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

（２０２０年度分）

２０２１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 2020 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 3

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 2020 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 2020 年度の研究成果に対する評価 20

2.2.1 中間報告 20

2.2.2 最終報告 21

2.3 2021～2022 年度に実施する研究開発テーマの選定 33

2.3.1 2021 年度から開始する、放射性廃棄物の地層処分を中心とした萌芽的・先進的な
研究開発テーマの選定に関する作業計画 33

2.3.2 研究開発テーマの選定の方針、公募方法、及び選考委員会の設置 34

2.3.3 研究テーマと研究実施者の公募・選考 35

2.3.4 選考委員会による応募研究テーマと研究実施者の選考 35

3. 人材育成プログラムの実施・作成 37

3.1 実施方針 37

3.1.1 前提 37
3.1.2 関連機関の協力 38
3.1.3 本事業におけるジェネラリストの定義 39
3.2 教材の作成 45
3.2.1 背景 45
3.2.2 教材作成方針 47
3.2.3 教材作成計画・スケジュール 48
3.2.4 2020 年度における実施内容 49
3.3 2020 年度の人材育成セミナーの開催 58
3.3.1 昨年度のセミナーからの考察 58
3.3.2 セミナーの企画の検討 59
3.3.3 人材育成セミナーの内容の検討 59
3.3.4 人材育成セミナーの開催に向けて 63
3.3.5 人材育成セミナーの開催概要 67
3.3.6 アンケート結果の整理及び考察 73
3.4 今後の計画について 73
3.4.1 教材作成に関する 2021 年度以降の計画 73
3.4.2 人材育成セミナーについて 77

別添資料１　実施研究報告
別添資料２　実施研究の総括
別添資料３-１　地層処分に関する包括的知識の構成（学習指導要領）
別添資料３-２　地層処分に関する専門的知識の構成（学習指導要領）
別添資料３-３　人材育成セミナーアンケート用紙
別添資料３-４　人材育成セミナーアンケート結果

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、以下２項目を実施する。具体的な作業内容を表1.2-1に示す。

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。

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。

次節で、2020 年度に実施する作業計画を整理する。

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

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もらう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。なお、資源エネルギー庁と相談の上、中間評価（中間報告）では、2018 年度に採択された研究開発テーマの、次年度以降の研究継続、または中止等の対応についても評価委員会に諮る。また、2021 年度から 2 カ年で実施する新規の研究開発テーマの選定を外部有識者からなる選考委員会を設置して実施する。なお、新規テーマの採択数は、2018 年度から実施している研究開発テーマの継続件数に応じて決定する。

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、新型コロナウイルス感染拡大状況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（詳細は 3 章を参照のこと）。

- 以下に示す対象とするジェネラリストに応じ、教材の作成及び人材育成セミナーを実施する
- レベル 1 のジェネラリスト育成に関しては、「地層処分に関する包括的知識」及び「地

層処分に関する専門的知識」の 2 種類を作成する。今年度は、両教材の学習項目やその内容などを定める学習指導要領を作成する。「地層処分に関する包括的知識」については、その教材の案も作成する。

- 作成した「地層処分に関する包括的知識」の教材案については、地層処分スキルアップ研究会等でレビューを受ける。
- レベル 2 のジェネラリスト育成に関しては、小規模のセミナーとして、駿河湾岸での地下水調査を題材とし、演習やサイト見学、グループワークを組み合わせた内容とする。

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での連絡・問い合わせ対応を実施した。なお、新型コロナウイルス感染拡大防止の観点から、大学等への訪問による打ち合わせに代えてオンライン会議に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、以下に示す 7 件の研究テーマの 2020 年度の成果概要を、2.2 節では評価委員会において 2020 年度実施内容等のチェックアンドレビューの状況を整理した。

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
〔研究者：北海道大学　胡桃澤 清文〕

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　〔研究者：電力中央研究所　田中真悟〕

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
〔研究者：山形大学　湯口貴史〕

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〔研究者：埼玉大学　富樫陽太〕

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
〔研究者：東京大学　鈴木庸平〕

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　〔研究者：早稲田大学　王海龍〕

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
〔研究者：日本原子力研究開発機構（JAEA）　渡辺勇輔〕

また、次年度以降の 2 ヵ年（2021～2022 年度）で実施する新たな萌芽的・基礎的研究テーマを 2021 年 4 月から研究を開始できるように、選考委員会を設置して選定した。選定過程を 2.3 節に整理した。

2.1 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発テーマの 2020 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。

＊＊＊＊＊

（2020 年度の実施計画）

2020 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、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セシウム等を吸着させその収着特性について検討を行う。また、1.5 年間にわたる核種の溶出・溶脱試験の測定を行った。これらの作製した試験体のキャラクタリゼーションを固体核磁気共鳴（NMR）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電子線プローブマイクロアナライザ（EPMA）によってマッピングを行う。

＊＊＊＊＊

（2020 年度の成果概要）

異なる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、アルカリ刺激剤の種類によって圧縮強度などの機械的物性が異なることを明らかにした。このことから適切なアルカリ刺激剤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形成される微細構造に起因することを明らかにした。養生温度の影響はアルカリ刺激剤の種類によって異なり、圧縮強度や収縮特性に影響

を与えることが示された。このことから必要な性能を満足するためには、適切なアルカリ刺激剤の選定がジオポリマー硬化体を使用する上で必要であることが示唆された。

試験体を塩化セシウム溶液に浸漬して拡散試験を行った結果、セシウムの見かけの拡散係数はおおよそ $10^{-12}m^2/s$ のオーダーとなった。一方で、塩化物イオンは全く浸透していない結果となった。塩化セシウムの吸着試験においても、セシウムは特にナトリウムを刺激剤とした試料で最も吸着量が多くなったが、塩化物イオンは全く吸着していなかった。

インプット法により透水試験を行った結果、ジオポリマー中の水の拡散係数はおおよそ $10^{-6}m^2/s$ のオーダーとなった。同程度のセメントモルタルと比較すると約一桁高い値となった。このことから、メタカオリン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、塩化セシウム以外のイオンの吸着挙動や拡散挙動を明らかにすること、及び純水以外の海水などを用いた系での溶脱性などの特性を明らかにすることが課題である。また、実際の放射性廃棄物処分を考慮した場合に、ジオポリマーと一緒に用いられ、ジオポリマーと接触する可能性のあるセメント系材料やベントナイトなどとの接触面における特性変化を明らかにすることが今後の課題である。

2.1.2 実施研究 2　研究者：電力中央研究所　田中真悟

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。

＊＊＊＊＊

（2020 年度の実施計画）

2020 年度は、2019 年度に見出した初期濃度条件で、電場により二次鉱物の析出形態（析出量、位置など）が異なる変質緩衝材を調製する。調整した変質試料を用いて、透過拡散試験を行い、実効拡散係数を評価する。また、定水位法による透水試験を行い、緩衝材中の二次鉱物が透水係数に与える影響について検討する。

＊＊＊＊＊

（2020 年度の成果概要）

変質緩衝材の調製については、2019 年度に乱した初期条件にて、ベントナイト試料中に炭酸カルシウム析出量を制御して調整できる手法を確立した。X 線回折分析により、変質試料に含まれる炭酸カルシウムの鉱物はカルサイト及びバテライトであった。

透過拡散試験については、重水とヨウ化物イオンをそれぞれトレーサーとして用いて、循環型システムによる透過拡散試験装置を用いて実行拡散係数の取得を行った。炭酸カルシウムの析出により、緩衝材中の重水及びヨウ化物イオンの全体の実効拡散係数が低下した。また、ヨウ化物イオンのほうが析出物の影響をより強く受けることが分かった。この

理由としては、ベントナイトの負電荷によりヨウ化物イオンがベントナイトから静電的に排除され、その拡散経路が粒子間空隙に制限されていること（陰イオン排除)、及び炭酸カルシウムが主に粒子間空隙を閉塞していることが考えられる。

炭酸カルシウムが析出した緩衝材を用いて透水試験を実施した結果、炭酸カルシウムの析出量が少ない場合は、析出が無い場合と比較して透水係数が低下した。この結果は、炭酸カルシウム析出による空隙閉塞によるものと考えられる。炭酸カルシウムが多量に析出した場合は、析出が無い場合と比較して透水係数が大きくなった。また、透水係数の経時変化から、透水係数が回復する場合もあることが分かった。この原因として、炭酸カルシウムの析出量が多い場合は、セメンテーションに類似した現象により膨潤性を失い、ひび割れが生じて透水係数が増大した一方で、膨潤性を残した部分の再膨潤により透水係数が回復した可能性が挙げられる。

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（物質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。

＊＊＊＊＊

（2020 年度の実施計画）

2020 年度は、2018、2019 年度に取得した、黒雲母の緑泥石化、斜長石の変質それぞれの変質パラメータを用いて、ラージスケール割れ目との関連性について検討する。また、顕微鏡レベルのマイクロスケール割れ目の定量的評価手法を構築し、得られたマイクロスケール割れ目とラージスケール割れ目、変質パラメータとの関連性について検討する。最後に花崗岩体中の現在の割れ目分布と将来的な割れ目発生の潜在性の評価手法について考察を行う。

＊＊＊＊＊

（2020 年度の成果概要）

変質パラメータとラージスケール割れ目の関連性について検討した結果、黒雲母の緑泥石化、斜長石の変質それぞれの変質パラメータとラージスケール割れ目は正の相関性を有することが確認出来た。

顕微鏡レベルのマイクロスケール割れ目の定量的評価手法については、電子顕微鏡による化学組成像から画像解析により微小空隙面積とオリジナルな鉱物領域の面積を導出し、面積比からマイクロスケール割れ目の面積分率を取得することが出来た。マイクロスケール割れ目の面積分率と変質パラメータの関連性について検討したところ、変質パラメータと微小空隙には正の相関があることが確認出来た。この結果は、変質の程度がマイクロスケール割れ目の面積に支配されていることを示唆する。

ラージスケール割れ目とマイクロスケール割れ目との関係について検討したところ、ラージスケール割れ目が大きい試料では微小空隙の面積分率と変質パラメータが大きく、ラージスケール割れ目が小さい試料の場合は、微小空隙の面積分率と変質パラメータが小さくなる関係が確認された。このことは、マイクロスケール割れ目が、物質移動に大きく寄与するラージスケール割れ目の種として働く可能性を示唆する。

これらの結果から、マイクロスケール割れ目を経路とした熱水流動により熱水変質がもたらされ、その後、このマイクロスケール割れ目を種として、除荷や断層活動によりラージスケール割れ目が発達するメカニズムを提案した。また、変質現象はマイクロスケール割れ目を求める方法と比較して、肉眼や顕微鏡下で観察することが容易であるため、変質パラメータを用いることで、その領域のラージスケール割れ目の頻度を把握することが可能となることが示唆された。

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。

＊＊＊＊＊

（2020 年度の実施計画）

2020 年度は堆積岩の透水性、保水性を調べるために、ベレア砂岩と田下凝灰岩を用いてフローポンプ式による透水試験、及び水銀圧入試験を行う。また、処分坑道の飽和度分布を推定するために、熱伝達境界を導入した非線形偏微分方程式（リチャーズ式）の厳密解の導出を行う。さらに、処分坑道の変形特性を把握するために、飽和度の変化に伴う異方性の主軸の回転を表現した有限要素法（FEM）解析を行う。最後に、スイスのモン・テリ岩盤研究所で測定してきた透気現象の計測結果をシミュレートするための、透気現象の厳密解を導出して固有透気係数を取得する方法の開発を行う。

＊＊＊＊＊

（2020 年度の成果概要）

フローポンプ式による透水試験の結果、ベレア砂岩では 10^{-7}（m/s）程度の透水係数であり、層理面の Z 方向の透水係数は他の方向よりも 1/5 程度小さかった。一方で、田下凝灰

岩の透水係数は 10^{-11}（m/s）程度であり、透水係数の異方性は見られなかった。保水性について水銀ポロシメータ試験により求め、圧入圧力と圧入量の関係から保水性曲線を求めたところ、堆積岩の剛性変化が生じる飽和度の範囲では、水分特性曲線の傾きは一定に近いことが確認された。

飽和度分布を求めるリチャーズ式の厳密解の導入に関しては、水分量の変化が滑らかな熱伝達境界を導入した厳密解を導出した。検証のために、乾燥収縮実験で測定した飽和度変化についてシミュレーションしたところ、実験結果を精度よく再現することが出来た。

異方弾性 FEM 解析については、堆積岩の変形異方性のモデル化に用いられる面内等方弾性体を用いて、異方性の主軸の回転を表現できるパラメータを導入し、パラメータを変化させた異方弾性 FEM 解析を実施した。その結果、異方弾性の変化によって坑道の変形特性が明確に変化することが示された。

モン・テリ岩盤研究所における透気現象のシミュレーションについては、線形化した透気の支配方程式の厳密解を用いて、現地計測をシミュレーションした結果、ボーリング孔内の気圧挙動を再現することが出来た。また、固有透気係数を求め、その値から透水係数を推定したところ、6.7×10^{-16}~10^{-13}（m/s）程度となり、既往研究の値とほぼ同じかやや小さい値となった。

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）

地層処分において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。

＊＊＊＊＊

（2020 年度の実施計画）

2020 年度は、瑞浪超深地層研究所及び幌延深地層研究所から採取した地下水を用いて、昨年度実施した高圧培養試料中の溶存無機炭酸の同位体測定、懸濁物中に含まれる粘土鉱物と地下水深度に対応する岩石コアの粘土鉱物を解析する。さらに、各高圧培養サンプル中の微生物細胞数、DNA を用いた微生物群集構造解析を実施する。

＊＊＊＊＊

（2020 年度の成果概要）

幌延深地層研究所から採取した地下水を用いて行った ^{13}C で標識したメタンを添加した系での培養試験後に、溶存無機炭素の安定同位体を測定した結果、培養前と比較して培養後は無機炭素の ^{13}C の割合が増加したため、培養実験中に微生物によるメタン酸化が進行したことが示唆された。また、高圧条件と比較して常圧条件で培養試験をした場合では、炭素同位体の数値が小さい結果となり、地下の高圧環境に生息するメタン酸化を行う微生物が低圧条件では活性が下がったことが示唆された。また、様々な酸化剤を添加して実験を行ったところ、酸化剤を添加していない系と比較して炭素同位体の値が小さくなったことから、元々の地下水中に含まれる懸濁物がメタン酸化代謝における電子受容体として重要

な役割を果たしていることが示唆された。

培養実験における微生物の群集組成を明らかにするために 16SrRNA 遺伝子解析を実施した結果、培養期間を通じて嫌気的メタン酸化古細菌の *Methanoperedenaceae* が存在していることが確認され、培養期間を通じて嫌気的メタン酸化が進行したことが示唆された。

地下水懸濁物中に含まれる鉱物の固体解析をしたところ、X 線回折によりスメクタイト系層状珪酸塩鉱物の存在が示唆され、さらに電子顕微鏡とエネルギー分散型X線分析により、スメクタイトに微量の鉄が含まれていることが示唆された。これらの結果から、*Methanoperedenaceae*は粘土鉱物中に含まれる鉄を還元してメタン酸化を行っている可能性が示唆された。また、フーリエ変換赤外分光分析により、地下水中懸濁物は元来地層中（声問層）に含まれる粘土鉱物であることが示唆された。

瑞浪超深地層研究所の地下水を用いた培養実験で得られた溶存無機炭素の炭素同位体を測定した結果、幌延深地層研究所の地下水を用いた培養実験で得られた溶存無機炭素の方が高い値を示した。この結果から、幌延深地層研究所の地下水の場合ではよりメタン酸化活性が高いことが示唆された。

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。

＊＊＊＊＊

（2020 年度の実施計画）

2020 年度は、月布産、アメリカ産、中国産の原鉱石試料を粉砕した粉末試料を用い、締固めることで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する。また、昨年度に試験方法を構築し月布産原鉱石を用いて適用性を確認した XRD・膨潤圧連携試験について、アメリカ産・中国産原鉱石の不攪乱・再構成供試体に対して試験を実施する。さらに、原鉱石におけるセメンテーションのメカニズム解明に向けて、薄片試料を作製して電子顕微鏡で観察し、微視的構造について考察する。

＊＊＊＊＊

（2020 年度の成果概要）

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作製した粒径 2～4.75 mm の再構成供試体の膨潤圧、膨潤変形特性については、月布産原鉱石（地質年代約 1 千万年前）では膨潤圧・膨潤変形特性に関して再構成供試体の粒径による影響はほぼ見られなかったのに対し、アメリカ産（地質年代約 1 億年前）・中国産原鉱石（地質年代約 1.5 億年前）では粒径が大きくなるほど、膨潤圧・膨潤変形特性が低下する傾向がみられた。この結果は、原鉱石の地質年代が古くなることで膠結作用の影響が大きくなることが、膨

潤圧、膨潤変形特性が低下する原因であることが推察された。また、膨潤圧について、不攪乱供試体と再構成供試体（粒径～0.425 mm）の値を比較すると、膨潤圧では月布産で約1/2、アメリカ産で約 1/3、中国産では約 1/3～1/4 であり、不攪乱供試体の膨潤圧は再構成供試体より低くなる傾向となった。同様に、膨潤変形特性についての不攪乱供試体と再構成供試体の比率は、月布産でほぼ同程度、アメリカ産で約 1/2、中国産で約 1/2～1/3 であった。この結果からも、膨潤圧・膨潤変形特性に対する膠結作用の影響は年代に応じて強まることが示唆された。

アメリカ産・中国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結果、前述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とどまる結果が得られるとともに、モンモリロナイト底面間隔については大きな差異がないことが分かった。

3 種類の Na 型ベントナイト原鉱石から薄片試料を作製し、偏光顕微鏡及び走査型電子顕微鏡を用いて土粒子の微視的骨格構造について評価した結果、モンモリロナイト、石英、斜長石、黄鉄鉱などの鉱物が同定された。

最後に、地層処分事業に対する本研究成果の適用として、オーバーパックの腐食に伴う水素ガス破過を想定し、シナリオを構築した。そして、本研究で得られた膨潤圧・膨潤変形試験結果と緩衝材の設計乾燥密度を踏まえて、緩衝材の自己修復性評価手法のひな型を作成した。

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。

＊＊＊＊＊

（2020 年度の実施計画）

2020 年度は、断層の内部構造（断層ガウジ、ダメージゾーン）に応じた水理特性が地下水流動に及ぼす影響や，断層の周囲の母岩とは鉱物組成が異なることで生じる収着作用が物質移行に及ぼす影響を定量的に把握するため、仮想的な水理地質モデル（仮想モデル）と実在する断層周辺の水理地質モデル（実在モデル）を用いた地下水流動解析と反応輸送解析を行う。

断層周辺岩石の元素収着特性については、これまで得られた収着データについてさらに拡充する。また、収着した元素がその後の地下水流動により脱離されることを想定した脱離試験を実施する。

＊＊＊＊＊

（2020 年度の成果概要）

仮想モデルを用いた解析では、断層交差部の水理特性、及びコンパートメント領域に対するキャップロックの広がりが地下水流動に及ぼす影響について検討した。その結果、コ

ンパートメント領域内部から外部に向かう地下水流動に対してキャップロックの広がりが大きな影響を及ぼすことが明らかになった。実在する断層の水理地質モデルを用いた解析では、地下水流動解析および粒子追跡解析を行った。さらに、断層に収着に寄与する粘土鉱物を設定し、地下水流動解析で算出された地下水流動状態に基づいて収着性トレーサーの長期的な移行推定を行った。粒子追跡解析から、地下水は断層にほぼ並行な方向に流動することが示され、地下水流動を断層が規制しているものと考えられたが、流動経路が粘土鉱物を設定したグリッドを通過しなかったことから、反応輸送解析で収着の影響は生じなかった。

断層周辺岩石の元素収着特性については、これまでのセシウム（Cs）、ユウロピウム（Eu）に加えて、バリウム（Ba）をトレーサーとして用いた収着試験を実施した。Ba は Cs や Eu と比較すると分配係数が小さく、地下水と同様の pH、イオン強度条件で容易に脱離することが確認された。Cs は粘土鉱物であるイライトやスメクタイトへの強い親和性のため、固相に強く固定され脱離されにくいことが確認された。Eu は Ba と同様に粘土鉱物への収着は弱いと考えられるが、一般的な地下水条件である pH7～9 付近の水では加水分解により移動しにくいことが示唆された。

2.2 評価委員会による 2020 年度の研究成果に対する評価

2018 年に選定し 3 カ年の期間で研究開発を実施してきた、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 2020 年度実施内容等のチェックアンドレビューを実施した。

2.2.1 中間報告

2020 年度の評価委員会における中間報告は以下の日時で実施した。

2020 年度　第 1 回評価委員会
日時：2020 年 9 月 7 日（月）　10：10～16：10
場所：オンライン会議（事務局：原環センター第 2 会議室）

中間報告では、各研究者から 2020 年度の研究進捗状況、及び 3 年間の研究成果概要となる総括の骨子案について 25 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。なお、委員会は新型コロナウイルス感染拡大防止に対応するためにオンライン会議形式で実施した。

また、昨年度（2019 年度）の評価委員会において、2018 年度に採択された研究開発テーマの、次年度以降の研究継続、または研究期間の終了等の対応について、委員会での意見交換をした結果、以下のような対応をすることとなっていた。

- 2020 年 9 月頃の中間評価において、3 年間の研究成果の総括骨子案を研究者に説明してもらい、それに対して評価を行い、研究期間を延長可能とする研究者を決める。
- 具体的には、①中間評価において定量的な評価を実施し、②上位 2 名程度を対象として委員会の場で延長の可否を審議し、研究期間を延長可能とする研究者を決定する。その後、③研究者に対して 2021 年 4 月から 2 カ年の研究を継続する意思を確認した上で、研究者が継続を受け入れた場合は 2 年間延長して研究を実施する。
- 延長する研究テーマの数は最大で 2 件とする。ただし、評価・議論の結果、1 件あるいは 0 件となる場合もある。
- 延長が認められなかった研究者については通例通り、本事業の研究テーマ公募での再応募は認めない。

資源エネルギー庁と相談の上、2020 年度中間報告において、上記の研究期間延長に関する評価も実施した。その結果、1 件の研究開発テーマについて 2 年間延長を可能とすることが評価委員会で認められた。しかしながら、研究実施者本人に研究期間の延長について打診したところ、実施者本人は延長しての研究実施に前向きであったものの、諸事情により継続研究の実施は難しいとの判断により、研究期間延長については辞退となった。

2.2.2 最終報告

2020 年度の評価委員会における最終報告は以下の日時で実施した。

2020 年度　第 2 回評価委員会
日時：2021 年 2 月 9 日（火）　10：10～16：00
場所：オンライン会議（事務局：原環センター第 2 会議室）

最終報告では、各研究者から 2020 年度の研究成果、及び 3 年間の研究成果概要に関する総括について、また、中間評価における評価委員会委員からの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、及び委員による評価記入を 15 分間行った。なお、委員会は新型コロナウイルス感染拡大防止に対応するためにオンライン会議形式で実施した。

評価では、以下の項目について評価点数を付け、また 2020 年度の研究に対する意見、3 年間の総括への意見、研究実施者の今後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

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。

2020 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。	4.2
・実施研究は新規性・独創性があるか	4
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.8

自由意見	・ TRU 等廃棄物については、廃棄物形態としてもっぱら固定化材はセメントに限られ、より良い材料がないのかという悩みがあるので、ジオポリマーについて着実に検討を進められており、それなりの成果も得られている点は評価する。ただ、せっかくの検討が、こういう条件と状況ではぜひジオポリマーを使うべきという形で成果が整理されていればと思う。 ・ ジオポリマーについて包括的な研究を示している。 ・ コスト的な問題はあるが、用途を選べば有効な材料になり得ると思われる。 ・ 今後、耐放射線特性についても調査の必要がある。 ・ ジオポリマーの適用性について、限定された時間長ではあるが、機械強度、微細構造解析、溶出特性、拡散抵抗性、吸着性などの多面的評価を行い、セメント系材料と遜色ない性能を有することが示され、セメント系材料の欠点を補完する材料として期待が持てる結果である。 ・ 発表ではあまり触れていなかったが、処分で問題視される、C や I などのアニオンの移行を抑制できる材料としての利用も考えられ、セメントの代替というだけではなく、より積極的な活用法はないだろうか。 ・ 外部発表について、データが充足された段階で、ジャーナルなどの活字として残る媒体への発表を期待する。 ・ ジオポリマー硬化体に関して、これまで不明なことの多かった強度特性、吸着性能、溶出特性、物質移動特性を精査し適切な配合条件を明らかにするとともに、影響因子の抽出を行っており、さらにデータを蓄積していけば、実用に耐えるジオポリマー硬化体となり得ることを示したことは評価に値すると考える。 ・ セメントに比べて種々の優位性は大いにあると思われるので、長期的な耐久性の評価やコストに関する問題をクリアするための実用化に向けた研究を進めて欲しい。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2020 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。	4.5
・実施研究は新規性・独創性があるか	4.3
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	4

自由意見	・ 緩衝材間隙を閉塞するためのカルサイト（アラゴナイト？）沈殿の生成、または結晶成長の速度は過飽和度と温度に依存しているのではないかと思う。イオン結晶といえども陽イオンの脱水和には時間がかかる。 ・ 本研究を含め、人工バリアの長期健全性を短期の実験から推測する難しさを考えさせられるが、チャレンジすべき重要な課題であると思う。 ・ 多くの新しい知見が得られており、非常に興味深い。 ・ 炭酸カルシウムの分布が不均一なので、それぞれの場所での拡散係数も変化していると思われる。 ・ 炭酸カルシウムの析出の多いもので透水係数が高くなるのは、モンモリロナイトの層間が縮んでいる可能性があるので、X 線回折（XRD）で確認した方が良い。 ・ 透水係数が大きくなる試料での拡散も大きく影響を受けるように思われるが、拡散の場合は、ボトルネックが大きく影響している可能性もあり、今後の研究の進展が期待される。 ・ 実験結果そのものは、現実の処分環境を模擬したものとは言えないが、2 次析出鉱物の物質移行に与える影響を実験的に捉えた実例としての重みは大きい。拡散に与える影響は、ほぼ論理的に説明できるレベルにあることは、非常に良い。一方で、透水性に与える影響は、精度をもって結論付けられる状況には至っていない。今後、この点を明らかにすることを期待する。 ・ 2 次析出鉱物のモル体積を実験的に得られる可能性があり、このことを非常に期待している。少なくとも、解析上、あたかもデファクト的に用いている数値に疑いがないかを確認するには、実験による確認が一番であり、これが可能な極めて稀な成果と言える。 ・ 外部発表にも意欲的である点も評価したい。 ・ 炭酸カルシウムの析出に関して、実験的なデータ取得と、予測モデルの改良をしており、これまで考えていたメカニズムを定量的に求め、それを表現できるモデルが開発されているので、当初の目的は達成したと評価できる。長期の透水特性への影響についてはさらに時間をかけて検討することを期待する。 ・ ベントナイト中への炭酸カルシウムの形成と、それによる透水性などへの影響に関して、独創的な実験方法でのアプローチなど、成果も含めて良好に進められたと判断できる。あと、できれば、これらの現象が実際の処分地下環

	境で生じるものなのか、その辺の情報整理も含めて今回の研究の位置付けが示されたならさらにいい研究になると思われる。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2020 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。	4.5
・実施研究は新規性・独創性があるか	4.3
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.8

自由意見

- 門外漢からみると、ガラスが急冷されると細かなひびが多数発生することと似ているような気がする。マイクロスケールの割れ目、顕微鏡サイズの割れ目、ラージスケールの割れ目の発生と成長、発生密度は、岩石を構成している鉱物結晶の晶出温度の違いや、岩体のおかれた温度圧力条件と冷却及び除荷の速度、その後の力学的自然事象に関連していると思われるので、違う地域、環境（日本以外も含めて）の岩体（花崗岩以外も含めて）との関係を定性的でもよいからまず大きく眺めてから、何がこれらを支配しているかを考えてはどうか。
- 地下の割れ目分布についての知見を得る大事な仕事なので、今後の発展を期待する。
- 9 月の発表時に不明であった因果関係について明確に説明されていた。
- 各パラメータが大きな誤差を含んでいるが傾向は認められる。
- 仮説に従っていないサンプルについて、潜在的な可能性を述べているが、マイクロとラージスケールの比較だけでなく、かかっている応力とその緩和能力で評価することはできないか。
- 作業仮説に基づいて、周到に研究計画が立てられ、目標に向かって着実に進んでいる。作業仮説自体は、論拠の数が少ないため、仮説の域を出ているとは言えないが、割れ目発生の潜在性を議論するうえで、一つの判断材料となる可能性がある。今後、データを蓄積し、作業仮説を基本原理にまで高められるよう期待する。また、堆積岩系ではどのような作業仮説があり得るのか、検討を進めることも期待している。
- 外部発表も意欲的であり、成果の発信は十分であると評価する。
- ミクロとマクロを繋げて割れ目の分布を考えることは大変重要であり、地層処分のサイト選定やサイト特性評価に有用であると思うが、チャレンジングな課題であると認識している。
- 湯口さんの研究方法は作業仮説を立てて取り組むことは評価されるが、一方で、それだけで十分なのかと問うことも大事であるように思う。常に仮説を吟味しながら、研究を進めることを期待する。
- 微小割れ目が大スケール割れ目の評価に通じるという話は、地層処分の岩盤評価に役立つと思われる。もちろんそれだけで決まる訳ではないが。
- 多くの委員から質問があったが，この微小割れ目と大スケール割れ目の関係は、鶏が先か卵が先かという話になってくる。それを避けるには発表者がどちらの立場に立って仮説を作って議論を進めているということを明確に示し

	た方が良いと思う。 ・ 岩石鉱物の変質組織の詳細な観察、記述、分析に基づいて、割れ目の発達過程との関連を追求しようとするユニークな研究であり、論文発表にも精力的で、具体的な成果が上がっていると判断できる。一方で、マイクロスコピックな観察事実が、ラージスケールの割れ目発生にどのようにつながって行くのかのプロセスについては、未だ不明であり課題を残す形となった。また、地層処分事業との時空間スケールでのギャップも未だ解消されておらず、その辺の議論もあるとさらにいい研究になったと思われる。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2020 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。	4.3
・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	3.3

自由意見	・ 青森県六ケ所村の低レベル放射性廃棄物埋設センターでは余裕深度処分の調査・施設検討が行われており、対象となる地層は深度 80m における軽石凝灰岩層と聞いている。すでに施工などが行われているので、そのときの検討状況とこの研究との対応などについても整理して紹介すればよいと思う。このような岩盤の異方性がどの程度深刻なのかは、原位置の岩盤次第ということになるが、それでも大まかな検討としてどのような堆積岩ならどうなるかなどは定性的に示せないものかと思う。地層処分では沿岸海底下の付加体における堆積岩が対象になる可能性があり、そこでの堆積岩の変形異方性がどうなるかは大いに気になるところである。 ・ 堆積岩の飽和度と剛性の異方性のモデルを構築している。 ・ 透水係数等のモデル化を行っており、実際の現場適用例も示されている。 ・ 概要調査がはじまる時に、有効な調査・評価手段として利用することが期待される。 ・ 掘削影響領域の水分飽和度と変形異方性を関連づけ、それを実験及び解析から、定量的に示した点は高く評価できる。一方で、評価式の中に不確実性を取り込むと、一見すると適用性が増すように見えるが、その実、調整因子次第で、合っているのかどうかが判りにくくなる。 ・ 本課題で取り扱った手法は、実際のトンネル掘削で利用されて初めて本領が発揮されるであろう。その意味では、ぜひ、現地試験との比較を行って欲しい。スイスのモン・テリ岩盤研究所のデータ評価は、その一環であろうが、ばらつきが大きく、判断が難しいところが惜しい点である。 ・ 外部発表が積極的に行われている点は評価したい。 ・ 研究目的に対して、多くのアイディアをもって取り組まれたことは評価に値する。この研究課題では、岩石材料に対する変形異方性を主に扱っているが、実際の岩盤には割れ目が存在するとともに、掘削影響領域も形成される。このような実岩盤における変形挙動に対して、どのように応用することができるのかを盛り込んでもらえることを期待する。 ・ 世界で初めての成果が得られたことはよろこばしいことと思うが、この研究は地層処分よりはトンネル掘削に役立つ研究と思われる。その場合、海底下や山岳地域など、具体的な地域でのいろいろな条件下での問題を示せば，地層処分により近づいたのではないかと思われる。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2020 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。	4
・実施研究は新規性・独創性があるか	4.6
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	4.2

自由意見	・ 放射性廃棄物処分における微生物の役割に関する科学的研究については、微生物プロセスは処分場の変遷(evolution)、あるいは核種の移行にどのような影響を与え、セーフティケースにどのように貢献するのかがよくわからないという意見が常に提出される（MIND project DELIVERABLE 3.6:The impact of the inclusion of microbiology on expert conceptualization and public perception of geological disposal)。一体、微生物は影響するのかしないのか、影響があるとすればどのような影響なのか（核種移行、バリア材料の変遷、微生物誘導腐食、埋め戻し後の還元環境の回復・・)、現行の研究はその中で何がわかるようになるのかといった背景情報についても説明に加えて欲しい。深部地下の地質環境に微生物の「生態系」が遍在することと、それによりある程度均質と考えられる何らかの地質環境条件が維持されていて、それが処分場の変遷に影響を与えるかどうかは単純に結び付けられるとは思われない。いずれにしても地下深部の微生物生態系についても、その地層処分システムに対する影響についても知らないことが多すぎるので、これに関する知識を得ることが必要であることには同意する。ぜひ今後とも研究を進めてもらえればと思う。 ・ 微生物の挙動については、処分に対して不確実性を持つものとして、今後とも知見を集めていく必要があると考える。 ・ 実際には、概要調査の段階でどのような微生物がサイトにいるのか、どのように活動するのかを調べることになるが、現時点では、微生物が処分場に与える影響についてのシナリオ、モデル、データ、必要に応じて対策を示していくことになると思われる。 ・ 例えば、硫化水素はコンクリートをはじめ、多くのバリアに影響を与えるので、これを生成する微生物活動は重要となるし、鉄還元により還元環境を維持できるのであれば、アクチニドの溶解度にも大きな影響を与える。これらの影響をより定量的に評価できるような研究目標を示してほしい。 ・ 微生物の影響という、これまで漠としたイメージしか持てなかった課題に、定性・定量的に議論が可能な状況が見えてきたことを示す、重要な成果である。 ・ また、実験手法を確かなものにするための苦心の跡が見え、それがデータの信頼性を一層高めている。 ・ これまで得られた情報から、定量的な評価がいきなり出来る訳ではなく、定量的な評価ができる方向にあるものが何で、そこまで行けそうにないものは

	何かを明らかにするだけでも、処分に対するインパクトはある。そのためには評価者への情報の周知が重要であり、専門分野だけでなく、処分関連分野にも外部発表などの情報発信を期待する。 ・ テドラーバックを用いた高圧培養実験手法を開発し，地下環境を忠実に再現した状態で実験を実施したことは有意義であると思う。メタン酸化速度の測定とある発表スライドで、速度の結果が実感できる図となっていないように感じた。 ・ 得られた結果を今後どのように地層処分の課題に応用していくのか、市民目線で提示するとよいと思う。 ・ 地層処分と直接関係ないように見えるが、実は概要調査あるいはその前の調査地区選定におけるプロセスの中で、必ず必要になる情報を提供する研究と思う。多くの人が地下について不安を持っている。特に、コロナ禍を経験した人々は、地下水流動だけでなく地下の生物環境、細菌に関する説明を求めて来ると思われる。そこで、定量的、実証的な地下細菌に関する情報は極めて重要である。研究計画に未達成の部分があることは事実だが、それは本研究を地層処分に結びつけようとして、細かな領域に風呂敷を広げすぎたためであろう。本研究には、そのようなことよりは、地下の細菌について正確な調査を行い、地層処分による影響や地下環境の変化に関する情報の集積・説明が可能になるような研究の進展を期待する。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2020 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。	3.7
・実施研究は新規性・独創性があるか	3
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.3

自由意見	・ ベントナイトの膨潤特性がどのくらい長期にわたって維持されるかが言えるまでもう少し努力が必要かと思う。キーはセメンテーションの機構とその進行速度、条件ということになりと考えられる。セメンテーションの進行による膨潤の阻害についてもメカニズムの理解が必要と思う。 ・ 原石の膨潤性が被圧期間によって悪くなるが、粉砕し再構成することで膨潤性を回復しているように見える。 ・ 処分への問題としては、被圧によって膨潤性が劣化するかが重要なので、それを確認するような試験をして欲しい。 ・ 被圧だけでなく、地下水組成によって、例えばカリウムイオン等によって部分的にイライト化のようなことが起きているのかという情報が不足している。 ・ 原鉱石をセメンテーションを受けたベントナイトと仮定し、粉砕試料がセメンテーションを取り除いた状態にあると考えて、最大拘束圧を指標に、セメンテーションの有無の違いがベントナイトの性能に与える影響度を可視化したのは、面白い着想である。ただ、粉砕＝セメンテーションの解除、と捉えてよいのか、セメンテーションの程度を数値化できていないところが惜しい。セメンテーションそのものの分析及び機構解明を補充すると、結果がより有意義なものになると思われる。 ・ ナチュラルアナログの一つの目的として、超長期の時間に対する挙動を理解する点がある。その意味では、時間軸に対する分析が不鮮明な点がある。億年レベルの試料を見るのではなく、むしろ、1 千万年程度の試料に絞って、地史との関連を見ながら、ベントナイトが置かれた環境がセメンテーションにどう関わっているのかを見るのも良いのではないか。その意味では、新たな試料を検討している点は期待できる。 ・ 外部発表も着実になされていると評価する。 ・ セメンテーションとは何かでストップしてしまい、考察が十分にできていない印象であった。３つの原鉱石を使いながら、その３つの原鉱石の違いに関する比較がされていないのは残念である。それぞれの原鉱石を産出した地質学的なプロセスを具体的に比較してみるのがよいと思う。 ・ ベントナイトの長期挙動に関する、ナチュラルアナログも含めた研究として、地質時代のベントナイトの性質も含めた多岐に渡ったデータが得られていると判断する。一方で、未だ、セメント現象に関しての解析が不十分であり、

	どういうメカニズムでセメント現象が生じているのか。堆積環境なども含めた考察の追加があるとさらに良い研究になると思われる。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2020 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
自由意見	・ 水理地質モデルにおける断層部・健岩部の扱いについては、NUMO の包括的技術報告書に合わせて透水係数をベクトル量として設定するなどとしてほしかった。一方、キャップロックについても考慮されたことは評価できる。これらを合わせて GBI がどうなるか、生活圏への移行の際の生活圏全体への移行はどう評価すべきかを考えていただければと思いました。 ・ 断層に遅延効果を期待できると言うことは評価できる。ただし、パラメータの設定やその有効性、時間変化についても検討する必要があると思われる。 ・ また、断層充填鉱物がどのような期間に形成され、今後どの程度安定に存在できるのかについても情報を得ることが必要と思われる。 ・ キャップロックについても、どの程度の期間、キャップを維持できるのかによって評価が変わるのではないか。 ・ 仮想サイトに対する地下水流動解析は、結果がある程度予想されるものであり、最初に、何を示したいのかを明確にして、その通りの結果が得られたのかどうかを議論した方が、より戦略的なアプローチになるであろう。 ・ 収着実験において、脱離試験を並行して行ったことは非常に良い。収着実験の殆どが脱離を全く意識していないことに危惧を持つからである。一方で、この結果が、通常の Kd モデルとどのような相違をもたらすのか、それは危険側なのか、安全側なのか、早めに答えを整理しておかないと、不毛な議論に引きずり込まれる可能性があるので、注意して頂きたい。 ・ 外部発表の努力については、記載がないので判断できない。 ・ 断層のバリア機能について調べるためには，実際に断層がどのように分布しているかを如何に妥当性のある形で示せるかがポイントになると考えます。数値解析的な検討はそのような分布に対して実施されるのがよく，この研究課題で示されたような定性的な傾向把握はあまり有用でないと感じました。瑞浪での計算結果も，なにかの実測値との比較をしないと，結果の妥当性の判断ができないと思います。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2.3 2021～2022 年度に実施する研究開発テーマの選定

2.2 節でも示した通り、2018 年度に採択された研究開発テーマの、次年度以降の研究継続、または今年度での研究終了等の今後の対応について、資源エネルギー庁と相談の上、中間報告で延長に係る評価を実施した。一方で、資源エネルギー庁と相談した結果、中間評価の結果、延長とならずに 2020 年度で終了する研究開発テーマの件数に対応する形で、2021～2022 年の 2 ヵ年で実施する新たな萌芽的・基礎的研究テーマを、2021 年 4 月から研究を開始できるように、2020 年度中に選考委員会を設置して選定することとした。なお、2.2 節で述べたように、中間報告で延長が認められた 1 件の研究テーマについては、研究実施者の事情により、研究期間を延長しての研究継続は辞退となったため、結果として、2020 年度に終了する 7 件の研究テーマと同数の研究テーマを今年度採択することとした。

2.3.1 2021 年度から開始する、放射性廃棄物の地層処分を中心とした萌芽的・先進的な研究開発テーマの選定に関する作業計画

2021 年度から研究を開始する 7 件の研究開発テーマの選定は以下の手順で進める。

① 研究開発テーマの選定の方針、公募方法について、有識者からなる委員会（選考委員会）に諮問

② 原環センターのホームページ等を用いた公募

③ 応募があった研究開発テーマについて、選考委員会にて書類及びプレゼン審査による選考

①については、最初に公募の基本的な考え方や公募方法を事務局において整理した後に、設置した選考委員会にて妥当性を諮る。

②については、募集要領を原環センターのホームページに掲載することにより、研究実施者の応募を受け付ける。また、関連する学会等の案内を活用して公募案内を周知する。

③については、応募のあった研究開発テーマ・実施者について、書類審査、及びプレゼン審査の 2 段階の審査を実施し、研究開発テーマを実施する研究者を決定する。

2.3.2 研究開発テーマの選定の方針、公募方法、及び選考委員会の設置

最初に、研究開発テーマの選定にあたり、委託研究の考え方について、本事業の目的やこれまでの有識者委員会での議論等を踏まえ、以下の方針とした。

- 地層処分の技術的信頼性向上に資する、かつ将来実施主体が発展的に技術開発することに資する萌芽的・基礎的な研究テーマを幅広に募集する。
- 処分技術に関する主に 4 つの分野（地質環境、工学技術、性能評価、代替オプション）で研究テーマ・研究実施者を公募する。
- 公募では参考となる研究テーマを例示する。
- 人材育成の観点から、応募対象者を 45 歳以下の研究者に限定する。

例示する研究テーマについては、上記の考え方に基づき、以下の国の政策や審議会の提言、その他の議論を参考に整理・抽出した。

- エネルギー基本計画（平成 30 年 7 月）
- 特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（平成 27 年 5 月）
- 地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～令和 4 年度）（令和 2 年 3 月改訂）
- 地層処分技術 WG とりまとめ（平成 29 年 4 月）
- 地層処分技術 WG 中間とりまとめ（平成 26 年 5 月）
- 原子力白書（平成 30 年 7 月）
- 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）（2018 年 11 月）
- 海外の研究開発動向

次に、研究開発テーマの選考にあたり、以下の役割を担う選考委員会を設置した。

- 公募方針についての妥当性を諮る
- 応募者の選考（書類審査（一次審査）、プレゼン審査（二次審査））

また、選定委員会を以下のように 2020 年度中に 3 回開催した。

- 第 1 回選考委員会（2020 年 9 月 9 日）－公募方針の妥当性について諮問
- 第 2 回選考委員会（2020 年 12 月 1 日）－応募者の書類審査、プレゼン審査を受ける

研究者の決定

・ 第 3 回選考委員会（2020 年 12 月 28 日）－プレゼン審査による研究実施者の決定

2020 年度の第 1 回選考委員会において、上記の公募方針や例示する研究テーマ（案）の妥当性について諮った。その結果、公募方針や例示する研究テーマについては了承されたため、これらの方針に従って公募を進めていくこととした。

2.3.3 研究テーマと研究実施者の公募・選考

当初計画に従い、2021～2022 年度の 2 ヵ年の期間での高レベル放射性廃棄物の地層処分を中心とした萌芽的・基礎的研究テーマ及び研究実施者の公募を実施した。公募においては原環センターのホームページに公募案内を掲載し、また以下に示す関連する学会のメーリングリスト等で案内することで公募の周知を図った。公募は 2020 年 9 月 18 日に開始し、途中募集期間を延長して 11 月 9 日に応募の受付を締切った。

- 一般社団法人　日本原子力学会
- 一般社団法人　日本原子力学会バックエンド部会
- 一般社団法人日本地質学会
- 一般社団法人　日本応用地質学会
- 公益社団法人　日本地下水学会
- サイエンスポータル（(国研）科学技術振興機構の運営する科学技術に関するポータルサイト）

2.3.4 選考委員会による応募研究テーマと研究実施者の選考

第 1 回選考委員会において公募方針の了承を受けた後、公募を実施した結果、合計 7 件の応募があった。公募に対して応募された研究テーマ及び研究実施者の選考を第 2 回選考委員会（書類審査（オンライン会議形式））、第 3 回選定委員会（プレゼン審査（オンライン会議形式））において実施し、その結果、応募のあった全 7 件が、本事業における研究開発の実施の目的に沿ったものとなる可能性があると確認されたため、以下の 7 件の研究テーマ及び研究実施者を採択した。

①「沿岸部に近接して施工された処分パネルの掘削時から操業時までの健全性評価に関する研究」

林　久資（山口大学）

②「長期的変質現象を考慮したベントナイト系緩衝材の自己修復性評価手法の構築およびベントナイトの膨潤特性における膠結作用に伴う年代変化の定量評価」

伊藤　大知（早稲田大学）

③「化学的変質によるベントナイトの性能劣化が天然バリアの物性に及ぼす影響評価とそのモデル化」

河野　勝宣（鳥取大学）

④「ベントナイトのセメンテーション現象のナチュラルアナログ研究」

菊池　亮佑（北海道大学）

⑤「粘土鉱物におけるアクチノイド系列放射性核種についての吸着・脱離特性および存在状態の解明」

向井　広樹（筑波大学）

⑥「数値解析と実測に基づく結晶質岩体を対象とした亀裂部―岩体基質部の複合的地下水理構造モデルの構築」

久保　大樹（京都大学）

⑦「隆起・侵食の評価技術の高度化：(U-Th)/He 年代測定法の年代標準試料の探求」

福田　将眞（(国研）日本原子力研究開発機構（JAEA））

3. 人材育成プログラムの実施・作成

3.1 実施方針

3.1.1 前提

地層処分の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 ヵ年の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みの一環として、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、平成 30 年度（2018 年度）に、「平成 30 年度人材育成セミナー」を試行的に共同で開催した。

平成 30 年度人材育成セミナーでは、参加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。

昨年度は、2019 年度人材育成セミナーとして、約 60 名の参加者（モニター）を集め、3 日間の日程で地層処分の主要 3 分野を含む 19 の講義を行った。今年度は、4 ヵ年の事業期間のうち 2 年目にあたり、昨年度実施した人材育成セミナーの実施結果を踏まえたうえで、

また、昨年度同様、関係機関の協力・助言（3.1.2 ）を得たうえで、実施内容を決定し、人材育成プログラムの開発の一環として、教材の作成（3.2 ）及びセミナー（3.3 ）の開催を行った。

3.1.2 関連機関の協力

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（モニター）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、参加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るため、講習会や研修会の実施、ひいては本事業の実施のためには、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（JAEA）、（国研）産業技術総合研究所（AIST）、（公財）原子力環境整備促進・資金管理センター（RWMC）及び（一財）電力中央研究所（CRIEPI）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、委員会形式の「地層処分スキルアップ研究会」を昨年度設置した。表 3.1-1 に、本研究会の構成機関を示す。

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（JAEA）
	一般財団法人　電力中央研究所（CRIEPI）
	国立研究開発法人 産業技術総合研究所（AIST）
	原子力発電環境整備機構（NUMO）

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（RWMC）

今年度、地層処分スキルアップ研究会は、以下の日時・内容で 2 度開催した。

表 3.1-2　2020 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	2020 年 10 月 8 日（木）	本事業で対象とするジェネラリストと作成するプログラムの方針などについて意見交換
第 2 回	2021 年 2 月 16 日（火）	2020 年度の人材育成セミナーの実施内容の報告、次年度以降の方向性について意見交換

3.1.3 本事業におけるジェネラリストの定義

(1) 昨年度の事業での検討内容

昨年度の事業において、原子力発電環境整備機構（NUMO）の資料に示された「第 2 階層：橋渡し情報」（図 3.1-1）に対応可能な人材（表 3.1-3）を本事業において育成の対象とするジェネラリストと定義することとした。このような人材は、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と考えられ、地層処分分野の 3 つの分野（地質環境、工学技術、安全評価）について広く浅く理解するジェネラリストであることが必要であると考えられるためである。

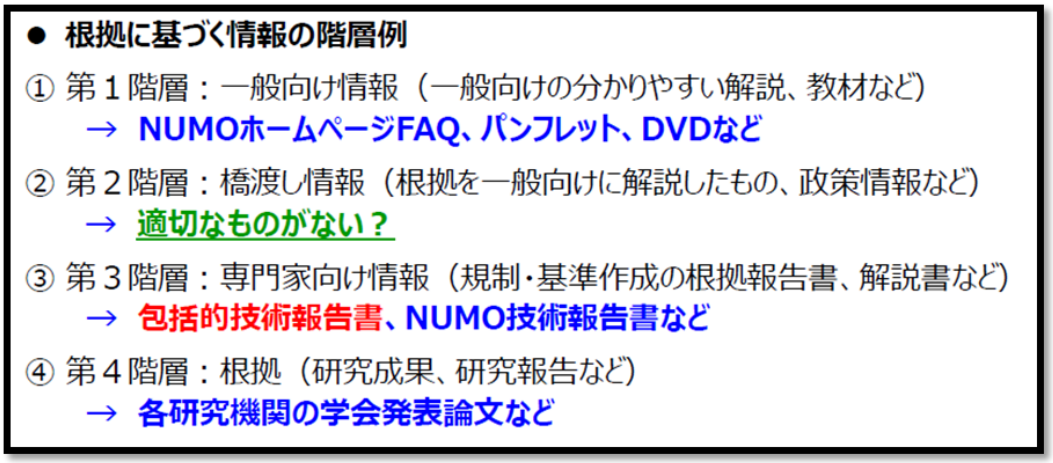


図 3.1-1　地層処分に関する階層的な資料整備の考え方[2)]

表 3.1-3　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
第 4 階層　根拠（研究結果、研究報告など）	⇒	NUMO 技術部

さらに、昨年度の事業では、この第 2 階層に対応できる人材（ジェネラリスト）にもレベル（サブ階層）があると考え、以下の 2 つのレベルを設定し、レベル 1 を本事業の主たる対象として人材育成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

(2) 今年度の事業での検討内容

今年度においては、昨年度の検討結果やセミナーの経験を踏まえ、本事業で作成する人材育成プログラムの対象となるジェネラリスト（人材）について、さらなる明確化等を行うため、再度検討を実施した。

まず、セミナーや e-learning などの地層処分や放射性廃棄物処分に関する既存の人材育成プログラム（人材育成に活用可能な講座などを含む）について整理を行い、どのようなものが活用可能であり、また、どのようなプログラムが現状存在しないのかを明らかにすることとした。さらに、既存のプログラムを整理するにあたり、各プログラムが地層処分事業のキャリア形成のどこの部分で活用可能であるか明らかにするため、地層処分事業におけるキャリアパスを整理した（図 3.1-2）。

このキャリアパスでは、キャリアのスタート（大学院卒の新入社員等）から、特定分野のスペシャリスト（専門家）、ジェネラリスト等に至る経路を示し、各経路に番号を振っている。スペシャリストやジェネラリストは、その中にもレベル・階層があると考えられるため、複数のレベル・階層で表し、各レベル・階層間の経路も示している（図 3.1-2 の矢印⑦や⑧）。昨年度開催した人材育成セミナーは、図 3.1-2 の経路のうち、概ね①、③、④、⑤に対応していると整理している。

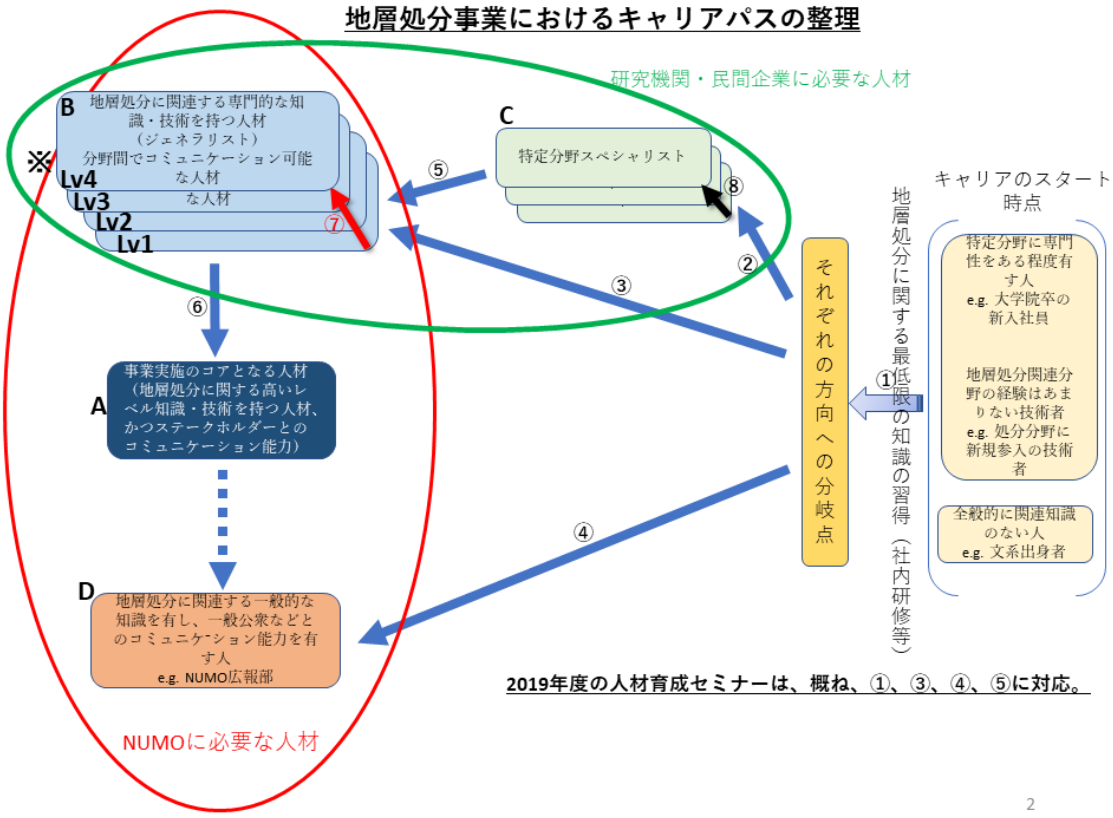


図 3.1-2　地層処分事業におけるキャリアパスの整理

次に、地層処分や放射性廃棄物処分に関する講座等の既存の人材育成プログラムについて、その構成、対象者、想定される活用例（図 3.1-2 のキャリアパスにおける活用例）を表 3.1-4 に整理した。また、図 3.1-2 に示したジェネラリストのレベル・階層のそれぞれについてのイメージを検討した結果を図 3.1-3 に示す。

表 3.1-4　地層処分を含む放射性廃棄物処分に関する既存人材育成プログラムとその活用例

	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	① ③ ④ ⑤
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	① ③ ④ ⑤
原環センターセミナー	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	③ ⑤ 安全評価分野を専門とする人以外
	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	③ ⑤ 安全評価分野を専門とする人以外
	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	② ③ ⑤
産総研・ジオスクール	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	③ ⑤ 地質分野を専門とする人以外
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	① 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	① ③ ④ ⑤
IAEA Training Workshop on Planning and Implementing Site Investigations for Geological Disposal	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	③ ⑤
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 ⑤

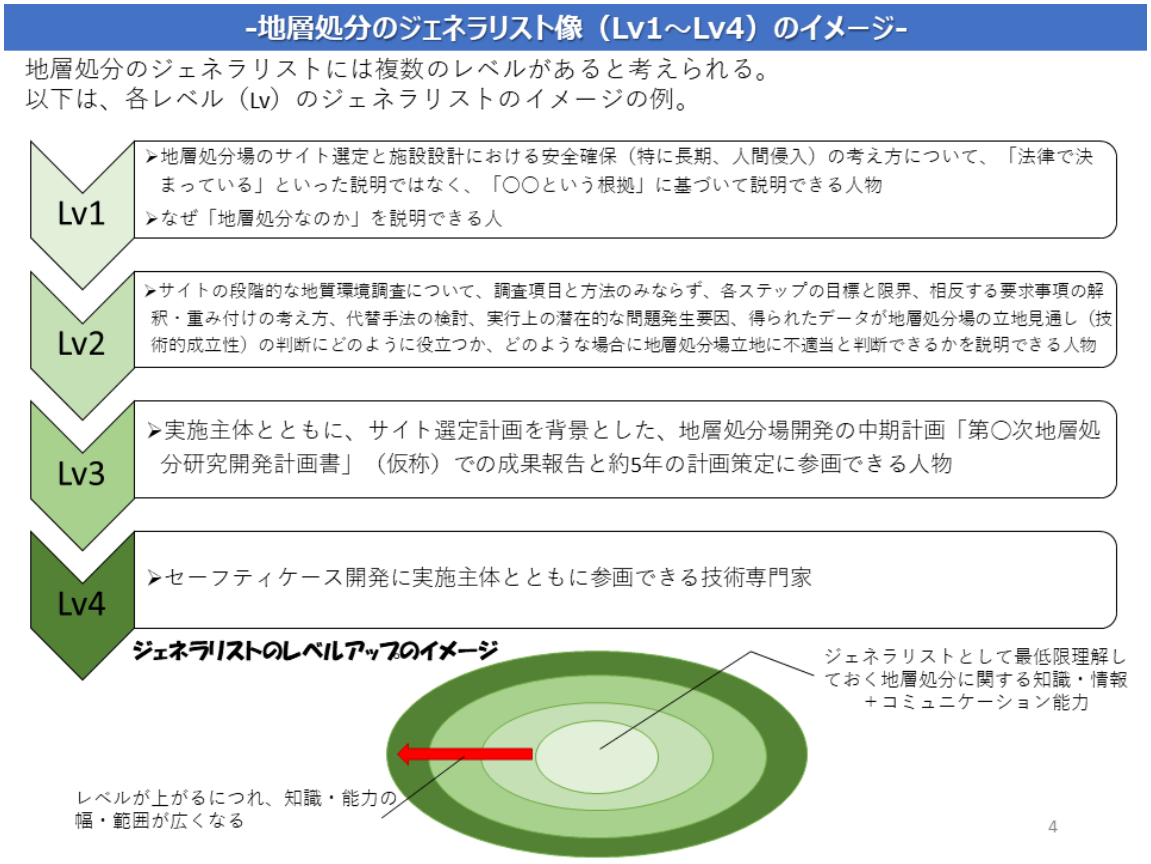


図 3.1-3　地層処分のジェネラリストのレベルのイメージ

既存の人材育成プログラム（講座等）の整理結果からは、地層処分分野のジェネラリストが必要とする知識をカバーする講座等も一定数存在していることが示された。一方で、地層処分のジェネラリストは、関連分野の知識や取得したデータを地層処分との関連で理解していることが必要であり、この観点で整理された講座や教材はあまり存在せず、単独でジェネラリスト育成に活用可能な教材・講座はほとんど存在しないと考えられた。

また、整理したジェネラリストのレベル・階層（図 3.1-3）のイメージのうち、Lv3 や 4 のジェネラリスト養成には、オン-ジョブ-トレーニング（On-Job-Training, OJT)）が必須であることから、この事業において対応することは困難と考えられる。そこで本事業では、今後の 3 ヵ年においては、以下を対象として人材育成プログラムの作成を実施することとした。

●実施内容 1：レベル 1 のジェネラリスト育成に寄与可能な教材の作成（3.2 ）

図 3.1-2 で示すキャリアパスの③及び⑤に対応可能と想定

●実施内容 2：レベル 2 のジェネラリスト育成に寄与可能な、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・演習の開催によるプログラムの開発（3.3 ）

図 3.1-2 で示すキャリアパスの⑤及び⑦に対応可能と想定

この方針については、2020 年度第 1 回の地層処分スキルアップ研究会において議論を行い、原則として今年度以降、この方針に従い人材育成プログラムの作成を進めていくこととなった。

以降のセクションにおいて、上記の実施内容 1 及び 2 について、今年度実施した内容を整理する。

3.2 教材の作成

3.2.1 背景

前述したように、2019 年度は、地層処分の主要 3 分野である、地質環境、工学技術、安全評価を幅広くカバーした、19 の講義からなるセミナーを開催した（表 3.2-1）。2019 年度のセミナーの講義資料には、転載許可が取れていない図表が多数含まれていることから、そのまま本事業で作成する人材育成プログラムの成果物とする場合、教材としての有用性が低下すると考えられた。そこで、本事業では、人材育成セミナーで作成した発表資料を活用して教材を作るのではなく、本事業で対象とするジェネラリスト育成に対応した教材を一から作成することとした。

表 3.2-1　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：1 月 8 日（水）

時間	講義分野	タイトル	講師
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	METI
10：50～11：30（40 分）		02.放射性廃棄物の発生と管理	NUMO
11：30～12：10（40 分）		03.地層処分における安全確保の考え方	NUMO
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）	NUMO
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）	AIST
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）	JAEA
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）	CRIEPI
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：1 月 9 日（木）

時間	講義分野	タイトル	講師
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）	CRIEPI
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）	AIST
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）	JAEA
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	NUMO
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）	NUMO
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	仮タイトル：サイトのモデリング	AIST
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・ディスカッションと発表準備）		

●3 日目：1 月 10 日（金）

時間	講義分野	タイトル	講師
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）	NUMO
9：20～10：00 （40 分）		14.線量基準の考え方	CRIEPI
10：00～10：45 （45 分）		15.安全評価の考え方と枠組み（後半）	NUMO
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	RWMC
12：00～13：00		昼食（60 分）	
13：00～13：40 （40 分）		17.核種移行解析モデル	JAEA
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	JAEA
14：20～15：00 （40 分）		19.最新の安全評価のための取り組み	JAEA
15：00～16：00	グループディスカッション（アンケートを基にしたセミナーの振り返り）		
16：00～16：15	閉会挨拶・事務連絡		

3.2.2 教材作成方針

レベル1のジェネラリストは、**「地層処分場のサイト選定と施設設計における安全確保（特に長期、人間侵入）の考え方について根拠を持って説明できる人物」**と定義しており、地層処分に関する個々の分野の知識を「地層処分」という観点（との関連）で理解する必要がある。しかし、表 3.1-4 に整理したように、既存の人材育成関連の講義などは、個々の分野に対応したものが多く、地層処分との関連で整理された教材はほとんど存在しない。加えて、地層処分の各分野の基礎的内容については、すでにそれぞれの分野の教科書・教材が存在するため、それらの教材等を利用可能であり、本事業で改めて作成する必要はない。

このため、本事業では、残りの 3 ヵ年の期間において、レベル 1 のジェネラリスト育成に対応する教材を作成することとした。

教材の体裁・フォーマットを検討した結果、教材は上下で構成し、上に図表、下に解説文を付すものとして作成を進めていくこととした（図 3.2-1）。また、教材は、以下のように、地層処分に関する一般的な知識と提供する「地層処分に関する包括的知識」及びジェネラリストとして把握すべき重要な主要 3 分野の知識などで構成される「地層処分に関する専門的知識」の 2 種を作成することとした。

- 「地層処分に関する包括的知識」

  なぜ地層処分をするのか、どのように地層処分を進めるのか、どのように安全性を示すのか、どのように処分場を受け入れてもらうのかなど、地層処分事業全般について説明できる素養の育成を目的

- 「地層処分に関する専門的知識」

  地質環境特性、工学技術、安全評価等の地層処分技術に関して、ジェネラリストとして把握しておく重要な専門的知識の習得を目的

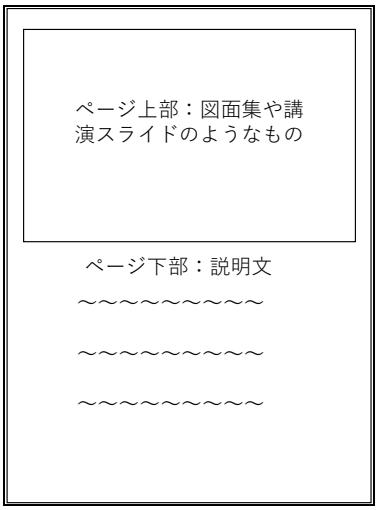


図 3.2-1　教材の構成のイメージ

3.2.3 教材作成計画・スケジュール

レベル 1 のジェネラリスト育成のための教材の作成ため、まずは、“学習指導要領”[2]に相当する資料を作成することとした。この本事業で作成する”学習指導要領”では、教材に含むべき項目、各項目の学習の狙い、具体的な内容、情報源について整理することとした。そのうえで、学習指導要領に沿って教材を作成する計画を立てた。

次に、教材作成のためのスケジュールとして、今後 3 年間のスケジュールを次のように設定した。

表 3.2-2　2020 年度当初に策定した、地層処分に関する教材作成スケジュール

2020 年度	・「地層処分に関する包括的知識」の学習指導要領の作成 ・「地層処分に関する専門的知識」の学習指導要領の作成 ・「地層処分に関する包括的知識」の教材作成
2021 年度	・「地層処分に関する包括的知識」の教材のレビュー・改訂 ・「地層処分に関する専門的知識」の教材作成
2022 年度	・「地層処分に関する包括的知識」の教材の更なる改訂 ・「地層処分に関する専門的知識」の教材のレビュー・改訂 ・「地層処分に関する包括的知識」及び「地層処分に関する専門的知識」の教材の完成

[2] 各学校で教育課程（カリキュラム）を編成する際の基準それぞれの教科等の目標や大まかな教育内容を定めている（文部科学省ウェブサイト
（https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/idea/1304372.htm）から引用）

3.2.4 2020 年度における実施内容

(1)「地層処分に関する包括的知識」の学習指導要領の作成

表 3.2-2 に示した今年度策定した教材作成のスケジュールに従い、まずは「地層処分に関する包括的知識」の学習指導要領を作成した（別添資料 3-1 参照)。学習指導要領は次の構成とした。

- ジャンル
- ねらい（教材の指導要綱）
- 目標とする到達レベル
- 学習項目
- 学習項目の概要
- 知識のソース

上記のうち、ジャンルは大項目に相当し、表 3.2-3 に示す 11 のジャンルを設定した。

表 3.2-3 「地層処分に関する包括的知識」に関するジャンル（大項目）

ジャンル
１．わが国における放射性廃棄物の特徴
２．わが国における放射性廃棄物の処分形態
３．高レベル廃棄物対策：地層処分の選択
４．地層処分の段階的な進め方
５．地層処分の倫理的側面と安全原則
６．地層処分の安全確保方策
７．地層処分固有の取組み
８．地層処分に対する信頼性の醸成
９．地層処分の実現性に関する報告書
１０．地層処分が直面する社会的な側面
１１．地層処分計画における各国の挫折と成功例からの教訓

「ねらい（教材の指導要綱)」では、各ジャンルに対して、そのジャンルを学習する意義などのねらいを解説している。目標とする到達レベルは、地層処分スキルアップ研究会の

メンバーの助言を受け追加した項目で、各ジャンルの学習においての到達目標（例えば、○○についての説明ができる）を設定している。

各ジャンルに対して、下位の項目として学習項目を複数設定した。この学習項目のそれぞれに対して、その概要を説明する「学習項目の概要」を示すとともに、各学習項目の内容の情報源を示す、「知識のソース」において出典等を示している。教材は、各学習項目に対して、図 3.2-1 に示した構成で一つ作成する方針とした。

図 3.2-2 「地層処分に関する包括的知識」の 11 のジャンルと学習項目

各ジャンルに対して、ジェネラリストが理解しておく必要と思われる学習項目を設定した結果、各ジャンルに 4～7 の学習項目が含まれることとなり、合計で 64 の学習項目となった。

(2)「地層処分に関する専門的知識」の学習指導要領の作成

表 3.2-2 に示したスケジュールに示したように、今年度は、「地層処分に関する専門的知識」について、学習指導要領の作成までを行うこととしていた。この方針に従い学習指導要領を作成した（別添資料 3-2）。

「地層処分に関する専門的知識」の学習指導要領の構成は、「地層処分に関する包括的知

識」と同様とし、以下とした。

- ジャンル
- ねらい（教材の指導要綱）
- 目標とする到達レベル
- 学習項目
- 学習項目の概要
- 知識のソース

また、ジャンルは次の 11 を設定し、各ジャンルに対する「ねらい（教材の指導要領)」、「目標とする到達レベル」を記載した。

表 3.2-4 「地層処分に関する専門的知識」のジャンル（大項目）

ジャンル
１．地層処分の対象となる放射性廃棄物の特徴
２．地層処分固有の学際的アプローチ
３．地層処分に係る法律、関係規制基準
４．地層処分の処分地選定と選定基準
５．地層処分固有のサイト特性評価技術
６．地層処分における天然事象の影響評価
７．地層処分の長期安全評価手法
８．地層処分事業に適用される工学技術
９．地層処分の閉鎖措置に向けてのモニタリングとサーベイランス技術
１０．地層処分の研究開発と地下研究施設の役割
１１．地層処分と社会科学的なアプローチ

「地層処分に関する専門的知識」の学習項目については、現時点では仮の項目として設定している。これは、「地層処分に関する包括的知識」の教材を作成する過程で、項目の入れ替え、追加等を行う可能性もあり、今後精査を行う予定であるためである。

(3)「地層処分に関する包括的知識」に関する教材の作成

作成した「地層処分に関する包括的知識」の学習指導要領に基づき、教材を作成した。教材では、各ジャンルの関係性や学習の流れが分かるように、ジャンルの相関図を冒頭に挿入した（図 3.2-3）。

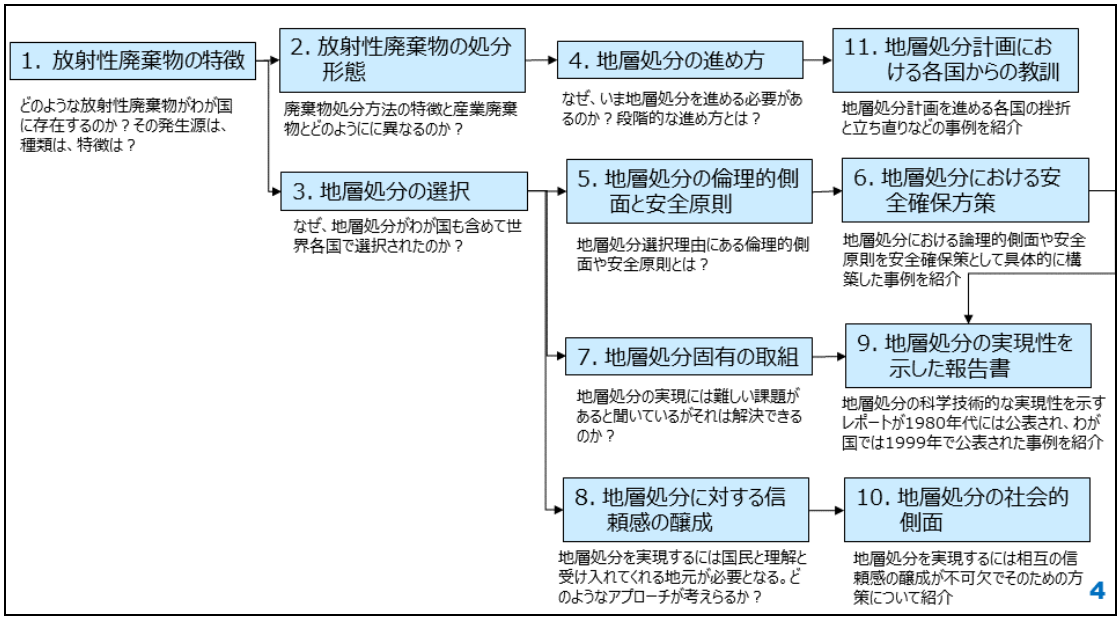


図 3.2-3 「地層処分に関する包括的知識」の教材における各ジャンルの相関図

図 3.2-3 に示したように、「地層処分に関する包括的知識」では、ジャンルは大きく二つのラインに分類される。一方はわが国で進められている処分計画の全体象と各国からの教訓、もう一方は、地層処分を選択したことの背景や理由、実現に向けての課題とその取り組み状況を理解する流れとなる。

また、当初、教材は、一つの項目に対して、上下の構成とし、上に図表、下にその説明を示す構成とすることを想定していた（図 3.2-1）。しかし、実際に教材を作成していく過程において、学習項目によっては、想定していた上下の構成では十分な説明ができない場合などがあることが明らかとなり、結果として、構成・フォーマットは以下の 4 種類となった。当初の予定どおり、上に図表を示し、下にその説明を加えたパターン（図 3.2-4、上段左）の他、上下 2 枚のスライドで説明を行うパターン（図 3.2-4、上段中）、スライド 1 枚で完結するもの（図 3.2-4、上段右）、スライド 4 枚見開きで説明するパターン（図 3.2-4、下段）が存在している。

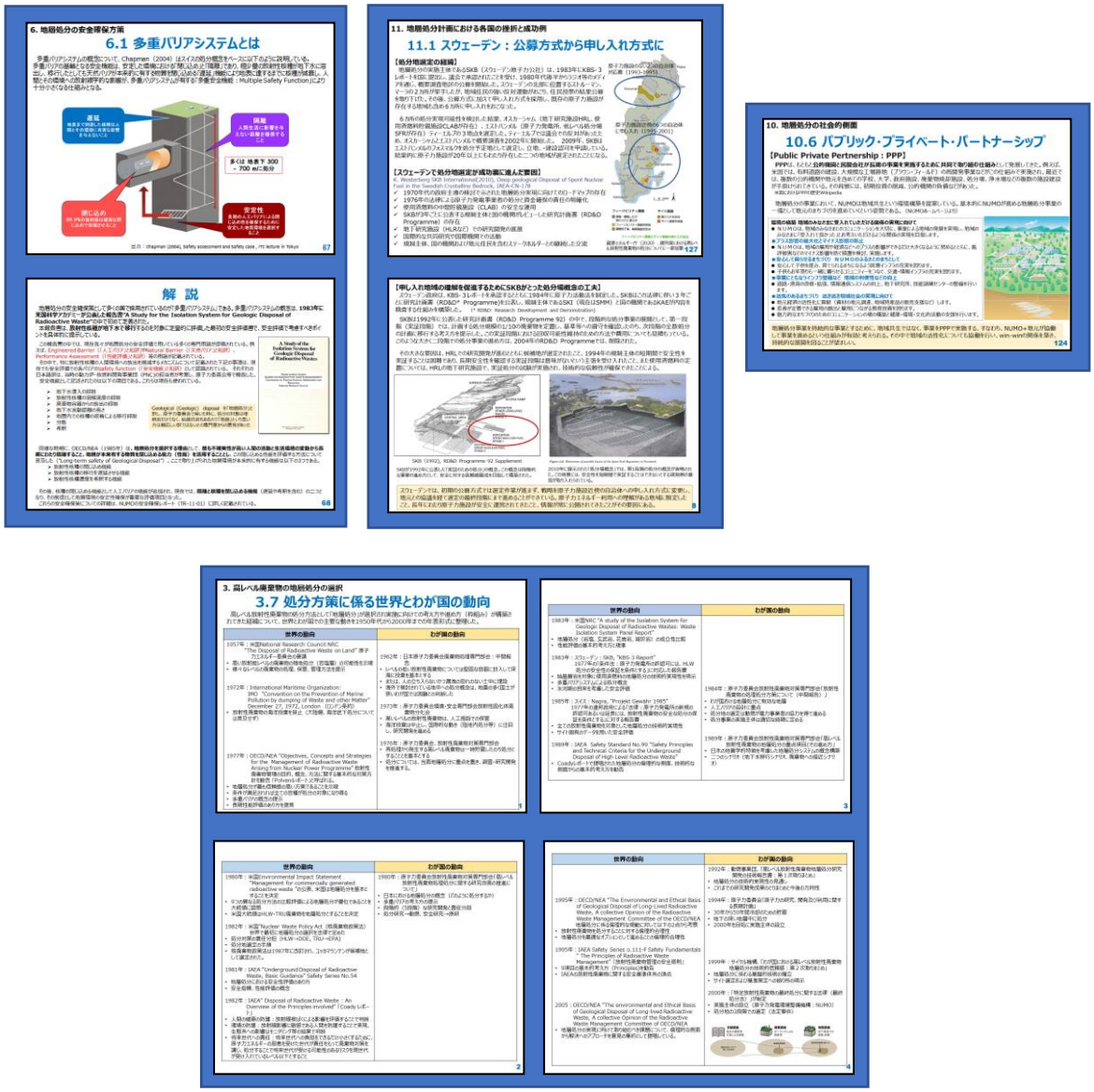


図 3.2-4　教材のフォーマット・パターン

上段左：上に図表、下に説明、上段中：上下で構成、上段右：1 枚で構成、下段：4 枚で構成

この図は、あくまで教材のフォーマット・パターンとその比較を意図したものであり、各スライドの記載内容（文字）の判読を意図したものではない。

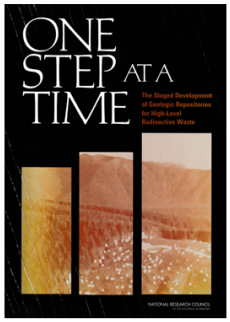
教材は Microsoft PowerPoint を用いて作成した。なお、現時点では、Microsoft PowerPoint を用いて作成しているが、最終的な教材は、電子ファイルでの整備も進める方針としているため、pdf など学習において扱いやすく使いやすいフォーマットとする。結果として教材は、スライド数で 140 枚を超える構成となった。これを第 1 案と位置付け、地層処分スキルアップ研究会や資源エネルギー庁殿のレビューを受け改訂をしていくこととした。

なお、教材（第 1 案）については、現時点では記載内容等の未精査の段階であるため、以下の例を除いて、本報告書には添付していない。

4. 地層処分の段階的な進め方

4.2 米国科学アカデミーからの提言（2003）

National Research Council of National Academies (2003), One Step at a Time, The staged Development of Geologic Repositories for High-Leve Radioactive Waste



【背景】
米国の高レベル放射性廃棄物処分の実施主体であるDOE（Department of Energy)は、地層処分計画を段階的（Staging)に進めていくことが有効であると考え、National Research Council（NRC)に処分を進める上で、建設・操業・閉鎖を段階的に進めるためのアドバイスを求めた。
本報告書は2003年3月にカリフォルニア州で各国から専門家を招聘し、米国のユッカマウンテンが対象であるが、一般的な処分を対象に、安全、セキュリティ、制度的、規制、社会的要素を含めて議論がなされた結果を取りまとめている。

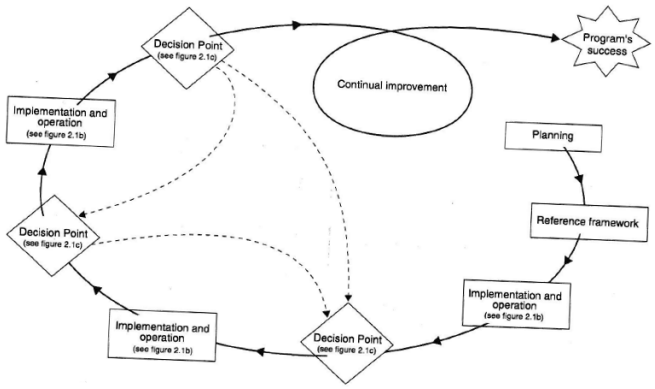
【二つのアプローチ】
"Liner Staging"「線形的な段階設定」：前もって次段階の進む方向の選択肢、ゴールが「マイルストーン」として設定されている進め方
"Adaptive Staging"「適合性を考慮する場の設定」：各段階の意思決定の場面において、考慮する事項、決定方法が設定されることで、新しい情報も取り入れ方向性を決定する進め方。

【一般的な勧告（米国プログラムに限らず、地層処分計画全体への勧告として取りまとめられている）】
1. 地層処分計画を進める上でAdaptive Stagingのアプローチを適用すべきである。
2. 地層処分計画では、処分全体に係る安全性について、繰り返しレビューする構造的意思決定プロセスを導入すべし。
3. 適合性を考慮する場の設定は、セキュリティにいかなる主要な影響を及ぼすものであってはならない。
4. セーフティケースの繰り返しは、地層処分の適合性を考慮する場における中核的役割を果たす。
5. 適合性を考慮する場では、技術と社会学両方にとって活発で持続的な学習が要求される。
6. 適合性を考慮する場は、ステークホルダーと一般公衆との相互関係の機会を促進する。
7. 適合性を考慮する場は、現在の規制の枠組みと両立する。

1

Adaptive Staging Approachの概念

Adaptive Staging Approach：下図における実線が段階的な事業の進め方を示す。各段階での意思決定の場面で、求められる事項への適合性が判断された結果、前段階に戻る可能性もある。これらのサイクルが繰り返し実施されることで計画が次段階に進む。この進め方は、"Reversible（可逆的）"なアプローチとして認識されている。



出典：National Research Council of National Academies (2003), One Step at a Time, The staged Development of Geologic Repositories for High-Leve Radioactive Waste

2

図 3.2-5 「地層処分に関する包括的知識」教材（第 1 案）の例 1
（一つの学習項目で上のスライドに図表を示し下のスライドで解説する対応する例）

3. 高レベル廃棄物の地層処分の選択

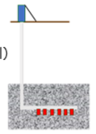
3.5 処分方法の種類として検討された事例

出典：米国EIS (1980): Management for commercially generated radioactive waste

① 地層処分（Mined geologic disposal)
② 超深孔処分（Very deep hole disposal)
③ 海洋底下処分（Sub seabed disposal)
④ 岩盤溶融処分（Rock melting disposal)
⑤ 島嶼処分（Island mined geologic disposal)
⑥ 氷床処分（Ice sheet disposal)
⑦ 井戸注入処分（Well injection disposal)*
⑧ 核変換（Transmutation)
⑨ 宇宙処分（Space disposal)

*井戸注入方式は、ガスや石油層跡に放射性液を注入する方法

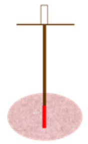
① 地層処分（Mined repository)



地下深部（数百m以深）の処分に適した地層中に坑道を掘削して廃棄物を処分
・坑道掘削技術
・地層の安定性
・操業・閉鎖技術
・閉鎖の時期

N. Chapman, I. McKinley (1987),The Geological Disposal of Nuclear Waste

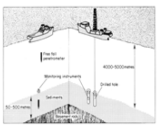
② 超深孔処分（Very deep hole disposal)



地下深部(数Km)の処分に適した地層までボーリング孔を建設し廃棄物を挿入定置
・超深層ボーリング技術
・地層の安定性
・定置方法
・品質確認方法
・回収可能性

N. Chapman, I. McKinley (1987),The Geological Disposal of Nuclear Waste

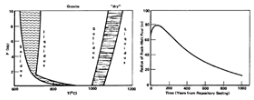
③ 海洋底下処分（Sub-seabed-disposal)



深海および大陸棚等の海洋底下に堆積する層の中に廃棄体を埋設処分
・ロンドン条約への対応
・各国での大陸棚利用への制約
・埋設状態の確認の困難さ
・海を汚すというイメージへの対応

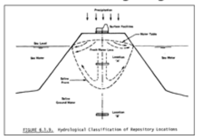
N. Chapman, I. McKinley (1987),The Geological Disposal of Nuclear Waste

④ 岩盤溶融（Rock melting disposal)

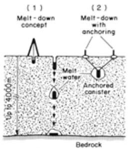


花崗岩の割れ目中に溶融したガラスコアk体を注入する方法で、周辺岩盤の結晶と一体化して固化される

⑤ 島嶼地層処分：Island geologic disposal



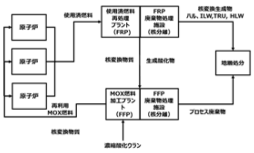
⑥ 氷床処分（Ice sheet disposal)



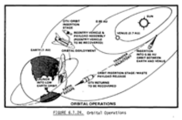
廃棄物自信の放熱を利用して氷床を貫通し、大陸上部に定置
・氷床の長期安定性の保証
・南極を利用する場合、国際条約に違反
・埋設状態の確認が困難

N. Chapman, I. McKinley (1987),The Geological Disposal of Nuclear Waste

⑧ 核分離・核変換：Partitioning-transmutation



⑨ 宇宙処分（Space disposal)



地球と金星の空間軌道に放出、太陽熱等で無害化
・ 打ち上げ時の事故の確率：6/100：1986年のNASAチャレンジャー事故のイメージ
・ コスト高
・ 特定の国の宇宙利用に対する社会的・政治的な制約

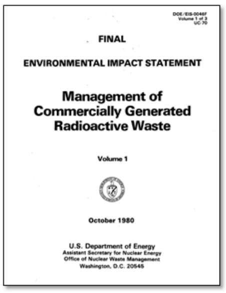
N. Chapman, I. McKinley (1987),The Geological Disposal of Nuclear Waste

31

処分方法の比較評価事例

1977年のPolvanyレポートに引き続き、米国エネルギー省（DOE）は、様々な分野の専門家を招聘し、高レベル廃棄物の処分方法についての比較評価した結果を環境影響評価書（Environmental Impact Statement : EIS" Management for commercially generated radioactive waste"）として公表した。このEISで比較評価された内容が、その後、各国で「地層処分」の優位さを示す事例に多く用いられるようになった。
EISで比較評価された処分方法は以下の９種類である。

① 地層処分（Mined repository)
② 超深孔処分（Very deep hole disposal)
③ 海洋底下処分（Sub-seabed-disposal)
④ 島嶼処分（Island mined repository)
⑤ 岩盤溶融処分（Rock melting disposal
⑥ 氷床処分（Ice sheet disposal)
⑦ 井戸注入処分（Well injection disposal)
⑧ 核変換（Transmutation)
⑨ 宇宙処分（Space disposal)


DOE/EIS-0046F
Volume 1 of 3
UC-70

FINAL

ENVIRONMENTAL IMPACT STATEMENT

Management of Commercially Generated Radioactive Waste

Volume 1

October 1980

U.S. Department of Energy
Assistant Secretary for Nuclear Energy
Office of Nuclear Waste Management
Washington, D.C. 20545

上記９つの処分方法について、10項目の性能目標に対し比較評価した結果、地層処分と島嶼処分がすべての項目で適合した。また、総合評価として望ましい処分方策について優先度が設定され、地層処分（MR)が最も優先度が高いと評価された。
これを受け、1980年２月、米国大統領は、「高レベル廃棄物とTRU廃棄物をmined geologic disposal (地層処分）とする」とする政策決定を行い、1982年に「Nuclear Waste Policy Act（核廃棄物政策法）」が制定された。

表-1 性能目標に対する処分方法の適合性評価

	放射線学的基準	1000年間の閉込	1万年間の隔離	開発期間	科学的ブレークスルー	予測可能性	産業規模	燃料サイクル	原子炉設計	損傷緩和・修復性	維持管理と監視
地層処分	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
深孔処分	○	○	○	○	○	○	○	○	○	No	○
岩盤溶融	○	No	No	○	○	○	○	○	○	No	No
島嶼処分	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
海洋底下処分	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
氷床処分	○	○	No	No	○	No	○	○	○	No	○
井戸注入	○	No	No	○	○	○	○	○	○	No	○
核変換	○	−	−	No	○	○	No	○	○	○	○
宇宙処分	○	○	○	○	○	○	○	○	○	No	○

○：適合性あり　No:適合性なし　−：指標は関係しない

表-2 望ましい処分方法の異なる指標に対する優先順位

	最高優先度 ――――→ 最低優先度
放射線学的影響 操業中	(MR)・・・(VDH)・・・(IMR)・・・(SS)・・・(S)
放射線学的影響 閉鎖後	(S)・・・(MR)・・・(VDH)・・・(SS)・・・(IMR)
非放射線学的環境影響	(MR, VDH)・・・(SS, IMR)・・・(S)
開発の見通し	(MR)・・・(SS, IMR)・・・(S, VDH)
法令適合性	(MR, VDH)・・・(IMR)・・・(S)・・・(SS)
原子力産業の将来からの独立性	(MR, VDH, IMR, SS)・・・(S)
是正・修復措置の必要性	(MR)・・・(IMR)・・・(SS)・・・(S, VDH)

（注）MR=地層処分　VDH=超深孔処分　IMR=離島処分　SS=海洋底下処分　S=宇宙処分：

32

図 3.2-6　「地層処分に関する包括的知識」教材（第１案）の例２
（一つの学習項目で上のスライドに図表を示し下のスライドで解説する対応する例）

(4) 学習指導要領及び教材の第 1 案作成を受けての計画変更の検討

「地層処分に関する包括的知識」及び「地層処分に関する専門的知識」の学習指導要領、及び「地層処分に関する包括的知識」の教材第 1 案を作成した段階で、以下のいくつかの検討すべき点が明らかとなり、教材の作成計画の変更を検討し、地層処分スキルアップ研究会等の意見を得ることとした。

1. 「地層処分に関する専門的知識」の学習指導要領で示した内容は、既存の教材、資料、教科書などが教材として利用可能であると考えられ、本事業においてあらためて教材を作成する意義があるか疑問があること（既存資料を活用すべきという意見は、昨年度の地層処分スキルアップ研究会においてもあがっていた）
2. 「地層処分に関する包括的知識」の教材だけで、全体として 140 ページを超えるものとなっており、「地層処分に関する専門的知識」の教材は、さらに膨大なものとなると想定され、本事業の実施期間や資源を考慮すると作成が難しいと考えられること

これらの点を踏まえ、「地層処分に関する専門的知識」の教材については、本事業では作成しないことを地層処分スキルアップ研究会等で提案することとした。

⑤地層処分スキルアップ研究会等でのレビュー

まず、作成した「地層処分に関する包括的知識」及び「地層処分に関する専門的知識」の学習指導要領、「地層処分に関する包括的知識」の教材（第 1 案）等について、資源エネルギー庁殿より、以下のコメントを受領した。

表 3.2-5　資源エネルギー庁殿からの教材へのコメント

教科書からインプットした知識をターゲットとなる各個人がアウトプットできるかどうかを確認するための教材として欲しい(まずは重要な用語などを赤字にして隠すことができるようにし、ユーザーの理解度、達成度が測れるような工夫をするのが一案)。
包括的知識と専門的知識の行き来がしやすいように作成して欲しい（場合によっては両者間で項目を移動する必要もある）
両教材の読者ターゲットと目的を明確にして刺さる内容にして欲しい（杤山先生の本やセーフティケースとの差別化、日常的に使ってもらうための工夫など)。

また、2021 年 2 月 16 日（火）にオンラインで第 2 回地層処分スキルアップ研究会の会合を開催した。同研究会で出た教材作成に関する主なコメントは次の通りである。

表 3.2-6　第 2 回地層処分スキルアップ研究会での教材に対するコメント

「地層処分に関する包括的知識」については、前広で幅広い内容をカバーしていると考えており、ジャンル・項目として問題無いと考える。
原環センターセミナー「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎」で使用している教材の評価が高いので、それを参考にしても良いかと思う。
「地層処分に関する専門的知識」の教材については、この事業であらためて作成するのではなく、既存の各種資料、包括的技術報告書などを利用するという方針に賛成である。この事業では必要な知識のアウトラインを示す形で良いのではないか。NUMO の包括的技術報告書など、さらに勉強するための教材として既存のものを提示する形にすれば良い。
「地層処分に関する専門的知識」の教材については、「地層処分研究開発第 2 次取りまとめ」や NUMO の「包括的技術報告書」の橋渡しとなる位置づけを考えてはどうか。
教材を電子版にする場合は、学びたい項目や関連事項にすぐに飛ぶことができるなどの検索機能やリンクを上手く活用するべきである。
「地層処分に関する専門的知識」の 5～8 章のつながりがわかるように、章を 1 つ入れた方が良い。包括的知識と専門的知識の中のジャンル名が混乱しないようにする。
現時点の「地層処分に関する包括的知識」の教材（素案）は、11 の大項目レベルでは昨年度実施のセミナー等とも整合した包括的なものとなっているが、全体の流れが悪い印象がある。また、次の細目レベル（節）の見出しや現状の記載内容に違和感がある。

以上のコメントを受け、新たに 2021 年度以降の計画案を検討した。3.4 において今後の計画案を説明する。

3.3 2020 年度の人材育成セミナーの開催

3.3.1 昨年度のセミナーからの考察

昨年度（2019 年度）には、本事業において、講師を含め約 60 名の参加で、地層処分の主要 3 分野である、地質環境調査、工学技術、安全評価をカバーする講義に、技術コミュニケーションに関する招待講演やグループワークを組み込んだ2019年度人材育成セミナーを開催した（表 3.2-1 参照）。2019 年度の人材育成セミナーは、参加者の満足度・理解度などからは一定の成果があったと考えられる一方で、以下の課題も明らかとなった。

- 講義が主体で参加者が受け身となるため、教育の効果に疑問が残る
- 地層処分の主要 3 分野（地質環境調査、工学技術、安全評価）を広く対象とした場合、3 日間の日程でもスケジュール的に過密となる
- 3 日間フルに講師や参加者を拘束することが難しい
- 対象者のレベル、講義の難易度を統一することが難しい

上記の昨年度のセミナーからの課題を考慮に入れた教訓には、今年度のセミナーへの反映を検討すべき事項として、以下などがあった[3)]。

- セミナーの規模を縮小し、参加者（モニター）に関しても専門分野別に分けるなど、講義の内容を絞る（小規模のより専門性の高いセミナー）の必要性
- 実際に手を動かす演習を多く組み入れることで能動的なセミナーとし、学習効果を上げる必要性
- 幅広い知識の習得を企図したセミナーから、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したものへの移行
- （国研）日本原子力研究開発機構（JAEA）の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、核種移行解析のような机上での演習などの組み入れ
- 参加者（モニター）がより能動的に参加するための仕組み、講義の構成等の検討の必要性

加えて、新型コロナウイルス感染症の拡大に伴い、昨年度のような規模のセミナーの開催は不可能と考えられ、セミナーの規模の縮小とそれに伴う講義内容の変更（より専門性の高いセミナーの志向）が必須のものとなった。

3.3.2 セミナーの企画の検討

2020 年度の人材育成セミナーは、前述の昨年度のセミナーからの教訓を活かすために、実サイトでの調査・実験の模様の見学などを組み入れたものを検討することとした。地層処分関連事業において、実サイトでの調査等を行っている事業・機関の中から、沿岸部処分システム評価確証技術開発事業において、今年度、駿河湾地域で新たなボーリング掘削を行う計画であった（国研）産業技術総合研究所（以下、産総研という）に協力を求めることとした。産総研に協力を求めた理由としては、以下が挙げられる。

- 産総研では、これまでに駿河湾地域において、地下水の調査を行ってきており、豊富なデータ・知見を有している。
- 今年度新たなボーリング孔を掘削する計画であったため、そのサイトにおいて実際のボーリング調査の見学をすることも可能と考えられた。
- 海域での地下水湧出の見学（地下水が湧出している海域は水の変色がみられる場合もある)、地下水が湧出している地点でのサンプル採取、地形の観察なども可能な場所が把握されているため、これらのセミナーに組み込むことも可能と考えられた。
- 沿岸部処分システム評価確証技術開発事業において、実際に調査研究を行っている産総研の研究者が、講師として協力可能と考えられた。

産総研に協力を打診し、協議を行った結果、2020 年 12 月にボーリング調査サイトが存在する静岡県富士市において、産総研の 3 名の研究者が講師を担当して人材育成セミナーを開催することになった。

3.3.3 人材育成セミナーの内容の検討

(1) 人材育成セミナーのコンセプト

2020 年度人材育成セミナーの内容検討のため、講師を担当する産総研との間で検討を行った。産総研との会合は以下の日程で実施した。このほか、電子メールや電話などでの意見交換や議論・検討は多数行った。

表 3.3-1　産総研とのセミナーの内容検討のための会合

日付	場所	内容
2020 年 9 月 4 日	（公財）原子力環境整備促進・資金管理センター	産総研から想定するスケジュール、セミナーの内容等の説明
2020 年 10 月 26 日	（国研）産業技術総合研究所	セミナーのコンセプト等の議論
2020 年 11 月 13 日	オンライン	準備状況の確認、今後のスケジュールの確認等
2020 年 12 月 11 日	オンライン	セミナーの予行の実施

産総研との議論の結果、また、座学のみで構成し受動的な参加のみであった昨年度のセミナーからの教訓を踏まえ、2020 年度人材育成セミナーの方向性としては、地層処分事業に対して専門家の知的好奇心を引き付けて伸ばすため、アクティブラーニングを導入し、参加者に受け身ではなく、主体的に参加し参加者間で対話が促される講義・グループワークを行うこととした。セミナーの対象は、特定分野に専門性を有する若手（キャリア 5 年程度）とした。また、異なる分野の専門家が対話を行うことによって、地層処分に関する自身の考えを深めるとともに、異分野との相互理解や協働の必然性、地層処分全体像の理解の重要性に気付くことができるような内容とすることとなった。

(2) 人材育成セミナーの構成

上記のコンセプトを踏まえ、2020 年度の人材育成セミナーの構成及びそれぞれの目的等は以下のとおりとした。

① 前振り（＋自己紹介を含む）

前振りでは、本事業における人材育成の説明、ジェネラリストの定義・必要性などを説明し、参加者によるこのセミナーの意義等の理解を深める。

また、参加者がこれからの話し合いに「参加」することを認識し合うチェックイン[3]と呼ばれる場の導入技法[4)] として、参加者による自己紹介を行う。

[3] 『チェックイン』では、まず、一人が何らかを話す。話をした者が、他のメンバーに自分の話を聞いてもらえたと思うことで、その話者にとって気がかりであることが一旦保留され、これからこのチームメンバーの一員として共につくる場へ参画することを期待できる。

② 座学

座学は、2 日目及び 3 日目に行われる地下水モデルの作成などを題材としたグループワークのための基礎知識を提供するものと位置付けるとともに、単に受け身で講義を受けるだけではなく、手を動かす、参加者自身で計算をするなどを実施する。

また、産総研が実施している駿河湾岸での調査の概要を説明するため、プロジェクションマッピングやビデオ画像などを用いた説明を行う。

③ エクスカーション（地形、海域、ボーリングサイトの見学）

2 日目にエクスカーションとして、富士山から駿河湾へと至る地形、富士川などを含む地形の見学、海域の見学、ボーリング調査実施サイト・ボーリングコアの見学を実施し、座学で履修した知識を実際の現場で確認することで理解の向上を期す。

④ 演習（地下水の湧水地でのサンプルの採水及び採取したサンプルを用いた実習）

地下水が湧出している地点を訪問し、サンプルを採取する。また、持ち帰ったサンプルを用いて重炭酸滴定を行い、地下水の研究者が実際に行っている作業の一端を知ることで、地下水研究者との意思疎通や地下水データの利用の際の参考となることを企図する。

⑤ 総合学習（グループワーク）

2 日目及び 3 日目に総合学習（前編）と総合学習（後編）として、地下水のモデル作成と作成したモデルを用いた議論を実施する。異なる分野の専門家が含まれるグループ内や他グループとのコミュニケーションを通じ、異分野の専門家との協働の重要性やコミュニケーションの難しさを理解することを企図する。

⑥ 振り返り（グループワーク）

セミナーの最後に全体の振り返りを行い、それぞれの参加者がセミナーで得たもの、感じたこと（気付いたこと）を早い段階で意識し、他の参加者と意見を交わすことで、それぞれの考えをまとめることを支援する。

3 日間のプログラムを次のように設定した。

●1 日目

時間	場所	講義概要	講義内容	講師
12:45	新富士駅	・新富士駅に集合し、ホテルの送迎バスにて、ホテルまで移動。		
13:30	ホテルグランド富士	前振り	・セミナーの目的と意義 ・当該プログラムの仕立てと学習到達目標について	原環センター 産総研
13:50	同上	ウォームアップ 自己紹介	・各自2分で、自身の専門、バックグラウンド、地層処分とのかかわり、抱えている課題を話す。他の参加者の話に耳を傾ける	産総研
14:30	休憩			
14:40	ホテルグランド富士	座学１	・地下水研究の位置づけや地下水流動を知る目的について、広域スケールでの天然バリアと地下水の関係に着目した講義、地下水流動を知るための方法（水質と同位体） ・ダイヤグラムの描画	産総研
16:30	休憩			
16:40	ホテルグランド富士	座学２	・水質や同位体からの地下水流動（事例紹介）	産総研
17:45	夕食			
18:45	ホテルグランド富士	座学３	・地下水流動解析（その1） ２次元有限差分法	産総研
20:15	同上	Wrap up	・受講生との議論＆アンケート配付	原環センター

●2 日目

時間	場所	講義概要	講義内容	講師
09:00	ホテルグランド富士	座学４	・富士山地域の水文地質の紹介 ・水文環境図のプロジェクションマッピングやＲＯＶの展示・紹介、海底湧水調査のビデオの視聴	産総研
10:45	座学の終了	出発準備		
11:00	ホテルを出発	移動		
11:15	富士川サービスエリア	地形見学	・地形、富士川断層帯、火山活動、駿河湾の確認 ・地形と地下水流動の関係を考察してみる	産総研
11:45	同上	昼食		
12:30	移動	移動	・海域調査の説明（バス内）	産総研
13:05	ふじのくに　田子の浦みなと公園	見学	・海域等の見学	産総研
13:20	移動	移動	・掘削調査の説明（バス内）	産総研
13:30	掘削現場	見学	・ボーリング調査の手順の説明とボーリングコアを使った地質の説明	現地協力会社
14:00	移動	移動	・湧玉池の説明（バス内）	産総研
14:45	湧玉池	実習1	・湧玉池で簡易水質測定と湧水のサンプリング（現地調査の体験）	産総研
15:30	移動（ホテルへ）	移動		
16:00	ホテルグランド富士	実習2	・重炭酸滴定の体験	産総研
16:30	ホテルグランド富士	座学5	・地下水流動解析（その２） ２次元有限差分法	産総研
18:00	ホテルグランド富士	夕食		
19:00～ 20:30	ホテルグランド富士	総合学習　前編 ・実習 ・座学	専門家チームメンバーに求められる賢慮と納得の意思決定について議論する ・鉛直１次元モデル作成を通じて専門家間の意思疎通の大切さを考える ・意思疎通の技術 ・コミュニケーションの向上を目指して	産総研

●3 日目

時間	場所	講義形式	講義内容	講師
09:00	ホテルグランド富士	総合学習　後編 ・実習 ・技術	モデリングとサイエンスコミュニケーション ・現場に出てモデリングする（２次元断面モデルのワーク） ・技術者間のコミュニケーション	産総研
11:00	同上	議論２ ふりかえり	・各自2分で「何が起きたか／どう感じたか」 「そこから何を学んだか」を内省して皆で話をする （初日の自己紹介からの変化に気付き合う） ・総括ならびに受講者との意見交換 ・本セミナーから見えた問題点の洗い出しなど	原環センター
12:00	終了	解散		

3.3.4 人材育成セミナーの開催に向けて

(1) 参加者（モニター）募集

今年度の人材育成セミナーは、レベル 2 のジェネラリスト育成に対応するものとして実施するため、単分野に専門性を有す若手（キャリア 5 年程度）の技術者等にモニターとして参加してもらい、地下水に関するモデリングを題材とし、アクティブラーニング形式でのセミナーの実施により、コミュニケーションの必要性・重要性に関する気づきを提供することを目的とした。

参加者（モニター）については、地層処分スキルアップ研究会での協力機関である、原子力発電環境整備機構（NUMO）、（国研）日本原子力研究開発機構（JAEA）、（国研）産業技術総合研究所（AIST）、（一財）電力中央研究所（CRIEPI）、（公財）原子力環境整備促進・資金管理センター（RWMC）を通じて調整を行った。今年度については、小規模での実施としたため、大学や民間企業からの参加者は募集しないこととした。

結果として、12 名の参加者（モニター）が参加することとなった。参加者の属性（所属、専門分野、従事年数、年齢）は、以下のとおりである。

表 3.3-2　人材育成セミナー参加者（モニター）の属性

所属	専門分野 （地質系、安全評価系、工学系）	地層処分事業への従事年数 （5 年未満、5－10 年、10 年以上）	年齢 （40 歳以上、未満）
JAEA	地質環境調査評価技術	5 年未満（1 年）	40 歳未満
JAEA	地質環境調査評価技術	5 年未満（1 年）	40 歳未満
JAEA	地質環境調査評価技術	5 年未満（1 年）	40 歳未満
JAEA	安全評価技術	5 年未満（7 年）	40 歳未満
NUMO	地質環境調査評価技術	5－10 年（10 年）	40 歳未満
NUMO	その他（環境分析）	5 年未満（1 年）	40 歳以上
NUMO	その他（知識マネジメント）	5 年未満（4 年）	40 歳未満
NUMO	工学技術	10 年以上（13 年）	40 歳以上
NUMO	工学技術	5－10 年（8 年）	40 歳未満
NUMO	地質環境調査評価技術	5 年未満（2 年）	40 歳未満
RWMC	安全評価技術	5 年未満（2 年）	40 歳未満
AIST	その他（地形学、水文学）	5 年未満（1 年）	40 歳未満

なお、講義資料中で使われる図表、データなどは、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ため、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ることとした。

(2) 参加者のグループ分け

プログラムの 2 日目と 3 日目には、参加者をグループに分けて行う総合学習（グループワーク）を組み込んでいた。このため、グループワーク以前からグループに馴染み、グループワークを当初から円滑に行うことができるよう、2 日目は朝の段階からグループで活動することとした。また、2 日目の総合学習（前編）と 3 日目の総合学習（後編）では、各グループにおいて地下水等のモデルに関するディスカッションを行う計画であった。そこで、人材育成プログラムの作成の検討に資する目的で、この総合学習の前編及び後編のグループワークにおいて、モニターの専門分野に基づいた構成の違いが、以下などに影響を与えるのか調査を試みることとした。

① アクティブラーニング方式では、グループメンバーの組み方で学習の効果に違いがどのような生じるか
② メンバー間の交流・相互作用の出方

このため、3 つのグループとして、地下水分野に近い地質環境系のみで構成（地質系）、地質環境系を含まない工学系・安全評価系で構成（非地質系）、及び地質系やその他を含む構成（混成）を設置した。また、上記の影響の把握は、“アンケート”の結果の考察やグループワーク時の参加者の相互評価（後述）などによる観察”によって実施した。参加者（モニター）の専門分野やその他の属性を考慮に入れ、グループ分けを検討した結果、以下の 3 グループを設置することとした。

●グループ 1（地質系のみ）

所属	専門分野	従事年数	年齢
JAEA	地質環境	5 年未満（1 年）	20 代
JAEA	地質環境	5 年未満（1 年）	20 代
NUMO	地質環境	5－10 年（10 年）	30 代
NUMO	地質環境	5 年未満（2 年）	30 代

●グループ 2（非地質系）

所属	専門分野	従事年数	年齢
JAEA	安全評価	5 年未満（7 年）	20 代
NUMO	その他（知識マネジメント）	5 年未満（4 年）	20 代
NUMO	工学技術	5－10 年（8 年）	30 代
RWMC	安全評価	5 年未満（2 年）	20 代

●グループ 3（混成）

所属	専門分野	従事年数	年齢
JAEA	地質環境	5 年未満（1 年）	30 代
NUMO	その他（環境分析）	5 年未満（1 年）	40 代
NUMO	工学技術	10 年以上（13 年）	50 代
AIST	地質環境	5 年未満（1 年）	20 代

さらに、産総研の講師 3 名のうち一人が各グループに付き、参加者からの質問対応やグループでのディスカッションの補助（ファシリテーション）を行うこととした。

(3) 下見・予行の実施等

人材育成セミナーの実施に先立ち､プログラムが概ね固まった 2020 年 10 月末の段階で、会場であるホテルとの打合せ、訪問するサイトなどの下見を実施した。下見では、ボーリング調査を実施しているサイトへのアクセスの確認、地形を観察するサービスエリアや海域の観察を行う公園などを実際に訪問し、アクセスや現地での注意事項などの確認を行った。また、新型コロナウイルス感染拡大防止のため、対面での実施は困難であったが、2020 年 12 月 11 日に産総研の 3 名の講師とオンラインで予行を実施し、問題点や改善点などの洗い出しを行った。

(4) 事前学習資料の案内

昨年度の人材育成セミナーの参加者（モニター）からのアンケートでは、事前に講義内容を予習しておきたかったとの意見があったこと、加えて、地層処分スキルアップ研究会のメンバー機関からも同様の依頼があったため、講師を務める産総研と相談し、以下を事前学習資料として参加者に案内した。ただし、今回のセミナーでは、地下水に関する知識

の習得を主目的とはしていなかったため、あくまで参考として提示し事前学習は必須とはしなかった。

◎「地下水・湧水の疑問 50 みんなが知りたいシリーズ 13」 成山堂書店

(5) アンケートの作成・設計

人材育成セミナーにおいて参加者からのフィードバックを得て、翌年度以降のセミナーや本事業で作成する人材育成プログラムに反映することが重要である。そのために、昨年度同様、アンケートを作成し、参加者からの回答を得ることとした。アンケートの設問は、今回の人材育成セミナーの各構成要素の目的・テーマを考慮し、それぞれの構成要素が効果的であったのか、参加者（モニター）に有益であったのかなどを明らかとなるよう考慮した。アンケートは、大きく以下の 6 つの項目で構成することとした（アンケートは別添資料 3-3 参照)。

1. あなた自身について
   年齢（年代)、最終学歴、地層処分事業従事年数、専門分野、積極性など参加者個人の情報に関する質問を設定
2. セミナープログラムの構成
   セミナー全体、座学、演習、総合学習などの各構成要素に対する満足度、有用性、体験してみた気付きなどを問う質問を設定
3. 総合学習（アクティブラーニング）について
   グループワークの様子、グループワークからの気づき等を問う質問を設定
4. 地下水専門家の仕事、考え方に関する知識獲得
   地層処分事業において他分野の専門家のやっていることを理解することの意義等に関する質問を設定
5. 自分の得意分野以外の専門性を持つ人々と働くことのイメージ
   他の分野の専門家との協力に関する現状、今後などについての質問を設定
6. セミナープログラムのポテンシャル
   今回実施したアクティブラーニングの手法の有用性等に関する質問を設定

アンケートは、電子ファイルをセミナー時に配布し、2021 年 1 月 12 日（火）を提出期限とした。

3.3.5 人材育成セミナーの開催概要

(1) 新型コロナウイルス感染症拡大防止策

2020 年度人材育成セミナーの開催日である 2020 年 12 月下旬に向け、開催地である静岡県などでは、新型コロナウイルスの感染者数が増加している状況であった。セミナーにおいて感染のクラスターを発生させないため、新型コロナウイルス感染拡大防止対策を十分実施したうえで開催することとした。

まず、会場については、参加者の座席間隔が十分広くなるように、大きな会場（参加者は事務局を含め 20 名程度に対し、定員着席時 230 名の会場）を主会場として利用した。また、セミナープログラムに含まれるエクスカーション（サイト見学等）の際のバス移動に関しては、マイクロバスを 2 台手配することで、各バスの乗車人数が概ね定員の半数以下となるよう配慮した。また、講師や事務局を含めすべての参加者の体温測定を行い、発熱等の異常がないことを定期的に確認した。この他に以下の対策を行った。

- セミナー会場のドアを開放、また、空調により、十分な換気を実施
- 会場のドアノブなど多人数が触る箇所のこまめな消毒を実施
- セミナー会場入口に消毒液を設置し、参加者にこまめな消毒を推奨
- 予備のマスクやフェイスガードを準備

図 3.3-1　会場に準備した体温計や消毒液

(2) 2020 年度人材育成セミナーの開催概要

2020 年度人材育成セミナーは、「地質環境モデル（SDM）の構築に向けて - 地下水データをみる・よむ・とく-」と題し、以下の日程・場所において実施した。

①開催日時：2020 年 12 月 21 日（月）～23 日（水）、2 泊 3 日

②開催場所：ホテルグランド富士（会議施設＋宿泊・食事施設）

③参加者総数：モニター：12 名、講師（産総研）：3 名、講師補助：2 名

参加者内訳：原子力発電環境整備機構（NUMO）：6 名

（国研）日本原子力研究開発機構（JAEA）：4 名

（国研）産業技術総合研究所（AIST）：1 名

（公財）原子力環境整備促進・資金管理センター（RWMC）：1 名

(3) 1 日目（12 月 21 日（月））の開催概要

セミナーの初日は午後から開始し、まずは、「前振り」として、セミナー実施の背景や意義の説明を行い、続いて、各参加者の自己紹介を実施した。

今回のセミナーの自己紹介では、各参加者（モニター）に以下を話してもらった。

1）名前・所属・勤務先

2）地層処分とのかかわり

3）地層処分業務に関して今悩んでいること、今後の課題

4）＋α（話したい場合）

次に地下水に関する基礎的知識を提供する目的で、座学を実施した。前述のように座学は、地下水に関する専門家を養成する目的ではなく、総合学習での議論等のための基礎知識を提供することを目的としていた。また、今回のセミナーではアクティブラーニングを志向することとしていたため、座学においても単に受動的に講義を聞くだけではなく、参加者が手を動かし計算等を行う作業を組み込んだ。

図 3.3-2　1 日目の座学の様子

(4) 2 日目（12 月 22 日（火））の開催概要

2 日目は、まず、座学 4 として、産総研で実施している駿河湾岸での調査の紹介等を実施した。海底湧水調査のビデオ上映やプロジェクションマッピングを使った駿河湾岸地域の水文地質図の紹介などの説明を行った。

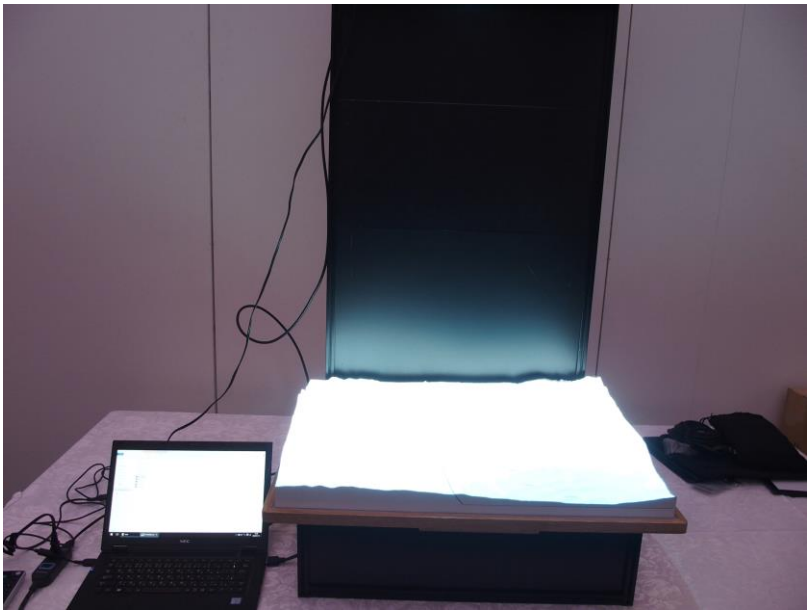


図 3.3-3　プロジェクションマッピングの機材

その後、エクスカーションとして、ボーリングサイトの見学、東名高速道路の富士川サービスエリアでの地形等の見学、地下水が湧出している富士宮市の涌玉池付近での採水などを行った。

図 3.3-4　ボーリングサイトでのコアの観察の様子

セミナー会場であるホテルに戻ったのち、実習として、実際に採水してきたサンプルを用い、重炭酸滴定を行った。

2 日目の最後に総合学習（前編）として、セミナーで実施した座学や実習を踏まえ、1 次元での地下水流動のモデルを題材としてグループワークを行った。総合学習は、2 日目及び 3 日目共に概ね以下の流れで実施した。

1. 個人でモデルを作成（模造紙にモデルを記入）
2. 各グループ内でどういう意図で自分がモデルを作成したのかを説明
3. グループとしてのモデルについて議論・検討しモデルを作成
4. グループごとにモデルについて発表、他グループがコメント
5. 他のグループの説明・コメントを受けて、自分たちのモデルの改善点をグループごとに議論し、議論した結果を発表

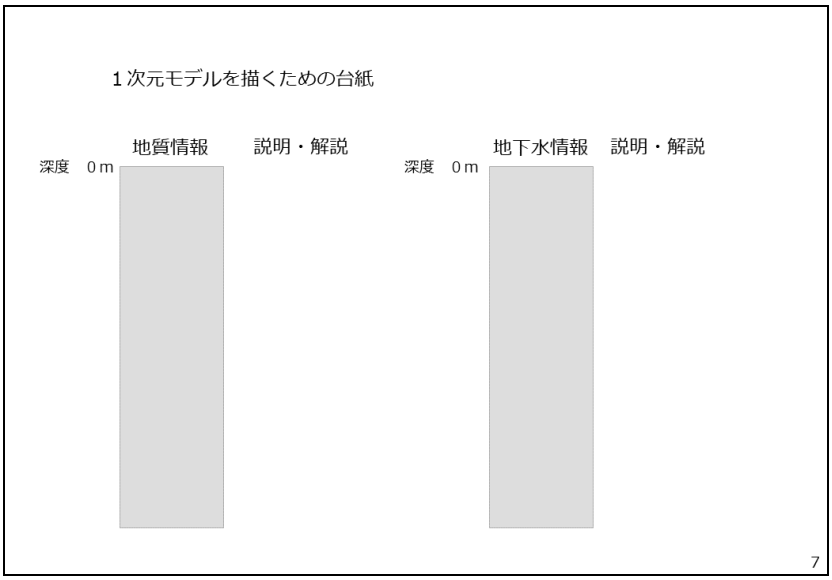


図 3.3-5　総合学習（前編）で用いた 1 次元モデル作成のための台紙

図 3.3-6　総合学習（前編）でのグループ発表の様子

(5) 3 日目（12 月 23 日（水））

3 日目はまず、総合学習（後編）として、2 次元の地下水流動モデルを題材として、2 日目の総合学習（前編）と同じ流れでグループワークを実施した。この総合学習（後編）では、冒頭に講師補助として参加した（株）地層科学研究所の研究者から地質環境モデルの構築等に関するプレゼンテーションを行った。

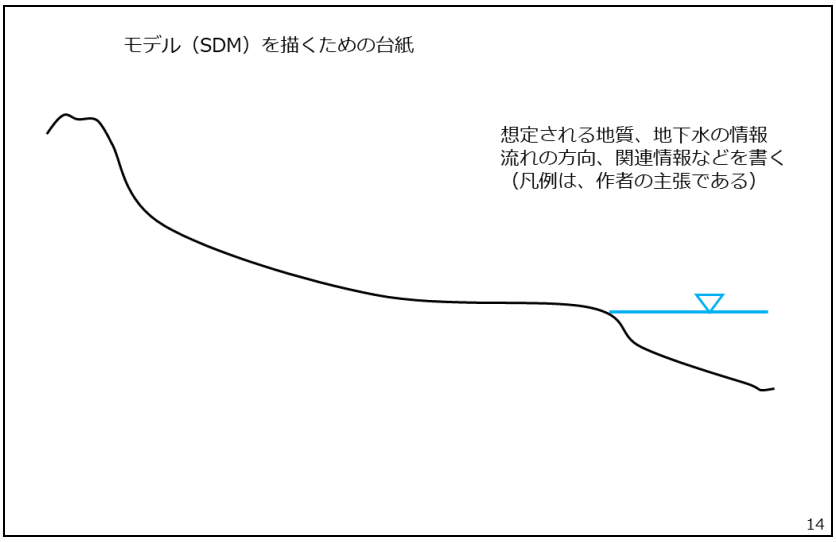


図 3.3-7　総合学習（後編）で用いた 2 次元モデル作成のための台紙

その後、3 日間のセミナーの振り返りとして、以下を各グループで議論したうえで、グループごとに発表を行った。

- 今回のセミナーで感じた「イイコト」
- 自分自身の専門性への気付き
- ジェネラリストという言葉のイメージが変わった
- 自分の部署でも似たことをやっている
- 次はこんなテーマでやったら面白いんじゃないか？

図 3.3-8　ふりかえりでのグループ内での議論の様子

3.3.6 アンケート結果の整理及び考察

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等のため、人材育成セミナーに対するモニターの意見をアンケート[4]によって聴取した。今年度のセミナーの参加者（モニター）は 12 名と少数であったため、統計的な評価・検定は行わず、参加者（モニター）の意見の傾向を確認した。

アンケートの回答のうち、セミナーに関する満足度、今回のセミナーで試みたアクティブラーニングに対する参加者の評価、総合学習（グループワーク）時の試行的に行ったグループ分けの影響などについて以下に紹介する。

3.4 今後の計画について

2020 年度第 2 回の地層処分スキルアップ研究会において、2020 年度の人材育成セミナーの開催報告、及び教材の作成を含む今後の計画について意見交換を実施した。この議論・意見交換に基づき、以下に今後の計画（案）等を示す。なお、以下に示す計画は、現時点では案の段階であり、今後各所との協議等を行ったうえで確定し、実施していくこととしている。

3.4.1 教材作成に関する 2021 年度以降の計画

①「地層処分に関する包括的知識」の教材の作成（今後の計画）

「地層処分に関する包括的知識」の教材（第 1 案）の改訂計画について図 3.4-1 に示す。第 1 案については、資源エネルギー庁殿（表 3.2-5）、地層処分スキルアップ研究会（表 3.2-6）や内部での精査結果に基づいた改訂を実施する。この改訂を行ったものを第 2 案とする。

次に第 2 案に関して、内容面の妥当性については、大学等の有識者によるレビューで確保するとともに、利用者の使いやすさ等の文章・デザイン面での見直しを行う（図 3.4-2）・これらの反映したものを第 3 案とする。大学等の有識者のレビューを依頼する大学等の有識者の候補としては、本事業で設置している評価委員会の委員や高レベル放射性廃棄物処分に知見を有する教育学を専門とする大学教員等とすることとしている。

[4] 5 段階（1～5 点、5 点が評価高）の評価とその理由を記載する設問のほか、自由意見のみ記入する設問などで構成（詳細は別添資料 3-3 参照）

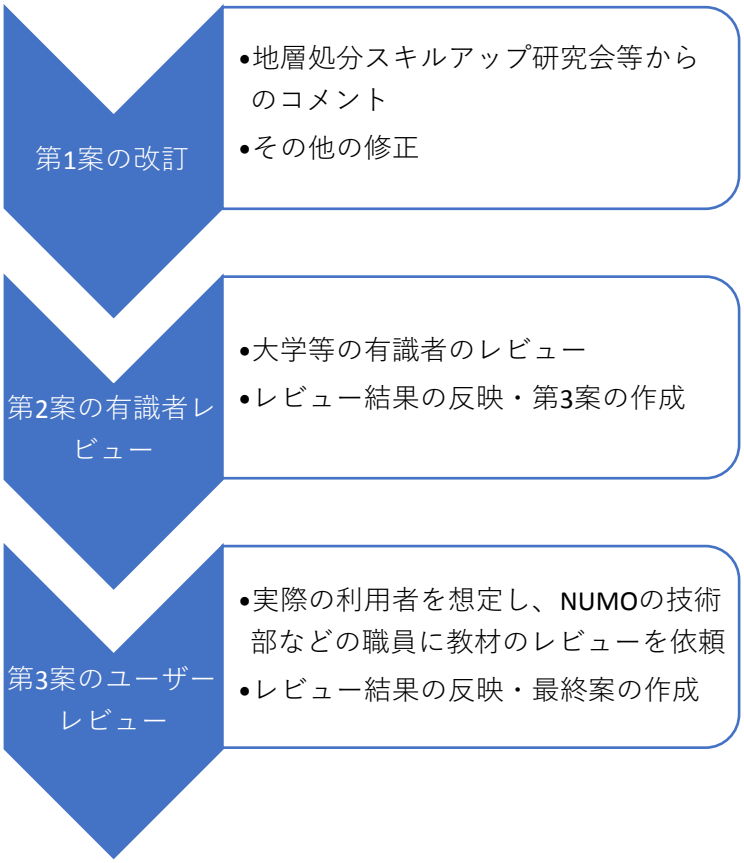


図 3.4-1 「地層処分に関する包括的知識」の教材作成の今後の流れ

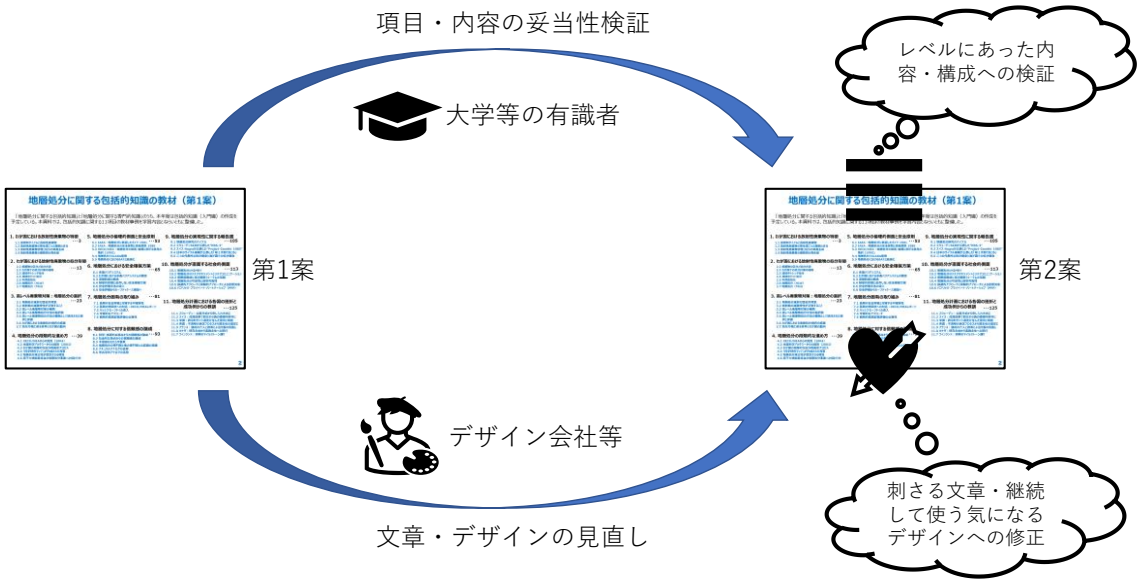


図 3.4-2 教材（第 1 案）の改訂方針

また、第 2 案に対しては、文章や図表などのデザイン面について、利用者にわかりやすく印象に残る、また継続して使うことを促すような文章やデザインとすることを目的として、デザイン会社などの協力を得たうえで、見直しを行うことを検討する。

第 3 案については、想定される実際の利用者（例、NUMO 技術部などの職員）からの意見聴取を実施する。意見聴取の項目としては、以下などを想定しているが、今後検討を行い、具体化する。

- 教材の使い勝手、記述のわかりやすさ（どのように改善すると良いか）
- 図表の使い方は効果的か
- 図表と文章の割合・構成

②「地層処分に関する包括的知識」及び「地層処分に関する専門的知識」の教材の作成に関するコメント対応

まずは、「地雄処分に関する包括的知識」の教材（第 1 案）について、資源エネルギー庁殿及び地層処分スキルアップ研究会から得られた教材へのコメントを参考に、教材の対応・改訂方針を検討した。現時点での方針は、大まかなものであり、来年度、方針が確定後に具体的な対応案を作成し実施していくこととしている。以下に「地層処分に関する包括的知識」の教材（第 1 案）の改訂方針案を示す。

- NUMO の包括的技術報告書などの構成・内容も参考としつつ、学習項目や内容の改訂を行う。
- 学習効果を図ることができるような工夫を行う。
  e.g. 重要な語句を赤字で隠すことができるようにする、または各ジャンルで確認テストのようなものを付ける
- 記述内容については、想定される利用者を意識して、わかりやすく、読みやすい、また、継続して利用する気になるような工夫を検討する。
  e.g. デザイン会社・サイエンスライターによるデザイン・文章の見直しなど

また、「地層処分に関する専門的知識」に関しては、当初の計画では、「地層処分に関する包括的知識」のような教材を作成することとしていた（3.2.3 参照）。しかし、3.2.4 に示

したように、「地層処分に関する専門的知識」については、教材は作成せず、既存の資料や教材を活用する方針を第 2 回地層処分スキルアップ研究会において議論した。地層処分スキルアップ研究会でのコメントを参考にして、このような教材は作成せず、現状の「地層処分に関する専門的知識」の学習指導要領の各学習項目の欄で、各学習項目の内容を学ぶことができる既存の資料（例えば、NUMO の包括的技術報告書など）を紹介する方針とする。既存の資料については、インターネット上で利用可能なものの場合には、リンクを貼るなどして、利用者の利便性が向上するように配慮する。図 3.4-3 に例を示す。

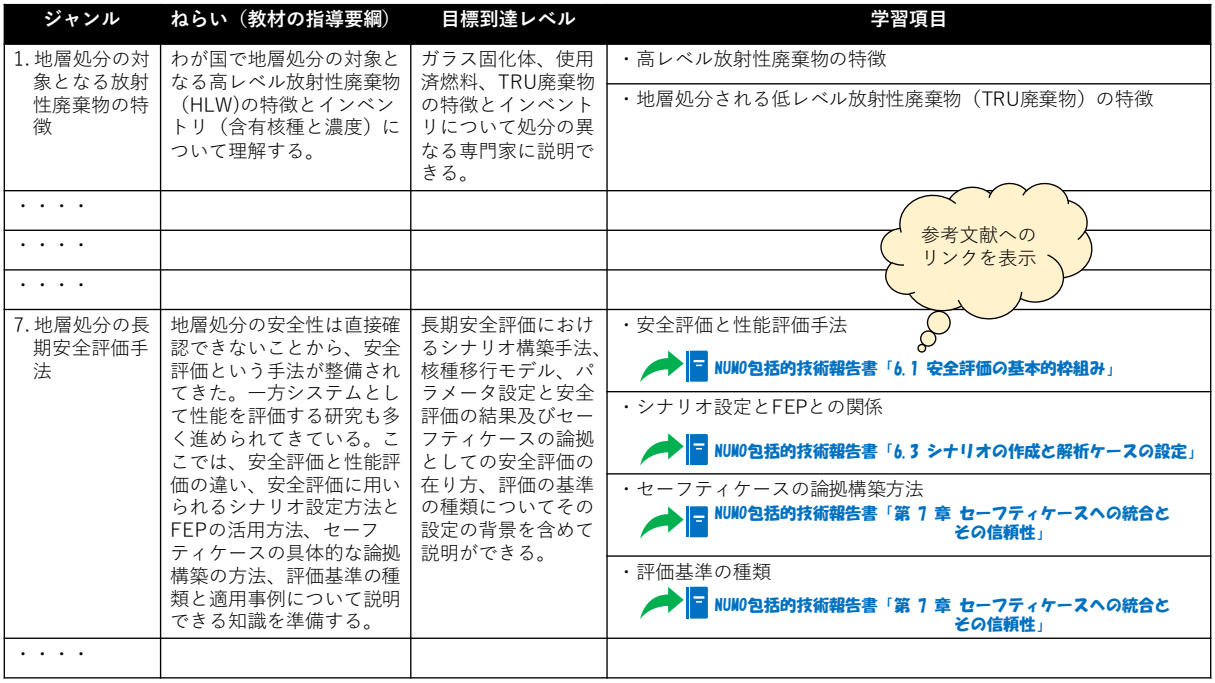


図 3.4-3 「地層処分の専門的知識」の学習指導要領から既存資料へのリンクの例
学習項目の内容を学習可能な既存資料の紹介・可能な場合にはリンクを貼る

今後、資源エネルギー庁殿との協議を行い、以上の方針を決定のうえ、教材等の作成を進めていくこととしている。

3.4.2 人材育成セミナーについて

(1) 開催方針について

今年度は、産総研の協力を受け、「地下水」を題材・テーマとし、知識の習得だけでなく、グループワークを通じて、異分野の専門家とのコミュニケーションの難しさ、重要性や地層処分における他分野との協力の必要性に関する気づきを与えることを意図してセミナーを開催した。アンケート結果などから今年度の人材育成セミナーでは、この当初意図した目的は概ね達成できたものと評価している。このため、来年度以降も 2019 年度に開催したような広く地層処分の 3 分野の座学で構成されるようなセミナーを開催するのではなく、題材・テーマを変えたうえで、今年度と同様、座学、見学、グループワークなどを組み合わせた相互学習的なセミナーを開催する。このセミナーでは、知識の習得ではなく、グループワークを通じて、異分野の専門家とのコミュニケーションの重要性、協力の必要性に関する気づきを与えることを目的する。以降に現時点で想定している来年度以降の計画を示す。

(2) 来年度以降の計画

今年度の人材育成セミナーでは、地質系分野の地下水をテーマとした。来年度以降、以下のようなテーマでセミナーを開催することを計画している。

2021 年度：工学技術分野からテーマを設定

2022 年度：安全評価分野からテーマを設定

来年度以降のセミナーのテーマを工学技術分野、安全評価分野と変えることで、他の分野の専門家との協働やコミュニケーションの重要性への気づきを与えるというセミナーの目的達成のため、どのようなテーマ設定がより効果的なのかも検討することが可能になると考えられる。

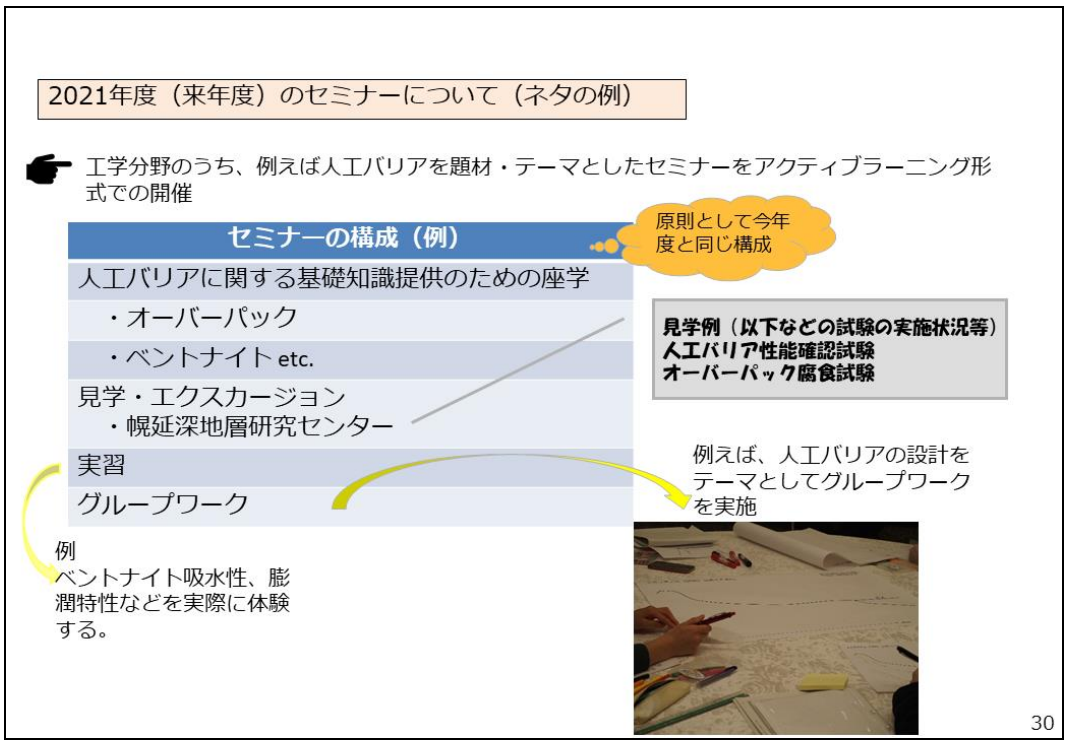


図 3.4-4　来年度の人材育成セミナーの内容検討例

この方針・計画については、第 2 回地層処分スキルアップ研究会において議論し、各参加機関の賛同を得ることができた。そのため、今後、具体的なテーマ、内容について検討を行っていくこととしており、検討に際しては、関係機関である原子力発電環境整備機構（NUMO）、（国研）日本原子力研究開発機構（JAEA）、原子力環境整備促進・資金管理センター（RMWC）などからなるワーキンググループを設置し、検討を行う。

テーマ・題材としては、工学技術分野で選定することになるが、セミナーに組み込む見学の場所としては、JAEA の幌延深地層処分研究所などを想定している。

また、2021 年度のセミナー実施のスケジュールは概ね以下を想定している。

4 月～6 月	セミナーの具体的な題材・テーマの検討
7 月～9 月	セミナーの具体的な構成、内容の検討、会場の選定、その他の準備
10 月ごろ	セミナーの開催

(3) 今年度の結果の反映について

前述のとおり、来年度の人材育成セミナーにおいても今年度の方針を踏襲して実施するが、今年度のセミナーから得られた教訓は反映を検討する必要がある。アンケートの結果などのセクションにおいて既に記述しているが、ここでいくつかの項目について再掲する。

- 参加者のテーマに関する基礎知識・レベル（地層処分事業への従事年数）を可能な範囲で統一する
- セミナーの日程・時間配分に世数を持たせる
- チェックイン（自己紹介）の実施方法を見直し、各参加者の話す内容がより印象に残るようにする
- 各実施項目、例えば実習について、その実施意図、地層処分との関係性の説明を十分に行う

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)」（令和 2 年 3 月改訂)、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）
2) （公財）原子力環境整備促進・資金管理センター、「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）https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2019/31fy_juyokiso.pdf
3) ワークショップ設計研究所、「場の導入技法: 『チェックイン』」、https://ws-plan.pro/check-in-on-introduction-phase-arts-of-ba/、2020 年 12 月閲覧

別添資料 1

（各実施研究の 2020 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

図 1　放射性廃棄物の処分概念 2
図 2　放射性廃棄物の種類に応じた処分方法 3
図 3　人工バリアの基本構成 3
表 1　各人工バリアの設計上考慮すべき機能の整理 4
図 4　余裕深度処分施設の構成 5
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 6
表 2　全体研究計画 9
表 3　メタカオリン化学組成 11
表 4　試験体の配合 11
図 7　含水量および強熱減量測定結果 14
図 8　圧縮強度および超音波伝播速度測定結果（材齢 28 日） 15
図 9　圧縮強度試験結果（材齢 1 年） 15
図 10　収縮量測定結果（材齢 1 年） 16
図 11　プロトン NMR 測定結果(CPMG 法、材齢 28 日) 17
図 12　固体 NMR 測定結果（上図：^{27}Al、下図 ^{29}Si） 18
図 13　低温 DSC 測定結果（材齢 28 日、上図：凍結過程、下図：融解過程） 19
図 14　PMA によるセシウムの濃度分布測定結果の一例 20
図 15　セシウムのみかけの拡散係数測定結果（材齢 28 日） 20
図 16　セシウムの吸着等温線（材齢 28 日） 21
図 17　セシウムの飽和吸着量 21
図 18　浸漬期間 18 か月における溶出量（上図：ナトリウムおよびカリウム、下図：アルミニウム及びシリカ） 22
図 19　溶出試験における質量減少率の変化 23
図 20　水の拡散係数測定結果（材齢 28 日） 24
図 21　空隙量と比表面積測定結果（材齢 28 日） 24
図 22　空隙径分布（材齢 28 日） 25

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。

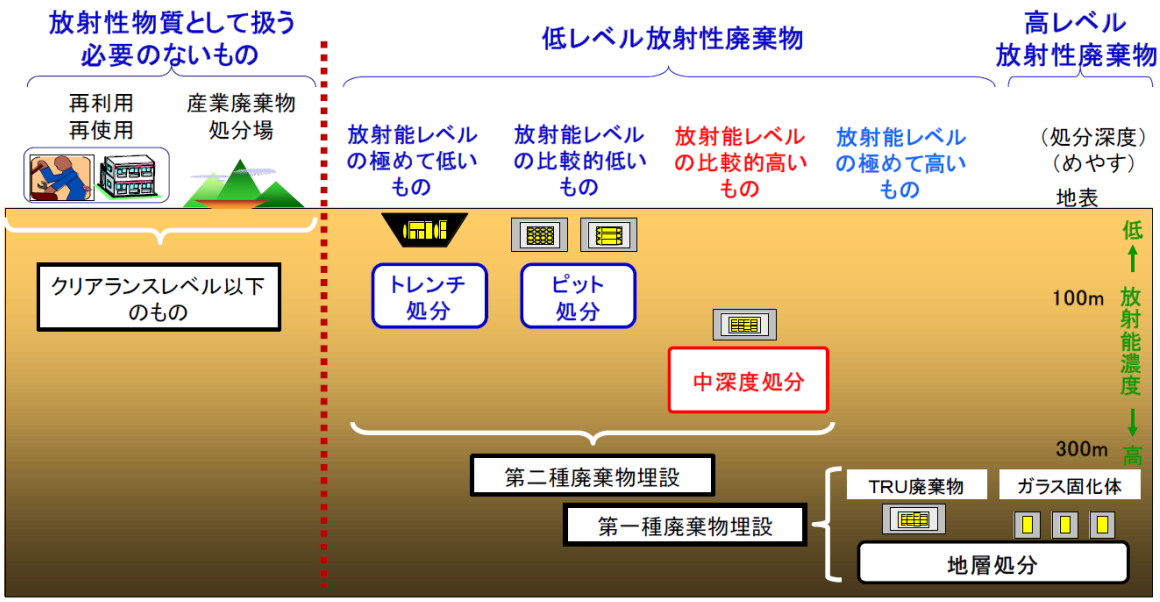


図 1　放射性廃棄物の処分概念[1]

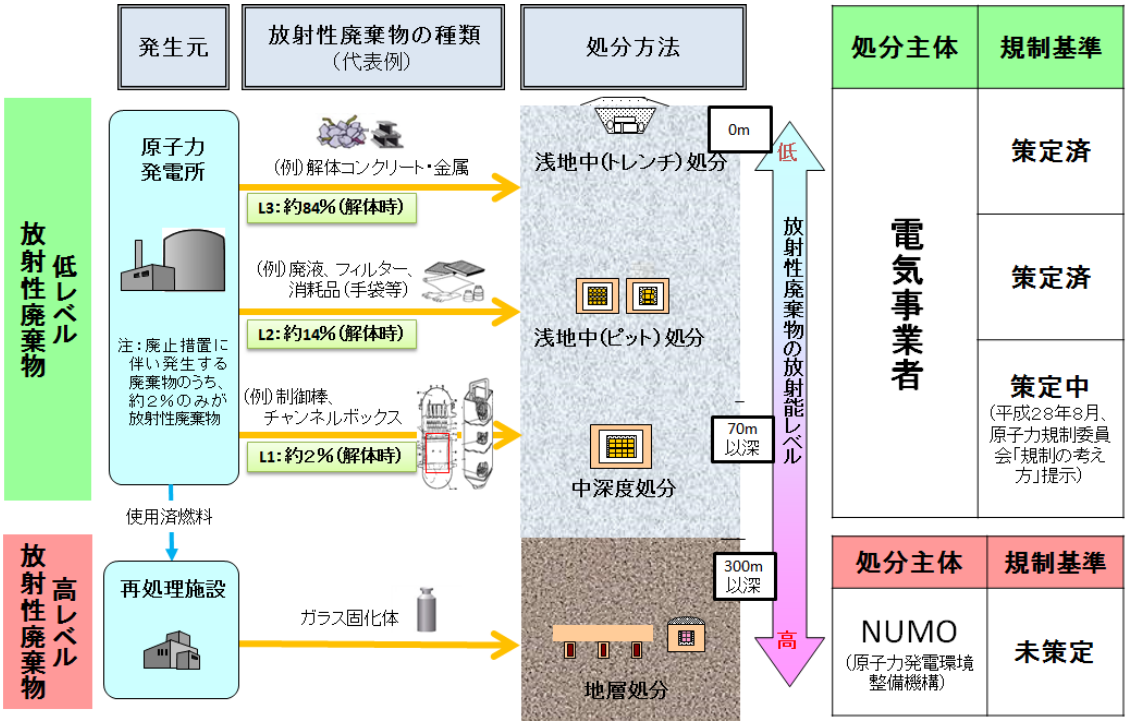


図 2　放射性廃棄物の種類に応じた処分方法[2]

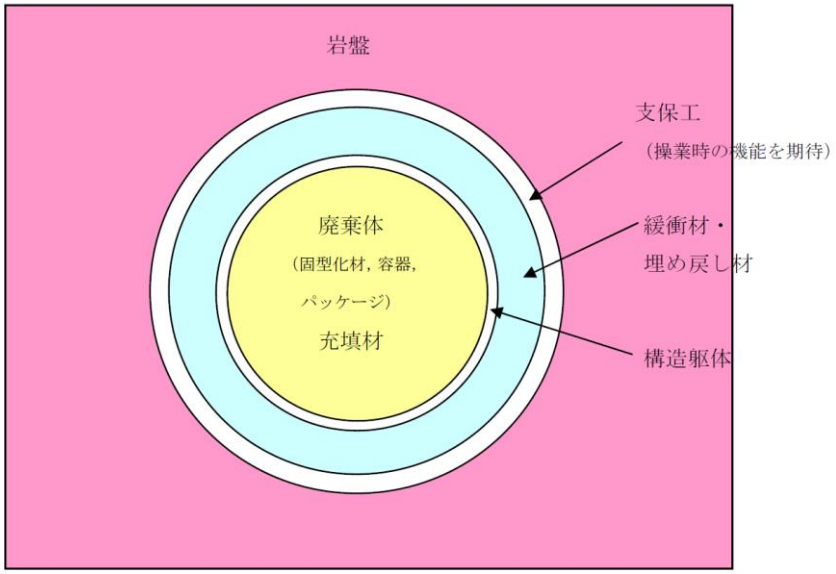


図 3　人工バリアの基本構成[3]

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

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。

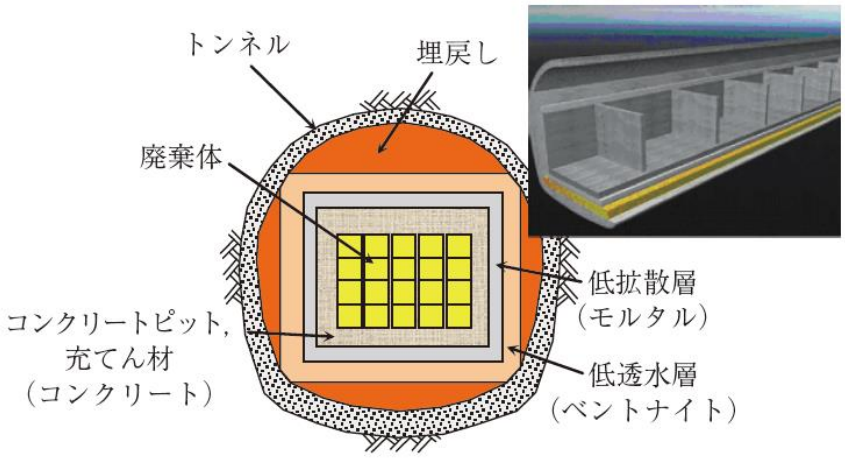


図 4　余裕深度処分施設の構成[4]

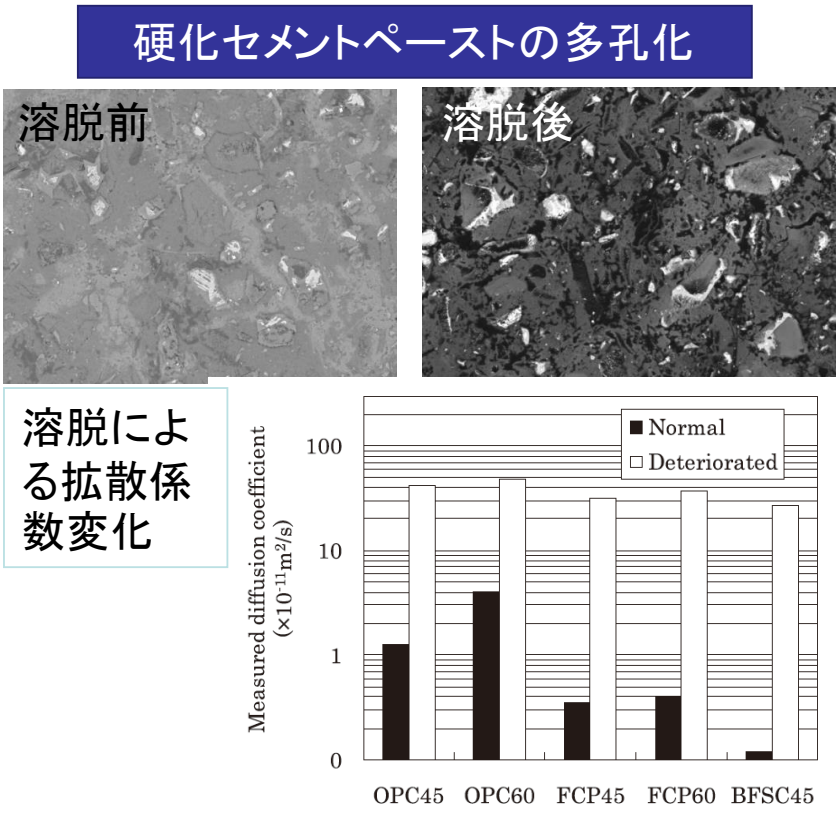


図 5　セメント硬化体の溶脱に伴う構造変化と拡散係数変化[5]

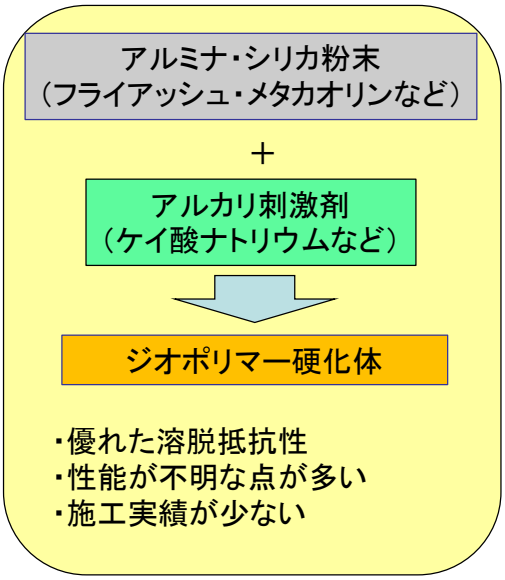


図 6　ジオポリマー硬化体の概要

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-, $Mn[-(SiO_2)z-AlO_2]n \cdot wH_2O$、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 CO_2 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。

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。1.5 年間にわたる溶出試験の 1.5 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。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	→	各種定数の決定
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 年度の成果概要

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	◎	○	○	ー
機械的特性	◎	○	○	○
拡散係数	ー	○	ー	ー
収縮	ー	○	○	◎
吸着量	ー	◎	○	ー
透水係数	ー	○	ー	ー

4. ２０２０年度研究実施内容

4.１２０２０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、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等を吸着させその収着特性について検討を行う。また、1.5 年間にわたる核種の溶出・溶脱試験の測定を行った。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。

4.2.1 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、平均粒形 1.3μm、BET 比表面積 12.9m^2/g、嵩比重は 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、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 メタカオリン化学組成

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI
MK	52.48	1.62	45.21	0.34	0.02	0.4	0.12	0.07	0.64

表 4 試験体の配合

Sample	Alkali activator(mol/mol)				Sand(g)
	M_2O	M_2O/Al_2O_3	SiO_2/Al_2O_3	H_2O/Al_2O_3	
K11	K_2O	1.0	1.0	11.0	MK×3
N11	Na_2O				
NK11	$0.5K_2O+0.5Na_2O$				
K9	K_2O			9.0	
0.66K			1.5	11.0	
K2Si	K_2O	1.0	2.0	11.0	

(2)　測定方法

a.　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。

b.　含水率および強熱減量測定

粉砕した試料を105℃の乾燥炉にて24時間乾燥し、含水量を求めた。また、105℃から950℃までに減少した質量から強熱減量を求めた。

c.　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。

d.　水銀圧入法および窒素吸着法による細孔径分布測定

試料を粉砕し、それを乾燥させたのちに水銀圧入法によって細孔径分布を測定した。また、窒素吸着法では粉末試料を用いて測定を行いBET理論によって比表面積を求めた。窒素吸着法の前処理として24時間真空にて乾燥後に測定を開始した。

e.　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。

f.　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。

g.　固体NMR測定

^{29}SiMASNMRと^{27}AlMASNMR測定を行った。

h. 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 −Al_2O_3)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。

i. 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。

j. 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。

k. 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。

l. 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。

m. 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 によって観察し拡散係数を算出した。

n. 透水試験

透水試験にはインプット法を用いて水の拡散係数を求めた。試験体は直径 150 ㎜、高さ 150 ㎜の円柱型の試験体を用いた。

4.2 ２０２０年度の成果内容

4.2.1 測定結果

(1) 含水量および強熱減量測定結果

図 7 に含水量と強熱減量を測定した結果を示す。含水量は K9 の試料が最も少なくその他の試料では同程度の結果であった。強熱減量（LOI）は全ての試料で同程度であった。

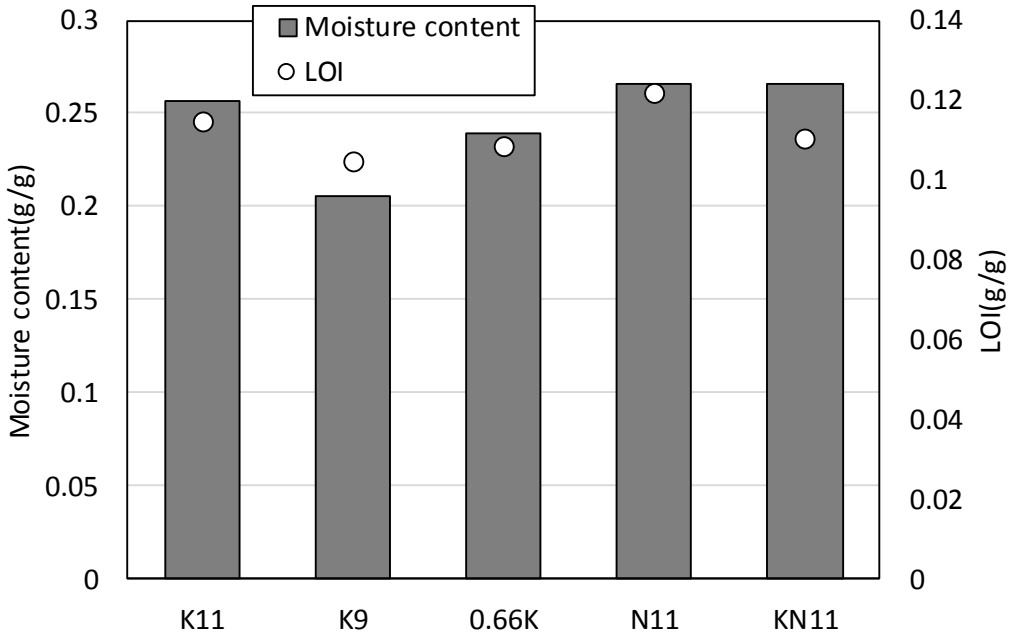


図 7　含水量および強熱減量測定結果

(2)　圧縮強度および超音波速度試験結果

図 8 に材齢 28 日のジオポリマーモルタルの圧縮強度試験結果を示す。シリカの量が多い試験体と水量の少ない試験体の強度が高い傾向にあった。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/mm^2、50%で 60N/mm^2 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。

また、図 9 に 1 年間養生したモルタルの圧縮強度試験結果を示す。1 年後の強度は材齢 28 日の強度とほぼ同程度であった。一方、養生温度が高くなるにつれて圧縮強度は低下する傾向にあった。ただし、これも 28 日において測定された結果であることから長期間高温にさらされても初期の強度水準は大きく低下しないことが示された。

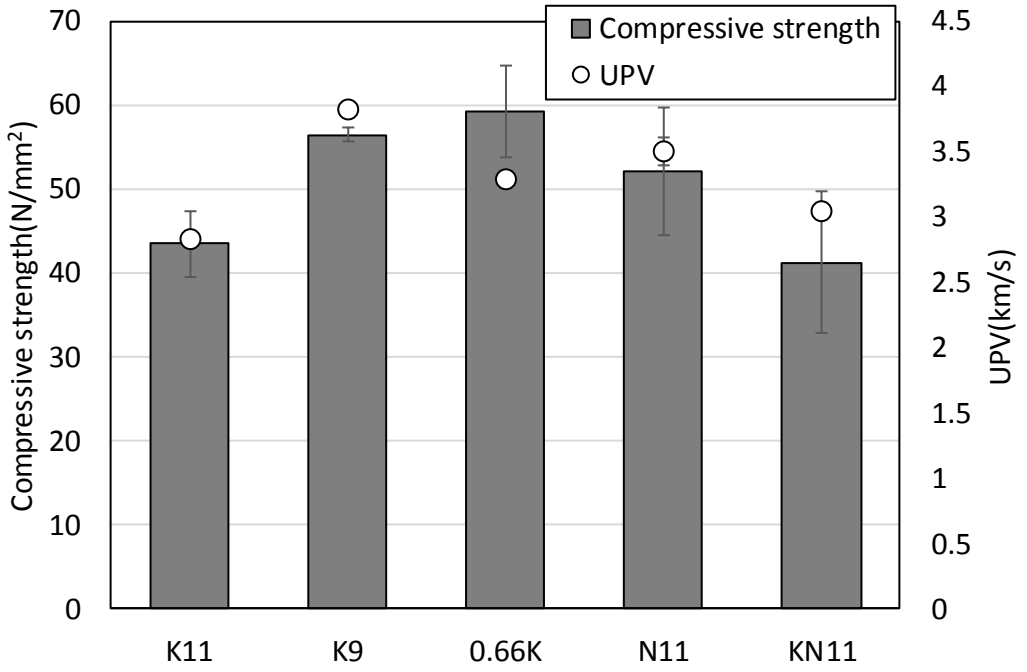


図 8　圧縮強度および超音波伝播速度測定結果（材齢 28 日）

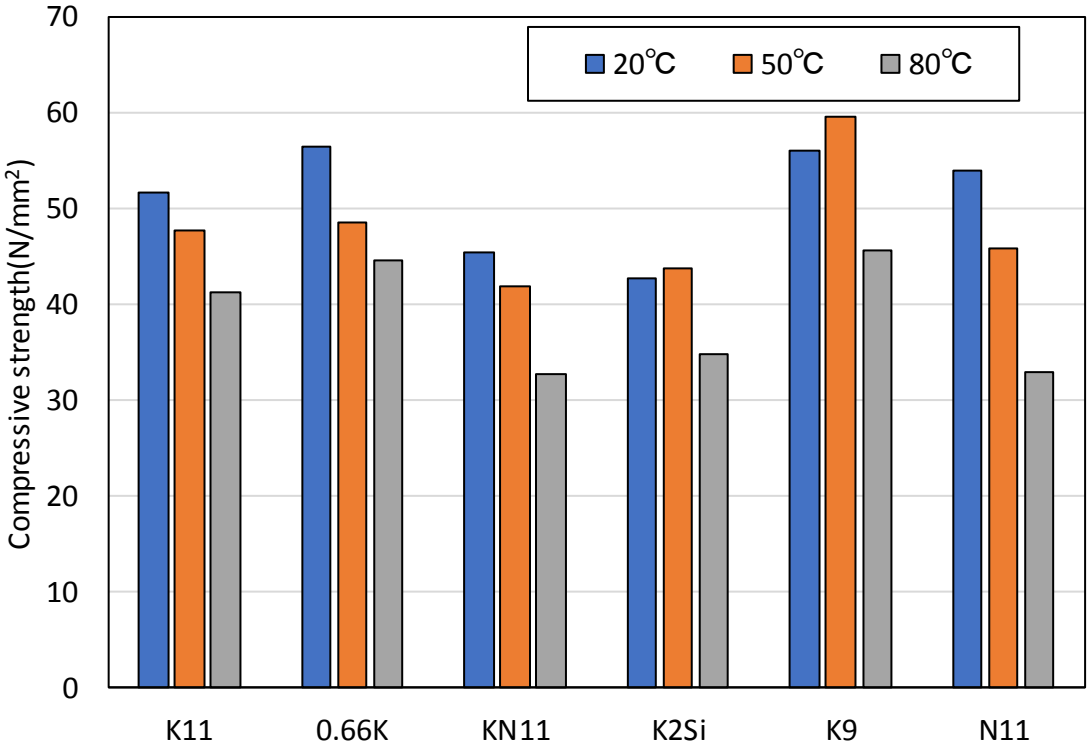


図 9　圧縮強度試験結果（材齢 1 年）

(3)　収縮量試験結果

収縮量測定結果を図 10 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。また、ナトリウムを含む試料においては加温することによって大きく収縮量が増加した。これも加温によって重合が進行したためであると考えられる。

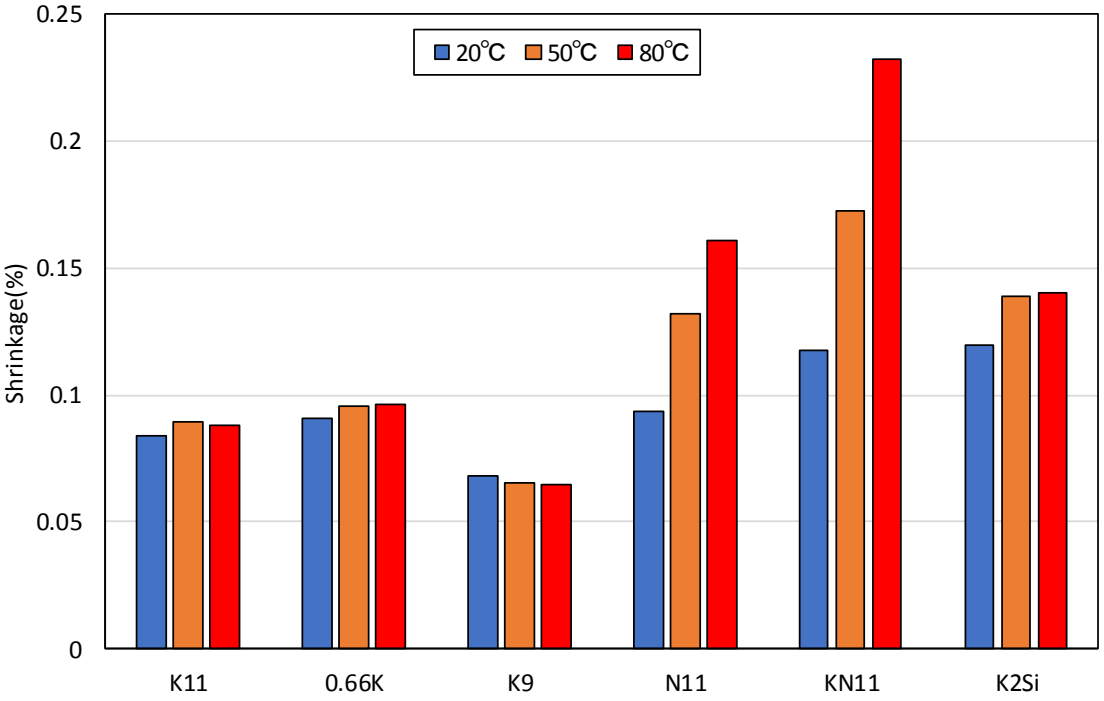


図 10　収縮量測定結果（材齢 1 年）

(4)　プロトン NMR 測定結果

図 11 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。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。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。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。

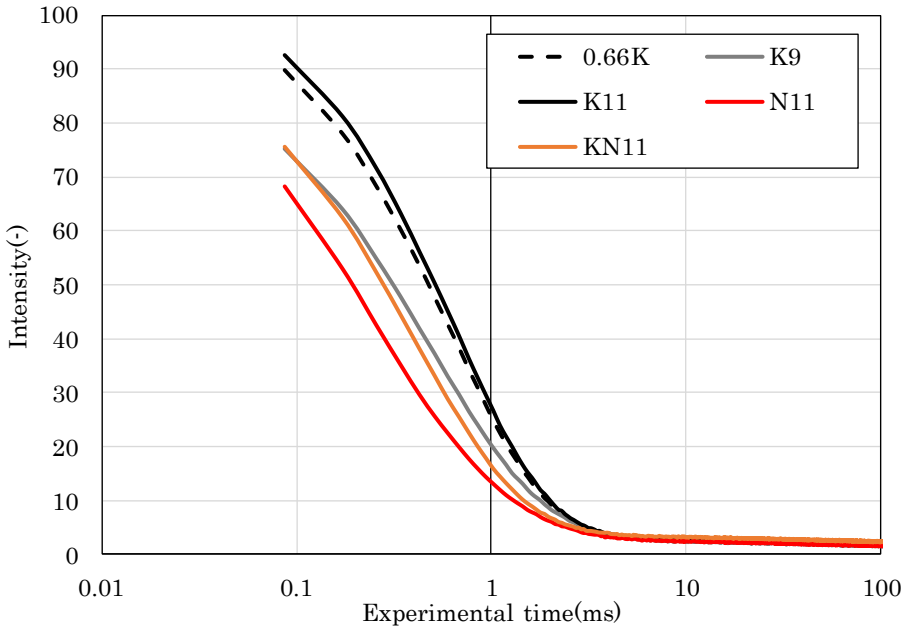


図 11　プロトン NMR 測定結果(CPMG 法、材齢 28 日)

(5)　固体 NMR 測定結果

図 12 に材齢 28 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 59 ppm 付近にピークがみられている。これはアルミの配位数が 4 配位であることを示している。したがってアルミの配位数はアルカリ刺激剤の種類によって変化しないことが示された。

^{29}Si MAS の測定結果より-87ppm 付近に 0.66K 以外の試料ではピークが見られた。これは Si に対して Al の配位数が 3 配位である状態が多いことを示している。一方、0.66K の試料では-90ppm 付近にピークがあることからその他の試料に比べて Al の配位数が少ない 2 配位の状態が多く存在していると考えられる。

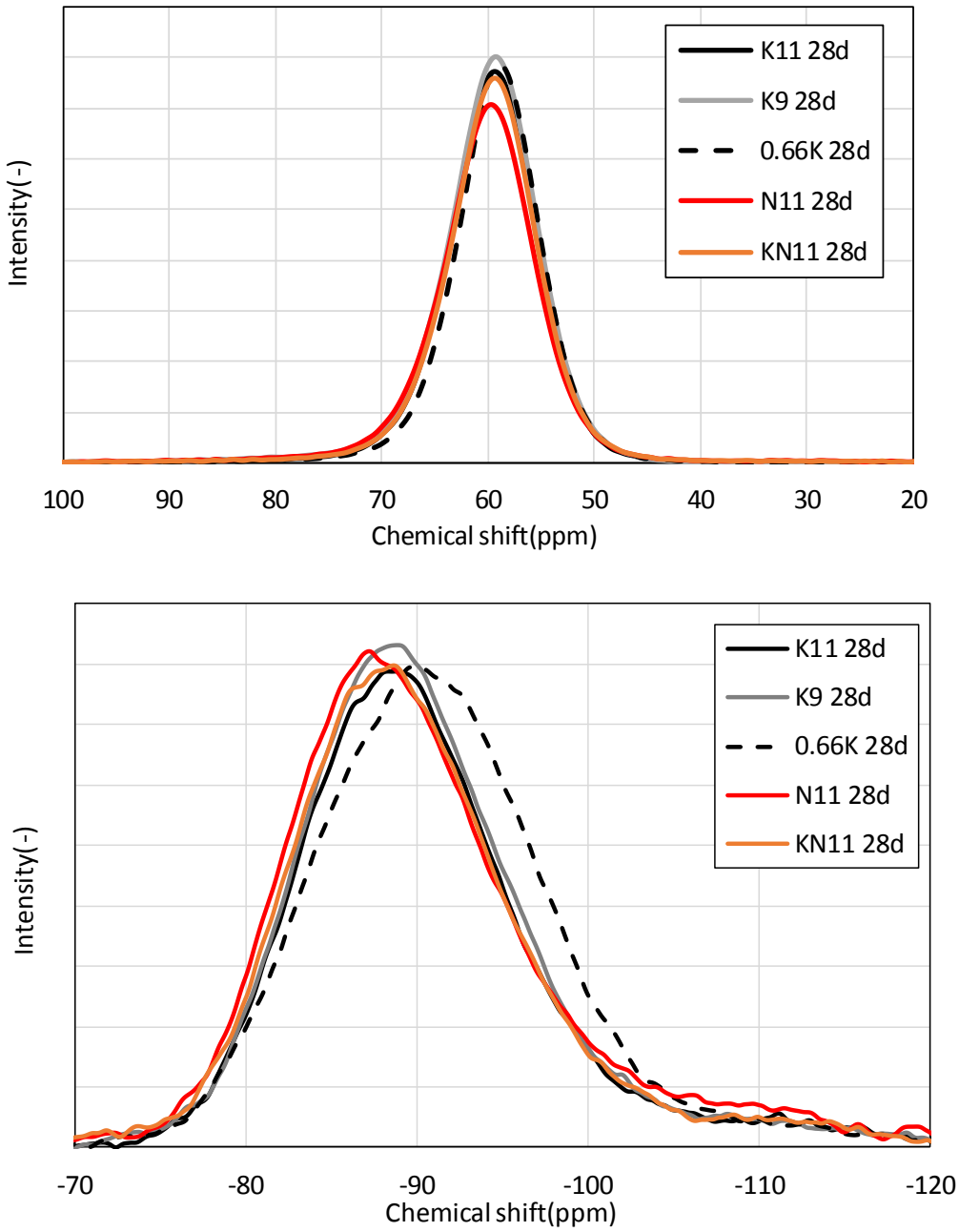


図 12　固体 NMR 測定結果（上図：^{27}Al、下図 ^{29}Si）

(6)　低温 DSC 測定

図 13 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比較的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。一方、融解側ではすべての試料において

0℃付近に大きなピークが存在している。このヒステリシスが生じた理由は凍結時にひび割れが発生した粗大な空隙が増加したと考えられる。しかしながら詳細は不明なため今後検討が必要である。

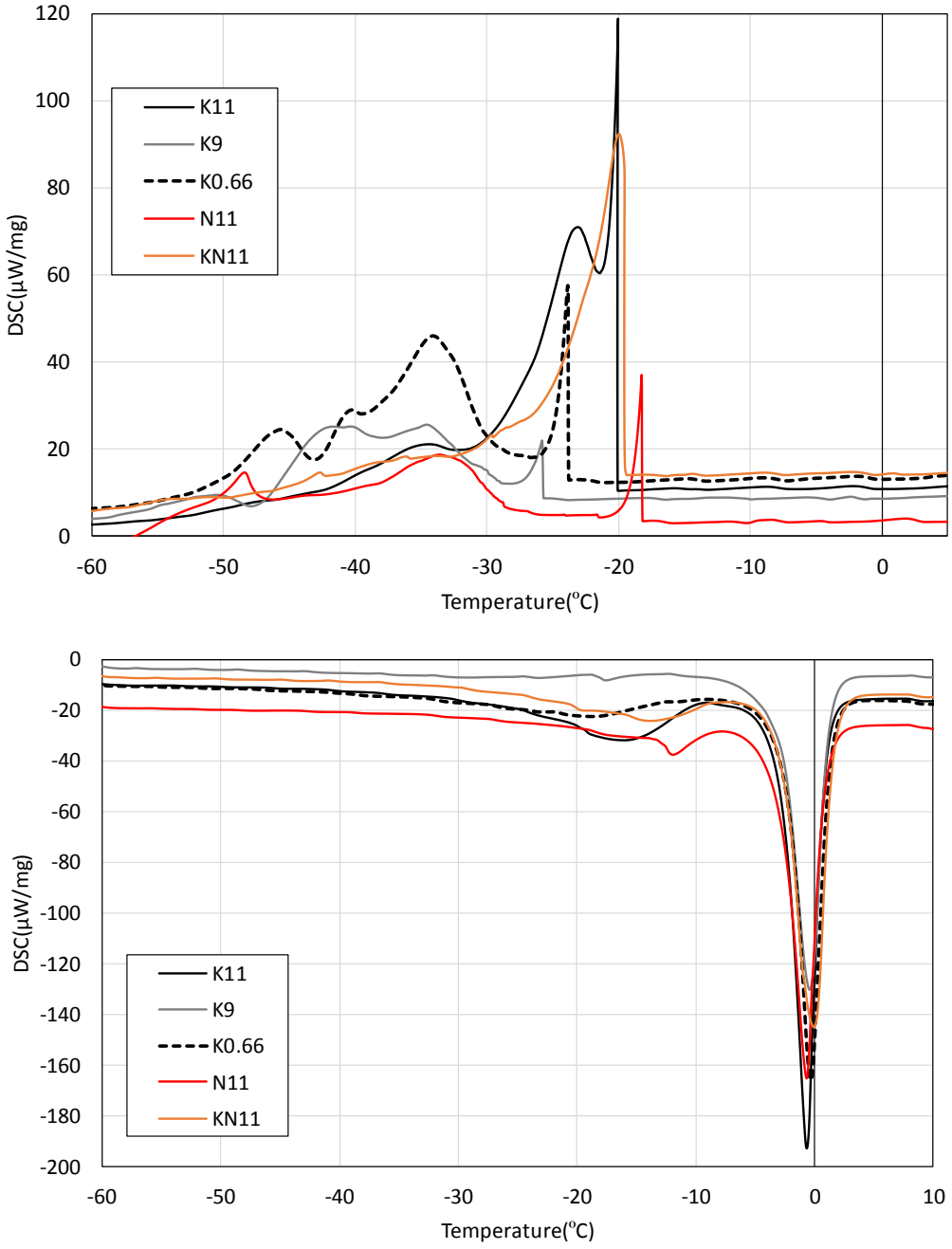


図 13　低温 DSC 測定結果（材齢 28 日、上図：凍結過程、下図：融解過程）

(7)　イオン拡散測定

図 14 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。浸透深さは水量が多い試験体

の方が深く、水量が少ない試験体の方が深く浸透しなかった。また、図 15 に拡散係数をまとめた結果を示す。水量が少ない試験体とナトリウムを使用した試験体の拡散係数が低い結果であった。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、1 週間浸漬の方が高い拡散係数であった。これは 4 週間浸漬することによって内部の構造が変化し空隙が閉塞しているためであると考えられる。

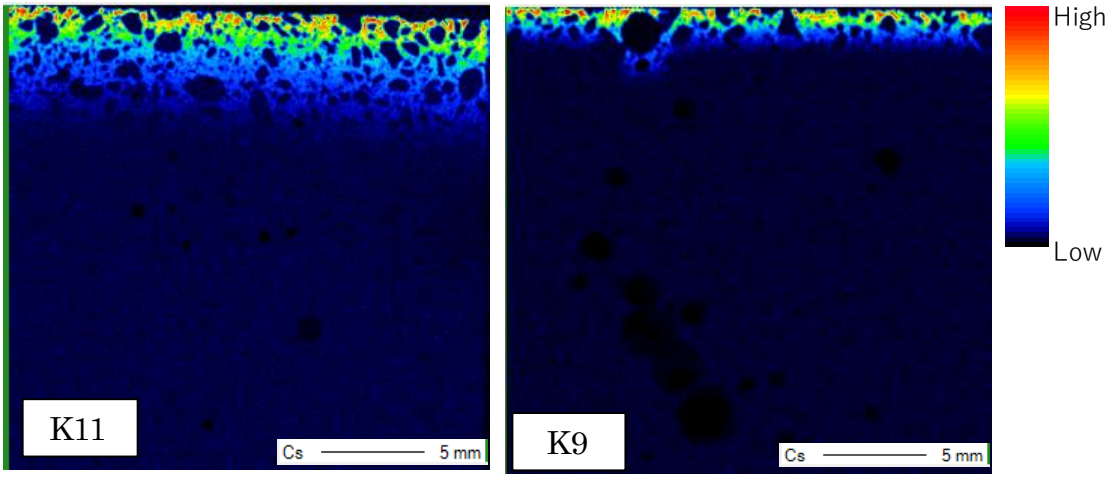


図 14　PMA によるセシウムの濃度分布測定結果の一例

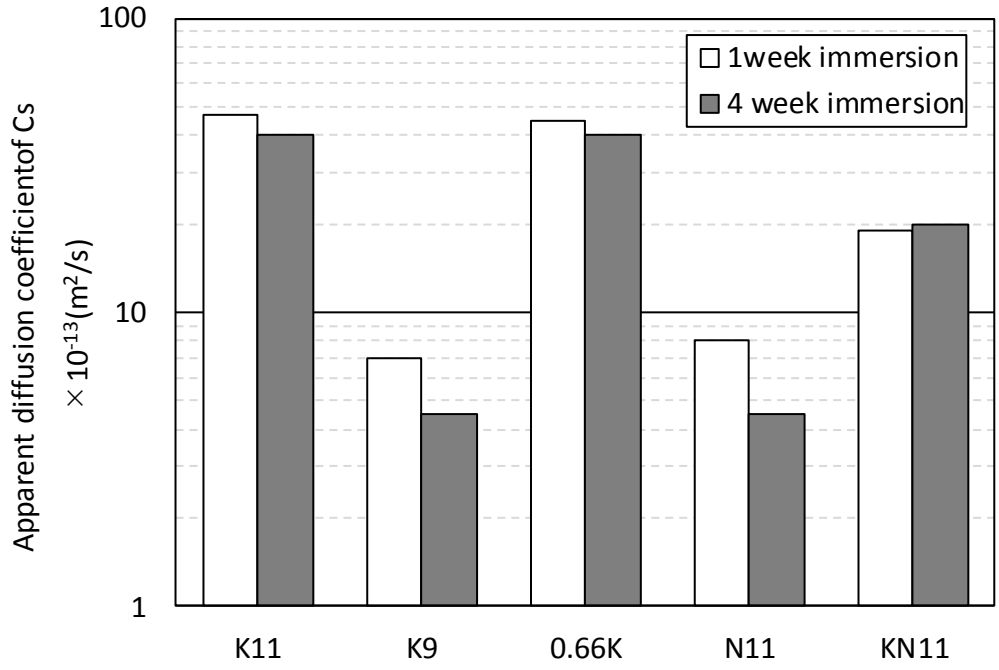


図 15　セシウムのみかけの拡散係数測定結果（材齢 28 日）

(8)　吸着量測定結果

セシウムイオンの吸着量測定結果を図 16 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、陰イオンである塩化物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。また、セシウムの吸着がラングミュア型で生じると仮定して飽和吸着量を求めた結果を図 17 に示す。飽和吸着量はナトリウムを用いるとカリウムの 2 倍の吸着量を示した。

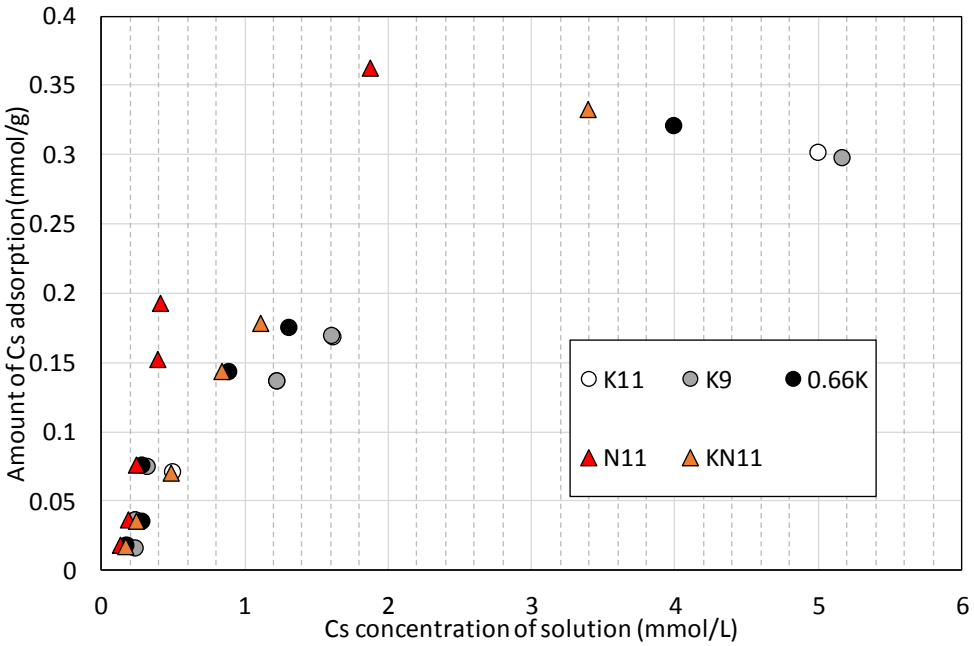


図 16　セシウムの吸着等温線（材齢 28 日）

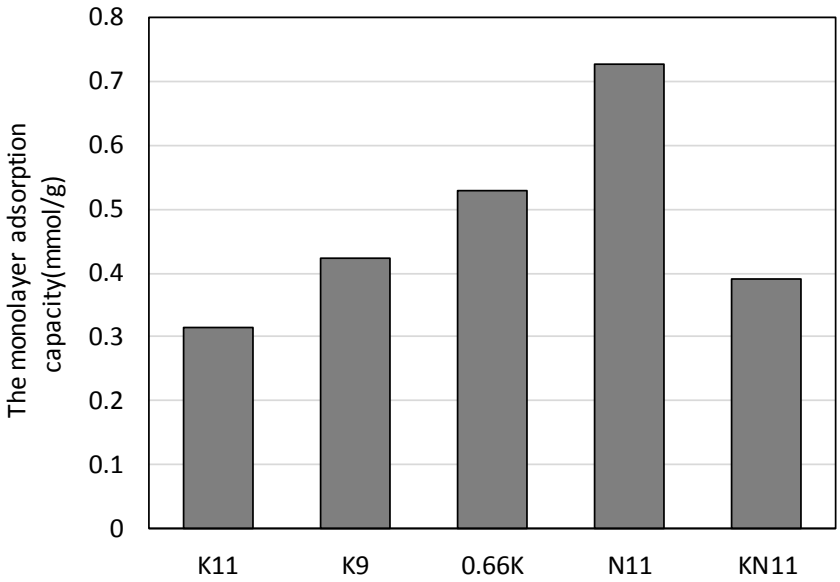


図 17　セシウムの飽和吸着量

(9)　溶出量測定結果

図 18 に 18 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。

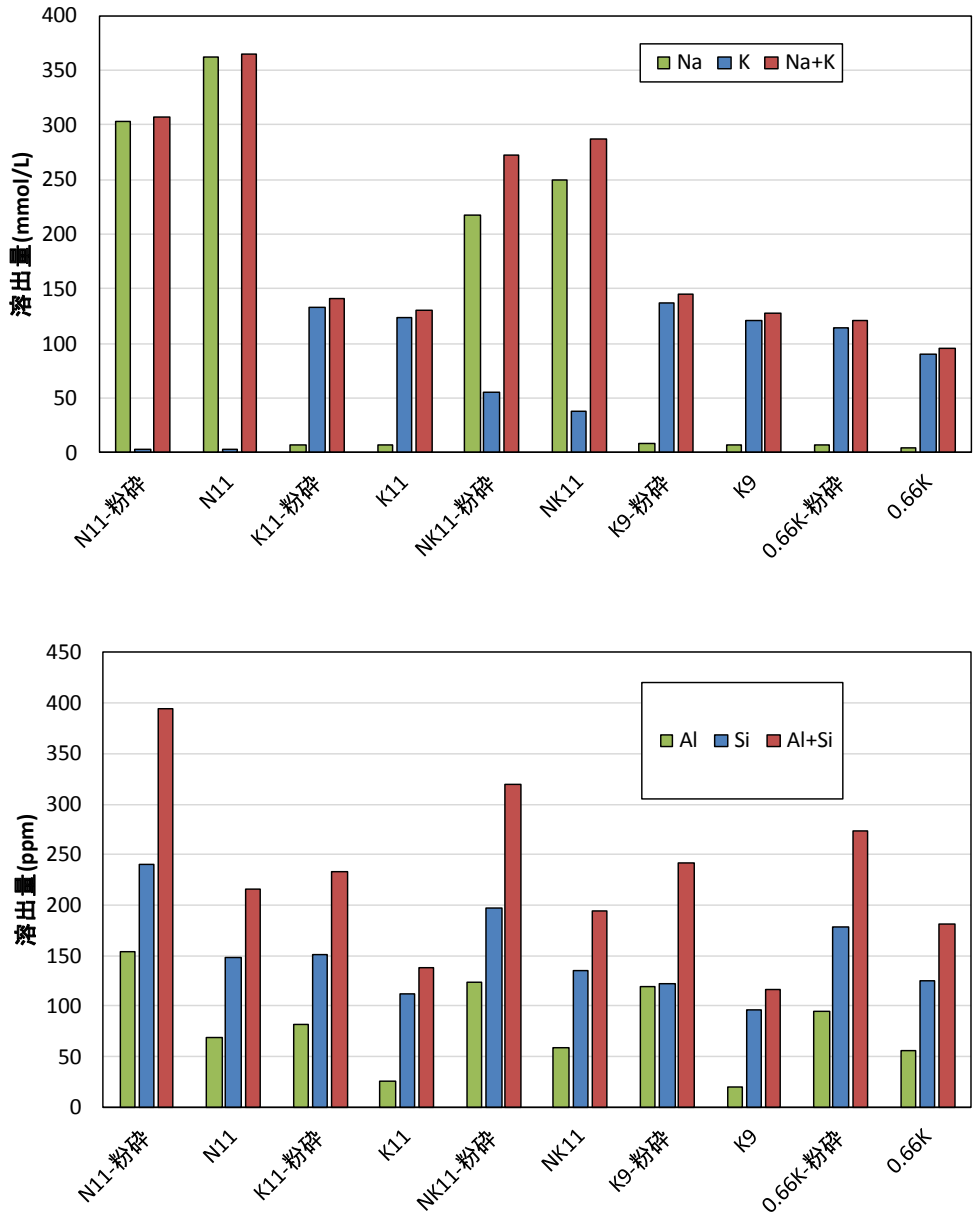


図 18　浸漬期間 18 か月における溶出量（上図：ナトリウムおよびカリウム、下図：アルミニウム及びシリカ）

図 19 に 12 か月間純水浸漬後の質量減少率を示す。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。

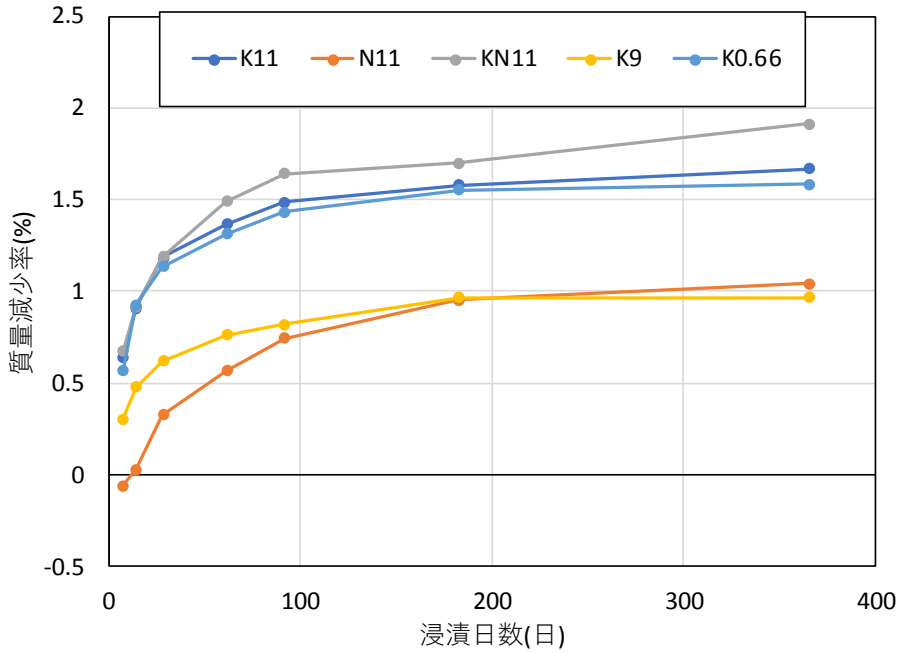


図 19　溶出試験における質量減少率の変化

(10)　透水試験結果

透水試験の結果を図 20 に示す。本研究で作製したジオポリマーはおおよそ 10^{-6} (m/s)程度の水の拡散係数であった。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 1 桁高い値であり、N11 の試料のみがセメントモルタルと同程度であった。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。

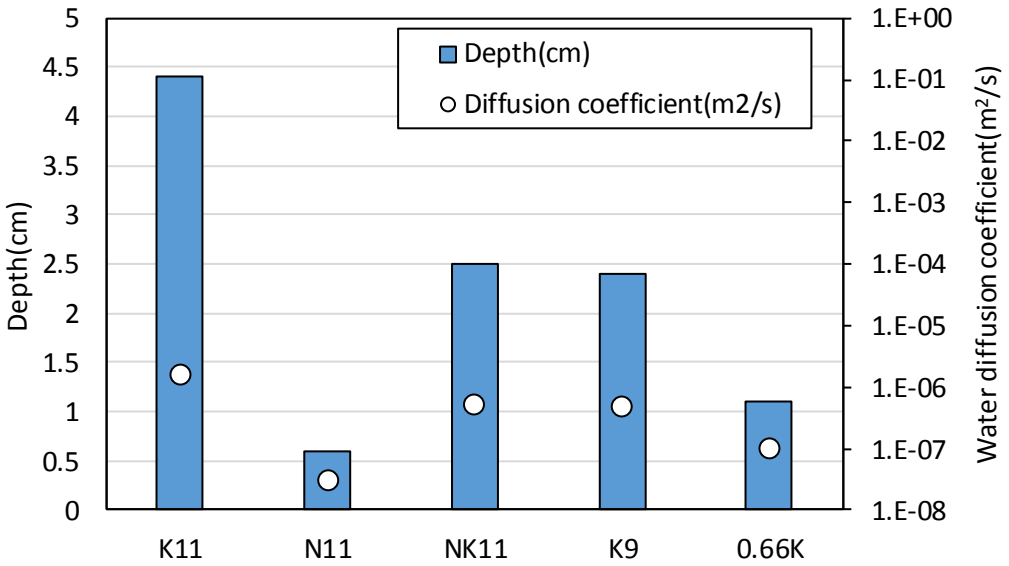


図 20　水の拡散係数測定結果（材齢 28 日）

(11)　水銀圧入法と BET 吸着による空隙構造測定

図 21 に水銀圧入法によって得られた空隙量と BET 法によって求めた比表面積を示す。空隙量は 0.66K の試料が最も少なく、比表面積は 0.66K の試料が最も高い値であった。これは 0.66K の試料の重合が進行しより緻密な構造を形成していることを示している。一方、図 22 に示したように MIP による細孔径分布ではナトリウム系の刺激剤を使用した試験体が比較的粗な構造を形成していることが示された。

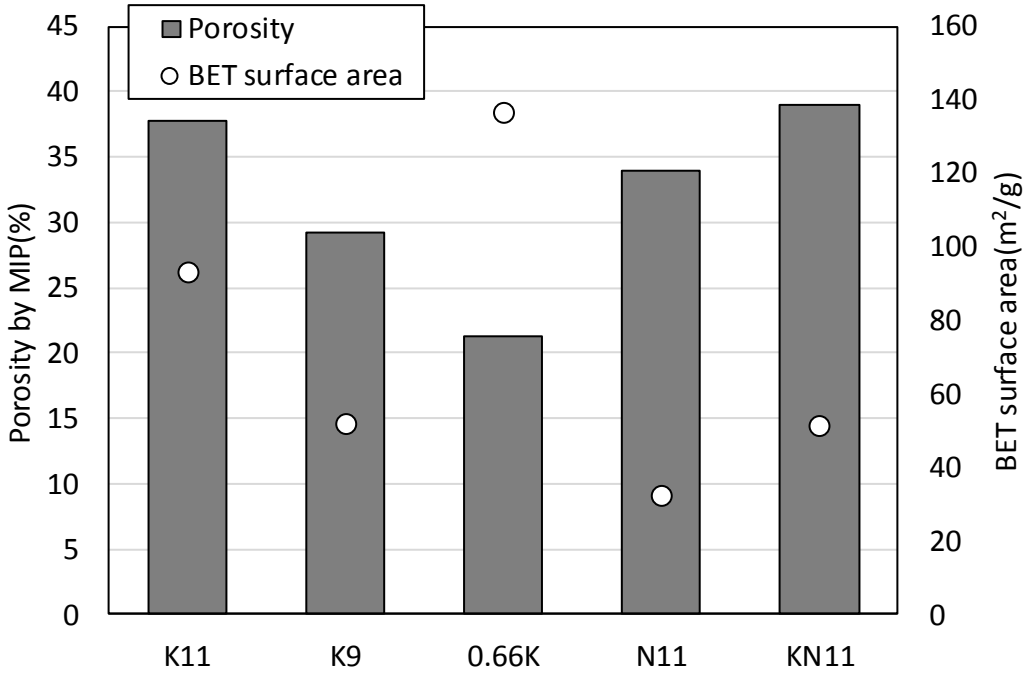


図 21　空隙量と比表面積測定結果（材齢 28 日）

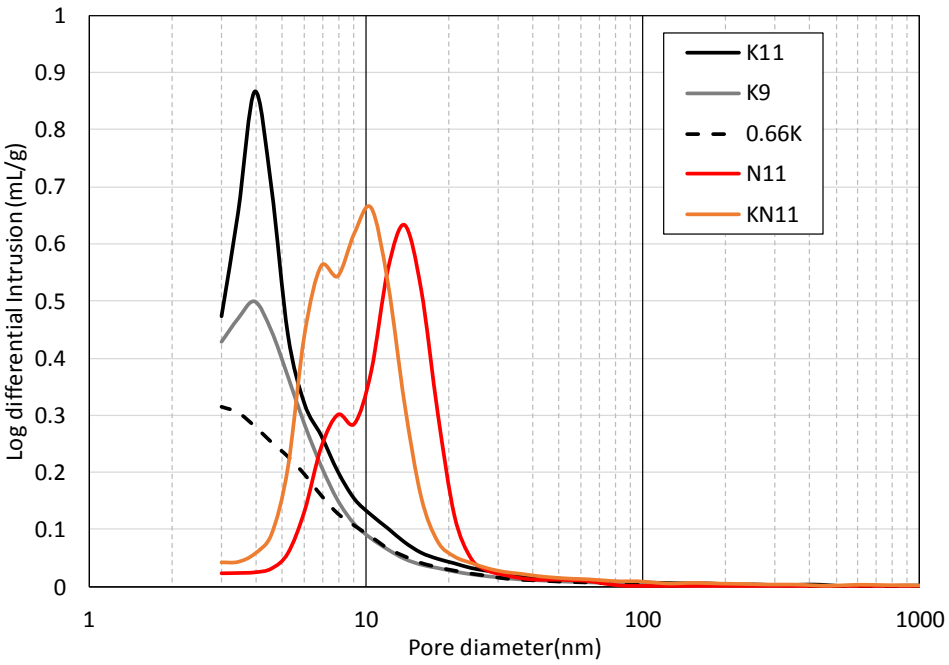


図 22　空隙径分布（材齢 28 日）

4.3 残された課題と今後の計画

本研究では、吸着量を CsCl のみで行ったため、他のイオンや核種の挙動に関しては明らかにしない。そのためジオポリマーにおける異なる核種の吸着量（他のイオンとの相互作用）や拡散係数を検討する必要がある。また、純水中のおける溶出試験しか行っていないため、異なる環境下（海水など）におけるジオポリマーの溶脱特性に関する検討が必要である。一方、ジオポリマーと接する可能性のあるセメント系材料やベントナイトなどとの接触界面における特性変化を検討する必要がある。

5. まとめ

異なる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、アルカリ刺激剤の種類によって圧縮強度などの機械的物性が異なることを明らかにした。このことから適切なアルカリ刺激剤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形成される微細構造に起因することを明らかにした。養生温度の影響はアルカリ刺激剤の種類によって異なり、圧縮強度や収縮特性に影響を与えることが示された。このことから必要性能を満足するためには適切なアルカリ刺激剤の選定がジオポリマー硬化体を使用する上で必要であることが示唆された。

・外部発表リスト

２０２０年度　外部発表

【学術論文】

【口頭発表】

1. Kiyofumi Kurumisawa and Mami Ojima: PHYSICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF METAKAOLIN BASED GEOPOLYMER, Proceedings of the ConMat’20, Advances in Construction Materials, pp.413-422, 2020
2. 胡桃澤清文：メタカオリンジオポリマーの吸着・拡散性能に関する基礎的検討、日本建築学会学術講演会梗概集、pp. 21-22、2020

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
1.1. はじめに 1
1.2. 緩衝材の長期的な変質に関する既往研究 1
1.3. 緩衝材の変質が核種移行パラメータに及ぼす影響に関する既往研究 2
1.4. 電気化学的手法の特徴と、炭酸カルシウム析出に着目する利点 4
1.5. 本研究の目的 4
2. 全体研究計画（3 ヵ年における全体計画） 5
2.1. 【課題 1】二次鉱物が析出した変質緩衝材の調製 5
2.1.1. 数値解析による実験条件の事前検討 5
2.1.2. 二次鉱物の析出促進と制御 5
2.1.3. 析出形態の観察 5
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 5
2.2.1. 変質緩衝材を用いた拡散試験 5
2.2.2. 数値解析による二次鉱物の影響評価 5
2.2.3. 変質緩衝材を用いた透水試験 6
3. ２０１９年度の成果概要 6
4. ２０２０年度の研究実施内容 8
4.1. ２０２０年度の計画 8
4.2. ２０２０年度の成果内容 8
4.2.1. 圧縮ベントナイト中における炭酸カルシウム析出試験 8
4.2.2. 炭酸カルシウム鉱物の同定（XRD） 13
4.2.3. 炭酸カルシウム析出形態の観察（EPMA） 14
4.2.4. 炭酸カルシウム析出挙動の予測解析コードの高度化 15
4.2.5. 析出物が重水およびヨウ化物イオンの実効拡散係数に与える影響評価 18

4.2.6. 析出物が透水係数に与える影響評価 25
5. まとめ 32
参考文献 (abc 順) 34
２０２０年度外部発表リスト 36

図リスト

図 1 炭酸カルシウム析出条件の再検討（2019 年度）.....7

図 2 試料内部濃度から拡散係数低下を評価する手法の解析的検討（2019 年度）.....7

図 3 ベントナイト試料の膨潤.....9

図 4 析出実験装置の概略図と初期条件 (a), (b), (c), (d).....10

図 5 炭酸カルシウム析出試験結果

（初期条件(a), Ca 当量分率 75%(2cm), 2mA, 4 日通電後）.....11

図 6 炭酸カルシウム析出試験結果

（初期条件(b), Ca 当量分率 75%(4cm), 2mA, 8 日通電後）.....12

図 7 炭酸カルシウム析出試験結果

（初期条件(c), Ca 当量分率 50%(6cm), 2mA, 12 日通電後）.....12

図 8 炭酸カルシウム析出試験結果

（初期条件(c), Ca 当量分率 75%(6cm), 2mA, 12 日通電後）.....12

図 9 XRD による炭酸カルシウム鉱物の同定（図８の炭酸カルシウム析出部）.....13

図 10 EPMA による炭酸カルシウム析出形態の観察（図６の炭酸カルシウム析出部）.....14

図 11 数値解析による炭酸カルシウム析出挙動の再現と、実験結果との比較.....17

図 12 透過拡散試験装置の概略図.....18

図 13 透過拡散試験における低濃度側の重水およびヨウ化物イオン濃度の経時変化.....20

図 14 透過拡散試験後のベントナイト試料中における重水およびヨウ化物イオン濃度分布、当量濃度分布、体積分率分布.....21

図 15 透水試験装置の概略図.....25

図 16 累積透水量の経時変化と区間透水係数（析出無し）.....26

図 17 透水試験後の試料内部の当量濃度および体積分率分布（析出無し）.....26

図 18 累積透水量の経時変化と区間透水係数（析出あり）.....27

図 19 透水試験後の試料内部の当量濃度および体積分率分布

（析出少および析出多（擾乱あり））.....28
図 20 累積透水量の経時変化と区間透水係数（析出多（水みちあり））.....29
図 21 透水試験後の試料内部の当量濃度および体積分率分布（析出多（水みちあり））..30
図 22 透水試験後の試料断面写真（析出多（水みちあり））.....30

表リスト

表 1　全体計画 6

表 2　2020 年度の月次計画 8

表 3　透過拡散試験　条件一覧 19

表 4　透過拡散試験から求めた全体の実効拡散係数と保持因子（25℃） 23

表 5　濃度勾配および Archie 則から求めた局所の実効拡散係数（25℃） 24

表 6　析出部における Archie 則パラメータ m 24

表 7　透水試験条件一覧（室温で実施） 25

表 8　透水試験から評価した平均透水係数まとめ 31

1. 背景・目的

1.1. はじめに

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, NUMO 2021)および TRU 廃棄物の地層処分（JNC-FEPC 2005, NUMO 2021）に加え、原子炉解体廃棄物の中深度処分（日本原子力学会標準 2009）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、核種移行の抑制につながる特性として低透水性、核種収着性および物理的・化学的な緩衝性が期待されている。これらに加えて、ベントナイト緩衝材の主要鉱物モンモリロナイトが負に帯電していることから、静電的な排除効果により陰イオン核種に対する潜在的な低拡散性も示唆されている（例えば Vanloon et al., 2007）。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核種移行パラメータとなる。

処分場閉鎖後、地下水成分や併設される他の人工バリア（炭素鋼製オーバーパック、セメント系材料等）との長期的な相互作用により、緩衝材中のモンモリロナイトの変質・溶解や、二次鉱物の析出が生じ、緩衝材の核種移行パラメータが変化する可能性がある。したがって、①緩衝材が時間とともにどの程度変質するのか、に加え②緩衝材の変質がどの程度核種移行パラメータに影響を及ぼすのか、を定量的に評価することが重要となる。前者①については主に反応輸送モデル（Reactive transport model）による解析的検討（例えば、Samper et al., 2020）やナチュラルアナログによる検討（例えば、藤井ほか、2014）が行われ、鉱物組成や空隙率の時間変化が評価されている。後者②については、セメントとベントナイトを接触させた系での透水試験（例えば、柴田ほか、2011）や、相互拡散法により人為的に鉱物を沈殿させた拡散試験（例えば、Chagneau, et al., 2015）が行われている。一方で、実環境に近い状態で前者①と後者②を関連付けることは容易ではない。この理由として、緩衝材の物質移行が緩慢であり、核種移行パラメータに及ぼす影響を評価できるほどの変質を生じさせることが困難であることが挙げられる。また、上述の室内試験では、鉱物の溶解、析出、イオン交換等の複合的な変質が生じるため、透水係数および拡散係数に影響を及ぼす支配的な変質過程を抽出し、評価する手法を別途検討することは有益と考えられる。以下の節では、本研究の背景として、これらの既往研究の現状について概説し、最後に本研究の特徴と目的について述べる。

1.2. 緩衝材の長期的な変質に関する既往研究

緩衝材の長期的な変質評価について、原子力機構で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）。その一方で、緩衝材の変質現象を実験的に確認することは容易ではない。この理由として、処分環境（低動水勾配かつ高い固相密度）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（例えば Tinseau et al., 2006）。透水試験や拡散試験をベースとした緩衝材の変質では、実験条件（動水勾配、濃度、温度など）を明確に設定できる反面、試験期間が数年から十年程度に制限される。一方、ナチュラルアナログでは数万年に及ぶ長期的な知見を直接的に取得可能である反面、原位置環境の時間的変遷（圧力、濃度、温度などの経時変化）に関する情報が乏しいことが課題となる。

数万年に及ぶ長期的な変質を評価するための解析的なアプローチとして、反応輸送モデルの開発が進められている。このとき、物質輸送は濃度勾配と水位勾配を駆動力とした移流分散型の式や、イオンの電荷の影響も考慮した Nernst-Planck の式（例えば、Tournassat, et al., 2020）で記述され、鉱物の溶解と析出反応は、空隙水中での各鉱物の過飽和度、不飽和度に基づいた速度論的または平衡論的な式により記述される（例えば、Samper et al., 2020）。反応輸送モデルに必要なパラメータ（鉱物の溶解、沈殿速度、イオン交換の選択係数など）については、実験的な制約から、一般にバッチ試験と呼ばれる固相に比べて液相が非常に多い状態で取得される。一方、圧縮されたベントナイト緩衝材の空隙率は数パーセントから数十パーセント程度であり、液相の割合が非常に少ない。これに加え、緩衝材の主要鉱物であるモンモリロナイトは永久負電荷を持ち、空隙水は静電的な影響を受けた状態にある。すなわち、圧縮ベントナイト中の空隙水は、自由水とは異なると考えられ、そこでの化学反応がバッチ試験で対象としているバルク溶液中での反応と同等であるかどうかは議論の余地があり、PHREEQC（Parkhurs and Appelo 1999）に代表される地球化学計算コードの圧縮状態における適用性についても検討する必要がある。さらに、我が国の地層処分や中深度処分では処分サイトが未定であり、地下水組成等、反応輸送解析を行うための詳細な基礎データに乏しいことも課題となる。

以上のことから、サイト選定の進展とともに得られる詳細な原位置データを用いて反応輸送解析を実施したとしても、解析結果を実験的に検証する手法が限られているために、反応輸送解析による緩衝材の長期的な変質評価には大きな不確実性を伴うのが現状と考えられる。

1.3. 緩衝材の変質が核種移行パラメータに及ぼす影響に関する既往研究

緩衝材の変質に伴う二次鉱物析出のうち、セメント系材料と緩衝材との相互作用では、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、セメントと緩衝材の界面にカルサイトが析出する可能性がある（Savage and Cloet 2018, JNC-FEPC 2005）。このとき、二次鉱物析出による空隙閉塞（クロッギング）により、拡散係数や透水係数が低下（性能向上）する可能性も考えられる。一方で、二次鉱

物析出により鉱物同士が結合（セメンテーション）して膨潤性が失われ、さらに力学的な擾乱が加わると卓越した水みちが形成され、透水係数が上昇（性能低下）する可能性も考えられる。

我が国の放射性廃棄物の安全評価では、緩衝材の変質による性能変化の情報が限定的なため、長期的な性能向上の可能性は考慮されず、保守的に性能低下のみが着目されてきた。すなわち、二次鉱物析出による緩衝材の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安全評価では考慮されていない。例えば、最新の地層処分の安全評価（NUMO 2021）ではこれを保守的に無視しており、中深度処分の安全評価（日本原子力学会標準 2009）では緩衝材のパラメータの時間変動として透水係数の増加のみが考慮されている。したがって、二次鉱物析出が緩衝材の拡散係数や透水係数に及ぼす影響について実験的な知見を得ることは、核種移行パラメータの長期的な変動を考慮する際の新たな判断材料となるのみならず、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。

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、相互拡散法（Counter diffusion 法）にて粘土質岩中に鉱物を析出させ、析出物が拡散挙動に及ぼす影響が研究されている。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)は相互拡散法により石灰岩中に $BaSO_4$(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おり、空隙率のみならず空隙構造が拡散係数に影響を及ぼしていると考察している。

透水試験や拡散試験をベースとした手法では、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と考えられる。時間的制約に加え、高アルカリ溶液を用いた透水試験では、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。また、相互拡散法による二次鉱物析出では、析出物の位置や量の制御が困難であることに加え、残留イオン（とくに Ca^{2+}などの未反応の交換性陽イオン）を排除できない問題がある。したがって、個々の

変質現象に着目して要素を明らかにすることは、複雑な現象解明に有効と考えられる。また、残留イオンを排除し二次鉱物析出のみを短時間で促進・制御する手法を開発できれば、二次鉱物が核種移行パラメータに及ぼす影響を詳細に評価可能になると考えられる。

緩衝材の変質が物質移行に及ぼす影響評価に関連して、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、複合的なベントナイトの変質現象が物質移行に与える影響を紐解くためには、二次鉱物析出による影響のみを抽出して詳細に評価することが有効な手段となる可能性がある。

1.4. 電気化学的手法の特徴と、炭酸カルシウム析出に着目する利点

ベントナイト中の交換性陽イオン（Na^+, Ca^{2+}）は電位勾配下で容易に移動し、その移動速度と電流値および乾燥密度との関係が実験的に明らかとなっている（Tanaka et al., 2011, Tanaka 2018）。既往研究により、Ca^{2+}の流束（移動速度×濃度）と CO_3^{2-}の流束のバランスを取ることで、局所的かつ短時間で炭酸カルシウムを析出できる見通しが得られている。また、電気化学的手法の利点として、初期にベントナイト中の交換性陽イオンとして導入した Ca^{2+} イオンを全て炭酸カルシウムに変換可能な点が挙げられる。すなわち、Na 型ベントナイト中に炭酸カルシウムのみを析出させた緩衝材を調製可能となり、これを拡散試験および透水試験に用いることで、炭酸カルシウムが無い場合との対照実験が可能になる。

炭酸カルシウムは天然バリア中に広く認められる代表的な二次鉱物であるとともに、セメントベントナイト相互作用においても長期的に析出することが予測され、とくに二酸化炭素（炭酸イオン）を多く含む堆積岩系の地層で重要とされている（Savage and Cloet 2018）。そのため、炭酸カルシウムによる空隙率の低下（空隙閉塞、クロッギング）や鉱物粒子の結合（セメンテーション）の影響を明らかにすることは、析出影響の類似性から他の二次鉱物影響を予測する際の基礎情報として活用できる可能性がある。とくに反応輸送解析の主要な出力に空隙率の変化があり、空隙率から拡散係数を推定する式として Archie の法則が知られている（Vanloon and Mibus 2015）。炭酸カルシウム析出による空隙率変化と拡散係数との関係について詳細な実験データを取得し、Archie 則の適用性を実験的に検証することは安全評価の信頼性向上に資すると考えられる。また、炭酸カルシウム析出による空隙閉塞やセメンテーションが透水係数に及ぼす影響について実験的な知見を得ることは、安全評価における透水係数の長期パラメータ設定に資すると考えられる。

1.5. 本研究の目的

本研究では、炭酸カルシウム析出量が異なるベントナイト緩衝材を調製する手法を開発する。さらに、炭酸カルシウム析出量が異なる緩衝材を用いた透過拡散試験を行い、実効拡散係数と空隙率との関係性を定量的に評価することを目指す。また同様の試料を用いた透水試験から、炭酸カルシウム析出が透水係数に及ぼす影響について考察を行う。

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 et al. 2011, Tanaka 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、各イオンの移流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 $CaSO_4$（硫酸カルシウム）または $CaCO_3$（炭酸カルシウム）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、$CaSO_4$ および $CaCO_3$ 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分布を取得する。さらに、拡散試験終了後の含水率（空隙率）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

ナイト中に二次鉱物が析出し、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

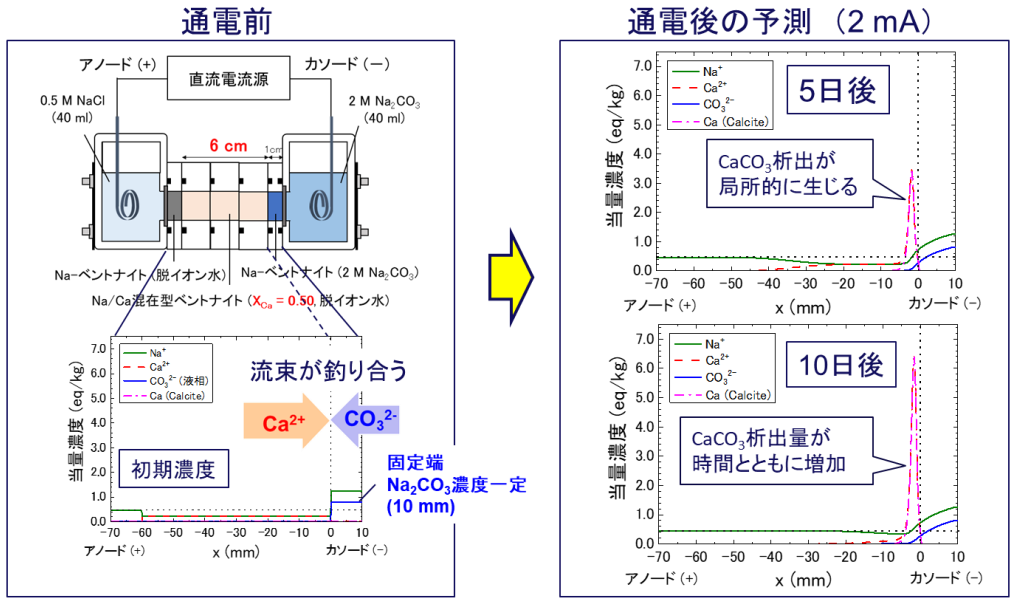
二次鉱物の析出形態が異なる変質緩衝材試料を用いた透水試験を、加圧注入法（定水位法）にて行う。具体的には、析出実験後のベントナイト試料を成型し、再膨潤後、窒素ガスで加圧した試験溶液を通水させる。試験溶液としては脱イオン水または NaCl 溶液を用いる。また二次鉱物が析出していない試料を用いた対照実験を行う。透水試験後、試料をスライスし、含水率および Na、Ca 濃度分布等を取得し、試験終了後における析出物の量および範囲を確認する。

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						

3. ２０１９年度の成果概要

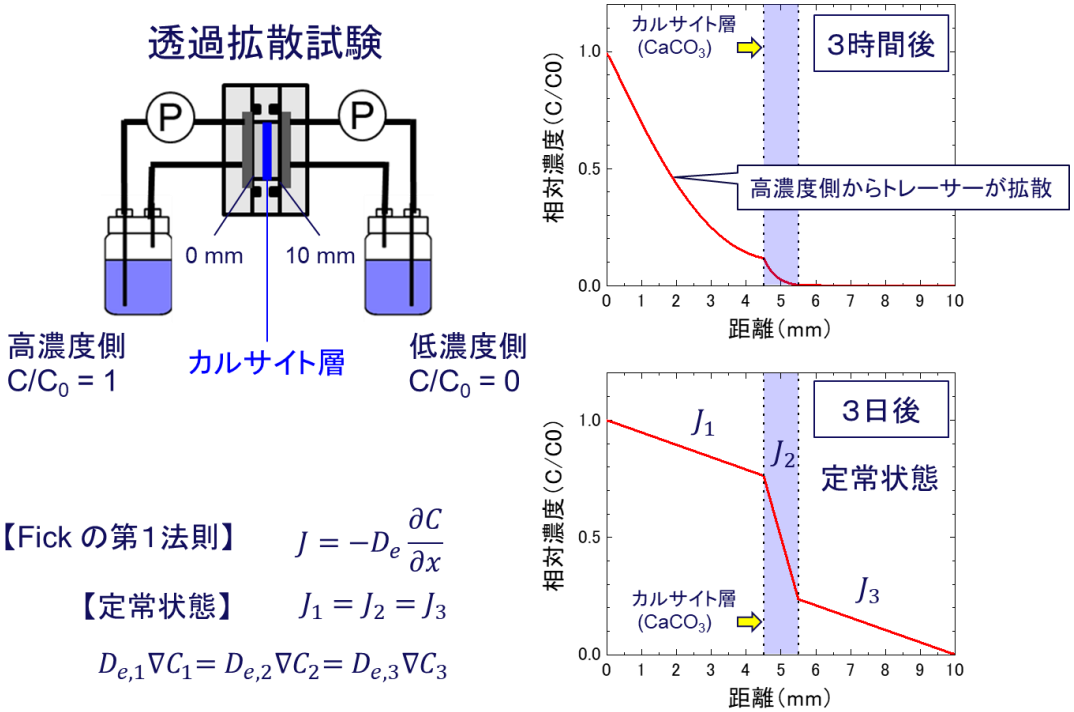
2019 年度は 2018 年度に見出した実験条件下にて析出形態が異なる硫酸カルシウム（石膏）および炭酸カルシウムが析出した変質緩衝材を調製し、透過拡散試験から実効拡散係数を評価した。これにより、変質緩衝材の調製から透過拡散試験までの一連の実験手法を確立した。一方で、硫酸カルシウムについては試験中に溶解が認められた。また、炭酸カルシウムは試験後まで十分に残存するものの、析出量が少なく、析出物が拡散係数に及ぼす影響を評価できなかった。したがって、対象とする鉱物を炭酸カルシウムに絞るとともに、解析的検討から Ca^{2+}および CO_3^{2-}の初期濃度を見直し、多量に炭酸カルシウムが析出する実験条件を見出した（図１）。また拡散解析により、試料内部の濃度勾配から炭酸カルシウム析出による局所的な拡散係数の低下を評価する手法を検討し、試料内部のトレーサー濃度分布から局所的な拡散係数を評価できる見通しが得られた（図２）。



Na_2CO_3で飽和したベントナイト試料を右端に配置 → Ca^{2+} とCO_3^{2-} の流束が釣り合う

$CaCO_3$が局所的に析出 → 析出量を制御可能に

図１　炭酸カルシウム析出条件の再検討（2019 年度）



【Fick の第１法則】　$J = -D_e \dfrac{\partial C}{\partial x}$

【定常状態】　$J_1 = J_2 = J_3$

$D_{e,1}\nabla C_1 = D_{e,2}\nabla C_2 = D_{e,3}\nabla C_3$

図２　試料内部濃度から拡散係数低下を評価する手法の解析的検討（2019 年度）

4. ２０２０年度の研究実施内容

4.1. ２０２０年度の計画

2020 年度は 2019 年度に見出した初期濃度条件で炭酸カルシウムが多量に析出することを実証する。さらに透過拡散試験および透水試験から、緩衝材中の炭酸カルシウムが実効拡散係数および透水係数に及ぼす影響を実験的に評価する。実施計画書に記載の項目と、月次計画を表 2 に示す。なお、解析的検討は不定期に実施するため、月次計画には記載しない。また実際の透過拡散試験では、水のトレーサーとして HDO、陰イオンのトレーサーとしてヨウ化物イオン（I^-）を採用した。

表 2　2020 年度の月次計画

項　目	2020/4	5	6	7	8	9	10	11	12	2021/1	2	3
(1)二次鉱物の析出促進と制御	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	
(2)実効拡散係数の取得	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	
(3)透水係数の取得						→	→	→	→	→	→	
2020 年度報告書（総括）作成										→	→	

(1) 二次鉱物の析出促進と制御

電場により二次鉱物の析出形態（析出量、位置など）が異なる変質緩衝材を調製し、拡散試験および透水試験に供する。

(2) 実効拡散係数の取得

水（HDO または $H_2{}^{18}O$）および陰イオン（Cl^-または I^-）等をトレーサーとした透過拡散試験を行い、実効拡散係数を評価する。また、緩衝材中の二次鉱物が実効拡散係数に与える影響について検討する。

(3) 透水係数の取得

定水位法による透水試験を行い、緩衝材中の二次鉱物が透水係数に与える影響について検討する。

4.2. ２０２０年度の成果内容

4.2.1. 圧縮ベントナイト中における炭酸カルシウム析出試験

試料には、クニピア F（モンモリロナイト 99%）を Na 型および Ca 型に置換した精製モンモリロナイトと珪砂（株式会社トウチュウ、アルバニー９０、平均粒径 150μm、SiO_2 の純度が 99%）を混合したもの（以後、ベントナイトと呼称する）を用いた。Na/Ca 混在型ベントナイト中の Ca イオン当量分率（交換性陽イオンに占める Ca イオン当量の割合）は 0.5 または 0.75 に設定し、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

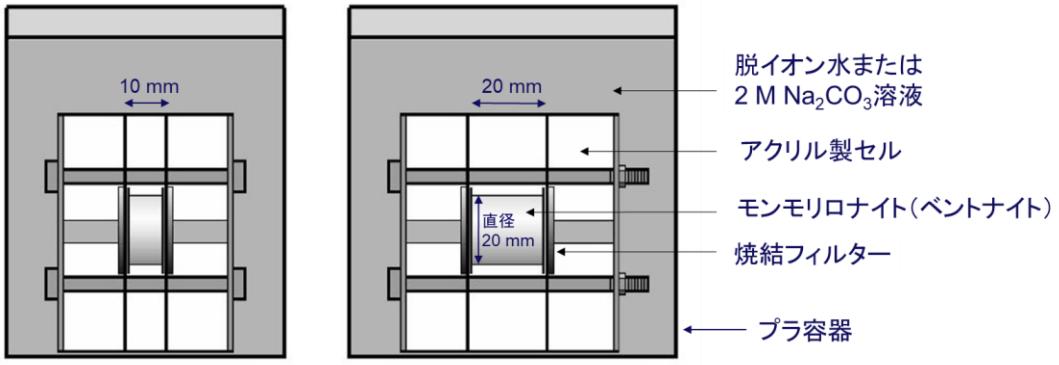


図３　ベントナイト試料の膨潤

に圧縮成型した。試料の形状は直径 20 mm で、長さ 10 mm または 20 mm の円柱状とした。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）。

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

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。これらの試料を脱イオン水にて図３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 =約 11.5）に浸し、7 日間以上飽和させた。これらのベントナイト試料を組み合わせて炭酸カルシウム析出実験を行った。

図４に 2019 年度に開発した炭酸カルシウム析出実験装置を示す。ベントナイト試料は、アノード側から Na 型ベントナイト（脱イオン水で飽和）、Na/Ca 混在型ベントナイト（脱イオン水で飽和）、2.0 M Na_2CO_3 溶液で飽和させた Na 型ベントナイト、の３種類で構成される。またアノード部は 0.5 M NaCl 溶液（40 ml）、カソード部は 2 M $NaCO_3$ 溶液（40 ml）で満たしている。

Ag/AgCl 電極は Ag（ニラコ、銀板）をアノード（＋）とし、白金をカソード（－）として 1 M HCl 中で電解して作製した。図４の装置において Ag/AgCl 電極に通電し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 $AgCl + e^- \rightarrow Ag + Cl^-$の還元反応が生じる。このとき、電気的中性を保つために、アノード溶液中の Na^+ はベントナイト中へ移行し、カソード溶液中にはベントナイトから Na^+ が供給される。すなわちトータルの濃度変化としては、アノード部では NaCl 濃度の減少が起こり、カソード部では NaCl 濃度の上昇が生じる。さらに、電気浸透流によりアノード側からカソード側への水の流れも生じる。電解や電気浸透流によるア

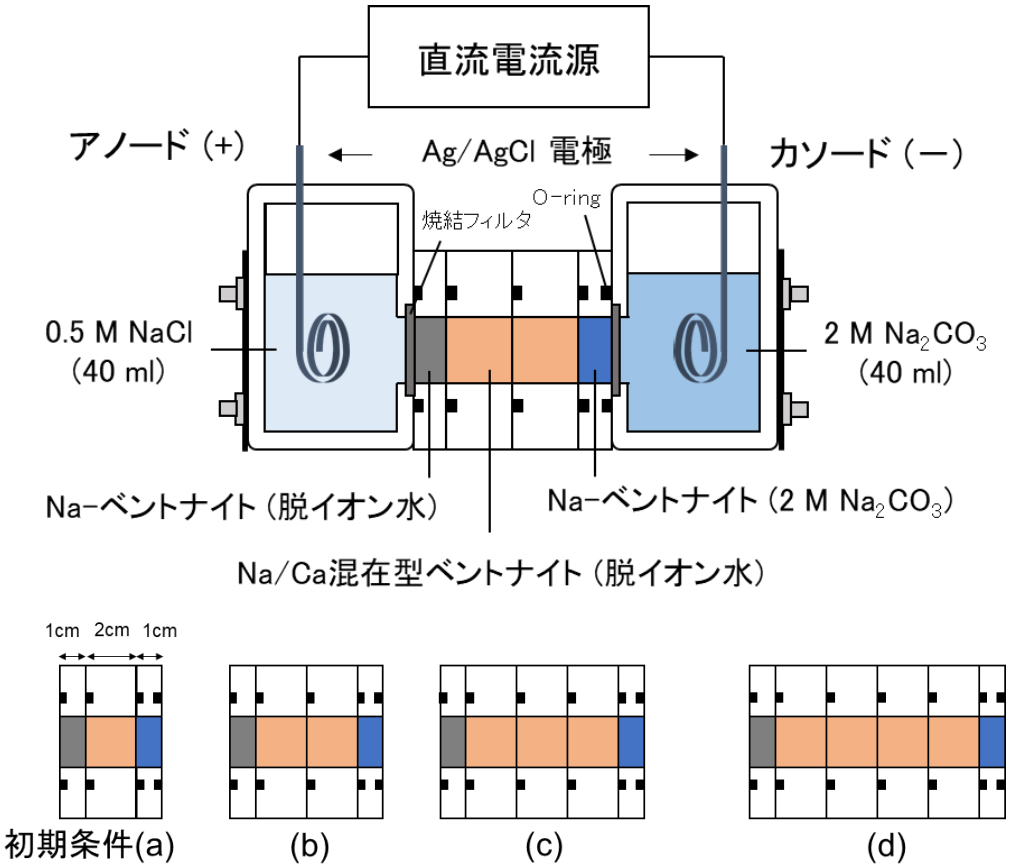


図４　析出実験装置の概略図と初期条件 (a), (b), (c), (d)

ノード部およびカソード部の濃度変化を抑えるため、通電中は定期的（４日毎）に溶液を新しいものに交換した。

電流値は 2 mA で固定とし、通電時間は、Na/Ca 混在型ベントナイトの長さに応じて４日、８日、１２日および１６日とした（4 日/2 cm）。通電後、試料を 1.0 mm 厚にスライスし、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、ベントナイト試料中の全ての交換性陽イオン（Na および Ca）と炭酸カルシウムに含まれる Ca を同時に抽出し、ICP-AES にて Na および Ca 濃度を測定した。別途、析出した炭酸カルシウムの鉱物分析には粉末 X 線回折法（XRD）を適用し、析出形態の観察には電子プローブマイクロアナライザ（EPMA）を用いて実施した。

図５～図８に初期条件(a), (b), (c)における炭酸カルシウム析出実験結果を示す（図７のみ初期 Ca 当量分率 0.50、その他は初期 Ca 当量分率 0.75）。図左が単位ベントナイト当たり（乾燥後、炭酸カルシウムを除く）の Na および Ca 当量濃度（eq/kg）であり、図右が通電後のベントナイト、炭酸カルシウムおよび水の体積分率である。このとき、珪砂の密度 = 2.63 g/cm^3, モンモリロナイト密度 = 2.88 g/cm^3、$CaCO_3$ の密度 = 2.71 g/cm^3（カルサイトの

値）をそれぞれ採用した。図中の横軸は位置であり、0 mm は通電前における Na/Ca 混在型ベントナイトと Na 型ベントナイト（2 M Na_2CO_3 溶液で飽和）との接触面である。

図 5 に示す初期条件(a)では、炭酸カルシウムのピークは認められなかった。また、図 7 に示す昨年度の解析的検討で見出した初期条件（Na/Ca 混在型ベントナイトの Ca 当量分率 0.50, 長さ 6 cm）では、解析では 0 mm 付近において Ca の鋭いピークが予想された（図 1 ）のに対し、実験では Ca ピークが認められなかった。このことは、Ca^{2+}のカソード側への移行量と、CO_3^{2-} のアノード側への移行量が釣り合っていないことを示唆している。そこで、Ca 当量分率を 0.75 に引き上げて実験を行った（図 6 、図 8 ）。図 6 の条件（初期 Ca 当量分率 0.75、長さ 4 cm）と図 8 の条件（初期 Ca 当量分率 0.75、長さ 6 cm）では、いずれも Ca ピークが双峰となり、主に 2 か所で炭酸カルシウムが析出していることを示している。また、Na/Ca 混在型ベントナイトが長くなるにつれて双峰ピークの右側が成長し、この部分で炭酸カルシウムが顕著に蓄積していることが分かる。Na 濃度に着目すると、-5 mm から 6mm 付近までは陽イオン交換容量（0.45 eq/kg）の値で一定となり、その後、Ca 双峰ピークの右側から 10 mm 付近にかけて単調に増加した。これは、初期に交換性陽イオンとして存在した Ca^{2+}が全て炭酸カルシウムに置換したとともに、カソード側（10 mm において Na_2CO_3 濃度が 2 M で固定 ）から主に拡散で侵入した Na_2CO_3 が 6-7 mm 付近の $CaCO_3$ 析出部で消費された結果、Na_2CO_3 濃度が直線的な分布となっていることを示している。また体積分率（図右）に着目すると、炭酸カルシウムの析出に対応して、空隙率の低下が認められた。

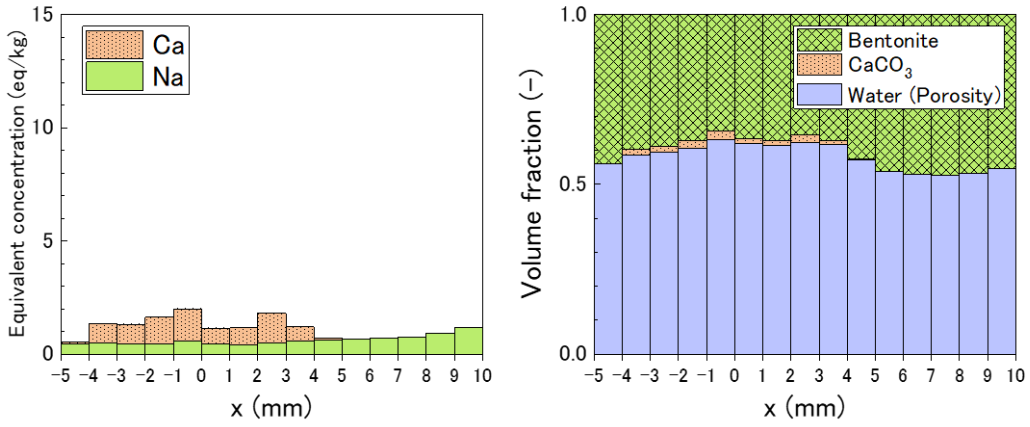


図 5　炭酸カルシウム析出試験結果
（初期条件(a), Ca 当量分率 75%(2cm), 2mA, 4 日通電後）

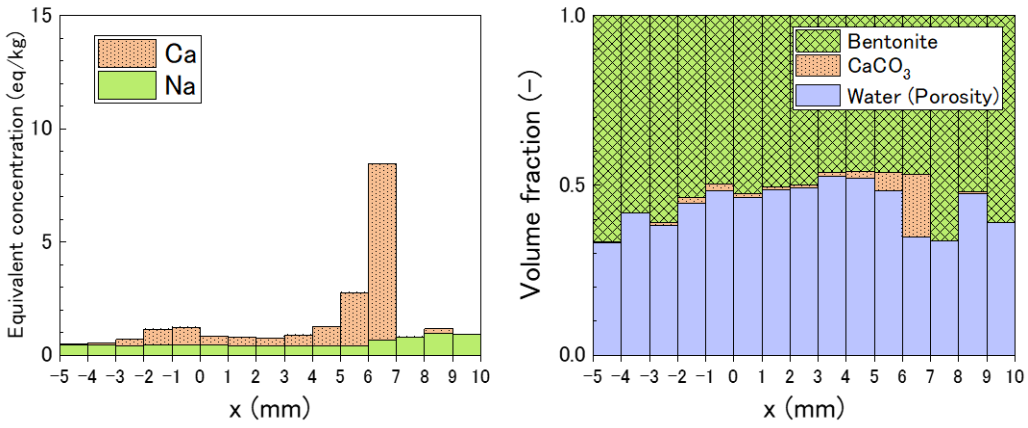


図 6　炭酸カルシウム析出試験結果

（初期条件(b), Ca 当量分率 75%(4cm), 2mA, 8 日通電後）

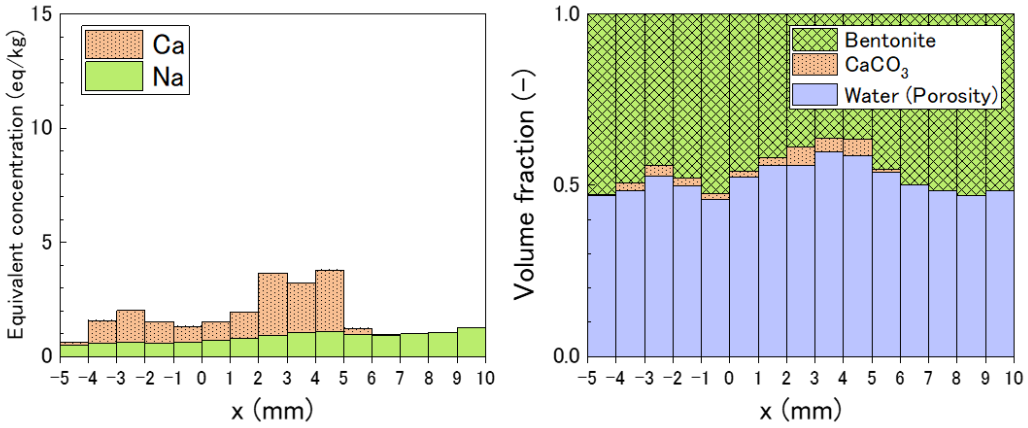


図 7　炭酸カルシウム析出試験結果

（初期条件(c), Ca 当量分率 50%(6cm), 2mA, 12 日通電後）

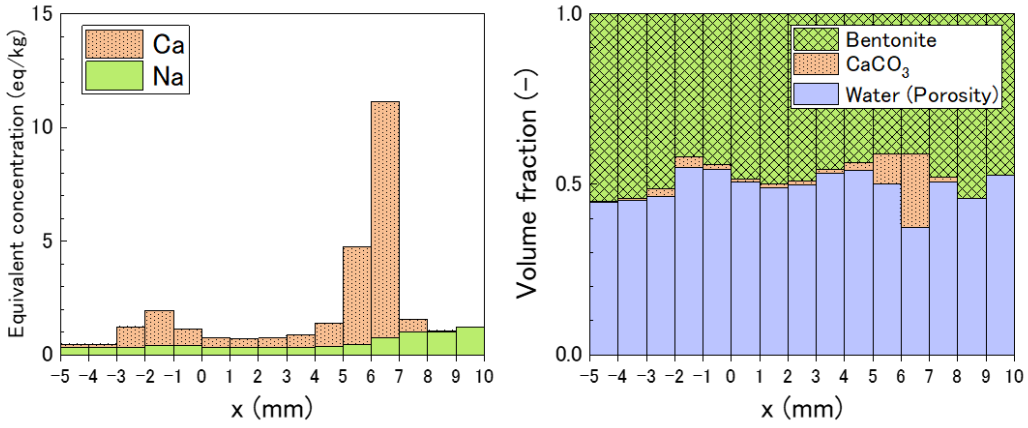


図 8　炭酸カルシウム析出試験結果

（初期条件(c), Ca 当量分率 75%(6cm), 2mA, 12 日通電後）

4.2.2. 炭酸カルシウム鉱物の同定（XRD）

図８の条件で析出させた炭酸カルシウムを含むベントナイト試料（6-7 mm 付近）を一部採取し、XRD により鉱物の同定を行った。析出試験後、ベントナイト試料を室温で真空乾燥させたのち、乳鉢で粉砕後、ふるいにかけて 75 μm 以下の微粒子とした。これを粉末 XRD 法（測定条件：管電圧 50 kV，管電流 300 mA、CuKα、ステップ幅 0.02 度）により炭酸カルシウム鉱物の同定を行った。得られた XRD プロファイルを図９に示す。結晶性鉱物としてモンモリロナイト（M）、石英（Q）、カルサイト（C）、バテライト（V）のピークが認められ、緩衝材中に析出した炭酸カルシウムには結晶性鉱物のカルサイトおよびバテライトが含まれることが分かった。常温常圧で熱力学的に最も安定な炭酸カルシウム鉱物はカルサイトであるので、析出した炭酸カルシウムは非平衡状態かつ完全な結晶ではなく、様々な鉱物種やアモルファスを含む凝集体を形成している可能性がある。

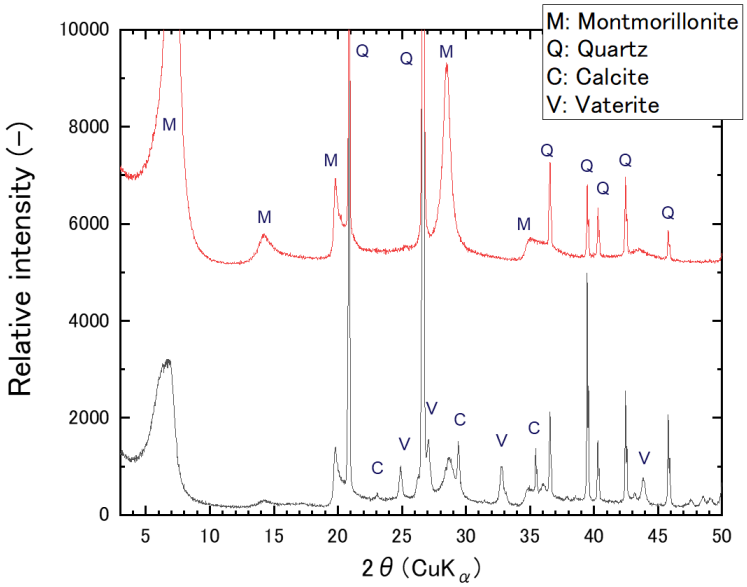


図９　XRD による炭酸カルシウム鉱物の同定（図８の炭酸カルシウム析出部）

4.2.3. 炭酸カルシウム析出形態の観察（EPMA）

図 6 の条件下で析出させた炭酸カルシウムを含むベントナイト試料（6-7 mm 付近）を一部採取し、EPMA（電子プローブマイクロアナライザ）による析出形態観察を行った。試料採取後、真空乾燥を行い、これを樹脂固化した後、表面を SiC 研磨紙で乾式研磨（3000 番まで）を行った。その後、EPMA を用いて表面の SEM 像（反射電子像）と、Ca, Al, Si の元素マッピングを行った。

EPMA 観察結果を図１０に示す。青は Si（主に珪砂）、赤が Al（主にモンモリロナイト）、緑が Ca（炭酸カルシウム）を示しており、黒は乾燥収縮に伴う樹脂充填部（隙間）を表している。炭酸カルシウムが珪砂の間を埋めるように析出していることが分かる。また、炭酸カルシウム中にモンモリロナイトが部分的に認められることから、析出物は炭酸カルシウムとモンモリロナイトの複合体を形成していることを示唆している。また、炭酸カルシウム層からアノード側は Ca 粒子がまばらに認められる一方で、カソード側には Ca がほとんど認められないことが分かり、この結果は図 6 の Ca 濃度分布とも概ね整合している。

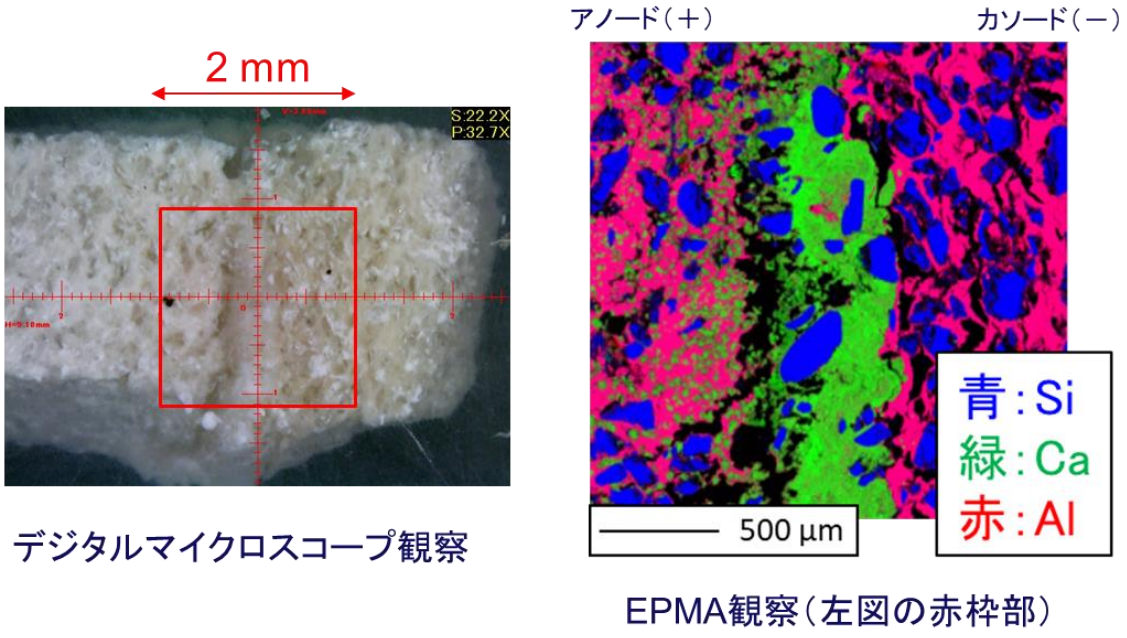


図１０　EPMA による炭酸カルシウム析出形態の観察（図 6 の炭酸カルシウム析出部）

4.2.4. 炭酸カルシウム析出挙動の予測解析コードの高度化

炭酸カルシウムの析出実験を効率的に実施するため、2019 年度までに開発した数値解析プログラムを改良し、予測精度の向上を図った。プログラムは Fortran で記述した。電位勾配下での Ca^{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、(2)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、(3)式を得た。

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

$$\frac{C_j^{k+1} - C_j^k}{\Delta t} = D_{h,i} \cdot \frac{C_{j+1}^k - 2C_j^k + C_{j-1}^k}{\Delta x^2} - V_{a,i} \cdot \frac{C_j^k - C_{j-1}^k}{\Delta x} \tag{3}$$

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+}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（$CaCO_3^0$）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、解析では析出した炭酸カルシウムを除いた全ての化学形態の（すなわち可動性である全Caおよび全CO_3の）移行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およびCO_3はそれぞれ一定の移動速度および分散係数で移動し、炭酸カルシウム析出に伴う空隙率変化によるパラメータ変動は解析では考慮しない。また電気的中性条件は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）を基準とし、移動速度が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）ことを利用して設定した。また、分散係数は電流値にほとんど依存しないため、5mA条件と同様として設定した。なお、今年度の解析では、CO_3は拡散（分散）のみで移行すると仮定した。すなわちCO_3の移動速度はゼロとして計算を行った。

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（Gaines-Thomas convention）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。

初めに、粒子間空隙中の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。

$$[\mathrm{CO_3^{2-}}] = \frac{C\rho}{z\varepsilon_{acc}} \quad (4)$$

ここで、[CO_3^{2-}]はCO_3^{2-}イオンの粒子間空隙中におけるモル濃度（mol/ dm^3）、C 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として設定した。

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、freeNa^+イオンのモル濃度はCO_3^{2-}のモル濃度を用いて以下の式となる（電気的中性条件）。

$$[\mathrm{Na^+}] = 2[\mathrm{CO_3^{2-}}] \quad (5)$$

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。

$$2\mathrm{NaX} + \mathrm{Ca^{2+}} \Leftrightarrow 2\mathrm{Na^+} + \mathrm{CaX_2} \quad (6)$$

$$K_{\mathrm{GT}} = \frac{X_{\mathrm{Ca}} \cdot a_{\mathrm{Na}^+}^2}{(1-X_{\mathrm{Ca}})^2 \cdot a_{\mathrm{Ca}^{2+}}} \quad (7)$$

$$X_{Ca} = C_{Ca}/CEC \quad (8)$$

ここでX_{Ca}はCa当量分率（陽イオン交換容量に占めるCaの割合）、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）。(7)(8)式より、陽イオン交換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。

$$[\mathrm{Ca^{2+}}] = \frac{X_{\mathrm{Ca}} \cdot \gamma_{\mathrm{Na}^+}^2 \cdot [\mathrm{Na^+}]^2}{(1-X_{\mathrm{Ca}})^2 \cdot \gamma_{\mathrm{Ca}^{2+}} \cdot K_{\mathrm{GT}}} \quad (9)$$

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freeCa^{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。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。

$$IAP = a_{\mathrm{Ca}^{2+}} \cdot a_{\mathrm{CO_3^{2-}}} = \gamma_{\mathrm{Ca}^{2+}}[\mathrm{Ca^{2+}}]\gamma_{\mathrm{CO_3^{2-}}}[\mathrm{CO_3^{2-}}] \quad (10)$$

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。

$$([\mathrm{Ca^{2+}}] - x)([\mathrm{CO_3^{2-}}] - x) = \frac{K_{\mathrm{sp}}}{\gamma_{\mathrm{Ca}^{2+}} \cdot \gamma_{\mathrm{CO_3^{2-}}}} \quad (11)$$

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）。

図１１に、数値解析による炭酸カルシウム析出挙動の再現結果を示す。初期に接触面(0 mm)にて炭酸カルシウムが成長し、ピークが生じている。時間の経過に伴い、析出箇所がカソード側（右側）へシフトし、Ca^{2+}のカソード側への移行と、CO_3^{2-} のアノード側への移行が釣り合ったところ（6-7 mm 付近）でピークが再び成長している。また、初期の Na/Ca 混在型ベントナイト試料が長くなるにつれて、Ca 双峰ピーク右側の析出量が増加している。図１１より、初期に交換性陽イオンとして存在していた Ca^{2+}の大部分が炭酸カルシウムとして析出していることが解析的に裏付けられた。解析結果と実験結果を比較すると、初期条件(b)と(c)の結果を概ね再現出来ていることが分かる。このことから、ベントナイト中における炭酸カルシウム析出量の予測に、改良した数値解析プログラムを適用できる見通しが得られた。さらに、Ca の移行速度は電流値に比例し、モンモリロナイトの見かけの乾燥密度に反比例することから、任意の実験条件（ベントナイト乾燥密度、Ca 当量分率、通電時間など）における予測解析にも適用可能と考えられる。

解析結果から、拡散試験および透水試験に供する実験条件として、図４に示した初期条件(b)（Na/Ca 混在型ベントナイトの長さ 4 cm）と(d)（同、長さ 8 cm）を選定した。

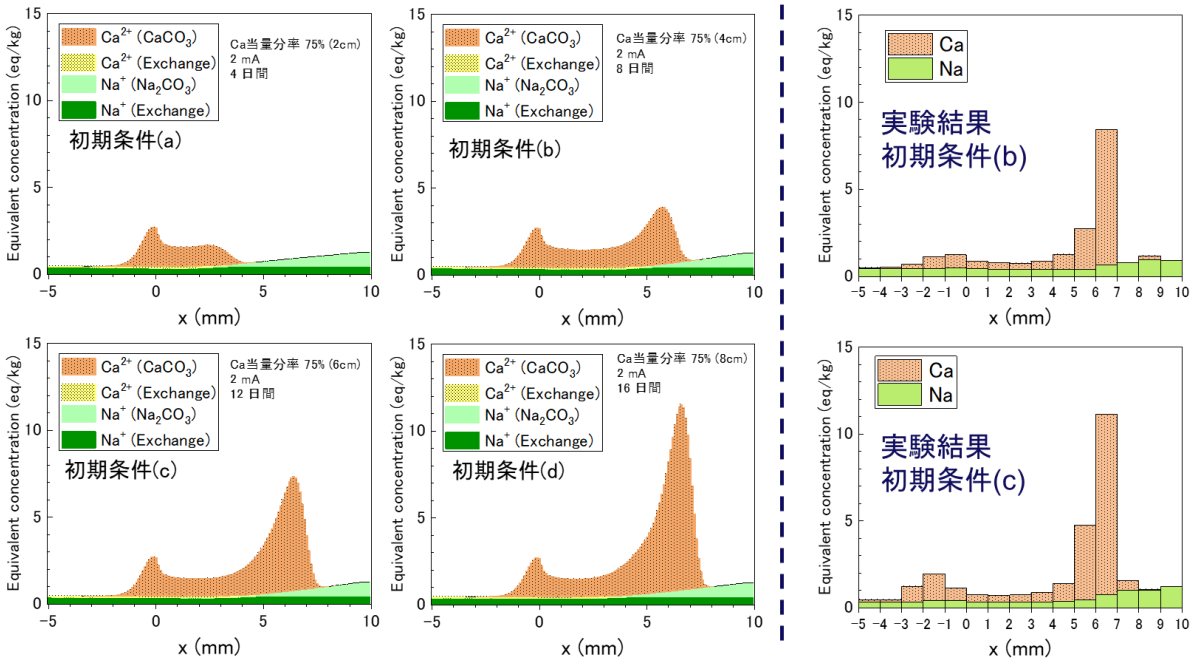


図１１　数値解析による炭酸カルシウム析出挙動の再現と、実験結果との比較

4.2.5. 析出物が重水およびヨウ化物イオンの実効拡散係数に与える影響評価

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１２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、(3)液量を容易に変更可能であること、の３点が挙げられる。

はじめに析出物が無い場合（ブランク）のデータ取得を目的として、Na 型ベントナイトを乾燥密度 1.2 kg/dm^3、モンモリロナイト部分密度 0.7 kg/dm^3 に圧縮成形（試料厚さ 10 mm）し、0.1 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１２のように組み上げ、重水およびヨウ化物イオンをトレーサーとする高濃度側溶液（NaCl 濃度 0.09 M、NaI 濃度 0.01M、重水濃度 0.1%）を加え、低濃度側に 100ml の NaCl 溶液（0.1 M）を加えて図１２のように循環させた。ベントナイト中のイオンの拡散は溶液の塩濃度の影響を強く受けるため、本研究では塩濃度を 0.1 M で一定となるような濃度条件とした。溶液の循環開始後、低濃度側溶液を約 12 時間置きに 10mL サンプリングしたのち、低濃度側に 0.1 M NaCl 溶液を 10 ml 補充するという操作を約 10 日間継続し、低濃度側の重水およびヨウ化物イオン濃度の経時変化を得た。なお、昨年度の解析的検討から、約３日程度で拡散フラックスが定常状態に達することを確認している（図２）。透過拡散試験後、試料を 1.0 mm 厚でスライスし、スライス片の半分を試料内部のトレーサー濃度分析に供し、残り半分を含水率測定および陽イオン（Na, Ca）分析に供した。

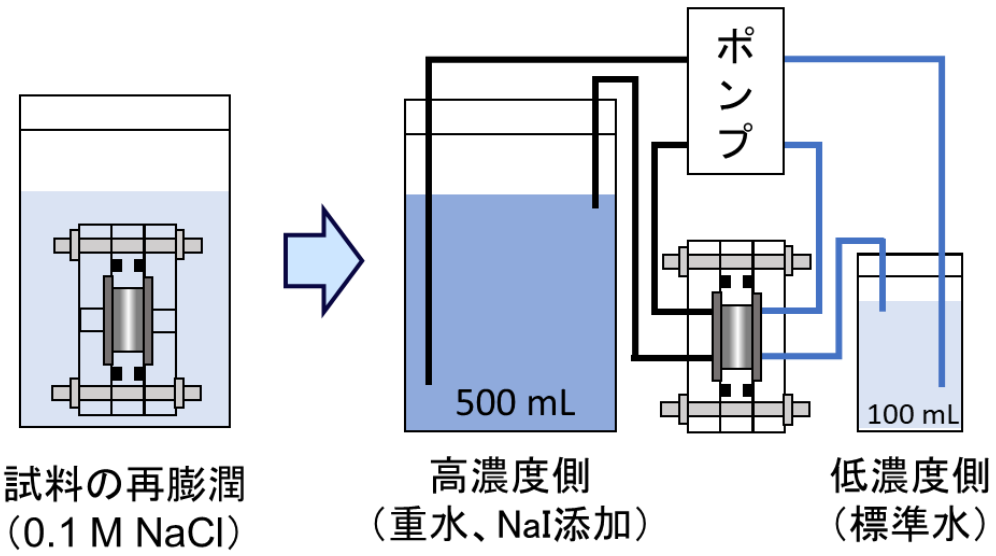


図１２　透過拡散試験装置の概略図

表 3　透過拡散試験　条件一覧

No.	析出条件	ベントナイト試料	高濃度側溶液	低濃度側溶液
1-1	析出無し①	ベントナイト乾燥密度 1.2 kg/dm^3 モンモリロナイト部分密度 0.7 kg/dm^3	・0.09 M NaCl ・0.01 M NaI ・D_2O 0.1 % （混合溶液）	0.1 M NaCl
1-2	析出（少）：初期条件(b)			
2-1	析出無し②			
2-2	析出（多）：初期条件(d)			

透過拡散試験の条件を表 3 に示す。炭酸カルシウムが析出した緩衝材を図 4 の初期条件(b)および(d)で調製したのち、炭酸カルシウム析出部を含む箇所を切り出し、0.1 M NaCl 溶液で 7 日間再膨潤させることでベントナイト試料とした。炭酸カルシウムが析出した緩衝材を用いた透過拡散試験についても、析出が無い場合と同様の手順で実施した。

低濃度側濃度の経時変化から実効拡散係数を評価する際には、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。ベントナイト中の重水およびヨウ化物イオンの拡散挙動は以下の式で記述できる（Vanloon et al., 2003）。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_e}{\alpha}\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \qquad (12)$$

$$\alpha = \varepsilon + \rho K_d \qquad (13)$$

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。本研究では、低濃度側の濃度が高濃度側に比べて十分小さな範囲で実験を行っているため、初期条件、境界条件は以下の式で記述できる。

$$C(x,t) = 0 \quad t = 0 \qquad (14)$$

$$C(0,t) = C_0 \quad x = 0 \qquad (15)$$

$$C(L,t) = 0 \quad x = L \qquad (16)$$

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（Vanloon et al., 2003）。

$$\frac{C(L,t)}{C_0} = \frac{SD_e}{V_{out}L}t - \frac{\alpha SL}{6V_{out}} - \frac{2\alpha SL}{\pi^2 V_{out}}\sum_{j=1}^{\infty}\frac{(-1)^j}{j^2}\exp\left(-\frac{D_e j^2 \pi^2 t}{L^2 \alpha}\right) \qquad (17)$$

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、Origin2021 で最適化し、実効拡散係数（D_e）と保持因子（α）を評価した。

図１３に透過拡散試験で得られた重水およびヨウ化物イオン相対濃度の経時変化および拡散方程式の解析解（17）式による最適化曲線を示す。いずれの濃度変化も（17）式でよく再現できていることがわかる。また、約２日（172,800 s）程度で重水、およびヨウ化物イオンともに定常状態に達している（濃度の経時変化が直線性を示す）ことが分かる。重水の場合、析出が無い場合の結果が２回の試験でほぼ一致し、実験の再現性を確認した。また、炭酸カルシウム析出量の増加とともに、定常状態（約２日以降）における濃度の経時変化の傾きが低下した。これは析出により実効拡散係数が低下していることを意味している。

一方、ヨウ化物イオンでは、析出が無い場合の最適化曲線の傾きはほぼ等しいものの、立ち上がりの時間に違いが認められた。このことは、実効拡散係数はほぼ等しいが、保持因子が異なることを意味している。また、傾き（実効拡散係数）は小さい順に析出（少）＜析出（多）＜析出無しとなった。一方、重水の傾き（実効拡散係数）は、析出（多）＜析出（少）＜析出無しの順となり、傾き（すなわち実効拡散係数）と析出量との関係性が重水とヨウ化物イオンで異なる結果となった。この理由として、水と陰イオンの移行経路の違い（陰イオン排除効果）と炭酸カルシウム析出に伴う空隙閉塞状況の違いが考えられる。

図１４に、透過拡散試験後の試料内部の重水およびヨウ化物イオン濃度、単位ベントナイト当たりの Na および Ca 当量濃度（eq/kg）、試料中の珪砂、モンモリロナイト、層間水、および粒子間空隙水の体積分率を示す。ベントナイト中の珪砂とモンモリロナイトの割合については、透過拡散試験後の Na 当量濃度がベントナイトの初期陽イオン交換容量（0.45 eq/kg）から変化していないことから、モンモリロナイト分率が初期の 0.432 から変化がないと見なして求めた。また、全空隙率に対する層間と粒子間空隙の割合は、Pusch らの報告を参照し、モンモリロナイト中の層間水が３水分子層、すなわち 0.357 cm^3/g と仮定することで求めた（Pusch et al., 1990）。

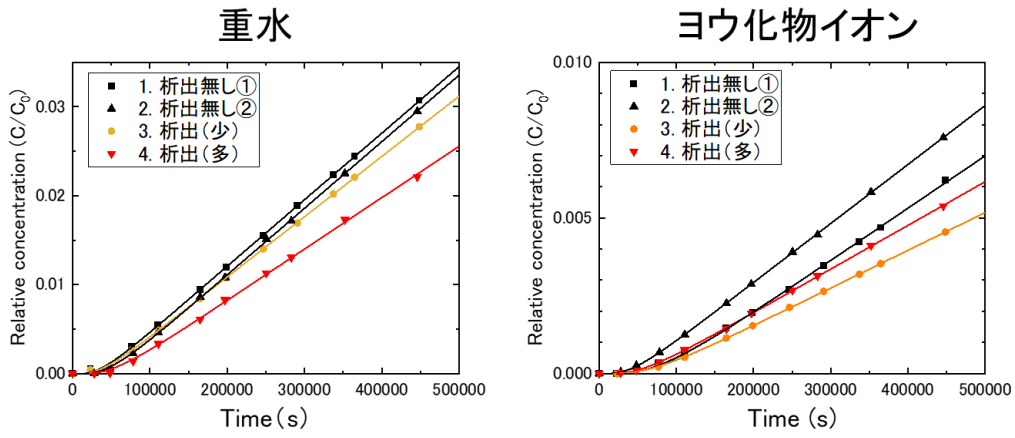


図１３　透過拡散試験における低濃度側の重水およびヨウ化物イオン濃度の経時変化
析出（少）：初期条件(b), Ca 当量分率 75%(4cm), 2mA, 8 日間通電
析出（多）：初期条件(d), Ca 当量分率 75%(8cm), 2mA, 16 日間通電

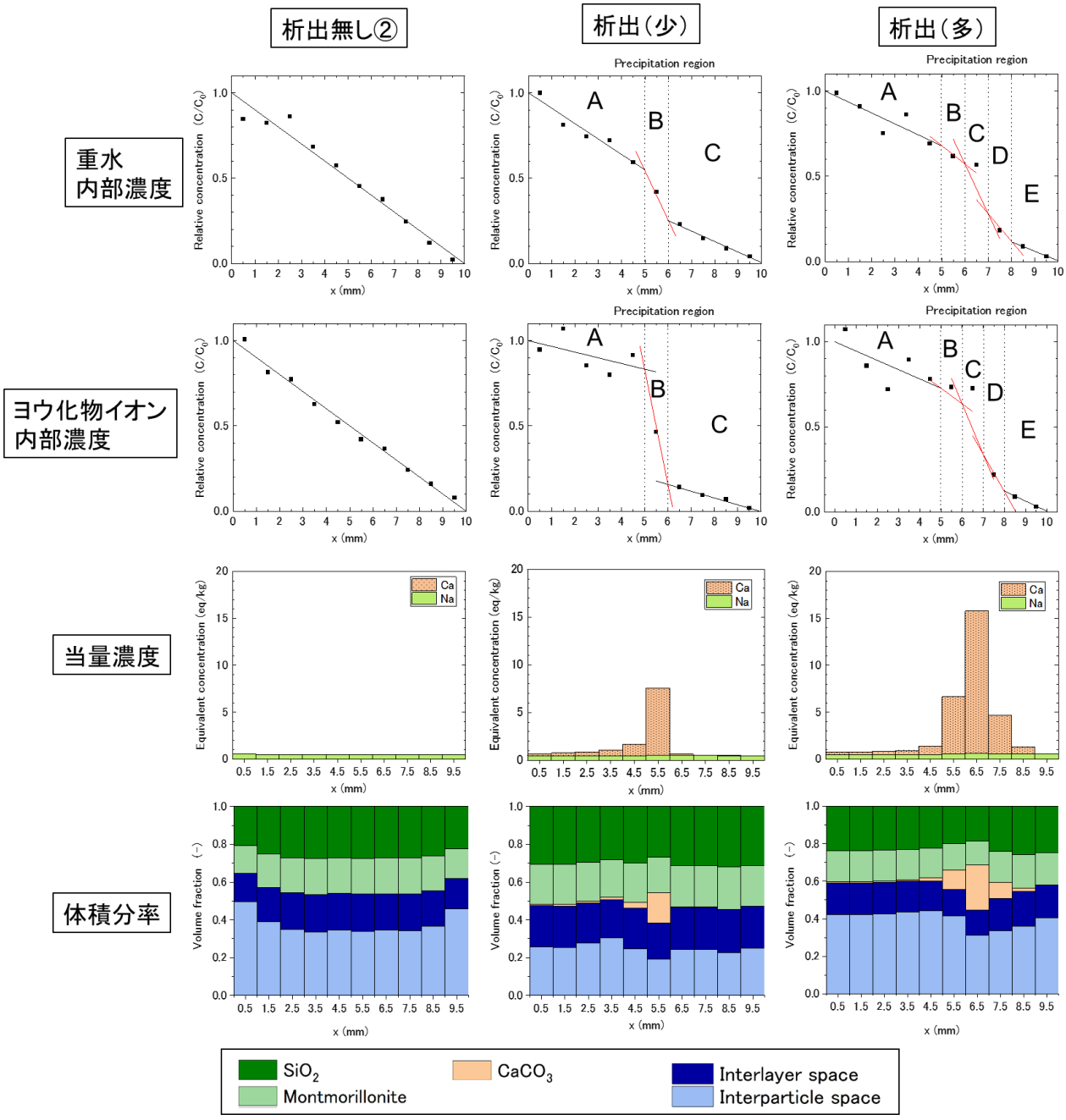


図１４　透過拡散試験後のベントナイト試料中における重水およびヨウ化物イオン濃度分布（高濃度側：0 mm、低濃度側：10 mm）、Na および Ca 当量濃度分布（単位乾燥ベントナイト当たり）、体積分率分布（SiO_2 :珪砂、Montmorillonite: モンモリロナイト、$CaCO_3$：炭酸カルシウム、Interlayer space: 層間空隙率、Interparticle space：粒子間空隙率）

図１４から、析出物が無い場合の試料内部濃度（相対濃度）は、重水およびヨウ化物イオンともに高濃度側（0 mm）において１、低濃度側（10 mm）において 0 となる直線を示し、濃度勾配が位置によらず一定となった。この結果は、炭酸カルシウム析出が無い場合は局所的な拡散係数は位置によらず一定であることを示している。

析出が少ない場合は、領域 B（5-6 mm）で炭酸カルシウムが析出し、空隙率（層間および粒子間空隙）が低下していることが分かる。これに伴い、試料内部濃度にも変化が見られ、析出部で濃度勾配が急になっていることが分かる。健全な領域 A（0-5 mm）、析出がある領域 B（5-6 mm）、健全な領域 C（6-10 mm）の濃度勾配は、各領域の回帰直線から直接求めた。定常状態では流束一定、すなわち、フィックの第 1 法則から実効拡散係数と濃度勾配の積が位置によらず一定となっている。したがって、以下の関係式により局所的な濃度勾配から局所的な実効拡散係数を求めることができる。

$$J = -D_e \frac{\Delta C}{\Delta x} = -D_{e,i} \frac{\Delta C_i}{\Delta x_i} \qquad (18)$$

ここで、J は拡散フラックス、$D_{e,i}$ は局所的な実効拡散係数、$\Delta C/\Delta x$ は全体の濃度勾配（相対値）、$\Delta C_i/\Delta x_i$ は局所的な濃度勾配（相対値）である。

析出が多い場合は、5-8 mm の範囲において炭酸カルシウムが析出し、析出量に応じて空隙率が低下していることが分かる。また炭酸カルシウム析出によりベントナイト体積割合も低下する傾向が認められた。これは析出物が単に空隙を閉塞するのみならず、ベントナイトの圧縮状態にも影響を及ぼすことを示している。析出量が異なる各領域（領域 BCD）で濃度勾配の変化が示唆されるが、5-6 mm, 6-7 mm, 7-8 mm 毎に分析点数が 1 点しかないため直接的に濃度勾配を求めることができない。そこで析出箇所における実効拡散係数の評価には、濃度勾配の代わりに、実効拡散係数と空隙率の関係として知られる Archie 則(19 式)と濃度差の和が 1 であるという関係式(20 式)を用いることとした（Luraschi et al., 2020）。

$$D_{e,i} = D_w \varepsilon_i^m \qquad (19)$$

$$\Delta C = \sum \Delta C_i = 1 \qquad (20)$$

ここで、D_w は重水およびヨウ化物イオンの自由水中における拡散係数、m は Archie 則パラメータ（セメンテーションファクター）、ε_i は局所空隙率、ΔC_i は局所濃度差である。また、(18)(19)(20)式から、以下の関係式を導くことができる。

$$\frac{\Delta x}{D_e} = \sum \frac{\Delta x_i}{D_{e,i}} = \sum \frac{\Delta x_i}{D_w \varepsilon_i^m} \qquad (21)$$

図１４の析出が多い場合において、各領域を A, B, C, D, E とすると、(21)式は具体的に以下のように表現できる。

$$\frac{\Delta x}{D_e} = \frac{\Delta x_{\mathrm{A}}}{D_{e,\mathrm{A}}} + \frac{\Delta x_{\mathrm{B}}}{D_w \varepsilon_{\mathrm{B}}^m} + \frac{\Delta x_{\mathrm{C}}}{D_w \varepsilon_{\mathrm{C}}^m} + \frac{\Delta x_{\mathrm{D}}}{D_w \varepsilon_{\mathrm{D}}^m} + \frac{\Delta x_{\mathrm{E}}}{D_{e,\mathrm{E}}} \qquad (22)$$

表４　透過拡散試験から求めた全体の実効拡散係数と保持因子（25℃）

試料	重水		ヨウ素	
	De [m^2/s]（全体）	保持因子 α [-]	De [m^2/s]（全体）	保持因子 α [-]
1. 析出無し①	$(2.4\pm0.1)\times10^{-10}$	0.55±0.02	$(5.4\pm0.1)\times10^{-11}$	0.27±0.01
2. 析出無し②	$(2.4\pm0.1)\times10^{-10}$	0.74±0.02	$(6.0\pm0.1)\times10^{-11}$	0.17±0.01
3. 析出（少ない）初期条件(b)	$(2.2\pm0.1)\times10^{-10}$	0.52±0.02	$(3.9\pm0.1)\times10^{-11}$	0.17±0.01
4. 析出（多い）初期条件(d)	$(1.8\pm0.1)\times10^{-10}$	0.63±0.05	$(4.5\pm0.1)\times10^{-11}$	0.16±0.01

健全部である領域 A（0-5 mm）および領域 E (8-10 mm)の局所的な実効拡散係数は、濃度の回帰直線から直接的に求めた濃度勾配を(18)式に適用することで評価した。一方、析出部（領域 B, C, D）の局所的な実効拡散係数は(22)式中の m をフィッティングパラメータとして最適化することで求めた。最適化に必要な空隙率のデータは、重水については全空隙率（層間＋粒子間空隙率）を用いて、ヨウ化物イオンについては陰イオン排除を考慮して粒子間空隙率を用いた。

表４に透過拡散試験から得た全体の実効拡散係数と保持因子を示す。重水の実効拡散係数は、炭酸カルシウム析出により 0.9~0.75 倍に低下し、ヨウ化物イオンの実効拡散係数は 0.79~0.68 倍に低下した。すなわち、重水とヨウ化物イオンの全体の実効拡散係数を比較すると、ヨウ化物イオンのほうが析出物の影響を強く受ける結果となった。

表５に濃度勾配または Archie 則から求めた局所的な実効拡散係数を示す。炭酸カルシウム析出により、局所的な実効拡散係数が大幅に低下し、とくに析出が少ない場合の 5-6 mm では１桁程度低下した。局所的な実効拡散係数を評価した結果、炭酸カルシウム析出により、ベントナイト緩衝材中における重水およびヨウ化物イオンの局所的な実効拡散係数はいずれも低下することが分かった。重水とヨウ化物イオンの局所的な実効拡散係数（すなわち図１４の内部濃度勾配）の違いは、析出が少ない場合において顕著であった。析出物の影響が重水と比べてヨウ化物イオンのほうが大きい理由として、炭酸カルシウムがヨウ化物イオンの支配的な拡散経路と考えられる粒子間空隙を主に閉塞していることが考えられる。すなわち、二次鉱物析出は陰イオンに対する潜在的な低拡散性をより顕在化させる方向に働くことが考えられる。

以上より、試料内部の濃度勾配から局所的な実効拡散係数を評価可能であり、試料内部の濃度勾配を直接求めることができない場合は、Archie 則を併用することで局所的な実効拡散係数を評価可能であることが示されたといえる。

表 6 に析出部における Acrhie 則パラメータ m を示す。Archie 則パラメータ算出の際に、重水には全空隙率を採用し、ヨウ化物イオンには粒子間空隙率を採用したことで、各試料（析出少および析出多）における Archie 則パラメータが重水とヨウ化物イオンでほぼ一致した。また表 6 から、析出が少ない場合（5-6 mm）の m は 3.5 程度であるのに対し、析出が多い場合（5-8 mm）の m は 4.2-4.4 程度の値を示した。一般に、Archie 則パラメータ m は空隙構造を反映していると言われているため、m の違いは析出量が少ない場合と多い場合の空隙閉塞状況の違いを反映している可能性がある。

表 5　濃度勾配および Archie 則から求めた局所の実効拡散係数（25℃）

試料	試料内の位置	重水	ヨウ素	評価方法
		De,i [m^2/s]（局所）	De,i [m^2/s]（局所）	
3. 析出（少ない）	A（健全）0-5 mm	2.4×10^{-10}	1.2×10^{-10}	内部濃度勾配
	B（析出・中程度）5-6 mm	7.9×10^{-11}	5.7×10^{-12}	内部濃度勾配 (Archie 則も適用)
	C（健全）6-10 mm	3.4×10^{-10}	9.7×10^{-11}	内部濃度勾配
4. 析出（多い）	A（健全）0-5 mm	2.9×10^{-10}	8.2×10^{-11}	内部濃度勾配
	B（析出・少ない）5-6 mm	1.6×10^{-10}	4.9×10^{-11}	Archie 則
	C（析出・多い）6-7 mm	6.3×10^{-11}	1.5×10^{-11}	
	D（析出・少ない）7-8 mm	1.1×10^{-10}	2.0×10^{-11}	
	E（健全）8-10 mm	3.1×10^{-10}	7.5×10^{-11}	内部濃度勾配

表 6　析出部における Archie 則パラメータ m

	重水 全空隙率	ヨウ化物イオン$^-$（粒子間空隙率）
3. 析出少ない (5-6 mm)	3.52	3.57
4. 析出多い (5-8 mm)	4.46	4.24

4.2.6. 析出物が透水係数に与える影響評価

透水試験は加圧注入法により行った。図１５に透水試験の概略図を示す。炭酸カルシウム析出後、ベントナイト試料を切り出し、0.1 M NaCl 溶液にて 1 週間以上、再膨潤して試料とした。図１５に示す圧送ボトルに 0.1 M NaCl 溶液を 500 mL 入れ、窒素ガスで 0.1 MPa の圧力をかけた。このとき、試料厚さが 1cm であるため、動水勾配は 1020 となる。なお、窒素ガスの圧力（0.1 MPa）はベントナイトの膨潤圧（モンモリロナイト部分密度 0.7 kg/dm^3 のとき約 0.1-0.2 MPa、Sato 2008）以下となるように設定した。

加圧後、透過液の重量から累積透水量(溶液の密度 1 g/cm^3 とした)を得た。透水挙動がダルシー則に従うと仮定すると、区間毎の透水係数は以下の式から算出できる。

$$k = \frac{\rho_w g h}{PA}\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{1}{iA}\frac{\Delta V}{\Delta t} \qquad (22)$$

ここで、ρ_w は水の密度（1000 kg/m^3）、g は重力加速度（9.8 m/s^2）、h は供試体の厚さ（0.01 m）、P は流入側圧力（10^5 Pa）、A は粘土試料の断面積（3.14×10^{-4} m^2）、ΔV は時間間隔 Δt (s) の間に透過した水の体積（m^3）i は動水勾配（$= P/\rho_w gh$ ）[-]である。今年度に実施した透水試験の条件を表 7 に示す。

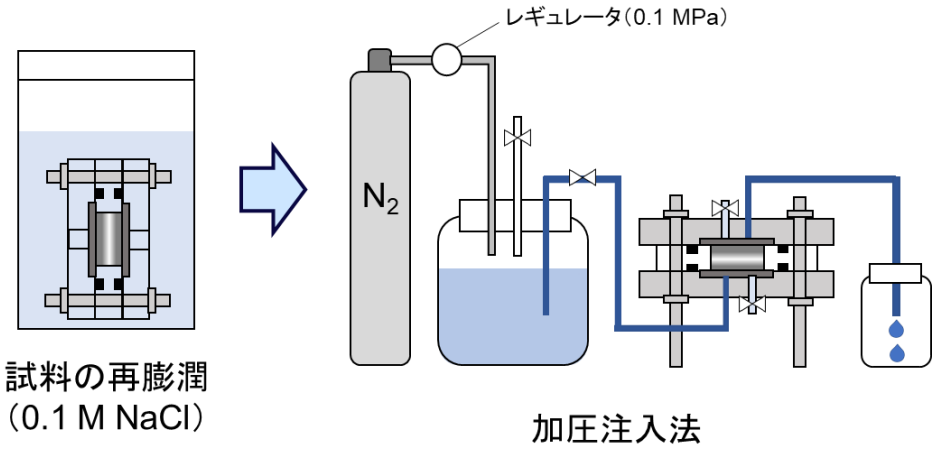


図１５　透水試験装置の概略図

表 7　透水試験条件一覧（室温で実施）

No.	析出条件	ベントナイト試料	透過溶液	動水勾配
1	析出無し①	ベントナイト乾燥密度 1.2 kg/dm^3 モンモリロナイト部分密度 0.7 kg/dm^3	0.1 M NaCl	1020
2	析出無し②			
3	析出（少）：初期条件(b)			
4	析出（多）：初期条件(d)			
5	析出（多）：初期条件(d)			

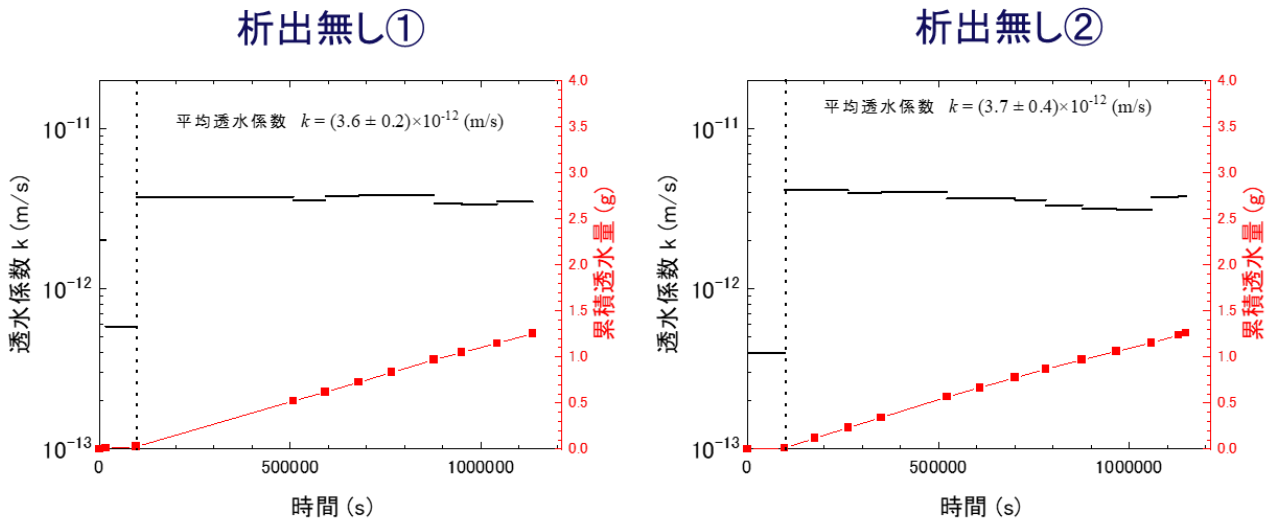


図１６　累積透水量の経時変化と区間透水係数（析出無し）

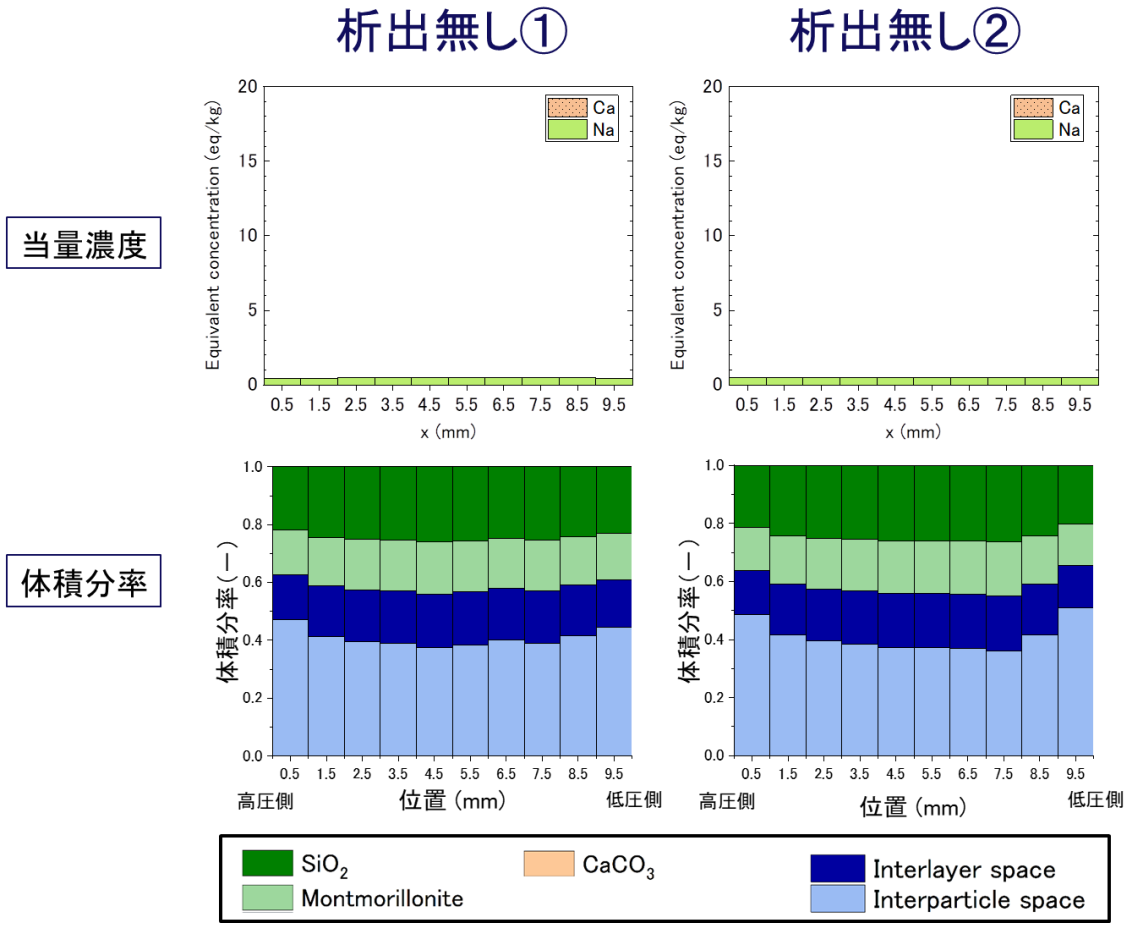


図１７　透水試験後の試料内部の当量濃度および体積分率分布（析出無し）

図１６に析出が無い場合の透水試験結果を示す。累積透水量は時間とともに直線的に増加し、透水係数の経時変化は認められなかった。また、２回の試験で透水係数はほぼ同じ値（3.6×10^{-12} m/s 程度）を示し、透水試験の再現性が確認できた。図１７に透水試験後の試料内部の Na および Ca 当量濃度（単位ベントナイト当たり）および珪砂、モンモリロナイト、層間水、粒子間空隙水の体積分率を示す。２回の試験ともに、透水試験の前後で試料の変質や密度変化は認められなかった。

図１８に析出が少ない場合および析出が多い場合（擾乱あり）の透水試験結果を示す。ここで、「擾乱あり」は炭酸カルシウム析出実験後の試料切り出しの際に、炭酸カルシウム層に破損が生じたことを意味している。析出が少ない場合の透水係数は、析出が無い場合と比較してわずかに低下した。これは、炭酸カルシウム析出による空隙閉塞が透水係数を低下させた可能性が考えられる。透水係数の経時変化をみると若干の変動が認められるが、これは透過液の量が少ない（１日当たり 0.1 ml 程度）ことによる実験誤差の影響が支配的と考えられる。一方、析出が多い場合（擾乱あり）の透水係数は、析出が無い場合と比較して２～３倍程度大きな値を示した。このことは、炭酸カルシウム析出量が多いことによるセメンテーションに類似した現象と、力学的な擾乱により、卓越した水みちが形成されたことを示唆している。析出が多い場合（擾乱あり）では、透水係数の経時変化は認められず、この試料の結果では水みちの回復は示唆されなかった。

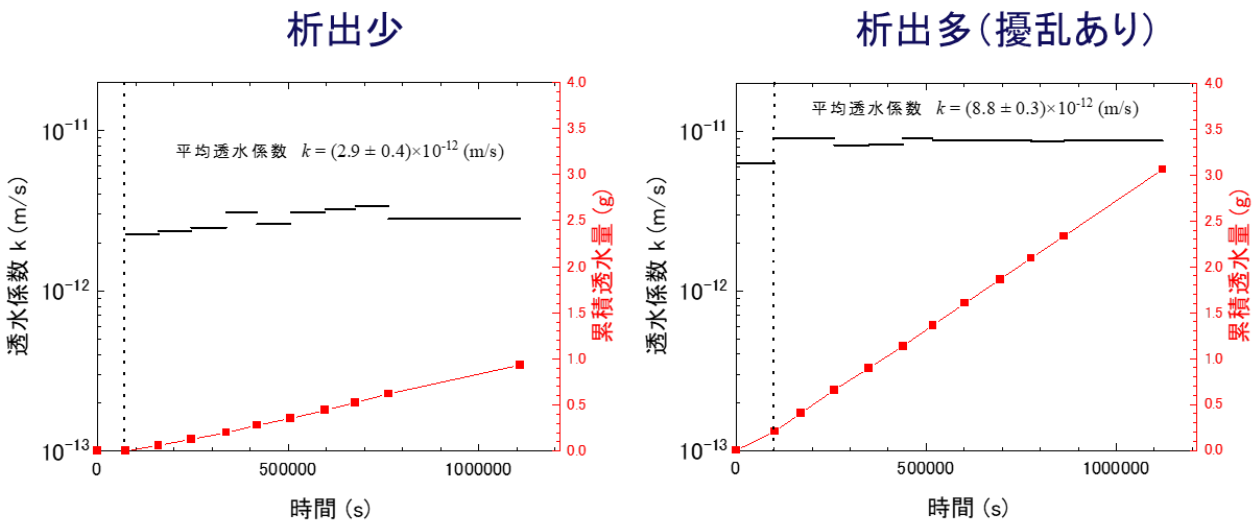


図１８　累積透水量の経時変化と区間透水係数（析出あり）

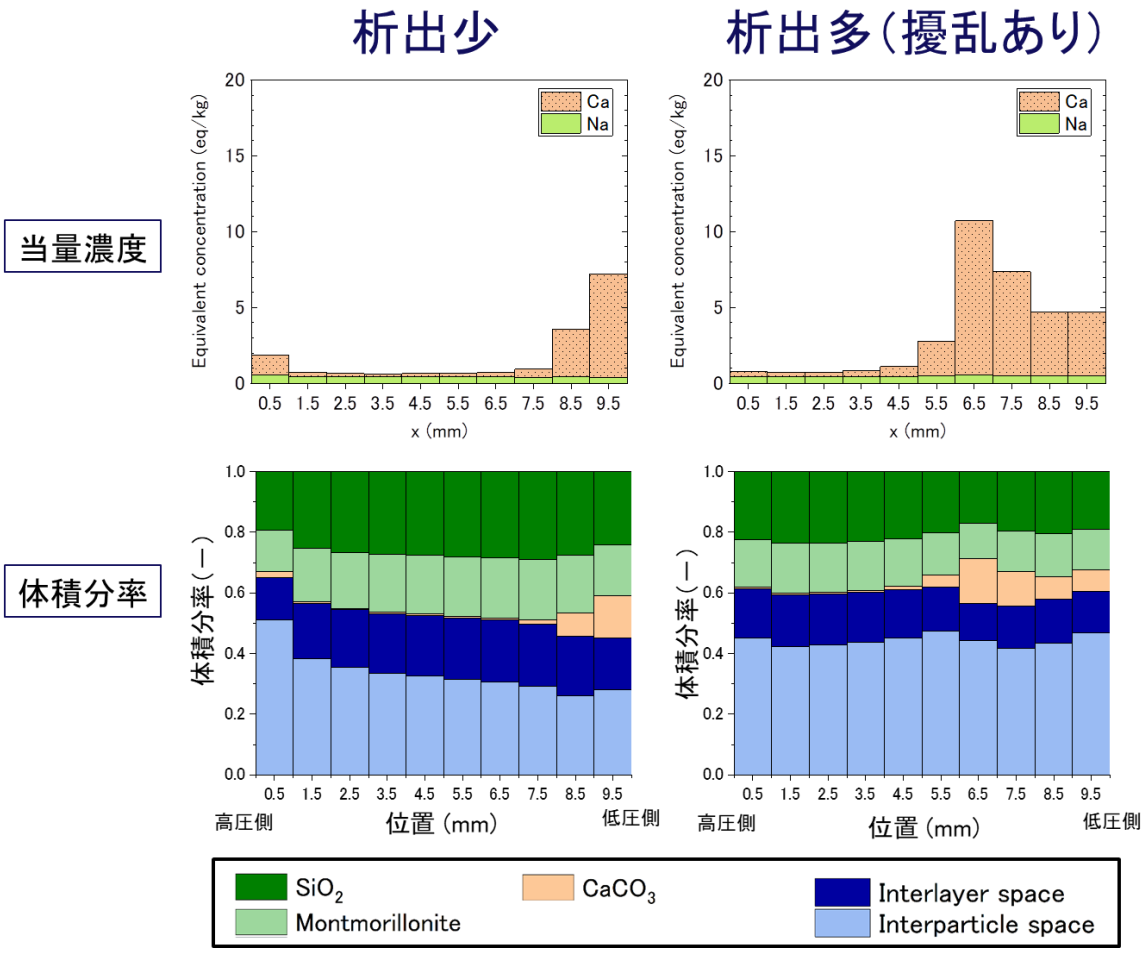


図１９　透水試験後の試料内部の当量濃度および体積分率分布
（析出少および析出多（擾乱あり））

図１９に析出が少ない場合および析出が多い場合（擾乱あり）における、透水試験後の Na および Ca 当量濃度（単位ベントナイト当たり）および珪砂、モンモリロナイト、層間空隙、粒子間空隙の体積分率分布を示す。いずれも炭酸カルシウム析出により空隙率が低下していることが分かる。析出が少ない場合の析出位置は 8-10 mm に偏っており、透水試験前に目視でも確認できたことから、炭酸カルシウムが析出した試料の調製時には既にこの付近で炭酸カルシウムが析出していた可能性が高い。

析出が多い場合（擾乱あり）では、全体的に空隙率（層間＋粒子間空隙）が高いことが分かり、高い空隙率も透水係数が大きな値を示す原因の１つと考えられる。析出物の位置や量は、拡散試験の場合（図１４）と比較してやや広がっている傾向が認められた。析出物の範囲の違いが透水試験によるのか否かについては、実験前後の試料に対し非破壊観察（X 線 CT 法など）を適用する等、多角的に検証する必要があると考えられる。

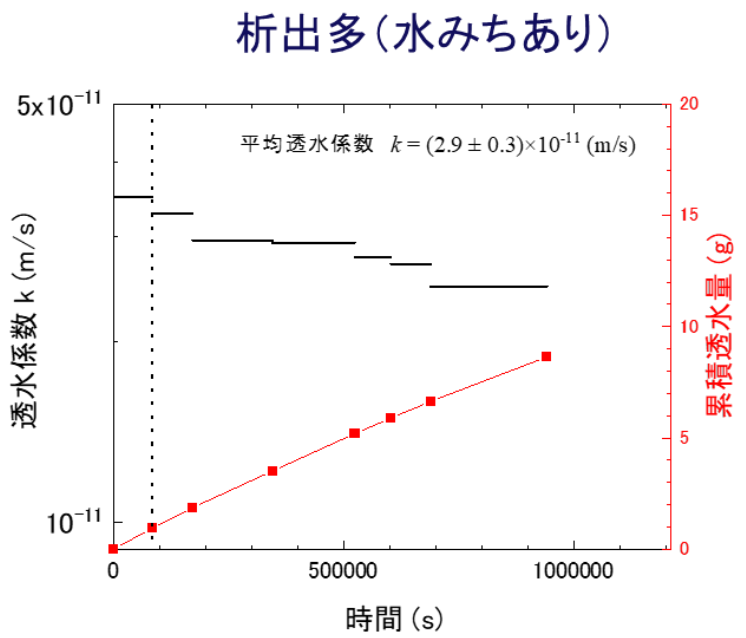


図２０　累積透水量の経時変化と区間透水係数（析出多（水みちあり））

図２０に析出が多い場合（水みちあり）の透水試験結果を示す。ここで、「水みちあり」は、透水試験後の試料スライス時に、試料断面に炭酸カルシウムの水みちが認められたことを意味している（後述）。透水係数は析出が無い場合と比較して初期の透水係数が１桁大きな値を示した。また図２０から、透水係数が時間とともに回復（減少）していることが分かる。このことは、この結果は、炭酸カルシウム析出量が多い場合は透水係数の評価が難しくなることを示唆している。考えられる原因として、炭酸カルシウム析出量が多い場合は、セメンテーションに類似した現象により膨潤性を失いひび割れが生じた一方で、膨潤性を残した部分の再膨潤により透水係数が回復した可能性が考えられる。

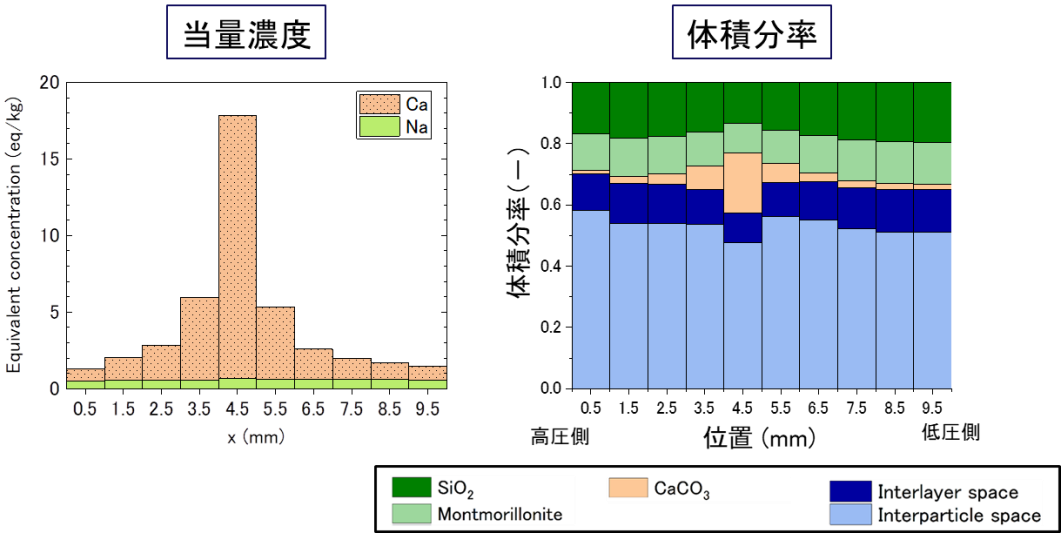


図２１　透水試験後の試料内部の当量濃度および体積分率分布
（析出多（水みちあり））

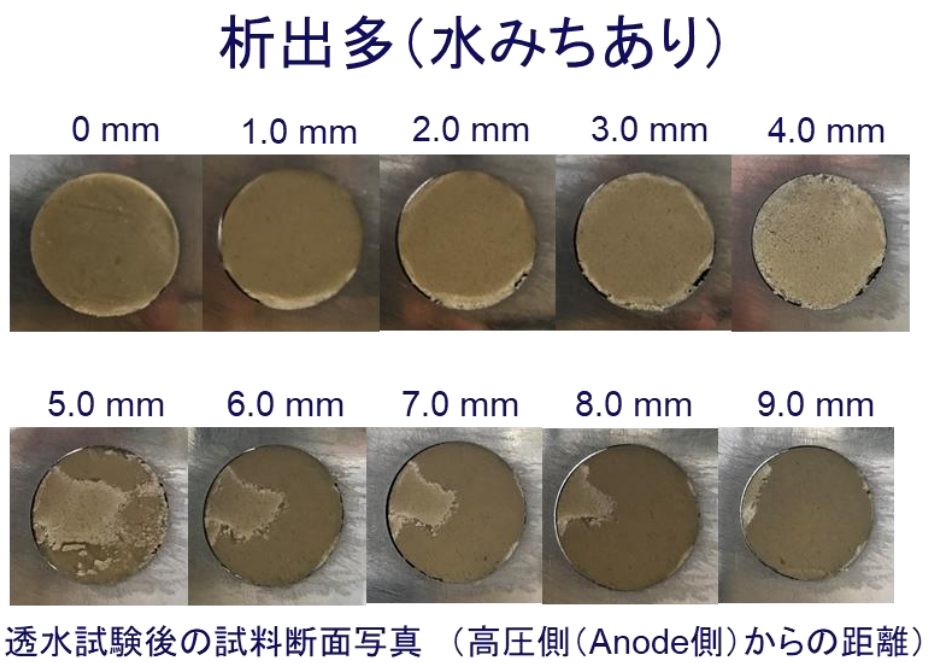


図２２　透水試験後の試料断面写真（析出多（水みちあり））

図２１に析出が多い場合（水みちあり）における、透水試験後の Na および Ca 当量濃度と体積分率分布を示す。炭酸カルシウムが 4-5 mm 付近に多量に析出している一方で、試料全体にも炭酸カルシウムが広く析出しており、ベントナイト全体に卓越した水みちが形成されていることを示唆している。また析出部においてベントナイト体積割合も低下する傾

向が認められた。これは、図１４の透過拡散試験における析出が多い場合と同様であり、炭酸カルシウム析出により空隙が閉塞されるのみならず、ベントナイトの圧縮状態にも影響を及ぼしていることを示唆している。また、空隙率が全体的に高い結果となり、この結果も高い透水係数と関連している可能性がある。

図２２に透水試験後の試料スライス時における試料断面写真を示す。白い部分は炭酸カルシウム量が多い箇所を示している。0 mm から 3 mm 程度までは輪郭に白い箇所（炭酸カルシウム）が認められ、4 mm では全面に均一に炭酸カルシウムが認められ、5 mm から 9 mm においても部分的に炭酸カルシウムが存在している様子が見て取れる。炭酸カルシウム析出部はベントナイト健全部と比較して膨潤性に乏しいと考えられることから、炭酸カルシウム析出部が卓越した水みちとして機能している可能性がある。断面写真による炭酸カルシウム析出部の観察結果は、図２１の Ca 濃度分布が試料全体に広がっている結果と整合的である。今回の目視による観察では、炭酸カルシウム析出部が水みちとして機能している可能性が考えられたが、詳細な水みち構造を把握するためには、X 線 CT 法による非破壊観察も有効と考えられ、今後の課題である。

表８に透水試験で得られた平均透水係数をまとめて示す。ここで、平均透水係数とその誤差は、各区間の透水係数の算術平均と不偏標準偏差を表している。析出が少ない場合は平均透水係数がやや低下し、炭酸カルシウム析出による空隙閉塞が原因と考えられる。一方、析出が多い場合の平均透水係数は、析出が無い場合と比較して大きくなり、No.5 の析出多（水みちあり）では透水係数が時間とともに回復（透水係数が減少し、析出が無い場合に近づく）する傾向が認められた。すなわち、炭酸カルシウム析出により空隙が閉塞される一方で、析出量の増大とともにセメンテーションに類似した現象が生じ、ひび割れの発生と再膨潤による回復を含む、複合的な現象が透水係数に影響を及ぼしていると考えられる。

表８　透水試験から評価した平均透水係数まとめ

No.	ベントナイト試料	平均透水係数 [m/s]
1	析出無し①	$(3.6\pm0.2)\times10^{-12}$
2	析出無し②	$(3.7\pm0.4)\times10^{-12}$
3	析出（少）：初期条件(b)	$(2.9\pm0.4)\times10^{-12}$
4	析出（多）：初期条件(d) (擾乱あり)	$(8.8\pm0.3)\times10^{-12}$
5	析出（多）：初期条件(d) （水みちあり）	$(2.9\pm0.3)\times10^{-11}$

5. まとめ

本年度はベントナイト緩衝材中に炭酸カルシウム層を形成させる手法の開発と、炭酸カルシウム層を形成させた緩衝材を用いた拡散試験および透水試験を行い、以下のことを明らかにした。

(1) 二次鉱物の析出促進と制御

- 2019 年度に見出した初期条件（2M Na_2CO_3 水溶液で飽和させた Na 型ベントナイトをカソード側末端に配置）にて実験を行い、炭酸カルシウム析出量を制御することに成功し、ベントナイト試料中に炭酸カルシウム層を形成させる手法を確立した。
- 数値解析により炭酸カルシウム析出挙動を概ね再現することができた。これにより様々な乾燥密度のベントナイト試料においても、炭酸カルシウム析出量を制御するための実験条件を事前に把握できる見通しが得られた。
- EPMA により、炭酸カルシウムの析出範囲やその形態を観察できた。
- XRD により炭酸カルシウム鉱物を同定できた。炭酸カルシウム鉱物としてカルサイトおよびバテライトが同定された。

(2) 実効拡散係数の取得

- 透過拡散試験により、炭酸カルシウムが析出したベントナイト緩衝材中における重水およびヨウ化物イオンの実効拡散係数（全体）を評価した。
- 炭酸カルシウム析出により、重水およびヨウ化物イオンの全体の実効拡散係数が低下した。また、ヨウ化物イオンのほうが析出物の影響をより強く受けることが分かった。
- 定常状態における試料内部の重水およびヨウ化物イオン濃度分布から、炭酸カルシウム析出部では濃度勾配が大きくなった。析出量が少ない場合は、濃度勾配の回帰直線から、重水およびヨウ化物イオンの局所的な実効拡散係数を評価できた。
- 析出量が多く、局所的な濃度勾配を直接求めることができない場合は、重水については全空隙率、ヨウ化物イオンについては粒子間空隙率を Archie 則に適用することで、炭酸カルシウム析出による局所的な実効拡散係数の低下を評価できた。
- 局所的な析出影響について、析出箇所では重水と比較してヨウ化物イオンの濃度勾配が大きい、すなわちヨウ化物イオンのほうが析出物の影響を強く受ける結果となった。この結果は、およびベントナイトの負電荷によりヨウ化物イオンがベントナイトから静電的に排除され、その拡散経路が粒子間空隙に制限されていること（陰イオン排除）、および炭酸カルシウムが主に粒子間空隙を閉塞していることで説明できる。
- Archie 則パラメータ m は、同じ試料では重水とヨウ化物イオンでほぼ等しい値となった。析出少と析出多における Archie 則パラメータ m の違いは、炭酸カルシウム析出による空隙閉塞状態の違いを表している可能性がある。
- 炭酸カルシウム析出により、空隙率の低下に加えてベントナイト体積割合も低下する

結果となった。この結果は、炭酸カルシウムが粒子間空隙を閉塞させるのみならず、ベントナイトの圧縮状態にも影響を及ぼすことを示している。

(3) 透水係数の取得

- 炭酸カルシウムが析出した緩衝材を用いた透水試験により、炭酸カルシウム析出がベントナイト緩衝材の透水係数に及ぼす影響を評価した。
- 炭酸カルシウムの析出量が少ない場合は、析出が無い場合と比較して透水係数が低下した。この結果は、炭酸カルシウム析出による空隙閉塞によるものと考えられる。
- 炭酸カルシウムが多量に析出した場合は、析出が無い場合と比較して透水係数が大きくなった。また、透水係数の経時変化から、透水係数が回復する場合もあることが分かった。この結果は、炭酸カルシウム析出量が多い場合は空隙閉塞に加えてセメンテーションに類似した現象が生じ、透水係数の評価が難しくなることを示唆している。
- 考えられる原因として、炭酸カルシウム析出量が多い場合は、セメンテーションに類似した現象により膨潤性を失いひび割れが生じて透水係数が増大した一方で、膨潤性を残した部分の再膨潤により透水係数が回復した可能性が挙げられる。
- 炭酸カルシウム析出による拡散係数の低下は空隙率の低下で説明できる一方で、析出による透水係数の変化は空隙率の低下のみでは説明できない。
- 透水係数の変化は炭酸カルシウムによる空隙閉塞、セメンテーション、水みちの形成やその時間変化等が複合的に関与していることを示唆しており、X 線 CT 法による空隙閉塞や水みちの非破壊観察を行うなど、別途、詳細に検討する必要がある。

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).

・日本原子力学会標準、余裕深度処分の安全評価手法、AESJ-SC-F012 (2009).

・NUMO 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－(2021).

・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).

・Pusch, P., et al., GMM – A general microstructural model for qualitative and quantitative studies of smectite clays, SKB Technical Report, 90-43 (1990)

・ 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).

・Luraschi, P., et al., Evolution of HTO and $^{36}Cl^-$ diffusion through a reacting cement-clay interface (OPC paste-Na montmorillonite) over a time of sic years, Applied Geochemistry 119, 104581 (2020).

・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).
・Sato, H., Thermodynamic model on swelling of bentonite buffer and backfill materials, Physics and Chemistry of the Earth 33, S538-S543 (2008).
・Savage, D. and Cloet, V., A review of cement-clay modeling, Nagra, NAB 18-24 (2018).
・Samper, J., et al., Reactive transport model of lab tests of lime-mortar, compacted bentonite and magnetite geochemical interactions. Applied Geochemistry 119, 104633 (2020).
・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).
・Tournassat, C., et al., Solving the Nernst-Planck Equation in Heterogeneous Porous Media With Finite Volume Methods: Averaging Approaches at Interfaces, Water Resources Research 56, e2019WR026732 (2020).
・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).
・Van Loon, L. R. and Mibus, J., A modified version of Archie's law to estimate effective diffusion coefficients of radionuclides in argillaceous rocks and its application in safety analysis studies, Applied Geochemistry 59, 85-94 (2015).
・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).

２０２０年度外部発表リスト

【国際会議発表】

Tanaka, S., CALCITE PRECIPITATION IN COMPACTED MONTMORILLONITE ENHANCED USING AN ELECTROKINETIC METHOD: EXPERIMENT AND PRELIMINARY MODELING, Clay Conference 2020, Nancy, France (2020)　【2021 年 6 月に延期】

【国内会議発表】

田中真悟, 処分施設環境における二次鉱物沈殿がベントナイト緩衝材の核種移行評価パラメータに及ぼす影響の基礎的研究: 炭酸カルシウム析出による重水の拡散係数変化の検証, ポスター発表, 日本原子力学会バックエンド部会主催, 第 36 回バックエンド夏期セミナー, 2020 年 8 月 26 日（水）オンライン開催

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。

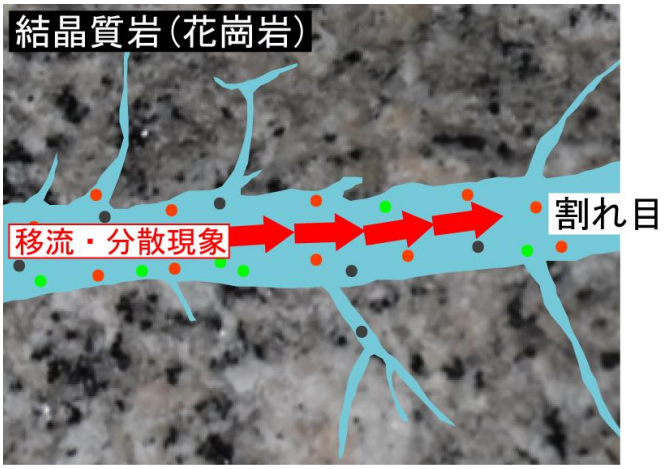


図 1　結晶質岩中の地下水流動および物質移動の経路となる割れ目の概念図
結晶質岩中の地下水流動および物質移動は、割れ目を
移動経路とした移流・分散現象に強く支配される。

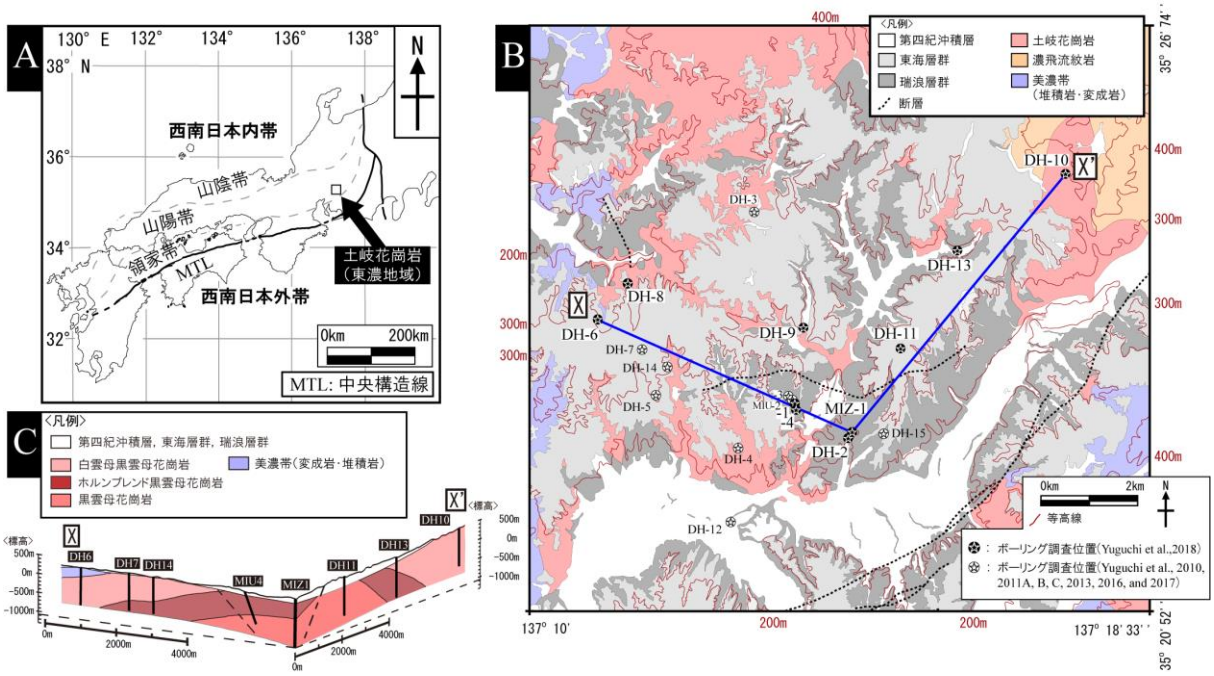


図 2　土岐花崗岩体の位置図（A）、土岐花崗岩体が位置する東濃地域の地質図（B：赤色部分が土岐花崗岩の分布領域を示す）、土岐花崗岩体中の岩石種の違いを示す断面図（C：B の X から X'までの断面図であり、色の相違は岩石種の違いを表す）

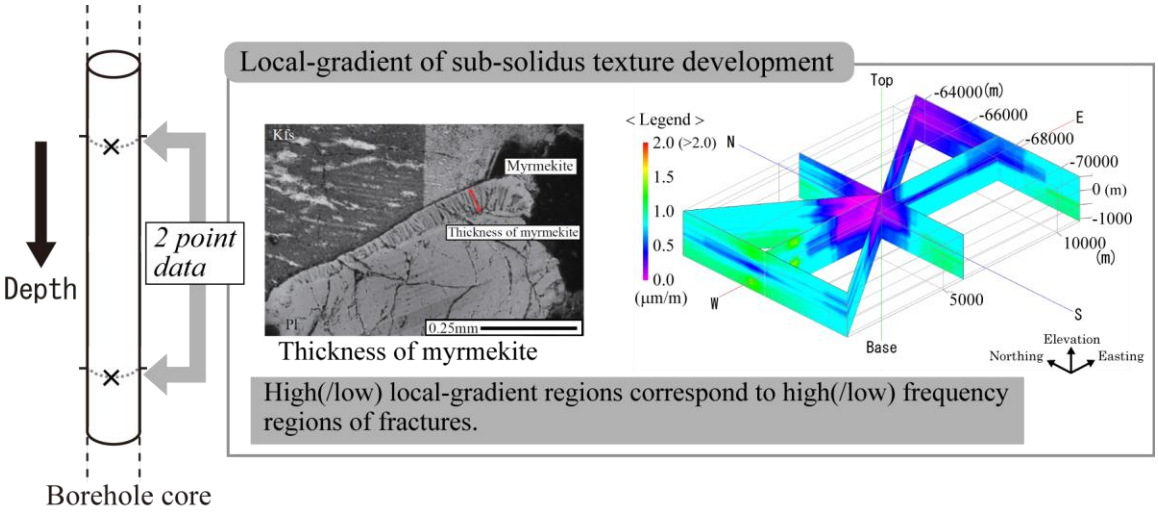


図 3　結晶質岩中の微組織（ミルメカイト）を用いた割れ目分布評価手法の概念図（Yuguchi et al., 2012）

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。

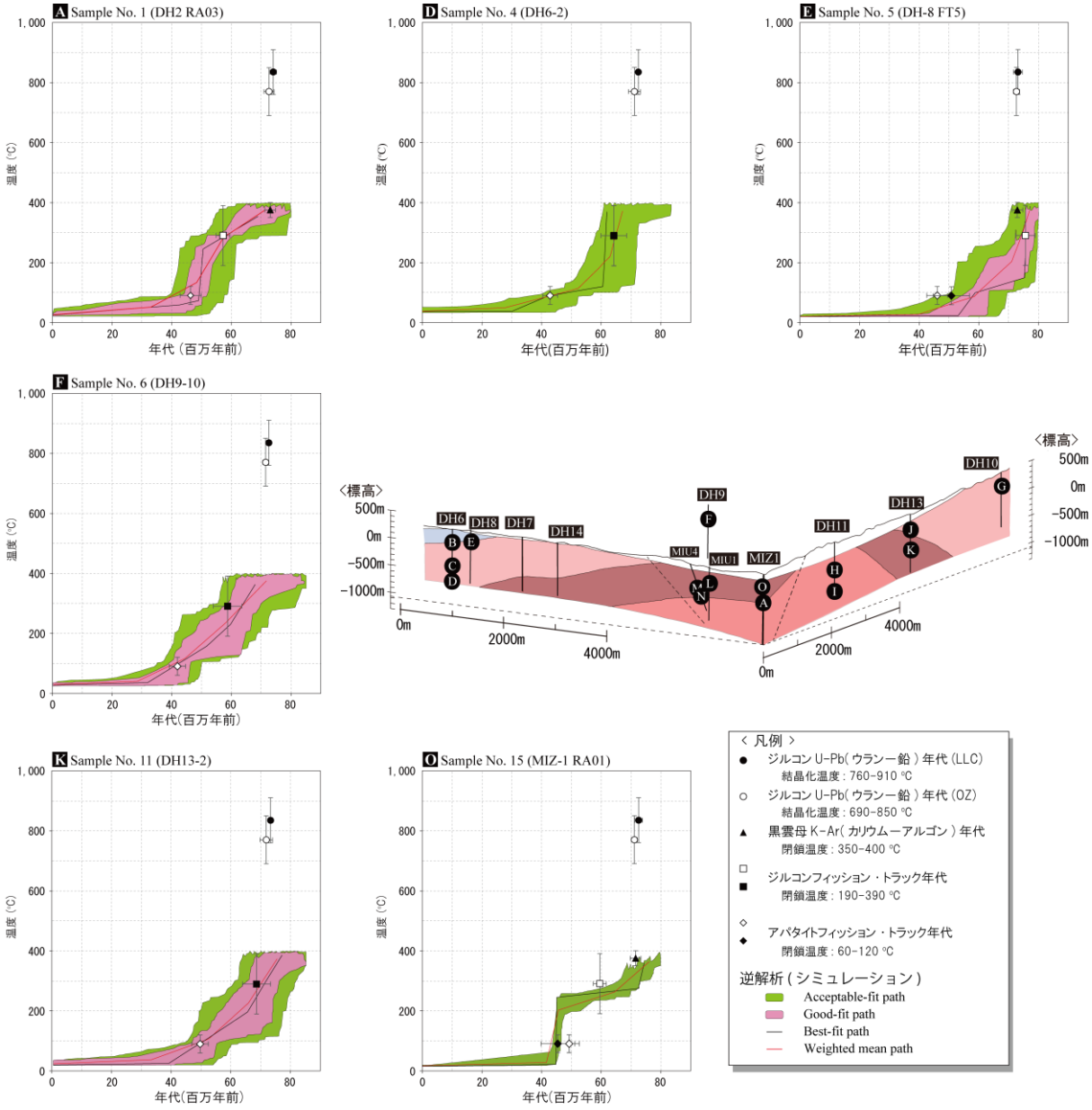


図 4　土岐花崗岩体中の領域ごとの温度－時間履歴（Yuguchi et al., 2019A を一部改編）

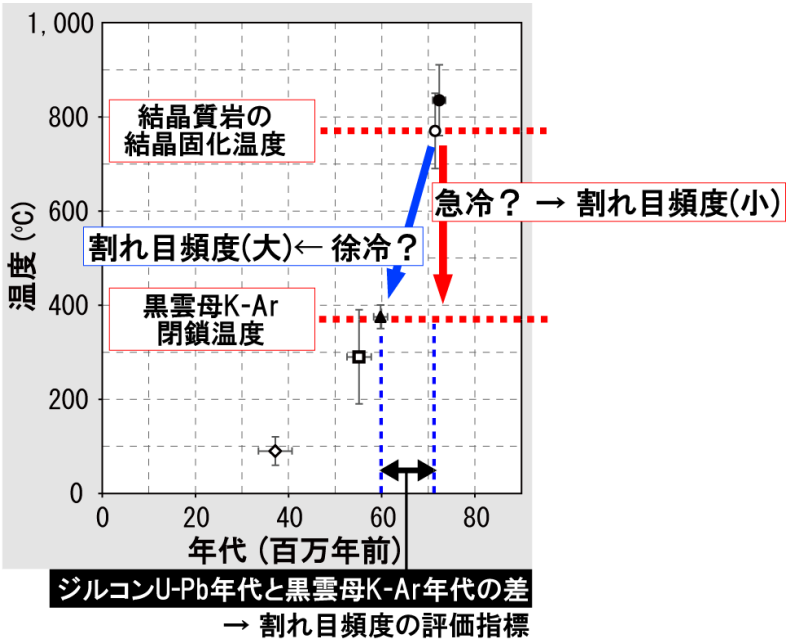


図 5　温度－時間履歴と割れ目頻度との関係を示した概念図

（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 を実施した。2020 年度は STEP1 のデータを補いつつ、STEP3 および STEP4 を中心に実施する。具体的な実施項目として、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）の変質パラメータとラージスケール割れ目との比較検討を行った。それぞれの鉱物中のマイクロケール割れ目面積の導出方法の構築と実際の値を導出し、マイクロスケール割れ目と変質パラメータの関係、ラージスケール割れ目とマイクロスケール割れ目との関係を議論する。以上の比較検討より、変質パラメータを指標とした花崗岩体中の現在の割れ目分布および将来的な割れ目発生の潜在性評価についての議論を行った。

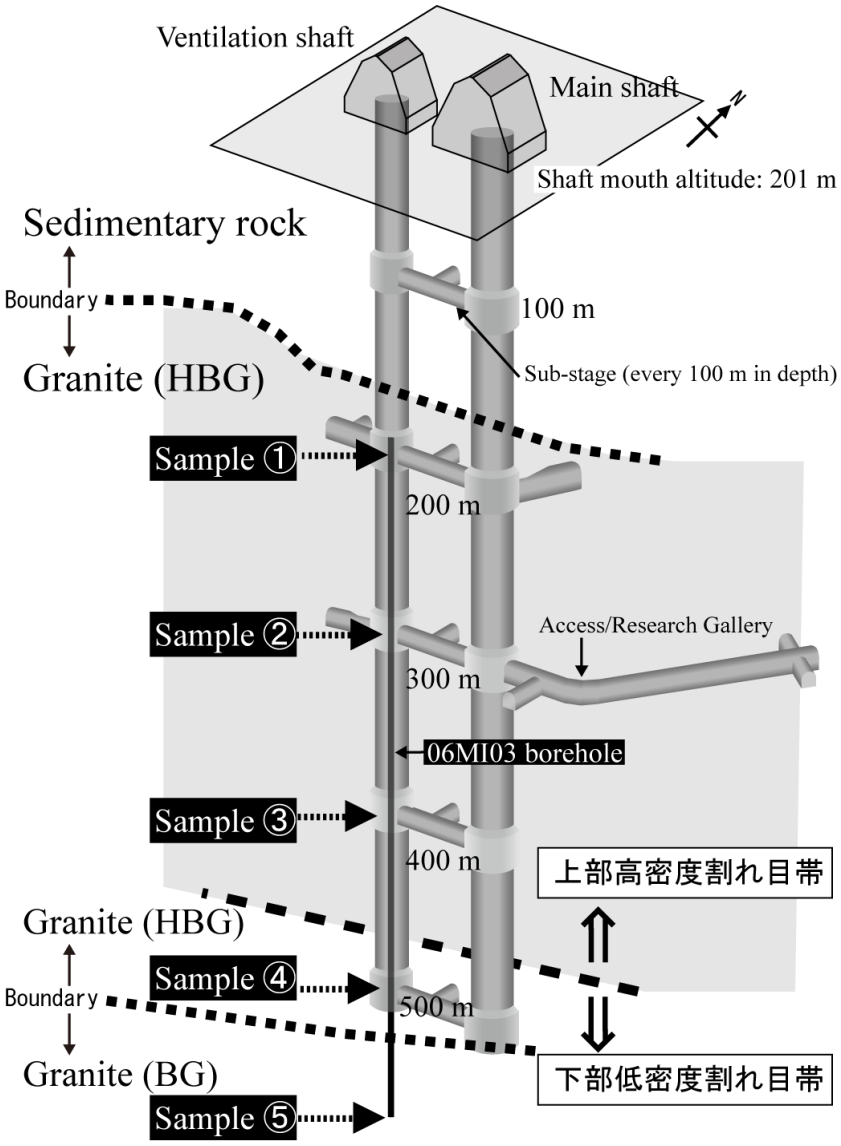


図 6　土岐花崗岩体に位置する瑞浪超深地層研究所の研究坑道の概念図

（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。

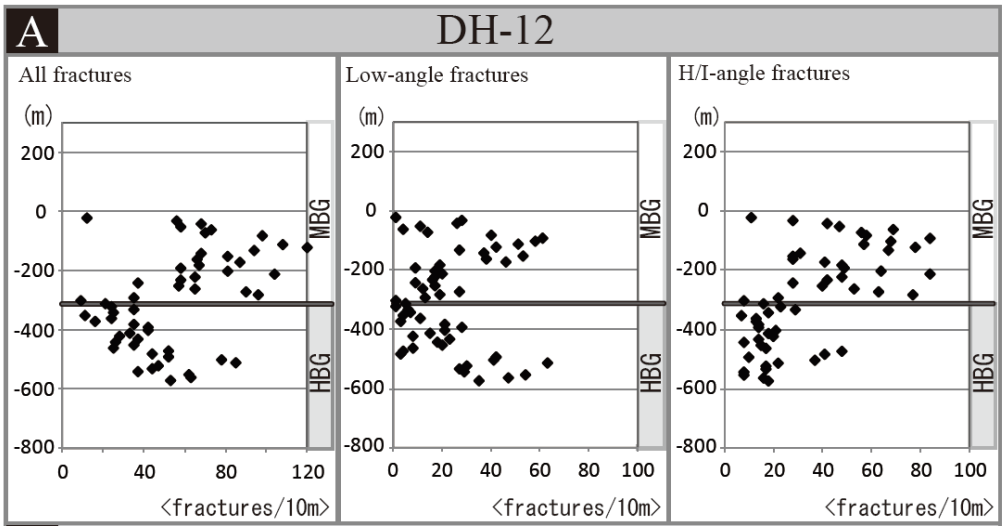


図 7　BTV を用いて得られた土岐花崗岩体の DH-12 号孔の鉛直方向（標高）に対する割れ目頻度の変化（Yuguchi et al., 2012）

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。

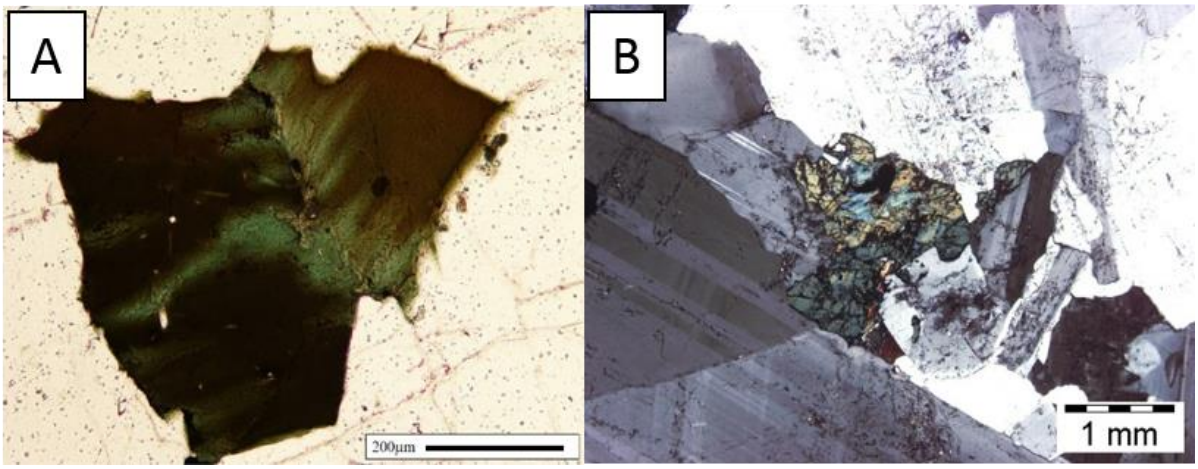


図 8　土岐花崗岩体中の緑泥石化を示した偏光顕微鏡写真

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

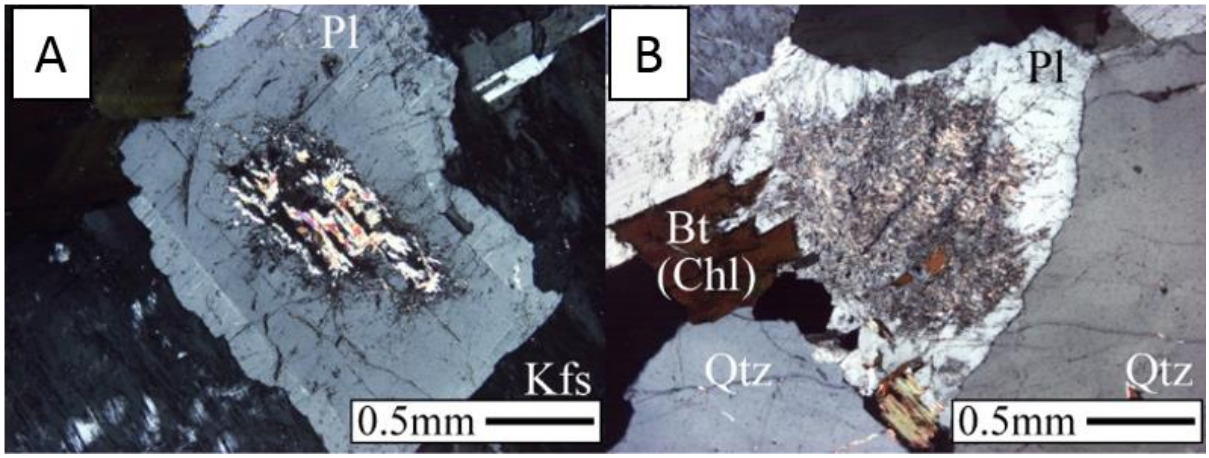


図 9　土岐花崗岩体中の斜長石の変質（ソーシュライト化）を示した偏光顕微鏡写真

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。

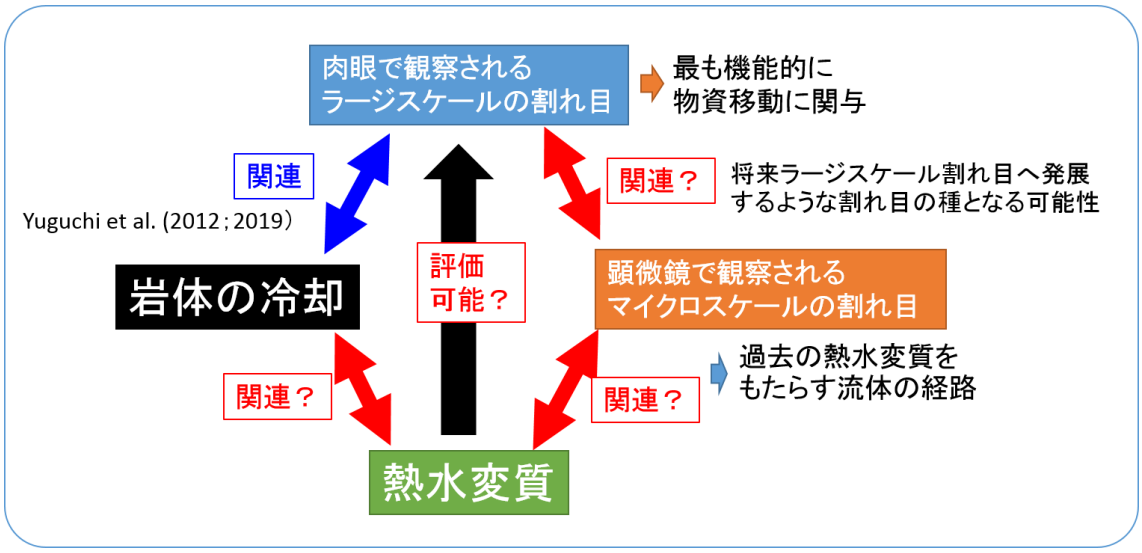


図 10　「熱水変質のパラメータ」「BTV で得られるラージスケールの割れ目」「顕微鏡サイズのマイクロスケールの割れ目」そして「岩体の冷却」の間の「関連性」の検討

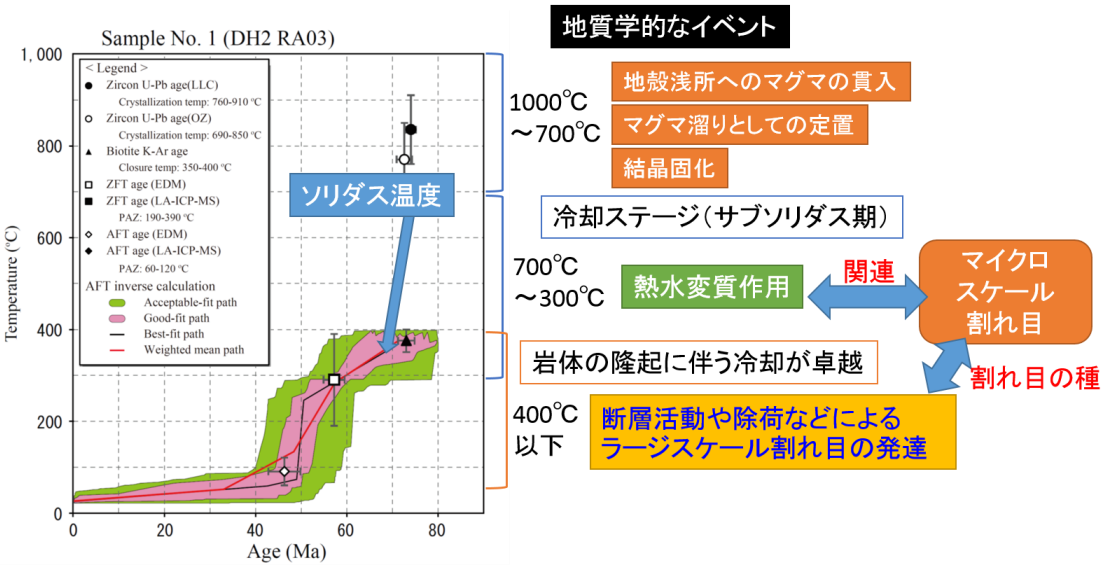


図 11　土岐花崗岩体の研究調査領域を代表する温度－時間履歴（*t-T* path）と「熱水変質」「マイクロスケール割れ目」「ラージスケールの割れ目」との関連性

3. 平成 31 年度（2019 年度）成果概要

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）が研究対象とされる。平成 31（2019）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（18 試料）とラージスケール割れ目との関連を議論した。その結果、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。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を有する。

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. 2020 年度研究実施内容

4.1 2020 年度の計画、実施方法

２０２０年度は以下のとおり実施した。

（1）熱水変質現象のパラメータの評価
提案した変質パラメータの中で、どの現象がその領域を代表する適切なパラメータなのかの評価を実施した。

（2）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
顕微鏡スケールのマイクロスケールの割れ目の分布データの収集を行い、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）の比較検討を実施した。

（3）花崗岩体中の現在の割れ目分布および将来的な割れ目発生の潜在性評価
2020 年度の実施項目（1）および（2）から花崗岩体中の現在の割れ目分布および将来的な割れ目発生の潜在性を評価する手法の検討を行った。

（4） 2020 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、委員会報告を行った。

4.2　2020 年度の成果内容

4.2.1　変質パラメータとラージスケール割れ目との関係

2018 年度報告書に記した黒雲母の緑泥石化と斜長石の変質の変質パラメータの抽出手法、2019 年度報告書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、岩石試料の変質パラメータの導出を行った。試料を代表する黒雲母の緑泥石化の変質パラメータは 0.16 から 0.67 の幅を有し、斜長石の変質の変質パラメータは 0.11 から 0.45 の幅を有する。

図 12 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。黒雲母の緑泥石化と斜長石の変質のパターンは類似する。このことは、変質パラメータが変質現象の程度を適切に評価できていることを示す。それぞれのパターンは、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。つまり、変質パラメータとラージスケール割れ目のプロットは正の相関を示す：黒雲母の緑泥石化 $R^2 = 0.41$、斜長石の変質 $R^2 = 0.39$。しかしながら、サンプル A1 は変質パラメータが低いにも関わらず、割れ目頻度は高く、この傾向から外れる。

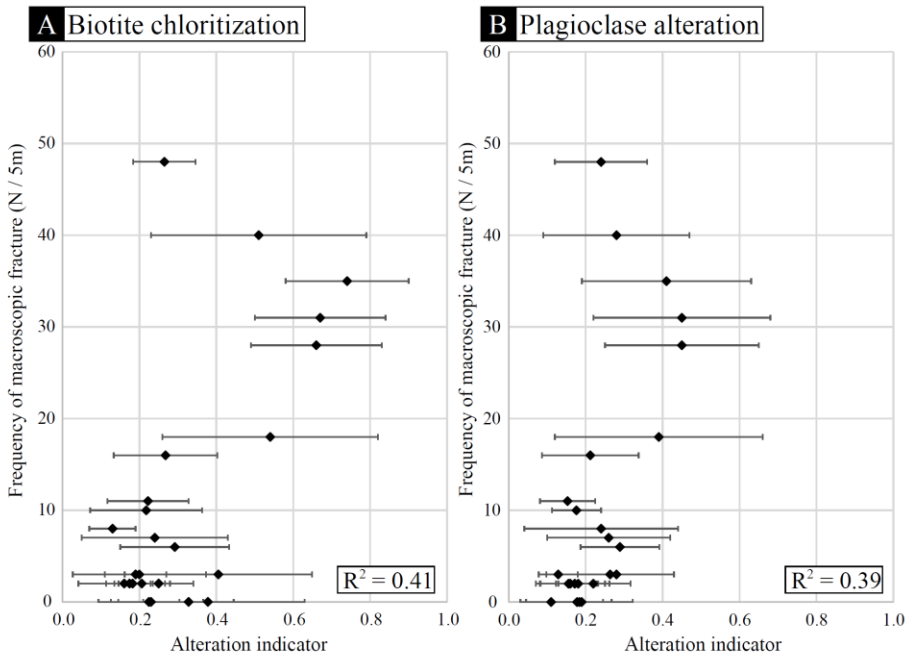


図 12　変質パラメータとラージスケール割れ目の関係

4.2.2　ラージスケール割れ目の走向・傾斜

ボアホールテレビジョン（BTV）データから 06MI03 号孔の No.A1-A13 および No.1-12 試料のラージスケール割れ目の走向・傾斜の情報を抽出した。図 13 は，大多数の試料（sample No. A2-A13 and 1-12）の走向・傾斜（A）とサンプル A1 の走向・傾斜（B）を示したシュミットネットステレオ図（下半球投影）である。大多数の試料では、低角度割れ目、NW-SE 走向の南傾斜の高角度割れ目、E-W 走向の南傾斜の高角度割れ目の 3 つの傾向の割れ目が卓越する。低角度割れ目は岩体隆起の際の徐荷により発達する（Yoshida et al., 2005）。NW-SE 走向の南傾斜の高角度割れ目は月吉断層と平行であり、E-W 走向の南傾斜の高角度割れ目は瑞浪超深地層研究所内で観察される主立坑断層と平行である。つまりラージスケール割れ目の走向・傾斜は除荷や断層などの構造運動により支配され、割れ目頻度は変質パラメータにより説明できる。

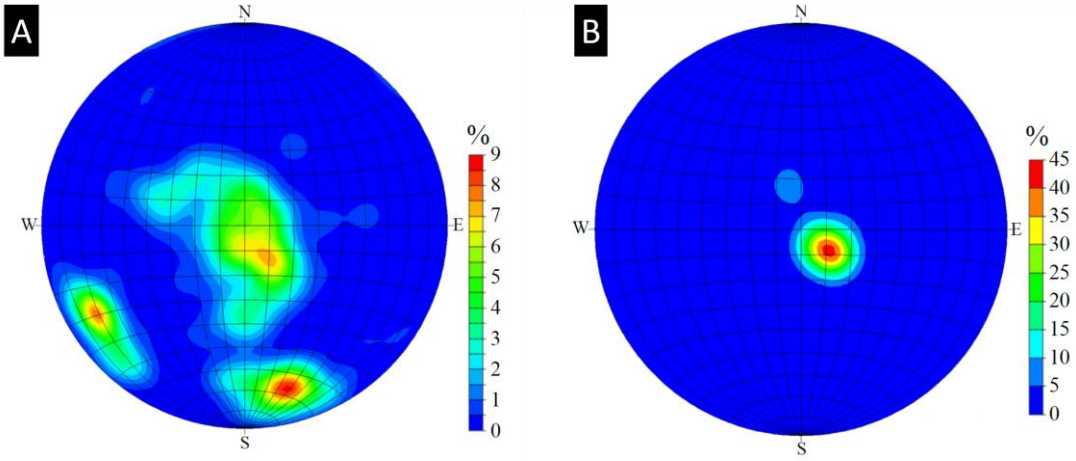


図 13　ラージスケール割れ目の走向・傾斜を示した
シュミットネットステレオ図（下半球投影）
A：サンプル No. A2-A13 and 1-12、B：サンプル No. A1

サンプル A1 の走向・傾斜は低角度割れ目が発達する。これはサンプル A1 が断層などの影響が乏しく，除荷の影響を強く受けたことを示す。サンプル A1 は深度 208.67m-213.67m の領域から採取した試料であり、サンプル中で最も浅い深度から採取したものである。また 06MI03 号孔では実際に浅部で低角度割れ目が卓越し、深部で高角度割れ目が卓越する（石橋・笹尾，2016）。このことはサンプル A1 で除荷の影響を強く受けたことと整合的で

ある。またこのことは、浅部から採取した岩石試料において、ラージスケール割れ目の頻度を除荷が支配する可能性を示す。

4.2.3　変質パラメータと Local cooling indicator

Yuguchi et al. (2012)において、割れ目の頻度分布を評価可能な local cooling indicator（LCI）という方法を提案した（LCI の概念や導出手法は Yuguchi et al. (2012)を参照）。LCI は岩体中の岩石組織であるサブソリダス組織から導出できる。図 14 は標高（深度）に対するラージスケール割れ目の頻度の変化（A）と LCI を表すサブソリダス組織の局所勾配の変化（B）を示したものである。このプロットは表すサブソリダス組織の局所勾配の低い領域（LCI が高い領域）で割れ目頻度が高く、サブソリダス組織の局所勾配の高い領域（LCI が低い領域）で割れ目頻度が低い傾向を示す。このことは LCI が割れ目頻度の分布を評価することのできる手法であることを示す。しかし LCI は割れ目頻度を数値的に表すことはできない。それに対して変質パラメータは図 12 に見せる正の相関により、ラージスケール割れ目の頻度の数値予測の可能性を示す。

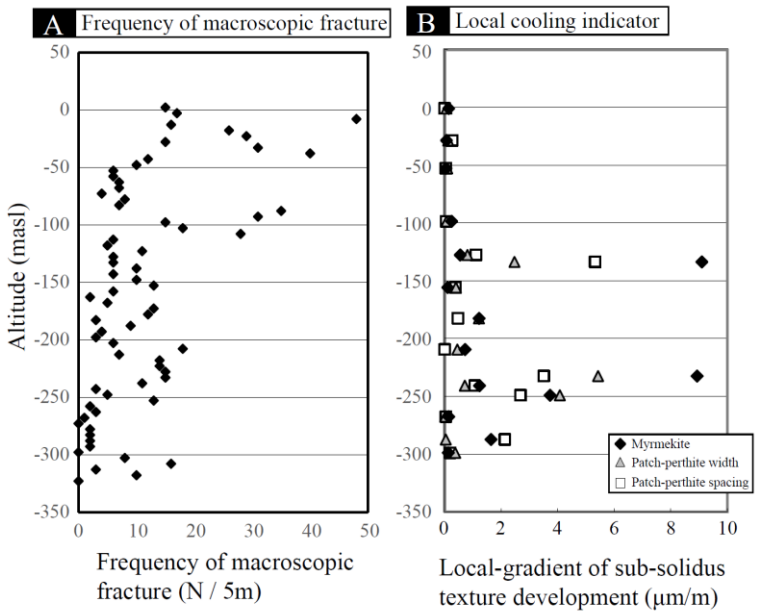


図 14　標高（深度）に対するラージスケール割れ目の頻度の変化（A）と LCI を表すサブソリダス組織の局所勾配の変化（B）

4.2.4　マイクロスケール割れ目の導出

マイクロスケール割れ目の面積を評価するパラメータとして、オリジナル鉱物（黒雲母と斜長石）と変質領域の面積比を提案する。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 15）。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（図 15）、Adobe Photoshop により黒雲母の緑泥石化を生じる粒子の周囲の領域を黒色化する（図 15A-1, 15B-1）。次に粒子全体（白色領域：緑泥石化した黒雲母と変質した斜長石）と割れ目領域（黒色領域）で二値化を行い、それぞれのピクセル数を取得する（図 15A-2, 15B-2）。

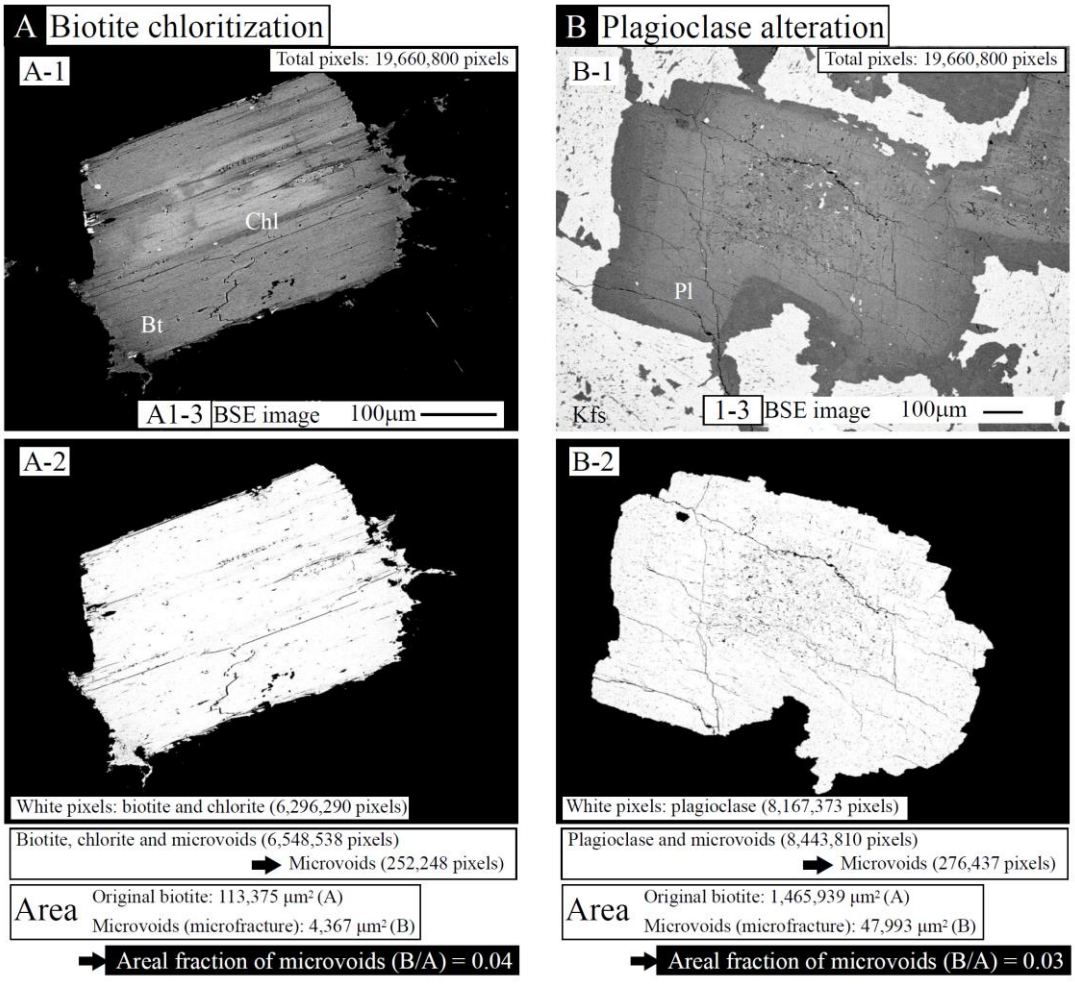


図 15　微小空隙算出のための画像解析

（A）黒雲母の緑泥石化、（B）斜長石の変質

例えば、サンプル A1-3 の緑泥石化した黒雲母では粒子全体のピクセル数は、6,548,538 ピクセルであり、微小空隙のピクセル数は 252,248 ピクセルである。これを面積に換算すると粒子全体では 113,375 μm² であり、微小空隙の面積は 4,367 μm² となる。このため粒子中の微小空隙の面積分率は 0.04（図 15A）となる。サンプル 1-3 の変質した斜長石では粒子全体のピクセル数は、8,443,810 ピクセルであり、微小空隙のピクセル数は 276,437 ピクセルである。これを面積に換算すると粒子全体では 1,465,939 μm² であり、微小空隙の面積は 47,993 μm² となる。このため粒子中の微小空隙の面積分率は 0.03（図 15B）となる。

また上記の画像解析手法に加え、偏光顕微鏡と蛍光顕微鏡を組み合わせ、マイクロスケール割れ目を捕捉する手法も構築した。

4.2.5　変質パラメータとマイクロスケール割れ目との関係

図 16 は変質パラメータとマイクロスケール割れ目の面積分率の関係を示した図である。変質パラメータとラージスケール割れ目の頻度の関係（図 12）と同様に黒雲母の緑泥石化（A）と斜長石の変質（B）と同じ傾向を示す。図 17 は試料を代表する変質パラメータの平均値とマイクロスケール割れ目の面積の平均値をプロットした図である。図 16 と図 17 の変質パラメータとマイクロスケール割れ目の面積分率の関係は、正の相関を有する。つまりマイクロスケール割れ目が卓越するほど、変質が強くなることを示す（黒雲母の緑泥石化の相関係数は R^2＝0.59：Fig. 16A と斜長石の変質の相関係数は R^2＝0.49：Fig. 16B）。つまり、このことは変質の程度がマイクロスケール割れ目の面積に支配されていることを示す。

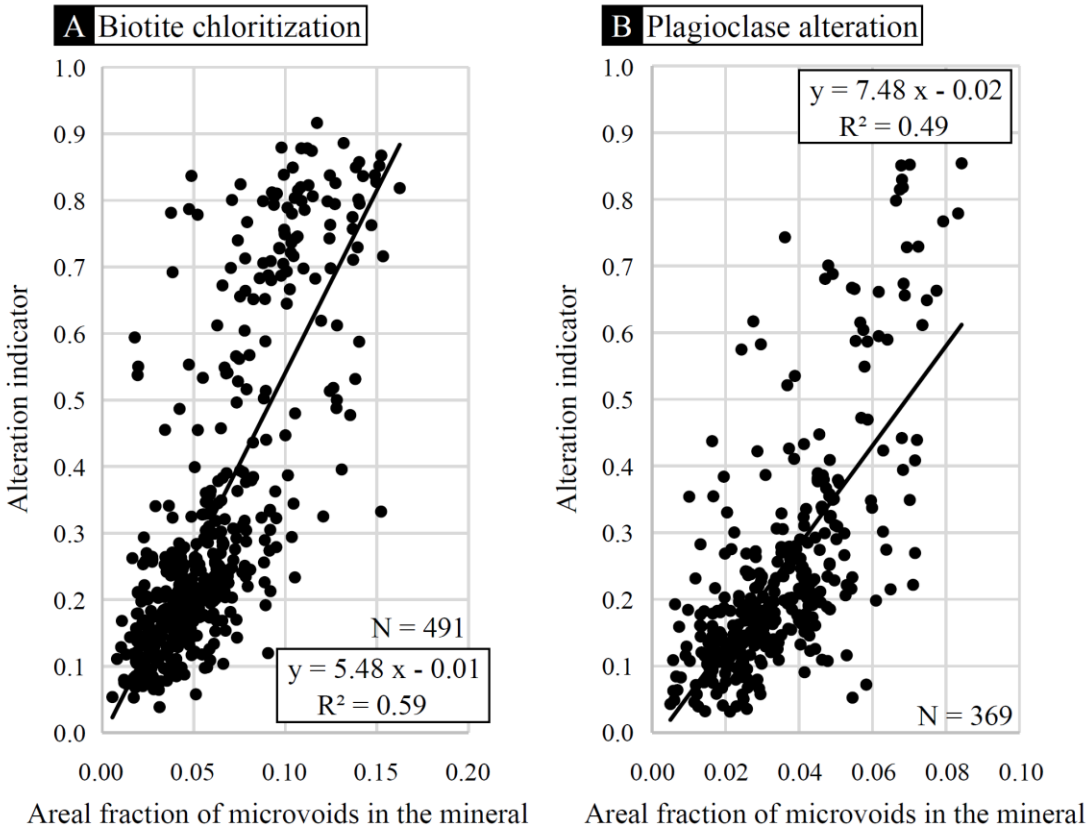


図 16　各鉱物の変質パラメータとマイクロスケール割れ目の面積分率の関係

（A）黒雲母の緑泥石化、（B）斜長石の変質

4.2.6　ラージスケール割れ目とマイクロスケール割れ目との関係

変質パラメータとマイクロスケール割れ目の面積分率の関係を示した図 17 において、ラージスケール割れ目の頻度の違いを異なるプロットで示す（割れ目頻度が 21 本/5m以上のものを黒色プロット、11-20 本/5mのものを灰色プロット、20 本/5m以下のものを白色プロット）。その結果ラージスケール割れ目の頻度の大きな試料は、変質パラメータとマイクロスケール割れ目の面積分率の高い領域にプロットされる。一方、ラージスケール割れ目の頻度の小さな試料は、変質パラメータとマイクロスケール割れ目の面積分率の低い領域にプロットされる。このことは、変質パラメータとマイクロスケール割れ目、ラージスケール割れ目の 3 者の間に関連があることを示す。つまり、変質現象とマイクロスケール割れ目を形成する要因、そしてラージスケール割れ目を生成する要因のそれぞれが関連することを示している。

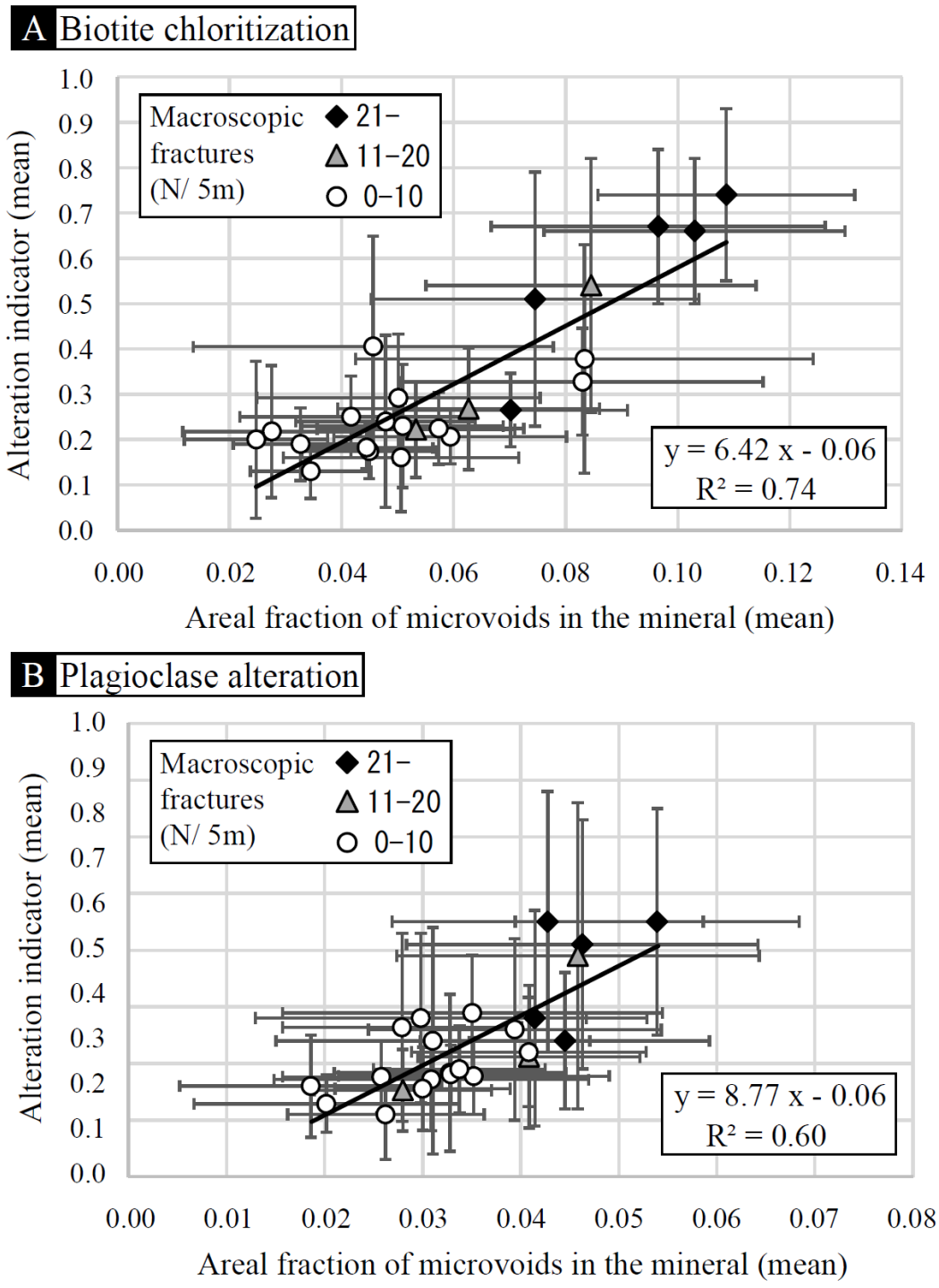


図 17　試料ごとの変質パラメータとマイクロスケール割れ目の面積分率の関係

（A）黒雲母の緑泥石化、（B）斜長石の変質

4.2.7　変質パラメータによるラージスケール割れ目分布および潜在性の推定

変質パラメータとラージスケール割れ目の頻度の正の相関（図 12）より、変質パラメータから、現在分布するラージスケール割れ目の頻度の数値的推測が可能であることを示した。また、図 17 が示す変質パラメータとマイクロスケール割れ目、ラージスケール割れ目の 3 者の間に関連は、マイクロスケール割れ目が、物質移動に大きく寄与す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を支持するものである。つまり、マイクロスケール割れ目を通路とした熱水流動により熱水変質がもたらされる。その後、このマイクロスケール割れ目を種として、除荷や断層活動によりラージスケール割れ目が発達する。変質現象は、マイクロスケール割れ目とは異なり肉眼や顕微鏡下で観察することが容易である。変質パラメータを用いることで，その領域のラージスケール割れ目の頻度を把握することが可能となる。

ラージスケール割れ目の潜在性の評価に関して、図 17 では変質パラメータとマイクロスケール割れ目の間に正の相関を有するが、それらの正の相関を有する分布の上側に、プロットが散乱する。この傾向は変質パラメータとラージスケール割れ目の関係（図 12）でも同様である。このように大きな傾向に則さないデータがしばしば観察される。現在の割れ目分布を説明できないこれらのイレギュラーなデータが将来予測のための重要な試料となる。例えば、変質パラメータとラージスケール割れ目の頻度の正の相関を示す図 12 では、ラージスケール割れ目の頻度が低い（5 本/5m以下）ものの、変質パラメータが 0.4 程度の値を持つ試料が認められる。正の相関が妥当な結果であると仮定とすると、変質パラメータ 0.4 では、おおよそ 20 本/5mの頻度を持つことが予測される。これらの試料に対して、再び STEP 1 や STEP2 で実施した物質移動メカニズムの把握や生成条件の解明をより詳細に実施することで、将来的な割れ目発生の潜在性を評価するための概念と手法が構築可能となる。

4.3　残された課題と今後の計画

上述の議論により、変質パラメータがラージスケール割れ目の頻度を評価する新たな手法となり得ることを示した。このことは放射性廃棄物の地層処分の安全評価において、割れ目分布の高詳細な推定・将来予測の実現に寄与するものとなる。また、変質パラメータとラージスケール割れ目の関係（図 12)、変質パラメータとマイクロスケール割れ目の関係（図 17）を示した図には、大きな傾向に則さないデータがしばしば観察される。現在の割れ目分布を説明できないこれらのイレギュラーなデータが将来予測のための重要な試料となる。これらの試料に対して、再び STEP 1 や STEP2 で実施した物質移動メカニズムの把握や生成条件の解明をより詳細に実施することで、将来的な割れ目発生の潜在性を評価するための概念と手法を構築する計画である。

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。

令和二（2020）年度は、①変質パラメータとラージスケール割れ目の関係、②マイクロスケール割れ目面積の導出、③変質パラメータとマイクロスケール割れ目の関係、そして④ラージスケール割れ目とマイクロスケール割れ目の関係について解明し、⑤変質パラメータによるラージスケール割れ目分布および潜在性の推定について議論を行った。

①変質パラメータとラージスケール割れ目の関係（STEP3）

変質パラメータとラージスケール割れ目の関係を明らかにした。黒雲母の緑泥石化と斜長石の変質それぞれの変質パラメータは同様の傾向を持つ（図 12）。変質パラメータの小さなサンプルではラージスケール割れ目の頻度が低く、変質パラメータの大きな試料ではラージスケール割れ目の頻度が高い。これは変質パラメータがラージスケール割れ目を評価するための指標となり得ることを示す。

②マイクロスケール割れ目の導出（STEP1）

化学組成像から画像解析手法によりマイクロスケール割れ目を含む微小空隙を評価する

手法を構築した（図 15）。

③変質パラメータとマイクロスケール割れ目の関係（STEP3）

変質パラメータとマイクロスケール割れ目の関係を明らかにした。黒雲母の緑泥石化と斜長石の変質それぞれの変質パラメータとマイクロスケール割れ目は同様の傾向を持ち、両者は強い正の相関を持つ（図 16）。このことは変質の程度がマイクロスケール割れ目の面積の大小に支配されていることを示す。このことは、変質や変成作用を扱う岩石学的な分野においても革新的な知見である。

④ラージスケール割れ目とマイクロスケール割れ目の関係（STEP3）

図 17 はラージスケール割れ目とマイクロスケール割れ目の関係も示す。ラージスケール割れ目の頻度の大きな試料は、変質パラメータとマイクロスケール割れ目ともに大きい傾向を持つ。このことは変質と、ラージスケール割れ目、マイクロスケール割れ目の 3 者の間で関連があることを示しており、マイクロスケール割れ目が、物質移動に大きく寄与す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を支持するものである。

⑤変質パラメータによるラージスケール割れ目分布および潜在性の推定（STEP4）

変質パラメータとラージスケール割れ目の頻度の正の相関（図 12）より、変質パラメータから、現在分布するラージスケール割れ目の頻度の数値的推測が可能であることを示した。つまり、マイクロスケール割れ目を通路とした熱水流動により熱水変質がもたらされる。その後、このマイクロスケール割れ目を種として、除荷や断層活動によりラージスケール割れ目が発達する。変質現象は、マイクロスケール割れ目とは異なり肉眼や顕微鏡下で観察することが容易である。変質パラメータを用いることで，その領域のラージスケール割れ目の頻度を把握することが可能となる。

ラージスケール割れ目の潜在性の評価に関して、変質パラメータとラージスケール割れ目の関係（図 12）において、正の相関に則さないデータがしばしば観察される。現在の割

れ目分布を説明できないこれらのイレギュラーなデータが将来予測のための重要な試料となる。これらの試料に対して、再び STEP 1 や STEP2 で実施した物質移動メカニズムの把握や生成条件の解明をより詳細に実施することで、将来的な割れ目発生の潜在性を評価するための概念と手法が構築可能となる。

本研究の成果は、放射性廃棄物の地層処分の安全評価において、割れ目分布の高詳細な推定・将来予測の実現に寄与するものとなる。

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.

Yoshida, H., Takeuchi, M., Metcalfe, R., 2005. Long-term stability of flow-path structure in crystalline rocks distributed in an orogenic belt, Japan. Engineering Geology, 78, 275-284.

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 ^{87}Sr / ^{86}Sr 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.

2020 年度　外部発表

【学術論文】

1. Yuguchi, T., Matsuki, T., Izumino, Y., Sasao, E., Nishiyama, T., 2021. Mass transfer associated with chloritization in the hydrothermal alteration process of granitic pluton. American Mineralogist, In press.
2. Yuguchi, T., Usami, A., Ishibashi, M., 2020. Analysis of the distribution of microfractures and micropores within granitic rock using simultaneous polarization–fluorescence microscopy. Heliyon, 6, e04815.
3. Yuguchi, T., Yagi, K., Sasao, E., Nishiyama, T., 2020. K-Ar geochronology for hydrothermal K-feldspar within plagioclase in a granitic pluton: Constraints on timing and thermal condition for hydrothermal alteration. Heliyon, **投稿中**
4. Yuguchi, T., Yuasa, H., Izumino, Y., Nakashia, K., Sasao, E., Nishiyama, T., 2020. Micropores and mass transfer in the formation of myrmekite. American Mineralogist, **投稿中**
5. Yuguchi, T., Izumino, Y., Sasao, E., 2020. Petrographic indicators of hydrothermal alteration to examine the fracture frequency distribution. Plos ONE, **投稿中**

【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方法[4)]などを用いて，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，有限要素法による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，田下凝灰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，測定の合理化を進める。

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 [4]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 年度の成果概要

2019 年度には，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。

4. 2020 年度研究実施内容

4.1 2020 年度の計画、実施方法

2020 年度の計画・実施した内容及び方法は以下の通りである。

A) 堆積岩の透水性，保水性の検討
B) 飽和度分布を求めるリチャーズ式の厳密解の導出・検証
C) 異方弾性 FEM による坑道の変形特性の把握
D) 透気現象の厳密解の導出・透気係数取得法とモンテリ岩盤研究所での現地計測への適用

次節で，それぞれの内容について述べる。

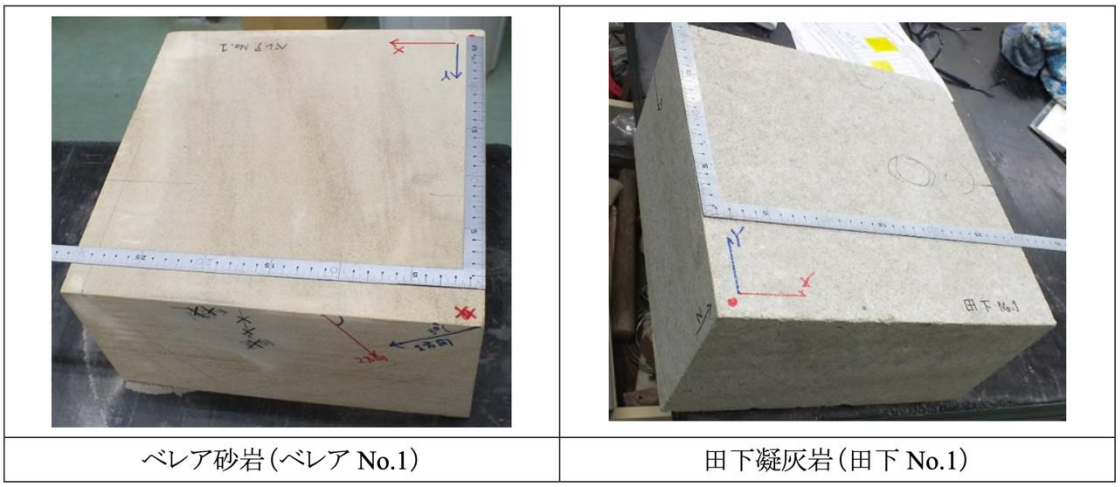
4.2　2020 年度の成果内容

A)　堆積岩の透水性，保水性の検討

2019 年の成果で飽和度の変化に伴って堆積岩の剛性が変化することがわかっている。飽和度の変化は透水性や保水性に依存するため，透水係数と水分特性曲線の評価が必要である。**表 1** の試験ケースで、ベレア砂岩及び田下凝灰岩の試料（**図 1**）に対し、層理面に水平(二方向)と直交の三方向(*X*，*Y*，*Z*)の試料を用いて，透水試験と水銀圧入ポロシメータ試験を実施して透水性と保水性の評価を行った。

表 1 透水試験と水銀圧入ポロシメータ試験の試験ケース
（X, Y 方向は層理面方向，Z は直交方向）

Case No.	試料	採取方向
1	ベレア砂岩	X
2		Y
3		Z
4	田下凝灰岩	X
5		Y
6		Z



ベレア砂岩（ベレア No.1）　　田下凝灰岩（田下 No.1）

図 1 ベレア砂岩と田下凝灰岩

- **透水試験**

フローポンプ法を用いた透水試験を実施して，堆積岩の透水性能を評価した。この試験法は供試体へ流入出する水量をフローポンプ（**図 2**）で制御し，

供試体間の水頭差を測定により透水係数を求める。フローポンプ法では透水係数 k を一般的な定水位法と同じ式で求める。

$$\mathrm{k} = \frac{QL}{Ath}$$

ここに Q, L, A, t, h はそれぞれ流量，試料長さ，断面積，時間，試料高さである。

図 2 フローポンプ

透水係数と有効拘束圧の関係を**図 3** に示す。透水係数は水の粘性に反比例するため、地盤工学会基準 [6]に従い 15°C 時の透水係数 (k_{15}) として結果を示す。ベレア砂岩の透水係数 k_{15} は、層理面方向 X 方向で 2.5×10^{-7}m/s，Y 方向で 3.5×10^{-7}m/s，層理面の直交 Z 方向では 5×10^{-8}m/s となっている。Z 方向が他の方向の 1/5 以下と小さく，X と Y 方向はほぼ同程度である。ベレア砂岩には明瞭な層理面(やや茶褐色の薄層)が認められるので粒径の異なる(細粒の)粒子が層状に堆積していると考えられる。なお，有効拘束圧による透水係数の変化は少ない。一方，田下凝灰岩の透水係数は、層理面 X 方向が 3.5×10^{-11}m/s，Y 方向で 8×10^{-11}m/s，直交方向 Z 方向で 3×10^{-11}m/s である。ベレア砂岩と比べ，田下凝灰岩には透水係数の異方性がほとんど見られない。田下凝灰岩は粘土鉱物が含まれるため、間隙率は 30%程度と大きいにも関わらず透水係数は低い。有効拘束圧が大きくなると透水係数が低下する傾向がみられる。

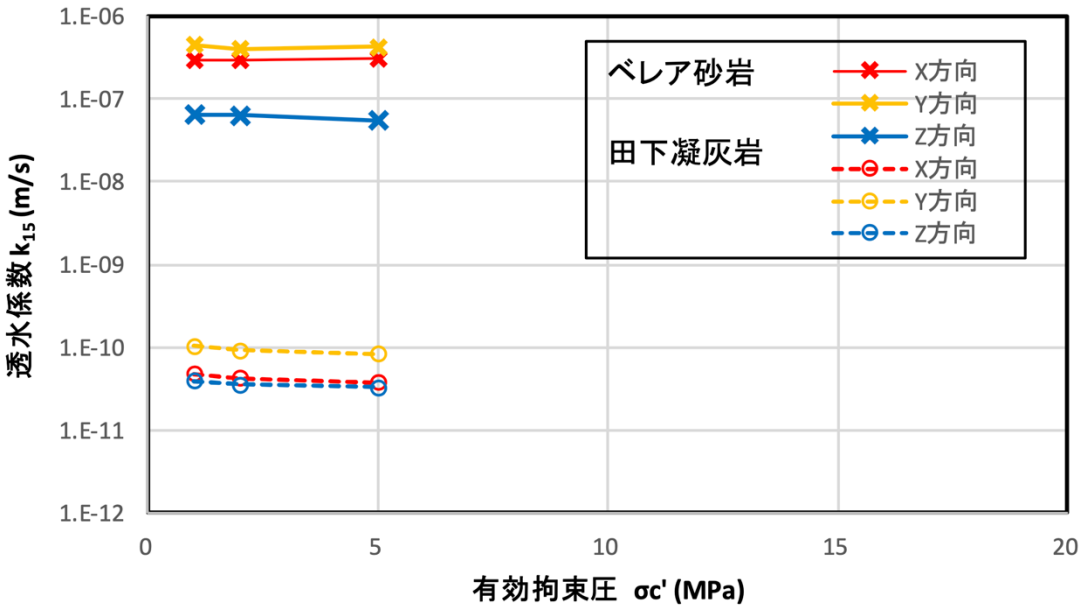


図 3 透水係数と有効拘束圧の関係

- **保水性試験**

保水性は飽和度とサクションの関係（水分特性曲線）により記述される。ここでは，水銀圧入ポロシメータ試験により求める。この試験は、乾燥状態の試料に対して圧力を作用させた上で水銀を圧入し、等方圧力と水銀の圧入量から試料の間隙径の分布を求める方法である。非ぬれ(乾き)性の性質を示す水銀を間隙内に浸入するためには，圧力を作用する必要がある。圧力は間隙の径に反比例するので，段階的に浸入圧力を上昇させ，間隙への浸入量を計測することで，浸入圧力に応じた間隙径の量を求められる。水銀圧入圧力 P と間隙半径 r の関係は，

$$r = \frac{2\gamma_{Hg}\cos\theta}{P}$$

ここでは，表面張力$\gamma_{Hg} = 480\text{mN/m}$，接触角$\theta = 141.3°$とする。この式から間隙径の分布を求める。また以下の式から，水銀の圧入圧力を毛管圧力に換算できる。

$$\frac{P_{c(water-air)}}{P_{c(Hg)}} = \frac{\gamma_{(water-air)}\cos 0°}{\gamma_{(Hg)}\cos 140°} \approx \frac{1}{5}$$

水-空気の界面に働く表面張力は 15° C では 73.48mN/m であり，上式の右辺は 0.196 であり概ね正しい。飽和度は次式で決定する。

$$S_r = \frac{CI(P)}{CI(P_{max})}$$

ここに，CI(P)は圧力 P における水銀圧入量(ml/g)で，CI(Pmax)は最大の水銀圧入量である。**図 4** には水銀ポロシメータ試験で用いた供試体を示す。

ベレア砂岩の供試体

田下凝灰岩の供試体

図 4 水銀ポロシメータ試験の供試体

試験結果の一覧を**表 2** に示す。水銀圧入試験では低圧の測定結果から試料体積を計測でき、間隙体積との比率から間隙率を測定出来る。得られた間隙率はベレア砂岩で 19%程度、田下凝灰岩で 23~30%であり，既往の実験結果と調和する。

表 2 水銀圧入試験の結果一覧

試料		試料重量 (g)	間隙体積 (mL/g)	間隙径分布の中央値 (μm)	間隙径分布の最頻値 (μm)	間隙率 (%)
1	ベレア No.1_X 方向	1.902	0.092	11.6	14.6	19.4
2	ベレア No.1_Y 方向	2.036	0.089	11.1	14.7	19.0
3	ベレア No.1_Z 方向	2.022	0.089	10.6	14.3	19.1
4	田下 No.1_X 方向	1.67	0.156	0.34	0.88	27.4
5	田下 No.1_Y 方向	1.841	0.119	0.62	1.16	22.8
6	田下 No.1_Z 方向	1.623	0.176	0.5	1.09	30.0

図 5 に水銀圧入試験から得られた、各試料の間隙径分布を示す。横軸は間隙径(対数)、縦軸は体積比率である。ベレア 砂岩の間隙径分布は 10μm 付近に鋭いピークを持つ。一方、田下凝灰岩の間隙径分布は 0.1μm ~3μm 付近になだらかなピークを持つ。**図 6** に得られた水分特性曲線を示す。飽和度が高い位置で、飽和度はほとんど変化せずに毛管圧が上昇する。

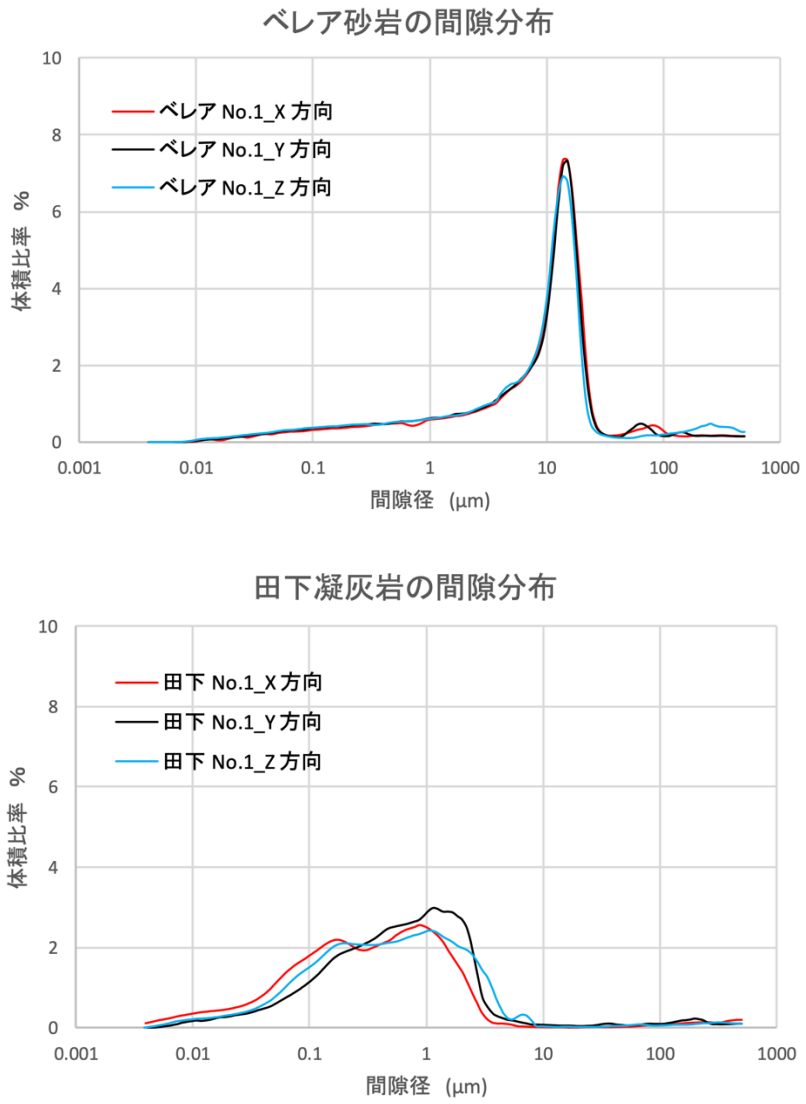


図 5 間隙径分布

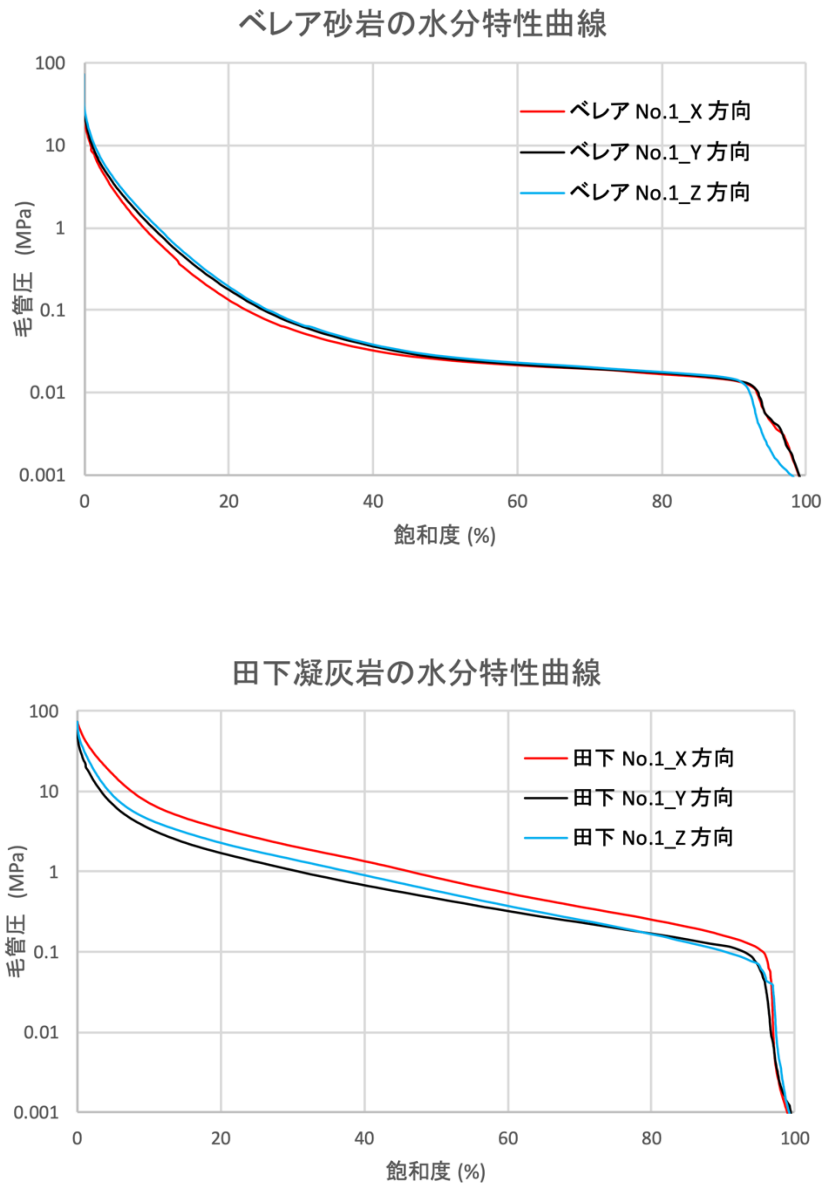


図 6 水分特性曲線

B) 飽和度分布を求めるリチャーズ式の厳密解の導出・検証

岩盤が乾燥あるいは浸水によって含水変化は非一様に生じるが，次のリチャーズ式に従う。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K\left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1\right)\right]$$

この式は非線形偏微分方程式であり，一般に厳密解が求められない。数値解ならば得られるが，条件によって非常に不安定になることが指摘されている。

本研究では，二つの条件を仮定することでリチャーズ式の厳密解を求める。一つ目は，透水係数 K が座標に依らないことである。

$$\frac{\partial K}{\partial z} \approx 0$$

この条件は，均質な地層を想定する地層処分においては妥当と考えられよう。二つ目の条件は水分拡散係数がコンスタントなことである。

$$D = K\frac{\partial \psi}{\partial \theta} = \text{const.}$$

この式は水分特性曲線の傾きが定数とした想定である。曲線の傾きが急変する乾燥，飽和状態では適用が難しいが，本研究で対象とする堆積岩の剛性変化は飽和度 80 - 90%で生じ，**図 6** によれば，水分特性曲線の傾きは一定に近い。そのため，無理の無い仮定であろう。

これらの条件をリチャーズ式に代入し，有効飽和度と体積含水率の関係を結べば，次の熱伝導方程式に帰着する。

$$\frac{\partial S}{\partial t} = D\frac{\partial^2 S}{\partial z^2}$$

初期の飽和度 S_i, 収束する飽和度を S_w として, 初期条件を以下で考慮する。

$$S(z,0) = \frac{S(z,0) - S_w}{S_i - S_w} = 1$$

続いて境界条件について述べる。リチャーズ式の厳密解を検討する既往検討でも同様に熱伝導方程式に帰着する検討が多いが，一般には断熱境界を用いられている。一方で，実際には気相と固相の相互の水分のやりとりが生じるため，断熱境界に比べ水分量の変化が滑らかな熱伝達境界の方が適切と考えられる。よって本研究では，次のように境界条件を考慮する。

$$\frac{\partial S(0,\mathrm{t})}{\partial \mathrm{z}} = 0$$

$$-k\frac{\partial S(\pm L,t)}{\partial z} = hS$$

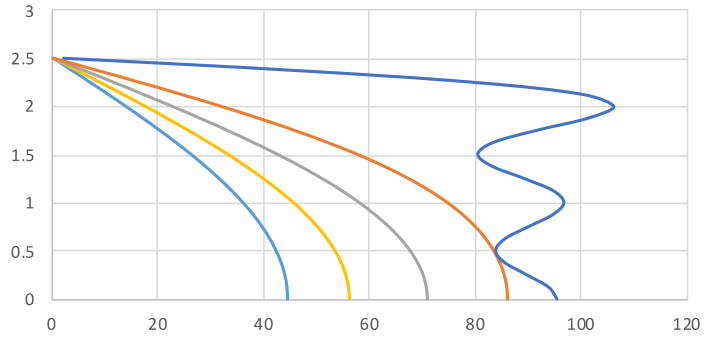
以上の条件を考慮して，変数分離を経て一般解を求め，フーリエ級数を用いて特解を求めれば以下の厳密解が得られる。

$$S(z,t) = S_w + (S_i - S_w)\sum_{n=1}^{\infty}\frac{4\,sin\,\beta_n}{sin(2\beta_n) + 2\beta_n}(cos\,\beta_n\,X)e^{-\beta_n^2 F_o}$$

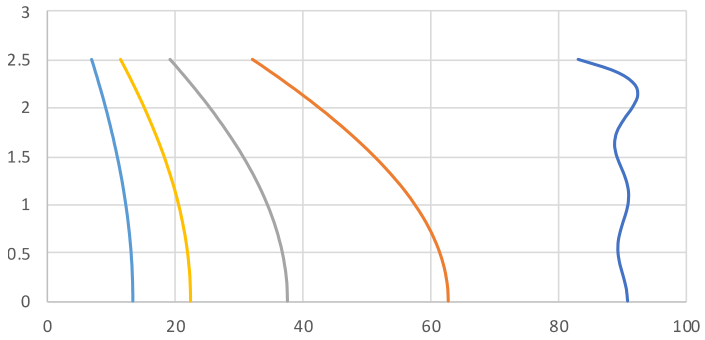
ここに，フーリエ数$F_o = \frac{kt}{L^2}, X = \frac{x}{L}$ である。β_nは次の超越方程式の解なので，陰解法で決定する。

$$\frac{\beta_n k}{Lh} = cot\,\beta_n$$

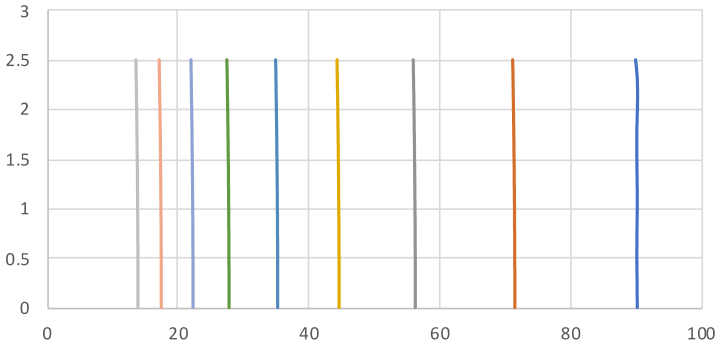
熱伝達境界を用いると，様々な境界条件を表現可能である。**図 7** には断熱，熱伝達，一様の条件で計算した結果を示している。



(a) 断熱境界　(h=1)



(b) 熱伝達境界　(h=0.0419)



(c) 境界境界　(h=10^{-5})

図 7 境界条件ごとの飽和度と深さの関係
（縦軸：深さ（0 が深部，値が大きいほど表層に近づく），横軸：飽和度）

ここで，方法の妥当性を検証するため，筆者らの行ってきた乾燥収縮実験で

測定した飽和度変化を厳密解が表現できるかを図 8 に議論する。このように，室内要素試験の結果を上手に表現できる。

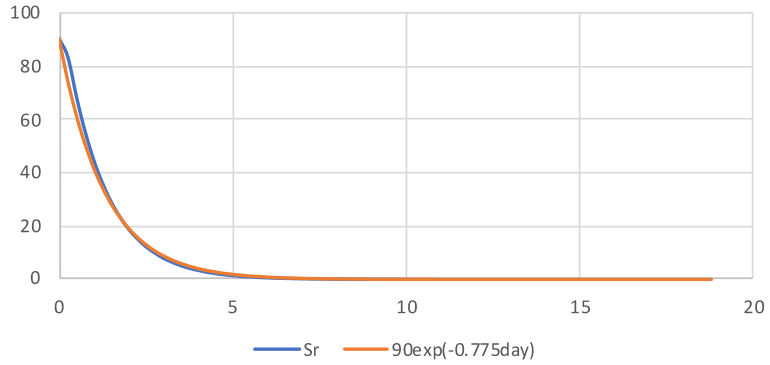


図 8 飽和度と時間（日）の関係
（縦軸：飽和度，横軸：日，オレンジ：実験データをフィットした関数）

C) 異方弾性 FEM による坑道の変形特性の把握

筆者らの室内乾燥変形実験の結果によれば，飽和度が 80-90%程度の時に主ひずみ方向の回転が急激に生じ，変形特性が変化している（**図 9**）。ここでは堆積岩の変形異方性のモデル化に用いられる面内等方弾性体を用いて，剛性の変化を次のパラメータの変化により表現する。

$$\alpha = \sqrt{\frac{E_x}{E_z}} = \frac{\nu_x}{\nu_z} = \frac{G_x}{G_z}$$

ここでは，x 方向は層理面方向，z はその直交方向であり，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。$\alpha = 1.0$ では等方，$\alpha < 1.0$ ならば層理面の剛性＜直交方向の剛性，$\alpha > 1.0$ ならば層理面の剛性＞直交方向の剛性である。このパラメータの変化は異方剛性の主軸の変化を模擬できる。よって，αを変化させた異方弾性 FEM 解析を行い，含水変化に伴って異方性の主軸が回転する状況の坑道の変形特性が比較できる。

図 10 には FEM の解析領域と境界条件を示している。荷重境界には深度 300m を想定して，6MPa の圧力相当の荷重を作用させた。層理面は水平として，無支保，覆工コンクリートやインバートは考慮していない円形断面のトンネルを想定した。飽和度が一様になる条件を想定するため，解析領域はトンネル径に対して 3 倍程度の領域を用いている。FEM 解析に用いた解析コードは著者らが開発したものを用いている。この解析コードは要素試験のシミュレーションで正解を計算可能なことを確認済みである。

図 11 には計算した変位ベクトルの大きさをコンターで示している。このよ

うに変形異方性が異なることで坑道の変形が全く異なってくることがわかる。

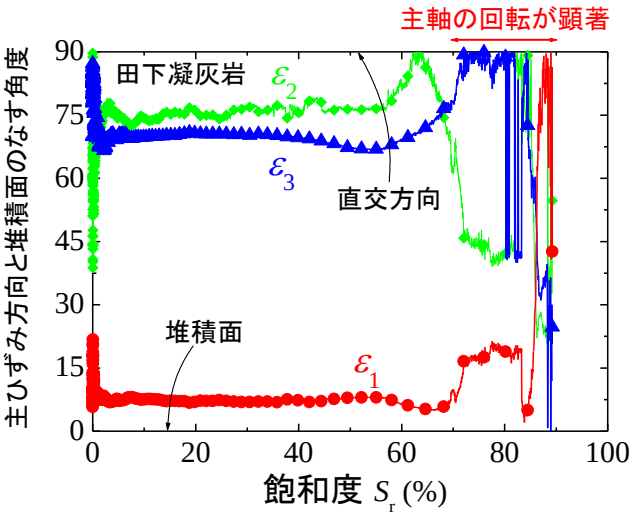


図 9 飽和度と異方性主軸の回転

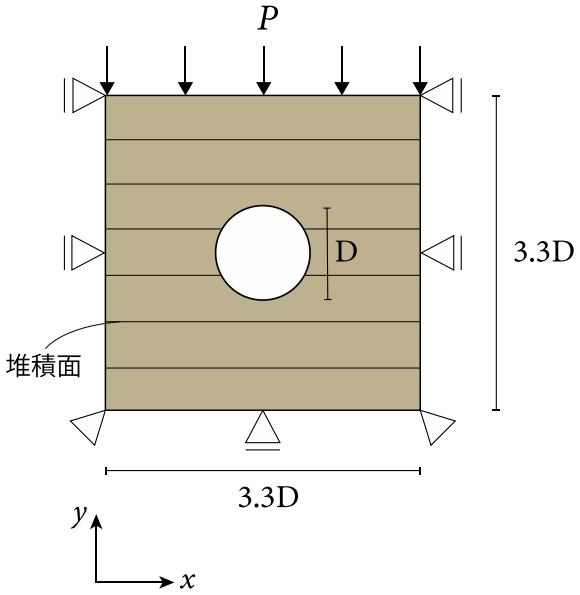
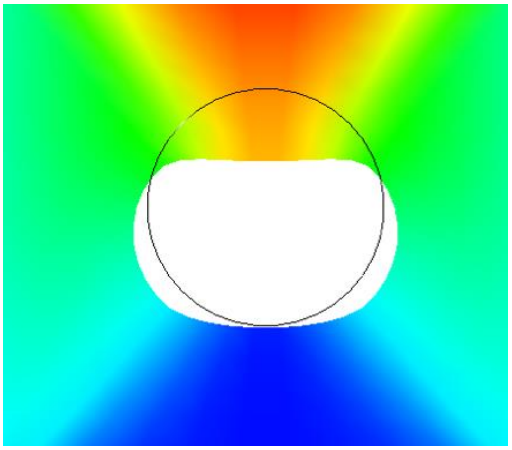
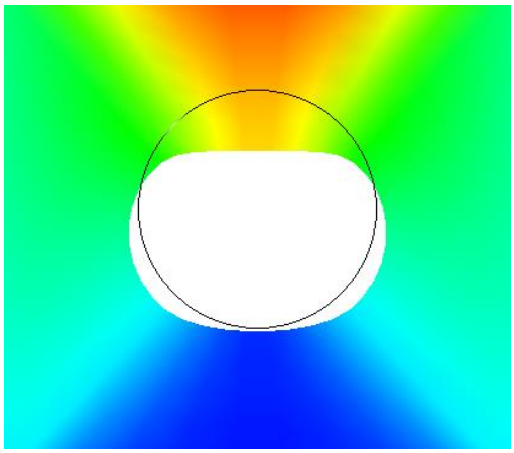


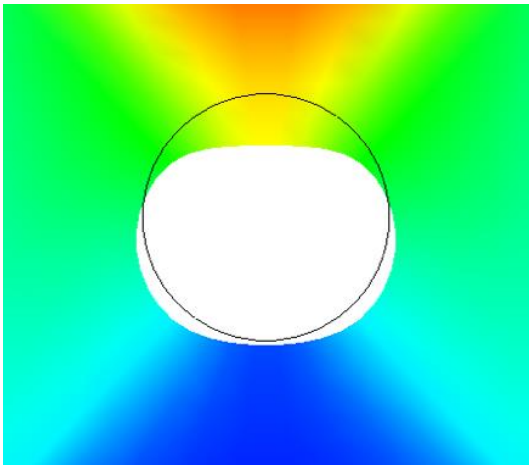
図 10 FEM の解析領域



(a) α = 0.81



(b) α = 1.0



(c) α = 1.3

図 11 変位ベクトルのコンター

D) 透気現象の厳密解の導出・透気係数取得法とモンテリ岩盤研究所での現地計測への適用

埼玉大岩盤研究室のグループでは，モンテリ岩盤研究所で岩盤内の透気現象の現地計測を進めてきた。ここでは，透気の支配方程式を線形化して厳密解を求め，固有透気係数を特定する方法を示す。一次元透気の支配方程式は以下の非線形偏微分方程式である。

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{K}{2\lambda\mu}\frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2}$$

境界の差圧が大きくなければ，$P^2 \approx \frac{P_0+P_l}{2}P$と線形化しても影響が小さい。この式は次の線形熱伝導方程式に帰着する。

$$\frac{\partial P}{\partial t} = G\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}$$

ここに，$G = \frac{K(P_0+P_l)}{4\lambda\mu}$ である。上で導いた飽和度分布の厳密解と異なり，無限遠方での条件設定も可能にするため，次のように変数変換する。

$$\eta = \frac{\mathrm{x}}{2\sqrt{\mathrm{Gt}}}$$

そうすると，線形熱伝導方程式は次の変数係数二階同次微分方程式になる。

$$\frac{d^2P}{d\eta} + 2\eta\frac{dP}{d\eta} = 0$$

これを次の境界条件で解く。

$$x = 0 \quad (\eta = 0),\ P = P_0$$

$$x = l \quad \left(\eta = \alpha = \frac{l}{2\sqrt{Gt}}\right),\ P = P_l$$

変数分離法，積分を繰り返すと次の厳密解が得られる。

$$P = (P_l - P_0)\frac{\mathrm{erf}(\eta)}{\mathrm{erf}(\alpha)} + P_0$$

ここに誤差函数$\mathrm{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-t^2}\,dt$である。

直線上に並んで位置する 3 点 $(x = 0, l/2, l)$ の計測データから厳密解を用いて分析する方法を示す。なお，中間位置は任意で 良いので，$x = l/2$ でなくても良い。3 点のうちの端点の気 圧データ P_0, P_l より中間位置の気圧 P を推定する方法を，まず述べる。上の厳密解は 一定圧の境界条件を想定するが，坑道入口の開閉や四季の気候変動などで現地計測のデータは時系列で変

化する。微小時間 Δt あたりの気圧変化 ΔP を次のように差分方程式にする。

$$\Delta P = (\Delta P_l - \Delta P_0)\frac{\mathrm{erf}(\Delta \eta)}{\mathrm{erf}(\Delta \alpha)} + \Delta P_0$$

n 番目のサンプリングデータを n-1 番目のデータを用いて次のように計算する。

$$P_n = P_{n-1} + \Delta P$$

続いて，誤差函数のテイラー展開より，1 次の項までを考えて陽に固有透気係数を求めると以下のようになる。

$$K = \frac{\lambda \mu}{P_0 - P_l}\frac{l^2}{2\Delta t}\frac{8\dfrac{\Delta P - \Delta P_0}{\Delta P_l - \Delta P_0} - 1}{24\dfrac{\Delta P - \Delta P_0}{\Delta P_l - \Delta P_0} - 12}$$

図 12 にはモンテリ岩盤研究所での現地計測の様子を示している。それぞれのボーリング孔で計測した気圧変動のデータを用いて, ここで導いた厳密解が適用可能か調べる。**図 13** には浅い位置と深い位置のデータを用いて中間の位置のデータを分析した結果を示す。概ねの挙動がうまく表現されていることがわかる。続いて提案する方法で固有透気係数を特定したものを**図 14** に示す。得られた値は 10^{-14} – 10^{-11} 程度である。

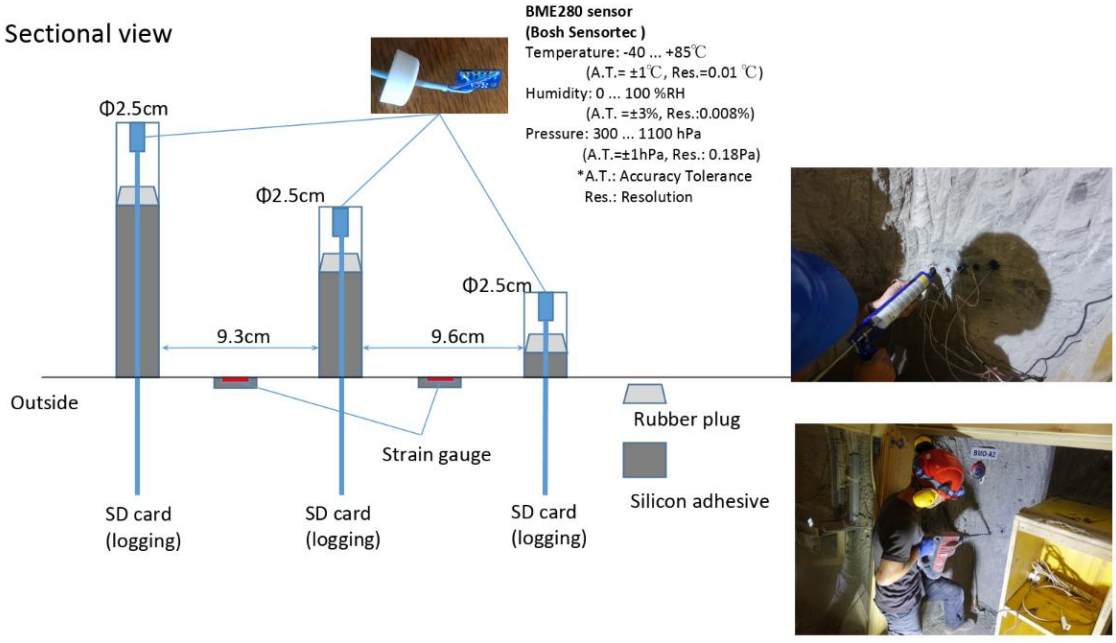


図 12 モンテリ岩盤研究所での現地計測

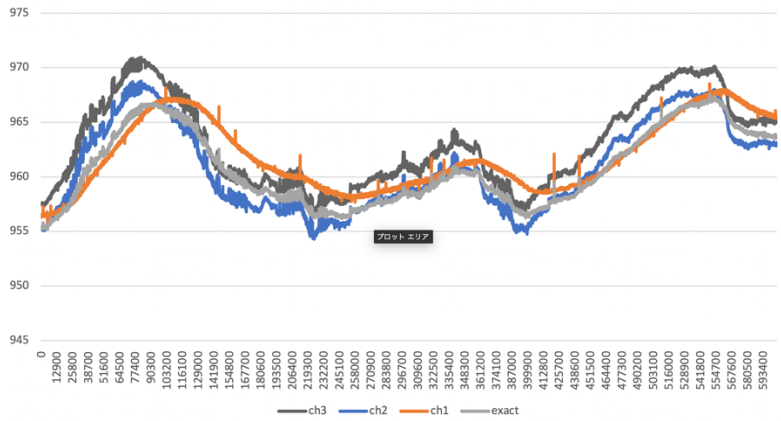


図 13 現地計測と厳密解を用いたシミュレーションの比較
（縦軸：気圧，横軸時間）

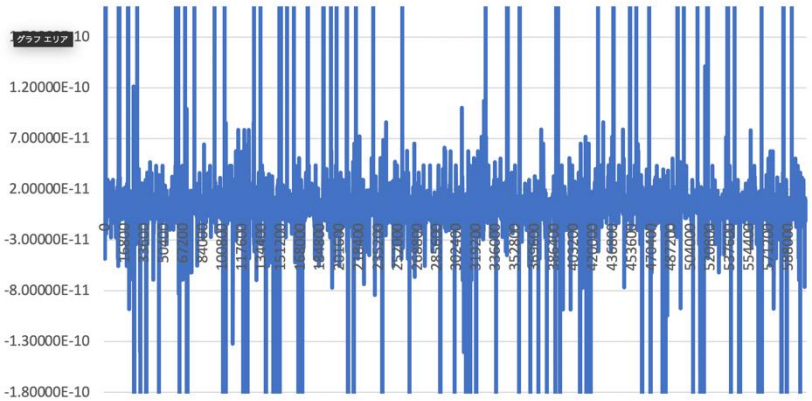


図 14 固有透気係数と時間(秒)の関係

ここで，Taylor による透水係数 k_w と固有透気係数 k_a の関係は次のように表せる。

$$k_w = K\frac{g}{\nu_w}$$

$$k_a = K\frac{g}{\nu_a}$$

ここに，重力加速度 g と水と空気の動粘性係数 ν_w と ν_a である。これらを連立すれば，

$$k_w = \frac{\nu_a}{\nu_w}k_a$$

ここに，$\nu_w = 1.004 \times 10^{-6}$ m^2/s，$\nu_a = 15.01 \times 10^{-6}$ m^2/s なので，不飽和の透水係数としては，k_w=6.7×10^{-16} - 10^{-13} である。既往研究の値とほぼ同程度あるいは小さい値になる。飽和条件の透水係数よりも小さい値を示すのは，不飽

和では流れがほぼ生じないからであり，妥当と考える。**図 3** の凝灰岩や砂岩の透水係数と比較すると，年代の古い泥岩質の地層であるモンテリ岩盤研究所では，**図 3** よりも小さい透水係数となっている。

5. まとめ

本研究は，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いる。目的の達成のため，今年度は，次の項目を実施した。

A) 堆積岩の透水性，保水性の検討
B) 飽和度分布を求めるリチャーズ式の厳密解の導出・検証
C) 異方弾性 FEM による坑道の変形特性の把握
D) 透気現象の厳密解の導出・透気係数取得法とモンテリ岩盤研究所での現地計測への適用

その結果，次の成果を得た。

A) 透水性の高いベレア砂岩と低い凝灰岩を用いてフローポンプ式の透水試験を実施した。ベレア砂岩では 10^{-7} 程度の透水係数であるのに対して，凝灰岩では 10^{-11} 程度の値を示すことを確認した。
B) 処分坑道の坑壁内部の飽和度は，乾燥が生じる面から岩盤の内部に向かって非一様に分布する。本研究では，土壌水分量の変化を表す非線形偏微分方程式（リチャーズ式）に現地の状況を反映する条件を考慮することで熱伝導方程式になることを示した。既往検討では，境界が特定の値であることを仮定するもの（断熱境界）が多いが，実際には，水分量が徐々に逸散する条件が好ましい。本研究では，熱伝達境界を導入した厳密解を導出するとともに，乾燥収縮実験のデータを精密に表現できることを示した。
C) 飽和度に応じて変化する異方弾性によって坑道に与える影響を検討するため，簡易に異方性の主軸の回転を表現できるパラメータを導入し，FEM 解析を実施した。その結果，異方剛性の変化によって坑道の変形特性は明確に変化することを示した。
D) 線形化した透気の支配方程式の厳密解を用いて，モンテリ岩盤研究所での現地計測結果をシミュレートする方法を提案するとともに，不飽和透水係数を特定する新しい方法を提案し，妥当性を確認した。

謝辞：
埼玉大学環境社会デザイン学科の地圏システムグループに所属する学生には本研究の遂行に貴重な時間を割いてご協力いただいた。特に，リチャーズ式の厳密解導出には，富樫研究室の卒研生である水尾華月氏の多大なご協力があった。岩石試料の力学的性質の検討には，同学科の技術職員である畠山健 氏と同研究室卒研生の佐藤晴海氏にご協力頂いた。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) 地盤工学会：低透水性材料の透水試験方法，JGS0312-2018.

2020 年度　外部発表

【学術論文】

1. Togashi Y, Imano T, Osada M, Hosoda K & Ogawa K (2021). Principal strain rotation of anisotropic tuff due to continuous water-content variation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 138.
2. Togashi Y., Kikumoto M., Tani K., Hosoda K. & Ogawa K (2021). Influence of end restraints on strain responses of anisotropic tuff during triaxial compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. (under review)
3. Togashi Y., Kikumoto M., Tani K., Hosoda K. & Ogawa K (2021). Method for the determination of 12 parameters of orthotropic elasticity in rock masses by three uniaxial compression tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (under review)

【口頭発表】

1. Mizuo K., Togashi Y. & Osada M. (2021). Exact solution of Richard's equation using heat transfer boundary and application to dry-induced deformation behavior of Tage tuff. Proc. RMEGV, (submitted)
2. Togashi Y., Iguchi S., Osada M. & Kawanoue R. (2021). Numerical method of tunnel face pressure estimation considering progressive failure due to excavation. Proc. EUROCK 2021, (Abstract accepted)
3. Togashi Y., Imano T. & Osada M. (2021). Deformation characteristics of sedimentary rock due to continuous changes of moisture content in wetting process. Proc. ACUUS2020, (accepted)
4. 井口翔太，富樫陽太，長田昌彦，川之上諒 (2021). 崩壊の進行性を考慮した切羽前方土圧理論と実験的検証. 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 139-143.
5. 佐藤晴海，富樫陽太，菊本統，谷和夫，細田光一，小川浩司 (2021). 三回の一軸試験による岩盤の直交異方弾性の特定方法. 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 91-96.
6. Togashi Y., Osada M. & Yamabe T. (2020). Rotation of three principal strains of tuff during drying shrinkage. Proc. EUROCK 2020 (7pages).

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を用いることにより、地下深部環境の形成や核種移行に及ぼす微生物影響の実態が明らかになりつつある。本報告書では最初に、地下研究所関連研究の成果と共に、処分場選定の調査で技術的な課題について言及する。次に、地下深部微生物研究の最新成果を、地層処分研究に適用することにより、技術的な問題が解決される可能性について紹介した後、本研究で開発してきた高圧培養技術の成果と、地層処分事業における重要性について説明する。

1.1. 地下研究所関連研究の成果と処分場選定の調査技術的課題

1.1.1. 瑞浪超深地層研究所における研究事例

岐阜県瑞浪市に建造された白亜紀の土岐花崗岩を主対象にした地下研究所に関連した研究により、地下施設建造による影響で、異なる深度の地下水が混合して、ベースラインと呼ばれる建造前の状態から大きく逸脱することが明らかとなった（Suzuki et al. 2014）。この擾乱は、亀裂系水みちが発達する高密度割れ目帯(highly fractured domain: HFDB)で顕著であるが、亀裂密度が低い低密度割れ目帯(sparsely fractured domain: SFDB)では立坑掘削の影響を受けづらいことも判明している。概要調査で想定される地上からの掘削による地下環境特性の把握に関して、精密調査段階での擾乱が顕著な高密度割れ目帯のような岩体が重要である。高密度割れ目帯は地下水が毎分数リットル湧水する一方で、低密度割れ目帯の岩盤からの湧水は毎分数 100 ml 程度である。この低い湧水速度では、地上からの調査では掘削による汚染の影響を、地下水のくみ上げにより排除するのが技術的に困難である。そのため、岩石コアでの調査技術が概要調査時にも必要となる。岩石コアから深部地質環境を調査する技術の必要性は古くから認識されているが、亀裂系岩体の掘削では、掘削流体が岩芯まで到達する懸念から研究開発が遅れており、浸漬法による地下水主要成分の特性把握が行われている程度であった。

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 を用いて重点的に行われてきた。図 1.1.1.1 に水理と生物地球化学特性を図示するが、高密度割れ目帯では微生物によるメタン酸化が、低密度割れ目帯では微生物によるメタン生成を示すデータが得られている（Ino et al. 2016, Ino et al. 2018）。これらの特徴は、地下研究所でしか採取できない高品質な地下水で可能になるメタゲノム解析によっても支持された。火成岩のような元来は高温の岩体で、光合成由来の有機物を含まない地下深部環境では、酸化還元状態は形成年代の若い岩体では、高温での岩石—水反応による還元剤の生成量に支配される。しかし、年代が古くなると微生物代謝も重

要な役割を果たすようになるが、その代謝活性は低いと一般的に考えられている。このような酸化還元緩衝能力の低い岩体では、微生物代謝を定量的に把握することが、地下施設建造により擾乱された酸化的条件から還元的なベースラインに回復するかを予測する上で重要な科学的根拠である。

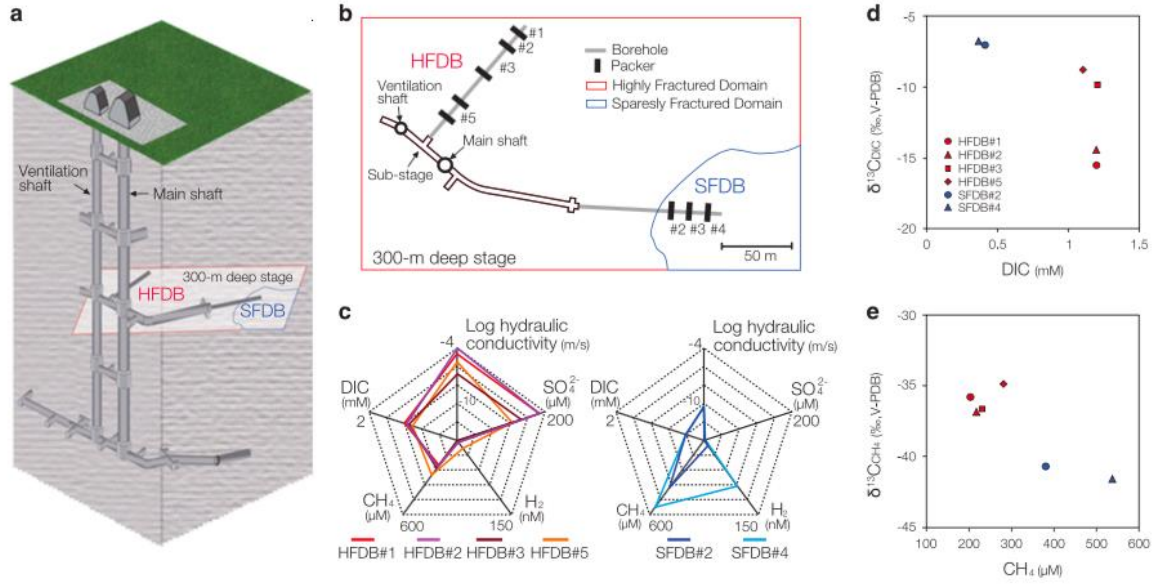


図 1.1.1.1 瑞浪超深地層研究所深度 300 メートルのステージの特徴。

(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、 Ino et al. (2018) から引用、(d および e) DIC とメタン濃度の同位体比。

1.1.2. 幌延深地層研究所における研究事例

幌延深地層研究所周辺は主に声問層が露出し、その下部には稚内層が分布する。稚内層はオパール A からオパール CT への相転移を伴い、埋没温度が 30–60°C 程度である(Aoyagi and Kazama, 1980)。地温勾配から最大埋没深度は 800–1,100 m と推定される（福沢, 1987）。堆積埋没後、大曲断層と幌延断層の活動や背斜構造の形成を伴う隆起、氷期間氷期サイクルによる浸食の促進と海水準変動により、海水・海退を経験したことが知られる(中山ほか, 2010)。これら気候・地質現象が駆動する地下水流動の情報を、地下水の水質や安定同位体は記録することが知られる(甲斐・前川, 2009)。幌延深地層研究所周辺では、大曲断層近傍の背斜成長により天水起源の地下水が地層中に侵入し、淡水化の進行が稚内層上部の亀裂帯を伴ったゾーンで顕著である(Ishii et al. 2011)。その一方で、埋没・続成作用後に変質した海水が停滞していることが明ら

かとなっており、塩分濃度が海水の約半分で酸素の安定同位体が海水より正の値を示す特徴が知られる (甲斐・前川, 2009)。幌延深地層研究所地下施設周辺では稚内層深部に停滞し、その上部で塩淡境界を形成することが確認されている。

幌延深地層研究所の東立坑脇で地上からの SAB-1 号孔のボーリング調査が実施され、深度 150 から 512.8 m のコアリングおよび水理試験後の 3 区間での地下水採取が行われた (深部地質研究コア, 2009)。この掘削調査は地下施設建設の影響を受ける前のベースラインを把握することを主目的とした。声問層から 2 深度、稚内層から 6 深度のコア試料を間隙水抽出に供した結果、声問層から様々な分析項目を調べるのに十分な量の間隙水が抽出できた。しかし、稚内層からの間隙水抽出は少量であったため、主要成分と水の同位体を測定することに限定された。地下水に関しては 3 区間 (RW3-5) から採取されたが(図 1.1.2.1)、特に最深の区間（RW5）が対象とした稚内層の高塩分地下水は、顕著な湧水区間が水理検層に特定されなかった。そのような区間からの地下水採取は、掘削泥水の影響をフラッシュにより排除することが困難で、品質の低い試料であった。これらの技術的課題は精密調査を想定した地下施設での調査により補完されるが、ベースラインの取得という観点では地上からの調査で、より多くの情報が取得されることが望ましい。

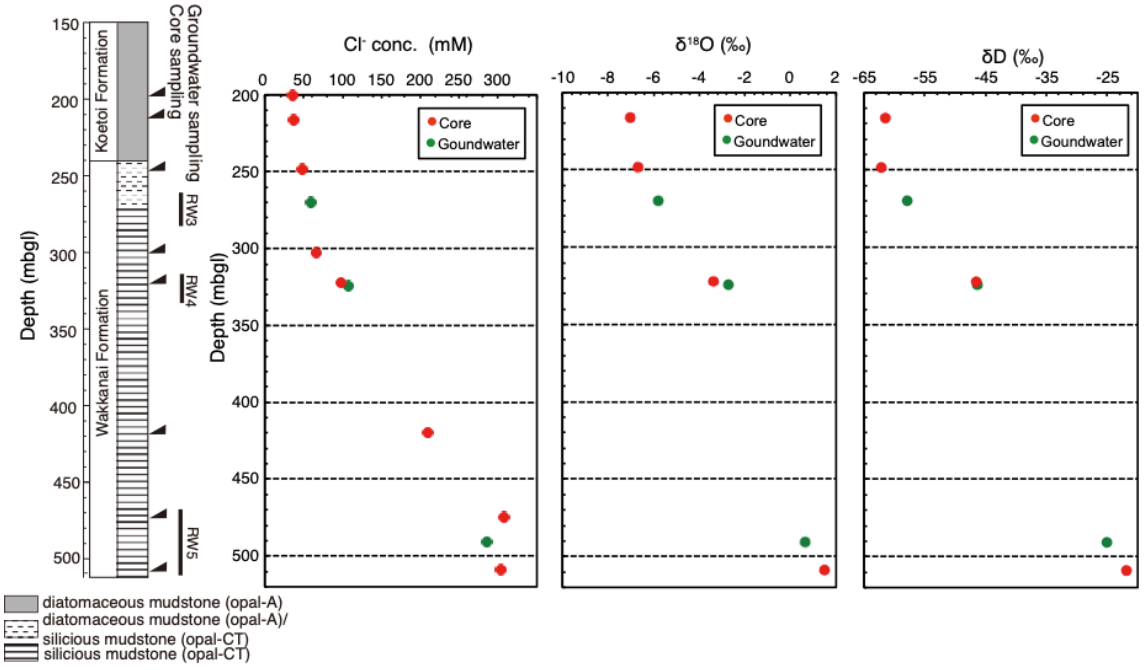


図 1.1.2.1. SAB1 号孔の柱状図とコア試料の採取深度（矢印）および地下水採取区間。コアから抽出された間隙水と揚水した地下水の塩化物イオン濃度および水の酸素・水素安定同位体組成。深部地質研究コア (2016) から引用。

稚内層内の塩淡境界を横断して採取された地下水中のガス濃度を封圧採水後の全ガス抽出により測定した結果、メタンは微生物の水素をエネルギー源とした二酸化炭素の還元により海水から形成したことが示唆された(図 1.1.2.2)。また、地下水の水素安定同位体組成とメタンの水素安定同位体組成を Whiticar (1999)が考案した図にプロットしたところ、メタンは淡水ではなく海水から形成したことが示唆された。メタンの微生物による生成が、現在の化石海水中で起きているのか、または堆積後の初期続成当時に生成されて現在は生成していないかを明らかにするため、岩石コア試料のメタン生成活性を測定した(図 1.1.2.3)。その結果、安定同位体組成から示唆された微生物の二酸化炭素還元によるメタン生成が化石海水の残る深度で高いことが明らかになった。これらの結果は、水理特性に影響を及ぼすガス生成が、淡水化により弱体する可能性を示唆した。しかし、全菌数や微生物群集組成といった微生物データの取得が不可能であったため、この結果を裏付けはできていなかった。

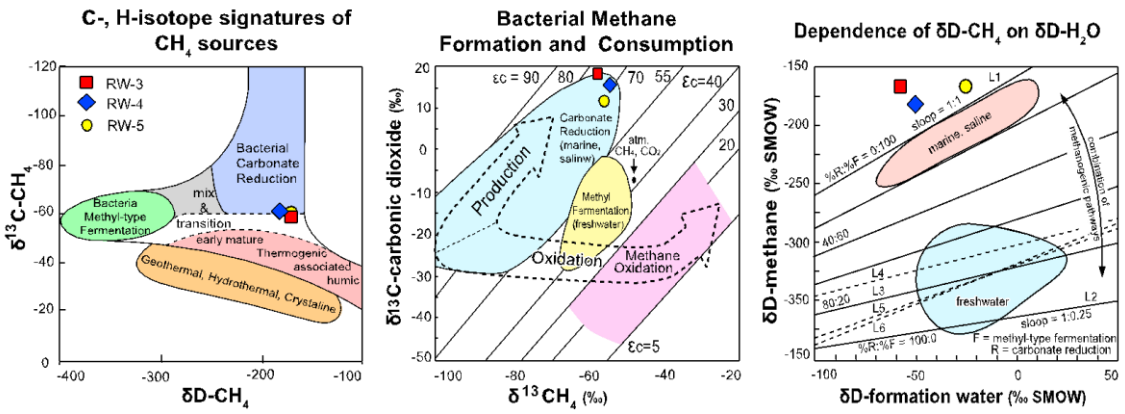


図 1.1.2.2. 揚水地下水中のメタンの炭素・水素安定同位体組成、二酸化炭素の炭素安定同位体組成、および形成場の水の水素安定同位体組成から推定されるメタンの起源および形成環境。Whiticar (1999)から引用。

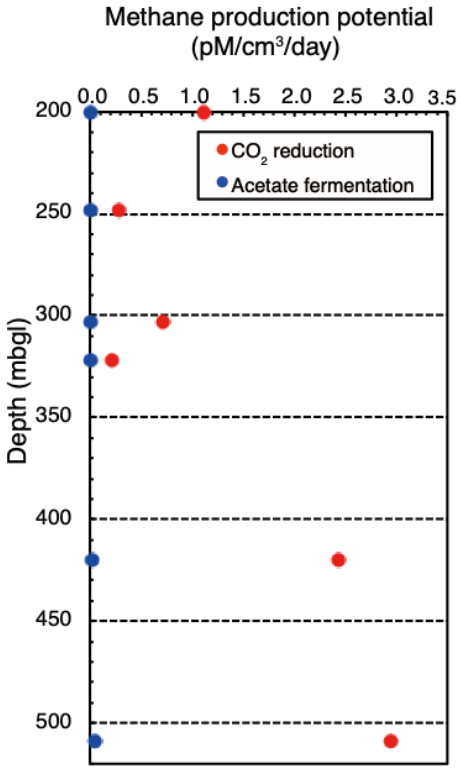
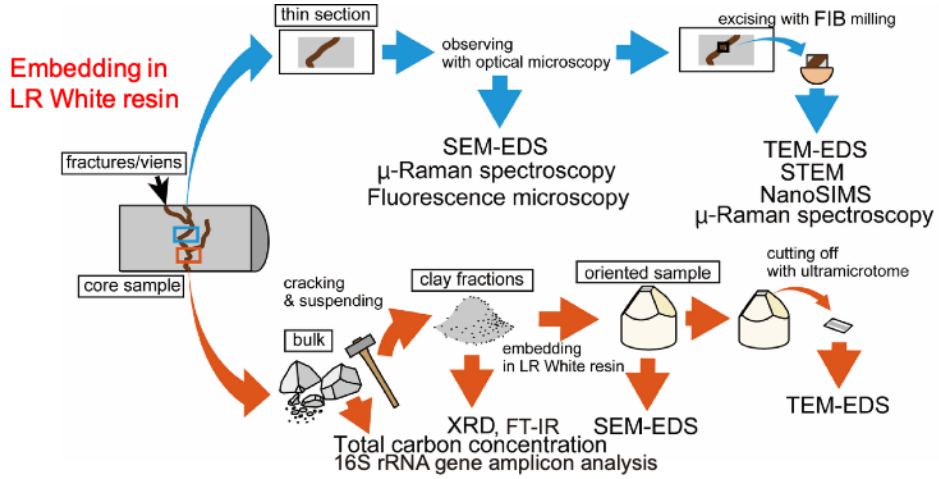


図 1.1.2.3. コア試料中の二酸化炭素還元と酢酸発酵を介したメタン生成活性。

1.2.1. 地下深部研究最新成果の地下研究所試料への適用

海洋科学掘削は、陸上掘削の地下水採取に該当する地殻内流体の採取を行った掘削調査は費用の制約から稀で、岩石コアのみの調査に限定される事例が多い。流体が採取できない岩石コアのみの調査の場合、岩石内部の環境特性の把握には、亀裂を充填する二次鉱物が情報源と成り得る。そのため、岩石コアから低温の水–岩石反応で形成する粘土、炭酸塩鉱物、金属硫化物鉱物等の解析技術が開発された（図 1.2.2.1, Yamashita et al. 2019）。この二次鉱物解析手法と組み合わせて、岩石コア中の微生物を可視化する技術の開発も行われて、亀裂充填するスメクタイト粘土に高密度な微生物集合体（バイオフィルム）が発見された（Sueoka et al. 2019, Suzuki et al. 2020）。



略称・英語表記	日本語表記	略称・英語表記	日本語表記
Optical microscopy	光学顕微鏡	μ-Raman spectroscopy	顕微ラマン分光法
SEM	走査型電子顕微鏡	BEI	後方散乱電子像
EDS	エネルギー分散型X線分析	Fluorescence microscopy	蛍光顕微鏡
FIB	集束イオンビーム	NanoSIMS	高分解能二次イオン質量分析法
TEM	透過電子顕微鏡	Total carbon concentration	有機物炭素含有量
STEM	走査型透過電子顕微鏡	bulk	玄武岩コアを粉砕した粉末試料
XRD	粉末X線回折	clay fractions	全岩から水ひで回収した粉末試料

図 1.2.1.1. 岩石コアの亀裂充填する鉱物と微生物を対象とした解析手法の分析手順。

固結により頁岩化した稚内層の岩石内部にも亀裂が発達するが、その亀裂に生息する微生物を可視化するために、HDB11 号孔の深度 942.1–942.2m の冷凍保存された岩石コアの薄片を作成した。DNA 染色剤である SYBR-Green I で薄片中の微生物細胞を可視化した結果、亀裂内部に高密度で細胞が観察され、バイオフィルムの形成が明らかとなった(図 1.2.1.2)。また、バイオフィルムは粘土鉱物を伴っていることも判明したため、粘土と微生物の共存が地下深部岩石中での微生物が生息する上で重要あることも示唆された。

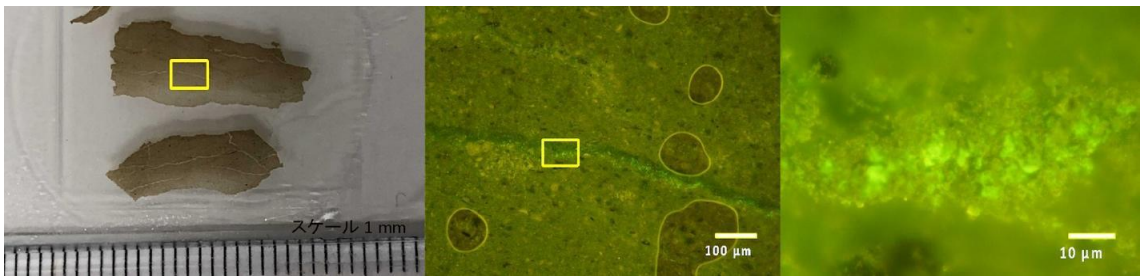


図 1.2.1.2. 幌延のボーリングコアの薄片(左)。蛍光顕微鏡で観察された亀裂内の微生物(中央・右)。

上述の岩石内生命可視化技術と共に、近年急速に発展してきたメタゲノム解析を幌延深地層研究所の地下施設から採取した地下水に適用した。調査が行われた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 の結果では(図 1.2.1.3)、メタン酸化古細菌が東立坑側のボーリング孔の地下水で優占することが重要な発見であった（Hernsdorf et al. 2017)。

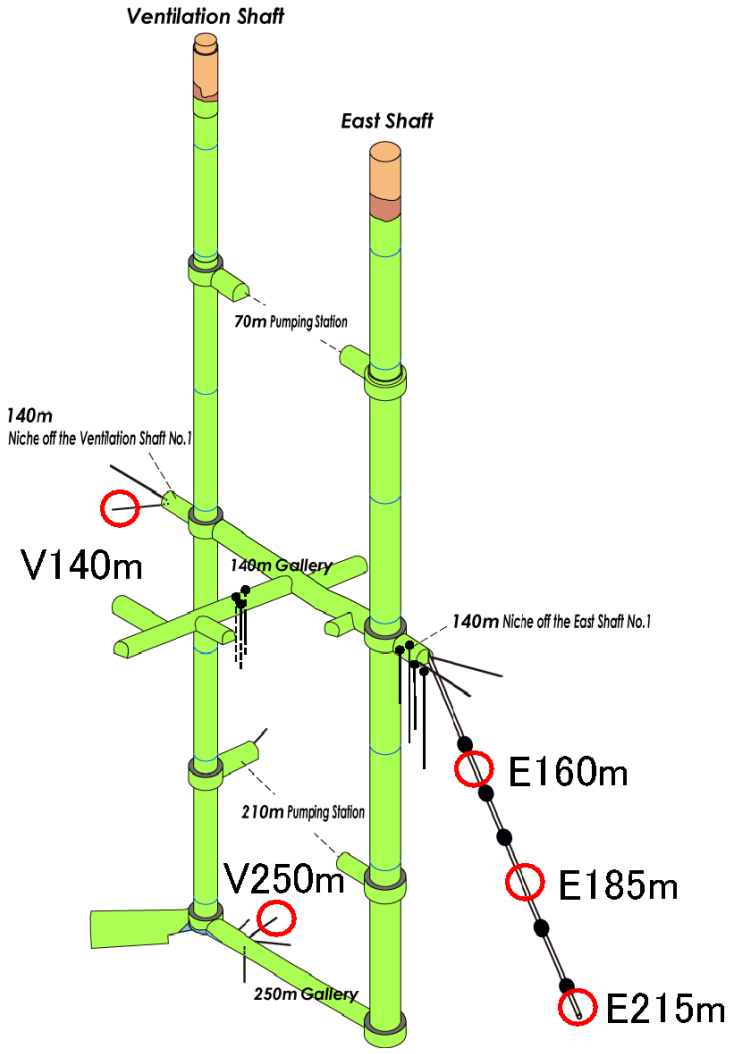


図 1.2.1.3. 幌延深地層研究所の地下施設における東立孔(East Shaft)と換気立孔(Ventilation Shaft)およびボーリング孔とサンプリング区間。(Ise et al., 2017 より改変して引用)

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 1.2.1.4a)、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 1.2.1.4b)。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。

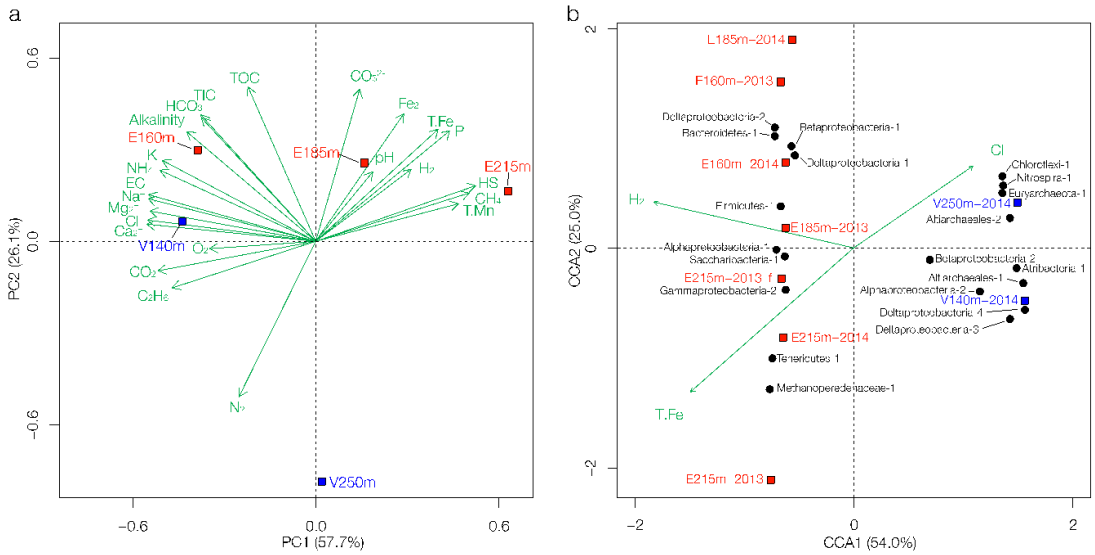


図 1.2.1.4. 環境因子と微生物群集組成の多変量解析。

(a)東立孔(E)の深度 165m、185m、215m、および換気立孔(V)の 140m、250m 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集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。また、メタン酸化古細菌の優占は瑞浪超深地層研究所での地下水調査でも判明しており、地層処分環境で核種移行特性の重要因子である硫化水素の形成に関与していることが示唆されている（Ino et al. 2018）。

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) と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. 2019 年度の成果概要

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

3.1.1. 瑞浪超深地層研究所における高圧培養手法の確立

地下の高圧条件下でメタン酸化古細菌の代謝によって形成される化学環境や放射性核種の移行に与える影響を評価するために、地下環境を模擬した高圧培養実験を実施した。試験には、2018 年度に準備した高圧培養容器と、2019 年 2 月と 8 月に瑞浪超深地層研究所の 09MI20-1 および 09MI21-2 から、採水した地下水を用いた。

地下環境を模擬するために、2019 年 2 月に、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を通して、高圧状態を維持したまま高圧培養容器に直接封入した。しかし、封入後に、高圧培養容器から分取した試料中の水素濃度を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)を用いて測定した結果、高圧培養容器の間で大きなばらつきが確認された。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、圧力低下により発生する気相の量に差が生じたことが原因と考えられた。

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、現場で採取した地下水を実験室で高圧培養容器に封入する手法を検討した。培養実験には、2019 年 8 月に 09MI21-2 から採取し孔径 0.2 μm のメンブレンフィルターにより濾過した地下水を用いた。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とステンレスホルダーを用いて回収した。地下水は滅菌したゴム栓付きの 1L ガラス瓶に採取し、ゴム栓に針をさし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。細胞懸濁液は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ルダーを開封し、フィルター上の懸濁物を 100 ml 程度の 09MI21-2 地下水に回収し調整した。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酸化剤溶液、細胞懸濁液を封入し、^{12}C もしくは ^{13}C メタンをガスタイトシリンジにて添加して高圧培養を行った。高圧培養後、試料中の水素濃度を測定した結果、各容器での水素濃度のばらつきは小さくなった。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。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。封入時に混入する酸素を除去するために、硫化水素を数十 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した結果、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。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。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を行うことにした。

^{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ために、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ーバッグを用いる高圧培養を検討した。テドラーバッグ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ことから、^{13}C メタンをテドラーバッグで 11 日間保存したところ、11 日後に水素濃度だけが著しく減少していた。そこで後述する高圧培養実験では、テドラーバッグ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。また、テドラーバッグ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 3.1.1 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で可能とした。

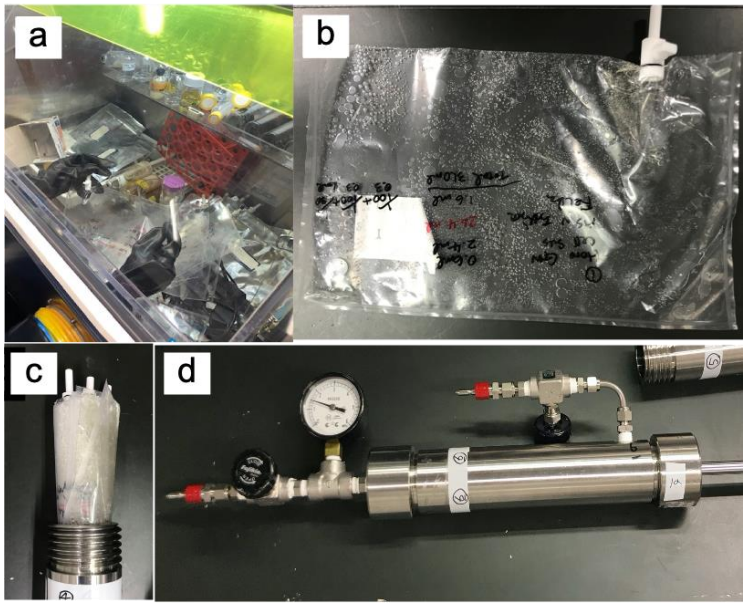


図 3.1.1. アルゴンガスを充填したグローブボックス内(a)で、地下水や添加剤をテドラーバッグに封入し(b)、高圧培養容器内に入れた(c、d)。

3.1.2. 瑞浪超深地層研究所におけるメタン酸化速度の測定

テドラーバッグ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、濃縮した微生物とメタンガスと共に異なる酸化剤（硫酸、硝酸、三価鉄、元素状硫黄、亜硫酸、チオ硫酸）をグローブボックス内でテドラーバッグに封入した。上述のテドラーバッグ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)。大気下で一つの高圧培養容器へテドラーバッグを 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。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。テドラーバッグ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。テドラーバッグ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。

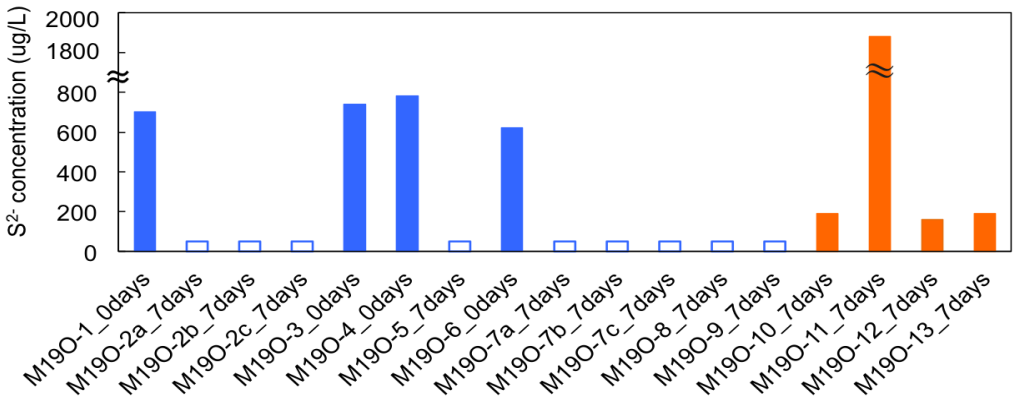


図 3.1.2. 瑞浪超深地層研究所内の地下水をテドラーバッグに封入し高圧培養した際の硫黄濃度の変化。

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。

3.1.3. 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

3.1.3.1. テドラーバッグ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 月に地下水を採取した。幌延地下水は瑞浪地下水と比べ溶存無機炭素(DIC)濃度が高いため、メタ

ン酸化速度を高感度に測定する目的で、初期 DIC 濃度が低い人工地下水を用いた。人工地下水は現場地下水の pH と塩分濃度に合わせ、pH 7.4 および 50 mM NaCl になるように調整した。上記の 3.1.2.と同様にガス置換した人工地下水、酸化剤（三価鉄）、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テドラーバッグに封入し、高圧培養容器に入れ、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ローブボックス内で観察された。

酸化剤の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、テドラーバッグ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 µm 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。今回幌延地下水で得られた培養開始前後の溶存無機炭素の安定同位体比の変化は、瑞浪の常圧培養で得られた値（＋2‰）に比べて、著しく大きく、フェリハイドライト無添加条件で＋3000‰を超え、フェリハイドライト添加条件では＋2000‰であった。この結果から、培養前に添加した ^{13}C で同位体標識したメタンがとりこまれ高い代謝活性でメタン酸化が進行していることが明らかとなり、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を示唆した。無添加条件では、酸化剤として懸濁粒子に含まれる酸化剤が使われた可能性が考えられるため、固相の詳細な解析が求められた。

3.1.3.2. 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、処分場創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も行った。アルカリ高カルシウム条件での培養は、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。上記の 3.1.3.1.と同様にグローブボックス内で人工地下水、酸化剤（硫酸、硝酸、酸素）、濃縮した微生物と共にメタンガスを、テドラーバッグに封入し、pH7.4 と pH10、および現場圧力の 1.6 MPa と常圧付近の 0.2 MPa で 7 日間培養した。

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の試料では、比較的高い濃度で二価鉄が検出された。また、アルカリ条件では培養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。

3.2. 2019 年のまとめと残された課題

2019 年度は現場で封入した培養の分析からはじまり、テドラーバッグ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、メタン酸化速度を求めるために溶存無機炭酸の同位体を測定すること、メタン酸化古細菌の地下水中での細胞数を算出すること、および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。

4. 2020 年度研究実施内容

4.1. 2020 年度の計画、実施方法

本年度は、2019 年度に残された課題として、瑞浪超深地層研究所および幌延深地層研究所から採取した地下水を用いて実施した高圧培養試料中の溶存無機炭酸の同位体測定、懸濁物中に含まれる粘土鉱物と地下水深度に対応する岩石コアの粘土鉱物を解析した。さらに、各高圧培養サンプル中の微生物細胞数、DNA を用いた微生物群集構造解析を実施した。

4.2. 2020 年度の成果内容

4.2.1. 幌延深地層研究所から採取された地下水を用いた高圧培養実験

4.2.1.1. 幌延深地層研究所から採取された地下水の高圧培養実験における溶存無機炭素同位体比測定

本年度は昨年度成功したテドラーバッグを用いて確立した高圧培養実験について、酸化剤無添加実験の再現性や多重実験による分析誤差を評価した。地下水試料は、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 12 月に採取した試料を用いた。培養条件については、2018 年度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、処分場創業時から埋め戻し直後の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も行った。アルカリ高カルシウム条件での培養には、人工地下水（pH 7.4、50 mM NaCl）に 100 mM の $CaCl_2$ を添加し、pH を 10 に調整したものを用いた。グローブボックス内で表 4.2.1.1 に示す条件でテドラーバッグに地下水、酸化剤、濃縮した微生物と共にメタンガスを封入し、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。培養終了後、培養器のバルブを開けて常圧に戻し、テドラーバッグからシリンジに培養液を採取し、それぞれの分析に供するためのサンプリング処理を行った。

溶存無機炭素の安定同位体比の測定は、メタン酸化が起きているかを確認するために、0.2 μm の孔径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 ガスで常圧に戻した後に、気相の CO_2 に変換された溶存無機炭酸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。また、分光光度法による二価鉄イオン濃度の測定を行った。

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ー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	7 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

高圧培養前後での培養液中溶存無機炭素同位体比を図 4.2.1.1.に示す。酸化剤を添加せずに 10 日間培養した系について同位体比を測定した結果、培養前と比較して ^{13}C の割合が増加した。本実験では ^{13}C で同位体標識したメタンを基質として加えているため、この結果は培養実験中に微生物によるメタン酸化が進行したことを示している。常圧(0.1 MPa)条件でも同様にメタン酸化の進行が認められるが、酸化剤なしの場合と比較して $\delta^{13}C$ の数値は十分小さい。微生物によるメタン酸化は圧力の影響を受けることが知られるため、この結果は地下の高圧環境でメタン酸化を行う微生物が低圧環境にさらされた結果として活性が下がったと解釈できる。さらに硫酸及び硝酸を酸化剤として加えた系でも酸化剤なしの場合と比較して低い $\delta^{13}C$ の値が得られた。この結果は本実験で測定しているメタン酸化がこれらの酸化剤ではなく、地下水中懸濁物の還元反応とカップリングしていることを示唆する。Hernsdorf et al. (2017) では幌延地下水中のメタン酸化古細菌のメタゲノム解析を行い、硫酸や硝酸を電子受容体として利用する際に必要な遺伝子がゲノムに欠如していることを報告しているが、この結果はそれと整合的である。加えて、酸素を添加した系では他の培養系と比較して著しく高い $\delta^{13}C$ の値が得られたが、これは嫌気的メタン酸化より獲得エネルギーが多い代謝反応である好気的メタン酸化が、より速く進行したことを意味している。またこのこと

は、並行して行った他の培養系や、昨年度報告書内で記載した 9 月の培養実験において酸素が混入した可能性が低いことを示している。最後に地層処分事業におけるアルカリ高カルシウム条件での結果を見ると、高圧にも関わらずメタン酸化がほとんど進行していないことがわかり、アルカリあるいは高カルシウム微生物の活性を抑える影響があると考えられる。

また、二価鉄濃度を測定した結果、高圧培養を行った試料において二価鉄濃度が検出されなかったが、地層処分事業でのセメントの影響を評価するために行ったアルカリ高カルシウムの培養条件下では二価鉄が含まれていた (図 4.2.1.2.)。前者の二価鉄が検出されなかった原因としては、高圧培養条件での溶存二価鉄の容器への吸着が考えられ、後者のアルカリ高カルシウム条件下では、溶存二価鉄の容器への吸着の影響が弱まると推測された。そして、アルカリ高カルシウム条件によって、7 日間の培養により二価鉄濃度が低下したことから、この培養条件において、微生物活動によって二価鉄が還元剤として使われたと考えられる。

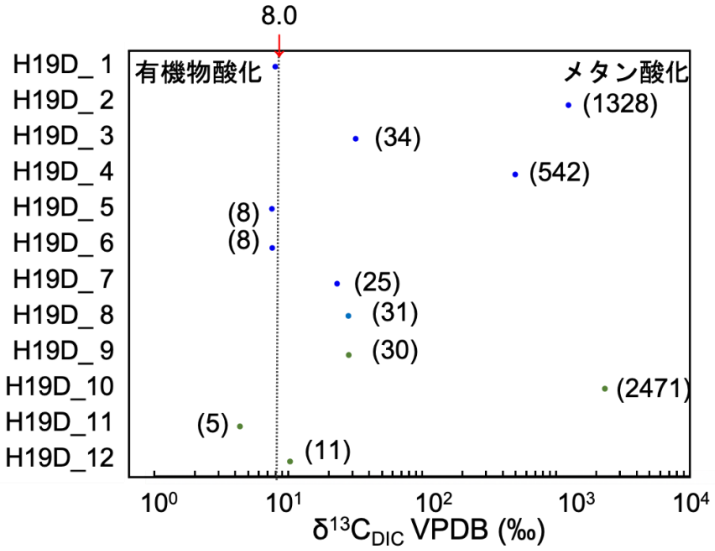


図 4.2.1.1. 幌延深地層研究所の地下水（2019 年 9 月採水）に含まれる溶存無機炭素の高圧培養前後の同位体比。

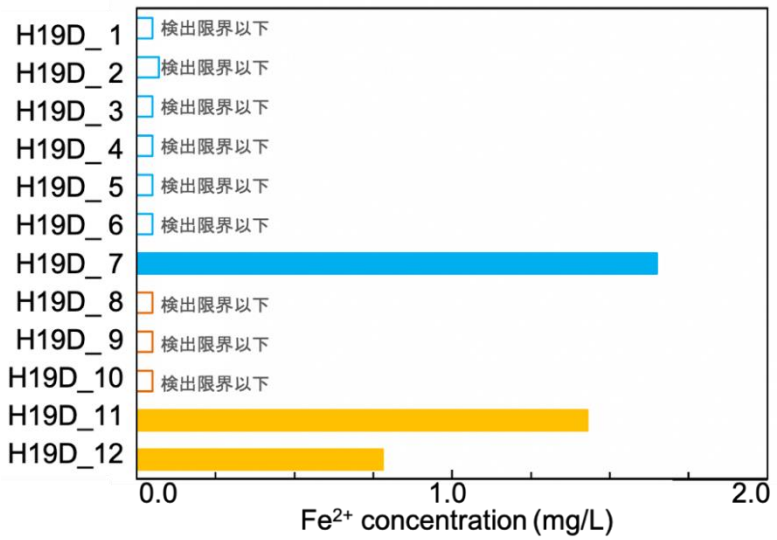


図 4.2.1.2. 幌延深地層研究所の地下水（2019 年 9 月採水）に含まれる二価鉄濃度の高圧培養前後の同位体比。

4.2.1.2. 溶存無機炭素同位体比とメタン酸化古細菌の細胞数からのメタン酸化速度の導出

2019 年 9 月に実施した幌延深地層研究所の地下水の高圧培養実験から得られた培養前後での溶存無機炭素同位体比の変化及び全菌数測定と微生物群集組成の結果から、メタン酸化速度の導出を行った。培養液中の全菌数については、実験前後の培養液をフィルター濾過滅菌済み MilliQ 水で 10 倍に希釈し、ポリカーボネート製フィルターにて濾過、SYBR Green I 染色を行った試料を蛍光顕微鏡下で直接計数法により菌数を測定した。その結果、導出されたメタン酸化速度を図 4.2.1.3.に示す。10 mM でフェリハイドライトを添加した系については、triplicate の繰り返し実験で標準偏差が約 0.25 であり、再現性があると判断できる結果となった。一方、フェリハイドライトを加えなかった系では加えた系よりも速いメタン酸化速度が進行した。これはフェリハイドライトがメタン酸化を阻害したことを示唆すると同時に、メタン酸化を行っている微生物は酸化剤として、フェリハイドライト以外の地下水中懸濁物に含まれる物質を利用していることを示す結果である。

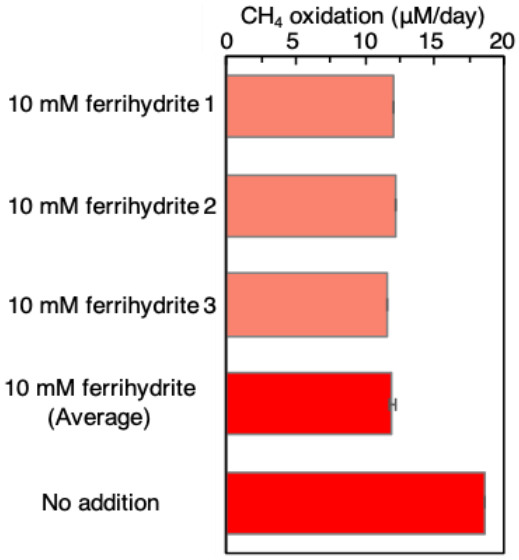


図 4.2.1.3. 溶存無機炭素同位体比及び全菌数から導出されたメタン酸化速度。

4.2.1.3. 幌延深地層研究所から採取された地下水の高圧培養実験における 16S rRNA 遺伝子解析

2019 年 9 月に実施した幌延深地層研究所地下水の高圧培養実験について、使用した地下水及び培養後の微生物の群集組成を明らかにするため、培養実験前後の培養液について 16S rRNA 遺伝子解析を行った。そのための微生物細胞は、孔径 0.2 μm のポリカーボネートフィルターを用いた濾過により培養液から回収した。その後、0.5 M NaOH のアルカリ溶液を用いて DNA を抽出した(Kouduka et al. 2012)。微生物から抽出された DNA について PCR 法により 16S rRNA 遺伝子領域を増幅し、ライブラリー調整をした後、Illumina の Miseq を用いて塩基配列を取得した。得られた配列情報は、MOTHUR プログラム (Schloss et al. 2009)を用いて、クオリティチェック、アライメント等の処理した後、97%の相同性で系統毎にグループ化し、公共のデータベース（http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/）を用いて、近縁種を決定した。近縁種を決定した結果をまとめ、培養前と後の微生物群集組成解析を行った結果を図 4.2.1.4.に示す。

微生物群集組成解析の結果から、培養前の地下水中では嫌気的メタン酸化古細菌の *Methanoperedenaceae* (ANME-2d)が全体の 11%を構成する地下水中優占種であった。Hernsdorf らによる幌延深地層研究所における微生物生態系調査でも、同様に深度 250 m の粘土質な懸濁物中で嫌気的メタン酸化古細菌の *Methanoperedenaceae* の優占が報告されている(Hernsdorf et al. 2017)。培養前の地下水の全菌数の測定結果が 4.3×10^5 cells/ml だったことから、地下水中に含まれる ANME-2d の細胞数は 4.7×10^4 cells/ml と推定された。7 日間培養した地下水中では、割合が減少してはいるもの

の、ANME-2d の全体の 0.6-6.8 %の割合で残存していることが確認され、培養期間を通して嫌気的メタン酸化が進行したと考えられる。その他、得られた ANME-2d の 16S rRNA 遺伝子について分子系統樹を作成した結果、Hernsdorf et al. (2017)で報告された ANME-2d である HGW-*Methanoperedenaceae*-1 と非常に近縁であることが判明した。

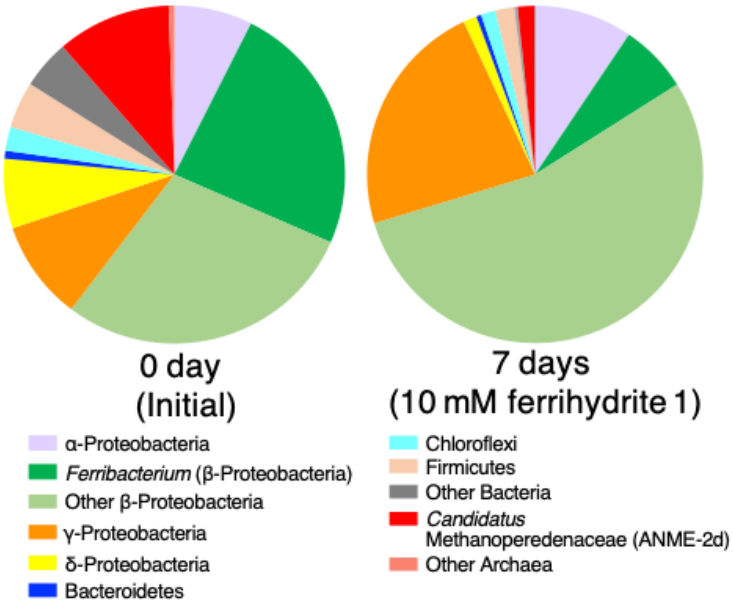


図 4.2.1.4. 2019 年度に実施した高圧培養実験に用いた幌延地下水(左)、及び 10 mM フェリハイドライトを添加した系の 7 日間高圧実験後培養液(右)の微生物群集組成。

4.2.1.4. 幌延深地層研究所から採取された地下水中堆積物の固体解析

4.2.1.4.1. フィルター上堆積物の粉末 X 線回折による解析及び走査電子顕微鏡-エネルギー分散型 X 線分析

上述の 4.2.1.3.で同定された高圧培養実験中にメタン酸化を行ったと考えられる ANME-2d は地下水中懸濁物に含まれる酸化剤を利用していることが高圧培養実験の結果から示唆されたため、2019 年 9 月の高圧培養の際に使用した地下水濾過フィルターの一部を使用して X 線回折(XRD)による懸濁物中鉱物の構造解析及び電界放射型走査電子顕微鏡(FE-SEM)による形態観察とエネルギー分散型 X 線分析(EDS)による鉱物の化学組成分析を行った。XRD には Rigaku RINT-2100 を使用した。また FE-SEM は Hitachi S-4500 を使用した。

XRD 分析により得られた X 線回折パターンと SEM 像、EDS スペクトルを図 4.2.1.5. に示す。XRD ではフィルターを 45℃で乾燥させて測定したパターンとエチレングリコールを噴霧したパターンとを比較することで 14.8Å から 16.9Å への底面間隔の膨潤が

認められ、スメクタイト系層状珪酸塩鉱物の存在が示された。さらに SEM-EDS 分析の結果から、地下水懸濁物中に含まれるスメクタイトに微量の鉄が含まれていることも判明した。以上の結果を統合し、幌延地下水中に存在する ANME-2d は粘土鉱物中に含まれる鉄を還元してメタン酸化を行っている可能性が示された。Hernsdorf et al. (2017) では幌延地下水中の ANME-2d がヘムを 50 個以上含むチトクロムを有していることや別の細菌との共生の可能性が低いこと、鉄の濃度と ANME-2d の割合が相関することなどから、チトクロムを通して鉄含有鉱物に直接電子を渡して還元している可能性が示されているが、本分析で得られた結果はそれと整合的なものである。

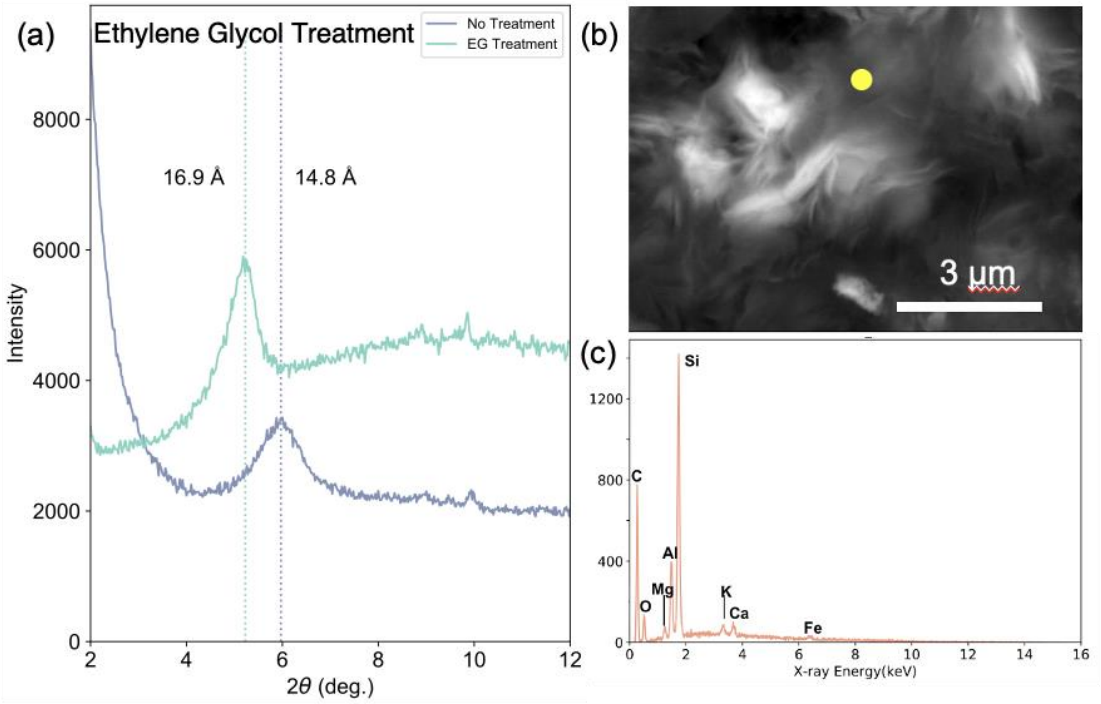


図 4.2.1.5. 2019 年 9 月の高圧培養実験に添加された幌延地下水中懸濁物の(a)X 線回折パターン、(b)SEM 像、(c)EDS スペクトル。

4.2.1.4.2. フィルター上懸濁物及び掘削コア試料のフーリエ変換赤外分光法による分析

上述の 4.2.1.4.1.では XRD 及び SEM-EDS 分析で幌延地下水中 ANME-2d が鉄を含むスメクタイト系粘土鉱物を酸化剤として利用している可能性が示された。次の段階として粘土鉱物中の鉄の状態や地層中の粘土鉱物の分布を明らかにするために、フーリエ変換赤外分光法(FT-IR)による分析が行われた。試料は 2019 年 9 月の高圧培養実験に使用したフィルター上懸濁物、2020 年 8 月に同じ採水場所から得られたフィルター上堆積物、また幌延深地層研究所東立抗脇の掘削孔(SAB-1)から得られたコア試料の

うち、地下水採水場所に近い深度の試料を使用した。コア試料については水簸を行うことで試料中から粘土のみを回収して分析した。FT-IR 装置は島津製作所の IRSpirit を使用し、全反射測定法により IR スペクトルを得た。

地下水中懸濁物及び SAB-1 コア試料の IR スペクトルを図 4.2.1.6.に示す。幌延深地層研究所が存在する地域では稚内層の上部に声問層が分布した層序になっているが、SAB-1 コア試料の IR スペクトルからこれら二つの層に含まれる粘土鉱物の構造に顕著な違いがあることが判明した。例えば破線で示した波数 420 cm^{-1}、520 cm^{-1}、690 cm^{-1} などの部分では、上位の声問層に見られたピークが稚内層では見られなくなっている。これらのピークは粘土鉱物の八面体シート中に含まれる陽イオンの種類やヒドロキシ基の変形を反映する領域に存在しており、粘土鉱物中に含まれる鉄は層間ではなくシート構造に含まれている可能性が示された。一方で声問層及び稚内層にはスメクタイト鉱物以外にガラス質二酸化ケイ素の Opal-A と同じく二酸化ケイ素の結晶多形であるトリディマイトとクリストバライトで構成される Opal-CT が含まれ、声問層から稚内層へ深度が増すことで Opal-A から Opal-CT へと遷移することが知られている。このため地層中に含まれる鉱物を比較する際にはこの点にも留意する必要があるが、Rice et al. (1995)では Opal-A から Opal-CT への相転移に対応する FT-IR スペクトルの変化は波数 472 cm^{-1} から 500 cm^{-1} へのピークシフトと説明されており、このシフトは今回着目しているピークと波数が異なる。また Opal-A の IR スペクトル(RRUFF ID = R060653)では、420 cm^{-1} 付近のスペクトルは声問層と類似しているが、520 cm^{-1} や 690 cm^{-1} 付近でピークが認められない。以上の点からも今回明らかとなった声問層と稚内層の IR スペクトルの差異はスメクタイト系層状珪酸塩鉱物の構造変化に由来したピークであると考えられる。その他、フィルター上に得られた地下水由来の堆積物の IR スペクトルは声問層の IR スペクトルと類似したパターンを示しており、掘削中に外部から混入したものではなく、元来地層中に存在する粘土鉱物であることが示された。

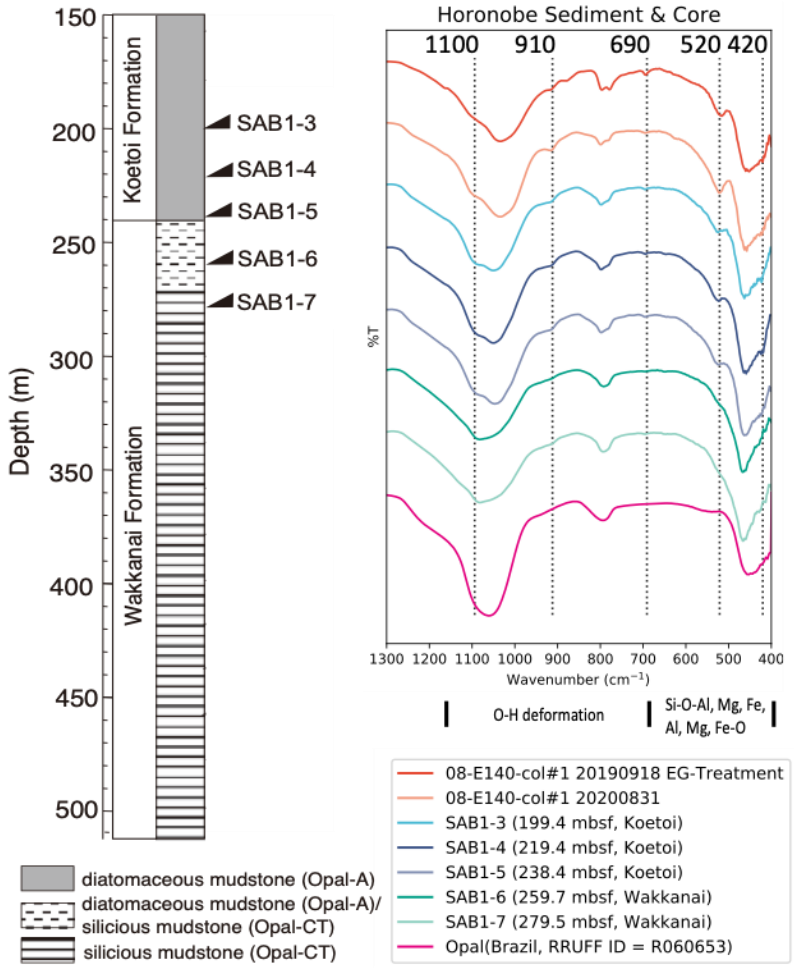


図 4.2.1.6. 幌延地区の層序と地下水中懸濁物及び SAB-1 コア試料の IR スペクトル。

4.2.2. 瑞浪超深地層研究所における高圧培養実験

4.2.2.1. 瑞浪超深地層研究所における溶存無機炭酸の同位体測定

本年度は、2019 年度に 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て得た試料の溶存無機炭酸の同位体測定を行った。本高圧培養では、2019 年度に確立したテドラーバッグを用いた方法で、地下水と微生物の封入を行い、表 4.2.2.1.に示す条件で 7 日間培養を行った。また、上述の 4.2.1.と同様に無機炭酸の炭素安定同位体比、硫化物イオンおよび硫酸濃度の分析を行った。

表 4.2.2.1. 瑞浪超深地層研究所内の地下水をテドラー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

その結果、溶存無機炭酸の炭素安定同位体組成について、酸化剤を添加しない系の培養 0 日目（M1911_6）で得られた同位体組成の値に対し、7 日間の培養後は、酸化剤添加なし（M1911_7）、硫酸（M1911_8）あるいは硝酸（M1911_9）、三価鉄（M1911_10）を添加した系では、^{13}C に富む重い同位体組成を示した。本実験では ^{13}C で同位体標識したメタンを基質として加えていることから、これらの培養条件では添加したメタンが消費されるメタン酸化のほうが卓越していると推測された(図 4.2.2.1.)。一方、酸化剤として、元素状硫黄、亜硫酸、チオ硫酸を添加した系（M1911_11, 12, 13）では 7 日間の培養で軽い同位体組成が得られた。特に、チオ硫酸を添加した系（M1911_13）で最も軽い同位体組成を示すことから一番高い有機物酸化活性反応がおこっていると考えられた。

また、硫化物イオンと硫酸濃度の測定結果（図 4.2.2.1.）から、酸化剤として、硫酸、硝酸、三価鉄、元素状硫黄、亜硫酸、チオ硫酸を添加した系の比較を行ったところ、硫酸を添加した系では培養後の培養液中からは硫化水素が検出されず、硫酸濃度の減少もみられなかったことから、硫酸還元活性は低いと考えられた。一方、元素状硫黄、亜硫酸、チオ硫酸を添加した系では培養後の硫酸濃度が高くなっていた（それぞれ 96.1, 667.2, 1618 µmol/L）。これらの硫酸はそれぞれ添加した酸化剤の不均化反応により生成された硫酸の可能性が考えられる。元素状硫黄を添加した系で高い硫化水素が検出されたのは、硫黄還元の代謝産物として硫化水素が生成する反応も起こっているためと考えられた。これらの不均化反応は独立栄養であることが知られ（Canfield 2001）、メタン酸化とカップリングして起きていると考えられるが、溶存無機炭素の炭素安定同位体組成（図 4.2.1.1.）の結果では、有機物酸化の卓越を示したことから、元素状硫黄、亜硫酸、チオ硫酸を添加した系のメタン酸化活性は他の培養系と比べてあまり高くないことがわかった。

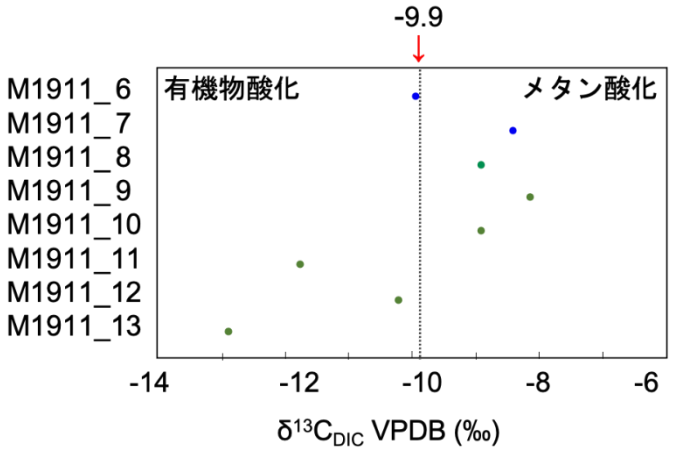


図 4.2.2.1. 瑞浪超深地層研究所の地下水（2019 年 10 月採水）の 1.4MPa で高圧培養した地下水中の溶存無機炭素。n.d. は検出限界以下を示す。

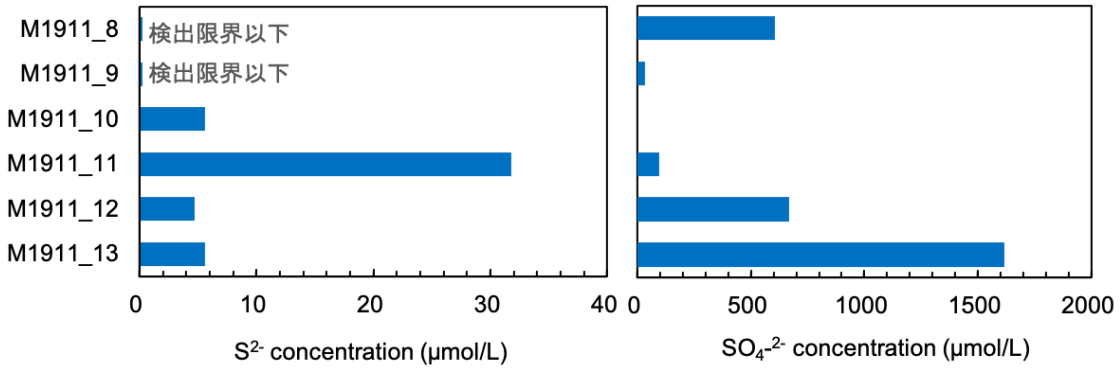


図 4.2.2.2. 高圧培養を行った瑞浪超深地層研究所の地下水(2019 年 10 月採水)中の硫化水素および硫酸濃度。

4.2.2.2 瑞浪超深地層研究所における元素状硫黄のメタン酸化速度測定の多重実験

2019 年 12 月に 09MI21-2 の地下水と 09MI20-1 の地下水より採取した微生物を用いて、酸化剤無添加実験の再現性や多重実験による分析誤差を評価した。本高圧培養では、上述の 4.2.1.と同様に 2019 年度に検討し確立した方法で、地下水と微生物の封入を行い、表 4.2.2.2.に示す条件で 7 日間培養と、同様に無機炭酸の炭素安定同位体比、硫化物イオンの分析を行った。

表 4.2.2.2. 2019 年 12 月に瑞浪超深地層研究所内の地下水をテドラーバッグに封入し高圧培養した際の培養条件。

Sample ID.	Final conc.	C stable isotope label	Cell suspension	Pressure	Culture start day	Culture period
M19D_1	0.5 mM elemental sulfur	^{13}C	○	1.8 MPa	2020/1/23	0 days
M19D_2a	0.5 mM elemental sulfur	^{13}C	○（細胞数 2 倍）	1.8 MPa	2020/1/23	7 days
M19D_2b	0.5 mM elemental sulfur	^{13}C	○	1.8 MPa	2020/1/23	7 days
M19D_2c	0.5 mM elemental sulfur	^{13}C	○	1.8 MPa	2020/1/23	7 days
M19D_3	0.5 mM elemental sulfur	^{13}C	-	1.8 MPa	2020/1/23	0 days
M19D_4	0.5 mM elemental sulfur	^{13}C	autoclaved	1.8 MPa	2020/1/23	7 days
M19D_5	0.5 mM Na_2SO_4, ^{34}S	^{13}C	○	1.8 MPa	2020/1/23	0 days
M19D_6	0.5 mM Na_2SO_4, ^{34}S	^{13}C	○	0.15 MPa	2020/1/23	7 days
M19D_7	0.5 mM Na_2SO_4, ^{34}S	^{13}C	-	1.8 MPa	2020/1/23	0 days
M19D_8	0.5 mM Na_2SO_4, ^{34}S	^{13}C	autoclaved	0.15 MPa	2020/1/23	7 days

培養開始時と終了時で硫化物イオン濃度を測定した結果、元素状硫黄を加えた系では、微生物を添加した試料で、培養前は検出限界だった硫化水素が、7 日の培養後に検出された(図 4.2.2.3.)。微生物無添加の試料では、培養前と培養後ともに検出限界未満であったので、テドラーバッグ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可能性は低い。一方、0.5 mM Na_2SO_4 を添加した試料では、微生物添加の有無、培養時の圧力に関係なく、硫化水素は検出限界未満であった。このことから、酸化剤として元素状硫黄を添加した培養では、硫黄の還元反応により硫化水素が生成することを確認した。また、同じ試料で溶存無機炭素の炭素安定同位体組成の測定した結果を図 4.2.2.4.に示す。元素状硫黄を添加した系において、培養 0 日目で得られた同位体組成の値に対し、7 日間の培養後は、細胞懸濁液を添加していない系をのぞき、有意に軽い同位体組成を示した。本実験では ^{13}C で同位体標識したメタンを基質として加えていることから、元素状硫黄を添加した培養系においては、添加したメタンではなく有機物を炭素源として使った有機物酸化が卓越していることが確認された。一方、硫酸を添加した常圧で培養した系では、重い同位体組成を示したことからメタン酸化の方が卓越していると推測された。この値に比べて、幌延地下水の高圧培養で得られた溶存無機炭素の安定同位体比 (図 4.2.1.2.) は著しく高く、幌延地下水の高圧培養でのメタン酸化活性が非常に高いことが確認できた。

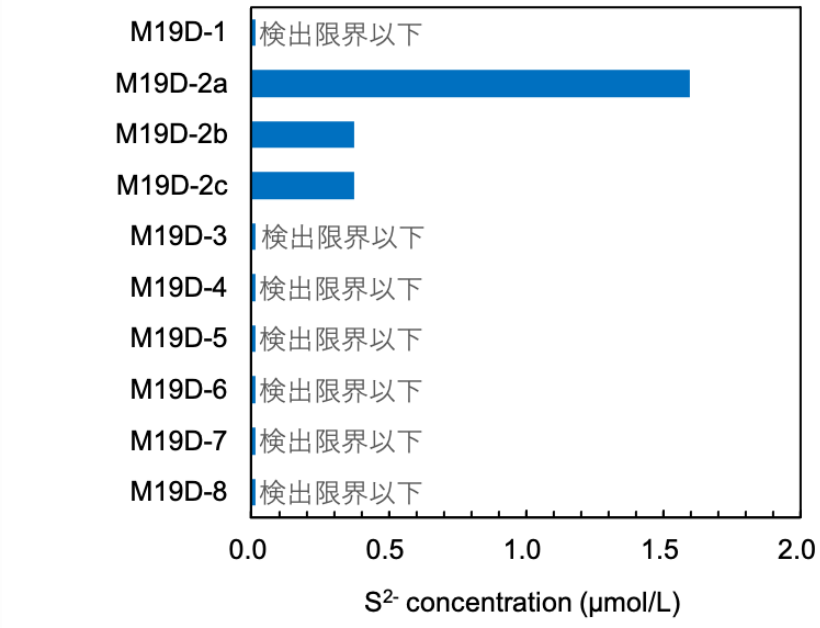


図 4.2.2.3. 瑞浪超深地層研究所内の地下水(2019 年 12 月採水)をテドラーバッグに封入し高圧培養した際の硫黄濃度の変化。

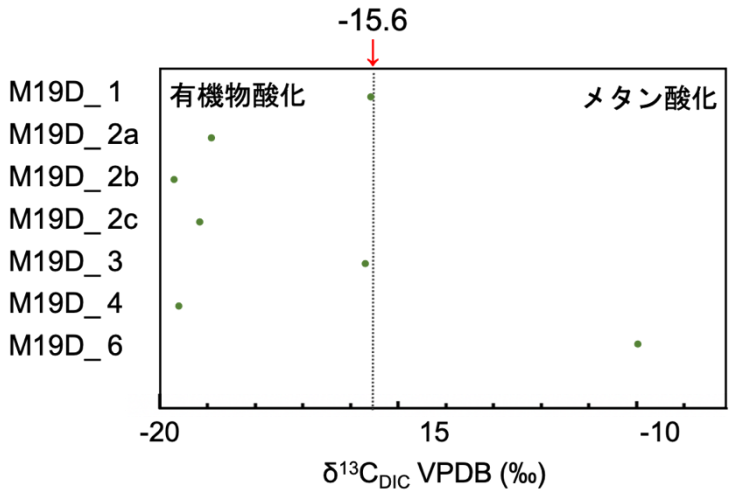


図 4.2.2.4. 高圧培養を行った瑞浪超深地層研究所の地下水(2019 年 12 月採水)中の溶存無機炭素。

5. まとめ

本委託研究では、地下深部に生息する微生物の代謝活動を対象に、高圧環境を模擬した室内試験技術を開発し、その性能評価を高品質な地下水を用いて行うことを目的とする。幌延の地下環境に存在する粘土と微生物の関連性についても明らかにすることを目指した。

最初に、地下環境を模擬した高圧培養実験を行うために、高圧培養容器を用いた実験系の確立を行った。高圧培養容器の性能評価を行ったところ、ガス保持能力を確認したが、代謝産物として重要な分析項目の硫化水素や溶存鉄が、容器との反応により評価できない問題が生じた。そこで、テドラーバッグと呼ばれるガスへの気密性が高いバックに地下水をいれて実験する方法を考案した。瑞浪と幌延の地下坑道から採取された高品質な地下水で、微生物の有機物やメタンの酸化に関わる代謝の速度、および代謝速度に電子受容体が及ぼす影響について評価を行った。幌延の地下水は、懸濁物の粘土鉱物の存在がメタン酸化代謝の電子受容体として重要な役割を果たしている可能性が判明した。そのため、懸濁物中の粘土鉱物の由来が掘削による影響か、地層由来かを識別するために、掘削コア中の粘土鉱物の解析を行った。

その結果、幌延の地下水中での微生物によるメタン酸化活性について、三重実験により試験の再現性が確認された。電子受容体としての利用性の高いフェリハイドライトの添加した培養条件よりも、添加しない条件で、メタン酸化活性が有意に高いため、地下水に含まれる懸濁物の成分が電子受容体として用いられていることが明らかとなった。また、微生物群集組成解析により培養中にメタン酸化古細菌が維持されていることも明らかとなった。懸濁物を固体解析した結果、鉄含有のスメクタイト粘土が含まれており、電子受容体として利用されている可能性を支持した。また、スメクタイト粘土の層構造の違いを敏感に判定できるフーリエ変換型赤外線分光装置で、懸濁物と掘削コア中の粘土鉱物を比較したところ、懸濁物と同一の粘土鉱物が声問層のみでコア試料から検出された。これらの結果から、懸濁物は地層由来であり、この粘土鉱物に依存した微生物生態系が存在する可能性が高まった。瑞浪の地下水は、地下深部環境でこれまで想定されていなかった元素状硫黄やチオ硫酸が重要であることが、培養結果から明らかとなった。

本委託で開発に成功した高圧培養技術は、岩石の掘削コアにも適用が可能である。概要調査から精密調査の両段階での掘削調査で取得される地下水と岩石コアで、微生物の影響評価に利用できる体制が整った。天然バリア性能をバイオフィルムの影響も踏まえて正確に把握することは、微生物の核種移行遅延特性を安全評価に組み込めるため、より信頼性の高い地層処分の確立に寄与する。

6. 参考文献

Aoyagi K and Kazama T. (1980) Transformational changes of clay minerals, zeolites and silica minerals during diagenesis. Sedimentology 27: 179-188.

Canfield DE (2001) Biochemistry of sulfur isotopes. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 43, 607-636.

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, 11:1915-1929.

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.

Ino K, Konno U, Kouduka M. Hirota A, Togo Y, Fukuda A, Komatsu D, Tsunogai U, Tanaba AS, Yamamoto S, Iwatsuki T, Mizuno T, Ito K, Suzuki Y. (2016) Deep microbial life in high-quality granitic groundwater from geochemically and geographically distinct underground boreholes. Environmental Microbiology Reports, doi: 10.1111/1758-2229.12379.

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.

Ishii E, Sanada H, Funaki H, Sugita Y and Kurikami H (2011) The relationships among brittleness, deformation behavior, and transport properties in mudstones: An example from the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012) 116.

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.

Kouduka M., Suko T., Morono Y., Inagaki F., Ito K., Suzuki Y. (2012) A new DNA extraction method by controlled alkaline treatments from consolidated subsurface sediments. FEMS Microbiology Letter,326: 47-54.

Rice SB, Freund H, Huang WL, Clouse JA, Isaacs CM (1995). Application of Fourier transform infrared spectroscopy to silica diagenesis; the opal-A to opal-CT transformation. Journal of Sedimentary Research,65(4a),639-647.

Schloss PD, Westcott SL, Ryabin T, Hall JR, Hartmann M, Hollister EB, et al. (2009). Introducing mothur: open-source, platform-independent, community-supported software for describing and comparing microbial communities. Applied and environmental microbiology, 75(23), 7537-7541.

Sueoka Y, Yamashita S, Kouduka M, Suzuki Y. (2019) Deep microbial colonization in saponite-bearing fractures in aged basaltic crust: Implications for Subsurface Life on Mars. Frontiers in Microbiology, DOI: 10.3389/fmicb.2019.02793.

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: e113063.

Suzuki Y, Yamashita S, Kouduka M, Ao Y, Mukai H, Mitsunobu S, Kagi H, D'Hondt S, Inagaki F, Morono Y, Hoshino H, Tomioka N, Ito M. (2020) Deep microbial proliferation at the basalt interface in 33.5-104 million-year-old oceanic crust. Communications Biology, DOI: 10.1038/s42003-020-0860-1.

Whiticar MJ (1999) Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. Chemical Geology, 161: 291-314.

Yamashita S, Mukai H, Tomioka N, Kagi H, Suzuki Y. (2019) Iron-rich Smectite Formation in Subseafloor Basaltic Lava in Aged Oceanic Crust. Scientific Reports, 9, Article number: 11306.

甲斐 邦男, 前川 恵輔 (2009) 北海道幌延地域の新第三 系珪藻質泥岩中の地下水の酸素・水素同位体比と塩化物イオン濃度. 石油技術協会誌 74: 96-106.

中山 雅, 佐野 満昭, 真田 祐幸, 杉田 裕（2010）幌延深地層研究計画 平成 21 年度調査研究成果報告. JAEA-Review 2010-039.

福沢仁之（1987）北海道北部, 新第三紀後期の層状珪質岩の堆積場. 地学雑誌 93: 37-55.

産業技術総合研究所深部地質環境研究コア（2009）平成 20 年度地下水流動解析モデルの総合的検証手法の検討、p7-1-28.

7. 2020 年度外部発表

【口頭発表】

1. Yohey Suzuki, In-situ and laboratory high-pressure cultivations of deep microbiome at two Japanese underground facilities. Goldschmidt Conference. 23, June, 2020.

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 7
2. 全体研究計画（3 ヵ年における全体計画） 9
3. 2019 年度の成果概要 12
4. 2020 年度研究実施内容 15
4.1 2020 年度の計画，実施方法 15
4.1.1 使用した試料の概要 16
4.1.2 不攪乱供試体および再構成供試体の作製方法 20
4.1.3 膨潤圧測定試験の概要 23
4.1.4 XRD・膨潤圧連携試験の概要 25
4.1.5 一次元膨潤変形試験の概要 29
4.1.6 原鉱石の薄片試料作製と SEM による微視的構造観察 32
4.1.7 針貫入試験による原鉱石の力学特性評価 33
4.2 2020 年度の成果内容 35
4.2.1 粒径 2～4.75 mm の再構成試料の膨潤圧挙動 35
4.2.2 粒径 2～4.75 mm の再構成試料の膨潤変形挙動 44
4.2.3 アメリカ産・中国産原鉱石の XRD・膨潤圧連携試験結果 52
4.2.4 原鉱石の薄片試料を用いた微視的構造評価 74
4.2.5 針貫入試験による原鉱石の力学特性評価 88
4.2.6 本研究成果の地層処分事業への適用 93
5. まとめ 102
参考文献 103

図・表リスト

図 1-1　地層処分システム概念図 7
図 3-1　乾燥密度と最大膨潤圧の関係（左：月布産，右：中国産） 12
図 3-2　乾燥密度と最大一次元膨潤変形率の関係 12
図 3-3　不攪乱供試体と再構成供試体の最大膨潤圧比較 13
図 3-4　不攪乱供試体と再構成供試体のモンモリロナイトピーク形状比較 13
図 3-5　各原鉱石における鉱物組成同定結果 14
図 4-1　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） 16
図 4-2　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） 18
図 4-3　内部標準法による鉱物組成定量結果 19
図 4-4　不攪乱供試体（左）と再構成供試体（右）の作製概念図 20
図 4-5　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） 21
図 4-6　フレーム型膨潤圧試験装置の概略図 24
図 4-7　小型膨潤圧試験装置の概要 26
図 4-8　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 27
図 4-9　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] 27
図 4-10　XRD 測定面の定義 28
図 4-11　XRD 測定の概念図 28
図 4-12　一次元膨潤変形試験装置 30
図 4-13　新たに開発した一次元膨潤変形試験装置 31
図 4-14　薄片試料の外観 32
図 4-15　軟岩ペネトロ計 33
図 4-16　月布産原鉱石再構成供試体（2～4.75 mm）の膨潤圧経時変化曲線 36
図 4-17　月布産再構成供試体（粒径：～0.425 mm・0.850～2 mm・2～4.75 mm）および不攪乱供試体の試験終了時乾燥密度と最大膨潤圧関係 37
図 4-18　アメリカ産原鉱石再構成供試体（2～4.75 mm）の膨潤圧経時変化曲線 38
図 4-19　アメリカ産再構成供試体（粒径：～0.425 mm・0.850～2 mm・2～4.75 mm）および不攪乱供試体の試験終了時乾燥密度と最大膨潤圧関係 39
図 4-20　中国産再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の膨潤圧経時変化曲線 40
図 4-21　中国産再構成供試体（粒径：～0.425 mm・0.850～2 mm・2～4.75 mm）および不攪乱供試体の試験終了時乾燥密度と最大膨潤圧関係 41

図 4-22　有効モンモリロナイト密度―最大膨潤圧関係 43
図 4-23　月布産原鉱石再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の膨潤変形率経時変化曲線 45
図 4-24　月布産再構成供試体（粒径：～0.425 mm・0.850～2 mm・2～4.75 mm）および不攪乱供試体の試験開始時乾燥密度と最大一次元膨潤変形率関係 45
図 4-25　アメリカ産再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の膨潤変形率経時変化曲線 47
図 4-26　アメリカ産再構成供試体（粒径：～0.425 mm・0.850～2 mm・2～4.75 mm）および不攪乱供試体の試験開始時乾燥密度と最大一次元膨潤変形率関係 47
図 4-27　中国産再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の膨潤変形率経時変化曲線 49
図 4-28　中国産再構成供試体（粒径：～0.425 mm・0.850～2 mm・2～4.75 mm）および不攪乱供試体の試験開始時乾燥密度と最大一次元膨潤変形率関係 49
図 4-29　試験開始時有効モンモリロナイト密度―最大一次元膨潤変形率関係50
図 4-30　試験開始時の供試体乾燥密度―試験終了時の有効モンモリロナイト密度 51
図 4-31　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（A-1） 53
図 4-32　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(A-2) 54
図 4-33　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(A-3) 55
図 4-34　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(A-4) 57
図 4-35　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(C-1) 59
図 4-36　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(C-2) 61
図 4-37　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(C-3) 63
図 4-38　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(C-4) 65
図 4-39　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(C-5) 67
図 4-40　アメリカ産原鉱石の膨潤圧経時変化曲線 69

図 4-41　中国産原鉱石の膨潤圧経時変化曲線 69
図 4-42　供試体の初期乾燥密度―最大膨潤圧関係 70
図 4-43　アメリカ産原鉱石の供試体含水比―モンモリロナイト底面間隔関係 71
図 4-44　中国産原鉱石の供試体含水比―モンモリロナイト底面間隔関係 71
図 4-45　供試体含水比―モンモリロナイト底面間隔関係 72
図 4-46　中国産原鉱石の含水比 20.7%，15.4%，13.9%における不攪乱供試体・再構成供試体のピーク形状比較 73
図 4-47　偏光顕微鏡観察結果（月布産） 74
図 4-48　偏光顕微鏡観察結果（アメリカ産） 75
図 4-49　偏光顕微鏡観察結果（中国産） 76
図 4-50　偏光顕微鏡観察結果（富岡産） 77
図 4-51　SEM による観察結果 79
図 4-52　倍率 4000 倍の図における元素定量分析箇所 79
図 4-53　元素分布のマッピング結果（倍率 4000 倍の図） 80
図 4-54　倍率 4000 倍の図における元素定量分析結果 82
図 4-55　倍率 4000 倍の図における鉱物分布 83
図 4-56　倍率 3000 倍の図における元素定量分析箇所 83
図 4-57　元素分布のマッピング結果（倍率 3000 倍の図） 84
図 4-58　倍率 3000 倍の図における元素定量分析結果 86
図 4-59　倍率 3000 倍の図における鉱物分布 87
図 4-60　針貫入試験に使用した不攪乱試料の様子 88
図 4-61　月布産原鉱石の一軸圧縮強さ 90
図 4-62　アメリカ産原鉱石の一軸圧縮強さ 90
図 4-63　中国産原鉱石の一軸圧縮強さ 91
図 4-64　全原鉱石の一軸圧縮強さの比較 91
図 4-65　緩衝材の設計フローの一例 94
図 4-66　オーバーパックの腐食に伴う水素ガスの発生・破過に関する概念図 95
図 4-67　試験終了時乾燥密度-拘束圧の関係（月布産） 96
図 4-68　試験終了時乾燥密度-拘束圧の関係（アメリカ産） 96
図 4-69　試験終了時乾燥密度-拘束圧の関係（中国産） 97
図 4-70　試験終了時乾燥密度-拘束圧の関係（月布産，縦軸対数化） 97
図 4-71　試験終了時乾燥密度-拘束圧の関係（アメリカ産，縦軸対数化） 98
図 4-72　試験終了時乾燥密度-拘束圧の関係（中国産，縦軸対数化） 98
図 4-73　想定される緩衝材の経時的な状態変化 99
図 4-74　緩衝材の経時的な状態変化に伴う乾燥密度-拘束圧関係の変化概念図 99

図 4-75　原鉱石の地質年代-拘束圧の比率（不攪乱供試体/再構成供試体）関係 100

表 2-1　本研究の実施計画（2018 年度時点） 10
表 2-2　本研究の実施計画（2019 年度初頭時点） 10
表 2-3　本研究の実施計画（2020 年度初頭時点） 11
表 4-1　2020 年度の研究スケジュール 15
表 4-2　原鉱石の基本的性質 17
表 4-3　測定条件 17
表 4-4　測定条件 28
表 4-5　月布産原鉱石の再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の諸元 35
表 4-6　アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の供試体諸元 38
表 4-7　中国産原鉱石の再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の供試体諸元 40
表 4-8　月布産原鉱石の再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の諸元 44
表 4-9　アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の諸元 46
表 4-10　中国産原鉱石の再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の諸元 48
表 4-11　アメリカ産原鉱石の試験ケース 52
表 4-12　中国産原鉱石の試験ケース 52
表 4-13　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験後，A-1） 53
表 4-14　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験後，A-2） 54
表 4-15　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後，A-3） 56
表 4-16　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後，A-4） 58
表 4-17　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験後，C-1） 59
表 4-18　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後，C-2） 62
表 4-19　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後，C-3） 64
表 4-20　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後，C-4） 66
表 4-21　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後，C-5） 68
表 4-22　原鉱石の代表的な構成鉱物の化学式 [33] 82
表 4-23　月布産不攪乱試料（含水比 11.6%）の針貫入試験結果 88
表 4-24　月布産再構成試料（乾燥密度 1.71 Mg/m^3，含水比 9.1%）の針貫入試験結果 88
表 4-25　アメリカ産不攪乱試料（含水比 34.2%）の針貫入試験結果 89
表 4-26　アメリカ産再構成試料（乾燥密度 1.62 Mg/m^3，含水比 14.5%）の針貫入試験結果 89
表 4-27　アメリカ産再構成試料（乾燥密度 1.43 Mg/m^3，含水比 14.5%）の針貫入試験結果 89

表 4-28　中国産不攪乱試料（含水比 15.8%）の針貫入試験結果..... 89
表 4-29　中国産再構成試料（乾燥密度 1.81 Mg/m^3，含水比 13.0%）の針貫入試験結果 89

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 [4]を示す．

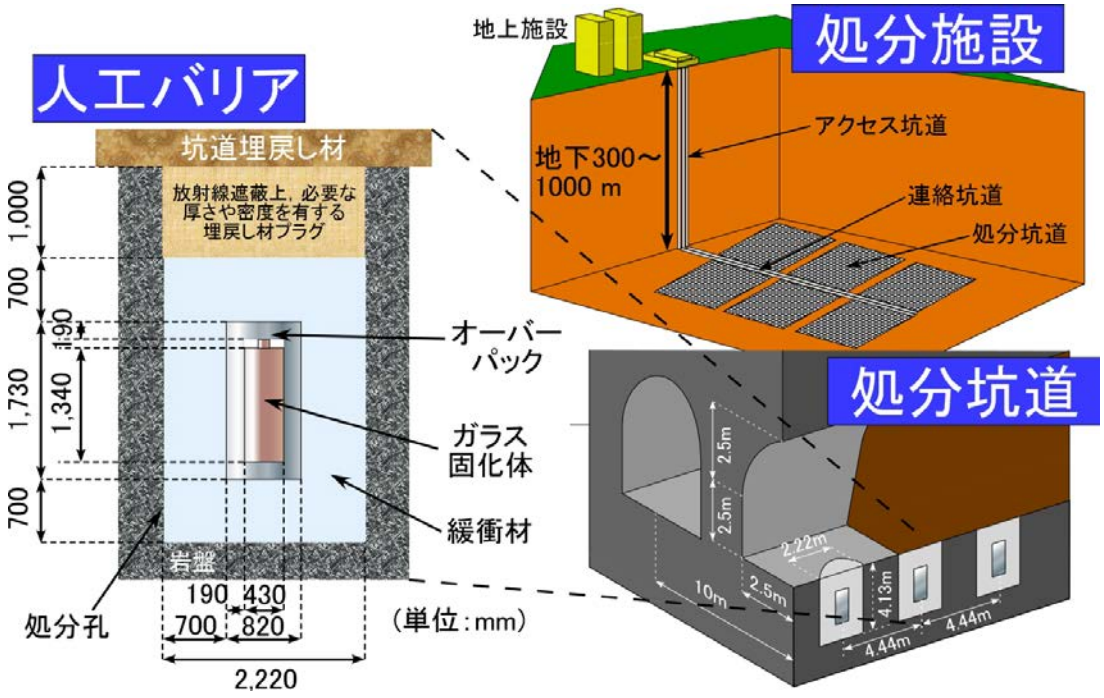


図 1-1　地層処分システム概念図

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～表 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，4.1.4 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した．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，膨潤変形試験の試験方法および精度向上に関する検討を行った．加えて，原鉱石の一軸圧縮強さ等の力学特性に関して実験データを取得するとともに，原鉱石から作製した薄片状試料の SEM による微視的構造観察を行い，セメンテーションの定量評価について検討した．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した．

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 年度の成果概要

本研究において，2019 年度に得られた成果は大きく分けて以下の 3 点である．

1) 日本・アメリカ・中国産ベントナイト原鉱石から作製した，粒径が 0.425 mm 以下，0.850～2 mm と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，図 3-1 に示すように，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，図 3-2 に示すように，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．

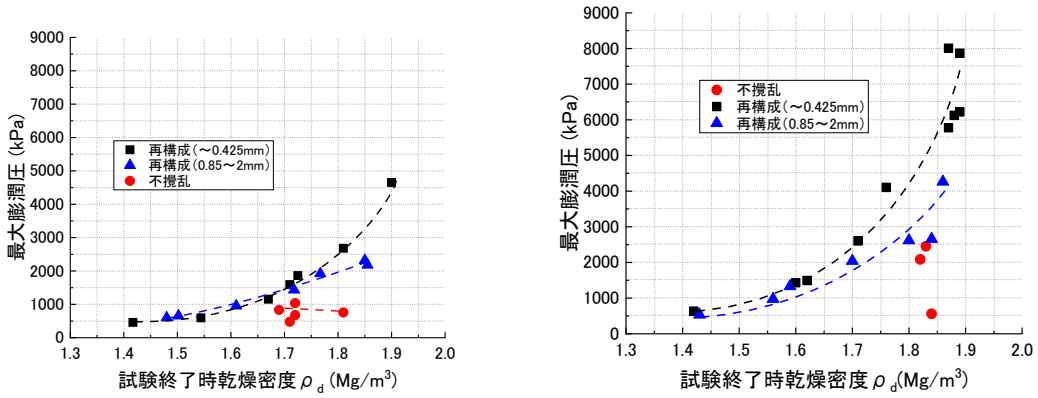


図 3-1　乾燥密度と最大膨潤圧の関係（左：月布産，右：中国産）

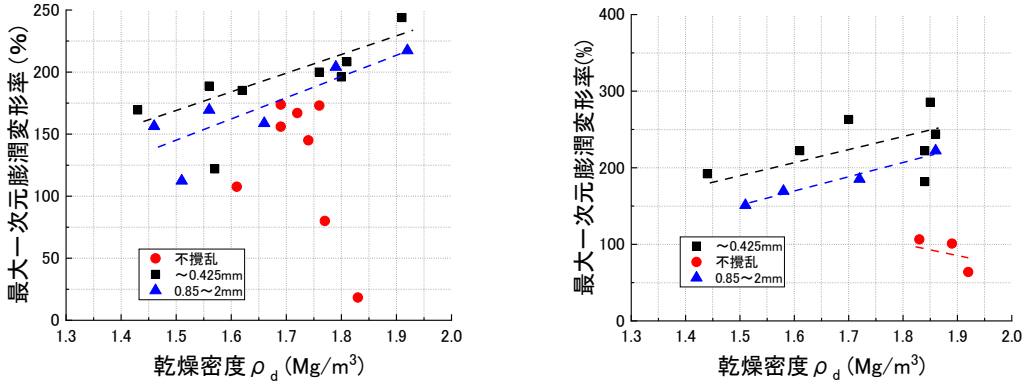


図 3-2　乾燥密度と最大一次元膨潤変形率の関係

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，図 3-3 に示すように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た．また，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，図 3-4 に示すように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．

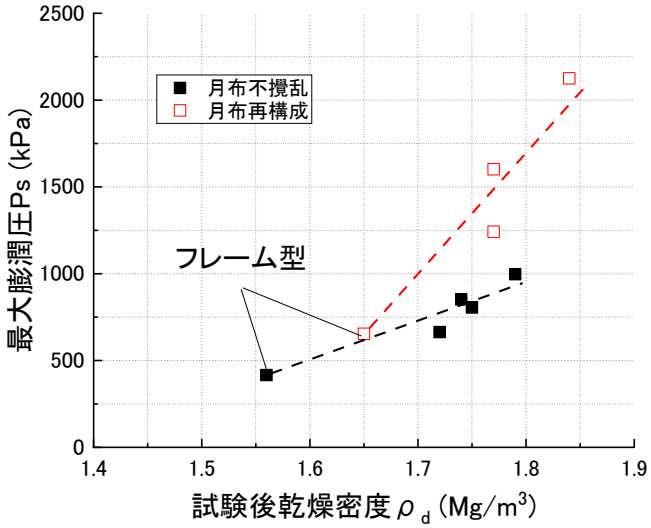


図 3-3　不攪乱供試体と再構成供試体の最大膨潤圧比較

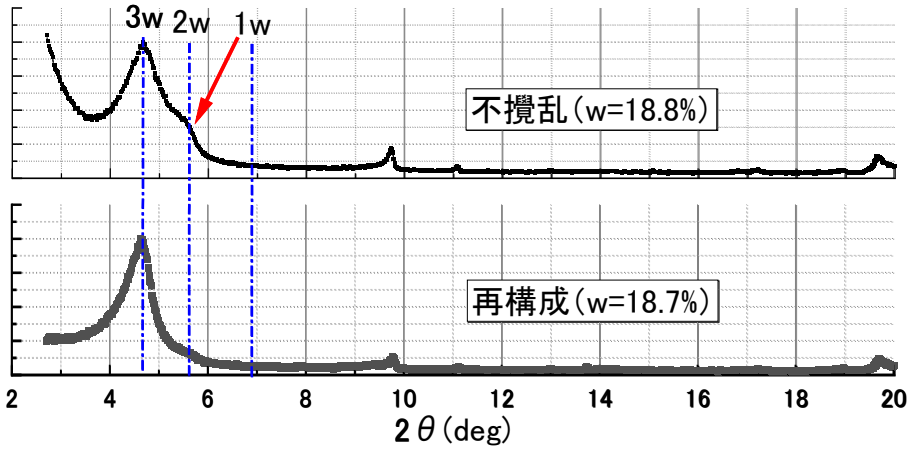


図 3-4　不攪乱供試体と再構成供試体のモンモリロナイトピーク形状比較

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，図 3-5 に示すように石英，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．

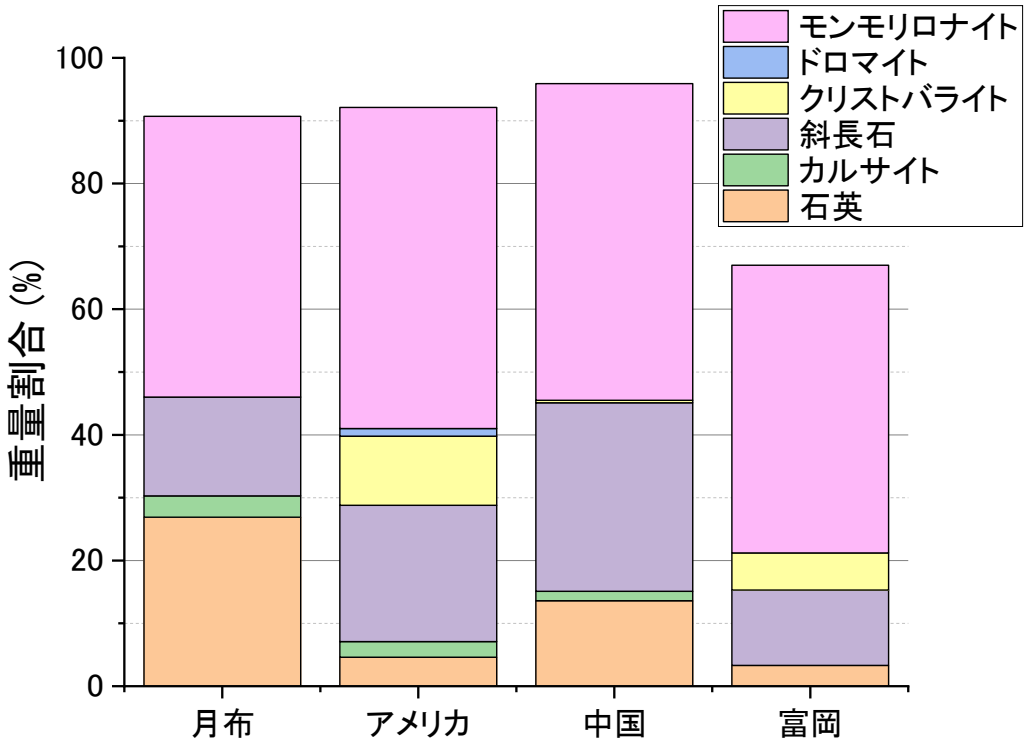


図 3-5　各原鉱石における鉱物組成同定結果

4. 2020 年度研究実施内容

4.1　2020 年度の計画，実施方法

2020 年度においては，まず月布産，アメリカ産，中国産の原鉱石試料を粉砕して粒径が 2～4.75 mm の範囲にある粉末試料を用い，締固めることで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．2019 年度に試験方法を構築し月布産原鉱石を用いて適用性を確認した XRD・膨潤圧連携試験について，アメリカ産・中国産原鉱石の不攪乱・再構成供試体（粒径：～0.425 mm）について試験を実施した．また，膨潤変形試験装置の試験方法および装置について，新たな装置の開発および試験条件（特に供試体高さ）を検討した．加えて，原鉱石におけるセメンテーションのメカニズム解明に向けて，薄片試料を作製して SEM で観察し，微視的構造について考察した．また，不攪乱試料と再構成試料の特性比較のための，原鉱石の地質年代の代替指標となりうる物理量について検討するため，非破壊物理試験である針貫入試験を行い，原鉱石の一軸圧縮強さについて評価を行った．

表 4-1　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）							→	→	→	→		
薄片試料の作製・観察による微視的構造評価							→	→	→	→		
針貫入試験による原鉱石の力学特性評価							→	→	→	→		
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										→	→	

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および，本研究でこれまでに実施した膨潤圧測定試験，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などの各種試験方法の概要について述べる．

4.1.1 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 4-1 に使用した原鉱石サンプルの様子を示す．

図 4-1 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 4-2 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 4-2　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 4-3 に示す．

表 4-3　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 4-2 に示す．

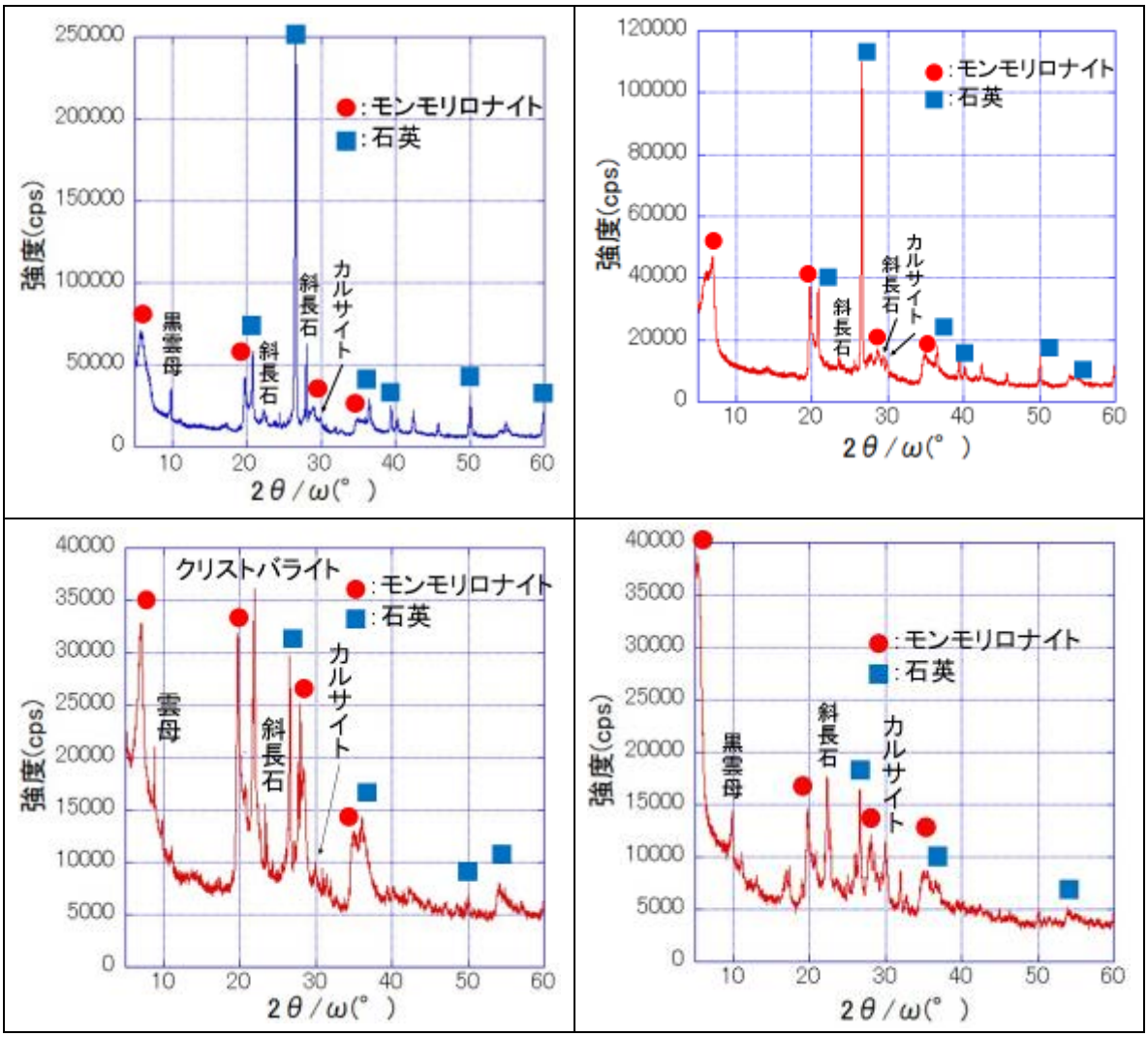


図 4-2　各原鉱石の粉末試料の鉱物組成分析結果（1 段目左：月布産，1 段目右：中国産，2 段目左：アメリカ産，2 段目右：富岡産）

また，原鉱石中に含まれる各鉱物の質量割合を定量的に評価するために，CaF_2 を標準試料として添加することにより，内部標準法を実施した．内部標準法により得られた鉱物組成定量結果を図 4-3 に示す．なお，モンモリロナイトの含有率については，メチレンブルー吸着試験により得られた値を用いている．

これより，随伴鉱物として月布産原鉱石では石英が約 30%を占め，次いで斜長石が約 20%程度を占めると得られた．アメリカ産原鉱石では斜長石が約 20%を占め，石英が微量である代わりに同じ SiO_2 であるクリストバライトが約 10%を占めると得られた．中国産原鉱石では斜長石が約 30%を占め，石英が約 10%を占めると得られた．富岡産原鉱石では，斜長石が約 10%を占めると得られたが，全般的に随伴鉱物の定量化が困難であった．

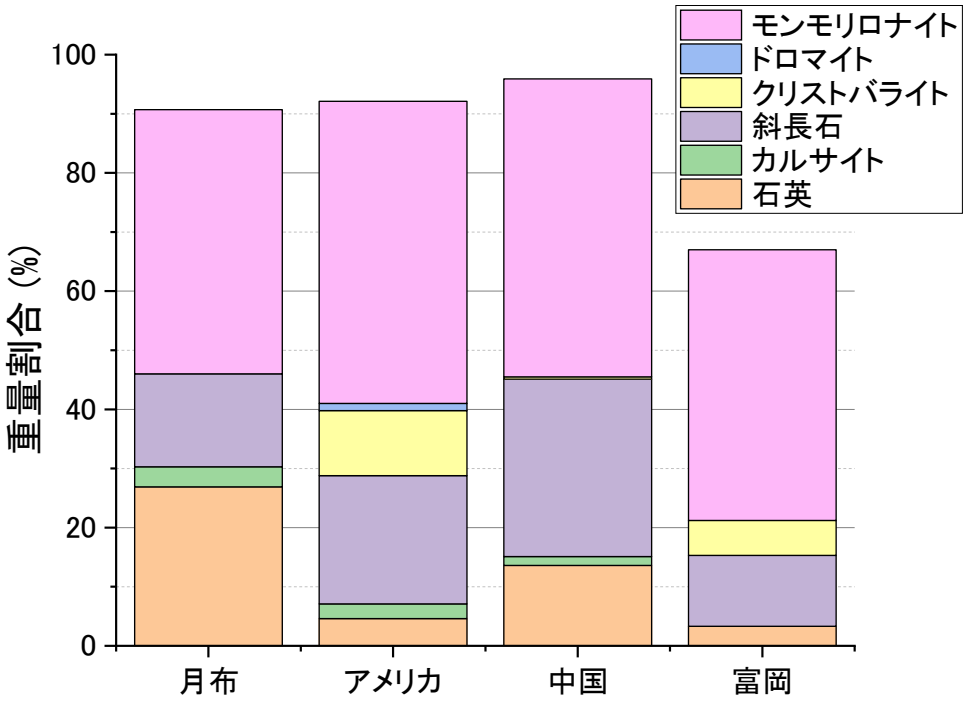


図 4-3　内部標準法による鉱物組成定量結果

4.1.2　不撹乱供試体および再構成供試体の作製方法

不撹乱供試体は，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 4-4 に不撹乱供試体と再構成供試体の作製概念図を示す．

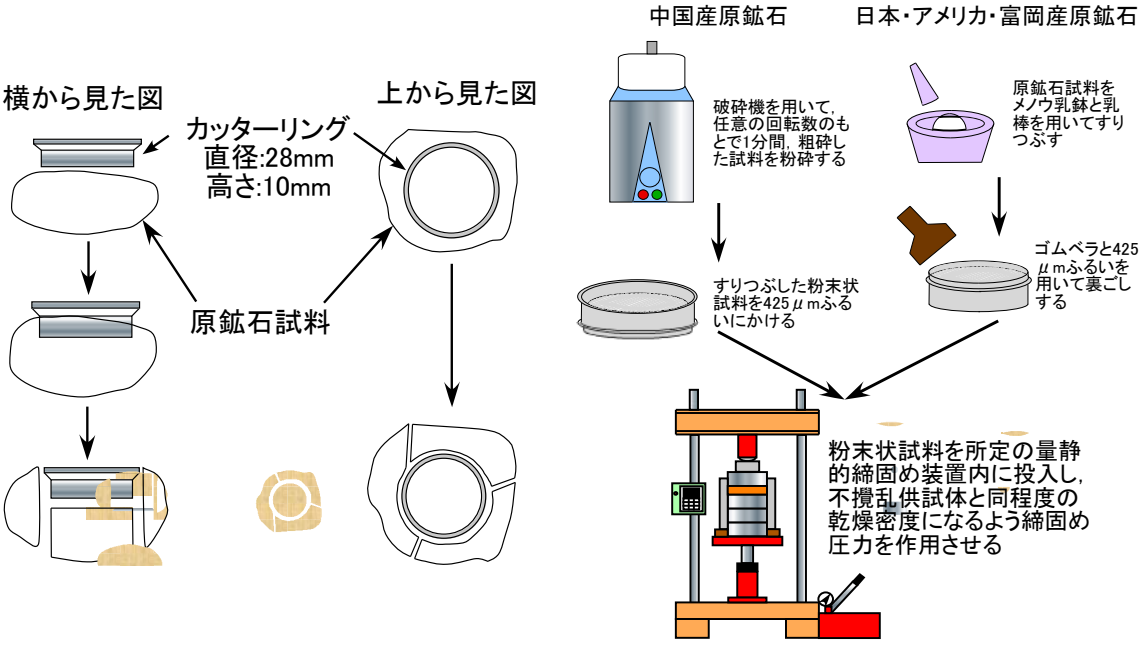


図 4-4　不撹乱供試体（左）と再構成供試体（右）の作製概念図

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 4-5 に示す．

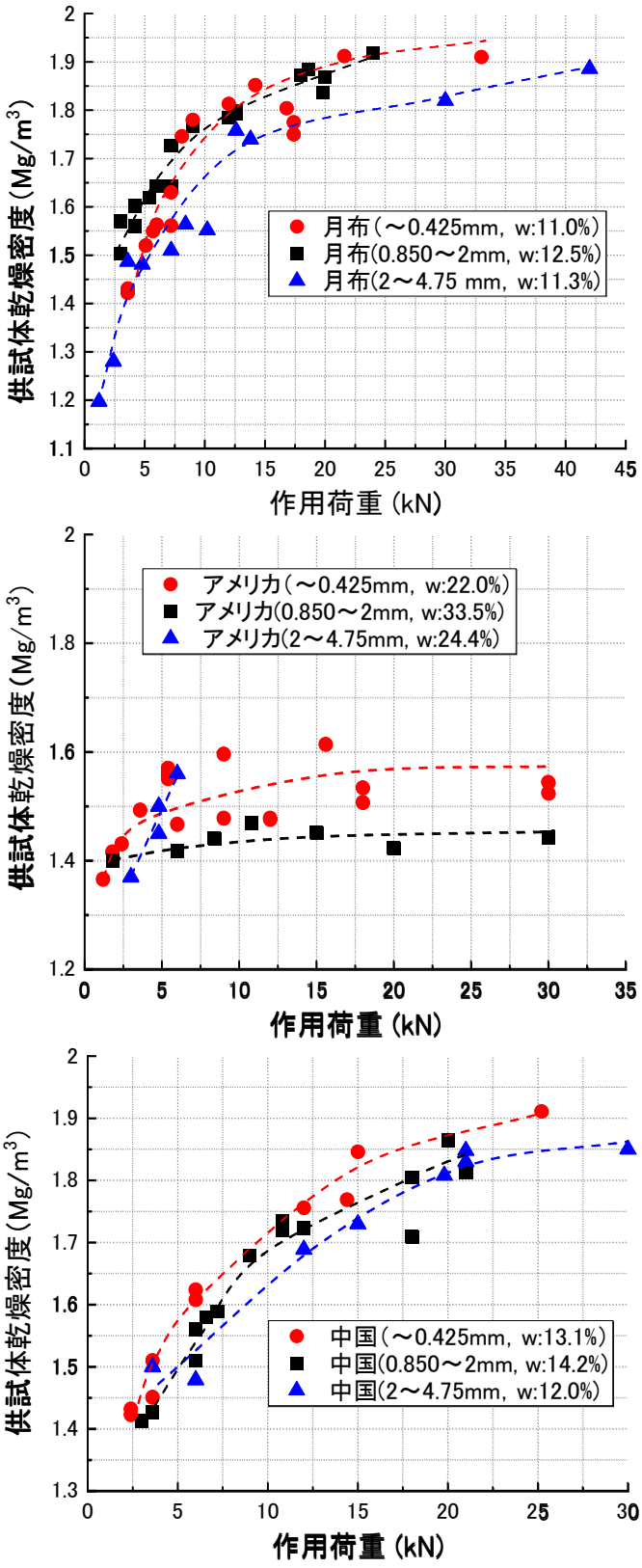


図 4-5　再構成供試体の作用荷重—乾燥密度の関係（上段：月布産，中段：アメリカ産，下段：中国産）

図 4-5 より，月布産，アメリカ産，中国産のいずれの原鉱石においては，作製後の供試体乾燥密度にバラつきは見られるものの, 粒径～0.425 mm, 0.850～2 mm および 2～4.75 mm のいずれの試料もほぼ同様の乾燥密度－荷重曲線をしめすことが分かった．これより，今回作製した 3 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．膨潤圧・一次元膨潤変形試験をはじめとする各種試験においては，これらの乾燥密度－締固め荷重関係を参考として再構成供試体の作製を行った.

4.1.3 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 4-6 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，4.1.2 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．

$$\rho_{d0} = \frac{m}{A \times (H_0 + \Delta d)} \times 1000 \tag{1}$$

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．

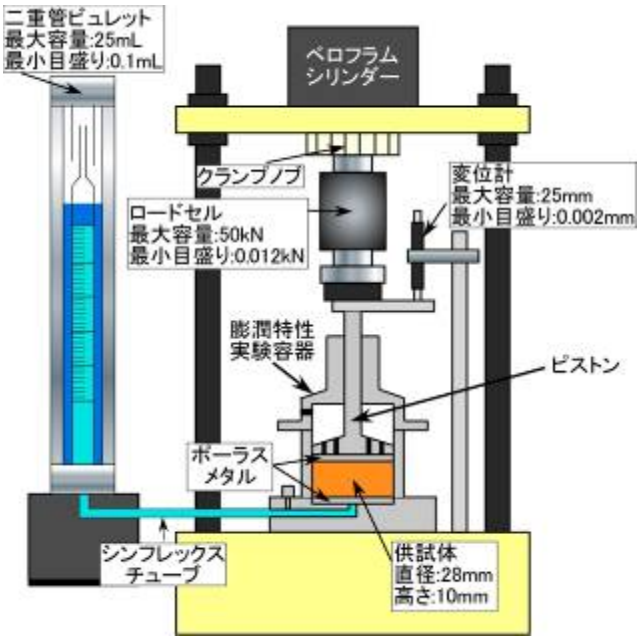


図 4-6　フレーム型膨潤圧試験装置の概略図

4.1.4 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 4-7 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 4-8 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 4-9）．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 4-7 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，4.1.2 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 4-4 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．供試体は各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．

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 4-4 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 4-10 に示すように名づけ，区別した．また，図 4-11 に XRD 測定の概念図を示す．

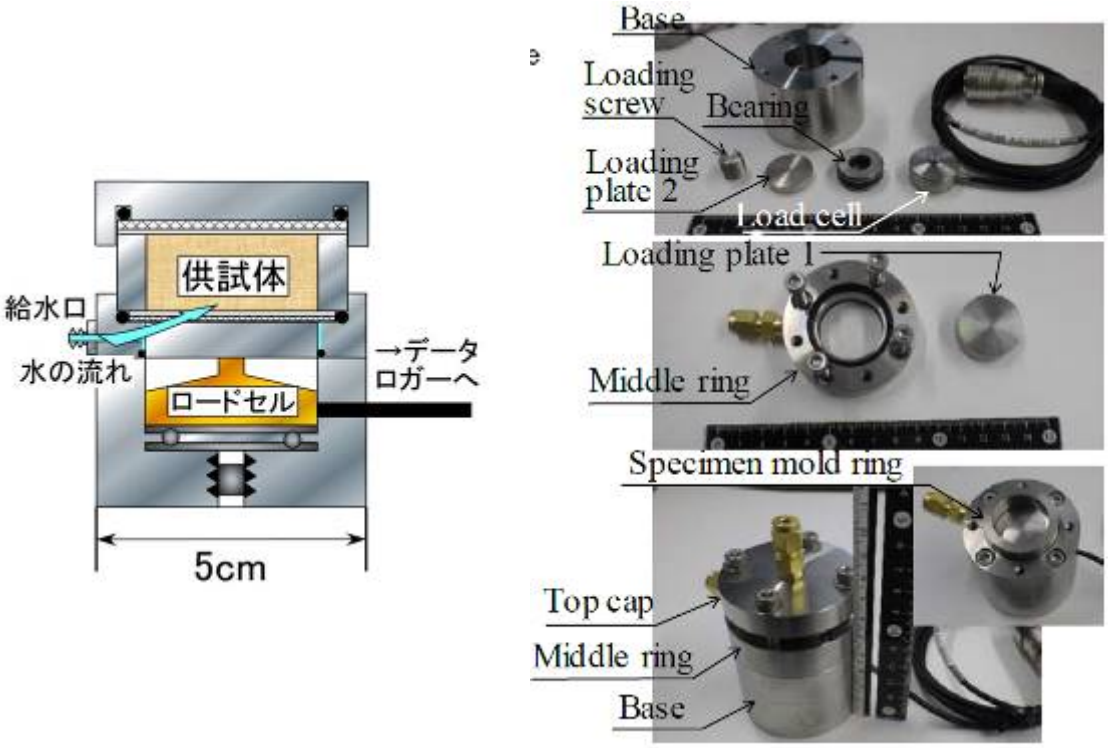


図 4-7　小型膨潤圧試験装置の概要

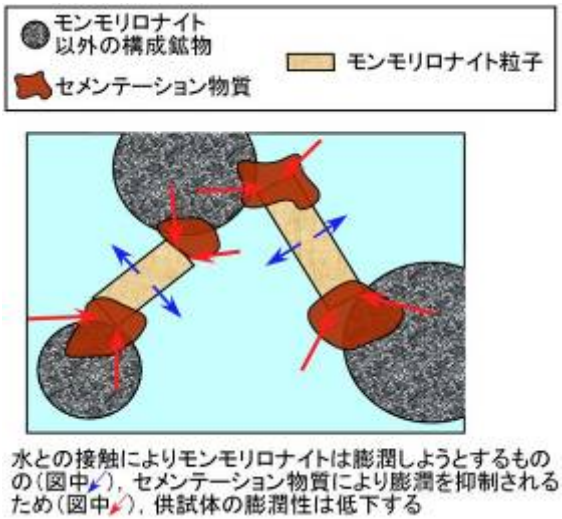


図 4-8　本研究における不攪乱供試体の膨潤圧低下メカニズムの推察

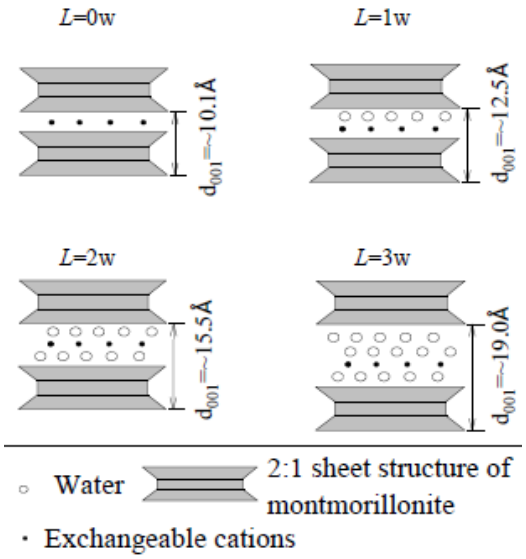


図 4-9　モンモリロナイト単位結晶の底面間隔と層間の水分子量の関係 [23)]

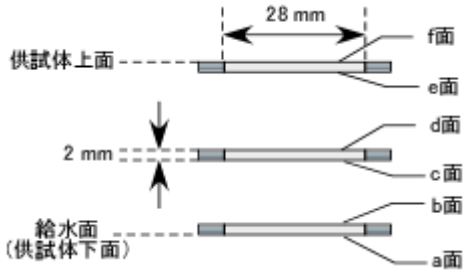


図 4-10　XRD 測定面の定義

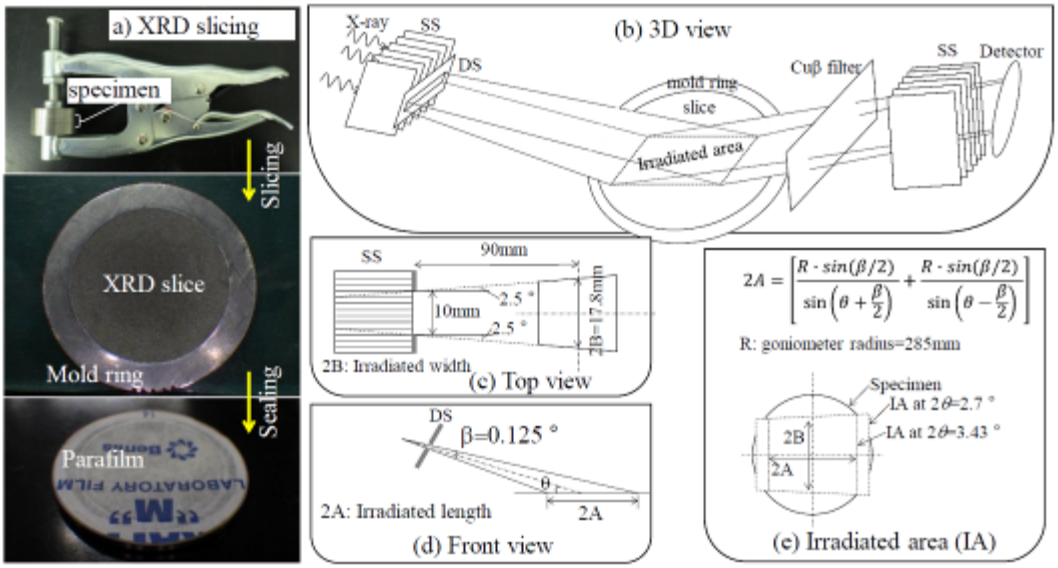


図 4-11　XRD 測定の概念図

表 4-4　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

4.1.5　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 4-12 に示す装置により一次元膨潤変形率を測定した．4.1.4 および 4.1.5 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，4.1.2 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．

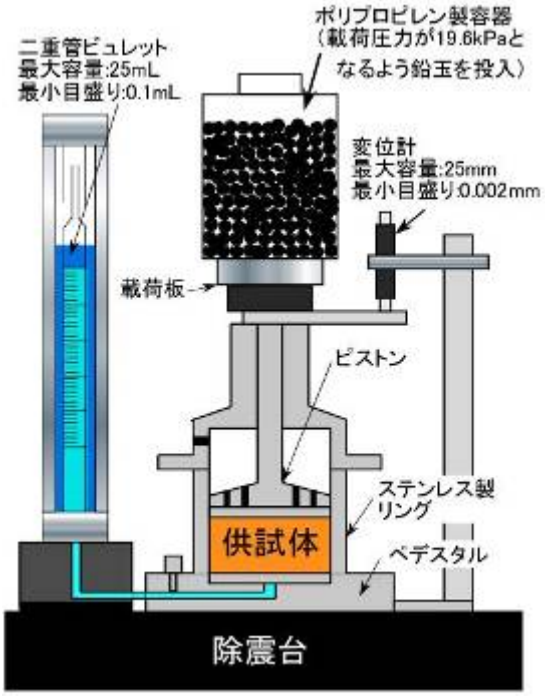


図 4-12　一次元膨潤変形試験装置

なお，図 4-12 に示す試験装置の問題点として，載荷可能な荷重がサイズ的に限定され，供試体に作用できる拘束圧が限られてしまうこと，供試体上部から給水する際，装置の構造上水浸させることしかできず，給水量を定量的に測定できないことなどが挙げられるため，本研究ではこれらを解決するために以下に示す試験装置を新たに開発した．新型の一次元膨潤変形試験装置を図 4-13 に示す．

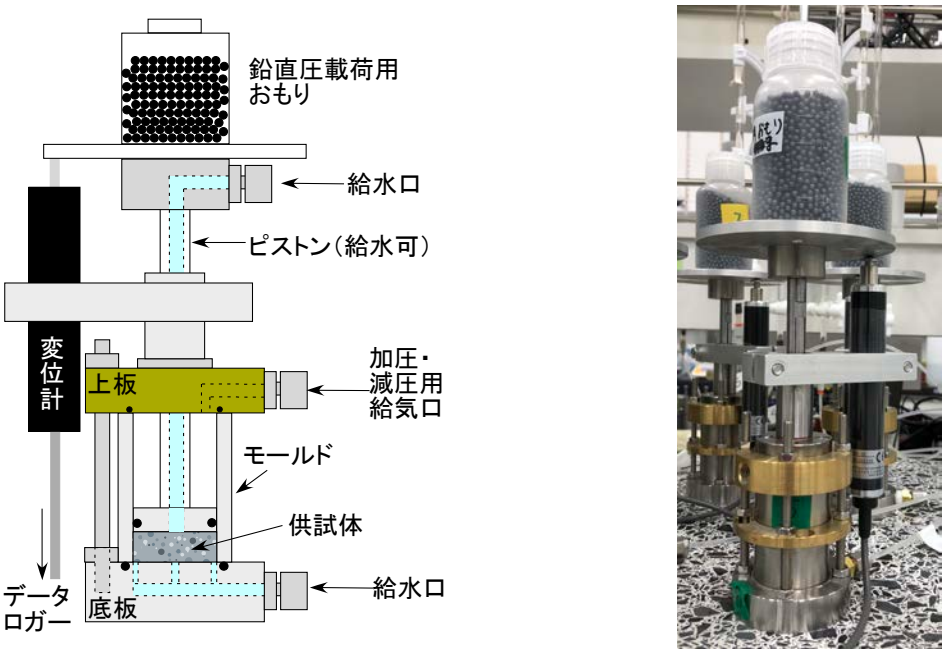


図 4-13　新たに開発した一次元膨潤変形試験装置

先述の問題点に対して，以下の改良を加えることにより解決した．

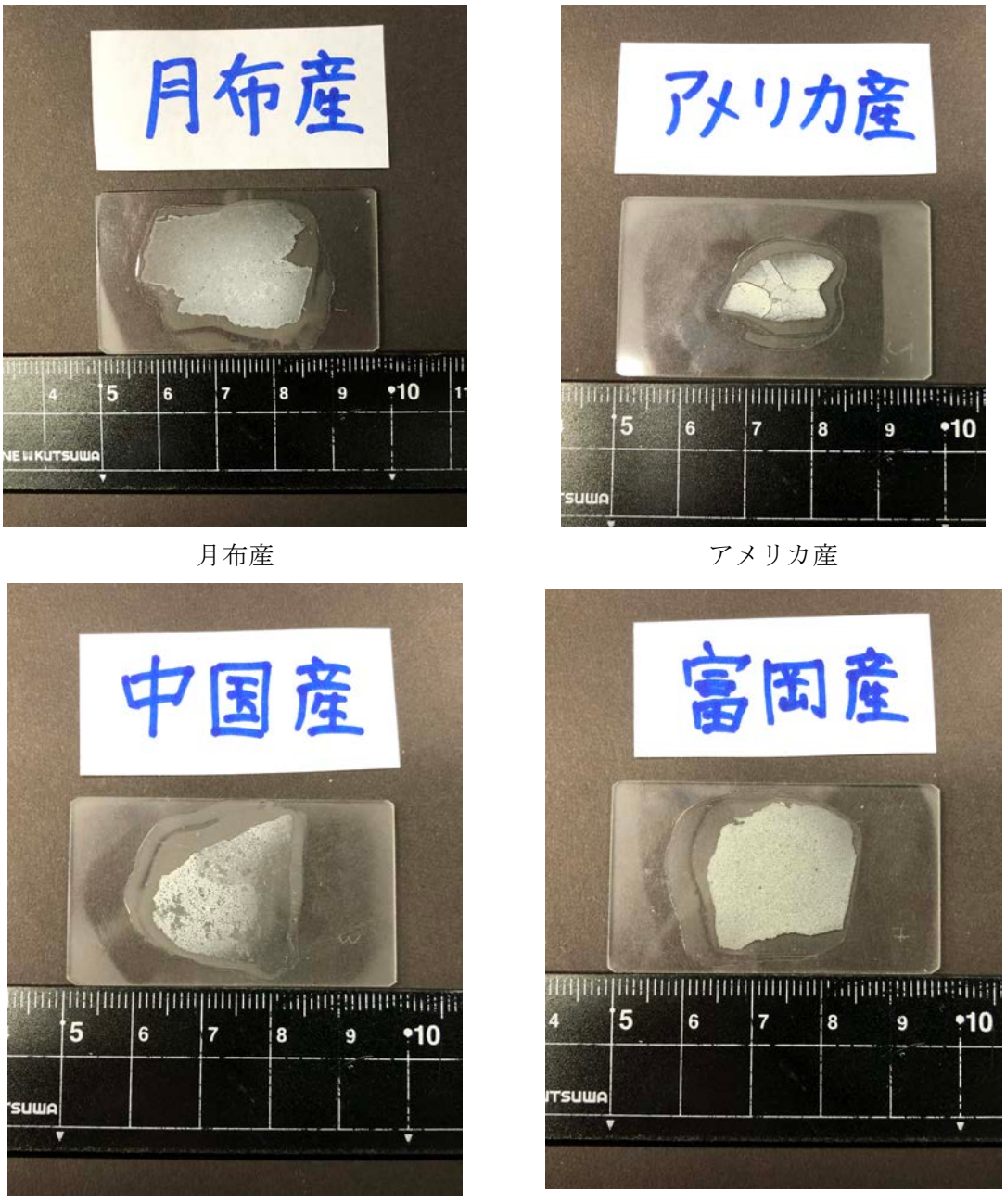
・供試体上部のピストンおよび載荷用プレートに給水口を設けたことにより，上下面いずれからでも給水量を定量的に測定できるようになった．

・ピストンに O リングを設けたことにより，空気供給および真空引きすることが可能になり，空気圧による拘束圧の載荷や，減圧により飽和を促進しながら膨潤変形量を測定できるようになった．

・XRD・膨潤圧連携試験で用いている多リング式モールドを導入可能な構造とし，試験後供試体を用いて乾燥密度や含水比分布測定と XRD 測定を実施できるようにした．

4.1.6　原鉱石の薄片試料作製と SEM による微視的構造観察

本研究では，原鉱石におけるセメンテーションのメカニズム解明のため，岩石の結晶組織評価で一般に用いられる薄片試料を作製し，その観察を行った．本項では薄片試料の概要および観察方法について述べる．薄片試料の作製は，早稲田大学教育・総合科学学術院薄片室(2019)[26]に基づき行った．作製された薄片試料の外観を図 4-14 に示す．



月布産　　アメリカ産

中国産　　富岡産

図 4-14　薄片試料の外観

4.1.7 針貫入試験による原鉱石の力学特性評価

原鉱石の不攪乱供試体と再構成供試体の膨潤特性の差異の評価において，本研究ではこれまで地質年代に基づいた整理を行ってきた．しかし，地質年代の同定にあたっては誤差が大きいこと，原鉱石の生成環境（周囲の地質や埋没深度，地温など）による影響も少なからず影響を与えていると考えられる．そこで本項では，力学特性を取得して原鉱石の特性評価，セメンテーション評価を試みるとともに，地質年代の代替指標となりうるかを検討するため，第一として非破壊的な力学特性評価試験である針貫入試験を実施した．針貫入試験は，非破壊かつ迅速に試験を実施することが可能であり，破壊型試験（三軸圧縮試験や一軸圧縮試験など）による強度評価とも比較的良好な相関性・精度を有することから，フィルダムの軟岩基礎の設計強度評価 [27]や，コンクリート構造物の劣化に伴う強度評価 [28]などにも用いられている．

針貫入試験は，岩石等の試料に針を貫入した場合の貫入力(N)と貫入量(mm)との比（針貫入勾配(N/mm)）を求め，一軸圧縮強度(kN/m^2)を近似式により換算して求める試験方法である．貫入力および貫入量は，針が 10mm 貫入した時の貫入力，もしくは貫入力が 100N に達した時の貫入量を用いる．針貫入試験には株式会社丸東製作所製の軟岩ペネトロ計 SH-70 を用いた．図 4-15 に軟岩ペネトロ計を示す．

図 4-15　軟岩ペネトロ計

軟岩ペネトロ計を用いた針貫入試験の手順を以下に示す．

(1) 貫入針を先端部に取り付ける．
(2) 先端部の押圧子及び貫入力量の指示リングをセットする．
(3) 試料の測定点に先端部の押圧子を直角に押し当て，貫入試験を行う．
(4) 貫入量が 10mm の時の貫入力(N)、もしくは貫入力が 100N の時の貫入量(mm)のどちらかを求める．
(5) 針貫入勾配（貫入力(N)/貫入量(mm)）を求める．
(6) 針貫入勾配(N/mm^2)と一軸圧縮強度(kN/mm^2)の関係を表す近似式(式 5)[29]を用いて，一軸圧縮強度を求める．

$$y=0.978x+2.621 \quad (5)$$

ここに，x：針貫入勾配の常用対数値

y：一軸圧縮強度の常用対数値

4.2　2020 年度の成果内容

本項では，4.1 で述べた各試験により得られた成果について述べる．

4.2.1　粒径 2～4.75 ㎜の再構成試料の膨潤圧挙動

・月布産原鉱石

表 4-5 に月布産原鉱石の再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の供試体諸元を示す．また，図 4-16 に再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の膨潤圧経時変化曲線を示す．

表 4-5　月布産原鉱石の再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の諸元

試験名	膨潤圧試験(月布 2～4.75 mm)					
試料名	1	2	3	4	5	6
試験開始時の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.74	1.51	1.55	1.89	1.20	1.30
最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m3)	1.73	1.52	1.54	1.85	1.19	1.30
初期含水比(%)	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3
初期飽和度（%）	52.9	37.6	40.1	67.1	23.9	28.3
試験終了時含水比（%）	22.4	29.0	24.5	15.5	47.8	38.6
試験終了時飽和度（%）	103.8	97.4	84.9	87.2	100.8	95.3
最大膨潤圧 (kPa)	1453	817	930	3638	296	434

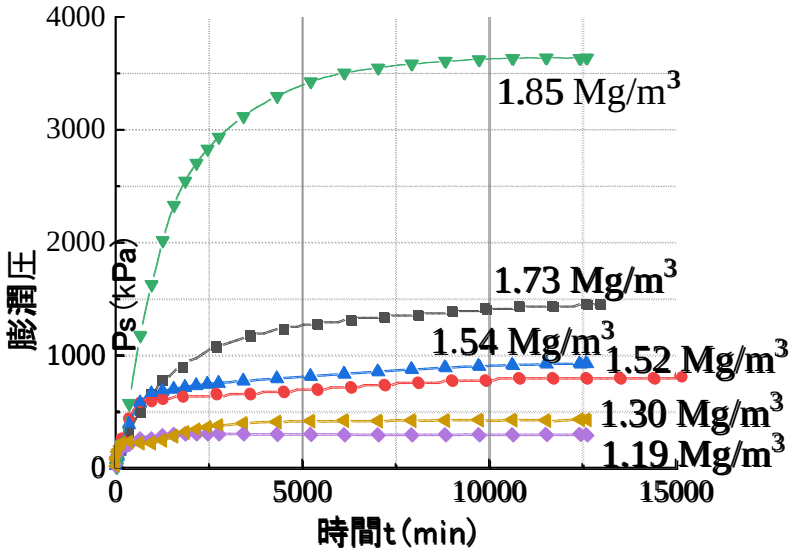


図 4-16　月布産原鉱石再構成供試体（2～4.75 mm）の膨潤圧経時変化曲線

これより，月布産原鉱石再構成供試体（2～4.75 mm）において，膨潤圧は試験開始直後に急激に上昇した後に一定値に収束する挙動であった．一定値に収束するのに要する時間として，乾燥密度が比較的低い 1.19～1.54 Mg/m^3 の範囲の供試体では約 1000～2000 分程度と短いのに対し，1.73・1.85 Mg/m^3 と乾燥密度が比較的高い供試体では約 5000 分以上と長くなっている．これは，ベントナイトの水分移動性が低く，乾燥密度が高くなるほど間隙が小さくなることにより供試体の吸水による飽和とそれに伴う膨潤圧の発現により時間を要するためと推察される．

図 4-17 に月布産原鉱石再構成供試体（2～4.75 mm）に加え，再構成供試体（粒径～0.425 mm），再構成供試体（粒径：0.850～2 mm）および不攪乱供試体を総合した，供試体試験終了時乾燥密度と最大膨潤圧（試験期間中における膨潤圧の最大値）の関係を示す．

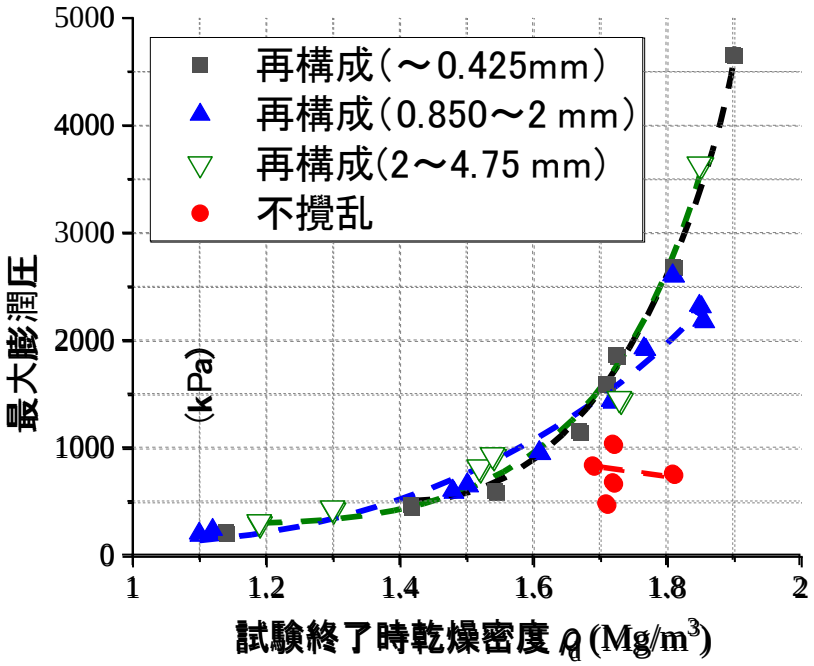


図 4-17　月布産再構成供試体（粒径：～0.425 mm・0.850～2 mm・2～4.75 mm）および不攪乱供試体の試験終了時乾燥密度と最大膨潤圧関係

これより，再構成供試体においては粒径の大小によらず，乾燥密度の上昇に応じて最大膨潤圧が上昇する傾向がみられた．また，粒径の差異による最大膨潤圧への影響については，乾燥密度 1.1～1.9 Mg/m^3 の範囲においてみられなかったため，本研究で用いた粒度範囲の月布産原鉱石試料においては，膨潤圧特性への影響は極めて小さいものと考えられる．また不攪乱供試体においては，乾燥密度 1.7～1.8 Mg/m^3 の範囲で約 500～1000 kPa と極めて値のバラツキが大きく，乾燥密度に応じた値の上昇も見られなかった．また，全ての試験ケースにおいて，不攪乱供試体の膨潤圧は再構成供試体の約 1/2 程度と低い値にとどまっていた．

・アメリカ産原鉱石

表 4-6 にアメリカ産原鉱石再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の供試体諸元を示す．また，図 4-18 に再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の膨潤圧の経時変化曲線を示す．

表 4-6　アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の供試体諸元

試験名	膨潤圧試験(アメリカ 2～4.75 mm)						
試料名	1	2	3	4	5	6	7
試験開始時の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.25	1.26	1.54	1.48	1.50	1.44	1.08
最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m^3)	1.22	1.24	1.57	1.52	1.48	1.42	1.06
初期含水比(%)	42.6	42.6	24.4	24.4	19.4	19.3	19.3
初期飽和度（%）	100.9	102.0	50.0	45.3	67.1	60.6	35.2
試験終了時含水比（%）	44.9	42.4	33.4	33.9	34.6	33.6	63.9
試験終了時飽和度（%）	101.7	99.0	128.1	119.8	115.6	101.5	113.1
最大膨潤圧(kPa)	975	1150	2611	2452	2443	2325	548

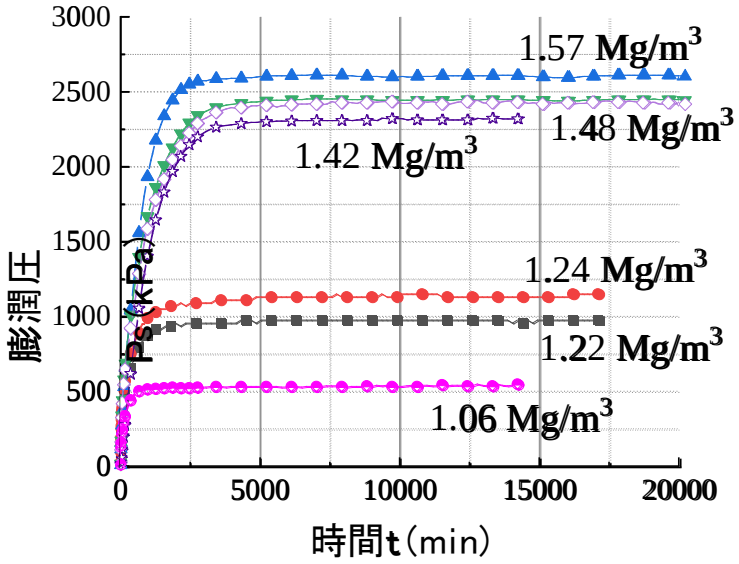


図 4-18　アメリカ産原鉱石再構成供試体（2～4.75 mm）の膨潤圧経時変化曲線

図 4-18 より，供試体の乾燥密度の大小によらず，膨潤圧は試験開始直後に急激に上昇した後に，約 2000 分経過以降は一定値に収束する挙動であった．2019 年度の成果において，

再構成供試体の膨潤圧増加挙動において，粒径 0.425 mm 試料では 2 段階に分かれた上昇過程がみられたのに対し，粒径 0.850～2 mm 試料では粒径 2～4.75 mm と同様の，上昇段階が分かれていない挙動であったことから，アメリカ産原鉱石においては粒径が大きくなるにつれて膨潤圧の増加挙動が 1 段階の単調な増加挙動になることがわかる．

図 4-19 にアメリカ産原鉱石再構成供試体（2～4.75 mm）に加え，再構成供試体（粒径～0.425 mm），再構成供試体（粒径：0.850～2 mm）および不撹乱供試体を総合した，供試体試験終了時乾燥密度と最大膨潤圧（試験期間中における膨潤圧の最大値）の関係を示す．

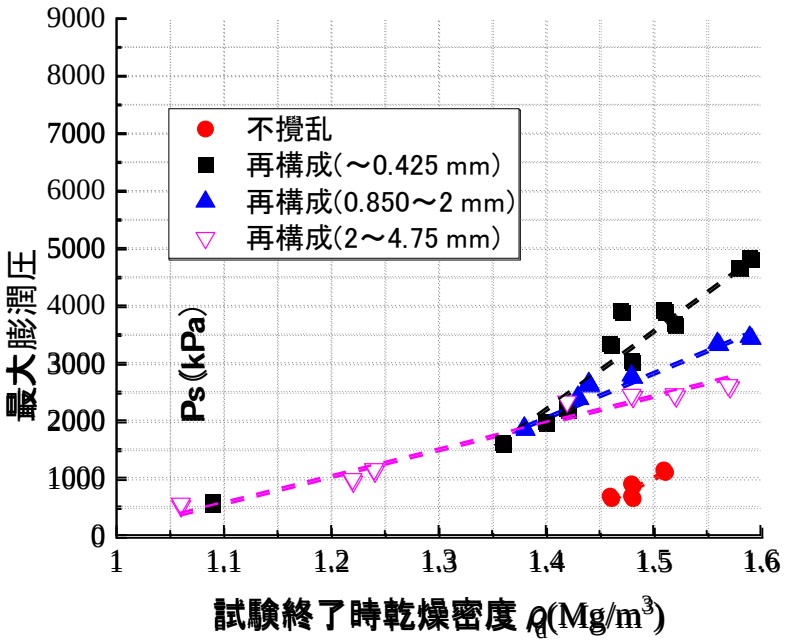


図 4-19　アメリカ産再構成供試体（粒径：～0.425 mm・0.850～2 mm・2～4.75 mm）および不撹乱供試体の試験終了時乾燥密度と最大膨潤圧関係

これより，再構成供試体においては乾燥密度と最大膨潤圧の間に一義的な関係があることが見て取れる．また，試験終了時供試体乾燥密度が 1.4～1.6 Mg/m^3 の範囲において，試料の粒径が大きくなるにつれて，最大膨潤圧が低下する傾向がみられた．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．以上から，アメリカ産原鉱石再構成供試体においては，試料の初期粒径の大小，すなわち粒子の有する固結の影響の大小により最大膨潤圧が低下するという傾向が得られた．また，不撹乱供試体については，乾燥密度 1.45～1.50 Mg/m^3 の範囲において約 500～1000 kPa と，同範囲の再構成供試体に比べて 1/5～1/8 程度と低くとどまっている傾向がみられた．

・中国産原鉱石

表 4-7 に中国産原鉱石再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の供試体諸元を示す．また，図 4-20 に再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の膨潤圧の経時変化曲線を示す．

表 4-7　中国産原鉱石の再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の供試体諸元

試験名	膨潤圧試験(中国 2～4.75 mm)								
試料名	1	2	3	4	5	6	7	8	9
試験開始時の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.81	1.49	1.83	1.13	1.67	1.73	1.85	1.89	1.08
最大膨潤圧発生時の乾燥密度(Mg/m^3)	1.81	1.49	1.81	1.11	1.66	1.70	1.82	1.85	1.08
初期含水比(%)	12.0	15.6	15.6	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4
初期飽和度（%）	64.6	51.5	87.0	29.6	66.6	72.3	87.7	94.0	27.4
試験終了時含水比（%）	21.6	35.3	22.6	58.9	26.9	25.7	21.8	20.4	61.7
試験終了時飽和度（%）	115.7	115.3	121.9	110.2	114.3	116.8	118.8	118.0	110.1
最大膨潤圧(kPa)	2935	723	1887	219	1393	1470	2153	2389	195

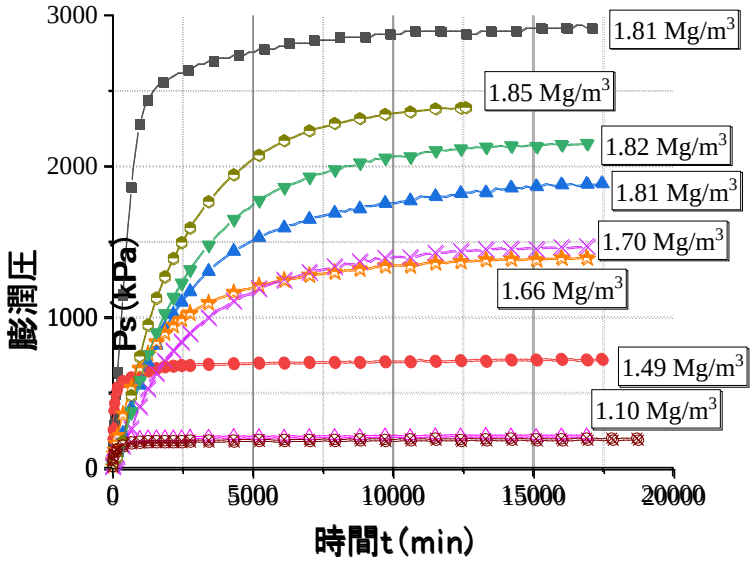


図 4-20　中国産再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の膨潤圧経時変化曲線

図 4-20 より，供試体の乾燥密度の大小によらず，膨潤圧は試験開始直後に急激に上昇した後に，約 5000 分経過以降は一定値に収束する挙動であった．また，他の原鉱石とは異なり，供試体乾燥密度と圧力値の収束に要する時間の間に一義的な関係はみられなかった．

図 4-21 に中国産原鉱石再構成供試体（2～4.75 mm）に加え，再構成供試体（粒径～0.425 mm），再構成供試体（粒径：0.850～2 mm）および不攪乱供試体を総合した，供試体試験終了時乾燥密度と最大膨潤圧（試験期間中における膨潤圧の最大値）の関係を示す．

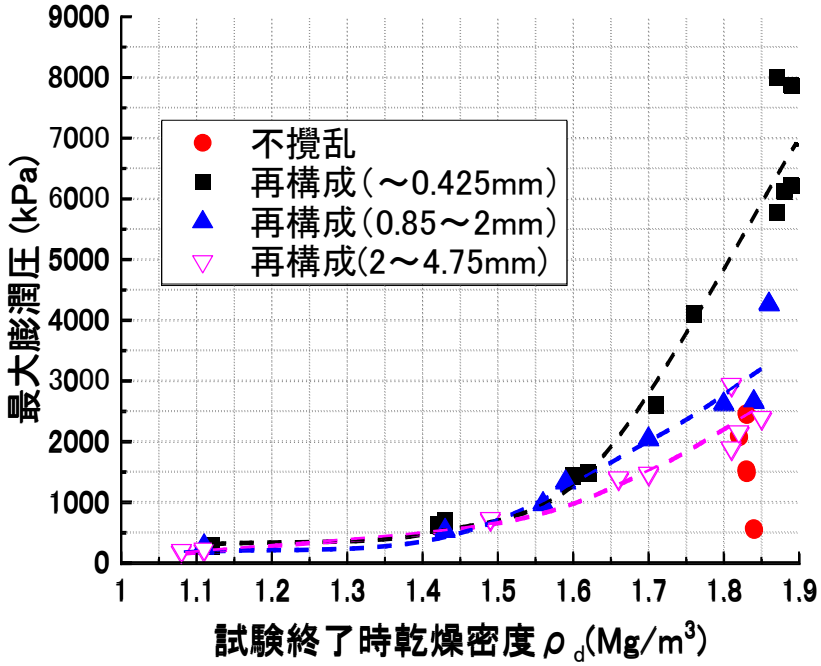


図 4-21　中国産再構成供試体（粒径：～0.425 mm・0.850～2 mm・2～4.75 mm）および不攪乱供試体の試験終了時乾燥密度と最大膨潤圧関係

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 2～4.75 mm と粒径～0.425 mm･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 1.1～1.6 Mg/m^3 の領域においては粒径の大小によらず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，粒径が大きくなるほど最大膨潤圧が低下する傾向が見受けられた．また，不攪乱供試体においては値のバラつきが大きく，一番大きい値（約 2500 kPa）は再構成供試体の粒径 2～4.75 mm と同程度の値であるが，おおむね再構成供試体に比べて値が小さい傾向であった．

・有効モンモリロナイト密度を導入した統一的な評価

本章ではこれまで，月布産，アメリカ産，中国産の個々について膨潤圧の経時変化，試験終了時乾燥密度―最大膨潤圧関係について議論してきた．本研究では，供試体乾燥密度に加えて試料ごとのモンモリロナイト含有率の差異を考慮した，有効モンモリロナイト密度を導入して，3 種類の原鉱石の最大膨潤圧特性について統一的な評価を行う．

有効モンモリロナイト密度は以下の式(6)・(7)により求められる．

$$\rho_{em} = \frac{C_m \rho_d}{100 - (100 - C_m)\dfrac{\rho_d}{\rho_{nm}}} \tag{6}$$

$$\rho_{solid} = \frac{\dfrac{100}{C_m}\rho_m}{\left\{1 + \left(\dfrac{100}{C_m} - 1\right)\dfrac{\rho_m}{\rho_{nm}}\right\}} \tag{7}$$

ここに，

ρ_{em}　：有効モンモリロナイト密度（Mg/m^3）

C_m　：モンモリロナイト含有率（%）

ρ_d　：供試体乾燥密度（Mg/m^3）

ρ_{solid}　：ベントナイトの土粒子密度（Mg/m^3）

ρ_{nm}　：ベントナイトに含まれるモンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度（Mg/m^3）

ρ_m　：ベントナイトに含まれるモンモリロナイトの土粒子密度（Mg/m^3）

C_mはメチレンブルー吸着量測定試験により得られた値を用いた．ρ_{nm}は，式（6）にρ_{solid}として土粒子の密度試験で得られた各サンプルの値を代入することにより算出した．ρ_mに関しては，一般的にモンモリロナイトの土粒子密度が 2.75～2.78（Mg/m^3）程度であると言われており [30]，この値を参考にρ_m=2.77（Mg/m^3）と設定した．

図 4-22 に，以上の計算により得られた有効モンモリロナイト密度と最大膨潤圧の関係を示す．

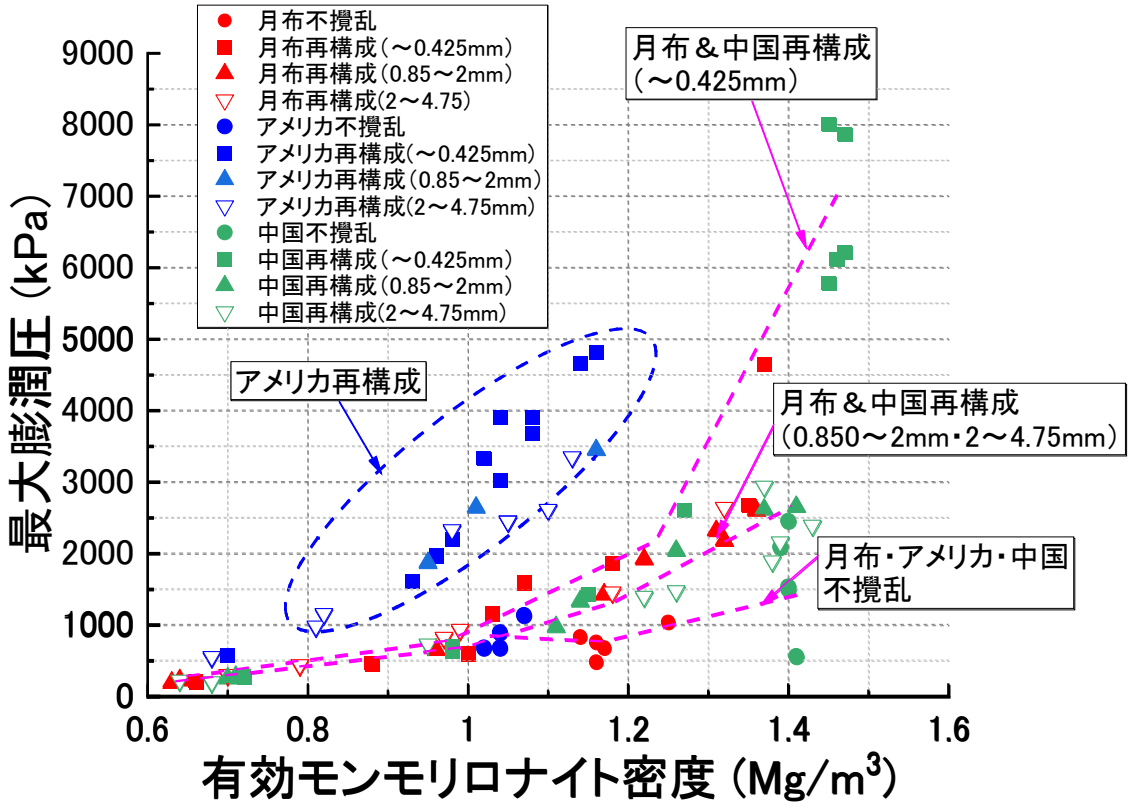


図 4-22　有効モンモリロナイト密度—最大膨潤圧関係

これより，不撹乱供試体については，3 種類の原鉱石において共通して，再構成供試体に比べておよそ 1/2 程度の膨潤圧にとどまっており，それぞれ有効モンモリロナイト密度が異なるものの，最大膨潤圧がほぼ横ばいとなっていることが分かる．また，月布産原鉱石と中国産原鉱石の再構成供試体では，有効モンモリロナイト密度と最大膨潤圧の関係においてほぼ同様の傾向であることが見受けられる．粒径 0.425 mm 以下と 0.850～2 mm・2～4.75 mm では，後者において有効モンモリロナイト密度が高くなるにつれて膨潤圧の増分が小さくなり，0.425 mm 以下との差異が大きくなる傾向であった．このことは，有効モンモリロナイト密度が高いことで，供試体中の空隙が小さくなり，粒子の膨潤変形が制限されることにより，膠結作用の影響が強く出たためであると推察される．一方，アメリカ産原鉱石では，月布・中国産原鉱石とは異なる傾向であり，同程度の有効モンモリロナイト密度において，全体的に両者よりも高い最大膨潤圧となっていることが分かる．この理由として，Ten Sleep 産原鉱石では表 1 中に示した交換性 Na^+イオン容量が 53.8 meq/100 g と，他の二つ（42.5 meq/100 g，42.3 meq/100 g）に比べて高いことが考えられる．一般に，ベントナイトの膨潤性の大小は，モンモリロナイトが結晶層間中に有する交換性陽イオンの影響を受け，特に Na^+イオンを多く保有している場合に膨潤性が高くなることが，実験結果・拡散二重層等の理論的解釈から観ても明らかにされており [31),32)]，本研究の結果はこれに整合する傾向となっている．

4.2.2 粒径 2～4.75 ㎜の再構成試料の膨潤変形挙動

・月布産原鉱石

表 4-8 に月布産原鉱石の再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の供試体諸元を示す．また，図 4-23 に再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の膨潤変形率経時変化曲線を示す．

表 4-8 月布産原鉱石の再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の諸元

	膨潤変形試験（月布 2～4.75 mm）								
試料名	1	2	3	4	5	6	7	8	9
試験開始時の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.49	1.74	1.48	1.56	1.28	1.82	1.08	1.81	1.93
試験開始時有効モンモリロナイト密度(Mg/m^3)	0.95	1.21	0.94	1.02	0.77	1.30	0.61	1.27	1.40
試験終了時の乾燥密度 (Mg/m^3)	0.61	0.61	0.63	0.61	0.58	0.64	0.57	0.69	0.67
試験終了時有効モンモリロナイト密度(Mg/m^3)	0.35	0.35	0.32	0.31	0.29	0.33	0.29	0.36	0.34
試験終了時含水比（%）	131.9	128.2	124.9	123.3	132.3	118.8	135.9	111.0	115.8
試験終了時飽和度（%）	102.9	100.7	102.1	97.6	96.6	98.7	97.5	101.8	102.2
初期含水比(%)	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3
初期飽和度（%）	36.4	53.1	36.1	40.7	27.2	62.0	20.0	59.3	52.4
最大一次元膨潤変形率 (%)	153.8	208.3	156.3	188.7	149.3	238.1	91.7	200.0	232.6
最大膨潤率時の有効モンモリロナイト密度 (Mg/m^3)	0.30	0.28	0.29	0.27	0.26	0.27	0.28	0.31	0.29

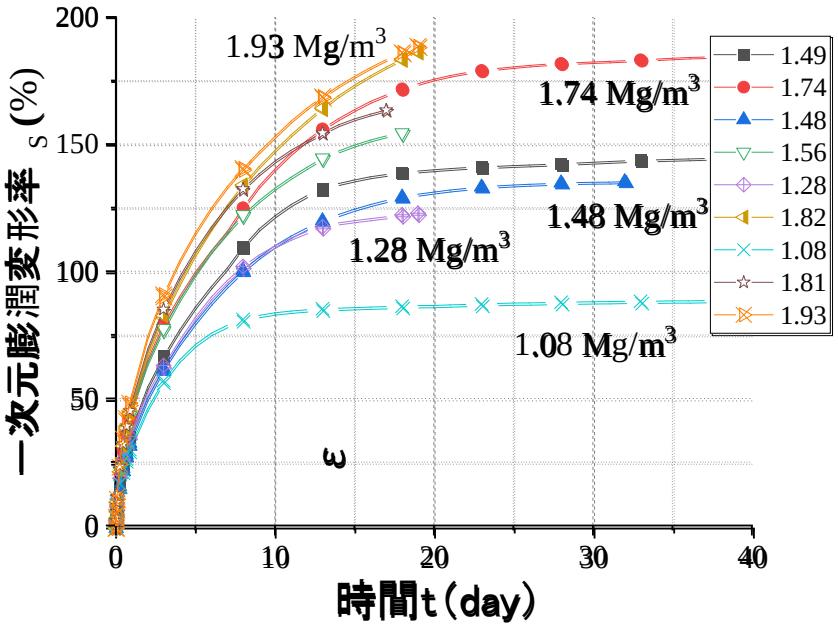


図 4-23　月布産原鉱石再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の膨潤変形率経時変化曲線

図 4-23 より，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わかる．また，図 4-24 に再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）に加えて粒径～0.425 mm，0.850～2 mm および不攪乱供試体の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．

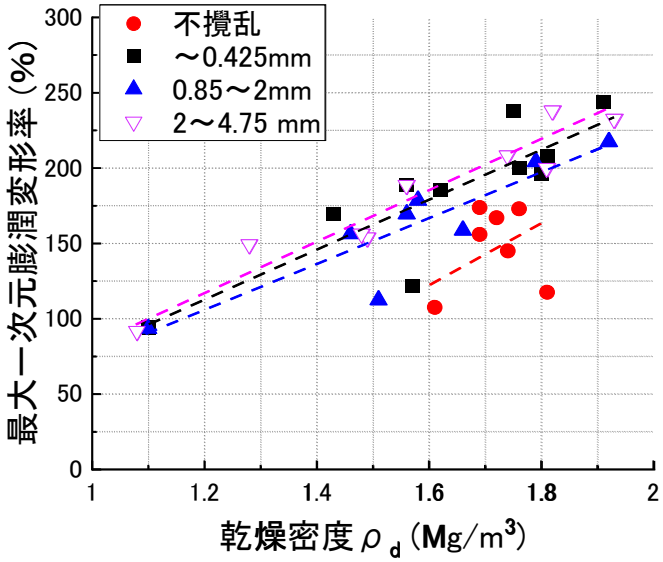


図 4-24　月布産再構成供試体（粒径：～0.425 mm・0.850～2 mm・2～4.75 mm）および不攪乱供試体の試験開始時乾燥密度と最大一次元膨潤変形率関係

図 4-24 より，再構成供試体においては，いずれの粒径においても最大一次元膨潤変形率は試験開始時供試体乾燥密度の増加に応じて線形的に増加する傾向が見受けられた．また，最大一次元膨潤変形率の値は粒径の大小によらず，ほぼ同程度であり，これは最大膨潤圧と同様の傾向であった．また，不攪乱供試体においては再構成供試体に比べて値のバラつきが大きいものの，おおむね初期乾燥密度が大きくなるにつれて最大一次元膨潤変形率も大きくなる傾向であった．再構成供試体と比較すると，乾燥密度 1.6～1.8 Mg/m^3 の範囲において，不攪乱供試体の値は再構成供試体の 2/3 からほぼ同程度といえる値であった．

・アメリカ産原鉱石

表 4-9 にアメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の供試体諸元を示す．また，図 4-25 に再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の膨潤変形率経時変化曲線を示す．

表 4-9　アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の諸元

	膨潤変形試験(アメリカ 2～4.75 mm)				
試料名	1	2	3	4	5
試験開始時の乾燥密度(Mg/m^3)	1.26	1.26	1.37	1.56	1.45
試験開始時有効モンモリロナイト密度(Mg/m^3)	0.84	0.84	0.94	1.12	1.02
試験終了時の乾燥密度(Mg/m^3)	0.41	0.40	0.39	0.45	0.42
試験終了時有効モンモリロナイト密度(Mg/m^3)	0.22	0.22	0.21	0.25	0.23
試験終了時含水比（%）	210.6	211.8	228.0	221.8	196.2
試験終了時飽和度（%）	100.8	99.7	103.7	119.8	98.3
初期含水比(%)	42.6	42.6	24.4	24.4	24.4
初期飽和度（%）	101.7	101.7	69.1	91.3	77.9
最大一次元膨潤変形率(%)	250.0	256.4	294.1	303.0	294.1
最大膨潤率時の有効モンモリロナイト密度(Mg/m^3)	0.19	0.19	0.19	0.21	0.20

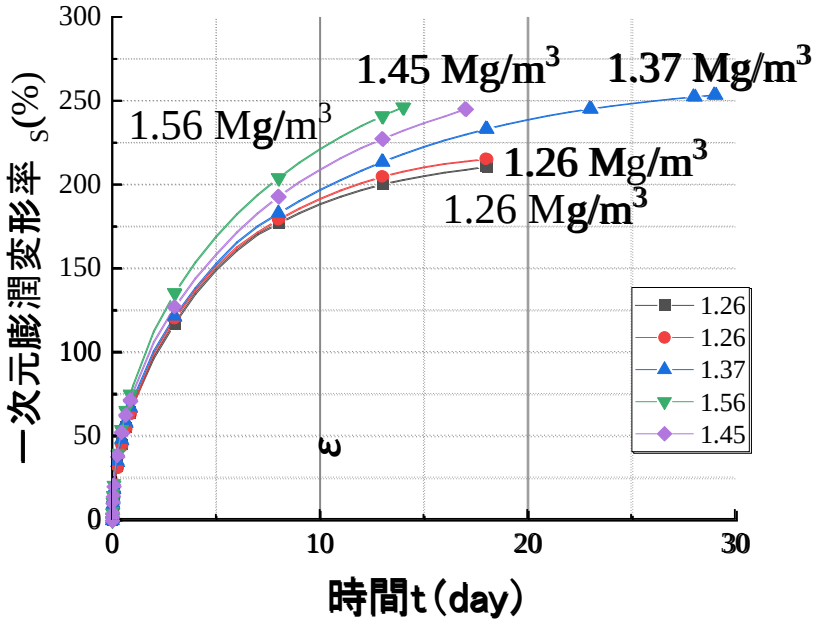


図 4-25　アメリカ産再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の膨潤変形率経時変化曲線

図 4-25 より，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わかる．また，図 4-26 に再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）に加えて粒径～0.425 mm，0.850～2 mm および不攪乱供試体の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．

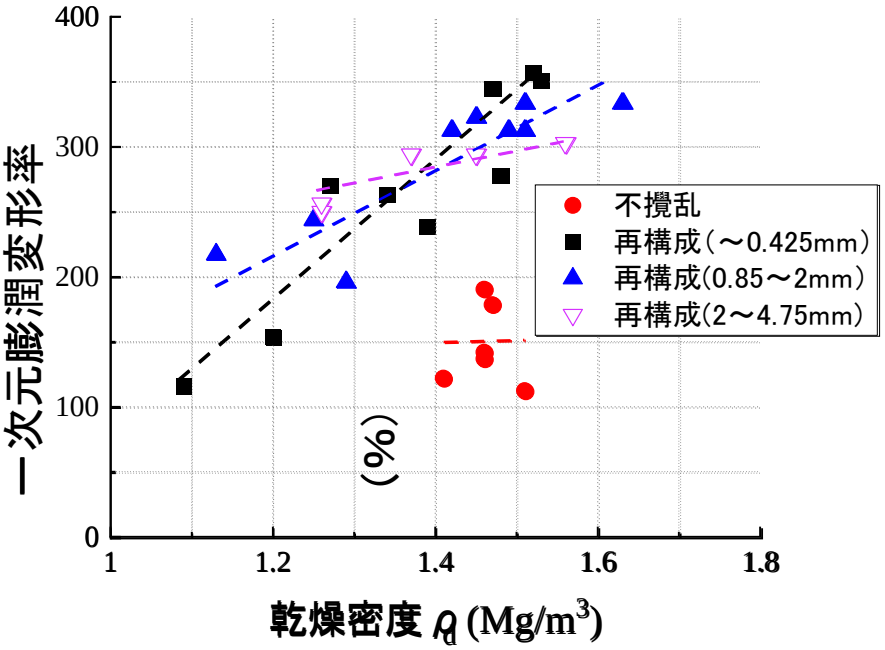


図 4-26　アメリカ産再構成供試体（粒径：～0.425 mm・0.850～2 mm・2～4.75 mm）および不攪乱供試体の試験開始時乾燥密度と最大一次元膨潤変形率関係

図 4-26 より，再構成供試体においては，いずれの粒径においても最大一次元膨潤変形率は試験開始時供試体乾燥密度の増加に応じて線形的に増加する傾向が見受けられた．また，粒径が大きくなるにつれて，乾燥密度に対する最大一次元膨潤変形率の増加の傾きは小さくなる傾向が見て取れた．すなわち，乾燥密度が 1.1～1.4 Mg/m^3 の範囲では粒径が大きい試料の値が大きく，1.4 Mg/m^3 以上の範囲では粒径が大きい試料の膨潤率が小さくなる傾向であった．不攪乱供試体については，乾燥密度 1.4～1.5 Mg/m^3 の範囲において再構成供試体の約 1/2 程度と低い値にとどまっていた．

・中国産原鉱石

表 4-10 に中国産原鉱石の再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の供試体諸元を示す．また，図 4-27 に再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の膨潤変形率経時変化曲線を示す．

表 4-10　中国産原鉱石の再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の諸元

	膨潤変形試験（中国 2～4.75mm）						
試料名	1	2	3	4	5	6	7
試験開始時の乾燥密度(Mg/m^3)	1.85	1.48	1.67	1.63	1.14	1.10	1.92
試験開始時有効モンモリロナイト密度(Mg/m^3)	1.42	1.03	1.23	1.19	0.73	0.71	1.50
試験終了時の乾燥密度(Mg/m^3)	0.70	0.72	0.78	0.81	0.64	0.62	0.67
試験終了時有効モンモリロナイト密度(Mg/m^3)	0.41	0.42	0.46	0.49	0.36	0.36	0.39
試験終了時含水比（%）	109.5	104.1	90.6	86.9	133.7	126.0	116.3
試験終了時飽和度（%）	103.8	101.8	98.6	100.6	111.8	101.4	103.7
初期含水比(%)	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	15.6	15.6
初期飽和度（%）	68.9	39.0	52.3	49.1	23.6	28.9	100.4
最大一次元膨潤変形率(%)	178.6	117.7	129.9	109.9	90.1	80.6	227.3
最大膨潤率時の有効モンモリロナイト密度(Mg/m3)	0.39	0.40	0.43	0.46	0.34	0.35	0.33

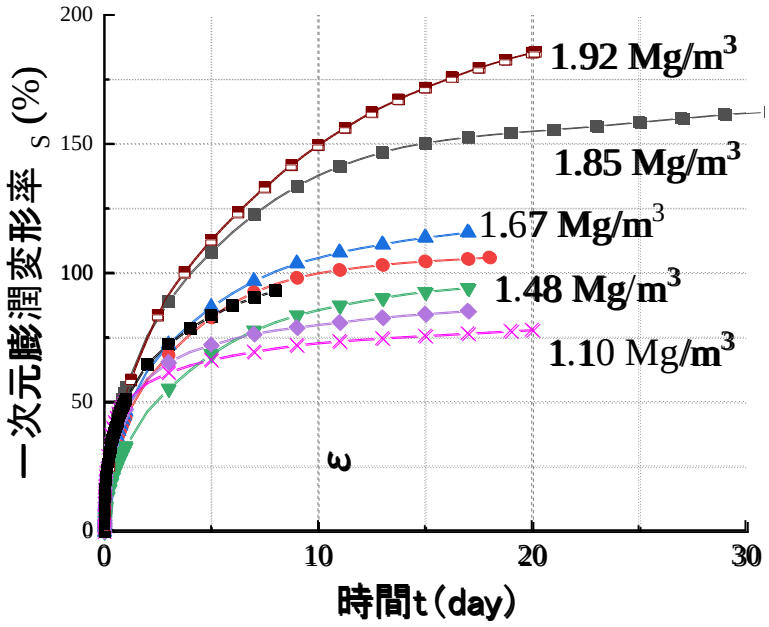


図 4-27　中国産再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）の膨潤変形率経時変化曲線

図 4-27 より，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わかる．また，図 4-28 に再構成供試体（粒径 2～4.75 mm）に加えて粒径～0.425 mm，0.850～2 mm および不攪乱供試体の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．

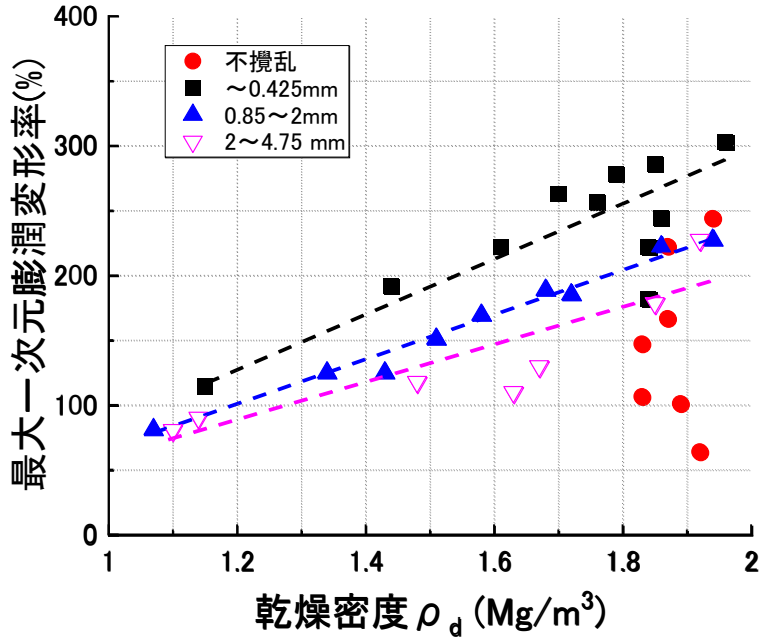


図 4-28　中国産再構成供試体（粒径：～0.425 mm・0.850～2 mm・2～4.75 mm）および不攪乱供試体の試験開始時乾燥密度と最大一次元膨潤変形率関係

図 4-28 より，再構成供試体においては，いずれの粒径においても最大一次元膨潤変形率は試験開始時供試体乾燥密度の増加に応じて線形的に増加する傾向が見受けられた．また，粒径が大きくなるにつれて，乾燥密度に対する最大一次元膨潤変形率の増加の傾き，および最大一次元膨潤変形率は小さくなる傾向が見られた．不撹乱供試体については，乾燥密度 1.8～2.0 Mg/m^3 の範囲においてバラつきが大きく，再構成供試体の約 1/2 から粒径 2～4.75 mm と同程度の値の範囲にあった．

・有効モンモリロナイト密度を導入した統一的な評価

膨潤圧特性と同様，膨潤変形特性についても有効モンモリロナイト密度の概念を導入し，月布産・アメリカ産・中国産原鉱石の挙動を統一的に評価する．

まず，図 4-29 に試験開始時供試体の有効モンモリロナイト密度と最大一次元膨潤変形率の関係を示す．

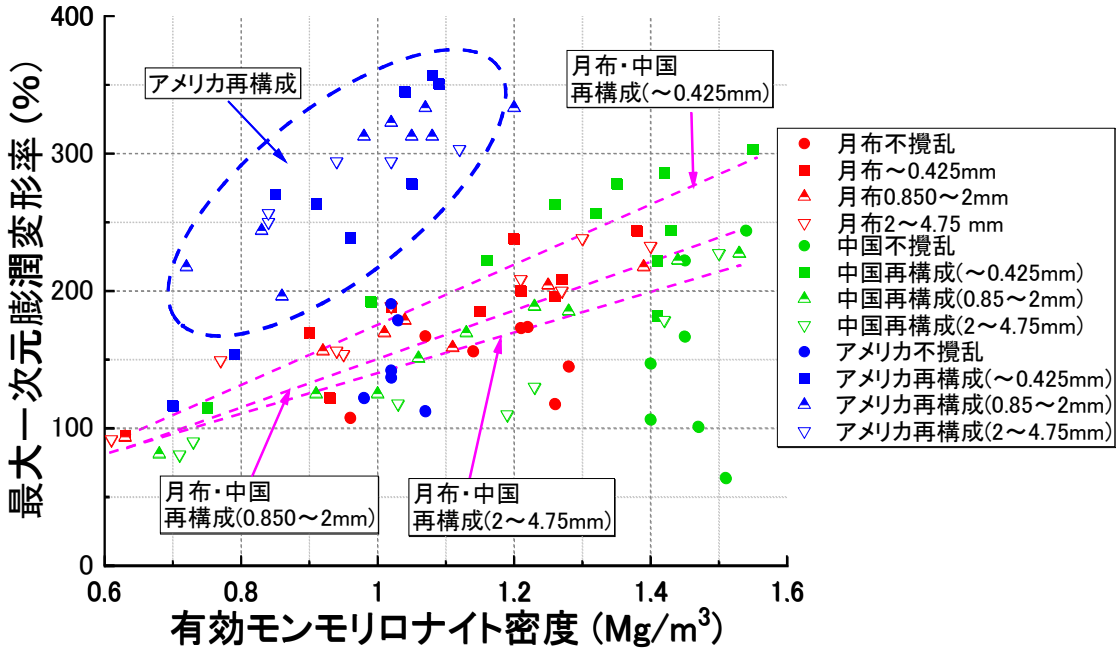


図 4-29　試験開始時有効モンモリロナイト密度―最大一次元膨潤変形率関係

これより，膨潤圧と同様，月布産原鉱石と中国産原鉱石の再構成供試体においては，各粒径において共通した傾向がみられる一方，アメリカ産原鉱石では他の 2 つよりも高い傾向がみられ，この理由は先述の通り交換性 Na^+イオン容量の影響であると推察される．また，不撹乱供試体においては，最大一次元膨潤変形率に対する有効モンモリロナイト密度の影響は明確には見られなかった．

次に，図 4-30 に試験開始時の供試体乾燥密度と試験終了時の有効モンモリロナイト密度

の関係を示す．なお，試験終了時の有効モンモリロナイト密度算出に当たっては，最大一次元膨潤変形率および試験後含水比の値をもとに乾燥密度を算出し，計算に用いた．

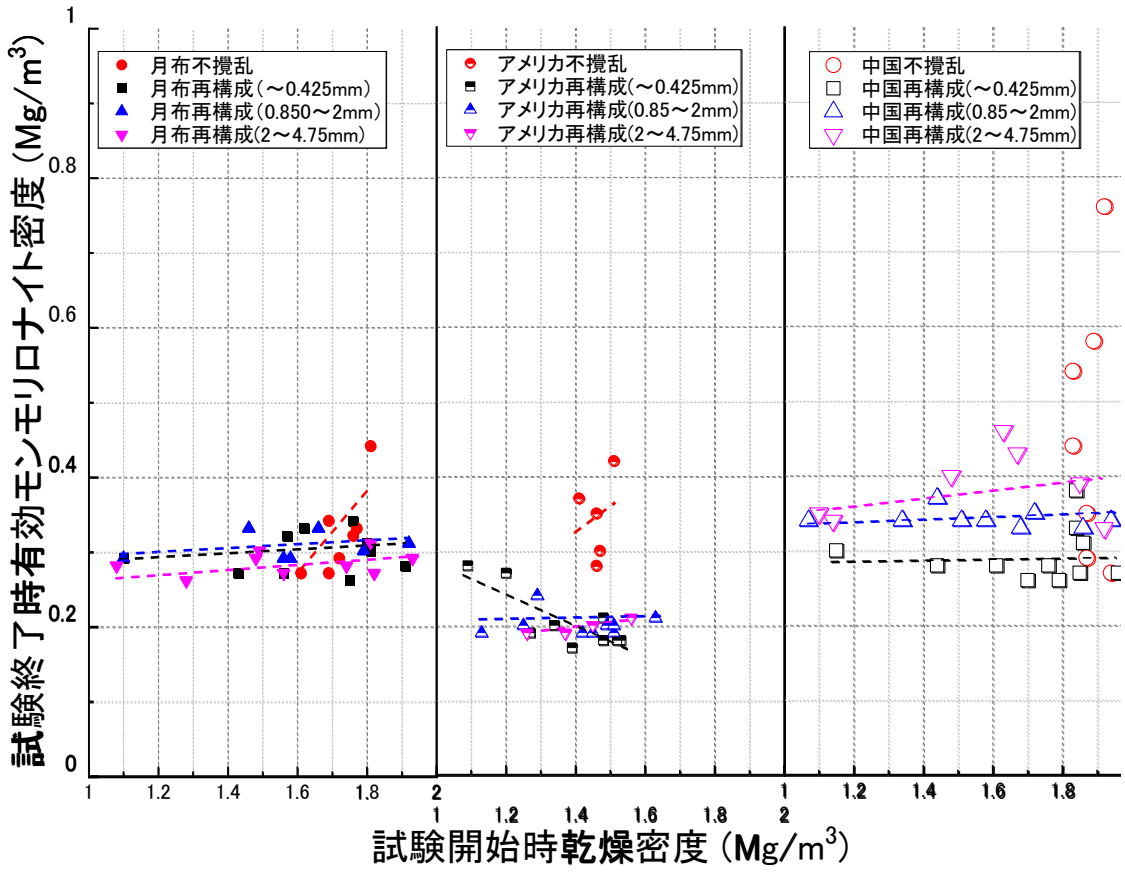


図 4-30　試験開始時の供試体乾燥密度―試験終了時の有効モンモリロナイト密度

本図より，月布産原鉱石では不撹乱供試体およびすべての粒径の再構成供試体において，試験開始時の乾燥密度の大小によらず，試験終了時の有効モンモリロナイト密度が 0.25～0.35 Mg/m^3 の一定の範囲内に収まっていることが分かる．このことから，月布産原鉱石では，膨潤変形性に対する膠結作用の影響は極めて小さいものと推察される．Ten Sleep 産原鉱石では，すべての粒径の再構成供試体において，試験終了時の有効モンモリロナイト密度は 0.20 Mg/m^3 程度に収束しているのに対し，不撹乱供試体では 0.35～0.40 Mg/m^3 程度と再構成供試体に比べて 2 倍ほど高い値となっていることが分かる．また，劉房子産原鉱石では，再構成供試体においては粒径が大きくなるほど，試験終了時の有効モンモリロナイト密度が高くなる傾向があり，不撹乱供試体ではバラつきが大きいものの，0.60 Mg/m^3 程度と再構成供試体の 2 倍程度の高い値となっている．このことから，劉房子産原鉱石では再構成供試体・不撹乱供試体のいずれにおいても，粒子の粉砕性の大小によって膠結作用の膨潤変形性に対する影響が傾向としてみられると考えられる．

4.2.3 アメリカ産・中国産原鉱石の XRD・膨潤圧連携試験結果

本項では，4.1.4 で述べた方法に基づき，アメリカ産原鉱石，中国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結果について述べる．まず，表 4-11（アメリカ産原鉱石）・表 4-12（中国産原鉱石）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・再構成供試体について試験を実施した．本項では，これ以降節番号を A-1～A-4（アメリカ産原鉱石），C-1～C-5（中国産原鉱石）と振り，供試体高さ・試験日数の等しい不攪乱供試体・再構成供試体の試験結果を比較する．

表 4-11　アメリカ産原鉱石の試験ケース

節番号	供試体種別	供試体乾燥密度 (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
A-1	再構成	1.49	4	5	小型	2364	後のみ
	不攪乱	1.47	4	5	小型	1138	後のみ
A-2	不攪乱	1.48	4	2	小型	1088	後のみ
A-3	不攪乱	1.53	4	5	小型	1447	前後
	再構成	1.45	4	5	小型	2025	前後
A-4	不攪乱	1.52	4	40	小型	1630	前後
	再構成	1.50	4	40	小型	2155	前後

表 4-12　中国産原鉱石の試験ケース

節番号	供試体種別	供試体乾燥密度 (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
C-1	再構成	1.94	4	2	小型	6035	後のみ
	不攪乱	1.96	4	2	小型	1797	後のみ
C-2	再構成	1.88	4	5	小型	6055	前後
	不攪乱	1.96	4	5	小型	2008	前後
C-3	再構成	1.79	4	6	小型	4536	前後
C-4	不攪乱	1.81	4	40	小型	1442	前後
	再構成	1.85	4	40	小型	4441	前後
C-5	再構成	1.93	4	3	小型	6070	前後

・A-1（供試体高さ：4 mm，試験日数 5 日，XRD は平行法で実施）

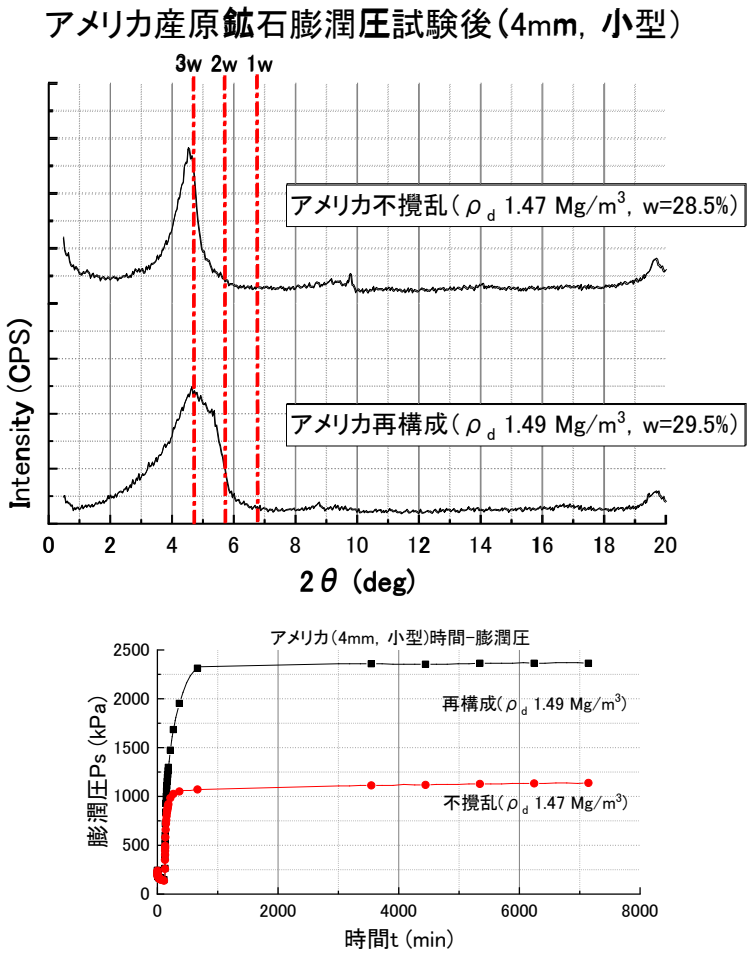


図 4-31　XRD の測定結果（膨潤圧試験後）および膨潤圧の経時変化曲線（A-1）

表 4-13　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験後，A-1）

	d(Å)	2θ(°)	層間の水分子の存在数　L	含水比(%)
不撹乱	19.4	4.56	3w	28.5
再構成	19.0	4.64	3w	29.5
	16.6	5.32	2w	

図 4-31 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それぞれ示す．これより，不撹乱供試体（1.47 Mg/m^3，w=28.5%）において，2θ=4.7 deg 付近にピークが存在していることがわかる．これは水分子が 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．再構成供試体（1.49 Mg/m^3，w=29.5%）において，2θ=4.7 deg および 5.8 deg にピークが混在している形状であることがわかる．これらはそれぞれ水分子が 3 列(4.7 deg)，

2 列（5.8 deg）存在する場合の底面間隔の値に相当するものである．

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に，約 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（最大膨潤圧）は不攪乱供試体において 1138 kPa，再構成供試体において 2364 kPa であった．

・A-2（供試体高さ：4 mm，試験日数 2 日）

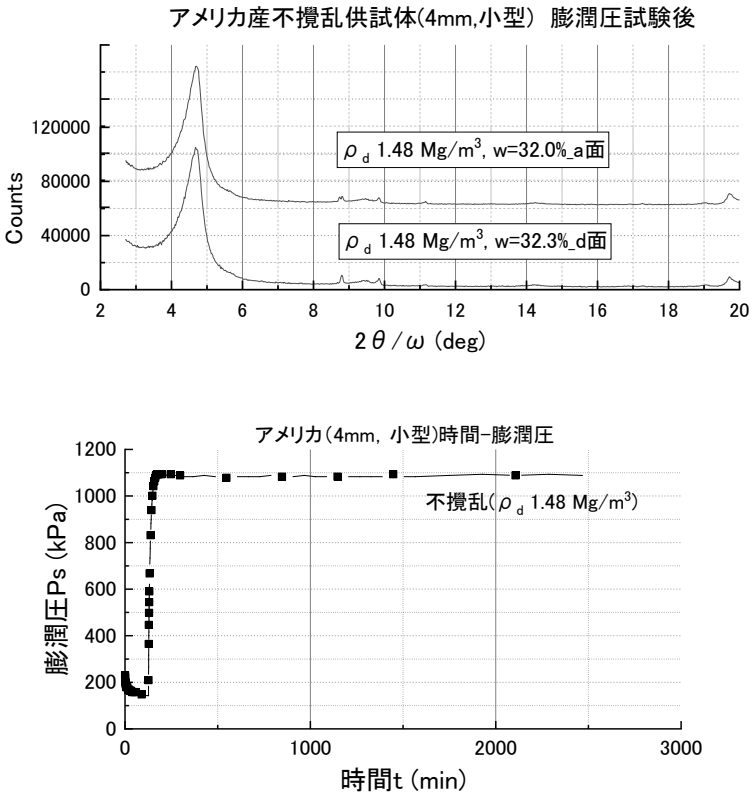


図 4-32　XRD の測定結果（膨潤圧試験後）および膨潤圧の経時変化曲線(A-2)

表 4-14　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験後，A-2）

	d(Å)	2θ(°)	層間の水分子の存在数　L	含水比(%)
上面	19.0	4.66	3w	32.3
下面	18.8	4.69	3w	32.0

図 4-32 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それぞれ示す．これより，不攪乱供試体（1.48 Mg/m^3，w=32.0%（吸水面側），32.3%（上面側））において，2θ=4.7 deg 付近にピークが存在していることがわかる．これは水分子が 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．

また，膨潤圧は試験開始直後に急激に上昇した後に，約 500 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（最大膨潤圧）は 1088 kPa であった．

・A-3（供試体高さ：4 mm，試験日数 5 日）

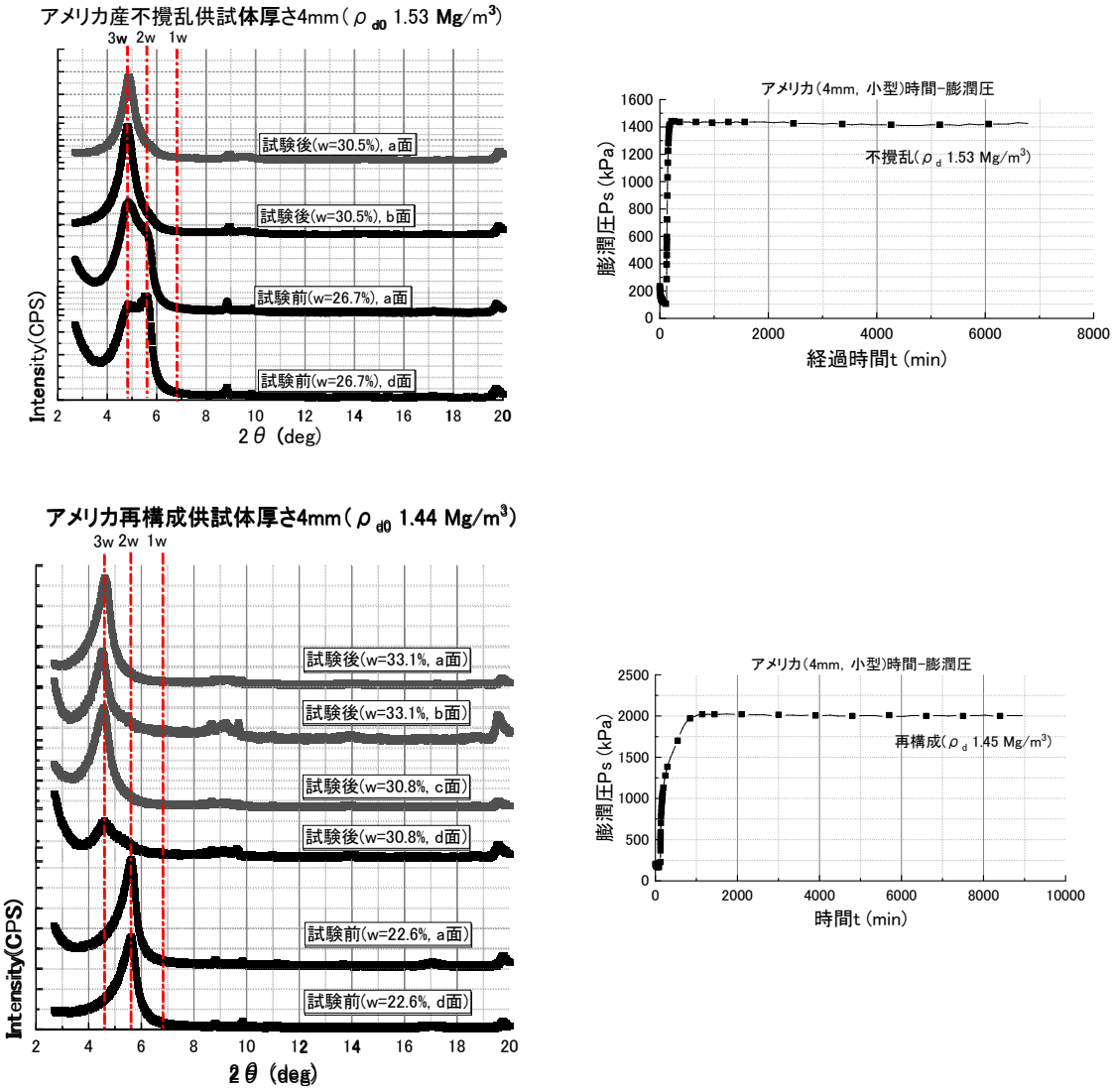


図 4-33　XRD の測定結果（膨潤圧試験前後）および膨潤圧の経時変化曲線(A-3)

表 4-15　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後，A-3）

		d(Å)	2θ(°)	層間の水分子の存在数　L	含水比(%)
不攪乱	試験前上側	15.8	5.6	2w と 3w 混在	26.7
	試験前下側	18.4	4.8	2w と 3w 混在	
	試験後下側	18.3	4.84	3w	30.5
再構成	試験前上側	15.6	5.66	2w	22.6
	試験前下側	15.7	5.64	2w	
	試験前上側	19.2	4.6	3w	30.8
	試験後下側	18.8	4.7	3w	33.1

図 4-33 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それぞれ示す．これより，不攪乱供試体（1.53 Mg/m^3，w=26.7%（試験前），30.5%（試験後））において，膨潤圧試験前においては 2θ=4.7 deg および 5.8 deg 付近にピークが混在しており，膨潤圧試験後において 2θ=4.7 deg のみにピークが存在していることがわかる．これより，膨潤圧試験前に水分子が 2 列存在するモンモリロナイト結晶層間と 3 列存在する層間が混在し，膨潤圧試験後には吸水により水分子が 3 列存在する結晶層が支配的となったことがわかる．再構成供試体（1.44 Mg/m^3，w=22.6%（試験前），30.8%（試験後上側），33.1%（試験後吸水面側））において，膨潤圧試験前において 2θ=5.8 deg のみピークが存在し，膨潤圧試験後において 2θ=4.7 deg のみにピークが存在していることがわかる．これより，膨潤圧試験前には水分子が 2 列存在する結晶層間が支配的であり，試験後には水分子 3 列へと推移していることがわかる．

また，膨潤圧は試験開始直後に急激に上昇した後に，約 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（最大膨潤圧）は，不攪乱供試体では 1447 kPa，再構成供試体では 2025 kPa であった．

・A-4（供試体高さ：4 mm，試験日数 40 日）

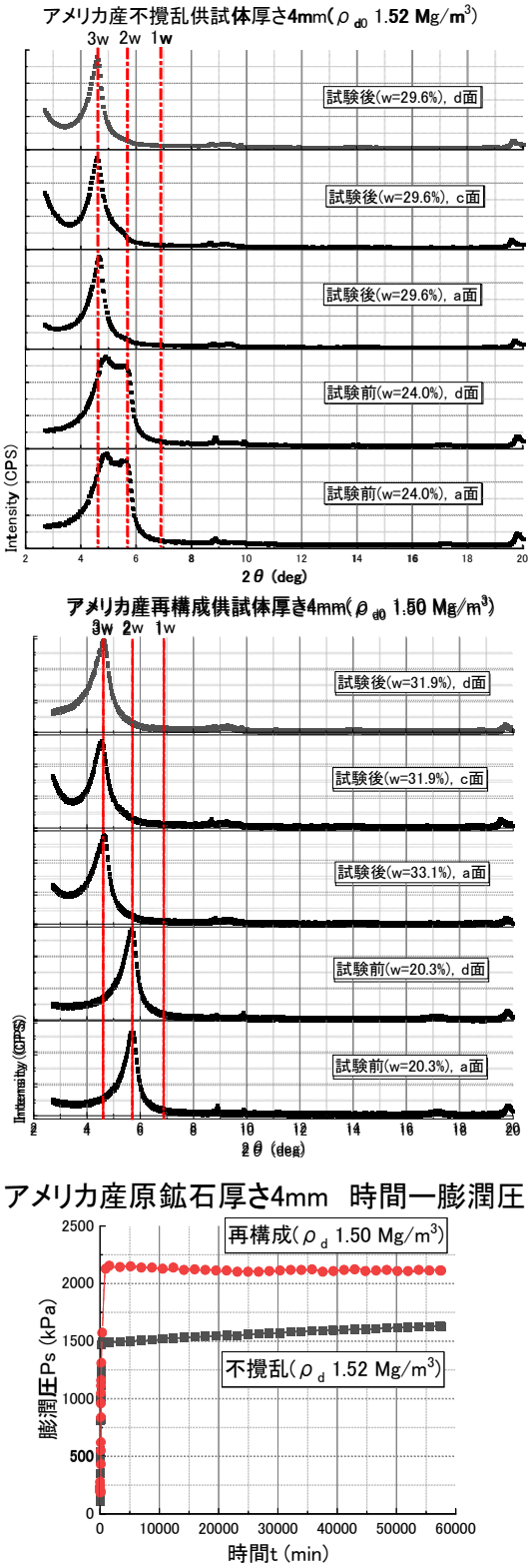


図 4-34　XRD の測定結果（膨潤圧試験前後）および膨潤圧の経時変化曲線(A-4)

表 4-16　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後，A-4）

		d(Å)	2θ(°)	層間の水分子の存在数　L	含水比(%)
不攪乱	試験前上側	18.0	4.90	2w と 3w 混在	24.0
	試験前下側	17.9	4.95	2w と 3w 混在	
	試験後上側	19.2	4.6	3w	29.6
	試験後下側	18.9	4.67	3w	29.6
再構成	試験前上側	15.5	5.7	2w	20.3
	試験前下側	15.6	5.68	2w	
	試験後上側	19.2	4.61	3w	31.9
	試験後下側	19.0	4.66	3w	33.1

図 4-34 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それぞれ示す．これより，不攪乱供試体（1.52 Mg/m^3，w=24.0%（試験前），29.6%（試験後））において，膨潤圧試験前においては 2θ=4.7 deg および 5.8 deg 付近にピークが混在しており，膨潤圧試験後において 2θ=4.7 deg のみにピークが存在していることがわかる．これより，膨潤圧試験前に水分子が 2 列存在するモンモリロナイト結晶層間と 3 列存在する層間が混在し，膨潤圧試験後には吸水により水分子が 3 列存在する結晶層が支配的となったことがわかる．再構成供試体（1.52 Mg/m^3，w=20.3%（試験前），31.9%（試験後上側），33.1%（試験後吸水面側））において，膨潤圧試験前において 2θ=5.8 deg のみピークが存在し，膨潤圧試験後において 2θ=4.7 deg のみにピークが存在していることがわかる．これより，膨潤圧試験前には水分子が 2 列存在する結晶層間が支配的であり，試験後には水分子 3 列へと推移していることがわかる．

また，膨潤圧は試験開始直後に急激に上昇した後に，約 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（最大膨潤圧）は，不攪乱供試体では 1630 kPa，再構成供試体では 2155 kPa であった．

・C-1（供試体高さ：4 mm，試験日数 2 日）

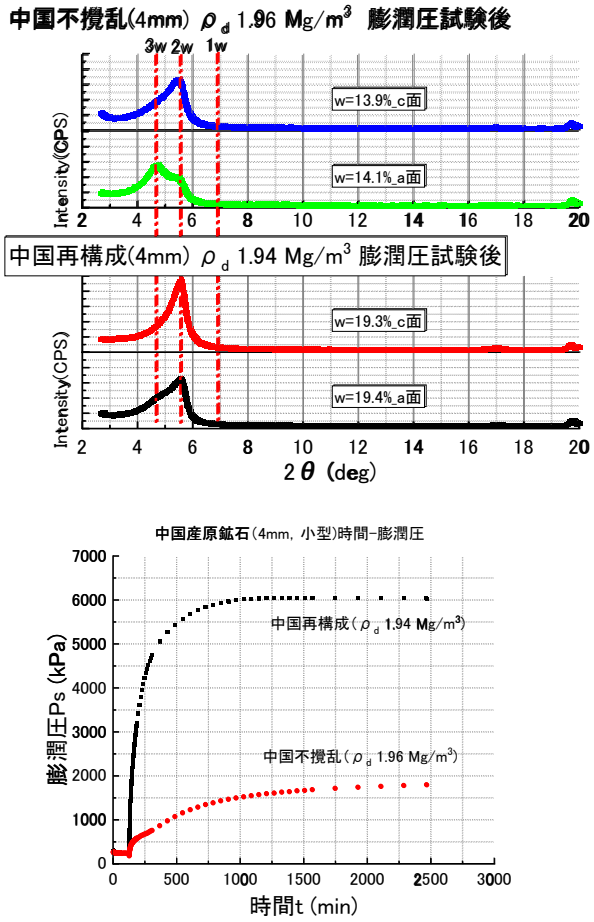


図 4-35　XRD の測定結果（膨潤圧試験後）および膨潤圧の経時変化曲線(C-1)

表 4-17　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験後，C-1）

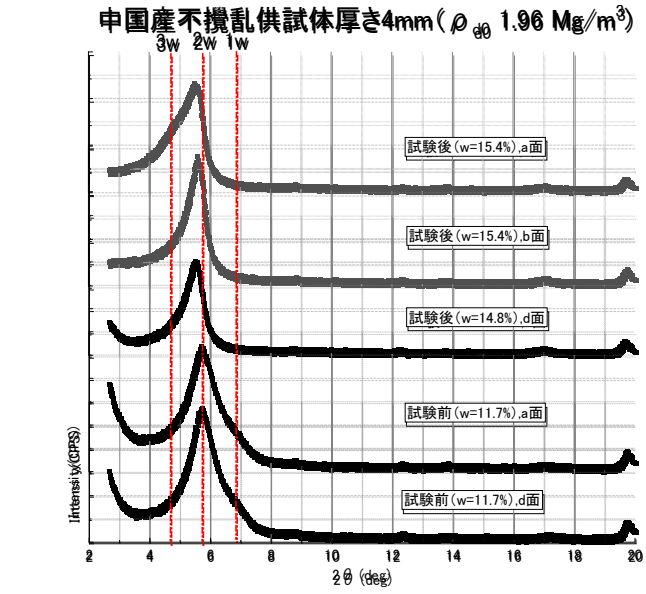
		d(Å)	2θ(°)	層間の水分子の存在数　L	含水比(%)
不攪乱	試験後上側	15.5	5.70	2w	13.9
	試験後下側	18.8	4.70	3w	14.1
再構成	試験後上側	15.8	5.58	2w	19.3
	試験後下側	15.9	5.57	2w	19.4

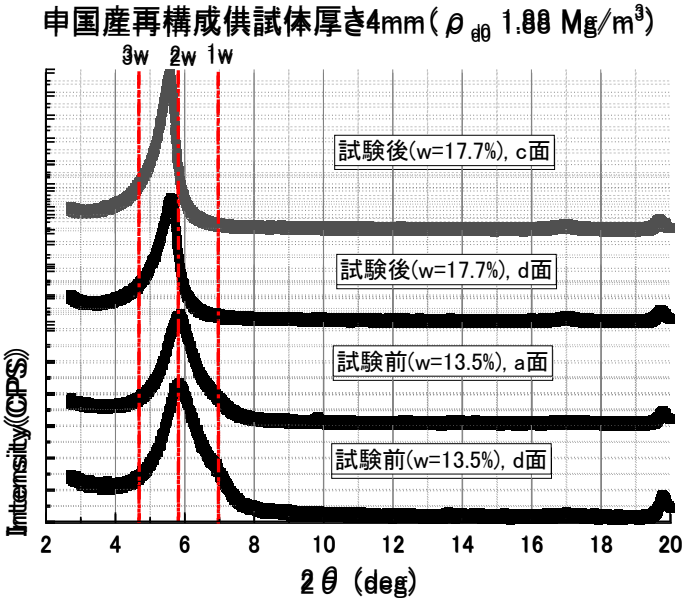
図 4-35 に XRD の測定結果（膨潤圧試験後）および膨潤圧の経時変化曲線をそれぞれ示す．これより，不攪乱供試体（1.96 Mg/m^3，w=14.1%）において，吸水面側では 2θ=4.7 deg および 5.8 deg 付近にピークが混在しており，上面側では 2θ=4.7 deg 付近にピークが存在している．これより，吸水面側では水分子が 2 列存在するモンモリロナイト結晶層間と 3 列

存在する層間が混在し，上面側では水分子が 2 列存在する結晶層が支配的である．再構成供試体（1.94 Mg/m^3，w=19.4%）において，吸水面側・上面側のいずれも 2θ=5.8 deg のみにピークが存在しており，水分子が 2 列存在する結晶層間が支配的であることがわかる．

また，膨潤圧は再構成供試体では試験開始直後に急激に上昇して約 1000 分経過以降は一定値に収束する挙動であったのに対し，不攪乱供試体では試験開始後約 2000 分まで緩やかに膨潤圧が増加する挙動であった．膨潤圧の収束値（最大膨潤圧）は，不攪乱供試体では 1797 kPa，再構成供試体では 6035 kPa であった．

・C-2（供試体高さ：4 mm，試験日数 5 日）





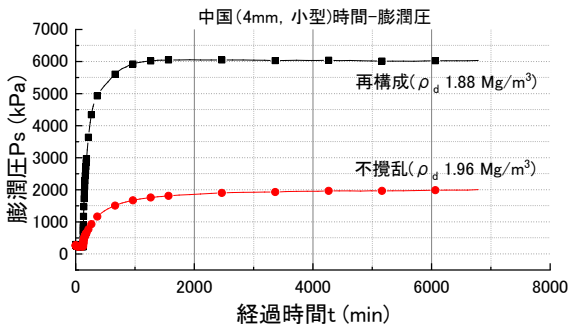


図 4-36　XRD の測定結果（膨潤圧試験前後）および膨潤圧の経時変化曲線(C-2)

表 4-18　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後，C-2）

		d(Å)	2θ(°)	層間の水分子の存在数　L	含水比(%)
不攪乱	試験前上側	15.3	5.76	2w	11.7
	試験前下側	15.4	5.74	2w	
	試験後上側	15.8	5.60	2w	14.8
	試験後下側	16.1	5.48	2w	15.4
再構成	試験前上側	15.1	5.86	1w と 2w 混在	13.5
	試験前下側	15.0	5.90	1w と 2w 混在	
	試験後上側	15.8	5.60	2w	17.7
	試験後下側	15.8	5.60	2w	

図 4-36 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それぞれ示す．これより，不攪乱供試体（1.96 Mg/m^3，w=11.7%（試験前），w=14.8%（試験後上面），w=15.4%（試験後吸水面側））において，膨潤圧試験前後のいずれも 2θ=5.8 deg 付近にピークが存在していることがわかる．これより，試験前後いずれもモンモリロナイト結晶層間中に水分子が 2 列分存在していることがわかる．再構成供試体（1.88 Mg/m^3，w=13.5%（試験前），w=17.7%（試験後））においても，試験前においては吸水面側・上面側いずれも 2θ=6.9deg および 5.8 deg にピークが混在しており，試験後においては吸水面側・上面側いずれも 2θ=5.8 deg にピークが存在している．これより，試験前はモンモリロナイト結晶層間中に水分子が 1 列ないし 2 列存在しており，試験後は吸水に伴い水分子が 2 列存在する結晶層間が支配的であることがわかる．

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て約 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（最大膨潤圧）は，不攪乱供試体では 2008 kPa，再構成供試体では 6055 kPa であった．

・C-3（供試体高さ：4 mm，試験日数 6 日）

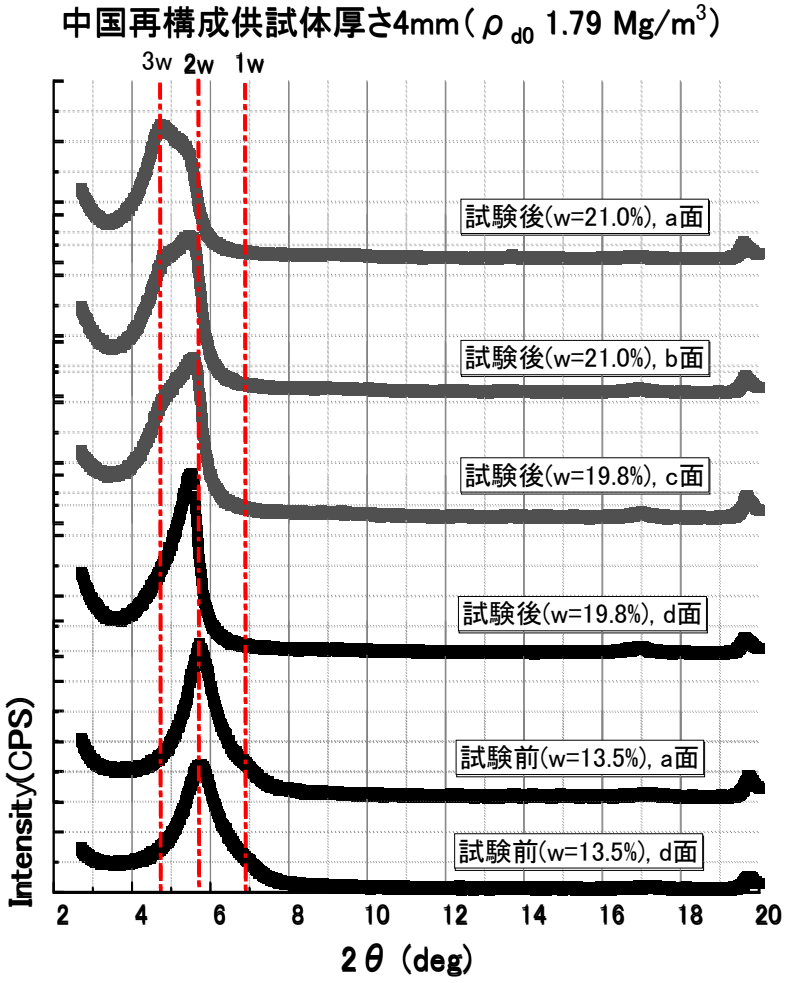


図 4-37　XRD の測定結果（膨潤圧試験前後）および膨潤圧の経時変化曲線(C-3)

表 4-19　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後，C-3）

	d(Å)	2θ(°)	層間の水分子の存在数　L	含水比(%)
試験前上側	15.5	5.72	2w	13.5
試験前下側	15.2	5.80	2w	
試験後上側	15.7	5.62	2w と 3w 混在	19.8
試験後下側	18.2	4.86	2w と 3w 混在	21.0

図 4-37 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それぞれ示す．これより，再構成供試体（1.79 Mg/m^3，w=13.5%（試験前），w=19.8%（試験後上面），w=21.0%（試験後吸水面））においても，試験前においては吸水面側・上面側いずれも 2θ=5.8 deg にピークが混在しており，試験後においては吸水面・上面側いずれも 2θ=6.9 deg および 5.8 deg にピークが混在していることがわかる．これより，試験前はモンモリロナイト結晶層間中に水分子が 2 列存在しており，試験後は吸水に伴い水分子が 2 列ないし 3 列存在する結晶層間が混在していることがわかる．

また，膨潤圧は試験開始直後に急激に上昇して約 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（最大膨潤圧）は 4536 kPa であった．

・C-4（供試体高さ：4 mm，試験日数 40 日）

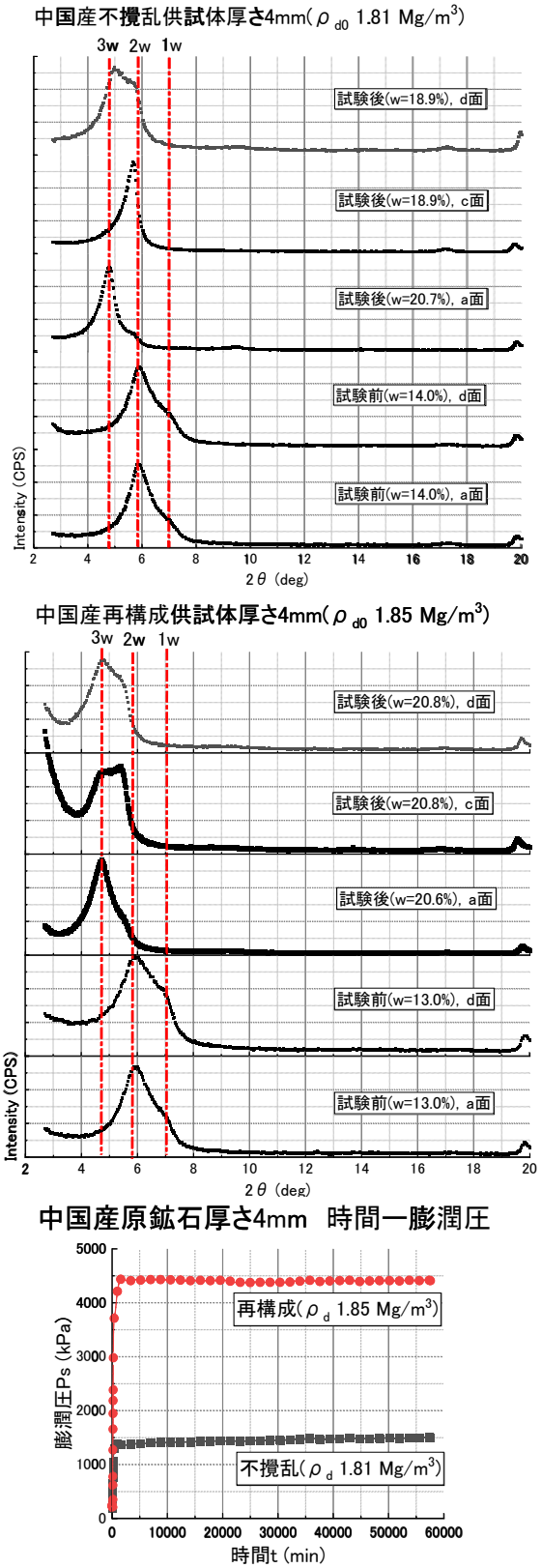


図 4-38　XRD の測定結果（膨潤圧試験前後）および膨潤圧の経時変化曲線(C-4)

表 4-20　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後，C-4）

		d(Å)	2θ(°)	層間の水分子の存在数　L	含水比(%)
不攪乱	試験前上側	15.1	5.85	1w と 2w 混在	14.0
	試験前下側	15.1	5.85	1w と 2w 混在	
	試験後上側	18.0	4.91	2w と 3w 混在	18.9
	試験後下側	18.4	4.8	2w と 3w 混在	20.7
再構成	試験前上側	15.0	5.91	1w と 2w 混在	13.0
	試験前下側	15.0	5.89	1w と 2w 混在	
	試験後上側	18.8	4.71	2w と 3w 混在	20.8
	試験後下側	18.8	4.71	2w と 3w 混在	20.8

図 4-38 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それぞれ示す．これより，不攪乱供試体（1.81 Mg/m^3，w=14.0%（試験前），w=18.9%（試験後上面），w=20.7%（試験後吸水面側））において，膨潤圧試験前は吸水面側・上面側いずれも 2θ=5.8 deg および 6.9 deg 付近にピークが混在しており，試験後は 2θ=4.7 deg および 5.8 deg にピークが混在している．これより，試験前はモンモリロナイト結晶層間中に水分子が 1 列分および 2 列分存在しており，試験後は水分子が 2 列分および 3 列分存在していることがわかる．再構成供試体（1.85 Mg/m^3，w=13.0%（試験前），w=20.8%（試験後））においても，試験前においては吸水面側・上面側いずれも 2θ=6.9deg および 5.8 deg にピークが混在しており，試験後においては吸水面側・上面側いずれも試験後は 2θ=4.7 deg および 5.8 deg にピークが混在している．これより，試験前はモンモリロナイト結晶層間中に水分子が 1 列分および 2 列分存在しており，試験後は水分子が 2 列分および 3 列分存在していることがわかる．

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て約 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（最大膨潤圧）は，不攪乱供試体では 1442 kPa，再構成供試体では 4441 kPa であった．

・C-5（供試体高さ：4 mm，試験日数 3 日）

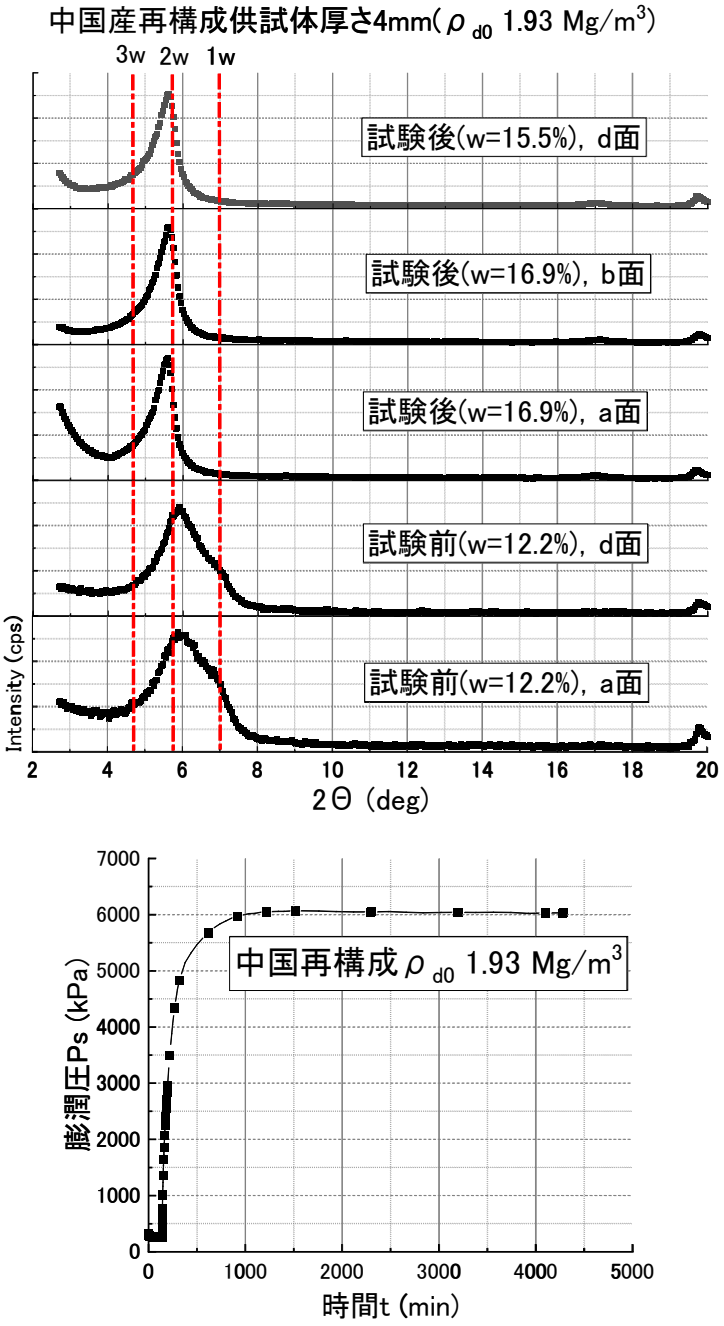


図 4-39　XRD の測定結果（膨潤圧試験前後）および膨潤圧の経時変化曲線(C-5)

表 4-21　d_{001} に関する結果（膨潤圧試験前後，C-5）

	d(Å)	2θ(°)	層間の水分子の存在数　L	含水比(%)
試験前上側	15.3	5.79	1w と 2w	12.2
試験前下側	15.1	5.86	1w と 2w	
試験後上側	15.9	5.56	2w	15.5
試験後下側	16.0	5.53	2w	16.9

図 4-39 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それぞれ示す．これより，再構成供試体（1.93 Mg/m^3，w=12.2%（試験前），w=15.5%（試験後上側），w=16.9%（試験後吸水面側））において，試験前においては吸水面側・上面側いずれも 2θ=6.9deg および 5.8 deg にピークが混在しており，試験後においては吸水面側・上面側いずれも試験後は 2θ=5.8 deg にピークが存在している．これより，試験前はモンモリロナイト結晶層間中に水分子が 1 列分および 2 列分存在しており，試験後は水分子が 2 列分存在していることがわかる．

また，膨潤圧について，約 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（最大膨潤圧）は 6070 kPa であった．

・膨潤圧測定結果に関するまとめ

各原鉱石において，得られた膨潤圧の経時変化曲線をまとめて示したグラフを図 4-40, 図 4-41 にそれぞれ示す.

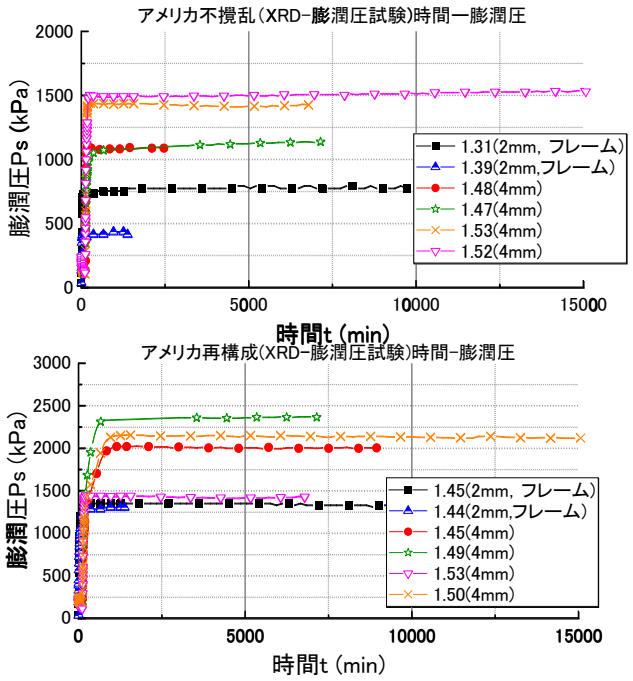


図 4-40　アメリカ産原鉱石の膨潤圧経時変化曲線

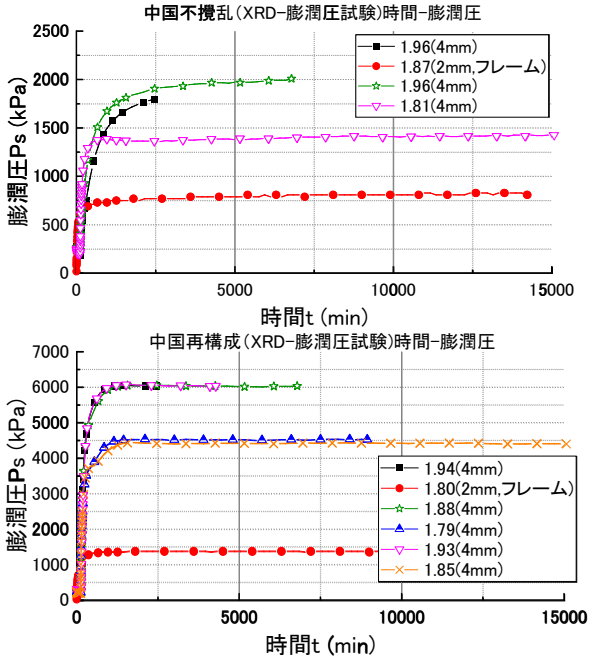


図 4-41　中国産原鉱石の膨潤圧経時変化曲線

膨潤圧の経時変化に関して，アメリカ産原鉱石では，試験開始後 500 分程度で膨潤圧がピークに到達し，その後はほぼ変動しない挙動であった．中国産原鉱石では，わずかにではあるが，供試体乾燥密度が高くなるにつれて膨潤圧の収束に要する時間が長くなるが，約 1000 分で収束していた．

次に，今年度実施したアメリカ産，中国産原鉱石に加えて，昨年度実施した月布産原鉱石の試験結果を併記した，供試体の初期乾燥密度—最大膨潤圧関係を図 4-42 に示す．

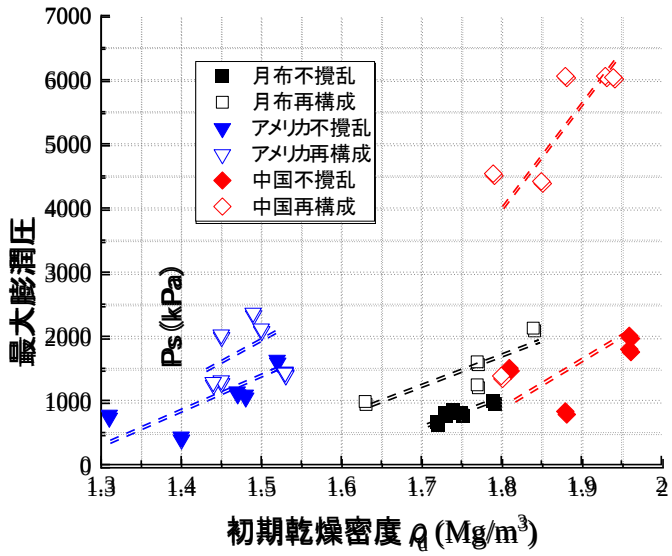


図 4-42　供試体の初期乾燥密度—最大膨潤圧関係

供試体の初期乾燥密度と膨潤圧の関係についてまとめている．いずれの原鉱石においても，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っている．両者の膨潤圧の差異は月布産＜アメリカ産＜中国産の順に大きくなっている様子が見て取れ，地質年代に対応しており，膠結作用の影響を表しているものと考えられる．

・供試体の含水比とモンモリロナイト底面間隔の関係

膨潤圧試験前後の供試体含水比と，最大ピークの 2θ の値から算出したモンモリロナイト底面間隔 d_{001} の関係を図 4-43，図 4-44 に示す.

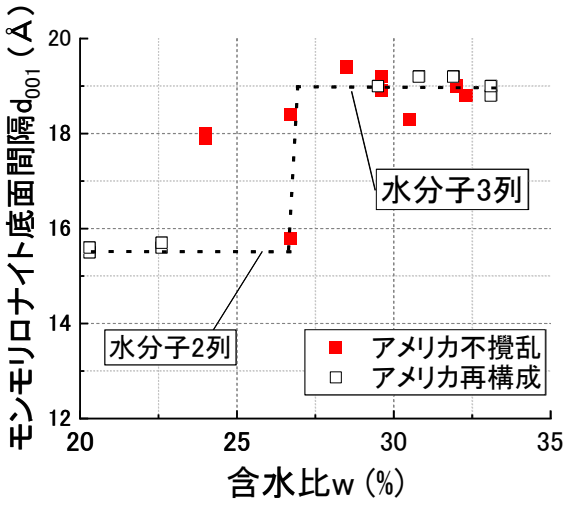


図 4-43　アメリカ産原鉱石の供試体含水比—モンモリロナイト底面間隔関係

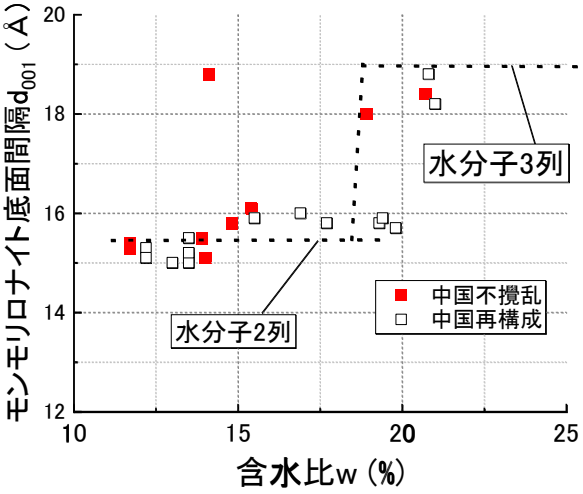


図 4-44　中国産原鉱石の供試体含水比—モンモリロナイト底面間隔関係

アメリカ産原鉱石では，約 27%を境として，それよりも低い場合は水分子 2 列，それよりも高い倍は水分子 3 列が配列する傾向がみられた．中国産原鉱石では，約 18%付近を境として，それより低い場合は水分子 2 列，高い場合は水分子 3 列配列する傾向がみられた．以上から，供試体含水比—モンモリロナイト底面間隔の関係においては，不攪乱供試体と再構成供試体とを比較して，大きな差異は見られなかった.

次に，昨年度実施した月布産原鉱石の試験結果もまとめて表示した供試体含水比—モン

モリロナイト底面間隔関係を図 4-45 に示す.

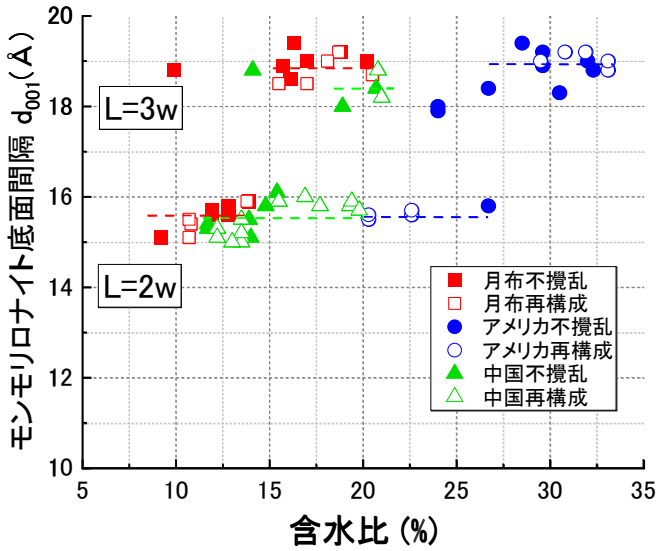


図 4-45　供試体含水比―モンモリロナイト底面間隔関係

本図より，含水比 15～20%の範囲において，月布産原鉱石では水分子 3 列が支配的であるのに対し，中国産原鉱石では水分子 2 列が支配的である違いがある．これは，中国産原鉱石の方が乾燥密度で 0.1～0.2 Mg/m^3 程度高いこと，モンモリロナイト含有率が 6%程度高いことにより，同じ含水比でも個々のモンモリロナイト層間中に含まれる水分子の数が少なくなっているためと推察する.

また，図 4-46 に中国産原鉱石の含水比 20.7%，15.4%，13.9%における，不攪乱供試体・再構成供試体のピーク形状を比較して示す．なお，いずれのグラフも，不攪乱供試体の最大ピーク値で正規化した強度で整理している．これらから，いずれの含水比においてもピーク形状に大きな差異は見られなかった.

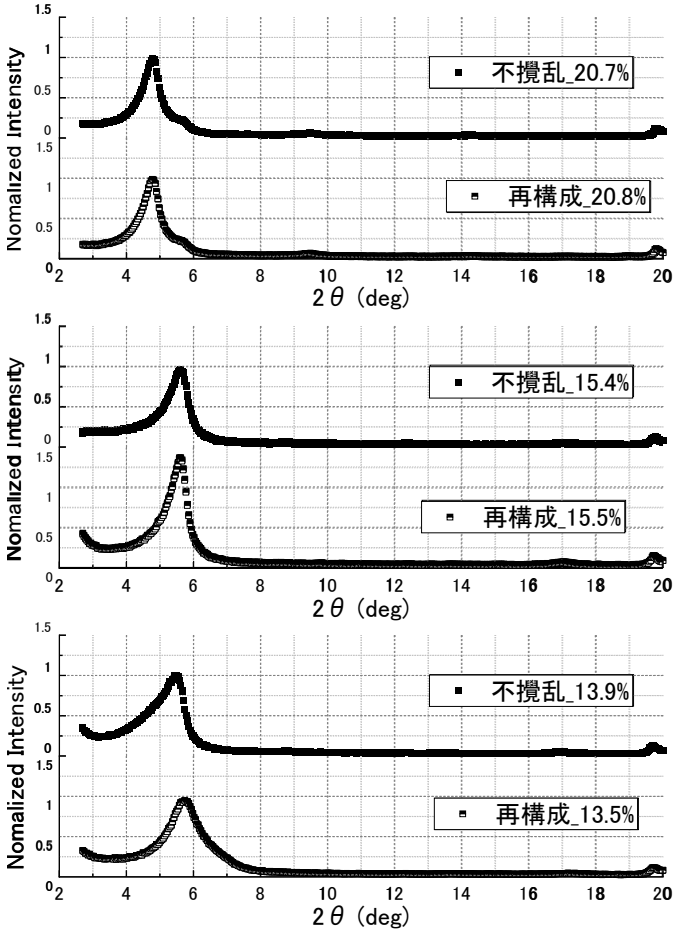
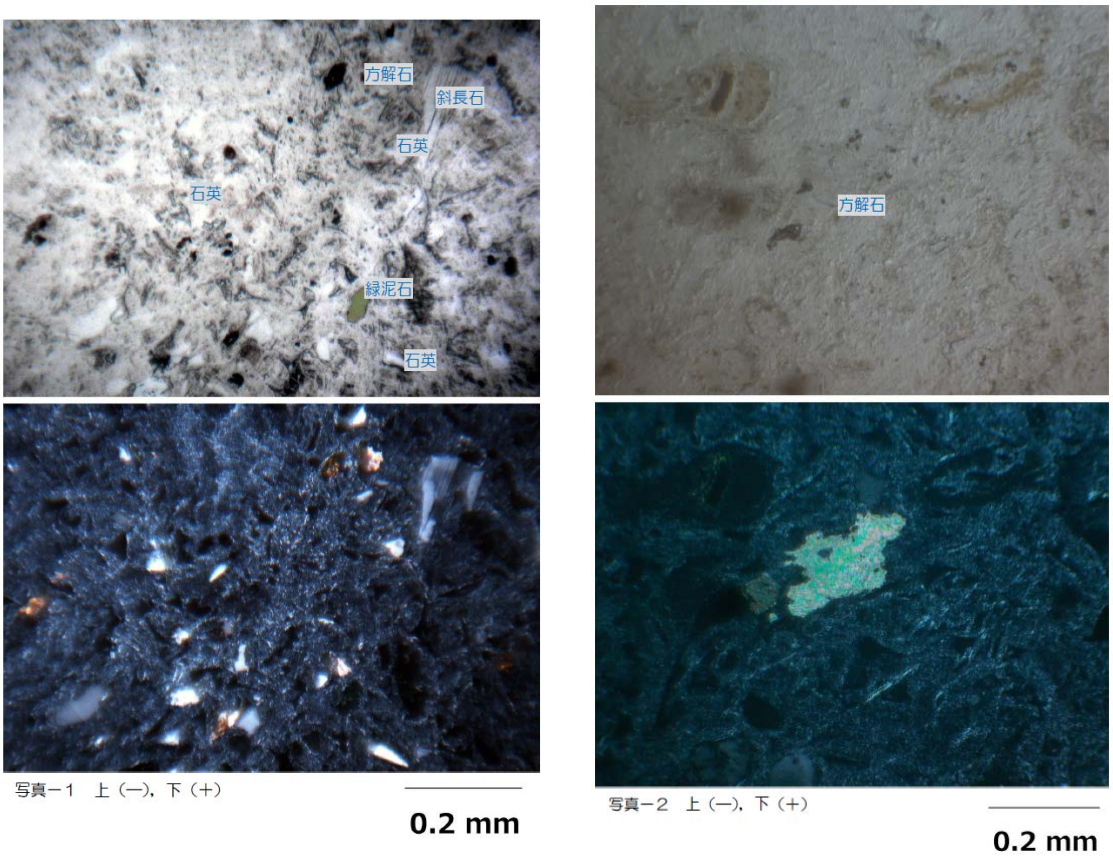


図 4-46　中国産原鉱石の含水比 20.7%，15.4%，13.9%における不攪乱供試体・再構成供試体のピーク形状比較

4.2.4　原鉱石の薄片試料を用いた微視的構造評価

本項では，4.1.6 で述べた原鉱石の薄片試料を偏光顕微鏡および SEM（月布産）により観察した結果について述べる．

月布産原鉱石から作製した薄片試料の偏光顕微鏡観察結果を図 4-47 に示す．

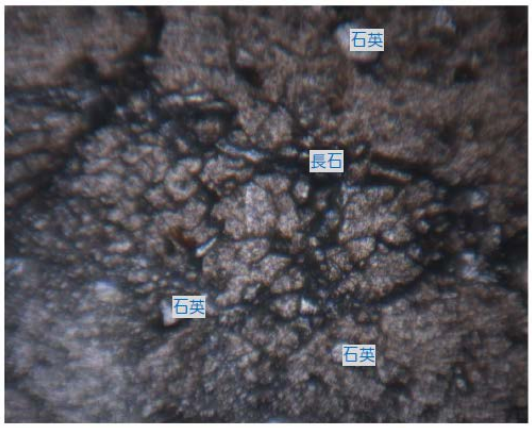


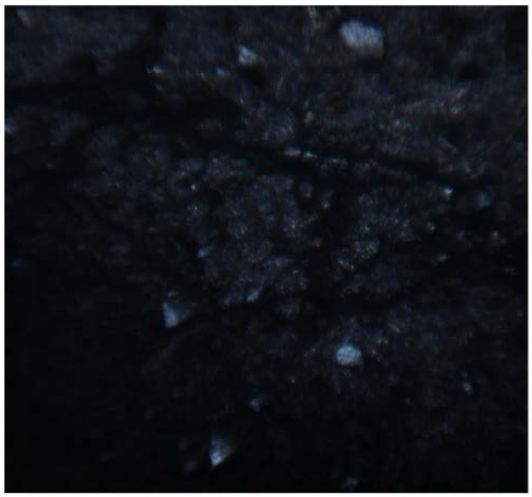
その 1　　その 2

図 4-47　偏光顕微鏡観察結果（月布産）

これより，構成鉱物として不定形な石英や累帯構造を示す斜長石，方解石，緑泥石および微粒状の硫化鉱物（黄鉄鉱や白鉄鉱など）が同定され，基質はモンモリロナイトによって充填されていることが分かった．

図 4-48 にアメリカ産原鉱石の偏光顕微鏡観察結果を示す．

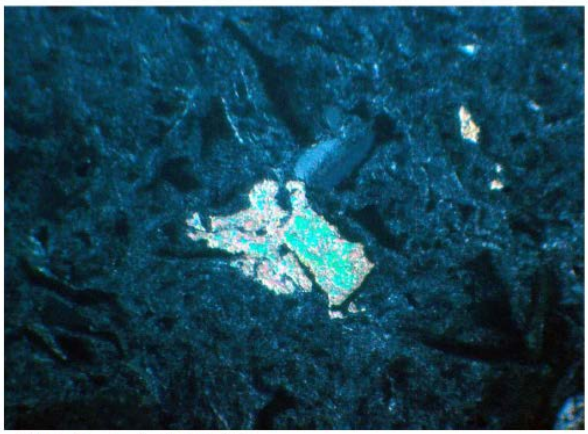




写真−3　上（—），下（+）

0.5 mm

その 1



写真−5　上（—），下（+）

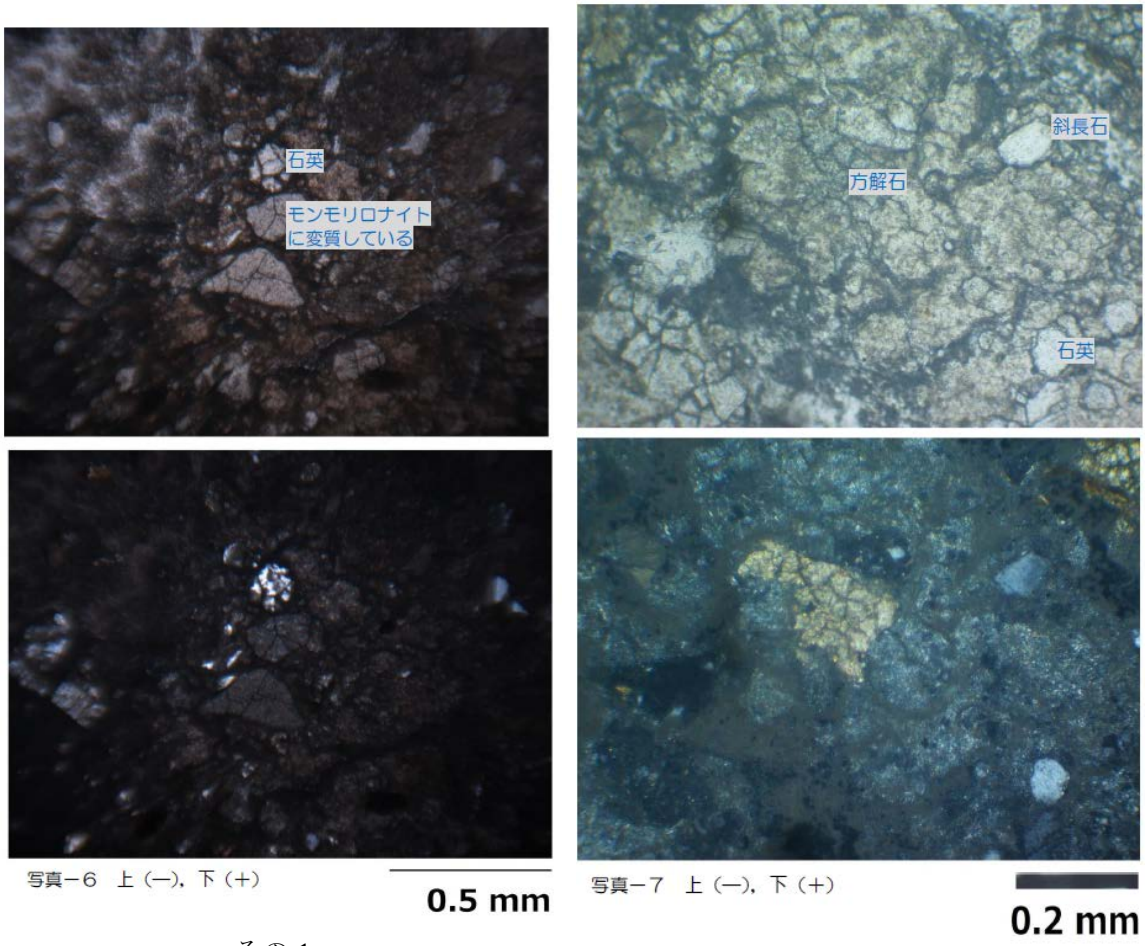
0.2 mm

その 2

図 4-48　偏光顕微鏡観察結果（アメリカ産）

これより，構成鉱物として不定形な石英や，累帯構造を示す斜長石，褐鉄鉱，炭酸塩鉱物（方解石，ドロマイト）やクリストバライト，微粒状の硫化鉱物（黄鉄鉱や白鉄鉱）が同定された．基質はモンモリロナイトで充填されていることが分かった．

図 4-49 に中国産原鉱石の偏光顕微鏡観察結果を示す．



その 1　　その 2

図 4-49　偏光顕微鏡観察結果（中国産）

これより，構成鉱物として不定形な石英や累帯構造を示す斜長石，方解石，微粒状の硫化鉱物（黄鉄鉱や白鉄鉱）が同定された．基質はモンモリロナイトにより充填されていることが分かった．

図 4-50 に富岡産原鉱石の偏光顕微鏡観察結果を示す．

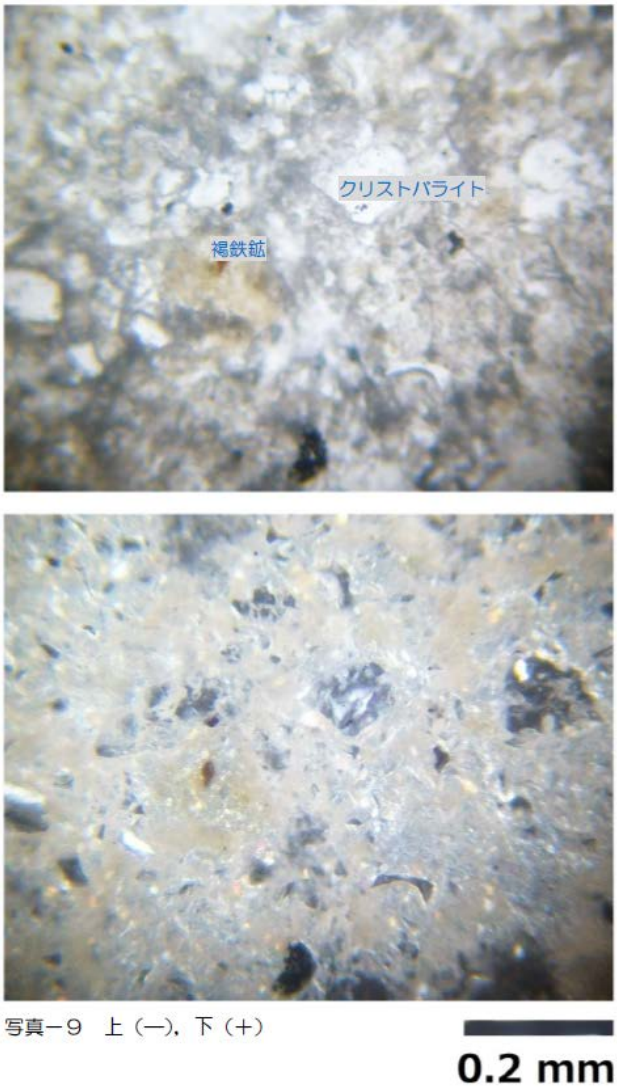
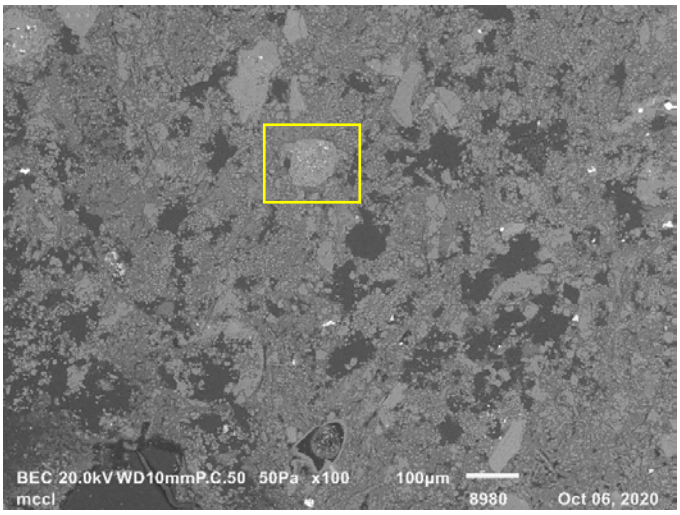


図 4-50　偏光顕微鏡観察結果（富岡産）

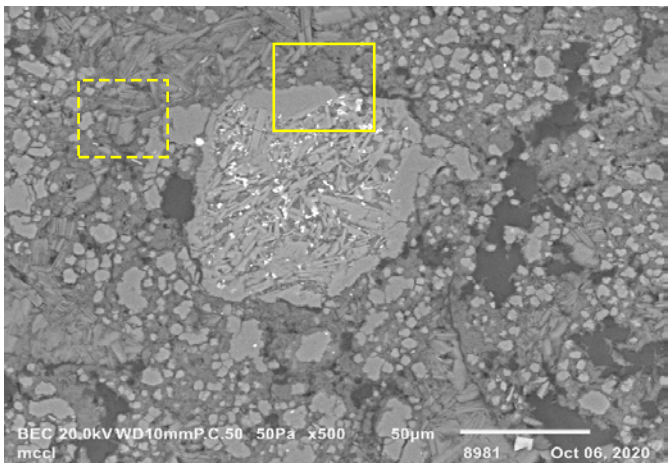
これより，構成鉱物として不定形な石英，累帯構造を示す斜長石およびクリストバライト，褐鉄鉱，微粒状の硫化鉱物（黄鉄鉱や白鉄鉱）が同定された．また，基質はモンモリロナイトにより充填されていることが分かった．

また，月布産の薄片試料を用いて SEM 観察を行った．観察に用いたのは，早稲田大学物性計測センターラボが保有する，JSM-IT100（日本電子株式会社製）である．今回，鉱物の同定を行うため，EDS 分析も同時に実施し，元素の定量評価も行った．

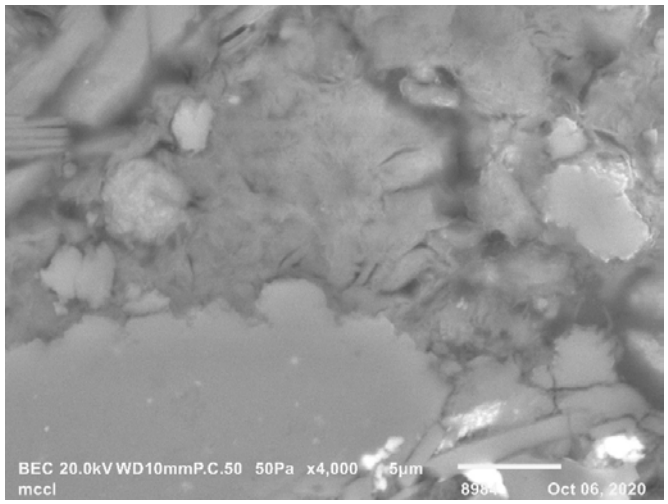
図 4-51 に SEM による観察結果（倍率：100～4000 倍）を示す．



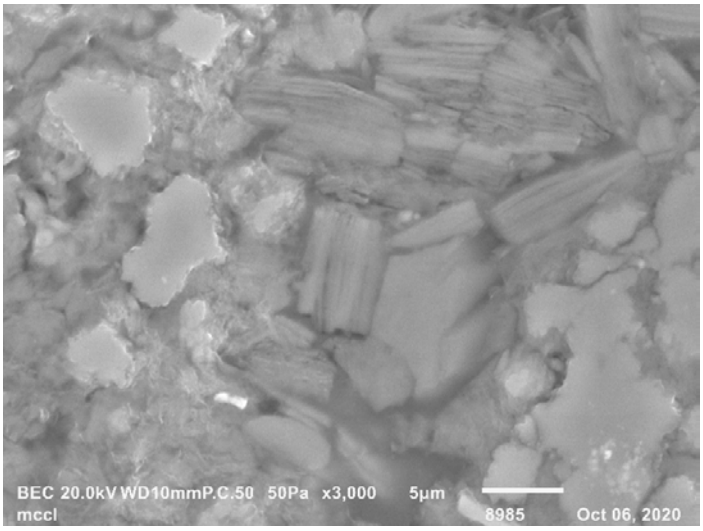
倍率：100 倍（□は下の倍率 500 倍の領域を示す）



倍率：500 倍



倍率：4000 倍（倍率 500 倍の図中実線の□に該当）



倍率：3000 倍（倍率 500 倍の図中破線□に該当）

図 4-51　SEM による観察結果

これより，鉱物粒子の構造として大きく分けて 2 種類が存在していることがわかる．一つは，倍率 4000 倍の図中左下部に存在するような，断面が平滑で輪郭の明瞭な構造を有する粒子である．二つ目として，倍率 4000 倍の図中央部や倍率 3000 倍の図中右上部等に存在するような，断面や輪郭の形状が不明瞭で，所々に長方形状の細かい粒子が重なるような構造を有する粒子である．また，倍率 4000 倍の図右下部等に存在するように，白く光るような粒子も点在している．

次に，倍率 4000 倍の図の範囲において，EDS 分析を実施した結果を示す．

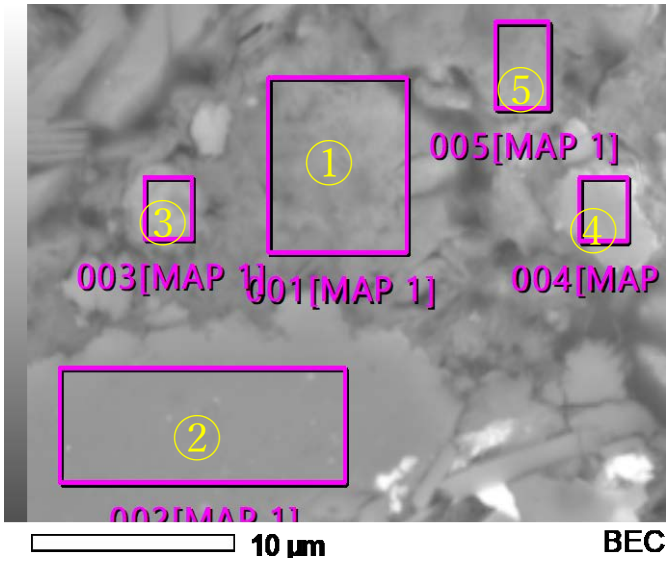


図 4-52　倍率 4000 倍の図における元素定量分析箇所

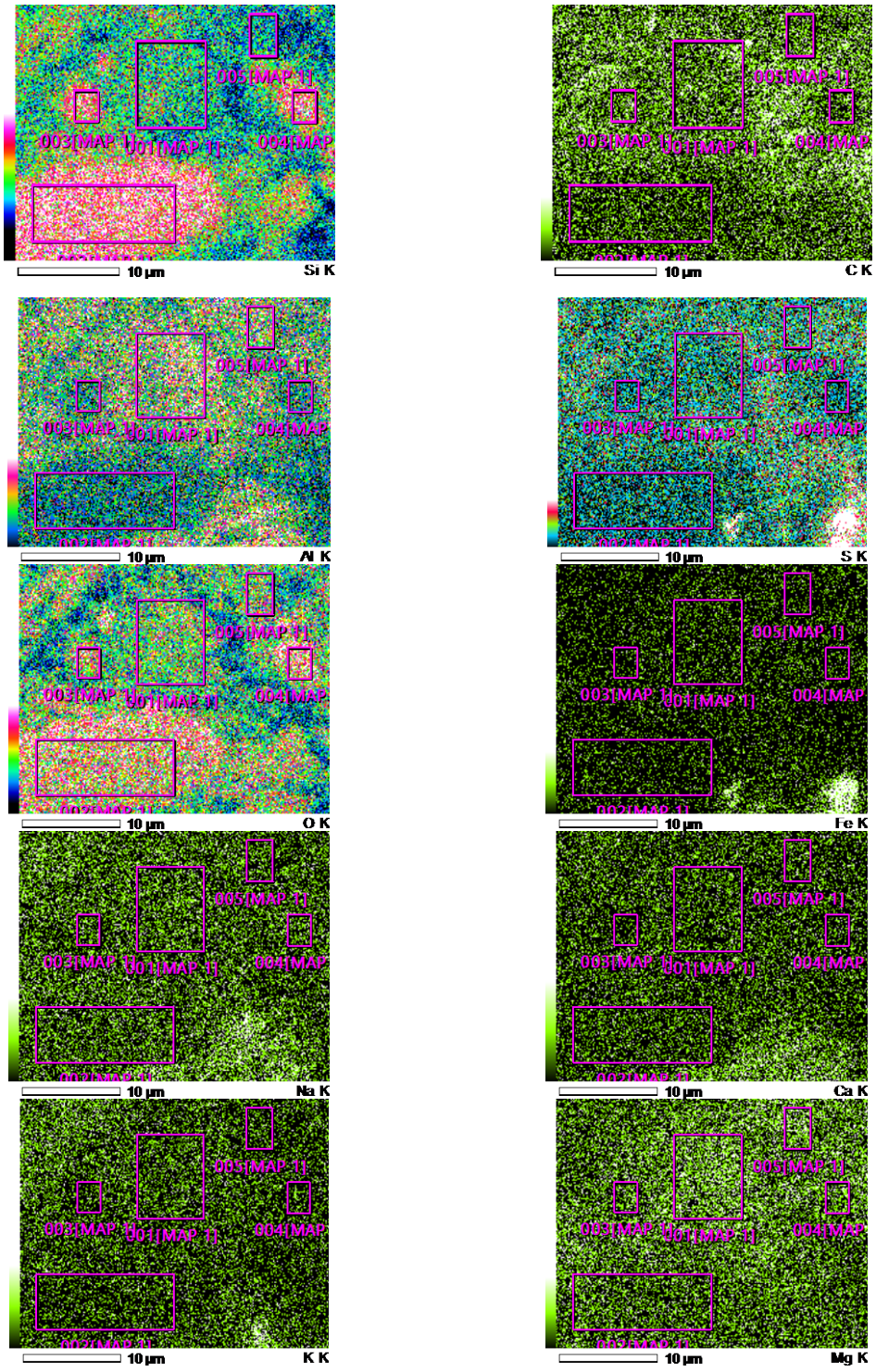


図 4-53　元素分布のマッピング結果（倍率 4000 倍の図）

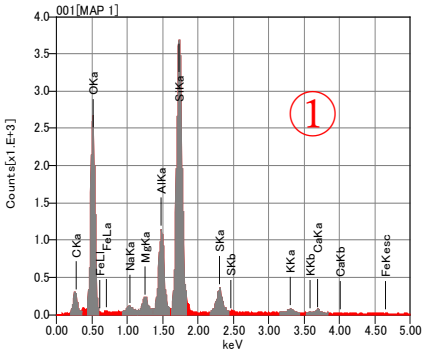


図 4-52 中①の元素ピーク

Formula	mass%	Atom%
C		
O*	51.30	64.98
Na*	0.96	0.85
Mg*	1.71	1.43
Al*	9.14	6.86
Si*	34.21	24.69
S		
K*	0.80	0.42
Ca*	0.73	0.37
Fe*	1.15	0.42
Total	100.00	100.00

図 4-52 中①の元素定量結果（左：質量比，右：数量比）

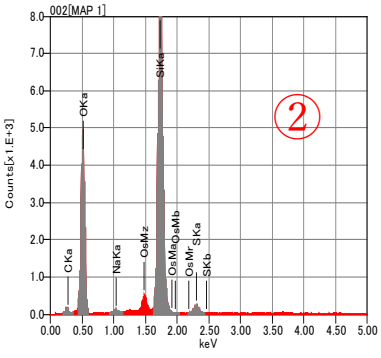


図 4-52 中②の元素ピーク

Formula	mass%	Atom%
C		
O*	54.35	68.15
Na*	0.56	0.49
Si*	42.16	30.11
S*	1.81	1.13
Os*	1.12	0.12
Total	100.00	100.00

図 4-52 中②の元素定量結果（左：質量比，右：数量比）

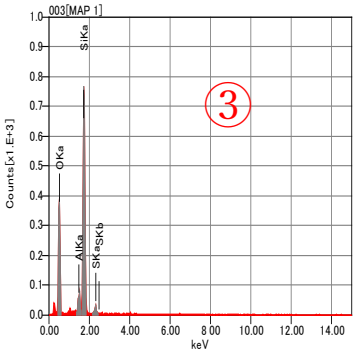


図 4-52 中③の元素ピーク

Formula	mass%	Atom%
O*	52.76	66.30
Al*	3.12	2.33
Si*	41.80	29.92
S*	2.32	1.46
Total	100.00	100.00

図 4-52 中③の元素定量結果（左：質量比，右：数量比）

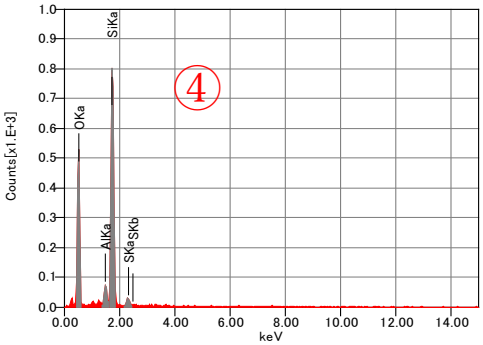


図 4-52 中④の元素ピーク

Formula	mass%	Atom%
O*	55.78	68.93
Al*	3.04	2.23
Si*	39.42	27.75
S*	1.76	1.09
Total	100.00	100.00

図 4-52 中④の元素定量結果（左：質量比，右：数量比）

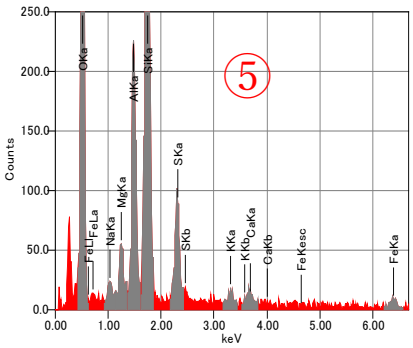


図 4-52 中⑤の元素ピーク

Formula	mass%	Atom%
O*	51.36	65.42
Na*	1.05	0.93
Mg*	1.79	1.50
Al*	8.80	6.65
Si*	28.52	20.70
S*	5.56	3.53
K*	0.62	0.32
Ca*	0.80	0.41
Fe*	1.49	0.54
Total	100.00	100.00

図 4-52 中⑤の元素定量結果（左：質量比，右：数量比）

図 4-54　倍率 4000 倍の図における元素定量分析結果

表 4-22　原鉱石の代表的な構成鉱物の化学式 [33)]

鉱物名	化学式
モンモリロナイト	$(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$
石英	SiO_2
クリストバライト	
斜長石	$NaAlSi_3O_8$，$CaAl_2Si_2O_8$
カルサイト	$CaCO_3$
緑泥石	$(Mg,Fe,Mn,Ni)_{6-x-y}(Al,Fe^{3+},Cr,Ti)_y\square_x(Si_{4-x}Al_x)O_{10}(OH)_8$
ドロマイト	$CaMg(CO_3)_2$
黄鉄鉱	FeS_2

図 4-52 に倍率 4000 倍の図における元素定量分析箇所を，図 4-53 に元素分布のマッピング結果（倍率 4000 倍の図）を，図 4-54 に倍率 4000 倍の図における元素定量分析結果をそれぞれ示す．また，表 4-22 に原鉱石の代表的な構成鉱物の化学式を示す．

まず，図 4-52 の①について，図 4-54 の元素定量結果と表 4-22 の構成鉱物化学式を照らし合わせると，Si と O の存在個数の比がおよそ 2:5～1:3 程度であることから，化学式と合わせてモンモリロナイトであると考えられる．図 4-52 の⑤についても，同様の理由からモンモリロナイトであると考えられる．

図 4-52 の②について，Si と O でほぼすべて構成されており，その比がおよそ 1:2 程度であることから石英であることが考えられる．図 4-52 の③および④についても，②と同様の理由から石英であることが考えられる．

また，図 4-55 に以上の結果を踏まえた鉱物の分布を記載したものを示す．①～⑤に加えて，図中右下部の Na・Ca の存在が比較的多い部分が斜長石，Fe・S の存在が比較的多い部分が黄鉄鉱と同定された．

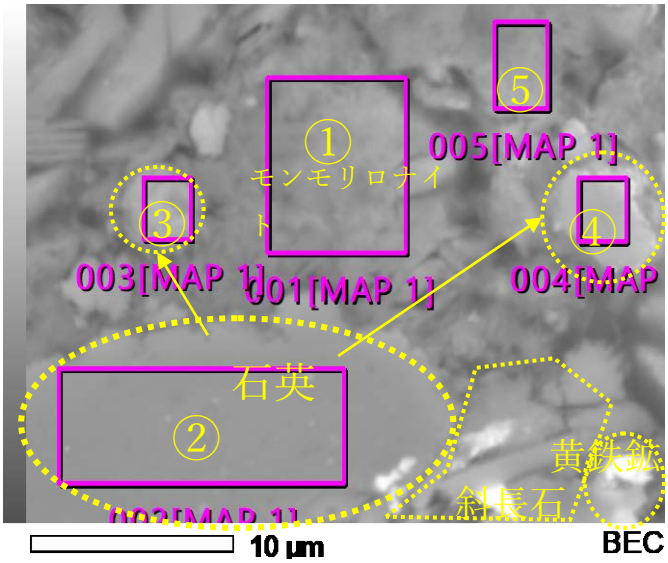


図 4-55　倍率 4000 倍の図における鉱物分布

次に，同様に倍率 3000 倍の図の範囲において，EDS 分析を実施した結果を示す.

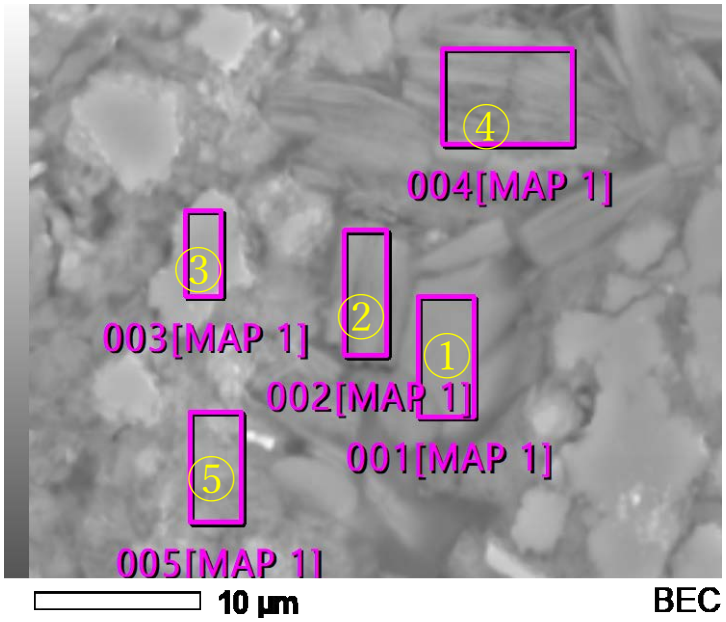


図 4-56　倍率 3000 倍の図における元素定量分析箇所

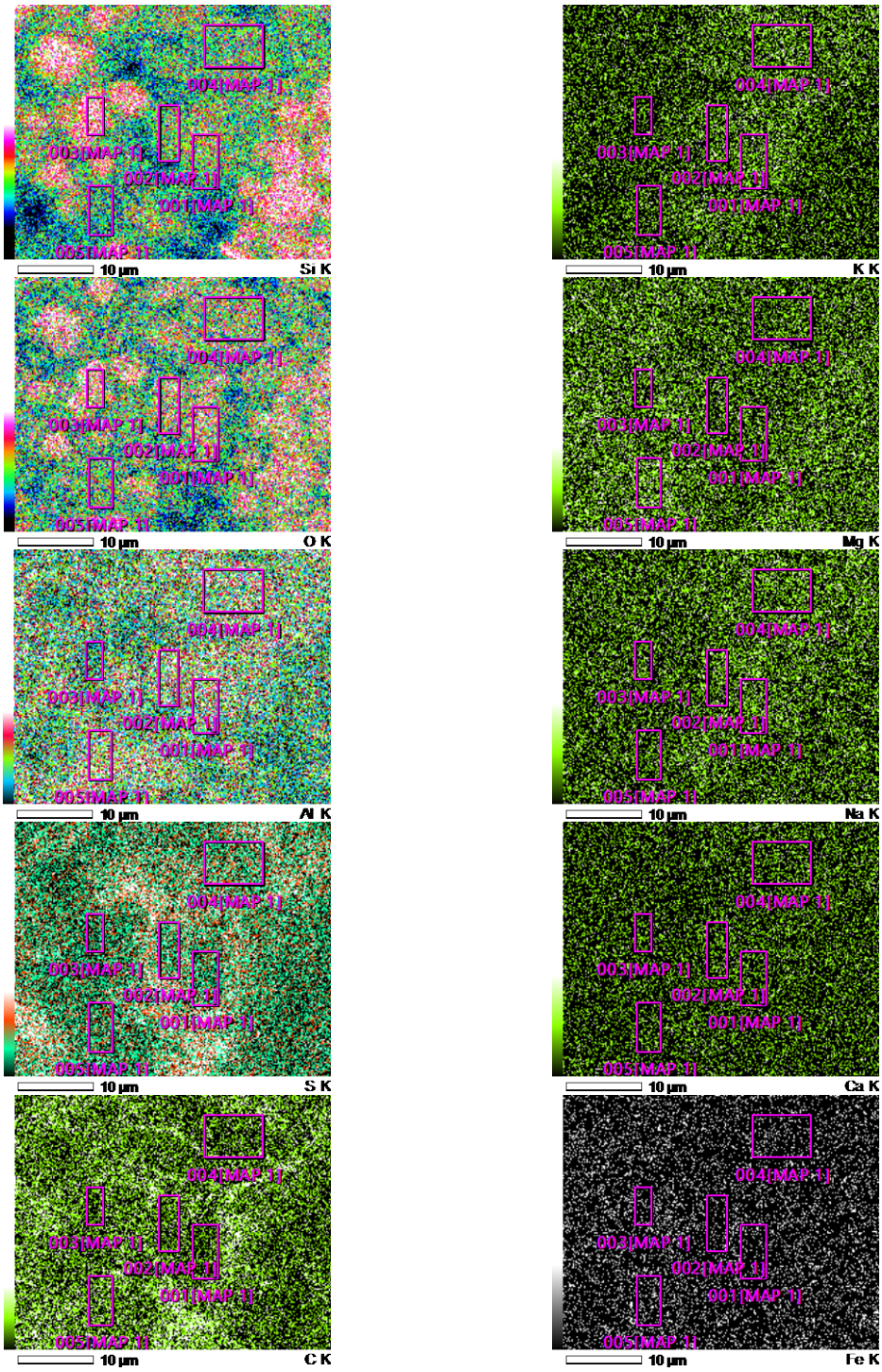


図 4-57　元素分布のマッピング結果（倍率 3000 倍の図）

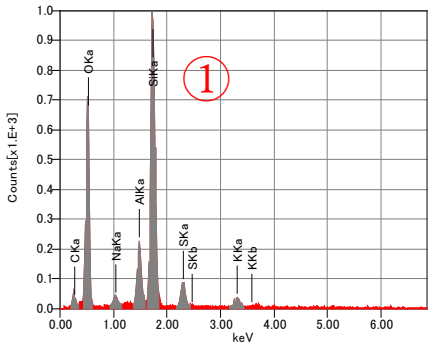


図 4-56 図 4-52 中①の元素ピーク

Formula	mass%	Atom%
C*	11.99	18.21
O*	50.55	57.64
Na*	1.26	1.00
Al*	5.43	3.67
Si*	26.18	17.01
S*	3.24	1.84
K*	1.36	0.64
Total	100.00	100.00

図 4-56 中①の元素定量結果（左：質量比，右：数量比）

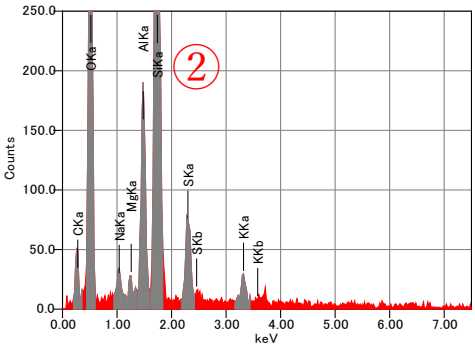


図 4-56 図 4-52 中②の元素ピーク

Formula	mass%	Atom%
C*	16.20	23.89
O*	49.15	54.41
Na*	0.96	0.74
Mg*	0.61	0.45
Al*	5.27	3.46
Si*	23.11	14.57
S*	3.51	1.94
K*	1.18	0.53
Total	100.00	100.00

図 4-56 中②の元素定量結果（左：質量比，右：数量比）

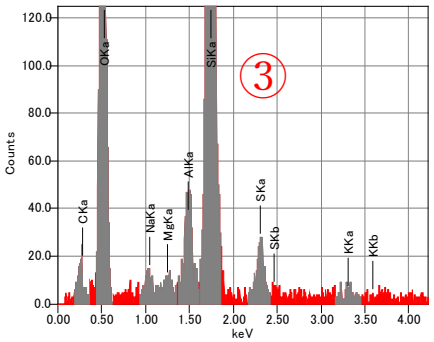


図 4-56 図 4-52 中③の元素ピーク

Formula	mass%	Atom%
C		
O*	53.66	67.06
Na*	0.89	0.77
Mg*	0.34	0.28
Al*	2.06	1.53
Si*	40.16	28.59
S*	2.58	1.61
K*	0.31	0.16
Total	100.00	100.00

図 4-56 中③の元素定量結果（左：質量比，右：数量比）

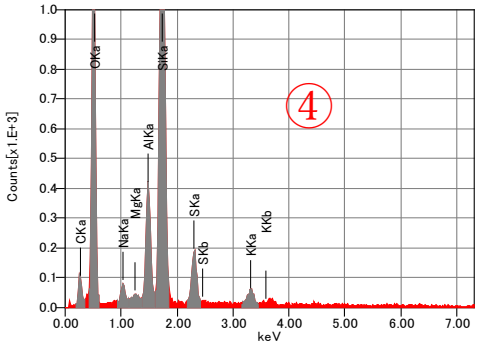


図 4-56 図 4-52 中④の元素ピーク

Formula	mass%	Atom%
C		
O*	52.09	65.83
Na*	1.55	1.36
Mg*	0.24	0.20
Al*	6.68	5.01
Si*	32.68	23.53
S*	5.10	3.22
K*	1.66	0.86
Total	100.00	100.00

図 4-56 中④の元素定量結果（左：質量比，右：数量比）

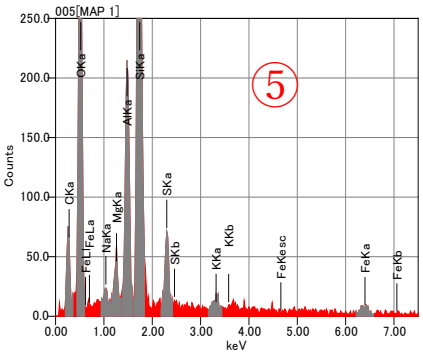


図 4-56 図 4-52 中⑤の元素ピーク

Formula	mass%	Atom%
C		
O*	50.85	64.72
Na*	0.81	0.71
Mg*	1.73	1.45
Al*	8.61	6.50
Si*	31.69	22.98
S*	4.59	2.92
K*	0.62	0.32
Fe*	1.09	0.40
Total	100.00	100.00

図 4-56 中⑤の元素定量結果（左：質量比，右：数量比）

図 4-58　倍率 3000 倍の図における元素定量分析結果

図 4-56 に倍率 3000 倍の図における元素定量分析箇所を，図 4-57 に元素分布のマッピング結果を，図 4-58 に倍率 3000 倍の図における元素定量分析結果をそれぞれ示す．

まず，図 4-56 の①について，C と O の存在数が約 1:3 であることより，何らかの炭酸塩鉱物であることが考えられるが，Ca や Mg，Fe といった炭酸イオンと結合する陽イオンが検出されておらず，断定はできない．また，Si も一定数（約 17%）存在していることから，石英やモンモリロナイトといった鉱物も混在していることが推察される．図 4-56 の②についても，ほぼ同様の鉱物組成であり，①と同様の鉱物が存在していることが考えられる．

図 4-56 の③について，ほぼ Si と O で構成されており，石英であることが考えられる．

図 4-56 の④, ⑤について, Si と O の存在個数の比がおよそ 2:5～1:3 程度であることから，化学式と合わせてモンモリロナイトであると考えられる．

また，図 4-59 に以上の結果を踏まえた鉱物の分布を記載したものを示す．①～⑤に加えて，図中右下部の Si と O のみが存在数が多い部分は石英と同定された．

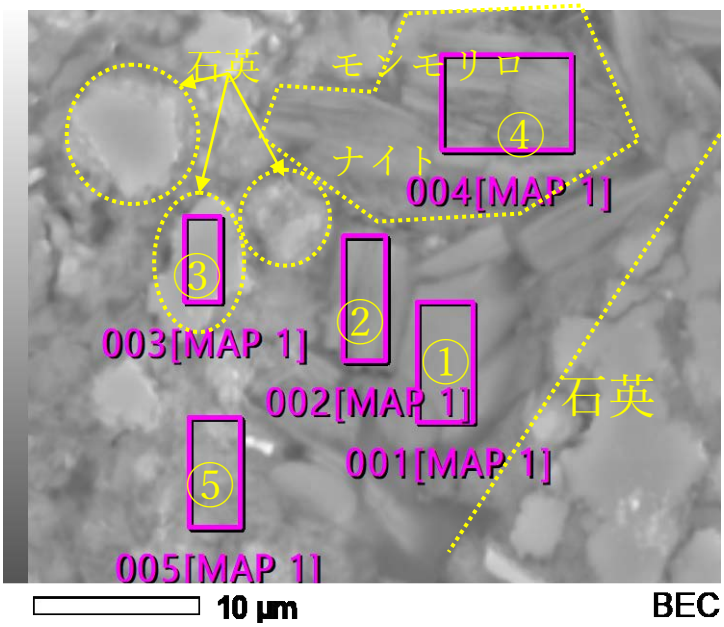


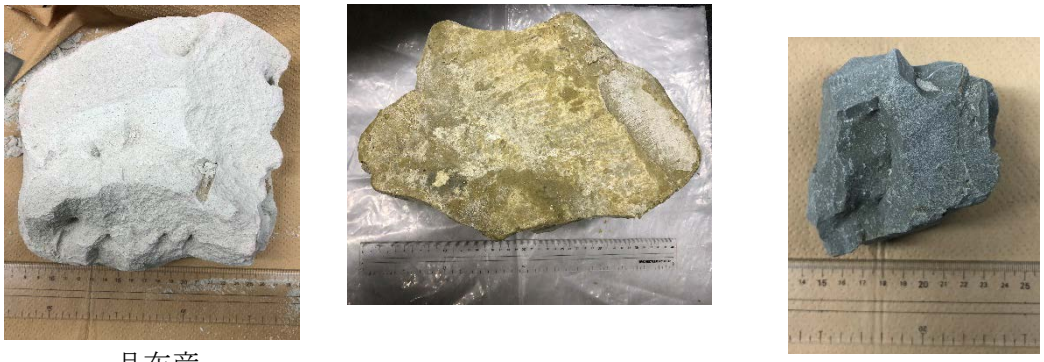
図 4-59　倍率 3000 倍の図における鉱物分布

以上の結果から，断面が平滑で輪郭の明瞭な構造を有する粒子は石英等の随伴鉱物であり，断面や輪郭の形状が不明瞭で，所々に長方形状の細かい粒子が重なるような構造を有する粒子はモンモリロナイトであると判断できることが示された．また，白く光るような粒子は黄鉄鉱等の点在する硫化鉱物であることが示された．

4.2.5　針貫入試験による原鉱石の力学特性評価

本節では，原鉱石に対して針貫入試験を実施した結果について述べる．

今回，原鉱石試料については図 4-60 に示すような塊状態のままで無作為に 5～6 点ほど抽出して試験を実施した．再構成試料については，膨潤圧試験や一次元膨潤変形試験の再構成供試体と同様の方法で，直径 28 mm，高さ 19 mm の円柱形を目標として締固めて作製した．なお，供試体の乾燥密度は膨潤特性試験の不攪乱供試体の乾燥密度値を参照して，それぞれ月布産では約 1.7 Mg/m^3 とし，アメリカ産では約 1.4・1.6 Mg/m^3，中国産では約 1.8 Mg/m^3 とした．



月布産　　アメリカ産　　中国産

図 4-60　針貫入試験に使用した不攪乱試料の様子

表 4-23　月布産不攪乱試料（含水比 11.6%）の針貫入試験結果

試行回数	貫入量 mm	貫入勾配 N/mm	一軸圧縮強さ kN/m^2
1	3.9	25.6	9976
2	4.8	20.8	8142
3	3.8	26.3	10232
4	5.2	19.2	7529
5	4.0	25.0	9732
6	3.3	30.3	11746

表 4-24　月布産再構成試料（乾燥密度 1.71 Mg/m^3，含水比 9.1%）の針貫入試験結果

試行回数	貫入量 mm	貫入勾配 N/mm	一軸圧縮強さ kN/m^2
1	5.7	17.5	6883
2	6.0	16.7	6546

表 4-25　アメリカ産不攪乱試料（含水比 34.2%）の針貫入試験結果

試行回数	貫入力 N	貫入勾配 N/mm	一軸圧縮強さ kN/m^2
1	14	1.4	581
2	12	1.2	499
3	14	1.4	581
4	15	1.5	621
5	18	1.8	742
6	18	1.8	742

表 4-26　アメリカ産再構成試料（乾燥密度 1.62 Mg/m^3，含水比 14.5%）の針貫入試験結果

試行回数	貫入量 mm	貫入勾配 N/mm	一軸圧縮強さ kN/m^2
1	7.2	13.9	5477

表 4-27　アメリカ産再構成試料（乾燥密度 1.43 Mg/m^3，含水比 14.5%）の針貫入試験結果

試行回数	貫入力 N	貫入勾配 N/mm	一軸圧縮強さ kN/m^2
1	60	6	2410

表 4-28　中国産不攪乱試料（含水比 15.8%）の針貫入試験結果

試行回数	貫入量 mm	貫入勾配 N/mm	一軸圧縮強さ kN/m^2
1	4.2	23.8	9278
2	4.8	20.8	8142
3	5.5	18.2	7127
4	4.0	25.0	9732
5	5.2	19.2	7529

表 4-29　中国産再構成試料（乾燥密度 1.81 Mg/m^3，含水比 13.0%）の針貫入試験結果

試行回数	貫入量 mm	貫入勾配 N/mm	一軸圧縮強さ kN/m^2
1	5.0	20	7824
2	5.0	20	7824

表 4-23～表 4-29 に月布産・アメリカ産・中国産原鉱石の不攪乱試料・再構成試料の針貫入試験結果を示す．なお，再構成試料の試行回数が 1～2 回にとどまっているのは，最後の試行の次の試行時に供試体が貫入方向に破断したため，それ以上試験が続行不可能となったためである．次に，図 4-61～図 4-64 にそれぞれの原鉱石における，不攪乱試料と再構成

試料の一軸圧縮強さの算出結果をボックスチャートで示す.

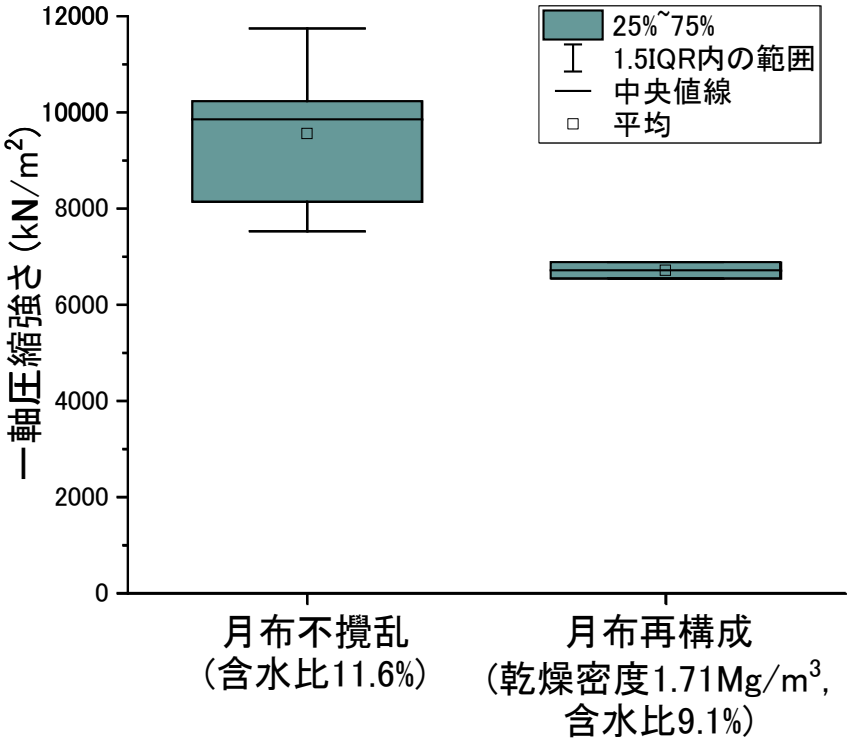


図 4-61　月布産原鉱石の一軸圧縮強さ

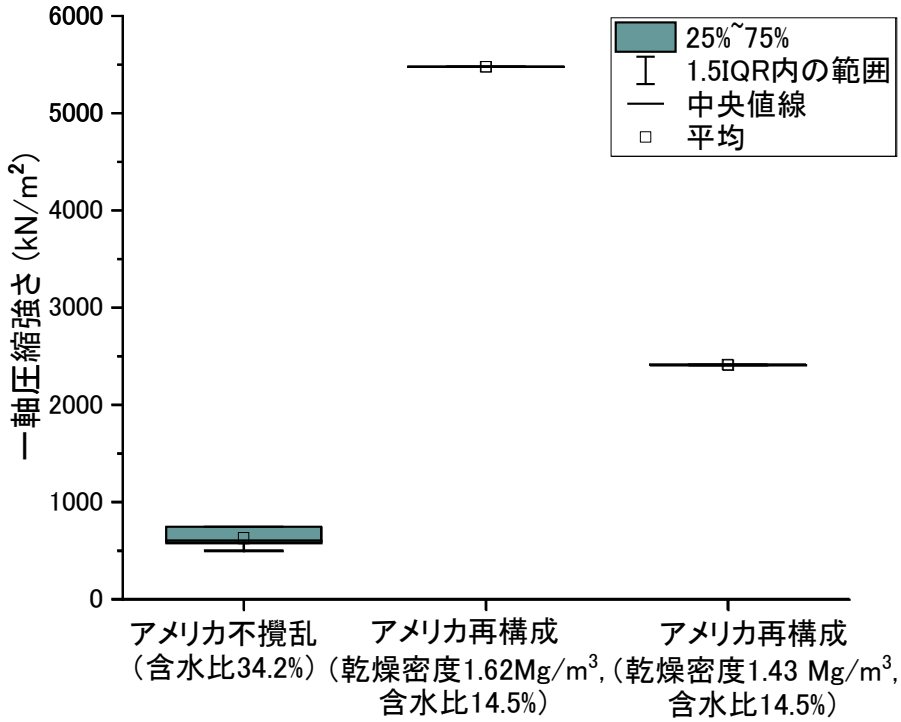


図 4-62　アメリカ産原鉱石の一軸圧縮強さ

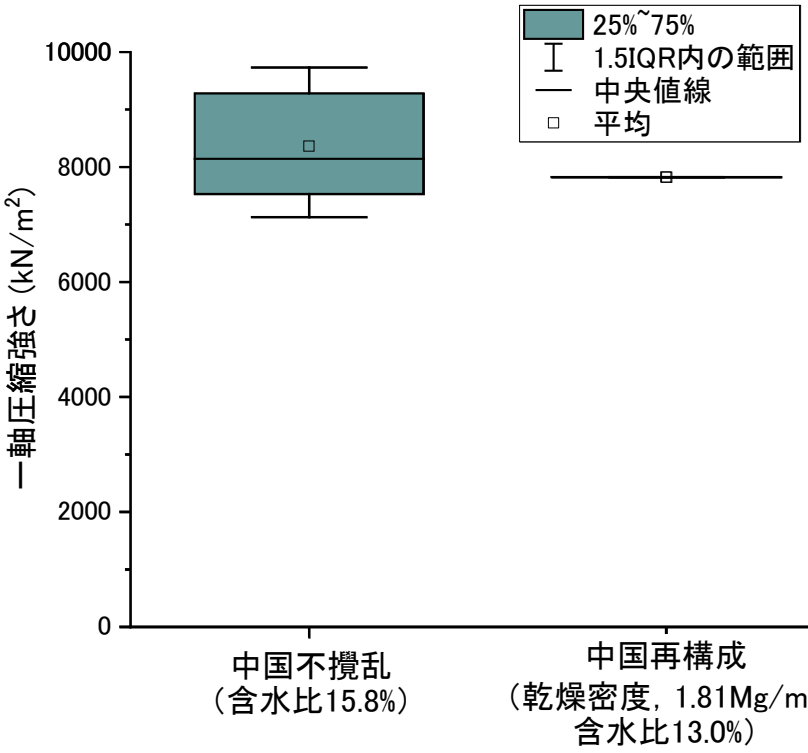


図 4-63　中国産原鉱石の一軸圧縮強さ

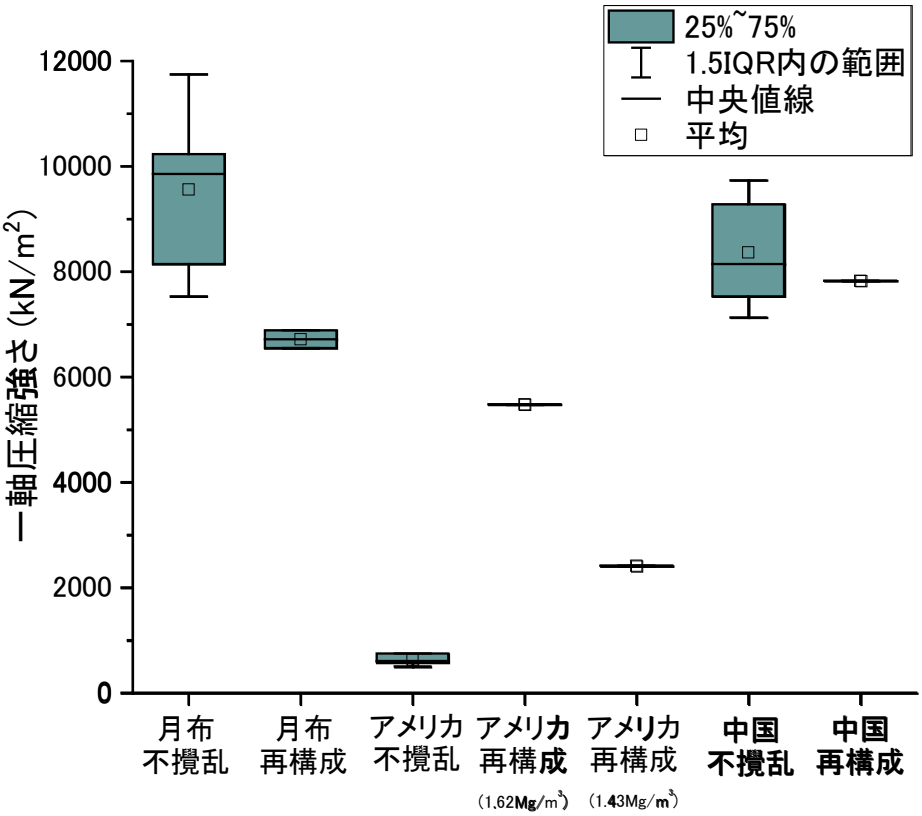


図 4-64　全原鉱石の一軸圧縮強さの比較

図 4-61 より，月布産原鉱石において，不攪乱試料の算出値にはバラつきがある（約 7500～12000 kN/m^2）ものの，いずれの測定ケースも再構成試料（約 7000 kN/m^2）に比べて高いことがわかる．図 4-62 より，アメリカ産原鉱石において，不攪乱試料の算出値（約 500～700 kN/m^2）に対して再構成供試体の値（1.43 Mg/m^3：約 2500 kN/m^2，1.62 Mg/m^3：約 5500 kN/m^2）が著しく大きいことがわかる．この理由として，不攪乱供試体の含水比が再構成供試体に比べて著しく高いことが挙げられる．また，再構成供試体において，乾燥密度が高い試料ほど一軸圧縮強さが高い傾向がある．図 4-63 より，中国産原鉱石において，不攪乱試料の算出値にバラつきがあるが，中央値・平均値については再構成試料に比べて高い結果であった．また，不攪乱試料と再構成試料の一軸圧縮強さの差異については，月布産原鉱石の方が中国産原鉱石に比べて大きく，アメリカ産原鉱石の結果も踏まえると，地質年代や膨潤特性の比率との相関性はみられなかった．今後は，針貫入試験に加えて，エコーチップ試験や弾性波試験など，非破壊で力学特性を調査し，地質年代の代替指標を模索していく．

4.2.6 本研究成果の地層処分事業への適用

本項では，本研究成果で得られた成果を用いた，地層処分事業の適用（安全評価）方法について述べる．

・地層処分事業における緩衝材設計への適用に関する概要

図 4-65 に緩衝材の設計フローの一例[3)]を示す．本研究で対象としている，ベントナイトの膨潤圧・一次元膨潤変形率における膠結作用の影響評価は，緩衝材の設計フロー内の「性能評価等における確認」の内，長期健全性の評価に該当する．原子力発電環境整備機構(2011)[34)]では，長期健全性に関わる緩衝材の技術要件として，自己修復性（施工後変形に伴う隙間を充填すること）や耐熱性，緩衝材流出の抑制，自己シール性（施工時の隙間を充填すること）など，10 項目が挙げられている．このうち，自己修復性や自己シール性に関しては，緩衝材の膨潤圧や膨潤変形特性が密接に関わる．本研究で得られた結果は，これらの要件が超長期的な変質現象である膠結作用を受けた場合においても満たされるか否かを照査する上で有用な結果となりうる．

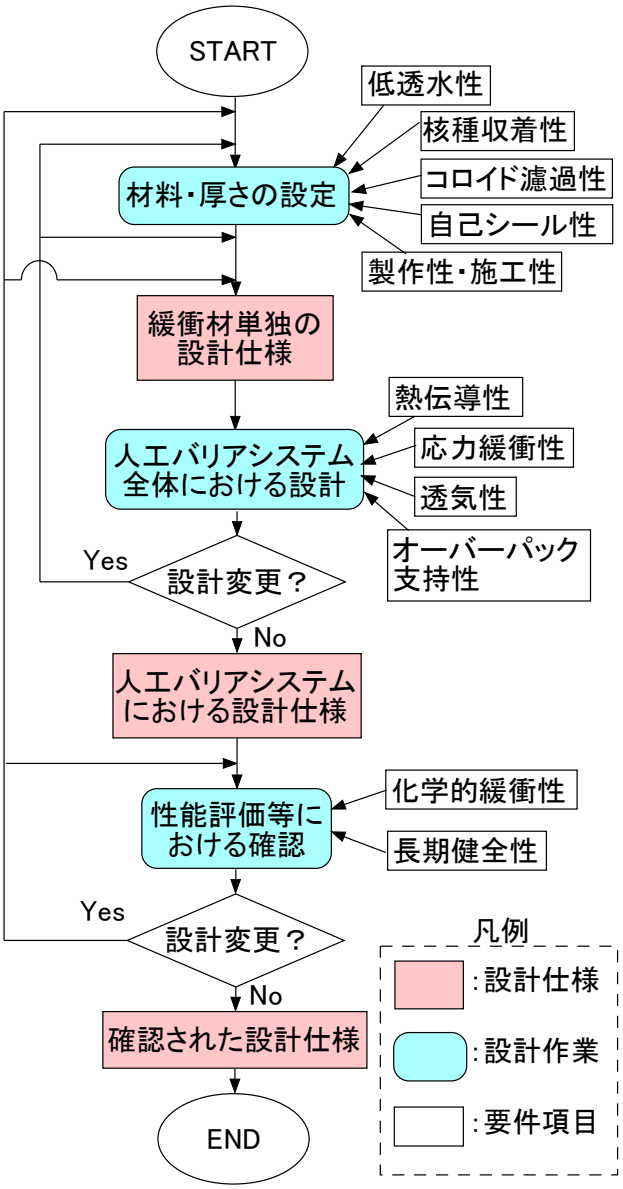


図 4-65　緩衝材の設計フローの一例

次に，自己修復性に焦点を当てて，本研究で得られた成果の適用方法について説明する．まず，自己修復性において想定される緩衝材の損傷原因は，処分後 1000 年経過以降に発生すると考えられるオーバーパックの腐食に伴う水素ガスの発生・破過である [35]．図 4-66 に本事象の概念図を示す．還元環境下においては，オーバーパックの構成分子である鉄が水と接触した場合，水素ガスが発生する．ベントナイト系緩衝材は透気性が低いため，水素ガスが発生した場合，はじめは緩衝材中の間隙水を置換するように緩衝材間隙にたまっていくと考えられる．しかし，ガスの発生量（供給量）が過大となるときに，透気できずに破過現象が発生し，水みちとなりうる割れ目が発生してしまうと考えられる [36]．この割れ目を膨潤変形により再充填することが，安全確保の上で緩衝材には長期的に求められる．

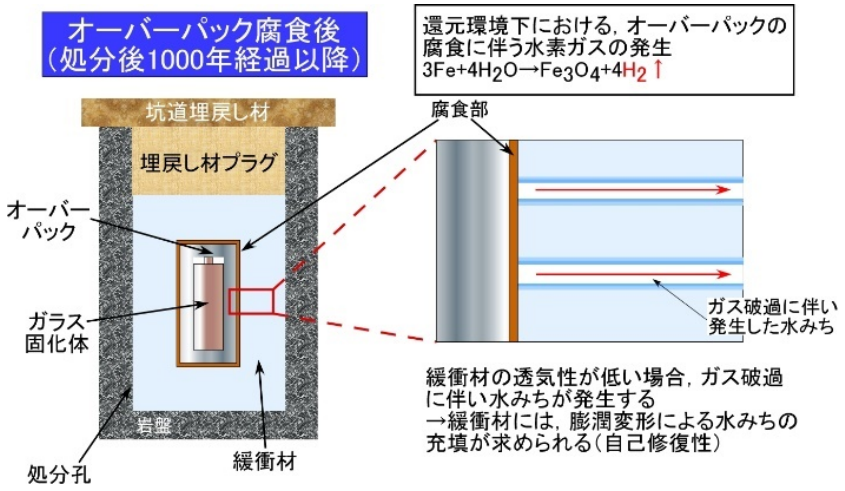


図 4-66　オーバーパックの腐食に伴う水素ガスの発生・破過に関する概念図

次に，本研究で得られた供試体乾燥密度—拘束圧関係のデータを用いながら，ベントナイト系緩衝材における膠結作用の影響を加味した，自己修復性の担保における膨潤挙動の評価手法を提案する．図 4-67～図 4-69 に，各原鉱石における膨潤圧・一次元膨潤変形率の測定結果および自己シール性実験 [37]の結果を，横軸試験終了時の供試体乾燥密度，縦軸を拘束圧として統一的に示したグラフを示す．なお，ここでの拘束圧は，膨潤圧および自己シール性実験の場合は最大膨潤圧および最大の発生圧力を，一次元膨潤変形率測定実験の場合は実験期間中の拘束圧（19.6 kPa）を指している．また，図 4-70～図 4-72 に，図 4-67～図 4-69 の縦軸を対数軸化したグラフを示す．この理由として，ベントナイト系材料の膨潤圧を対数化した場合，乾燥密度に対して相関性を有することが既往の検討 [22]において提案されているためである．

これらより，膨潤圧・一次元膨潤変形率・自己シール性の各実験により得られた，試験終了時の供試体乾燥密度と拘束圧の間には一意な関係性があることが分かる．このことから，発生圧力の収束値に対して，試験開始時の供試体周辺の隙間の有無や拘束状況の影響は小さいものと推察される．再構成供試体では，最大粒径に因らず同程度の拘束圧となる傾向が分かるとともに，不攪乱供試体では再構成供試体に比べて乾燥密度の全ての範囲において，拘束圧が低下している傾向が分かる．そして，図 4-70～図 4-72 中に示している，再構成供試体と不攪乱供試体のプロットに関する近似折れ線を見ると，月布産原鉱石に比べて，アメリカ産原鉱石・中国産原鉱石の方が折れ線間のギャップが大きくなっている傾向が見て取れる．これは，原鉱石の地質年代が古くなるにつれてギャップが大きくなっていると考えられ，地質年代に応じて原鉱石中の膠結作用の影響が強まり，膨潤特性の低下幅が大きくなったものと推察する．

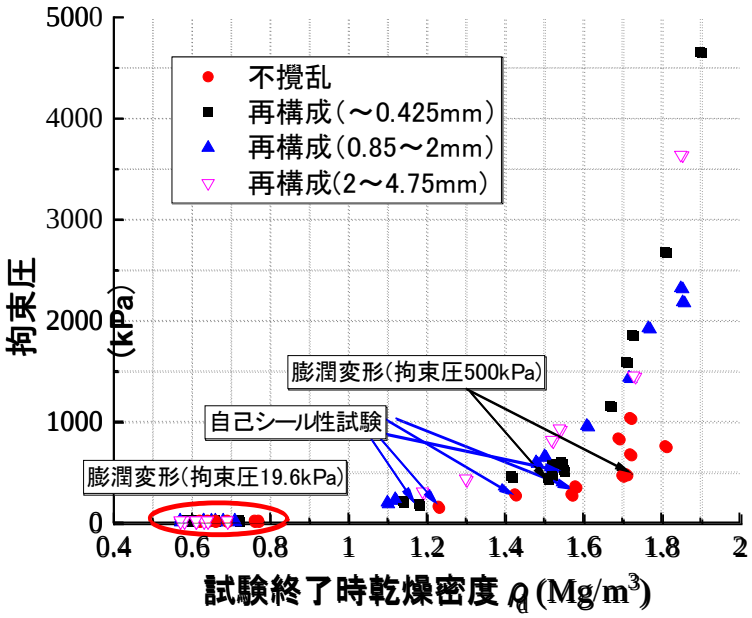


図 4-67　試験終了時乾燥密度-拘束圧の関係（月布産）

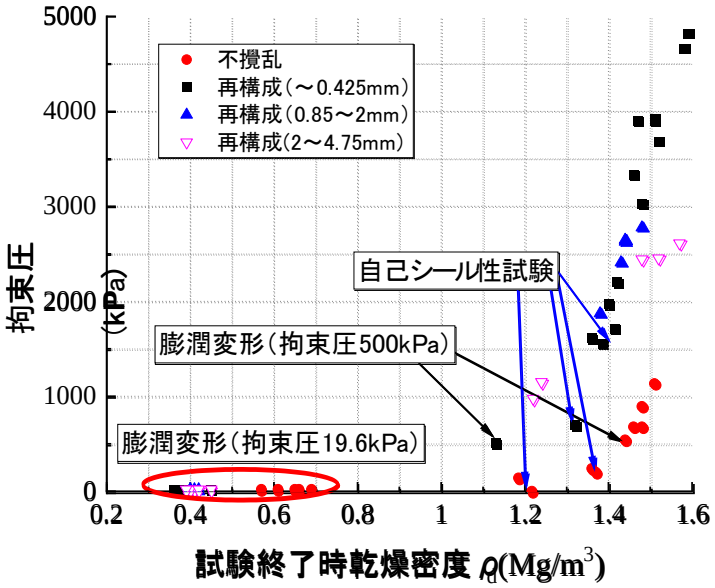


図 4-68　試験終了時乾燥密度-拘束圧の関係（アメリカ産）

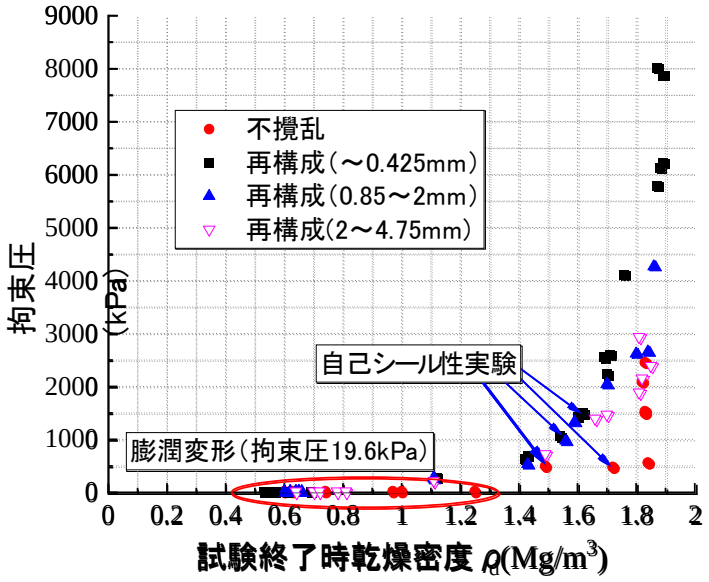


図 4-69　試験終了時乾燥密度-拘束圧の関係（中国産）

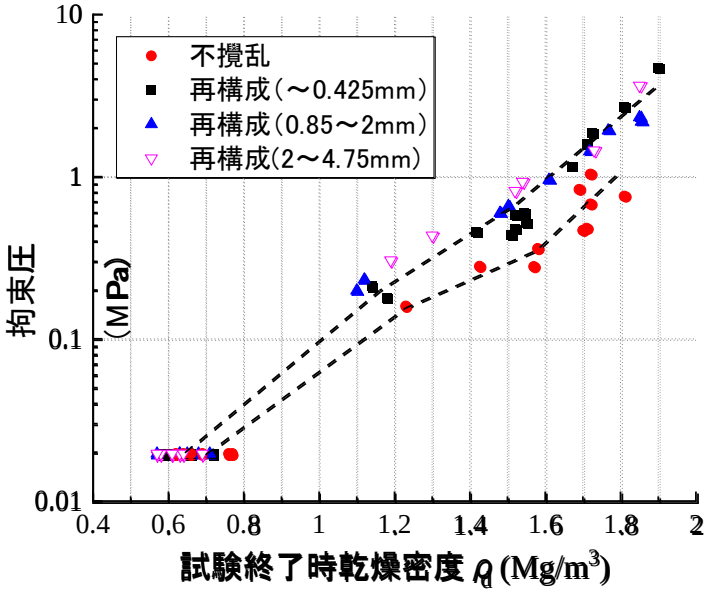


図 4-70　試験終了時乾燥密度-拘束圧の関係（月布産，縦軸対数化）

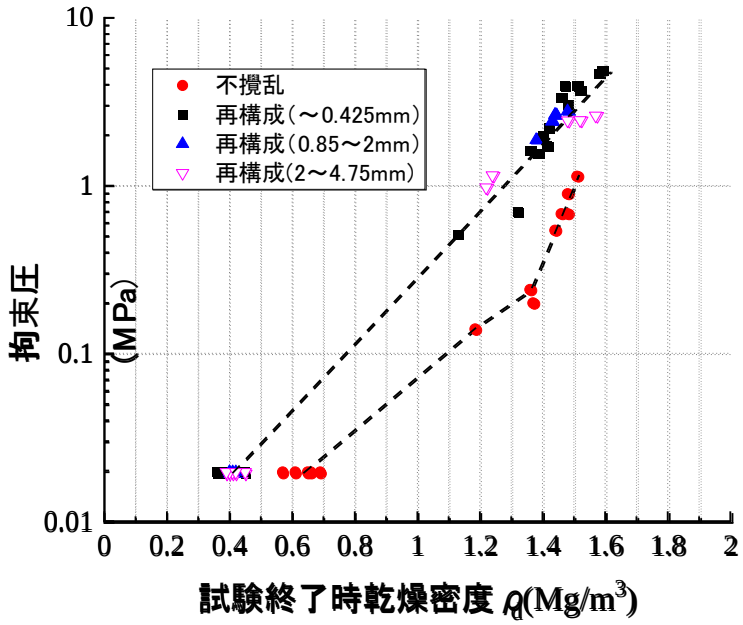


図 4-71　試験終了時乾燥密度-拘束圧の関係（アメリカ産，縦軸対数化）

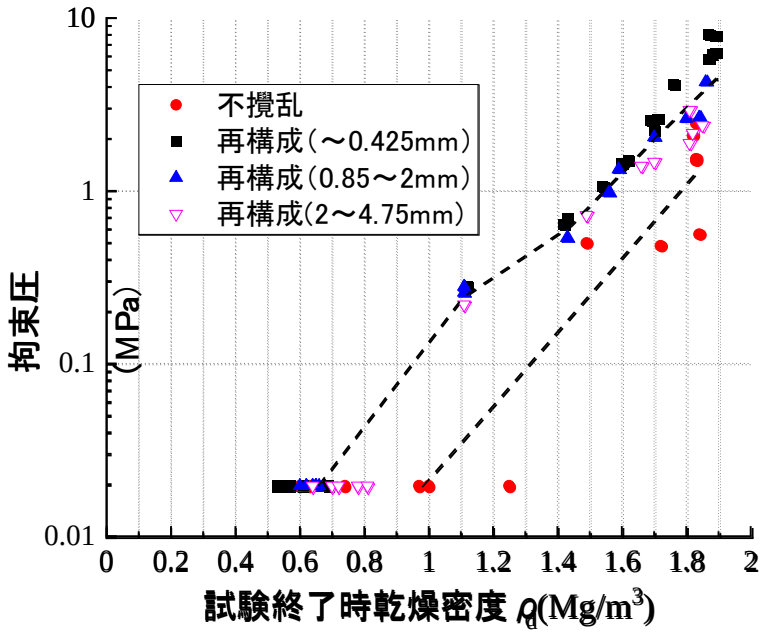


図 4-72　試験終了時乾燥密度-拘束圧の関係（中国産，縦軸対数化）

続いて，地層処分事業開始直後から，数千年～数万年が経過し，オーバーパックの腐食，水素ガスの破過，緩衝材中の膠結作用の進行に伴う膨潤特性の低下の一連の経時変化を，図を用いながら説明する．一例として，緩衝材が図 4-73 のような経時に伴う状態変化をたどると想定した場合に，緩衝材の乾燥密度—拘束圧の関係に基づいた自己修復性の設計に

関して，月布産原鉱石の試験終了時乾燥密度－拘束圧関係（図 4-70）を用いた概念を図 4-74 として示す．

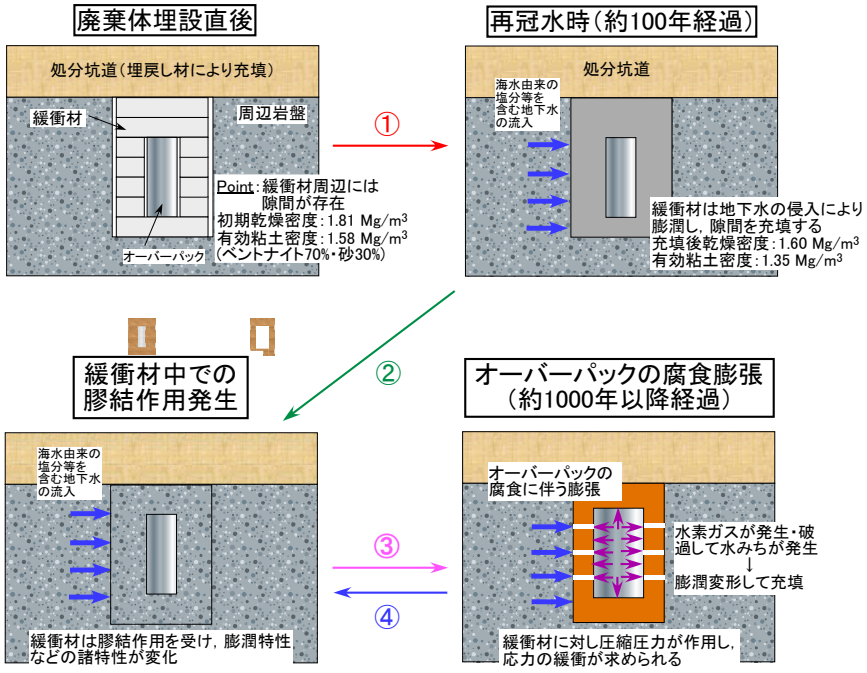


図 4-73　想定される緩衝材の経時的な状態変化

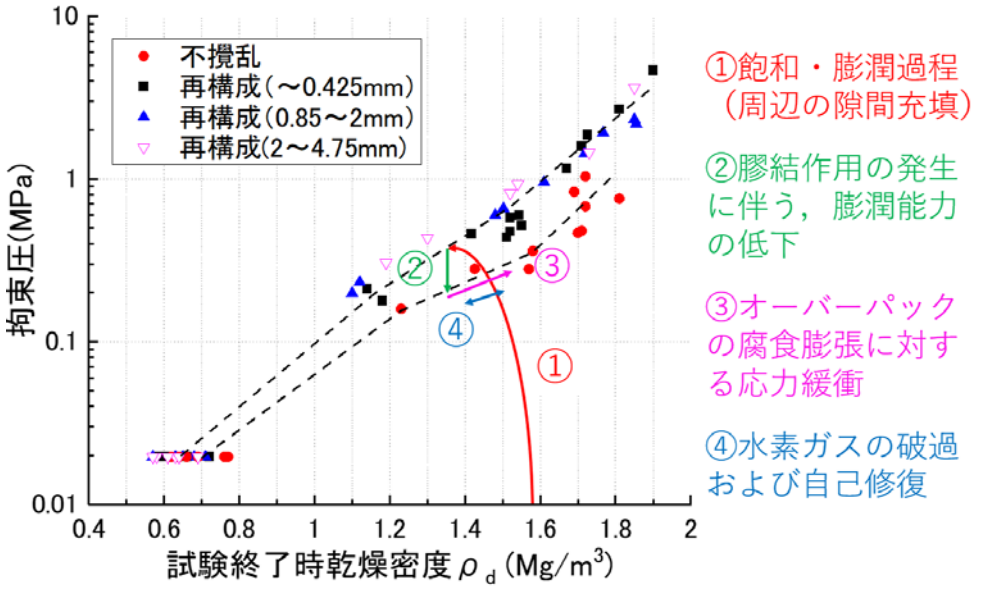


図 4-74　緩衝材の経時的な状態変化に伴う乾燥密度-拘束圧関係の変化概念図

ベントナイト系材料が締固められてブロックとして製作され，緩衝材として処分孔に設置される場合，参考文献 3)および 35)を踏まえると，初期の乾燥密度は 1.81 Mg/m^3 であり，ベントナイト：砂=7：3 の配合であるため，有効粘土密度，すなわちベントナイト部分のみの乾燥密度は 1.58 Mg/m^3 と計算される．再冠水に伴って膨潤変形し，緩衝材とオーバーパック・周辺岩盤との間の隙間を充填し，岩盤等の変形を考慮しない場合，充填後の乾燥密度は 1.60 Mg/m^3, 有効粘土密度は 1.35 Mg/m^3 となる [3),35)] (図 4-73・図 4-74 中の①に該当)．時間経過とともに，緩衝材中において膠結作用が発生し，膨潤特性などの諸特性が変化する（②に該当)．その後，1000 年経過以降においてオーバーパックの腐食・膨張が発生し，膨張に伴って緩衝材に対して圧縮方向に働く圧力が作用して応力を緩衝することが求められる（③に該当)．また，腐食とともに発生した水素ガスが破過して，水みちとなりうる隙間が発生した場合，一時的に隙間周囲の乾燥密度が上昇し，その後膨潤変形により乾燥密度が戻るという応答があると考えられる（④に該当)．このように，本研究で得られた乾燥密度―拘束圧の関係を用いて，緩衝材の自己修復性に関して，膠結作用のような長期的な変質現象を考慮した設計を行うことができると考えられる．なお，本提案においては，膠結作用の発生に伴う変質がオーバーパックの腐食・膨張に先立って発生すると想定しているが，これは膠結作用によって緩衝材の膨潤特性が低下してしまった場合を工学的に危険側で想定したものであり，どちらの現象が先立って発生するかは今後解明すべき課題である．

最後に，図 4-70～図 4-72 で示した，各原鉱石における試験終了時乾燥密度―拘束圧の関係において，緩衝材が周辺の隙間を充填した際の有効粘土密度である 1.35 Mg/m^3 における不攪乱供試体と再構成供試体の拘束圧の比率を算出し，原鉱石の地質年代を用いて整理したのが図 4-75 である．

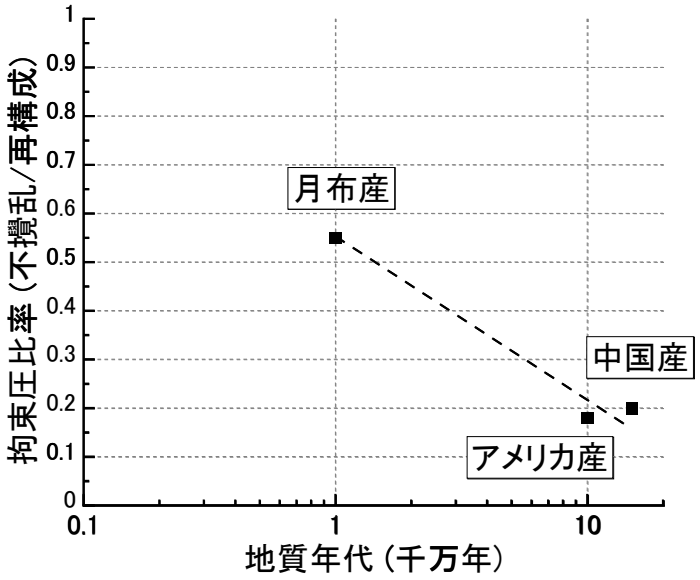


図 4-75　原鉱石の地質年代-拘束圧の比率（不攪乱供試体/再構成供試体）関係

これより，原鉱石の地質年代が古くなるにつれて，拘束圧の比率（不攪乱/再構成）が低下していることが分かる．このことから，ベントナイト系緩衝材においても，時間経過とともに膠結作用が進行して，同程度の乾燥密度においても拘束圧が低下することが考えられる．しかし，地質年代の測定精度の問題や，原鉱石の置かれてきた環境等による影響は無視できないことが問題として挙げられる．

5. 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 2～4.75 mm の再構成供試体の膨潤圧，膨潤変形特性を評価した．また，昨年度までに実施した不攪乱供試体と，再構成供試体（粒径～0.425 mm，0.850～2 mm）も加えて総合的に評価した．その結果，月布産原鉱石の膨潤圧・膨潤変形特性において，再構成供試体の粒径による影響はほぼ見られなかったのに対し，アメリカ産・中国産原鉱石では粒径が大きくなるほど，膨潤圧・膨潤変形特性が低下する傾向がみられ，原鉱石の地質年代が古くなることで，膠結作用の影響が大きくなると推察された．また，不攪乱供試体と再構成供試体（粒径～0.425 mm）の値と比較すると，膨潤圧では月布産で約 1/2，アメリカ産で約 1/3，中国産では約 1/3～1/4 であった．膨潤変形特性では月布産でほぼ同程度，アメリカ産で約 1/2，中国産で約 1/2～1/3 であり，膨潤圧・膨潤変形特性に対する膠結作用の影響は年代に応じて強まることが示唆される結果が得られた.

2) アメリカ産・中国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，1)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とどまる結果が得られるとともに，モンモリロナイト底面間隔については大きな差異がないことが分かった.

3) 3 種類の Na 型ベントナイト原鉱石から薄片試料を作製し，偏光顕微鏡および SEM を用いて土粒子の微視的骨格構造について評価した．その結果，原鉱石中に含有される鉱物と粒子構造について同定することができた.

4) 地層処分事業に対する本研究成果の適用として，オーバーパックの腐食に伴う水素ガス破過を想定し，シナリオを構築した．そして，本研究で得られた膨潤圧・膨潤変形試験結果と緩衝材の設計乾燥密度を踏まえて，緩衝材の自己修復性評価手法のひな型を作成した.

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) Alezander, R., W., Reijonen, H., M., McKinley, I., G.: 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) Komine, H., and Ogata, N.: 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) Wang, H., Komine, H., Gotoh, T.: A swelling pressure cell for X-ray diffeaction test, Geotechnique, 2020, 12. (accepted)

24) 例えば，Morodome, S. and Kawamura, K.: Swelling behavior of Na- and Ca montmorillonite up to 150°C by IN SITU X-ray diffraction experiments, Clays and Clay Minerals, Vol. 57, No. 2, pp. 150-160, 2009.

25) Wang, H., Shirakawabe, T., Komine, H., Ito, D., Gotoh, T., Ichikawa, Y., Chen, Q.: Movement of water in compacted bentonite and its relation with swelling pressure, Canadian Geotechnical Journal, doi:10.1139/cgj-2019-0219, 2019, 8.

26) 早稲田大学教育・総合科学学術院薄片室：薄片製作のテキスト，2019.

27) 山口嘉一，中村洋祐，中村真，箱石憲昭，山谷政彦，加藤康徳：針貫入試験によるダム軟岩基礎の設計強度検証，応用地質第 46 巻，第 1 号, pp.20-27, 2005.

28) 三浦尚，岩城一郎，板橋洋房：針貫入試験によるコンクリート構造物の劣化診断に関する研究，土木学会論文集 No.620/V-43, pp.245-255, 1999.

29) 岡田滋，泉谷泰志，飯塚友之助，堀内澄夫：針貫入試験による軟弱な地山強度の推定，土と基礎，33-2，pp.35-38，1985.

30) Lambe, T., W. and Whitman, R., V.: Soil Mechanics，John Wiley & Sons Inc.，pp.29-31，1969.

31) 小峯秀雄，緒方信英：高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式の提案―砂とベントナイトの配合割合およびベントナイト中の陽イオンの種類・組成の影響―，電力中央研究所報告，U99013，1999.

32) Schanz, T., Khan, M. I., Al-Badran, Y.: An alternative approach for the use of DDL theory to estimate the swelling pressure of bentonites, Applied Clay Science, Vol. 83-84, pp.383-390, 2013.

33) Michell, J.K. and Soga, K.: Fundamentals of soil behavior (Third edition), John Wiley &Sons, Inc., pp.52-53, 2005.

34) 原子力発電環境整備機構（NUMO）：処分場の安全機能と技術要件（2010 年度），NUMO-TR-10-11, p. 24, 2011.

35) 核燃料サイクル開発機構：我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, 1999.

36) 穂刈利之，沖原光信，石井卓，小島圭二：ベントナイト混合土の自己修復性に関する考察，放射性廃棄物研究，Vol.3, No.1, 1996.

37) Ito, D., Komine, H., Wang, H.: Experimental study on effect by cementation on self-sealing capability of bentonite buffer material, 2nd International Conference on Energy Geotechnics, E3S Web of Conferences, 205, 2020.

2020 年度　外部発表

【学術論文】

1. （査読付）Wang, H., Komine, H., Gotoh, T.: A swelling pressure cell for X-ray diffraction test, Geotechnique, 2020. 12. (Accepted)
2. （査読付）王海龍，小峯秀雄，伊藤大知，後藤隆弘：締固めたベントナイトの膨潤圧特性の究明に向けた X 線回折を用いた実験手法の開発，地盤工学会誌，2021 年 1 月号，pp.48-51.

【口頭発表】

1. 王海龍，小峯秀雄，渡邊保貴.「締固めたベントナイトの膨潤圧発生に伴うモンモリロナイト底面間隔の遷移」土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会，2020.9.
2. 王海龍，白河部匠，小峯秀雄.「締固めたベントナイトの膨潤圧計測装置の開発」，第 55 回地盤工学研究発表会, 21-5-5-01, 2020 .7.
3. 伊藤大知，小峯秀雄，王海龍，後藤茂：破砕により粒径を変化させたベントナイト原鉱石の膨潤圧測定結果に基づく膠結作用の影響評価, 第 55 回地盤工学研究発表会（京都），23-7-4-02，2020.7.
4. 伊藤大知，小峯秀雄，王海龍，後藤茂：モンモリロナイト底面間隔から観たベントナイト原鉱石の膨潤圧における膠結作用の影響評価，土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会（名古屋），2020.9.
5. D. Ito, H. Komine, H. Wang: Experimental study on effect by cementation on self-sealing capability of bentonite buffer material, E3S Web of Conferences 205, 10004, ICEGT2020, San Diego, U.S.A, https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020510004, 2020.11.
6. D. Ito, H. Komine, H. Wang: Experimental study to elucidate cementation effect on swelling pressure and montmorillonite basal spacing of bentonite ore, 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney, Australia, 2021.9. (査読中)

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。

地殻中に存在する断層は，断層活動による割れ目の形成によって選択的な地下水の移行経路になると考えられる一方で，基盤岩の変質によって生成する粘土が低透水性を示すことからこれらを抑制する構造としても機能しうることが知られている。断層の内部構造は断層コア，ダメージゾーン，母岩に大きく分けることができる(Caine et al., 1996)。断層コアは断層の中央に位置し, 断層帯の中で最も大きなひずみや変位が生じている(Bense et al., 2013)。断層コアは単独のすべり面や, 未固結粘土を多く含むガウジ帯, 角礫化した変質帯, カタクレーサイト帯などを含むことがある。走向あるいは傾斜方向における断層コアの厚さの変化, 内部構造と組成が流体流動特性の支配因子であると考えられている。その周りに分布しているダメージゾーンでは, 亀裂や小規模な断層が認められ, 断層帯からの距離に応じて亀裂密度や浸透率が低下するとの報告がある(Mitchell and Faulkner, 2012)。さらに, ダメージゾーンの外側には断層の影響がほとんど認められない原岩が分布する(Caine et al., 1996)。これらの内部構造に応じて，断層は conduit あるいは barrier，conduit-barrier システムとして働くことが知られており，断層帯におけるコアやダメージゾーンの割合により，断層の水理特性が変化すると考えられている(Caine et al., 1996)。また，断層の水理特性に影響を及ぼすプロセスとして，透水性を増大させるものとしては，粒子の流動，亀裂の発生，角礫化などが，減少させるものとしては，粒子の移動，フィロ珪酸塩スミアの形成，圧砕などが, 透水性に影響を及ぼす二次的および地質学的プロセスとして，流体流動に伴う鉱物の溶解やセメンテーション，圧力溶解などが考えられている(Bense et al., 2013)。断層帯における流体の流動特性は時間的に変化する可能性があるため(Goddard and Evans, 1995；Caine et al., 1996)，特定の断層帯の概念モデルを構築する際には断層が発達する過程のどの段階にあるかを明らかにする必要がある(Caine et al., 1996)。

上述のように, 断層は多様な水理特性を示すが, 放射性廃棄物の地層処分の安全評価では, 主に放射性核種の移行経路として考えられてきた。例えば, 安全評価において主要な評価対象となる地下水シナリオ(地下水の作用により埋設された廃棄体から放射性核種が漏出，移行し，生物圏に到達するとするシナリオ)に関連して，第 2 次取りまとめ報告書(核燃料サイクル開発機構，1999)では断層を一次元平行平板モデルで表現して物質移行解析が行われた。その一方で，一定の割合の断層は地下水流動や物質移行を抑制する構造として働くことが知られている。例えば，Scibek et al. (2016)は世界の断層の水理特性に関するデータに基づいて，barrier として機能する断層が 30%程度，conduit-barrier システムが 20%程度であるとした。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。また，断層近傍で起きる元素の地球化学的プロセスに関しては，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評価するためには，対象なる岩石の元素収着特性を把握するだけでなく，その岩石を構成するどの鉱物への収着挙動が重要であるかを把握する必要がある。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う。

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する。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う。

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う。

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る。

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. 2019 年度の成果概要

2019 年度は断層周辺の岩盤への元素収着特性を把握するための収着試験と，粘土鉱物への収着を考慮した物質移行解析を行った。概要を以下に示す。

3.1 断層周辺の鉱物組成を考慮した反応輸送解析

バリア機能を示す可能性が高い水理地質構造として瑞浪超深地層研究所周辺で確認されたような複数の断層に囲まれたコンパートメント構造に注目し，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作成した。本モデルにおいて断層ガウジの透水性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，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（図 1)。地下水流動解析の結果に基づき，コンパートメント構造周辺を地下水と共に移行する核種の反応輸送解析を行った。反応輸送解析では，断層と母岩に含まれる鉱物組成の違い，具体的には粘土鉱物の種類と含有量を変化させ，物質移行状態を確認した（図 2，図 3)。

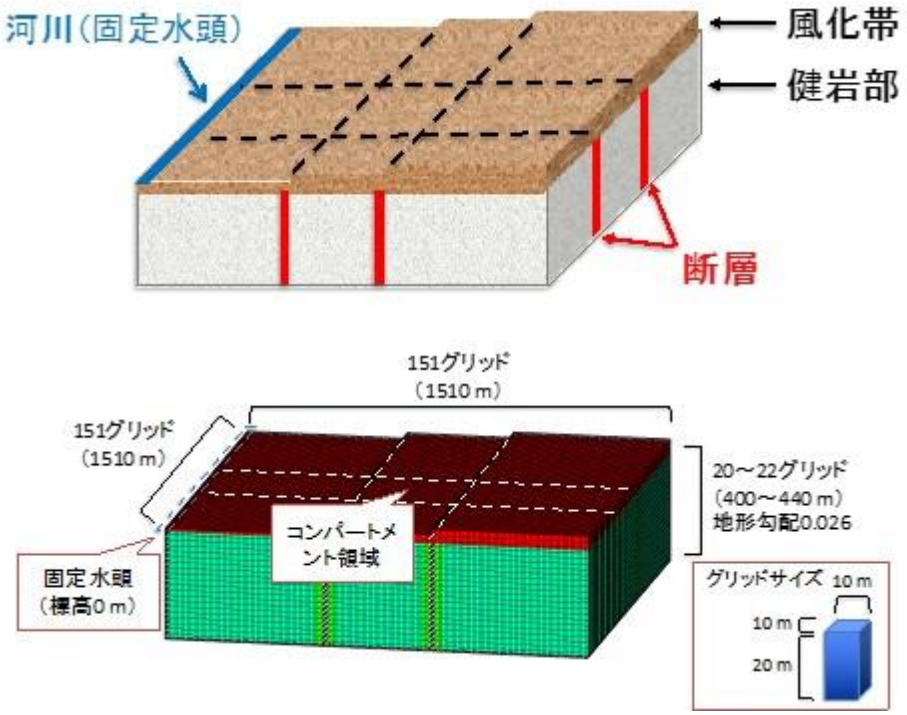


図 1　本研究で想定したコンパートメント領域を有する水理地質構造（上）と水理地質構造に基づく仮想水理地質モデル（下）

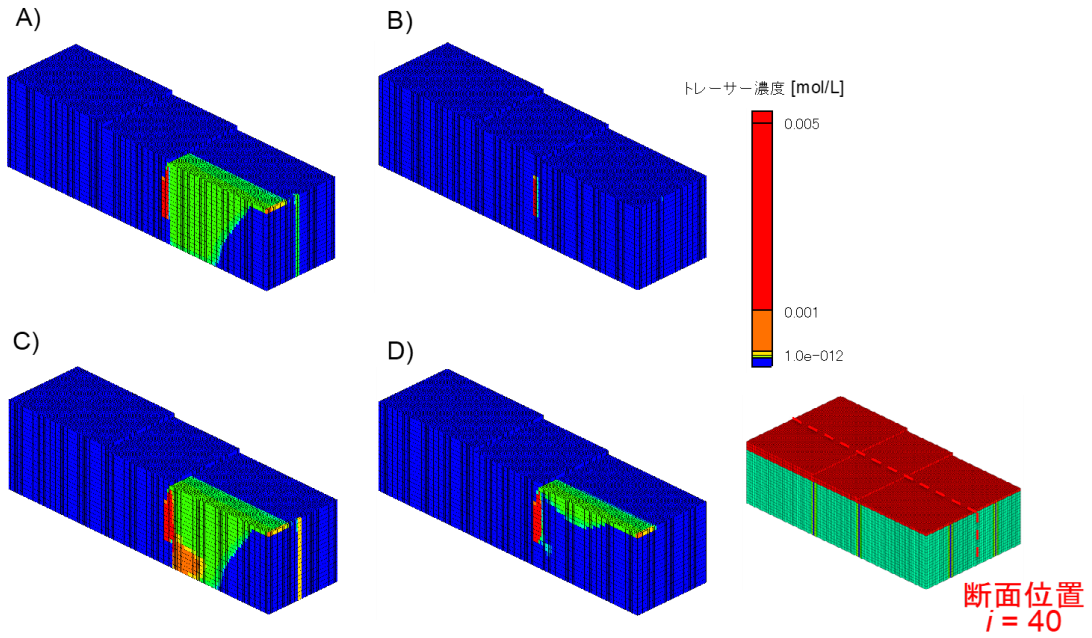


図 2　断層における収着を考慮した反応輸送解析結果

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

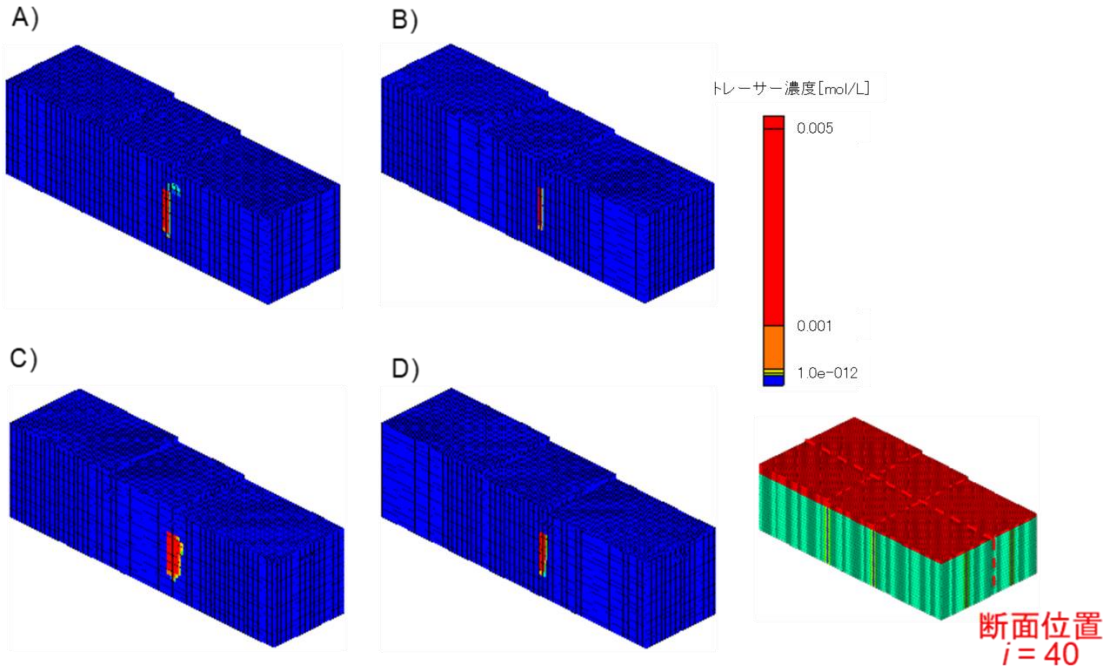


図 3　断層における収着を考慮した反応輸送解析結果

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

3.2 断層周辺岩石の元素収着特性

断層周辺の元素の収脱着能力が健岩部とどのように異な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。収着試験は瑞浪超深地層研究所内の深度 300m で採取された断層周辺岩石試料の細粒化した粉末試料を用いて行った。外観と鉱物組成分析から変質の度合いを評価し，収着挙動との関係について考察を行った（図 4）。

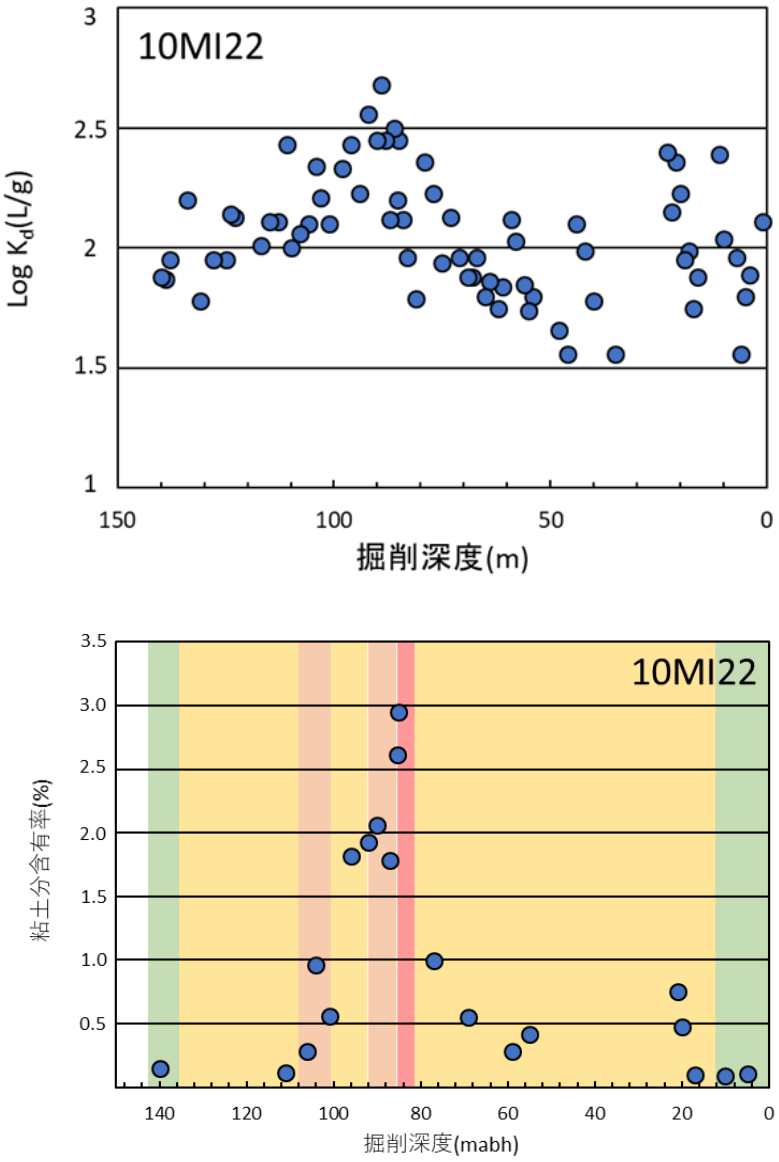


図 4　10MI22 号孔における Cs の収着分配係数（上）と粘土含有率（下）

4. 2020 年度研究実施内容

4.1 研究目的

断層の内部構造（断層ガウジ，ダメージゾーン）に応じた水理特性が地下水流動に及ぼす影響や，断層の周囲の母岩とは鉱物組成が異なることで生じる収着作用が物質移行に及ぼす影響を定量的に把握するため，仮想的な水理地質モデル（仮想モデル）と実在する断層周辺の水理地質モデル（実在モデル）を用いた地下水流動解析と反応輸送解析を行った。仮想モデルと実在モデルを用いた解析を並行して実施した理由としては，実在モデルでは実際に存在する断層の水理特性や収着特性をモデルや解析に反映することで，考慮する断層が周辺の地下水流動や物質移行に及ぼす影響を把握できる一方で，モデルに設定するパラメータが検討対象とする断層に依存してしまうため，断層が有する一般的な地下水流動や物質移行への影響を把握することが困難となる。仮想モデルでは自由に水理や収着に関するパラメータを設定できることで，様々な性質を示す断層を考慮し，それらが周辺の地下水流動と物質移行に及ぼす多様な影響を把握する上で役立つと期待される。しかし，仮想モデルにおけるこれらパラメータの設定においては，実在する断層における水理特性や収着特性の範囲を考慮し，非現実的なモデルとならないように注意する必要がある。これら仮想モデルと実在モデルそれぞれの長所と短所を図 5 にまとめる。以上の理由から，本研究では仮想モデルと実在モデルを用いた解析を並行して進めることで，仮想モデルにおけるパラメータ設定の妥当性確保と，多様な水理特性，収着特性を示す断層が周囲の地下水流動や物質移行に及ぼす影響の一般的な理解を目指した。

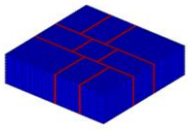
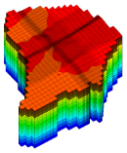
	仮想モデル 	実在モデル 
長所	• シンプルなモデルを用いることで，水理地質構造や水理・収着特性が地下水流動，物質移行に及ぼす影響を把握しやすい • 幅広い地質構造や水理・収着特性を考慮可能	• サイトによっては地質構造や水理・収着特性などに関するデータが蓄積されており，実データを反映したモデル構築と解析を行うことで，モデル構築の方法や解析結果の妥当性検証に利用可能
短所	• 考慮する地質構造や水理・収着特性の妥当性（実存する断層への適用可能性）を示すことが必要	• 構築されるのは検討対象とする断層のモデルであり，断層が有する一般的なバリア機能は評価できない

図 5　仮想モデルと実在モデルそれぞれの長所と短所

4.1.1　仮想モデルを用いた地下水流動解析

仮想モデルを用いた解析については，これまで断層やキャップロック（コンパートメント構造の上部を水平に覆う難透水層で，粘土層などを想定）など地質要素の有無や断層内部における断層ガウジの有無，ダメージゾーンの厚さの影響，断層ガウジおよびダメージゾーンに分布する粘土鉱物による収着の影響などを考慮した解析を行ってきた。本年度の仮想モデルを用いた解析では，断層交差部の水理特性の影響やコンパートメント構造に対するキャップロックの分布範囲の影響を考慮することを目的とした解析を行った。

解析に用いた水理地質モデルの概念図を図 6 に示す。本モデルでは，深部の健岩部内に並行する断層からなる鉛直傾斜の断層系 2 組が直交することで生じたコンパートメント領域を含む水理地質構造を考える。断層は低透水性の断層ガウジの両側に高透水性のダメージゾーンが分布する構造とした。また，浅部には風化帯を設定した。地形は断層付近で標高が変化するものとした。モデル上部から降水が浸透し，標高が低い領域のモデル上部の 1 辺に固定水頭を設定することで，相対的に標高が高い領域（図でモデル右側）から固定水頭グリッドに向けた地下水流動を生じさせた。

解析には代表的な三次元有限差分地下水流動モデルである MODFLOW を使用し，モデル構築や結果の可視化は GMS（アメリカ Aquaveo 製）上で行った。上述のような水理地質構造を有する領域を水平方向 151×151 グリッド，深度方向 20～22 グリッド（標高に応じて変化）に分割した。各グリッドの大きさは水平方向 10×10 m，深度方向 20 m であり，モデルは 1510×1510×440 m の領域に相当する。また，モデルに設定した涵養速度，透水係数，間隙率を表 1 にまとめる。

表 1　仮想モデルに設定した水理パラメータ

項目	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，建設産業調査会，1998）	
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

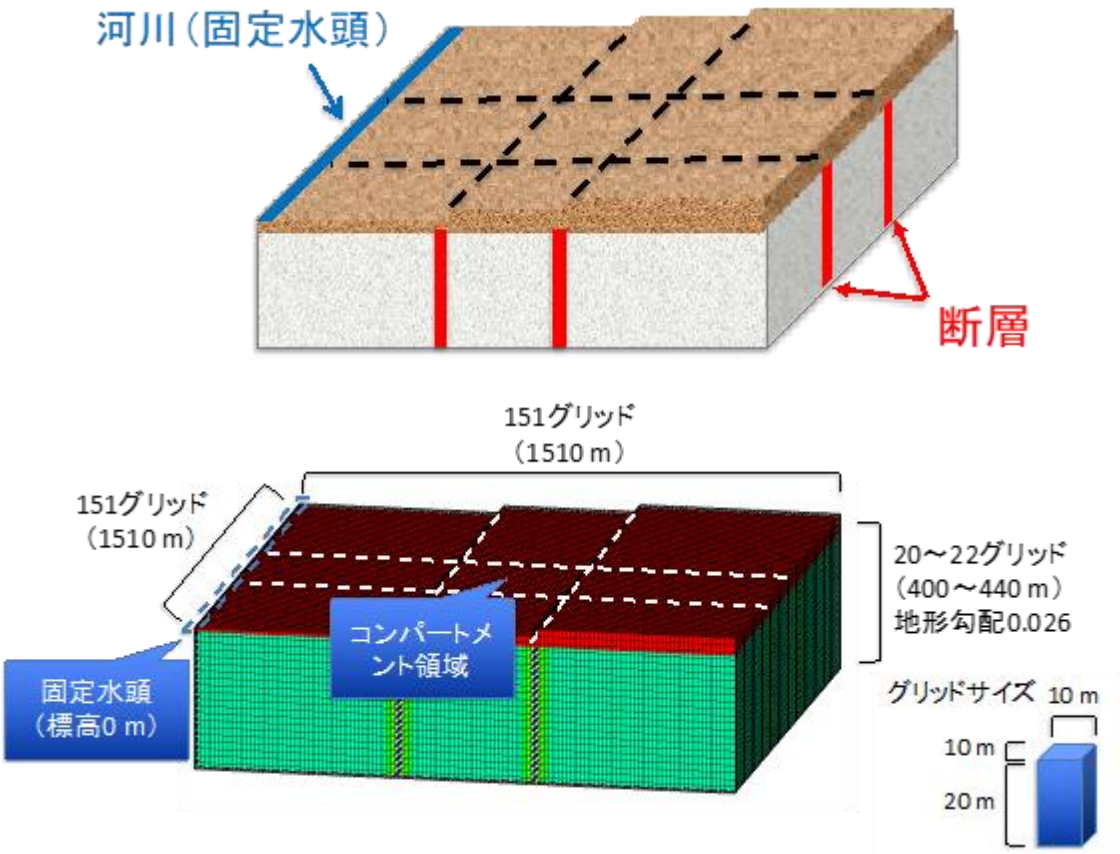


図 6　考慮した仮想的な水理地質構造の概念図（上）と作成した水理地質モデル（下）

本年度の検討において，断層交差部では直交する断層系の断層ガウジが連続して分布し，キャップロックがモデル全域を覆うものを基本モデルと呼ぶこととする。これに加えて，断層交差部の切断関係の影響について検討するため，図 7 に示す仮想モデル（切断モデル）を作成した。断層交差部において，基本モデルでは断層ガウジが連続して分布するのに対し，切断モデルでは交差する断層系の一方がもう一方を切断することにより，一方の断層ガウジが不連続となっている。断層交差部では，断層の形成メカニズムに応じて断層ガウジの連続性が変化すると考えられることから，その連続性の地下水流動や物質移行への影響について検討した。

また，昨年度までの仮想モデルを用いた検討を通して，コンパートメント構造上部にキャップロックが分布する場合，深部への地下水浸透が抑制され，深部における地下水流動が断層およびキャップロックが存在しない場合に比べて抑制される場合があることが示された。これまでのモデルではキャップロックがモデル全域を覆う設定としており，コンパートメント領域の大きさに対して相対的なキャップロックの分布範囲を変化させた場合の影響を明らかにするため，キャップロックの大きさを変化させたモデルを作成し，解析を行った。作成したモデルを図 8 に示す。

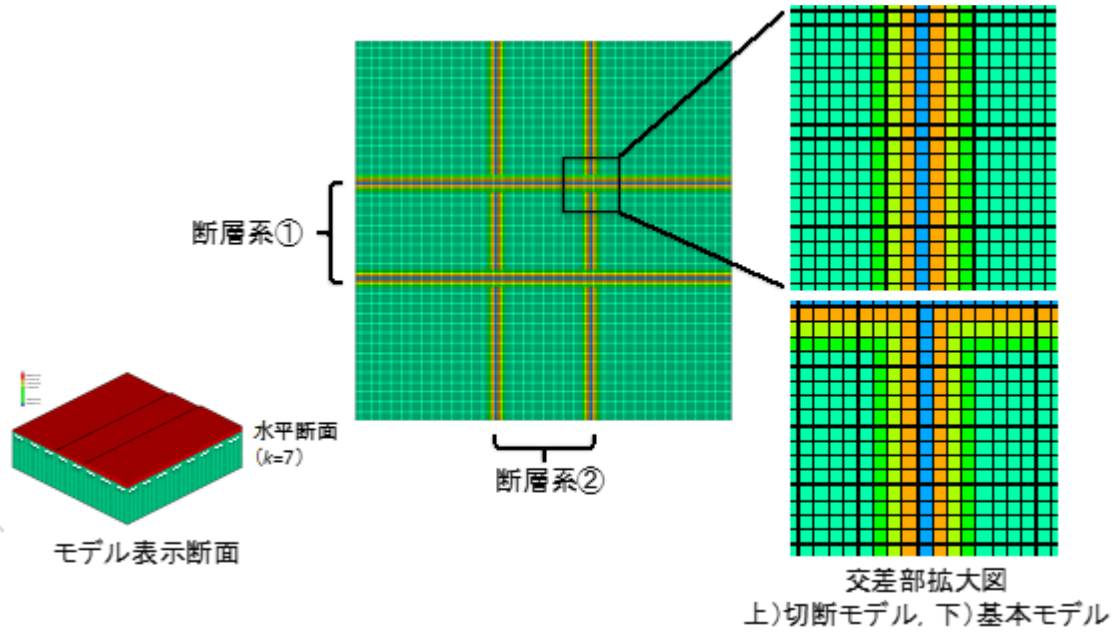


図 7　断層交差部の切断関係を考慮した仮想モデル（切断モデル）

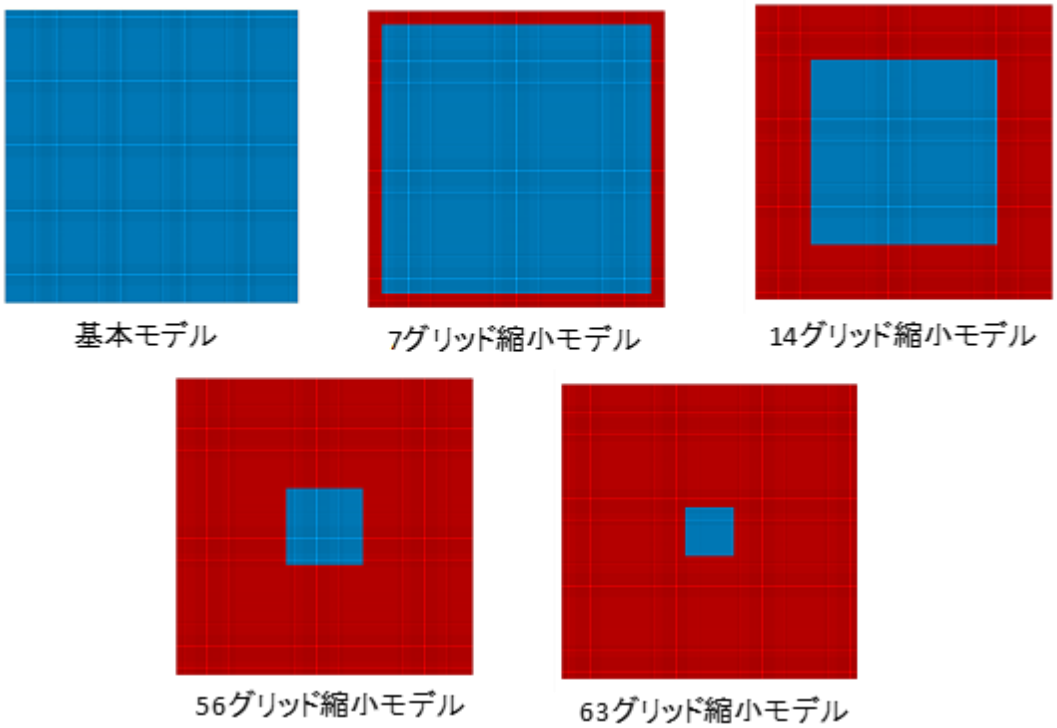


図 8　キャッププロックの分布範囲を変化させた仮想モデル

（キャッププロックモデル）

上述のモデルを用いた解析から算出された地下水流動場に基づいて，MODPATH を用いた粒子追跡解析を行うことで，断層周辺における地下水の流動状態を可視化した。

基本モデルによる粒子追跡と地下水流動解析の結果を図 9 および図 10 に示す。コンパートメント領域内の黒丸が粒子追跡の開始点であり，白の実線が地下水流動による 10 万年間の粒子移動を示している。図から明らかなように，浅部と深部から異動を開始した粒子はいずれもほぼ水平に移動し，10 万年経過後も断層のダメージゾーンに留まっていることがわかる。水平方向の移動は，水頭が断層付近で低く，断層から離れた箇所で高いことによるものと思われる。

次に，断層の切断関係により断層ガウジが不連続に分布するモデルにおける解析結果を図 11 に示す。基本モデルでは，水平断面においてコンパートメント領域の角に配置された粒子は断層に沿う方向に水平移動した後，断層を通過する結果となったが，切断モデルでは粒子がダメージゾーンを通って地下水流動の上流側から下流側へ（水平断面で右から左へ）移動していることがわかる。さらに，キャップロックの分布範囲をやや小さくしたモデルで同様の検討を行った結果を図 12 に示す。キャップロックの分布範囲が小さくなることにより，粒子の移動距離がはるかに促進され，一部の粒子は固定水頭のグリッド（垂直断面で左上角のグリッド）に到達していることが確認できる。

断層の水理特性が地下水流動に及ぼした影響を定量的に検討するため，粒子追跡における各粒子の移動距離を求め，ボックスプロットを作成した（図 13)。図より，粒子移動距離には断層ガウジの連続性よりもキャップロックの分布範囲の影響が大きいことがわかる。キャップロックの分布範囲が限られ，深部への地下水浸透が進む場合には，深部の地下水流動も活発となり，その結果粒子の移動距離に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

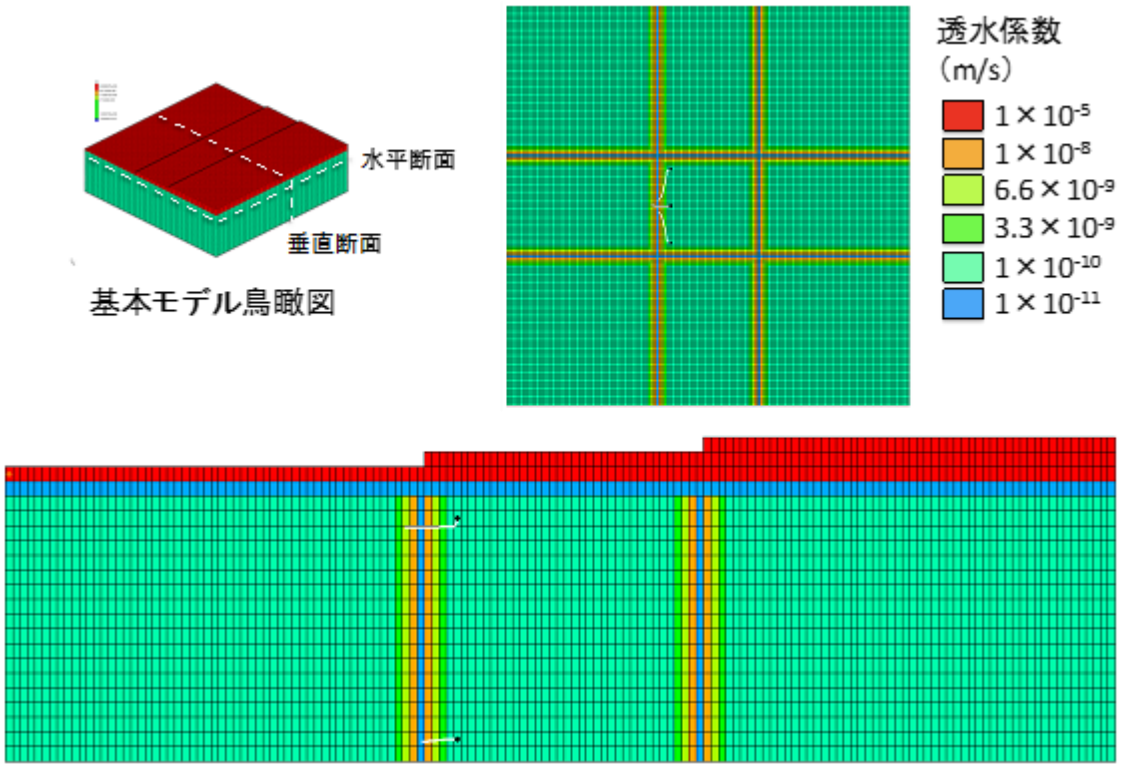


図 9　基本モデルにおける粒子追跡解析結果

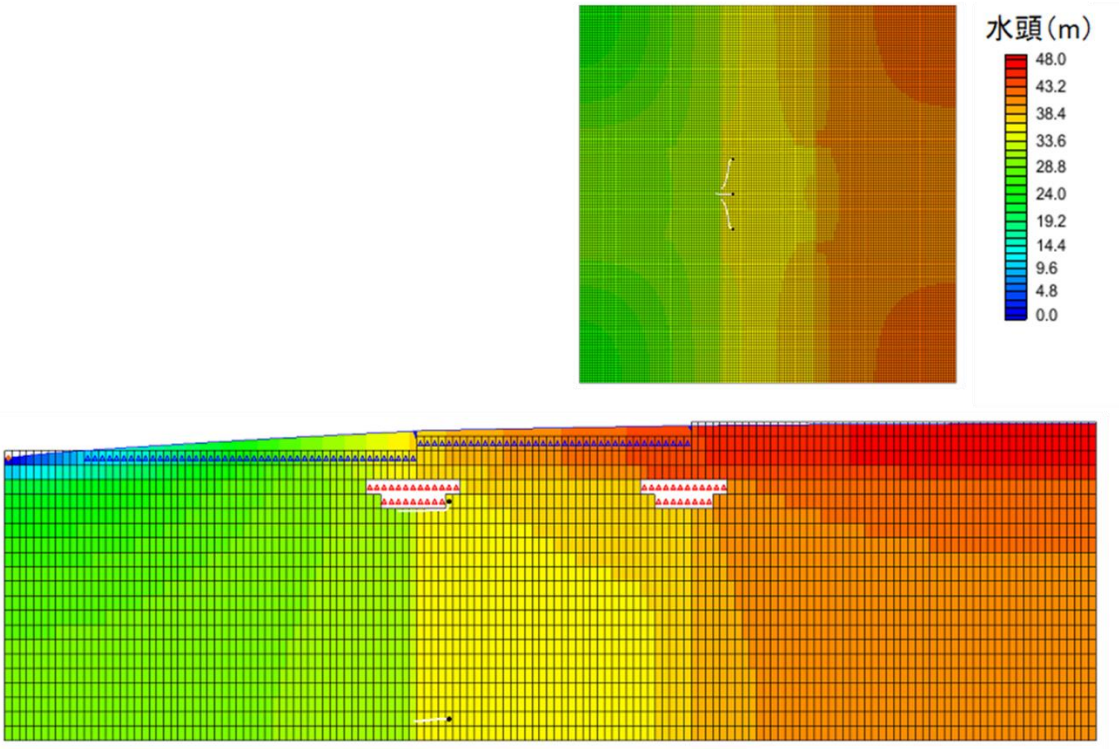


図 10　基本モデルで算出された水頭分布

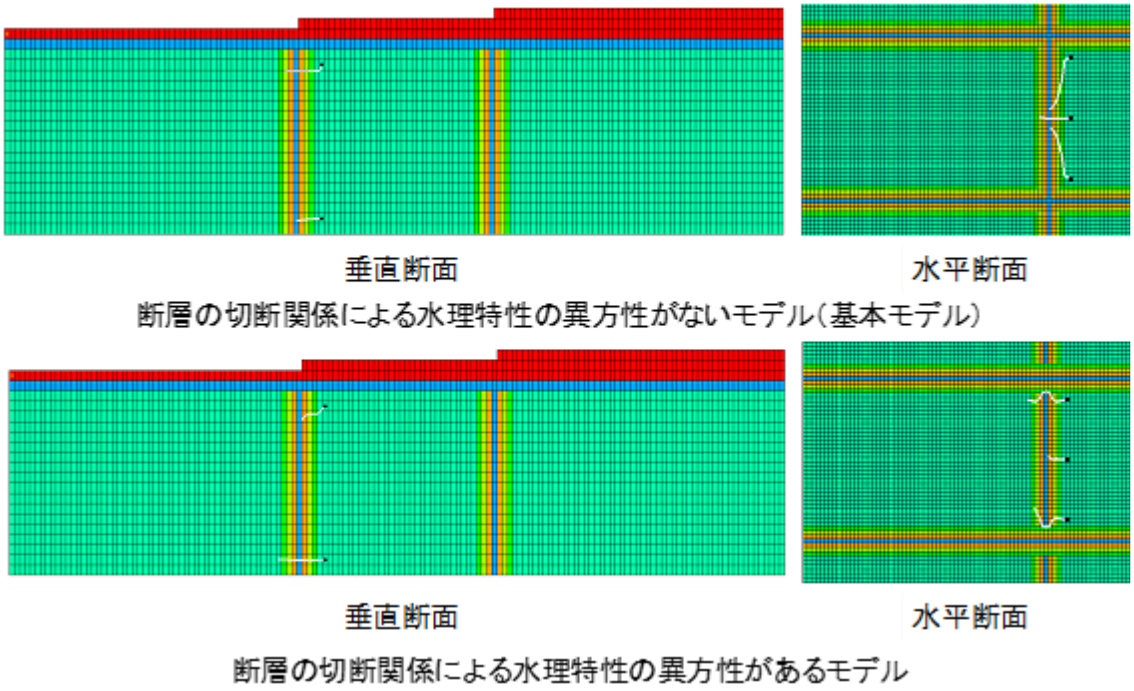


図 11　断層の切断関係を考慮した仮想モデルにおける粒子追跡結果

（キャップロックが全域に分布するモデル）

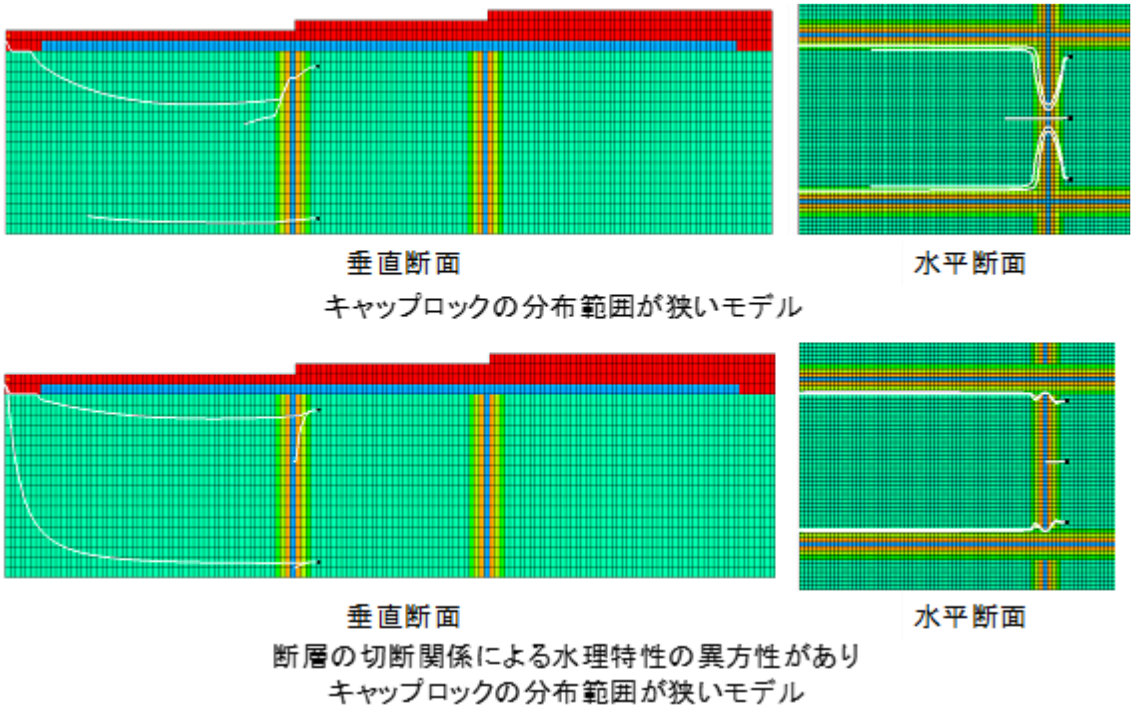


図 12　断層の切断関係を考慮した仮想モデルにおける粒子追跡結果

（キャップロックの分布範囲が狭いモデル）

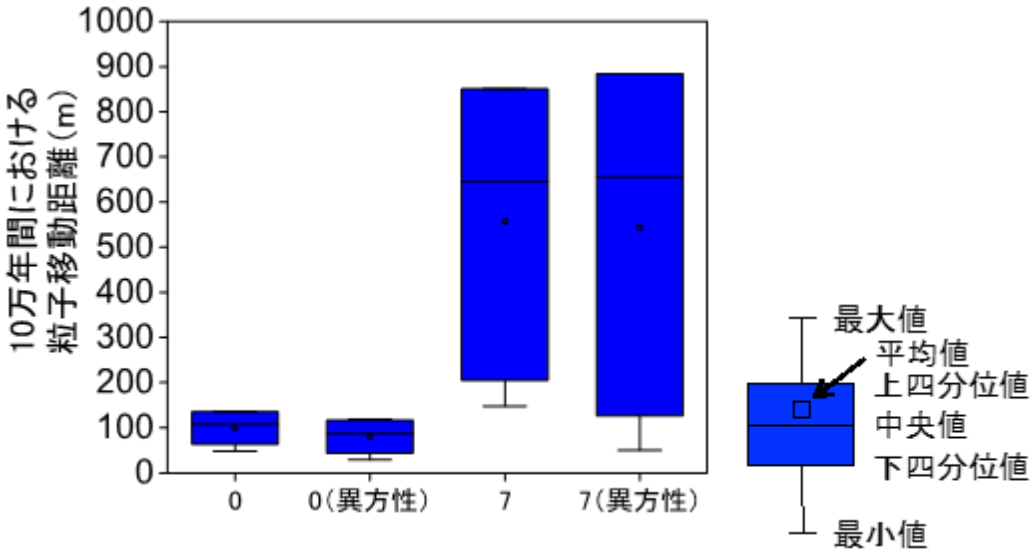


図 13　図 11 および図 12 における粒子移動距離

0 はキャッププロックがモデル全域を覆うモデル，7 はキャッププロックの分布範囲をモデル境界から 7 グリッド縮小したモデルを表す。また，「異方性」は断層の切断によりガウジが不連続なモデルを表す。

キャッププロックの分布範囲を変化させたモデルを用いた粒子追跡解析の結果を図 14 に示す。また，各モデルにおける粒子移動距離のボックスプロットを図 15 に示す。上に示した基本モデル（キャッププロックがモデル全域を覆う）の解析結果に比べ，キャッププロックをモデル境界から 7 グリッド，28 グリッド，63 グリッド小さくした場合には粒子の移動距離が大きくなり，一部粒子は固定水頭グリッドに到達していることがわかる。しかし，キャッププロックの分布範囲がコンパートメント領域の大きさと同程度の場合，著しく粒子の移動が抑制され，基本モデルと同程度となることが明らかとなった。キャッププロックの分布域がモデル領域よりもわずかに小さいモデルとキャッププロックの分布域がコンパートメント領域と同程度のモデルで水頭の計算結果を比較すると（図 16），キャッププロックの分布域がモデル領域と同程度のモデルで相対的に水頭が低いことがわかる。本モデルでは，コンパートメント領域は連続した低透水性の断層ガウジ，キャッププロックに囲まれていることで水理的に孤立していることに加え，浸透する地下水が断層により効果的に流出することで全体的な水頭が低下した結果，キャッププロックから外部への粒子の移動が生じにくいものと考えられた。

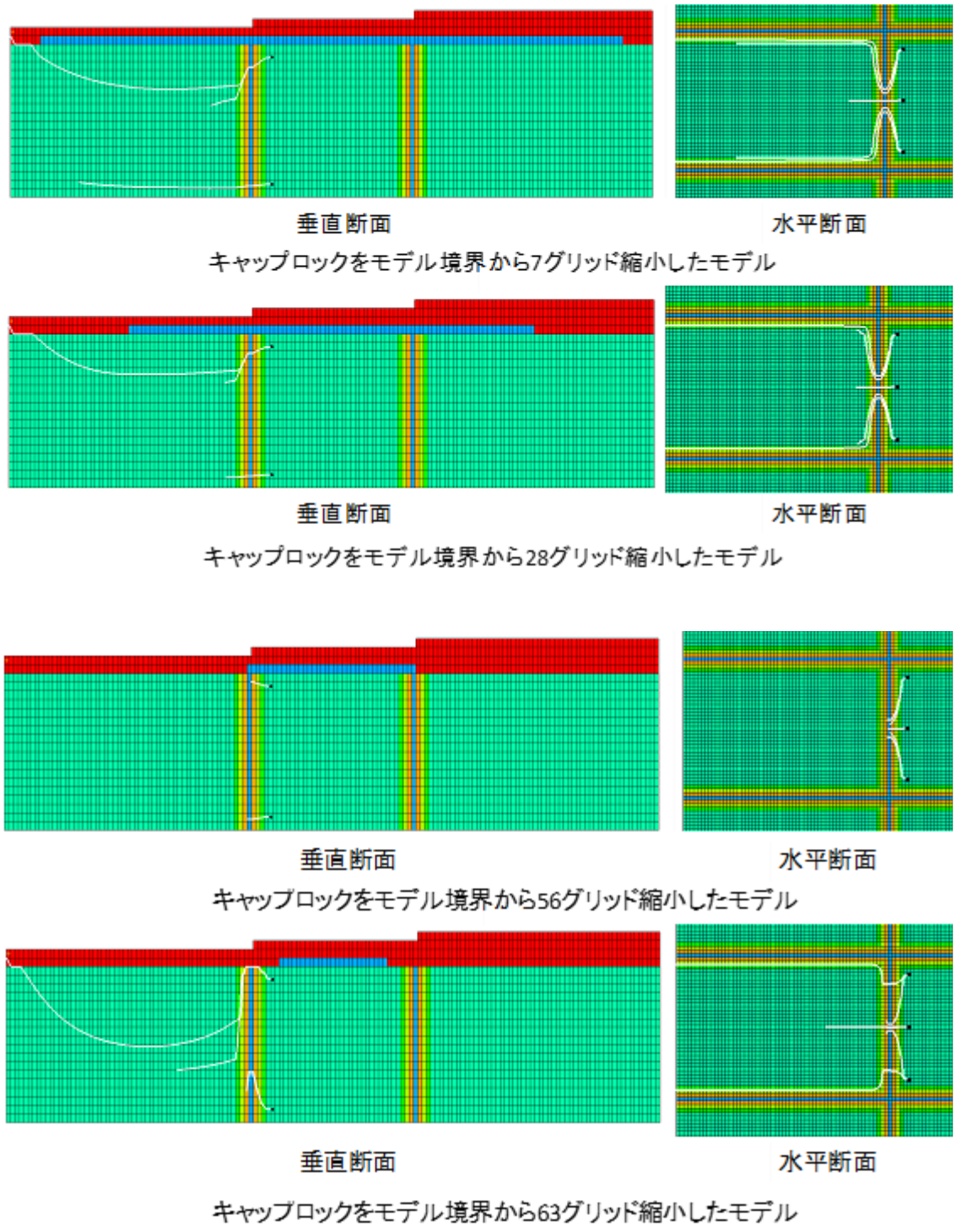


図 14　キャップロックの分布域を変化させたモデルを用いた粒子追跡解析結果

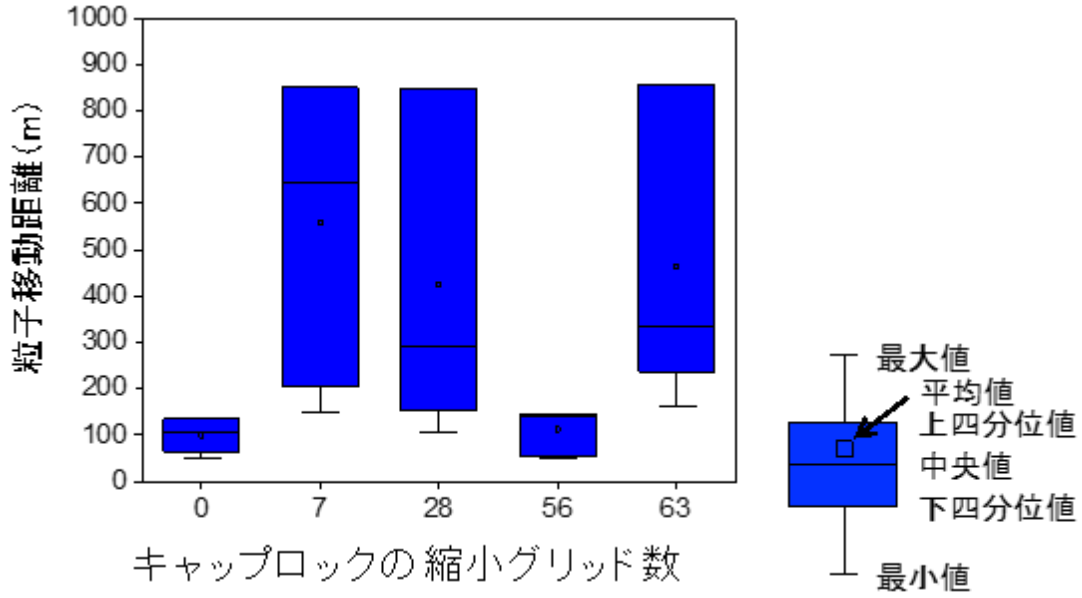


図 15　キャップロックの分布範囲を変化させたモデルにおける粒子の移動距離

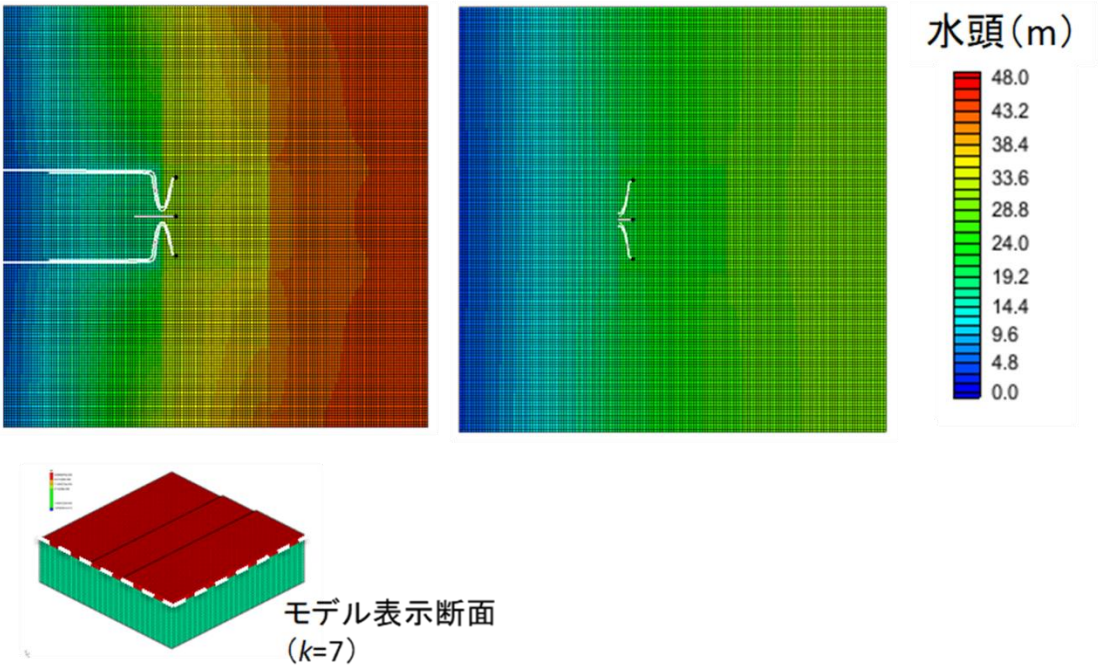


図 16　キャップロックの分布域を変化させたモデルで算出された水頭分布

4.1.2　実在モデルを用いた地下水流動解析および物質移行解析

実在する断層として，岐阜県東濃地域に存在する主立坑断層を対象とした解析を実施した。本断層については，岡嶋（2019）により水理地質モデルの構築が行われており，本モデルでは主立坑断層近傍に分布するボーリング孔での地下水質変化の傾向などを再現できることが示されている。本年度は，粘土鉱物による収着の影響を検討するために実施した仮想モデルを参考に，モデルの主立坑断層に対応するグリッドに粘土鉱物を設定し，トレーサー試験などで収着性トレーサーとして用いられる元素の移行を推定する解析を行った。

検討に用いる水理地質モデルを図 17 に示す。図では複数の色の異なる領域が認められるが，色は堆積岩層や花崗岩体，断層などの地質要素を表しており，それぞれに透水係数や間隙率が割り当てられている。今回は断層に粘土鉱物としてイライトを設定し，昨年度仮想モデルを用いて実施したのと同様に，表面錯体反応を考慮した反応輸送解析を実施した（図 18）。

解析には MODFLOW を使用し，モデル構築と結果の可視化などには GMS を用いた。さらに，MODFLOW で算出された地下水流動状態に基づき，MODPATH を用いて粒子解析を行った。反応輸送解析には PHT3D を使用した。

主立坑断層の水理地質モデルを用いた地下水流動解析で算出された水頭分布を図 19 に示す。図には 10 万年間の粒子追跡の結果も示しているが，水平方向には主立坑断層にほぼ平行な方向に北東から南西に向けて，鉛直方向には一度深部に向けて移動した後，浅部に向けて上昇する結果となった。

次に，上述の地下水流動解析結果に基づいて，断層に分布する粘土鉱物による収着を考慮して実施した反応輸送解析の結果を図 20 に示す。粒子追跡解析結果では粒子追跡の開始点から下方向に移動する結果となったが，これに対応して収着性トレーサーの濃度分布も注入点から下方向に伸びる結果となった。粘土鉱物を設定した断層に対応するグリッドには到達しておらず，今回の解析結果には収着の影響は限定されているものと推測される。

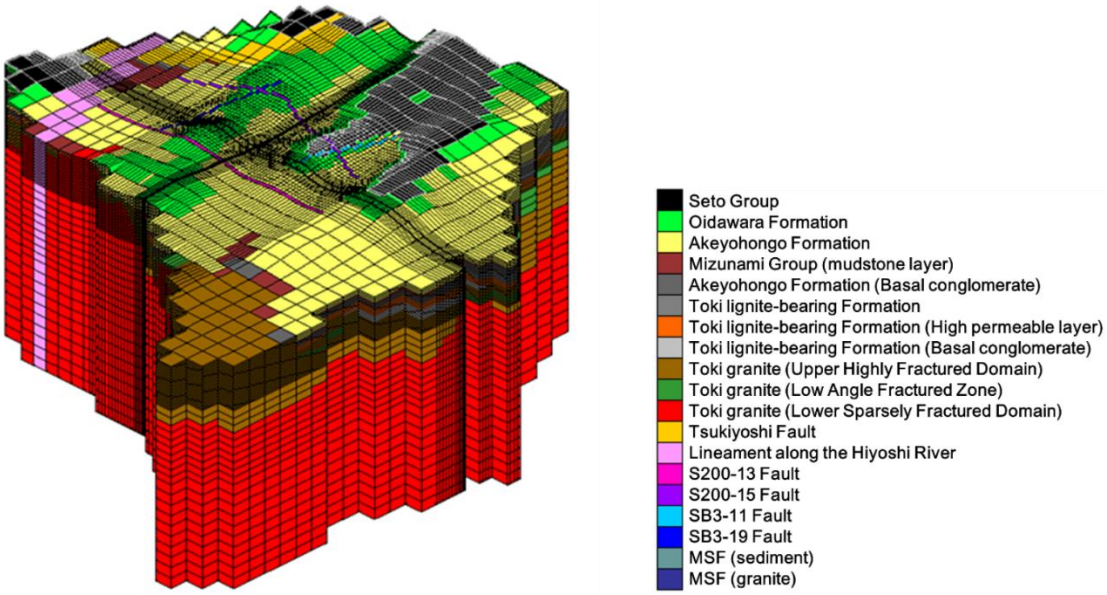


図 17　主立坑断層モデル（岡嶋，2019）鳥瞰図

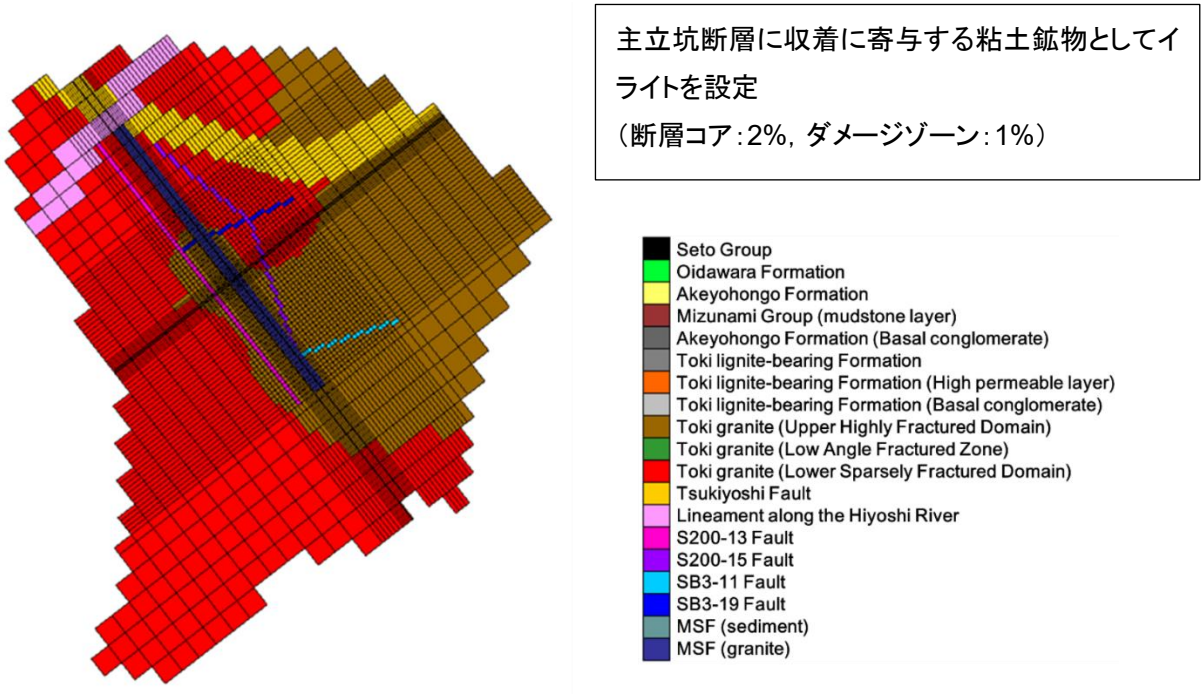


図 18　断層における粘土鉱物の設定（モデル水平断面）

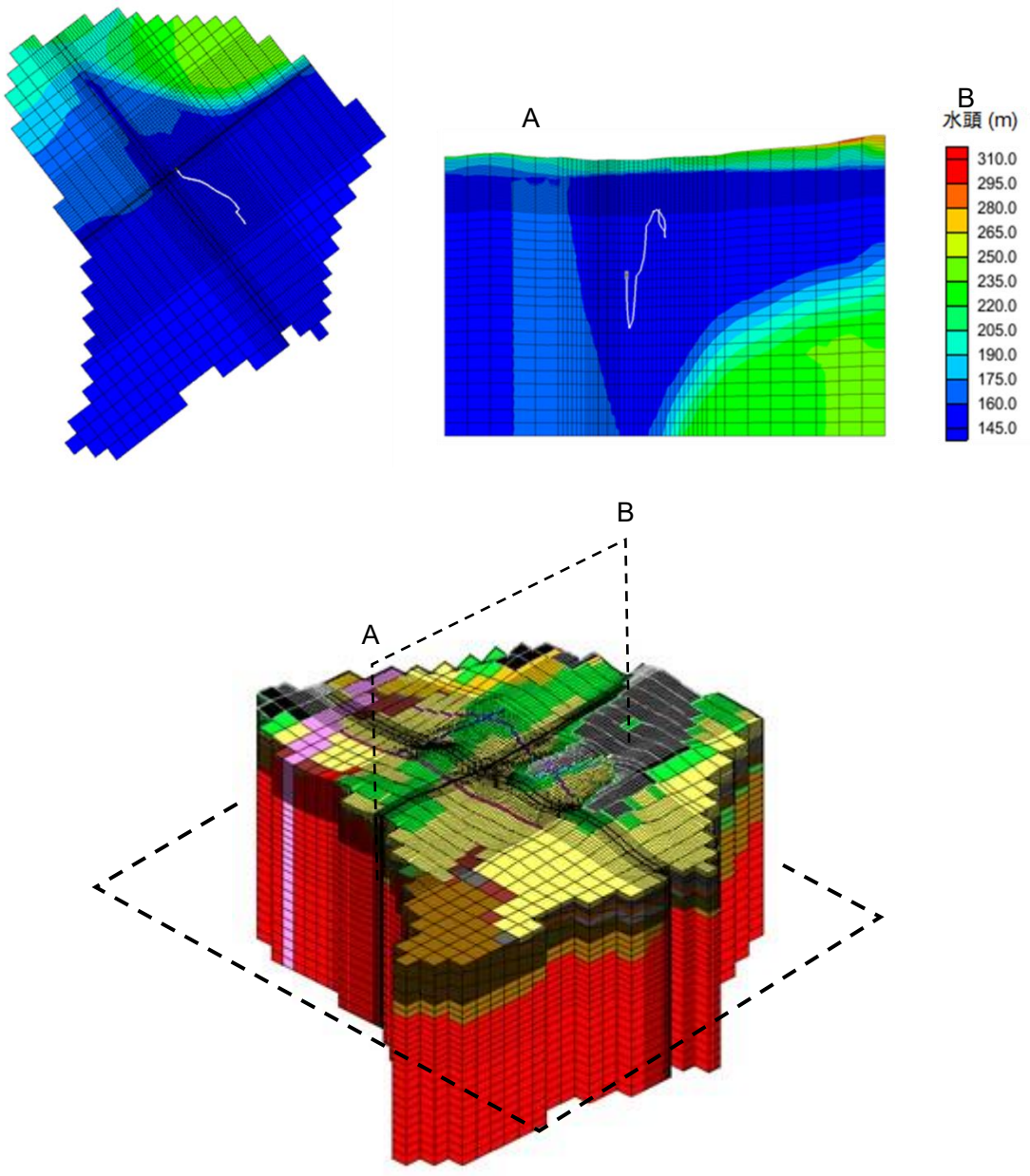


図 19　地下水流動解析で算出された水頭分布および粒子追跡解析結果における 10 万年間の粒子移動

上左）水平断面，上右）垂直断面，下）水平断面および垂直断面の位置

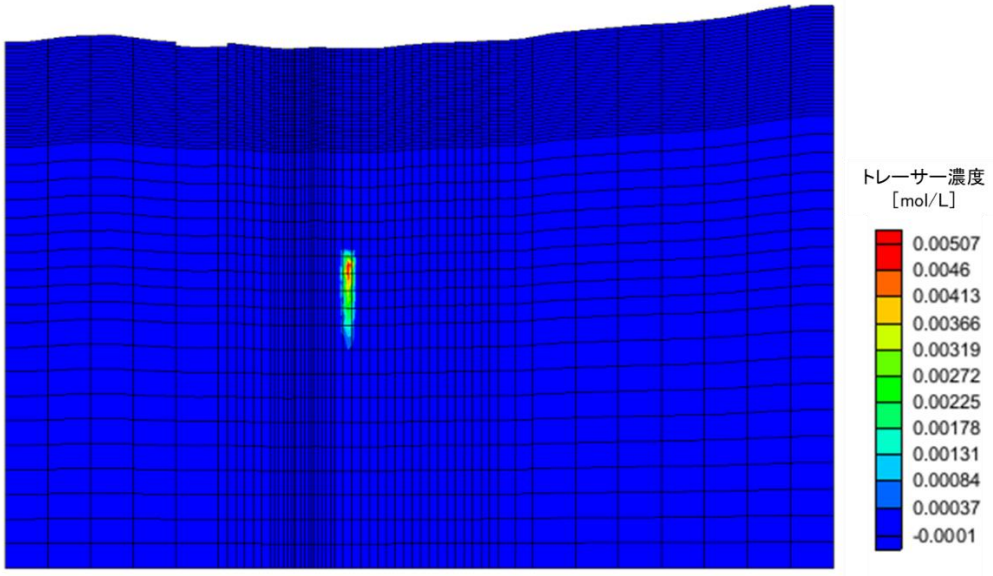


図 20　注入開始から 1000 年経過後の収着性トレーサー濃度分布（図 19 と同じ鉛直断面）

4.2 断層周辺岩石の元素収着特性

2019 年度までに断層近傍ではスメクタイトやイライトを含む粘土粒子が母岩部よりも多く含まれており，粘土粒子や雲母鉱物の含有量が Cs や Eu の収着挙動に影響を与えていることが示唆された。2020 年度はこれまで得られた収着データの拡充と，収着した元素がその後の地下水流動により脱離されることを想定した脱離試験を実施した。また，地下水流動解析によって確認された断層近傍での地下水の移行経路における収脱着現象に着目し，瑞浪超深地層研究所深度 300m の地下水環境を例として岩石への元素の収着から脱離までの移行挙動の評価を行った。

4.2.1 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 09MI21 号孔，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（大丸他，2012）。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）。09MI21 号孔は他の 2 孔よりも主立坑断層から離れた位置に掘削されており，断層の影響を受けていない母岩部の情報を得ることを目的として使用した。各ボーリング孔および主立坑断層の位置について図 **21** 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。

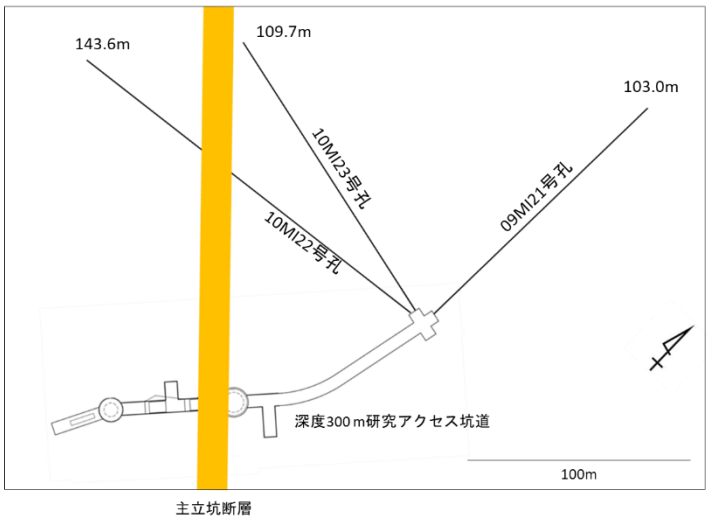


図 21　ボーリング孔位置図

（主立坑断層の厚さは鶴田ほか(2012)の記載による）

4.2.2　試験方法

(1) 鉱物組成分析

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。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。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 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)分析装置を用いて鉱物組成を分析した。粘土鉱物の同定を行うことを目的として無処理での測定に加えてエチレングリコール処理と塩酸処理を行った試料の分析を行った。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。また，全岩の鉱物組成分析は不定方位試料の測定を上記と同条件で 3°～90°の走査範囲で測定を行った。各試料の鉱物組成と粘土分含有量について表 2 に示す。

表 2　10MI22 号孔試料鉱物組成分析結果

不定方位試料分析

採取位置(m)	緑泥石	雲母粘土鉱物	石英	カリ長石	斜長石	炭酸塩鉱物
5-6		○	○	○	○	
10-11		○	○	○	○	
17-18		○	○	○	○	
20-21		○	○	○	○	
21-22		○	○	○	○	
55-56		○	○	○	○	
59-60		○	○	○	○	
69-70		○	○	○	○	
77-78		○	○	○	○	
81-82	○	○	○		○	○
83-84	○	○	○		○	○
85-86		○	○		○	
85.4		○	○	○	○	○
87-88		○	○	○	○	
90-91		○	○	○	○	
92-93		○	○	○	○	○
96-97		○	○	○	○	
101-102		○	○	○	○	
104-105		○	○	○	○	○
106-107		○	○	○	○	
111-112		○	○	○	○	
140-141		○	○	○	○	

定方位試料分析

採取位置(m)	スメクタイト	緑泥石	イライト	石英	カリ長石	斜長石	粘土含有率(%)
5-6	−	−	−	−	−	−	0.11
10-11	−	−	−	−	−	−	0.09
17-18	−	−	−	−	−	−	0.10
20-21	−	−	−	−	−	−	0.48
21-22	○	○	○	○	○	○	0.75
55-56	−	−	−	−	−	−	0.42
59-60	○	○	○	○	○	○	0.28
69-70	○	○	○	○	○	○	0.56
77-78	○	○	○	○	○	○	1.00
81-82	−	−	−	−	−	−	7.75
83-84	○	○	○	○	○	○	7.25
85-86	○	○	○	○	○	○	2.95
85.4	○	○	○	○	○	○	2.62
87-88	○	○	○	○	○	○	1.78
90-91	○	○	○	○	○	○	2.06
92-93	○	○	○	○	○	○	1.93
96-97	−	−	−	−	−	−	1.82
101-102	○	○	○	○	○	○	0.56
104-105	○	○	○	○	○	○	0.97
106-107	−	−	−	−	−	−	0.28
111-112	○	○	○	○	○	○	0.12
140-141	○	○	○	○	○	○	0.15

○：同定された
ー：分析未実施

(2) 収着試験

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。細粒化した試料の表面積を 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 500 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 下記に示す陽イオンおよび陰イオン溶液を添加した。添加量は試験条件によって段階的に変化させた。

添加元素

Cs：塩化セシウム （富士フィルム和光純薬社製）を超純水に溶解
Ba：塩化バリウム （富士フィルム和光純薬社製）を超純水に溶解
Eu：塩化ユウロピウム六水和物（富士フィルム和光純薬社製）を超純水に溶解

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。収着試験は室温 20℃，アルゴンガス雰囲気下で行った。

⑥ ICP 質量分析計(ICP-MS，Agilent 7700x，Agilent Technologies 社製)を用いて Cs, Ba, Eu の濃度を測定した。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, Ba, Eu の添加量と，収着試験後の液相中の濃度から，式(1)を用いて各試料への Cs, Ba, 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式(2)より分配係数(K_d)を算出した。

$$C_s = \frac{(C_0 - C_w)V}{m} \qquad (1)$$

$$K_d = \frac{C_s}{C_w} \qquad (2)$$

C_s は固相中の Cs 濃度，m は固相重量，C_0 は同条件でのブランク試験における液相中濃度，C_w は収着試験後の液相中濃度である。

(3) 脱離試験

岩石中の鉱物に収着したイオンは元素の物理化学的性質によって様々な存在形態で収着している。鉱物表面との親和性が高く，強く収着するイオンは鉱物表面に安定して存在すると考えられるが，弱く収着するイオンは地下水流動や地下環境の変化によって移動する可能性がある。2019 年度は収着試験によって Cs と Eu の収着挙動の違いについて試料の鉱物組成の違いなどから検討を行った。2020 年度はこれまでに推測された収着メカニズムの違いが鉱物からの脱離挙動に与える影響を評価するため，収着試験後の試料からの脱離試験を実施した。手順を以下に示す。

① 収着試験終了後の試料を遠心分離によって固相と液相に分離した。

② 液相を捨て，固相のみとした試料に超純水 50mL を入れ，マグネチックスターラーで試料を拡販しながら塩化ナトリウム，塩酸，水酸化ナトリウムを用いてイオン強度と pH を適宜調整した。

③ 試験開始から 24 時間毎に試料 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。脱離試験は室温 20℃，アルゴンガス雰囲気下で行った。

④ 一部の試料は試料 1 mL の採取後，遠心分離によって固相と液相を分離し，液相を捨てた後④，⑤の作業を繰り返した。脱離試験を複数回実施する場合，遠心分離による固液分離では沈降した固相側に液相が残留し，次回の試験時に残留した液相の影響を受ける。そのため本研究では固液分離後の沈降物の重量を測定し，残留溶液量を計算し，液相中濃度と残留溶液量から前回試験の影響の補正を行った。

⑤ ICP 質量分析計(ICP-MS，Agilent 7700x，Agilent Technologies 社製)を用いて Cs, Ba, Eu の濃度を測定した。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。

⑥ 収着試験によって計算された収着量を 100 とし，脱離試験により脱離した各イオンの脱離率を式(3)により求めた。

$$R = \frac{C_d}{C_0 - C_w} \times 100 \qquad (3)$$

R は脱離率，C_0 は同条件でのブランク試験における液相中濃度，C_w は収着試験後の液相中濃度，C_d は脱離試験後の液相中濃度である。

4.2.3　結果

(1) 収着試験

2019 年度に実施した，10MI22 号孔試料への Cs と Eu の収着試験に追加し，2020 年度は Ba の収着試験を実施した。pH=8.5，イオン強度=0.01，初期液相中の Sr 濃度 20 μg/L の試験条件での各試料の Ba の K_d を図 **22** に示す。Ba は Cs，Eu と比較すると各試料への K_d は低い傾向を示した。また，掘削深度による K_d の変化が見られなかったことから，Ba は花崗岩の変質に関係なく収着すると考えられる。また，いくつかの試料を用いて pH とイオン強度をパラメータとして収着試験を行った結果を図 23～図 25 に示す。Ba は Eu と同様に pH やイオン強度による K_d の変動が大きく，試料の表面積で規格化した場合の K_d は全ての試料で傾向の大きな違いは見られなかった。また，Cs や Eu と比較して低い K_d を示した。Cs は断層部試料においてイライトやスメクタイトに収着され，母岩部と異なる収着挙動を示したと考えられる。Eu は母岩中の黒雲母への K_d が高く，断層部よりも K_d が高い傾向が見られた。Ba はこれらの異なる鉱物種に対して強い収着特性を持っておらず，全体的に弱く収着するため K_d が比較的小さいと考えられる。これらは Ba が岩石表面に収着する時に pH による表面電荷の影響やイオン強度増大による競合イオンの増加の影響を大きく受けるためであると推察される。

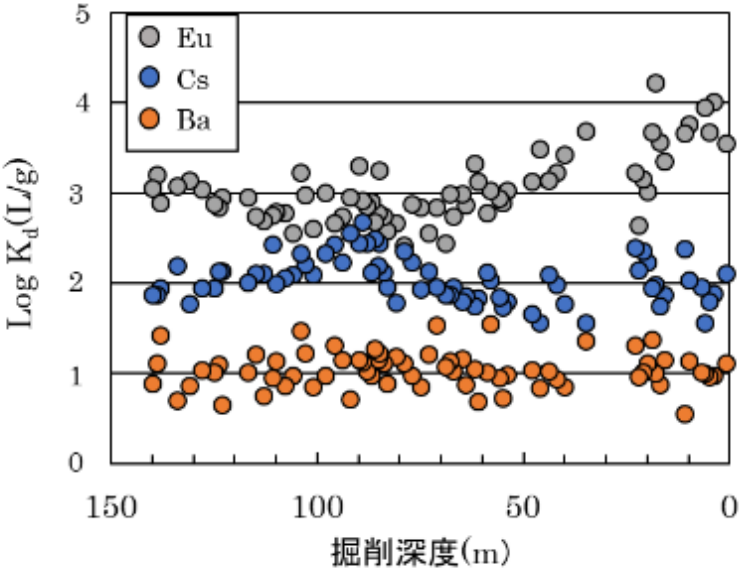


図 22　10MI22 号孔試験収着試験結果

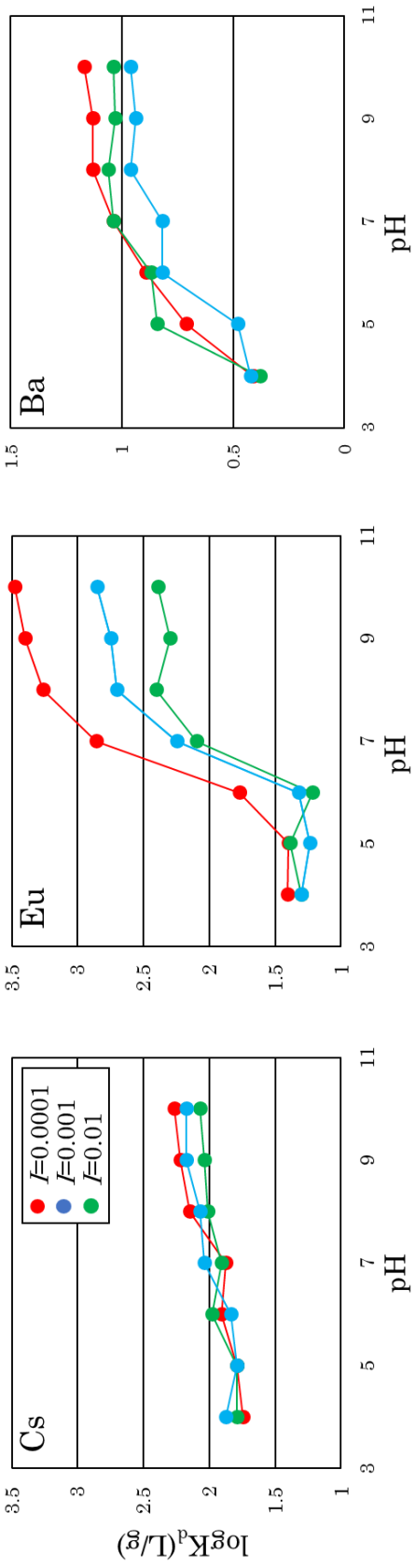


図 23　10MI22 号孔 69m 試料の収着試験結果

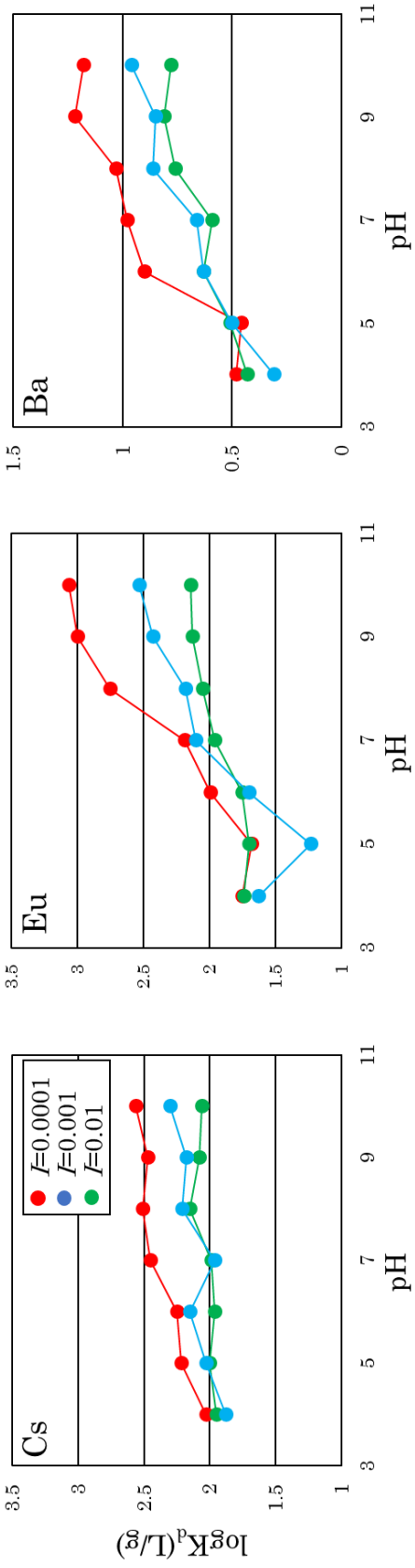


図 24　10MI22 号孔 85m 試料の収着試験結果

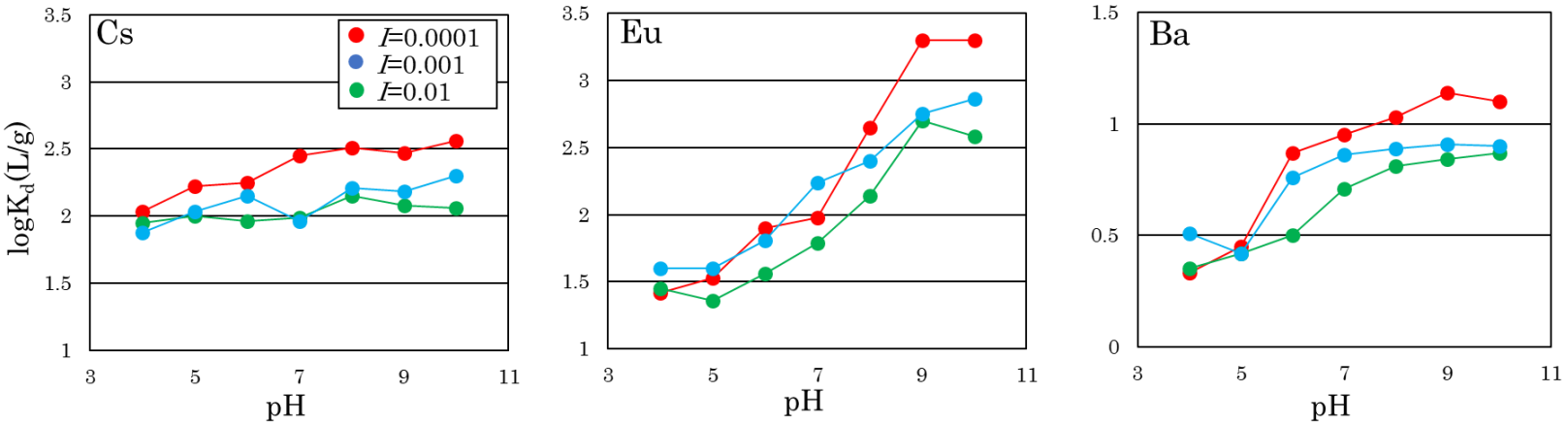


図 25　10MI22 号孔 104m 試料の収着試験結果

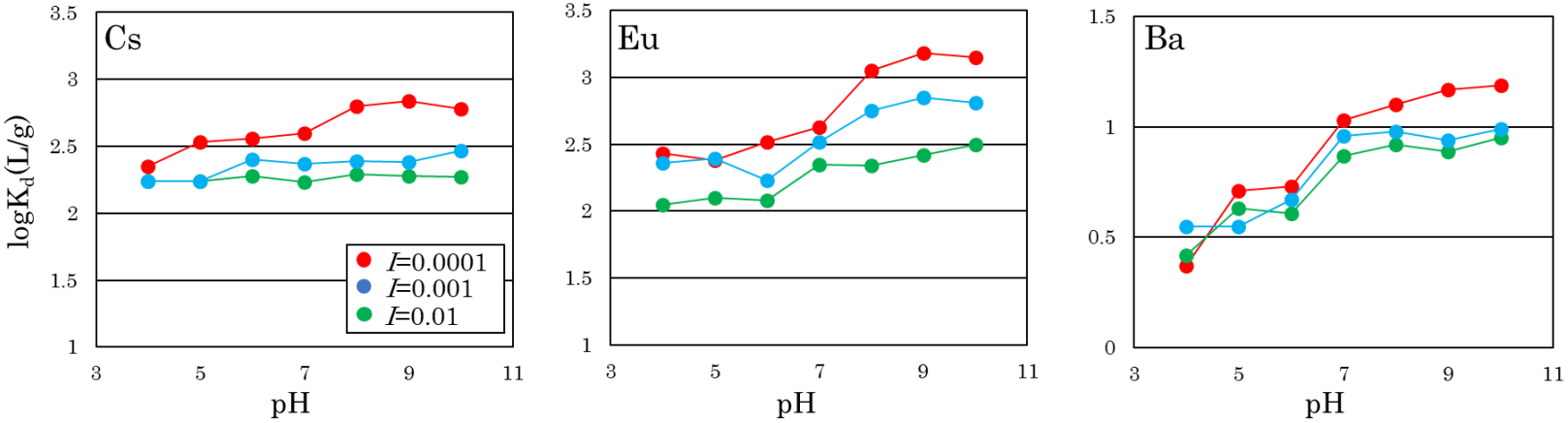


図 26　10MI22 号孔 141m 試料の収着試験結果

(2) 脱離試験

各元素の脱離挙動を確認するため, 脱離試験開始からの時間経過後の脱離率を図 **27** に示す。試料は 10MI22 号孔 69-70m，85-86m，104-105m，140-141m 試料を対象とし，収着試験時，脱離試験時とも液相の組成は pH=8.5，イオン強度=0.01 とした。

Cs，Eu，Ba の 3 元素とも 24 時間経過以降は脱離率が上昇しなかった。これは脱離が起きた後再吸着平衡に達したためであると考えられる。地層処分の安全評価においては，低透水性の母岩部のような非常に地下水の流れが遅い個所ではこのような吸着平衡に達した環境が形成される可能性がある。各元素ともその時の脱離率は 50%前後となっており，収着した元素の 50%が地下水と共に拡散して広がっていく可能性がある。

一方，ダメージゾーンのような地下水流動が卓越する場所では元素の収着が起きた後，目的元素を含まない地下水が流れてきて平衡状態にならず，絶えず元素の洗い出しが起きる可能性がある。そこで本研究では脱離液の交換を複数回実行することで地下水の洗い出しにより各元素がどの程度脱離するのか評価を行った。結果を図 **28** に示す。累積脱離率は各脱離液による脱離量の 1 回目からの累積の R の値である。各試料において Ba は 5 回の脱離駅の交換によって約 90%が固相から脱離した。Eu は概ね 70-80%が脱離した。Cs は脱離が少なくどの試料においても 50%程度の脱離率であった。これらの元素による脱離挙動の違いは鉱物への収着メカニズムと関連していると考えられる。Cs はイライトやスメクタイトなどと親和性が高く強く収着するため，NaCl でイオン強度を調整した脱離液では脱離されにくいと考えられる。一方 Ba は加水分解しやすく, 水和イオンの状態をとりやすいため, 鉱物表面との親和性が低く弱い収着であるため脱離液によって脱離しやすいと推察される。Eu は化学的性質から考えると脱離されやすいと考えられるが，本試験の pH8.5 では Eu は水酸化物を生成している可能性がある。Ba との脱離率の違いは生成した $Eu(OH)_3$ が固相に残っているためである可能性がある。図 **29** は $Eu(OH)_3$ が生成しないと考えられる pH4.0 の条件で収着試験及び脱離試験を実施した結果を示す。pH4.0 の条件では Eu の累積脱離率は 90%以上となった。これらの結果から地下水条件を模擬した pH 条件で実施した脱離試験では $Eu(OH)_3$ の生成の影響を受けた脱離率であると考えられる。

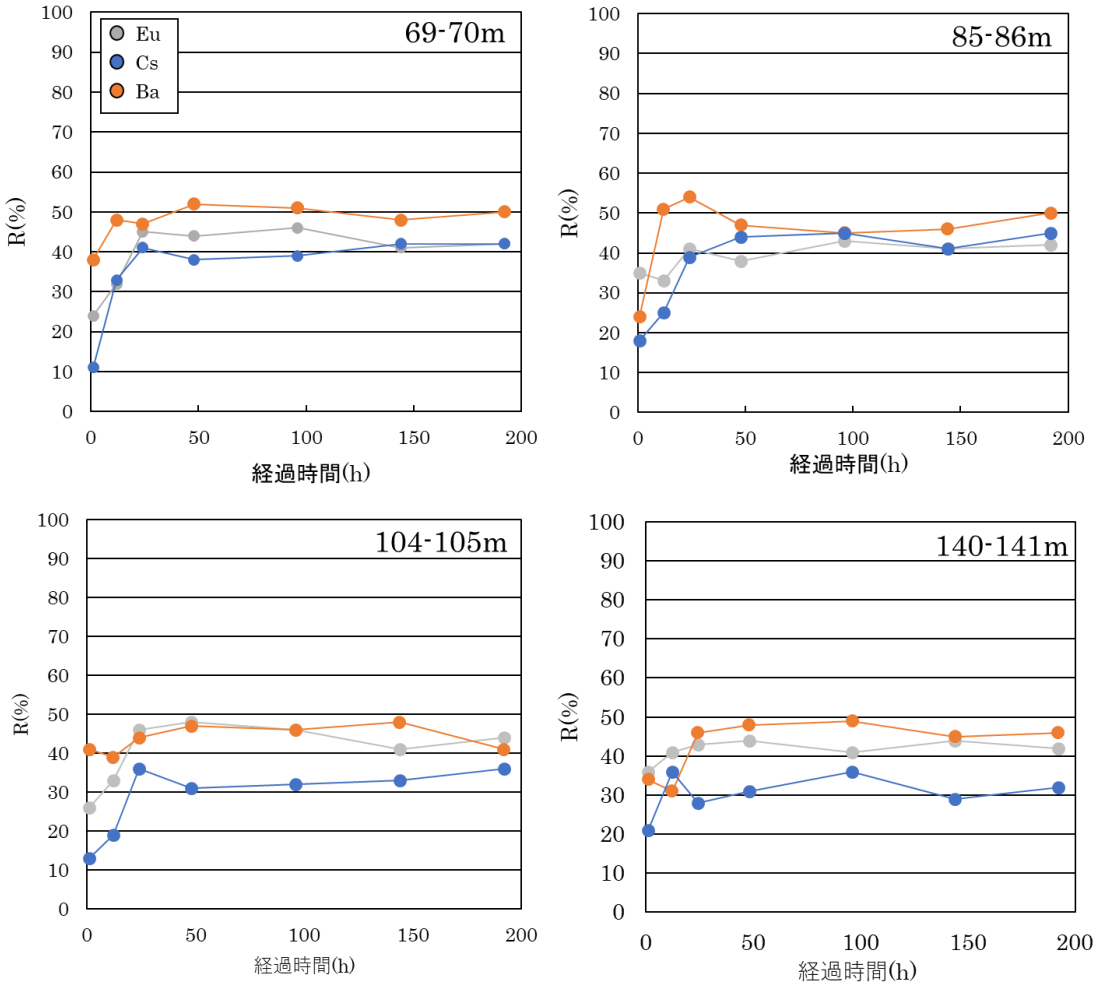


図 27　10MI22 号孔試料の脱離試験結果

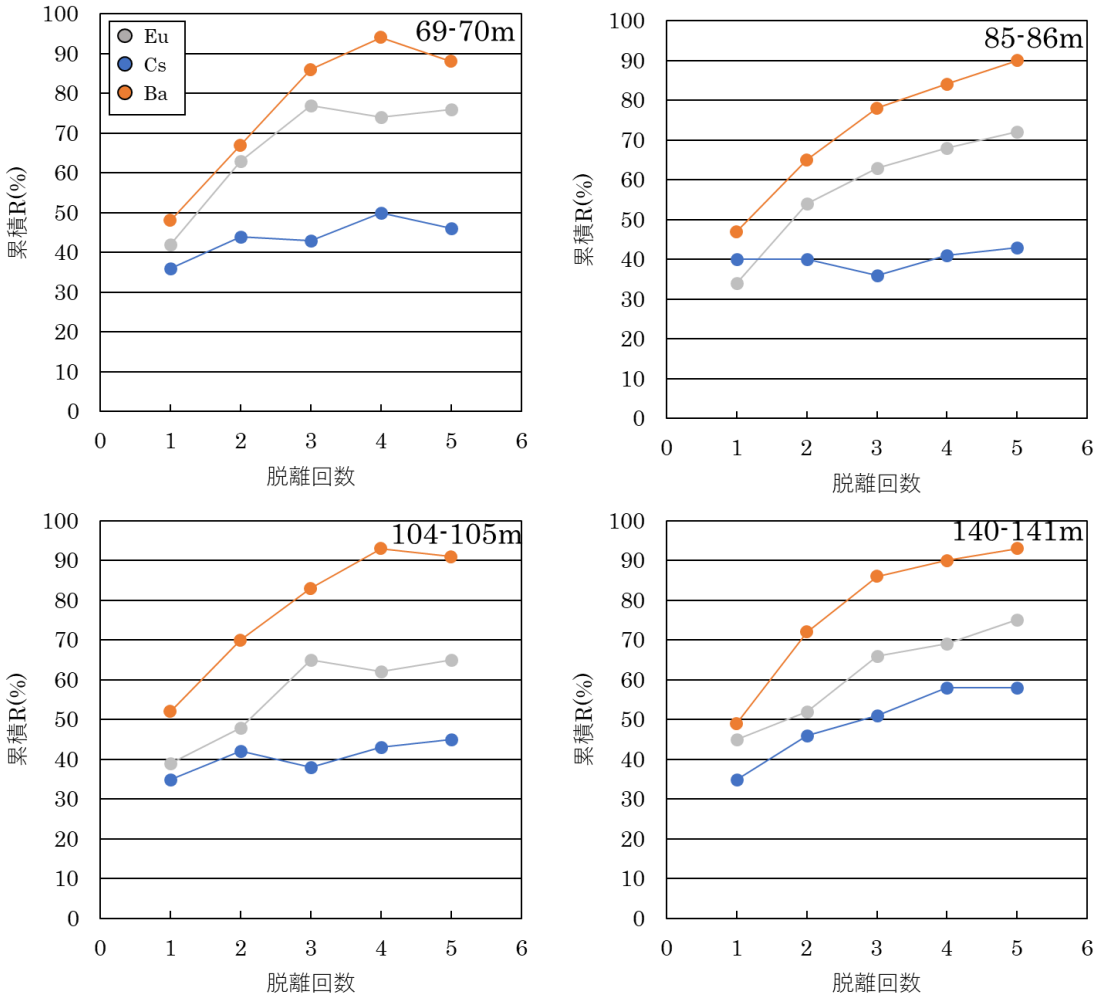


図 28　10MI22 号孔試料の脱離試験結果(累積脱離率)

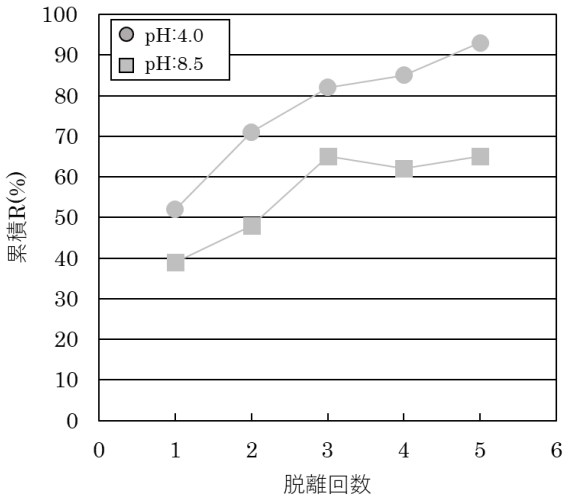


図 29　10MI22 号孔 104m 試料の Eu 脱離試験結果

断層近傍部に生成した変質部と母岩部において，元素の保持能力どのような違いがあるか調べるため，10MI22 号孔の各試料への Cs，Ba，Eu の脱離率を図 **30** に示す。ここで示す脱離率は脱離液の交換を 5 回行った場合の累積脱離率である。試験条件は pH8.5，イオン強度 0.01 である。

各元素の脱離量は，Cs は約 20%～50%，Eu は約 70%～90%，Ba は約 85%～95%の値で推移した。Ba や Eu は岩石の地質と脱離挙動に大きな相関は見られなかったが Cs は断層部において他の箇所よりも保持率が高い傾向がみられた。断層部の鉱物組成は粘土含有率が高く，粘土粒子は主にスメクタイト，イライト，緑泥石を含む。Cs はイライトやスメクタイトの一部と強く吸着し固定される性質を持つため，相対的に粘土粒子を多く含む断層部試料においてより多くの Cs が保持されたと考えられる。Cs の脱離率と各試料の粘土鉱物含有率は弱い負の相関があり粘土鉱物の存在によって Cs のようなアルカリ金属がより強く保持されることが示唆されるが，脱離試験のばらつきの評価や再現性の確認が不十分であり，今後より詳細な脱離挙動と鉱物組成の関係についての検討が必要であると考えられる（図 **31**）。

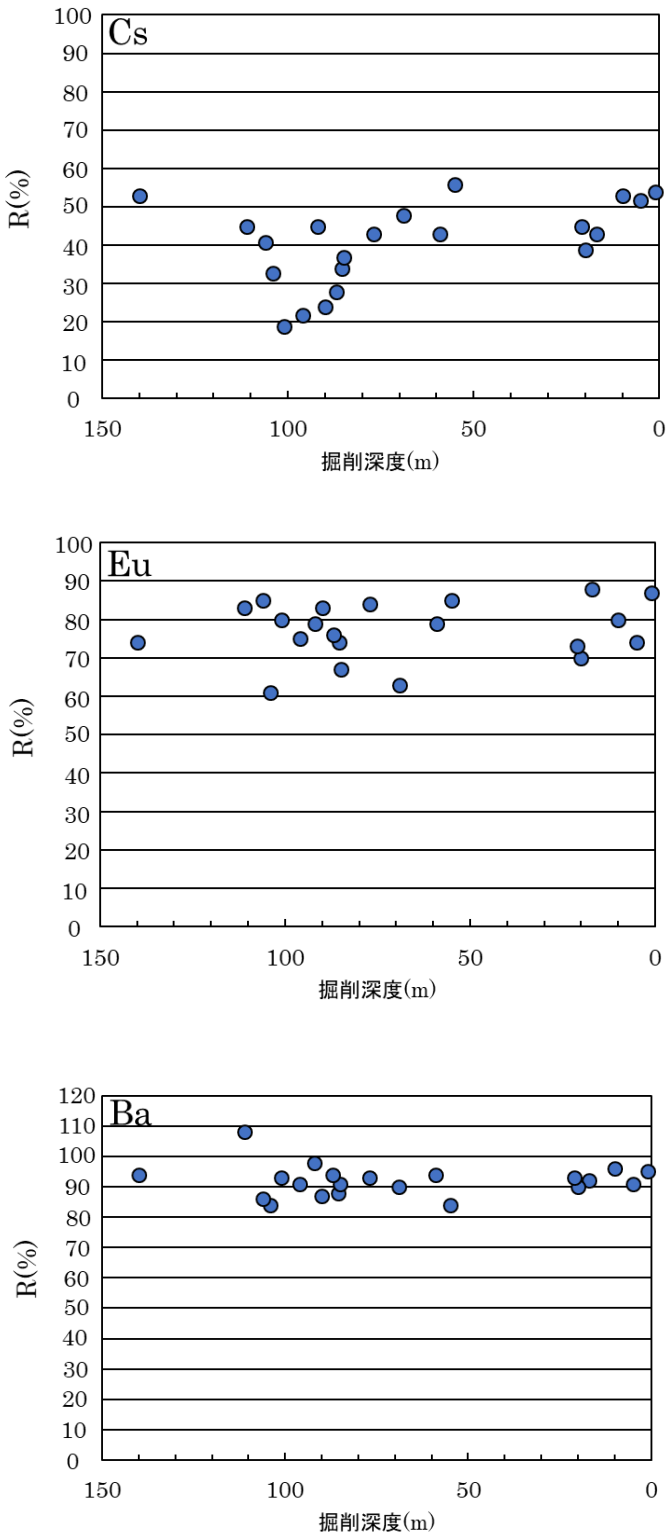


図 30　10MI22 号孔試料を用いた脱離試験結果

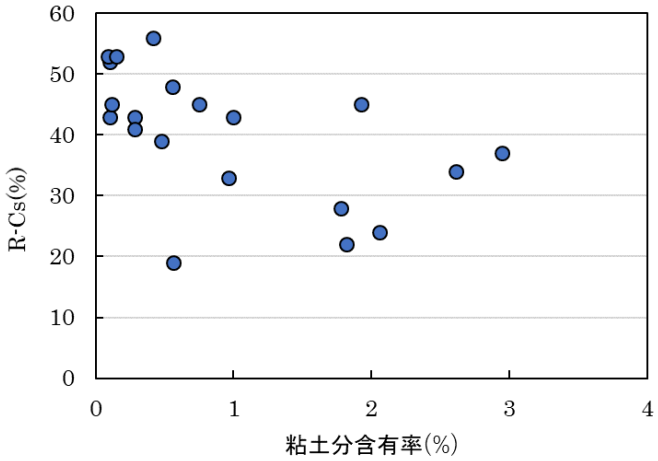


図 31　10MI22 号孔試料の Cs の脱離率と粘土含有率

(3) 岩石の割れ目部における元素収着現象

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。健岩部においても割れ目に地下水が流れることによる水－岩石反応により二次鉱物が生成していくと予想される。地下環境中で起きている元素の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。そこで，収着試験に使用した岩石試料から岩石チップを作成し，Cs，Eu，Ba を含む溶液を浸透させ収着挙動の観察を試みた。岩石チップは 25mm×30mm×10mm 程度とし，チップ作成や吸収試験によってチップの形状が変化しない程度の固結試料を使用した。チップ試料をあらかじめ 100℃で 24 時間乾燥させた後，Cs と Ba を含む，pH8.5，イオン強度 0.01 に調整した試験溶液に浸漬させ，デシケータ内で真空ポンプを用いて減圧し試験溶液を岩石チップに吸収させた。本試験では試験日程の制約上，吸収時間を 180 時間とし，水飽和法による間隙率の評価は行わなかった。試験後の液相を採取し，液相中濃度の変化からチップへの収着量を求めた。10MI22 号孔 69m～70m 試料用いた試験の結果，Ba は液相の濃度変化が小さく試料への収着の有無を評価できなかった。一方 Cs は液相濃度の 25%ほどの変化が観察され，一部が試料に収着されたと考えられる。粉末試料を用いた試験では，Ba と Cs の分配係数に大きな違いはなく，本試験では収着に寄与した鉱物の量比が異なると推測される。69m～70m 試料は粘土分含有率が 0.56%と断層部と比べると試料全体に含まれる粘土鉱物は少ないため，粉末化し均一の状態で実施した収着試験では粘土鉱物の影響が小さいと考えられる。一方岩石チップでは，試験液が浸透した空隙に粘土鉱物が多く存在し，収着への寄与が大きくな

ると予想される。断層近傍の地質構造では粘土含有率が高い断層コア部は低透水性であり地下水が流れないため，地下水からの元素の収着は起きにくい。一方，ダメージゾーンは地下水流動解析の結果，地下水の移行経路となりうる。ダメージゾーンの岩石はバルクの粘土含有率は小さいが，地下水の移行経路となる割れ目等の空隙に粘土鉱物が集中しているため断層コア部と同等の元素収着特性を持つ可能性がある。本研究ではダメージゾーンの岩石の空隙に存在する粘土鉱物の同定や，収着した元素の定量，定性分析は実施できなかった。しかし，吸収試験によってチップ上の岩石試料に対して元素を収着させることが可能であり，これらの試料に対して 3 次元的に元素の存在状態や鉱物組成を分析することで，より詳細なダメージゾーンでの元素の移行挙動を調べることができると考えられる。

5. まとめ

断層の水理特性と収着特性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，仮想的な水理地質モデルと実在する断層の水理地質モデルを用いた地下水流動解析と反応輸送解析を実施した。

本年度の仮想モデルを用いた解析では，断層交差部の水理特性と，コンパートメント領域に対するキャップロックの広がりが地下水流動に及ぼす影響について検討し，コンパートメント領域内部から外部に向かう地下水流動にキャップロックの広がりが大きな影響を及ぼすことが明らかになった。

実在する断層の水理地質モデルを用いた解析では，地下水流動解析および粒子追跡解析を行った。さらに，断層に収着に寄与する粘土鉱物を設定し，地下水流動解析で算出された地下水流動状態に基づいて収着性トレーサーの長期的な移行推定を行った。粒子追跡解析から，地下水は断層にほぼ並行な方向に流動することが示され，地下水流動を断層が規制しているものと考えられたが，流動経路が粘土鉱物を設定したグリッドを通過しなかったことから，反応輸送解析で収着の影響は生じないものと推定される。収着試験および脱離試験を通して得られた主立坑断層を構成する鉱物の収着特性をモデルに反映することで，断層を構成する鉱物による物質移行遅延の効果を明らかにすることが今後の課題である。

主立坑断層から採取した岩石試料を用いた収着試験では 2020 年度は Cs と Eu に加えて Ba を対象とした試験を実施した。また，収着試験後の試料からの脱離試験を実施した。これらの元素は価数とイオン半径が異なり，鉱物への収着挙動が異なると予想された。Ba は Cs や Eu と比較すると分配係数が小さく，地下水と同様の pH，イオン強度条件で容易に脱離することが確認された。Cs は粘土鉱物であるイライトやスメクタイトへの強い親和性のため，固相に強く固定され脱離されにくいことが確認された。Eu は Ba と同様に粘土鉱物への収着は弱いと考えられるが，一般的な地下水条件である pH7～9 付近の水では加水分解により移動しにくいことが示唆された。このような元素による収着特性，脱離特性を個別に理解することが地下環境中での元素の移行特性を評価する上で重要である。

引用文献

岡嶋純也，京都大学修士論文，Clarification of mass transport properties around a fault by reactive transport analysis considering water-rock interaction, 2019.

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.

Bense, V.F., Gleeson, T., Loveless, S.E., Bour, O., Scibek, J. (2013) Fault zone hydrogeology. Earth Science Reviews. 127, 171-192.

Brunaue, S., Emmeit, P. H., and Teller, E. (1938) Adsorption of gases in multimolecular layers. J. Am. Chem. Soc., 60, 309-319.

Caine, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B. (1996) Fault zone architecture and permeability structure. Geology. 24, 1025-1028.

Goddard, J.V., Evans, J.P. (1995) Chemical changes and fluid-rock interaction in faults of crystalline thrust sheets, northwestern Wyoming, U.S.A. J.Struct.Geol. 17, 533-547.

Mitchell, T.M., Faulkner, D.R. (2012) Towards quantifying the matrix permeability of fault damage zones in low porosity rocks. Earth Plan. Sci. Lett. 339-340, 24-31.

Scibek, J., Gleeson, T., McKenzie, J.M. (2016) The biases and trends in fault zone hydrogeology conceptual models: global compilation and categorical data analysis. Geofluids. 16, 782-798.

別添資料２　総括

（各実施研究の３年間の成果概要）

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　胡桃澤　清文

要約

本研究では、ジオポリマーを用いた放射性廃棄物処分のための充填材の開発を行うことを目的とした。その結果、ジオポリマーは用いるメタカオリンの種類、アルカリ刺激剤の種類、養生条件によって圧縮強度、透水性、吸着性能などの物性が異なることを明らかにした。また、ジオポリマーの物性発現の違いを NMR などの測定法による微細構造レベルで明らかにした。これらより、適切な配合条件を設定することによってジオポリマーを充填材として用いることが可能であることが示唆された。

○研究の背景・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溶脱抵抗性が高いことが報告されている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。本研究では、メタカオリン、アルカリ刺激剤、養生条件等が機械的特性、収着性能、溶出特性、及び物質移動特性などのジオポリマーの物性に及ぼす影響について定量的に明らかにすることを目的とする。

○実施内容

ジオポリマーの強度発現、吸着性能、溶脱性能などの物性に及ぼすメタカオリンの種類、アルカリ刺激剤の影響を巨視的に検討する。また、ジオポリマーの物性発現に及ぼす影響を NMR などの分析手法を用いて微視的に検討する。

○得られた成果と考察

- 使用するメタカオリンの種類によって強度発現が異なることを明らかにした。また、アルカリ刺激剤の種類、アルカリ刺激剤の水量によって強度発現が異なることを明らかにした。(図 1)
- 各種要因を含めた圧縮強度予測式を構築し、その予測精度は 30%程度であった。
- ジオポリマーのセシウムイオン吸着能は、非常に高いことを明らかにした。また、吸着能はナトリウム型が高く、カリウム型は低い結果であった。これはセシウムイオンとジオポリマー中のナトリウムイオンが容易に交換することを示している。なお、ヨウ素イオンや塩化物イオンの陰イオン吸着量はほとんどないことを明らかに

した。(図 2)

- ジオポリマーの純水中での溶脱量は、使用したアルカリ刺激剤や水量によって異なり、ナトリウム型とアルカリ刺激剤中の水量が少ないものが高い溶脱抵抗性を示した。(図 3)
- Al の NMR 分析によってメタカオリンの反応性の違いを明らかにした。また、反応後にジオポリマー構造中の Al は 4 配位の構造をとることを明らかにした。(図 4)
- Si の NMR 測定結果より、反応性の低いメタカオリンを使用したジオポリマーはシャープなピークを示すことを明らかにした。(図 5)
- ジオポリマー中のセシウムの拡散係数は 10^{-12}(m/s)程度であることを明らかにし、その値はナトリウム系のアルカリ刺激剤を使用することによって大きく低下することを明らかにした。(図 6)
- ジオポリマーの透水性は拡散性能と同様にナトリウム系のアルカリ刺激剤を使用することによって低下することが明らかとなった。(図 7)

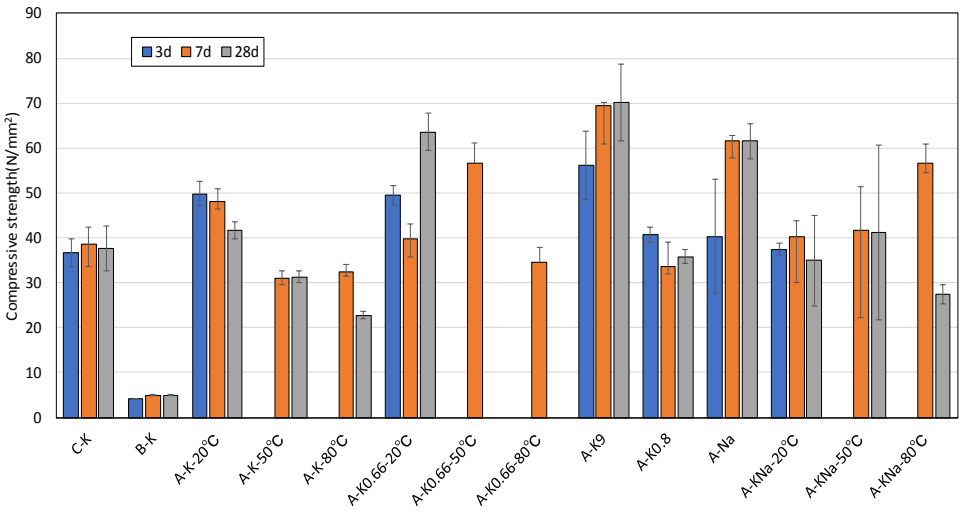


図 1　圧縮強度測定結果

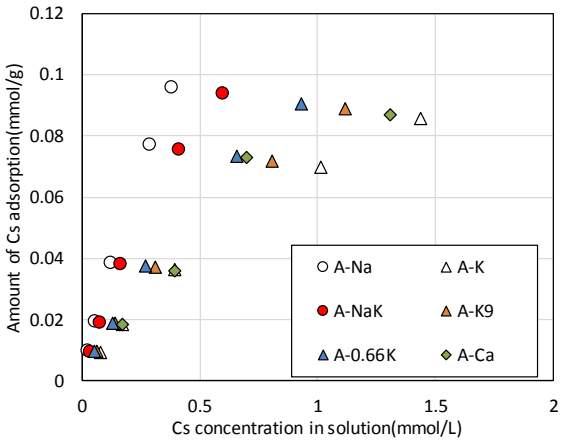


図 2　セシウムの吸着等温線

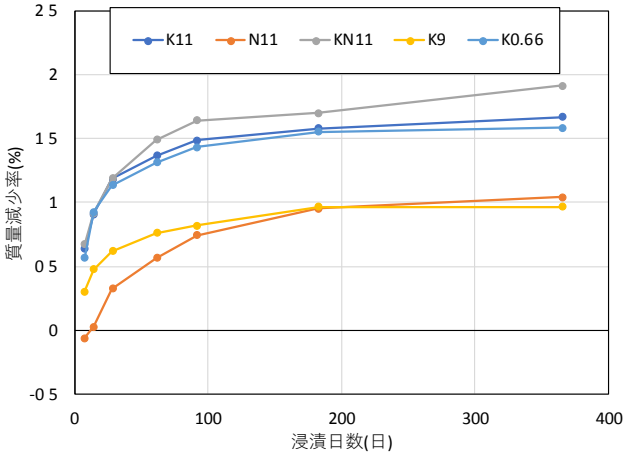


図 3　純水浸漬による質量減少量

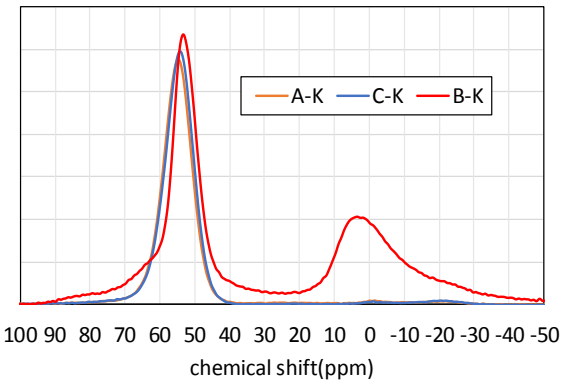


図 4　^{27}Al NMR 測定結果

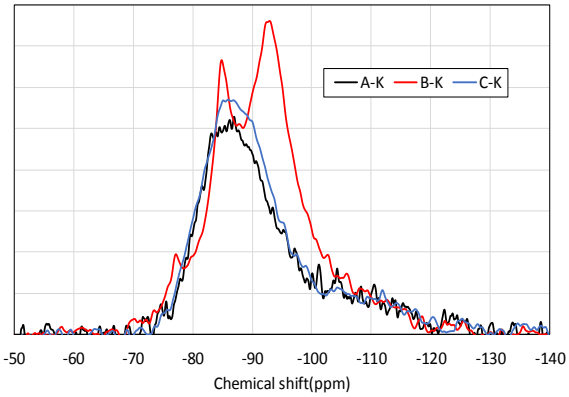


図 5 ^{29}Si NMR 測定結果

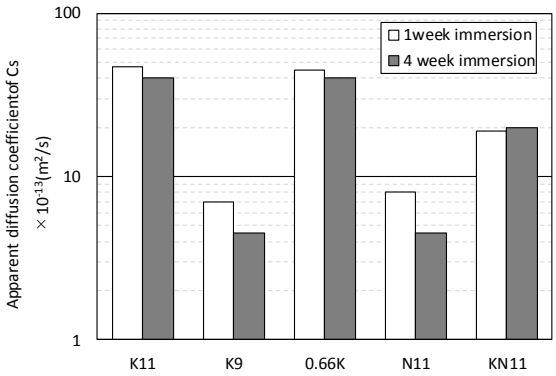


図 6 セシウムの拡散係数測定結果

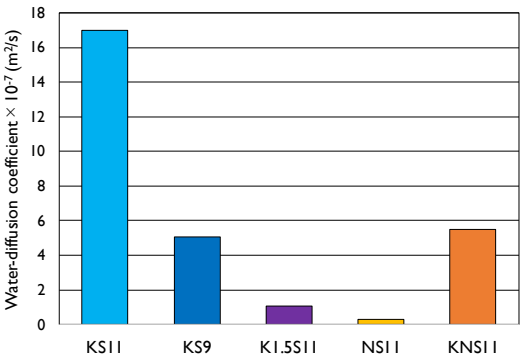


図 7 水の拡散係数測定結果

○今後の展開（地層処分事業への寄与を含む）

ジオポリマーにおける異なる核種の吸着量（他のイオンとの相互作用）や拡散係数を検討する必要がある。また、異なる環境下（海水など）におけるジオポリマーの溶脱特性に関する検討が必要である。さらに、セメント系材料やベントナイトなどとの接触界面における特性変化を検討することが課題である。

○外部発表リスト

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
3. 胡桃澤清文：メタカオリンジオポリマーの吸着・拡散性能に関する基礎的検討、2020 年度日本建築学会大会学術講演会梗概集（DVD）,2020
4. K.Kurumisawa, M.Ojima:Physical properties and microstructure of metakaolin based geopolymer, Proceeding of ConMat'20, 2020.

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

一般財団法人電力中央研究所　田中真悟

要約（数行程度）

ベントナイト緩衝材中に炭酸カルシウム層を形成させる手法を開発し、炭酸カルシウムが拡散係数および透水係数に与える影響を実験的に評価した。炭酸カルシウム析出により重水およびヨウ化物イオンの実効拡散係数が低下した。また炭酸カルシウム析出部における局所的な実効拡散係数は全空隙率（重水）、または粒子間空隙率（ヨウ化物イオン）の低下で説明できた。一方、透水挙動は炭酸カルシウム析出により変化し、空隙率の低下のみでは説明できなかった。透水挙動に影響を及ぼす要因として、炭酸カルシウムによる空隙閉塞に加え、セメンテーションに類似した現象に伴う水みちの形成が挙げられる。

○研究の背景・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安全評価の不確実性や保守性を低減する必要がある。廃棄物に含まれる C-14 や I-129 は陰イオンの化学形が支配的で収着が見込めないため、ベントナイト緩衝材の物理的なバリア機能である低透水性や、陰イオンに対する潜在的な低拡散性が安全評価上重要となる。処分場閉鎖後の長期的な相互作用によりベントナイト中に二次鉱物が析出し、拡散係数や透水係数が変化することが懸念されている。一方で、安全評価でこれらの値の変化やその時期を設定する際の科学的根拠は十分ではない。この理由の１つとして、ベントナイト中の鉱物析出反応は非常にゆっくりと進行するため、現実的な試験期間内で二次鉱物を析出させることが困難であり、二次鉱物の析出量と拡散係数および透水係数との関係を実験的に評価できていなかったことが考えられる。

そこで本研究では、処分環境下において代表的な二次鉱物である炭酸カルシウムの影響に着目し、炭酸カルシウム析出量が異なるベントナイト緩衝材を調製する手法を開発した。さらに、炭酸カルシウムが析出したベントナイトを用いた透過拡散試験から、炭酸カルシウムによる空隙率低下と実効拡散係数との関係を実験的に検証する。同様に透水試験から、炭酸カルシウムによる空隙閉塞やセメンテーションが透水係数に及ぼす影響を評価する。

○実施内容

図１に本研究の全体概要を示す。はじめに、電気化学的手法により炭酸カルシウムが析出したベントナイト緩衝材を調製する（課題１）。さらに、炭酸カルシウムが析出したベントナイトを用いた透過拡散試験および透水試験から、炭酸カルシウムが拡散係数および透水係数に及ぼす影響を評価する（課題２）。

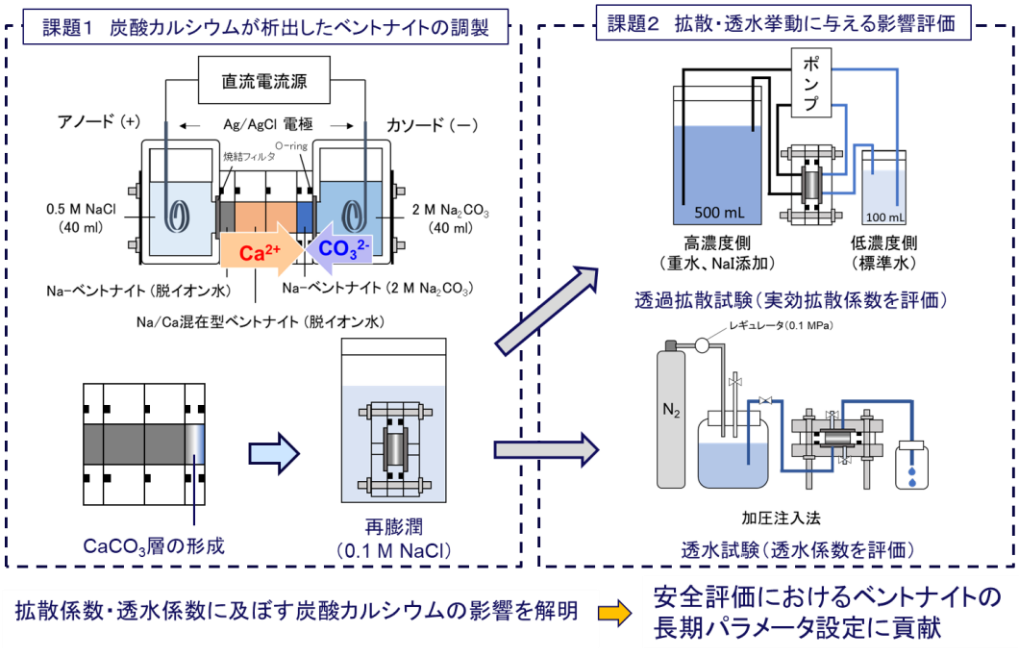


図 1　本研究の全体概要

〇得られた成果と考察

(1) 炭酸カルシウム析出量と範囲が異なるベントナイトの調製方法を確立

解析的な検討から、炭酸ナトリウム水溶液で飽和させた Na 型ベントナイトをカソード側末端に配置した初期条件が、炭酸カルシウム層の形成に適していることが見出された。図 2 の初期条件にて炭酸カルシウム析出実験を行い、炭酸カルシウムが多量に析出したベントナイトを調製することができた。また、Na/Ca 混在型ベントナイトの長さと通電時間を延ばすことにより、炭酸カルシウム析出量と範囲が異なるベントナイトを調製できた。

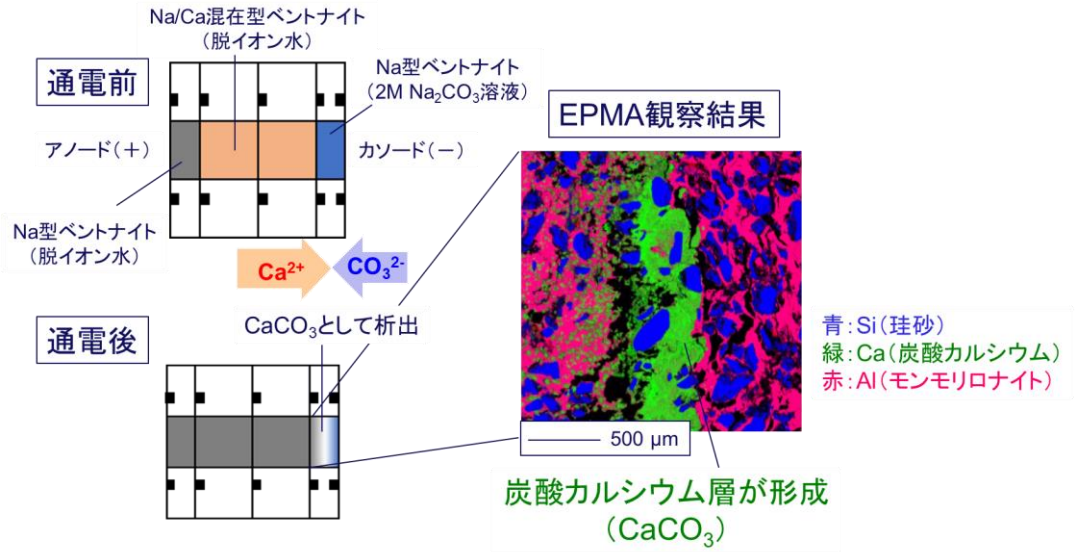


図 2　電気化学的手法による炭酸カルシウムが析出したベントナイトの調製

(2) 炭酸カルシウムが実効拡散係数に及ぼす影響を評価

炭酸カルシウムが析出したベントナイトを用いた透過拡散試験から、炭酸カルシウムが重水およびヨウ化物イオンの実効拡散係数に及ぼす影響を評価した。その結果、炭酸カルシウム析出により重水とヨウ化物イオンの実効拡散係数が低下することが分かった（表１、図３）。

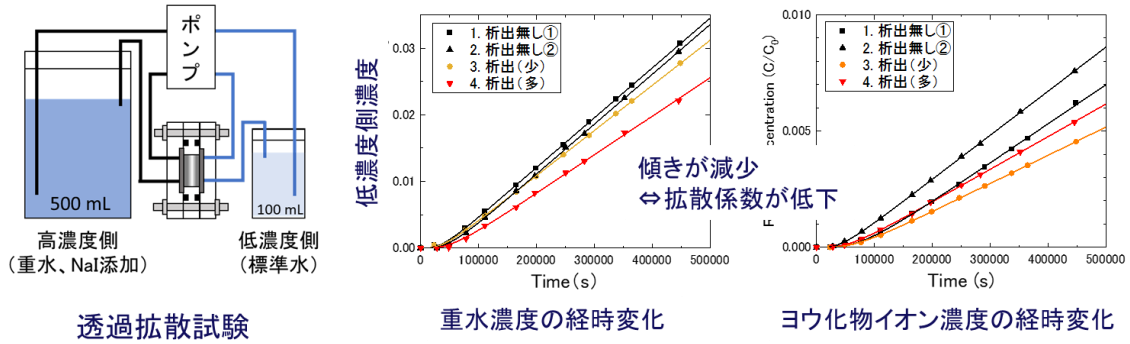


図３　透過拡散試験による低濃度側濃度の経時変化と最適化曲線

表１　透過拡散試験から得られた実効拡散係数（全体）

	実効拡散係数（全体）[m²/s]	
	重水	ヨウ素
1. 析出無し①	$(2.4\pm0.1)\times10^{-10}$	$(5.4\pm0.1)\times10^{-11}$
2. 析出無し②	$(2.4\pm0.1)\times10^{-10}$	$(6.0\pm0.1)\times10^{-11}$
3. 析出（少）	$(2.2\pm0.1)\times10^{-10}$	$(3.9\pm0.1)\times10^{-11}$
4. 析出（多）	$(1.8\pm0.1)\times10^{-10}$	$(4.5\pm0.1)\times10^{-11}$

＊誤差は解析解へのフィッティングによる

また、透過拡散試験後の定常状態における重水およびヨウ化物イオンの試料内部濃度分布から、炭酸カルシウムが析出している箇所で大きな濃度勾配が生じる結果となった（図４）。この結果は、炭酸カルシウム析出に伴う空隙率の低下による、局所的な実効拡散係数の低下で説明できる（Archie 則）。また濃度勾配の変化は、重水と比較してヨウ化物イオンのほうが大きいことが明らかとなった（図４）。この結果は、ベントナイトの負電荷により陰イオンであるヨウ化物イオンがベントナイトから静電的に排除され、その拡散経路がモンモリロナイト層間以外の比較的広い粒子間空隙に制限されることで説明できる（陰イオン排除）。

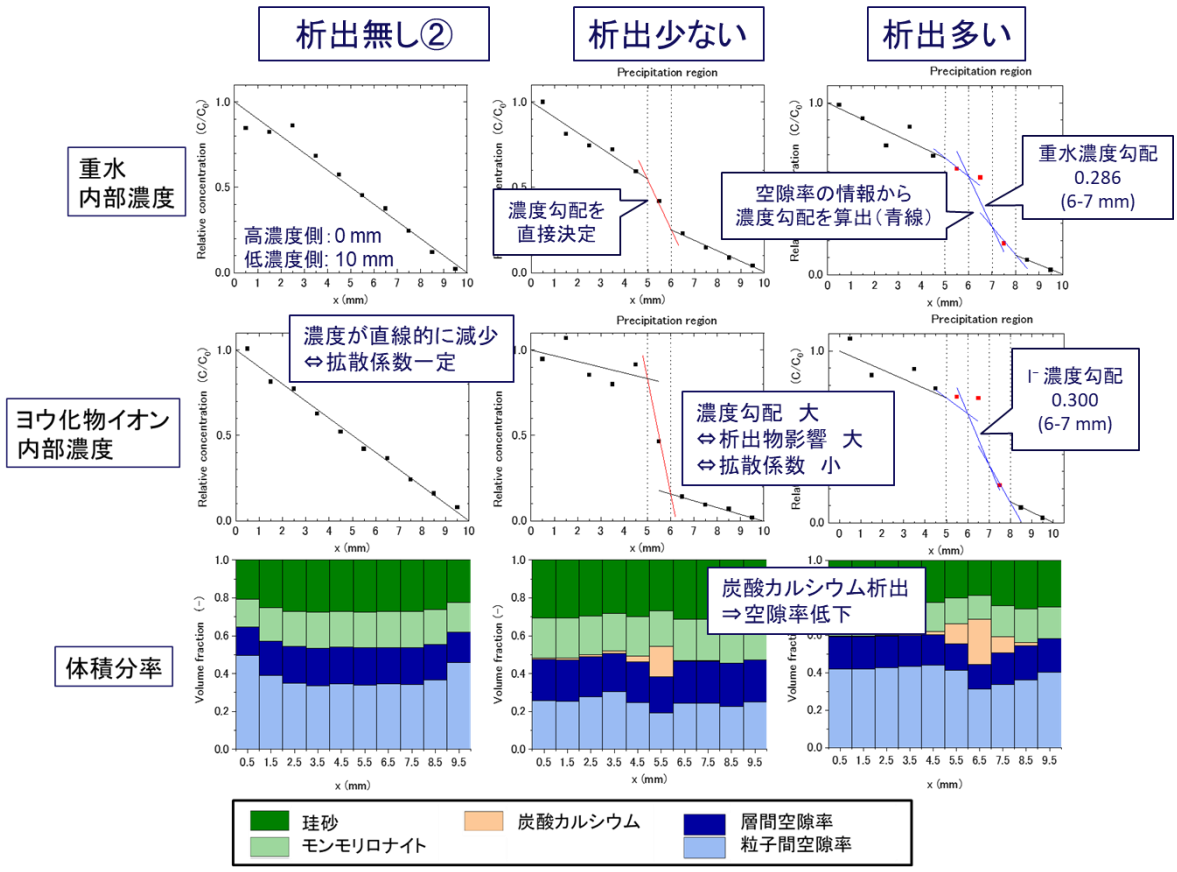


図 4　透過拡散試験後の試料内部濃度、各鉱物の体積分率、
層間空隙率（青）、および粒子間空隙率（水色）

(3) 炭酸カルシウムが透水係数に及ぼす影響を評価

炭酸カルシウムが析出したベントナイトを用いた透水試験から、炭酸カルシウムが透水係数に及ぼす影響を評価した。炭酸カルシウム析出が無い場合の透水係数は概ね一致し、実験の再現性を確認した（表 2)。炭酸カルシウム析出が少ない場合は、析出が無い場合と比較して透水係数が低くなり、炭酸カルシウム析出による空隙閉塞が透水係数を低下させたことが考えられる。これに対し、析出が多い場合は初期の透水係数が大きくなり、その後、透水係数が時間とともに回復した（図５)。この結果は、炭酸カルシウム析出量が多い場合は透水係数の評価が難しくなることを示唆している。考えられる原因として、炭酸カルシウム析出量が多い場合は、セメンテーションに類似した現象により膨潤性を失いひび割れが生じて透水係数が増大した一方で、膨潤性を残した部分の再膨潤により透水係数が回復した可能性が挙げられる。

炭酸カルシウム析出による拡散係数の低下は空隙率の低下で説明できる一方で、析出による透水係数の変化は空隙率の低下のみでは説明できない。透水係数の変化は炭酸カルシウムによる空隙閉塞、セメンテーション、水みちの形成やその時間変化等が複合的に関与し

ていることを示唆しており、X 線 CT 法による空隙閉塞や水みちの非破壊観察を行うなど、別途、詳細に検討する必要がある。

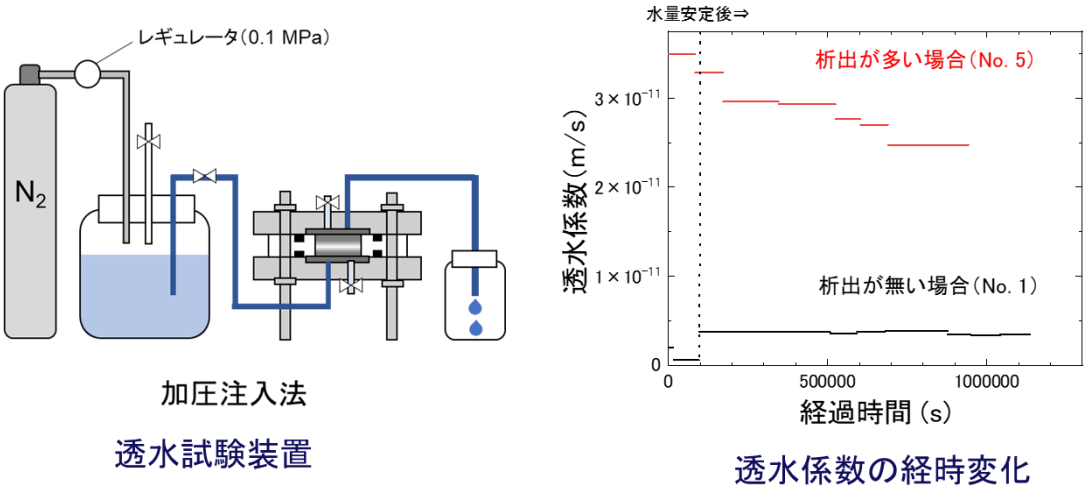


図 5　透水試験の概略（左）と透水係数の経時変化（右）
（黒：析出が無い場合、赤：析出が多い場合）

表 2　透水試験から取得した平均透水係数まとめ

No.	炭酸カルシウム析出量	平均透水係数 [m/s]
1	析出無し①	$(3.6\pm0.2)\times10^{-12}$
2	析出無し②	$(3.7\pm0.4)\times10^{-12}$
3	析出少ない	$(2.9\pm0.4)\times10^{-12}$
4	析出多い①	$(8.8\pm0.3)\times10^{-12}$
5	析出多い②	$(2.9\pm0.3)\times10^{-11}$

○今後の展開（地層処分事業への寄与を含む）

炭酸カルシウム析出がベントナイト中の重水およびヨウ化物イオンの拡散係数に及ぼす影響は空隙率の低下で説明できる一方で、透水係数については更なる検討が必要である。本研究の手法は、析出現象の類似性から処分環境下で生じる他の二次鉱物影響を検討する際の基礎データとして活用可能であり、放射性廃棄物処分の安全評価におけるベントナイト緩衝材の長期的なパラメータ（拡散係数および透水係数）設定に資すると考えられる。

○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, Kyoto (2019).
- Tanaka, S., CALCITE PRECIPITATION IN COMPACTED MONTMORILLONITE ENHANCED USING AN ELECTROKINETIC METHOD: EXPERIMENT AND PRELIMINARY MODELING, Clay Conference 2020, Nancy, France (2020) 【2021 年 6 月に延期】

【国内発表】

- 田中真悟、処分施設環境における二次鉱物沈殿がベントナイト緩衝材の核種移行評価パラメータに及ぼす影響の基礎的研究: 炭酸カルシウム析出による重水の拡散係数変化の検証、日本原子力学会「バックエンド部会」主催　第 36 回バックエンド夏期セミナー、2020 年 8 月 26 日　（オンライン開催）

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に関する研究

山形大学　湯口 貴史

要約

本研究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約 700℃から 300℃の冷却の際に生じる熱水変質現象に着目する。本研究では熱水変質の程度のパラメータ化を実施し、変質パラメータと冷却データ、割れ目頻度データ（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を目指すものである。

本研究では熱水変質現象のうち、黒雲母の緑泥石化と斜長石の変質に着目した。本研究の最大の成果として、画像解析手法により、変質パラメータという変質を定量的に評価する手法を構築した。これは鉱物内の変質領域面積と鉱物全体面積の面積分率で表すものである。得られた変質パラメータとラージスケール割れ目は相関関係を持つ。また本研究では，マイクロスケール割れ目領域面積の定量的な導出方法を提案した。その解析の結果、変質パラメータとマイクロスケール割れ目は、強い正の相関を示す。つまり変質パラメータとラージスケール割れ目、マイクロスケール割れ目には関連があることが示された。本研究の成果は、放射性廃棄物の地層処分の安全評価において、割れ目分布の高詳細な推定・将来予測の実現に寄与する。

○研究の背景・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）を評価する手法の構築を目指す。そのメリットとして、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領域を推定することを目指す。

著者らの既存研究において 700℃から 300℃の間の岩体の冷却と割れ目分布の間に関

連があることを明らかにした。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。

〇実施内容

本研究は中部日本（岐阜県東濃地域）の土岐花崗岩体を対象とし、4 つの STEP を設定し、段階的に研究を実施する。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。熱水変質現象の中で，特に黒雲母の緑泥石化および斜長石の変質の 2 つの現象に着目する。ここでは変質に伴う物質移動メカニズムについても解明する。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。STEP3 では、肉眼観察可能な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割れ目と変質パラメータの関連性を評価する。また，マイクロスケール割れ目を定量的に評価する方法を構築する。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について考察を行った。本研究では、マイクロスケール割れ目が、物質移動に大きく寄与す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た。

〇得られた成果と考察

物質移動メカニズムの解明

本研究では熱水変質現象のうち、黒雲母の緑泥石化と斜長石の変質に着目し、記載岩石学的データの収集を実施した（図 1A，図 2A）。変質現象をもたらす鉱物と熱水流体間の物質移動メカニズムを解明した。その結果、黒雲母の緑泥石化と斜長石の変質が連続的な元素移動によることを明らかにした。その成果は 2 編の論文として投稿を行った。

変質パラメータの導出

ここでは 1 つの鉱物中の変質の程度を定量的に評価する手法を構築した。まず電子顕微鏡を用いて鉱物の化学組成像を取得し、画像解析手法により変質領域を抽出する（図 1B，図 2B）。構築した「変質パラメータ」は鉱物内の変質領域面積と鉱物全体面積の面積分率で表すものである。加えて、「試料中でどの鉱物を選定するのか」や「試料を代表する値を導出するのか」などの方法論を体系化した。

斜長石の変質年代の決定

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。その成果は 1 編の論文として投稿を行った。

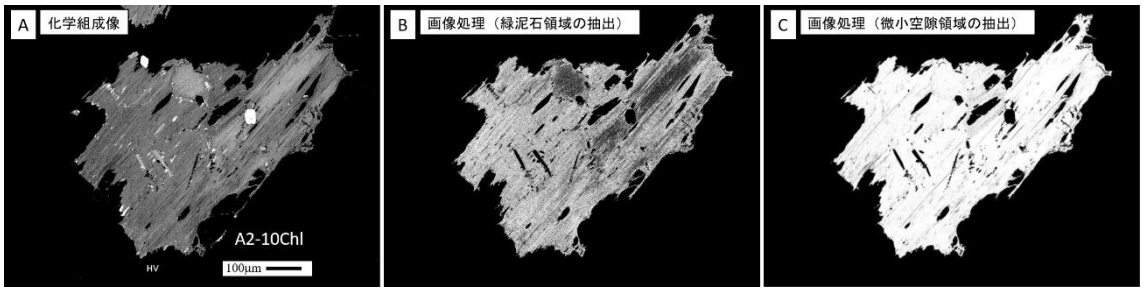


図 1　黒雲母の緑泥石化を示した化学組成像（A）と画像処理により抽出された変質領域（B）と微小空隙（マイクロスケール割れ目、C）

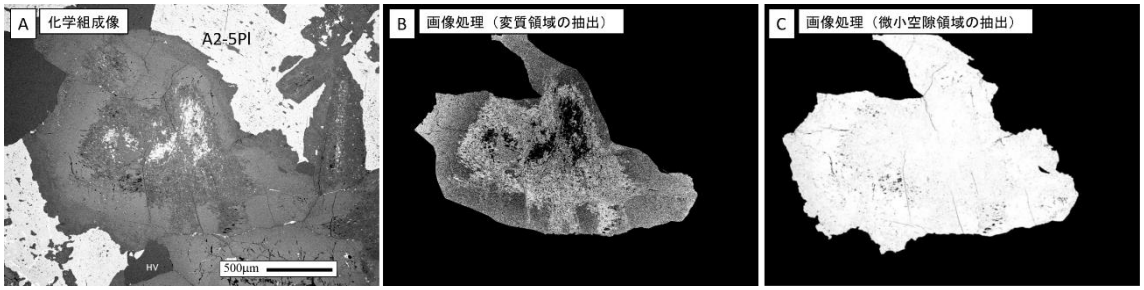


図 2　斜長石の変質を示した化学組成像（A）と画像処理により抽出された変質領域（B）と微小空隙（マイクロスケール割れ目、C）

変質パラメータとラージスケール割れ目の関係

変質パラメータとラージスケール割れ目の関係を明らかにした。黒雲母の緑泥石化と斜長石の変質それぞれの変質パラメータは同様の傾向を持つ（図 3A，図 3B）。変質パラメータの小さなサンプルではラージスケール割れ目の頻度が低く、変質パラメータの大きな試料ではラージスケール割れ目の頻度が高い。これは変質パラメータが割れ目を評価するための指標となり得ることを示す。

マイクロスケール割れ目の導出

マイクロスケール割れ目の導出方法として、2 つの方法を考案した。一つは偏光顕微鏡と蛍光顕微鏡を組み合わせ、マイクロスケール割れ目の分布を知る方法であり、この方法論は 1 編の論文として投稿を行った。もう一つは化学組成像から画像解析手法によりマイクロスケール割れ目を含む微小空隙を評価する方法である（図 1B，図 2B）。

変質パラメータとマイクロスケール割れ目の関係

変質パラメータとマイクロスケール割れ目の関係を明らかにした。黒雲母の緑泥石化と斜長石の変質それぞれの変質パラメータとマイクロスケール割れ目は同様の傾向を持ち、両者は強い正の相関を持つ（図 4A，図 4B）。このことは変質の程度がマイクロス

ケール割れ目の量に支配されていることを示す。

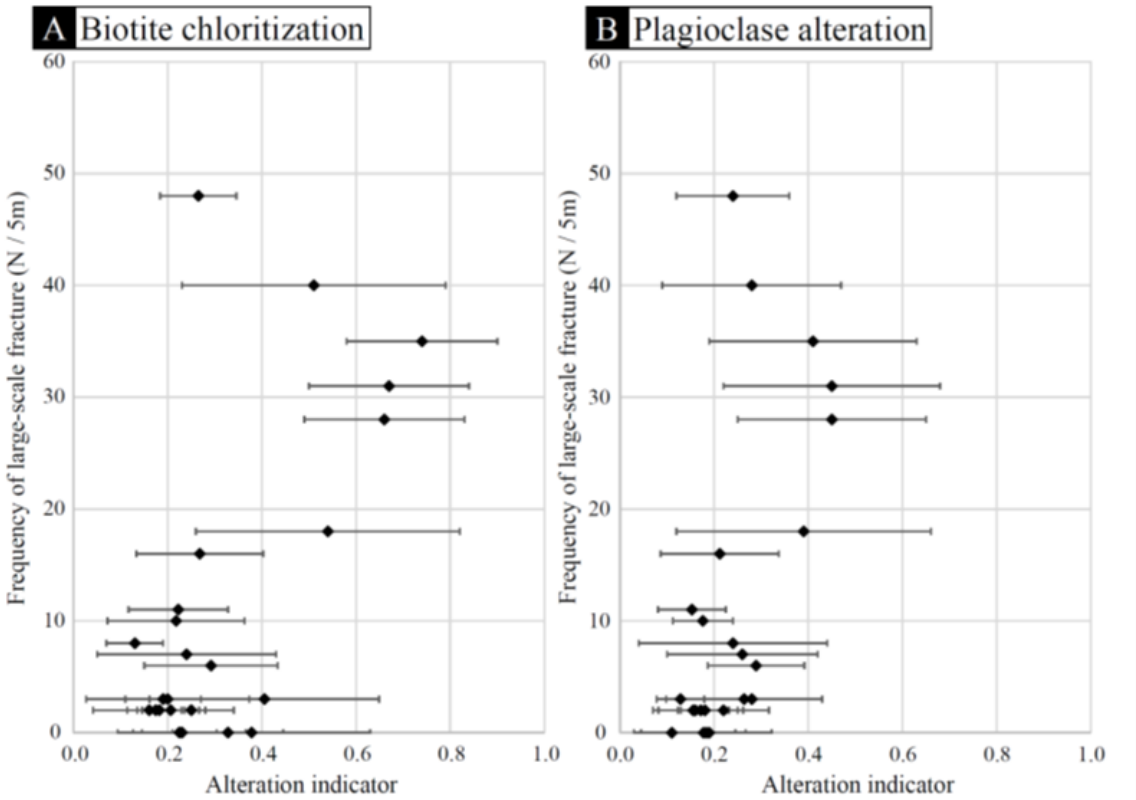


図 3　黒雲母の緑泥石化（A）と斜長石の変質（B）の変質パラメータと
ラージスケール割れ目の頻度との関係

ラージスケール割れ目とマイクロスケール割れ目の関係

図 4A と図 4B はラージスケール割れ目とマイクロスケール割れ目の関係も示す。ラージスケール割れ目の頻度の大きな試料は、変質パラメータとマイクロスケール割れ目ともに大きい傾向を持つ。このことは変質と、ラージスケール割れ目、マイクロスケール割れ目の 3 者の間で関連があることを示しており、マイクロスケール割れ目が、物質移動に大きく寄与す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を支持するものである。

〇今後の展開

上述の議論により、変質パラメータがラージスケール割れ目の頻度を評価する新たな手法となり得ることを示した。このことは放射性廃棄物の地層処分の安全評価において、割れ目分布の高詳細な推定・将来予測の実現に寄与するものとなる。また、変質パラメータとラージスケール割れ目の関係（図 3A，図 3B）、変質パラメータとマイクロスケー

ル割れ目の関係（図 4A，図 4B）を示した図には、大きな傾向に則さないデータがしばしば観察される。現在の割れ目分布を説明できないこれらのイレギュラーなデータが将来予測のための重要な試料となる。これらの試料に対して、再び STEP 1 や STEP2 で実施した物質移動メカニズムの把握や生成条件の解明をより詳細に実施することで、将来的な割れ目発生の潜在性を評価するための概念と手法を構築する計画である。

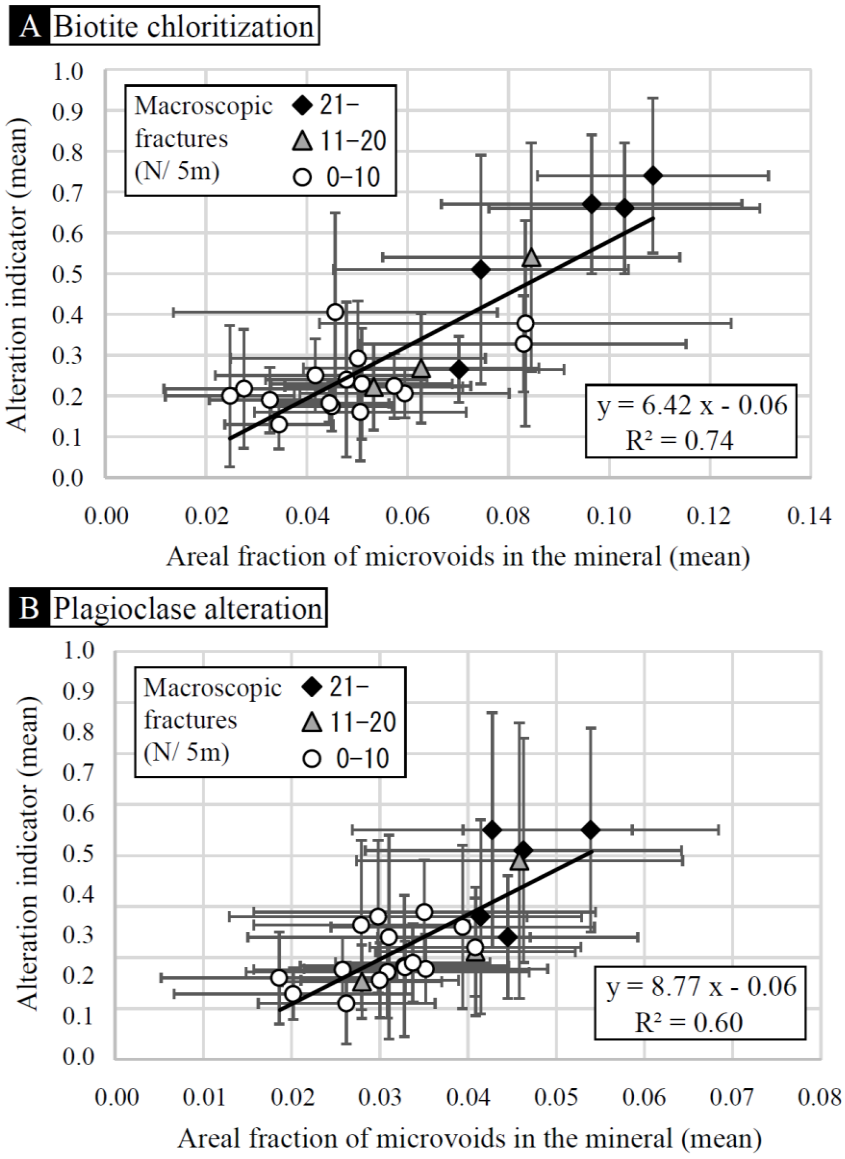


図 4　黒雲母の緑泥石化（A）と斜長石の変質（B）の変質パラメータとマイクロスケール割れ目との関係

〇外部発表リスト

・査読付き論文

1. Yuguchi, T., Matsuki, T., Izumino, Y., Sasao, E., Nishiyama, T., 2021. Mass transfer associated

with chloritization in the hydrothermal alteration process of granitic pluton. American Mineralogist, In press.

2. Yuguchi, T., Usami, A., Ishibashi, M., 2020. Analysis of the distribution of microfractures and micropores within granitic rock using simultaneous polarization–fluorescence microscopy. Heliyon, 6, e04815.
3. Yuguchi, T., Yagi, K., Sasao, E., Nishiyama, T., 2020. K-Ar geochronology for hydrothermal K-feldspar within plagioclase in a granitic pluton: Constraints on timing and thermal condition for hydrothermal alteration. Heliyon, **投稿中**
4. Yuguchi, T., Yuasa, H., Izumino, Y., Nakashia, K., Sasao, E., Nishiyama, T., 2020. Micropores and mass transfer in the formation of myrmekite. American Mineralogist, **投稿中**
5. Yuguchi, T., Izumino, Y., Sasao, E., 2020. Petrographic indicators of hydrothermal alteration to examine the fracture frequency distribution. Plos ONE, **投稿中**

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　富樫陽太

要約

処分坑道の変形特性を詳細に把握するには、掘削に起因する岩盤の含水量変化に応じた不飽和変形特性の把握が肝要である。本研究では、坑道掘削を想定した乾燥収縮実験や室内実験を通して、含水変化に伴って堆積岩の主ひずみ方向が回転することを世界で初めて示した。さらにモンテリ岩盤研究所での岩盤内気圧変動を現地計測するとともに、非線形熱伝導方程式の厳密解を用いた不飽和透水係数の特定方法を開発した。

○研究の背景・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。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）の定量的な把握が極めて重要である。本研究では、掘削に起因した乾燥に伴う堆積岩の異方的な力学特性の変化を把握し、高レベル放射性廃棄物の処分坑道建設・埋設方法へ応用可能な知見を得ることを目的とする。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の詳細な特定を試みる。

○実施内容

本研究では、堆積層に処分坑道が建設される場合を想定して堆積軟岩を用いた検討を進める。本研究の実施項目と実施内容は以下である。

- 連続的な含水変化に伴う異方性岩盤の変形現象を観察することを目的とした乾燥・浸水変形実験と岩盤の不飽和変形異方性を取得するための要素試験
- 坑道の掘削に伴う不飽和領域の進展を記述する微分方程式の厳密解の導出
- スイス・モンテリ岩盤研究所におけるボーリング孔での気圧変動の現地計測と、不飽和透水係数を取得する方法の開発

○得られた成果と考察

- 連続的な含水変化に伴う堆積岩の剛性変化

図 1 には新第三紀の凝灰岩を用いた乾燥変形実験により得られた成果を示す。乾燥変形実験は、10 日以上純粋浸水させ飽和度 90%程度に調整した円柱供試体の変形を詳細に計測するとともに含水量の変化を電子天秤で測定する試験である。図にはひずみテンソルの計測から測定した主ひずみ方向の回転を示す。乾燥変形実験では等方的なサクションが作用するので、主ひずみ方向は異方剛性の硬い方向（ε_3）と柔らかい方向（ε_1）を意味する。これら主ひずみ方向が含水変化に伴って 90 度回転し入れ替わることを世界で初めて示した。

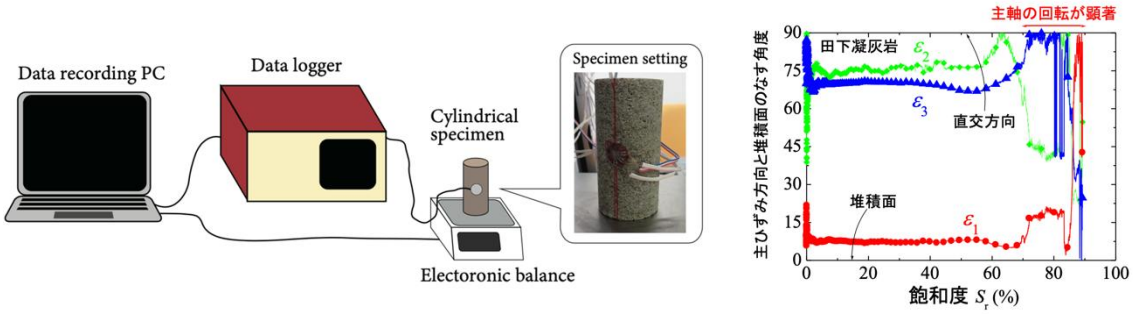


図 1 乾燥変形実験と主ひずみ方向の回転

● 不飽和領域の進展を記述する微分方程式の厳密解

多孔質媒体の不飽和領域の進展は非線形偏微分方程式のリチャーズ式の数値解を求めることで推測されてきたが、高い非線形性を有するため不安定な結果が得られる場合が多い。本研究では、水分拡散係数をコンスタント、透水係数が座標に依存しない均質な領域を仮定することで、以下の熱伝達境界のリチャーズ式厳密解を求めた。

$$S\left(z、\ t\right) = S_w + (S_i - S_w)\sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\,sin\,\beta_n}{sin(2\beta_n) + 2\beta_n}(cos\,\beta_n\,X)e^{-\beta_n^2 F_o}$$

この式の妥当性は、乾燥変形実験における飽和度の変化を詳細に表現できることで確認している（図 2）。

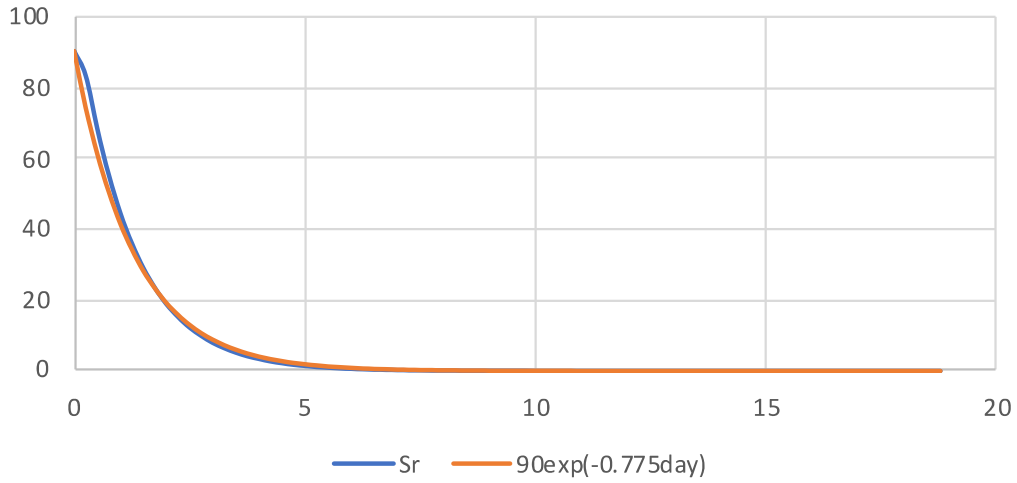


図 2 リチャーズ式厳密解を用いた乾燥変形実験のシミュレーション
（青：厳密解、オレンジ：実測値の非線形最小二乗回帰曲線）

● モンテリ岩盤研究所でのボーリング孔での気圧計測と不飽和透水係数の特定方法

モンテリ岩盤研究所では、トンネルの坑壁に深さの異なる 3 つのボーリング孔を開け、

内部に気圧･温度･相対湿度を測定できる環境センサを設置し、常時計測を行なった(図 3)。岩盤の透気現象は非線形熱伝導方程式で表されるが、これを線形化して厳密解を導き、現地計測をシミュレートするため以下の差分方程式を開発した。図 4 左には実測データのシミュレート結果を示しているが、よく整合していることがわかる。

$$\Delta P = \left(\Delta P_l - \Delta P_0\right)\frac{\mathrm{erf}\left(\Delta \eta\right)}{\mathrm{erf}(\Delta \alpha)} + \Delta P_0$$

この差分方程式を用いて、誤差函数 erf に関する 1 次のテイラー展開から固有透気係数を陽に求める以下の方法も開発している。

$$K = \frac{\lambda\mu}{P_0 - P_l}\frac{l^2}{2\Delta t}\frac{8\dfrac{\Delta P - \Delta P_0}{\Delta P_l - \Delta P_0} - 1}{24\dfrac{\Delta P - \Delta P_0}{\Delta P_l - \Delta P_0} - 12}$$

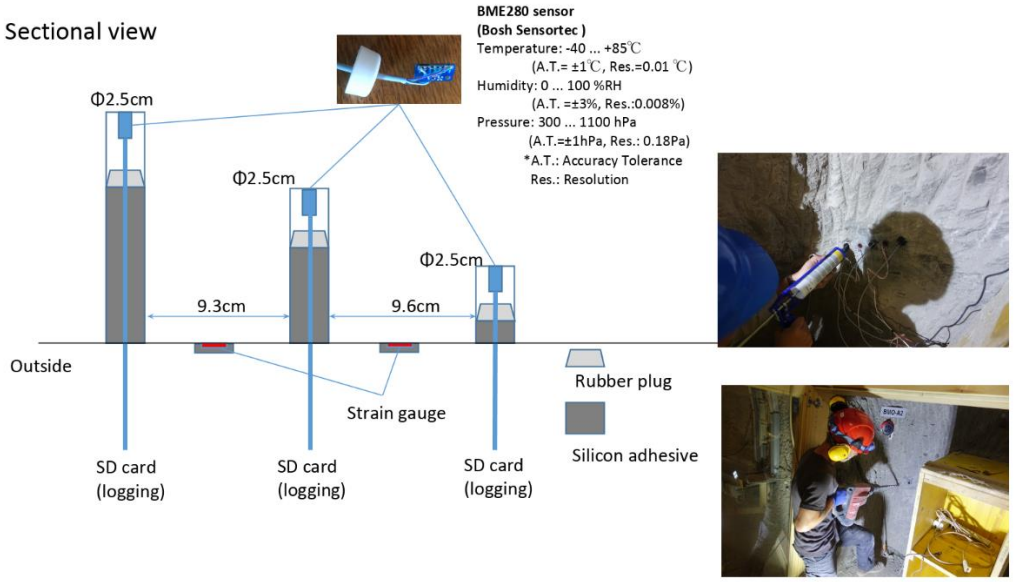


図 3 モンテリ岩盤研究所での現地気圧計測
(深さの異なるボーリング孔に環境ロガーを設置)

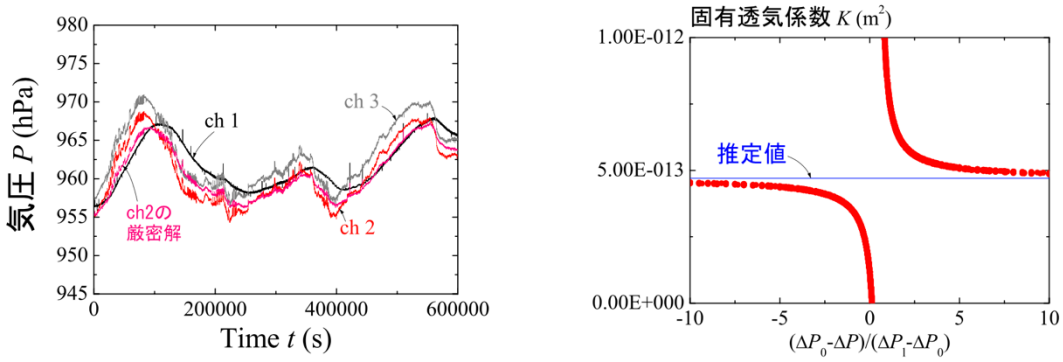


図 4 厳密解を用いた気圧変動のシミュレーションと固有透気係数の特定

〇今後の展開（地層処分事業への寄与を含む）

連続的な含水状態の変化に伴う岩盤の異方剛性の変化を世界で初めて明確に捉えたが、そのミクロなメカニズムは未だ明らかでない。今後、検討を進めることで地層処分における坑道の建設過程における留意点が明確にできる可能性がある。また、今回開発した不飽和透水係数の特定方法、不飽和領域の進展を特定できる厳密解を用いた、力学・浸透の連成解析を実施し、処分坑道の変形特性を詳細に把握することが課題となる。

〇外部発表リスト

1. Togashi Y、Imano T、Osada M、Hosoda K & Ogawa K (2021). Principal strain rotation of anisotropic tuff due to continuous water-content variation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences、 138.
2. Togashi Y.、 Imano T. & Osada M. (2021). Deformation characteristics of sedimentary rock due to continuous changes of moisture content in wetting process. Proc. ACUUS2020、 (accepted)
3. 井口翔太、富樫陽太、長田昌彦、川之上諒（2021）. 崩壊の進行性を考慮した切羽前方土圧理論と実験的検証. 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、 139-143.
4. 佐藤晴海、富樫陽太、菊本統、谷和夫、細田光一、小川浩司（2021）. 三回の一軸試験による岩盤の直交異方弾性の特定方法. 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、91-96.
5. Togashi Y.、 Osada M. & Yamabe T. (2020). Rotation of three principal strains of tuff during drying shrinkage. Proc. EUROCK 2020 (7pages).
6. Osada M.、 Takemura T.、 Togashi Y. & Goshima S. (2019). Pore air pressure measurement at Mont Terri Rock Laboratory、 Switzerland. Proc. YSRM2019 & REIF2019、 P-31 (6pages)
7. Togashi Y.、 Kikumoto M.、 Tani K.、 Hosoda K. & Ogawa K. (2019). Deformation

anisotropy of sedimentary rock sampled from deep seabed near subduction zone. Proc. YSRM2019 & REIF2019、 1-5-6 (6pages).

8. 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. Proc. 7th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials (IS-Glasgow 2019)、 92(2008)、 1-6.

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に関する研究

東京大学　鈴木庸平

要約
地下深部環境に生息する微生物に関して、処分場選定における調査技術や多重バリアシステムへの影響評価技術の開発を行った。特に、地下深部環境を模擬した室内試験法の開発に成功し、微生物の代謝様式や速度を把握することが可能となった。

○研究の背景・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を用いることにより、地下深部環境の形成や核種移行に及ぼす微生物影響の実態が明らかになりつつある。しかし、地層処分場の建設が想定される地下深部の岩石中に、バイオフィルムが形成しているか評価する技術が未確立なため、微生物生態系の影響を考慮するのか明確ではなかった。本委託事業とは別の受託研究により、地下深部岩石内部のバイオフィルムに関して評価技術の確立に成功し、バイオフィルムの普遍的な存在を示唆した。その裏付けとして、幌延の高塩分地下水を胚胎する閉鎖的な地層においても、亀裂に粘土に共存するバイオフィルムの存在を確認している(図 1A-C)。本委託研究の目的は、地下深部に生息する微生物の代謝活動を対象に、高圧環境を模擬した室内試験技術を開発し、その性能評価を高品質な地下水を用いて行うことを目的とする。さらに、幌延の地下環境に存在する粘土と微生物の関連性についても明らかにすることを目指した。

○実施内容

最初に、開発した高圧培養容器の性能評価を行い、ガス保持能力を確認した(図 1D)。しかし、代謝産物として重要な分析項目の硫化水素や溶存鉄が、容器との反応により評価できない問題が生じた。そこで、テドラーバックと呼ばれるガスへの気密性が高いバックに地下水をいれて実験する方法を考案した(図 1E, F)。瑞浪と幌延の地下坑道から採取された高品質な地下水で、微生物の有機物やメタンの酸化に関わる代謝の速度、および代謝速度に電子受容体が及ぼす影響について評価を行った。幌延の地下水は、懸濁物の粘土鉱物の存在がメタン酸化代謝の電子受容体として重要な役割を果たしている可能性が判明した。そのため、懸濁物中の粘土鉱物の由来が掘削による影響か、地層由来かを識別するために、掘削コア中の粘土鉱物の解析を行った。

〇得られた成果と考察

幌延の地下水中での微生物によるメタン酸化活性について、三重実験により試験の再現性が確認された(図 2)。電子受容体として利用性の高いフェリハイドライトの添加した培養条件よりも、添加しない条件で、メタン酸化活性が有意に高いため、地下水に含まれる懸濁物の成分が電子受容体として用いられていることが明らかとなった(図 2A)。また、微生物群集組成の解析により培養中にメタン酸化古細菌が維持されていることも明らかとなった(図 2B)。懸濁物の固体解析をした結果、鉄含有のスメクタイト粘土が含まれており、電子受容体として利用されている可能性を支持した(図 3A, B)。また、スメクタイト粘土の層構造の違いを敏感に判定できるフーリエ変換型赤外線分光装置で、懸濁物と掘削コア中の粘土鉱物を比較した結果、懸濁物と同一の粘土鉱物が声問層でのみでコア試料から検出された(図 3D)。これらの結果から懸濁物は地層由来であり、この粘土鉱物に依存した微生物生態系が存在する可能性が高まった。瑞浪の地下水の培養結果からは、地下深部環境でこれまで想定されていなかった元素状硫黄やチオ硫酸が重要であることが明らかとなった。

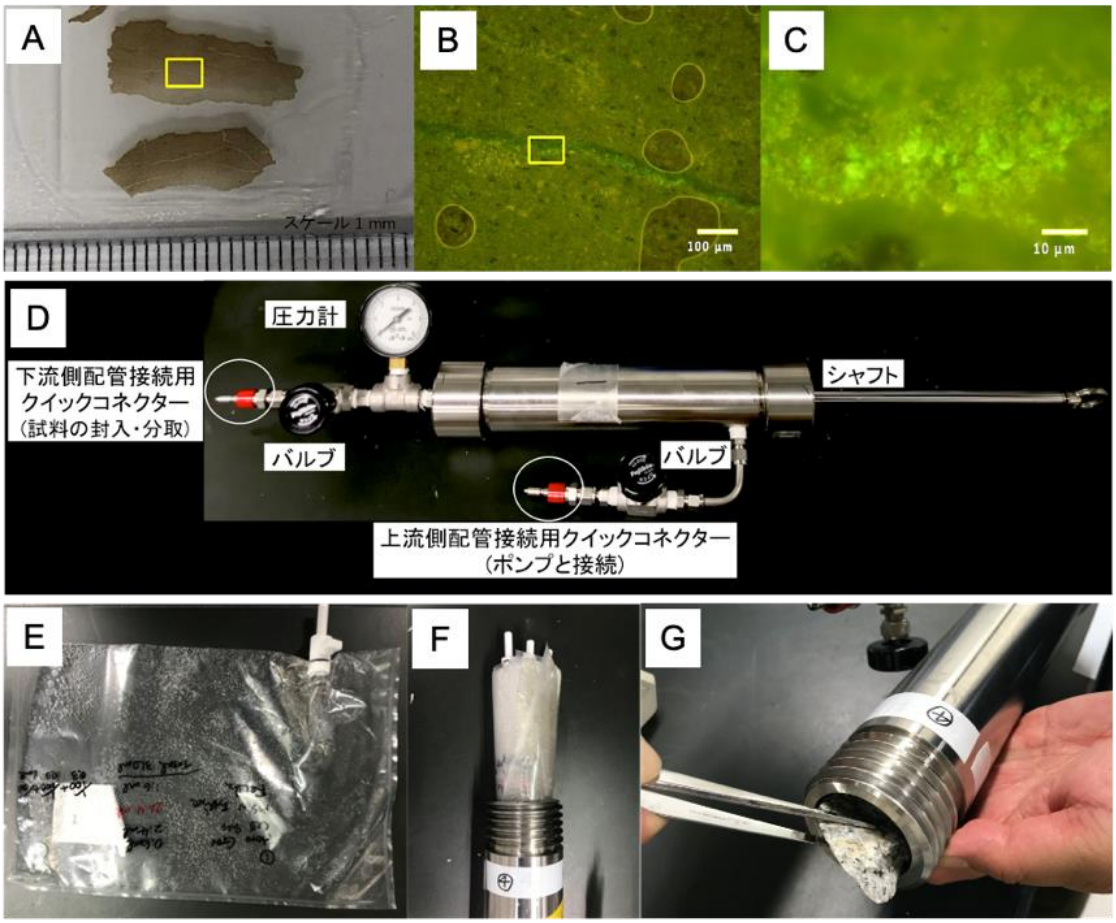


図 1.　(A) 幌延のボーリングコアの薄片、(B) (C) 蛍光顕微鏡で観察された亀裂内の微生物、(D) ステンレス製高圧培養容器、(E) 調整した培養液をいれたテドラーバッグ;　(F) 高圧培養器と 3 枚のテドラバッグ、(G) 高圧培養器と岩石コア試料。

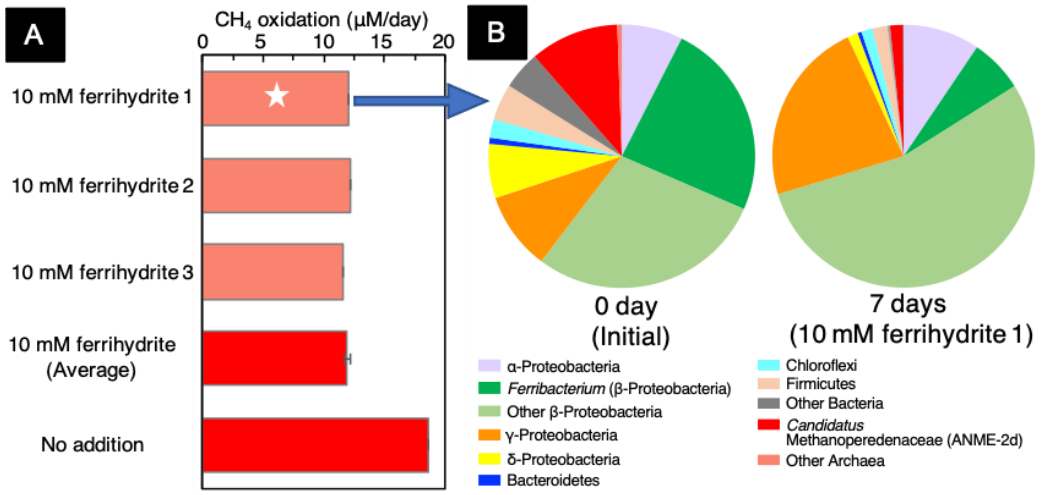


図 2. （A） 溶存無機炭素安定同位体比及び全菌数から導出されたメタン酸化速度、(B) 16S rRNA 遺伝子解析により得られた微生物群集組成。左は培養前の幌延地下水試料、右は 10 mM フェリハイドライトを加えた高圧培養後の試料。

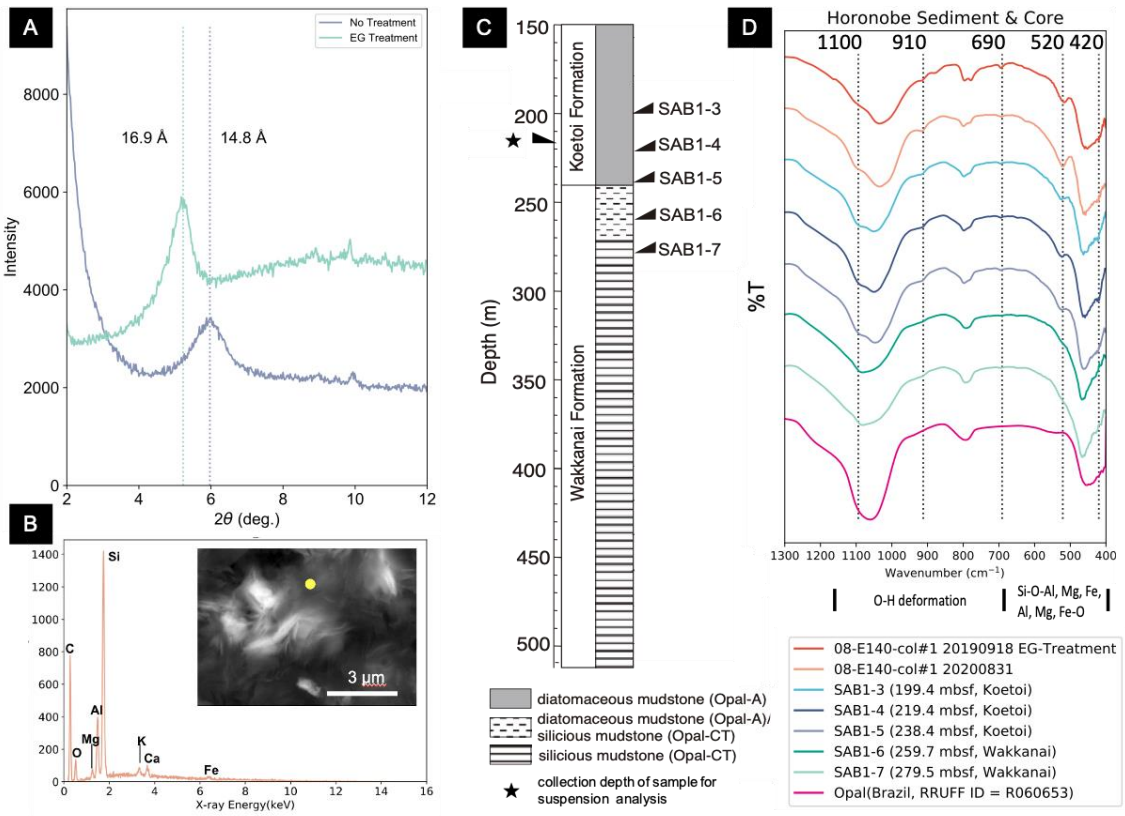


図 3. （A）幌延深地層研究所地下 215m から採取された地下水中懸濁物の X 線回折(XRD)パターン、(B) 後方散乱電子像及びエネルギー分散型 X 線分析(EDS)スペクトル、(C) 幌延深地層研究所地下の層序。黒い三角形で XRD、EDS、FT-IR 分析に使用されたコア試料 SAB1-3～7 の採取深度、及び、★で地下水中懸濁物採取深度を示した。(D) 地下水中懸濁物及び SAB-1 号孔コア試料のフーリエ変換赤外分光法(FT-IR)スペクトル。

○今後の展開

本委託で開発に成功した高圧培養技術は、岩石の掘削コアにも適用が可能である(図 1G)。概要調査から精密調査の両段階での掘削調査で取得される地下水と岩石コアで、微生物の影響評価に利用できる体制が整った。天然バリア性能をバイオフィルムの影響も踏まえて正確に把握することは、微生物の核種移行遅延特性を安全評価に組み込めるため、より信頼性の高い地層処分技術の確立に寄与する。

○外部発表リスト

1. Yohey Suzuki, In-situ and laboratory high-pressurecultivations of deep microbiomeat two Japanese underground facilities. Goldschmidt Conference. 23, June, 2020.

ナチュラルアナ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　王　海龍

要約

本研究は，ベントナイト系緩衝材の自己修復性能，応力緩衝性能に関連する，ベントナイトの膨潤特性におけるセメンテーションに伴う年代変化の定量評価を目的としたものである．セメンテーションを受けた緩衝材の模擬材料として，地質年代や産地の異なる数種類のベントナイト原鉱石を選定し，原鉱石の不攪乱試料と再構成試料を作製して膨潤圧，膨潤変形試験を行うとともに，セメンテーションの影響を確認するため，X 線回折や顕微鏡観察を行った．その結果，不攪乱試料の膨潤特性は再構成供試体に比べて低下し，その低下度合いは原鉱石の地質年代に応じて大きくなる傾向が見受けられた．この結果については，緩衝材の性能評価におけるセメンテーションの影響の検討根拠になり得ると考えられる．また，緩衝材の経時的な状態変化に関するシナリオを構築し，膨潤特性試験結果と組み合わせることで，緩衝材の自己修復性能・応力緩衝性能における年代変化を評価する手法を提案した．本研究の成果は，高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価において，緩衝材の性能における年代変化を高精度に予測・評価できる手法の構築に大きく寄与できる．

○研究の背景・目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるベントナイト系緩衝材には，オーバーパックの設計寿命（約 1000 年）以降から廃棄物の放射能が安全レベル以下（約 100 万年程度）まで，自己修復性能（オーバーパックの腐食に伴う水素ガスの破過により発生する水みちとなり得る損傷部を膨潤変形により充填すること）と応力緩衝性能が求められている．しかし，長期間を経ることにより，緩衝材内部におけるセメンテーション発生の影響に伴い，これらの性能の発揮に密接に関わるベントナイトの膨潤特性が低下する可能性が懸念されているが，セメンテーションのような長期的な変質現象を室内実験で模擬し，評価することは極めて困難である．

本研究の目的は，地質学的概念であるナチュラルアナログ手法を参考として，ベントナイト原鉱石をセメンテーションを受けた緩衝材とみなし，不攪乱状態の原鉱石および粉砕によりセメンテーションを除去した原鉱石の膨潤特性を定量評価して，緩衝材の特性のセメンテーションによる年代変化を調査することである．

〇実施内容

産地や地質年代の異なる 3 種類の Na 型ベントナイト原鉱石の不攪乱試料と，粉砕後の粒径をパラメータとして作製した再構成試料を試験対象として，膨潤特性試験（軸圧方向の変形を抑制した膨潤圧試験，軸圧を小さくして発生する膨潤変形量を測定する膨潤変形試験）を行った．また，セメンテーションの影響を確認するために，X 線回折や薄片試料の作製・観察，含有鉱物の定量化などの各種化学分析を実施した．

〇得られた成果と考察

各原鉱石の不攪乱試料と再構成試料から得られた膨潤特性試験結果を図 1 に示す．これより，不攪乱試料の膨潤特性曲線（赤破線）が再構成試料の曲線（黒破線）に比べて低下していることがわかる．この低下の程度は，原鉱石の種類および拘束状態に依存して変化していることがわかる．原鉱石の種類による膨潤特性曲線の低下度は，図 2 に示すように地質年代（すなわち，セメンテーションの程度）に因る影響を受けると考えられる．

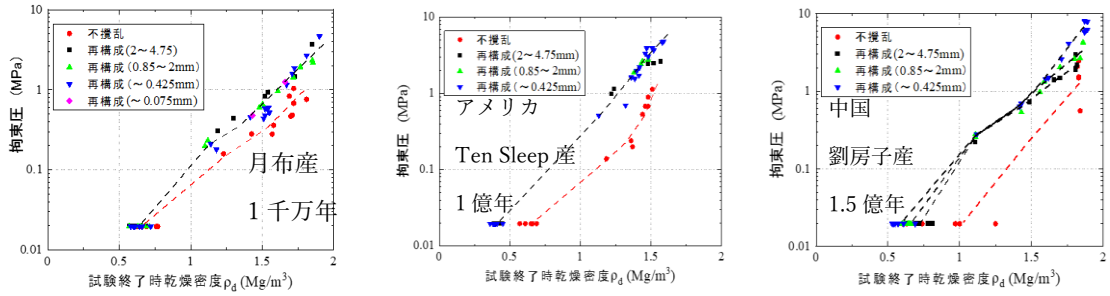


図 1　各原鉱石の膨潤特性試験結果

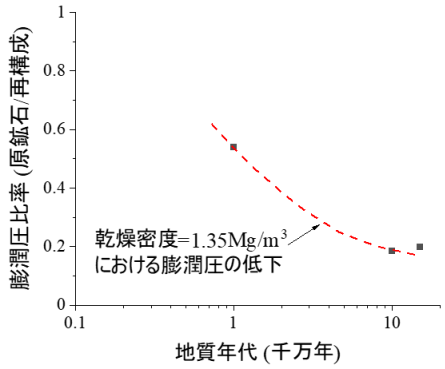


図 2　原鉱石の地質年代と膨潤圧比率（不攪乱/再構成）の関係

また，図 3 に示すように，処分後 1000 年程度以降からオーバーパックの腐食に起因する体積膨張および水素ガスの発生・破過に対して，ベントナイト系緩衝材には自己修復性能・応力緩衝性能が求められる．本研究では，図 4 に示すような処分事業直後～再冠水による隙間充填～セメンテーション発生～オーバーパックの腐食膨張発生～ガス破過に伴う水

みちの発生といった，緩衝材の状態変化に関するシナリオを想定した．そして，本研究で得られた不撹乱試料と再構成試料の膨潤特性曲線を図 5 のように組み合わせることにより，緩衝材の自己修復性能・応力緩衝性能におけるセメンテーションによる年代変化を評価する手法を提案した．

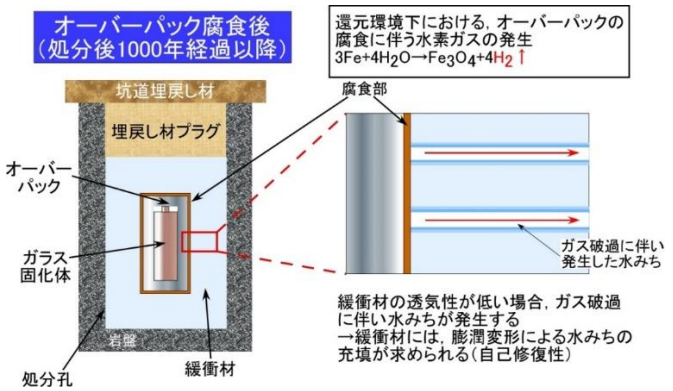


図 3　オーバーパックの腐食に起因する体積膨張および水素ガスの発生・破過概念図

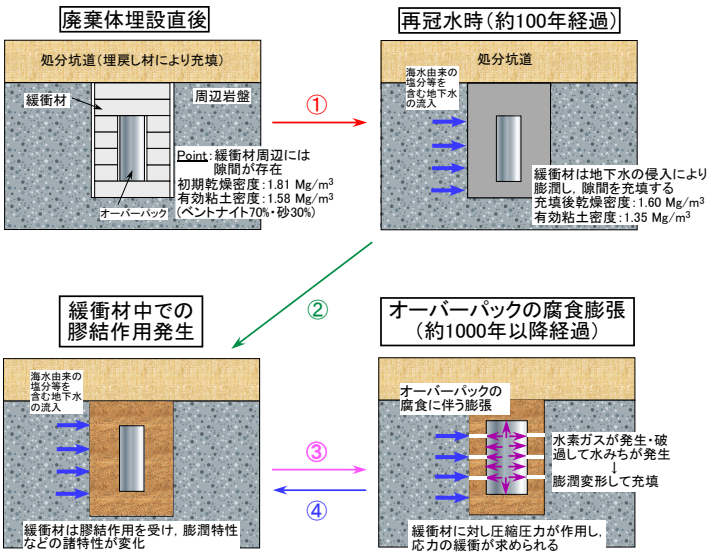


図 4　想定される緩衝材の経時的な状態変化

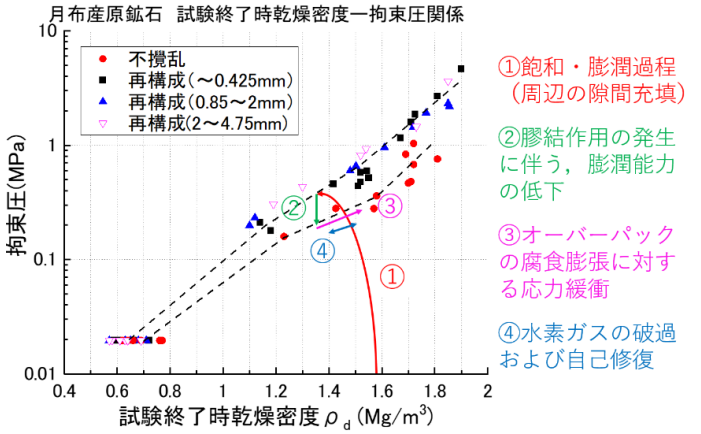


図 5　緩衝材の状態変化に伴う膨潤特性曲線の変化概念図

〇今後の展開（地層処分事業への寄与を含む）

本研究で得られた成果のうち，地質年代約 1000 万年から 1.5 億年の原鉱石に対する膨潤特性の低下を評価した成果は，緩衝材の性能評価におけるセメンテーションの影響の検討根拠になり得る．

今後は，ベントナイトの特性と緩衝材の性能における年代変化について，特に地層処分の時間スケールに近い数百～1000 万年程度の年代についてより定量的に評価する必要があるため，該当する年代のベントナイト原鉱石や，モンモリロナイト（ベントナイトに含まれる膨潤性粘土鉱物）を含有する自然岩石を研究に導入して検討する．また，地質年代に代わる指標を模索し，セメンテーションの程度と特性変化の度合いをより合理的・定量的に評価する手法を開発する．

〇外部発表リスト

・学術論文発表

1. H. Wang, T. Shibue, H. Komine. “Hydration and dehydration of water of bentonite: a solid-state 1H magic-angle spinning NMR study”, Chemical Physics, Vol. 536, 2020.
2. 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, Vol. 57, pp.921-932, 2020.
3. H. Wang, H. Komine, T. Gotoh. “A swelling pressure cell for X-ray diffraction test”, Geotechnique, 2020. (Accepted)
4. 王海龍，小峯秀雄，伊藤大知，後藤隆弘：締固めたベントナイトの膨潤圧特性の究明に向けた X 線回折を用いた実験手法の開発，地盤工学会誌，2021 年 1 月号，pp.48-51，2021.

・国際会議口頭発表（査読有）

1. D. Ito, H. Komine, S. Morodome, T. Sekiguchi, G. Miura. “Evaluating influence of cementation in bentonite buffer material based on the swelling properties of bentonite ore”, Proceedings of the 7th International Congress on Environmental Geotechnics, pp.97-104, Hangzhou, China, 2018.
2. D. Ito, H. Komine, H. Wang. “Experimental study on effect by cementation on self-sealing capability of bentonite buffer material”, E3S Web of Conferences, 205, 10004, 2nd International Conference on Energy Geotechnics, San Diego, U.S.A., 2020.
3. D. Ito, H. Komine, H. Wang. “Experimental study to elucidate cementation effect on swelling pressure and montmorillonite basal spacing of bentonite ore”, 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney, Australia, 2022. (査読中)

・国内会議口頭発表

1. 伊藤大知，小峯秀雄，諸留章二，関口高志，三浦玄太：生成年代の異なるベントナイト原鉱石の膨潤変形特性に基づく膠結作用の定量評価, 第 53 回地盤工学研究発表会(高松), D-05，pp.2295-2296，2018.
2. 王海龍，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（さいたま），p.845-846, 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能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（高松），Ⅶ-134，2019.
5. 王海龍，白河部匠，小峯秀雄.「締固めたベントナイトの膨潤圧計測装置の開発」，第 55 回地盤工学研究発表会（京都）, 21-5-5-01, 2020.
6. 伊藤大知，小峯秀雄，王海龍，後藤茂：破砕により粒径を変化させたベントナイト原鉱石の膨潤圧測定結果に基づく膠結作用の影響評価，第 55 回地盤工学研究発表会（京都），23-7-4-02，2020.
7. 王海龍，小峯秀雄，渡邊保貴.「締固めたベントナイトの膨潤圧発生に伴うモンモリロナイト底面間隔の遷移」土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会（名古屋），2020.
8. 伊藤大知，小峯秀雄，王海龍，後藤茂：モンモリロナイト底面間隔から観たベントナイト原鉱石の膨潤圧における膠結作用の影響評価，土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会（名古屋），2020.

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

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構　渡辺　勇輔

要約

断層近傍の地下水流動と核種の移行挙動を評価するため、断層周辺で採取した岩石試料を用いた収着試験および、水理地質構造モデルを用いた物質移行解析を実施した。その結果、断層周辺では粘土鉱物の含有量に応じた核種の保持機能が確認された。地質構造を模擬した地下水流動解析によって断層に囲まれた領域では断層近傍では破砕帯を経路とした地下水流動が確認されるが、地下水の流動速度は低下することが確認された。また、地下水流動解析と反応輸送解析の比較により、粘土への収着により核種の移行は遅延されることが示唆された。

○研究の背景・目的

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。特に複数の断層に囲まれた領域は周囲との周囲から水理的に隔離され、地下水の閉じ込め機能を有する可能性がある。また、断層部は母岩が変質した粘土物質が分布しており母岩を用いて予測される核種の収着とは異なる挙動を示すと予想される。本研究では、どのように断層が地下水流動や物質移行を抑制するバリアとして機能するのか把握することを目的として、収着試験や反応輸送解析から評価する。

○実施内容

断層周辺の水理地質構造モデルを用いた地下水流動解析、反応輸送解析を実施した。反応輸送解析では水理地質構造モデルの断層部に粘土鉱物による元素収着特性を与え、断層近傍における核種の移行挙動を観察した。

また、反応輸送解析へ反映させるパラメータを得ることを目的として、断層近傍から採取した岩石試料（瑞浪超深地層研究所 10MI22 号孔コア試料）を用いた鉱物組成分析および Cs，Eu，Ba 等の陽イオン元素の収着試験を実施した。断層コア、ダメージゾーン、健岩部における収着挙動を比較し、各岩相の収着特性を比較した。

○得られた成果と考察

①断層周辺の水理地質構造モデルを用いた地下水流動解析、反応輸送解析

断層を含む地質構造が地下水流動にどのような影響を与えるのか、様々な条件を設定して検討することを目的として、深部の健岩部内に並行する鉛直傾斜の断層 2 組が直交することで生じたコンパートメント領域を含む水理地質構造モデルを作成した（図 1)。地下水

流動解析の結果、複数の断層を組み合わせたコンパートメント構造内では地下水の移流が抑制され、移行距離が短くなることが確認された（図 2)。また、断層コアとダメージゾーンに粘土鉱物が含まれる場合の収着反応を考慮した反応輸送解析の結果、低透水性で地下水の移行経路とならない断層コアは収着性トレーサーの移行に影響がなく、水みちとなるダメージゾーンにおいて粘土鉱物に吸着することにより、移行が抑制されることが示唆された（図 3)。

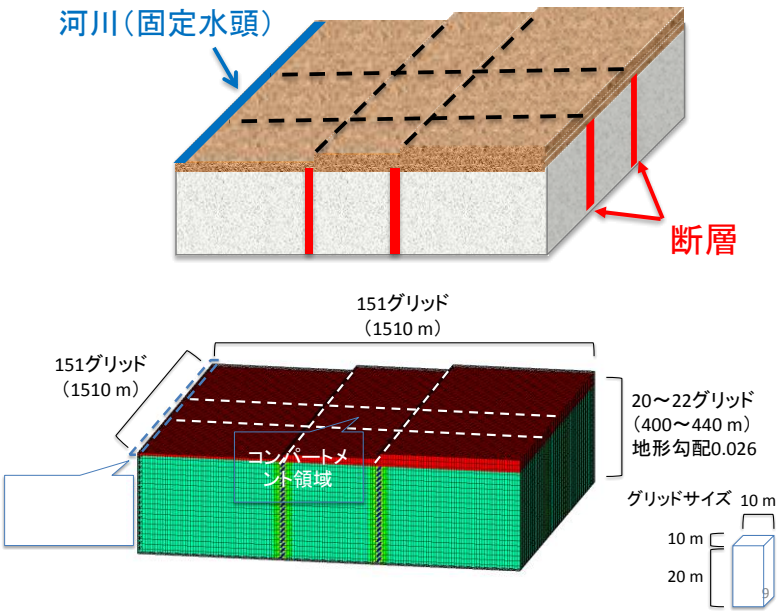


図 1 交差する断層を模擬した地質構造モデル
上：考慮した地質構造、下：作成した仮想水理地質構造モデル

深部の健岩部内に並行する断層からなる鉛直傾斜の断層系 2 組が直交することで生じたコンパートメント領域を含む水理地質構造を考慮した。断層は母岩（緑色グリッド）よりも低透水性の断層コア（青色グリッド)、高透水性のダメージゾーン（黄緑色グリッド）から構成される。図中右側の標高を相対的に高くすることで右側から固定水頭グリッドへ向かう地下水流動を生じさせた。

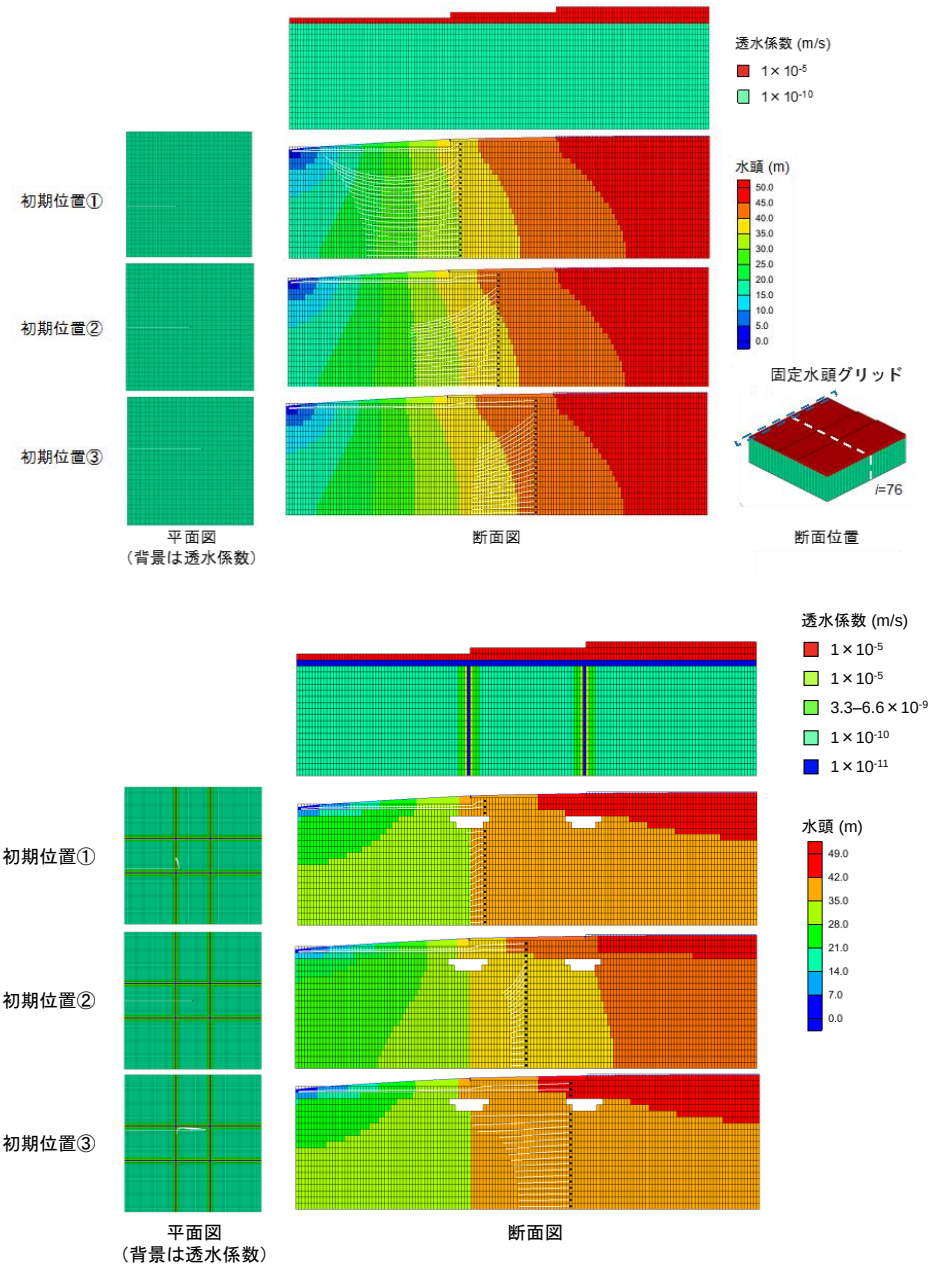


図 2 仮想水理地質構造モデルの地下水流動解析結果。上：断層を含まないモデルでの解析結果、下：断層を含むモデルでの解析結果

断面図中の黒丸が粒子追跡の開始点（①～③は全てコンパートメント構造内）、白線が 10 万年間の地下水流動による粒子移動距離を示す。断層を含まないモデルでは標高差によって生じた水頭分布に依存した地下水流動が確認されるが、断層を含むモデルではコンパートメント構造内に水頭差が生じず地下水が移流しにくい領域が生じている。また、断層部に到達した地下水はダメージゾーンに沿って地表面方向へ上昇する動きが確認された。

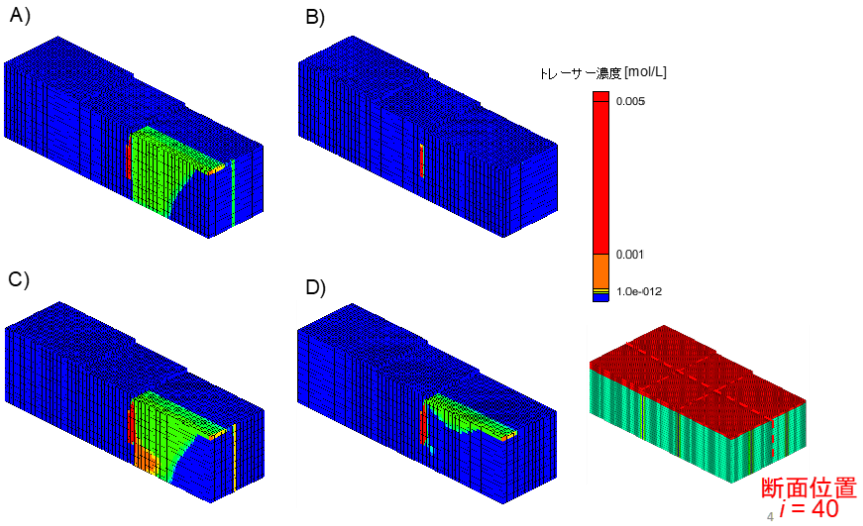


図 3 断層における収着を考慮した反応輸送解析結果
A）断層コアにイライトが分布、B）断層コアおよびダメージゾーンにイライトが分布、C）断層コアにモンモリロナイトが分布、D）断層コアおよびダメージゾーンにモンモリロナイトが分布

図 1 と同じ水理地質構造モデルのコンパートメント領域内のグリッドに一定濃度の収着性トレーサーを設定した。断層コアに 2%、ダメージゾーンに 1%の粘土鉱物が含まれる場合の収着反応を考慮した反応輸送解析を実施した。断層コアにのみ粘土鉱物を設定したモデル（A、C）ではトレーサーの移行抑制は小さく、断層コアとダメージゾーンに設定したモデル（B、D）では移行が抑制されることが分かった。粘土鉱物種別では、より収着性トレーサーを強く固定するイライトが含まれる場合に移行が抑制された。

②断層近傍岩石試料を用いた収着試験

花崗岩を母岩とする断層における化学組成、鉱物組成分析の結果、断層部では長石と斜長石の水鉱物反応によって多量の粘土鉱物（イライト、スメクタイト）が生成しており、それらの含有量が Cs、Eu、Ba の収着挙動に影響を与えることが示唆された（図 4）。脱離試験の結果、Cs はイライトへ強く吸着するため断層部で強く保持され、Eu と Ba は粘土鉱物への吸着が弱いため保持されにくいと考えられた（図 5）。

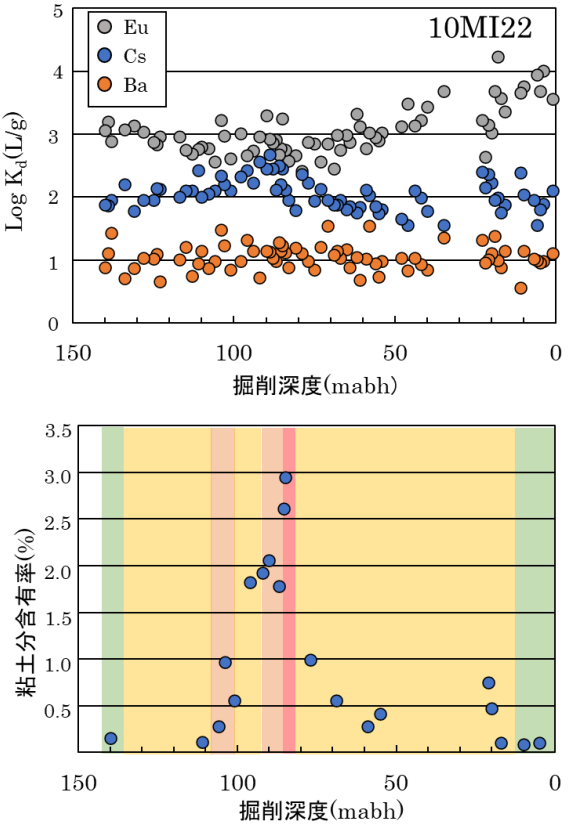


図 4 10MI22 号孔試料への Cs、Eu、Ba の収着試験結果
上：分配係数 K_d、下：粘土含有率
（色掛け部は各試料の地質区分を示す、
■: 非変質帯、■: 母岩の変質を伴う割れ目帯、■: 断層、■: 貫入岩）

10MI22 号孔は掘削深度約 85m～110m に主立坑断層が分布し、健岩部と比較して粘土分の含有率が高い（下図）。Cs は粘土分含有率が高い断層部で K_d が高い傾向が確認された。Eu は非変質帯の方で K_d が高い傾向を示し、Ba は地質区分に応じた K_d の傾向は確認されなかった（上図）。

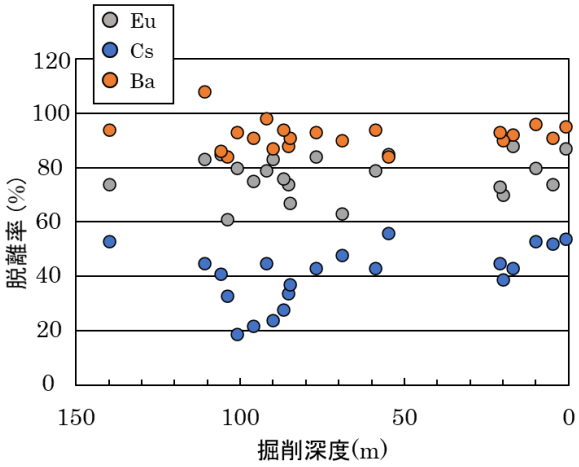


図 5 10MI22 号孔試料の Cs、Eu、Ba の脱離試験結果（脱離率は収着試験後の収着量からどの程度脱離したかを示す。）

脱離率は収着試験後の収着量からどの程度脱離したかを示す。Cs は Eu や Ba と比較して全体的に脱離率が低いが、特に断層部では脱離率が低い傾向が確認された。Eu や Ba は地質区分に応じた脱離率の変化は見られず、全体的に高い脱離率を示した。

〇今後の展開（地層処分事業への寄与を含む）

本研究の成果は、天然バリアにおける、収着を考慮した物質移行解析の一例となると今後期待される。今後処分場立地を検討する上で、その地域において単一の断層や複数の断層を含む場合は、本研究の手法によって物質移行評価に活用できる可能性がある。一方で、粘土鉱物は地下水の水みちとなる割れ目に多く分布すると考えられているが、原位置のダメージゾーンにおける収着挙動に実際どの程度の粘土鉱物が寄与しているのかは依然として不明である。そのため、割れ目試料への収着脱着試験等を行い、断層周辺における 3 次元的な収着現象の把握が今後の課題となる。元素毎の地球化学的性質（地下水中での存在状態、鉱物との反応性など）の理解により、地層処分における物質移行解析の精度の精緻化が期待できる。

〇外部発表リスト

学会発表

- 渡辺勇輔，柏谷公希, 2019, 放射性廃棄物の地層処分に係る萌芽的・基礎的研究－断層に生成した粘土鉱物への陽イオン収着特性－，令和元年度東濃地科学センター地層科学研究情報・意見交換会
- 青木月丸，柏谷公希，渡辺勇輔，小池克明，2020，仮想水理地質モデルを用いた核種移行に関する断層のバリア機能評価，資源・素材 2020.

別添資料３

別添資料３-１　地層処分に関する包括的知識の構成（学習指導要領）
別添資料３-２　地層処分に関する専門的知識の構成（学習指導要領）
別添資料３-３　人材育成セミナーアンケート用紙
別添資料３-４　人材育成セミナーアンケート結果

地層処分に関する包括的知識の構成（学習指導要領）

ジャンル	ねらい（教材の指導要綱）	目標とする到達レベル	学習項目	学習項目の概要	知識のソース
1. わが国における放射性廃棄物の特徴	わが国の原子力エネルギー利用の国家政策である核燃サイクル路線からの放射性廃棄物、その他の発生源の違いによる放射性廃棄物の種類と区分の考え方、発生源別の処分実施主体、予測発生量などの概括的な知識を理解する。	わが国で発生する（既に発生している）放射性廃棄物の種類、特徴を概略説明できる。	1.1 核燃料サイクルと放射性廃棄物	わが国の原子力政策のうちで重要な核燃料サイクルについて、そもそもの発想及び仕組み、もんじゅ計画が中止になったことによるよる路線の変更、現状でのサイクル施設の状況、核燃サイクルの運転から発生する放射性廃棄物の種類に関する情報を把握する。	・原子力白書 ・日本原燃資料 ・原子力産業会議（原産）資料
			1.2 放射性廃棄物の発生源ごとの種類と区分	わが国で発生する（既に発生している）放射性廃棄物の発生源、廃棄物の種類、区分の考え方、廃棄物管理の責任主体についての知識を取得する。着目しておくべきこととして、福島第一の事故により今後発生する放射性廃棄物の対応がある。	・政府刊行物 ・電気事業連合会（電事連）資料
			1.3 放射性廃棄物管理と廃棄物ストリームの実施主体	わが国における放射性廃棄物管理の形態は、諸外国と異なり極めて複雑で、発生者、保管・貯蔵者、処理責任者、処分責任者が全て異なる場合がある。このような特異な廃棄物ストリームについてその仕組みを理解しておくことは廃棄物管理を行う上で重要な知見となる。	・原子力白書 ・電事連資料
			1.4 放射性廃棄物の発生源と発生量	わが国で既に発生している放射性廃棄物及び今後発生する可能性のある廃棄物の種類と量（「ナショナル・インベントリ」という）の推定は、廃棄物ストリームの実施主体が異なることもあり、今後のわが国おける処分までの廃棄物管理を進めていく上で重要な情報となる。特に、福島第一の廃止措置から発生する廃棄物への対応は、その種類の多様性と発生量の多さから、将来世代に大きな負担を強いることになる点を理解しておく。	・原子力白書 ・JAEA 報告書 ・原産、電事連資料など
2. わが国における放射性廃棄物の処分形態	わが国では、放射能濃度区分に対応した処分形態が設定されている。代表的な処分形態である低レベル埋設処分と高レベル地層処分計画概要の歴史的な変遷と、発生源から処分に至るまでの廃棄物ストリームの最終形態となる処分施設の特徴を理解する。	わが国で規定されている放射性廃棄物区分に対応した処分形態とその設定理由が説明できる。	2.1 廃棄物の区分と処分方法	わが国の法律等で規定されている放射性廃棄物の濃度区分による処分形態の種類を理解するとともに、大きく分類される「低レベル廃棄物」と「高レベル廃棄物」の代表的な廃棄物ストリームの概要を把握する。福島第一の事故により、これまでの区分や処分形態が変化する可能性についても言及する。	・政府刊行物
			2.2 わが国での処分計画の経緯	現在、青森県六ケ所村で実施されている低レベル廃棄物埋設処分事業の歴史的な変遷、ガラス固化体を対象とする高レベル廃棄物の現状までの経緯について、大概的な知識として把握する。	・原子力白書 ・日本原燃資料
			2.4 浅地中トレンチ処分	浅地中トレンチ処分施設の概要および対象となる廃棄物の種類について把握する。対象は主として原子力施設の廃止措置から発生する極低レベル廃棄物（L3）であり、施設の敷地内に建設が予定されている。トレンチ処分にされる廃棄物の管理期間（規制除外値以下になる）としては 50 年程度が見込まれている。	・電事連資料
			2.5 浅地中ピット処分	青森県六ケ所村で展開されている浅地中ピット処分施設の概要と対象となる廃棄物の種類について把握する。六ケ所には電力会社が操業する原子力発電所の運転から発生する廃棄物を受け入れている。その他の機関からの廃棄物は対象とされていない。約 300 年間の 3 段階の管理期間を経て立入制限のない状態とすることを予定している。	・日本原燃資料 ・電事連資料
			2.6 中深度処分	青森県六ケ所村で展開されている浅地中ピット処分施設の概要と対象となる廃棄物の種類について把握する。六ケ所には電力会社が操業する原子力発電所の運転から発生する廃棄物を受け入れている。その他の機関からの廃棄物は対象とされていない。約 300 年間の 3 段階の管理期間を経て立入制限のない状態とすることを予定している。	・経産省資料 ・原子力学会資料
			2.7 地層処分	地下 300m以深に建設される処分施設で、ガラス固化体、寿命が長い TRU 廃棄物を対象としている。管理に依存しない多重バリアによる安全確保を原則としている。	・電事連資料 ・経産省エネ庁資料
3 高レベル廃棄物対策：地層処分の選択	高レベル廃棄物（HLW と使用済燃料）の処分対策として、多くの国で「地層処分」が選択されてきている。その選択の背景や理由、それに歩調を合わせたわが国での選択の歴史を知識として理解する。	世界各国とわが国で地層処分が選択されてきた歴史的背景とその理由及び主要な意思決定の概要が説明できる。	3.1 地層処分選択の歴史的背景	国際機関等での議論や報告書に地層処分の選択の背景を知ることができる。当時に記述された安全確保上重要な事項は、現在においても変わらず、その精神は現代世代に受けつがれていることを学ぶ。	・米国 NAS 報告書 ・OECD/NEA 報告書
			3.2 放射能の減衰特性が示唆すること	放射性廃棄物の重要な特性として、放射能核種の半減期があるが、放射能の影響は極めて長く持続するため、長期の安全確保を図るための方策として地層処分が選択されてきた大きな理由となっていることを理解する。	・NUMO 報告書 ・第２次取りまとめ
			3.3 高レベル廃棄物対策の種類	高レベル廃棄物の長期の安全性を確保するために、多くの方策が提案されてた。それぞれの特徴を理解し、その中で将来世代への負担を最小限とする永久隔離の考え方が選択されてきたことを理解する。	・第２次取りまとめ
			3.4 高レベル処分方法の選択肢	高レベル廃棄物の処分方法として、1980 年代に複数の方法が提案され、専門家による評価の結果として地層処分が選択されてきた。3.5 の資料とともに地層処分の選択は消去法ではないことを理解する。	・第２次取りまとめ ・POSIVA 報告書他
			3.5 処分方法の種類として検討された事例と評価	1980 年、米国で実施された処分オプションと専門家による相互比較の結果として米国では地層処分が選択され、国の法律に反映されてきた経緯を理解しておく。残念ながらわが国ではこのプロセスを経ていないことも留意しておく必要がある。	・米国環境影響評価報告書
			3.6 わが国で地層処分が選択された経緯	わが国で地層処分が選択されてきた経緯を知識として把握しておく。地層処分の研究開始がいつのまにか国の政策となっていることが理解できる。	・原子力委員会報告書
			3.7 処分方策に係る世界とわが国の動向	国際機関を含めた海外とわが国における地層処分選択の経緯を年表形式で理解する。	
4 地層処分の段階的な進め方	わが国を含めて、高レベル廃棄物の地層処分を進める各国では、処分地の選定から処分事業を段階的に展開する方策を採用している。その背景には、国際的な機関等からの提言もあり、各段階の意思決定において実施側だけでなく、多くのステークホルダーが参画し、次段階に進むことを納得することが長い処分事業の持続的な受容を醸成できると考えられている。ここでは、そのような段階的な進め方に至った背景及びわが国での処分地選定の動向、規制当局の係り方について学ぶ。	わが国で規定されている処分事業の段階的なアプローチの重要性と採用されてきた理由が説明できる。	4.1 OECD/NEA からの提言（2004）	地層処分計画を進める国々にとって、共通な課題は、処分計画の実現に向けての進め方、公衆や地元住民との関係をどのように築くかであった。1990 年代後半から段階的な進め方とともに意思決定の場面での住民参加のあり方、処分計画の可逆性などについて議論が進められてきた。これらを提言として取りまとめた報告書を取り上げ、背景および新たな進め方を理解する。	・OECD/NEA(2004)
			4.2 米国科学アカデミーからの提言（2003）	科学アカデミーは、処分事業の進め方として”Adaptive Staging Approach”を提唱した。この進め方は、従来の“Linear Staging Approach”ではなく、各段階で一度立ち止まり、実施してきたことを要件との適合性を判断し、場合によっては後戻りすることもあり得るという進め方である。この進め方は現在多くの国が採用していることもあり、その考え方の背景を理解する。	・”One Step at a Time(2003)”
			4.3 わが国の段階的な処分地選定プロセス	最終処分法で規定された３つの選定段階と各選定段階における要求事項について理解するとともに NUMO の処分地選定の進め方について把握する。	・最終処分法、懇談会資料

			4.4 科学特性マップ作成の背景	2017 年に公表された地層処分地の立地可能領域を明示する「科学特性マップ」作成の背景を理解するとともに科学特性マップの概要を把握する。	・科学特性マップ ・学術会議報告書
			4.5 地層処分場立地が想定される環境	科学特性マップが提示した立地環境の一つとして沿岸海底下立地がある。国の専門委員会で議論された沿岸海底下立地について、その利点と課題を把握する。	・沿岸海底下処分報告書
			4.6 原子力規制委員会の地層処分事業への係わり方	わが国における地層処分事業の段階的な進め方に関する原子力規制委員会（規制当局）の係り方について、現行法に基づき概説する。今後、事業の進展に伴い、原子力規制員会により地層処分に対する安全基準や審査指針が作成されることになる。	・原子炉等規制法
5 地層処分の倫理的側面と安全原則	地層処分を選択してきた背景には、科学・技術的な側面だけでなく、倫理・社会的な側面がある。本章では、地層処分の安全確保に着目した国際機関の指針、原則、技術規準について言及したのち、特に環境倫理的な側面や地層処分にとっての最適化をどのように考えるかについて学習する。	地層処分選択の背景にある倫理的な側面と安全原則が地層処分の方策としてどのように具体的に取り入れられているかが説明できる。	5.1 IAEA：地層処分に着目した基本指針（1980）	地層処分の初期段階において、IAEA の専門家グループは、「地層処分を実現させるために考慮すべき事項」を立地地点の特徴を考慮しない基本指針として取りまとめた。そこには、現在の地層処分の安全性を評価する時に用いる専門用語の多くが定義されていること、記述された考慮事項の多くは現在も不変であることを認識する。	・IAEA 基本指針
			5.2 IAEA：地層処分の安全原則と技術規準（1899）	IAEA が公表した本報告書は、地層処分の長期の安全確保に関する倫理的側面を考慮した安全原則と技術規準を取りまとめており、地層処分を語る上で最も重要な 3 つの原則が記述されているとともに、地層処分の評価で避けて通れない長期の時間枠での不確実性についても言及している。安全原則の基本となる本レポートの内容を理解する。	・IAEA 安全原則
			5.3 OECD/NEA：地層処分の環境・倫理に関する意見の集約 (1995)	地層処分の実務に携わっている国際的な専門家グループの地層処分が有する環境と倫理的な側面に関して意見を集約した報告書は、現在においても極めて重要な項目について言及している。この集約された意見書をベースに、何が地層処分固有の問題となるかについて言及する。	・OECD/NEA 報告書
			5.4 地層処分と ALARA の原則	原子力施設等を対象にした被ばく線量を最小とする ALARA の原則における行為の正当化、最適化、放射線防護の原則について説明するとともに、地層処分にこのような原則が適用できるかどうかについての意見書について言及し、地層処分の長期安全性には ALARA の原則は馴染まないことを理解する。	・ICRP の規定 ・ALARA に関する意見書
			5.5 地層処分における BAT と最適化	ALARA の原則から導出された被ばく線量の最適化と地層処分で求められる BAT（適用可能な最良な技術）との関係について説明し、BAT を適用した最適化とはどのようなことを示唆しているのかについて学習する。	・英国環境省報告書
6. 地層処分の安全確保方策	地層処分の長期の安全確保の基本的考え方となる「多重バリアシステム」の概念、安全原則とされている制度に依存しない安全確保の考え方、そしてこれらの安全確保策を評価する安全評価や性能評価の手法、現状における安全評価からセーフティケースの概念への展開について、歴史的な変遷を踏まえて地層処分の安全確保の考え方について学習する。	地層処分の長期の安全確保策の仕組みが通常の安全性確保と異なる考え方であることを明確に説明できる。	6.1 多重バリアシステムとは	地層処分の長期安全性を確保する方策は、基本となるのが「多重バリアシステム」であり、各バリアが有する安全機能（放射性核種の移行抑制など）である。ここでは、基本となるこれらの安全機能について、歴史的な流れを踏まえて概括的に取りまとめ、安全確保の仕組みを理解する。	・ITC2004 講義資料
			6.2 わが国における多重バリアシステムの考え方	わが国での多重バリアシステムの概念図は、多重防護の概念に近く、結果として、事故時への対応をイメージしてしまう説明がなされている。放射性核種の放出と最終的に人間の生活環境への移行現象は事故ではなく、通常の起こり得る現象であり、バリア本来が有する物質を閉じ込める機能を多重に組み合わせているという概念を説明すべきであることを理解する。	・電事連資料 ・NUMO 資料、IAEA 報告書
			6.3 深層防護の考え方	原子力発電所の安全原則として用いられている「深層防護：Defense in Depth」の仕組みについて説明し、地層処分の多重バリアシステムとは異なる方策であることを 6.2 での考え方を踏まえて理解する。	・NEA 報告書、IAEA 報告書
			6.4 安全評価の導入	極めて長期にわたる地層処分の安全性については、直接的には実証できないことから、ある前提に基づく安全評価という手法が開発され適用されてきた。その前提となる考え方、評価の方法について概括的に理解する。	・NEA 報告書 ・第 2 次取りまとめ
			6.5 安全評価からセーフティケースへ	地層処分の長期安全性を示す方法として安全評価（性能評価）手法が用いられてきたが、実証できない安全評価の計算結果だけでは、一般の人を含むステークホルダーに安全性を受け入れてもらうことが難しいと認識されてきたことから、セーフティケースという安全性に係る論拠やエビデンスを集約して説明する方策が用いられるようになってきた。その歴史的背景やセーフティケースが必要となった理由及び構成する要素について理解する。	・NEA 報告書 ・IAEA 報告書
7. 地層処分固有の取組み	これまでの説明から地層処分固有の取り組みがあることが分かる。例えば、長期の評価に不可避な不確実性への取り組み、評価の時間枠への対応、パッシブセーフティという安全確保の原則、多くの専門家の知識を必要とする学際的な取り組み、長期の事業に対する戦略的な環境影響評価への対応などについて学ぶ。	地層処分固有の課題への取り組みについて、その特徴と背景及びわが国を含めた各国での取り組みについて説明できる。	7.1 長期の安全評価と付随する不確実性	地層処分の長期の安全評価は 10 万年を超えて実施される。そこには必然的に不確実性の増大という要素が存在し、それにどのように対処していくのかが、地層処分研究の主要なテーマであるといわれている。安全評価は予測ではなく、現在の状態を前提とした処分システムの性能を評価する行為であるとするかつて取り組みから、不確実性を含めたセーフティエース構築の流れに変化してきたことを理解する。	・JAEA 報告書 Heisenberg 理論
			7.2 長期評価の時間枠への対応：OECD/NEA レポート	地層処分で取り組む長期の時間枠に関する国際的な会議の中で、不確実性についてどこまで対応するのか、セーフティケースの論拠が準備できない時間領域はどのように対処するのかといった議論がなされた。それらの議論の背景と集約された意見を理解し、評価時間に対する問に答えられる知識を身につける。	・OECD/NEA 報告書 IAEA 資料、NEA
			7.3 パッシブセーフティの導入	放射性廃棄物処分の重要な安全原則の一つとされている「制度的管理に依存しない安全確保」を具現化したのが地層処分の選択と多重バリアシステムによる安全確保策である。なぜパッシブな仕組みが必要かについての背景を理解する。	・IAEA 報告書
			7.4 学際的なアプローチ	地層処分の実現に向けては、多分野の知識と知見の集約が不可欠であることから、異なる専門家の意見を地層処分分野にどのように集約するか、議論のプラットフォームの事例を含めて把握する。	・原子力学会報告書 ・NUMO 報告書
			7.5 戦略的環境影響評価	地層処分事業は、調査が開始されて処分場が閉鎖されるまでに 100 年間程度、その後、未来永劫にわたり地下の埋設物は存在する。処分場の建設・操業時の周辺環境の影響を事前に評価する戦略的な環境影響の必要性、多くの国が長期の安全評価を含めて「環境影響評価書：EIS」を公表している状況を踏まえ、将来的な環境影響に対してどのように対応していくかについて理解する。	・環境省資料
8. 地層処分に対する信頼性の醸成	地層処分計画を進める上で重要となる信頼感の醸成について、科学技術的な視点と社会的な視点からのアプローチに関する国際機関からの提言、一般大衆が科学・技術に対する不信感をつのらせる要素などについて言及し、地層処分の実現に向けての信頼感を醸成するには、どのように対応していくかについて学ぶ。	科学技術的な視点と社会的な視点からステークホルダーの信頼感を醸成していく方策について概要を説明できる。	8.1 科学・技術的な視点からの信頼感醸成	地層処分の科学・技術的な視点からの信頼感の醸成は、基本的に地層処分の長期安全性がどのように確保されているのか、その仕組みを丁寧に何度も説明していくことで得られる。段階的に更新されていくセーフティケースをプラットフォームとして活用することも有力な手段となることについて言及する。	・OECD/NEA 報告書
			8.2 社会学的な視点からの信頼感醸成	社会的な視点からの信頼感の醸成は、国際機関でのフォーラムの活動など、多くの教訓に学ぶべき点がある。そこでは、公平な対話の機会の整備、学習の時間の確保、異なる性格の人々の間のコミュニケーションの機会など既に実施されているアプローチが用いられている。	・SCF 報告書、 ・日本学術会議報告書

			8.3 不信感をもたらす要素	一般の大衆が専門家の議論の何に不信感を抱くか、例えば、二人の専門家が別の答えを出すことは多様性の観点からは意味があるが、大衆から見ればまだ、合意された答えがないように感じてしまう。また、福島第一原発の事故の前後における科学への信頼性に関する調査事例では、科学技術への不信感は一瞬のうちに生じることを示している。	・ITC2004 講義資料
			8.4 地層処分の専門家と他の専門家の認識の乖離	地層処分に長く携わっている専門家の考え方は、それが当たり前のこととしてとらえられていることでも、他の分野の専門家からすると理解し難いものになるという現実を直視することが必要である。ギャップをどのように埋めるのかが専門家に課せられた役務となることを理解する。	・原子力学会報告書
			8.5 ナチュラルアナログの活用策	地層処分の安全確保の仕組みの説明に、自然界の類似の仕組みを用いるのは、地層処分の安全性が直接的に実証できないことから有力な手段となることから、ナチュラルアナログはセーフティケースの重要な役割の一部を担うことを理解する。	・ITC2004 講義資料 ・ナチュラルアナログ・ワーキング・グループ資料
			8.6 考古学的アナログの活用策	地層処分の人工バリアに用いられる材料が、実験の期間を超えて長期に健全性を保持していることについて、長く保存されてきている考古学的な類似物（アナログ）を用いて説明する方法がセーフティケースのエビデンスとして活用されていることを理解する。	・ITC2004 講義資料 ・ナチュラルアナログ・ワーキング・グループ資料
9. 地層処分の実現性に関する報告書	地層処分の研究を始めるにあたり、先輩諸氏がバイブルとして手にした 2 つの報告書の概要を紹介する。国際機関は地層処分の安全概念や原則等について提唱してきているが、スウェーデンの KBS-3 レポートやスイスの Gewähr1985 レポートは、自国に分布する地層を対象に具体的な処分場概念を構築し、その技術的実現性について安全評価とともに公表した最初の包括的な報告書である。これらのレポートが作成された背景、記述された概要について学習する。	地層処分の実現性明示について先駆的に実施された評価書の概要、わが国が学び取った教訓について説明できる。	9.1 地層処分研究のバイブル	1980 年代に地層処分の研究開発に携わった研究者が手にした二つの報告書、スウェーデン KBS-3 レポートとスイス Project Gewähr1985 レポートおよびその影響を受けたわが国の第 2 次取りまとめについて紹介する。	
			9.2 スウェーデン SKB が公表した KBS-3 レポート（1983）	KBS-3 レポートは、原子力発電所の運転認可更新の要件として、スウェーデン国内での使用済燃料の地層処分の実現性を明示する報告書として SKB が作成した。KBS-3 レポートは、花崗岩を対象に、処分深度を設定し、具体的な処分場のレイアウト設計、人工バリアの仕様設定、定置方法など工学的な検討と多重バリアによる安全評価を総合的に取りまとめた世界で最初の報告書である。	・SKB KBS-3 レポート(1983)
			9.3 スイス NAGRA が公表した Project Gewähr1985 レポート(1985)	Gewähr1985 レポートは、スウェーデンと同様に原子力発電所の運転認可更新の要件として、再処理から発生するガラス固化体と低レベル放射性廃棄物を対象とした地層処分のスイス国内における実現性を明示する報告書として NAGRA が作成した。スイス北部の深部に分布すると推測される花崗岩を対象に、処分深度を設定し、人工バリアの仕様を定置方法も含めて設計し、安全評価を行った包括的技術報告書である。廃棄物の発生予測、インベントリの設定など現在実施されている各国の報告書の原形となる様式を整えている。	・NAGRA Project Gewähr1985
			9.4 日本サイクル機構が公表した第 2 次取りまとめ(1999)	第 2 次取りまとめは、原子力委員会からの要求を受け、日本国内における高レベル廃棄物（ガラス固化体）の地層処分を実現するための知見と技術が存在することを明示する報告書で、サイクル機構（現、日本原子力機構）が作成した。サイトを特定せず、代表的な岩種（結晶質岩と体積岩）を対象に、レファレンスの処分場を設計し、国際機関で提唱されている安全評価の手法に準じた評価を実施している。	・JNC 第 2 次取りまとめ
			9.5 二つの代表的な処分概念のわが国への影響	KBS-3 と Gewähr1985 の処分概念、特に人工バリアの概念は異なっている。それぞれの特徴について設定された背景も含めて紹介するとともに、第 2 次取りまとめがこれらの概念を踏襲し、そのまま NUMO も引き継いでいることに言及する。	
10. 地層処分が直面する社会的な側面	地層処分の実現には、地層処分という方策に対する国民の理解と処分場建設への受入れが極めて重要な要素となる。これらの理解や受入れは、「総論賛成」「各論反対」といった社会的・環境倫理的な側面を有する。本章では、このような社会的な側面に着目し、地層処分との関係について学習する。	地層処分事業が有する社会学的な側面の説明とその対策について現状進められていることが説明できる。	10.1地層処分と NIMBY	地層処分場は、いわゆる迷惑施設として立地に際しての受入れが極めて難しい。NIMBY と呼ばれるこれらの反応について、何が原因となっているのか、またどのように対応するのかの考え方を理解する。	・日本学術会議報告書、文献資料
			10.2地層処分のリスクマネジメントとリスクコミュニケーション	地層処分が有する潜在的な放射線被ばくリスクに対するリスクマネジメントとリスクコミュニケーションの手法についての概要と地層処分に適用した場合の事例を学ぶ。	・亀井利明論文 ・環境省資料
			10.3信頼性を醸成する国際フォーラムの活動	OECD/NEA の放射性管理委員会が設立した The Forum on Stakeholder Confidence (FSC) の活動について紹介し、活動の中で学習されてきた「信頼感の醸成に必要となる要素」について概要を把握する。FSC の活動は、実際に地層処分の立地に直面している各国でのワークショップを通しての意見交換により、NIMBY への対応などの教訓がまとめられている点に特徴がある。	・OECD/NEA 報告書 ・FSC 報告書
			10.4地層処分の可逆性と回収可能性	わが国をはじめ世界各国では、地層処分の受入れに対する理解促進のために、段階的に進められる意思決定時に「可逆性と回収可能性」の制度を取り入れている国が多い。その背景にある「意思決定時の世代間の公平」といった環境倫理学な側面について学習する。	・OECD/NEA 報告書 ・最終処分法基本方針
			10.5協調的アプローチと段階的アプローチによる意思決定	地層処分の持続的な受け入れを図るには、意思決定に対して世代間の公平な制度を準備すること、そのためには協調的アプローチを段階的に進める重要性が指摘されている。そのアプローチの背景と取組み方を理解する。	・OECD/NEA、大沼他レポート
			10.6パブリック・プライベート・パートナシップ	地層処分事業の特徴および処分場を受け入れてくれる地元との共生の形態は、パートナーとして処分事業を進めることで持続する形態が構築できるのではという提唱について、その背景と実現可能性について理解する。	・米国の PPP の事例 ・NUMO 資料
11. 地層処分計画における各国の挫折と成功例からの教訓	社会的側面の具体例として地層処分事業を順調に進めている各国の歴史的背景を概説し、その中で経験した挫折、モラトリウムなどを様々な工夫で克服し、事業を軌道に乗せている理由を教訓として把握する。 各国によりおかれた社会的環境が異なるが、基本的に処分場を受け入れてくれた地域住民とのコミュニケーションや制度的なバックアップなどが存在する。また、国の関与の在り方も重要なポイントとなっている点、実施主体の組織的対応、民意の集約方法などの具体例を学習する。	地層処分の長い歴史の中で、多くの国が経験してきた挫折とそれを乗り越えてきた成功例とその原動力について、知識情報として把握するとともに、わが国の地層処分事業への教訓として説明できる。	11.1スウェーデンでのサイト選定方法（公募型から申入れに）	スウェーデンの実施主体である SKB が初期の処分地選定段階で用いた公募方式の失敗から、規制当局も含めた地域とのコミュニケーションの場と機会を多く設定し、申し入れ方式で処分地を選定していた事例を紹介する。	・SKB RD&R レポート
			11.2スイスでの住民投票（EKRA の概念、国の関与）	スイスの実施主体である NAGRA が経験した住民投票での敗北と専門委員会（EKRA）の助言、連邦政府の積極的な関与、原子力法の改正からの申し入れ方式を採用した処分地選定の現況を紹介する。	・EKRA 報告書 ・NAGRA 資料
			11.3米国での連邦政府主導のサイト選定（ブルーリボン諮問）	政治的な決定によるユッカマウンテイン処分計画の挫折、ブルーリボン委員会からの諮問、Re-thinking 報告書からの提言などから、現況も凍結状態にある処分地選定プロセスについて言及する。	・Brue ribbon 報告書、 ・Re-thinking(2002)
			11.4英国でのサイト選定の失敗例と新組織によるアプローチ	英国 NIREX が実施した初期段階での処分地選定プロセスの不透明さが招いた失敗から、新たな組織 NDA による新アプローチの状況を紹介する。	・Nirex 報告書(1998)、 ・NDA 報告書(2002)
			11.5フランスにおけるモラトリアムと新アプローチの成功	フランスの ANDRA が実施した初期段階での地下研究施設選定の失敗、議員の関与によるモラトリウム、地下研究施設での活動を通じての新たなアプローチによる処分候補地区選定の成功例を紹介する。	・ANDRA Dossier2005
			11.6カナダの新アプローチの成功例	カナダにおける初期段階の科学・技術アプローチによる地層処分の理解促進の失敗と新組織 MWMO による段階的な処分地選定プロセス、申し入れと公募を組み合わせが順調に進められている状況を説明	・NWMO 報告書（A Way Forward ）
			11.7 フィンランドの成功例	フィンランドは、1980 年代前半に作成されたマイルストーン通りに処分地選定が順調に進めることができている唯一の国である。その背景にあった活動や地層処分が受け入れられた理由について紹介する。	・POSIVA 報告書（EIS 2000）

地層処分に関する専門的知識の構成（学習指導要領）

ジャンル	ねらい（教材の指導要綱）	目標到達レベル	学習項目	学習項目の具体的な内容	知識のソース
1. 地層処分の対象となる放射性廃棄物の特徴	わが国で地層処分の対象となる高レベル放射性廃棄物（HLW）に分類されるガラス固化体及び地層処分される低レベル放射性廃棄物（TRU）の特徴とインベントリ（含有核種と濃度）について理解する。	ガラス固化体、使用済燃料、TRU 廃棄物の特徴とインベントリについて処分の異なる専門家に説明ができる。	・ 高レベル放射性廃棄物の特徴	・ 高レベル放射性廃棄物（HLW）の特徴とインベントリ	・ 第２次取まとめ
			・ 地層処分される低レベル放射性廃棄物（TRU 廃棄物）の特徴	・ TRU 廃棄物の特徴とインベントリ（なぜ TRU 廃棄物と呼ばれるようになったかの背景も含めて）	・ TRU 第２次レポート
2. 地層処分固有の学際的アプローチ	地層処分固有の特徴として、多方面の専門分野を集約する学際的アプローチを必要とする点がある。この認識に立ち、4.以降の地層処分特有の専門分野の内容と相互の関係を体系的に理解する。	地層処分に係る学際的なアプローチについて専門家に体系的に説明できる。	・ 地層処分の実現に係る学際的アプローチの体系	・ 地層処分の実現に必要となる専門分野について、4.以降に教材を総括して説明	・ 独自に教材を作成
3. 地層処分に係る法律、関係規制基準	地層処分事業が準拠すべき法律（最終処分法、改正基本方針、原子炉等規制法）それぞれの関係と遵守すべき事項について理解をしておく。また、改正基本方針で示された処分地選定で国の関与、理解を得るための可逆性・回収可能性（R&R）の導入の背景を理解する。	処分事業に係る法律、原子炉等規制法などの等安全規制の在り方、2016 年の基本方針の改正の内容について背景を含めて説明できる。	・ 最終処分法	・ 最終処分法（2000）の設定の背景、概要	・ 処分懇談会の資料等
			・ 原子炉等規制法	・ 地層処分事業の許認可と原子炉等規制法との関係	・ 法律
			・ 改正基本方針	・ 最終処分法改正基本方針で示された新たな取り組み（国の関与、可逆性・回収可能性などの制度）の具体的な展開	・ 閣議決定された改正基本法
4. 地層処分の処分地選定と選定基準	地層処分の処分地選定に係る歴史的変遷、公募方式と申し入れ方式、国の関与の在り方、国が公表した科学特性マップの背景、NUMO の処分地選定考慮事項など、一連の流れについて時系列的にまとめて理解する。	わが国における処分地選定の方法とその設定の背景、選定の基準（考慮事項）、科学特性マップと設定の背景について説明ができる。	・ 最終処分法に示された段階的な処分地選定と調査項目	・ 法律で規定された段階的処分地選定における要求事項（公募と申入れ方式）	・ 最終処分法、NUMO の公募資料、改正基本方針
			・ 処分地選定における考慮事項	・ NUMO が初期に設定した選定の考慮事項とその背景	・ NUMO の公募資料、技術報告書
			・ 科学特性マップ作成の背景	・ 科学特性マップ作成の背景と内容および専門家の議論	・ エネ庁委員会資料
5. 地層処分固有のサイト特性評価技術	地層処分の安全性を評価するには、立地点の地質環境（地質・地質構造、地質水理構造、地化学特性、力学特性）の現状の把握と将来的な変遷について理解する必要がある。調査と評価を結び付ける手法、Geo-synthesis の考え方、地質環境モデル（SDM:: Site Description Model）の作成方法、気候変動と隆起侵食を考慮した SDM 作成方法について理解する。	段階的に進められるサイト特性調査の実施概要および各段階で作成される SDM の特徴、長期変遷モデル構築の方法と具体例が説明できる。	・ 地質環境調査技術	・ 立地点の地質環境を把握する調査・分析技術の現状	・ JAEA、CRIEPI 資料
			・ SDM の作成技術	・ 調査システムフロー、Geo-synthesis の考え方と SDM の作成方法と作成例（ＮＵＭＯ包括的技術報告書）	・ 原環センター資料、Geo-synthesis は NAGRA、SDM は SKB の概念
			・ 長期変遷モデル作成技術	・ 地質環境の長期変遷モデル作成の考え方と作成例	・ NUMO 包括的技術報告書
6. 地層処分における天然事象の影響評価	地層処分の長期安全性に影響を及ぼすとされる天然事象の二つの評価手法（確定論的評価手法、確率論的評価）について説明し、現状での火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食作用に対する影響評価事例を理解することで、地層処分における天然事象の取り扱い方について説明できるようにする。	テクトニクスに起因する火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食作用及気候変動による海水準変動が地層処分システムに与える影響を評価する手法と具体例が説明できる。	・ 評価の期間と評価手法	・ 外挿法と様式化を用いた確定論的評価手法とロジックツリー・専門家の意見集約を用いた確率論的手法の相違点	・ NUMO 包括的技術報告書
			・ 火山・火成活動	・ 火山・火成活動の影響評価事例	・ 同上
			・ 地震・断層活動	・ 地震・断層活動の影響評価事例	・ 同上
			・ 隆起・侵食作用	・ 隆起・侵食作用の影響評価事例	・ 同上
7. 地層処分の長期安全評価手法	地層処分の安全性は直接確認できないことから、安全評価という手法が整備されてきた。一方システムとして性能を評価する研究も多く進められてきている。ここでは、安全評価と性能評価の違い、安全評価に用いられるシナリオ設定方法と FEP の活用方法、セーフティケースの具体的な論拠構築の方法、評価基準の種類と適用事例について説明できる知識を準備する。	長期安全評価におけるシナリオ構築手法、核種移行モデル、パラメータ設定と安全評価の結果及びセーフティケースの論拠としての安全評価の在り方、評価の基準の種類についてその設定の背景を含めて説明ができる。	・ 安全評価と性能評価手法	・ 安全評価と性能評価の相違点	・ IAEA, NEA, 原子力委員会資料
			・ シナリオ設定と FEP との関係	・ シナリオ設定手法（ボトムアップとトップダウン）におけるストーリボードの活用と FEP の役割	・ NUMO 技術報告書
			・ セーフティケースの論拠構築方法	・ セーフティケースの論拠となる評価結果、エビデンス、ナチュラルアナログ、専門家の判断など Multiple Lines of Evidence	・ JAEA 研究報告書、NUMO 技術報告書
			・ 評価基準の種類	・ 被ばく線量基準、リスク基準、天然バックグランド、フラックスなどの異なる指標の考え方と照査基準としての用い方	・ IAEA, ICRP 資料 ・ 原子力規制庁での最新の議論
8. 地層処分事業に適用される工学技術	地層処分事業を実施するために必要となる設計・施工技術について、これまでの技術報告書等で記述されている事項を簡潔に説明し、設計因子、安全機能と設計要件との関係、建設・操業・閉鎖・回収・環境影響評価に必要となる現状レベルの技術と今後開発すべき課題について理解する。地層処分ではこのほか調査・評価技術を含めて BAT（Best Available Technology）を適用するとの考え方もあることから、将来的な技術（ロボットの活用など）についても言及する。また、処分場の閉鎖までに遭遇する事故や災害の種類、それらへの工学的な対応策について現状で考えられていることを理解する。	地層処分の実現に向けての必要となる様々な工学技術について、処分場の設計・建設・操業・閉鎖及び管理技術に関する最先端の技術とその用い方の説明ができ、事業期間中に遭遇が予測される事故や災害への対応策・予防策・緩和策も含め、環境評価と保全に係る技術と対策が説明できる。	・ 人工バリアシステムの設計・製作技術	・ 人工バリアシステムの設計に係る安全機能と設計要件の考え方	・ 第２次取りまとめ、NUMO 資料
			・ 処分場のレイアウト設計技術	・ 処分場レイアウト設計をする場合の考慮事項と実施例	・ NUMO 資料
			・ 処分場の建設技術	・ 地下施設を建設する場合に適用が考えられる施工技術の現状	・ 第２次取りまとめ、NUMO 資料
			・ 処分場の操業技術	・ 操業技術として開発されてきた技術の特徴	・ 第２次取りまとめ、NUMO 資料
			・ 処分場の閉鎖技術	・ 埋戻し、プラグの設計、施工技術の特徴	・ NUMO,JAEA 資料、HRL での実証試験
			・ 廃棄体の回収技術	・ 廃棄物容器の回収に係る技術開発の現状	・ 各国の取組み、NEA：R&R
			・ 処分場の環境影響評価技術	・ 処分場建設が及ぼす周辺への環境影響の種類と対応策	・ NUMO 資料
			・ 処分場閉鎖までの安全対策	・ 閉鎖までに遭遇する災害、事故の種類とその対策例	・ NUMO 資料
9. 地層処分の閉鎖措置に向けてのモニタリングとサーベイランス技術	地層処分の安全原則では、制度的な管理に依存しないパッシブセーフティを基本としているが、処分の安心感を得るために状態変遷を把握するモニタリングやサーベイランスの導入についても国際的に議論されている。実務における制度的管理の在り方、管理の手法について理解する。また、スイス、フランス、カナダの処分計画にみられるパイロット施設の位置づけ、役割を理解する。	改正原子炉等規制法に定められた「閉鎖措置」に対する具体的なアプローチ、モニタリングの種類と方法について具体例とともに説明ができる。	・ 地層処分と制度的管理の仕組み	・ 制度的管理の種類と期間（処分事業の廃止措置との関係）	・ IAEA 資料
			・ モニタリングの種類と役割	・ モニタリングの種類と方法	・ EU Modern プロジェクト
			・ サーベイランスの種類と役割	・ サーベイランスの種類と方法	・ IAEA TEC DOC
			・ 地層処分場の閉鎖措置とパイロット施設	・ 閉鎖措置の意思決定に向けての「パイロット施設」の位置づけと役割	・ スイス EKRA 概念、フランス ANDRA 資料、カナダ NWMO 資料
10. 地層処分の研究開発と地下研究施設の役割	地層処分事業の展開にとって地下研究施設は大きな役割を果たしていることを世界各国の処分計画を通じて理解する。地下研究施設は、地層処分の実現に向けてのコンフィデンス・ビルディングを醸成する場であること、処分固有の研究開発や技術の実証の場として活用されていることを実例で示す。	地層処分実現に向けての研究開発の歴史、研究開発における地下研究施設の役割、処分地での実証試験などについて具体的に説明ができる。	・ 世界の地下研究施設	・ 世界の地下研究施設の位置と特徴	・ NEA 資料
			・ 地下研究施設の役割	・ 地下研究施設の位置づけと役割	・ 米国 NRC、NEA 資料、JAEA 資料
			・ 地下研究施設での研究開発	・ 地下研究施設で実施されている研究開発	・ NEA 資料、JAEA 資料
			・ 処分候補地での処分技術の実証	・ 精密調査段階における地下調査施設での実証試験の種類と役割	・ 電事連報告書
11. 地層処分と社会科学なアプローチ	地層処分の長期安全性は、潜在リスクであることの説明の仕方、パッシブセーフティなど一般常識との乖離する概念に関する説明の方法、処分事業をパートナーとして実現する仕組みの重要性について説明できる知識を準備する。	社会学的な側面と倫理学的な側面から地層処分への取組み、リスク共有の考え方、パートナーシップの導入などの方策について説明できる。	・ リスクコミュニケーションの役割	・ 地層処分の長期リスクは潜在的なリスクであることを伝える手法	・ 米国 DOE 資料、NEA 資料
			・ 安心感の醸成	・ 安全と安心に関する議論、リスク共有の考え方	・ 原子力学会
			・ パートナーシップ育成	・ Public Private Partnership の仕組みと役割	・ 米国の実例

2020 年度人材育成セミナー

地質環境モデル(SDM)の構築に向けて
～地下水データをみる･よむ･とく～
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「**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開発の一環として開催したもので、皆様にはモニターとしてご参加いただきました。
このアンケートへの回答も人材育成セミナーに組み込んでおります。

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。

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１２日（火）期限厳守！**

【アンケート提出先】 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！！

1：あなた自身について

まずはあなた自身について教えてください。

1.1 年代	歳代（20,30 などを記入）
1.2 最終学歴（学士、修士、博士）	
1.3 放射性廃棄物処分関連研究等の従事経験年数 ※経験年数は、年単位で記載してください。 例）1 年未満 ⇒経験年数 1 年 例）1 年と 3 ヶ月 ⇒ 2）	年
1.4 あなたの専門分野（従事経験のある技術分野）複数選択可	□地質環境調査評価技術 年 □工学技術 年 □安全評価技術 年 □その他（以下に記入してください） ・○○○○○○○○ 年 ・○○○○○○○○ 年
1.5 自分は積極的な方だと思いますか 5：積極的 4：やや積極的 3：普通 2：あまり積極的でない 1：積極的でない	（数字で回答）
1.6 あなたは仕事と趣味（ライフ）を両立させていると思いますか 5：そう思う 4：やや思う 3：普通 2：あまり思わない 1：そう思わない	（数字で回答）
1.7 自組織への帰属意識と対外関係 1.7.1 あなたの仕事において、帰属していると思うグループ（社内）の規模（人数）は？	人
1.7.2 あなたが帰属していると思うグループ以外（社内）との交流度合いは？ 5：高い 4：やや高い 3：普通 2：やや低い 1：低い	（数字で回答）
1.7.3 あなたの仕事において、社外の人物との交流度合いは？ 5：高い 4：やや高い 3：普通 2：やや低い 1：低い	（数字で回答）

2：セミナープログラムの構成

今回のセミナープログラムではテーマを「地下水」に絞り、講義や現場見学、実習を通じて土台の知識を学んだ後、**総合学習**のグループワークで多様な専門家とディスカッションする流れでした。

2.1：セミナーの満足度・気付き

セミナープログラムを受講してみてどう感じましたか。

回答の選択肢； 5：とても良かった 4：やや良かった 3：普通 2：あまり良いとは言えない 1：良いとは言えない

	回答（5 択）	ご意見記載欄（なぜそう思いましたか）
2.1-1 **全体**としての満足度		
2.1-2 **総合学習**の満足度		
2.1-3 **座学**の満足度		
2.1-4 **見学**（エクスカーション）の満足度		
2.1-5 **実習**（採水、滴定）の満足度		
2.1-6 講師の工夫、助言		
2.1-7 テーマ設定		

2.2：地下水を学ぶ

総合学習に先がけた座学・実習・見学に関してお尋ねします

		５段階評価	回答	ご意見記載欄（なぜそう思いましたか）
2.2-1 座学１ 「地下水に関する基礎知識」 セミナーの実習など受講するにあたり、基礎知識を理解するのに役に立ちましたか。		5：役に立った 4：やや役に立った 3：どちらでもない 2：あまり役に立たなかった 1：役に立たなかった		
2.2-2 座学２ 「水質からみた地下水流動」 水質・同位体から見た地下水流動モデルの考え方の理解に役立ちましたか。		5：役に立った 4：やや役に立った 3：どちらでもない 2：あまり役に立たなかった 1：役に立たなかった		
2.2-3 座学３ および 座学５ 「地下水流動解析（１次元）、（２次元）」	エクセルを用いた解析はうまく出来ましたか。	5：出来た 4：やや出来た 3：どちらでもない 2：あまり出来なかった 1：出来なかった		
	モデルと解析手法を理解するのに役立ちましたか。	5：役に立った 4：やや役に立った 3：どちらでもない 2：あまり役に立たなかった 1：役に立たなかった		
2.2-4 座学４ 「富士山地域の水文地質の紹介」 広域地下水流動調査の紹介は見学の予習として役に立ちましたか		5：役に立った 4：やや役に立った 3：どちらでもない 2：あまり役に立たなかった 1：役に立たなかった		
2.2-5 座学で学んだことは自分の仕事に役立ちますか。役立つとしたらどのように役立ちそうですか。		5：役に立つ 4：やや役に立つ 3：どちらでもない 2：あまり役に立たない 1：役に立たない		

	ご意見記載欄		
2.2-6 実習 1 湧玉池での簡易水質測定とサンプリング（現地調査の体験）	（実習を経験して感じたことについてご記入下さい）		
2.2-7 実習 2 重炭酸滴定と水質ダイアグラムの作成	（実習を経験して感じたことについてご記入下さい）		
2.2-8 見学 1 地形見学（富士川ＳＡ）	（見学をして感じたことについてご記入下さい）		
2.2-9 見学 2 海域等の見学（みなと公園）	（見学をして感じたことについてご記入下さい）		
2.2-10 見学 3 ボーリング調査現場	（見学をして感じたことについてご記入下さい）		
2.2-11 （実習、見学全般） 講義と連動する形でフィールドを見るのは学習に効果的だったと思いますか。	5：役に立った 4：やや役に立った 3：どちらでもない 2：あまり役に立たなかった 1：役に立たなかった		（なぜそう思いましたか）
2.2-12 （実習、見学全般） 体験してみたい実習、見学してみたい現場がありましたらご記入下さい			

3：総合学習（アクティブラーニング）に関して

頭だけでなく手も動かして考えて〈専門性〉のある**知識（ハード）**を学ぶとともに、自分の考えや理解を相手の専門家に伝わるように整理して話す、他の専門家の話を聞いて事実情報とメッセージを聞き分ける、双方ともに誤解してしまう可能性にも配慮するといった**〈専門性〉を使いこなすソフト**面の学習にも注目した企画でした。

3.1：モデリング（鉛直一次元モデル、２次元断面モデル）

	５段階評価	回答	ご意見記載欄
3.1-1 あなたのグループメンバーの構成は、どれに近いと思いましたか？	5：地質環境専門家の集まり 4：やや地質環境専門家の集まり 3：中間 2：やや地質環境専門家以外の集まり 1：地質環境専門家以外の集まり		
3.1-2 自分は「主体的」にグループワークに関われたと思いますか？	5：主体的に関わった 4：やや主体的に関わった 3：どちらでもない 2：あまり主体的ではなかった 1：主体的に関われなかった		（なぜそう思いましたか）
3.1-3 グループメンバー全体でのグループワークへの関わり方はどうでしたか？	5：主体的に関わっていた 4：やや主体的に関わっていた 3：どちらでもない 2：あまり主体的に関わっていなかった 1：主体的に関わっていなかった		（なぜそう思いましたか）
3.1-4 グループでの作業は活発だったと思いましたか？	5：活発だった 4：やや活発だった 3：どちらでもない 2：やや低調だった 1：低調だった		（活発になった要因やきっかけについて、あなたの気付きを教えてください）
3.1-5 手を動かして考える作業をグループメンバーと共同で行う経験は、モデル自体への理解を深めたり、モデルで表現される事柄を理解するのに有用だと思いますか？	5：役に立つ 4：やや役に立つ 3：どちらでもない 2：あまり役に立たない 1：役に立たない		（なぜそう思いましたか）

3.2：独習用トピック（1.意思疎通の技術、2.コミュニケーション能力の向上を目指して）

	ご意見記載欄		
3.2-1 トピック１ 意思疎通の技術	5：役に立った 4：やや役に立った 3：どちらでもない 2：あまり役に立たなかった 1：役に立たなかった		（なぜそう思いましたか）
3.2-2 トピック２ コミュニケーション能力の向上を目指して	5：役に立った 4：やや役に立った 3：どちらでもない 2：あまり役に立たなかった 1：役に立たなかった		（なぜそう思いましたか）

3.3：総合学習全体を通じて

	ご意見記載欄		
3.3-1 総合学習を通じて、あなた自身の専門性やマインドに関わる気付き・発想はありましたか？	（総合学習を通じて得た気付き、発想などをご記入下さい）		
3.3-2 専門家チームは、＜専門性＞を集めるだけでなく、チーム力を発揮するための「場づくり」「チームづくり」の努力も必要だと思いますか？	5：そう思う 4：ややそう思う 3：どちらでもない 2：あまり思わない 1：そう思わない		（なぜそう思いましたか）
3.3-2 メンバーに専門家チームの力を発揮させるポテンシャルをもつ人が比較的多くいるチーム①と、専門家は専門知識を語るだけの役割を担い、チーム力を発揮するために非技術系の外部ファシリテータを入れるチーム②では、あなたはどちらのチームに参画したいですか？	1：①のチーム 2：②のチーム		（なぜそう思いましたか）

4：地下水専門家の仕事、考え方に関する知識獲得

今回のセミナープログラムでは、「地下水」に関わる学習だけでなく、その**〈専門性〉をもつ人**を知ってもらうことにも狙いがありました。

	5段階評価	**回答**	**ご意見記載欄**
4.1 地下水専門家が行っている日常の仕事を知ることは、そのような専門家との意思疎通に役立つと思いますか？	5：役に立つ 4：やや役に立つ 3：どちらでもない 2：あまり役に立たない 1：役に立たない		（なぜそう思いましたか）
4.2 地下水専門家が提供するデータが、実際にどのような仕事（労力、思惑）を経て取得されたのかを知ることは、あなたの仕事でその使い方を考えるうえで役立つと思いますか？	5：役に立つ 4：やや役に立つ 3：どちらでもない 2：あまり役に立たない 1：役に立たない		（なぜそう思いましたか）
4.3 地下水専門家は、地層処分事業のどのような局面で活躍できる、または活躍して欲しいと思いますか？	（あなたの考えをご記入下さい）		

5：自分の得意分野以外の専門性を持つ人々と働くことのイメージ

	5段階評価	回答	ご意見記載欄
5.1 自分自身の地層処分事業（研究開発または事業実施）との関係度をどう感じていますか？	5：8 割以上 4：6 割以上 3：4 割以上 2：2 割以上 1：2 割未満		（なぜそう思いましたか）
5.2 自身の仕事は、地層処分事業の研究開発面、事業実施面とどの程度関係していると感じていますか？	5：8 割以上が研究開発面と関係 4：6 割以上が研究開発面と関係 3：ほぼ半々 2：6 割以上が事業実施面と関係 1：8 割以上が事業実施面と関係		（なぜそう思いましたか）
5.3 現在、あなた自身の仕事において、自分の得意分野以外の専門家との協力の度合いや頻度は高いと感じていますか？	5：そう思う 4：ややそう思う 3：どちらでもない 2：あまり思わない 1：思わない		（なぜそう思いましたか）
5.4 今後、あなた自身の仕事において、自分の得意分野以外の専門家との協力の度合いや頻度が高まっていくと思いますか？	5：そう思う 4：ややそう思う 3：どちらでもない 2：あまり思わない 1：思わない		（なぜそう思いましたか）
5.5 それを意識して、あなた自身やあなたが帰属するグループでは、どのような取り組みをしていますか？	（あなたの考えをご記入下さい）		
5.6 （まえふりスライド 11 参照） あなたが専門性を持つ人々のチームに参画している場合、あなたはチーム活動の「why」「what/how」「process」のどの領域でリーダーシップを発揮できる（リーダーである必要はありません）と思いますか？）	〈複数選択可〉 1：why どうなりたいか、何が課題か 2：what/how 何をするか、どうやってするか 3：process チームとしてどのように進めるか 4：上記以外の何か		（なぜそう思いましたか）

6：セミナープログラムのポテンシャル

6.1：ファシリテーション面の工夫

	５段階評価	回答	ご意見記載欄
6.1-1 他者と共同で学ぶ上で、今回のセミナーの「自己紹介」のように**最初に（終わった後ではなく）**自身の思いを語り、他の人の思いを聞くことは有益と思いましたか？	5：役に立つ 4：やや役に立つ 3：どちらでもない 2：あまり役に立たない 1：役に立たない		（なぜそう思いましたか）
6.1-2 初日の自己紹介で、あなた以外の人が示したキーワードのうち、印象に残ったキーワードは何でしたか（複数可）？ それはどうしてでしょうか。	（あなたの気付きをご記入下さい）		

6.2：アクティブラーニング手法

今回のセミナープログラムは、様々な参加者の動機、問題意識、気分などを始めに雑談として交わしてもらった後、講義や現場見学、実習を通じて土台の知識を学び、**総合学習**のグループワークで多様な専門家とディスカッションするという構成でした。

セミナー企画事務局（原環センター）では、地層処分に関する政策立案プロセスにおいて、イギリスやカナダで採用されている市民向け対話活動の方式を、わが国の専門家を対象に行うとしたらどんなものになるかを試してみようという発想がありました。

	ご意見記載欄
6.2-1 今回の「地下水」をテーマとしたセミナーと同様な方法を他のテーマに応用する場合や、自組織で行っている勉強会等で応用できるかもしれないといったアイデアをお聞かせください	（あなたの考えをご記入下さい）

アンケートは以上です。ご協力ありがとうございました。

2.1：セミナーの満足度・気付き	
質問項目	**意見・要望等**
2.1.1 全体としての満足度	「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」というテーマについて、仕事を離れじっくり考える機会を持つことができたから
	講義と現場見学、実習のバランスが良いと思ったため
	普段の業務では触れることのない分野のプロや、様々な現場で働いている受講者と接点を持つことができて良かった。 スケジュールを詰め込み過ぎている点と、開催時期を年末の忙しい時期に設定している点は残念である。
	異分野間、他機関との連携のきっかけになったと思う。また、自分の専門性や業務を見直すきっかけにもなり、全体として非常に有意義だった。ただ、時間設定が詰め込みすぎの印象を受けたため、もう一日増やすか、座学の時間を減らしてほしい。夕食後の座学は印象が良くなかった人が多いと思う。
	業務にすぐに使える知識や解析方法が学べると期待していたが、どちらかというとコミュニケーション能力や対話の実践に重点をおいていたように感じた。
	普段、調査や実験などせず、数値でしか見てこなかった地下水を、見学や実習、さらに他分野の方との話し合いができ、大変勉強になりました。他分野との連携がかなり意識されていたと思いますが、その分、もっとグループワークの時間を作って、長めに話し合いができれば良かったと思います。
	地下水に特化した内容の研修ではあったが、地下水をバックグラウンドとしない参加者にとっては、地下水流動系の解釈の仕方について概要をつかむことのできるような内容であったと思う。地形、地質に関するフィールド見学や、実際に地質環境モデルを作成してみるところまでの実践が含まれていたので、考え方の基礎が掴みやすいように感じた。
	地層処分分野における専門性、経験年数もバラバラな参加者が、「概要調査」という地下将来必ず実施する共通テーマの下、緊張感をもって協力して議論、コミュニケーションをとることが出来きました。
	講師の方々の知識が豊富であり、また人数も十分に多く気軽に質問できたため。
	座学の資料、講師の先生の説明の分かりやすさ、見学と総合学習を組み合わせた体験を重視した構成など、人材育成プログラムとしてよく考えられた内容であった。こうしたわかりやすさの反面、ダルシー則の説明が度々繰り返され一部の説明に重複感があったこと、総合学習に用いたボーリングデータが地層処分の対象深度に及ぶものではなく、処分場の本格的な議論に進めなかったことは残念に思えた。
	イメージしにくい地形の観察や地下水の水質を調べる実験を実体験することができ、グループディスカッションと発表、および振り返りをセミナーのなかで実施することができたのでとても良かった。
	3日目のプログラムの冒頭でプレゼンがありましたが、資料中で用いられている用語の定義（概念モデル、地質環境モデル）が1日目の講義内容と異なっており、誤った説明となっていました。当日はこのプレゼンについては質疑応答の時間が無かったので指摘しませんでしたが、受講者が誤った知識に基づいて仕事をするのは好ましくないので、誤っていた内容（スライド）を修正し、配信した方が良いと思います。
2.1.2 総合学習の満足度	普段から面識のなかった人たちと話し合ってその場で回答をまとめる作業が新鮮だったから
	他の機関の方と話す貴重な機会であったため
	学びたての知識で作成したこともないモデルを作るのは辛かった。 指示も曖昧で、話し合いも行いづらかった。
	初対面の人とグループワークといった取り組みは、今後起こりうるプロジェクトの発足時には必要。他の専門性、機関を知るという意味でも良い経験となった。
	グループワークではコミュニケーション能力の向上が目的となっていたが、もっとモデリングの詳細や具体的なデータの取り扱いについて学べる実習的な内容の方がよかったと思う。
	他分野間の連携の第1歩のような形で、専門の違いを体感できて良かったです。ただの話し合いではなく、絵でイメージを共有するというのはとても良かったと思います。全員が参加する工夫もされていたので、真剣に取り組めたように思います。折角ならもっと話し合いたかったので、時間が長めなら嬉しかったです。また、専門家が地下環境の1次元2次元モデルをどのようにして描くのか、その方法を知りたかったこともあり、グループ毎の思い付きを見せるだけに留まり、描いたモデルが良いのか悪いのか何が足りないのかなど、そのあたりが共有されなかったのは残念に思いました。
	バックグラウンドが地下水ではない参加者にとっては、地下水流動系の考え方の基礎的知識を得るには、難易度的にもちょうどよいように感じた。
	10分、15分単位で作業・議論時間を細かく区切り、時間を厳しく管理して進行したため、追い立てられつつも、集中してディスカッション出来きました。自身の瞬発力、協調性に対して良い刺激となりました。
	他の参加者の考えに触れられた点が良かったため。 短時間で集中して取り組むものであり密度が濃かった点も良かったため。
	バックグラウンドの異なるメンバーと意見交換しながら気付きを得る機会にできたことは良い経験であった。総合学習に用いたボーリングデータであるが、仮想でも良いので少なくとも深度500m～1000m程度の大深度ボーリングのデータを参照できていれば、地層処分におけるSDM構築の本格的な議論ができたのではないか。試行錯誤での最初の試みであることを考えれば満足できる内容であった。
	学びえることが大変多かったのでとても良かった。
2.1-3 座学の満足度	基本的なことから学べたのでついていきやすくとても助かったから
	地下水に関する基礎的な知識を丁寧に伝えていただいたため
	地下水について、基礎から学べたため。
	内容としては非常にわかりやすく、専門外の人間にも理解できるような概要を説明してもらえて勉強になった。座学の占める時間が長く、一日のスケージュールが詰め込みすぎだと感じた。日程を伸ばすか、時間を減らすか検討してほしい。
	座学では、基礎知識から解説していただいたことで、その後に続く流動モデルの理解が深まった。また、実地の見学でも地下水の存在を意識することができた。ただ、ボーリング調査の事例の解説が駆け足であり、理解が追いつかなかった部分があるので、座学の時間が少ないように感じた。
	地下水について詳しくない人でも分かりやすく説明していただいたので、良かったと思います。ただ、内容が易しいところも多くあったとも思いました。地下水や地質を専門としている方々からの質問が少なかった印象ですので、もう少し専門的な内容でも良かったのではないかと思いました。（そのあたりのバランスは非常に難しいところですが）
	自身は既に地下水に関するバックグラウンドがあるが、そうでない参加者にとっては、水文地質、地下水調査のトレーサーによる解釈（水質、同位体など）、数値解析、など全体の概要を知ることが出来たのではないかと思う。
	説明資料に誤字脱字が散見されていました。
	現場から得られる情報を地下水の専門家がどのような観点でとらえて、モデルを組み立てているのかを理解できました。
	分かりやすく、地下水に関する基礎的な知識を習得できたため。
	どうすれば分かりやすく伝えるかといった講師の先生の配慮を強く感じた。また、初学者への説明の仕方としても参考になった。エクセルで解析の初歩的な体感ができたことも理解の向上に有益であった。一方で、ダルシー則の説明が度々繰り返され、両講師で同じ内容を説明されているなどの重複感はあった。今回の参加者がいずれも専門性の高い人であったことを考えると、もう少し専門性の高い内容が含まれていてもよかったのではないか。そうしたマイナス面はあったとしても講義の満足度は高かった。

質問項目	意見・要望等
2.1-4 エクスカーションの満足度	事前のオリエンテーションから見学に赴く流れが効果的だと感じたから
	地下水の専門家の目には現場がどのように映っているかを多少は知ることができたため
	実際のボーリング試料や現場を観察する機会をいただけたため。
	座学後に実際の見学を行い、簡易的な分析を体験するといった流れは大変良かった。自分の理解の定着にも繋がるし、何より初めて富士周辺を訪問した参加者も多かったため、学問的な意義を自らの目で見て体感できるというのは非常に良かった。前年度は現地見学がなかったそうなので、今後は必ず盛り込むべきプログラムだと思う。
	実地を見学することで、地形に隠された地質と地下水の流動との関係をイメージすることができ、新しい視点を得ることができたと感じた。また、富士市周辺は私が所属する幌延周辺とは全く地形が違い、その違いが地下水に与える影響についても興味が湧いた。
	富士川SAでの地下水の専門家から見る富士山と周囲の地形の話はとても面白く感じました。あの辺りは地下水が少ないとか、断層があるからこのような地形になっていて水の流れはこうなっているなど、座学の内容を踏まえながらの話は面白かったです。今年の調査が終わってしまったということで仕方がありませんが、欲を言えば、海底湧水探査や物探についても専門家の視点を合わせながら見学したかったです。
	事前に富士山周辺の水文地質を、3Dのプロジェクションマッピングを用いて解説頂いたので、実際のフィールドで起こっていることの理解がしやすかったように思う。
	コロナ下にも関わらず、見学会時に使用していたバスの乗車密度が高く、補助席まで使用する状況は好ましくないと思います。
	座学にて水の流れを学んだ後で、現場見学出来たので、ただ景色を眺めるのとは異なる視点で地形を観察出来きました。ボーリング掘削について現場担当者から直接、掘削コア等の実物を観察しながら説明をしていただけたので、説得力がありました。
	座学で習ったことを実際に確認できた点は良かったが、それ以上の発見は無かったため。（ボーリング調査については自社の業務で携わっていて見知っていた）
	地下水流動を流域を俯瞰しながら考えられるように配慮された内容に、素晴らしい景色が加わってとても印象的であった。
2.1-5 実習（採水、滴定）の満足度	複雑すぎず、グループでも取り組みやすかったから
	採水や滴定は普段のデスクワークでは体験できず、今回の実習は貴重な機会と感じたため
	自分の手を動かすことで、実際の業務の流れをうっすらと理解することができた。
	採水から分析までのフローが体験でき、他分野の分析業務に触れることができて貴重な経験となった。一方で、滴定の体験にはあまり意義を感じなかった。そもそも現在は実施したマニュアル測定は行っていないらしく、アルカリ度の測定は過度に専門的過ぎたように思う。
	業務で扱う水質を自分で測定、計算してみることで、データに対する理解が深まった。時間があれば様々な項目の測定もおこなってみたかった。
	座学だけでなく実習があることでより地下水についての理解が深まるので、良かったと思います。私が聞き漏らしてしまったのかもしれませんが、試験結果から何が分かるか明確にするために、例えば講義資料(1日目「地下水に関する基礎知識」p。28)にあるように、アルカリ度から地下水の年齢を測るといったことをしても良かったのではないかと思いました。
	始めて水質分析に取り組む人にとっては、アナログな滴定法のほうが、何をしているのかが分かりやすかったと思う。サンプリングの際に、現地測定の際の留意点について、もう少し説明があるとよかった。
	実作業をしたことがなかったので理解の助けとなりました。
	参加者全員が採水、現場測定、滴定操作等について同じ内容を一通り体験できたのが良かったです。 一方で、全員が参加できる方法を選んだという印象があり、SDM構築における重要な項目だから選んだという印象は弱かったと感じました。
	地下水の専門家が行っていることを実際に知ることができた点が良かったため。
	時間の制約から、少しなおざりになってしまったように感じた。
2.1-6 講師の工夫、助言	グループワークのとりまとめ等、手本にしたいと思う点があったから
	研究内容や現在の知見について、本質には時間的制約から到達できなかったが、本質を理解するための概念についてのわかりやすい説明を、講義全体を通して受けられたため
	少人数制のグループワークのおかげで、講師の考え方や受講者の発言の捉え方などを学ぶことができたため。
	3名の講師は地下水の専門家であり、知見の広さや専門性の高さを感じることができてよかった。また、地質や工学などの他分野の参加者にも伝わるような平易な言葉遣いがなされており、誤解なく伝達できていたと思う。スライドも全体的にわかりやすかった。
	発表のときの伝わりやすい話し方についてのアドバイスが参考になった。また、参加者に満遍なく意見を聞いていたこともよかったと思う。グループワークにおける補助もとても助かった。
	質問に対して、とても丁寧に答えていただけたので大変嬉しかったです。別の講師からの補足や途中から議論に参加してさらに知見を深められるように様々なお話をしていただけたので、とても良い経験になりました。グループワークでも、ユーモアのある発言やまとめ方で、皆が発言しやすい場を作っていただけました。
	自身は地下水のバックグラウンドなので、あまり感じなかったかもしれないが、他分野の人にとってはやや説明不足の部分もあったのではないかと思う。
	グループワークの際に的確な助言をされていたと思います。
	ダルシーの式の説明に多くの時間を割いていただいたが、私自身は数式の意味をイメージ（絵）として「この式は、要は〇〇を示している。ただしこういう条件の時のみ適用できる」という説明をしていただいた方が理解しやすいと感じた。そのほうが一般の方々にとっては、地下水流動解析の理解や説明性向上につながるのではないかと感じた。
	産総研の講師の皆さんの熱意に感銘しました。ありがとうございました。 質問に答えていただける知識量や、熱意・ユーモアのある人柄が魅力的でした。
	資料・説明に相当工夫されていることが伝わってきた。その配慮には感服しました。わかりやすさを追求した一方で、導入部の基礎的なパートでは今回の参加者のスキルと内容にミスマッチもあったのではないか。座学の最後の方のパートで参考までにとしつつ、より専門性の高い最新知見の紹介がもう少し追加されていても良かったのではないか。
2.1-7 テーマ設定	地層処分分野のほとんどのステップで登場する分野なので適切だと考える
	地下水の専門家が、地層処分事業においてどのような立ち位置として認識されているか体感できたため
	テーマを地下水に絞ることで、3日間という短い時間でも実りのある研修になった。
	地下水を題材としたセミナーであり、自らの専門とは外れた内容だったからこそ新しい学びがあったように思う。テーマ設定に基本的には問題はないが、地下水を対象とした理由や、地層処分事業における水門地質学の立ち位置などをメンバーで共有できていればより良いプログラムになっていたと思う。
	地下水は私が業務で関わっている分野であり、研修で学ぶことのできた知識や技術は、まさに必要としていることだった。
	日常生活でも密接な関係する地下水を富士山を含め広大なスケールで見て学ぶことができ、とても良かったと思います。私は調査や実験などを全くしないので、そういったことを専門とする方々と話し合うことで、視点や感覚、使う言葉の違いなどを知れて良かったです。
	今回は地下水がメインでしたが、地質についても専門の講師による座学があってもよかったのではないか（地下水屋さん的な水文地質の解釈の仕方に偏っていたように思うため。研修のテーマ設定がやや広めになってしまうかもしれないが、サイト選定という視点などでの地形・地質屋さんの話も聞けるとよかったのでは。）
	「地下水」はまた一般に身近な存在で、且つ地層処分事業における設計、安全評価での最重要要素の一つなので、応用性が高い、有効なテーマだと感じました。
	専門外の分野について基礎的な内容を学べた点が良かった。ある程度自身の専門分野の知識を有している若手（2-3年目程度）の職員に勧めたい。
	地下水をテーマとしつつも、SDMを中心に据えたコミュニケーションの実践はタイムリーであり、今後のサイト選定調査に向けた取り組みにおける重要性の点からも適切であった。

2.2:地下水を学ぶ	
質問項目	**意見・要望等**
2.2-1　座学1「地下水に関する基礎知識」 セミナーの実習など受講するにあたり、基礎知識を理解するのに役に立ちましたか。	基本的なことから学べたから
	地層処分研究と地下水研究の関わりについて、基本的な事項を中心にわかりやすい講義を受けられたため
	地下水に関する知識はOに等しかったため、基礎から学べてよかった
	全くの専門分野外のため、地下水に関する基礎知識はなく、足並みをそろえる意味で有意義だったように思う
	座学の導入として、基礎知識から始めるのに異論はないが、そもそも地下水の研究が地層処分事業の上で、どのように応用されるか、何に役立つかといった前提が各参加者で大きく異なっていたように思うので、意識共有や意見交換からすべきだったように思う。
	私は現在、地下水の流動環境の評価に関する業務に関わっている。ただし地下水についての知識は全くといっていいほどなかった。座学で基礎知識から説明を受けたことで、見学でも地下水の存在や地質を考えることができ、風景の見え方が変わったと思う。
	タイトルの通り、地下水はどういったもので、どのような情報が取れるか、分かりやすく説明されていたので、良かったと思います。
	バックグラウンドが地下水ではない参加者にとっては、地下水流動系の考え方の基礎的知識を得るには、難易度的にもちょうどよいように感じた。
	地下水を議論するための基本要素を網羅的に学ぶことが出来ました。
	地下水、涵養など、基礎的な用語の定義や概念を理解できた点が良かった。事前に参考図書を紹介いただいていた点も良かった。地下水水位には季節変動があること、季節変動に埋もれるため長期の変動傾向の把握には時間を要することは、調査や処分場建設が地下水水位に影響しているのかを把握する上で役に立つ知識であった。
	個人的に理解の伴っていなかった地下水質について、説明のみならず例題を加えるなど理解が進むように工夫された内容で充実していた。
2.2-2　座学2「水質からみた地下水流動」 水質・同位体から見た地下水流動モデルの考え方の理解に役立ちましたか。	誤った解釈も例として挙げられていたので、当分野の理解に近づけたと感じたから
	水質分析が地下水流動の推定に対してどのような有用性を持つのかということを理解できたため
	学生時代に学んだことでも、時が経つと忘れてしまうため、基礎から学ぶことができて良かった。
	水文地質学者がどのように考え、どのように研究を進めているかといった視点で追うことができて大変面白かった。研究事例紹介は他分野の専門家にとっても非常に興味深い内容が多いので、今後も現在までの研究背景や業績紹介などは是非実施すべきと思う。
	地下水流動モデルを作るためにはどのようなデータが必要か、また、それをどのように扱うことで地下水の動きがわかるのか、といったことが、これまでよくわからなかった。講義を受けることで、水質や同位体の値がなにを示しているのか、また、ダイアグラムなどの形で比較することで湧水における地下水の影響を調べる方法を知ることができ、水質データや同位体データをどのように解釈するかがわかった。
	あまり等高線図などの見方に慣れておらず、地下水の温度や流れの解釈が難しい部分もありましたが、図や写真が多かったのでイメージしやすいと思いました。
	どういう指標をつかって地下水流動系を概観するのかについて、基礎的な部分を分かりやすく、事例も交えながら分かりやすく解説頂いたと思う。クイズ形式のように、参加者に解釈させるものが、もう少し多くても良かったかもしれない。
	地下水の専門家が、現場から得られる情報をどのように取扱い、モデルに組み込んでいこうしているかが理解できました。
	実例に沿って考え方を紹介いただいたことで、地下水の専門家の方々がどのようなデータからどのように判断するのかを知ることができた点が良かった。例えば、君津の水質調査結果の解釈を紹介いただいたことで、シュティッフダイアグラムの傾向の掴み方を把握することができた。
	広域の地下水流動を地形から大局的にとらえ、これに地下水の分析結果を加えて実際の地下水流動の解釈を進めて行く流れが理解できた。一方で、3本の爪の説明は解釈の違いが容易に起こりうることを伝える講師の意図であったと思われるが、新解釈も含めて理解が追い付かなかった。ここの解釈の部分はもう少し簡潔にされても良かったのではないか。
2.2-3 座学3　および　座学5 「地下水流動解析（1次元）、（2次元）」 エクセルを用いた解析はうまく出来ましたか。	センターのセミナーで似た実習を経験していたので取り組みやすかった
	計算の意味について理解したうえで解析できたため
	2次元解析は時間が足りなかった。
	モデル構築などの数値計算は日常的に携わることがないため新鮮だった。実際のモデル作成に立脚して、手取り足取り計算方法を教えていただいたのが非常に良かった。エクセルを使った数値計算のフローは自分のような初学者にもわかりやすく、全く問題なく解析を体験できた。
	有限差分法を使って地下水位を推定する方法を学んだ。有限差分法の計算は初めてだったが、エクセルでの解析は、手順を追って丁寧に説明していただいたおかげでうまく出来た。
	同じ数値になっていたため。
	エクセルをつかって実際に作業してみることで、実際にどういうことを計算しているのかが非常に分かりやすかった。「多少の正確さを犠牲にしても分かりやすさを重視」というコンセプトで解説していただいたのが、数値解析初心者にとっては非常に分かりやすかった。実際には、詳細まで知る必要があるのは専門家だけで、ジェネラリストとしてはそこまで求められず、むしろなんとなくでも知っていることが大事と思うので、有益であったと思う。
	解析をこれまでにしたことがなかったので最初はとても不安でしたが、丁寧に説明していただいたので、理解することができました。
	理解不十分な状態で行ったため、ただ真似をしてなんとかできたという状態でした。
	基本的にスライドにてやり方が説明されていたため迷わなかったことと、自分で考える時間の設け具合がちょうどよかったことから、理解しながら正しく出来たため。
2.2-3 座学3　および　座学5 「地下水流動解析（1次元）、（2次元）」 モデルと解析手法を理解するのに役立ちましたか。	図と式を付け合わせた解説が良かった
	数値モデリングの基礎的な考え方を知ることができたため
	解析手法の流れをぼんやりと理解することができたと思う。
	自分で手を動かしてみる、というのが体験として価値のある内容だったと思う。今後自分が数値計算に携わることは少ないかもしれないが、だからこそモデリングの手法や考え方を学ぶのは大切だったと思う。他分野との連携で、モデル屋と自分のような地質屋と共同研究する機会は必ず訪れると思うので、良い学びとなった。
	数値解析の計算式を十分に理解することはできなかったが、地下水位がどのように推定されるかについて大まかな方法を把握することができた。しかし、実際にどのような手法でデータを取得するか、また、報告書や論文に使われているような、より複雑な結果や図がどのように作成されているのかまではわからなかった。
	2次元の解析の資料p。26にあるように、実際の等水位線図と合わせて見ることができたので、イメージがしやすいので良かったと思います。
	エクセルをつかって実際に作業してみることで、実際にどういうことを計算しているのかが非常に分かりやすかった。「多少の正確さを犠牲にしても分かりやすさを重視」というコンセプトで解説していただいたのが、数値解析初心者にとっては非常に分かりやすかった。実際には、詳細まで知る必要があるのは専門家だけで、ジェネラリストとしてはそこまで求められず、むしろなんとなくでも知っていることが大事と思うので、有益であったと思う。
	地下水の動きを3次元的に捉えるための方法を段階的に示していただいたので、今後は自身でも更に理解を深めていきたいと思います。
	モデル・解析の基本的な考え方・手法は理解できた一方で、実際のより複雑なフィールドを相手にするときの解析についての説明があると尚良かった。
	既存のプログラムを参考に計算するのではなく、エクセルで表を繰り返し書くことで解が収束していく様は目からうろこであった。ただ、これで解析手法全体を理解できたわけではなく、あくまで導入部の最初の理解に過ぎないので、解析手法としての理解という点ではまだ不十分。

質問項目	意見・要望等
2.2-4 座学4 「富士山地域の水文地質の紹介」 広域地下水流動調査の紹介は見学の予習として役に立ちましたか	模型で見学地を事前に確認するのが視覚的にわかりやすかった
	現地で実際のスケールを体感することで、座学の段階より格段に地下水流動に関するイメージが湧いたため
	見学の予習という意味でも、総合学習の基礎知識という意味でも、不可欠な時間だったと思う。 説明も分かりやすく、座学の中で最も興味深く楽しく聞けた。
	自分がいま居る地域の研究事例や、これまでの研究でわかっていることを紹介されるというのは非常に面白かったし、対象とした地域に興味がわいた。事前知識を入れてから、実際に見学するという流れは学習的で良い。
	座学に続いて、富士川の周辺、また、海底湧水が存在する田子の浦みなと公園周辺を見学した。地上からの見学だけでは地下の状態や実際に海底から湧水が湧き出る現場を知ることはできないため、あらかじめ3Dモデルなどを使った説明を受けることで、現地で見えない部分の水の動きをイメージすることができた。
	どこから来ている地下水なのか、どのような地質なのか紹介があった後に現場に行くことで、より理解が深まったように感じました。残念ながら、海底湧水調査は見ることができませんでしたが、その分、関心が高まりました。
	事前に富士山周辺の水文地質を、3Dのプロジェクションマッピングを用いて解説頂いたので、実際のフィールドで起こっていることの理解がしやすかったように思う。
	現場見学の際、目には見えない地下水の動きを想像しながら地形を観察することが出来ました。
	見学の際に確認する要点を掴めたため良かった。特に地下水の年代を学習したことで、どれくらいの空間スケールをどれくらいの時間で地下水が流動しているのかを見学時に体感できた点が良かった。
	これまで精力的に進められてきた富士山・駿河湾沿岸部の調査の全貌を知ることができた。また、海域での調査についてはどういう調査が行われているのか調査項目としては知っていたが、実際にどのように進められているのか調査の進め方について理解しているわけではなかったが、そうしたことの理解につながる情報が盛り沢山であった。
2.2-5 座学で学んだことは自分の仕事に役立ちますか。役立つとしたらどのように役立ちそうですか。	解析手法等は業務にも直結しているので役立つと考える 地質や地下水の性質に関する知識も理解しておくべき内容だと考える
	今後、地下水研究は自身の業務にさらに密接に関わってくると考えられるため
	自分が今の業務に携わる限りは、あまり役に立たないと思う。 しかし、ジェネラリストorスペシャリスト問題を含め、今後自分がどのようにキャリアを積んでいくのか、地層処分事業にどのように関わっていくのか、考え直す良い機会にはなった。
	水文地質学者が周囲におらず、考え方を学ぶ機会がないので新鮮な経験となった。今後の業務で直結する場面は少ないかと思うが、他分野の研究を知るという意味では今後の地層処分事業を進めていく上で必要不可欠な場面だと思う。その一事例を体験できたのは良かった。
	私が関わっている業務では過去の結果や手法の取りまとめのため、多くの報告書や論文を読む必要がある。座学で基礎知識や基本的な解析を解説していただいたことで、結果の理解や問題点の洗い出しに役立つと思う。
	私の専門は解析・評価であり、実験データを扱うときに、不確かな部分や理解が不足しているところは、それを包括するようにパラメータの範囲を拡げて設定してきましたが、どのようにデータを取得したか一歩踏み込んでみれば、おかしな設定をしてしまうことも少なくなると思うので、もっと丁寧にデータを扱おうと思いました。
	自身は既に地下水に関するバックグラウンドがあるが、そうでない参加者にとっては、水文地質、地下水調査のトレーサーによる解釈（水質、同位体など）、数値解析、など全体の概要を知ることが出来たのではないかと思う。
	地下水の専門家がどのように情報を取得し、取扱うか、解釈しようとするかを感じることができました。地下水以外の専門家の方たちと議論をする際の共同理解向上に役立つと感じています。
	基礎知識を習得できたことで、地下水の専門家とのコミュニケーションがよりスムーズになることが期待できるため。
	概要調査計画の策定における調査側とのコミュニケーションにおいて、これまでよりも相手の考えの理解に役立つ可能性がある。
	実際に構築されたSDMを用いて処分場の位置選定、地下施設レイアウトの設計を実施するため、広域地下水流動の座学で得たイメージは役立つと考える。
2.2-6 実習1 湧玉池での簡易水質測定とサンプリング（現地調査の体験）	採水ひとつにしても、現場では様々なテクニックやノウハウがあるということ
	簡易的であれば、水質測定は手軽に行うことができるのだなと感じた。 実際の業務で行う水質測定と比較すると、手間とデータの精度がどれほど異なるのか興味がある。
	短い時間だったが、実際の地下水屋が野外調査でどのようなことを行っているか、さわりだけでも体験できてよかった。富士山周辺が大量の地下水を湛え、湧出していることが身をもって実感できた。
	実習1では、神田川にて現場でのpH測定と、実習2の重炭酸滴定に使用するサンプル水を採取した。これまで湧水といえば小規模な池や井戸でしか見たことがなかったため、湧玉池や神田川を見学して豊富な湧水が富士山周辺にあることを実感できた。また、チューブへの採水時に空気が入らない方法を教えてもらうことができ、調査に役立つちょっとしたコツを知ることができて良かった。
	本当にここで富士山からきた水が取れるのかと思っていました。座学での説明はあったので納得はしようと思っていたのですが、湧玉池の西側には山地があることや川が出来ていることから、富士山から比較的離れている湧玉池には富士山由来というには納得しにくく感じました。沿岸域の調査とは関係ありませんが、谷になっているところの水質や地下水流動の調査は難しいだろうなと感じました。
	電気伝導度とpHを計測したが、何のための指標であるのか、現地計測する意味などについてももう少し説明があるとよかった。
	自身が採取した試料を分析することになるので、効果的な内容だったと思います。
	富士山からの豊富な地下水の流れを感じられる場所でした。全員が同じ体験をするという意味でとても良い内容だったともいます。 満水にすることも大切ですが、簡易測定であっても、採取した試料にラベルを付ける等を加えることで、専門家がどのように大切に検体、データを取り扱っているかを示す研修になると考えます。
	地下水の専門家が測定結果のみならず周囲の地形等を観察しながら地下水の流動のモデルを構築していることが想像できた。
	pH計の値がなかなか落ち着かなかった。どこで良しとするのか判断に迷った。
	大学のゼミで経験したことのあるサンプリング・測定であったが、復習と振り返りに役立った。

質問項目	意見・要望等
2.2-7 実習2 重炭酸滴定と水質ダイアグラムの作成	座学や見学が続いていたので実際に手を動かす活動が気分の切り替えに役立ったと考える
	普段目にしているシュティフダイヤグラムが、どのようにして作成されているのかをよく理解できた
	中和する瞬間を狙うのが難しかった。
	水質の分析で実施する内容を体験できてよかったが、過度に専門的過ぎたように思う。 講師が実際に分析しているところを観察する程度で良かった気がする。
	実習2では、湧玉池の水の重炭酸イオン濃度を中和滴定により測定した。加えて、既存のデータからイオンバランスを計算し、水質ダイアグラムを作成した。水質ダイアグラムは初めてだったが、その形状で地下水の由来がわかることが興味深かった。また、滴定をおこなったのは高校以来だったが、地下水の研究で使われるデータがどのように取得されるかを知ることができてよかった。
	実際には機械で制御して何百ものデータを取っているということでしたが、その雰囲気を体験出来て良かったと思います。
	重炭酸滴定については、始めて水質分析に取り組む人にとっては、アナログな滴定法のほうが、何をしているのかが分かりやすかったと思う。 水質のダイヤグラム作成を実際にやってみることで、何のためにこのようなデータ整理をするのかが分かりやすかったと思う。
	分析値としては見たことがありましたが、実際に作業をしたことは無かったので理解の助けになりました。
	簡易的な器具類で行ったとはいえ、準備がかなり大変だったのではないでしょうか。ありがとうございます。 中途半端な体験となるより、経験者による模範演技と、パックテストを組合せた実習でも、手間を減らしつつ研修の目的を達成できるのではないかと感じました。
	水質はあらゆる含有成分の数値データから考察するものと想像していたが、水質ダイアグラムの作成を通じて、代表的な成分を基に大まかな分類を把握する手法も取っていると学習した。今回の実習が無ければ知らないことであった。
	滴定の調整が難しかった。 グループ内の経験者の機器を扱う手つきがスムーズでさすがであった。
	この実習についてはまだ完全に理解していないため、テキストを読んで振り返るつもりである。
2.2-8 見学1 地形見学（富士川SA）	模型で事前に確認していた景観との一致を一番実感でき、見学で一番印象に残った
	富士山周辺における地下水流動のスケールを体感できた
	何を見せたかったのかよくわからなかった。 富士川断層による明瞭な変位地形が見えないのであれば、断層の話は省いても良かったのでは。
	富士川周辺の地形を把握する意味では、この1地点以外にも断層地形や特有の地形が見られる地域を案内していただきたかった.
	富士川SAでは富士川周辺を見学し、地質や断層についての解説を受けた。事前に3Dモデルを使いおおよその地形と地下水の流れの関係の説明を受けており、現場での解説を受けることでその関係がより具体的にイメージすることができた。
	分野外の者からすると、良い景色だなと思うくらいしかできませんでしたが、地下水の専門家の方の視点として、地下水がどこを流れているとか断層があのあたりにあるなどという話があったので、面白さを感じつつ見学することができました。
	実際に目で見てみることで、スケール感や、実際の地形と地図上での断層の位置などとの関係が分かりやすかった。
	講義だけでは実感しにくい部分もあったので見学があって良かったと思います。
	地形見学は地表面、地形を観察することしかできませんが、水の動きについて教わっていたので、地下内部での水の動きを想像することができました。
	地形や街並みを見ながら解説を聞いたことで、地下水の流れが目に浮かんだ。普段の街歩きでも自習したいと感じた。
	手前に富士川があり、富士山を中心に流域の大きな地下水の流れに思いを馳せるのに絶好のロケーションであった。
	地形からみる地下水流動の考え方を学ぶことができた。
2.2-9 見学2 海域等の見学（みなと公園）	距離感についての説明が印象に残った
	富士山周辺における地下水流動のスケールを体感できた
	タイミングが悪かったのは残念だった。 駿河湾沿いの地形概観を観察することができて良かった。
	田子の浦や駿河湾を遠望でき、周辺の山地や地形を遠望できて面白かった.
	みなと公園では海底湧水についての解説を受けた。海底にも湧水が存在することは本で知っていたが、駿河湾の漁業にも影響するかもしれないといった、人間の生活との関わりも感じることができた。
	調査が今年は終わってしまったということで残念でしたが、講義中の映像にもあった海底湧水調査の様子を見てみたかったです。
	実際に目で見てみることで、スケール感が掴みやすかったと思う
	規模感は実感することができました。
	目印の無い海域では、距離感覚をつかむのが難しいのだと感じました。
	海底湧水箇所の距離感を具体的に説明いただけたことでスケールの実感が持てた点が良かった。
	まずは景色が素晴らしかった。座学で海底湧水調査の話を聞いていたので海側を調査の風景と湧水地点をイメージしながら眺めることができた。
	地形からみる地下水流動の考え方を学ぶことができた。

質問項目	意見・要望等
2.2-10　見学3 ボーリング調査現場	ボーリングという作業そのものは知っていたが実物は見たことなかったので工具のサイズ感や構造が興味深かった
	ボーリングに用いられる機器やコアサンプルを見られる貴重な機会だった
	コンサルの方々がどのような点に留意して掘削を行っているのか知ることができて勉強になった。
	実際に岩芯試料を分析することはあるが、コアリングやツールの仕組みなど、実物を目にしながら説明を受けることは初めてだったので大変良い経験となった。
	駿河湾沿岸の掘削現場を訪問し、業者の方にボーリングに使う機材と掘削方法、技術面の難しさについて説明していただいた。私の業務ではボーリングデータを扱うことがあるが、初めて調査現場を見ることでスケール感がわかった。技術的な解説については専門用語が多く、理解が難しい部分があった。
	幌延のボーリングコアを見たことがありますが、静岡で得られたボーリングコアとの違いに驚きました。火山噴出物の層ではここまで脆い（表現が正しいかわかりませんが）ものなのだと、見て触って実感することができ、良かったです。サイトでの説明も丁寧に受け答えしていただけたので、大変良かったです。
	実際のコアを見ることで、溶岩、砂礫層、などがどのような「モノ」であるかをイメージしやすいので良かったと思う。
	調査現場では、現地の協力会社の方からご説明いただきましたが、本プログラムの研修資料に記載されている講師・講師補助にはお名前が記載されておらず、違和感がありました（現場の方々に失礼ではないでしょうか）。
	現場作業を行う方たちから、実物の道具、機器、コアを説明していただくことで、ボーリング調査現場でどのようにデータ取得されているかを学ぶことが出来ました。
	コアとそのスケッチや柱状図との比較があれば、専門家が情報をどのように処理しているかのイメージがより掴めたかもしれない。
	現場内の整理が行き届いていた。現場での説明もわかりやすかった。 きれいなコアが比較的よく取れているように思われた。
	ボーリングコアの観察の機会はこれまで少なく、考察の仕方を多少学ぶことができた。
2.2-11 （実習、見学全般） 講義と連動する形でフィールドを見るのは学習に効果的だったと思いますか。	あらかじめ背景を知っておくことで見学の際に理解が深まるだけでなく、これから見学に行くという前提があることで、講義への身の入り方が違ってくるという効果もあったと考えるから
	座学だけではイメージできない地下水流動のスケールを体感できたため 座学の内容を見学により定着させられたと感じたため
	座学だけではイメージしづらい具体的な作業内容や各調査地点の位置関係なども、フィールドを見ることで実感がわいた。
	座学で知った内容を実際に目にすることができるという流れは大変良い。前年度はすべてが座学だったと聞いていたので、この流れは継続すべきだと思う。
	業務では既存のデータを扱うことが多く、私自身も実地での経験がなかった。講義でもやはり数字や概念図だけでは理解しにくい部分があった。今回現場を見ることで、実際に調査しているスケール感やデータ取得の方法を知ることでデータが表す環境の意味をもう少し具体的にイメージすることができたため、効果的だったと思う。
	講義だけではイメージしにくい部分を、見学を通すことでイメージが固まる部分もあると思うので効果的だと思います。
	座学だけではイメージがわきにくい。実際に地形や、地質、地下水がわいている様子を見ることで、広域の地質環境モデルを作成する際にイメージがわきやすくなるし、そのようなセンスが身につきやすいと思う。
	講義だけでは理解できないこともあるので見学会と併せることで効果的だと思いました。
	講義の内容を忘れないうちに現場を観察することで、モデルを実地形に当てはめて想像することが出来るから。
	フィールドに目にすることで地下水の流れのイメージや空間的なスケールを体感できた。座学で習った知識が実際のフィールドで利用できる生きた知識になった点で役に立ったと思う。
	内陸側と海側の両方から地形を見て地下水流動について考えることができたこと。流域全体を俯瞰できる絶好のフィールドであった。
	座学で知りえた情報をフィールドでイメージでもって確認することは理解を深めるうえで有用であったため。
2.2-12 （実習、見学全般） 体験してみたい実習、見学してみたい現場がありましたらご記入下さい。	航海調査の様子を見学するとか、乗船とかできたら面白いかと思う。
	重炭酸以外の項目についても、ひととおりの測定をしてみたい。また、コアサンプルや地下の間隙水、海底湧水など、調査が難しそうな環境についても、実地調査の見学や、自分で手を動かしてのサンプリングを経験してみたい。
	海底湧水調査や物理探査の様子も見てみたいです。 今回は地下水がテーマでしたが、地質に着目したテーマとして、地層の種類や岩石の分布などの調査についても学べればと思いました。
	現状ではアイディアがありませんが、研修という意味では、今回のような、　・地下水の涵養域、流出域が比較的分かりやすい地域　・沿岸域　が良いように思います。
	現場から得られる生のデータセットがどのように加工（？）され、モデルの中に組み込まれていくのか、デモンストレーションしていただき、各捜査における考え方、見え方について議論するような実習を体験してみたいです。
	コア観察→スケッチ→柱状図の作成→…→地下水流動のモデルの構築のように生データの処理から実習（または専門家による実例を座学）することで、データからモデル化に至るまでのプロセスにおいてどのようなエキスパートジャッジが入っているのかを学んでみたい。どのようなエキスパートジャッジが地質環境のモデルに含まれているのかを知ることはモデルの不確実性を（感覚として）掴むことに繋がるため、処分場設計のオプションの検討や安全評価のシナリオやモデルの不確実性の考慮にあたって役に立つように思う。
	地下水に関して：淡水レンズの理解につながるような場所の見学。ボーリング孔を利用した水質・水温の測定と分析。
	・傾斜ボーリングの現場　・海上ボーリングの現場　・付加体地質の調査現場

3.1：モデリング（鉛直一次元モデル、2次元断面モデル）	
質問項目	**意見・要望等**
3.1-1 あなたのグループメンバーの構成は、どれに近いと思いましたか？	専門ごとにグループ分けをしたのであれば、最初にアナウンスもしくは栞に記載してほしかった。
	全員が地質学に携わる人間というわけではないが、他のグループに比べると圧倒的に地質学的な考え方をするグループだと感じた。
	専門が偏らなかったことで、様々な意見が出てよかったと思う。
	意見はまとまりやすかったと思うが、他分野とのコミュニケ―ションの訓練という意味では物足りないように感じた。
	グループは地質環境専門家の集まりとそれ以外の集まりに分けられていましたが、そもそも講師の方から各専門家の立ち位置や地下水にかかわるニーズの説明がなかったので、各グループで意見を言い合って終わってしまったような気がします。
	個人で作成するタイミングで出てくるモデルがバラバラ（地質情報だけを記述する方と、設計条件を記述する方等）だったから。
	他の班と検討結果の違いが明瞭であったことから、視点の違いに気付きやすかった。班内部でも専門分野が三者三様であり気付きが多かった。良い班分けであったと思う。
3.1-2 自分は「主体的」にグループワークに関われたと思いますか？	グループでの回答のまとめ方の方向性に対して案を出したので主体的に関われたと思う。
	グループワーク前半では、自身の専門知識がどのように役立つかわからず議論に参加しにくかったが、後半では積極的に議論に関われるようになったため
	地下水についてもモデリングについても、基礎知識が欠如しており何を発言していいのかすら、よく分からなかった。
	あまり議論が活発にならなかったが、グループワークの中で意見交換や提案もできた。
	グループの中でリードする人に完全に頼ってしまった。
	話し合いにかけられる時間が短かったので、全員の意見をまとめるときに、どこがポイントになるか発言できたため。ただ、これは私個人というよりは全体的にそうあったように感じます。
	自身の考えを述べたり、率先して手を動かす（作図ずる）ことはしたが、議論をリードする、まとめる、などの役割まではこなしていない（ほかの参加者やファシリテーターにゆだねていた）ため。
	与えられた時間に対して、何を取り組むべきか、理解できないままで議論に加わる状態が何度かあったため
	自身の意見を出し惜しみなく積極的に共有したため。自分が意見を共有することは他のメンバーにとっては他人の考えに触れる機会になると考え、積極的に関わった。
	メンバー内の年長者であることから、グループ内の議論を進めるために、そのきっかけとなるような発言を積極的に行うよう努めたつもり。
	発表や意見出しに積極的に参加した。
3.1-3 グループメンバー全体でのグループワークへの関わり方はどうでしたか？	メンバー各々の考えが全員分、グループの回答に反映されていたから
	各々が互いの強みを生かしてグループワークでの実習をより良いものにしていることが感じられたため
	議論開始時など、何からやればよいのか分からず、沈黙の時間があったため。 グループ担当の講師の方がいてくださり本当に良かった。
	講評にもあったが、物静かなメンバーが大半だったので積極的な話し合いという雰囲気にはあまりならなかった。グループワークで1つのものを作り上げる、という場合には協力して作成できたように思う。
	意見交換ではそれぞれの意見を述べており、最終的に各自を尊重した結論ができあがったと思う。
	結果的に全員の意見を絵に反映することができたので、自ずと意見を言う雰囲気になっていました。どこに誰の考えを入れるか全員で話し合いながら決められたのは印象的でした。
	自分と同様のスタンス（自身の考えを述べることはするが、議論をリードする、まとめる、などの役割は参加者やファシリテーターにゆだねたいというスタンス）の参加者が大半であったと思う。
	もともと講師が一人ずつ各グループを担当されるという話でしたが、急遽事務局に担当が振られており、専門家のグループワークへの関わり方に違和感がありました。
	それぞれの専門性に立って、モデルの説得性を高めるための助言、提言が活発になされていたから。
	どのメンバーも各自の考えを共有できていたため。また、メンバーの考えを整理して統合する役割に挑戦するメンバーもいたため。
	グループワークの初めの頃では、若手の人は遠慮がちであったが、議論を進めて行くにつれ次第に積極的な発言もでるようになっていった。
3.1-4 グループでの作業は活発だったと思いましたか？	自分たちのグループがどのようなメンバーの集まりとして設定されたのかを理解したことがきっかけで、徐々にメンバー間の壁が薄くなっていったと思った
	各人の専門知識を適切なバランスで組み合わせることで、議論をより実りあるものへと昇華させられると感じたため
	講師の方から助言をいただいたりタイムリミットが迫ったりした際は、やや活発になったと思う。
	受け身なタイプが多かったので、作業は進むが、リーダーシップを取る人はいなかったように思う。
	意見をまとめることが上手な方がいたため、それぞれの関わりが活発になったと思う。
	メンバーの全員が比較的活発に発言することが出来ていたので、自ずと活発な雰囲気になっていました。講師の方のまとめ方も巧く、ユーモアのある発言で場を和ませつつも真剣に取り組めたと思います。
	みんな自分の頭の中で考えることはするが、それを共有したり、議論しようとしたりする姿勢があまり見られなかった。
	「何を伝えるためのモデルにするか」を設定できていたからだと考えます。
	全員が悩んで手が止まる瞬間もあったが、指導役の方の提案や助言と、各メンバーが頭を回し続けたことにより、活発な作業となったと思う。
	発言がない場合でも考えがないわけではないので、ちょっとしたことの意見を聞いてみるなど議論に主体的に関わるための工夫ができれば良いのかも。グループワークを始めるにあたってのアイスブレイクの時間や休憩中の雑談も重要。

質問項目	意見・要望等
3.1-5 手を動かして考える作業をグループメンバーと共同で行う経験は、モデル自体への理解を深めたり、モデルで表現される事柄を理解するのに有用だと思いますか？	自分の持つ視点以外からモデルをみることができ、比較することで自分の視点のモデルへの影響度合いを確認できるから
	バックグラウンドの異なる専門家同士では、同じ言葉やデータに対する定義や着眼点が異なるということを肌感覚で知ることができたため。それにより、専門家同士の考えの共有が可能なモデル等を作成する必要性を実感できた。
	少なくとも自分は、基礎知識が不足しすぎており、人と議論できるレベルに達していなかったため。 1人で作成し、まとめの時間で講師陣の作成した例を座学で学ぶ形式が良かった。
	異なる考え方の人と協力して、作業するというのは難しい反面、非常に良い経験になった。物の考え方が違うと意見を取りまとめるのも難しく、他分野の人間は何に着目するのかといった視点が得られて有意義であった。
	ひとりでは理解できないところでも教えてもらうことができ、また、自分の解釈とは違う視点からの意見を聞くこともできたため、グループで作業したことは有用だったと思う。
	特に効果的だと思ったのは絵でイメージを示すことです。こういった場は大抵が言葉を交わすだけのものが多いように思いますが、各自がどんなことを考えているのか分かるのでとても良かったと思います。ただ、専門外の私が考えるモデルの良し悪しが分からず、今後、こういったモデルを考える時に何に留意すればいいか分かりませんでした。グループ毎にも描いたモデルは全く異なっていたので、専門家からの意見を聞きたかったです。
	自分の頭で考えているだけでは見落としがちな視点などを知ることができるので、有意義ではあると思う。
	各自が考えていることをモデルとして表現するのは理解の一助となったと思います。
	モデルを作成した側が伝えたい相手と伝えたいテーマを明確することで、初めてモデルが成立すると感じた。「〇〇を伝えたいかこのデータが必要だ」「〇〇を伝えるには××観点が無ければ説得力がない」というような議論を重ねて、要素を足し算、引き算することで、メンバーがお互いの考え方を理解した上でモデル自体を理解していけると感じました。
	モデルに関する理解は専門分野（今回のSDMであれば地質や地下水）の知識によって深まると考える。今回のグループメンバーはいずれも他分野の専門家であったため、各々の独自の解釈に触れる機会とはなったものの、SDMに関する理解としては深まらなかったと思う。地質や地下水などモデルに関わる分野の専門家同士のグループワークであれば理解の共有と深化に繋がると思う。
	情報を共有しながら、それぞれの意見を交わすことができる。
	意見を交わすだけでなく、手を動かしてイメージや文字で相手に伝えたほうが、自分の考え方を相手に伝えやすいため。

3.2：独習用トピック（1.意思疎通の技術、2.コミュニケーション能力の向上を目指して）	
質問項目	**意見・要望等**
3.2-1 トピック1 意思疎通の技術	ディスカッションとディベートの違い等は初耳だったから
	相手の知識やバックグラウンドに応じた説明をできると、意思や意見の擦り合わせがスムーズに進むということを改めて学んだため
	ディスカッションとディベートの違いすら曖昧だったため、勉強できてよかった。
	ディベートとディスカッションの違いなど、話し合いの基礎的な技術や知識を学ぶことができてよかった。ただ、この内容は初日に実施すべきだった。初日はグループワークもなく、ひたすら座学だったので、アイスブレイク的な意味でもグループに分かれて話し合う体験が初日に欲しかった。
	事前に説明されたディスカッションとディベートの方法を説明され、グループワークの際に意識して話そうと思ったが、実行するのが難しかった。ディスカッションの時間を独立して設けたほうがいいかもしれないと感じた。
	他分野の方が集まったこともあり、話し方や言葉に注意して話すように心掛けましたが、それでも専門性が抜けない部分があるとともに、周囲の方の視点の違いなど、そのギャップを痛感しました。そこの感覚を共有できるように、今回のような場があれば積極的に参加していきたいと思いました。
	講義の内容は有益であったと思うが、実際の議論の場では、目の前の課題に一生懸命になってしまい、意思疎通の技術について気を配る余裕がなかったため。
	時間が限られている中で、”ある程度”追い込まれた環境での議論というのは、チームを活性化するのだと実感でいたから。
	ディベートの評価の4つの観点やクリティークマニュアルの内容が相手に物事を伝える際の参考になったため。ただし当日すぐに役立った実感はなかった。
	コミュニケーションの質を高めるためには、相応のテクニックも知っておく必要と考えていたので、その一端を知ることができた。
3.2-2 トピック2 コミュニケーション能力の向上を目指して	実際に活用されている例等が示されていると内容が実感しやすかったかもしれない
	本トピックを通じて、地層処分のプロジェクトを各機関と連携して進めていく上で、コミュニケーション能力の必要性を強く感じたため。
	心理学に関することを勉強できて興味深かった。 この知識が業務にどう役に立つのかについては、よく分からなかった。
	バックグラウンドの異なる人間に伝えることの難しさが体験できた。自分が言いたいことは伝わらないという経験は、今後の自己研鑽にも繋がる良い体験だったと思う。
	これについても実際にうまくできたとは思えなかったため、独習ではなく、少し長い時間をかけて練習したかった。研修のマニュアルを参考にして、今後向上を心がけたい。
	私は2回発表する機会がありましたが、1回目は「愛が無い」という評価をされました。そこで資料を見返したり、グループで話し合うことで、2回目の発表では、その項目で多くの方に手を挙げてもらいました。改めてコミュニケーション能力の重要性を感じるとともに、多くの人と話し合って少しでも良くなるように努力していくことが必要だと強く感じました。
	講義の内容は有益であったと思うが、実際の議論の場では、目の前の課題に一生懸命になってしまい、意思疎通の技術について気を配る余裕がなかったため。
	コミュニケーション能力は、相手に伝えたいという意識を持って実践を積み重ねていくことで向上されると思っているので、今回のようにテーマを決めて練習することは意味があると感じているから。
	興味深い内容であり今後実戦において活用していきたいが、現時点においてはまだ役立てられていない。
	基本的な知識がないこともあるが、内容が概念的であり説明から受けるイメージを理解につなげるまでに至らなかった。

3.3:総合学習全体を通じて	
質問項目	**意見・要望等**
3.3-1 総合学習を通じて、あなた自身の専門性やマインドに関わる気付き・発想はありましたか？	専門性を持った人が集まり何か回答を目指す場面は、規模や複雑さに違いはあっても、展開や空気感といった核となる部分は今回のグループワークをモデルとできるのではと思った。今後似たような場面に遭遇した時は、今回のグループワークと比較しながら取り組んでいきたい。
	異なる専門を持つものどうしが、相手に対してわかりやすい説明を行い、そして相手の説明を理解しようとする姿勢が不可欠だと感じた。
	地層処分事業において、自分の専門が役に立つ部分は微々たるもので、地層処分は様々な分野の専門家が協力しないと成し遂げられない壮大な事業だと改めて実感した。
	工学・安全評価に携わる方々との対話の際に、専門用語を使わずに伝わる言葉を選ばなければならないと思った。異なる前提を持っている場合は、意図したいことが伝わらない場合が多く、当たり前すぎることが当たり前じゃなかったという気付きを得た。おそらく今後の事業で他分野間・他機関の連携の際には、かならず生じる問題だと思うので一層の注意を払いたい。
	グループワークでは様々なバックグラウンドを持つ人たちが集まっており、同じことに対しても違った意見を持っていた。このようなグループで意思疎通を図ったり、最終的に結論をまとめるためには、異なる専門分野の橋渡しとなるジェネラリストの重要性を感じた。
	私は解析・評価が専門であり、今回のセミナーでは調査や実験を行う方が多かったので、他分野の持つ視点や表現の違いを強く感じました。グループワークで示した図について、解析・評価で用いるような表現で説明したところ、そのような表現はしないなどと言われたこともあり、衝撃を受けました。解析をしていく上で近い性質を持つものはまとめてしまうことも多いですが、自分の描いたモデルを見返してみると、調査や実験をしている方の想いを軽く考えてしまっている部分もあるのかなと思い直すところもありました。今後はもう少しデータの持つバックグラウンドにも踏み込んでみていければ、より深く考察できる部分もあるだろうと思いました。
	ジェネラリストの存在意義については理解できた（普段の業務のなかでも必要性を実感することが多々ある）が、ジェネラリストになる人材を育成するためには、普段からそのような能力が育つような環境に身を置かないと難しい（専門性を伸ばすことが重視される職場や業務分担では難しい）と感じた。
	異なる分野からのニーズを意識して業務を行う必要があると感じました。
	専門家が自分の専門分野を多分野の人間に説明するというのはとても難しいと感じた。専門分野の方たち同士なら通じる言語が通じない、ということに気づけないで教育してしまう恐れがあると感じた。専門家から多分野の少人数の人間への集中的な教育⇒他多分野
	他のメンバーが各々の専門性に基づいてSDMを解釈していたのに対して、自分は地下水の専門家と同じ観点で解釈できていると指導役から講評を受けた。これまで主に部門間調整の業務に携わってきたことで、他分野の理解に立つ能力が身についているのかもしれないと感じた。
	専門異なることで、それぞれの発言が相手の気付きにつながるということが、短時間のグループワークでも経験することができた。同じものを違う目線で考えること、それらの考えを突き合わせて考えることの重要性をあらためて認識することができた。その際、検討に資する情報を参加者が共有できていることが大前提。今回のケースでは事前に余分な情報は持ち合わせていないので、参加者のもっている情報は共通であるという前提が実践されていたのが良かった。こうした場合には、普段の職場内の議論よりも相手の意見に素直に耳を傾けることができていたような気がした。
	構築されたSDMに基づき設計する側として、あまりにも知識不足であると痛感した。
3.3-2 専門家チームは、<専門性>を集めるだけでなく、チーム力を発揮するための「場づくり」「チームづくり」の努力も必要だと思いますか？	そのような努力がなければ、回答がまとまりにくくなると考えるから
	「必要だと思わない」とは思わないため
	グループ担当講師の方が発言しやすい雰囲気を作ってくださったおかげで議論を行うことができたから。
	共通の目的に向かって進んでいる一員、という意識づけは大切だと思う。ひたすら業務や研究に没頭するだけでは、プロジェクトの成功はおろか、連携性は生まれない。
	専門が異なると同じ考えには至らないことを感じた。そのため、意見を言いやすい雰囲気作りや、多様な意見をまとめることのできる人をチームに入れるといった工夫が重要になると思う
	チームとしての取組みは非常に重要なものだとは思います。しかし、それは強要されるものではなく、専門性を高めていく人もいれば、チーム作りを専門に取り組む人もいたり、どちらも担う人がいてもいいと思います。それぞれ、個人の興味であったり、得意不得意もあると思うので、必ず行うべきものでは無いと思います。
	専門家も必要だが、専門家の考えをうまく引き出す人、まとめる人、などの役割を担う存在がいないと、チームとしての考えや方針がまとまらないため。
	人は機械ではないので、「場づくり」「チームづくり」の努力が必要だと思います。
	専門家にしかできないことがあるので、あまり欲張るべきではないと思うから。
	各チームメンバーが有している専門性は共有されてこそチームとして活用できるものであるため。
	お互いの専門性を披露するだけでは何の成果も作り出すことができない。 共通のゴールを明確に設定することが必要。
3.3-2 メンバーに専門家チームのカを発揮させるポテンシャルをもつ人が比較的多くいるチーム①と、専門家は専門知識を語るだけの役割を担い、チーム力を発揮するために非技術系の外部ファシリテータを入れるチーム②では、あなたはどちらのチームに参画したいですか？	お互いに議論の前提となる知識の共有ができているうえに、チームで回答をまとめるにあたっても円滑に進むと考えられるから
	チーム内で役割がはっきりしている②のチームでは、互いにリスペクトをもちつつ効率的にプロジェクトを遂行するポテンシャルを持っていると考えられるため。 ①のチームの場合、スペシャリストが無理してゼネラリスト的なふるまいをすることにより、スペシャリストの強みが失われてしまう恐れがあると感じる。
	役割分担がしっかり行われている方が、責任感や義務感が生まれ、議論が活発になると思うため。
	逆説的ではあるが、今回のプログラムの参加により、自分はジェネラリストには向かないという思いを強くした。ジェネラリストに要求される項目は非常に多く、幅広い知識やマネージメント能力、適切なコミュニケーション能力など要求される水準が高いように思った。そのような人材は限られており、若手のころからジェネラリストを目指すというのは違和感を覚える。なんとなく、専門家として認知されてから、裾野を広げていく中堅以降の時期にジェネラリストとしての適性に芽生える人が多いように思う。ひたすら専門性を生かした研究をしている方が自分は居心地がよく、マネージメントの役割を担う人材がいれば、自分としては研究に専念できる②のチームの方がパフォーマンスを発揮できると思う。
	いろいろなバックグラウンドを持つ専門家が集まった場合、意見が衝突してしまったり、リードする人がいたとしてもひとつの結論に達するまでに時間がかかってしまうと思う。非技術系の外部ファシリテータがいることで、それぞれの専門家の意見を対等にすることができ、結論がまとまりやすくなるかもしれない。ただし、非技術系とはいっても幅広い知識が求められるし、誰が責任をもって最終的な判断をするかは明確にする必要があると思う。
	地層処分に関する研究にはまだ知らない部分も多く、そのことは今回のグループワークを通して痛感したので、視野を広げるためにも、チーム全体で取り組めるような雰囲気が必要だと思い、①を選びました。
	専門家も必要だが、専門家の考えをうまく引き出す人、まとめる人、などの役割を担う存在がいないと、チームとしての考えや方針がまとまらないため
	質問の前提条件が分かりません。
	専門家でありながら、チーム力を発揮させるポテンシャルを持つ人が多数いるならそれに越したことはない。ただしチーム力は発揮されても、相手に伝えられる能力を持っているかはまた別の問題だと思う。
	経験が無いためそれぞれ参加してみたい。どちらのチームがより優れているということは無いと想像する。 現状においては自分自身には語れるほどの専門性がないため1のチームの方が参加しやすいと思う。
	設問がどのような場面を設定したものかが分かりません。総合学習で実践したSDMの作成のことですか。それとも一般の方も含めたステークホルダー間のコミュケーションを想定したものでしょうか。 前者であれば①ですが、後者のような場合であれば②です。
	技術系のファシリテータであれば②にも参画したいと思う。

4:地下水専門家の仕事、考え方に関する知識獲得	
質問項目	意見・要望等
4.1 地下水専門家が行っている日常の仕事を知ることは、そのような専門家との意思疎通に役立つと思いますか？	専門家に聞けば完全に正確な答えが出ると思い込んでしまうことがあるけれど、必ずしもそうでない場合もあるということが受け入れやすくなったり、相手がどのように検討していったかに耳を傾けやすくなったりすると考えるから
	まずは連携機関の業務内容を知ることが意見の共有に不可欠だと思うため
	専門家と話す際、予備知識がすこしでもあると、説明の時間が短くて済むから。
	前提の知識がないまま、地下水の専門家と語り合うことはできない。加えて、その専門家の考え方や研究成果など、前提を知らないままでは、表面をなぞる程度しかできないと分かった。
	地下水の分野で使われる専門用語や作業内容を知ることは、なにを意図した研究なのか、また、そのデータをとるためにどれだけの労力が必要になるかを理解することにつながり、意思疎通が円滑になると思う。
	私の所属する部署にも地下水を専門とするグループはありますが、あまり交流がないので、今回得た知識を基に、少しずつ話し合っていければと思いました。
	地下水の専門家とコミュニケーションをとる際の土台になると思うし、どういう視点で現場を見ているかを知ることで、他分野から地質環境の分野の専門家に対して調査内容などのオーダーも出しやすくなると思う。
	専門家の仕事を理解することはその分野の言語を理解することだと思うから。非言語コミュニケーションは有効な面もあるが、効率の面では言語コミュニケーションを図れる関係性を確保するほうが望ましいと考えます。
	地下水専門家がどのような情報やデータを見てどのような判断を下すのかが分かることにより、判断の信頼性・不確実性の感覚が掴めるため。
	相手の背景（どこで、どのような業務をおこなってきたか）を知っているかそうでないかで、意思疎通の効率は相当変わると認識している。
4.2 地下水専門家が提供するデータが、実際にどのような仕事（労力、思惑）を経て取得されたのかを知ることは、あなたの仕事でその使い方を考えるうえで役立つと思いますか？	提供されたデータが、データ取得方法等に制限があり、自分の仕事で使う際に適さないといったケースもあるかもしれないから
	データが得られた背景を知ることは、地下水流動の推定など、自然現象の理解に不可欠であるため
	データの解釈に困った際、データの背景を把握しているのとしていないのとでは、解釈を難航させる要因の発見にかかる時間が大きく異なるため。
	地層処分で連携すると期待される地下水の専門家を知るきっかけにはなったとは思うが、果たして今後の実際の業務に直結するかというと疑問が残る。
	どのような思惑で取られたデータかを知ることで、誤った解釈をしてしまう危険性を減らすことができる。また、データを取得する労力を知ることは、貴重なデータであることを実感できるので活用しようという思いが強くなるし、調査計画の立案にも必須の情報になる。
	解析・評価をする上で、時間的なスケールや空間的なスケールを見て、丸めてしまうことや、判断がつきにくい場合は保守的な設定をしてしまうことも多くありますが、簡単にそうしてしまうのではなく、一旦立ち止まって、データをよく見れば見えてくる部分もあると思うので、気を付けようと思いました。また、判断が付かないようなところは、その専門家の方と話し合いながら、どのようにすればいいか決めていけるようになれば良いと思いました。
	データ取得に関する苦労もそうであるが、データの品質確保の仕方、誤差の考え方などについても説明があるとより良かったと思う（とはいえ説明が難しいとは思いますが…）
	労力は分かりましたが、どのような品質管理がされているのか説明がなかったので、取得されたデータが使用できるものか否かの判断がつきません。
	専門家のデータの取り扱い方を理解することは、専門家が作るモデルのレシピを把握することで、モデルの評価を行うために必要不可欠なものだと考えます
	地下水専門家がどのような情報やデータを見てどのような判断を下すのかが分かることにより、判断の信頼性・不確実性の感覚が掴めるため。
	データのみを必要とする場合か、協働して固有地点の地下水流動を理解する場合かで異なるのではないか。前者であれば、必要なデータについては取得できるかできないかが重要での労力や思惑は関係ない（リソース不足は解決の手段がある）。思惑は一連の作業を共同で実施している場合には共有されていてしかるべきこと。協働作業でないのであれば、論文等の形で提供され、その中に調査の意図も明記されていることが望ましいが必須ではないように思う。
4.3 地下水専門家は、地層処分事業のどのような局面で活躍できる、または活躍して欲しいと思いますか？	地下水は様々な局面で登場すると考えられるので地下水専門家は総括的な活躍をして欲しいと思う。
	地下水シナリオの作成
	地質環境モデルを作成する際はもちろん、その地域で水を使って仕事をしている方々との対話活動の際にも活躍してほしい。
	物質移行の評価には大変重要な研究であり、サイトの安全評価に必要な項目だと思われる。オーバーパックの性能に対する流体の影響や、深層の水の分布と挙動など、他分野との連携の必要性が高い専門家だと考える。地層処分で対象とする地下300m以深の水の分布や流動は、実際に調査するまではおそらく不明な点も多いと考えられる。地下水の専門家による判断なしでは将来の環境評価は困難と思うので、分野間連携をどのように円滑に進めるか考える必要性が高いと思う
	地層処分事業におけるサイト選定では、安全性を評価するために、数百万年にわたって安定した地質であることが保証される必要がある。また、地下に埋設した廃棄物から放射性核種が漏れ出て地下水を通じて拡散する可能性がある。そのため、地下水の専門家は、安全性評価のための地下水流動を調査する上で大きく活躍できると思う。
	地層処分では地下水は核種の移行挙動に関わったり、化学的な反応に関わるので、地下水流動や水質といった情報を時間的にも空間的にも広いスケールで得ていって欲しいと思いました。 また、地層の層理面での地下水の動きや塩淡境界の詳細な動き、THMCの連成による変化など、どこまで核種移行解析で取り扱えばいいか分かるようになればと思いました。
	現地での調査手法立案、現地調査でのデータ取得と解釈、地質環境モデルの構築、長期の地質環境の変遷およびそれとともに変わる核種の流出点に関する理解、不確実性を含む地下水流動解析結果と現地データの比較による妥当性の判断、など
	住民の方が抱く不安を理解したうえで、専門家の立場から責任を持って、また顔が見える形で説明していただきたいです。
	地層処分事業においては、まず概要調査段階で、当該地域における地下水の観測条件、観測方法の設計で活躍できると思います。 現在の地下水モデルは既存井戸から得られる情報を基にすることが多く、作成したいモデルに対して本当に必要な情報が得られないという制約条件下で議論されていると感じた。理想的な観測条件を整理し、提案していくことは重要だと思います。
	処分場建設候補地における地下水流動の推測、将来の地下水流動の予測、地層処分事業の地下水への影響に関する地元の方々の懸念への回答。
	概要調査・精密調査計画の策定。サイト選定の過程の地質調査および水理地質構造モデルの作成と解析結果の妥当性評価。地点対応：処分場の建設・操業時の周辺地下水環境の保全の観点からの説明。地下水流動の理解向上のための勉強会の開催。
	調査結果に基づくSDMの構築や、処分場の位置選定時にご意見を賜りたい。

5：自分の得意分野以外の専門性を持つ人々と働くことのイメージ	
質問項目	**意見・要望等**
5.1 自分自身の地層処分事業（研究開発または事業実施）との関係度をどう感じていますか？	廃棄物による影響を研究しているので、関りは深いと考える
	概要調査を考えると、隆起侵食プロセスを明らかにする手法の開発は不可欠なため。
	実際のところ、地球環境の技術開発に携わっている人間ではあるが、実施している研究はサイト選定などには直結しないため、地層処分とは比較的関連性の薄い応用研究であるため。
	私自身が業務として地層処分事業のための研究開発をおこなっているため、関係度を高く感じる。
	地層処分の安全評価ということで、天然バリアを対象とした核種移行解析をしており、時間的・空間的変化について地層処分のスケールを考えているため。
	現在は生活圏評価の手法構築に関係する業務が主になっているため
	地層処分事業に関わらず、一分野、一専門性だけで成立、継続する事業はなく、事業全体において、自分が持つ得意分野はごく一部に過ぎないと思うから。
	地層処分事業への貢献を常に念頭に置いて仕事をしているため。
	実施主体の職員である。
5.2 自身の仕事は、地層処分事業の研究開発面、事業実施面とどの程度関係していると感じていますか？	自身の仕事は最終的に安全評価へと反映されなければならないから
	自分が現在携わっている業務が「手法の開発」なため。
	手法開発や将来予測など、業務では研究が主体となっている。
	私の所属するグループでは地質の長期的な安定性の評価技術の開発をおこなっているため、地層処分の研究開発と関わりが深い。
	5。1での回答の通り、研究開発の面が強いと思います。ですが、今回のセミナーを通じて感じたこととして他分野との連携の必要性を感じましたので、ある程度はどちらも関係することが必要だと思っています。
	現在の直近の業務が概要調査段階での生活圏評価の手法構築に係るものであるため
	NUMOは事業実施を目的とする組織だから。
	マネジメントに関する仕事であり、事業の遂行が主眼であるため。研究開発については広く浅く、事業における位置づけを理解する程度で良いと考えている。
	概要調査の準備に向けた業務が増加している。
5.3 現在、あなた自身の仕事において、自分の得意分野以外の専門家との協力の度合いや頻度は高いと感じていますか？	自身の仕事で協力することの多い専門家は、大きなくくりでは工学系の方がほとんどで偏っていると考えるから
	1つのターゲット（地域・時代）にしか関わっておらず、狭域な分野の専門家としか仕事を行っていないため。
	機構内でも専門分野の異なる研究者は多く、異分野間の連携という意味では大きく関連する。学会等で他分野と協力する頻度はある程度あるが、地層処分に関係のない研究では、関わりは比較的少ない。
	業務でおこなっている地下水の流動環境の評価では、あまり他分野との共同作業がないため、交流は少ないと感じている。
	個人的な付き合いで多少話すことはありますが、協力となるとほとんどありません。
	生活圏評価は、各種の出口としての地下水流動系の理解、地表の水系の変化、地形などの地球科学的な分野の知識と、被ばく線量評価の知識が橿王となるため。
	私の所属する技術企画Gは特定の専門性を発揮するのではなく、技術部の運営を円滑に遂行するための組織として期待されているから。
	事業遂行のために各分野の取組みをどう進めていくかを指揮することが仕事であるため。
	地層処分においては得意分野だけで完結する業務はほとんどない。
	得意分野1つで業務は遂行できないため。
5.4 今後、あなた自身の仕事において、自分の得意分野以外の専門家との協力の度合いや頻度が高まっていくと思いますか？	文献調査が始まったことにより、事業の前提となる条件が定まっていき、仕事上必要となるデータもより限定され専門性が高まっていく可能性があるから
	今後、地層処分という一つのゴールに向けてより一層の調査・研究を進めていく必要があるため。
	地層処分が新たなステージに進み、概要調査や精密調査が実施されることになれば、他分野と協力する機会が生じると思うから。
	処分事業が本格化した場合、工学や安全評価など、あらゆる分野の専門家と連携して事業に従事する必要性が高まると考えられる。
	まだ地質評価技術の開発に関わって経歴が浅いため、他の分野との協力は少ないが、今後プロジェクトに関わっていく上では協力の度合いや頻度は高まっていくと思う。
	セミナーの後半にあった発表では、分野が違えば示す図も言葉も変わることが分かりました。表現の仕方が変わることはもちろんあると思いますが、大きく地層処分事業の括りで見ると、まだ連携が取れていない証拠でもあると思いました（自分の勉強不足もありますが）。今後は他分野との連携を意識することも大切だと思いました。
	上述のように、地質環境と安全評価の知識が必要な分野であり、双方の意見交換で評価モデルをよりよくしていく必要があると思うので、連携は不可欠だと思う
	事業が進展すればするほど、多分野との連携が必要不可欠だと私は考えているから。
	現在は主に技術的な分野を対象にマネジメントしているが、サイト選定活動が進むにつれて地元地域の方々のニーズなど社会科学的な観点についてもマネジメントの必要性が増してくるため。
	事業が進めば協働作業が必然的に増える。

質問項目	意見・要望等
5.5 それを意識して、あなた自身やあなたが帰属するグループでは、どのような取り組みをしていますか？	自身の仕事の前提となる条件に関わってくる可能性があるので、常に動向を追っていきたいと考える
	分野間での連携をもとにした研究成果を創出すること
	分野横断型のセミナーの実施
	アウトリーチ活動に力を入れたり、自分の資料や文章を専門外の人に見せて理解できるか試したりといった工夫を実施している。
	同じ性能評価・安全評価のグループ内ではありますが、人工バリア、ニアフィールド、ファーフィールド、生活圏と様々ですので、それぞれどのようなことをしているか発表する場を考えています。まずは自分の所属するグループを知ることから始める予定です
	部の単位であるが、専門分野を横断した枠組みでのプロジェクト業務を立ち上げている
	分野を横断するプロジェクトに取り組んでいます。
	多分野の専門家への説明会の開催を企画する。 専門グループが作成する資料の説明性を高めるための議論の実施
	部門横断の業務についてプロセスを整理することで連携を円滑にしようとしている。
	委託業務においてもテーマごとに複数の専門家から意見をいただく場（専門家委員会）を設定することに取り組んでおり、その際、複数分野から専門家を選出するようその構成に配慮することを心掛けている。
	グループにおいて、自主的に年度末に成果報告会を部内に向けて実施している。
5.6（まえふりスライド11参照） あなたが専門性を持つ人々のチームに参画している場合、あなたはチーム活動の「why」「what/how」「process」のどの領域でリーダーシップを発揮できる（リーダーである必要はありません）と思いますか？）	自身の仕事の役割が該当すると考えるから
	現場に近いところで考えるのが比較的適していると思うため
	自分の専門性を一番発揮できそうな領域だから。
	研究を進めていく上で、建設的な思考力はチームの運営に活かせると考えられる。
	同位体をはじめとした化学分析は比較的得意なので、技術的な面でチームをサポートできるような立場であれば、目標を達成するために貢献できると思う。
	例えば、どういった状況が地層処分にとって厳しい状況（線量が高くなるなど）になるか、解析をしてみるとこうなりそうだといったことをこれまで考えてきたので、どうなりたいか、何が課題になるかについては考えていけると思いました。
	なじみのある研究開発に近い部分の領域が「2：what/how何をするか、どうやってするか」であるため
	チームにとって、5W1Hを明確することが必要不可欠です。チームを構成するメンバーの得意・不得意はその時々で変わるので、自分はチームの中で不得意な部分を補う役割を果たすことが得意だと思っています。
	事業遂行の観点に立って各業務の意義を整理する経験を積んでいるため。
	業務の実施担当者として推進する場合、いずれも実施する立場にあるのが常

6.1：ファシリテーション面の工夫	
質問項目	意見・要望等
6.1-1 他者と共同で学ぶ上で、今回のセミナーの「自己紹介」のように最初に（終わった後ではなく）自身の思いを語り、他の人の思いを聞くことは有益と思いましたか？	他の参加者と仕事内容の範囲の被りが狭く感じられ、他の参加者のもつ課題について深く理解できなかったから
	他者の専門分野やバックグラウンドを知ることで、その後の話し合いの際に意思疎通を図りやすいと感じたため
	数日間、共に作業を実施する仲間の背景を知ることは、役割分担やコミュニケーションにおいて不可欠だから。
	有益ではあるが、もっと他の参加者の専門性を掘り下げて話したかった。口頭だけでなく、プレゼン発表といった形式で紹介があればなお良い。
	初対面である他の参加者のバックグラウンドや問題意識を知ることができて、その後のコミュニケーションが円滑になった。
	どのようなバックグラウンドの方なのか、考えなのかが分かると、話しかけやすいと思いますし、その後のコミュニケーションも円滑にできると思います。実際に、グループワークでもそうしたところの会話から意見の出しやすい良い雰囲気で臨めたのではないかと思います。
	お互いのバックグラウンドなどを知っておくことで、あとあと話しやすくなるため。
	どういった方が参加しているのか興味があるので、有益だと思いました。
	1人2分程度で十数人の話を聞いても、ほとんど覚えていられない。きっかけの一つとしては良いと思う。
	他の参加者の思いを知ることで相手に対して能動的に働きかけやすくなるため。 自身としても思いを整理して語ることで、目的意識が明確になり参加姿勢がより能動的になるため。
	意思疎通において、相手のバックグラウンドをしっておくことはとても重要。
	自己紹介に参加できなかった
6.1-2 初日の自己紹介で、あなた以外の人が示したキーワードのうち、印象に残ったキーワードは何でしたか（複数可）？ それはどうしてでしょうか。	地下水 地質環境分野を生業としている参加者が多く感じ、一番記憶に残った
	「工学」「工学特性」 地質環境分野の側にいる身としては、工学を専門とする方々と一緒に同じトピックについて学び、議論するというのは貴重な機会であったため
	「対話」 普段の自分の業務では対話に携わる機会は少ないため。
	安全評価 理由：自分と全く別のバックグラウンドを持つ専門家が参加していることが実感できたため。
	コミュニケーション：これまでの研究や業務では近い分野の人と共同作業をおこなっていたため、意思疎通の前提になる知識や問題意識が異なる人との交流した経験がほとんどなかったため、独習トピックにもあったようなコミュニケーション能力を意識する場面があまりなかったと感じる。
	「仕事は〇〇の調査」や「学生時代に〇〇を学んでいた」といったキーワードは、6。1-1の回答にもある通り、どのような方か分かるので印象に残りました。
	具体的にどのキーワードということはありませんが、どちらかというと自己紹介のときには、皆さんが自身の専門分野に関係する言葉をキーワードにしていた人が多く、「コミュニケーション」などは少なかった印象。
	皆さんキーワードを言われていましたが、むしろ話の内容のほうが記憶に残ってしまい、キーワードについてはあまり印象に残りませんでした。
	炭素同位体年代から物理探査　　学生時代は炭素同位体年代を専門に研究していたのに、物理探査のグループに配属されるというように、研究機関に就職しても自分の専門性とは異なる仕事を要求されることもあることに驚きました。
	キーワードとして印象に残っているものは無い。どのワードも聞き覚えのあるものであったためかと思う。 話として印象に残っているのはNUMO西尾さんの「コミュニケーションの難しさ」に関するお話。自身の実体験を基に話をされていて分かりやすい話であったため受講後の今も内容を覚えている。
	忘れてしまいました。ということはあまり印象に残らなかったのか。キーワードを示した人も少なかったような気がするが
	自己紹介に参加できなかったため未記入。

6.2:アクティブラーニング手法	
質問項目	**意見・要望等**
6.2-1 今回の「地下水」をテーマとしたセミナーと同様な方法を他のテーマに応用する場合や、自組織で行っている勉強会等で応用できるかもしれないといったアイデアをお聞かせください	今回のセミナーを通じて、専門分野がばらついているメンバーで集まって一つのトピックについて議論することで、新たな知識の獲得や意思疎通の技術向上が見込めると感じた。 自組織でも勉強会やセミナーなどが開催されることがある。その際、異なるバックグラウンドを持つ専門家が一堂に会す。様々な専門家が周りにいるということを意識すれば、事物を多角的かつ専門的な視点で捉えられるだろうと思った。このような視点を持つことで、個人から組織レベルでの研究能力向上などに役立つと感じた。
	共通する知識は地下水の超基礎のみで、専門や地層処分事業に携わってきた年数も全く異なる人たちが協力するにもかかわらず、地下水分野に特化したディスカッションを行うのは無理があるのではないか。自分のグループでは、地下水に詳しい人に負担が偏っていた。ディスカッションのテーマは、浅く広い方が良いのではと感じた。（例えば想定する説明相手を市民にする等）
	着想は良かったと思うが、プログラムの順序には違和感を覚える。異分野間で集まっているので、ディスカッションは最初の方が良いと思う。全く視点の異なる意見を目にすると、自分の分野の考え方や伝え方に注意するようになると思う。今回初日に実施した自己紹介はかなりあっさりしていたので、もう少し掘り下げて話を聞きたかった。ブレインストーミングを使った意見交換など、ベースの違う分野の人とかかわる際には、考え方を洗い出す方法などが有効かと思った。
	目に見えない地下にも水がたくさんあって流れているということは、地上からは目に見えないことであり、多くの人の興味をひくトピックだと思う。今回の研修は3日間かけておこなったが、例えば富士山周辺のような地下水が豊富な地域で、地下の3Dモデルの解説と実地見学を組み合わせたコンパクトな内容にして小学校や中学校向けの出前授業とすると、地域貢献もできるのではないか。
	自分の所属するチーム内での報告会などで、個人で行っている研究を発表するといった取組みはあってもいいと思いました。市民向けの対話活動などでは用いる言葉などの表現をある程度は統一しないと混乱を招くこともあると思いました。人によって使う言葉が違う、意味も違うとなれば理解しにくくなってしまうと思います。イギリスやカナダでの対話活動がどのように行われているか分かりませんが、使う言葉、意味の統一やその言葉が正しいか専門家と相談するなどが必要だと思いました。
	今回のような3日間のプログラムでなくとも、数時間くらいで、異分野間（地質、工学、安全評価）でのコミュニケーションの難しさや、それぞれの分野はどのようなものの見方をするのか、などを知るための研修を各組織内で繰り返し行っていくことで、「ジェネラリスト」的なものの考え方ができる人材育成につながるのではと思いました。
	このアンケートのように参加者からのコメントを収集した場合には、ジャンルごとに整理し、回答を参加者に返すことが多いです。本プログラムでもアンケート結果を収集して終わるのではなく、事務局から回答をお示し頂きたいです。
	・「地下水」をテーマとしたセミナーと同様な方法を他のテーマに応用できるアイデア 土壌や、トンネル（坑道）。「地下水」は多くの人にとって身近な存在なので、問題意識を共有しやすかったという特徴があると思います。
	今回の方式を用いて、処分場建設候補地において地元の方々を対象に地域の地質環境や地下水環境に関する勉強会を開催すると、実施主体の活動に対する納得感の醸成が期待できるように思う。
	SDM構築の演習については、自組織にそのまま適用できるように思われる。 SDMに主軸を置けば、地質構造や水理・力学パラメータの設定を加えて応用することも可能ではないか。さらに進めて将来の変遷を考慮した4D-SDM構築の考え方とか。
	アイデアとして、座学と実習をセットにした学びの形は、理解を深めるうえで有用であった。

（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）（国庫債務負担行為に係るもの）報告書（2020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）（国庫債務負担行為に係るもの）

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1-5	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]
（別添1）研究報告1-6	図6	ジオポリマー硬化体の概要
（別添1）研究報告1-9	表2	全体研究計画
（別添1）研究報告1-11	表3	メタカオリン化学組成
（別添1）研究報告1-11	表4	試験体の配合
（別添1）研究報告1-14	図7	含水量および強熱減量測定結果
（別添1）研究報告1-15	図8	圧縮強度および超音波伝播速度測定結果（材齢28日）
（別添1）研究報告1-15	図9	圧縮強度試験結果（材齢1年）
（別添1）研究報告1-16	図10	収縮量測定結果（材齢1年）
（別添1）研究報告1-17	図11	プロトンNMR測定結果(CPMG法、材齢28日)
（別添1）研究報告1-18	図12	固体NMR 測定結果（上図：27Al、下図29Si）
（別添1）研究報告1-19	図13	低温DSC測定結果（材齢28日、上図：凍結過程、下図：融解過程）
（別添1）研究報告1-20	図14	EPMAによるセシウムの濃度分布測定結果の一例
（別添1）研究報告1-20	図15	セシウムのみかけの拡散係数測定結果（材齢28日）
（別添1）研究報告1-21	図16	セシウムの吸着等温線（材齢28日）
（別添1）研究報告1-21	図17	セシウムの飽和吸着量
（別添1）研究報告1-22	図18	浸漬期間18か月における溶出量（上図：ナトリウムおよびカリウム、下図：アルミニウム及びシリカ）
（別添1）研究報告1-23	図19	溶出試験における質量減少率の変化
（別添1）研究報告1-24	図20	水の拡散係数測定結果（材齢28日）
（別添1）研究報告1-24	図21	空隙量と比表面積測定結果（材齢28日）
（別添1）研究報告1-25	図22	空隙径分布（材齢28日）
（別添1）研究報告2-7	図1	炭酸カルシウム析出条件の再検討（2019年度）
（別添1）研究報告2-7	図2	試料内部濃度から拡散係数低下を評価する手法の解析的検討（2019年度）
（別添1）研究報告2-9	図3	ベントナイト試料の膨潤
（別添1）研究報告2-10	図4	析出実験装置の概略図と初期条件
（別添1）研究報告2-11	図5	炭酸カルシウム析出試験結果（初期条件(a)，Ca当量分率75%(2cm)，2mA，4日通電後）
（別添1）研究報告2-12	図6	炭酸カルシウム析出試験結果（初期条件(b)，Ca当量分率75%(4cm)，2mA，8日通電後）
（別添1）研究報告2-12	図7	炭酸カルシウム析出試験結果（初期条件(c)，Ca当量分率50%(
（別添1）研究報告2-12	図8	炭酸カルシウム析出試験結果（初期条件(c)，Ca当量分率75%(6cm)，2mA，12日通電後）
（別添1）研究報告2-13	図9	XRDによる炭酸カルシウム鉱物の同定
（別添1）研究報告2-14	図10	EPMAによる炭酸カルシウム析出形態の観察
（別添1）研究報告2-17	図11	数値解析による炭酸カルシウム析出挙動の再現と、実験結果との比較
（別添1）研究報告2-18	図12	透過拡散試験装置の概略図

（様式２）

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告2-20	図13	透過拡散試験における低濃度側の重水およびヨウ化物イオン濃度の経時変化
（別添1）研究報告2-21	図14	透過拡散試験後のベントナイト試料中における重水およびヨウ化物イオン濃度分布、当量濃度分布、体積分率分布
（別添1）研究報告2-25	図15	透水試験装置の概略図
（別添1）研究報告2-26	図16	累積透水量の経時変化と区間透水係数（析出無し）
（別添1）研究報告2-26	図17	透水試験後の試料内部の当量濃度および体積分率分布（析出無し）
（別添1）研究報告2-27	図18	累積透水量の経時変化と区間透水係数（析出あり）
（別添1）研究報告2-28	図19	透水試験後の試料内部の当量濃度および体積分率分布
（別添1）研究報告2-29	図20	累積透水量の経時変化と区間透水係数（析出多（水みちあり））
（別添1）研究報告2-30	図21	透水試験後の試料内部の当量濃度および体積分率分布（析出多（水みちあり））
（別添1）研究報告2-30	図22	透水試験後の試料断面写真（析出多（水みちあり））
（別添1）研究報告2-6	表1	全体計画
（別添1）研究報告2-8	表2	2020年度の月次計画
（別添1）研究報告2-19	表3	透過拡散試験　条件一覧
（別添1）研究報告2-23	表4	透過拡散試験から求めた全体の実効拡散係数と保持因子（25℃）
（別添1）研究報告2-24	表5	濃度勾配およびArchie則から求めた局所の実効拡散係数（25℃）
（別添1）研究報告2-24	表6	析出部におけるArchie則パラメータ
（別添1）研究報告2-25	表7	透水試験条件一覧（室温で実施
（別添1）研究報告2-31	表8	透水試験から評価した平均透水係数まとめ
（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（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）
（別添1）研究報告3-3	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
（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（ソーシュライト化）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	図12	変質パラメータとラージスケール割れ目の関係
（別添1）研究報告3-17	図13	ラージスケール割れ目の走向・傾斜を示したシュミットネットステレオ図（下半球投影）
（別添1）研究報告3-18	図14	標高（深度）に対するラージスケール割れ目の頻度の変化（A）とLCIを表すサブソリダス組織の局所勾配の変化（B）
（別添1）研究報告3-19	図15	微小空隙算出のための画像解析
（別添1）研究報告3-21	図16	各鉱物の変質パラメータとマイクロスケール割れ目の面積分率の関係
（別添1）研究報告3-22	図17	試料ごとの変質パラメータとマイクロスケール割れ目の面積分率の関係

（様式２）

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告4-6	表1	透水試験と水銀圧入ポロシメータ試験の試験ケース
（別添1）研究報告4-6	図1	ベレア砂岩と田下凝灰岩
（別添1）研究報告4-7	図2	フローポンプ
（別添1）研究報告4-8	図3	透水係数と有効拘束圧の関係
（別添1）研究報告4-9	図4	水銀ポロシメータ試験の供試体
（別添1）研究報告4-9	表2	水銀圧入試験の結果一覧
（別添1）研究報告4-10	図5	間隙径分布
（別添1）研究報告4-11	図6	水分特性曲線
（別添1）研究報告4-13	図7	境界条件ごとの飽和度と深さの関係
（別添1）研究報告4-14	図8	飽和度と時間(日)の関係
（別添1）研究報告4-15	図9	飽和度と異方性主軸の回転
（別添1）研究報告4-15	図10	FEM の解析領域
（別添1）研究報告4-16	図11	変位ベクトルのコンター
（別添1）研究報告4-18	図12	モンテリ岩盤研究所での現地計測
（別添1）研究報告4-19	図13	現地計測と厳密解を用いたシミュレーションの比較
（別添1）研究報告4-19	図14	固有透気係数と時間(秒)の関係
（別添1）研究報告5-6	図1.2.1.2	幌延のボーリングコアの薄片(左)。　蛍光顕微鏡で観察された亀裂内の微生物　(中央・右)
（別添1）研究報告5-19	図4.2.1.1	幌延深地層研究所の地下水（2019年9月採水）に含まれる溶存無機炭素の高圧培養前後の同位体比
（別添1）研究報告5-20	図4.2.1.2	幌延深地層研究所の地下水（2019年9月採水）に含まれる二価鉄濃度の高圧培養前後の同位体比
（別添1）研究報告5-21	図4.2.1.3	溶存無機炭素同位体比及び全菌数から導出されたメタン酸化速度
（別添1）研究報告5-22	図4.2.1.4	2019年度に実施した高圧培養実験に用いた幌延地下水(左)、及び10 mM フェリハイドライトを添加した系の7日間高圧実験後培養液(右)の微生物群集組成
（別添1）研究報告5-23	図4.2.1.5	2019年9月の高圧培養実験に添加された幌延地下水中懸濁物の(a)X線回折パターン、(b)SEM像、(c)EDSスペクトル。
（別添1）研究報告5-25	図4.2.1.6	幌延地区の層序と地下水中懸濁物及びSAB-1コア試料のIRスペクトル
（別添1）研究報告5-27	図4.2.2.1	瑞浪超深地層研究所の地下水(2019年10月採水）の1.4MPaで高圧培養した地下水中の溶存無機炭素
（別添1）研究報告5-28	図4.2.2.2	高圧培養を行った瑞浪超深地層研究所の地下水(2019年10月採水)中の硫化水素および硫酸濃度
（別添1）研究報告5-29	図4.2.2.3	瑞浪超深地層研究所内の地下水(2019年12月採水)をテドラー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5-30	図4.2.2.4	高圧培養を行った瑞浪超深地層研究所の地下水(2019年12月採水)中の溶存無機炭素
（別添1）研究報告5-18	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ー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5-26	表4.2.2.1	瑞浪超深地層研究所内の地下水をテドラー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5-28	表4.2.2.2	2019年12月に瑞浪超深地層研究所内の地下水をテドラーバッグに封入し高圧培養した際の培養条件
（別添1）研究報告6-7	図1-1	地層処分システム概念図
（別添1）研究報告6-12	図3-1	乾燥密度と最大膨潤圧の関係（左：月布産，右：中国産）
（別添1）研究報告6-12	図3-2	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6-13	図3-3	不撹乱供試体と再構成供試体の最大膨潤圧比較
（別添1）研究報告6-13	図3-4	不撹乱供試体と再構成供試体のモンモリロナイトピーク形状比較
（別添1）研究報告6-14	図3-5	各原鉱石における鉱物組成同定結果
（別添1）研究報告6-16	図4-1	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）
（別添1）研究報告6-18	図4-2	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）
（別添1）研究報告6-19	図4-3	内部標準法による鉱物組成定量結果

（様式２）

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告6-20	図4-4	不撹乱供試体（左）と再構成供試体（右）の作製概念図
（別添1）研究報告6-21	図4-5	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）
（別添1）研究報告6-24	図4-6	フレーム型膨潤圧試験装置の概略図
（別添1）研究報告6-26	図4-7	小型膨潤圧試験装置の概要
（別添1）研究報告6-27	図4-8	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6-27	図4-9	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)]
（別添1）研究報告6-28	図4-10	XRD測定面の定義
（別添1）研究報告6-28	図4-11	XRD測定の概念図
（別添1）研究報告6-30	図4-12	一次元膨潤変形試験装置
（別添1）研究報告6-31	図4-13	新たに開発した一次元膨潤変形試験装置
（別添1）研究報告6-32	図4-14	薄片試料の外観
（別添1）研究報告6-33	図4-15	軟岩ペネトロ計
（別添1）研究報告6-36	図4-16	月布産原鉱石再構成供試体（2～4.75mm）の膨潤圧経時変化曲線
（別添1）研究報告6-37	図4-17	月布産再構成供試体（粒径：～0.425mm・0.850～2mm・2～4.75mm）および不撹乱供試体の試験終了時乾燥密度と最大膨潤圧関係
（別添1）研究報告6-38	図4-18	アメリカ産原鉱石再構成供試体（2～4.75mm）の膨潤圧経時変化曲線
（別添1）研究報告6-39	図4-19	アメリカ産再構成供試体（粒径：～0.425mm・0.850～2mm・2～4.75mm）
（別添1）研究報告6-40	図4-20	中国産原鉱石再構成供試体（2～4.75mm）の膨潤圧経時変化曲線
（別添1）研究報告6-41	図4-21	中国産再構成供試体（粒径：～0.425mm・0.850～2mm・2～4.75mm）および不撹乱供試体の試験終了時乾燥密度と最大膨潤圧関係
（別添1）研究報告6-43	図4-22	有効モンモリロナイト密度－最大膨潤圧関係
（別添1）研究報告6-45	図4-23	月布産再構成供試体（粒径2～4.75mm）の膨潤変形率経時変化曲線
（別添1）研究報告6-45	図4-24	月布産再構成供試体（粒径：～0.425mm・0.850～2mm・2～4.75mm）および不撹乱供試体の試験開始時乾燥密度と最大一次元膨潤変形率関係
（別添1）研究報告6-47	図4-25	アメリカ産再構成供試体（粒径2～4.75mm）の膨潤変形率経時変化曲線
（別添1）研究報告6-47	図4-26	アメリカ産再構成供試体（粒径：～0.425mm・0.850～2mm・2～4.75mm）
（別添1）研究報告6-49	図4-27	中国産再構成供試体（粒径2～4.75mm）の膨潤変形率経時変化曲線
（別添1）研究報告6-49	図4-28	中国産再構成供試体（粒径：～0.425mm・0.850～2mm・2～4.75mm）および不撹乱供試体の試験開始時乾燥密度と最大一次元膨潤変形率関係
（別添1）研究報告6-50	図4-29	試験開始時有効モンモリロナイト密度－最大一次元膨潤変形率関係
（別添1）研究報告6-51	図4-30	試験開始時の供試体乾燥密度－試験終了時の有効モンモリロナイト密度
（別添1）研究報告6-53	図4-31	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（A-1）
（別添1）研究報告6-54	図4-32	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（A-2）
（別添1）研究報告6-55	図4-33	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（A-3）
（別添1）研究報告6-57	図4-34	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（A-4）
（別添1）研究報告6-59	図4-35	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（C-1）
（別添1）研究報告6-61	図4-36	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（C-2）
（別添1）研究報告6-63	図4-37	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（C-3）
（別添1）研究報告6-65	図4-38	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（C-4）
（別添1）研究報告6-67	図4-39	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（C-5）
（別添1）研究報告6-69	図4-40	アメリカ産原鉱石の膨潤圧経時変化曲線
（別添1）研究報告6-69	図4-41	中国産原鉱石の膨潤圧経時変化曲線
（別添1）研究報告6-70	図4-42	供試体の初期乾燥密度 - 最大膨潤圧関係
（別添1）研究報告6-71	図4-43	アメリカ産原鉱石の供試体含水比―モンモリロナイト底面間隔関係

（様式２）

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告6-71	図4-44	中国産原鉱石の供試体含水比―モンモリロナイト底面間隔関係
（別添1）研究報告6-72	図4-45	供試体含水比―モンモリロナイト底面間隔関係
（別添1）研究報告6-73	図4-46	中国産原鉱石の含水比20.7%，15.4%，13.9%における不撹乱供試体・再構成供試体のピーク形状比較
（別添1）研究報告6-74	図4-47	偏光顕微鏡観察結果（月布産）
（別添1）研究報告6-75	図4-48	偏光顕微鏡観察結果（アメリカ産）
（別添1）研究報告6-76	図4-49	偏光顕微鏡観察結果（中国産）
（別添1）研究報告6-77	図4-50	偏光顕微鏡観察結果（富岡産）
（別添1）研究報告6-78~79	図4-51	SEMによる観察結果
（別添1）研究報告6-79	図4-52	倍率4000倍の図における元素定量分析箇所
（別添1）研究報告6-80	図4-53	元素分布のマッピング結果（倍率4000倍の図）
（別添1）研究報告6-81~82	図4-54	倍率4000倍の図における元素定量分析結果
（別添1）研究報告6-83	図4-55	倍率4000倍の図における鉱物分布
（別添1）研究報告6-83	図4-56	倍率3000倍の図における元素定量分析箇所
（別添1）研究報告6-84	図4-57	元素分布のマッピング結果（倍率3000倍の図）
（別添1）研究報告6-85~86	図4-58	倍率3000倍の図における元素定量分析結果
（別添1）研究報告6-87	図4-59	倍率3000倍の図における鉱物分布
（別添1）研究報告6-88	図4-60	針貫入試験に使用した不撹乱試料の様子
（別添1）研究報告6-90	図4-61	月布産原鉱石の一軸圧縮強さ
（別添1）研究報告6-90	図4-62	アメリカ産原鉱石の一軸圧縮強さ
（別添1）研究報告6-91	図4-63	中国産原鉱石の一軸圧縮強さ
（別添1）研究報告6-91	図4-64	全原鉱石の一軸圧縮強さの比較
（別添1）研究報告6-94	図4-65	緩衝材の設計フローの一例
（別添1）研究報告6-95	図4-66	オーバーパックの腐食に伴う水素ガスの発生・破過に関する概念図
（別添1）研究報告6-96	図4-67	試験終了時乾燥密度 - 拘束圧の関係（月布産）
（別添1）研究報告6-96	図4-68	試験終了時乾燥密度 - 拘束圧の関係（アメリカ産）
（別添1）研究報告6-97	図4-69	試験終了時乾燥密度 - 拘束圧の関係（中国産）
（別添1）研究報告6-97	図4-70	試験終了時乾燥密度 - 拘束圧の関係（月布産，縦軸対数化）
（別添1）研究報告6-98	図4-71	試験終了時乾燥密度 - 拘束圧の関係（アメリカ産，縦軸対数化）
（別添1）研究報告6-98	図4-72	試験終了時乾燥密度 - 拘束圧の関係（中国産，縦軸対数化）
（別添1）研究報告6-99	図4-73	想定される緩衝材の経時的な状態変化
（別添1）研究報告6-99	図4-74	緩衝材の経時的な状態変化に伴う乾燥密度 - 拘束圧関係の変化概念図
（別添1）研究報告6-100	図4-75	原鉱石の地質年代 - 拘束圧の比率（不撹乱供試体/再構成供試体）関係
（別添1）研究報告6-100	表2-1	本研究の実施計画（2018年度時点）
（別添1）研究報告6-100	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6-11	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6-15	表4-1	2020年度の研究スケジュール
（別添1）研究報告6-17	表4-2	原鉱石の基本的性質
（別添1）研究報告6-17	表4-3	測定条件
（別添1）研究報告6-28	表4-4	測定条件
（別添1）研究報告6-35	表4-5	月布産原鉱石の再構成供試体（粒径2～4.75mm）の諸元
（別添1）研究報告6-38	表4-6	アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径2～4.76mm）の供試体諸元
（別添1）研究報告6-40	表4-7	中国産原鉱石の再構成供試体（粒径2～4.77mm）の供試体諸元
（別添1）研究報告6-44	表4-8	月布産原鉱石の再構成供試体（粒径2～4.75mm）の諸元
（別添1）研究報告6-46	表4-9	アメリカ産原鉱石の再構成供試体（粒径2～4.76mm）の諸元
（別添1）研究報告6-48	表4-10	中国産原鉱石の再構成供試体（粒径2～4.77mm）の諸元
（別添1）研究報告6-52	表4-11	アメリカ産原鉱石の試験ケース
（別添1）研究報告6-52	表4-12	中国産原鉱石の試験ケース

（様式２）

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告6-53	表4-13	d_{001}に関する結果（膨潤圧試験後，A-1）
（別添1）研究報告6-54	表4-14	d_{001}に関する結果（膨潤圧試験後，A-2）
（別添1）研究報告6-56	表4-15	d_{001}に関する結果（膨潤圧試験前後，A-3）
（別添1）研究報告6-58	表4-16	d_{001}に関する結果（膨潤圧試験前後，A-4）
（別添1）研究報告6-59	表4-17	d_{001}に関する結果（膨潤圧試験後，C-1）
（別添1）研究報告6-62	表4-18	d_{001}に関する結果（膨潤圧試験前後，C-2）
（別添1）研究報告6-64	表4-19	d_{001}に関する結果（膨潤圧試験前後，C-3）
（別添1）研究報告6-66	表4-20	d_{001}に関する結果（膨潤圧試験前後，C-4）
（別添1）研究報告6-68	表4-21	d_{001}に関する結果（膨潤圧試験前後，C-5）
（別添1）研究報告6-82	表4-22	原鉱石の代表的な構成鉱物の化学式[33)]
（別添1）研究報告6-88	表4-23	月布産不撹乱試料（含水比11.6%）の針貫入試験結果
（別添1）研究報告6-88	表4-24	月布産再構成試料（乾燥密度1.71Mg/m^3，含水比9.1%）の針貫入試験結果
（別添1）研究報告6-89	表4-25	アメリカ産不撹乱試料（含水比34.2%）の針貫入試験結果
（別添1）研究報告6-89	表4-26	アメリカ産再構成試料（乾燥密度1.62Mg/m^3，含水比14.5%）の針貫入試
（別添1）研究報告6-89	表4-27	アメリカ産再構成試料（乾燥密度1.43Mg/m^3，含水比14.5%）の針貫入試
（別添1）研究報告6-89	表4-28	中国産不撹乱試料（含水比15.8%）の針貫入試験結果
（別添1）研究報告6-89	表4-29	中国産再構成試料（乾燥密度1.81Mg/m^3，含水比13.0%）の針貫入試験結
（別添1）研究報告7-4	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（上）と
（別添1）研究報告7-5	図2	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7-5	図3	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7-6	図4	10MI22号孔におけるCsの収着分配係数（上）と粘土含有率（下）
（別添1）研究報告7-7	図5	仮想モデルと実在モデルそれぞれの長所と短所
（別添1）研究報告7-9	図6	考慮した仮想的な水理地質構造の概念図（上）と作成した水理地質モデ
（別添1）研究報告7-10	図7	断層交差部の切断関係を考慮した仮想モデル（切断モデル）
（別添1）研究報告7-10	図8	キャップロックの分布範囲を変化させた仮想モデル
（別添1）研究報告7-12	図9	基本モデルにおける粒子追跡解析結果
（別添1）研究報告7-12	図10	基本モデルで算出された水頭分布
（別添1）研究報告7-13	図11	断層の切断関係を考慮した仮想モデルにおける粒子追跡結果（キャップ
（別添1）研究報告7-13	図12	断層の切断関係を考慮した仮想モデルにおける粒子追跡結果（キャップ
（別添1）研究報告7-14	図13	図11および図12における粒子移動距離
（別添1）研究報告7-15	図14	キャップロックの分布域を変化させたモデルを用いた粒子追跡解析結果
（別添1）研究報告7-16	図15	キャップロックの分布範囲を変化させたモデルにおける粒子の移動距離
（別添1）研究報告7-16	図16	キャップロックの分布域を変化させたモデルで算出された水頭分布
（別添1）研究報告7-18	図17	主立坑断層モデル（岡嶋，2019）鳥瞰図
（別添1）研究報告7-18	図18	断層における粘土鉱物の設定（モデル水平断面）
（別添1）研究報告7-19	図19	地下水流動解析で算出された水頭分布および粒子追跡解析結果における
（別添1）研究報告7-20	図20	注入開始から1000年経過後の収着性トレーサー濃度分布（図 19と同じ鉛
（別添1）研究報告7-22	図21	ボーリング孔位置図
（別添1）研究報告7-28	図22	10MI22号孔試験収着試験結果
（別添1）研究報告7-29	図23	10MI22号孔69m試料の収着試験結果
（別添1）研究報告7-29	図24	10MI22号孔69m試料の収着試験結果
（別添1）研究報告7-30	図25	10MI22号孔104m試料の収着試験結果
（別添1）研究報告7-30	図26	10MI22号孔141m試料の収着試験結果
（別添1）研究報告7-32	図27	10MI22号孔試料の脱離試験結果
（別添1）研究報告7-33	図28	10MI22号孔試料の脱離試験結果(累積脱離率)
（別添1）研究報告7-33	図29	10MI22号孔104m試料のEu脱離試験結果

（様式２）

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告7-35	図30	10MI22号孔試料を用いた脱離試験結果
（別添1）研究報告7-36	図31	10MI22号孔試料のCsの脱離率と粘土含有率
（別添1）研究報告7-8	表1	仮想モデルに設定した水理パラメータ
（別添1）研究報告7-24	表2	10MI22号孔試料鉱物組成分析結果
別添資料3-1		地層処分に関する包括的知識の構成（学習指導要領）
別添資料3-2		地層処分に関する専門的知識の構成（学習指導要領）
別添資料3-3		人材育成セミナーアンケート用紙
別添資料3-4		人材育成セミナーアンケート集計結果