかっていること、わかっていないこと、今後、力を入れて取り組んでいくことなどを整理し、専門家ではなく一般の意見を取り入れて限りなく一般目線での情報の見える化を進めていく必要がある。 （地質環境、17年）
	マニアックなところまで説明しすぎないこと。（工学技術、3年）
	話者のプレゼン力の向上が重要。一般の人はそもそも地層処分に興味がないため、いくら有用でわかりやすい情報を伝えようとしても話を聴く姿勢になっていなければ、伝えたいことのほとんどは伝わらない。したがって、話を聴く姿勢にするための工夫や努力が重要。説明内容の工夫だけでなく、話し手が聴き手に与える印象なども重要（第一印象の改善、ユーモアと知性を同時に感じられるような振る舞い）、また、伝えたい事象をただ伝えるのではなく聴衆自身がその事象をイメージできるような工夫、聴衆自身が誰かに話してみたくなる内容を盛り込むなど関心を喚起する工夫など。（広聴・広報、5年）
	出発点として、地下が処分に適していること （工学技術、10年/安全評価、5年）
	「正確さ」と「分かりやすさ」には多少の乖離があると思います。伝える側が本来の正確な情報を持ちつつ、かみ砕いて表現する、伝えることが重要だと思います。説明を受ける対象によって表現を変えていく必要もあるでしょう、どこまでの情報を伝えればよいか見極めることも重要と考えます。（広聴・広報、4年）
	・地層処分を今考えないと手遅れになるという緊迫感を伝えること。 ・原子力は危ないと印象を受けた方々に向けて、多重の安全対策を伝えるだけでなく、対策が全部破られても安全上影響はないと伝えること。 ・専門用語をつかわないこと。（工学技術、7年）
	一般の人の情報の受け取り方をよく想像して伝える準備をすることと、実際のコミュニケーションの場での一般の人のリアクションからこちらの説明が伝わっているのかのフィードバックを受けることが重要だと思います。また、組織を超えたディスカッションなど普段とはメンバーの異なる場で議論をすることで、今まで気が付かなかった物事の見方や伝え方のヒントを地道に集めることも必要だと思います。（広聴・広報、2年）
	抱える問題を理解頂くことが重要であると感じる。なぜ地層処分なのか？などたくさんのクエスチョンを 持って頂くことがスタートラインと考えている。そのため、伝わるためには日本が抱えるこの廃棄物問題を共有することが重要と考える。 （技術者や専門家も同じ、日本に住む同じ人間であり、考え方は異なっても、抱える問題は同じであることから共有できると思う。）（工学技術、1年）
	専門用語をできるだけ使わず、平易な表現に努めること、覚えて帰ってもらいたいことをできるだけ少なく、その部分を重点的に説明すること、どんな単純なことでもよいので質問してもらいたいということを表明し、質問しやすい雰囲気を作ることが重要だと思う。（その他、7年）
	地質・工学・安全評価の分野間の連携に関する課題 （地質環境、7年）
	各種リスクやコストについて、他の処分方法との比較による事実に基づく丁寧なコミュニケーション （工学技術、7年）
	なるべく平易な言葉で説明し、専門的な用語が必要な場合は、その用語を説明すればいいと思います。資料ではキーワードを強調して、ある程度図を使えばいいと思います。（その他、8年）
	「一般の人」といっても個々人での知識レベル、疑問に思う点は異なると考えられるため、対話型で伝える場合には、そういった相手の背景や疑問点をきちんと汲み取って適した回答をするのが重要であると思いました。 分かりづらく、難しい分野であるからこそ、丁寧にレベルに応じた段階的な伝え方が重要ではないかと思います。例として、地層処分に関わる他分野の人への説明→地層処分を知らない関連分野関係者→地層処分を知らない理系の人→一般の人くらいの段階分けが必要ではないでしょうか。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	自分の考えが正しいと伝えることでなく、一般公衆の不安な気持ちや考えを理解・受け入れつつ、疑問に対して誠実に答えることで、処分事業に誠実に取り組むことについて信頼を得ること。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	海洋処分のような他の処分方法との比較をしながら説明する。（安全評価、1年）
	地層処分の方法論を説明する前に、廃棄物の隔離と閉じ込めのためであることを説明すること、加えて、一方的な説明にせず、疑問点に対して答えることが重要だと思います。（安全評価、9年）
	・説明する前の大前提として、一般のかたの疑問や不安に寄り添おうとする態度、マインドが必要だと思う。 ・一般のかたの不安、疑問に対してポイントを絞った説明手法（端的に、誤解を与えない程度にかみ砕いた説明） ・正しく理解してもらうことを目指すのではなく、なんとなくでも知ってもらうことを目指す、くらいからでもよいと思う。（広聴・広報、1年）
	対等な立場で誠実にしなければならないと思います。また、話し方（スピーチ）や立ち振る舞いなども大事だと思います。（安全評価、2年）
	安全性・信頼性を実際のデータを用いて説明する。 一方的に伝えるだけでなく、質問に対して丁寧に答える。（地質環境、9年）
	どのような方法であるか、安全性は担保できているかをわかりやすく伝えること。（工学技術、1年）
	安全性を伝えていくことが最も重要だと思いますが、事故等のトラブルが発生したときにどのようなリカバリーや情報提供がされるのかということを伝えていくことが安心につながるのではないかと思います。（地質環境、10年/その他、20年）
	2 日目のグループディスカッションを通して「処分」という単語から、実際には事前の綿密な検討等を行うにもかかわらず、埋めてそれで終わり、という 無責任な姿勢を取ろうとしているという悪い第一印象を与えてしまっているかもしれないと思いました。その印象が市民の不安を招き、技術的なポイントを伝えづらくしているかもしれないので、場合によっては「地層処分」から何か別の用語に置き換えてもよいかもしれないと思います。もちろん従事 者一人一人がコミュニケーション能力を身につけることも重要と思います。（工学技術、1）
	地層処分に関する問題意識を共有してもらうことが重要だと思います。また、それ以前の話として、一般の人は原子力関連事業に関する不信感が根強いです。地層処分事業の実施は国の方針であり、私たちは往々にして政治で決定された現方針を正しいものとして説明付けしなければならない立場に立たされますが、一般の人はそういったポジショントークの雰囲気を感じると不信感を強めると思います。ですので、現方針についても間違っていることは間違っていると物申す技術者個人の態度と、それが許される業界全体の雰囲気を醸成することも、わかりやすく伝えるということの下地として重要になってくると思います。（工学技術、2年）
	一般の人に与える影響について、分かりやすい指標を明示すること。線量などは興味を持って見ている人でないと、数値だけ見てもその値が持つ意味を理解するのは難しいと感じました。（工学技術、1年）
	・簡潔に説明できる能力 ・広い分野の知識 （地質環境、3年）
	ビデオ，Youtubeなとを用いて，若い層から話題化する。（工学技術、17年）
	専門用語を使わないこと． 図で構造を可視化すること．（工学技術、1）
	私の同世代が，地層処分について知っている人は，かなり少ないと思います．もちろん，説明会に来る住民の方々への説明は必要であるが，実際に処分が進められる私の同世代や更に若い世代に対して，更に分かりやすく，誤解がないように説明する必要があると感じました．そのうえで，高校教育・中学教育の中で地層処分というテーマを扱い，処分について賛成でも反対という意見を持ってもいいので，まず情報提供する必要があると思います．そのため，地層処分，高レベル放射性廃棄物などの用語を学校の先生に学校教育で使われる用語で説明できるように専門家が考えることが重要だと思います．（工学技術、2年）
	地層処分を分かりやすく伝えることよりも，ステークホルダーの満足を得ることが大切 （地質環境、5年）
	一般の人は、研究の過程について話しても、混乱するだけだと思うので、目的とそれに対する結果を簡潔に述べるのが良いと考えます。また、見せる資料も、文字ばかりでなく、写真、動画といったものを活用し、一般の人がしっかりイメージできることが大切だと考えます。（地質環境、3年）
	専門的な内容・言葉を使った説明ではなく、分かりやすく簡単な説明を心がけるべきだと思う。今回のセミナーについては、地質環境の講師方の説明が分かりやすく、専門が違う研究者・技術者にも分かりやすい説明だったと思う。（地質環境、2年）
	小中学生を含めた一般の人を対象とした理解活動（研究所の一般公開、大学でのオープンスクール、サイエンスカフェなどの簡単な実験など）を継続的に行い、科学的な観点から議論ができる基盤作りを進めることが大切だと思います。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	口頭での説明では，身近な事例に置き換えるなどわかりやすくするとともに，模型等により実際にみて，触れるなどができればよいと思われます。（地質環境、3年）
	必ずしも【わかりやすい】説明が重要ということではなく、地層処分を身近で、自分たちの生活にも関連があるのだということを知って貰うことの方が重要だと感じた。ただ、分かりやすく説明するという点では以下が重要だと思う。 ・まずは地下利用そのものについてのイメージを持ってもらう（例：地下鉄から地層処分のような大深度構造について） ・その上で地層処分のメリット（災害に強く、地下なら土地も使わないことや、いざ事故が起きても生活圏に十分遠いことなど）を示す。（工学技術、3年）
	リスクコミュニケーション等の専門家と非専門家との知識や考え方の溝を埋める技術を、専門家が身につけること。（安全評価、6年）
	・地層処分自体については，これまでの説明手法などでも理解がかなり進んでいると考える． ・それに伴うリスクを受け入れるかどうかについては，地層処分以外の様々な観点を含めた上で判断されるように思われる．例えば，わが国が原子力エネルギーをどのように扱うのか，当該地域の社会活動状況，など．（工学技術、20年/安全評価、20年）
	相手の分析方法を学ぶこと。（地質環境、30年）
	専門用語を多用せず、平易な表現を行う。（安全評価、27年）
	一般の人に理解できる言葉を使うという事が重要だと思います。ともすれば専門用語がわかっていないと仕事ができない分野である事は承知していますが、大衆が1から勉強を始めるにはハードルが高すぎるし誤った解釈を行う可能性があるので、情報量を犠牲にしてでも、しっかりと大事な部分を噛み砕いて伝える事が重要だと思います。（地質環境、1年）
	使用済み核燃料がどれくらい存在していて、それをどのように処分する方針なのか、というような事実を伝えること。安全であるということを強調する人が多くいることが今回のセミナーで分かったが、それよりも現時点での事実や課題などを伝えることが大切だと思う。（地質環境、2年/安全評価、1年）

質問項目	意見・要望等
今回のセミナー全体を受講した結果、あなたはこの分野において成長したと思いましたか。その場合は具体的にどのような点であるか教えてください。もしそうでない場合は、セミナーで改善すべき点を教えてください。	地層処分に携わる専門3分野の内容がよくわかりました。また、講義01、講義02.03を冒頭においたことは良かったと思います。昨年度も講義02, 03の講義は大変重要だと感じていました。また、講義04も多くの質問が出ましたが、それは多くの方が理解したいと思っている表れだと思います。安全評価は地層処分業務の成果として提示される部分なので、その成果イメージをNUMOから説明していただくことは全体理解のために必須だと思います。その意味で、SDMから安全評価に至るまでの部分をもう少しお話していただきたかったです。グループワークは面白いと思います。(地質環境、25年)
	3日目のみの参加のため、回答を控えます。(工学技術/安全評価、24年)
	成長したとは思わない。有望な若手を見出す眼力ができていなかったため。(地質環境、26年)
	特別講演やグループワークを通じ、コミュニケーションの方法をいくつか学ぶことができた。(工学技術、5年)
	地層処分事業・研究に関連する幅広い分野の知識・情報を得ることができる良い機会であった。また、多くの研究者・技術者が、それぞれの立場・思いで前向きなコメント・発言をされており、今後もこの分野で頑張っていこうという意欲がわいてきた。(安全評価、25年)
	地層処分分野において、新しい知識を得ることができ、また、自分の専門分野の立ち位置を全体像から考え直すことが出来た。 普段の業務ではあまり聞くことができない安全評価や工学技術分野の知識を得ることができた。 所属機関以外で地層処分に携わっている方々と関わり、議論をすることができた。(地質環境、1年)
	成長した。地質環境以外の分野で, 地質環境に関するどのような知見が必要なのかについて, 他分野の方々との議論により理解を深められたと思う。(地質環境、1年)
	とくに安全評価についての知識が得られたことについて、成長できたと思います。 (地質環境、18年)
	講師として参加しましたが、自分の専門分野の内容を専門ではない方に伝えることが非常に難しいことがよくわかりました。 改善点として、少なくとも夕食時はグループワーク等無しで、ゆっくりさせてほしい。長時間の研修となるため、On-Offは必要だと感じた。 また、講義内容を絞った上で、質疑応答の時間を多くとっても良いと感じた。講義資料は地層処分にあまりなじみのない方向けに講師の方が作成されているように感じたが、実際の質疑応答では、経験のある方からの突っ込んだ質問が多く、そういう方にとっては、消化不良であったように感じる。したがって、対象者や講義の内容(資料)についてはもう少し趣旨を明確にしつつ、取捨選択してもよいのではないか。 (地質環境、10年)
	成長した点:自分と似たような専門分野をもつ人でも、自分と違う形で地下環境や処分事業を捉えていることがわかり、新鮮であるとともに、今後研究開発を進めていくうえでそのような視点を積極的に取り入れたいと感じた。他分野の知識拡充はもとから頭にあったが、このような気づきがあるとはそれほど意識していなかったので、良い刺激となった。 改善すべき点:他の項目でも書いていますが、演習の割合をもう少し多くしてもよいのではと思った。(地質環境、4年)
	成長したかどうかは, よくわかりません。3日間程度で成長できるぐらいなら, 一般の方々とのコミュニケーションにも苦労しないような気がします。時間や労力の面では大変でも, 繰り返し参加することが大事なのではないでしょうか。(安全評価、20年)
	自身の専門分野以外の地質環境や安全評価といった分野に関しては、ベースの知識について理解できこれからさらに理解を深めていく中でポイントとなる点についても把握できたと思っており、講義を受ける前と受けた後での成長を実感している。しかし、自身が多少知識のある工学技術の分野では、事前の講義に期待するハードルも高かったためか他の分野の講義に比べるとやや満足度にかけるものとなってしまった。 また、三つの分野の中で工学技術の時間が一番短かったこともその要因の一つであると思う。 (工学技術、2年)
	講師を担当したので, 他人に説明するために自分自身が勉強したので, ある程度成長できたのではないかと思います。また, グループワーキングでの作業が大変多かったので, 地層処分に関わる方々と知り合いになれたは今後仕事を進めていく上で, 有意義であったと思います。 (安全評価、1年)
	成長したかどうかはわからないが、自分の専門分野以外の分野も学べたことはよかった。一方で、地質環境に比べて、工学設計や安全評価については相対的に講義の内容も難しく、時間もタイトだと感じた。最終的に地層処分事業が信頼を得られるかどうかは安全評価についてどれだけ1季節に伝えることができるかにかかっていると思うので、もう少し、安全評価にウエイトを置いてもよいと思う。(地質環境、17年)
	成長したと思う。知らない・関わりのない分野の知識を少しは得られた点。(工学技術、3年)
	単純に各分野の知識量が増えた。(広聴・広報、5年)
	他機関等の関係者とのコミュニケーションで成果があったと感じる (工学技術、10年/安全評価、5年)
	一般の方々に説明をする機会が多いので、様々な技術的な数値の根拠を知れたのが良かったと思います。(広聴・広報、4年)
	・建設操業技術を講義したことで、操業安全対策の全体像を改めて学び、人に説明し評価してもらえたおかげで自信がついたこと。 ・専門外といって逃げてきた人工バリアの施工技術についても学ぶきっかけとなり、人に説明し評価してもらえたおかげで自信がついたこと。 ・専門外といって学ぶことをあきらめていた地下水などの水文学についても学ぶことができたこと。(工学技術、7年)
	・地層処分に関する技術的な知識の基礎について、イラスト込みで理解することができました。特に、地質図の不確実性について専門家以外が読み解くことはなかなか難しいものであることは意外で、必要な場面では適切に専門家を頼ることが重要だと知りました。また、地層処分に直接関連する情報のみから勉強するのではなく、ダム建設の事例など類似性のある事業の情報も参考にするべきだと感じましたので、今後の勉強に生かしたいと思います。この他に、地下水流動について詳しく図解していただけた点が分かりやすく勉強になりました。 ・業務では地層処分についてある種の応用的な内容の表面にしか触れていないため、分野ごとの用語や考え方の基礎を整理するような講義は勉強になりました。(広聴・広報、2年)
	まず、本研修やバックエンドセミナーなど、類似した研修や講習を繰り返し受講することで、知識を増やせることを認識した。講義内容も類似していくものだが(種々動向や技術の進歩とは別に)新たな発見が都度あるので、引き続き、可能な範囲で地層処分に関連する研修を受講したい。 本研修では、地質環境分野で多くを学ぶ機会となった。この分野は、目に見えるものが多く、具体的事例をもとに、大きなスケール(日本列島の火山活動やプレートの動きなど)から小さいスケール(地下水や元素など)まで、満遍なくご説明頂いた印象でした。地質環境の状況は、経年変わることや、調査ではすべてを把握できないことも多いが、処分地建設に直接影響するので、工学分野担当として、非常に面白かった。 (工学技術、1年)
	今回のセミナーについては、技術者でないものにとってかなり難解であった。講義では一部の内容で、分野外の人でも理解できるように丁寧な説明をする講師もいたが、全体的に専門家が同じ分野の専門家を相手にしているような状況だった。 締め切った部屋に長時間滞在するので、空気が薄かった。時間は短くてもよいので、もっと小まめに休憩を入れた方が集中力も増すと思った。(その他、7年)
	特に自分の専門外の分野の講義は, 使われている用語や内容が難しく感じられた (地質環境、7年)
	地層処分事業を分かりやすく伝えるためのコミュニケーションの重要性と、そのために必要な具体的なことを招待講演により把握し、グループワークを通じて実践した貴重な体験により成長したと思います。(工学技術、7年)
	地質環境と安全評価技術の線量基準・シナリオ(13～15の講義)については、参加する前よりも理解が深まったと考えています。工学技術全般と安全評価技術の16～19の講義については非常に難解と感じました。この分野では私の知識が不足していることが理由だと思います。事前に資料を配布頂いて、目を通しておけば、多少ましかと思いました。(その他、8年)
	ジェネラリストという意味では、今まで知識がほぼなかった地質分野での理解が深まり、成長できたと思います。一方で、普段から取り組んでいる工学分野、安全評価分野については、どう説明すれば専門外の人に伝わるのか、コアの考えは何なのか、どんな用語が伝わらないのか考えるきっかけとなった と思います。(工学技術、1年/安全評価、4年)
	コミュニケーション力。反対意見を言われた時の対応。今までの自分の対応は真逆だった。(地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年)
	成長したと思います。 普段は勉強していない、もしくは結果や事実だけを利用している分野について講義を聴いて、その分野ではどのような学問に基づいて調査研究が進められているのかを知ることができた点。結果や事実もその裏には研究者の調査や推測があるので、絶対的なものとして捉えるのではなく時には根拠について考えたり疑ったりも必要かもしれないと考えた。(安全評価、1年)
	他分野でどんなことを考えて検討しているかを知ることで、分野間の連携に向けて検討すべき事項がより明確になりました。また、グループワークでコ多様な意見から皆が納得する1つの答えを得ることの大事さを学んだ。(安全評価、9年)
	・地層処分事業に関する技術的な内容について、すでに知っていた分野についても、復習や新しい知見を得ることができたし、自身の知識として不十分だった分野についても、広く浅く学ぶことができて有意義だったと思う。 ・一般の方との対話のありかたについても、グループワーク、座学を通じて学ぶことができ、良い機会となった。(広聴・広報、1年)
	基本的なところ、地層処分の背景をほとんど知らなかったので、そのことを知れたのは良かったです。ただその一方で、発表者は個別に発表資料を作成し、発表しているように感じました。もう少し発表者間同士で打ち合わせをし、何を目的にこのセミナーを実施しているのかを明確にしたうえで、セミナーを行わなければならないと思います。(安全評価、2年)
	単に知識が増えただけでなく、自分の専門分野と地層処分とのつながりの理解が深まり、視野が広がったと思う。(地質環境、9年)
	全体的な知識の向上になったと思う。特に地質調査や安全評価などはあまりなじみのない分野の知識を講義によって知ることができたことはより成長できたと思う。しかしながら、2日目の実習では時間が少なかったこともあり、すべてを理解する前に終わってしまったような印象だった。そのため、実習を行う際には適当な時間を見積もって行うべきだと感じた。 また、セミナーの中でグループワークはあったものの、もっと他の参加者とも話す機会があればよかったと思う。人脈を作るといった点ではもっと変更の余地があったように感じた。(工学技術、1年)
	地層処分全体の概要を把握することができた。現状の理解と今後の課題を把握するために有効でした。(地質環境、10年/その他、20年)
	単に技術の説明に終始されていた方と、その技術の研究の経緯や実現に必要な周辺データ等を含めて講義されていた方にニ極化していたように 感じた。ジェネラリスト育成のためにと銘打たれていることもあり、受講者一人ひとりの前向きな姿勢も重要であることは言うまでもないが、専門外の 分野の技術に対して自分の従事分野からはどのように貢献できるか、あるいは何が求められているのかという観点で受講できるとより理解が深まる のではないかと感じた。 (工学技術、1)
	・成長したか はい ・具体的にどの点か 放射性廃棄物処分の枠組みに関する理解が、より明瞭になりました。 また、他の分野の方々の率直な考えは刺激になりました。(工学技術、2年) 地質環境については、日本の地質の特性という基礎の部分から、実際にSDMを用いた処分の設計や安全評価までのプロセスを教えていただけたので、その部分の知識を少しでも理解し、身に付けることができたと思います。(工学技術、1年)
	・コミュニケーション能力(特に傾聴の姿勢) ・安全評価研究の現在地と展望 ・一般の方との対話スキル(地質環境、3年)
	地層処分の全体, 安全評価基準などよくわかった. (工学技術、17年)
	これまで, 緩衝材やその周辺に関すること以外は, あまり触れてこなかったため, 今回, 地層処分の計画の全容をおおまかに把握できたことが良かった. (工学技術、1)
	セミナー全体を通して, 今まで現象だけを追っている部分があったが, 地層処分全体における自分の研究の立ち位置を明らかにできたことが最も成長できた部分だと思います. 私の研究対象である工学分野の中でも, 自分が今後進めていく方針について再確認することができたことは, 今後論文を執筆するとき, 報告書を作成する時など幅広く必要になるので, 非常にいい機会だと感じました. また, 安全分野・地質環境に関しては, 自分とは関係ないと思い, 勉強することを避けていましたが, このように講義の中で専門家の方々にお話しを頂くことができ, 自分の勉強意欲の増大につながったことも成長できた点だと自負しております. (工学技術、2年)
	コミュニケーション理論の基礎の基礎を学べた点 異分野交流が図れた点 (地質環境、5年)
	私の分野である地質環境調査評価技術については、下地があるので講義してくれた内容は比較的理解しやすく有意義なこうぎだったと感じました。他分野が行っている研究・調査について、大まかであるがどういったことをしているのかが分かりました。しかし、専門ではないので、一歩踏み込んだものになりますと理解が追い付かない印象を受けました。ですので、もう少し、わかりやすく、理解しやすい内容にしてもらえるとより良いセミナーになったのではないかと思います。(地質環境、3年)
	地層処分の全体像について、浅く広く理解できた点で成長したと思う。特に工学分野の方のお話を聞く機会はなかったので勉強になったが、もう少しどういった研究をしていて、どういった結果が出ているのか知りたかった。(地質環境、2年)
	技術コミュニケーションの演習において、相手の話を聞く上での留意点(傾聴)について講師の経験に基づいた具体例を交えて学ぶことができました。また、グループワークを通じて自分やグループの考えを短時間でまとめて相手に伝える難しさが分かりました。これらの作業を通じてコミュニケーションスキルが向上したと思います。(工学技術、2年/安全評価、7年)
	安全評価技術については, 具体的にどのようなことするのかを教えていただき, 大変役にたちました。 一部の発表時には使用する用語を説明されていましたが, 発表原稿には必ず用語集(一枚程度)あるいは, 全体をとりまとえたものがあればよいと思います。(地質環境、3年)
	【よかった点】 ・処分事業に必要な地質学の基本を学べた ・処分事業業界の基本用語を学べた(地質学を含めたベースとなる学問) ・安全評価基準、日本の法令を絡めた概略を学べた ・一般の人と地層処分業界の方との考え方の差を学べた 【悪かった点】 ・無理もない事だが、地質学の知識がなく、地質について素人同然の人間には演習含め話についていけない部分があった。 ・他の参加者がほとんど身内(顔見知り)なのか、(自分のような)外様には分からない雰囲気がある。 セミナー参加者の多様性をもう少し高めても良いのではないか。 (工学技術、3年)
	自分の専門分野に関連する背景について程度の知識しかなかったため、地層処分の幅広い範囲に渡って系統的な講演を聞くことで、全てを吸収できたわけではないが、見識を広められた。また、配布資料がよく整理されているため、地層処分の背景に関して調べたいことが生じた際に、本セミナーの資料を辞書的に用いることで、必要な情報を簡便に情報できる手段を得られたこともメリットとなると感じる。また、グループワークにおいて専門分野の異なる方や、経験の豊かな方など幅広い専門家の意見や、考え方に触れられたことは非常に貴重な経験となった。(安全評価、6年)
	・集中的に学ぶ時間が確保されたことで, 新しい知識の獲得や自分の理解の確認が効率的に進められたと思う. ・これまで面識のなかった方々とのやりとりも, 大いに刺激となった. (工学技術、20年/安全評価、20年)
	技術的な成長はあまり実感できませんでした。内容が専門的すぎるものが多く、地層処分事業との関連性についての説明が薄かったように思いました。(地質環境、1年)
	これまで自分の業務に関わる分野について学ぶことが多かったためその他の分野について学ぶ機会が欲しいと感じていた。今回のセミナーで幅広い分野についてどのような取り組みがなされているのか知ることができた。また、他機関からの参加者の考え方や研究内容について話すことができ刺激になることが多かった。(地質環境、2年/安全評価、1年)

質問項目	意見・要望等
地質環境調査評価技術、工学技術、安全評価技術の各分野毎に全体を振り返って気付いた点、役立った点、	（地質環境調査評価技術分野） 講義07,08が良かったです。 （工学技術分野） 特にありませんが、講義11の講師は若いといっても、1年目2年目のNUMO職員ではありません。ご自身が考えている以上に多くの方が、ご自身のプレゼンに注目していることを自覚する必要があります。 （安全評価技術分野） 重要な内容なので、講義時間（質疑時間）が大きく不足していたと感じました。講義13・15は、講師一人に質疑をやらせるのではなく、NUMOの出席者全体で回答するぐらいの対応があっても良いと思います。（地質環境、25年）
	（地質環境調査評価技術分野） ①調整不足。重複が目立った。欠けている内容、誤った内容（あるいは見解の相違がある）も見られた。詳細なコンテンツの選定・収集・整理には時間をかけるべき。 ②サイトのモデリング演習も時期尚早。全ての人を対象とする内容としてはズレていた。 （安全評価技術分野） ①個人としての内容の理解は多々及ばなかったが、調整が効いていて、プレゼン間の繋がりを明示された点は評価に値する。 （地質環境、26年）
	（地質環境調査評価技術分野）各現象のメカニズムについても丁寧な説明があり、よかった。 （工学技術分野）講義時間が少なく感じた。建設技術などは、幌延や瑞浪での施工事例を紹介してもよいと思う。 （安全評価技術分野）安全評価とは何かについて、丁寧な説明があり、よかった。　（工学技術、5年）
	（地質環境調査評価技術分野） ・今回のセミナーでの個別の講義はいずれも質の高いものであったが、分野全体としての構成の検討は不十分であり、内容の重複も多かった。 ・地質学的な基本事項、マップに係る地質情報に関する背景情報、その後の各調査段階で想定される調査など、当該分野における講義の構成・役割分担を整理した上、それを説明するとともに、処分事業との関連についても、もう少し丁寧に説明することが必要と感じられた。 （工学技術分野） ・今回のセミナーでは、2件のNUMO包括的報告書の解説のみであったため、講義の構成としては分かりやすかったが、今後の事業段階を踏まえた課題といったことにも触れられると良かった。 （安全評価技術分野） ・全体の体系の説明はNUMO包括的報告書にまかせ、その後の講義では、その中での、個別分野の少し詳細な解説、信頼性向上のためのさらなる取り組み、今後、場所が決まった場合の取り組み、などを解説するといった全体構成が良いのではないでしょうか？ ・SDMを介した分野連携という観点からは、母岩中の核種移行の評価手法、評価モデル構築手法の講義が重要であると考えます。今回のセミナーでは十分にカバーされていないので、国外の事例などを含めて、この点についての講義を充実させるべきと考えます。 ・生物圏（生活圏）については、2つの講義で同程度の説明をするのではなく、「様式化」の概念など、生活圏の特有の考え方や課題、場所が決まった場合にはどの様に評価していくことが考えられるのかなど、もうすこし時間をかけて丁寧な説明をすべき。　（安全評価、25年）
	（地質環境調査評価技術分野） 講義番号04で、全体の話をするのであれば、ほかの講義との連携（所属が異なる場合は難しいかもしれないが…）を含めた話がよかった。 （工学技術分野） 19講義中2講義しかなかったので、もう少し他の話も聞きたかった。 （安全評価技術分野） はじめに考え方の話があり、そのあと実際の研究内容を聞けたので、初めての内容だったが理解しやすかった。（地質環境、1年）
	（地質環境調査評価技術分野） 地質学や地球科学は，専門外の方々にとって分かりづらすぎる，という学問特性を有すること。私は，大学時代からなじんでいたので，もはやなんとも思っていなかった。 （工学技術分野） 難しい。 （安全評価技術分野） やや難しい。（地質環境、1年）
	（地質環境調査評価技術分野） 事例の紹介は調査のイメージを得るのに有効だと感じました。 （工学技術分野） 処分場を想定した検討例の紹介が、イメージを得るのに有効だと感じました。 （安全評価技術分野） 最初に安全評価の概要が紹介されたことは、その後の講義を理解する上で役立ちました。　　（地質環境、18年）
	（地質環境調査評価技術分野）　内容にやや偏り（主に地質）があるように感じる。水理、化学、力学など各分野の話を均等にしたほうがよいと感じる。 （工学技術分野） 主として包括的技術報告書の説明という印象だったが、それぞれの工学技術がどのような役割（安全機能）を担っており、その役割を果たすためにどのような検討として、設計しているものなのかが明確になった方が理解しやすいと感じた。 （安全評価技術分野） 安全評価の全体像は非常にわかりにくい部分があり、最終的な計算結果である被ばく線量ばかりに目がいきがちだが、その前提となるシナリオの構築作業も同様に重要であると感じる。このシナリオ構築の部分を実習などを通して理解してもらうような講義枠を設けてもよいと思う。　（地質環境、10年）
	（地質環境調査評価技術分野） 参加前から想定していた通り、専門分野外の基礎知識を網羅的に習得できたことが役に立った。言及している講演者の方も何人かいらっしゃったが、同じ用語でも別の意味をもっていたり、その逆があったり…複数分野で協同する事業にあたって、言葉の定義およびその共有の重要性を感じた。この観点で、それぞれの講演内容を前もって簡単にレビューしたり、可能な限り統一したりしてもよいかもしれない。 （工学技術分野） 工学技術に関してはこれまで基礎的な知識しかなく、各技術の現状の進展度合いなどを把握できたことは役立った。NUMOなどが考えておられる計画・構想（こうやってやればよいと考えられる）の紹介も重要であると思うが、それよりも実施内容（実際に地下施設や室内で試験を行い、その結果こういった知見と課題が得られた）をベースにお話しいただいたほうが、より現実的かつ身近に感じられて理解が進みやすいと感じた。 （安全評価技術分野） 業務でほとんど携わることがないので、「安全評価」という言葉がどこかふわふわしており、具体的に何をやるのかがいまいちわかっていなかった。今回の講義により、上の二分野がどのように関係し、どのような手法で評価に結びついているのかに関して理解が深まった。自身が研究を進めていく上でも、それが安全評価にどのようにつながるかという視点をもつという意識が強まった。　（地質環境、4年）
	（地質環境調査評価技術分野）　久々に当該分野の話を伺って，よい勉強になりました。が，ちょっと時間配分がこの分野に偏っていたような気もします。 （工学技術分野）　ちょっと情報量が少なかったという印象です。 （安全評価技術分野）　内容量の割に時間が足りなかったのではないでしょうか。込み入った問題であることは理解していますので，内容を簡潔なものに絞るか，もう少し時間を多めに確保するかの対応があったほうがよいように思います。　　（安全評価、20年）
	（地質環境調査評価技術分野）　人材育成セミナーの講義として、専門外の人に向けた難易度の講義になっており、図や実例を活用した説明で理解し易かった。しかし、演習の時間がもう少し長いとよかった。 （工学技術分野）　三分野の中で時間が一番短かくが残念であった。また、講義内容も包括的技術報告書の内容をなぞっている印象を受けもう一工夫あるとよかったと感じた。 （安全評価技術分野）　個別の具体的事例を紹介しながら、言葉の定義の説明が丁寧になされており安全評価においてどのようなことを実作業として行っているかイメージがわいた。 （工学技術、2年）
	（地質環境調査評価技術分野）　地下水や地質構造についての新しい知識が得られたので役にたちました。 （工学技術分野）　処分場の構造についての説明や，オーバーパックやベントナイトの製造工程を動画を使って説明してくれたので分かり易かったと思います。 （安全評価技術分野）　最新の研究開発動向やこれまでの状態設定に関わる実験の講義があったので，面白かったと思います。　（安全評価、1年）
	（地質環境調査評価技術分野） 全体的に基礎的な内容が多く、わかりやすい構成になっていたと思う。一方で、地質学概論のような講義になっていて、地層処分事業において、まだ現在の研究結果や技術では明らかになっていないところはどこで、今後、期待される技術や将来の方向性が示されるとよかったと思う。 （工学技術分野） 全体的にはわかりやすい講義にするための工夫が見て取れた。一方で、SDMとの関連性や他の分野との連携、今後、期待される技術や将来の方向性が示されるとよかったと思う。 （安全評価技術分野） 3つの分野の中では相対的に、難しい内容の講義が多く、資料も改善が必要だと感じた。専門用語を多用するなど、講師にも問題点が多かった。地層処分事業において出口に最も近い分野なので、講師陣も含めた意識改革が必要。（地質環境、17年）
	（地質環境調査評価技術分野） 全く馴染みのない分野なので、難しかったし理解できない講義もたくさんあった。似たような用語が多くて混乱した。 （工学技術分野） オーバーパックの溶接・PEMの製作動画を見られたことが収穫だった。 （安全評価技術分野） 解析でどんな現象を対象にしているか知ることができた。 （工学技術、3年）
	（地質環境調査評価技術分野） 複数の調査手法を用い、自身が考えていたよりも精度の高い評価を得ることができることがわかったことが良かった。 （工学技術分野） そもそもあるということ自体を知らなかった研究や、これまで詳細を知らなかったことを知ることができた（作業者安全を考慮した立坑の配置、ベントナイトの条件による評価、回収技術の検討、埋め戻しの際のプラグの設計など）（広聴・広報、5年）
	（地質環境調査評価技術分野） 3分野とも、各講義の関連が取れ基本的な構成ができていたと感じる なお、自習できる副読本があると予習や復習に役立てられると思う （工学技術、10年/安全評価、5年）
	（地質環境調査評価技術分野） 講師の「信頼は小さな満足の積み重ねから醸成される」という言葉に納得した。火山活動のメカニズム、将来予測の考え方が役立つと感じた。 （工学技術分野） 詳細まで説明されていて良かったと思うが、説明者の声が小さい等で聞き取れないことが多く残念だった。 （安全評価技術分野） 数値の根拠が分かって良かった。特に杉山さんの講義内容は再度復習し、一般の方への説明時に役立てたいと思う。（広聴・広報、4年）
	（地質環境調査評価技術分野） SDM構築、解析、実測との比較・フィードバックの流れをつかむことができた。 今後は3段階の調査段階におけるそれぞれの調査目的と具体的な調査項目を学びたい。 （工学技術分野） 工学の設計は、設計要件が整理されているが、専門用語が非常に多く、専門外の方には理解できない。（工学技術、7年）
	（地質環境調査評価技術分野）分かりやすく図解されており、内容がイメージしやすかったです。特に、地下水流動について理解が深まりました。 （工学技術分野）地層処分の設計に関する考え方が分かりやすく整理されており、包括的技術報告書では理解できなかった点がわかりました。特に動画は情報量が多く、新たに気が付いたこともあり勉強になりました。 （安全評価技術分野） 核種移行解析は難しく、内容を理解できたとは言えませんが、どのような考え方なのかはつかめたように思います。（広聴・広報、2年）
	（地質環境調査評価技術分野）満遍なく説明頂いた印象であった。 （工学技術分野）2コマでは限界を感じる。情報過多で、概要のまとめになってしまう。 （安全評価技術分野）他分野に比べコアな話が多く、とっつきにくい内容ではある。（工学技術、1年）
	（地質環境調査評価技術分野） 写真などが多用され、各講師ができるだけ分野外の人もわかるように工夫していたと感じた。内容についてもある程度なじみがあるものであるため、一番なじみやすい講義であった。 （工学技術分野） 全体的にスライドに文字が多い印象。発表者についても声がこもっていて聞こえづらく人がいた。その人は話にメリハリがなく、今、何の話をしているのかわかりづらかった。ただ、換気経路やオーバーパックの設計など内容はある程度理解できるものであった。 （安全評価技術分野） 資料については文字が多く、専門用語が当然に使われていて、全体的に難解。講義の中の用語の意味を理解するのにも苦労した。数式なども多く、スライドのどこを理解してもらいたいのか、どこを見ればよいのかわかりづらかった。（その他、7年）
	（地質環境調査評価技術分野）調査の話はいろいろと聞けたが，評価に関する話が少なかったように思う （工学技術分野）動画等を用いた説明があり，分かりやすかった （安全評価技術分野）資料に文字が多く，分かりにくかった （地質環境、7年）

質問項目	意見・要望等
地質環境調査評価技術、工学技術、安全評価技術の各分野毎に全体を振り返って気付いた点、役立った点、	（地質環境調査評価技術分野） ・全体を振り返って気付いた点 地質環境モデル（SDM）が各分野の中心であり、それゆえ重要であること。 ・役立った点 自然現象と調査・評価の全体像を把握できたこと。 ・改善すべき点 三段階のそれぞれの調査・評価と、地質環境モデル（SDM）の情報レベル（詳細さ）との関係についての情報の追加。 （工学技術分野） ・全体を振り返って気付いた点 大深度の地下環境において、建設・操業を行うための技術実証の重要性。 ・役立った点 処分場設計および建設・操業の全体像を把握できたこと。 ・改善すべき点 特にありません。 安全評価技術分野） ・全体を振り返って気付いた点 これまでの長期間にわたる研究・検討の成果であるため、現在得られている結果だけではなく、研究課程における情報の取捨選択に関する知見の整理と次世代への継承とが重要な課題であること。 ・役立った点 安全評価の流れや構成について概要を把握できたこと。 ・改善すべき点 ストーリボード、FEP、シナリオ、対応するモデルデータの関連や位置づけについての情報の追加。
	（工学技術、7年）
	（地質環境調査評価技術分野）資料と説明が分かり易かったと思います。キーワードも明確で理解しやすかったです。 （工学技術分野）事前の知識がなく難解でした。資料の中でキーワードをもう少し強調して欲しいです。 （安全評価技術分野）一部の講義については、事前の知識がなく難解でした。資料の中でキーワードをもう少し強調して欲しいです。（その他、8年）
	（地質環境調査評価技術分野） 地質の基礎を学べたのが良かったです。若い世代が発表し、それに専門家が質問、コメントする形も良いなと思いました。 （工学技術分野） 地層処分分野では遠い将来のことに目が行きがちですが、閉鎖前の安全性についても聞けたのが良かったです。 （安全評価技術分野） 専門的な内容を簡単に伝える難しさを感じました。地質や工学がどのように関連するのかがわかるとセミナーのまとまりがあるのかなと思いました。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	（地質環境調査評価技術分野） この分野でない自分にとっては、これだけの時間をかけて一気通貫で講義を受ける機会はほとんどないため、大変有意義な時間だった。 （工学技術分野） QAにもあった過酷事象（稀頻度事象）にどう対応しているかなどは付け加えてもいいのでは。 （地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	（地質環境調査評価技術分野） 地層処分においての地中という天然のバリアが果たす役割の大きさを再認識した。 （工学技術分野） 処分場という大きな施設やその作業動線を論理的にレイアウトするのは規模の大きな仕事だと考えた。 （安全評価技術分野） 今まで勉強してきたことの確認や復習になり、またこれから学ばなければいけないことの概要も知ることができた。（安全評価、1年）
	（地質環境調査評価技術分野）地質や地下水の調査からSDMの作成までの手順を知ることができ、この分野の理解を深めるのに役立った。 （工学技術分野）最新の設計や技術について網羅的に学べた。何故そのように選択したか、決めたかなど背景がわかると理解が深まると思い増しました。TRU等廃棄物についても、情報があるとよいと思います。 （安全評価技術分野）核種移行のパラメータに関する講義で、基礎的なことから学ぶことが出来、今後、安全評価の結果の理解や担当者と話をする際のベースとなる知識が得られた。 （安全評価、9年）
	（地質環境調査評価技術分野）地層処分事業に関する技術的な内容について、すでに知っていた分野についても、復習や新しい知見を得ることができた。 （工学技術分野）自身の知識として不十分だった分野についても、広く浅く学ぶことができて有意義だったと思う。 （安全評価技術分野）自身の知識として不十分だった分野についても、広く浅く学ぶことができて有意義だったと思う。 （広聴・広報、1年）
	（地質環境調査評価技術分野）地質環境についてほとんど知らなかったため、参考になった。ただ、発表順序や発表内容など、発表者同士の連携を考えるべきだと思いました。 （工学技術分野）時間と情報量が合っていない（詰め込みすぎ）と感じました。内容をもう少し精査して、情報量を減らすか、説明時間を増やす必要があると思います。 （安全評価技術分野）地質環境分野と同様にもう少し発表者間で流れがあったほうが良いと思います。 （安全評価、2年）
	（地質環境調査評価技術分野） 最新の研究を知ることができた。工学分野との接点がわかった。 （工学技術分野） 講演数がもう少し多くても良いと思った。 （安全評価技術分野） 安全評価についてはあまり学んだことがなかったが、基本的な部分から理解することができた。 （地質環境、9年）
	（地質環境調査評価技術分野） 地質環境モデルは作成する際に他の分野の人がみてもわかるように作成することでより効果を発揮することが分かった。 （工学技術分野） 動画を使って説明することはよりわかりやすく説明できると感じた。 （安全評価技術分野） 安全分野はとっつきにくい部分が多いのでより細心に一般のひとに伝える必要があると感じた。（工学技術、1年）
	（地質環境調査評価技術分野） ・文献調査の具体的な実施手順 （工学技術分野） ・講演の題材が少ないと感じました。 （安全評価技術分野） ・どのような指標を用いて安全評価をしていくのか、考え方を理解することができました。 ・内容が少し専門的で難しかったと思います。また、閉塞後の安全評価の考え方についても知りたいと思いました。 （地質環境、10年/その他、20年）
	（地質環境調査評価技術分野）地学的な知識については、図や画像を多用した資料から基礎知識を吸収することができた。また、科学的特性マップの作成の経緯など、これまで の処分業務への従事経験を踏まえた内容が含まれていたことも有意義だった。（工学技術分野）画像や動画を用いた実例の紹介が良かった。（安全評価技術分野）最終日で疲労がたまっている中、文字ベースの講義を聴くのは頭に入り辛いところがありました。（工学技術、1）
	（地質環境調査評価技術分野） 私の専門分野（土木工学）に近い部分があり、比較的スムーズに理解できました。適地選定に関する内容に特に興味がひかれました。 （工学技術分野） NUMO殿の考え方をわかりやすく説明して頂ける機会、それ自体を貴重に感じました。NUMO殿の考え方に対する理解が深まったように思います。 （安全評価技術分野） 初学者向けの講義は貴重に思います。非常に専門的な話を易しくご説明頂き感謝しています。（工学技術、2年）
	（地質環境調査評価技術分野）教材に図表が多くわかりやすかったです。 （安全評価技術分野）線量の評価についてそれぞれの核種が持つ意味など勉強不足だったため、理解が難しかったです。（工学技術、1年）
	（地質環境調査評価技術分野） ・現状の技術で解決できていない課題も、解決できている課題と同列で説明すべきと思う。 （工学技術分野） ・文字だけのパワーポイントが多く、この分野は理解し難かった。 （安全評価技術分野） ・全てを統合し、研究する難しさを痛感した。（地質環境、3年）
	（地質環境調査評価技術分野）地質環境図 （工学技術分野）特にない （安全評価技術分野）安全評価の基準 （工学技術、17年）
	（地質環境調査評価技術分野）施設の建設候補地をどのように選定していくか，知ることが出来て良かった． 各分野の講義がそれぞれぶつ切りの印象だったので，はじめにそれらを総括した導入を入れてもらえると分かりやすい． （工学技術分野） 知識としては知っていたが，各材料の作製の様子を動画で初めて見せてもらったので，規模感を知るためにも，ためになりました． （安全評価技術分野） 各項目をしっかりと聞いたのがはじめてだったので，参考になった． （工学技術、1）
	（地質環境調査評価技術分野） 専門用語が多く，工学との連携が取れていないと感じた点 （工学技術分野） 実際の現象に対して，どの範囲であれば施工可能であり，運用可能であるかもっと詳細を知りたかった点 （安全評価技術分野） 安全の基準の設定があいまいなところがあった点 （工学技術、2年）
	（地質環境調査評価技術分野） 受講者の評価が概して高かった． （工学技術分野） あまり詳しすぎる話をされても分からなかった．何を他分野に求めるかという話を聞きたい． （安全評価技術分野） あまり詳しすぎる話をされても分からなかった．何を他分野に求めるかという話を聞きたい．（地質環境、5年）
	（地質環境調査評価技術分野） 各分野について調査がしっかりされていると思うが、地質環境調査評価技術分野の中で、まとまり切れていない印象がある （工学技術分野） 講義者が2人だけということもあり、1つの講義の中で、情報量が多く理解が追い付かなかった。もう少し情報量を減らしてほしかった （安全評価技術分野） どういったことをやっているのかは大まかに理解できた。しかし、その詳細になると理解が追い付かなかった。（地質環境、3年）
	（地質環境調査評価技術分野） 地質環境や地下水流動・物質移行を評価する技術は体系化されつつあるが、他の分野への適用を意識した研究も必要だと思う （工学技術分野） 処分施設の時間的変化・シナリオを考慮した研究は、難しいことが分かった。 また、環境変遷を想定した人工バリア材の物性値取得が難しいことが分かった。 （安全評価技術分野） 色々なケースを想定した解析モデルが組まれていることが分かった。物質移行パラメータの使用方法などもよく理解できた。（地質環境、2年）
	（地質環境調査評価技術分野） 全体的に良かったと思いますが、一部、講師の間で重複しているテーマがあったようです。時間が限られているので改善すべきと思います。 （工学技術分野） 時間的制約がありますが、NUMOだけでなく、基盤的な技術開発や海外の事例もあっても良いのではと思いました。 （安全評価技術分野） 第2次取りまとめの評価例はやや古い印象を持ちました。海外の安全評価事例もあっても良いのではと思いました。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	（地質環境調査評価技術分野）資料が分かりやすく、今後ほかの技術者とコミュニケーションに役に立つと思います。 （工学技術分野）効率的な実施には，作業動線，特に換気に関しては十分考慮しなければならない。必要な項目が多くて大変ですが，全般的に説明がされていたので，資料は今後十分に勉強の役に立つと思います。 （安全評価技術分野）専門用語や定義あいまいな用語（文章）がかなりあり、専門以外の人にはわかりにくいので、丁寧な説明（解説資料）があればと思います。（地質環境、3年）

質問項目	意見・要望等
地質環境調査評価技術、工学技術、安全評価技術の各分野毎に全体を振り返って気付いた点、役立った点、	（地質環境調査評価技術分野） ・基本的な用語を含め、考え方を学べたことはありがたい。演習は全くついていけなかったのでもう少し考えてほしかった。 （工学技術分野） ・THMCのような連成解析、分野間の連携が今後重要になることが理解できた。 （安全評価技術分野） ・日本の法律を踏まえた安全評価の基準、概略はかなり整備されていると感じている。 ・これをどのように説明し、処分場誘致の説得材料にするかは課題だと感じた。 （工学技術、3年） （地質環境調査評価技術分野） 一部専門的すぎて理解し難い発表があった。 （工学技術分野） 地質に関して全く知識がなかったので、学ぶ足がかりとなった。 （安全評価技術分野） 各分野間の関連性が理解しやすくまとめられていた。（安全評価、6年） （地質環境調査評価技術分野） 二日目以降のみの聴講だったが，基礎を含めて概要がわかりやすく紹介されていたと思う． （工学技術分野） 情報量が講義時間に対して過多に感じた．もう少し時間を長くとるとともに，各トピックを掘り下げても良いように感じた． （安全評価技術分野） 全体概要を紹介してから各論に移る流れはわかりやすかったと思う．ただ，やはり情報量がかなり多いため，時間を長くとる，紹介内容を絞るなどの工夫が必要なように感じた。（工学技術、20年/安全評価、20年） （地質環境調査評価技術分野）用語や現象の説明が多くわかりやすかった。他分野との連携についてどの程度まで技術開発が進んでいるのか、について各人の話が聞きたかった。 （工学技術分野）現状のNUMOの方針について聞くことができたが、現時点の課題や他分野に求めるものなどについてももう少し説明が欲しかった。 （安全評価技術分野）ニアフィールドの話をこれまで聞く機会があまり無かったので勉強になることが多かった。試験の結果からどのように安全評価につなげるのか、という解析の部分の話も今後聞いてみたい。 （地質環境、2年/安全評価、1年）

質問項目	意見・要望等
今回の研修で具体的にどういった点の知識を新たに得ることができましたか。	少しでも専門が外れると、そこはもう未知の分野です。そのため、すべての講義が興味深く、知見が深まりました。(地質環境、25年)
	安全評価全体の振り返りでリフレッシュができました。また、分かったような気になっていながら理解が浅かった点も浮き彫りになりました。(工学技術/安全評価、24年)
	①対象とする方により、プログラムを変える必要があることを改めて痛感した。 ②自分が望む分野を担う人材(素材)がいなかった。会場に優秀な方はたくさんいた。ただ、分野が偏っていた。また、中堅層が不足。 ③NUMOさんの若手育成には向かないこと。広く浅くの前に、分野ごとに時間をかけて2018レポの内容をシニア・中堅・精鋭専門家に対し説明してもらい、これまた長時間の質疑応答を浴びる会を開催するのが良いと思った。2018レポで足りない点が浮き彫りになること、プレゼン一個々人が足りない知識を具体的に認識すること、論理力・応用力を養成すること、個々人の適性(貢献できそうなことは何か)を理解することが目標とする成果。 ④本会の運営が、知財の保護、安全保障の面で十分な対応ができていないこと。今後自分の組織から同様なイベントに参加する際には、リスク対応を取りたい。 (地質環境、26年)
	地質環境モデルに関する知識 (工学技術、5年)
	・地質環境分野については、地質学等についての基礎的な学習ができた。 ・NUMOの包括的報告書の内容についても、内容の要点について、体系的に理解することができた。(安全評価、25年)
	安全評価や工学技術分野の知識。特に、これまで学んだことのなかった地層処分事業の経緯や処分後の核種移行の研究については、今回のセミナーで学べて非常に良かった。 (地質環境、1年)
	現在3分野それぞれのスペシャリストとして活躍されている方々は、これまで独立して(連携なしで)研究開発に携わってきたということ。 驚っているわけではない。これから、いかようにでも連携していくことができるのではという希望を見出した。 (地質環境、1年)
	とくに安全評価についての知識が得られ、理解が深まりました。 (地質環境、1年)
	知識ではないが、どの関係機関でも、分野(地質環境調査、工学技術、安全評価)間のコミュニケーションが重要であるという問題意識をもっていることが共有できた。 (地質環境、10年)
	専門分野外(地質、水理など)で重要であるがあまりわかっていない基礎知識の理解が進んだ。講義内容をきっかけに、今後できそうな研究テーマをいくつか思いつくこともできた。 (地質環境、4年)
	地下水化学への理解が少し深まったかと思っています。地質調査部分でも面白かった講義はありましたが、ちょっと縁遠い印象でした。 (安全評価、20年)
	地質環境については、地質や地下水、隆起浸食など網羅的にその基礎知識を得ることができた。 工学技術においては、建設・操業技術についての具体的な考え方の一部を知ることができた。 安全評価においては、安全評価とはどういうことを実施することなのかに加えて、線量基準の考え方の基礎を知ることができた。 (工学技術、2年)
	サイト選定時に考慮が必要となる隆起運動や浸食作用のような自然現象についての知識と、安全評価に関してはシナリオ作成に関係する研究内容についての知識を得ることができました。 (安全評価、1年)
	各分野やNUMOにおけるSDMの考え方やとらえ方。 (地質環境、17年)
	火山についての知識。他に、地質の研究者は化学や工学系とは全然雰囲気が違うことがわかった。(工学技術、3年)
	・現存する地質図の精度にはかなりの偏りがあるということ。また、それを素人が図面から読み取るのは難しいが、熟練者に聞くことで、ある程度補正できるということ。 ・メルトができてから地殻を突き破って火山ができあがるまでの時間的猶予は不明で、科学者間でもコンセンサスが取れていないということ。(広聴・広報、5年)
	SDMの対象が関係者によって異なることで、用語の使い方が注意があると認識できた点 (工学技術、10年/安全評価、5年)
	地質環境、工学技術、安全評価それぞれの考え方や言葉の捉え方や定義が異なっており、各分野の連携が重要だということを改めて考えさせられました。浅い知識が少し踏み込んだ知識になったと感じています。…が、それを一般の方々に「分かりやすく」どう伝えていけば良いかということはまだまだ熟考することが必要だと思いました。(広聴・広報、4年)
	SDM構築、解析、実測との比較・フィードバックの流れをつかむことができた。(工学技術、7年)
	包括的技術報告書を読んだだけでは分からない点が補足されており、また、第2次取りまとめなど過去の資料で議論されていることも含めて解説されていたので全体的な理解に結び付きました。(広聴・広報、2年)
	分野横断の重要性を理解するとともに、担当分野(工学技術)以外の知見に触れる機会となった。実際、業務として扱っていない分、深い知識を得ることはできていないが、概要やまとめ、必要ニーズを知る中で、関係することが分かったため、大変有意義であった。特に、地質環境特性を知る上で、必要となる情報が限られているようにも感じたが、そこから建設技術の分野担当者として、相互のやりとりにより、最適化された処分場建設の知見に活かせられたらと思う。(地質環境特性講義全般(基礎用語など含め)) (工学技術、1年)
	原子力産業、地層処分事業に関わりを持つ人であっても、原子力発電については様々な考えを持っており、必ずしも肯定派だけではないということ。 地下水は地球上に存在する淡水の99%であること。(その他、7年)
	安全評価の考え方や評価手法について知識を得られた (地質環境、7年)
	安全評価の大まかな流れ・構成、地質環境モデルの位置づけ。(工学技術、7年)
	地質環境・調査技術の分野については、事前知識はそれほどあるとは思いませんでしたが、概要がかなり把握できたと考えています。復習として、頂いた資料を時々見返すことが重要と思います。(その他、8年)
	地質関連分野の基礎、現象論など。 一般の人(専門でない人)への説明の仕方。 他分野の人と協力して一つの答えを導くやり方。(工学技術、1年/安全評価、4年)
	本来の専門門分野でない地質環境・調査技術の考え方や研究開発の現状とSDMを介した3分野の連携。 説明スライドの作成方針。(地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年)
	工学技術分野での処分場の設計では作業性も含めて設計されていると初めて知った。今までは廃棄物を安全に保管することのみを重要視していると考えていたけれど、処分業務が安全に行われることも考えていて、様々な起こりうる問題を想定できることが重要だと思った。(安全評価、1年)
	地質や地下水の調査やモデルの作り方、安全評価に関する試験など自分の専門以外の分野の知識、コミュニケーションで大事な点。(安全評価、9年)
	地層処分事業に関する技術的な内容について、すでに知っていた分野についても、復習や新しい知見を得ることができたし、自身の知識として不十分だった分野についても、広く浅く学ぶことができて有意義だったと思う。(広聴・広報、1年)
	地層処分の背景。地質環境についての基本的なところ。(安全評価、2年)
	工学技術・安全性評価分野についてはもともと知識が乏しかったので、基礎的な知識を得ることができた。 地質分野については地層処分の中での位置付けが理解でき、また最新の研究についても知ることができた。隆起・侵食量評価のための手法など。(地質環境、9年)
	地質環境や安全評価技術といった分野での知識を新たに得ることができた。地質環境では地質環境モデルの考えを知ることができ安全評価では安全評価の基本的な考えを知ることができたことが新たな知識だと感じた。(工学技術、1年)
	地層処分全体の概要を把握することができた。現状の理解と今後の課題を把握するために有効でした。(地質環境、10年/その他、20年)
	地質環境や調査技術についての理解が全般的に深まった。(工学技術、1)
	研修の内容が広範のため、あまり頭が整理できておらず、全体から特定の事柄をピックアップするということが難しいのですが、 私は工学技術が専門で、他の分野に詳しくないため、地質環境と安全評価に関しては広く浅く多くの知識を新たに得ることができたと思います。(工学技術、2年)
	上述の通りですが、地質環境については、何を考慮して科学的特性マップが作成されているか、プロセスを知れたことはとても大きいと思います。(工学技術、1年)
	安全評価技術 (地質環境、3年)
	地層処分の全体, 安全評価基準などよくわかった. 対話活動の進め方. 緩衝材の設計方法 オーバーパックの作り方(映像) (工学技術、17年)
	自身の専門であるベントナイト系緩衝材以外の内容について, 全体の流れをさらうことが出来たことが良かった. (工学技術、1)
	全く知らなった, SDMについて知ることができました. 今まで, 工学分野を研究していたので, TMHC連成解析が多くの分野の連携だと思っていたが, サイト設定に関して, SDMがあるということを確認できて非常に良かったなと感じました. また, このSDMによってある程度の地質の予想をもとに, 工学的に設計を実施し, どのように進めていくのか, 今後実務に取り組んでいく上で更に勉強したいと思います. (工学技術、2年)
	工学設計に関する知識, 安全評価基準 (地質環境、5年)
	地層処分に関わる各分野の人たちがどのような研究・調査をしているかについて、全部を理解することはできなかったが、流れはある程度理解することができた。また、各分野の連携が取れていない状況であることもわかりましたので、今後はそこについても気にかける必要があると思いました。(地質環境、3年)
	安全評価技術分野について、母岩部の物質移行パラメータがどうやって取得され、どのように使用されているか理解できた。(地質環境、2年)
	地質環境(とくに火山や隆起侵食)や工学技術(とくに地下施設のレイアウト設計)についての知識が身に付きました。(工学技術、2年/安全評価、7年)
	安全評価にたいし, 様々要素を考慮しなければならないし, 理解することは容易ではないと思いました。 コミュニケーションをする場合, 特に自分と意見が異なる場合の対応。(地質環境、3年)
	・火山活動の成り立ち ・地質、岩石学の基礎知識 ・安全評価の考え方の基本、日本の法令上カバーするべき点 ・核種移行モデル、水理地質解析モデルに関する基礎知識 (工学技術、3年)
	地層処分における安全評価分野の考え方について学べた。本セミナーでは、安全評価技術が最後のパートだったが、これが処分場における研究の根幹にあると感じた。(安全評価、6年)
	地質評価に関する基礎や具体事例, 最近の解析手法の動向, コミュニケーションの心構え, など. (工学技術、20年/安全評価、20年)
	技術コミュニケーションに関する知識。(安全評価、27年)
	コミュニケーションスキルについての講義が印象に残っています。 傾聴や同意といった、普段あまり考えないようなことを掘り下げて考えるという経験が今までなかったので。(地質環境、1年)
	ニアフィールドの安全評価に関する研究内容。地質環境の長期安定性評価に関する調査技術。(地質環境、2年/安全評価、1年)

質問項目	意見・要望等
今回の研修は今後のあなたの業務に役立つと思いますか。具体的にどのような内容で、どのような点が役立つと思いますか	ある程度全体像を理解した上で自分の仕事をすることができるようになったと思います。(地質環境、25年)
	幅広い分野の、特に若手の方の存在を知ることができて、今後につながる経験となりました。（工学技術/安全評価、24年）
	①今回の資料を鵜呑みにする事は無いが、人材が薄い分野が分かった。前回今回のようなイベントでは解決できない問題。 ②今回のようなセミナーをいきなりやってもあまり効果が期待出来ないことがわかった。スキルアップ研究会にとらわれず、各階層の人材育成の進め方について考えたい。(地質環境、26年)
	特に他分野の技術開発に携わる方とのつながりを持つことができ、連携がとりやすくなったと感じる。(工学技術、5年)
	・特別講演は、今後、公衆との対話の場面などで活かせると思います。（安全評価、25年）
	今後、一般の方と話す機会がある可能性があるため、本セミナーで学んだ技術コミュニケーションの内容は役に立つと考えられる。特に、原子力や地層処分に対して反対意見を持っている一般の方に対して、傾聴することは重要であると思った。また、本セミナーで地層処分の全体像が学べたことは、自分の研究の立ち位置を再認識できたため今後に生かせると思う。（地質環境、1年）
	地質環境分野のデータは，処分場の工学設計や安全評価の基盤となるものである。自身の業務で地質データを扱う際，どのようなクオリティーであれば他分野の方々とディスカッションできるか，を考える材料になると思う。(地質環境、1年)
	安全評価についての概要や現状を紹介いただいたことは、今後の地質環境に係る研究開発の課題を考える上で役に立つと感じました。 （地質環境、18年）
	包括的技術報告書には記載されていない、NUMOの考え方を知れたことが今後の業務において有益であったと感じた。（地質環境、10年）
	日頃より、研究内容のタコつぼ化に気をつけて、事業との関連を意識するようにと言われている。一方で、事業全体の把握はどうしてもレポートなどが中心となり、実際に研究開発を進める方が感じる課題と乖離があるように思っていた。今回の研修により、非常に基礎的な部分だけであっても、各分野を網羅的に知ることができた。特に、安全評価はどうしても縁遠いものになってしまうので、実際に携わっている方の話を聞けたのはよかった。今回の資料は、今後、テーマ考案などの際に事典のように使えそう(もちろん、二次利用はせず使用方法には十分留意いたしますが)。 （地質環境、4年）
	地質や地下水に対する理解を深めることは，核種移行挙動評価においても役に立つと思います。 （安全評価、20年）
	地質環境の分野で提供可能なデータや安全評価の側で必要なデータなどを知ることで知識を共有し、工学技術の側からどのようなデータが欲しいのか効率的に伝えることや、他の分野でほしいデータ、数値を手帰郷できることが可能でないかと思う。（工学技術、2年）
	安全評価において重要となる処分場の状態変遷やパラメータ設定の考え方は知識として役立つと思います。また，処分場の状態変遷に影響するTHMC解析については，今後深くかかわっていくと思われますので，大変参考になりました。 （安全評価、1年）
	最終的に分野間連携を進めていくために各分野でどのようにSDMをとらえているのか、また連携に対する意識について確認することができた。(地質環境、17年)
	（一般の方を対象にした）見学対応に役立つと思う。これまではサイトの選定やガラス固化体について質問されたとき答えに困っていたが、以前よりはまともな回答ができそうだと思う。(工学技術、3年)
	新たな知識が得られたことも大きいが、知識そのものよりも、これだけの技術者が地層処分実現のために、長年研究を続けていることを肌で感じることができたことが大きい。 これらは事業実現のためのモチベーションの向上、対話活動における説明時の自信の向上につながる。(広聴・広報、5年)
	他機関の関係者との繋がりは今後の業務に役立つと感じる （工学技術、10年/安全評価、5年）
	各分野で取り組んでいる状況や情報を講義いただいたので、一般の方々への説明時に「こんなことも取り組んでいる」とか、日本の地質環境がどのような成り立ちになっているのか、等についてお伝えできると思います。 また、先述しましたが安全評価については、その数値の根拠を自信を持って伝えることができると感じました。（広聴・広報、4年）
	SDM構築、解析、実測との比較・フィードバックの流れを理解しておくことで その結果に基づいた処分場の設計を円滑にすすめられると感じた。(工学技術、7年)
	今後環境影響評価について勉強する際に、地層処分場の設計等も念頭に置きたいと思います。また、対話型全国説明会での説明や資料の作成に生かしたいと思います。(広聴・広報、2年)
	自身の業務が事業全体のどの範囲にあたるか、またどういった役目をもつものなのか、 再認識するとともに、今後、分野横断業務が増えると予想されるため、知見を得たと考えている。(工学技術、1年)
	地下水については、説明会でも特に質問が多い分野であるが、今までは技術者に説明を任せていた。今回の講義を受けて、地下水の特性や調査方法については一部理解することができたので、技術者に回答してもらわなくても自分で回答することができる部分が増えたこと。(その他、7年)
	分野間にまたがる業務に携わるうえで役立つと思う （地質環境、7年）
	今後の業務に役立つと思います。具体的には、調査段階で実施される安全評価において考慮する処分場の状態変遷、多重バリアシステムにおける不確実性に対応した解析ケース設定の具体例などの内容で、これらの知見によって、より広い視点で事業全体を捉えられる点です。(工学技術、7年)
	現在、海外情報を調査する仕事をしているので、資料を作成するときに今回の研修の資料を見返すことがあると思います。 特に、安全評価の線量やリスクについては業務で必要となることがあるので、日本の規制基準や国際的議論の講義は非常に参考になりました。こうした議論を把握していれば、諸外国の議論の理解も円滑に進みます。(その他、8年)
	現在の地層処分事業の全般、大枠を知ることは、どの分野に従事する人でも重要なことだと思います。 私の場合で言えば、今後、沿岸の事業でのSDM作成に対し、SDMがいかなるものかを理解した上で工学や評価の検討を進めたいと思いました。(工学技術、1年/安全評価、4年)
	説明スライドの作成などは今回のグループワークで学んだことを生かしてすぐにでも改善したい。分野間の連携において、しっかりこちらが必要なものを伝えること。(地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年)
	役立つと思う。現在、業務のために安全評価技術分野について勉強しているが、今回の研修の講義で今まで勉強してきた内容を一通り復習できた。 また、処分場の解析に関しての講義はこれから勉強していこうと考えている分野だったので、先に講義で概要を知ることができてよかった。(安全評価、1年)
	他の専門分野との連携や自分の分野の研究課題をより明確にすること、処分について様々な人に説明していくのに役に立つと思います。(安全評価、9年)
	・一般の方との対話の業務に携わる機会が多いので、地層処分事業に関する3分野の全体を広く浅く知ることができたので、今後の説明の際にも役立つと思う。 ・対話の在り方についても、学ぶ機会となったので、今後の業務に役立てていきたい。(広聴・広報、1年)
	地層処分事業のこれまでの背景や、基本的な考え方を知れたのは、今後この分野に関係するのであればよかったと思います。(安全評価、2年)
	SDMの重要性と調査・設計との関連性の理解が、今後の業務で生きると思う。(地質環境、9年)
	地質環境モデルでは調査・設計・安全評価をつなぐモデル構築であるが、それをつなぐためには各分野のひとが理解できるような単語や言い回しで伝える必要があることから、できる限り一般のひとがわかるような言葉回しを使って伝える必要あり、それ使えるように意識が今後の業務に生かせるようにしていきたいと思う。(工学技術、1年)
	・役立つ 観測・監視システムについてはまだ具体化されていないという印象がありました。どのような項目を計測しどのように表現し、公表（国民、地域住民、現地作業員）していくのか検討・提案していきたいと思います。 （地質環境、10年/その他、20年）
	産総研の講師の方の「信頼は満足の積み上げである」という心理学用語の紹介が心に深く残っています。各講義でご説明頂いた内容や、これまで の検討の経緯などをしっかりと理解し説明できなければ、いくら頑張って今後の業務の中で実験等行ったとしても、実際の事業に移れないかもしれ ないことを認識し、自己研鑽に励もうと思いました。（工学技術、1）
	自分の専門分野でない部分にも興味の幅が広がり、業務に必要な情報のインプット効率が向上したという点と、 業務の進め方や成果について広い視点からの説明・考察ができるようになった点です。(工学技術、2年)
	地層処分に直接携わっているわけではないのですが、処分事業に携わるものとして、地質環境・工学技術・安全評価という3分野は切っても切れないものなので、地層処分の考え方を知れたことで、今後の業務においてはピット処分の建設において、リスク管理など考え方を応用していきたいと思います。(工学技術、1年)
	・地質調査業務 ・他分野の技術者へ渡すデータの留意点などを理解できた点は、実際の調査時のリスクコミュニケーションに役立つと感じた。(地質環境、3年)
	地層処分の全体，安全評価基準などよくわかった． 緩衝材の安全性検討において，更なる研究条件，考え方などをideaができた． 例えば，心理学を研究に取り入れられたい，立地問題において，理工学と文学をうまく連携できないかというところで，貢献できると思った。(工学技術、17年)
	計画の全容を把握できたので，より規模感を持って，緩衝材の研究に取り組むことが出来ると思います．(工学技術、1)
	私は，学生なので実務ではないですが，今回の研修を得て自分が得た地層処分の現状を同世代の学生に伝えることができればいいなと感じました．実際の専門家の方にお会いして話を聞ける学生はなかなか少ないと思いますし，これらの知識を正しく同世代もしくは後輩に伝えることができれば，研究意欲の向上にもつながると思いますし，この分野を携わる可能性がある自分自身の義務である私にとって，学生の時から真剣に考えてくれる人が増えることが大事であると感じました．(工学技術、2年)
	今回の特別講演にあったようなコミュニケーション理論は，処分事業にかかわらず，顧客との円滑なコミュニケーションをする上で大変に重要であると考えている． （地質環境、5年）
	これから、地層処分関連で地質について業務をおこなっていきますが、その結果を他分野にスムーズに繋げられるように意識すること。 他分野の人と交流することによって、私の分野間では常識の範疇だったことがそうじゃないということもわかりましたので、もっと物事をわかりやすくしていく必要があると思いました。(地質環境、3年)
	業務に直接は役には立たないと思う。分野間連携を念頭においた結果の出し方や業務の進め方を意識するようになった点で役に立つと思う。(地質環境、2年)
	安全評価上重要な核種は処分場の地質環境によって全く異なる可能性があることが分かりました。この知見は今後の基盤研究の課題設定に役立つと思います。(工学技術、2年/安全評価、7年)
	成果を伝える場合は，相手の立場を考慮する。(地質環境、3年)
	L1, L2処分における長期解析モデルの構築に役立つ ＞地下水の移動、核種の移流の知識が必要 ＞リスク評価、安全評価につなげるため、どのような視点で情報を提供するべきかの基本を理解する上で役立つ （工学技術、3年）
	今後、本セミナーで紹介された知識が必要になった際に、講義資料を振り返ることで必要な情報にたどり着きや易くなると思う。(安全評価、6年)
	個人としては処分事業全体を扱う機会はないが，自分が扱っているテーマに対してより複合的な視点で考えられるようになったと思われる．(工学技術、20年/安全評価、20年)
	他分野のことが少し理解できた。(地質環境、30年)
	一般の人に対する地層処分技術の説明。(安全評価、27年)
	内容的には研究開発などの幅広い分野で役に立ちそうな気がしました。(地質環境、1年)
	幅広い分野の研究内容について概要を知ることができ、自分が関わっている分野の位置づけがより明確になったと思うので、今後の研究計画の立案や予算申請における背景や目的の作成に活かしていけると思う。(地質環境、2年/安全評価、1年)

質問項目	意見・要望等
自分自身の研究が他の分野や処分事業全体の中でどのように貢献できると思いますか	受託研究を実施中 （地質環境、25年）
	安全評価、放射線防護概念の解釈によって、処分事業の方向性を示唆できるように努めたいと思います。（工学技術/安全評価、24年）
	社会には貢献しうる。一方、国や事業者の意向に沿うとは限らない。(地質環境、26年）
	安全評価における場の設定の精緻化に貢献できると思う。（工学技術、5年）
	（パス：現在、直接研究開発には従事していないので。）（安全評価、25年）
	自分の専門分野は地質の年代測定であり、自然現象における調査技術を研究している。地層処分においてのぞまれる好ましい・好ましくない地質環境を制約する手がかりを提供することで貢献できると思う。（地質環境、1年）
	岩石中の地下水の経路を詳細に明らかにすることで，ニアフィールドスケールやパネルスケールの地下水流動に有用な知見を得られると思う。 （地質環境、1年）
	サイト選定の調査技術や安全評価のシナリオ構築に貢献することを想定しています。 （地質環境、18年）
	地質環境調査や、閉鎖技術など、処分事業の各調査段階および操業時／閉鎖後に必要となる技術を整備することで貢献できると思います。 （地質環境、10年）
	処分技術や安全性評価の基盤となる地質環境の理解やデータの提供。 （地質環境、4年）
	地下水挙動評価や地質の変遷挙動評価に少しはお役に立てるかもしれませんが，あまり自信はありません。 （安全評価、20年）
	工学技術は、地層処分の安全性を向上させる研究開発の大きな柱であると思うので、この分野でしっかりと研究成果を残すことで地質環境の条件を緩和できたり、安全評価においてもより現実の減少に近い条件や性能を提供できるのではないかと考える。 （工学技術、2年）
	広域スケールでの核種移行解析や，より現実的なモデルを利用した現象解析は処分場の性能評価の観点から貢献できると思います。また，新たな研究テーマの開発にも貢献できると思います。 （安全評価、1年）
	分野間連携に必要なデータや知識の提供 （地質環境、17年）
	隣り合う人工バリア要素（緩衝材）の分野・安全評価分野にはデータを提供することや考慮するべき現象を共有することで貢献できると思う。(工学技術、3年）
	対話技術や技術的な知識の向上により、より安心や信頼を感じてもらえるような対話が可能となることで、事業を前に進めることに貢献できる。(広聴・広報、5年）
	地層処分事業を、対話/技術を組み合わせた全般として推進したい （工学技術、10年/安全評価、5年）
	広報としては、一般の方々が疑問に思うこと、不安に思うこと等を技術者、研究者の方々にももっと知ってほしいと感じています。 技術者の言葉が一般の方々（自分も含め）どれだけ難しく感じられるのか、技術者の思う「一般的」と、一般人の思う「一般的」は違うということを知ってほしいと思います。そういったことを広報側からも伝え、共有し、より分かりやすい資料や表現というものを考えていけたら良いと思います。(広聴・広報、4年）
	処分場の操業期間中の安全対策を示し、安全が確保されていることを説明できること。 人工バリアをはじめとする施工の実現可能性を説明できること。(工学技術、7年）
	研究職ではないが、建設工事の管理・監理として、品質管理や効率化や安全衛生など、調査環境や操業後の坑道環境を整えることに貢献できるものと考えている。それらが、維持管理しやすく、地上と地下施設も含め、事業が円滑に進む計画など、土木観点な視点で事業を盛り立てたい。(工学技術、1年）
	どのように説明すれば一般の人も理想処分の安全性を理解できるかという感覚については、実際に対応した人間でなければ分からないと思うので、その感覚をできるだけ技術者にフィードバックし、技術者にも説明の能力向上に努めてもらうことができると考える。(その他、7年）
	安全評価の将来のシナリオを考える際に貢献できると思う （地質環境、7年）
	工学技術分野における回収可能性維持の影響評価 （工学技術、7年）
	国、実施主体、電力、規制機関等が処分事業を設計する上で、我々が調査した諸外国の事例を参照事例として活用しているので、その点で貢献できていると思います。(その他、8年）
	工学及び評価の知見から、より確からしい処分場の変遷の記述や安全評価のためのシナリオ作成の考え方の提示など。(工学技術、1年/安全評価、4年）
	人工バリアの制作にかかわる研究では設計へのフィードバック。 長期挙動評価ではその評価に必要な地質環境データや熱力学データの提示。(地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	私は安全評価分野に所属しているので、処分事業が地層処分の安全性を一般の人たちへ説明する際にその根拠を示すのに貢献できるのではと考えられる。(安全評価、1年）
	工学的な対策や人工バリアの長期変遷などの研究をしており、これらは設計や安全評価に役立つと思います。(安全評価、9年）
	一般の方への分かりやすい説明、理解活動、など。(広聴・広報、1年）
	物質移動についての研究をしていますが、安全評価を行うシミュレーションを行うためのモデル形成や基礎データの集積、現場での物質移動評価技術の確立に貢献できるかと存じます。(安全評価、2年）
	地質構造モデルを作成しているので、客観性のある、信頼性の高いモデル作成法を模索していきたい。(地質環境、9年）
	解析が研究分野であることから、安全評価や工学の分野で貢献できると考えています。(工学技術、1年）
	・講演中に地表も含めたSDMというお話もあったかと思います。弊社で取り組んでいる洪水予測等の地表面における流出解析の技術で貢献できると思いました。 ・今回触れられなかった観測・監視システムについて貢献できると思いました。 （地質環境、10年/その他、20年）
	ベントナイトを用いた調査ボーリング孔の閉塞技術の検討に携わっているので、処分孔そのものの閉塞における工学技術の向上へ応用する 形で少しでも貢献させて頂ければと思います。（工学技術、1）
	処分場の設計オプションを充実させ、より安全で合理的な処分場の実現に貢献できると思います。(工学技術、2年）
	ピット処分の主にコンクリートなどの材料分野の研究を行っている中で、地層処分においても、同様にセメント系材料の低熱化や低腐食性化などに貢献していきたいと思います。(工学技術、1年）
	・地質調査業務 （地質環境、3年）
	緩衝材に関わる研究において，もっと詳細な研究を実施することで，貢献できないかと思った． 想定されたシナリオにおいて，予測された現象，例えば緩衝材の再冠水など，もっと詳細に検討した上，予測の向上に貢献できると思う．（工学技術、17年）
	実験と解析により，より確からしい数字を示す。(工学技術、1）
	私は，現在大学機関に属しているので，実務に関わる研究をしているわけではないことを再確認させられました．しかし，大学機関は国からお金を頂いて研究を行っているわけではないので，実現が難しい研究について積極的に進めていってもよいのではないかと感じることができました．私の研究は，緩衝材の制限温度の引き上げを工学的視点からテーマにしておりますが，これは実施団体・企業の方が研究するには少し無謀なテーマだと思います．このようなテーマを大学機関が扱い，安全性を証明できる技術のみを採択することができれば，より一層大学や学生が地層処分の課題に対して貢献できるのではないかと期待しております．（工学技術、2年）
	SDMのルール作り，不確定要素の議論 （地質環境、5年）
	私が行っている地質モデルの作成は、工学設計や安全評価をするための、SDMを作ることに直結しますので、私の地質モデルの精度次第で、工学設計や安全評価がしやすくもなり、しにくくもなると思いますので、より良いモデルを作れるように精進したいと思います。(地質環境、3年）
	講義の中でもあったが、地質環境分野からはSDMを作ることで分野間の連携に貢献できると思う。実際に作成されるSDMの精度については、工学・安全評価の方が想像しているものとは違うものかもしれないが、出来るだけ精度(再現性)や確度がある情報をお渡しできるよう努力していきたいと思う。(地質環境、2年）
	私はベントナイト中における鉱物析出反応と、二次鉱物がバリア性能（拡散係数、透水係数）に及ぼす影響について研究しています。これらの知見は、多孔質媒体中の反応輸送モデルの構築や、安全評価の保守性低減による合理的な処分事業の推進に貢献できると思います。(工学技術、2年/安全評価、7年）
	研究業務は行っていないが，地質の専門家として地質環境調査評価技術分野に貢献していきたいと思います。(地質環境、3年）
	地下水シナリオにおける核種移行解析。(安全評価、6年）
	放射性廃棄物処分に求められる核種閉じ込め性能の向上に貢献できるよう，研究を進めている．（工学技術、20年/安全評価、20年）
	地質環境は、この事業の基礎となる。(地質環境、30年）
	地層処分技術の安全性向上に貢献。(安全評価、27年）
	今進めているのは花崗岩を対象とした掘削損傷領域についての業務で、これは坑道掘削と岩盤中の水理特性について密接に関係しているので、処分場の設計や安全評価などに関して広く浅く貢献することができると思います。(地質環境、1年）
	私が現在興味を持て取り組んでいるのは地質環境調査と安全評価をつなぐ部分であると思うので、今回各分野の講師の説明を聞き、考え方を知ることができたことは大変勉強になったと思う。(地質環境、2年/安全評価、1年）
【大学の先生・学生の方への質問】 興味をひかれた（携わってみたい）研究開発分野・テーマは何ですか	心理学の内容。(工学技術、17年）
	核種移行解析 連成挙動（工学技術、1）
	I9．最新の安全評価のための取り組み （工学技術、2年）
	幌延深地層研究センターにおける物質移行解析。(安全評価、6年）
	・社会受容性に関する研究 （工学技術、20年/安全評価、20年）
【大学の先生への質問】 今回のセミナー資料に関して、次世代の人材確保に向けた資料作りとしての改善点がありましたら教えて下さい。	説明会などで，よく聞かれた質問および標準回答を整理して，いただいた方が有難い．自分でもうまく説明できないのは，地層処分がなぜ急ぎで必要なのか，なぜ安全なのか． 地層処分の安全評価の方法及び結果を分かりやすい資料があれば，ありがたいです．（工学技術、17年）
	・今回のセミナー資料は，「人材確保」というよりは，すでに関連分野におられる方々の育成を目指しているものと思われ，それについては十分な効果を発揮すると考える． ・人材確保に向けるということは，それまであまり興味が向いていない方々を取り込むことが目的となるため，もちろん今回のセミナー資料とは全く異なるものになるのではないか．（工学技術、20年/安全評価、20年）
【学生の方への質問】 地層処分分野において次世代の人材の確保（学生がこの分野に興味を持つ）するためには何が有効かアイデアを頂ければ幸いです。	地層処分のプロジェクトは，「現時点で人類が持つ最高レベルの技術を結集したものである」，「この事業に関わることは，栄誉なことである」というポジティブな印象を持ってもらうことが必要． そのためには，地層処分に関わる人間が学生たちにリスペクトされる存在であることが求められと思います．
	まず，学部の時から放射性廃棄物の処分が一つの大きな課題であることを工学・理学の幅広い分野の学生に伝える必要があると思います．そのためにも，今回作成した資料よりももっと簡単にしたものを大学教授に配布し，講義の1コマの中で10分でも20分でも説明していただくことが必要だと感じました．（学部生の講義で既出の専門用語を使用したテキスト，実際の現場の動画や実物大の模型など）私を含めて，学生は本当に知識がないので，少し難しい内容だと聞く耳を持たず，時間の無駄になると思いますので，専門家の皆様が思う2割増しに簡単にするかつ大学の講義内容にも関連した授業案の作成等が必要なのではないかと感じました．（工学技術、2年）
	深地層という直接的な測定が難しい対象に対して、様々な手法や知見を組み合わせることで、地下の状態を推定する楽しさを伝えること。 また、法令や地層処分場概要の説明ではなく、実際に研究者が行っている実験や解析を紹介することが重要だと感じる。(安全評価、6年）

質問項目	意見・要望等
【民間企業の方への質問】 今後、所属する会社が、地層処分事業にどのような形でかかわっていくことができると思います。	地層処分に資するための研究開発。事業に進展があった際、これまでに蓄積された知見をもとにして文献・概要調査へ参加。（地質環境、4年）
	事業の実施主体 （工学技術、10年/安全評価、5年）
	事業者なので、関わる以外に道はない（その他、7年）
	実施主体として責任を持って事業を進めていかなければならない （地質環境、7年）
	これまでも調査・研究を実施して、国や電力、関係機関の要望に対応しており、今後もこうした機関・組織の要望に対応していくと考えております。もし、日本のサイト選定が進んで、文献調査に入ることができれば、国や電力、関係機関の要望もより具体的・詳細なものへと変化していくと想定しております。（その他、8年）
	国（METI）等の委託事業において実施する研究開発において、NUMOのニーズに確実に反映することが柱であるのは変わりないが、このプログラムで強調されていた他分野の連携や一般公衆とのコミュニケーションも意識して、成果がうまく伝わるようにまとめること。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	NUMOのセーフティケース内容へ、国の基盤研究の実施を通して反映していくことが出来ると思います。（安全評価、9年）
	実施主体として、技術分野、一般の方への理解促進、など広くかかわっていく。（広聴・広報、1年）
	基礎データ収集のための試験、環境モニタリング事業。（安全評価、2年）
	地質環境の長期的予測をする上での、モデル作成やシミュレーション。（地質環境、9年）
	地層処分の坑道を掘削する分野とベントナイト等で埋め戻す分野で大きくかかわっていくと思います。（工学技術、1年）
	・講演中に地表も含めたSDMというお話もあったかと思います。弊社で取り組んでいる洪水予測等の地表面における流出解析の技術で貢献できると思いました。 ・今回触れられなかった観測・監視システムについて貢献できると思いました。（地質環境、10年/その他、20年）
	（施工業者として）処分坑道の掘削、地上施設の建設、ガラス固化体運搬専用の港湾や道路の造成 （工学技術、1）
	地層処分場の現実的な建設計画の立案や、建設工事の安全かつ合理的な実現、という形で関わっていくことができると思います。（工学技術、2年）
	坑道・埋戻し材・地下施設などの仕様の設定・計画から施工まで、選択肢をご提案して、事業者とともに最適解を見つけていけたらと思います。（工学技術、1年）
	・概要調査 ・精密調査 （地質環境、3年）
	地質環境モデル作成，斜坑施工支援，人口バリア研究 （地質環境、5年）
	当社では、地質モデルの作成と地下水の解析について関わっていくことができると思います。ですので、SDMモデルについて深くかかわっていきたいと思います。（地質環境、3年）
	研究組織のため、地層処分に関わる研究内容で科学的に信頼できる結果を出す、最新・実用的・確からしい手法を開発することなどで関わっていくことができると思う。 また、実際に事業が始まった場合を考えると、データの評価やアドバイザーのような立場からサポートできるのではないかと考える。（地質環境、2年）
	中立的な学術研究機関として、科学的な観点から地層処分事業の推進に必要な研究開発に関わっていくことができると思います。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	地質環境調査評価技術、工学技術、安全評価技術に特化したものではなく，これらすべてを含んだ形でかかわっていければとと思います。（地質環境、3年）
	・調査、設計、安全評価の三分野連携を担えるコンサルとしての立ち位置で、各分野で携わることが出来る（あるいは将来的に出来るようにする）ことを目指し、インタープリターとしての形で関わる。（工学技術、3年）
	設計や安全評価、現場施工において大いに関わる事になると思います。（地質環境、1年）
	地層処分技術の研究開発。（地質環境、2年/安全評価、1年）
【民間企業の方への質問】 また、所属する会社が、地層処分事業に継続的に関わっていくためには何が重要でしょうか。	知識の継承。そのための人材の継続的確保。（地質環境、4年）
	人材の確保と育成 （工学技術、10年/安全評価、5年）
	地域住民との信頼関係の構築、高度な技術力（その他、7年）
	技術者として，地域の方に安心・安全と思ってもらえるよう，調査・評価手法を準備しておく。調査開始以降は，適切にサイト選定を行う （地質環境、7年）
	国の予算がないと、事業が動かないので、まず予算だと思います。また、予算が確保できれば、次に人材の育成が必要とされるので、今回の人材育成は、処分事業の実施前の重要なプロジェクトであると考えております。（その他、8年）
	処分事業の進展によって関わり方が異なると思うが、その時の状況に合わせて必要なR&Dを実施すること。そのために、若手を確保することが重要であり、若者に魅力のある職場と認識できるような職場環境に改善すること。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	NUMOの事業で必要な技術やデータを理解、また、事業の動向を知り、適切に整備していくことが重要と思います。（安全評価、9年）
	実施主体として広く全般に関わっていくなかで新しい知見等を取り入れていく必要はある一方で、地層処分の枠にとどまらず、類似したほかの事業（例えば、発電所建設など？）ですでに取り入れられている考え方、手法などをよく勉強したり、そのような分野の専門家とコミュニケーションをとっていくことも重要だと感じた。（広聴・広報、1年）
	地層処分事業において、いつ、どこで、どういったものを必要としているかという情報。（安全評価、2年）
	地質環境の予測に関して常に最新の知見・技術を模索し、地層処分全体との関わりについて考える。（地質環境、9年）
	サイトを選定して、坑道を掘削する時期が明確になること。 現状では研究段階で埋め戻し技術ばかり研究しているが、いつ始まるかわからないので会社が見切りをつければそこまでになってしまう。（工学技術、1年）
	あくまで社内的な話ですが、処分事業の社会的意義を社内に広く PR する必要性は個人的に日ごろから感じています（どうしても現在進行中の工事が重要視される風潮があるため）。ダムなどの従来の花形工事をしておけば威張れる時代は終わり、会社の社会的価値を高めていかなけれ ば民間企業も次の時代を生き残っていけないこと、そのための一つとして放射性廃棄物の処分という何らかの方法で解決しなければならない課題 に取り組むことの意義を社員全員が共有することが重要と考えています。（工学技術、1）
	現実として、企業の経営方針に地層処分事業への関与が継続的に組込まれる必要があると思います。弊社は株式会社のため、株主に提示できるわかりやすい将来利益の見通し、つまり 地層処分事業の予算規模や建設分野への投資額が決定的に重要となってしまいますが、その他にも近年 経営方針にSDGsを取り入れる動きが盛んですので、地層処分事業のSDGsにおける位置づけを打ち出しておくと 僅かながら企業としても世間にアピールしやすいかもしれません。（工学技術、2年）
	地層処分に求められることを理解し、よりよいものを提供することが重要ではないかと個人的には感じています。（工学技術、1年）
	・継続的な人材育成 ・豊富な資金 （地質環境、3年）
	第一人者とのコネクション，その人との相互信頼，論文などの実績 （地質環境、5年）
	当社は、地質・地下水について専門に業務を行っています。ですので、1つ1つのモデルの作成や解析を丁寧に、確実にやってく必要があると思います。そうすることによって、結果はついてくると思います。（地質環境、3年）
	地層処分事業を遂行する上で不明瞭・不確実な点を見つけ、取り組んでいくことが重要だと思う。また、NUMOのニーズ、日本・世界の動向などにも留意しつつ、研究・業務内容を少しずつ変えていける柔軟性も必要だと考えている。（地質環境、2年）
	安定した予算による長期的な研究開発テーマに参画する機会があれば、地層処分事業に継続的に関わることができると思います。この分野に仕事が沢山あれば、地層処分分野に精通した若い人材の獲得と育成にも積極的に取り組むことができると思います。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	継続的に関連業務を実施していく必要があるが，どのように継続していくのかが課題である。人員確保，技術継承のためにも，長期的に業務として行えることが重要となる。 発注者側の予算の都合もあるとは思いますが，単純に業務の対価だけではなく，それらを考慮した予算を組んでいただければと思います。（地質環境、3年）
	・三分野の連携が課題ということなので、この課題を埋めれるようなポジションを獲得することが重要。（工学技術、3年）
	実施主体や関連団体との良好な関係。（地質環境、1年）
	活発な共同研究の実施、予算の確保。（地質環境、2年/安全評価、1年）
【講師の方への質問】 講師をやってみて難しかった点、また、今後、講師をやる場合に、より分かりやすい講義のために改善したい点は何ですか	用語の解説の程度が難しかったです。概念の理解を、定量的かつ感覚的に腑に落ちるようにはできていなかったと反省しています。 「線量」のような基本的な用語の解説も必要であったかと反省しています。（工学技術/安全評価、24年）
	①セミナーの目的が絞り込めていないので、どこを向いて話せば良いか戸惑いがあった。自己評価としては、良いプレゼンができたとは思わない。 ②広く浅くの会については、今は中堅・若手にバトンタッチすべきだと思うので、もうやらない。専門家養成向けのプログラム開発とその実践に専念したい。（地質環境、26年）
	聞く人の専門分野や興味がバラバラな中で、何を伝えたいかを決めることが難しかった。動画等を織り交ぜれば，より簡単に伝えることができると感じた。（工学技術、5年）
	前後の講義内容との調整 （地質環境、18年）
	他の講師の方の発表内容の勘所がよくわからなかったので、何を説明すべきかが悩ましかった。今後同じような機会があった際、ポイントを絞って、説明すべきと感じた。 （地質環境、10年）
	核種移行挙動評価は，セミナー全体のバランスの観点からは詳細にすぎると思いました。もちろん，核種移行屋の立場として，講義を通して研究の重要性を訴えられる機会は大変ありがたいのですが，異分野の方が興味を持ってくださったかどうかは（昨年度も今年度も）疑問です。強いて改善点を挙げるなら，「溶解・収着・拡散」という現象ごとの分類だけでなく，主要な核種の化学・放射線学的挙動を紹介するといった，別の視点もあったほうがよいような気がします。 （安全評価、20年）
	難しい話題をなるべく分かり易く説明しようとした結果，煩雑な情報を削りすぎてしまったのではないかと懸念しています。その結果，誤解を招いてしまったと懸念されるので，簡略化するときはその背景情報もなるべく取り込む必要があると思いました。 （安全評価、1年）
	受講者の専門性が幅広いため、どこにターゲットをしぼったらよいか最後まで迷った。また、講義時間も限られていたことから、必要な情報のエッセンスだけを話すことになってしまったが、その意図がどこまで伝わっているのか疑問である。分かりやすいかどうかは受講者が感じるものなので、自分では、今後、どこを改善すべきかはわからない（とりあえず自分としては、最善を尽くしたつもりである）。 （地質環境、17年）
	限られた時間、かつ一般レベルで理解していただけるように説明を工夫する点が難しかった。時間を守ること・理解していただけるような説明は、今後も説明する立場に立った際に意識する。（工学技術、7年）
	個々人の講義云々よりも、昨年の振り返り（次年度はこうすべきという総括）を踏まえて、今回のセミナーの対象者をどのように設定し、どの程度までの知識レベルとするのかなどといった、本セミナーの目的・目標、それに対応したセミナー構成をこのように設定したというプランニングの具体的な考えが、講師陣に十分に伝えられていなかった点が改善すべき点だと思います。（講師向けのプレゼンがない） また、分かりやすいというのは、身になったということなのか？例えば、研修後、試験でもすれば，受講者の理解レベルにどれだけ貢献していたかがわかりますが，それもないので，わかってもらったかもわからず。簡単な資料で分かった気にはさせられますが・・・。（安全評価、10年）
	受講者の方が何を聞きたいのかが分からず，自分の言いたいことだけを話してしまった。また，他の講師の方と一部内容が被る部分もあり，事前の調整が必要と感じた （地質環境、7年）
	教材の内容について，もう少し受講者のニーズを踏まえて議論したうえで練ればよかったと反省している．（地質環境、5年）
	演習時間をどのくらいとればよいか 私の中では、3分もかからないと思っていたが、予想以上に時間がかかった。その見通しが甘かった。今回演習のほかに、講義も行ったが、演習のみという選択肢もあったかと思います。（地質環境、3年）
	他分野のことを表面的にしか理解していない、このような機会が定期的にあるとうれしい。（地質環境、30年）
	前置きが長かったため、講義時間が短かった。時間配分を考え講義を行いたい。（安全評価、27年）

質問項目	意見・要望等
【講師の方への質問】 分野間の連携を進めていくためには何が重要だと思いますか	他分野に踏み込む姿勢でしょうか。自己の専門からの質問をもって、双方向の議論を持ち掛ける努力が必要と感じます。（工学技術/安全評価、24年）
	①他事業から学ぶこと。他の事業でやってきた連携が、地層処分分野では出来ていない現実を理解・分析すべき。 ②組織のエゴ（柔らかく言えば組織文化）をまとめるマネジメント能力。 ③機関間・分野間で相互に信頼・尊重しあえること。最終的には人となり。 ④個人では、専門分野に閉じこもらないこと。隣の分野が何であるかを理解し、専門分野の立場で、隣の分野にどんどん口出しすること。またそれを聞くこと。いきなり全方向に向く必要はなく、一つ一つ積み上げれば良い。 ⑤若手リーダーの育成，世代間の融合などの課題も山積み。（地質環境，26年）
	他の分野に積極的に貢献しようとする姿勢。（工学技術、5年）
	各分野の概要や現状をある程度理解した上で、議論することが重要だと思います。 （地質環境、18年）
	今回のような勉強会を繰り返し開催して，異分野の研究開発に接する機会を増やしていくことが重要かと思います。時間も手間もかかりますが…。（安全評価、20年）
	共通専門用語の定義の統一が最も重要であると思います。同じ用語を使っていても，お互いの認識が異なっているとコミュニケーションが円滑に進まないため，相互の連携は難しいと考えます。 （安全評価、1年）
	講師が分野間連携を意識した講義を行うことがまず第一。今回は、連携を意識した発表とたんに自分の仕事を紹介しただけの発表が混ざっていたので、受講者以上に講師の意識改革が必要と感じた。 （地質環境、17年）
	要素技術の開発だけを進めればいいのではなく、 調査・工学・評価の分野をまたぐ、「模擬演習」→「課題抽出」→「課題解決のための技術検討」が必要と感じている。（工学技術、7年）
	連携をしなければいけない仕事が必要。具体的には、セーフティーケースの作成、事業の進展 （安全評価、10年）
	分野横断プロジェクトを定期的に実施する。技術者間でコミュニケーションを密にとる （地質環境、7年）
	専門外のことに関して深く議論できないことは仕方がないので，お互いにどういったアウトプットが欲しいか明確にする．（地質環境、5年）
	各分野の用語の統一が必要と考えます。あとは、地層処分の上層部が最初に用語の意味などを定義してくれるとバラバラになりにくいのではないかと思う。（地質環境、3年）
	自己の表現方法を高めること、他分野で有用なデータを見極めること。（地質環境、30年）

大項目②-2:1月8日（1日目）の招待講演「「技術と社会」の関係認識から技術コミュニケーションへ」について	
質問項目	意見・要望等
講演の内容でどういったところが印象に残りましたか。	講師の研究者・技術者に対する厳しい姿勢が印象的で、一般市民の方々の意識を素直に反映した講義だったと感じます。専門性に加えコミュニケーション能力を磨くことが必要になっていることは理解できますが、しかし、我が国の技術者に対する扱いは決して良いものではないし、少なくとも（NUMOは別だと思いますが）市民対応は組織のなかで評価軸として確立されていません。このような背景のなかでの社会からの要求は過酷すぎるのではないか、と感じながらも、やはり、やらなくてはならないのだろう、とも感じました。 （地質環境、25年）
	①特別講演が印象に残った。ステップ1の問題提起に同意。ステップ2は必要なテクニックだとは思うけれど、どんな分野でもいいから、説明者がプロであることが前提。 ②準備不足。地質環境は特に顕著。 ③イベント開催が目的化してしまった。事業内容の見直しの必要性が透けて見えた。 （地質環境、26年）
	状況の多様性や受け手の意図の多様性を理解することの重要性や、傾聴の重要性が印象に残った。普段のコミュニケーションで練習していきたい。（工学技術、5年）
	対社会コミュニケーションにおいて、研究者・技術者がおちいりがちな傾向を的確に指摘されており、私自身にも思い当たることが少なくなかった。（安全評価、25年）
	「安全・安心」という言葉はよく使われるが、同列で使うことができる言葉ではない。安全を積み重ねて安心を獲得することができるということ。 サイエンスコミュニケーションと技術コミュニケーションの違い。（地質環境、1年）
	現在そしてこれからは，「コミュニケーションの専門家でなくても，コミュニケーションの勉強をする必要がある」時代だということ。（地質環境、1年）
	「技術者の説明が不十分である」ということが印象に残りました。（地質環境、18年）
	特別講演で紹介があった、技術コミュニケーション、科学コミュニケーションの講義が非常に印象に残った。また、コミュニケーションのやり方、留意点については、一般の方々に研究内容を説明する際または、質疑応答をする際の参考になった。（地質環境、10年）
	専門家による説明（回答）責任の重要性 傾聴の重要性 事実ベースのコミュニケーション（怒りの背景となっている「事実」は何か？）　（地質環境、4年）
	ひとつひとつの言葉が経験に裏打ちされていて，非常に重みを感じました。様々な例がとてもわかりやすく，印象に残りました。（安全評価、20年）
	「説明と説得」ベースのコミュニケーションの機能不全ということはこれまで私自身も感じていたところであり、先生のご説明でうまく言語化できて自身の中で改めて消化できたと考える。さらに関連して、対話の上では受け手側に多様性があるため送り手側の意図を正しく受け取っていただくための努力を忘れないようにしなければならないと思う。（工学技術、2年）
	国民の理解の得られない科学技術は現実世界から退場するべきという意見が印象に残りました。また，先生ご自身も原子力の理解促進に向けて活動しておられるが，本来は研究室にあって研究に集中したいという本音を聴けたことが印象にあります。（安全評価、1年）
	実体験に基づいた話の進め方。一方で、利益優先で生じた民間企業における技術者の不祥事と国の事業における技術者の不祥事を混同して話すことについては疑問を感じた。 （地質環境、17年）
	傾聴が大切。相手の意図を確認しながら回答することが重要。（工学技術、3年）
	一般の方と対話活動を行う上でのポイントをあらためて認識できた。（広聴・広報、5年）
	傾聴の重要性（工学技術、10年/安全評価、5年）
	「無関心層に対しては耐えるしかない。なぜか？その人にとっては興味関心がないから無関心なわけで、人は誰でも無関心である権利を有している」というお話が印象的だった。だからといって何もしないわけにはいかないのだが、そのような前提を気持ちとして持っていることでこちらも心理的に楽になる気がした。また、敵対する人への対処法や、傾聴の重要性も強く印象に残った。（広聴・広報、4年）
	地下水の様子をコップなど身近にあるものでたとえた点（工学技術、7年）
	専門家側に社会向けのリテラシーが不足しているという話が印象に残りました。確かに、専門家が社会向けの説明を行うことは重要ですが、どこまでの説明を専門家に求めていいものなのかが難しいラインではないかと個人的には感じています。 また、「信じていないならコミュニケーションはできない」という先生の一言も印象に残りました。 個人的には講演の続きが気になるので、何らかの機会にもう1度お話を伺えると幸いです。（広聴・広報、2年）
	（地元）人間活動に影響がある事業であるからこそ、理解活動の難しさ、重要性を学んだ。規模にもよるとは思うが、ミス、偽証は長年語り継がれてしまうこと。（コンプライアンス含め） 共通の正解は存在しないことが多々ある。（工学技術、1年）
	技術による社会への貢献をしっかりと主張しつつも、相手の発言の裏にある思いに対して理解しようという姿勢を持ち続けることが大切だということが印象に残った。 私は通常の業務として対話型全国説明会の運営に携わっており、日々の対応の中で、技術的な正解や政治的な結論を当然のものとして質疑をしてしまう傾向にあったので、今後の対応においては、こちらにとって正解であっても相手にはそうではないということを意識して対応を行えるようにしていきたい。（その他、7年）
	傾聴することの重要性（地質環境、7年）
	「説明重視」より「対話重視」、「傾聴」するというところが印象に残りました。研究者や技術者同士の日常の議論ではまずは結論から述べることが求められます。しかし、社会との対話を行う際には、答えを急ぎがちにならず、まずは受け止めて整理することを重視しているお話が印象に残りました。（工学技術、7年）
	先生のしゃべり方に熱がこもっていて、何を強調したいかが明確でした。キーワードもいくつかはっきり述べていたので、非常に分かり易かったです。キーワードを基に受講者に考えさせるという姿勢があって、大変役立つ講演でした。特に頭に残ったキーワードは「傾聴」です。姿勢としても大事だと思いました。（その他、8年）
	技術者が提供できるのは安全までであり、安心は別次元のものである。国民には無関心の権利もある。 発信者の意図が正確に反映された言語化の難しさと、受け手のコンテクストによって異なる受け取り方の多様性。 技術コミュニケーションと科学コミュニケーションの違い。科学は真実の探求、技術は希望の実現。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	ここの技術開発についてできるだけ網羅しつつ、その中でも伝えたい部分は深堀りして説明されていた。また、できるだけ分野間の連携をどう図るかも意識されていた。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	距離をとりたい相手とは逆に距離を詰めるようにしているという言葉が印象に残った。分かり合う気持ちを全く持ってくれていない相手に対して有効であるというのは意外でしたが、不思議に納得感があった。（安全評価、1年）
	地質、地下水、核種移行パラメータの講義などで、どのようにとらえればわかりやすいかなど、講師が大事な点をご自身の経験や知識から伝えていただいたのが印象的でした。（安全評価、9年）
	技術者が説明できるのは安全性のみであるということ。「安心」は、一般の方々が判断すること。 そのため、いかに安心していただくか、に配慮したコミュニケーションのありかたを、知る必要があるということ。（広聴・広報、1年）
	研究者・技術者もコミュニケーションをとる必要がある（説明責任がある）という点についてはその通りだと思いました。 その一方で、"傾聴"や"技術革新の不連続"の話をされていたときは、ずいぶんと極端な話をしているように感じました。 傾聴については、使い分けが重要であり、どういった条件の時に有用であるかを説明すべきであったと思います。グループワークで、傾聴することが大事、ということが先行してしまっている方がおられたが、場合を問わずに使うと、時には相手に不信感を抱かれる原因になると思います。 技術革新の不連続について、半導体デバイスを例に出されてお話しされていましたが、それはその分野に詳しくないから不連続に感じているだけであると感じました。実際には消費者には見えないところで、様々な材料・手法・技術について研究・開発が行われており、決して不連続ではないと考えております。今回の講義では、研究者・技術者の地道な努力や成果（消費者には見えない技術革新）をないがしろにしているように感じます。（安全評価、2年）
	サイエンスとテクノロジーの違いという話で、サイエンスでは正しいかどうかが重要だが、テクノロジーでは市民の評価が関わってくるという点。 市民に説明する際の「対話」の重要性。（地質環境、9年）
	対応の仕方によって相手の対応の取り方が変わってしまうのでコミュニケーションの取り方が大事だと感じた。また、人によって考え方が違ってくるので、それを尊重して、一度、傾聴するということは興味深かった。 （工学技術、1年）
	様々な意見を持つ方々とのコミュニケーションの難しさとその対処方法の事例について、実際のご経験に基づいたお話が印象に残りました。（地質環境、10年/その他、20年）
	（一つの例として挙げられていた）「人類は不連続に技術革新を進めており、原子力関連技術においてのみそれが不可能ということはないのでは ないか」という内容について、例示されてきた技術革新は「最悪革新が進んでいなければ（不効率でも）代替手法がある」というものであるのに対し、原子力関連技術につい ては市民の健康にも直結するため「命は最も大事であり、技術者が革新して当たり前」ととらえられる可能性もあり諸刃の剣だと思った。（工学技術、1）
	講師の先生が原子力に関する対話を長年されてきた、という説得力が印象に残りました。 また、先生のご苦労や悩みを知ることができ、大変参考になりました。（工学技術、2年）
	サイエンスコミュニケーションと技術コミュニケーションの違いの理解（地質環境、3年）
	講義02の資料25ページ，放射線レベル．（工学技術、17年）
	「傾聴」 末期患者の発現に対する医師，看護師，精神科医師の対応の違い． 住民の認識不足は，専門家の責任．（工学技術、1）
	コミュニケーションは，企業の中でも文系職や政府が行うことと思っていたので，技術者も住民に説明する機会が今後も増え，必要であるということが印象に残りました．（工学技術、2年）
	安全・安心をワンセットにしてはいけない．安全のみが不変の評価基準． 技術者は社会の懸念への真摯な向き合い方が欠如している D.I.E.法のDペースの議論をすべき 無関心である権利を有している サイエンスコミュニケーションとテクニカルコミュニケーションは違う（地質環境、5年）
	「市民参加型意思決定」について印象深かった。市民参加型意思決定については、たしかに国民の声を聞いて、進んでいくことは大事だと思いました。特に放射性廃棄物処理については、他人事ではなく、もしかしたら自分が住んでいる近くに処分場が設置されるかもしれないから。しかし、同時に、そこまでする必要があるのかという印象も受けました。あまり、感情的な方向に持ち込まないほうが良いと思うので、時には、専門家の独断ということも必要なのかもしれないと思いました。（地質環境、3年）
	研究者としての立場から地域住民へ説明するときの態度（傾聴すること）は非常に重要だと感じた。質問者が質問内容に込める意図をくみ取ることが大事であり、一般の方の質疑対応をする機会があれば意識するよう心掛けたいと思う。（地質環境、2年）
	一般の人に対し、専門用語を使って説得するやり方は不適切で、まずは「傾聴」が重要であるという点が印象的であった。講師の長年のご経験が凝縮した実りある講義であったと思います。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	特別講演で，技術者は技術の追求だけではなく，それを活用し享受する側の人たち（住民）にもわかりやすい説明が必要であり，たとえ対立意見があってもそれを受け止め，共有することが非常に重要であるとのことでした。（地質環境、3年）
	・社会に対する説明責任を果たせない場合、社会から退場を余儀なくされるという点 ・社会に「理解させる」というスタンスの否定 （工学技術、3年）
	意見の対立し、さらに敵対的に振る舞う方との話し合いは最も難しいことであると考えるので、その要な場合にどのように対処したかという例と、なぜそうしたかということを聞けたことは良かった。（安全評価、6年）
	多くの講師は自分の言いたい説明がほとんどであり、もう少しプレゼン技術を身に着けてほしい。将来的に市民に語ることも視野に入れなければならないと感じた。（地質環境、30年）
	我々技術者の、大衆に対する説明義務や姿勢などをどのようにするべきか、 また、現状の問題点などが印象深かったです。技術が優れていれば民衆は受け入れるといった時代ではなく、説明・対話を通していかに彼らの合意や支持を得るかといったところが大事なのかについて良く触れていたと思います。（地質環境、1年）
	研究者同士の質疑応答とはかなり異なる受け答えの方法があるということを強く感じた。（地質環境、2年/安全評価、1年）

質問項目	意見・要望等
地層処分に対する社会の信頼・理解を得るために、研究者・技術者ができることがあると思いますか。また、あるとすれば何ができると思いますか。	正しい知識を身につけて述べること。与えられた場所で何をすべきかを考えること。（地質環境、25年）
	バイアスと金に縛られることなく、誠実にものを言うこと。保身に走らないこと。（地質環境、26年）
	研究者、技術者は地層処分を実現するために必要な研究開発・技術開発を進め、一つでも多くの論文等をだし、実績を積み重ねる。（工学技術、5年）
	我々の職場では、研究者・技術者が見学者の対応をすることがあるため、説明や質問対応において、コミュニケーションのフレーミング（ステップ2）の各項目については、大いに参考になったし、今後、実践できるように努めていきたい。（安全評価、25年）
	社会の信頼・理解を得るのではなく、研究者・技術者が社会を信頼・理解していく必要がある。決して研究者・技術者が社会に理解してもらうわけではない。 安全性が伝わるような成果を出し、安心してもらえるようにする。（地質環境、1年）
	普段からコミュニケーションの基本を意識して話すこと。人の意見を共感的に聴く，意見の違いを超えて事実を見抜く，など。 一般の方々と話すときに，普段の"素"の状態というか，話し方の"くせ"が出てしまい，信頼を失う可能性がある。（地質環境、1年）
	誠実に説明を尽くすことが重要だと思います。（地質環境、18年）
	研究者、技術者が語るべきなのは地層処分の信頼性（安全性）ではなく、あくまでも研究内容、技術内容を科学的な視点で社会に伝えるべきだと感じる。（地質環境、10年）
	事業に対する理解を深めること（試してくるような質問に対して動じない）。傾聴の姿勢で臨むこと。（地質環境、4年）
	あるような気はするものの，具体的には思い浮かびません。研究者や技術者が対話の場に出る際には，事前に十分な（それがどれほどかはわかりませんが…）訓練を積む必要があると思います。（安全評価、20年）
	研究者・技術者の役割としては、地層処分の安全性を向上させるための根拠をそろえて提示することがベースにあると思う。ただ、そこで得られた根拠や数字を社会の皆様に押し付けるのではなく、相手が知りたいと思う事、不安に思う事に答える際の材料とすべきであり、納得・理解する権利は受け手側が持っていると思う。（工学技術、2年）
	研究者や技術者は地層処分の実現可能性や安全性を定量的に示すことができると思います。あるいは客観的なデータを示すことで科学的に信頼を得ることは研究者や技術者にしかできないことだと思います。（安全評価、1年）
	社会に対して、メリットやデメリットを含めて正確な情報をわかりやすく提供していくこと。講師が満足の積み重ねが信頼というのであれば、今のような専門用語を使ったり、相手の質問の意図をくみ取っていないような回答をしているかぎり、信頼を得ることは難しいと思う。（地質環境、17年）
	必要なデータをとる。研究所や現場でトラブルを起こさない。（工学技術、3年）
	プレゼン力の向上や、一般目線での説明の仕方の工夫が求められる。それは単に平易な言葉を使うということではなく、難しい内容を何とか伝えようという工夫やその姿勢そのものを相手に伝えるということ。 各分野の技術者個人への信頼が積み重なり、やがては組織や事業への信頼を醸成することができる。（広聴・広報、5年）
	異なる意見を受け止めることのできる謙虚さと誠実な対応（工学技術、10年/安全評価、5年）
	社会から信頼されない技術者は退場すべき　との言葉にもあったように、社会全体の流れや傾向を知ったうえで対話をしていくことも大事だと思う。セミナー中も度々出た「連携」が大切。それは技術者だけでなく広報＝技術での連携にも同様に言えることだと思う。小規模で良いので機関を跨いだ共有の会を頻繁に設けられれば良いと思った。例えば広報部門、技術部門、広報＋技術部門など。（広聴・広報、4年）
	・地層処分を今考えないと手遅れになるという緊迫感を伝えること。 ・原子力は危ないと印象を受けた方々に向けて、多重の安全対策を伝えるだけでなく、対策が全部破られても安全上影響はないと伝えること。 ・専門用語をつかわないこと。（工学技術、7年）
	実施主体とは別の中立の立場として一般の方とサイエンスカフェ等の場で対話を行う、目身のWebページに解説を掲載するなど、一般人との接点を増やす取り組みが何ができるのではないかと思います。（広聴・広報、2年）
	常日頃、技術者倫理を磨くとともに、都合のいい結果やデータのみならず、事実に基づいた情報の取り扱いを行う風土をつくり上げる。 （JAEA深地層研究所などのように、積極的な情報公開なども参考となる。）（工学技術、1年）
	研究者・技術者ができることはあると考える。まず第一としてやらなければならないことは安全性、効率性の追求であって、そこを怠っては信頼や理解を得ることはできないと考える。第二にできることは、技術による成果を正しく世間に伝えることだと考える。それも多くの一般の方々に理解できるように平易な表現などで、技術や成果の説明をすることが必要だと考える。第三に、世間からの要望や批判に対して、真摯な態度で対応することである。これは決してへりくだるということではなく、できないことはできないと言い、間違っていることに対しては間違っていると伝えるが、技術的な知識のない人間が言っていることだと下に見るような態度をとるようなことはしてはならないと考える。（その他、7年）
	科学的な事実を誤魔化さずに分かりやすく伝えること（地質環境、7年）
	研究者・技術者ができることは、D.I.E法のうちD（Describe）により事実を伝えることを中心とした対話、と思います。事実を正しく伝えるためには常に最新の知見や知識を得ること、技術の研鑽を継続する必要があると思います。（工学技術、7年）
	対話集会に研究者・技術者が積極的に出席して、一般の参加者に分かり易く説明することが一番重要だと思います。 新聞、テレビ、雑誌、ネットなどのメディアに登場することも重要と思いますが、メディアで発言する際は、事前に質問内容をもらっておいて、慎重に回答した方がいいと思います。（その他、8年）
	説明と説得のコミュニケーションではなく、傾聴し、同じ一国民として寄り添うこと。 技術革新への努力。 不正や不祥事など信頼を損なうようなことの根絶。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	思います。誠実に研究することで貢献できると思っていましたが、それだけでなく、反対意見に対してしっかり受け止めつつコミュニケーションとることで信頼性が上がると認識できました。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	講演の中で傾聴という言葉について医者と患者のやり取りを例にして説明があった。 研究技術の分野に限らず他分野でのコミュニケーションの例題も活用してコミュニケーションについて学んでいけば信頼理解に近づけると思った。（安全評価、1年）
	疑問点をしっかり理解して技術的な事柄を説明するなど、コミュニケーションを工夫することはできると思います。（安全評価、9年）
	社会に対する科学・技術の説明。一般の方々との対話。（広聴・広報、1年）
	嘘をつかないこと、隠し事をしないことが最終的に信頼・理解につながると思います。（安全評価、2年）
	社会への情報発信。特に安全性や、モデリングや予測を行う上での客観性。（地質環境、9年）
	話し方によって相手への信頼が変わってしまうので、真摯に返答することがだ時だと感じた。また、信頼を得るために提供するデータの信頼性をしっかりすることが大事だと感じた。（工学技術、1年）
	・研究成果や事実をわかりやすく伝えていくことが大切だと思いました。 ・研究者の負担を減らすために、エバンジェリスト（伝道者）の役割を担う人材や組織があるとよいのではないかと思いました（必ずしも研究者が常に矢面に立つ必要はないのではないかと思いました）。（地質環境、10年/その他、20年）
	「放射性物質」に対する社会的な不安感を解消すべく、関係する幅広い基礎知識をきちんと理解したうえで、かみくだいて説明できるスキルを身に つける必要があると感じた。また、こうしたスキルについて、コミュニケーションについての既往の研究成果をしっかり学ぶ必要もあると感じた。（工学技術、1）
	直接的な答えではないのですが、 自分の専門分野に関する理解を深めておき、その内容を他の人が理解しやすい形でに伝えるということは 社会の信頼・理解を得るために「できること」であるべきかなと思いました。 また、（今は相互理解が無理だとしても）相互理解をあきらめず根気強く説明し続けることも、同様に「できること」であるべきかなと思いました。（工学技術、2年）
	・簡易明解な資料作成 ・一般人の目線　（地質環境、3年）
	地層処分を分かりやすく映像化して，若い世代をアピールする。（工学技術、17年）
	日本における研究者・技術者の立場が，諸外国と比較して低いことが，地層処分に限らずあらゆる事業において障害になり得る． これは，国民の科学技術に対する興味のなさに起因するものと考えられる． 科学技術の魅力や，リスペクトを持ってもらうためには，研究者や技術者から世間に対して積極的にコミュニケーションを図ることで，まず興味を持ってもらうように動く必要がある．（工学技術、1）
	研究者・技術者自らが正しい技術を正しく説明することが必要と感じました．今回は，自ら説明会に参加していただいた住民の方の意見に対してどのように対応するかという話が大多数を占めておりましたが，自分の周りの若い世代はそもそも興味がない方の方が多いと思います．若い世代の中でも，思想の違い，バックグラウンドの違い，学の違いなどいろいろと異なる方々に，技術者自身で少しでも多くの方が興味を持っていただける話術が必要と感じました．まだ，具体的に何をすればいいのかは自分自身分からないですが，以上のような意識をもって社会に出たいと思います．（工学技術、2年）
	研究に関しては黙々と社会貢献を続けるしかない． 市民に研究の全てを理解させることは不可能であり，それを彼らも求めていないので，彼らの問いに真摯に答え続ける．（地質環境、5年）
	ある 研究結果をしっかりと公表する。良い結果はもちろん悪い結果についても開示する必要があると考えます。悪い結果の場合は、その解決策も用意して理解してもらうように努めたほうが良いと思います。個人的に思うのは、今までは、あまり研究結果を一般の人に分かりやすく、詳細に公表していなかったのではないかと思います。（地質環境、3年）
	研究者・技術者の立場として、D.I.E 法のD.について丁寧かつ専門的な知見から対応することができると思う。NUMOの方が説明会を催されているが、必要に応じて研究機関や企業の研究者・技術者も参加し議論することが将来的には必要であると感じた。（地質環境、2年）
	社会の理解を得るためには、それぞれの仕事・研究に真剣に向き合い、論文その他として成果を創出していることを示すとともに、研究成果を分かりやすく発信していくことも重要と考えます。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	客観的かつ真実に基づいた情報を用いることが重要だと考えます。手を加えるデータ前のデータと加工データを明確に区分することが重要だと思います。透水係数とか。（地質環境、3年）
	・技術者、研究者そのものへの信頼を取り戻せるように、個々人が対立者と信頼感を取り戻すことから始めないといけないと感じた。 ・「一般の人」と「技術者/研究者」と分けていることが、そもそも、へだたりを生む原因ではないかなと感じた。 立場や知識の有無は違えど、日々の生活を守り、将来世代へ負の遺産を残さないことを考えているという点で同じ、という点を踏まえてもう少し考える必要があると思う。（工学技術、3年）
	事実を述べること。その際に、恣意的にならないように、注意する必要がある。先生の言うD.I.EにおけるDescribeにおいて、個人の意見を含めること、また、誘導的に事実を絞ること、などについて排除することは簡単にはできない。（安全評価、6年）
	・研究者・技術者としては，真摯な仕事を地道に積み重ねることが肝要．その傍らで，今回のセミナーのように，関連する事柄について幅広い知識をフォローする努力をする． ・いずれ一般の方々に対して話をしていく際に，上記のベースのもと，実直に話すことができると良い．（工学技術、20年/安全評価、20年）
	信頼を得るためには、情報発信が重要である。わかりやすい言葉、レベルの高い研究発表など基本に立ち返る必要がある。（地質環境、30年）
	大衆に対して誠実に対応し、説明を続けることが大事なのではないでしょうか？ 聞かれたことに誠意を持って答え、大衆の気持ちの理解に努め、相手を煙に巻くことなく協力して合意を得ていくのが大事だと感じました。（地質環境、1年）
	すでに各研究機関は地層処分の理解促進のためのシンポジウムやセミナーなどを開催、もしくは参加していると思う。今回の抗議のようなふぃじゅつコミュニケーションの考え方が浸透すればより互いの意見を出し合いながら意見交換ができるのではないかと思う。（地質環境、2年/安全評価、1年）

質問項目	意見・要望等
地層処分事業における地元などとの対話で重要なことは何だと思いますか。	個人的には地層処分が最適なチョイスであることは比較的容易に理解してもらえると思います。しかし、候補地になると、風評被害によって人々の歴史・生活を100年程度傷つけることになってしまうと思いますし、下手をすると未来永劫、放射能で汚染した土地にしてしまうかもしれません。このような経済的な観点は、丁寧な対話（特にリスク）と、万が一の事態が生じた場合の適切な補償額の提示が必要になると思います。（地質環境、25年）
	究極的には、民主主義というシステムとの間のトレードオフ。ポピュリズム（個人のニーズ）に陥らない勇気と覚悟。それを支えるスキル。我が国を思う気持ち。（地質環境、26年）
	説明重視のコミュニケーションではなく、対話重視のコミュニケーションが大事と思う。（工学技術、5年）
	相手の話を傾聴する。相手の主張の認めるべきところ（or共感すべきところは）は認めた上で、高圧的にならないように留意しながら、事実は事実として伝える。（安全評価、25年）
	地元の方々の意見や言い分をまずは傾聴し、受け入れること。そのうえで、相手の意図をくみ取りその回答をしていくこと。（地質環境、1年）
	要望を完全に受け止める。できないかと考える。（地質環境、1年）
	相手の立場や思いを理解することがまず重要だと思います。（地質環境、18年）
	自分の意見を押し付けず、相手の立場にたって対応することが重要であると感じる。（地質環境、10年）
	地層処分が絶対的な正解であり、その合理性を説明・説得する…というスタンスで臨まないこと。参加者に対する敬意・尊重の姿勢。（地質環境、4年）
	先生がおっしゃっていた「市民からの質問に答えるだけ。語りすぎてはいけない」という意識を持つことが重要だと思いました。（安全評価、20年）
	対話を行っていく中で地元の方が知りたいことをうまく引き出して、知りたいことに対して真摯に答えることがまず重要であると思う。また、対話の目指す方向性としては、地元の方の思いを尊重して説得するのではなく、こちらの主張を納得してもらうことが大事だと思う。（工学技術、2年）
	相手の立場に立って，相手がどう考えて質問をしているのかの意図をくむことが重要であると思います。相手を説得しようとするのではなく，相手の話を聴く態度が重要であると思います。（安全評価、1年）
	一か所に1回の説明会で終わらせるのではなく、何度も足を運ぶ必要がある。また、地元の将来は地元民に決めてもらうというスタンスを守ること。地層処分事業を受け入れた場合の将来計画等を話すと紹介されていたが、それは相手が求めた場合でよい。こちらから、選択肢や未来像を主導的に示すことは押し付けだと捉えられるため、まずは時間をかけることが重要。説明会の数を増やすことが重要ではなく、どれだけ、真摯に対応するかが重要。（地質環境、17年）
	無関心な人々に情報を届けること。上から言わない。（工学技術、3年）
	全ての分野に広く受け答えができるジェネラリストの存在。また、最初の対話において、第一印象を良くすること。その良い印象を維持するよう努めること。 第一印象を良くすることは、以降の説明を聴衆が肯定的にとらえるか否定的にとらえるかが決まるので重要。また、一般の方が質問をしてきた際に、一通り何でも受け答えできるような存在は重要。 「専門外なのでお答えできない」は相手に不安な印象を与えるため。（広聴・広報、5年）
	傾聴の姿勢と謙虚で誠実な対応 （工学技術、10年/安全評価、5年）
	正確な知識を持ちつつも相手の心情を察しながら接することが重要だと思う。そのために「傾聴」は大切。 また、相手に合わせた言葉や表現を使えるように様々なシチュエーションを想定し取り組むことが大切だと思う。（広聴・広報、4年）
	・処分場の建設・操業は安全であることを伝えること。 ・環境影響評価をおこない、環境保全策をおこない続けることを伝えること。 ・漁業補償などの社会的な取り組みもおこない続けることを伝えること。（工学技術、7年）
	傾聴の姿勢と適切な知識の組み合わせで相手の信頼を得たうえで、その地元特有の事柄にも気を配った対応をすることが重要だと考えています。（広聴・広報、2年）
	技術者は限りなく、多くの知見・知識を得る努力をする一方、絶対の安全技術（限りなくゼロリスクに近いものも含め）はなく、過信してはならないこと、それを認識する必要がある。そして、地元との対話で得られた意見を受け止めながらも、理解活動を地道に取り組むことが求められる。 過去事例から見ると、大規模インフラ整備の際、技術＜人間性（また倫理性（また経済性など））が求められているように思う。（工学技術、1年）
	説得するのではなく、相手の気持ちに寄り添い対応すること。正確な情報を提供することを意識して、不確かな情報を出すのではなく、あいまいな点があれば一度持ち帰って確認すること。技術的な背景のない人でも理解できるように専門用語を使用せずとも十分な説明ができるような技量を身に着けること。（その他、7年）
	地域の方が何を不安に感じているかを考えながら対話すること （地質環境、7年）
	相手の方の質問の意図を汲んで、対話を重ねるなど真摯に対応することが重要と思います。（工学技術、7年）
	対話集会に参加したら、地元の方々の質問に丁寧に答えることが重要だと思います。また、その地元の社会・経済がどのように動いているのかを把握することは、その地元の地域振興、産業振興を検討する上で、重要になってくるのではないかと思います。（その他、8年）
	コミュニケーションは勝負ではなく同じ土俵の真ん中に戻すまでのことであり、あくまで対等であることが重要。 技術や科学的な根拠を並べて高圧的になるのではなく、逆にへりくだりすぎることなく、対等な立場であるスタンスで対話を続けることが重要ではないか。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	これまでは反対派の意見の不整合をあぶりだして論破するくらい強く反論するような対応が足りていないと強く感じていましたが、自らのやり方が正しいということを押し付けてはいけない、というのはそのような今までの考えと全く違っていました。自らの姿勢が地元の人に信頼を得ることが重要だと思います。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	対話の前に相手と自分の関係や相手がどんな考えを持っていそうか準備して臨むのが重要であると考える。対話の中でのとっさの立ち回りは難しいのであらかじめ準備をしておくことが落ち着いた対話につながると思う。（安全評価、1年）
	何が心配で質問されているかなど、より深く相手の考えを理解しながら話すことが重要と思いました。（安全評価、9年）
	・対話において、傾聴する姿勢と、その手法を身に着けること。 ・地元住民の言いたい事、聞きたいことを引き出すこと。（広聴・広報、1年）
	嘘をつかないこと、隠し事をしないこと、対等な立場で話すこと、説明と対話を分けてお話しすること。 様々な制約で情報を守秘する必要がある場合があると思いますが、そうした情報に興味が向かないようにするのも、説明者の重要なスキルだと思います。（"守秘義務があってお話しできません"とお話しされる方がおられますが、聞いている側からすると、何が機密情報なのかはわからないため、不都合なことはすべて隠していると捉えられ、不信につながると思います）（安全評価、2年）
	講演者から住民への一方通行にならないこと。質問があった場合はその意図を理解し丁寧に対応する。（地質環境、9年）
	反対のひとや慎重な意見のひとに対しても真摯に反応して、対話していくことがたいせつであると感じた。（工学技術、1年）
	・安全性をつたえること ・万が一のことが発生したときに、情報提供と行動計画ができていること。自治体における地域防災計画への追加等も必要ではないかと思いました。 ・閉塞後はモニタリングをしないということについて、私が地元の人間だとすると、不安な感じがしました。技術的に大丈夫だったとしても、不安を解消するためのとりくみ（モニタリング等）は必要ではないかと思いました。（地質環境、10年/その他、20年）
	「丁寧な対話（一方的な回答ではなく親切な解説？）」や「傾聴」の重要性を認識する一方、現実的に大量の放射性廃棄物が存在しており、何らかの手法で処分すべく技術者側が専門知識に基づき強く主張するべき場面が出てきたときに、どこまで地元や市民に寄り添うかというバランス 感覚も重要になるかもしれないと思いました。（工学技術、1）
	地元の方の問題意識を理解し共有すること、声を上げない聴衆の目を意識すること、だと思います。 非常に難しいですが、地元の方の問題意識を知り・考えることで、合意できる点、できない点をスムーズに明確化でき、 それがより良い合意形成や相互理解につながりやすいのかなと思います。 また、聴衆の目を意識して、誠実な態度を心がけることが、話者の説得力に寄与すると思います。（工学技術、2年）
	事実と解釈を明確に区分して対話し、それを相手にもしてもらうこと。（地質環境、3年）
	若い世代ために，地層処分の必要性を強調するのはいかがでしょうか．（工学技術、17年）
	住人側に「この人は，私の意見をきちんと聞いている」，「地元住民の意志を無下にしない」という認識を持ってもらうこと．（工学技術、1）
	先生がおっしゃられた傾聴は非常に大事と感じました．これは一方的な説明にならず，住民参加型の説明会にすることと似ていると思いましたので，このような話し方を日ごろから心掛けたいと思います．（工学技術、2年）
	コミュニケーターの国語力，コミュニケーション能力，地域住民の真意を把握するために必要． 心の広さ，相手からのケンカを買わない．（地質環境、5年）
	まず必要なのは、専門家と一般の人が同じ土俵に立つことが重要だと考えます。議論をする際に、まずは、だれでも手に入る資料で説明をするべきと思います。なぜなら、一般の人が手に入らない資料から話をしても、結果が本当に合っているかどうか信じることは難しいからです。まずは、共通の資料から、議論を交わしていき、その後、独自の調査で得られた結果を元に話を進めていくべきだと考えます。（地質環境、3年）
	先生がおっしゃるように「真摯に対応すること」だと思う。相手の意図が汲み取れるよう傾聴し、分かりやすい説明を心がけることが大事であると感じた。（地質環境、2年）
	一般の人の素朴な疑問に対し、まずは「傾聴」し、それから科学的な事実をベースとして分かりやすく丁寧な説明を心掛けることだと思います。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	継続することが重要だと思います。（地質環境、3年）
	・地層処分の事業主体（の担当者は）地元の敵ではなく、地元の一人一人の味方であり、あなたの為に何が出来るかを考えていると思わせること。 ・可否を判断する人間（市議など）に科学的知識が無さすぎるので、もっと基礎的な段階から勉強会を開くなど。（工学技術、3年）
	意見に真摯に耳を傾け、対話する相手（地元の方）の真意を汲み取ることに努める。一方的な情報の提供にならないようにする。すなわち、安全と言うための根拠を列挙する話し方は良くないと感じた。相手の意見に歩み寄るには、事実に基づいた上で利点と欠点とを平等に述べることが有用と考えた。（安全評価、6年）
	・対話に先立ち，地元に関する理解を深めること．（特徴，風土，経済状況，抱えている悩み，他と比べて特殊な点，など） ・説明する側の謙虚な姿勢．専門家ではあっても自分の知っていることがすべてとは限らず，例えば，その土地のことは住民が一番の専門家である．（工学技術、20年/安全評価、20年）
	コミュニケーション理論を身に着けること レベルの高い研究をすること（論文や著書）（地質環境、30年）
	聞かれたことにはしっかりと答えることが大事だと思います。 グループワークで出たNUMOのQ＆Aのほとんどは、問いに対する答えになっていないように感じました。（地質環境、1年）
	誠実な対応、互いの考え方の共有。それを踏まえた気遣い。（地質環境、2年/安全評価、1年）

大項目②-3：1月9日（2日目）の演習「サイトのモデリング」について	
質問項目	**意見・要望等**
演習の難易度はどうでしたか。難しかった点を具体的に教えてください。	目次には、サイトモデリング（概念モデル⇒SDM⇒工学設計⇒性能評価⇒安全評価）と書かれていましたが、内容と大きく離れており、評価できません。地層科学研究所の講演者は概念モデルとSDMの定義すら誤解していましたし、地質構造モデルについても単純に幾何学的な方法で作成すると説明されていました。講義を素人同然の人間に任せたことは参加者の不満を買うと思います。また質疑ではデータの帰属について問題点を指摘されてしまいました。今後の影響が心配です。（地質環境、25年）
	①事前に議論はあったが、やはり全員を対象としてやるべき内容ではなかった。対象を絞って内容を濃くした方が効果的な内容となろう。 ②資料に資料の出典が示されていないものが多数ある点は看過できない問題である。国の事業の報告書からの引用であることを明示すべきものである。ケアレスミスとは言えず、技術者倫理の問題と見做した。差し替えが必要なレベル。内容以前の問題であり、不愉快である。 ③可能な範囲で、事務局には事前・事後のチェックをお願いしたい。 （地質環境、26年）
	時間的な制約もあり、ただ手を動かすだけになってしまってしまい、十分に理解して作業ができていたわけではなかった。（工学技術、5年）
	今回の実習作業自体は特に難しいとは思わなかった。一連の流れ作業の一例を知るという点においては、意味のある実習であった。ただし、内容に対して、時間が十分ではなかったので、地質環境モデルの作成にあったっての留意点（実際に行う際の難しところ）は、十分には伝わらなかった。（安全評価、25年）
	特に難しくなかった。どのようにして地質モデルが作成されているか分かった。隆起・侵食の内容はわかりやすく、実際に侵食量から安全性を見積もるということを体験できてよかった。 ただし、地質モデルの作成に関しては、初めて地質図を描く人にとって、誤解生む表現があった。地質モデルを3Dで見るのは、PCのスペックが高くないとフリーズしたりするものだったので、そういう人にとってはあまり有用な時間にならなかった気がする。興味がある人はダウンロードできるようにしてもらい、実演を見てもらうというのでよかった気もする。 （地質環境、1年）
	易しい。私は地質環境分野を専門としているので，地質図の基礎などは身についている。 ちなみに，今回のセミナーで交流のあった方で，地質環境分野になじみのない方は，「基礎的なことを理解できた」と嬉しそうでおられた。（地質環境、1年）
	地質図の読み方が分からない方にとっては難しすぎたのではないかと感じました。　（地質環境、18年）
	難易度は高くなかったが、時間が少なかったため、実際に作業できる時間がほとんど取れなかった。（地質環境、10年）
	（難易度というより感想を書きます）演習と言いながら講義が半分以上で、効果が薄いように感じた。参加者の中で、「最近地質図を作ったことがない人が入社するようになり、その教育から始めないといけない」というような立ち話をしていたのも耳にしたことから、人材育成の観点からは実際に手を動かす演習の機会を多く設ける方がよいと思う。講義やグループワークを少なくし、半日～一日くらいを演習に費やしてもよいのでは。地層境界線を引いてからモデルを構築するまでのところをこそ重点的にやりたかった（経験が必要だということは承知だが、地質の専門家がどういう視点で見ているかの一端でも感じられたらよかった）が、さらっと終わってしまった。（地質環境、4年）
	難しく感じました。知識を持たない専門外の者には，演習問題が解けなかっただけでなく，どこに原因があって解けなかったのかもつかめませんでした…。（安全評価、20年）
	地質や地質環境に関する前提知識が不足していたため、地質図を使った演習の難易度が高く感じられた。また、演習全体の時間が短く、さらにその中で説明の時間と実際の手を動かした作業の時間のバランスが悪く、最終的に丸井先生の演習の時間も無くなってしまったため個人的にはもったいないと感じた。（工学技術、2年）
	演習課題の内容自体は易しかったと思いますが，ダウンロードファイルの名前が文字化けしていたため，どのファイルを指しているのかといった基本的なスタートが遅れたので，ついていくのに時間がかかりました。（安全評価、1年）
	とくに難しい点はなかった。（地質環境、17年）
	作業自体は簡単だったが、それをもとに考えるのは難しかった。何に注目したらいいのか、どういう風に考えたらいいのかがわからなかった。 （演習資料のソフトは個人個人ダウンロードするほどでもなかったような気がする。また、持ってくるPCのOSの指定やPCを使って何をするのか事前に教えておいて欲しかった。）（工学技術、3年）
	手順は理解したが、表示されている図が何を示しているのかよく理解できなかった。（広聴・広報、5年）
	・何をやろうとしているのかわからずに混乱したので、最初に説明があるとよいと感じた ・PCの操作説明があまりなく、活かせていなかった ・解説していただいた水色の地層を読み解くような部分がもう少し深めてほしいところであった　（工学技術、10年/安全評価、5年）
	先ず前提としてPCにダウンロード出来なかったり、スムーズに操作ができずフラストレーションが溜りました。 今、何をやっているのかついていくのが難しく理解が進まなかった。（広聴・広報、4年）
	・専門用語が出てきた時点で理解が難しい。 ・専門用語の説明を口頭でされても一瞬で理解できるわけではないので説明が難しい。（工学技術、7年）
	演習自体についてではありませんが、ソフトが3回目でやっとインストールできたので、上手くインストール出来ていればデスクトップにアイコンが出てくることを先に教えていただけるとありがたかったです。（広聴・広報、2年）
	PC演習作業で扱われた三次元モデルデータの認識はもてたものの、扱い方は短時間の中で難しいと感じた。（工学技術、1年）
	システムをダウンロードすることはできたが、システムが持参したパソコンではうまく動作せず、結局はあまりシステムを使うことができなかった。初めて触るシステムであるため、一度説明から遅れてしまうと後から追いつくことがかなり困難になってしまった。もう少し簡略化したものや、やるべき内容を紙に記すなどすればよかったのではないかと感じた。（その他、7年）
	地形や地層のでき方，時代等を絡めた演習内容であれば面白かったと思う　（地質環境、7年）
	演習内容についての難易度は適切だったと思います。（工学技術、7年）
	慣れていない作業だったので、演習において自分で作業するときの時間が短すぎたという印象です。演習についても、配布資料を事前に頂けていれば、内容がもう少し円滑に理解・吸収できていたのではないかと思います。（その他、8年）
	インストールまでをどうにかできれば、演習そのものは出来上がったものを見るだけといっても同義でしたので簡単でした。 手書きのワークを行う時間をもう少し確保できればよかったかなと思います。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	地質図に記載してある以上のものを読み取って想像することはなかなか難しいと思いました。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	境界線を予想して書くことができず、難しかった。（安全評価、1年）
	難易度は取り組みやすく工夫されていたのでちょうどよかったと思います。演習に取り組む時間が短かくなってしまった場合もあったので、今後、配慮いただけるとよいと思います。（安全評価、9年）
	地質構造のソフトの扱いが難しく、フォローできなかった。慣れていない人にとっては、より多くの時間を割かないとう難しいと思うので、地質構造の解釈をするのであれば、内容の難易度とかける時間との兼ね合いとを考えたほうが良いと感じた。今回は時間が足りなかったが、丸井先生の推理地質構造の解釈についても、同様かと思う。（広聴・広報、1年）
	時間が足りず、ほとんどが操作をまねするだけで終わってしまいました。 もう少し時間を延ばすか、内容を減らしたほうが良いかと思います。（安全評価、2年）
	難しくはなかったが時間が足りなかった。 非専門家に対してもう少し丁寧な説明が欲しかった。（地質環境、9年）
	難易度は普通だったが、あまり時間が取れなかったのか、演習の時間が短かった。演習をするにしても時間はもう少し必要だと思います。また補助するひとも講師のほかに何人か追加で必要だと感じた。（工学技術、1年）
	わかりやすかった。ビューアで実際のデータを3次元可視化して見ることができたのが良かったと思います。（地質環境、10年/その他、20年）
	ある程度のヒントは与えて頂いていたので演習課題としての難しさは感じなかったが，実際に一から取り組む場合は THMC をどのように取り込むか がかなり難しそうだと感じた。（工学技術、1）
	丁度よかったと思います。 難しかった点ではないですが、解答例が複数あればよかった、もしくは試行錯誤の部分を詳しく知りたかったかなと思います。（工学技術、2年）
	パソコンのメモリ不足により、操作が難しかった。（地質環境、3年）
	知識があまりない。確かに疲れましたので，あまりfollowできなかった。（工学技術、17年）
	データをプロットするだけだと，簡単でした．（工学技術、1）
	かなり難しいご感じた．地質環境について，基礎的なところから勉強していないため，イメージを浮かべることができなかったです．また，せっかく演習を用意していただけたのに，地層処分の技術の中でも地質技術に限ったところで演習したことが残念でした．異分野の方が集まっているので，演習を実施するのであれば，地層処分に関して，3分野の方の知識を多く学べるプログラムの方が学生にはありがたいと感じました．（工学技術、2年）
	難しいとは思わなかった。特にソフトウェアについては、よく準備されていると感じた。（地質環境、2年）
	Geo-graphia を使った演習は分かりやすくて良かったが、アプリのダウンロードとインストールが大変だった。また、天野さんの講義の後半部分が専門的過ぎて難しいと感じた。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	パソコンで操作できませんでした。（地質環境、3年）
	・地質屋ではない方がこれをいきなりやっても、何が何やら情報量が多すぎて訳が分かりませんでした ・あと、ソフトがまともに動かないので演習のしようもありませんでした。（工学技術、3年）
	アプリケーションがMACに対応していなかったため行えなかった。（安全評価、6年）
	・パソコンのスペック的にハードルが高いものだった．要求スペックを事前に連絡して頂く，パソコンを会場で用意しておく，などが必要と思われる． ・ソフトウェアを実際に触って解析結果を閲覧できるのは興味深かった． ・難易度としては問題ない．（工学技術、20年/安全評価、20年）
	専門用語の解説が必要 理論や課題が設定されている経緯の説明。（地質環境、30年）
	事前説明がされていたので難度としては易しかったと思う。もう少し実際の研究者、技術者が行っている解析方法を具体的に紹介してほしかった。（地質環境、2年/安全評価、1年）

質問項目	意見・要望等
ご自身の研究テーマは、今回の演習で実施した内容とどのようにかかわっていると思いますか。	（自身の研究テーマはこの一部、当方にとってはこの質問は対象外。）（地質環境、25年）
	主に人工バリアを対象とした研究を実施しているが、天然バリアとの相互作用を考えた時に、今回の演習内容は活用できる。（工学技術、5年）
	直接的に係ることは無いが、地質環境モデル作成に至る手順等の背景に係る知識が実際の感覚通じて習得することができ、今後の分野横断的な議論や一般公衆への説明において役に立つものと考える。（安全評価、25年）
	サンプリング調査を行う機会がある分野なので、サンプリング箇所決定する前に地質モデルなどでその地域の確認ができるかもしれない。（地質環境、1年）
	自身の研究テーマは，地質環境モデル（SDM）の基礎データ及び地下環境の詳細な解明に資するものである。（地質環境、1年）
	将来の地質環境を予測・評価する際に関係します。（地質環境、18年）
	直接的な関わりはないが、地質モデル等がどのような作業を経て作成されているかについて、知見を深められた。（地質環境、10年）
	資源エネルギー庁からの委託事業の中で地下水流動解析を行うにあたり、地質モデルの構築を行う必要がある（現状、実際に作業しているわけではない）。（地質環境、4年）
	地質は地下水組成を決めますので無関係だとは思いませんが，かなり遠い存在だと思いました。（安全評価、20年）
	現在の研究テーマは工学技術に属しているが、地層処分ということで地下深部を対象に実施するものであり地質環境の内容はどうしても切り離せないと思っている。 （工学技術、2年）
	どうやって地質環境モデルができてきたのかの過程がわかったので，SDMを使った地下水流動解析において不確実性の根拠等が少しわかったような気がします。（安全評価、1年）
	地下水モデル作成のための基礎情報　（地質環境、17年）
	自分の研究テーマは演習の内容とは関係ないと思う。（工学技術、3年）
	特に深くかかわってはいない。（広聴・広報、5年）
	地質情報を読み解くことの技術は残されている不確実性を理解するためにも事業者として重要な技術（工学技術、10年/安全評価、5年）
	モデリングの方法を知ることで説明時に有効だとは思うが、何せついていけなかったのでよくわからない。評価できないというのが正直な感想です。（広聴・広報、4年）
	「建設・操業技術」の技術的裏付けとなる検討業務
	環境影響評価とその保全策 過去の事例から学ぶところからはじめ、今現在保全策（大気・水・生態系・景観など）を実施している現場に出向き、紙面では得られない知識を学ぶことで、将来、処分事業を実施するうえでの環境保全策の具体的なイメージをつかみたい。（工学技術、7年）
	（研究テーマなし）対話活動の場での説明や今後の文献調査内容の理解において、知識面で役に立つと思います。（広聴・広報、2年）
	建設・操業に関わる最適化の仕事を行っており、すべての条件や仕様を幅広く知る必要がある。 沿岸海底下・沿岸部の調査技術や手法、断層等成り立ちを学ぶことはいずれも繋がると考える。（工学技術、1年）
	今回のようなシステムは簡略化して、だれでも使うことができるようになれば、説明会などで一般の方々に地下の環境について理解してもらうための一助になるのではないかと感じた。（その他、7年）
	研究の基礎となる内容だったと思う（地質環境、7年）
	研究テーマは、今回の実習内容（地質調査とそれに基づく概念モデルおよび詳細モデルの構築など）と、全般的に関わっていると思います。（工学技術、7年）
	私の業務はスイスのサイト選定プロセスを調査することです。スイスにおいて、実施主体が地質環境に基づいて地質学的候補エリアを提案するプロセスを把握する上で、日本とスイスの比較という意味で、今回の演習が多少役立つという印象を持ちました。（その他、8年）
	分野連携でSDM作成の際の理解の向上。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	地質環境のデータから3次元のSDMが作成される。それらを安全評価や設計におけるパラメータや境界条件として使うという点で少なからず関わりがあるものである。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	私の研究テーマは処分場の環境から受ける影響を考慮する必要があり、実際にサイトモデリングされた結果が特に関りを持ってくると考えられる。今回の演習から、その結果も考察に基づいて導かれたものであることがわかった。（安全評価、1年）
	自身の分野のテーマからは他分野の演習であったので、今後、分野間の連携をするために、他分野の内容について理解を深めるのに役に立ちました。（安全評価、9年）
	自身の直接の業務ではないが、SDMは安全性確保のベースになるものだと考えているので、考え方、手法を知っておくことは必要だと感じている。（広聴・広報、1年）
	地下水流動・地下水水質はその周辺を構成する地質にも大きく依存するので、役立つと思います。（安全評価、2年）
	GeoGraphiaでの演習で3Dモデル中に様々なデータを追加していたので、自分でモデリングを行う際にも工夫して色々な形でデータを追加し利用したい。（地質環境、9年）
	地質環境モデルを作成したものに関して、解析を行う上で必要なデータであることから、どういった意図で作成したのかを知ることができた。（工学技術、1年）
	弊社が得意とする地表面の流出解析を地下にも連携させることができないかと考えました。（地質環境、10年/その他、20年）
	人工バリアの研究に携わっているため、水理構造や化学的特性を読み解き、周辺の透水係数や pH を踏まえどの程度の性能が要求されるか判 断するスキルを身につける必要があるのかもしれないと感じた。 （工学技術、1）
	私は地質モデルを使って設計検討を行う立場ですので、 地質モデルからより多くの情報を読み取り、検討に活かすことがよりよい成果を出すために必要になります。 今回の演習でモデル化を行う方の考え方の一端を理解でき、地質モデルから読み取り活用できる情報が増やすことができる、という点で関わりがあるかと思います。（工学技術、2年）
	概要調査段階などでの地質モデル作成。（地質環境、3年）
	具体的にまだ考えられておりません．（工学技術、17年）
	自身の研究課題であるベントナイト系緩衝材がどこに設置されるのか，このように選定されるのかと知ることが出来た．（工学技術、1）
	私は，ベントナイト系緩衝材について工学的に研究をしているので，サイト選定にあたって地質環境に対した研究をより進めていく必要があると感じました．研究を進めていくうえで，ベントナイトの変質や性質等を深くのめりこんでしまうことが多々あるが，実際に地層処分を実施するということを考えれば，大学機関等でも，更にサイト選定の条件などを学んだ上で試験を進める必要があると感じました．（工学技術、2年）
	地質モデルを基に地下水流動モデルを作成するため、密接に関わっていると思う。地質モデルがどういった過程で作られるか不明瞭だったので、勉強になった。（地質環境、2年）
	私の研究分野が人工バリアと安全評価（主にニアフィールドまで）なので直接的な関わりはないが、広域スケールの地質環境についてのイメージを持って研究に取り組むことができるようになったと思います。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	ぜひ活用したいと思います。（地質環境、3年）
	サイトのように広い範囲について適用はしていないが、水の浸透率（透水係数ではなく）が空間的に分布する系において、その分布の持つ統計量が物質移行挙動へ及ぼす影響を数値計算により検討しています。 そのため、私の対象としている比較的ミクロな系ですが、地下水の流れとそれに伴う物質移行挙動を知ろうとする点において相似性があると考える。（安全評価、6年）
	・地下における核種移行を考えるに当たっては，地下環境を外挿なども含めて図示できることは非常に有意義と考える．（工学技術、20年/安全評価、20年）
	コミュニケーション理論（地質環境、30年）
	直接的な関わりはないが、モデルを作成するという事については共通すると思います。（地質環境、1年）
	地質、岩種、構成鉱物など。（地質環境、2年/安全評価、1年）

質問項目	意見・要望等
この分野についてさらに深く(詳細に)学んでみたいと思いますか。また、学びたい場合には、具体的にどのような点を学んでみたいですか。	今回のような実習でしたら不要だと思うので、夜はもう少し早く終わる方が良いと思います(グループワークは個人的には楽しかったのですが、やはり21時過ぎになるのは遅すぎだと思います)。(地質環境、25年)
	(自分自身も含めてOJTで実施中なので、当方にとってはこの質問は対象外。) (地質環境、25年)
	サイトのモデリングから数値解析に至るところの技術を具体的に学びたい。 (工学技術、5年)
	SDMがどのように設計や安全評価に活用されるのかの具体例 (安全評価、25年)
	地下水解析における使い方、TMHCの情報を追加した詳細モデルをどのように使うのかがいまいちわからなかったので、有用性を学びたい。(地質環境、1年)
	既に実施中。 (地質環境、1年)
	調査によって得られるデータから、どのように将来を予測・評価するのか？ (地質環境、18年)
	地質モデル限らず、他のモデルについても実習等により具体的な構築手法の知見を深めたいと感じた。 (地質環境、10年)
	学んでみたいというよりは、必要に駆られてOJTで身につけるものと思う。その意味では、今回のような演習は「とりあえずやって経験してみた」という観点からは重要だが、業務で使えるようになるまでには隔たりがあると思う(実際、講師の方のお話から、実際に地質モデルを作成するには専門家としての視点の熟成が必要であるように感じた)。(地質環境、4年)
	余裕があればもう少し取り組んでみたいとは思いますが，現状では難しそうです…。 (安全評価、20年)
	演習はやや消化不良であったことは事実であるが、さらに詳細に学んでみたいと思った。SDMをどのように作っているのか、データの提供のためにどのような作業が必要であるか、データがどのくらいの確度で提供されるかを学ぶことで工学技術の側から欲しいデータとのミスマッチが少なくなるようにしたいと思う。 (工学技術、2年)
	分野がだいぶ異なるので，理解はしたいと思いますが，専門性を必要とするため深く学びたいとは思いませんでした。専門家がどうやって地質構造モデルを構築するのかを理解するために，基礎知識は必要であると思いました。 (安全評価、1年)
	とくに学ぶ必要はない。むしろ、深い部分については地質の専門家に任せるべきである。それよりも、今回、若手二人がモデルソフトを使って、容易に地質構造モデルを作成してしまったことで、地質構造モデルは地質に関するちょっとした知識があれば簡単にできてしまうんだと、専門外の人に誤った印象を与えてしまったような気がしている。講師が地質の講義で話していたが、地質図や反射断面など人の解釈が入ったニ次データ(演習では1次データと定義されていたが・・・)を使って答えを導くことは危険である。それを否定するような内容になっていたので心配している。 (地質環境、17年)
	思わない。興味が持てない。(工学技術、3年)
	このシステムを活用して得られた成果などを学びたい。(広聴・広報、5年)
	今回のような短時間ではなく、しっかり時間をとって、事前に予習をして臨みたい (工学技術、10年/安全評価、5年)
	モデリングの方法を知ることで説明時に有効だとは思うが、何せついていけなかったのでよくわからない。評価できないというのが正直な感想です。(広聴・広報、4年)
	地質図から地質環境モデルを作成する際に、どのような視点で地層の境界線を推定するのかをもう少し詳しく知りたいと思っています。(広聴・広報、2年)
	サイト(沿岸部～沿岸海底下、山岳部など)のモデリング調査手法の概要(時間スケール、精度、費用)について、学んでみたい。(工学技術、1年)
	システム自体はよいものだと思うので、もう少し動作が軽くて、簡単なものがあればできるだけ色々な事をやってみて、地下の環境について感覚をつかみたいと思った。これを使って一般の方々に地層処分の安全性をどのように理解してもらうかということについて考えたいと感じた。(その他、7年)
	サイト選定するうえで必要となる技術・評価手法等について，幅広く，深く学びたい (地質環境、7年)
	さらに深く学びたいと思います。具体的には、地質図の読み方、地質図から三次元地質モデルの作成、沿岸域の隆起・沈降のメカニズムなどです。(工学技術、7年)
	来年もう一度同じ内容で簡単に講義をして、演習をするのもいいかと思います。また、非常に素人の意見・質問ですが、サイトのモデリングに関連して、何らかの天然資源の存在する場所と存在しない場所の境界線をなぞることを題材にした演習は可能なのでしょうか。(その他、8年)
	工学、評価の観点を主体にジェネラリストを目指すという意味では、今回くらいのレベル感で丁度よいかと思います。(工学技術、1年/安全評価、4年)
	さらに深くは必要ないと思います。講師が言ってたように餅屋は餅屋に任せろ、でないでしょうか。ただ、この講義の内容程度は連携のためにもしっかり理解したいです。(地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年)
	学んでみたい。どのような手順で研究を進めているのかを学んでみたい。(安全評価、1年)
	地形と地下水の流動の関連について学んでみたいと思います。(安全評価、9年)
	机上の情報からどのようにモデルを構築していくのかについて、より時間をかけて実践的に学ぶ機会があるとよい。(実際のフィールドワークは時間的にも難しいと思うので、地質、水理情報等の生データー式を用いた実践) (広聴・広報、1年)
	モデリングする人・構成モデル・使用データの違いでどれぐらいの差が出てくるのかを知りたいです。(安全評価、2年)
	隆起量の推定では平面補間で良いのか、また他の補間法は使えないのか考えてみたい。(地質環境、9年)
	地質環境モデルをもう少し詳しく知れれば、今後の解析等の技術に使うことができると思うので、詳しく知れればと思います。(工学技術、1年)
	弊社が得意とする地表面の流出解析を地下にも連携させることができないかと考えました。地表施設が洪水などにより被災するリスクの評価に活用できないか考えたいと思います。(地質環境、10年/その他、20年)
	地質図を読み込んだ経験値に基づくセンスが要求されるのではないかという第一印象を抱いたので、すでに専門的に取り組まれている方にお任せ したいと思います・・・・・。(工学技術、1)
	・地質モデルから読み取れること。 ・元となった地質断面図との見比べ方 ・モデル化をする方々が悩むところ、全く悩まないところ。(工学技術、2年)
	・地質環境の長期変遷 ・国民の理解と関心の向上方法 (地質環境、3年)
	いええ．他分野の深い勉強は，なかなか時間が取れませんので、必要に応じて，専門分野の方とコラボすることは検討したいです．(工学技術、17年)
	他分野の研究者は，概要だけ知ることが出来れば良いと思います．あとは，その道の専門家が深く追求してくれると思います．(工学技術、1)
	この分野に関しては，全く知識がないと感じたので，深く学ぶ前に用語や背景など基礎的な部分の習得をすることが必須であると感じました．今後，建設会社に進んだ際には，地質学という理学的な学問から実際にものを造る工学的観点にいかに落とし込むことができるか考えていく必要があると思います．そのため，サイト選定に携わる地質学の方々と議論ができるように最低限の知識を学んでいきたいと思います．(工学技術、2年)
	詳細に学びたいとは思わない。電中研の幡谷さんも仰っていたが、線を一本引くのにも理由や経験が必要であるため、実務レベルの作業となると専門家に頼んだ方が良いと思う。(地質環境、2年)
	野外調査に同行してデータ取得やサンプリングを行い、持ち帰ったサンプルを分析調査してみたいと思った。(工学技術、2年/安全評価、7年)
	全般。(地質環境、3年)
	・概念モデル作成については興味深いところがありました。 結局人間の想像力が多分に含まれるモデルであるところが難しい。(工学技術、3年)
	サイトのように広い範囲について適用はしていないが、水の浸透率(透水係数ではなく)が空間的に分布する系において、その分布の持つ統計量が物質移行挙動へ及ぼす影響を数値計算により検討しています。そのため、私の対象としている比較的ミクロな系ですが、地下水の流れとそれに伴う物質移行挙動を知ろうとする点において相似性があると考える。(安全評価、6年)
	・演習の冒頭に紹介されたコミュニケーションに関する話題についても，より学んでみたい．グループワーク前に紹介頂いても良かったのでは． ・本分野について深く学ぶというよりは，それほど詳しくない人でもツールとして使い回せるようになると良いと思う．(工学技術、20年/安全評価、20年)
	時間軸を踏まえた性能評価技術を学びたい。(地質環境、30年)
	モデル作成や、それを利用した解析など、一通りはできるようになりたいと思いますが、特に突き詰めて研究したいとは思いませんでした。(地質環境、1年)
	地質調査は地学に関する研究者にとって非常に基本的な手法の一つだと思う。その具体的な手法を覚え、実践の経験を増やすことができると今後の自分の力になると思う。(地質環境、2年/安全評価、1年)

大項目②-4：1月9日（2日目）のグループワークについて	
質問項目	意見・要望等
グループワークを実施して気付いた点、今後の展望などありましたら教えてください。	若い方々と話し合い、自分の至らなさがわかりました。非常に大切な時間でした。（地質環境、25年）
	様々な立場の人たちが議論することで、いろいろな意見を聞くことができてよかった。（工学技術、5年）
	比較的属性が近いと思われる受講者（グループメンバー）でも、考え方や意見に相違があることを再認識した。（安全評価、25年）
	ボールを持って話すというのは、割り込んだりすぐに否定しないようにするためには有用であるが、話の進みが遅くなったり、今回は途中から使われていないということが多々あった。 知識の差があったので、共通資料がある、もしくは講義での資料を使う内容だと議論しやすかった。（地質環境、1年）
	グループ内の議論はもちろん，グループ間の情報交換をより多く行いたいと思った。（専門分野は違えど）地層処分に関わる方々が集っている本セミナーにおいて，小グループごとの意見の微妙な違いがあり，「そのような考え方もあるのだな」と思う場面が多々あった。（地質環境、1年）
	あえて難しい質問への回答を考えさせることは、参加者のコミュニケーションスキルを向上させる上で有効だったと思います。　（地質環境、18年）
	グループワークの時間を日中（夕方前）にしたほうが良いと感じた。また、FAQについては、作成するところまでで終了したが、作成した回答に基づき、他のグループとの質疑応答をやってもよいかと感じた（その場合、想定更問などを準備する必要があるが・・・）　（地質環境、10年）
	対話により議論が多かれ少なかれ進む。傾聴を意識せず事実のみに基づいてコミュニケーションするよりも良い結果になりやすい。　（地質環境、4年）
	グループワークの内容も大変勉強になることは当然のことながら、他の参加者とのコミュニケーションを図るうえでよいものだったと思う。ただ、プログラム全体としてみると講義と演習、グループワークのバランスがあまりよくないと感じており、詰め込みすぎで消化不良な部分もあったかと思う。　（工学技術、2年）
	グループ内で話し合って，ひとつの答えを出す形式は，様々な意見を聞いて，取りまとめるという話し合いの過程でグループ内の連帯が生まれたので良かったと思います。 ただ，質問が三つもあるとどうしても間延びしてしまうので，ひとつあるいは二つが量として適当ではないかと思いました。　（安全評価、1年）
	専門が異なる人材が同じ課題についてどのような回答を出すのか、しっかりと確認することができてよかった。一方で、ファシリテーターの実力もグループワークの成功に大きな影響を与えることから、ファシリテーターについての人選もグループワークの中に取り入れた方がよいと思う。　（地質環境、17年）
	メンバーのエネルギーの差がかなりあったと思う。1日目はアルコールもあったためか盛り上がっていたが、今回は他のグループよりも盛り上がっていなかったと感じた（疲労が原因かもしれないが）。また、ファシリテーター(?)の方がイマイチ場をコントロールできていなかったように感じた。本業ではないのであまり求めてもいけないのかもしれないが、もう少しうまく立ち回ってほしかった。 事前に簡単な性格診断（エニアグラムとか）をやってもらってグループ分けしたら面白いかもしれない。毎日グループを変えるのもありだと思う。 （工学技術、3年）
	・特別講演を実践するグループワークという流れ・関連性はあまりなかったように思う ・コミュニケーションの技術の理解と実習をしっかり行ったほうが良いかもしれないと感じた（工学技術、10年/安全評価、5年）
	方向性は有効で意義のあるものだと思うが、QAは2問程度にし、QA自体も少し種類を絞った方が良かったのではないかと感じる。例えば1つは簡潔に回答できるQAで頭を慣らし（柔軟にし）、2つ目で少し時間をかけて考えてもらう。さらにQAを2～3種類くらいにして同じQに対する回答を何チームかで各々考え、結果を共有する時間も設ける。そうすると、チームごとに作成した回答が違うので「捉え方が人によって違う＝異文化コミュの重要性」がより理解できるのではないかと思った。（広聴・広報、4年）
	普段とは違う発想で質問を見ることができ、頭を切り替えて議論することができたことで、自身の物の見方が狭まっていたことを実感しました。今回の研修に限らず定期的にこのようなグループワークの機会があると、FAQの作成者側が意図していない視点や解釈を深く考えることが出来て業務の参考になると思います。（広聴・広報、2年）
	NUMOよく頂くご質問（Q＆A）に対し、文章で回答する場合、対話説明会で直接回答する場合、同じ質問に回答するとしても、異なる説明になることを再認識した。グループの特色は、人の組み合わせによってさまざまなカラーが出るわけだが、ファシリテーターや主張力を持つ方に引っ張られる傾向もあるため（グループワークの議題が同調した回答になりやすい）、適正な判断力を持った方の重要性を理解した。（ファシリテーターは大役なのだと、知った。）一自身においても、専門性を高め、傾聴とまとめる力を高めていきたい。（工学技術、1年）
	グループワークの題材として、実際にあるものを使うと、それを知っている人の意見に偏ってしまうのではないかと感じた。それよりは答えがない問いに対して、どのように答えるかということの方が各グループの個性などが発揮され輪の出よいのではないかと感じた。また、各グループのファシリテータの力量にもかなり差があり、積極的にファシリテートし議論を回せる人とそうでない人がいた。ファシリテータが存在することで、他の人間が議論を回すことに消極的になっているように感じたため、能力のないファシリテータの場合、むしろ議論を停滞させる結果になる。（その他、7年）
	・気づいた点：まずは事実に基づくコミュニケーションの重要性をあらためて認識しました。 ・今後の展望：研究者・技術者として、事実の基となる数値の根拠の確からしさや信頼性を高めることを目指していきたいと思います。（工学技術、7年）
	今回、NUMOのFAQの質問への回答づくりを行って気付いたのは、まだまだ改善の余地があるということでした。事実に誤りがあると思いませんが、ある説明文の全体の文章の中での位置や、説明の内容などの見せ方によって、回答を受ける人の印象が大きく変わってくるという印象を持ちました。私のグループにはNUMOのFAQの作成に携わっている方がいたのですが、実際に携わった方の意見が聞けたのは非常に参考になりました。（その他、8年）
	QAのワークショップで強く思ったことですが、一つの問題に対し、分野の違う人が回答すると異なる回答やアプローチが出てくるのが面白かったです。 男女比、経験年数などが均等になるようにチーム分けされていたように思いますが、あえて偏らせて（初心者チーム、中堅チーム、玄人チームなど）出てくる答えの差を見るのも面白いのではないかと思いました。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	題材としてはよく練られており、この分野の初心者でも取り組める課題であると同時に、経験者でも長い時間熟考したり議論したりすることが必要な点は、グループワークの趣旨に合っていたと思う。 また、前日に講義を聞いた後すぐにこのようなグループワークの場で実践できる機会があったことで大きな相乗効果があったように思う。回答作成の際には、できるだけ質問者の意見に理解しつつ説明するという点を重視して取り組んでいた。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	質問者の立場や意図を考えるのは普段はなかなか余裕がなくてできないのでゆっくり取り組めるいい機会だと思う。また、質問を本当の意味で理解するにも必要だと考える。（安全評価、1年）
	テーマは、誰にも取り組みやすい内容で良かったと思います。1日の最後にグループワークを実施したため、講義の疲れでテーマに対する思考が十分にできなかった。そのような状況でグループワークをする意図はないようでしたら、今後、グループワークの時間帯は、1日のスケジュールの中でもう少し前の時間帯にあるとよろしいと思います。（安全評価、9年）
	実際の一般の方との対話では、地層処分に関して知識がない方との対話になることが想定されるが、今回のグループワークではメンバーが地層処分関係者であったこともあり、一般の方の立場で対話の仕方を考えることができたわけではないかもしれないが、考えるきっかけとしては非常に良かったと思う。対話活動の担当者以外にも、このようなことを考える機会くらいはあったほうがよい。（広聴・広報、1年）
	もう少し目的を明確にして実施すべきかと存じます。また、グループ毎の発表も発表だけでなく、それに対しての質疑や検討の時間もあったほうが良いと思います。（安全評価、2年）
	質問によっては皆同じような意見を持っていることもあったが、それでも議論することでさらに多くの意見が出て深い議論ができたので、ディスカッションの大切さを感じた。（地質環境、9年）
	自分自身も地層処分に関して経験が少ない中で答えを探すことが難しく感じた。また、答えが明確でないことに対して回答することは必要なこととだとは感じながらも人の意見を感じながら答えることは難しかった。（工学技術、1年）
	・対個人に回答する場合は、丁寧に深堀して回答する必要があると思いました。 ・インターネットに掲載するFAQ等の一般の人が参照するだけの回答については、多くを盛り込まず、質問に端的に答えることが適しているのではないかと思いました。（地質環境、10年/その他、20年）
	実際に対一般社会の広報業務に従事されている方がおり、その方の発言で初めから答えが出てしまってディスカッションに発展しない場面があった ように感じました。司会の方あるいはファシリテーターの方が、グループワークの狙いをはじめに強調して頂ければ、当人の自重そして一人ひとりの自 由な発言の増加につながると思いました。全体のルールとして、他人の発言を遮らないということ以外に、発言しすぎないというものもあってもよいかと 思いました。（工学技術、1）
	ほかの方の率直な意見を聴く、思いを巡らす、自分の考えをどう発信するか考える、という時間を持てた点が良かったかなと思います。 参加者のみなさんとの相互のやり取りを通して自分の考えをアウトプットすることで、伝え方の訓練や頭の整理ができたかと思います。 その他、気づいた点は以下です。 ・学ぶ機会の公平性の観点から、発言者のルールはやはり必要かなと思いました。 議論が白熱して、話すのが得意でない人が話辛そうにするという状況が散見されましたので そのような方も発言しやすくなるような工夫がもっとあれば、より良くなるかなと思います。 ・Q＆Aを考える、というテーマのグループワークでは、質問者の立場になった人が、その立場に徹しきれないという場面が多く見られました。 時間の制約を考えると、効率的にグループワークを進めるために、ディベートに対する慣れがある程度必要なのかなと思った一方で、慣れていない状態の人が慣れないことにチャレンジするということも研修の主旨を鑑みると重要なのだろうと思いました。（工学技術、2年）
	・基礎的な知識がないと、論点が明確にならないこと。（地質環境、3年）
	Numo様の標準回答に対して，皆様が何らかの形で，不満足と気がします． 標準回答が悪いではないが，会話の現場でそのまま使うのは，不十分ではないかと思いました．（工学技術、17年）
	グループワークの形式だと，各自の意見を出しやすい，かつ詳細に語ることができるので，良い取り組みと思います． 全員が黙ってしまった時間があったので，そこがもったいないと感じました．（工学技術、1）
	このグループワークを通じて，異文化の専門の方々が地層処分・原子力発電についての考え方や意識をお聞きすることができたのは，学生にとって非常に有意義でした．また，地層処分に対しては，研究を進めていく上で，学んだつもりになっていたが，もっと多くの知識や他分野の見解などを学習していないと国民の方に説明できないと感じました．更に学生が参加するには，最低限の学んでおくべき知識を事前に配布していただけると勉強してから臨めると思いました．（工学技術、2年）
	より地域住民に寄り添ったコミュニケーションが必要　（地質環境、5年）
	年齢や分野の違う方と交流することによって、自分では思いつかなかったことなどもあり、いい刺激を受けました。 今後もこのような交流を進めていけばよいと思いました。（地質環境、3年）
	質問者の質問内容の意図をくみ取ることが思ったより難しいと感じた。議論を通して出た意見は私が思いつかなかったものが多く、考え方や視野が広がった。これは研究結果の解釈にも生かしていきたいと思う。 今回のグループワークでは、質問内容に対して考える時間が十分あったが、実際は考える時間はほとんどないと予想される。質問内容に瞬発的に答えられるようにするには、北村先生もおっしゃったように実践して経験を積むことが重要だと身を持って感じた。 感想になるが、分野や立場を超えて議論できたことは非常に有意義であった。特に、他分野でマネージメントをされているような幹部職の方と意見を出し合い議論できる場は珍しいため、いい経験となった。（地質環境、2年）
	相手の話を否定せず、話を遮らないというところが重要だと気付きました。一般の人との技術コミュニケーションだけではなく、今後の仕事でのディスカッションにおいて役に立つと思います。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	それぞれの経験に基づいて意見があり，特にNUMO，JAEA殿の意見を聞けたのはよかったと思います。（地質環境、3年）
	もう少し極端な意見や、一見して「あり得ない」ようなアプローチなどを検討することが出来る時間やテーマもあると面白いと感じました。個々人の能力を見定める場ではなく、別の視点からの意見や、予期せぬアイディア、考え方が生まれるような仕組みがあっても良いと感じます。（工学技術、3年）
	数人のグループワークでも意見を完全に統一することは難しいと感じた。 また一日目のグループワークは、お酒を飲みながらである必要性を全く感じなかった。（安全評価、6年）
	・周囲が賑やかすぎて互いの声が聞きづらいことも多かったので，ある程度部屋を分けるなどの工夫があっても良いように思う． ・初対面の間柄で対話する際には，ファシリテーターの存在が効果的と感じた．（工学技術、20年/安全評価、20年）
	意識レベルの基礎を作る教科書的なものが必要 しっかりとしたコミュニケーターを要請する必要がある。（地質環境、30年）
	皆さんの質問に対する答えがしっかりと筋が通ってて、話の組み立て方などが参考になりました。 （地質環境、1年）
	年齢やこの分野での経験年数に幅があり、それが発言の回数に影響していたように思う。 一般の方からの質問に対しては、単純内容の質問でも納得できる回答にするのは難しいと感じた。また回答の方針についても各人の所属によってかなり異なっていると感じた。（地質環境、2年/安全評価、1年）

質問項目	意見・要望等
異文化コミュニケーションを体験してみたことで、一般の人との対話・コミュニケーションにおいて役に立つと考えられる点などありましたら教えてください。	今回は専門用語が通じあう内容でしたし、地層処分業界に関わっている人々との対話だったので、異文化とは言えないかもしれません。しかし、得たものは大きかったと思います。 （地質環境、25年）
	質問者の意図を考えるなど、相手のことを考えたやりとりが大事と感じた。（工学技術、5年）
	対話活動は経験を積み重なることが重要である側面もあることから、今回、グループワークの中で、異なる意見を有する相手に対して、相手の意見を尊重しつつ、事実を伝えながら、自分の意見を理解してもらうという経験を増やすことが出来ことは有意義であった。（安全評価、25年）
	質問してきたことに対して、答えつつ相手に質問することによって、誘導的な話の仕方もある。1日目の招待講演で学んだことを生かす機会になってよかった。（地質環境、1年）
	私自身は，この度のコミュニケーション（意見の出し合い，主張の場）でのスキルが足りないと感じた。だから，一般の方々に自分の意見を伝える際，この度のセミナー以上に言葉に配慮しなければと思った。（地質環境、1年）
	コミュニケーションをとる際は、相手の考えを知ることも重要であるといった点が役立つと思います。（地質環境、18年）
	地層処分にかかわる研究者が多くを占めていたため、あまり異文化を感じることがなかった。（地質環境、10年）
	相手の質問の意図（特に、不安や怒り）をくみ取って共感・尊重の意を示す。物事のデメリットや伝えるのに抵抗がある点も隠さずに伝える。（地質環境、4年）
	同じ地層処分の分野でもバックグラウンドや専門性、立場が異なると視点や意見が異なる部分があり、多くの気づきがあった。一般の方とのコミュニケーションについてもグループワークの中で、「相手の質問の意図や知りたいことをどう引き出すか」についてそれぞれの意見・考えを交換することができ大変勉強になった。（工学技術、2年）
	異文化ではありませんが，研究者や技術者は得てして白黒つけたがる傾向があると自分を含めて実感しました。模範解答には質問に対してはっきりと答えを述べていない場合もあり，一般の人との対話には相手の意図することがどこにあるかを明らかにする傾聴の態度が必要だと思いました。（安全評価、1年）
	やはり、自分が当たり前だと思っている前提などが人によって異なることを知れたことは非常に重要である。また相手の質問の意図をしっかりとくみ取り、相手が聞きたいことにこたえていくことが非常に重要だと感じた。（地質環境、17年）
	相手も知っていそうな具体例を出して話をする。話す時の態度や言葉の強弱の選択も重要だと感じた。（工学技術、3年）
	実施してみるとグループ内の意見はほとんど一致しており、異文化とは感じなかった（工学技術、10年/安全評価、5年）
	チーム内でも各人のバックグラウンドが違うと捉え方や考え方が違ってくるというのが実際に分かり、勉強になった。 地層処分について同業の中でも意見をまとめる（合意する）のは大変なのだから、これが一般住民の方々を対象にしたら、比べものにならないくらい大変なのだと思うので、日々「相手にとって分かりやすく伝えるとはどういうことか」を考えながら取り組んでいかなければいけないと感じた。（広聴・広報、4年）
	こちらが思ってもみない意見が突然出てくることもあり、傾聴の姿勢を維持しながらコミュニケーションを続けることは簡単ではないとあらためて感じました。また、質問者の意図をよく捉えてコミュニケーションをとるためにはFAQの回答がやや適切でない部分もあり、自分なりに分かりやすく伝える工夫を考えたいと思いました。（広聴・広報、2年）
	参加者は専門家や技術者であるため、一定の知識・知見を備えられているが、それぞれの答えは似ているようで違うものがたくさんある。その他一般の方に対しそれぞれ違う答えがあるよう、その差異を理解することも必要と理解した。自身の答えを正当化せず、相手の答えも知る中で、自身の技術を理解して頂くことに繋げられる様（平行線にならない様）、違いを明確化させる傾聴技術を磨いていきたい。（工学技術、1年）
	事実を否定することはできないということ。どんなに論理的に話をしても否定しようと思っている人に対してはあまり効果がないので、そういった人であっても否定することができない事実から話をすることによって、相手も納得することがあるということ。否定しようと思っている人と議論をしてもあまり意味がないということ。結局のところほとんどの場合議論をしても結論がでないので、議論するのではなく、相手の主張に寄り添う姿勢を一定程度示し、そのうえでこちらの考えを述べるに留めておく。（その他、7年）
	相手の質問の奥にある意図をくんで、事実（分かっていること）と分かっていないことを明らかにながら真摯に対応するコミュニケーションを目指すことです。（工学技術、7年）
	日本人でも、皆さんそれぞれ育った背景、物の見方、考え方が違います。対話・コミュニケーションをする際には、相手がどういう情報を欲しがっているのか、我々の述べていることのどこかに不満を持っていないかどうか、対話集会に参加した目的は何なのかを探ることは重要と思います。こちらから質問しすぎると逆に構えてしまうので、なるべく多く話してもらえるように、対話集会等で何らか工夫するのがいいのではないかと思います。（その他、8年）
	他分野の総意で答えを作ることは一般の人への回答を作るうえで網羅性や説明性が上がるため良いことだと感じました。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	そもそも原子力について懸念・疑念が持たれているということを念頭に、技術に胡坐をかいて説明と説得によるコミュニケーションではだめだということは重い意見として受け止めたい。質問者の意図を理解し対話型のコミュニケーションを実践することが信頼性醸成のために役立つと思うので、このようなコミュニケーションができるよう心掛けたい。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	あらかじめよく出る質問ややり取りは想定して解答を準備しておくようにしようと考えました。（安全評価、1年）
	傾聴、事実ベースで会話を進めることなど役に立つと思いました。（安全評価、9年）
	地層処分に関わっている人間同士でも、分野が異なると考え方、説明の仕方が異なるように感じた。一般の方との対話であればなおさらだと思う。そういうことを実感する場としては、有意義であったと思う。（広聴・広報、1年）
	異文化コミュニケーションと銘打って実施できているとは思いませんでした。あまりに参加者のバックグラウンドが偏りすぎているように感じます。もう少しいろいろな分野で活躍されている方に参加してもらうようにすべきだと思います。（安全評価、2年）
	難しい用語については丁寧に説明することが大事だと思った。（地質環境、9年）
	自分の持っている言葉が一般のひとには伝わらない、もしくは誤って伝わってしまうことがあるので、一般のひとにも伝わる言葉で話すことが大切だと思います。（工学技術、1年）
	知らないことを聞くことが重要だと思いました。説明する側がすべてを理解しているわけではなく、質問者から教えられることがあるということもあるということと、教えてもらったことに感謝することが重要だと思いました。（地質環境、10年/その他、20年）
	ある程度の技術的検討は進んでいるので、一般の人に対しある程度主体的に（自信をもって？）コミュニケーションを取ってもよいのかなと感じま した。また、相手の質問の裏に隠されているかもしれない真意を常に意識しながら相対する必要があると感じました。（工学技術、1）
	気づいた点です。 漠然としていますが、対話の一方法として、以下のような点が大切なのかなと思いました。 ・自分の立ち位置を自分の中で明らかにしておく。 ・言いたいことを一気に言うのではなく、互いに共感できるところや反論が必要なところを、徐々に探りながら明らかにする。 ・自分の立ち位置と発言を照らし合わせながら、技術者として誠実さからかけ離れたポジショントークに堕してないか省みる。 ・自分の発言が、知らぬ間に刷り込まれた誰かの発言のコピーでないか、も省みる。 （オリジナリティが必要ということではなく根本を理解しているか、自分の価値観に自覚的であるかの反省）（工学技術、2年）
	傾聴が重要であること。（地質環境、3年）
	観点が異なることによって，会話現場での臨機応変が大事ではないかと思いました．（工学技術、17年）
	傾聴の姿勢は，分野の異なる人同士では，とても重要だと感じました．（工学技術、1）
	実際に一般の方を想定することで，一方的な説明の場合，必ず反論が出てくることを知りました．そのうえで，市民参加型の説明を心掛けなければならないことが非常に重要であることを感じました．大学の講義でも教授が一方的に話す講義は，聞いている人が少なく寝ていたり，違うことを考えていたりする人が多いように感じておりますが，このように住民説明会でも同じように傍観者にならない，させないようにどのように説明するか技術者も考える必要があると強く感じました．今までは，技術についてだけやればよいと思っていましたが，技術者自身で説明・納得させることができるよう今後も学んでいきたいと思います．（工学技術、2年）
	文脈の推察 推察方法はいくつかあり，例えば経験，プロファイリング（統計），国語力（地質環境、5年）
	まずは、否定をしてはいけない。 反論する際には、論理的に話す、かつ、抽象的になりすぎないことが相手に不信感を与えないのではないかと思う。
	相手が話している時は最後まで聞くこと、すぐに反論しないことは役に立つと考えられる。また、業務で使っている単語などは、異分野の人からすれば聞きなれない単語であり、伝えたい内容と違った解釈をすることもあるため、丁寧に説明することが重要だと感じた。これは、一般の人とのコミュニケーションでも役に立つと思う。（地質環境、2年）
	上述のとおり、相手の話を否定せず、話を遮らないで傾聴し、事実に基づいて丁寧に説明することを実践したいと思います。なお、今回のグループワークメンバーは主に地層処分の関係者であったので、異文化とは感じませんでした。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	技術者は技術の追求だけではなく，それを活用し享受する側の人たち（住民）にもわかりやすい説明し，その時に身近な例を参考にするのがよいと思いました。（地質環境、3年）
	あえて「地層処分に反対する」という立場から物を見る、という役割を経験すると、これまであまり疑問に思わなかった部分に目が向けられるので良かったと思います。処分事業に関わる方は当然、地層処分以外はあり得ない、というスタンスを持っていると思うが、それを一度捨て去って真逆の立場から考えることで、反対者が何を感じ、考えているのかを理解する上で役に立つと思います。（工学技術、3年）
	質問をする人の立場と意図とを慎重に探る必要があると考えた。しかし、簡単なことではなく、日々から様々な意見に対する想定を行い、また、実践（ディスカッション、グループワーク）を重ねることが肝要だと感じた。（安全評価、6年）
	・今回のグループワークにおけるコミュニケーションについては，あまり「異文化」とは感じなかった．セミナー二日目夜ということもあってか，すでに共通の認識が醸成されつつあったとも考えられる． ・対話において，相手の意見を受け取り否定しないところから始めること（傾聴）は，その後の円滑なやりとりに効果的と感じた．否定せず受け取ることで，相手の意見も咀嚼する習慣もつくように思う．（工学技術、20年/安全評価、20年）
	専門家と言っても他分野ではほとんど素人であるとわかった。 市民コミュニケーションの練習としては絶好の場となる。（地質環境、30年）
	地層処分は絶対安全、想定外のことが起きる可能性は非常に低いというような回答は、不安を持つ方への説明に対しては不誠実だと以前から考えていた。今回の講義、グループワークを通してそのような回答を前提に考えている技術者がかなり多いと感じた。この業界全体でどのようにコミュニケーションをとるべきかもう一度しっかり考えてほしい。（地質環境、2年/安全評価、1年）

大項目③：1月8日（1日目）の講義について（各講義に対する質問）	
講義ID.講義タイトル	意見・要望等
01.わが国の地層処分事業の制度・政策・進め方	講師の経験に裏打ちされた話であり、大変わかりやすく面白かった。より長い質疑応答の時間があるともっとよかった。（地質環境、25年）
	概要的な発表であり、全般的にわかりやすかった。また、人材育成に関して、処分事業の進展に伴い各段階で必要となる分野のイメージ図を見て、将来のイメージができた。（工学技術、5年）
	・導入として、国としての取り組み等を概観する講義としては適切な内容であった。 ・最後に個人的な見解を含めて人材育成についての考えを述べていた点も、本セミナーのオープニングとしては良かった。（安全評価、25年）
	地層処分に関する現状及び経緯を把握することができてよかった。地層処分に関連する仕事に従事した年数が短い人にとってもわかりやすく、セミナーの最初の講義として、適した内容であると感じた。（地質環境、1年）
	●大変分かりやすい。ただしそれは地層処分に関して，そこそこの知識がある者が抱く感覚であると思う。 ●本アンケート3ページ目の通り，現在の処分事業・処分場の状況・イメージを伝えるとよいと思う。（地質環境、1年）
	地層処分に関する経緯や全体的な状況の紹介は、以降の講義を受ける上で必要なものだと思います。講義はよく理解できる有意義なものでした。（地質環境、18年）
	国の動向について、最新の状況を聞くことができた。（地質環境、18年）
	教材は情報量が豊富ながらも図や写真が多用されており、ごちゃごちゃとはしておらずわかりやすかった。自身の業務で一般の方に地層処分事業を説明するうえでも役に立ちそうな情報が多数あった。（地質環境、4年）
	国の動きがわかりやすくてよかったと思います。対話型全国説明会を中心とした広報活動の取組状況や問題点などについて，より詳細な紹介があるとなおよかったと思います。「なぜ地層処分に対する理解が進まないのか」というのは，事業をすすめる上で重要なポイントだと思います。（安全評価、20年）
	地層処分事業の現状について、網羅的に簡潔な説明でありながら情報に漏れがなくわかりやすい講義であった。（工学技術、2年）
	地層処分の政策全般がよくわかり良かったと思います。東陽町の詳細な経緯も理解できました。（安全評価、1年）
	経産省のとりくみについては理解した。一方で経済産業省としての過去のとりまとめ事項（たとえば2000年レポートと呼ばれる第2次取りまとめ）において、決定された事項がどこまで活かされており、またどこがどのような経緯で変更になったのかを説明してほしい。他の発表の質問にもあったが、表面的な結果よりも経緯がわからないと今後の具体的な発想や改善点が出てこないことを危惧している。（地質環境、17年）
	エネ庁の国民理解を深めていくために行っている取り組みがよくわかった。（工学技術、3年）
	全て既知の話だが、全体像を把握していない方々にとっては導入としてスムーズに把握できたのではないか。国の方は、公平性の観点から誰が説明しても同じ内容で、いつも画一的となるが、今回自己紹介があったので親しみをもって聞くことができた。（広聴・広報、5年）
	①【事業の実現性の説明】第二次取りまとめやNUMO2018レポで地層処分は可能と主張したことに対し、「どこ」という質問があっても、科学的特性マップは「可能性」をやんわりと説明したものなので、先の質問への答えとしては論理的ギャップがある。 ②【人材育成】個人に焦点が当てられているが、組織の育成という視点も明確に取り上げた方が良いと感じた。（地質環境、26年）
	廃棄物に関する全般的網羅的な説明がなされ、最初の講義として適切な導入講義であった。（工学技術、10年/安全評価、5年）
	情報量が多いという気もしたが、分かりやすくまとめてあり、また説明も的確にポイントを説明いただいたと思う。エネ庁委託事業の表が分かりやすかった。(P.29)（広聴・広報、4年）
	丁寧に説明していただき、大変わかりやすかったと思います。（広聴・広報、2年）
	地層処分事業の全体概要（制度・処理プロセス）をおさらいし、本研修会のキックオフとなる講義であった。こういった場では難しいと思うが、政策の動向やポイントをより深く知る機会があったらいいと感じた。NUMOと連携していかなければならないこと、問題等、深堀りできたらよりよいです。（NUMOは原子力政策の動向も学んでいかなければならないと感じている。）（工学技術、1年）
	資料としては文字が多いが、強調されている部分がわかりやすいので、それほど醜さは感じなかった。(その他、7年)
	資料が見やすかった（地質環境、7年）
	セミナー全体の導入として、簡潔かつ分かりやすい講義でした。人材育成に関するキャリアプランについてのお考えは若い研究者・技術者に有益な内容と感じました。(工学技術、7年)
	放射性廃棄物WGの資料と似ているということもあり、内容の理解は容易でした。(その他、8年)
	我が国の主要な処分関連組織に属されてきた方からの説明ということで、現実味があり良かった。特に政策の経緯や住民理解のための活動についてその理解が深まった。(工学技術、1年/安全評価、4年)
	国の方針や取り組みの現状がよく理解できた。(地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年)
	現状や展望がよくわかった。資料の情報が多すぎると感じた。(安全評価、1年)
	経験に基づいて話をしていただいたのがよかった。(安全評価、9年)
	元々知っている内容も多かったが、おさらいの意味でよかった。東陽町の事例から2015年の基本方針改定への経緯が丁寧に説明されていてよかった（東陽町内部だけでなく、周辺自治体などの反対も強かった点などの具体の説明）。(広聴・広報、1年)
	地層処分について全体的な話を聞けて良かった。配布資料も後々見た際にわかりやすくまとめられていると思った。(安全評価、2年)
	地層処分技術の概要が良く理解できた。(地質環境、9年)
	地層処分事業の基本的なことをわかりやすく話されていてよくわかりやすかったです。ただ、スライドの1枚1枚の文字の分量が多く、スライドの中でどの部分が重要なのかがぼやけてしまっていた印象がありました。(工学技術、1年)
	地層処理に関するこれまでの取組みを理解することができました。 また、2020年以降どのようなことに取り組んでいくのかもわかりやすく理解することができました。P28の研究開発テーマについて興味があり、もう少しお話を聞きたいと思いました。(地質環境、10年/その他、20年)
	今携わっている事業の全体像を改めて学ぶことができた。50 年以上前から廃棄物処 分の検討自体は行われていたことが意外であり、さらに 50 年も結論を持ち越すことが ないようにしなければならないと感じた。（工学技術、1）
	よかった点：制度や政策に関する現状の取り組みについて、実務者の観点からご説明頂き、その背景や動向の大筋をつかむことができた点。(工学技術、2年)
	キャリアプラン構築への考え方の話が今後の自分の役割を考える上で、大変興味深いと思いました。 国際連携の説明をより詳しくお聞きしたいと思いました。(工学技術、1年)
	通り一辺倒の話で、専門技術者でも興味が沸かない、感じた。(地質環境、3年)
	内容的にもっと知りたいことは，エネ庁として，どうな課題があるのか，具体的な例も聞きたいです．(工学技術、17年)
	全体の地層処分事業の制度を再確認することができたのは，非常に良かったです．(工学技術、2年)
	導入ということで，背景知識がある分理解が捗った．必ず知っておかねばならない内容なので有用性は5．（地質環境、5年）
	地層処分について、その流れがわかりやすくてよかった。また、様々な人々とディスカッションをしているのを聞いて、大事なことだと思った。1つ気になったのは、ディスカッションを経て一般の人がどう感じたのかを知りたかった。(地質環境、3年)
	若手であること、受託研究を実施している立場などから、資源エネルギー庁の方のお話を拝聴する機会は少ないため、大変いい経験となった。資料も分かりやすく、単語や意義も口頭で説明頂いたため、理解しやすかった。政府間国際ラウンドテーブルなど、最近の動向も含まれていたので内容も満足であった。(地質環境、2年)
	日本の地層処分政策について、従来の進め方の問題点や、最新の状況が詳しくまとめられていて良く理解できた。(工学技術、2年/安全評価、7年)
	地層処分に関する動向を，基盤となる法律の観点から流れに沿って説明していただいたことはよかったです。対話や人材育成については，今回のセミナーのタイトルにもなっているので，さらなる展望や具体的な提案があればよかったともいます。(地質環境、3年)
	【よかった点】 ・日本における地層処分政策の変遷が理解できた ・今後、地層処分業界が目指している方向はどこか、どういう人材が求められているのか？を理解できた。(工学技術、3年)
	要点が見やすく、わかりやすくまとまっていて良かった。(安全評価、6年)
	スライドの情報量が多すぎて理解が追い付かなかった。 他のパートに比べると予備知識が比較的少なくても理解はできるが、それでも高度な内容をやっているように感じた。(地質環境、1年)
	これまでの経緯、国の方針について確認することができた。(地質環境、2年/安全評価、1年)

講義ID.講義タイトル	意見・要望等
02.放射性廃棄物の発生と管理	あまり時間をかけるべき内容ではなかった気がする。このあたりはさっと終わらせて、SDMから安全評価を説明するための時間をとって欲しいです。（地質環境、25年）
	地層処分の話に行く前に、低レベル放射性廃棄物の説明等を入れるなど、放射性廃棄物の処分全般の話をセミナーの初期の段階で聞けてよかった。（工学技術、5年）
	・冒頭に発表の狙いについて、自身の思いも伝えた上で、講義に入ったことは良かった。 ・放射性廃棄物の全体像を理解するには有益な講義であった。（受入基準、受入検査の話をどこまでするかは、全体の時間配分に依存するかと…）（安全評価、25年）
	言葉が難しい。略語など一度で覚えられないから書いてかれた。全体知識を知れる講義で、最初にあってよかった。（地質環境、1年）
	●高レベル放射性廃棄物とTRU廃棄物の違いを取り上げていただきたい。（地質環境、1年）
	処分事業の対象を理解するには適当な内容だと思います。（地質環境、18年）
	地層処分以外の処分方法について改めて確認することができてよかった。包括的技術報告書に書かれている以上のことはあまり説明がなかったため、残念だった。 （地質環境、10年）
	業務上、地層処分に関する内容ばかりで低レベル放射性廃棄物やTRU廃棄物に関する知識がほとんどなかったので、それらに対する知識取得や共通点の考察などといった観点を提案していただけたことはありがたかった。（地質環境、4年）
	低レベルを含めて放射性廃棄物の種類を網羅的に紹介されていた点が，わかりやすかったと思います。ただ，後半（地層処分対象廃棄物）の内容が時間の割に盛りだくさんになってしまい，難しく感じられた方もいらしたのではないかと思いました。　（安全評価、20年）
	放射性廃棄物の種類について体系的にまとめられており、とてもよく理解ができた。（工学技術、2年）
	放射性廃棄物がどういった施設からどんな種類のものが発生してくるのかが全般的にわかり，知識の習得という点でよかったです。（安全評価、1年）
	地層処分についてある程度の知識があることが前提でお話されていたので、もう少し対象（受講生）にあわせたレベルで話をした方がよいと感じた。（地質環境、17年）
	TRU廃棄物などの低レベル放射性廃棄物についての説明がわかりやすかった。図・写真がわかりやすかった。（工学技術、3年）
	ポイントを整理されていたため理解しやすかった。（広聴・広報、5年）
	重要なポイントを絞り込めていなかった。「本発表の狙い」に見られる講師の熱意は感じたが、発表内容とはあまりリンクしていない。廃棄物を管理する上での問題・課題を示した方が良い。技術的な話題のトップバッターだったので、「本発表の狙い」は理解するが、開催趣旨説明の中でするような全体に関わる話だと思う。（地質環境、26年）
	・講義に先立ち狙いが整理されている点が分かりやすかった ・LLW等地層処分以外の事業者の講義がもう少しあってもよいかもしれない　（工学技術、10年/安全評価、5年）
	HLWだけでなくTRUについても詳細に説明があり良かった。また、普段はあまり聞くことがない廃棄体の受け入れ、検査方法にも触れてあり勉強になった。（広聴・広報、4年）
	法律の条文について合わせて解説いただき、今まで内容を誤解している部分があったことがわかりました。（広聴・広報、2年）
	前半、説明頂いた、TRU廃棄物の中深度処分方法の在り方、規則の見直しについて、踏み込んだお話をより詳しく聞きたかった。深地層の地層処分を実施主体とするNUMOであるが、直接関係ない処分概念も学ぶことで活かすことは沢山あると感じた。また、取り扱う放射性廃棄物の特徴、仕様、などまだまだ知らないことが多く、学ばなければならないと、再認識した。事業を進める上、規制とのかかわり方、求められる要件の整理は、重要かつ早急に整備が必要とも理解した。（工学技術、1年）
	放射性廃棄物の分類やそれぞれの処分方法などがわかりやすく整理されており、今後の参考資料としても使えるものであった。（その他、7年）
	話し方が上手なので，内容が理解しやすかった　（地質環境、7年）
	略語について注釈があると、放射性廃棄物処分関連研究等の従事経験年数が少ない方の理解がより深まったと思います。（工学技術、7年）
	審議会や他機関の刊行物、私の職場の刊行物で一部内容が類似する資料を読んだことがあり、内容の理解は比較的容易でした。（その他、8年）
	低レベル廃棄物に関する丁寧な説明はあまり聞けないので再認識も含め役立つと思えた。事業許可申請に至るまでの時間的なGAPの話が興味深かった。NUMOが今後必ず必要になるものから関挙げていくアプローチは今からできる技術開発のスタートとなると思えた。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	地層処分対象以外のものも含めて放射性廃棄物を整理して説明いただいたので、理解が深まった。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	地層処分事業の全体がわかる内容だったと思う。（安全評価、1年）
	狙いを最初に説明していただいたのがよかった。（安全評価、9年）
	もともと知っている内容も多かったがおさらいの意味でよかった。一般的な話がメインだったと思うので、可能であれば、それぞれの管理方法、処分方法に関する留意点、具体についても、原燃などの実施主体での取組に基づいた説明があるとよかった。（広聴・広報、1年）
	略語を多く使われていたので、分野外の人からすると話についていけないことが多々あった。もう少し丁寧な表現を使われたほうが良いと感じた。配布資料は見やすくまとめられており、非常に良かった。（安全評価、2年）
	放射性廃棄物の処理について基本的な部分から説明していただきよく分かった。（地質環境、9年）
	放射性廃棄物の種類や濃度に応じた処分方法が詳しく話されていてわかりやすかったです。廃棄物がどのようなものかがもう少しわかりやすければよかったと思います。（工学技術、1年）
	放射性廃棄物の発生プロセスとその管理方法についてわかりやすく説明いただきました。P9で幾前により格納容器の大型化ができないことについて、是非改善していくべきだと思いました。（地質環境、10年/その他、20年）
	これまであまり考えたことのなかった発熱率について知ることができ勉強になりました。また、いままで実際の処分施設を見たことがなかったため、稼働中の施設の写真が資料 に含まれており興味深かったです。（工学技術、1）
	よかった点：講義のつかみとして、「共通言語として知っておくべき」という言葉があり、聴講に身が入りやすかった点。（工学技術、2年）
	放射線については全くの素人ですが，P.25の外部被ばくを考慮すると，コンクリート壁厚がどの程度必要かという説明が土木分野の人間にとっては実感として分かりやすかったです。 01での説明と被っている部分があり、01と順番が逆でも良いかと思いました。（工学技術、1年）
	講演者のふざけた態度が目に余った。（地質環境、3年）
	内容的に加えていただきたいのは，numo様として，如何な活動されているのか，その活動において，課題は何でしょうか．（工学技術、17年）
	地層処分にこだわらず，放射性廃棄物全般の話をしたうえで，高レベル放射性廃棄物の話に移ったので，他との違いが明確になり分かりやすかったです．（工学技術、2年）
	「ねらい」が明記されていたり，ポイントやまとめなどが適切で理解しやすい． 現職のグループでは有用性はさほど高くない。（地質環境、5年）
	放射性廃棄物について初めて聞くことがあり、新しい知識を得ることができた。特に印象的だったのは、原発ででる廃棄物のうち、放射性廃棄物はごく僅かということ。 難しかったところは、専門的な言葉が多く、もう少し丁寧に説明してもらいたかった。（地質環境、3年）
	放射性廃棄物の処分概念や処分方法を規定する法律などについて、地質環境に関する研究をしていると、あまり触れることがないため、大変勉強になった。 配布された教材は読み返してもよく理解できる内容で大変満足できた。（地質環境、2年）
	放射性廃棄物の起源や分類について、図や写真を交えて説明されており、良く理解できた。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	放射性物質の埋設に関して，レベルごとの取り扱いがわかりやすく説明されていたと思われます。（地質環境、3年）
	【よかった点】 ・日本の法律上求められる要件がまとまっており、勉強になった ・過去の業務で疑念だった点（ドラム缶である理由や，ピット処分の理由など）の経緯が理解できた。（工学技術、3年）
	処分施設ごとの概要がまとまっていて参考になった。（安全評価、6年）
	放射性廃棄物に関する基本的な情報であり、理解できた。（安全評価、27年）
	法令や基準に沿って話していたが、それらがどういった経緯で出来たのか話を聞ければと思った。現状の事業を聞いてみると、基準や法令に過度にがんじがらめにされているような印象を受ける。（地質環境、1年）
	放射性廃棄物の分類についての部分がわかりやすかった。（地質環境、2年/安全評価、1年）

講義ID.講義タイトル	意見・要望等
03.地層処分における安全確保の考え方	昨年度に比べて格段に良かったと思う。石田さんの責任ではないが、事務局はSDMの説明のところはもう少しゆっくりと時間を割くように要請すべきだったと思う。SDMがHTMCの概念モデルの集合体なのか、対象エリアをグリッドで分割して、それぞれのグリッドにHTMCに関する数値を与えたものなのか、はっきりしなかったと思う。また、セフティケースについても"概念"として認識すべきか、説明の根拠の集合体として何らかの電子システム（質問したら回答が返されるようなコンピュータプログラム）なのかがよくわからなかった。（地質環境、25年）
	セーフティーケースとは、地質環境モデルとは、等の、この分野の仕事でよく聞く単語の説明を丁寧に行っていたのがよかった。（工学技術、5年）
	・安全確保の基本的な考え方に加え、自らの経験も踏まえて三分野連携についての主張を述べられて言えたのは良かった。 ・SDMとは何か（どうあるべきか）？、SDMを介した3分野の連携については、レクチャーというよりも、その課題に特化したワークショップのような形で議論をする場があっても良いかもしれない。　（安全評価、25年）
	具体的な話がなかったので、ぼんやりとしたイメージしかつかめなかった。SDMという言葉を初めて知り、後半出てきたときに忘れかけていた。（地質環境、1年）
	●「包括的技術報告書」がいたるところに出てくるので，事前によく読んでおけばよかったと思った。→事前に，セミナー主催側が「これが根幹の話になります」と周知するか，講義担当者が引用する際に詳しく説明するか，等を行うとよい。 ●SDMの定義を厳密に示してほしい。また，何か具体例があればそれも示してほしい。（あとの講義で出てきます，とされたとしても，「3分野の連携」の話のときに，「何がどうつながるか」をイメージできなくなる。） ●連携と言いつつ，実施主体内でそもそも連携ができていないことは，大変に歯がゆい。 ●講義に対する意見ではないが，「セーフティケース」なる語を多用するのは，適切でない気がする。「セーフティ」から「安全だ」というふうに解釈されて，もし何かあったときに「安全だと言っていたのに」となりうるかなと思う。　（地質環境、1年）
	処分事業の概略的な流れを把握するには適当な内容だと思いますが、「セーフティケース」はより明解にご説明いただけるとより良いと思います。　（地質環境、18年）
	包括的技術報告書に書かれている以上のことはあまり説明がなかったため、残念だった。　（地質環境、10年）
	SDMが、調査段階の各分野をつなげる重要なものであるというメインメッセージは理解できた。ただし、スライドに文字が多すぎたりして、冒頭にあげていただいた狙いに対応する個別の内容が頭に入ってきづらかった。　（地質環境、4年）
	地層処分の安全確保を網羅的に説明されていただのがよかったと思います。その一方で，各論への入口として，もっと時間をかけて丁寧に紹介してもよかったのではないかと思いました。（安全評価、20年）
	三分野の連携という狙いを軸に講義がなされており、それに必要な情報がまとまっていた講義であったと思う。その後のグループワーク等においても三分野の連携とはという話題がなされており、参加者の意識付けの面でもよかったと思う。　（工学技術、2年）
	三分野の連携が必要であること，共通の基盤がSDMとなるということがわかり良かったと思います。（安全評価、1年）
	地層処分についてある程度の知識があることが前提でお話されていたので、もう少し対象（受講生）にあわせたレベルで話をした方がよいと感じた。（地質環境、17年）
	SDMが結局何かわからなかった。後半は用語が全然わからなくてついていけなかったのでもう少し配慮してほしい。（工学技術、3年）
	ポイントを整理されていたため理解しやすかった。（広聴・広報、5年）
	①会場でも指摘があったかと記憶しているが、地層処分を選択する理由を説明することが「基本的考え方」の説明。内容は、地層処分を実現するために必要なアクションの基本的考え方。小見出しや構成を変えるだけで、印象が変わる。 ②分野連携として、必要なマネジメントを並べても並べただけで終わる。各マネジメントを理解した上で、マネジメント間のトレードオフをどのような方針で解消して行くかを聞きたい。（地質環境、26年）
	・概念的な内容なのでどうしても文字が多くなる教材とならざるをえない点が残念 ・最初に要件の構造について全体的な説明があったのが良かった ・3分野の連携についてしっかりとした説明があったのが良かった　（工学技術、10年/安全評価、5年）
	情報量が多すぎな印象があった。法令等の記載があるので仕方ないと思うが、もう少し時間をかけてじっくり聞きたい内容だと思った。（広聴・広報、4年）
	地質環境モデルが3分野間の協同で作成され、思っていた以上に重要な役割を果たしていることがわかりました。（広聴・広報、2年）
	講義2でもあったが、実施主体であるNUMOは役割やR＆Dの方向性を各々分野担当者でも考えなくてはならいこと、それらの課題整理、整備に時間をつくらなければならないことを認識した。終盤、説明頂いたSDMが分野横断のキーになること同様に考えている。組織内のニーズを共有しあうことは今後必ず求められると、学ぶことができた。それによって、安全裕度の指針が狭めていけると、個人的には感じた。（工学技術、1年）
	教材の文字が多く、今どこの部分を話しているのかわかりにくい。文字の色分けが多く、重要な部分がわかりにくい。（その他、7年）
	話し方が上手なので，内容が理解しやすかった　（地質環境、7年）
	地質環境モデル（SDM）を中心として、サイト調査・評価、施設設計、安全評価の三分野が情報を共有して連携すること、ようでSDMが重要である、という内容が分かりやすいと思いました。（工学技術、7年）
	サイト調査・評価の基本的考え方として、地質環境モデル（SDM）を挙げていましたが、本セミナーで初出の用語なので、なぜこのモデルをこの箇所（スライド18）で説明するのか、の丁寧な説明があればもっとよかったと思います。また、セーフティケースの定義が分かりにくかったです。（その他、8年）
	運営側との調整かもしれないが、廃棄物の丁寧な説明があったので、地層処分の基本的なコンセプトについても丁寧な説明があるといいなと思った（p.4の充実）。セーフティケースに関して丁寧に示されたのもNUMO包括的技術報告書をまとめられた賜物かと思え、良かった。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	3分野の連携の重要性と難しさが理解できた。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	セーフティケースという言葉のように基本的なことも説明されていてよかった。 資料の情報が多すぎると感じた。（安全評価、1年）
	狙いを最初に説明していただいたのがよかった。（安全評価、9年）
	もともと知っている内容も多かったがおさらいの意味でよかった。内容的にも、一般的な話がどうしてもメインとなってくる部分だと思うが、現状では何が安全確保のための手法、連携などでネックとなっているのか、その解決方法の提案などについても言及があるとよりよかったと思う。（広聴・広報、1年）
	略語を多く使われていたので、分野外の人からすると話についていけないことが多々あった。もう少し丁寧な表現を使われたほうが良いと感じた。配布資料は見やすくまとめられており、非常に良かった。（安全評価、2年）
	地層処分におけるSDMの位置付け・重要性がよくわかった。（地質環境、9年）
	講義として地質環境モデル(SDM)のデータが調査・設計・安全評価をつなぐ指標として重要だということがよく分かった。ただ、最後に急に地質環境モデルが重要であるといった結論がでてきたような説明であったので、地質環境モデルの重要性の説明をもう少し早い段階でることでもっと地質環境モデルの重要性がわかって聞けたように思います。（工学技術、1年）
	安全確保のためには、3分野連携が重要でそのためのツールとして、SDMが必要であるということを認識することができました。（地質環境、10年/その他、20年）
	三分野連携に関する内容が少し難しかった。後で資料を読み返すと P28 の図に講 義内容が集約されていると理解できた。これまでの連携における問題点（本当は〇 〇なデータが欲しかった、ニーズが伝わってこなかった、等？）を従事者の生の声とし て聞いてみたかった。（工学技術、1）
	良かった点：地質モデルを媒体とした分野間コミュニケーションの考え方を知ることが出来た点 難しかった点：事前知識がある程度ないと理解しづらい内容かなと感じました。（工学技術、2年）
	多岐にわたるデータから評価される中で、その際の分野間での調整が難しいということが理解できました。（工学技術、1年）
	講演者のふざけた態度が目に余った。（地質環境、3年）
	三分野連携の内容において，我々numo外のものに対して，期待があるのか，連携希望があるのか，具体的に連携必要性を示す例があれば，ありがたいです．（工学技術、17年）
	SDMを初めて聞いたので，多用されるとなかなか頭にはいってきづらい． ステークホルダーなど，カタカナ単語も同様．（工学技術、1）
	全体の講義の核になる部分で，SDMについて地質環境・調査技術に入る前に知ることができたのは，予習となりこの後の講義を有意義に聞くことができる講義だったと思います．（工学技術、2年）
	分野間連携についての理解が深まった． 各分野の考え方を知れた． SDMへの理解が深まった．（地質環境、5年）
	安全評価について、今まで資料でしか見たことがなかったが、初めて詳しい内容を聞けて良かった。最後の質問ででたステークホルダーが各分野間でバラバラということがあったが、本当にその通りだと考えさせられた。（地質環境、3年）
	包括的技術書の立ち位置として「ベーシックな体系として更新していく」とのご説明があったが、私個人の意見としても是非そうしていただきたいと思う。三分野間の連携にSDMをHubとするご説明があったが、将来的にはもう少し具体的な内容が記述できるよう研究者・技術者から提案する必要があると思う。（地質環境、2年）
	このテーマ自体が概念的でわかりにくいのかもしれないが、スライドの文字が多くて理解が難しかった。もう少し文字を減らして要点を太字にする等、重要なところが分かるように工夫して頂けると助かります。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	三分野の連携は非常に重要なテーマであり，頭ではわかっていても，実行することが難しいため，このような説明があったことはよかったと思います。（地質環境、3年）
	【よかった点】 ・安全確保の考え方について改めて整理できた ・ディスカッションと併せて内容をよく理解できたことは良かった 【疑問点】 ・必要な「安全裕度」について、決めるのは困難であると理解できるが、もやもや感があった。（工学技術、3年）
	要点が見やすく、わかりやすくまとまっていて良かった。（安全評価、6年）
	既に聞いている情報であり理解できた。（安全評価、27年）
	法令や基準に沿って話していたが、それらがどういった経緯で出来たのか話を聞ければと思った。現状の事業を聞いてみると、基準や法令に過度にがんじがらめにされているような印象を受ける。（地質環境、1年）
	安全確保の現状がどのようなものか理解できた。各研究機関が実施している各分野の安全確保のための研究をNUMOがうまく取りまとめるのか、あるいはNUMOから要望を出すのか早めに方針を決めるべきだと感じた。（地質環境、2年/安全評価、1年）

講義ID.講義タイトル	意見・要望等
04.地層処分に望まれる地質環境と3段階の調査1（3段階の調査・評価）	高畑さんは練習不足だった。しかし、NUMO職員として頑張ろうという意識が見えて安心した。プログラム全体の中の自分の講義の位置づけをしっかりと考えながらストーリーを考えて欲しい。今思い返してみると、このパートでは、地球科学の紹介ではなく、3段階調査の目的と具体的なイメージを詳しく話すべきだったと思う。 （地質環境、25年）
	配布資料と発表資料が違うため、理解に時間がかかる部分があった。発表資料が更新された場合、最新版を当日配布したほうがよいと思う。若手の発表であり、プレゼンの練習にもなるため、人材育成という観点でよかったと思う。（工学技術、5年）
	・冒頭に"ガラスが化石になる環境をさがす"という、発言は良かった。従来、あまりそういう説明をされていなのを聞いたことがなかったが、一般の方には伝わりやすい当アメセージであると感じた。 ・良い発表でしたので、もっと自信を持って（余計はエクスキューズを発言せずに）お話をされると良いと思います。 ・前半で個別の自然事象のイベントについての基本的な事項と考慮すべきリスクを概観した上で、後半で法定要件等の紹介する構成は悪くないと思います。 ・ただし、地質環境調査・自然事象に関する複数の講義間での役割分担や構成については、事務局や関係者を含めて改めて調整をされるのが良いと考えます（講義04-07共通コメント）。　（安全評価、25年）
	地質環境の内容は、自分の専門分野と近いので理解は出来たが、他の専門分野の人にとっては非常に難しかったと思う。三段階の調査があることが分かってよかった。 同位体・火山灰など間違った使われ方をしていたので、他分野の人に誤解を与えかねないと思った。 発表に流れがなく、内容がいったりきたりしていてわかりにくかった。 発表時間が90分にもかかわらず、40分程度で終わり、内容が薄かった。（地質環境、1年）
	●配布資料と大きく異なるの話は，ついていきづらい。 ●各種の地質現象が，地層処分においてどのような危険性を伴うのか，説明があるとよい。 ●配布資料のページp.43～p.45が，大変見づらい。そのうえ，説明の際にページを行ったり来たりしていたので，ついていかれなかった。（地質環境、1年）
	広範な内容を紹介する講義ですので、（自然現象の細かな解説は後の講義に任せて、）全体像に重点をおいて目次にある項目の概要・要点を紹介されるとより良いと思いました。（地質環境、18年）
	包括的技術報告書に書かれている以上のことはあまり説明がなかったため、残念だった。（地質環境、18年）
	実際の事例や写真を示していただきイメージがつかみやすかった。ただし、時間の都合上仕方ない面もあると思うが、投影と配布とで資料が大きく違うのは結構なストレスを感じた。（地質環境、4年）
	前半の視覚的にわかりやすい資料が大変参考になりました。ただ，本題と思われる「3段階の調査・評価」と「地質環境特性の調査・評価」との関係などを含め，全体的に構成や内容を改善する余地があるような気がしました。　（安全評価、20年）
	地質環境の分野で考慮すべき現象について網羅的に説明がなされており、よく理解ができたが、配布資料と投影資料の差異が大きく、講義中に振り返って確認したいというときにできなかったことが残念であった。　（工学技術、2年）
	教材に多くの図を利用しているので，直感的にわかりやすいと思います。講義全体のストーリー構成をもう少し工夫すればよりわかりやすい講義になったと思います。 （安全評価、1年）
	地質環境調査の総論のような内容でタイトルの部分については、あまり話がなかった印象である。もっとどの段階の調査では、どのような調査を想定していて、そこで必要となるデータや情報がなんなのかを明確にした講義が望ましい。（地質環境、17年）
	配布資料と発表資料が違っていたので、わかりにくかった。3色の表のところの説明ではどの部分の説明をしているのか追えなかった。（工学技術、3年）
	ご自身で工夫された資料を作りこんでいるところが良かった。質疑応答では自信がなさそうに答えていたので、自身はこの道のプロなんだと意識されながら対応されるともっと伝わると思う。（広聴・広報、5年）
	①地質環境に関わる総括的な説明をするという意欲は買う。 ②リスクの説明に重点を置いたという説明があったかと思うが、リスクという用語が正確に理解できていないことがわかった。リスク（地層処分という目的に対する事象の不確実性の影響）というよりは、リスク事象を集めて報告していると受け取れる。そのように説明すれば、それで良い。 ③三段階の調査については、まず、各段階での目的を皆に共有させる内容であって欲しい。（地質環境、26年）
	・写真が多く用いられている教材が良かった ・少し話スピードが速く、聞き取りにくかった（工学技術、10年/安全評価、5年）
	資料は分かりやすかったと思うが、もう少し落ち着いて説明いただけると良かったと思う。（広聴・広報、4年）
	写真や図が多くてわかりやすかったですが、配布資料と変更のあった部分を差し替えてもらえるとなおありがたかったです。（広聴・広報、2年）
	科学的特性マップにある処分場から避けるべき環境の理解を深める機会となった。各調査段階で、費用と時間が限られる中、信頼できるデータをその程度揃えるべきか、質疑でもあったが、NUMO主体として、関係機関で調整していくべきと認識できた。そもそも最終処分法のもと、科学的特性マップを参考とし、避けるべき環境条件の"詳細"（地質・火山など…）を学ぶ機会は、講義としては、中々ないので、兼ねて大変参考になるものであった。（工学技術、1年）
	教材については写真を多く使っており、見やすくわかりやすいものであった。講義の進め方については順序だてが甘く、前後する場面が多かった。各スライドで何を言うのかきちんと整理したうえで、しっかり発表の練習をして頂きたい。（その他、7年）
	三段階の調査・評価の内容と地質環境モデル（SDM）の例の関係がよく分かりませんでした。三段階のそれぞれの調査段階で、どの程度詳細な情報を持ったSDMが作成できるのかを例示していただけると理解の助けになったと思います。（工学技術、7年）
	講師が自分の言葉で説明しようと心がけていたことと、資料で図や写真を上手に使っていたので、分かり易かったです。配布資料と実際説明で用いた資料が結構異なっていたのは、残念だと思いました。（その他、8年）
	地質環境の変遷プロセスについて、純粋にその挙動を知る機会が今までなかったため大変興味深かったです。また、若い人材が自分の専門を用いて発表することはとても良いことだと思う。教材はご本人もおっしゃっていましたが、発表スライドと配布資料の乖離があり、せめて重要だと思われるポイントだけでも配布資料に文字で示されていると良かった。ぜひ本番用の発表スライドも欲しいです。 （工学技術、1年/安全評価、4年）
	資料とスライドは統一した方が理解するという点ではいいのではないか。自身の経験を踏まえた説明はよかった。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	資料の情報量がちょうどよかった。 内容は、あまり親しみがなかったこともあり難しかった。（安全評価、1年）
	図が多くわかりやすかった。資料とプレゼンpptの内容が違うのが聞き手にとって少々大変だった。（安全評価、9年）
	地層処分場に求められる要件について述べてから、個々の自然現象について説明していただけるとより分かりやすかったのではないか。（広聴・広報、1年）
	スライドと配布資料が全く同じである必要はないと思いますが、あまりにも違いすぎると聴講者にとっては わかりづらくなるので、もう少し改良したほうが良いかと存じます。また、配布資料には最低限のキーワードを入れていただかなければ、後から拝見する際に理解しづらいと思います。 発表については、声の大きさ、スピーチの仕方などもう少し練習したほうが良いかと存じます。内容に問わず、今回のような発表では、なかなか聴衆に理解していただくのは難しいと感じました。（安全評価、2年）
	図や写真が効果的だと思った。（地質環境、9年）
	スライドと手元の資料とがちがうところがあり、どこを言っているのかわかりにくい部分があった。三段階の調査・評価の説明のスライドは似たようなスライドが複数あり、分かにくい部分が多いように感じました。（工学技術、1年）
	P52～58の地質環境特性調査・評価の例で示されたモデル図を示していただいたので、モデル構築のために必要な要素を把握することができました。（地質環境、10年/その他、20年）
	P6 のガラス工芸品の出土物の画像は地層処分の安全性を分かりやすく社会に伝える一助になるかもしれないと思った。地学的な講義を受けるのは中学生の時以来だったため、基礎知識が全くなく、河川争奪についてよく理解できなかった。（工学技術、1）
	良かった点：ずっと興味を持っていた内容でした。詳しい内容で大変良かったです。 NUMO殿の考え方の一端も知ることができた点も良かったです。（工学技術、2年）
	日本の地質の特性とサイト選定時に考慮すべき項目について、理解できました。写真や図を用いてご説明いただいたので、わかりやすかったです。（工学技術、1年）
	講演中の執拗な謝罪が、目に余った。（地質環境、3年）
	内容の幅がかなり広いので，限られた時間に，内容が絞られた方が，専門外のもの取って，わかりやすいかもしれません．（工学技術、17年）
	パワーポイントが前に行ったり、後ろに行ったりと聞き手からすると非常に分かりづらいと感じました。特に、私は専門ではなく聞く立場に余裕がなかったので、少し理解するのが大変でした。（工学技術、2年）
	法律でどのように規定されているのか学べたのが良かった． 教材は内容によく即していた． 進め方については，要点を絞って話すべきだと思った．（地質環境、5年）
	地層処分に適さない場所の説明について知らなかったこともあったので聞けて良かった。 内容が広すぎたため、中途半端になってしまった部分があり残念だった。（地質環境、3年）
	処分に望まれる地質環境3段階の調査全体像を話すことは難しいと思う。ただ、教材の難易度はもう少し難しく（詳しく）していただきたかった。（地質環境、2年）
	図が多いところは直感的にわかりやすかったが、キーワードを記入していただけると後で見返したときに思い出しやすいと思いました。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	プレゼン資料と紙資料が大きく異なったのは残念でしたが、NUMOのこれまでのレポートや自らの資料をもとに，非常にわかりやすく整理された資料であったと思います。（地質環境、3年）
	【よかった点】 ・地層処分に望まれる環境を一覧で整理されており、理解しやすくよかった ・将来的な気候変動リスクも織り込もうとされているのは、理解した。（工学技術、3年）
	発表資料と配布資料があまりにも異なるため集中し難かった。（安全評価、6年）
	自らの研究事例にも触れ、地層処分事業において、サイトを選定する際の注意点について　理解できた。（安全評価、27年）
	話が少しぎこちなかった。 内容については専門的な内容だったため、理解が難しい部分もあったが、どうしてそれらの情報が事業の推進に必要になるのかがいまいちわからなかった。（地質環境、1年）
	各自然現象や地質構造が地層処分においてどのように関わってくるのか、後の説明者に任せるという言い方だったが、簡潔にでも説明してほしかった。（地質環境、2年/安全評価、1年）

講義ID.講義タイトル	意見・要望等
05.地層処分に望まれる地質環境と3段階の調査2（地層処分に好ましい地域の科学的特性）	話は面白かったが、人材育成という観点での効果はどうだろうか。本講義はサイエンスコミュニケーターあるいはゼネラリスト育成のためのものなので、いくら興味深い話をしても、プレゼン資料で形として残っていないと、次世代の方には伝えられないと思う。（地質環境、25年）
	用語説明の表をつけるなど、聞き手に配慮した資料作りであった。（工学技術、5年）
	・講師が伝えたいとしたことは理解できた。意義のあるメッセージであった。 ・特性マップ作成の経緯に関連した事実とマップに関連した課題認識、マップ以外の課題認識の混在があり、講義の流れ的には付いていきにくい側面もあった。 ・共通コメントは04参照のこと。（安全評価、25年）
	中間の取りまとめの話など時系列が聞けて良かった。専門でない人でも分かるように用語の説明ページがあって、見直すときにも役に立った。（地質環境、1年）
	●講義に対する意見ではないが，「科学的特性マップに関する理解度」について，方針が曖昧である。本アンケート3ページ目に記した通り。 ●科学的特性マップを，今後どうしていくか気になる。このままなのか，精度を高めるのか，など。　（地質環境、1年）
	特性マップ作成時の議論のご紹介は興味深い内容でしたが、資料の文字が小さく読み取り辛いです。（地質環境、18年）
	科学的特性マップの策定背景を知ることができ、参考になった。地下水解析の部分は、09.調査・評価技術各論−長期安定性2（地下水）でまとめて説明してもよいと感じた。 （地質環境、10年）
	言葉の定義をはっきりし、他者と共有することが重要であると理解した。ワーキンググループでのご経験を随所に織り交ぜながらお話しいただき、興味深く聴講できた。 （地質環境、4年）
	はなはだ僭越ではありますが，豊富な経験に裏打ちされた素晴らしい講義だったと思います。大事なことは資料をきれいに仕上げることではなく，いかに自分の言葉で語れるかであるということを再認識しました。（安全評価、20年）
	講義の内容が良かったことは言うまでもないが、話の技術の高さで引き込まれよく理解できたと思う。　（工学技術、2年）
	地下水シミュレーションには質量保存則のみ使われていて，エネルギー保存則は入っていないというお話は非常に納得でき，とてもためになりました。（安全評価、1年）
	講演のタイトルと教科書の内容が一致していない。タイトル的には「04」の前半の講演内容の方が合致していると感じた。（地質環境、17年）
	用語集はいつか役に立ちそうな気がする。（工学技術、3年）
	コミュニケーションに重点をおいて、相手によって言葉を使い分けることなどを実例を交えて紹介いただいたところが良かった。（広聴・広報、5年）
	科学的特性マップの成り立ちについて集中した方が良い。それ以外のところはコメントできない。裏話は裏話として終わる。（地質環境、26年）
	裏話のような話が興味を引き全体の話が良く理解できた（工学技術、10年/安全評価、5年）
	語句の説明等の記載もあり、科学的特性マップ公表までの裏話のような内容も聞けて興味深かった。（広聴・広報、4年）
	科学的特性マップについて、その検討過程の裏話も交えて解説していただき、大変参考になりました。（広聴・広報、2年）
	冒頭にご説明頂いた、（本日、何度か話題に上がった）SDMの概要説明（地質・地質構造・地質環境の違い）は分かりやすく参考になった。用語と説明の解釈は、性質の異なるステークホルダーに対し、押さえておかなければいけないことだと感じた。また、地層処分事業においても、分野の異なる専門家同士、各プロセスで必要となるデータの解釈は、意思疎通を図る必要性を感じた。話の中で、少しばかし触れた、事業が与える、地域活性の必要性についても、実施主体として考えるいい機会となった。その他、資料を読み返してもわかる内容であったら尚よかったです。（工学技術、1年）
	資料については文字が多いものの、最初に用語集が記載されていて、専門外の人間にも配慮されていた点はわかりやすくてよい。数式の意味等も説明されているので、この後の講義でも役立つものであった。（その他、7年）
	資料外の話が面白かった（地質環境、7年）
	地質モデルと地質環境モデルの違いについてのご説明が大変分かりやすかったと思います。また、サイエンスコミュニケーターについての講義は大変勉強になりました。（工学技術、7年）
	処分技術WGの議論はおおよそ把握していたことと、講師の説明方法が上手だったので、講義内容は比較的理解しやすかったです。私の知識不足があって、資料後半の地下水の解析については理解が弱いと思います。（その他、8年）
	ご講演最初のお話が大変興味深く、若い世代に伝えるべき内容だと思いました。また、専門家分野ごとに欲しい情報が違う、テクニカルタームの一人歩きなど処分事業を学び始めてからずっと気になっている部分でもあるので、ぜひ先生のような国からの信頼のある有識者に声を上げていただき統一化、あるいはテクニカルタームを正しく伝える方法をご指導いただきたいです。（工学技術、1年/安全
	3分野連携の要となるSDMの定義はよく理解できた。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	水の循環の話で、地下水と降雨の違いを対比させながら説明しているのが印象に残った。（安全評価、1年）
	経験をもとに話をしていただいたのがよかった。（安全評価、9年）
	ご自身が委員会のなかで議論していた際にもどかしく感じていた点についてお話しされていたので、それはそれで、メッセージ性があって考えさせられたと。（広聴・広報、1年）
	科学的特性マップに対する包括的な話で、わかりやすくご説明いただけた。（安全評価、2年）
	用語の用法など考えさせられる内容だった。 スライドを行ったり来たりでやや流れを追いづらかった。（地質環境、9年）
	地層処分に適したサイトの地質環境がどのような文献で示されているのかがよくわかりました。ただ、少し講義資料の字の大きさが小さいように思いました。（工学技術、1年）
	文献調査を実施するにあたり、全国データが必要であり、既に整備されているデータが存在していることを認識することができました。また、科学的特性マップ作成過程の考え方に触れていただいたのはよかったです。（地質環境、10年/その他、20年）
	冒頭の、地質モデルという言葉の理解度の低さに関するお話から、処分関連の研究 開発があまり体系化されてきていないのかもしれないと感じました。分野ごとのこれまで の研究の経緯にたいしての興味も沸いた。また、今後さらに候補地を絞り込むための 基準の境界値をどのように設定するかという課題を認識できた。（工学技術、1）
	良かった点：聞き取りやすく、分かりやすい内容だった点。（工学技術、2年）
	解析・シミュレーション方法などの実情について詳しくご説明いただき、大変興味深かったです。（工学技術、1年）
	科学特性マップの裏話など、大変興味深く聴講できた。（地質環境、3年）
	非常に重要な話でしたが，最初の心理学の話がもっとあれば，大変ありがたいです．（工学技術、17年）
	SDMに対して，地学の専門用語を使わずに，間隙比，透水係数など工学の専門用語を用いて作成しなければならないというのは，非常に共感できた．実際に，地学は，中学以来勉強していない人が多いと思うので，そのように説明していただければイメージがわきやすいと思います．（工学技術、2年）
	ユーモアを挟んで聴衆の意識を向けるのは流石． タイトルに沿って，シンプルながら基礎を抑えられる内容だった．（地質環境、5年）
	公開されているデータの裏側のことなども知ることができてよかった。 モデルのとらえ方についても言及されていたので、理解が深まった。（地質環境、3年）
	教材の最初に用語説明があったのは、非常に分かりやすい。また、科学特性マップがどういった経緯・基準で作成されたのかに関する説明は勉強になった。（地質環境、2年）
	講義は刺激的で魅力的であったが、教材のスライドだけでは伝えたいメッセージが見えないので、この点を改善していただけると助かります。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	具体的にデータが示されていたのはよかったと思います。（地質環境、3年）
	【お願いしたい点】質疑でも挙がっていたが、特性マップ決定の経緯など、暗黙知の部分をとりまとめて頂くことは後に有用になると感じる。（工学技術、3年）
	科学的特性マップの要件に対して地質と地下水の両面において解説がなされていて理解しやすかった。（安全評価、6年）
	導入部分のサイエンスコミュニケーターに関する話が本セミナーの目的と強く関連していたように感じて印象深かった。（地質環境、1年）
	この講義が全体でどのような枠組みなのかわからないが、具体的な調査事例を示したうえで、様々な問題点について言及してほしかった。（地質環境、2年/安全評価、1年）

講義ID.講義タイトル	意見・要望等
06.調査・評価技術各論-自然現象1 （火山・火成活動、深部流体）	資料も丁寧で、説明もわかりやすかった。話すスピードもちょうどよかったと思う。人材育成という点では講義06（と講義09）の資料レベルが最も良かったのではないか。電磁探査の原理の部分での話があるとさらに良かったかもしれないが、これ以上細かく話をするのは難しいかもしれない。（地質環境、25年）
	普段なじみのない内容の発表であったが、メカニズム等の初歩的な部分も丁寧に説明がありわかりやすかった。そのうえで、最近の研究成果等も織り交ぜた発表であったため、理解しやすかった。（工学技術、5年）
	・自然事象に関する基本的な事項の説明、将来予測、調査・評価事例を体系的に説明されており、良い講義であった。 ・調査・評価手法の詳細の理解することは困難であったが概念的な理解はできたと思う。 ・これらの調査・評価手法が事業のどの段階でどのようなに活用されるのかについて、もう少し丁寧な説明があるとなお良いと思った。 ・共通コメントは04参照のこと。（安全評価、25年）
	難しい言葉なくわかりやすかった。発表の流れが理解しやすかった。物理的・化学的両方からの研究について説明があってよかった。（地質環境、1年）
	●所属なので容易に理解した。ただし，他の参加者と話したところ，やはり専門外の方々には難しすぎるようだった。（地質環境、1年）
	ここまでの講義で処分システムに期待される機能やそれを確保するための考え方についての解説が必要だと思います。（地質環境、18年）
	基礎的な説明から、実際の調査事例までが順序立てて説明されており理解しやすかった。　（地質環境、10年）
	基礎的な部分の説明と具体的な調査研究事例の紹介とがバランスよく説明されており、またスライドも鮮明な図ベースで構成されていてわかりやすかった。（地質環境、4年）
	学樹的な内容をわかりやすく説明されていたと思います。04.の講義の前半に事例が写真で紹介されていたかと思いますので，うまく組み合わせると私のような素人にはよりわかりやすいと思います。（安全評価、20年）
	地質学的現象の将来予測の方法論の説明がコンパクトにまとめられており、他の講義の内容も含めてよく理解ができた。（工学技術、2年）
	全くの専門外だったので，初めて知ることが多く，講義を面白く聴くことができました。トモグラフィーといった最新の調査方法は技術が進んでいることを実感することができたので良かったです。　（安全評価、1年）
	講演内容は専門外の分野の人を意識したものとなっているため、理解しやすかった。一方で、タイトルでは調査・評価技術となっているが、講演全体としては、地質学の概論のような内容になっていた。もっと、地層処分で必要となる調査・評価技術にフォーカスして、既存の調査・評価技術で対応できているところと、できていないところ（今後の課題：分野間連携の観点も含めて）を明確にした方がよいと感じた。（地質環境、17年）
	話すスピードがちょうどよかったので内容にちゃんと付いていけた。資料が全体的にわかりやすかった。自分の業務とはあまり関係ないので有用性は2　（工学技術、3年）
	講演のテンポが良かった。質疑応答も自信をもって対応されていて、聴衆に好印象を与えることができていると思われます。（広聴・広報、5年）
	①専門外の方々へのプレゼンとして、よく練れていると思う。 ②深部流体の説明で引用したMorikawa et al.2016のモデルは、地質構造図としては正しく無い（地表で認識されるいわゆる構造線はこんな構造をしていない）ので引用は考え直した方が良い。ただし、深部から地表に伸びる「新しい」「別の」断層（経路）の存在は否定しない。（地質環境、26年）
	・わかりやすい説明で全体的に理解が進んだ ・測定技術の説明が参考になった（工学技術、10年/安全評価、5年）
	資料に図解が多く分かりやすかった。説明の仕方もポイントを押さえつつ聞きやすいスピードで説明いただき、分析の状況などが理解できた。（広聴・広報、4年）
	質疑において火山フロントより東に火山ができる可能性が極めて低い理由を説明していただいた点がよかったです。（広聴・広報、2年）
	講義04と合わせ、地震や火成活動のメカニズム（概要）を学ぶことができ、それが与える影響について知ることができた。質疑でもあった日本列島の火山活動の履歴で、東日本と西日本の特徴を科学的特性マップに活かせたら..とも感じたが、NUMOとして、様々な場所で処分場建設が可能である趣旨からずれるとも感じた。 地下構造（マグマ・深部流体）把握のアプローチ手法は技術の概要のみだが知る機会となった、調査手法は複合的な調査が必要であることは、水道（みずみち）の調査手法と似てはいるが、その精度や費用はより深く知りたいと思った。（工学技術、1年）
	資料には図が多く、伝えたいことが明確でわかりやすかった。内容も具体的なものが多く、分野外でも興味を持ちやすいものだった。（その他、7年）
	資料が綺麗で見やすかった　（地質環境、7年）
	地質学的現象の将来予測の方法論が簡潔に整理されていて参考になりました。各予測の考え方は汎用性が高いので、より詳細なお話を伺いたいと思いました。（工学技術、7年）
	説明方法も資料で用いていた図も非常に分かり易かったです。（その他、8年）
	前の2つをより専門的にご解説頂いたと理解しました。不慣れな部分もあり、難しかったです。ただ、前の2つがあったので少しわかりました。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	火山のメカニズムや予測方法についてよく理解できた。 地質環境でもサイト選定に使うものと、SDMを通じて設計や安全評価までつながるものがある。これは前者の話と理解した。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	説明が丁寧に順を追ったものになっていた。 内容は、あまり親しみがなかったこともあり難しかった。（安全評価、1年）
	ゆっくり話していただいたのがよかった。（安全評価、9年）
	専門的すぎず、分かりやすかった。非火山地域での地下のマグマの捉え方、深部流体の調査事例など、具体例があって分かりやすかった。実際には、火山活動の影響の避け方について、不確実性が伴うこともあると思うので、どのような不確実なことが想定されるのか、それをどのよう精度よく調査していくのか、などについても聞いてみたいと思った。（広聴・広報、1年）
	イントロから非常に丁寧にわかりやすくご説明いただけた。スピーチも丁寧で、分野外の人に説明する見本のような発表でした。（安全評価、2年）
	データが豊富で解説がわかりやすかった。（地質環境、9年）
	深部流体のことなどよく知らないことがよくわかりました。火山や深部流体などの調査方法についても知らないことが多かったのでとても勉強になりました。（工学技術、1年）
	火山のない地域においても深部流体の有無を把握することが重要であると認識することができました。まだ、その調査方法についても示されていたことがよかったです。（地質環境、10年/その他、20年）
	社会的に「日本は地震、火山が多い」という大まかなイメージが自分自身も含め定着 しているが、実際には火山フロントの存在など地学的特性の違いがあることを勉強でき てよかった。講義05から特性マップは全国統一の基準で作られたという経緯を解説 して頂いたが、今後は地域特性も盛り込んで改定していく必要があるのかもしれないと 感じた。（工学技術、1）
	良かった点：火成活動や深部流体について、ほとんど知らなかった内容で有意義でした。 難しかった点：事前知識に乏しかったため、難しく感じました。（工学技術、2年）
	日本の地質の特徴である火山活動について、よく理解できました。地殻構造の推定手法等解析方法については、勉強不足で難しかったです。（工学技術、1年）
	JAEAの自然事象についての研究を網羅的に理解できた。（地質環境、3年）
	重要な話でしたが，専門外であまりfollowできませんでした．（工学技術、17年）
	図が多く，非常に分かりやすい発表でした．（工学技術、1）
	内容が難しかったです．もう少しレベルを落としていただけると幸いです．（工学技術、2年）
	非常に丁寧な説明で理解が捗った． 火山や熱活動の調査手法を学べた．（地質環境、5年）
	日本における火成活動についてわかりやすくて聞きやすかった。 マグマだまりが存在していることはわかったが、その後のマグマの動きについてもう少し聞きたかった。（地質環境、3年）
	専門用語が多いように感じたが、講義内容としては理解しやすいと感じた。特に、日本列島の特徴と地層処分で考慮すべき自然現象は関連性が分かりやすかった。個人的には「深部流体」というフレーズは聞いたことがあるが、どういった性質で何に悪影響を及ぼすか知らなかったので、勉強になった。（地質環境、2年）
	講義とスライドともに大変分かりやすい内容でした。ありがとうございました。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	実例を示しながら，説明されたのはよかったと思います。深部流体はあまり，なじみのないものですが，重要であることがわかりました。（地質環境、3年）
	【よかった点】火山（マグマ）の成り立ちから、深部流体とは何か、まで基本的な事項を抑えることができた。（工学技術、3年）
	火山活動につてわかりやすくまとまっていた。また実際の調査手法についても、説明されており非常にわかりやすかった。（安全評価、6年）
	技術的な内容が中心であったが、丁寧に解説され、理解できた。（安全評価、27年）
	テーマの重要性やどのように役に立つのかといったポイントがわからなかった。 大学の授業を受けているような感じ。（地質環境、1年）
	現象の説明がわかりやすかった。 地層処分との関連がわかりにくかった。（地質環境、2年/安全評価、1年）

講義ID.講義タイトル	意見・要望等
07.調査・評価技術各論-自然現象2(隆起運動、侵食作用、断層運動)	内容はよくわかったが、やや高度だった気がする。段丘の知識があることが前提になっていたので、この部分は平易に説明した方が良いと思った。(地質環境、25年)
	地層処分において重要となる将来予測に関する考え方が示されていたのがよかった。将来予測の考え方は、隆起・浸食等の分野に限った話ではなく、他の分野にも活用できる話であるため、もう少し時間を割いて説明してもよかったと思う。(工学技術、5年)
	・技術的な詳細を完全に理解することは困難であったが、隆起・浸食の調査手法・評価の考え方やアプローチについて、概念的に理解することができた。 ・共通コメントは04参照のこと。(安全評価、25年)
	調査の様子も含めて隆起侵食について詳しく知ることができた。演習として、調査の話をもっと詳しく話してもらうのもいいかもしれないと思った。(地質環境、1年)
	●半分、専門みたいなものなので，容易に理解できた。ただし，実際の研究例の紹介は，非常に難しく感じた。(地質環境、1年)
	地質環境の調査として行われる調査分野のイメージを持ってもらうための講義として、有意義であったと思います。(地質環境、18年)
	以前、別の場所で同じ講演を聞いたことがあったが、今回の方がポイントが絞られており理解しやすかった。(地質環境、10年)
	分野外の者からすると、隆起・沈降等の基本的な用語から解説していただけたことは大変有用だった。一方で、隆起・侵食量の見積もりなど(ご自身の研究に関する部分)はさらっと過ぎてしまって、重要なことだとは思うもののあまり理解できなかった。すごく有用であった部分とほとんどわからない部分が混在していた印象。 (地質環境、4年)
	業界用語と専門用語を対比しながら説明されるなど，異分野の方に配慮したわかりやすい講義だったと思います。(安全評価、20年)
	語句の定義が丁寧になされているとともに図や写真を用いた説明でイメージを明確にできる講義内容であった。(工学技術、2年)
	隆起と浸食の定義からお話ししてくれたので，門外漢でもよくわかりました。資料では写真や図を多用してくれたのでわかりやすく良かったです。(安全評価、1年)
	内容を詰め込みすぎているため話すスピードが速く、また専門用語が多く、理解しづらかった。(地質環境、17年)
	説明が少し速かった。自分の業務とはあまり関係ないので有用性は2 (工学技術、3年)
	例を示す画像がわかりやすかった。(広聴・広報、5年)
	①対象者の想定が違ったようだ。 ②カバーしている範囲が狭い。(地質環境、26年)
	・貴重な写真を用いられて教材が良かった ・もう少し時間があったほうが良いかもしれないと感じた (工学技術、10年/安全評価、5年)
	写真等も多用されていて資料は分かりやすかった。専門用語が分からないことがありついていくのが少し大変だった。一方的にパーッと話されていたので、もう少し余裕をもって説明いただけると良かったと感じた。(広聴・広報、4年)
	隆起沈降モデルや段丘の下方への侵食について理解が及ばなかったので、もう少し基礎的な内容を交えて説明して欲しいと感じました。また、12Pの切り合いの説明は過程が想像しづらいので①～⑥それぞれに図があると大変助かります。(広聴・広報、2年)
	前半、基本事項を抑えて頂くことで、知うだづもりでいた隆起・浸蝕・沈降と体積の概念を学ぶ機会となうだ。百年列島の地質特色・活断層の分布を用いて地層処分に活かせられるごとは理解していただが、調査ステップが(思いのほかシンプルに)体系化されており、分かりやすかった。時間スケールが大きいため、測量等調査によるデータの信頼性は不確実にも感じ、将来予測の難しさを感じた。(工学技術、1年)
	資料の文字は多いが説明者が分野外の人間に説明する意識を持っており、わかりやすかった。写真が多いので、スライド一枚一枚が文字の量のわりに主題が明確であった。(その他、7年)
	図や写真を用いた説明が分かりやすくてよかった (地質環境、7年)
	具体的でまとまっていて分かりやすい講義でした。資料の最後に参考文献を付けて下さったことも大変良かったと思います。また、地層処分で用いられている用語には、この分野特有のものがあることなど、勉強になることが多くありました。(工学技術、7年)
	予備知識が不十分なので、内容が吸収しきれなかったと思います。説明方法は良かったと思います。スライド12の図が少々分かりにくかったです。資料の量に対して、講師の説明の時間が短すぎた気がしました。(その他、8年)
	自分が専門外のせいだと思うが、最初の用語の説明や現象論できなところはよく理解できたが、モデルや評価解析の部分になると理解が難しかったです。(工学技術、1年/安全評価、4年)
	隆起・浸食の定義はよく理解できた。ただ、それが与える影響について具体的にどう扱うのか、安全評価とのつながりの部分とかについて、もう少し詳しい説明が欲しかった。(地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年)
	図が多く見やすかった。 内容は、あまり親しみがなかったこともあり難しかった。(安全評価、1年)
	沢山の専門用語について知ることができよかった。(安全評価、9年)
	隆起浸食について、自身の理解が追い付いていなかった部分もあったが、多くの方にとっては分かりやすかったのではないかと思う。(広聴・広報、1年)
	分野外の内容でしたが、ご丁寧にご説明いただけましたので、わかりやすかったです。(安全評価、2年)
	基礎から最新の研究までバランスが良い講演だったと思う。(地質環境、9年)
	隆起・沈降、体積・侵食の言葉の説明が最初にあり、ある程度理解して講義を聞くことができたように感じます。(工学技術、1年)
	将来予測を行うに当たっては斉一説の考え方が重要であることを認識することができました。(地質環境、10年/その他、20年)
	20ページの地質図について、本来の図の作成意図とは違った形で引用されたとのこと だったが、図の複雑さゆえに処分事業と結び付けて捉えることが難しかった。(工学技術、1)
	良かった点：非常に興味深い内容でした。特に、以前から隆起量の推定はどういう原理なのか、ということに興味があったため大変有意義でした。 難しかった点：事前知識に乏しかったため、やや難しく感じました。(工学技術、2年)
	将来予測に対する考え方を初めてお聞きして、勉強になりました。万が一に備えて様々な仮説をたてておくことが大切であると感じました。(工学技術、1年)
	地形学の基礎を復習することができ、有用であった。(地質環境、3年)
	非常に面白い話ですが，専門外でよく理解できませんでした．講師の活動・経験・内容は，地層処分内容ともっと関連させていただければありがたいです．(工学技術、17年)
	難易度が高く，あまり理解することができなかった．P10からの見積りの説明では，もっと概念的なことを詳細に説明していただければありがたいです．(工学技術、2年)
	興味のある分野だったので深く理解できた。(地質環境、5年)
	個人的に隆起については勉強をしていたので、話してもらった内容は理解できた。しかし、隆起について知識がない方が理解するのは難しいと思った。(地質環境、3年)
	専門用語の定義に関する説明は、非常に有用性があると思う。講義内容・教材は難しく感じたが、具体例があるのは非常に分かりやすいと感じた。参考文献の記載もあり、詳細を調べる際にも有用な教材だと感じた。(地質環境、2年)
	分野外の私から見ると、説明が概念的でよくわからないところがあった。(例えばp29)。もう少し分野外の人にも分かるように工夫して頂けると助かります。(工学技術、2年/安全評価、7年)
	地層処分では地下地質に注目されがちだが，地表の調査も非常に重要であることが示されよかったと思います。地表の調査は，情報があるようでないような状況なので，その成果を導き出すのは大変であるが，地下を理解するうえで，非常に重要な項目であることが示されていてよかったと思います。(地質環境、3年)
	【よかった点】隆起(段丘)の成り立ち含め、地層がどのように形作られたのかを理解することができた。日本は全体的に隆起傾向にある、というデータは興味深かった。(工学技術、3年)
	隆起・侵食現象についての専門家からの講義は初めてであり、参考になった。(安全評価、6年)
	話は非常にわかりやすく、一般の方も恐らく理解はできると思うが、事業を進める上でそれほど重要だとは感じなかった。(地質環境、1年)
	あまり勉強してこなかった分野なので非常に参考になった。(地質環境、2年/安全評価、1年)

大項目③：1月9日（2日目）の講義について（各講義に対する質問）	
講義ID.講義タイトル	意見・要望等
08.調査・評価技術各論−長期環境特性1（地質・岩盤）	わかりやすくて非常に良かった。特に地質図の不確実性の部分を強調された部分は勉強になった。（地質環境、25年）
	基本事項に絞った発表であり、発表資料の中で用語の説明等もされているため、セミナー後にも勉強資料として使用することができると感じた。（工学技術、5年）
	・地質学に関する基礎知識に関する講義については、当該分野のバックグラウンドを持たない者には非常に有益な講義であった。 ・ご経験に基づいたダムの実例に関するお話は、非常に興味を持って聞くことができた。（安全評価、25年）
	基本的な用語の説明がきちんとされていて分かりやすかった。地質図に関して、ダムと比較したり実際の例を示したりしていて理解しやすかった。（地質環境、1年）
	●専門分野であるので，非常に楽しかった。 ●ダム建設の経験を語ってくださったのが，大変に参考になる。　（地質環境、1年）
	講義はわかりやすく、地質環境の調査に携わる方にとっては非常に有意義な内容だと思います。一方で、その他の分野にかかわる方にとっては優先度が低いのではないかとも思いました。（地質環境、18年）
	基礎的な説明から、実際の調査事例までが順序立てて説明されており理解しやすかった。（地質環境、10年）
	昨日に引き続き、地質関係の基礎的な内容を重点的にご解説いただき有用であった。07.の講義に比べると理解が難しい部分はなかった（講義の時間帯の問題？）。また、地層処分のみでなくダムでのご経験についてもご紹介いただき、共通点や相違点が興味深かった。（地質環境、4年）
	業界用語と専門用語を対比しながら説明されるなど，異分野の方に配慮したわかりやすい講義だったと思います。講師の方の想い（こだわり）が伝わる，大変興味深い講義でした。　（安全評価、20年）
	丁寧な語句の説明と図を活用した講義であり、専門外の自身にとってもモノや現象をイメージしやすい内容であり、とても理解しやすかった。　（工学技術、2年）
	地質学がもともと炭鉱を見つけるために生まれた学問であるという話はこれまで知らなかったので新鮮でした。岩石の分別の仕方にも何通りかの方法があるというのは，経験則に基づいているようで定義がはっきりしないという印象を受けました。　（安全評価、1年）
	講演の内容が地質全般についてだったので、もう少し、その中で地層処分の地質分野の中で求められる情報に集中して話してもらえるとよいと思う。（地質環境、17年）
	イラストはわかりやすかった。（工学技術、3年）
	不確実性にも色々とあることがわかった。特に地質図の精度が一様ではないことがわかったことが良かった。ダム調査の事例を挙げて、類似性や相違点を述べる形が伝わりやすかった。（広聴・広報、5年）
	対象者の想定が違ったようだ。（地質環境、26年）
	・用語解説から初学者にとって非常に丁寧に説明頂きとても分かりやすかった ・今回のセミナーの講義として適切な内容・レベルであると思う（工学技術、10年/安全評価、5年）
	専門的な内容で時間も足りなかったように感じた。改めて資料を見返すと有用なものだと感じたので、もう少しじっくり説明を聞きたかったと思う。（広聴・広報、4年）
	地質図に不確実性があり、内容の精度を読み解くには技能が必要で専門家以外にはわからないものであると初めて知りました。また、ダムの建設で50mピッチでのボーリング調査をしても実際の地質環境から10%程度ずれることも初めて知りました。（広聴・広報、2年）
	当たり前であるが、必要とされる地質環境モデルは知りたい地質構造（ダム等）、また求められる要件によって、調査スパンや規模が変わることを再認識できた。それが地層処分事業では、その程度求められるか、仮定されていると思うが、個人的にも学ぶ必要があると感じた。スライド、岩石の分類～概要まで、知らないことが多く初歩的なお話をしていただき、助かりました。資料もポイントキーワードが多くよかったです。（工学技術、1年）
	資料については文字が多かったものの、講師の説明がうまく、内容については非常にわかりやすかった。特に褶曲構造と貯水池の話は非常に興味を持つことができた。（その他、7年）
	図や写真を用いた説明が分かりやすくてよかった　（地質環境、7年）
	ダムの地質学との比較や、講師の方の実務経験に基づく内容でしたので、具体的で大変分かりやすい講義でした。資料の最後に参考文献や参考資料を付けて下さったので、参照してより理解を深めたいと思います。（工学技術、7年）
	予備知識が不十分なので、内容が吸収しきれなかったと思います。説明方法は良かったと思います。資料の量に対して、講師の説明の時間が短すぎた気がしました。（その他、8年）
	ダムとの比較など一般産業の知見を参考にする、応用する視点はとても重要だと思っており、その好例だと思った。基本的なところの説明もわかりやすく、地層処分を知る他分野の専門家の講義としてスタンスも発表もとても良かったと思います。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	既存情報や調査データから概念モデル→SDMの作成の流れがよく理解できた。専門的な用語もわかりやすく説明されていた。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	講義の狙いがよく絞られていた。 情報が多く理解は大変だった。（安全評価、1年）
	留意点やダムの調査をもとにした話などにより理解がしやすかった。（安全評価、9年）
	専門的すぎず、分かりやすかった。ダム建設の際の地質調査の事例なども交えての説明だったので、注意点すべき点など具体的なイメージを持つことができ、分かりやすかった。地層処分のサイト選定の際の評価方法に有用な点があれば、取り入れたいと思うので、そういう視点での話も聞いてみたいと思った。（広聴・広報、1年）
	講義ID.07と同様、ご丁寧に説明いただけた。プログラム的には、ID.07と同日に実施していただけたほうが良かったと思います。（安全評価、2年）
	地質学と工学分野とのつながりがよく分かった。（地質環境、9年）
	最後に言葉を説明した参考資料が付帯されており、言葉の意味をよく知らない人に対してもわかりやすいスライドであった。（工学技術、1年）
	ダム建設を事例として実施される調査の方法と、地質図を取り扱う際の不確実性に関する注意点について認識することができました。（地質環境、10年/その他、20年）
	単なる学術的な情報の提供にとどまらず、地質の専門家という立場から、調査ボーリング孔の掘り方について等の意見も述べられていたのが考えるきっかけとなり、興味が増した。（工学技術、1）
	良かった点：地層に関する「法則」のお話や「地層処分での地質学」のお話が、（もちろんその他の部分も）この分野への理解の助けになると感じた点です。 「地質図は作業仮説のひとつである」、との言葉も分かりやすく、印象に残りました。（工学技術、2年）
	応用地質の歴史も振り返ることができ、有用であった。（地質環境、3年）
	非常に面白い話ですが，専門外でよく理解できませんでした． 講師の活動・経験・内容は，地層処分内容ともっと関連させていただければありがたいです．（工学技術、17年）
	講義の最後にあった地層処分分野にこだわらずに，様々な分野に出て学び，物事を多角的に判断することが大事ということは，非常に心に残りました．これから，社会に出る上で，地層処分に関わらず．広い視野を持って多くのことに挑戦したいと思いました．（工学技術、2年）
	専門用語は門外の方にとっては難しいかと思いきやそうでもなかった。（地質環境、5年）
	地層処分に関する地質について、広く浅くで分かりやすかった。私は地質を勉強してきた下地があったので、スムーズに聞けたが、知識がない人にとっては理解が追い付かないかもしれない。（地質環境、3年）
	ダム調査を例にした地質・岩盤調査手法の説明は分かりやすかった。他の構造物建造に関わる調査事例を参考にするべきことは私も賛成である。個人的な意見では、あるが資源工学や電力土木などの事例を積極的に取り入れるべきだと私も考える。（地質環境、2年）
	日本の地質環境特性について詳細にまとめられており、大変勉強になりました。一方、内容の密度が高いので講義だけでは理解しきれませんでした。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	原理原則や実例を写真や図が多く活用され，非常にわかりやすかったと思います。 地質に関しては，既存技術活用により可能であることがしめされ，その時の課題（調査密度がダムと比べあらくなる）が示されたのは，他の分野の人には大変有用な情報であったと思います。（地質環境、3年）
	【よかった点】 ・地質学、岩盤に関する基礎知識を簡単に浚えた ・サイト選定に重要なポイント（母岩・水理基盤の年代情報と将来的な変動予測）が何か理解できた。（工学技術、3年）
	用語の解説が多くなされていたが、その説明に用いられている用語がわからないため、理解できない部分があった。（安全評価、6年）
	・なじみの薄い地質学について，基礎の概観からわが国の地質の特徴，ダムに関連した具体例まで，わかりやすくまとめられていたと思う． ・仕方ない部分と思っているが，引用の図が細かく，配付資料でも判読しづらい部分があった．せめて，配付資料では確認できるように，解像度を上げられるものがあれば可能な範囲で対応を望む．（工学技術、20年/安全評価、20年）
	初日の講義と同様に、事業推進にどのように関わってくるのかという点が少しわかりにくかった。（地質環境、1年）
	地質に関する基本的な用語の解説があり、わかりやすかった。（地質環境、2年/安全評価、1年）

講義ID.講義タイトル	意見・要望等
09.調査・評価技術各論-地質環境特性2(地下水)	広域の地下水の流れについて、物理的、化学的な説明があった。専門外の人に対してわかりやすく話そうという意図が感じられた。水質や同位体に関する説明がなかったのは残念。(地質環境、25年)
	地下水の流れの原理について丁寧に説明されており、土木・地質以外の分野以外の人にとっては基礎を学ぶいい機会となったと思う。 (工学技術、5年)
	・地下水に関する基礎的な情報、地層処分事業における地下水に関する研究の位置づけなどについて体系的に整理されており、わかりやすい講義であったと思います。 ・ダルシー則、水頭の説明に少し時間をかけ過ぎ感はありました。深部地下水調査の具体例などについても、もう少し説明があると良かったかと思います(JAEA or 電中研の分担？) ・ダルシー流速と実流速の話もあるとより良かったと思います(これも他の講義との取り合い調整の問題かもしれませんが…)。 (安全評価、25年)
	水理水頭についてわかりやすく説明されていた。地下水の性質を知ることが出来てよかった。SDMへの応用性も理解することができた。(地質環境、1年)
	●地下水の基本的なところを学ぶことができて大変に有用である。 ●理解度「3」は，私自身の反省を込めている。 ●進め方「5＋」は，章立てをアドリブで変更し，分かりやすくなっていたことを評価した。 (地質環境、1年)
	地質環境の調査として行われる調査分野のイメージを持ってもらうための講義として、有意義であったと思います。 (地質環境、18年)
	大学の講義を聞いているようで、非常に理解しやすかった。個人的には調査事例の説明がもう少しあってもよかったと感じた。 (地質環境、10年)
	水理学の基礎的な知識について、事例も交えながらご説明いただき理解が促進された。これまでの自身の業務では、水質のみの観点から地下水を見ることが多かったが、地下水流動と合わせて解釈すべきというコアメッセージが特に印象に残り参考になった。 (地質環境、4年)
	大変わかりやすい説明で、地下水に対する理解を深めることができたと思います。個人的には地下水のモデル化などの内容も知りたいところではありましたが、それは次のステップと割り切った潔さがよかったのではないかと思います。 (安全評価、20年)
	言葉の定義を明確にしたのちに、実際の減少について説明し調査方法を解説するという講義の構成がとても分かり易く、しっかりと地下水のイメージが持てる説明であった。 (工学技術、2年)
	資料も説明も大変分かり易くとても良かったと思います。地下水についての知識が全くなくても理解できるような講義でした。用語の定義も丁寧に説明していただいたので良かったです。 (安全評価、1年)
	講師なので、評価できない。(地質環境、17年)
	説明がゆっくりでわかりやすかった。想像しやすい例を使って説明していたのがよかったと思う。(工学技術、3年)
	水理水頭の話がわかりやすい事例を用いていてスムーズに理解できた。(広聴・広報、5年)
	①一般論については面白かったと思う。SDMとの関わりについては、SDMに媚びる必要はない。地下水がもたらす影響についての説明がなされることが本質であり、SDMは表現方法に過ぎない。 ②「地下水の流れは地質によって決まる」を定説としているのは誰か。地質屋は器であると考えているが、地層中の水がどう流れるかは別と考えている。例えば、ダムでいえば、水圧がかかった時、掘削(地形改変)を行った時などにどのようなことがあるかを想定するなど、様々な外部要因に対して地層がどう応答するかを想像している。(地質環境、26年)
	・初学者にとって非常に丁寧に説明頂きとても分かりやすかった ・今回のセミナーの講義として適切な内容・レベルであると思う (工学技術、10年/安全評価、5年)
	説明がとても分かりやすかった。資料もポイントを押さえた内容に絞ってあり、図解も上手く使ってあり理解が増したと思うし、例えば一般の方々が対象であっても通用するものだと感じた。(地下水位の考え方や水利水頭の説明など) (広聴・広報、4年)
	地下水の流れをコップなど身近なもので例えてくれる説明は理解するうえで一助となった。 SDMの構築・解析・実測値との比較・条件にフィードバックの流れをイメージすることができた。(工学技術、7年)
	地下水位について用語を含め細かく定義やイメージを解説していただけた点がとても分かりやすく参考になりました。また、シュティダイアグラムについては今まで漠然と眺めていただけでよく理解していなかったのですが、今回の講義で1つの図の中でも縮尺が異なる場合があることをはじめて知りました。(広聴・広報、2年)
	講義内容、スライドがシンプル且つ明解なため、分かりやすかった。地下水調査方法をおさえるため、終盤まで、地下水に関する基礎の基礎として、水理学(物理)を説明頂き、頭の体操になった。調査方法では、深地層における地下水の採水は、技術的に様々な手法があり、それらの説明も頂けるとなおよかった。実際に気を付けるポイントや実情のお話がききたい。(工学技術、1年)
	資料に文字が少なく、一枚のスライドで何を伝えたいのかが明快であった。また内容についても具体的なものが多く、分野外の人間でも興味を持って受講することができた。(その他、7年)
	初心者にもわかりやすい資料，かつ，聞き手に理解してもらいたいという意思が感じられる講義で非常に良かった (地質環境、7年)
	地下水の調査方法、特にシュティフダイアグラムの内容と留意点の解説は勉強になりました。(工学技術、7年)
	私には難易度の高い内容ですが、講師の説明が上手でかつ資料も分かり易かったので、比較的よく理解できました。(その他、8年)
	現象論、言葉の定義から細かく説明していただき、とても地下水流動に関する理解が進んだ。話の進め方を直前で変えられていたが、とても分かりやすかったと思う。そもそものpptも大変わかりやすかったです。(工学技術、1年/安全評価、4年)
	他分野の人でもわかるように教材の内容はとても工夫されていた。一方で、安全評価とのつながりが最もある水質について、地下水形成過程やモデルでのシミュレーションで具体的にどのようにやられているかについての解説があった方がよかった。(地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年)
	字が大きく話題毎によく分けられていてスライドが見やすかった。(安全評価、1年)
	水頭の違いについてわかりやすくよかった。(安全評価、9年)
	地下水について知識がない人向けの地下水の流れの話が大部分を占めていたため、地下水の初心者向けの話としては有用だったかもしれないが、物足りないように感じた。できれば、地層処分のための地下水調査の留意点や具体などについて、説明があるとよかった。調査の一般的な話と、地下深部や沿岸域などのフィールドごとの調査の留意点、不確実性への対処方法などをより深い話があるとよかった。(広聴・広報、1年)
	非常に丁寧にわかりやすくご説明いただけた。分野外の人に理解してもらうための発表だということを心掛けていることがよくわかり、今回のセミナーの目的に沿ったプレゼンだったと思います。(安全評価、2年)
	地下水の基礎や調査法が分かりやすく説明されていた。(地質環境、9年)
	一番なじみの分野であったので、わかりやすい内容だと思った。地下水の理論的な部分が多いように感じた。なので、違う分野のひとには少しマニアックな内容なのではないかと感じた。(工学技術、1年)
	人工バリアを健全性に地下水がどのような影響を与えるのかを明らかにすることが重要であると認識することができました。(地質環境、10年/その他、20年)
	水頭について、物理にあまりなじみのない人にとってもわかりやすくかみ砕いた解説をさ れていたと思いました。また、地下水の化学的性質について、そういった性質を持つに 至ったプロセスにも注目すべきというお話が印象に残った。(工学技術、1)
	良かった点：熱量を感じた講義でした。初学者の方に向けて、説明を工夫されてるなと感じました。 最初のほうに仰られた「地下水の流れを把握することが目的」「水質は答え」という旨の言葉や、シミュレーションに関する部分で仰った「アウトプットが定量的でないとダメ、という考えはナンセンス。概念モデルが一番大事」という旨の言葉も大変印象に残り、良かったです。(工学技術、2年)
	分かりやすいモデル図を用いており、大変勉強になった。(地質環境、3年)
	個人的に，内容が若干浅いと気がします．(工学技術、17年)
	水頭のあたり，初心者に対してとても分かりやすいご説明でした．(工学技術、1)
	非常に分かりやすく，理解できました。(工学技術、2年)
	よく理解できた。(地質環境、5年)
	地下水の基本についてわかりやすかった。地下水の勉強をする上で良い教材だと思った。個人的にはもう少し詳しい内容を聞きたかった。(地質環境、3年)
	地下水について、初歩的な内容かつ補足説明などが充実しており、講義内容で大変分かりやすかった。また、他分野の研究者がグラフや値を見るときの注意点などを補足的に説明されていたことは勉強になった(スティフダイアグラムのスライドなど)。 講義内容だけでなく、他分野の方に説明する発表方法も勉強になる大変充実した内容であった。(地質環境、2年)
	講義のレベルは初学者向けで、表面的な内容を一通り概観したという印象でした。個人的には、もう少し詳細な内容があれば良いと思いました。(工学技術、2年/安全評価、7年)
	図がわかりやすく丁寧に説明されていたことは非常に良かったと思われます。 例えも，身近なものと比べ非常にわかりやすかったと思います。 一般の人，地下水技術に関して初心者に対しては，よい資料であると思います。(地質環境、3年)
	【よかった点】 ・地下水位の分布がどういう成り立ちで形成されるか、を理解することができた ・概念モデルの適切な構築が、水理地質モデルの構築に寄与することが理解できた。(工学技術、3年)
	地下水に関して基本的な内容から、実際に処分場に適用する導入が説明されており良かった。(安全評価、6年)
	・地下水について，非常に基礎的な部分から確認することができ，自分の認識を確認する良い機会になった． ・図も，単純ながら理解を助ける効果的なものであったと思う．(工学技術、20年/安全評価、20年)
	基礎的な部分をしっかりと噛み砕き、どうして地下水の調査が重要なのかという点について十分に触れていたように感じました。スライドの情報量も適正でわかりやすい講義だったと思います。(地質環境、1年)
	地質に関する基本的な用語の解説があり、わかりやすかった。(地質環境、2年/安全評価、1年)

講義ID.講義タイトル	意見・要望等
10.調査・評価事例（幌延を事例とした物質移行調査技術） （幌延を事例とした物質移行調査技術）	話自体は面白かったが、要素研究の紹介の印象を受けた。すなわち、この講義は地層処分の理解というよりも、パラメータの取得方法に関する話であるから、もう少しそのあたりを強調し、さらにより基礎的な部分から、たとえば物質移行式について丁寧に説明した方が良いかもしれない。（地質環境、25年）
	トレーサー試験や拡散試験など、実際に幌延で行われている事例の紹介であったが、単なる試験の紹介だけでなく、試験における難しさなども織り交ぜながら紹介していたのがよかった。（工学技術、5年）
	・地下研における物質移行研究の実例として興味深い話を聞くことができた。 ・本セミナーの目的や聴講者のバックグラウンドを考えると、試験手法や解析手法についての教科書的な一般的な解説を行った後に、幌延での実例（特有の苦労話等）を紹介された方が、より聴衆の理解が進んだのではないかと思います。 ・ダイポール試験の結果についても、手法開発成果に留まらず、結果の解釈の現状についても紹介もあるとより良かったと思います（質問にもありましたが…）。 ・処分事業・規制への反映・貢献という観点から、本研究の位置づけ、反映先についても言及があると良かった。（安全評価、25年）
	脱ガスを考慮したトレーサー試験について学ぶことができた。同じ所属であるが拠点が異なるので、本セミナーで詳しく聞くことが出来てよかった。（地質環境、1年）
	●この講義は，最終日の「核種移行」の話のあとの方が，しっくりくる気がする。なぜここに持ってきたのか。今まで「地質環境（自然現象）」，「地下水」の話をしていたのに，なぜ。 ●理解度「1」は，私自身の反省も込めている。　　（地質環境、1年）
	実際の調査・評価の事例のイメージを持ってもらうための講義として有意義であったと思いますが、物質移行調査のみならず地下研での研究事例を広く紹介いただけるとより良いと感じました。（地質環境、18年）
	現場での実際の試験で留意すべき点が簡潔に述べられていてわかりやすかった。割れ目に対する試験結果についても興味があり、可能な範囲でお示しいただけるとなおよかった。（地質環境、4年）
	幌延における調査研究について，わかりやすく説明されていたと思います。　（安全評価、20年）
	幌延の事例を基にした説明が分かり易く、実際の作業等についての理解が深まった。　（工学技術、2年）
	写真や図を使って説明していただいたので分かり易かったです。幌延でのトレーサー試験の方法など具体的な測定法がよくわかりました。　（安全評価、1年）
	話し方や内容については、早すぎず、多すぎずよかった。もし可能であれば、この技術が「17.核種移行解析モデル」とどのようにつながるのかについて説明を入れていただけるとよかったと思う。（地質環境、17年）
	図が見やすかった。（工学技術、3年）
	放射性物質をもちこまないという制約が、調査の手法にまで影響を与えたという点が興味深かった。これは一般の方との対話の中でも話せるトピックス。（広聴・広報、5年）
	①専門外の方への理解を取り付けるためには、イントロダクションを厚くするのも一策。 ②このプレゼンに対する要望では無いが、概要調査・精密調査と類似の先行事例を広く浅く紹介するというコンテンツが事前にあるとベターと感じた。（地質環境、26年）
	・事例紹介に先立って試験の目的等について丁寧な説明があったのが良かった ・幌延のこれまでの取組を（豊富な事例として）概説していただけるとよりよかったかもしれない （工学技術、10年/安全評価、5年）
	瑞浪でのトレーサー試験の様子や評価結果が興味深かったが、専門用語も多く十分理解するまでには至らなかった。（広聴・広報、4年）
	グラフの縦軸・横軸が明瞭でなく、注釈もなかったため、何を説明しているのか理解が困難だった。 有用性を感じて説明を聞いてはいたが、口頭で説明されている内容をスライドのグラフ上に注釈として書いてもらえればより理解しやすいと感じた。（工学技術、7年）
	物質移行試験はダイポール試験の印象が強く、マトリクスを対象とした拡散試験についてはあまり認識していなかったので勉強になりました。また、自治体との協定が放射性トレーサーまで排除してしまうことに驚きました。（広聴・広報、2年）
	放射性核種の拡散動向を知る上、物質移行技術は必要なものであることを理解しているつもりだが、今後、その技術がNUMOとして活用できるよう、学んでいかなければならないと認識した。JAEAは不確実性を取り除くため、繰り返しアプローチ等様々な手法を取られているが、トレーサー試験に限らず、概要からその調査精度、費用、現状詳細を合わせて学ぶ機会は必要と感じた。（工学技術、1年）
	幌延の深地層研究所で行っている研究の内容については、説明会等でも聞かれることがあり、今回どのような試験をしていて、それが地層処分事業においてどのような意味があるのかを知ることができたのは、大変有用だった。資料も図が分かりやすく配置されていて、理解しやすいものであった。（その他、7年）
	幌延の実際の写真・データを使った資料で分かりやすかった （地質環境、7年）
	トレーサー試験や物質移行特性調査の処分事業の中での位置付けについて、冒頭でもう少し説明があると、より分かりやすかったと思います。（工学技術、7年）
	内容は難解ですが、スライド28のまとめが分かり易かったです。（その他、8年）
	前の基本的な講義から応用して話を聞けたのが良かった。用語等（岩種？）を前の講義と合わせるとセミナーの一体感がでてよかったかもしれません。一方で、トレーサー試験は岩種や地下水流も知るというよりも安全評価（解析）の裏付けにあたるかと思うので発表の順番を後の方にしてもよかったのではないかと思いました。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	現位置試験で評価した拡散係数や割れ目を安全評価にどのように受け渡すのか（測定データがそのまま使えるか）について、解説があればよかった。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	最新の話で興味深かったが、内容は難しく感じた。（安全評価、1年）
	試験内容について詳しく説明をいただいたのが良かった。今後、データの取り扱いの助けになると思います。（安全評価、9年）
	幌延でのトレーサー試験の具体の話があり、イメージがしやすかったが、前半の部分でトレーサー試験の目的、主な手法、評価方法などに関する基礎的な話が含まれているとよりよかったと思う。また、トレーサー試験以外の物質移行試験についても紹介があるとよかった。幌延での物質移行試験の結果から導かれた概念図などがあると、ストーリーとしてまとまってよかったのではないか。（広聴・広報、1年）
	実際の地下研での試験結果をもとに、どういった試験、結果だったのかをお教えいただけた。個人的には、発表時間を延ばして、もう少し事例紹介をしていただきたかった。（安全評価、2年）
	トレーサー技術の説明が分かりやすく興味が持てた。（地質環境、9年）
	幌延で実際に行った研究を話されていてとても勉強になった。割れ目とマトリクス拡散のちがいなどわかりやすかった。（工学技術、1年）
	幌延で実際に行われてる調査内容、評価事例を理解することができました。 文献調査、概要調査、精密調査のプロセスにおいてどのようにトレーサー試験を活用するのかが疑問として残りました。（地質環境、10年/その他、20年）
	解説用の簡略的なイメージ図を使用しながら、化学的な試験について詳しく解説して 頂いたので理解が深まった。幌延の写真も見られてよかった。（工学技術、1）
	良かった点：まったくの初心者だったため、総じて難しく感じましたが、物質移行に関する「駆動力」と「相互作用」という説明は理解の助けになりました。トレーサー試験の話もイメージしやすく、良かったです。（工学技術、2年）
	今後のスケールアップに希望が持てる講義内容だった。（地質環境、3年）
	大変面白い試験ですが，専門外で詳細内容をうまく理解できませんでした．（工学技術、17年）
	幌延深地層研究センターで実際に実施している試験を知ることができたのはよかった．個人的にトレーサー試験に興味が沸いたので，更に詳しく勉強したいと思います．（工学技術、2年）
	専門外の人間が何を理解すべきなのかよくわからなかった 有用性については現職とは直接関係がないので2 （地質環境、5年）
	物質調査移行技術について現在どんなことをやっているのかを大まかに理解できた。まったく知識がないところからのスタートだったので、この技術で一番注目しているところなど、話の中で強弱をつけてくれると聞きやすかったと思う。（地質環境、3年）
	講義内容と実務内容が近いこともあり、講義内容全てが大変勉強になった。特に、実際の試験方法や試験結果について、本講義を拝聴し得られた知見や解釈などは今後の私の実務にも参考にしていきたいと思う。（地質環境、2年）
	原位置において物質移行特性を把握しなければならない理由と、原位置でのデータがどのように安全評価に活用されるのかの説明が無いので、ただ地下で試験をしただけという印象でした。原位置試験の目的と活用先の説明を充実して頂きたいと思います。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	専門外であり，内容が非常に専門的であったため理解は難しかったです。要素技術とは思いますが，この技術の発展性あるいは活用がどのようになるのかが，示されればよかったと思います。（地質環境、3年）
	【よかった点】 ・トレーサー試験とは何をやっているのか、を理解することができた（ダイポール試験） ・非放射性トレーサでの実験は重要だと感じた（原位置試験での余計な軋轢を避けられそう） （工学技術、3年）
	幌延で実際に行われている研究をわかりやすく詳細されており良かった。（安全評価、6年）
	・写真やカラフルな図も多く，物質移行調査のイメージが持ちやすい資料であったと思う. ・原位置試験と実験室規模試験の間の共通点や違い，それらの原因，相互の関係について，もう少し詳しく紹介頂けると，各試験の意義がより伝わると思う. （工学技術、20年/安全評価、20年）
	事業の核に関わる重要な内容だったように思いますが、レベルが高かったように感じました。（地質環境、1年）
	手法を詳細に説明するのか、結果を詳細に説明するのかどちらかに絞ったほうがよかったと思う。 試験の結果から言えることは何か、安全評価にどう活用していくか説明してほしかった。（地質環境、2年/安全評価、1年）

講義ID.講義タイトル	意見・要望等
11.安全確保に向けた処分場設計の考え方	声が小さく、スライドも単調で、皆に理解してもらおうという意欲が感じられなかった。実施主体の職員という、ご自身の立場を自覚して、我々の前に立ってほしい。講義をやりたくなかったのかもしれないが、少なくとも私は期待していたし、皆が時間を割いてNUMOの話を聞きに来ている。また、質問に対して"包括的報告書の補足資料に掲載されている"という回答は、お上の言うことを黙って聞きなさい、という意味にも聞こえてしまうので注意が必要（本人にその気持ちがないのは分かっています）。包括的報告書を順に説明するだけでなく、この根拠となっているのは○○というデータです、という例をいくつか挙げておくだけで、聞いている方の印象はだいぶん違うはず。（地質環境、25年）
	設計の考え方をわかりやすくまとめていた。（工学技術、5年）
	・NUMO包括的報告書に従って、処分場設計について、設計の考え方、部位毎の要件、仕様検討の具体例等が紹介されており、分かりやすい、有意義な講義であった。 （安全評価、25年）
	人工バリアの仕組み・特性について知れてよかった。緩衝材の研究や現状について知らなかったので、いい機会だった。（地質環境、1年）
	●処分場に，らせん状の坑道を想定していることを初めて認識した。（そのようなイメージは，初めに伝えておくべきだ。本アンケート3ページ目の通り）（地質環境、1年）
	処分場設計のイメージを得るための講義として、有意義であったと思います。初心者にも適切なレベルの講義だったと思います。（地質環境、18年）
	緩衝材、止水プラグ、力学プラグ、埋め戻し材など、それぞれの構成要素がどのような考え方、評価に基づいて設計されているのかについてもう少し説明があってもよいと感じた。　（地質環境、10年）
	処分技術についてはこれまで基礎的な知識しか理解していなかったが、自身の業務で一般の方に説明する際に役に立ちそうな情報が多数あった。一方、発声が若干不明瞭で内容が聞き取りにくかった。また、各スライドの情報量が多すぎること、および今そのスライドを何のために説明しているかが不明瞭であることにより、内容が頭に入ってきにくい部分が多かった。　（地質環境、4年）
	必要な情報を網羅的かつ丁寧に説明されていたと思います。ただ，受け手に対するインパクトが不足している印象で，この分野への入りやすさの点で改善の余地があるような気がしました。（安全評価、20年）
	包括的技術報告書の内容をなぞっている内容であったが、講義では時間の都合もあったのであろうが個々の要素についてもう少し踏み込んだ解説が欲しかった。 （工学技術、2年）
	処分場設計の考え方から具体的な設計についてお話してくれたので，講義の流れが整理されていて分かり易かったと思います。ただ，説明が速くてついていけない部分や，資料の文字が小さすぎて見えない箇所もありました。　（安全評価、1年）
	資料の文字が小さいのが気になった。また講師の話し方に抑揚がなく、棒読みの印象が強かった。質問に対してもあまり、上手に対応できているとは思えなかった。サイエンスコミュニケーターをテーマにするのであれば、資料だけでなく、話し方についても考えた方がよい。（地質環境、17年）
	図がきれいで見やすかった。自分の研究と関係する分野なので理解しやすかった。（工学技術、3年）
	埋め戻し時のプラグの詳細など、これまで自身があまり把握できていないところに焦点が当てられてよかった。対話活動の中で聞かれた際に答えられるよう復習したいと考えたが、その点では、資料が詳しかったので良かった。（広聴・広報、5年）
	2018レポの内容の紹介だと思うが、それをもっと強調して良い。自分たちが書いたレポートを批判に晒すことは成長に繋がる。その意味では、60分でも時間が足りない。（地質環境、26年）
	・説明スピードが速く少し聞き取りにくかった ・設計の考え方や最新知見を入れたオーバーパックの厚みの説明等は本セミナーの講義としては有用な情報になると思われる　（工学技術、10年/安全評価、5年）
	情報量が多いのと専門用語が多く理解するには至らなかった。また、せっかく良い内容の説明をされていたと思うが、声が小さく聞こえないことが多かったのと淡々と話されていたのがもったいないと感じた。（広聴・広報、4年）
	設計要件などの表はいずれも整理されているが、その表の説明やほかの表との関連性が口頭のみで文字化されていないため、理解が困難だった。 口頭で説明されている内容をスライドのグラフ上に注釈として書いてもらえればより理解しやすいと感じた。（工学技術、7年）
	声が聞き取りにくい部分がありましたので、もう少し大きめの声で説明いただけるとなお良かったと思います。（広聴・広報、2年）
	包括的技術報告書ベースの話であり、オプションケースや可能性が多く残る中、設計要件を取りまとめていくことの難しさを感じた。閉鎖前・閉鎖後にはじまり、各材料と製品における要求事項が多いことから、それらを講義時間内でまとめることは容易でなく、対外的な説明が求められた際、工夫が必要だと理解した。建設に際し、調査技術との連携が密に求められると分かった。（工学技術、1年）
	説明にメリハリがなく、何を伝えたいのかがよくわからない説明になっていた。話し方ももっと明瞭にした方がよい。（その他、7年）
	丁寧な説明，質問対応で好感が持てた　（地質環境、7年）
	内容が簡潔に整理されていて分かりやすい講義でした。（工学技術、7年）
	キーワードや話のポイントが掴みにくく、理解が浅かったと思います。あくまで私の印象ですが、資料に文字が多い気がしました。（その他、8年）
	セミナー受講者をどんな人を対象としているかによるかと思うのですが、地質の皆さんの発表とスタンスを合わせるならば、ただのNUMO包括的技術報告書の解説ではなく、どのような考えがあって処分場の設計を組み立てたのかという話の方が良いかと思いました。包括的技術報告書の内容をきちんと知ってほしいというテーマならこうなるかと思いますが、ジェネラリスト育成のために安全確保のための処分場設計の考え方を講義すると考えると違うものになるのではないかと思います。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	網羅的に説明されていて、設計の考え方は十分理解できた。声のボリュームだけでも上げていただけると、理解しやすくなると思うが。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	内容にあまり親しみがなかったこともあり難しかった。（安全評価、1年）
	設計全体がよくわかりました。なぜそうなったかがあるとより理解が深まると感じた。TRU等廃棄物についても講義してほしい。（安全評価、9年）
	安全確保に向けた処分場の考えたかについて広くカバーされており、かつやや詳細な情報も盛り込まれていたため、教材としては役立つものであると感じた。一方で、各スライドの情報量が多かったため、設計要件についての基礎知識がない立場としては、内容を追っていくのが難しい部分も多かった。ポイントを絞ってもよいのではと思う。（広聴・広報、1年）
	スピーチの仕方をもう少し改良したほうが良いと思いました。もう少しゆっくりと大きな声で，抑揚をつけてお話ししていただかないと，何が重要で，どういったことを伝えたいのか，ということがわかりませんでした。また，1枚のスライドに対する情報量が多すぎるので、もう少し見やすい資料作りを行うべきかと存じます。（安全評価、2年）
	処分場の設計について基礎的な部分から学べた。（地質環境、9年）
	とても落ち着いた話し方で、いまいちどこが一番大事であるかよくわからない部分があった。資料はよくできている分、そこが物足りなく感じた。（工学技術、1年）
	処分場設計の方法論について重要なポイントとなる項目を理解することができました。声が小さく聞き取りにくいところがありました。（地質環境、10年/その他、20年）
	設計についての内容ですので、図や写真を用いることは難しいとは思いますが、例えば 試作した人工バリアを提示して頂くなどするとより関心がひきつけられるかと思います（サイズ的に、例えば緩衝材なら現物の回覧も不可能ではないかと思います）（工学技術、1）
	良かった点：興味のある内容でした。従来からの基本的な設計の考え方に関して、頭の整理が出来ました。（工学技術、2年）
	声が小さく、何を話しているか分からなかった。（地質環境、3年）
	自分自身の研究背景になる部分で，再度確認することができたのと同時に緩衝材以外の部分についても，専門家の方の説明をお聞きできたのは非常に有意義でした．（工学技術、2年）
	スライドの文字数・情報量が多すぎて理解しきれなかった 単調で眠くなった 有用性については現職とは直接関係がないので2　（地質環境、5年）
	工学設計について、資料でしか見たことがなかったので、実際に従事している人の話を聞けて、資料を読んだだけではわからなかったところが理解できたのでよかった。 全体として、知っている程で進んでいるところがあったので、ある程度知識を持っていないと理解できないところが多々あった。（地質環境、3年）
	設計要件、設計オプションについて理解できた。人工バリア(特にベントナイト)について、どういった機能が求められるか理解できた。現在、どういった研究・開発が進行しているかなどの例があるといいかと感じた。（地質環境、2年）
	処分場設計の考え方について詳細にまとめられており、大変勉強になりました。今後も適宜、資料を見返して勉強させていただきます。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	地下設備・設置物の事項・建設およびそれに必要な要件が網羅的に整理されており，よかったと思います。（地質環境、3年）
	【よかった点】 ・処分場設計における基本要件、要求機能についてまとめられており、勉強になった ・特に人工バリア設計要件などは弊社業務に現時点で関連が深く、よい学びになった 【疑問点】 ・定置方式についてはまだ定まっていない、あるいは処分場の特性に応じて決定されるのか？　（工学技術、3年）
	人工バリアの設計要件について端的にまとめられており、理解しやすかった。また、オーバーパックや坑道における力学プラグや止水プラグの詳細を知る事ができた。（安全評価、6年）
	・文字が小さい＆多い． ・情報量が多すぎる？今回の参加者であれば問題ないかもしれないが，この分野に来て間もない受講者の場合はフォローできないのでは．（工学技術、20年/安全評価、20年）
	処分場のイメージがよく分かった。 安全確保に関しての説明が少なかった。 声が小さく、淡々と話されたので内容がよく伝わらなかった。（地質環境、2年/安全評価、1年）

講義ID.講義タイトル	意見・要望等
12.建設・操業技術（製造・施工品質の確保、操業安全） （製造・施工品質の確保、操業安全）	特に問題がないと思う。映像を交えていて飽きさせない構成だったと思う。（地質環境、25年）
	動画による説明があると、視覚的にわかりやすい。（工学技術、5年）
	・NUMO包括的報告書に従って、建設・操業技術について、動画も交えて具体例が紹介されており、分かりやすい、有意義な講義であった。（安全評価、25年）
	動画がありイメージしやすかった。回収可能性について現状を知ることができてよかった。処分場の建設技術や人工バリアの施工技術、回収可能性などが検討されていることを知らなかったので、学べてよかった。海外の例も取り扱っていて、先行例を知れて良かった。（地質環境、1年）
	●大変に分かりやすい。 ●進め方「3」に関しては，講義時間の設定に問題があると思われる。 動画を使っての説明なので，イメージしやすく分かりやすい。積極的に行うとよいはずである。そのような講義の時間としては，短すぎる。 ●資料p.11～p.27のような建設手順が，実際どれくらい現実で難しさを伴うのか気になる。（地質環境、1年）
	処分場設計のイメージを得るための講義として、有意義であったと思います。初心者にも適切なレベルの講義だったと思います。（地質環境、18年）
	操業時の換気、搬入ルートの考え方についての説明は初めて聞く話だったので、大変参考になった。（地質環境、10年）
	各処分技術が何のために必要で、何に留意する必要があり、現状の課題が何か、ということが整理されていて理解しやすかった。動画も適切に使用しながら、各処分技術に対する現状での進展度合いが把握できて有用であった。（地質環境、4年）
	全体的にわかりやすい説明だったと思います。動画は理解の助けになってよりよかったと思う一方，音声は絞っていただけると放映中の解説がより聞き取りやすくなったと思います。（安全評価、20年）
	動画を活用した説明がなされており、短い時間ながらも多くの内容を理解しやすい講義であったと思う。（工学技術、2年）
	動画を利用して製造工程を見せてくれたので，とても分かり易かったと思います。ただ，講義の時間を考えると話の内容が多すぎたので，少しテーマを絞るとさらに分かり易いのではないかと思います。（安全評価、1年）
	映像や図面が多く、理解しやすかった。（地質環境、17年）
	動画を使っていたのでわかりやすかった。前半の換気経路の検討の図は難しかった。（工学技術、3年）
	声のトーンが聞き取りやすかった。（2日目までの講演の中でもっとも聞き取りやすかった）。聴き手に配慮して進めているという姿勢が読み取れたことが良かった。今後一般の方を前に説明をする機会が出てくるが、大いに期待できる。（広聴・広報、5年）
	2018レポの内容の紹介だと思いますが、それをもっと強調して良い。自分たちが書いたレポートを批判に晒すことは成長に繋がる。その意味では、60分でも時間が足りない。（地質環境、26年）
	・説明のスピード等プレゼン方法がうまく分かりやすかった ・換気や工事中の動線以外に遮へい設計や操業中の安全策の説明があるとよりよいと感じた（工学技術、10年/安全評価、5年）
	動画を取り入れていて分かりやすかった。ただ、資料自体は工学専門の方でないと理解できないように感じた。説明はハキハキと説明していただき好感が持てた。（広聴・広報、4年）
	動画資料がわかりやすく、オーバーパックや緩衝材の充填方法等がよく理解できました。（広聴・広報、2年）
	講義11と同様。 実際、断層の形状や方向によって、地下施設建設時、レイアウトや施工方法を変えなくてはならないことから、調査時、レイアウト等計画を立てられるほどの、詳細データが必要になると、再認識した。定置作業にて縦置き、横置きの概要について、工法が異なる場合のメリットデメリットを講義で比較したりされてもいいように感じた。あるものをそのまま載せるだけでなく、いくつかの工法や手法、材料種がことなるものなど、その良し悪しを理解することも必要だと思う。（工学技術、1年）
	一つのスライドで伝えたいことが分かりやすくまとめられていて、今何の話をしているのかわかりやすい。声もハッキリしていて聞き取りやすく、最初に関係法令を示している点も理解度を向上させている。（その他、7年）
	動画を使った資料が分かりやすかったのに加え，はきはきとした説明で非常に分かりやすかった（地質環境、7年）
	内容がよく整理され、動画もあり、分かりやすい講義でした。（工学技術、7年）
	内容が難解でしたが、最後にスライド52でまとめがあるので、理解の助けになりました。資料でところどころにキーワードをもう少しはっきり示して欲しかったです。（その他、8年）
	建設操業中の安全性という観点で分かりやすく、よくまとめられていたと思います。原子力工学や発電出身の人には閉鎖前安全性の考え方は新規制基準のPRAを参考にしていると一言入れると理解しやすいのかもしれません。EBSをどのように製作するか、施工するかは11．のご発表に入れるのも良いかと思いました（難しい所ですが）。1つ1つ製作、施工できるか否かが11、大量にある廃棄体をいかに施工するか（パネルの換気の検討と同様に建設操業中の経時変化）が12だと面白いかなと思いました。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	実規模の検討事例が少ない状況で、現状の進め方や課題などがよく理解できた。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	動線の説明にスライドが複数使われていてわかりやすかった。 建設と操業を同時に行う理由を知りたかった。（安全評価、1年）
	動画により理解がしやすかった。TRU等廃棄物についても講義してほしい。（安全評価、9年）
	建設操業時の安全確保について、坑道レイアウト、人口バリアの製作・定置方法などについて、動画などで視覚的に分かりやすい資料となっていた。それぞれの方法のメリット、デメリットなども紹介されていて、分かりやすかった。（広聴・広報、1年）
	内容が難しかったですが、比較的わかりやすくご説明いただけたと思います。（安全評価、2年）
	図が効果的で、換気経路の検討などイメージしやすかった。（地質環境、9年）
	スライドで処分場を作る際の動線の説明があり、掘削と容器の移動経路が示されていて動線の重要性がよくわかったスライドであった。また、緩衝材の部分では動画が多く使われており、とてもわかりやすく伝わった。（工学技術、1年）
	放射線防護、一般労働安全に関する取組みが重要であるということを認識することができました。動画があったのがわかりやすかったです。（地質環境、10年/その他、20年）
	実際の検討の様子を動画で見せて頂いたことで理解が進んだ。また、スライド内の図も大きく見やすかった。存在しているのであれば，海外ですでに掘られた処分孔（SKB or Nagra?）の動画も見てみたい。（工学技術、1）
	良かった点：坑道の設け方に関する内容が興味深く、良かったです。（工学技術、2年）
	動画などを用いており、大変理解しやすかった。（地質環境、3年）
	映像の印象がふかっく残りました．（工学技術、17年）
	緩衝材ブロックなどの作製の様子は，なかなか見ることが出来ないので，動画が参考になりました．（工学技術、1）
	緩衝材の作製方法やペレットの充填方法が実際の動画で確認することができたので，イメージを沸くことができたのがよかった．（工学技術、2年）
	動画が非常にわかりやすく理解を促す．教材として動画を配布するとしたらCDやDVDになるのか？ 有用性については現職とは直接関係がないので2（地質環境、5年）
	人工バリアの制作について、映像も混ぜながら説明していたので、わかりやすかった。しかし、専門的なワードなどがあり、ついていけないところも見られた。（地質環境、3年）
	動画を使用された講義内容は静止画よりイメージが分かりやすかった。また、設計オプションについてはその根拠の説明を工夫されており、専門外である私にもよく分かった。現在、どういった研究・開発が進行しているかなどの例があるといいかと感じた。（地質環境、2年）
	建設と操業を実際に行う際の課題や考え方について、様々なオプションでの検討状況を説明していただき、大変勉強になりました。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	動画資料は非常に良かったと思います。 設計・施工に関する課題がわかりやすく示されていたと思います。（地質環境、3年）
	【よかった点】 ・人工バリア施工および品質管理について具体的に、動画とあわせてイメージが出来たことは良かった。 ・回収可能性についても、現時点では埋め戻し材・緩衝材の除去技術の開発・実証が望まれる段階であると理解できた。（工学技術、3年）
	概念図がわかりやすく構成されており良かった。（安全評価、6年）
	・換気経路パターンの図示や動画の導入など，工夫を感じた． ・スライドによっては，No.11と同様に文字が小さい＆多い． ・やはり，時間・資料量に対して情報量が多いように感じた．（工学技術、20年/安全評価、20年）
	施工に際して重要な部分だったと思う。 施工業者としてイメージがわきました。 しいて言えば、場所選定から建設完了、操業終了までの予定表などがあれば見たかったです。（地質環境、1年）
	人工バリアの製造過程についてはよくわかった。（地質環境、2年/安全評価、1年）

大項目③：1月10日（3日目）の講義について（各講義に対する質問）	
講義ID.講義タイトル	意見・要望等
13.安全評価の考え方と枠組み（前半）	特に問題はないと思う。講義時間も短いので細かい説明がなかったのは仕方ない。（地質環境、25年）
	安全評価の概要をわかりやすくまとめていた。（工学技術、5年）
	・安全評価の全体像を理解してもらうための冒頭として適切な講義であった。 ・スライドに後の講義との関係を示したのは良かった。　（安全評価、25年）
	様々な可能性に応じた安全評価があることが全体的に説明されていてわかりやすかった。一方で、字が多く内容が漠然としていてイメージがつきにくかった。 （地質環境、1年）
	●「シナリオ」の具体例がほしい。（地質環境、1年）
	安全評価の概要をここで紹介されたことで以降の講義がスムーズに理解できたことは、非常に良かったと思います。（地質環境、18年）
	安全評価の定義や、関連する用語（シナリオ、安全機能、処分システム等々）については説明があった方がよいと感じた。シナリオの例などの説明があった方が、よりどのような想定のもと安全評価を行おうとしているかの理解が進むと感じた。（地質環境、10年）
	14.以降の講演内容を最初に概括するものであり、安全評価の全体的な枠組みを理解する上で有用であった。　（地質環境、4年）
	ポイントを的確に押さえたわかりやすい説明だったと思います。　（安全評価、20年）
	15.の話と分かれていることで資料を行ったり来たりすることもあり、線量基準を最初に講義し、そのあとに13.と15.の内容を分けずに講義してもよかったかもしれないと感じている。　（工学技術、2年）
	NUMOの包括的技術報告書に基づく説明が重要なことはわかるが、サイエンスコミュニケーター養成という趣旨から考えると、もう少しかみ砕いた説明が必要と思う。また、専門用語（基本シナリオや変動シナリオなど）の説明や基準値決定プロセスの背景などについても話があると、理解しやすいと思う。また資料の文字が小さいことも気になった。（地質環境、17年）
	発表時間が短かったので集中して聞くことができた。（工学技術、3年）
	講義の関係性が示されて位置づけが理解しやすい （工学技術、10年/安全評価、5年）
	シナリオの前提がイマイチ分からなかった。（広聴・広報、4年）
	質疑にもありましたが、稀頻度事象シナリオでの「発生確率が極めて小さいと考えられる事象」についての区分は考え方が難しく、あまりよく理解できませんでした。（広聴・広報、2年）
	工学分野担当として、処分場の性能の内訳に定義やシナリオを形にしていく作業の難しさを概要として学ぶことができた。現場がない中、仮定で評価を行うことは調査段階にも通じるが、（設定に関し）分野横断の重要性を個人的に認識した。被ばく線量等、諸外国やNUMOの基準取り扱いに関し、学ぶ機会となった。（工学技術、1年）
	安全評価の基本的な手順などの内容であり、この後の講義を理解するのに役には立った。（その他、7年）
	説明が丁寧で大変分かりやすかった （地質環境、7年）
	安全評価のあらましについて、簡潔に整理されていた点が、分かりやすい講義でした。（工学技術、7年）
	業務で少々かかわった内容でもあり、また講師の方に短い資料で内容を濃く説明して頂いたので、かなり理解できたと思います。（その他、8年）
	安全評価の全体像、それぞれの関係（すなわち以降の講義の関係性）が示されてよかった。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	安全評価において最も基本的なことで、シンプルにまとめられている。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	スライドの字が大きく見やすかった。（安全評価、1年）
	安全評価の流れがよくわかりました。（安全評価、9年）
	地層処分事業における安全評価の考え方について、ポイントを絞って分かりやすく説明していただけたと思う。導入の資料としては分かりやすかったと感じた。（広聴・広報、1年）
	安全評価について基本的なところからお教えいただけた。（安全評価、2年）
	安全評価の基本的な評価について理解できた。（地質環境、9年）
	シナリオの基本的な考え方がよくわかり、勉強になった。海外のシナリオの考え方もよくわかった。（工学技術、1年）
	線量を指標とする安全評価の取組みについてわかりやすく説明いただきました。（地質環境、10年/その他、20年）
	公文書や法律に載っていそうな言い回しがそのまま資料に転記されているような第一 印象を受けた。初聴者では若干理解し辛かった。（工学技術、1）
	良かった点：安全評価には詳しくなかったので、全体像が知ることができ有意義でした。（工学技術、2年）
	安全評価の流れについて、理解できました。また、講義の流れがわかり、続く講義の理解が深まりました。（工学技術、1年）
	講演者が講義内容を理解していない、と感じた。（地質環境、3年）
	講義14の内容は，ことらの結論を説明する形になっているようです．講義14のみでも，十分ではないでしょうか．（工学技術、17年）
	質問に対して，自分自身で応えられていないことが多々見られたので，住民への説明のときだと不信感を持たれると感じました．（工学技術、2年）
	安全評価基準や何を目指しているのかが分かった。（地質環境、5年）
	安全評価の流れについてわかりやすかった。安全評価の大枠について大まかではあるが、理解できたと思う。（地質環境、3年）
	安全評価の考え方について、理解できた。特に、基本シナリオと変動シナリオの違いについて明確になった。（地質環境、2年）
	安全評価の考え方について、具体的な数値を示して説明されていたところが良かったと思います。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	わかりやすく，整理されていてよかったとお思います。（地質環境、3年）
	【よかった点】 ・14のテーマと併せて、線量基準の考え方を包括的に基本から学べた 【悪かった点】 ・フィラーが多すぎて気になって話が頭に入ってこない。（工学技術、3年）
	安全評価のパートへの導入として適切な講演がなされていた。（安全評価、6年）
	・以降の講義の前振りという位置づけとしては有効と感じた． ・線量基準に関する用語はなじみのない聴講者も多いかもしれない．以降の講義で詳しく述べるとしても、注釈を入れておくと親切と思われる。（工学技術、20年/安全評価、20年）
	スライドの情報が多すぎて理解が追い付かなかった。 単語も予備知識が無いと分からないものが多いように感じた。（地質環境、1年）
	本セミナーが対象とする層がよくわからないが、研究者や技術者が多く参加しているので、概念だけでなく、もう少し具体的な安全評価の方針を示してほしい。（地質環境、2年/安全評価、1年）

講義ID.講義タイトル	意見・要望等
14.線量基準の考え方	基準決定の経緯について細かい説明があった。無論、このような知見は必要だと思うのだが、人材育成としてはやや踏み込みすぎで時間を取り過ぎた気がする（杉山さんの責任ではない）。（地質環境、25年）
	文字が多いため、じっくり読むテキストとしての活用が期待できる。しかし、発表資料としては、文字を大きくしたり、色を変えるなど、視覚的なわかりやすさに対する工夫が必要と感じた。（工学技術、5年）
	・理解が難しい放射線防護の考え方や数値について、丁寧な説明をされており、この分野の講義としては、非常に分かりやすく、有益な講義であった。 ・資料についても、勧告の文章を正確につたえつつ、コアメッセージを明確にするなど理解を容易とする工夫があり、とても良かった。　（安全評価、25年）
	線量規準についての説明であったが、イメージがつきにくかった。図や表があるとよかった。（地質環境、1年）
	●時系列で，何がどう変わってきたのか，がより分かりやすいとよい。（地質環境、1年）
	説明方法を工夫されており、わかり易い講義だったと感じました。（地質環境、18年）
	(講師の方もおっしゃっていたが)法律にかかわる部分は説明しづらいと感じる。一方で、可能な限り、時間、資料等をコンパクトにする方がよいと感じた。 （地質環境、10年）
	基準となる線量がどのような考え方に基づいて決められているのかが理解できた。ただし、ご本人もおっしゃっていたように、背景説明の観点からスライドに文字が多くならざるを得ず、少し内容が頭に入ってきにくいところがあった。（地質環境、4年）
	丁寧に解説された講義だったと思います。が，①で述べたとおり，放射線や放射能に関する基礎知識に関する講義がないままこの講義に入っていますので，とっつきにくく感じた方もいらっしゃるのではないでしょうか。市民との対話活動に参加するうえでも，放射線・放射能に関する基礎知識の習得は重要だと思います。また，講師自身がエクスキューズされてもいましたが，スライドについてはわかりやすさより正確さが優先されており，まだ工夫の余地があるような気がしました。（安全評価、20年）
	線量基準についてはこれまで非常にとっつきにくいものであると感じていたが、講義においては重要なポイントが示されており、とても理解しやすかった。 （工学技術、2年）
	放射性廃棄物処分の専用基準を丁寧に分かり易く説明していただいたと思います。国際的な議論で基準が決まってきた経緯がよくわかりました。　（安全評価、1年）
	文字と専門用語が多すぎる。もう少しプレゼン仕様の資料にしてほしい。また、各国の安全基準の一覧表（P28 ）についても用語が統一されていないので、初学者にはわかりにくい。もう少し、ざっくりでもいいので、発表者がグラフや表にするなどして比較して理解しやすいようにしてほしい。安全評価を理解する上で、重要な部分だとおもうので、初学者が興味をもって理解しようと思えるような資料作りをしてほしい。（地質環境、17年）
	文字だけのスライドの下の要約は文字の色を変えるとか、箱に色をつけるとか目立たせたほうがいいと思った。（工学技術、3年）
	あとで振り返ることができる教材であることと、一言で簡単にまとめられて理解がしやすい教材であった （工学技術、10年/安全評価、5年）
	放射線基準の根拠情報について説明いただき、資料も分かりやすかったので、折に触れて見返したいと思った。文字が多かったがポイントは各ページにまとめがあり分かりやすく示してあり勉強になった。（広聴・広報、4年）
	ICRPの勧告やIAEAの安全基準について何か調べたいことがあった際に、どの文書を確認すればいいのかや、考え方の基礎・変遷がざっくり掴めたので大変参考になりました。ただ、時間の都合もありますが進み方が早すぎるためついていけない部分がありました。（広聴・広報、2年）
	放射線防護、線量に関する概念をまったく学んでいないため（勉強不足）、まとめで述べられた放射線防護の論理の必要性を理解できなかった。地層だけでなく、国の指針など様々な違いがある中、諸外国が安全基準を議論されてきた今日、その概念や成り立ちを知ることはもちろん重要との認識は持っている。（工学技術、1年）
	資料に文字が多すぎて、見るだけで嫌になる。各スライドで重要な部分がどこなのか一見してわからない。専門外の人間に対して配慮が足らないと感じた。（その他、7年）
	難しい内容だったが，重要な点をピックアップしてくれたので分かりやすかった （地質環境、7年）
	文字が多くならざるを得ない資料において、ポイントを各ページの下に箱書きされている点は、今後の自分の発表資料づくりの参考になりました。（工学技術、7年）
	業務で少々かかわった内容であり、結構理解できました。講師の説明も上手だと思いました。資料は少々字が多い印象ですが、この内容では仕方ないと思いました。（その他、8年）
	数あるICRPの勧告やIAEAのレポートの関係性が示されたのがとてもよかったです。文字が多くならざるをえない内容でどのように分かりやすく伝えるかの教材づくりとしてもコツが示されたようにも思います。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	線量基準の根拠はわかりにくいのは仕方ない面もあり、テキストとして明記していただいたのは後々にも活用できる。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	資料の情報が多すぎると感じたが、簡単にまとめる工夫があってよかった。（安全評価、1年）
	線量基準に関しての出典から言葉の意味を整理しつつ一連の流れを説明いただいたのでよくわかりました。今後詳しく理解していく助けになると思います。 大事な点が各スライドにまとめられていたのは良かったと思います。（安全評価、9年）
	自身の知識が不足している部分も多かったため、自身の理解度は十分ではないと思うが、国際的な議論の経緯も踏まえて線量基準の考え方をまとめていただいたので、今後復習するための教材としても有用性が高いと感じた。（広聴・広報、1年）
	国際的にどういった議論がなされて来たのかがよくまとめられていると思った。（安全評価、2年）
	スライドの情報量が多く追うのが少し大変だった。（地質環境、9年）
	内容的に仕方がないのかもしれませんが、字が多く、スライドが見ずらい印象がありました。そのせいか、あまり、講義内容が印象に残りにくいように感じました。（工学技術、1年）
	線量基準の根拠などが示されていました。最適化を目指すことが重要であることを認識できました。（地質環境、10年/その他、20年）
	これまでに提示されてきた様々な線量の基準値の中における、現在の線量基準の位 置づけがよく理解できた。（工学技術、1）
	良かった点：線量基準の具体的な数字について、その出典を知ることができ有意義でした。（工学技術、2年）
	線量の設定について、海外での基準についてご説明いただいたうえで日本のピット処分等での基準を知れたのでわかりやすかったです。（工学技術、1年）
	法令などの話なので仕方ないが、文字が多すぎた。（地質環境、3年）
	根拠うとする内容を明確に整理されて，非常にありがたいです．（工学技術、17年）
	文字が多かったので，理解するのに時間がかかりました．（工学技術、1）
	最初に概念的になるということを説明していただけたので，文字が多く読むのは大変なパワーポイントだったが，聞くことで理解をすることができた．（工学技術、2年）
	スライドの情報量が多すぎると思った。（地質環境、5年）
	線量規準について、過去も含めて話されていたので、わかりやすかった。 線量については、イメージすることが難しいが、身近なとこの線量も紹介していたので、理解しやすかった。（地質環境、3年）
	線量基準がどういった経緯で規定されたか分かった。また、「拘束値」の意味、「最適化プロセス」の意図はよく理解できた。 放射性廃棄物の線量基準が国際的議論で定められた経緯、安全基準は国際的な考え方との調和を図って定められることは理解できたが、日本で適用する場合にも他国と同様の手順でいいのか疑問に思った。（諸外国を参考にするべきであることは理解しているが…）（地質環境、2年）
	線量基準の考え方については、ICRPやIAEAといった国際機関等による長年の議論により構築されてきたことが良く分かった。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	原文も重要であると思いますが，それに対する解説書のようなものがあれば，より理解しやすいと思います。おそらく口頭でお話ししていたお思いますが。（地質環境、3年）
	【よかった点】 ・線量基準が国際的にどのような経緯で定められたのか、しっかりと資料を作っていただけて大変ありがたい。 ・資料を改めてじっくり読み込んで勉強したい。（工学技術、3年）
	非常に良い講演だったが、法令を含めた線量基準は本公演のみでは把握しきれなく、難しく感じた。（安全評価、6年）
	・内容的に仕方のないところと思われるが(講師もエクスキューズを入れていたが)，文字が多すぎる＆小さすぎる．構成を工夫しても良いかもしれない．講義資料はエッセンスのみを残して，他は付録として別添資料扱いとするなど。 ・線量、数値の根拠を理解することは一般に向けた説明においても重要であり，ここに改めて時間を割いて学ぶことは大きな意義があると考える． ・これに先立ち，放射線防護の基礎に関する講義を別途もうけるのも一案と思う．（工学技術、20年/安全評価、20年）
	スライドのまとめを下部に1文で記したのは非常にわかりやすかった。（地質環境、1年）
	資料としては十分かもしれないがプレゼンである以上わかりやすく説明するスライドを作成するべきと思う。（地質環境、2年/安全評価、1年）

講義ID.講義タイトル	意見・要望等
15.安全評価の考え方と枠組み（後半）	おそらく講義03と、講義15が本セミナーで最も重要なパートである。非常に説明しにくいところだと思うが、NUMOの包括的報告書の図を使うだけでなく、より具体的な例を挙げて、ストーリーボード、シナリオ、解析ケースまで、1つ1つの用語の定義と関連性を説明して欲しい。また、FEPについては次の講義16で詳しい話があることを述べておくと、聞いている側の不安が解消されると思う。質疑お疲れ様でした。（地質環境、25年）
	包括的技術報告書を事例に、一般化した解説があると良いかと思いました。（工学技術/安全評価、24年）
	他の講義との関係性を示すなどの工夫がよかった。（工学技術、5年）
	・NUMO包括的報告書に従って、安全評価の実例を流れに沿って紹介されており、分かりやすい、有意義な講義であった。 ・今回のセミナーの前半で話題になった、SDMを介した分野間連携との関連という観点でいうと、母岩中の物質移行モデルをどのような情報に基づいてどのように構築したかについての説明を膨らませても良かったかもしれません(ただし、これは後段の講義との役割分担の調整が必要かと思います)。(安全評価、25年)
	ハイブリッドアプローチという考え方を初めて知った。様々な解析ケースが紹介されていて、イメージしやすかった。（地質環境、1年）
	●「ボトムアップ」と「トップダウン」の言葉の意味が分かりづらく，よく分からないまま講義が進んだ。のちのグループワーク等で，理解した。 ●資料p.8以降，「対応するモデル」とは，つまり「想定」のことだろうか。　（地質環境、1年）
	稀頻度シナリオについても解説いただけるとより良いと思います。（地質環境、18年）
	安全評価の定義や、関連する用語（シナリオ、安全機能、処分システム等々）については説明があった方がよいと感じた。シナリオの例などの説明があった方が、よりどのような想定のもと安全評価を行おうとしているかの理解が進むと感じた。　（地質環境、10年）
	シナリオ選定と評価の方法についてご紹介されていたことは理解できたが、質疑応答でもあったように、非常に複雑かつ膨大な内容を1時間の講義にまとめられているため全体的に消化不良の感があった。（地質環境、4年）
	限られた時間で説明するのが難しいテーマについて，要点を絞ってうまく説明されていたと思います。が，核種移行解析の部分が17.の講義と重複し，しかも先に行われる本講義のほうがより新しい情報を提供する形になってしまっています。17.もNUMOの方が講義すると，重複を避けられるとともに，講義の流れもスムーズになるのではないかという気がします。　（安全評価、20年）
	安全評価の考え方と実際の作業フローについて説明がされており他分野の自身から見ても安全評価のイメージがつかむことができた。資料の記述については、いろいろな方からの質疑応答であったようにより分かり易くなるように改善する点もあったかと思う。（工学技術、2年）
	13と同じ。参加者が原子力分野の1～2年目の人材ということを考慮すると、移行、母岩、シナリオ、といった普段、使わない言葉はできるだけ避けるべきで、使うならきちんと定義や個々の関連性を図などで説明した方がよい。またデータセットの設定についての話のみで解析結果の話がなかったので、結果的に、個々のスライドのつながりがよくわからなかった。図も報告書のものを転用するのではなく、講義に合わせたものを作るべきだと思う。　（地質環境、17年）
	フォントが変わっているところに何か意味があるのか気になった。図がわかりやすかった。(工学技術、3年)
	内容が多いため時間をもう少し取ってもよかったと思われる　(工学技術、10年/安全評価、5年)
	資料を読むだけでなく「なぜそのシナリオになったのか」まで説明いただきたかった。全般的にもう少し落ち着いて余裕をもった説明がほしかった。(広聴・広報、4年)
	今まで文章で読んだだけでは、ハイブリッドアプローチのうちどの部分がボトムアップアプローチとトップダウンアプローチなのか分からなかったのですが、それが図示されていたのでやっと理解できました。(広聴・広報、2年)
	空間スケール（ニアフィールド～生活圏間）における核種移行の概念・フローから扱うデータの概要について学ぶことができた。地表における核種移行プロセス・被ばくのプロセスも基本シナリオから様々なケースを作り上げていることを初めて知った。調査選定が進み、現場ができることで、各段と不確実性を減らせると思うが、基準設定や必要とされる解析ケースの基準について、計画性について、学びたいとも思った。(工学技術、1年)
	安全評価に関する他の講義に比べると、以前聞いたことがあったので、多少わかりやすかったと感じた。P19のグラフにおける核種の表示など細かい点で抜けているところがあったので、データを表示する部分では抜けがないようにした方がよいと思った。(その他、7年)
	説明が丁寧で大変分かりやすかった　(地質環境、7年)
	ストーリボード、FEP、シナリオ、対応するモデルデータに関して、それぞれの内容や関連について理解が難しかった。(工学技術、7年)
	ハイブリッドアプローチの説明が分かりにくかったですが、シナリオや線量評価の説明は分かり易かったです。説明は丁寧だったと思います。(その他、8年)
	難しい分野であるため大変だったとお見受けし、質問意見も多々出ていましたが、解析ケースの設定でモデルイメージとシナリオ、それに対応するモデル及びデータを1枚にまとめる形は参考になると思いました。(工学技術、1年/安全評価、4年)
	多くの範囲を含むためなかなか説明が難しかったと理解する。各スケールでの評価とスケール間のつながりについて、具体的にイメージできる例などがあるとよかったと思う。(地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年)
	他の方の講義分野の位置づけを整理しながら見ていける内容だった。(安全評価、1年)
	一連の流れは理解できたのですが、シナリオ構築までの作業がどのように進むのかもっと具体的にわかると良いと思います。オーバーパックなど核種移行解析モデルで省かれ理由はわかるのですが、例えばスライド10のフロー図で省くものも記載すれば、専門以外の人の理解も進むと思いました。(安全評価、9年)
	地層処分事業における安全評価の考え方について、全体の流れとポイントを絞って分かりやすく説明していただけたと思う。導入の資料としては分かりやすかったと感じた。(広聴・広報、1年)
	実際に解析ケースを提示して説明していただけたのは良かった。(安全評価、2年)
	実際のシナリオと対応するモデルが示されていてよく理解できた。(地質環境、9年)
	放射性廃棄物のシナリオにはいろいろな考えのもととなっていることがわかった。ただ、話が難しいせいか印象に残っていない部分もあるので多少あった。(工学技術、1年)
	安全評価の考え方において時間×空間の各場面における評価が重要であることを認識できました。(地質環境、10年/その他、20年)
	安全機能の影響分析のプロー図やシナリオ設定についてその資料が、通常評価業務に従事していない者からすると分かりにくかったり、本来の意味と逆の印象を受けたりする部分があった。(工学技術、1)
	良かった点：質疑応答での議論、特に講義16の講師のご発言が以降の講義内容への理解につながり、大変良かったです。(工学技術、2年)
	前半後半合わせて、安全評価に対する考え方について理解できました。FEPについてより詳しくお話伺いたいと感じました。(工学技術、1年)
	講演者が講義内容を理解していない、と感じた。(地質環境、3年)
	非常に重要な内容ですが，不明なところがちょっと多くて，内容のわかりやすさに工夫していただきたいです．(工学技術、17年)
	質問に対して，自分自身で応えられていないことが多々見られたので，住民への説明のときだと不信感を持たれると感じました．(工学技術、2年)
	図表が何を示しているのかよく分からなかった。(地質環境、5年)
	実際埋めた後のシナリオやその解析についてどんなことをやっているのかについては、まったく知識がないところからでしたが、ある程度は理解できたと思う。いままで、どこに処分場を設置するのが良いのかしか考えてこなかったので、処分後のことについては、新鮮だった。(地質環境、3年)
	線量計算の流れに関する概要は理解できた。(前半)の講義にも関連するが、変動ケースについて明確になった。実務で物質移行パラメータを取得しているが、取得されたパラメータがどういったパラツキを有しているかなども今後言及していくべきだと思った。(地質環境、2年)
	評価上重要な核種について、どのような要因が核種の出現時期と線量に影響を及ぼしているのかについて、より具体的に知りたかった（パラメータの感度など）。(工学技術、2年/安全評価、7年)
	評価はシナリオの構築がポイントになるとことがわかりました。特に網羅性は難しいとは思いますが。様々な要素技術の理解が必要で難しい分野。(地質環境、3年)
	【よかった点】 ・シナリオについてBottom upとTop downのハイブリッド方式で決められていることが分かった。また検討シナリオについては幾らか検討の上で決められていることも分かった。(工学技術、3年)
	ハイブリッドアプローチの解説がどこからどこに当たるか資料と発表からわかりにくい。(安全評価、6年)
	・安全評価の概要がシンプルにまとめられていたと思う．一方で、説明不足の部分が多いと感じられる点もあった． ・引用文献については，各図に付記して頂けると後で参照，活用しやすい． (工学技術、20年/安全評価、20年)
	これも経験がある程度無いと理解が難しいと感じた。(地質環境、1年)
	13と同様。今後どのような研究開発が必要か課題を示してほしい。(地質環境、2年/安全評価、1年)

講義ID.講義タイトル	意見・要望等
16.処分場構成要素の変遷挙動（現象の理解）	FEPの中身を解説してもらい、大変ためになった。しかし、人材育成としては少し難しすぎる感じがしないでもない。（地質環境、25年）
	処分場の環境の変遷を図で分かりやすく表現されていた。（工学技術、5年）
	・"変遷"というキーワードで、処分システムの各構成材料に対して考慮すべき重要な現象とそれらに対する理解の現状について、丁寧な説明がなされ、興味を持って聞くことができる講義であった。 ・安全評価の流れにおける位置付けや、個別現象の設計や安全評価との関連についても言及されていた点はよかった。 ・ひとつひとつは重要で興味のなる内容であるものの、内容が少し多め感がある（講義の最後(6.の部分)については、他の講義との役割分担・調整が必要かもしれません。）。（安全評価、25年）
	処分関連する物質の材質における変遷など詳しく紹介されていた良かった。スライドが見やすく話し方もわかりやすかった。（地質環境、1年）
	●変質の話は，半分専門なので楽しめた。 ●原環センターさんがどのようなことを行っているのか紹介していただけると大変うれしい。（地質環境、1年）
	安全評価（ID.13～ID.15）の講義は、他分野の研究開発に従事している方々には重要な内容だったと思います。この講義は、その具体的なイメージをもつための講義として、有意義であったと思います。（地質環境、18年）
	自分の業務に密接にかかわる部分だったため、非常に参考となる情報が多かった。（地質環境、10年）
	処分場の周辺環境や人工バリア材料に対して起こりうる変遷が網羅的に解説されており、わかりやすかった。地下の地質環境の研究を行う上で、将来的な変遷も考慮してどのような点に留意した研究をすればよいか考えることができた。（地質環境、4年）
	複雑な場の変遷に関する話題を，とてもわかりやすく説明されていたと思います。（安全評価、20年）
	安全評価シナリオを作成する流れについて、その構成要素の説明が丁寧になされていてとてもよく理解ができた。（工学技術、2年）
	処分場の状態変遷について，個々の構成要素の現象を丁寧に説明していただき，シナリオ構築に関わるFEPとPIDの作業についての知識を得ることができたため大変有意義な講義でした。（安全評価、1年）
	資料は文字が多かったが、講演者がポイントを絞ってくれたので、内容を理解することができた。（地質環境、17年）
	時系列のイラストがわかりやすかった。（工学技術、3年）
	内容が多いため時間をもう少し取ってもよかったと思われる（工学技術、10年/安全評価、5年）
	ちょうどベントナイトの劣化について知りたかったので関心が高かったが、専門性が高く十分理解するには至らなかった。もっと時間をかけて聞きたい内容だった。（広聴・広報、4年）
	個々の事象を組み合わせて処分場の安全性を考えなければならないことが、具体例を通じてわかりやすく説明されていました。（広聴・広報、2年）
	シナリオ選定、解析ケースの設定に繋がる処分場状態設定に係る現象理解として、物性（物体）の構成要素をまとめられており、とても参考になった。資料として読み込まなければいけない部分もあるが、参考資料となった。P35のように相互作用の関係を様々なもので見るが、その他についても学び、知識を足していきたい。（工学技術、1年）
	資料の文字は多いものの、重要な部分が分かりやすく強調されているので、講義の流れからいったん遅れても追いつくことができた。説明も100％ではないものの、ある程度理解できるくらいの難易度だった。（その他、7年）
	資料が見やすかった（地質環境、7年）
	PID、FEP、シナリオについての基本的な解説が分かりやすい講義でした。また、シナリオ構築に際して、考慮から外した現象・事象と外した理由を知見として整理し、次世代以降に残していくことは、事業者が行うべき重要な課題であると認識できました。（工学技術、7年）
	業務内容と異なるわけではないのですが、かなり専門的で難解に感じました。事前の予備知識がないと、理解が非常に難しいと思います。ポイントを絞って分かり易く説明をしていただと思います。（その他、8年）
	個々の概論とその関係性も随所に出てきてよかったと思う。概論がかなり専門的であり、他分野の人に伝わったかが心配である。セミナー全般として、TRUとガラス固化体の話分けが必要なような気もしました。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	やや専門的な用語が多いが、様々な要素で構成される処分場の変遷がよく理解できた。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	すでに勉強したことのある内容が多かったので復習や確認になった。 ただ、勉強したことない人にとっては内容が濃いかもしれないと思った。（安全評価、1年）
	重要な点は資料の文字の色を変えるなど良かったと思います。全体的に情報量が多いので、各項目の伝えたいことで絞るなどしても良いと感じました。（安全評価、9年）
	自身の知識が不足している部分も多かったため，自身の理解度は十分ではないと思う。一方で、処分場の構成要素のうち、とくに緩衝材材料の性能変化にトピックスを絞ってご説明いただいたので、その部分に関しては新たに知ることも多く，かつ分かりやすかった。（広聴・広報、1年）
	データや写真を提示しながら、順を追った説明で非常にわかりやすかった。（安全評価、2年）
	変遷現象の具体例が多く示されていて良かった。（地質環境、9年）
	ガラス固化体周辺部の緩衝材で起こるシナリオ事象がよく理解できた。セメント系材料というのがセメントとは異なる意味を持つということがよく分かった。（工学技術、1年）
	緩衝材には様々な役割が期待されており、重要な構成物である。緩衝材に対する間隙水の影響を考慮することが重要であるということを認識できました。（地質環境、10年/その他、20年）
	工学的な技術検討に応用できるような内容も多く含まれており、興味深かった。安全 評価全体における講義の範囲も明示されており分かりやすかった。（工学技術、1）
	良かった点：分かりやすい説明で、大変良かったです。検討当初の情報を知っている人が少ない、というお話は大変印象に残りました。（工学技術、2年）
	処分場に用いられる各材料に関する必要性能が理解できました。セネコンの立場から、セメントに関してもなぜこの制限があるのかという点がわかり，今後の仕事に活かしたいと思います。（工学技術、1年）
	第二次とりまとめから研究や技術が進歩していることを感じることができた。（地質環境、3年）
	素晴らしい内容です．もっと時間があれば．．．（工学技術、17年）
	非常に分かりやすく，理解することができた．一方，最後の質問の削除されたFEPリストをどのように残すのかという部分は，とても大事な点だと感じた．（工学技術、2年）
	想像だにしなかった処分場変遷について触れることができてよかった。（地質環境、5年）
	処分後の構成要素の変遷について興味深かった。変遷について処分場の場所によって影響の受け方が異なると思うので、処分場の場所にどういった条件を満たしたところが好ましいなど、地質環境調査評価技術との関連についてあればよかったと思う。（地質環境、3年）
	口頭での説明が充実していたため、専門外でも非常に分かりやすいと感じた。FEPや処分場の時間変遷などがまとめられており、地質環境の分野からどういった変遷が予想されそうか提案することの重要性も理解できた。質問にもあったが、想定されるシナリオから除外されたものについては、その根拠も文章に残していただきたく思う。（地質環境、2年）
	人工バリア間の相互作用について、個々の事例について詳しくまとめられており、大変勉強になりました。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	シナリオを構成する各要素を具体的に説明されていてよいと思いました。ただ，具体的なFEPについては，どのような考えのもと構築され，採用（不採用）された経緯があればよかったと思います。（地質環境、3年）
	【よかった点】 ・採用しなかったシナリオについての経緯をとりまとめる点については賛成 ・処分場構成要素の変遷について大まかに理解できた。（工学技術、3年）
	処分場の変遷について、理解しやすくまとめられており、非常に参考になった。（安全評価、6年）
	・各要素の変遷について丁寧にかみ砕いて説明されており，わかりやすく感じた． ・文字の多さ＆小ささが気になった。（工学技術、20年/安全評価、20年）
	これらの内容が、事業にどのような影響を与えたり、課題を残しているのかなどがもう少しわかりやすい形でほしかった。（地質環境、1年）
	人工バリアで起きうる現象について詳しく説明していた。 他分野との連携についても現状を紹介してほしい。（地質環境、2年/安全評価、1年）

講義ID.講義タイトル	意見・要望等
17.核種移行解析モデル	用語の定義が古く、講義13、15のプレゼン資料と違っている（例えば、“変動シナリオ”は、今の定義は少し違っていると感じました）。この講義で出てきた（第二次とりまとめ時の）解析ケースと、講義15の話に出てきた解析ケースとの違いを述べることが参加者の理解を助けることになると感じた。（地質環境、25年）
	核種移行モデルについて、用いられている式や、各項の持つ意味についても説明があり、わかりやすかった。（工学技術、5年）
	・講義15・18との役割分担・調整が必要と思われます。 ・解析ケースの設定や線量評価の結果は、NUMO包括的報告書にまかせて、評価モデル（たとえば、岩盤中の核種移行評価モデル＝平行平板重ね合わせモデル）の考え方、妥当性といったことをもう少し丁寧に説明するなども一案かと思います。母岩中の移行モデルは、SDMを介した連携の観点からも他分野からの興味をもたれるのではないかと考えます。他国の評価事例の紹介などもあってもよかったかもしれません。 ・理解が難しい専門用語を解説なしで使っている場面が見受けられた。　（安全評価、25年）
	核種移行の話を初めて聞いたが、とても分かりやすく興味を持った。実際にどのような解析が行われているか知ることができてよかった。　（地質環境、1年）
	●所属機関が同じでも，この分野の話は全くなじみがなく，難しかった。 ●資料p.8の入力パラメータを実際どのように決めているか気になる。　　（地質環境、1年）
	安全評価（核種移行解析）に係るイメージをもつためには重要な講義であったと思います。　（地質環境、18年）
	改めて、第二次とりまとめにおける核種移行解析モデルの体系を確認できた。　（地質環境、10年）
	核種移行解析モデルについて、考慮すべきパラメータとその結果である線量評価結果とが把握できた。これまでの結果をメインでご紹介いただいたが、現在どのような課題があって何に取り組んでいるのかもわかるとなおよかった。　（地質環境、4年）
	説明そのものはわかりやすかったと思うのですが，時間の割に盛りだくさんな印象でした。さらに，15.を聞いたあとですので，H12もTRU-2もいまさらな感を持ってしまいました。講義の順序か講師（の所属）の見直しがあったほうがよいかと思います。　（安全評価、20年）
	核種移行解析についてモデルの考え方や実際の作業、得られる結果が図を用いて説明されており深い理解につながった。　（工学技術、2年）
	第二次取りまとめで扱った核種移行モデルとその解析結果について，図を多用して説明していただいたので非常に分かり易かったです。今後の業務に役立つ内容でした。 （安全評価、1年）
	資料の文字が小さく、専門用語も多く書かれているので、他分野の人には理解しにくい内容だった。また講師も早口だったので、どこが大事なポイントなのかが把握できなかった。　（地質環境、17年）
	スライドの文章をもう少し減らしたほうが見やすいと思う。（工学技術、3年）
	わかりやすい教材であったと感じる　（工学技術、10年/安全評価、5年）
	解析ケースなど貴重な資料をいただいたが難しかったので理解には至らなかった。（広聴・広報、4年）
	慣れない内容なのですぐに理解することは難しいと感じました。ただ、3次元亀裂ネットワークモデルを近似的に評価できるので1次元平行平板モデルを使っていること等、新たな知識が得られた部分もあり、その点は良かったと思います。（広聴・広報、2年）
	時間スケールが大きいからこそ、入力パラメータの精度が求められると思う、時間変化を表す式において、これ以上不確実性を考慮することは可能なのか、到底分からなかった。第2次取りまとめと包括的技術報告書の違いも学んでいく必要を感じた。（NUMOの包括的技術報告書の元になる部分も多くあり、理解が必要である。）（工学技術、1年）
	スライドについてはある程度纏められていたが、一部文字が多い部分があり、見にくかった。また数式についての説明が記載されていたので、ある程度は後から見直して理解することができてよかった。 (その他、7年)
	資料が見やすく，よかった　（地質環境、7年）
	核種移行解析モデルの重要性、人工バリアおよび母岩中の核種移行解析の前提条件、式、入力パラメータについて、明快に整理されていて、分かりやすい講義でした。（工学技術、7年）
	内容が難解ですが、短い資料で比較的分かり易くまとめて、説明もよかったです。（その他、8年）
	サイエンスコミュニケーターになるという視点だと、一般の人は生活圏評価が身近で気になるのかなと思いました。その部分の説明が多くorそこで一つのトピックとしてもいいのではないでしょうか。（工学技術、1年/安全評価、4年）
	核種移行解析での指標の定義がよく理解できた。（地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年）
	図の使われ方が適切だった。(安全評価、1年）
	核種移行解析の流れ、設定や条件について詳しく学ぶことが出来よかったと思います。核種移行解析モデルの前提条件は、実際の現象を保守的に設定されている事柄がわかると理解しやすいので、今後も重点的にお願いしたいと思います。（安全評価、9年）
	第2次とりまとめでの各種移行解析モデルの考え方について、ポイントを絞って分かりやすくご説明いただけたと思う。NUMOの包括的技術報告書での各種移行解析モデルがもし第2次とりまとめの段階から改良されているのであれば、それについても触れていただきたいと思った。（広聴・広報、1年）
	核種移行解析について、基礎の部分からお教えいただけた。ただ、分野外の人からすると、少し難しすぎる内容になってしまっているような気がする。（安全評価、2年）
	全体的にスライドが見やすく理解しやすかった。（地質環境、9年）
	核種移行はなじみ深い分野であるので、よくわかってきくことができた。また、核種移行モデルの中の一次元平行平板モデルというものを知らなかったのでそういったモデルがあるということを知れてよかった。（工学技術、1年）
	核種移行解析モデルの一連の流れをご説明いただきました。内容は難しかったです。（地質環境、10年/その他、20年）
	通常の放射性廃棄物と TRU 廃棄物では、核種移行解析を行う上で考慮すべき化 学物質に違いがあることが分かった。（工学技術、1）
	良かった点：本筋ではありませんが、はじめのほうに「前提条件」を示して頂いた点が、とっつきやすく、良かったです。モデル化の条件を詳しく示して頂くことで、理解の助けになることがあるな、と感じました。 難しかった点：事前知識に乏しかったため、難しく感じました。（工学技術、2年）
	解析のモデルやパラメータまで詳細に教えていただき、核種というもの自体について勉強不足だったため、結果の理解が難しかったです。（工学技術、1年）
	第二次とりまとめから研究や技術が進歩していることを感じることができた。（地質環境、3年）
	上手く理解できませんでした．（工学技術、17年）
	はじめにとまとめに関して関連性が高く，非常に聞きやすいプレゼンだと感じた．また，次の18章の講義との関連性についても話していただけたことがよかった．（工学技術、2年）
	パラメータや不確実性について，その入り口は理解できたが， 具体的な研究内容はあまり興味がなく分からなかった。（地質環境、5年）
	各種移行解析についてどんな解析を行っているは理解しましたが、各グラフをどう見るのかなど、安全評価を行っている人からしたら当たり前かもしれないこともせつめいしてほしかった。（地質環境、3年）
	人工バリア中および母岩中の核種移行解析について、よく理解できた。また、空間的・時間的な不均質性について、どう対処していくかは地質環境分野の研究者も同じだと考えている。安全評価の知見、考え方などは是非参考にしていきたい。（地質環境、2年）
	第2次取りまとめの安全評価について詳しく説明していただいたのは良いのですが、20年前の評価なのでやや古い印象を持ちました。諸外国の安全評価との比較など、多面的な説明があれば良かったと思います。（工学技術、2年/安全評価、7年）
	必要な解析条件の説明があり，それらを取り込んだ解析がおこなれていることがわかりました。（地質環境、3年）
	【よかった点】 ・第2次とりまとめにおける核種移行解析モデルについて、包括的にまとめられており勉強になった。 【疑問】 ・核種移行解析においても時間的不確実性を加味する、というのは？すでに長い時間スケールでの解析になっているのでは。（工学技術、3年）
	第二次取りまとめの核種移行評価について、人工バリアと母岩に対してその違いなどを学べた。（安全評価、6年）
	・核種移行解析の概要を確認することができ，分量もちょうど良かったと思う．（工学技術、20年/安全評価、20年）
	内容が難しいです。（地質環境、1年）
	核種移行解析に関する知見を紹介してもらえて勉強になった。 第2次取りまとめの内容が多かったが現時点でどの程度進展しているのかも紹介してほしい。（地質環境、2年/安全評価、1年）

講義ID.講義タイトル	意見・要望等
18.核種移行データ・モデル整備とパラメータ設定手法	この講義レベルの話をセミナーに含めようとすると、たとえば、物理探査データの解析方法とか、力学データの実験方法とか、そのような技術者レベルでの話も含める必要が出てくる。個人的にはゼネラリスト育成に必要な技術レベルだと考えていない。(地質環境、25年)
	収着および拡散の試験系について、試験の概要や、試験のメリットやデメリット等の話が面白かった。(工学技術、5年)
	・冒頭部分(除く用語の定義)については、講義17との役割分担・調整が必要と思われます。 (安全評価、25年)
	ガラス固化体の溶解についてどのようなモデルが考えらえていて、どんなデータが必要か学ぶことができた。収着・拡散データベースを知り、今後の研究で用いることができると思った。 (地質環境、1年)
	●データベースの使い方講座もあると大変ありがたい。 (地質環境、1年)
	講義はわかり易く、安全評価に関わる方にとっては有効な講義だと思います。一方で、他分野の方にとっては優先度が低いのではないかと感じました。 (地質環境、18年)
	自分の業務に密接にかかわる部分だったため、非常に参考となる情報が多かった。また、専門用語についても改めて、正確な意味を確認することができた。 (地質環境、10年)
	化学に明るくない方にもわかりやすいように言葉や内容を選んで講演されているのが伝わった。スライドも鮮明で見やすく、よく理解できた。 (地質環境、4年)
	自分の講義ですので評価は控えますが……。他の項目でも書きましたが、「溶解・収着・拡散」といった現象面に注目するだけでなく、主要核種の化学的・放射線学的挙動を紹介しただけでよかったようにも思いました。「データベース」とかは、それらの理解が進んでからではないと、理解が難しいのではないかと思いました。以上の点は、昨年度のセミナー終了時に気づくべきでした…。 (安全評価、20年)
	元素と核種の違いについての説明や地層処分では同位体を区別する必要はないと判断といった基礎や前提が丁寧に説明されていた。また、一つ一つの現象や因子についても図を活用した分かり易い説明がなされていた。 (工学技術、2年)
	核種移行モデルに必要となるパラメータの種類とその測定法について、理解を進めることができました。特に、バッチ系収着試験と圧縮系拡散試験のメリット・デメリットが分かったのが非常に大きかったと思います。 (安全評価、1年)
	はじめに言葉の意味を教えてもらえたので入りやすかった。また図も大きく、話の内容も簡易的なものにしていただいたので良かったと思う。 (地質環境、17年)
	スライドの色使いが派手でちかちかしていたので、原色の部分は彩度を少し落とすと見やすくなると思う。 最初の核種と元素の違いについての説明はわかりやすかった。(工学技術、3年)
	・わかりやすい教材であったと感じる ・研究志向の学生には興味深い内容になると思われる (工学技術、10年/安全評価、5年)
	基本的な部分だが、元素の特徴を説明いただき勉強になった。専門性が高く十分な理解までには至らなかった。(広聴・広報、4年)
	大まかな考え方の部分は理解できたように思いますが、専門外の身にとっては難しいと感じました。 一方で、最初の核種の解説はありがたかったです。(広聴・広報、2年)
	核種移行について、HLWとTRUの違いを認識していなく、参考になった。考慮される影響因子という点で、TRU廃棄物がHLWと違う成分を含み、安全評価のポイントも異なる点、詳しい理解は追いついていないが、勉強になった。これら講義内でもあったトレーサーの事例以外にも、イメージしやすい事例が多くあると(講義内で扱って頂くと)より効果的だと思った。(工学技術、1年)
	専門用語や数式が多く、分野外の人間にとってはかなり理解しにくい教材であった。内容についてもあまりなじみのないものであったので、理解が困難であった。(その他、7年)
	図表類が綺麗に作られていて分かりやすかった (地質環境、7年)
	核種移行解析のパラメータに影響を与える因子や、各種データベースを整備する理由がよく分かりました。核種移行の研究アプローチが、時間と空間のスケールで整理されていたので、各試験等の位置づけについて理解できました。(工学技術、7年)
	内容が難解ですが、資料では図が多く資料のまとめ方や説明方法は比較的分かり易かったと思います。(その他、8年)
	用語の説明、現象論がとても重要だと思うので、核種や収着の説明はとても良かったと思います。(工学技術、1年/安全評価、4年)
	解析で用いるデータベースの試験によるデータ取得方法やデータベースの整備方法がよく理解できた。(地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年)
	ちょうど勉強していた内容だったので聴けてよかった。(安全評価、1年)
	核種の分類からパラメータとそのデータベースについて関連がよくわかり良かったと思います。(安全評価、9年)
	自身の知識が不足している部分も多かったため、自身の理解度は十分ではないと思うが、各種の特徴やモデル解析での扱いについてポイントを絞ってお話しいただいた点は、導入としては分かりやすいように感じた。(広聴・広報、1年)
	どういった取り組みをされているのかがわかりやすくご説明いただけた。(安全評価、2年)
	図が分かりやすくパラメータ設定手順が理解しやすかった。(地質環境、9年)
	核種移行のプロセスの中で、緩衝材とEDZや岩盤を移行する際に主となる移行のモデルが大きく異なることがよくわかった。(工学技術、1年)
	核種の言葉の定義をわかりやすく説明いただきました。熱力学データベースの取組みについてわかりやすく説明いただきました。(地質環境、10年/その他、20年)
	化学的な用語の基礎知識から丁寧に解説して頂いたので、スムーズに理解すること ができた。(工学技術、1)
	良かった点:「核種と元素の違い」や「収着の意味」などの講義のつかみが大変良かったです。収着・拡散の試験に関する内容もイメージが湧きやすく、良かったです。(工学技術、2年)
	個人的に核種移行シナリオについては理解できていない部分だったため、ご説明がとても分かりやすかったです。(工学技術、1年)
	第二次とりまとめから研究や技術が進歩していることを感じることができた。(地質環境、3年)
	いくつかの重要な内容が理解しました.(工学技術、17年)
	説明について,例えば周期表を用いた説明の際に,初学者でも分かるように詳細の説明を避けて,大きな分類で説明していただけたことが非常によかった.(工学技術、2年)
	用語解説がありがたい 噛み砕いた説明で素人も理解しやすかった。(地質環境、5年)
	専門外ということもあり、理解するのが難しかった。しかし、ところどころ丁寧に説明してくれたところもありましたので、部分的にはよくわかった。話の流れ的に、ある程度この分野に理解がある人ならわかりやすくて良い講義だったと感じた。(地質環境、3年)
	安全評価で取得されたデータをどうやって安全評価で使用するか理解できた。母岩中の物質移行パラメータ取得方法について、室内・原位置・ナチュラルトレーサーの違いについては非常に興味がある。何か結果などが出ていれば、是非教えて頂きたい。(地質環境、2年)
	核種移行モデルやパラメータ設定についての説明は良かったと思いますが、個々のモデルの最先端の状況や高度化の可能性についての話題があると良いと思いました。(工学技術、2年/安全評価、7年)
	上記で説明された,パラメータがどのように設定されているかの説明があり,よかったと思います。(地質環境、3年)
	【よかった点】 ・核種移行データ・モデル整備とパラメータ設定手法について、整理された情報で勉強になった。熱力学DBについては興味深い。(工学技術、3年)
	ガラス固化体の溶解変質およびそれに伴う核種移行について、必要とされるデータとその測定方法について費用にわかりやすくまとめられていた。(安全評価、6年)
	・前回セミナーを鑑みた用語説明からの導入には好感が持てた. ・パラメータ取得手法も端的にまとめられておりわかりやすかった.(工学技術、20年/安全評価、20年)
	内容が難しいです。(地質環境、1年)
	核種移行の概念についてわかりやすく説明していた。 得られたデータが最終的にどのように安全評価に活かされるのか説明してほしい。(地質環境、2年/安全評価、1年)

講義ID.講義タイトル	意見・要望等
19.最新の安全評価のための取り組み	講義18にも増して、なぜ今年もこのような内容の講義を依頼したのか、理由が全くわからない。この発表は将来の技術に関する話であり、人材育成とは別次元である。(地質環境、25年)
	・何をやろうとしているかは、とても良く理解できた。 (安全評価、25年)
	図が見やすく、わかりやすかった。ニアフィールドのモデル開発についての国際共同研究の紹介もあり、興味を持てた。(地質環境、1年)
	●興味のある分野であるが，大変難しく，ジェネラリストになるのを断念せざるをえないのかもしれないと思ってしまった。(地質環境、1年)
	講義はわかり易く、安全評価に関わる方にとっては有効な講義だと思います。一方で、他分野の方にとっては優先度が低いのではないかと感じました。 (地質環境、18年)
	4連成の解析が海外含めてチャレンジングな取り組みであるとともい、分野間の連携が非常に重要である点を再認識できた。(地質環境、10年)
	THMCをどのように連携して解析を行うのかがわかった。また、ここでも言葉をきちんと定義して分野間での捉え違いを少なくすることの重要性を認識した。地層処分全般を網羅するエキスパートはおらず、各自が専門知識を持ち寄って解決を目指していく、というメッセージが強く伝わった。(地質環境、4年)
	盛り沢山な内容をとてもうまく説明されていたと思います。回ごとにいろいろなテーマで，気鋭の若手研究者におおいに語っていただければよいかと思います。 (安全評価、20年)
	現状のプロジェクトの例を挙げるなど実践的な講義内容になっておりよかった。 (工学技術、2年)
	THMC解析の最新の研究内容がわかり，とても面白い講義でした。処分場性能の評価のためにより現実的なモデル構築が必要であることが良く分かりました。 (安全評価、1年)
	難しい内容だと思うが、講師が平易に教えてくれたのでよかった。 (地質環境、17年)
	絵の使い方が見やすくてよかったと思う。(工学技術、3年)
	内容が難しいが研究志向の学生には興味深い内容になると思われる (工学技術、10年/安全評価、5年)
	全般的に難しかった。もう少しかみ砕いて説明いただきたかった。(広聴・広報、4年)
	専門外の身にとっては難しいと感じました。(広聴・広報、2年)
	THMCの関係について、JAEA論文等でもよくお見掛けするが、相互関係をより詳しく学ぶこと(分野が偏らず)で、評価手法の精度が高められることを再認識した。同じく、土木工学を専攻した者として、力学場の現象例がイメージしやすく、参考となった。技術開発に限らず、地層処分事業が多分野の力を合わせる必要性について、改めて認識を持つ機会となった。(工学技術、1年)
	資料としては文字も多くなく、要点が整理されていたと思う。内容については数式が多く、専門外の人間にはとても理解できなかった。安全評価の分野ではそういったことが多く、説明の仕方さえ工夫すればよい良いものになるであろうものが多いと感じた。(その他、7年)
	自分の研究内容を分かりやすく説明しており非常に良かった (地質環境、7年)
	講義16において「THMC全ての現象を考慮した解析では、実時間を超える解析時間が必要」とのコメントがありましたが、そのようなTHMC連成解析における課題への具体的な対応についてもう少し詳しく講義いただけるとより理解が進んだと思います。(工学技術、7年)
	内容が難解ですが、資料は図が多く、また結論部分は明瞭だったので、多少は理解できたと思います。(その他、8年)
	過渡期からの一気通貫はとても興味があります。最後の連成解析をする上での苦労点で一つトピックにしても面白かったのかなと思いました。(工学技術、1年/安全評価、4年)
	複雑な連成挙動の評価について、現状の取り組みが理解できた。(地質環境、4年/工学技術、1年/安全評価、20年)
	各要素が互いにどのように影響しているかの説明がためになった。(安全評価、1年)
	検討の意義から最新のTHMC解析の動向や専門家の協力の大事さなど経験に基づいた話が良かったと思います。(安全評価、9年)
	自身の知識が不足している部分も多かったため、自身の理解度は十分ではなかったと思う。THMC解析の考えかた、手法など、基礎的な内容についても扱っていただけるとありがたかった。(広聴・広報、1年)
	現在検討されている解析手法について説明いただけたのは良かった。解析手法やモデルは様々なものがあると思いますが、それぞれの特徴、長所短所などを最初に教えていただければ、なお良かったと思います。(安全評価、2年)
	ニアフィールドTHMC連成挙動評価手法の持つ要素について、その概要が理解できた。(地質環境、9年)
	今回、THMCに焦点を当ててはなされていてTHMCについてはよくわかったのですが、テーマの本質と少しずれているような感じがしました。(工学技術、1年)
	THMC連成挙動評価手法についてわかりやすく説明いただきました。(地質環境、10年/その他、20年)
	実際のサイトの状況に即した現実的な評価を行うために、様々な技術分野が協力して評価技術を向上させていく必要があることが分かった。様々な技術分野から集った 聴衆を引き付けるような発表だと感じた。(工学技術、1)
	良かった点：様々な挙動を解析プログラムにどう取りこむか、という内容が良かったです。(工学技術、2年)
	THMCという多領域の分野において、連携した解析モデルの開発という新たな取り組みについて、ご説明いただき、新たな知見となりました。(工学技術、1年)
	地層処分の未来は明るい、と感じることができる素晴らしい講義だった。(地質環境、3年)
	非常に複雑な問題が検討されて，解析の結果に加えて，解析の注意点，課題，適用性なども加えていただきたいです．(工学技術、17年)
	緩衝材の作製方法やペレットの充填方法が実際の動画で確認することができたので，イメージを沸くことができたのがよかった．(工学技術、2年)
	分野間連携の重要性を再確認できた。(地質環境、5年)
	安全評価のTHMCについて講義していただいたが、ニアフィールドではどのように研究が進んでいるのか知れてよかった。また、ニアフィールドのTHMCについて地質環境の人間も知っておかなければいけないと思った。(地質環境、3年)
	ニアフィールドでの連成解析の概要について、よく分かった。また、国際的なプロジェクトに参加している点や他分野との協力が必要なこと等、セミナーらしい内容に纏まっている印象を受けた。大変満足な内容であった。(地質環境、2年)
	THMC連成挙動や国際プロジェクトの現状を知ることができて良かった。一方、THMCの安全評価における位置付けについて、もう少し説明があると良いと思いました。(工学技術、2年/安全評価、7年)
	個別分野の集積する必要があり，大変で理解が大変だと思いました。(地質環境、3年)
	【よかった点】 ・ニアフィールドTHMCについての概要、現状について学べた ・今後、こうした連成解析はシミュレーション上必要であり、興味深い分野だと思う。(工学技術、3年)
	最新の安全評価手法についてまとめられており、良かった。(安全評価、6年)
	・最近のTHMC解析の動向を確認する機会となり，有意義だった． ・解析手法の発展に関する経緯の紹介も，セミナー講義として良い流れだと思う。(工学技術、20年/安全評価、20年)
	内容が難しいです。(地質環境、1年)
	連成解析の現状や課題を説明されていて具体例も示されていてよかったと思う。(地質環境、2年/安全評価、1年)

（様式２）

二次利用未承諾リスト

平成31年度放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務）報告書（2019年度分）

平成31年度放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務）

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告1-4	図5	セメント硬化体の溶脱に伴う構造変化と拡散係数変化
（別添1）研究報告1-4	図6	ジオポリマー硬化体の概要
（別添1）研究報告1-8	表2	全体研究計画
（別添1）研究報告1-9	表3	メタカオリン及び高炉スラグの化学組成
（別添1）研究報告1-10	表4	試験体の配合
（別添1）研究報告1-10	写真１	フローの測定
（別添1）研究報告1-10	写真２	作製したジオポリマー試験体
（別添1）研究報告1-13	図7	練混ぜ直後のフロー値
（別添1）研究報告1-13	図8	フロー値に及ぼす砂量の影響
（別添1）研究報告1-14	図9	試験体の含水量
（別添1）研究報告1-14	図10	強熱減量測定結果
（別添1）研究報告1-15	図11	圧縮強度試験結果
（別添1）研究報告1-16	図12	割裂引張強度試験結果
（別添1）研究報告1-16	図13	割裂引張強度と圧縮強度の関係
（別添1）研究報告1-17	図14	超音波伝播速度測定結果
（別添1）研究報告1-17	図15	弾性係数測定結果
（別添1）研究報告1-18	図16	弾性係数と圧縮強度の関係
（別添1）研究報告1-18	図17	収縮量測定結果
（別添1）研究報告1-19	図18	プロトンNMR測定結果
（別添1）研究報告1-20	図19	固体NMR測定結果
（別添1）研究報告1-21	図20	XRD測定結果
（別添1）研究報告1-22	図21	ナトリウム型ジオポリマー中のEPMAによる元素分布測定結果
（別添1）研究報告1-23	図22	低温DSC測定による硬化体内部の水分の状態
（別添1）研究報告1-24	図23	ジオポリマーのセシウムイオン拡散試験結果
（別添1）研究報告1-24	図24	偏光顕微鏡測定結果
（別添1）研究報告1-25	図25	セシウムイオンの吸着等温線
（別添1）研究報告1-26	図26	溶出量測定結果（6か月累積）
（別添1）研究報告1-27	図27	質量減少率の推移
（別添1）研究報告1-27	表5	透水係数試験結果
（別添1）研究報告2-8	表４	透過拡散試験　条件一覧
（別添1）研究報告2-9	図４	二次鉱物の析出が無い場合のHTOおよびCl-36相対濃度の経時変化と最適化曲線
（別添1）研究報告2-9	図５	二次鉱物の析出が無い場合の透過拡散試験後の含水率分布
（別添1）研究報告2-10	図６	石膏が析出した場合のHTOおよびCl-36相対濃度の経時変化と最適化曲線
（別添1）研究報告2-10	図７	石膏が析出した場合の透過拡散試験後の含水率および陽イオン当量濃度分布
（別添1）研究報告2-11	図８	カルサイトが析出した場合のHTOおよびCl-36相対濃度の経時変化と最適化曲線
（別添1）研究報告2-11	図９	カルサイトが析出した場合の透過拡散試験後の含水率および陽イオン当量濃度分布

（様式２）

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告2-12	表５	透過拡散試験　結果一覧（試験後の含水率および乾燥密度）
（別添1）研究報告2-13	図１０	HTOおよびCl-36実効拡散係数と拡散試験後の乾燥密度との関係
（別添1）研究報告2-16	図１２	珪砂を混合したベントナイトにおける通電後の各イオン分布
（別添1）研究報告2-17	図１３	初期Ca当量分率0.50における実験後の試料のEPMA観察結果
（別添1）研究報告2-18	図１４	初期Ca当量分率0.75における実験後の試料のEPMA観察結果
（別添1）研究報告2-22	図１５	数値解析により最適化した初期濃度条件
（別添1）研究報告2-23	図１６	最適化した初期濃度条件におけるカルサイト析出挙動の解析結果（2 mA, 10日）
（別添1）研究報告2-24	図１７	最適化した初期濃度条件におけるカルサイト析出挙動の解析結果（4 mA, 5日）
（別添1）研究報告2-25	図１８	透過拡散試験において、実効拡散係数が局所的に変化した場合の試料内部濃度の経時変化
（別添1）研究報告3-2	図1	結晶質岩中の地下水流動および物質移動の経路となる割れ目の概念図
（別添1）研究報告3-3	図2	土岐花崗岩体の位置図
（別添1）研究報告3-3	図3	結晶質岩中の微組織を用いた割れ目分布評価手法の概念図
（別添1）研究報告3-4	図4	土岐花崗岩体中の領域ごとの温度－時間履歴
（別添1）研究報告3-5	図5	温度－時間履歴と割れ目頻度との関係を示した概念図
（別添1）研究報告3-9	図6	土岐花崗岩体に位置する瑞浪超深地層研究所の研究坑道の概念図
（別添1）研究報告3-10	図7	BTVを用いて得られた土岐花崗岩体のDH-12号孔の鉛直方向（標高）に対する割れ目頻度の変化
（別添1）研究報告3-10	図8	土岐花崗岩体中の緑泥石化を示した偏光顕微鏡写真
（別添1）研究報告3-11	図9	土岐花崗岩体中の斜長石の変質を示した偏光顕微鏡写真
（別添1）研究報告3-11	図10	「熱水変質のパラメータ」「BTVで得られるラージスケールの割れ目」「顕微鏡サイズのマイクロスケールの割れ目」そして「岩体の冷却」の間の「関連性」の検討
（別添1）研究報告3-12	図11	土岐花崗岩体の研究調査領域を代表する温度－時間履歴（t-T path）と「熱水変質」「マイクロスケール割れ目」「ラージスケールの割れ目」との関連性
（別添1）研究報告3-14	表1	06MI03号孔サンプルNo. A1～A13試料採取情報
（別添1）研究報告3-14	表2	06MI03号孔サンプルNo. 1～12試料採取情報
（別添1）研究報告3-16～21	表3	サンプルNo.A1からNo.A13までの岩石記載
（別添1）研究報告3-22	図12	斜長石変質の3つのタイプ（Type A-C）
（別添1）研究報告3-23	図13	微小孔領域面積と変質領域面積の比
（別添1）研究報告3-23	図14	変質領域面積と変質領域面積の相関関係
（別添1）研究報告3-24	図15	反応物と生成物、熱水間の反応関係の概略図
（別添1）研究報告3-24	図16	緑泥石化から斜長石の変質へと至る物質移動を示した概念図
（別添1）研究報告3-25	図17	画像解析による黒雲母の緑泥石化の変質パラメータの導出
（別添1）研究報告3-27	図18	画像解析による斜長石の変質パラメータの導出：サンプルNo. A1-1
（別添1）研究報告3-28	図19	サンプル中での黒雲母（緑泥石）粒子の選択
（別添1）研究報告3-29	図20	サンプル中での斜長石粒子の選択
（別添1）研究報告3-30	図21	部分的に緑泥石化した黒雲母
（別添1）研究報告3-30	図22	部分的に緑泥石化した角閃石
（別添1）研究報告3-30	図23	割れ目に充填した緑泥石（電子顕微鏡・組成像）
（別添1）研究報告3-31	図24	黒雲母起源緑泥石、ホルンブレンド起源緑泥石、充填緑泥石の生成温度
（別添1）研究報告3-32	図25	緑泥石化温度から生成年代の推定
（別添1）研究報告3-33	図26	イライトK-Ar年代から生成温度の推定
（別添1）研究報告3-33	図27	カリ長石K-Ar年代から生成温度の推定
（別添1）研究報告3-34	図28	取得済みの変質パラメータ
（別添1）研究報告3-35	図29	変質パラメータとラージスケール割れ目の関係

（様式２）

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告4-10	表１	堆積岩試料の諸元
（別添1）研究報告4-10	表２	等方圧密時のひずみテンソルと主ひずみ
（別添1）研究報告4-12	図９	等方圧密時の主ひずみ方向
（別添1）研究報告4-13	図１０	軸圧縮時のひずみテンソル
（別添1）研究報告4-13	図１１	軸圧縮時のひずみテンソル
（別添1）研究報告4-14	表３	堆積軟岩の面内等方弾性
（別添1）研究報告4-15	図12	飽和度の時系列変化
（別添1）研究報告4-16	図13	ひずみテンソルの時系列変化
（別添1）研究報告4-16	図14	三主ひずみの時系列変化
（別添1）研究報告4-16	図15	温度の時系列変化
（別添1）研究報告4-18	図16	三主ひずみの方向
（別添1）研究報告4-19	図18	最大主ひずみ方向と層理面のWulffnet上の位置関係
（別添1）研究報告4-20	図19	ひずみテンソルの時系列変化
（別添1）研究報告4-20	図20	三主ひずみの時系列変化
（別添1）研究報告4-20	図21	温度の時系列変化
（別添1）研究報告4-21	図22	三主ひずみの方向
（別添1）研究報告4-21	図23	最大主ひずみ方向と層理面のWulffnet上の位置関係
（別添1）研究報告4-24	図25	ひずみテンソルの応答
（別添1）研究報告4-25	図26	三主ひずみの応答
（別添1）研究報告4-26	図27	力学特性と飽和度の関係
（別添1）研究報告5-14	図3.1.1.2.	地下で高圧培養容器に、添加剤、微生物、酸化剤を封入するシステム
（別添1）研究報告5-14	図3.1.1.3.	瑞浪超深地層研究所内の地下坑道の深度 300mに位置する09MI20号孔(区間1)で添加剤を封入したチューブを取り付けて高圧培養容器に直接採水した
（別添1）研究報告5-16	図4.1.1.1.	09MI20-1の地下水を現場で封入した際の水素濃度
（別添1）研究報告5-17	図4.1.2.1.	実験室で一定の圧力で地下水、添加物等を封入する系
（別添1）研究報告5-17	図4.1.2.2.	瑞浪超深地層研究所内の地下水を実験室で高圧培養容器に封入し高圧培養を行った試料中の水素濃度(左)と13C及び12Cメタンで異なる水素濃度(右)
（別添1）研究報告5-18	図4.1.2.3.	瑞浪超深地層研究所内の地下水を実験室で高圧培養容器に封入し高圧培養を行った試料中で確認された硫化水素濃度の減少
（別添1）研究報告5-18	図4.1.2.4.	微生物細胞添加なし培養試料中の硫化水素(左)と硫酸(右)の経時変化
（別添1）研究報告5-19	図4.1.3.1.	テトラバッグで11日間放置した13Cメタン、一酸化炭素、水素の濃度
（別添1）研究報告5-19	図4.1.3.2.	アルゴンガスを充填したグローブボックス内(A)で、地下水や添加剤をテトラバックに封入し(B)、高圧培養容器内に入れた。
（別添1）研究報告5-21	図4.1.4.1.	瑞浪超深地層研究所内の地下水をテトラバッグに封入し高圧培養した際の硫黄濃度の変化
（別添1）研究報告5-22	図4.2.1.1.	幌延深地層研究所の地下水を濾過した孔径0.2 μmのポリカーボネートフィルターとステンレスホルダー
（別添1）研究報告5-23	図4.2.1.2.	幌延深地層研究所内の地下水をテトラバッグに封入し高圧培養した地下水中の溶存無機炭素
（別添1）研究報告5-24	図4.2.2.1.	幌延深地層研究所内の地下水をテトラバッグに封入し高圧培養した地下水中の溶存二価鉄濃度
（別添1）研究報告5-14	表3.1.1.3.	瑞浪超深地層研究所における現場高圧培養実験の条件
（別添1）研究報告5-17	表4.1.2.1.	瑞浪超深地層研究所内の地下水を実験室で封入し高圧培養する際の培養条件
（別添1）研究報告5-20	表4.1.4.1.	瑞浪超深地層研究所内の地下水をテトラバッグに封入し高圧培養する際の培養条件
（別添1）研究報告5-22	表4.2.1.1.	幌延深地層研究所内の地下水を実験室でテドラバッグに封入し高圧培養する際の培養条件
（別添1）研究報告5-23	表4.2.2.1.	幌延深地層研究所内の地下水を実験室でテドラバッグに封入し高圧培養する際の培養条件
（別添1）研究報告6-1	図1-1	地層処分システムの概念図
（別添1）研究報告6-8	図3-1	原鉱石サンプルの様子
（別添1）研究報告6-10	図3-2	各原鉱石の粉末試料の鉱物組成分析結果
（別添1）研究報告6-11	図3-3	不撹乱供試体（左）と再構成供試体（右）の作製概念図

（様式２）

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告6-12	図3-4	再構成供試体の作用荷重―乾燥密度の関係
（別添1）研究報告6-15	図3-5	フレーム型膨潤圧試験装置の概略図
（別添1）研究報告6-17	図3-6	小型膨潤圧試験装置の概要
（別添1）研究報告6-18	図3-7	本研究における不撹乱供試体の膨潤圧低下メカニズムの推察
（別添1）研究報告6-18	図3-8	モンモリロナイト単位結晶の底面間隔と層間の水分子量の関係
（別添1）研究報告6-19	図3-9	XRD測定面の定義
（別添1）研究報告6-19	図3-10	XRD測定の概念図
（別添1）研究報告6-21	図3-11	一次元膨潤変形試験装置
（別添1）研究報告6-22	図3-12	蒸留水中に静置した原鉱石試料の様子と中国産原鉱石の洗い出し中のふるい上残留分の様子
（別添1）研究報告6-24	図3-13	検量線を用いた石英の重量含有割合の算出例
（別添1）研究報告6-28	図3-14	粒径～0.425 mm（上），0.850～2 mmの再構成供試体（中）および不撹乱供試体（下）の膨潤圧の経時変化曲線
（別添1）研究報告6-29	図3-15	粒径～0.425 mmおよび0.850～2 mmの再構成供試体と不撹乱供試体の試験終了時の供試体の乾燥密度と最大膨潤圧の関係
（別添1）研究報告6-32	図3-16	粒径～0.425 mm（上），0.850～2 mmの再構成供試体（中）および不撹乱供試体（下）の膨潤圧の経時変化曲線
（別添1）研究報告6-33	図3-17	粒径～0.425 mmおよび0.850～2 mmの再構成供試体と不撹乱供試体の試験終了時の供試体の乾燥密度と最大膨潤圧の関係
（別添1）研究報告6-36	図3-18	粒径～0.425 mm（上），0.850～2 mmの再構成供試体（中）および不撹乱供試体（下）の膨潤圧の経時変化曲線
（別添1）研究報告6-37	図3-19	粒径～0.425 mmおよび0.850～2 mmの再構成供試体と不撹乱供試体の試験終了時の供試体の乾燥密度と最大膨潤圧の関係
（別添1）研究報告6-40	図3-20	粒径～0.425 mm（上），0.850～2 mmの再構成供試体（中）および不撹乱供試体の一次元膨潤変形率の経時変化曲線
（別添1）研究報告6-41	図3-21	粒径～0.425 mmおよび0.850～2 mmの再構成供試体と不撹乱供試体の試験開始時の供試体乾燥密度と最大一次元膨潤変形率の関係
（別添1）研究報告6-42	図3-22	粒径～0.425 mmおよび0.850～2 mmの再構成供試体と不撹乱供試体の試験開始時の供試体乾燥密度と試験終了時の供試体乾燥密度の関係
（別添1）研究報告6-45	図3-23	粒径～0.425 mm（上），0.850～2 mmの再構成供試体（中）および不撹乱供試体（下）の一次元膨潤変形率の経時変化曲線
（別添1）研究報告6-46	図3-24	粒径～0.425 mmおよび0.850～2 mmの再構成供試体と不撹乱供試体の試験開始時の供試体乾燥密度と最大一次元膨潤変形率の関係
（別添1）研究報告6-47	図3-25	粒径～0.425 mmおよび0.850～2 mmの再構成供試体と不撹乱供試体の試験開始時の供試体乾燥密度と試験終了時の供試体乾燥密度の関係
（別添1）研究報告6-50	図3-26	粒径～0.425 mm（上），0.850～2 mmの再構成供試体（中）および不撹乱供試体（下）の一次元膨潤変形率の経時変化曲線
（別添1）研究報告6-51	図3-27	粒径～0.425 mmおよび0.850～2 mmの再構成供試体と不撹乱供試体の試験開始時の供試体乾燥密度と最大一次元膨潤変形率の関係
（別添1）研究報告6-52	図3-28	粒径～0.425 mmおよび0.850～2 mmの再構成供試体と不撹乱供試体の試験開始時の供試体乾燥密度と試験終了時の供試体乾燥密度の関係
（別添1）研究報告6-54	図3-29	高さ2 mm，フレーム型，7日間のXRDおよび膨潤圧の経時変化曲線
（別添1）研究報告6-56	図3-30	高さ4 mm，小型，5日間のXRDおよび膨潤圧の経時変化曲線
（別添1）研究報告6-58	図3-31	高さ6 mm，小型，2日間のXRDおよび膨潤圧の経時変化曲線
（別添1）研究報告6-60	図3-32	高さ4mm，小型，5日間のXRDおよび膨潤圧の経時変化曲線
（別添1）研究報告6-62	図3-33	不撹乱高さ4mm，小型，6日間のXRDおよび膨潤圧の経時変化曲線
（別添1）研究報告6-64	図3-34	月布産原鉱石　時間-膨潤圧関係
（別添1）研究報告6-65	図3-35	供試体の試験後乾燥密度と最大膨潤圧の関係
（別添1）研究報告6-65	図3-36	供試体の含水比とモンモリロナイトの底面間隔の関係
（別添1）研究報告6-66	図3-37	不撹乱供試体と再構成供試体のピーク比較（w=15.5～15.7%）
（別添1）研究報告6-67	図3-38	不撹乱供試体と再構成供試体のピーク比較（w=17.0%）
（別添1）研究報告6-67	図3-39	不撹乱供試体と再構成供試体のピーク比較（w=18.7～18.8%）
（別添1）研究報告6-69	図3-40	月布産原鉱石の随伴鉱物のXRD結果
（別添1）研究報告6-70	図3-41	アメリカ産原鉱石の随伴鉱物のXRD結果
（別添1）研究報告6-70	図3-42	中国産原鉱石の随伴鉱物のXRD結果
（別添1）研究報告6-71	図3-43	富岡産原鉱石の随伴鉱物のXRD結果

（様式２）

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告6-72	図3-44	月布産原鉱石＋CaF2 10%混合試料のXRD結果
（別添1）研究報告6-72	図3-45	アメリカ産原鉱石＋CaF2 10%混合試料のXRD結果
（別添1）研究報告6-72	図3-46	中国産原鉱石＋CaF2 10%混合試料のXRD結果
（別添1）研究報告6-73	図3-47	富岡産原鉱石＋CaF2 10%混合試料のXRD結果
（別添1）研究報告6-73	図3-48	CaF2単体試料のXRD結果
（別添1）研究報告6-76～77	図3-49	各鉱物の重量割合に関する棒グラフ
（別添1）研究報告6-5	表2-1	本研究の実施計画（2018年度時点）
（別添1）研究報告6-5	表2-2	本研究の実施計画（2019年度初頭時点）
（別添1）研究報告6-6	表2-3	本研究の実施計画（2020年度初頭時点）
（別添1）研究報告6-7	表3-1	2019年度の研究スケジュール
（別添1）研究報告6-9	表3-2	原鉱石の基本的性質
（別添1）研究報告6-9	表3-3	測定条件
（別添1）研究報告6-19	表3-4	測定条件
（別添1）研究報告6-23	表3-5	測定条件
（別添1）研究報告6-23	表3-6	各鉱物の検量線データ
（別添1）研究報告6-25	表3-7	XRDの測定条件
（別添1）研究報告6-26	表3-8	月布産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の諸元
（別添1）研究報告6-27	表3-9	月布産原鉱石の再構成供試体（粒径0.850～2 mm）の諸元
（別添1）研究報告6-27	表3-10	月布産原鉱石の不撹乱供試体の諸元
（別添1）研究報告6-30	表3-11	アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の諸元
（別添1）研究報告6-31	表3-12	アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径0.850～2 mm）の諸元
（別添1）研究報告6-31	表3-13	アメリカ産原鉱石の不撹乱供試体の諸元
（別添1）研究報告6-34	表3-14	中国産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の諸元
（別添1）研究報告6-35	表3-15	中国産原鉱石の再構成供試体（粒径0.850～2 mm）の諸元
（別添1）研究報告6-35	表3-16	中国産原鉱石の不撹乱供試体の諸元
（別添1）研究報告6-38	表3-17	月布産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の諸元
（別添1）研究報告6-39	表3-18	月布産原鉱石の再構成供試体（粒径0.850～2 mm）の諸元
（別添1）研究報告6-39	表3-19	月布産原鉱石の不撹乱供試体の諸元
（別添1）研究報告6-43	表3-20	アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の諸元
（別添1）研究報告6-43	表3-21	アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径0.850～2 mm）の諸元
（別添1）研究報告6-44	表3-22	アメリカ産原鉱石の不撹乱供試体の諸元
（別添1）研究報告6-48	表3-23	中国産原鉱石の再構成供試体（粒径～0.425 mm）の諸元
（別添1）研究報告6-48	表3-24	中国産原鉱石の再構成供試体（粒径0.850～2 mm）の諸元
（別添1）研究報告6-49	表3-25	中国産原鉱石の不撹乱供試体の諸元
（別添1）研究報告6-53	表3-26	試験ケース
（別添1）研究報告6-54	表3-27	d001に関する結果（膨潤圧試験前）
（別添1）研究報告6-56	表3-28	d001に関する結果（膨潤圧試験後）
（別添1）研究報告6-58	表3-29	d001に関する結果
（別添1）研究報告6-61	表3-30	d001に関する結果
（別添1）研究報告6-62	表3-31	d001に関する結果
（別添1）研究報告6-74	表3-32	月布産原鉱石の内部標準法による鉱物組成定量結果
（別添1）研究報告6-74	表3-33	アメリカ産原鉱石の内部標準法による鉱物組成定量結果
（別添1）研究報告6-75	表3-34	中国産原鉱石の内部標準法による鉱物組成定量結果
（別添1）研究報告6-75	表3-35	富岡産原鉱石の内部標準法による鉱物組成定量結果
（別添1）研究報告6-80	表3-36	2020年度の研究スケジュール

（様式２）

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告7-5	図1	本研究で想定したコンパートメント領域を有する水理地質構造
（別添1）研究報告7-5	図2	図1の水理地質構造に基づく仮想水理地質モデル
（別添1）研究報告7-6	図3	解析に用いた水理地質モデル
（別添1）研究報告7-7	図4	花崗岩体における断層周辺の浸透率
（別添1）研究報告7-7	図5	断層周辺における亀裂密度と浸透率分布の概念モデル
（別添1）研究報告7-8	図6	断層における透水係数の設定
（別添1）研究報告7-8	図7	粒子追跡法による解析における粒子の移行開始地点
（別添1）研究報告7-11	図8	断層およびキャップロックを含まないモデルでの地下水流動解析結果
（別添1）研究報告7-12	図9	キャップロックを含むモデルでの地下水流動解析結果
（別添1）研究報告7-13	図10	断層を含むモデルでの地下水流動解析結果
（別添1）研究報告7-14	図11	断層とキャップロックを含むモデルでの地下水流動解析結果
（別添1）研究報告7-17	図12	反応輸送解析における移行開始領域
（別添1）研究報告7-19	図13	収着を考慮しない条件での反応輸送解析結果
（別添1）研究報告7-20	図14	断層における収着を考慮した反応輸送解析結果
（別添1）研究報告7-22	図15	断層における収着を考慮した反応輸送解析結果
（別添1）研究報告7-23	図16	ボーリング孔位置図
（別添1）研究報告7-26	図17	10MI22号孔と10MI23号孔試料の粘土分含有率
（別添1）研究報告7-27	図18	粘土分のXRDパターン
（別添1）研究報告7-30	図19	10MI22号孔と10MI23号孔試料におけるCsの収着分配係数
（別添1）研究報告7-31	図20	10MI22号孔と10MI23号孔試料におけるEuの収着分配係数
（別添1）研究報告7-31	図21	10MI23号孔における表面積と粘土分含有率
（別添1）研究報告7-32	図22	10MI22号孔 69 m試料の収着試験結果
（別添1）研究報告7-32	図23	10MI22号孔 85 m試料の収着試験結果
（別添1）研究報告7-32	図24	10MI22号孔 104 m試料の収着試験結果
（別添1）研究報告7-33	図25	10MI22号孔 141 m試料の収着試験結果
（別添1）研究報告7-33	図26	粘土鉱物層間における表面錯体構造の模式図
（別添1）研究報告7-9	表1	仮想水理地質モデルにおける設定値
（別添1）研究報告7-16	表2	収着を考慮する解析で用いた仮想水理地質モデル設定値
（別添1）研究報告7-17	表3	Csとイライトおよびモンモリロナイトの表面錯体反応に関するパラメータ
別添資料2		2019年度人材育成セミナー講義資料集
別添資料4		人材育成プログラムモニターアンケート集計結果