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

（２０２１年度分）

２０２２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 2021 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 2

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

1.2.2 人材育成プログラムの実施・作成に関する作業計画 4

2. 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理・成果の取りまとめ 5

2.1 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発テーマの 2021 年度の成果概要 6

2.1.1 実施研究 1　研究者：山口大学　林　久資 6

2.1.2 実施研究 2　研究者：早稲田大学　伊藤　大知 8

2.1.3 実施研究 3　研究者：鳥取大学　河野　勝宣 10

2.1.4 実施研究 4　研究者：北海道大学　菊池　亮佑 12

2.1.5 実施研究 5　研究者：筑波大学　向井　広樹 14

2.1.6 実施研究 6　研究者：京都大学　久保　大樹 15

2.1.7 実施研究 7　研究者：日本原子力研究開発機構（JAEA）　福田　将眞 17

2.2 評価委員会による 2021 年度の研究成果に対する評価 19

2.2.1 中間報告 19

2.2.2 最終報告 19

3. 人材育成プログラムの実施・作成 32

3.1 実施方針 32

3.1.1 前提 32

3.1.2 実施体制 33

3.1.3 本事業におけるジェネラリストの定義 35

3.2 教材の作成方針と今年度以降の作成計画 38

3.2.1 昨年度までの実施内容 38

3.2.2 リテラシー教材作成の今年度の実施内容 39

3.2.3 ポータル教材作成に関する今年度の実施内容 64
3.2.4 教材作成に資する情報収集 69
3.3 2021 年度の人材育成セミナーの開催 74
3.3.1 これまでのセミナー開催経験からの考察と今年度のセミナーのコンセプト 74
3.3.2 セミナーの企画の検討 75
3.3.3 人材育成セミナーの内容の検討 76
3.3.4 人材育成セミナーの開催に向けて 85
3.3.5 人材育成セミナーの開催 90
3.3.6 アンケート結果の整理及び考察 97
3.3.7 今年度のセミナーのふりかえり及びアンケート結果等からの考察 108
3.4 今後の計画について 115
3.4.1 教材作成に関する 2022 年度の計画 115
3.4.2 人材育成セミナーの 2022 年度の実施計画について 116

別添資料１　実施研究報告
別添資料２　人材育成プログラム関連資料

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[a]を参考にする。

次節で、2021 年度に実施する作業計画を整理する。

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

前述の作業内容を踏まえて、2020 年度に選定した[b]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。

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。

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

[b] 2018 年度に選定した 7 件の研究テーマについては 2020 年度で研究を終了している。2021 年～2022 年度の 2 ヵ年で実施する 7 件の研究テーマについては 2020 年度に公募・選定を実施している。

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。
- 「地層処分に関する包括的知識」（⇒地層処分に関するリテラシー育成教材と名称を変更）及び「地層処分に関する専門的知識」（⇒地層処分に関するポータル教材と名称を変更）の 2 種類を作成する。今年度は、昨年度作成した「地層処分に関するリテラシー育成教材」の案の内容の精査を進めていくとともに、教材としての構成・デザインなどの見直しを行う。「地層処分に関するポータル教材」については、教材案を作成するとともに、ポータル教材としての概念を決定する。
- 作成した「地層処分に関するリテラシー育成教材」の教材案については、地層処分スキルアップ研究会や外部有識者等からのレビューを実施し改訂を行う。
- 人材育成セミナーに関しては、昨年度同様、小規模のセミナーとして、地下研究施設での研究開発を題材とし、幌延深地層研究センターのサイト見学、演習、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

2020 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、外部有識者からなる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 2021 年度の成果概要を、2.2 節では評価委員会において 2021 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。なお、各研究テーマの 2021 年度報告書については別添資料 1 に掲載する。

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

〔研究者：山口大学　林　久資〕

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

〔研究者：早稲田大学　伊藤　大知〕

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

〔研究者：鳥取大学　河野　勝宣〕

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

〔研究者：北海道大学　菊池　亮佑〕

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

〔研究者：筑波大学　向井　広樹〕

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

〔研究者：京都大学　久保　大樹〕

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

〔研究者：日本原子力研究開発機構　福田　将眞〕

2.1 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発テーマの 2021 年度の成果概要

2.1.1 実施研究 1　研究者：山口大学　林　久資

研究テーマ：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

（背景・目的）

地層処分施設の地下施設は、立坑、斜坑、連絡坑道、処分パネル等から構成される。地層処分施設の建設・操業は、閉鎖までの間を含めれば数 10 年程度（50 年以上）にわたることが想定されており、掘削施工段階から維持管理段階までの長期安定性を把握することが必要である。また、地層処分施設が沿岸部に建設される可能性も考えられており、そのような場合は地下水の塩分により、支保部材や設備等に何らかの悪影響を及ぼす可能性がある。そこで本研究では、地層処分施設の処分坑道を対象とし、地下空洞の長期安定性および塩水の空洞内湧水の影響による、施設の長期安定性を解明する。

＊＊＊＊＊

（2021 年度の実施計画）

2021 年度は、地下坑道の長期健全性を予測し、維持管理の要否やその程度を検討するために、同様の工法で施工・維持管理されている道路トンネルの健全性評価データを収集・分析をする。また、坑道が施工された際の支保工に発生する支保内圧や、支保工が腐食によって劣化した場合に及ぶ影響を明らかにするために、数値解析による坑道掘削解析を実施する。さらに、沿岸海底下で想定される高湿度・塩分環境下における、坑道の支保工の腐食挙動を明らかにするために、坑道で使用される部材の候補として、レールを対象として恒温恒湿腐食試験を行う。

＊＊＊＊＊

（2021 年度の成果概要）

道路トンネルの健全性評価データ分析については、日本国内で詳細調査したトンネルを 10645 本から無作為に 52 本抽出し、漏水や外力が発生したトンネルの分析を行った。その結果、漏水については、火成岩、堆積岩、変成岩すべての岩種において 50%～60%程度

のトンネルで漏水が発生しており、地質による影響は確認できなかった。トンネルに生じる変形の外力について分析を行ったところ、措置を必要としないトンネルは 67%であった一方で、中には補修等何らかの対策が必要な状態のトンネルがあることがわかった。今後は、トンネルの周辺に分布する地質や土かぶりの厚さ等を調査し、変状の有無との関係性を明らかにする。

坑道掘削解析については、幌延深地層研究センター地下 350m 地点の西連絡坑道を模擬した坑道を設定し、坑道掘削による坑道変状と支保工応力を確認した。その結果、掘削時の地山の変状については、第 2 次取りまとめの軟岩系岩盤データセットの下限値を入力データとした場合に、変位解析結果が西連絡坑道の掘削時の変異測定結果と近くなった。また、支保工応力については、支保工劣化に伴う支保内圧の低下は大きく違わないものの、比較的硬質な地山よりは比較的軟質な地山において坑道の変状が生じる可能性が示唆された。

塩害に関する試験については、予備実験でレール直上 10、20、30cm から人工海水噴霧によって付着する塩分量を計測し、霧吹きを 7 日毎に吹きかけた場合の日平均飛来塩分量が 0.2mg/dm^2/day (mdd) となることを確認した。また、恒温恒湿腐食試験を実施するにあたって、レールの初期質量とさび厚の測定を行い、初期さび厚はレール両端部が多いことが確認できた。今後は、恒温湿度器内に静置されたレールへ定期的に人工海水を噴霧し、また、レールのさび厚を計測することで、レールの減耗量を調べて腐食挙動についての知見を得る。

2.1.2 実施研究 2　研究者：早稲田大学　伊藤　大知

研究テーマ：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

（背景・目的）

高レベル放射性廃棄物処分場で人工バリアとしての使用が考えられているベントナイト系緩衝材は、自己シール性、止水性、核種吸着性などの性能が期待されているが、長期の土圧作用や地下水反応により膠結作用（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、緩衝材の性能に影響を及ぼす可能性が考えられる。本研究では、ベントナイト系緩衝材の膠結作用に伴う変質現象をベントナイト鉱床の生成過程の一部とみなし、鉱床から産出されるベントナイト原鉱石を用いて、緩衝材の膠結作用に伴う変質とそれに伴う特性変化を定量的に評価し、それらを考慮した緩衝材の自己修復性評価手法を構築・提案することを目的とする。

＊＊＊＊＊

（2021 年度の実施計画）

2021 年度は、新たに導入した原鉱石の基本的性質を取得するとともに、不攪乱試料・再構成試料の膨潤圧・膨潤変形実験を行う。また、月布産原鉱石の不攪乱試料・再構成試料について高拘束圧の膨潤変形試験を実施し、乾燥密度―拘束圧関係のデータを拡充するとともに、自己修復性評価手法のひな型を提案する。

＊＊＊＊＊

（2021 年度の成果概要）

新潟県白崎産・新潟県細越産・青森県黒石産のベントナイト原鉱石について、膨潤圧特性は再構成試料と比較して不攪乱試料は膠結作用の影響により約 1/2 以上低下する結果なり、先行研究と調和的であった。また、膨潤変形特性については、特に白崎産・細越産原鉱石の不攪乱試料において一次元膨潤変形率が著しく低くとどまっている傾向が見られた。今後は再現性の確認を目的とした実験的検討を継続し、試験結果の精度向上とデータベースの拡充を目指す。

高拘束圧の膨潤変形特性については、月布産原鉱石・Ten Sleep 産原鉱石の不攪乱試料・再構成試料を用いて高拘束圧（100・500 kPa）下での膨潤変形特性を評価した。その結果をもとに拘束圧－乾燥密度関係として整理し、膨潤圧実験や低拘束圧下の膨潤変形実

験結果と比較したところ、拘束条件に依らず不攪乱試料・再構成試料のいずれも拘束圧と乾燥密度の間に一意な関係にあることが示された。

自己修復性評価については、これまでに得られた各種膨潤特性実験結果に基づいた拘束圧－乾燥密度関係と、緩衝材の状態変化シナリオ（操業初期→再冠水→膠結作用発生→オーバーパック腐食）を組み合わせて緩衝材の自己修復性評価手法の提案を行った。今後、シナリオの見直しや対象データの拡充により、評価手法の高度化を目指す。

2.1.3 実施研究 3　研究者：鳥取大学　河野　勝宣

研究テーマ：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

（背景・目的）

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、人工バリア材（ベントナイト系材料）と天然バリア材（岩盤）の長期安定性に影響を与える現象の一つとして、岩盤亀裂へのベントナイト系材料の侵入が挙げられる。ベントナイト系材料による岩盤亀裂の閉塞の度合いにより、岩盤の透水性などが大きく変化することが考えられる。したがって、天然バリア材のバリア性能を評価するためには、岩盤亀裂へのベントナイト系材料の侵入量を予測することが必要となる。本研究では、人工バリアと天然バリアの物性に及ぼす地下水の化学成分の違いの影響を明らかにし、特にベントナイト系材料の劣化に伴う岩盤亀裂充填性のモデル化を行う。さらに、人工バリアと天然バリアの相互作用関係から、化学的作用によるベントナイトの性能劣化と岩盤の亀裂閉塞による性能向上の関係性を明らかにする。

＊＊＊＊＊

（2021 年度の実施計画）

2021 年度は、各種溶液中環境下における膨潤・充填性同時試験および透水試験を実施し、ベントナイトの膨潤圧、隙間充填量および透水係数を取得する。また、締固めたベントナイトと亀裂を含む岩石と模擬亀裂を含むアクリルを接触させた供試体を用いて、膨潤・充填性同時試験を実施する。また、膨潤を伴う緩衝材（ベントナイト）の亀裂への侵入量を予測する解析モデルの構築を行う。さらに、化学的作用を促進させたベントナイトで充填された亀裂を含む岩石の透水試験のための試験装置の作成と予備試験を実施する。

＊＊＊＊＊

（2021 年度の成果概要）

ベントナイト試料の膨潤・充填性同時試験では、浸漬させる溶液の種類によってベントナイトの膨潤圧と侵入距離に違いが見られ、いずれも蒸留水に浸漬させたベントナイトの膨潤圧と侵入距離に比べて小さくなることが分かった。特に、KOH 水溶液、NaOH 水溶液および $MgCl_2$ 水溶液については、膨潤圧も大きく低下し、さらに、ほとんど隙間に侵入しなかった。ベントナイト試料の透水試験については、各種の高アルカリや塩水系水溶液を用いた場合は、蒸留水を用いた試験と比較して初期の透水量が計測されるまでの経過時

間が早い傾向を示した。今後各種条件において透水試験データを取得する。

ベントナイト試料の岩石亀裂充填性のモデル化では、ベントナイトを高粘度の流体と仮定し、先端が閉口した亀裂へ侵入する流体の挙動を対象とした解析モデルを構築した。また、亀裂中は高湿度環境を想定し、この環境帯により気固界面のベントナイトの膨潤を固相の封入流体吸収現象と見なして解析モデルに組み込んだ。解析モデルを用いて、膨潤試験実験値の傾向の把握と、ベントナイトの侵入挙動における影響因子の検討を行った結果、ベントナイトの亀裂充填には、浸透による初期段階では膨潤圧および亀裂幅による影響が支配的であることが示唆された。また、膨潤圧が粘性抵抗とつり合うことによりベントナイトの侵入距離が平衡状態となり、それ以降は拡散の影響が支配的であることが示唆された。

岩石の透水試験装置の製作と予備試験では、最初に低透水性岩石供試体に適用できる定水位型透水試験装置を製作し、それを用いて封圧 1～12 MPa における種々のインタクトな岩石供試体の透水係数を測定した。得られた稲田花崗岩供試体の透水係数と、既往研究のトランジェントパルス法によって取得された同花崗岩の透水係数とを比較した結果、同じ封圧条件での透水係数は両試験で同様の結果となり、また、封圧の増加に伴い透水係数が低下する傾向についても調和的であった。これらの結果から、製作した定水位型透水試験装置は、トランジェントパルス法と同様に低透水性岩石の透水性を評価することが十分可能であり、10^{-5} m/s～10^{-14} m/s の範囲における岩石の透水性を評価することが可能であることが示された。今後はベントナイト試料で充填された亀裂を含む岩石の透水試験を実施する。

2.1.4 実施研究 4　研究者：北海道大学　菊池　亮佑

研究テーマ：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

（背景・目的）

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、人工バリアと天然バリアの多重バリアシステムによる封じ込めが想定されている。人工バリアの一つとして考えられているベントナイト緩衝材中に含まれる膨潤性のモンモリロナイト鉱物は、自身の鉱物学的変質が起こらないような常温に近い環境においても、モンモリロナイトあるいは随伴鉱物の溶解に伴う二次鉱物の間隙への沈殿や、発熱廃棄体の近傍での間隙水の蒸発・凝縮で生じる溶質の析出に伴って、粒子同士の固着が進行する現象、すなわちセメンテーションが発生し、膨潤性能に影響を及ぼす可能性が考えられる。本研究では、山形県月布鉱山から得られる複数のベントナイト原鉱石を、長期間天然環境においてセメンテーションを被った緩衝材のアナログ物質としてとらえ、ベントナイト原鉱石のセメンテーション物質の同定とその多様性を調査し、膨潤圧低下といった基本特性に影響を与えるメカニズムやセメンテーションの進行過程について検証を行う。

＊＊＊＊＊

（2021 年度の実施計画）

2021 年度は山形県月布鉱山周辺での野外調査および試料採取を行うとともに、採取された多数の天然試料の鉱物学的特徴付けを行う。採取試料については、全岩化学組成や粉末 X 線回折による鉱物組成の推定を行う。また、粉砕前の原鉱石の岩石組織やセメント物質を明らかにするために、走査電子顕微鏡あるいは透過電子顕微鏡による観察を行う。さらに、各ベントナイト層が続成作用時に経験した温度や、母岩となった火山灰の化学組成などの地球化学的パラメータの推定も行う。また、セメンテーションによる侵食への抑制効果の検証に資するために、ベントナイト中の宇宙線生成核種（TCN）の同位体分析に基づいた侵食速度推定方法の適用可能性に関して検討を行う。

＊＊＊＊＊

（2021 年度の成果概要）

野外調査により、月布鉱山の含ベントナイト褐色硬質頁岩部層のうち、背斜軸を挟んだ 2 地点（梅ノ木田、川向）において主要なベントナイト原鉱石を収集した。採取した試料について、粉末 X 線回折による分析を行ったところ、ベントナイトの試料はスメクタイト

と石英が主体で、長石や沸石、黄鉄鉱などのピークも確認された。梅ノ木田抗側および川向の両方において、沸石相が上盤側でクリノプチロライト、下盤側でアナルサイムとなっている傾向が見られ、下盤側のベントナイト層が続成過程においてより高温に達したことが示唆された。

月布ベントナイト鉱床の岩石物学的分析および走査電子顕微鏡あるいは透過電子顕微鏡による観察からは、原鉱石を固結させている主要なセメント物質はシリカであることが示唆された。微粒子状のシリカは、石英が主体で一部アモルファスシリカが確認された。また、シリカ微粒子はモンモリロナイト端面と接合する組織を呈していた。

蛍光 X 線分析により全岩化学組成を求め、続成過程における変質時に移動しないと考えられる微量元素に基づいて、ベントナイトの材料となった火山灰の化学組成の推定を行った結果、梅ノ木田抗側および川向抗側の 8 番層のみ安山岩質に分類されたが、その他のベントナイトおよび凝灰岩試料は流紋岩質からデイサイト質のマグマを由来とする火山灰から生成されたと推定された。

侵食速度推定方法の適用可能性に関して検討については、先行研究で行われている理論モデルを基に検討を行った。継続的な生成による蓄積と削剥による除去が釣り合う動的平衡状態に達するような＞10^3 年程度のタイムスケールの間、定常的に削剥され、かつ削剥速度が年間 1 mm を下回るような場所にベントナイトが露出している場合、その岩層の ^{26}Al 濃度からベントナイトの侵食速度を見積もることは理論上可能だと考えられた。

2.1.5 実施研究 5　研究者：筑波大学　向井　広樹

研究テーマ：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

（背景・目的）

高レベル放射性廃棄物の地層処分に関して、ガラス固化体に含まれている核種の中でアメリシウム（Am）-241（半減期約 433 年）、ネプツニウム（Np）-237（半減期約 214 万年）といった潜在的有害度が高いアクチノイド系列の放射性核種の環境中での挙動については比較的研究が限られている。本研究ではアクチノイド系列放射性核種の環境中での挙動について理解するため、特に各種の粘土鉱物におけるこれらの元素の吸着・脱離能や存在状態について明らかにすることを目的とする。

＊＊＊＊＊

（2021 年度の実施計画）

2021 年度は、Am のアナログとしてユウロピウム（Eu）を用いて、4 種類の粘土鉱物（雲母、ハイドロバイオタイト、カオリナイトおよびモンモリロナイト）に対して Eu 濃度、及び pH を変化させて吸着実験を行う。また、Eu を吸着させた試料に対して脱離試験を行う。さらに、吸着された Eu の存在状態について、電子プローブマイクロアナライザ（EPMA）や走査型、透過型電子顕微鏡（SEM、TEM）を用いた観察・分析を行う。

＊＊＊＊＊

（2021 年度の成果概要）

各粘土鉱物に対して、10^{-4}～10^{-6} M の Eu 濃度、また pH3～9 の条件で吸着実験を行った結果、各粘土とも pH が上昇するとともに Eu 吸着率が上昇する傾向が見られ、また低濃度の Eu の試験において、より高い吸着率を示す結果となた。また Eu 脱離実験においては黒雲母、ハイドロバイオタイトからほとんど Eu は脱離せず、これらの鉱物において Eu が強く固定されていることが示唆された。一方でカオリナイトからは Eu はよく脱離し、Eu が粒子表面に弱く吸着していると考えられた。また Eu が吸着されたハイドロバイオタイト、黒雲母に対して EPMA、TEM による観察・分析を行ったところ、それぞれ粒子の端部付近によく Eu が濃集していることがわかった。さらにハイドロバイオタイトでは粒子の層間にも一部 Eu が侵入していることが観察され、このような吸着サイトにおいて Eu が強く固定されていることが示唆された。

2.1.6 実施研究 6　研究者：京都大学　久保　大樹

研究テーマ：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

（背景・目的）

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、処分施設周辺の地下水流動形態の把握が重要となる。地下水理構造モデルでは、断層や透水性亀裂が主要な地下水流動パスあるいは遮水性構造として重視される。しかしながら、地層処分における長期の時間スケールを対象とする場合、マイクロクラックや鉱物粒界で生じる岩体基質部の透水性も無視できないと考えられているものの、広域地下水流動に及ぼす影響については不明な点が多い。本研究では、亀裂部（移流）と岩体基質部（拡散）の水理特性を統合した水理構造モデルの構築を最終的な目標とする。特に亀裂構造が重要な要素となる結晶質岩体を対象とし、亀裂モデリング手法の開発と、岩体基質部における透水性の定量化手法を数値解析と実測を通して実施する。

＊＊＊＊＊

（2021 年度の実施計画）

2021 年度は、既存の地球統計学的手法を用いた亀裂シミュレーション法である『GEOFRAC』のプログラムコードについて、解析時間の短縮や操作性の向上を目的とした改良を行う。また、岩石基質部の透水性の計測に使用するプローブ型浸透率測定器（パーミアメーター）の改良と検証試験を実施し、測定値のばらつきや、試料表面の状態によるガスリークなど測定精度について検討する。さらに、岐阜県瑞浪地域において日本原子力開発機構瑞浪超深地層研究所により大深度ボーリング調査で取得された水理試験データとボアホールカメラによる観測亀裂データの整理を行い、その統計的特徴について再検討を行う。

＊＊＊＊＊

（2021 年度の成果概要）

GEOFRAC の改良については、計算時間の短縮のために、各計算ステップを独立したコードに分割した。分割後のコードを使用し、GEOFRAC の検証を目的とした解析を実施した。解析では、仮想的に設定したボーリング孔に現れる亀裂データに基づいて GEOFRAC モデルを作成し、発生させる亀裂面や、ボーリング孔の条件を変更することにより、

GEOFRAC の適用できる範囲や妥当性についての検証を行った。亀裂傾斜に関して検証した結果、亀裂面の方向性とボーリング掘削方向の関係がモデリングの妥当性に大きな影響を与え、傾斜掘削の導入によって改善できることが確かめられた。本研究課題で対象とする瑞浪地域では、比較的傾斜の緩い亀裂の卓越が確かめられ、複数の傾斜孔も存在しているため、GEOFRAC による亀裂モデリングはある程度の妥当性を有していると考えられる。

プローブ型浸透率測定器の改良については、プローブ先端と試料表面の計測時の密着においてガスリークが発生しないように測定箇所にエポキシパテによるシーリング加工を施し、また、より低透水試料の計測が可能となるようにパーミアメーターの圧力センサを交換し、浸透率 $10^{-17}m^2$ 以下の測定が可能となった。改良したパーミアメーターにより土岐花崗岩のボーリングコア試料を用いて計測したところ、間隙率と浸透率の間に明瞭な正の相関関係が確認できた。この結果、パーミアメーターによるガス浸透率を直接的に透水係数に変換できないものの、透水性の大小関係の把握やモデル化に際しての重みづけの検証に用いることは可能であると考えられた。

瑞浪地域の水理データの再整理については、全 19 孔の大深度ボーリング孔で得られている水理試験値（透水係数）とその試験区間内の亀裂観測データを分析した。その結果、土岐花崗岩体の透水性は単純な亀裂本数の大小のみで決定されず、亀裂の配向性や性状によって岩体の透水性に与える影響が大きく変化することが示唆された。また、極めてインタクトな花崗岩であっても、複数の晶洞が存在する試料が観察され、亀裂以外の地質構造が透水性を変化させる可能性があることが示唆された。今後、水理試験結果と亀裂・岩相の関連性の分析をさらに検討し、その組み合わせから透水係数の推定を行い、広域的な連続モデルとして表現することが課題である。

2.1.7 実施研究 7　研究者：日本原子力研究開発機構（JAEA）　福田　将眞

研究テーマ：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

（背景・目的）

高レベル放射性廃棄物の地層処分において，10 万年スケールの隆起・侵食の評価は重要課題であり、その中で熱年代学は隆起・侵食評価手法の一つとなりうる。熱年代法の一つである(U-Th)/He 法（以降、He 法）は、様々な地質体に対して適用可能であることが特長であり、また熱年代法の中でも閉鎖温度が低い手法（<200℃）であることから、数十万年～千万年スケールでの冷却履歴を推定可能であり、温度変化を伴う幅広い地球科学的現象の推定に応用可能であるが、一方で He 法は年代標準試料が国際的にも未確立の状態となっている。本研究では、年代標準試料の候補として期待される複数のジルコン試料に対して、He 年代学的特徴を定量的に解明し、個々の粒子年代のばらつきをもとに年代標準試料としての適性を評価することにより、ジルコン He 法（ZHe 法）の年代標準試料の確立を目指す。

＊＊＊＊＊

（2021 年度の実施計画）

2021 年度は、年代標準試料の候補となる試料を選定し、その中の一つである兵庫県北西部の美方郡新温泉町付近に分布する歌長流紋岩について、現地にて試料採取を行い、試料から He 年代法分析用のジルコンを分離抽出する。また、候補 6 試料の内、歌長流紋岩とジルコンフィッション・トラック（ZFT）法の年代標準試料である Buluk Tuff の 2 試料について ZHe 年代分析を実施し、年代標準試料としての適性を定量的に評価する。

＊＊＊＊＊

（2021 年度の成果概要）

現地において採取された約 3kg の歌長流紋岩試料 2 つ（TRG04-21、TRG07-21）について、ZHe 年代分析に使用するジルコンを抽出し、各試料についてそれぞれ 1 万粒程度のジルコンを得た。歌長流紋岩 2 試料（TRG04-21、TRG07-21）と Buluk Tuff 試料（1 試料）について、ZHe 年代測定をした結果、TRG04-21 で 2.42±0.13 Ma、 TRG07-21 で 2.77±0.20 Ma、Buluk tuff で 17.7±1.74 Ma の年代値を得た（Ma は百万年、また誤差範囲はすべて 95%信頼区間を示す）。TRG04-21 については、1.9～3.7 Ma の範囲で比較

的集中しており、データのばらつきの指標となる MSWD（Mean Square of Weighted Deviates）値も 5.47 と比較的妥当であった。一方で、TRG07-21 および Buluk tuff については、年代の分布範囲は，2.0～5.0 Ma および 10～40 Ma と比較的広く、MSDW 値はそれぞれ、13.6、20.2 とばらつきも大きかった。また、TRG04-21 については、既往研究の年代データと整合的であることから標準試料としての潜在性が認められた一方で、TRG07-21 と Buluk tuff は広い ZHe 単粒子年代のばらつきにより、年代標準試料としての適性は低いという結果が得られた。今後は残り 4 つの候補試料の分析と年代のばらつきの原因を究明することが課題である。

2.2 評価委員会による 2021 年度の研究成果に対する評価

2020 年に選定し、2021 年度より 2 カ年の期間で研究を実施する 7 件の研究テーマについて、2021 年度は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

2021 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。

2021 年度　第 1 回評価委員会 日時：2021 年 9 月 29 日（水）　13：00～17：40 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 2021 年度の研究進捗状況について 20 分間の発表を行い、その後委員からの質疑、及び委員による評価記入を 15 分間行った。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。

2.2.2 最終報告

2021 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。

2021 年度　第 2 回評価委員会 日時：2022 年 2 月 22 日（火）　10：00～16：00 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 2021 年度の研究成果について、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 2021 年度の研究に対する意見、次年度の研究の方向性等に対する助言等を自由意見として記入する形式で行った。

- 実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか
- 実施研究は新規性・独創性があるか

- 地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか
- 次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か

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

2021 年度第 2 回評価委員会　評価結果（その 1）

研究テーマ	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）

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。	3.6
・実施研究は新規性・独創性があるか	3.4
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.6
・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	3.4

自由意見	・ 処分パネル，坑道の健全性等については，NUMO の包括的技術報告書の第 4 章と付属書 4-3 で述べられていますが，支保工やロックボルトの腐食についてはあまり述べられていません。研究室での実験に加えて，沿岸部や海底のトンネルにおける海水影響下での腐食の状況などを調査されてはいかがでしょう。 ・ 外国ではスウェーデンの SFR という中レベル廃棄物処分場が沿岸部での処分を検討しています。ひょっとしたら良い情報が得られるかもしれません。 ・ 一般的な道路トンネルの状況調査で、工法や経年によって漏水等の劣化が増える様子が定量的に得られている。それらの更なるモデル化と機構解明を期待したい。幌延地下水や塩水を用いた試験の実施によってある程度結果は得られるとは思うが、経過時間に関しては、現地のデータが重要となるので、更なるデータ取得が望まれる。 ・ 大きく 3 つの研究テーマを遂行しているが，それぞれの関係性があまり強くない印象である．例えば，トンネル点検で得られた結果が，何らかの形で坑道掘削解析に活かすなどの繋がりを期待したい． ・ トンネル点検の結果を，火成岩，堆積岩，変成岩でまとめているが，もう少し細かい区分で評価できないか．可能ならば，工事誌まで遡り，施工が困難であった箇所が点検結果ではどのように判定されているのかが必要な情報であり，さらにそのような不良箇所に対して，どのような対策をすることによって，寿命がこの程度延びたとか，LLC を考慮して，このような補修をすれば，この程度の延命が期待できるなどといった具体的な事例を積み重ねてほしい． ・ 坑道掘削解析では，3 番目のテーマである塩害に関する実験，あるいは腐食に関する知見をうまく取り入れて，それぞれの研究テーマを繋げることを検討いただきたい． ・ トンネル点検に関連して貴重なデータが蓄積されていると存じます。トンネル点検の結果から、地層処分(300 m 以深)の坑道維持から留意すべきことを整理して頂くと有り難いと存じます。

	・ 坑道掘削解析では、淡水系地下水と塩水系地下水とでは異なる結果になるのかが気になりました。後段のレールのデータを活かしながら支保工の腐食の影響を見ていくのも一つの方法だと考えます。 ・ 塩害について、塩分付着量は実験環境によって左右されるのでしょうか？温度および湿度の情報も確認をお願いできれば幸いです。 ・ 国内外の事例をも参考に、知見の整理を進めて頂ければと思います。 ・ 数多くの事例から研究が進められていると感じた。ただ力学的な観点での取りまとめが現状主流になっているようでもあるので、もう少し地下水成分やpH などとの関連、比較できるデータがあるとより将来的な観点で活用性が上がるのではないかと考える。 質問は； １）調査トンネルでの海水（塩水）場の部分はどれほどあるのか？ ２）５０年以上の変状として留意すべき最も重要なプロセスは何か？ ３）沿岸の場合、静水から塩水へと変化することになるが、そのような変化の場のアナログになるトンネルはないか？ ４）ロックボルトについては、数十年以上もの安定性（腐食なども含め）データがないか？特にロックボルトは処分場閉鎖後の水みちとして逆効果になることも考えられることから、既存のトンネルからのデータが得られるとありがたい。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2021 年度第 2 回評価委員会　評価結果（その 2）

研究テーマ	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）

評価項目	評価（平均）
・実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか。	3.8
・実施研究は新規性・独創性があるか	3.2
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.6
・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	3.6

自由意見	・ 実験室の研究からのみのアプローチでは限界があると思います。第一の目的である，「10 万年から 100 万年の間，緩衝材は膨潤した状態のまま（拡散場）で，膠結作用等により水みちができて移流場になることはないか」（膠結はどのような条件の下でどのくらいの時間をかけて進むか）に答えられるように研究と考察を進めてください。 ・ 膠結作用について様々な方法で特性を調べている。撹乱試料と不撹乱試料の特性の差異が顕著であり、膠結作用の特徴が出ている。SEM による観察でモンモリロナイトも膠着に寄与しているとあるが、そもそもモンモリロナイトが膨潤物質なので、少し違うように感じた。膨潤性を失う原因としては、層間に水が供給されない、層間の K イオンが層を固定している等が考えられるが、何が主要な原因なのかを追求してほしい。乾燥密度依存性を示しているが、膠着作用は密度の局所的不均一で生じているのではないでしょうか？予定されている弾性波試験は、局所不均一性を表す指標になるのかもしれません。 ・ 新しいベントナイト原鉱石を加え，多くのデータを蓄積していることは評価できる。ただし，毎回同じ視点からのデータ評価に留まっている感じが否めない．異なる切り口での検討が必要である．また，何度も指摘しているところであるが，原鉱石の年代で比較することに積極的な意義を見出せない．それぞれの原鉱石の形成プロセスを熟考する必要があると思う． ・ 膨潤圧実験では，それぞれの試料で，膨潤圧―時間関係の形状が異なっている（具体的には，ピークに至る過程が曲線的ではなく，一度減少に転じてから最大膨潤圧に至る）ことに対して，何が影響しているかを検討してみてはいかがでしょうか． ・ 膨潤変形実験においても，ピーク値で正規化してみたら，同じ曲線上にプロットされるでしょうか．違うとすれば，それは何を反映しているのか，などを検討してみてはいかがでしょうか． ・ 再構成試料の乾燥密度―最大膨潤変形率の間に，直線関係を見出していますが，なぜこの関係は直線上に載るのかを考えてみてはいかがでしょうか．

	・ 劉房子試料では，エコーチップのＬ値が不攪乱と再構成で同じ範囲に入るのはなぜかについて，さらに踏み込んで検討してみてはいかがでしょうか. ・ 膨潤特性と乾燥密度との関係は示されていますが、膨潤特性と膠結作用との関係はどのようになりますでしょうか？自己修復性評価手法と関連しておりますが、その道筋を示すことも重要と考えます。 ・ 膠結作用はシリカ系鉱物等の含有鉱物の溶解・再結晶化に伴う土粒子構成鉱物間の固着現象とのことで、進めている膠結作用メカニズム解明ではこの固着現象をどこまで理解できているか整理が必要かと思います。その上で、P.15 の下の部分での言及している代替指標を考えていく必要があるのかと考えます。 ・ 自己修復性評価手法では、乾燥密度、拘束圧で整理しようとしておりますが、乾燥密度や拘束圧と自己修復（遮水効果）との関係を、引用文献をも整理しつつクリアにしていただければと思います。 ・ 天然ベントナイトの膠着（セメンテーション？）作用について、どういうメカニズムなのかについてのアプローチが未だ弱い感じがする。 ・ 天然のベントナイトの膠着作用については、堆積に伴う圧力、地温による温度によって鉱物の一部が溶解し、セメント剤として役割を果たしていることが一般的なプロセスであるので、その辺を、実験などでアプローチしてみてはどうでしょうか。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2021 年度第 2 回評価委員会　評価結果（その 3）

研究テーマ	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）

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	3.8
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.8
・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	4.0

自由意見	・ 先行研究について調査を進められたようですので，ベントナイトの膨潤に付随して起こるベントナイトコロイドの膨出と，ベントナイト固体相としての膨潤との関係を整理してください。コロイドはもはや「膨潤」などしないものですので，これが亀裂を閉塞するためには，コロイドの凝集やアモルファス沈殿の生成などの化学反応が起こる必要があるのではないでしょうか。 ・ 種々のベントナイト試料の膨潤性と止水性を評価する研究である。人工亀裂への膨出の初期の結果がルート t 則に乗っているが、その機構を明確にする必要がある。膨出によって、ベントナイト試料の密度も低下するように思うが、それが影響してルート t 則なのか、あるいは侵入距離が頭打ちになるところなのか。エロージョンについては、周囲の流速に影響を受けるはずだが、そのモデル化はできているか。実際の岩石は平行平板ではなく凸凹しているので、局所流速も変化すると思われる。エロージョンと沈着の境目を調べることも有用と考える。 ・ 研究計画における実験機材と解析方法を含む仕様が確定し，今後多くのデータを蓄積できる環境を整えたことは十分に評価される. ・ ベントナイト試料の膨潤・充填性同時試験では，使用流体として，実際の地下水や純水の使用を是非ご検討ください．それにより，原位置への適用性や現象の理解が深まることを期待しています. ・ 人工バリアと天然バリアとの境界領域に着眼し、人工バリア側にあるベントナイトの物性変化が天然バリアの EDZ における亀裂閉塞効果の定量化を目指しており、研究の筋道が明確なものと考えます。 ・ 他方、ベントナイトの一部の流出が大きな課題になるという指摘もあります。特に塩水系地下水はベントナイトの流出が大きくなる懸念があります。膨潤は塩分により期待はできないものの、亀裂の閉塞という観点では、亀裂幅、コロイドのサイズ、供給量との関係によっては効果があるように思います。その考察では、p. 19 において、実環境を考えると流体が下流に抜ける場合をも想定する必要があると存じます。実験室での知見を如何に活かしていくかを整理していただけると地層処分への寄与がより明確になると思いま

	す。 ・ 岩盤亀裂へのベントナイトの侵入とシーリング効果についての基礎的な実験だと判断できる。今後の実施内容についてのコメントとして、例えば幌延地下研究所の実際の地下水などを用いた実験も検討してはどうかと考える。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2021 年度第 2 回評価委員会　評価結果（その 4）

研究テーマ	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）

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。	4.4
・実施研究は新規性・独創性があるか	4.4
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	4.2
・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	4.2

自由意見	・ 研究はよく考察されて進められていると思います。さらに「10 万年から 100 万年の間，緩衝材は膨潤した状態のまま（拡散場）で，膠結作用等により水みちができて移流場になることはないか」（膠結はどのような条件の下でどのくらいの時間をかけて進むか）という懸念にはどうこたえるのかを考えていただければ幸いです。 ・ ベントナイトのセメンテーションに関する詳細な研究である。鉱床が高温（50℃以上）を経験することにより SiO_2 の相転移がセメンテーションを引き起こすとしている。セメンテーションによるメリット・デメリットとして、侵食の低下と膨潤性の低下があるが、侵食しなくても膨潤しなければ意味が無いので、定量的な指標が必要と感じる。K イオンなどの化学的影響についても検討して欲しい。 ・ 目の付け所がよく，非常にスマートに研究を遂行している．提示いただいたベントナイトの組織イメージは，ミクロな観察を的確に表現しており，重要な知見である．コロナのためか，現地調査にかける時間が少なかったのは残念であるが，研究計画に照らし合わせて，十分な成果を上げていると評価できる． ・ 露頭表層では様々な現象が生じていると考えられます．固結したベントナイトが侵食に耐えうるかを示すためには，どのように固結が生じているのかを検討する意味でも，ベントナイト層の表層からのプロファイルを取ることを検討させてはいかがでしょうか． ・ 原鉱石を固結させているセメント物質に着目すると、カルサイトは制限され、シリカの微粒子が原因となっており、一部はアモルファスシリカであり、多くは石英であったとの報告を頂きました。今後さらにデータの蓄積が期待されます。現段階での疑問としては、アモルファスシリカが残っている理由、Opal-CT などの存在などが見られない理由、また、ベントナイト層による違いの理由などがあります。Si 含有量や間隙水の違いなども想定し、議論を深めて頂きたいと存じます。 ・ シリカ微粒子がセメント剤として機能している可能性が見えてきており、成

	果が具体的になってきていると判断できる。今後は、このシリカのソースと、地下水との反応、地熱による Diagenesis の組み合わせで、これまでの実験結果などからどの程度の速度でそれらが進行するのかを推定することで、ベントナイトの長期挙動、バリア機能としての機能維持（喪失も含め）への寄与がどういったものかを検討するとさらに地層処分への貢献が見えてくると考える。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2021 年度第 2 回評価委員会　評価結果（その 5）

研究テーマ	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）

評価項目	評価（平均）
・実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか。	4.0
・実施研究は新規性・独創性があるか	3.2
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.2
・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	3.8

自由意見	・ 天然バリアとよばれるところで，収着がどういうメカニズムで起こっているかというような研究も意味があるかもしれませんが，地層処分の安全性評価では，不均質に分布する不均質な岩石表面での構成鉱物とのイオン交換，沈殿形成，固溶体形成等々を解析的に調べて起こることを構築することには無理があると考えて吸着と吸収を含めて「岩石」に対する収着係数という経験的パラメータを用いることとしています。このような考え方の中で，この研究では何を明らかにしようと考えているのかを明確にして研究を進めてください。 ・ 種々の粘土鉱物（黒雲母等）への Eu の吸着脱離挙動を調べている。pH 依存性を調べているが、そもそもの原材料（鉱物）の特性を調べておく必要があるのでは無いか。例えば、等電点（滴定）の測定が必要と思われる。脱離についても、過塩素酸だけでなく、塩化カリウム溶液やシュウ酸等を用いて逐次脱離をしてはどうか。 ・ 吸着機構の解明を目指す必要があると感じる。 ・ 研究計画と照らし合わせて，順調に研究が遂行されていることを確認しました. ・ 高い pH における脱離実験が行うことが有用だと思います。その実験は次年度行うとのことで、期待したいと存じます。pH が高くなると Eu は加水分解種となると考えられます。固相との強い相互作用の有無が脱離実験の挙動により見えてくると存じます。なお、収着についても収着率を示し、Kd に整理することが必要と思います。 ・ 詳細な実験を展開しており、アクニチドの粘土鉱物への吸着機構が示されつつあるが、気になるのは、この吸着機構が地層処分でのどの時空間断面でのプロセスを抑えようとしているのかが今ひとつ不明瞭だと感じるので、その辺をもう少し具体的に検討いただけるとありがたい。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2021 年度第 2 回評価委員会　評価結果（その 6）

研究テーマ	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）

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

自由意見	・ 水理構造モデルの構築においては，そのモデルが恣意的なものではないこと，このモデルにより意味のある予測ができることをご説明ください。 ・ 亀裂媒体の透水モデルの構築に関する研究である。リークの低減やパーミアメーターの改良等を行なっている。 ・ 一方で、観察と測定によって透水率の空間モデルは構築できるかもしれないが、実際の処分に適用するためには、ミクロな亀裂の分布と透水率の関係を示すことや、コアリング観察以外に、物理探査結果との統合も必要と考える。 ・ 広域のモデリングと，パーミアメーターを用いたハンドスペーシメンサイズの透水性がどのように組合させるのかについてのイメージが掴みにくかった．各研究項目については一定の進展があったことを確認した．ただ，最終年度に向けて，新たに化学反応シミュレーションの実施が盛り込まれていることなど，どのような取りまとめとなるのか，いささか心配である． ・ 瑞浪に存在する水理試験結果などをうまく取り込んで，改良した解析コードの妥当性を検証していただけると理解が深まると思います． ・ GeoFrac では亀裂情報から連続体の透水性にする部分の妥当性についてはいかがでしょうか？既に公表されている場合にはその概要や連続体とする場合の限界にも言及して頂くと幸いです。 ・ プローブ型パーミアメーターについて、従来の方法での透水試験（コアを利用する方法など）との比較も是非にお願いしたいと存じます。今回の測定は、従来に比較して小さい領域を見ていると存じますので、従来の方法の測定値（前述）に比較してやや大きくなると拝察しております。その知見が、前述の GeoFrac のみならず、従来の水理解析における連続体への変換の部分に活かせるとよりいいと聞かせて頂きました。

（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	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（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。	4.0
・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	4.3
・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	4.0

自由意見	・ もう一歩のところに来ているのだと思います。この方針で進めてください。 ・ ジルコン－ヘリウム年代測定法の標準試料候補が見つかっており、標準化への道筋が見えてきている。 ・ ジルコン－ヘリウム法に対する標準試料の候補を見出し，その確立に向けて，着実に研究が進捗していることを確認した．ラウンドロビンテストの結果が期待される． ・ 海外との連携が必要となるので，コロナ禍の中，工程管理が重要だと思います． ・ 本研究では ZHe 法による年代測定について、特に標準試料の確立を目指しております。その方向で進めて頂ければと思っておりますが、タイトルでは、隆起・侵食の評価手法の高度化とあり、複数の手法を組み合わせるがいいのか、本手法がいいのかなど言及もお願いしたいと存じます。また、評価値にはばらつきがございますが、地層処分における隆起・侵食の評価に必要な精度への言及も是非にお願いできればと思う次第です。 ・ これまで、得られた成果をコロナ禍であっても積極的に公表されており、引き続き、研究とともに公表も進めて頂ければと存じます。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

3. 人材育成プログラムの実施・作成

3.1 実施方針

3.1.1 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。

2019 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、平成 30 年度に行ったセミナーと同様に 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。また、昨年度は、4 ヵ年の事業期間のうち 2 年目にあたり、人材育成プログラムの開発の一環として、教材の作成及びセミナーの開催を行った。

今年度に関しては、昨年度に引き続き、教材の作成の継続及びセミナーの開催を行った。このうち、教材については 2 種類の教材を作成することとして、双方の作成を進めた。セミナーに関しては、人材育成セミナーについては、当初、幌延深地層研究センターを題材としたセミナーを開催していたが、新型コロナウイルス感染拡大の影響から、対面での開催をあきらめ、オンラインで開催を行った。このセミナーは、過去 2 年間の実施から得られた教訓等を反映したうえで、関係機関の協力・助言を得たうえで 2021 年 10 月に開催した。

3.1.2 実施体制

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、そのフィードバックを繰り返したうえでプログラムの改良を進めていくことが不可欠である。講習会や研修会では、地層処分の関連分野において高度に専門性を有す講師による講義・実習を行うことが必要である。また、本事業で開催する講習会や研修会は、作成する人材育成プログラムの実証試験の場と位置付けており、受講者は人材育成プログラムのいわゆるモニターとして参加するもので、受講者からは、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、講師及び受講者は、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。本事業では、地層処分事業の実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）のほか、地層処分の主要研究開発分野であり、地層処分のジェネラリストの必須の知識である、地質環境調査、工学技術、安全評価技術の研究開発を行っている、国の基盤研究機関の（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ため、これらの機関の有識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 2019 年度に設置した。また、今年度は特に、JAEA の幌延深地層研究センターの見学、同センターで行われている研究開発などを題材とした

セミナーを企画したため、JAEA 及び NUMO との間で多数の打合せを実施した。

地層処分スキルアップ研究会は、以下の構成である。

表 3.1-1　地層処分スキルアップ研究会構成機関

メンバー	国立研究開発法人　日本原子力研究開発機構（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 1 度開催した。

表 3.1-2　2021 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	2021 年 9 月 1 日（水） （オンライン開催）	2021 年度の人材育成セミナーの概要説明と参加者（モニター）の派遣要請、教材作成に関して 現時点での作成状況の報告と意見交換

また、JAEA 及び NUMO との人材育成セミナー開催に向けた打ち合わせは、すべてオンライン形式で以下の日時及び内容で実施した（詳細は後述）。さらに、教材作成に関しては、外部の有識者から、教材の内容・範囲等の適切さなどに対する意見を得るための会合も実施した。

3.1.3 本事業におけるジェネラリストの定義

2019～2020 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のジェネラリスト（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。

昨年度までは、地層処分事業に関連する様々なキャリアパスを整理したうえで、ジェネラリストの経験・能力を 4 つのレベル・階層を示し（図 3.1-1）、本事業における人材育成プログラムとしてはまずはレベル 1、2 の能力を有するジェネラリストが育成されるきっかけとなることを意図していた。

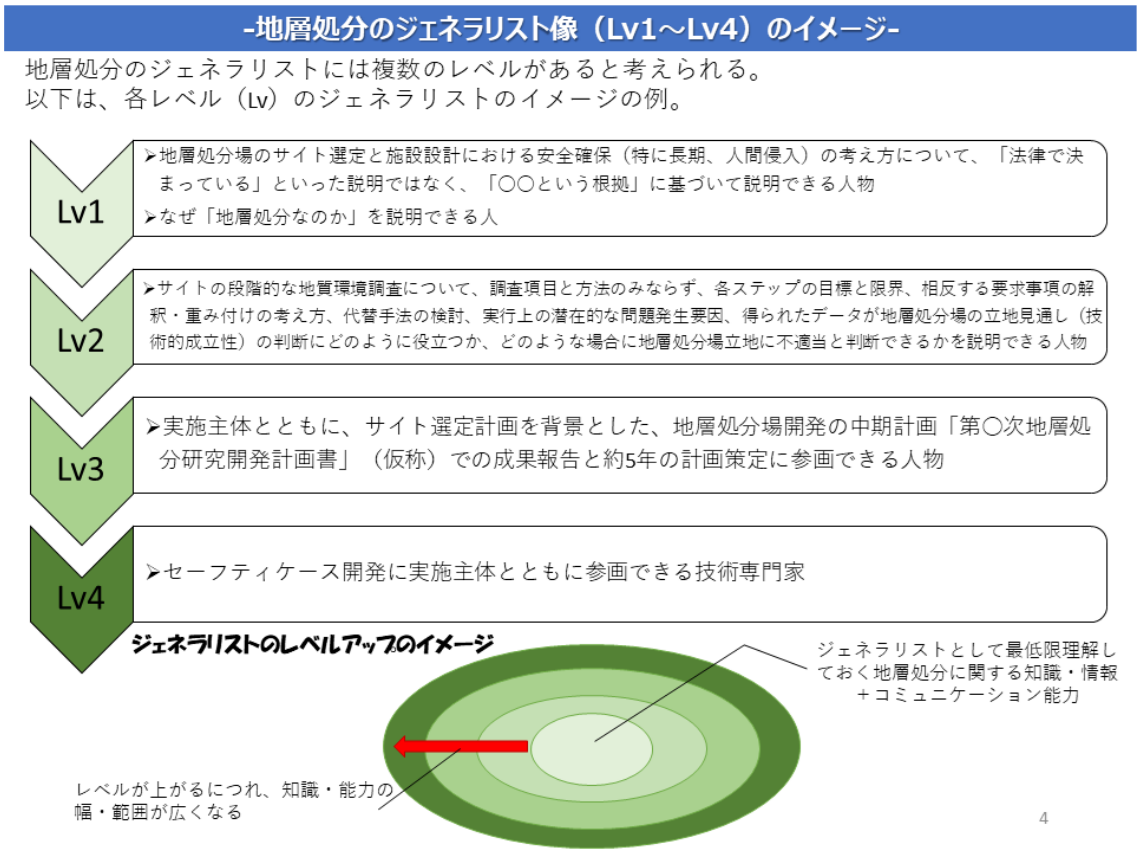


図 3.1-1　2019～2020 年度における地層処分のジェネラリストの考え方

一方で、スキルアップ検討会や関係者からの意見として、キャリアパスによっては必ずしもレベル 1 から 4 の順に育成されるとは限らないのではないかといった意見や、あるいはマネジメント能力もジェネラリストにとっては重要であることから、本事業で直接的にマネジメント能力を育成することはしないとしても、ジェネラリストの定義としてその要

素を加える必要があるとの意見もあった。

そのような経緯により、ジェネラリストの定義について再検討し、図 3.1-2 のように整理した。ここでは地層処分のジェネラリストとしては地層処分に係る知識を有している必要があること、また地層処分技術全体を俯瞰し、他分野の専門家とも協働できること、さらに地層処分事業等について進めるための組織の統率、関係者との交渉・調整能力、公衆とのリスクコミュニケーションをとれるような地層処分に関するマネジメント能力を有することが必要であると定義した。（ただし、地層処分実施主体、関係研究開発機関、メーカーなどの各組織において求められるジェネラリストには必要な要素において相違がある可能性があることについても留意されたい。）

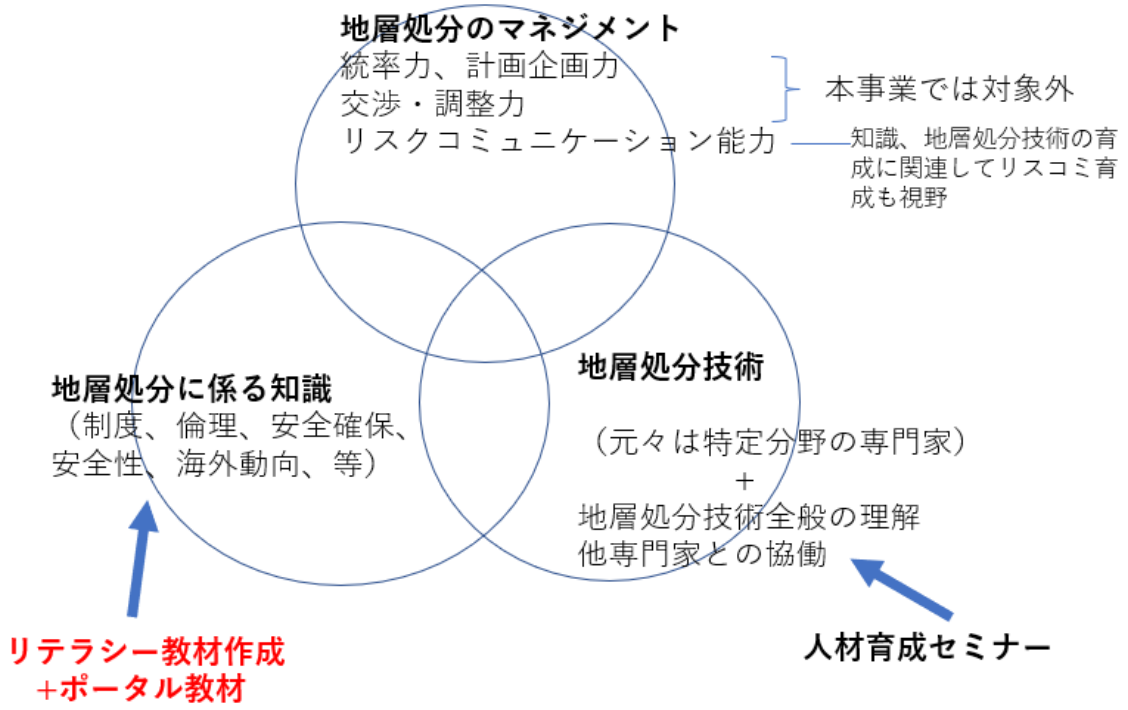


図 3.1-2　地層処分のジェネラリストの定義の再検討結果

本事業では、上記ジェネラリストの考え方を踏まえて、「地層処分に係る知識」と「地層処分技術」に関して以下の人材育成プログラムの作成を実施する。地層処分のマネジメントについては各組織での OJT などを通じて育成されるものと考えられることから、本事業では対象としないが、リスクコミュニケーションに関しては「地層処分に係る知識」と「地層処分技術」に関連して育成のきっかけとなることも期待される。

●実施内容 1：「地層処分に係る知識」を身に付けるために資しる教材の作成

●実施内容 2：「地層処分技術」に関して、地層処分全体を俯瞰できる、また他分野の専門家と協働できるような人材の育成に寄与可能な、気付きを得るためのセミナー・演習を通じたプログラムの開発（人材育成セミナーの開催）

以下に、地層処分に係る教材の作成と人材育成セミナーに関連する 2 つの実施内容について、今年度実施事項及び成果等を整理する。

3.2 教材の作成方針と今年度以降の作成計画

3.2.1 昨年度までの実施内容

昨年度は、教材の内容・構成等の検討を行い、「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 種類の教材を作成することとし、「地層処分に関する包括的知識」を先行して作成を開始した。昨年度は、「学習指導要領」の作成、学習指導要領に基づく教材案の作成を進めた。また、「地層処分に関する専門的知識」については、「学習指導要領」の作成までを昨年度実施した。なお、これらの教材の名称について、NUMO の包括的技術報告書との混同を避ける等の目的のため、今年度の検討において、以下に示す名称へ変更した。以降は、この変更した名称で記述する。

- 「地層処分に関する包括的知識」⇒「地層処分のリテラシー育成教材」
  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」⇒「地層処分のポータル教材」
  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

表 3.2-1　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	・「地層処分のリテラシー育成教材」の学習指導要領の作成 ・「地層処分に関するポータル教材」の学習指導要領の作成 ・「地層処分のリテラシー育成教材」の教材作成
2021 年度	・「地層処分のリテラシー育成教材」の教材のレビュー・改訂 ・「地層処分に関するポータル教材」の教材作成
2022 年度	・「地層処分のリテラシー育成教材」の教材の更なる改訂 ・「地層処分に関するポータル教材」の教材のレビュー・改訂 ・「地層処分のリテラシー育成教材」及び「地層処分に関するポータル教材」の教材の完成

昨年度後半の当センター内部での検討や地層処分スキルアップ研究会での議論などに基づき、「地層処分のリテラシー育成教材」（以下、リテラシー教材という）については、今年度以降、放射性廃棄物処分に関する大学等の有識者等による、教材の項目や内容等のレビュー（図 3.2-1 の上の矢印）、及びデザインなどを含めた教材の使いやすさ、継続して使われる工夫に関するレビュー・見直し（図 3.2-1 の下の矢印）を出版社等に依頼して実施する計画とした。

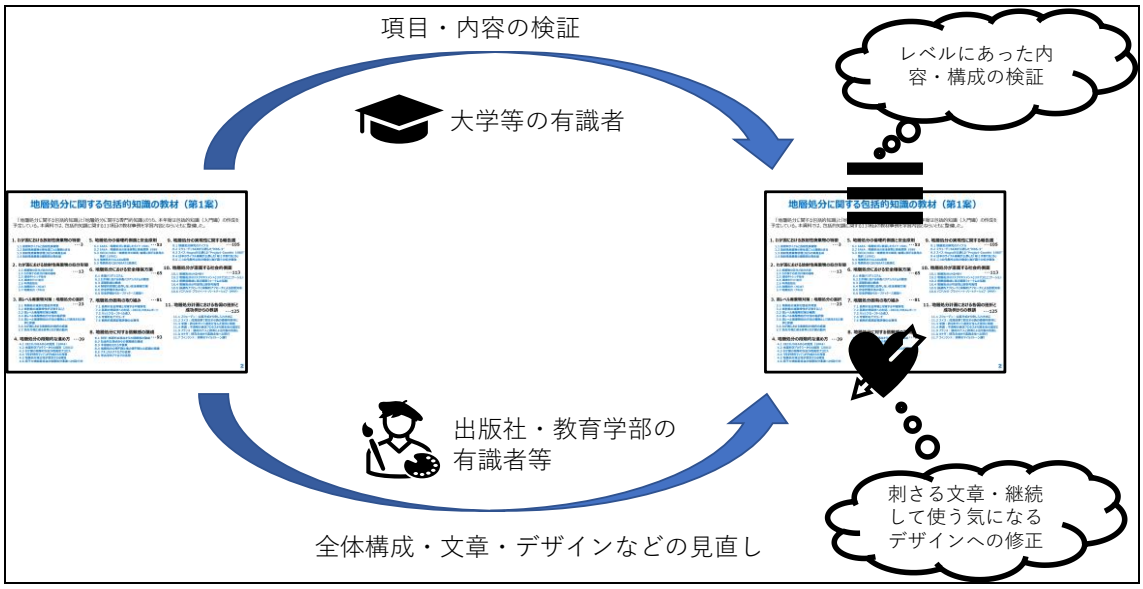


図 3.2-1　「地層処分のリテラシー育成教材のレビュー計画」

また、「地層処分に関するポータル教材」（以下、ポータル教材という）については、教材の作成に向けポータルの概念の検討を行う計画とした。以降に、リテラシー教材及びポータル教材作成に向けた今年度の実施内容を示す。

3.2.2 リテラシー教材作成の今年度の実施内容

(1) 昨年度の地層処分スキルアップ研究会等でのコメントへの対応

リテラシー教材に関しては、表 3.2-1 に示した計画に従い、2020 年度に学習指導要領の作成、及び学習指導要領に基づく教材第 1 案を作成した。また、2020 年度に作成した教材第 1 案については、資源エネルギー庁殿より、以下のコメントを受領した。

表 3.2-2　資源エネルギー庁殿からのリテラシー教材へのコメント

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)。
リテラシー教材とポータル教材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（既存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、昨年度の第 2 回地層処分スキルアップ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 3.2-3　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

「地層処分に関するリテラシー育成教材」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。
「地層処分に関するポータル教材」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。
「地層処分に関するポータル教材」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。
「地層処分に関するポータル教材」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。リテラシー教材とポータル教材の中のジャンル名が混乱しないようにする。
現時点の「地層処分に関するリテラシー育成教材」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。

これらの意見・コメントに関して対応を検討した結果、以下の対応を今後行うこととした。また、対応案とその効果を分析し、各対応が学習意欲の向上、ひいては教材の日常の利用につながることを確認した（図 3.2-2）。なお、一部については今年度対応を検討したが、一部は作業の効率性などの観点から今後実施する計画としている。

① 印刷物だけでなく電子版を作成し以下を実施

⇒用語などの検索を可能とする

⇒参考資料や「地層処分に関するポータル教材」の項目へのリンクを張る

効果：他の資料等との連携を強化することにより、辞書的な使い方が可能となるとともに、教材自体の使い勝手が向上し、継続的な利用、日常の利用につながることが期待できる。

② 文字中心の読み物ではなく、図表を配置し使いやすい、理解しやすいものとする

⇒当初の方針として、の方向でリテラシー教材を作成しているが、これを継続・強化する

効果：既存の他の教材との差別化が可能であり、また、分かりやすさが向上することにより、学習意欲の知覚的な喚起につながることが期待できる。

③　理解度テストを付け、学習の進捗・理解度等を確認する

⇒各項目、ジャンル、教材の最後に確認テストを付ける

効果：学習者自身が学習の進捗状況を確認できるようにすることで、探求心の喚起につながり、学習意欲の向上が期待でき、日常的な利用を促すことが可能となると考えられる。

④　NUMO 包括的技術報告書の項目の反映

⇒ジャンル構成を見直し、NUMO の包括的技術報告書の項目を反映する

効果：わが国における地層処分の最新の検討状況を学習することで、それらを理解するだけでなく、各項目の地層処分との関連での理解が向上することが期待できる。

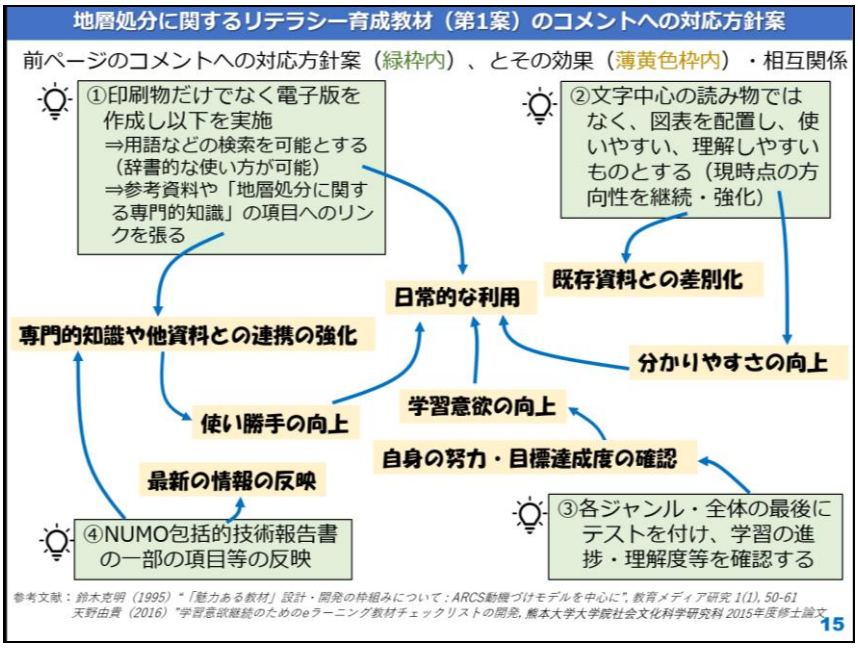


図 3.2-2　リテラシー教材第 1 案へのコメント対応方針とそれらの効果の関係

また、上記の①～④のうち、①に関しては内容等が完全に固まった時点で実施することとし、今年度は、②～④について進めていくこととした。以下に②～④の対応について、今年度の具体的な検討・実施内容等を示す。

a. 図表を活用した読みやすい教材

地層処分に関する既存の資料の多くが文字を中心とした読み物となっていることから、リテラシー教材は、作成の当初から図表とその解説で構成する構想で作成を進めてきた。これにより、既存の資料からの差別化を図ることが可能であると考えられる。このため、この方針は今後も維持・強化し教材の作成・改訂を進めていくこととした。

b. 理解度確認テストの作成

(a) 理解度確認テストの構想

図 3.2-2 に示したように、理解度確認テスト（以下、「確認テスト」という）は、学習者自身の努力や目標達成度の確認を可能とすることで、学習意欲の向上につながることが期待でき、教材の日常的な利用につながる効果があることが考えられる[2)]。

確認テストについては、学習者が自身で実施し自己採点を行い、到達レベルを確認可能となるよう、問題形式の場合[c]には、回答を作成し提供することとした。

リテラシー教材に関する到達レベルの確認として、以下の三つのレベルの確認テストを準備することとした。

◆ **レベルⅠ**：教材に記述されている重要な「用語」に関する質問

⇒正解を選択できる能力（○×選択式）

→**各項目の理解度をチェック**

◆ **レベルⅡ**：教材の各ジャンルで記述された項目に関する質問

⇒重要な用語を用いて文書を組み立てる能力（300 字での記述式、回答例を教材内で提供）

→各ジャンルの理解度をチェック

◆ **レベルⅢ**：地層処分の重要なテーマに関する質問

⇒テーマに対する自身の意見を論拠を用いて組み立て議論ができる能力（正解がないため教材内では具体的な回答例は示さないが、答え方・ヒントについて示すことを今後検討）

→**教材全体（地層処分全体）としての理解度をチェック**

[c] レベル III の質問については、正解がないため回答は提供しない。

(b) 確認テストの作成

今年度は、上記の 3 つのレベルの確認テストについて、案の作成を行った。

レベル Ⅰ の問題は、重要な「用語」に関する質問とし、以下の用語を抽出した。レベル Ⅰ では、これらの用語を問う／回答となる問題を作成する。

表 3.2-4　レベルⅠの問題のための抽出した重要な「用語」

- 核燃料（原子燃料）サイクル
- 多重バリアシステム
- パッシブセーフティ
- セーフティケース
- ナチュラルアナログ
- 安全原則の倫理的側面
- 世代内・世代間の公平性
- ステークホルダー
- NIMBY
- 放射能濃度区分と処分形態
- 評価シナリオとストーリーボード
- 段階的な処分場選定
- 科学的特性マップ
- 可逆性と回収可能性
- NUMO 包括的技術報告書
- 第 2 次取りまとめ

これらの用語を問う質問とその回答、回答に対する解説の例を作成した（図 3.2-3）。

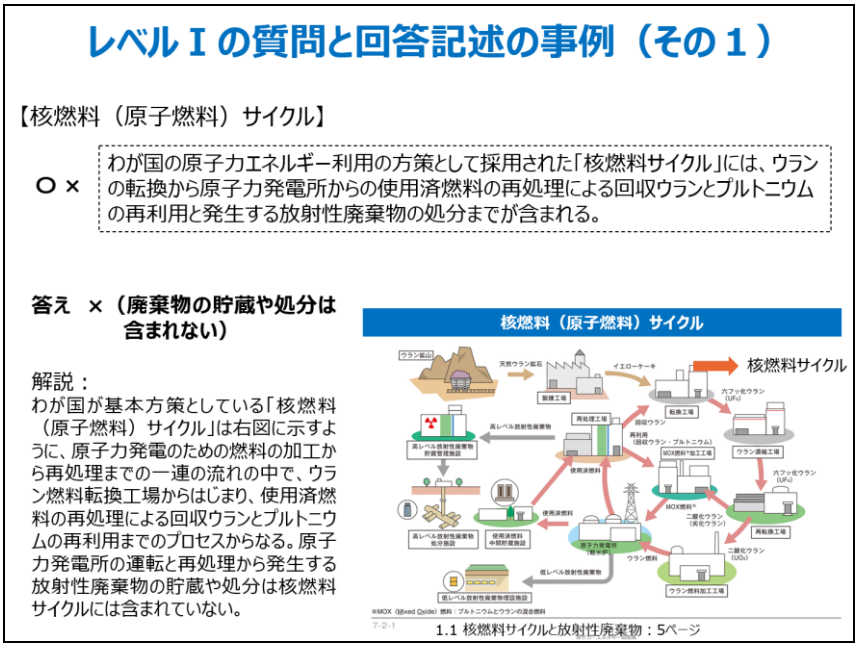


図 3.2-3　レベルⅠの問題と解答及び解説の例

次に、レベル II の問題については、各ジャンルで記述された項目に対する理解度を問うものとし、回答を 300 字程度で記述する方式とし、例を作成した（図 3.2-4）。レベル II の問題は 12 の各ジャンルに対応するものとして、12 の例を作成した（12 のジャンルについては後述）。

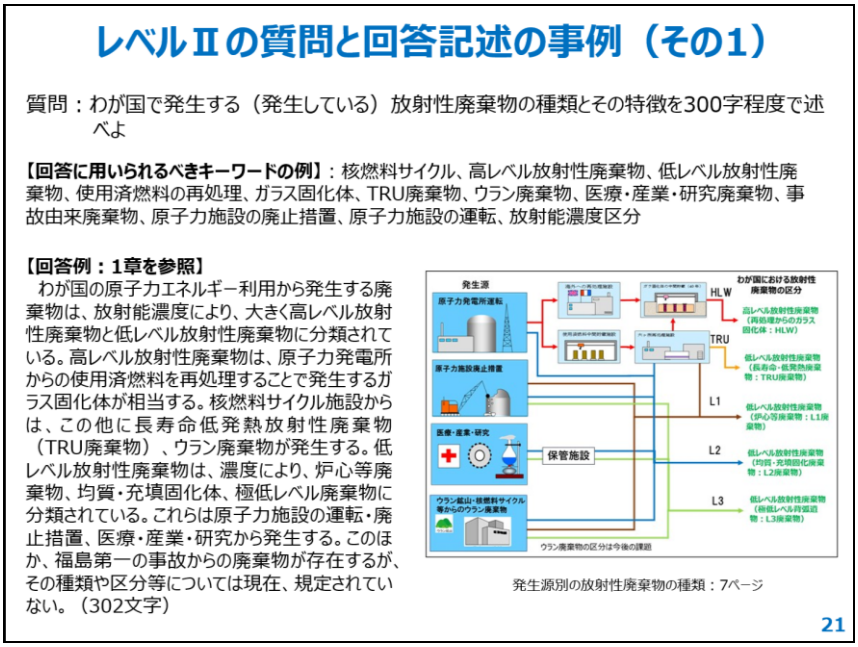


図 3.2-4　レベル II の確認テストの質問と回答の例

レベル III については、教材全体を学習したのちに取り組むことを想定し、教材の全範囲を対象とした地層処分の重要なテーマに関連した問題とした。レベル III の問題は、学習者が周囲の関係者と議論することを想定した問題であり、必ずしも正解はなく回答例は作成しない方針とした。ただし、答え方やヒントを付けることは今後検討する。

レベル III のテーマ設定例は以下の通り。

- ✓ 高レベル放射性廃棄物の対策として、地層処分と長期貯蔵の違いを論じよ
- ✓ 地層処分の選択と世代間・世代内の公平について論じよ
- ✓ 地層処分の長期安全確保の方策について論じよ
- ✓ 地層処分の長期安全性に係わる不確実性とその対応策について論じよ
- ✓ 地層処分における安全評価とセーフティケースについて論じよ
- ✓ 地層処分の段階的な進め方と可逆性・回収可能性について論じよ
- ✓ 地層処分の信頼感を醸成するための技術的な視点と社会的な視点について論じよ

- ✓ 地層処分固有の課題に言及し、どのように考えたら良いか具体例を示して論じよ
- ✓ 海外の地層処分計画の進め方から学ぶべき教訓は何か論じよ
- ✓ 地層処分事業を円滑に進めるために重要となる社会的な対応について論じよ
- ✓ 地層処分の長期安全性に係わるナチュラルアナログの是非について論じよ

c. NUMO 包括的技術報告書の内容の反映を含む構成・内容の再検討

わが国における地層処分事業の最新の検討状況、安全確保に係る考え方等を反映するため、2021 年 2 月に公表された NUMO の包括的技術報告書の内容の反映を含む、ジャンル構成や内容の見直しを実施した。以下が見直しの内容である。

- ✓ 第 7 章「NUMO 包括的技術報告書 - 適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築 - 」と題し、NUMO の包括的技術報告書の内容を理解するためのジャンルを追加
- ✓ 第 6 章の「地層処分の実現性に関する報告書」の内容について、海外の報告書の記述を減らし、わが国の検討経緯等を追加

また、ジャンルを追加したことで、合計 12 のジャンル構成となり、ジャンル相互関係の流れの見直しも実施した（図 3.2-5）。これまでのジャンル相互関係の整理では、大きく 2 つの流れで構成していたが、放射性廃棄物や処分形態などの地層処分に関する基本的な内容に関する 3 つのジャンル（第 1 章～第 3 章）以降、以下の 3 つの流れに分かれるジャンル関係に見直しを行った。

① 地層処分の安全原則と規則・規準から始まり、地層処分の安全確保方策と安全評価、地層処分の実現性を示した報告書、安全評価からセーフティケースへの重点の移行、最近のセーフティケース報告書の紹介
② わが国における地層処分事業の段階的な進め方及び各国でのサイト選定からの教訓
③ 実現に向けての地層処分固有の取り組みについて社会的側面を含めたアプローチ

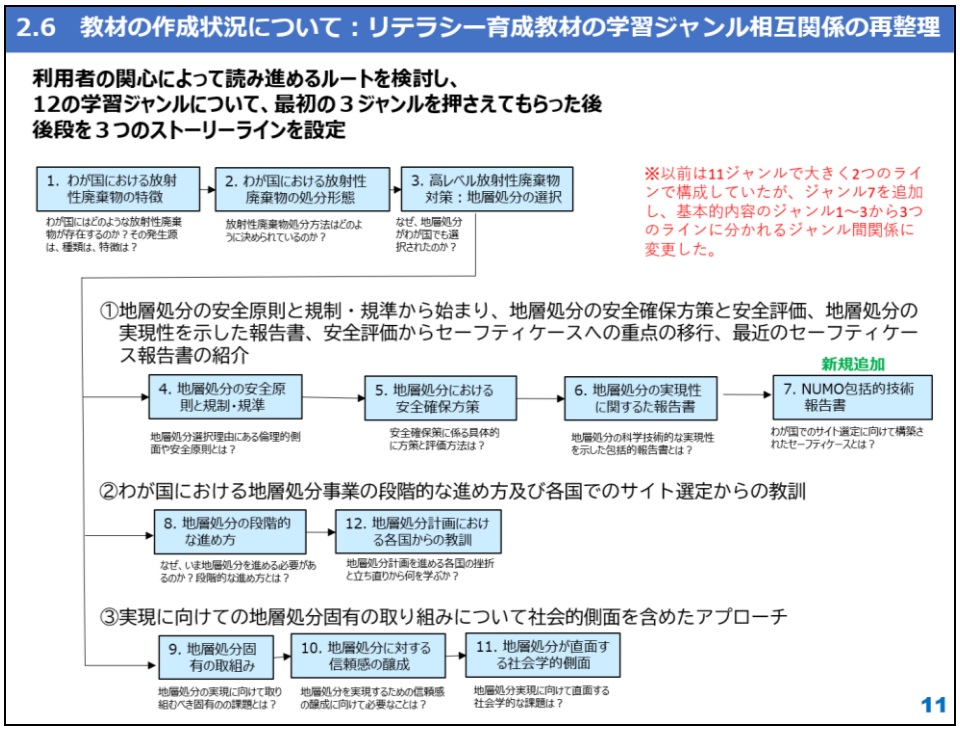


図 3.2-5　リテラシー教材のジャンル相互関係の再整理

(2) 外部有識者によるレビュー

図 3.2-1 において計画を示したように、リテラシー教材の第 2 案に対しては、放射性廃棄物処分の専門家等による内容のレビューを行った。今年度は、(公財) 原子力安全研究協会の有識者にレビューを依頼した。レビューは、事前に教材の作成方針、作成コンセプト等の説明を行ったうえで、リテラシー教材第 2 案の印刷物を提供し、構成、内容などの適正について依頼した。また、レビューが終了した段階で、対面での意見交換を実施し、改訂の方向性について議論・確認した。下表に教材の改訂に関しての主な意見を示す。

表 3.2-5　教材第 2 案のレビュー結果及び改訂についての意見

・ そもそも論として、教材では、最初に放射性廃棄物の危険性について説明し、倫理的側面から防護の三原則を遵守するため、地層処分が選択されるという流れで説明することが必要である。 ・ 安全評価が何かというと、リスク評価をしてリスクが十分に低いことを確認すること。固化した廃棄物を深い地層に処分すれば人間にまで到達接触する可能性はないが、それでも人間侵入などの残余のリスクがどうしても残るので、それらのリスクが許容できることを確認することである。こういった安全評価の構造を理解する必要がある。 ・ 工学的には閉じ込めを満足する施設を作る、そのための要件を満たすことが必要である。地質については要件を満たすサイトを選んでいくという作業が必要であり、これらの条件が揃ったところで安全評価をして確かめるという大枠の考え方を示す必要がある。 ・ 三段階の調査では地質環境モデルを作成してそれをもとに施設設計・安全評価が行われ、セーフティケースが段階的に精緻化していくということを説明した方がよい。 ・ 地層処分の基本的な考え方について、IAEA SSR-5『放射性廃棄物の処分』(2011年)とICRP Pub122『長寿命放射性固体廃棄物の地層処分における放射線防護』(2012年)などの最新の文書を用いて説明すべきである。過去の文書と表現が少し違うだけで内容は同じであるが、教材としては現在の国際的なコンセンサスを紹介する必要がある。 ・ 放射性廃棄物の発生と区分などについては原環センターのハンドブックがよくまとまっているのでそちらを参考にするのが良いのではないか。 ・ 教材の後半部分の流れはおおむね妥当ではないか。 ・ 主観的な表現が気になる箇所があるが、現状を淡々と説明するのが良いのではないか。 ・ 教材の学習レベル確認方法のテストの方向性については特に異存はない。

これらの意見を勘案して、今年度実施した対応を以下に示す（表 3.2-6)。

表 3.2-6　専門家からの主な意見と対応

最初に放射性廃棄物の危険性について説明し、倫理的側面から防護の三原則を遵守するため、地層処分が選択されるという流れで説明することが必要	「はじめに」で地層処分が必要とされるのかについて記載
地層処分の基本的な考え方について最新の国際的文書を用いて紹介する必要がある	4.4・4.6 節に IAEA や ICRP の最新文書の解説を追加
安全評価の構造がわかる内容を含めるべき	5.5 節に「最新の安全評価の流れ」を追加

ここまでで述べてきた、地層処分スキルアップ研究会、外部有識者等の意見への対応を含み改訂した第 2 案の構成等を下図に示す。

図 3.2-6　改訂後のリテラシー教材の目次構成

(3) 教材の構成・デザイン等に関する見直し

教材を用いて学習する使用者が、使やすく、学習意欲の向上や継続して学習しようと思えるためには、教材の構成やデザインなどの内容以外の部分も非常に重要な要素である。そのため、今年度は、出版社に依頼し、リテラシー教材の内容や位置づけ、対象読者等を踏まえたうえで、どのような構成、デザイン等が使用しやすく、学習意欲の向上・継続に寄与するのか検討を行った。また、検討した結果を反映したサンプル紙面を作成した。

検討は、以下の 2 つの観点から実施するために、異なる 2 社に依頼した。

① 教科書などの教材としての観点からの検討⇒教科書作成会社に依頼

② 理工系の内容をわかりやすく伝える書籍としての観点からの検討⇒産業・工業系出版社に依頼

以下に、これらの 2 つの異なる観点からの検討結果の概要を示す。なお、これらの検討結果は、来年度さらに精査を行ったうえで、現在作成している教材に反映する予定である。

a. 教科書作成会社による検討

前述のように、教科書作成会社による検討は、教材としての観点、特に使用者の学習意欲の向上・継続に資する構成・デザインを対象とすることとした。このため、教科書や教材の作成に豊富な実績を有す会社を選び、検討を発注した。以下に検討結果を示す。

(a) 通常ページのレイアウト・構成案の検討

教材全体の構成・デザイン等について、利用者の学習意欲を向上させる、または継続させるためには、教材の使いやすさ、学習のしやすさなどを改善する必要がある。そのため、以下の観点で検討を行った。

① 学習の進めやすさの観点での全体構成の検討
② 学習のしやすさの観点での紙面における工夫
③ 使いやすさの観点でのデザインでの工夫

以降に上記 3 点の検討結果を示す。

●学習の進めやすさの観点での全体構成の検討

教材の各学習項目のつながりをわかりやすくすることで、教材の冒頭から学習を進めていくことも、理解を深めたい項目を選択しながら学習を進めていくこともできる全体構成とすることで、学習を進めやすくなると考えられる。このため、「学習の進めやすさ」の観点から、具体的には以下の 4 点を行うことが考えられる。

① 「はじめに」の追加

本書を作成した目的や意義、本書の目標等を掲げ、学習者への動機づけを行い、学習の道筋を示すメッセージとして、本書提供者のあいさつを掲載する。

② 「本書の構成・使い方の説明」の追加

「本書の構成・使い方の説明」を追加する。ここで本書の構成を説明し、使い方や効率のよい学習方法を学習者に提案する。これにより学習者が限られた時間で効率的に業務上有益となる知識を得られるようにする。

③ 「索引」の追加

学習の効率化を図るため、本書に掲載されている重要用語をまとめた索引を巻末に掲載する。

④　「参考文献」の追加

本書を作成するに当たり、参考にした文献の一覧を掲載する。学習者が本書の掲載内容についてさらに深い知識を得る際に、参考文献を参照しやすくすることで、さらなる学習のための支援を行う。

●学習のしやすさの観点での紙面における工夫

各学習項目を学ぶにあたって、「学習のしさすさ」という観点から紙面における工夫を検討した。この検討においては以下の 2 点を基本とした。

- 本文の内容理解を助ける図表を多めに掲載する。
- 各項目のねらい、要点、キーワードをはっきりさせる。

また、各項目を学習者自身が自学自習する際に、教材の要点がつかみやすくするための検討を行った。具体的には、以下の 8 点である。その結果を図 3.2-7 に示す。

A)　章扉に本章で学ぶことを記載（図 3.2-7 の③）

章の位置づけを説明することで、学習者が章の内容の大枠をとらえることができるようにする。

B)　要点・注意点の囲み解説を設置（図 3.2-7 の⑤参照）

囲み解説において、本書の構成を説明し、使い方や効率のよい学習の仕方を提案する。これにより、学習者が限られた時間で効率的に業務上有益となる知識を得られるようにする。

C)　本文タイトル（図 3.2-7 の⑥参照）

本文は内容ごとに小分けにし、段落ごとに内容をまとめた小タイトルをつける。これにより、後に続く本文が何を解説しているのか事前に知ることができ、本文内容の定着度が高まる効果がある。

D)　章のまとめ（図 3.2-7 の⑩参照）

見開きの最後に章のまとめとして内容を振り返るキーワードを入れる。キーワードは、本章で覚えておくべきワードとする。学習者が自身の定着度が低い部分を把握し、振り返って学習することで、内容の理解向上につなげることができる。

E)　コラム（息抜き、トリビア、関係者経験談など）を適宜挿入

地層処分事業に携わる人材のインタビューや関係業務の話題などをコラムとして取

り上げる。学習者にとって単なる知識の習得だけではなく、実際の事業の現場での経験談や事業等に関する「豆知識」を提供することで、幅広い知識を身に付けることをできる。また、学習者にとっての息抜きになり、学習意欲の向上に役立つ。

F) Q&A の追加

Q&A 形式で学習者が本書で学習を進めていく際に疑問に思うと想定される点等を解説し、学習者が疑問を解決できるようにする。このことで、学習者が疑問をもちながら学習を進めることができる。

G) 確認テストとその解説は章末に配置（図 3.2-8 参照）

各章の内容の理解度・定着度を確かめるために作成している確認テストについては、各章章末にその解答解説とともに挿入する。

H) 脚注 or 側注（用語解説、補足説明）の追加（図 3.2-7 の⑨参照）

本文中で補足説明が必要な重要用語等は脚注や側注に説明をまとめる。これにより、学習に必要な補足説明を学習の流れを妨げずに提供することができ、学習者の学習意欲の継続に貢献できる。

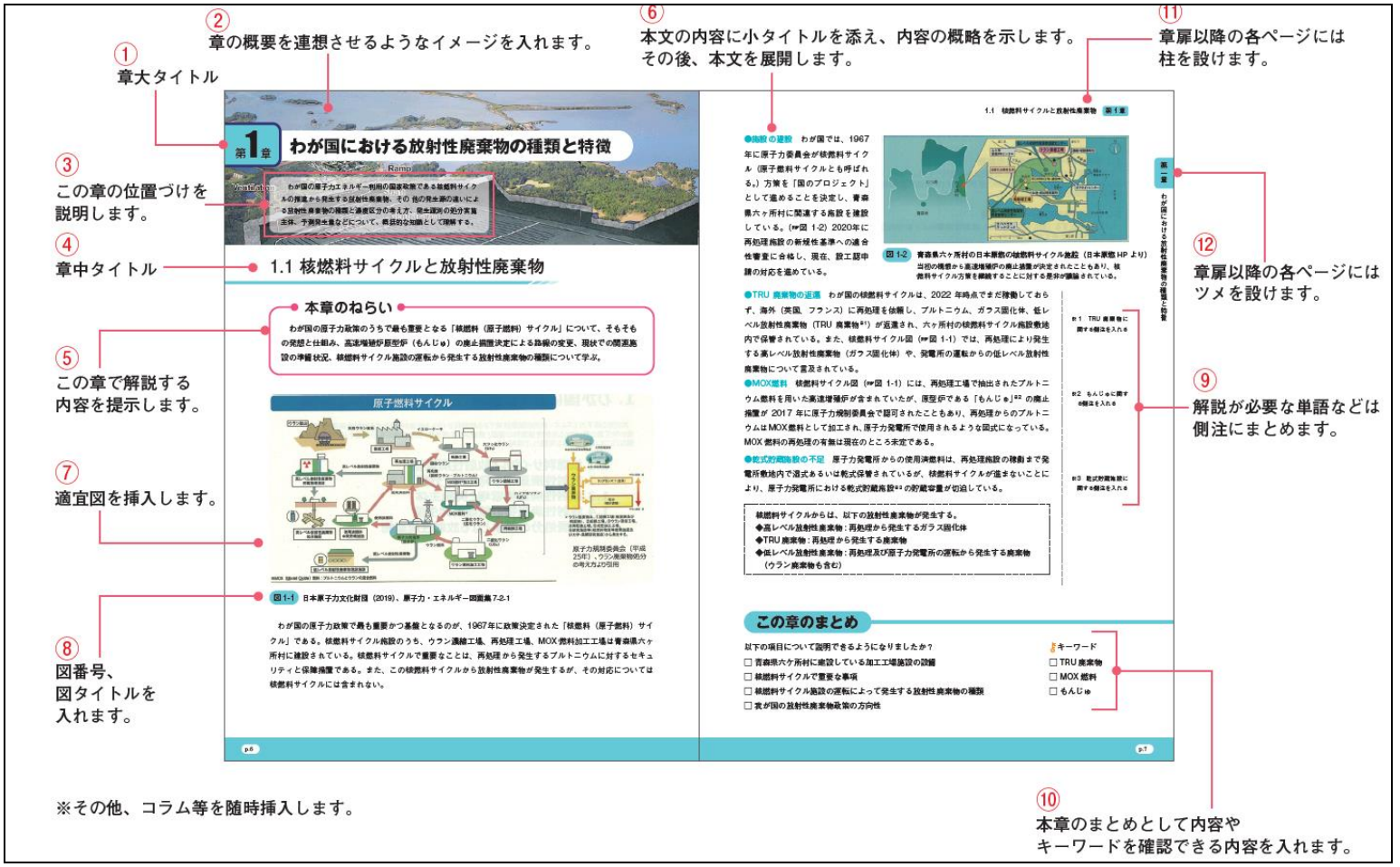


図 3.2-7　通常ページの紙面・デザインの見直し案

●使いやすさの観点でのデザインでの工夫

学習者自身が学ぶ内容を自覚し、自学自習を行えるように、教材の「使いやすさ」という観点からデザイン面での工夫を行った。これらの工夫により使いやすい教材とすることで、学習者の学習意欲の向上・継続に役立つものとなる。検討の結果を図 3.2-7 に示した。

以下、工夫した 4 点及びその効果を示す。

A) 章大タイトル（図 3.2-7 の①参照）

章番号・章タイトルを冒頭に入れることで、章で解説している内容・身につけるべき点を把握しやすくなる。

B) 章タイトル背景（図 3.2-7 の②参照）

章の内容を連想させるようなイメージ画像やイラストを背景に入れることで、章の内容を視覚的にイメージすることができ、章の内容を理解する手助けとなる。

C) ツメ（章の内容）の配置（図 3.2-7 の⑫参照）

小口（紙面両端）に章を検索するためのツメを配置することで、学習者が目的のページを探しやすくする。

D) 柱（項目の内容）の配置（図 3.2-7 の⑪参照）

ページの左右上に柱として章番号と名前を配置し、学習者がページ内容を把握するのに役立てる。

以上を反映した教材の構成案を別添資料 2-1 に示す。

(b) 確認テストページの構成・デザイン等に関する見直し

教材で学んだ内容の理解度・定着度等を確認するための確認テストのページデザインについても検討を行った。特に、理解が不十分な項目を学習者自身が把握し、何回でも教材本文に戻って復習できるような工夫を検討した（図 3.2-8）。なお、3.2.2 (1) b. に示したように、確認テストは、リテラシー教材に関する到達レベルの確認として、レベル I、II、III の三つのレベルを準備している。

確認テストのページは、問題ページと解答解説ページをそれぞれ見開きで作成する。

回答解説ページでは、以下の工夫を行うことを検討した。

A) レベル別の確認問題の配置（図 3.2-8 の⑬参照）

確認テストは、レベル I、II、III の順に各章の章末に入れる※。各章の章末に関連

する確認テストを入れることで、章の内容を振り返るとともに、定着度の確認を行う。理解不十分な部分は振り返って学習することで理解度を向上させる。

※ただし、レベル III の確認テストは、必ずしも各章には対応していないため、この点は今後検討が必要である。

B) 書き込みスペースの配置（図 3.2-8 の⑭参照）

レベル II 及び III の問題に対しては、書き込みスペースを設け、解答をその場で記入できるようにすることで学習を進めやすくする。解答欄を設けることで、本教材一冊で学習を進めることができる利点がある。

C) 解答・解説の掲載（図 3.2-8 の⑮参照）

レベル I 及び II の確認テストに対しては解答と解説を掲載する。理解の不十分な点は解説を読むことですぐに正確な情報を把握することができる。

D) 本文の関連ページの記載（図 3.2-8 の⑯参照）

「解答・解説」に加え、確認テストに関連した内容の理解を深めることができるように、問題に関連した内容を含む本文ページを示す。教材のページを掲載することで、関連する内容の振り返り学習が進めやすくなる。

E) 問題のキーワードの記載（図 3.2-8 の⑰参照）

問題のキーワードを提示し、定着していない部分を学習者が振り返ることができるようにする。問題と関連するキーワードを提示することで、学習効果を高める効果がある。

F) 模範解答の掲載（図 3.2-8 の⑱参照）

レベル II 及び III については、模範解答例を掲載する。自身の解答を記入・考えたうえで、模範解答例を読むことで、例えば、どういう観点が足りなかったのかなどを把握することができ、内容のより深い理解につながる。

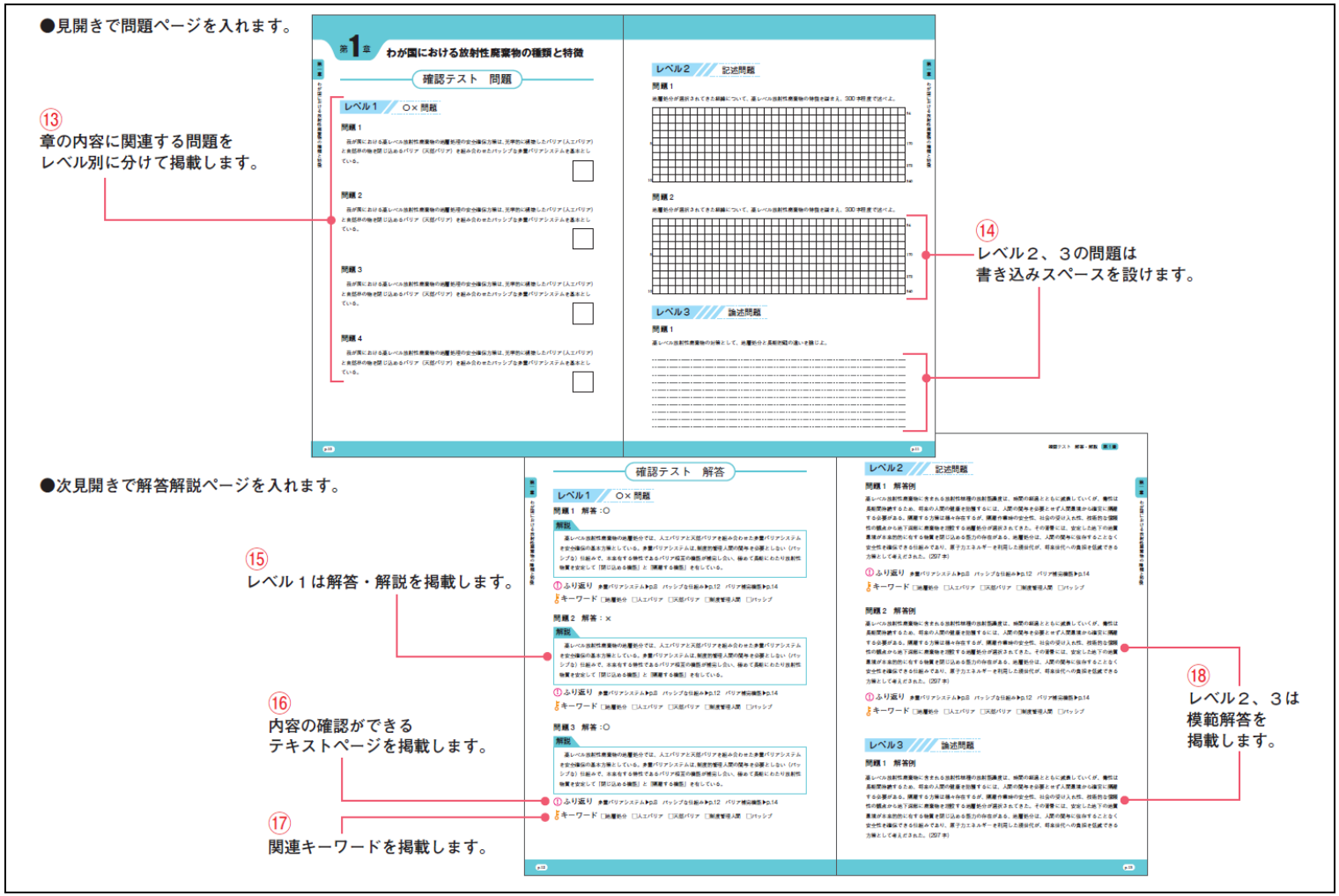


図 3.2-8　確認テストページの構成・デザインの見直し案

(c) 教材のサンプルページの作成

(a) (b) で検討した内容を反映した教材のサンプルページを作成した。通常ページにおいてサンプル作成は、教材の典型的な紙面構成（文章量と図の大きさ・図版の数量）と考えられる学習項目を対象とした（別添資料 2-2)。

また、文章と図版の分量の異なるページ及び年表などを含むページ等の場合の適用可能性を確認するために他のページのサンプルを作成した（別添資料 2-3 及び 2-4)。

b. 産業・工業系出版社による検討

前述のように、理工系の内容をわかりやすく伝えるという観点で、一般向けの理工系書籍を多数出版している出版社によるレビューを実施した。レビューは、次の 4 つの点で実施した。

① 体裁について

どのような体裁の教材（大きさ、形など）にしたら良いか

② 構成について

現在の教材案をどのような構成・デザインとしたら良いか

③ 内容について

編集者の視点での内容の修正について

④ その他

上記以外の検討内容について

以下に、上記 4 点それぞれの評価結果について概要を示す。

(a) 体裁について

書籍の判（大きさ）としては、通常以下の 3 種類が考えられ、作成している教材に関しても以下のいずれかが適当と考えられる。

- A5 判（148×210mm、一般的なビジネス書籍など）
- B5 判（182×257mm、雑誌や週刊誌など）
- A4 判（210×297mm、公共文書など）

現状の 1 項目を 2 ページで説明するという構成は、見開き 2 ページとなり読者にとって見やすく、理解しやすい形式であると考えられるため、これは維持すべきである。現状の教材案では、1 ページ当たり約 1,000 文字程度の文字数が有り、かつ図表が含まれている。このため、上記の判の検討においては、この 1 項目 2 ページという構成で、約 1,000 文字／ページ及び図表を含めることが前提条件となる。

A5 判の場合、文字サイズが 14Q[4]の場合、約 1,000 字／ページ、13Q の場合には 1,000 ＋α字／ページとなるが、これに図表を加える場合には、文字サイズをさらに小さくするか、行間を詰める必要が出てくるため、読みづらくなる（A5 判の試作ページは別添資料 2-5 参照）。

B5 判の場合には、文字サイズ 13Q とした場合、約 2,000 字／ページ入れることができ、タイトルの挿入や図をある程度大きめに入れることも可能である（B5 判の試作ページは別添資料 2-6 参照）。

A4 判の場合、文字の大きさを 14Q とした場合でもかなり余裕を持ち自由にデザイン可能となり、図もゆったり見せることが可能となる。しかし、教材という性格を考えた場合には、持ち運びや取り回しが難しくなるという欠点がある（A4 判の試作ページは別添資料 2-7 参照）。

これらを総合した結果、教材の大きさは、B5 判とするのが良いと考えられる。

また、書籍として出版することを考えた場合に、ハードカバー（上製）かソフトカバー（並製）とするのか、また、カラーで作成するか白黒とするのかという点についても検討を行った。前述のように、教材としての性格を考慮した場合、取り回しが向上することからソフトカバー（並製）とすることが望ましいと考えられる。図表の見やすさ、読みやすさの観点からカラーで作成するのが望ましいと考えられる。

以上から、教材の体裁としては、「B5 判・並製・オールカラー」とするのが良いと考えれれる。

(b) 構成について

地層処分についてわかりやすく読者に伝える、読者が学習しやすい教材とするという観点から、教材の構成について検討を行った。検討は、以下について実施した。

[4] 1Q＝0.25mm、13Q は約 9.2pt, 14Q は約 9.9pt

- 見開き 2 ページの構成
- 章扉・チェックシート（確認テスト）・コラム・カバーデザイン
- その他

以下に検討結果を示す。

●見開き 2 ページの構成

教材の基本パターンである見開き 2 ページでは、教材としてどういう構成が良いのかという点について検討結果は以下のとおりである（図 3.2-9）。

- 読者にとって各項目のポイント等が分かりやすく、理解しやすくなると考えられることから、現在の教材案の各章のはじめにある、「ねらい：何を学び取るか」については、それぞれの項目の冒頭に少し簡潔にして挿入する。
- 「何を学び取るか」に対応し、各項目の終わりに「ポイント」を入れ、当該の項目で最低限学んでおかなければならないことを簡潔にまとめる。
- 2 ページ目の「解説」部分は、「くわしく知りたい」としてまとめる。

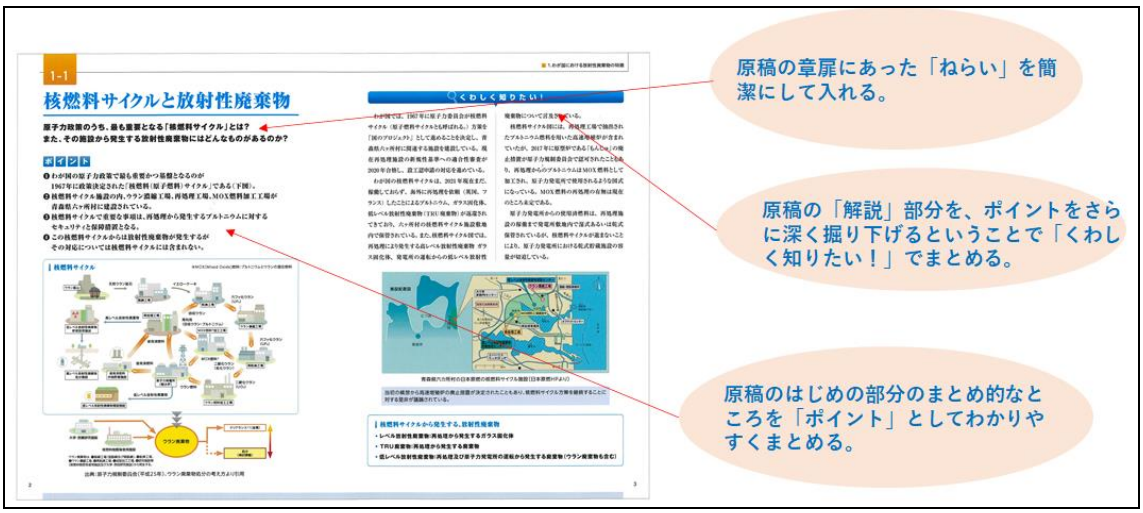


図 3.2-9　B5 判で「ねらい」等を入れた見開きページの例

見開きページについては、タイトルデザインなどを変えた 3 パターン作成した（別添資料 2-8、2-9、2-10 参照）。

●章扉・チェックシート（確認テスト）・コラム・カバーデザイン

章扉は、読者が最初に見るところであるため、「わかりやすく、シンプルに」が重要であるため、「何を学ぶのか」ということをわからせつつも、ここで読者に敬遠されないように、できるだけシンプルに「ねらい：何を学び取るか」を簡潔に示す（図 3.2-10 参照）。また、作成した章扉のサンプルは別添資料 2-11 参照。

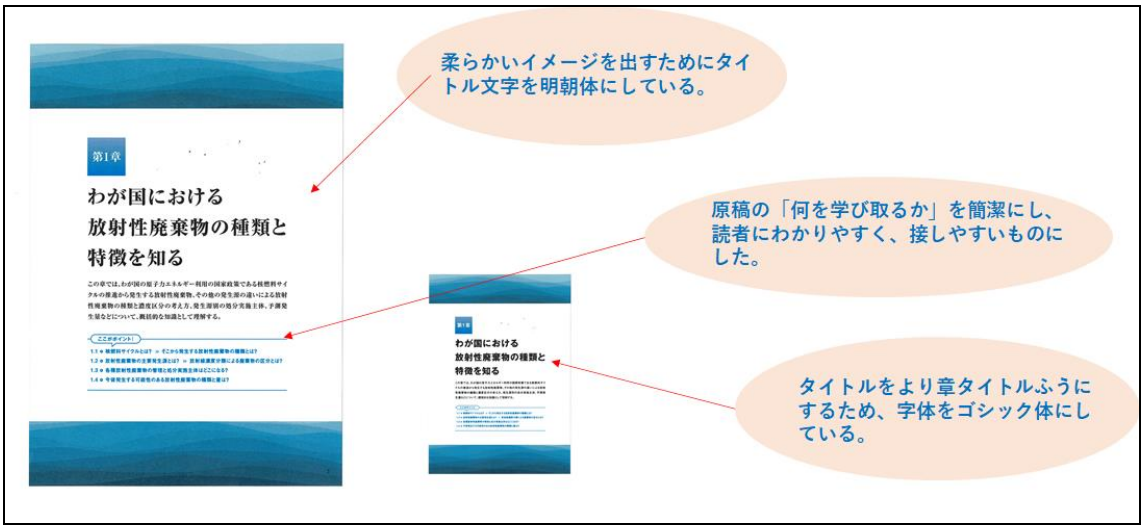


図 3.2-10　章扉の試作例

各章の最後には、その章の内容をどの程度理解できたかを問う、穴埋め問題的な「振り返りチェックシート」を追加する（図 3.2-11、別添資料 2-12）。これは、この章で最低限覚えておかなければならない事項で、使用者のやる気をそがないために、難易度はあまり高くない穴埋め問題として掲載する。教材の最後に「リテラシー確認テスト」として少し難易度の高い設問を設定する（図 3.2-12、別添資料 2-13）。

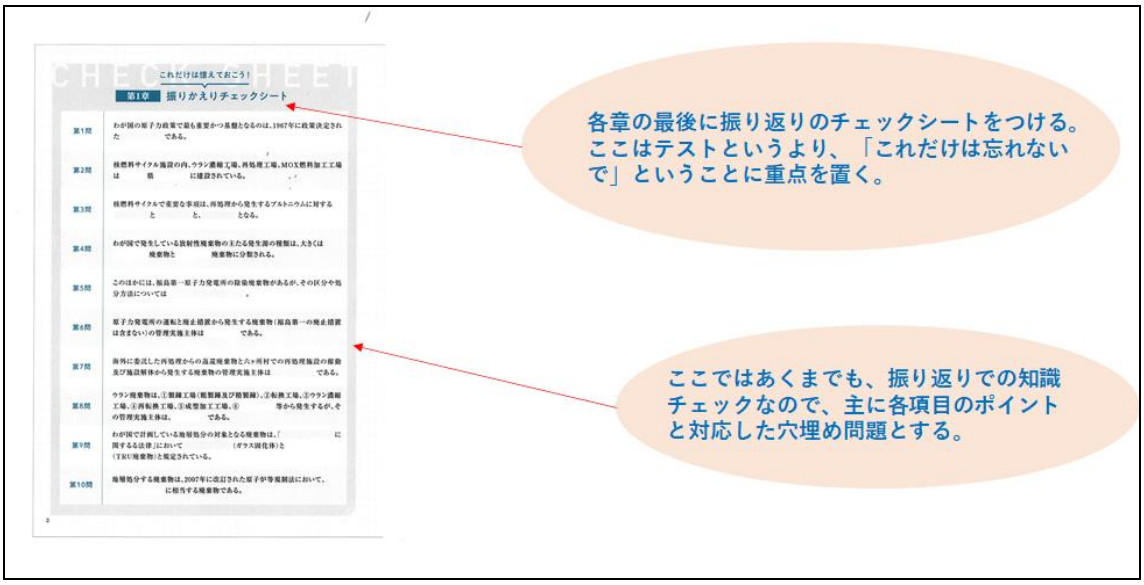


図 3.2-11　各章の理解度を試すチェックシートの例

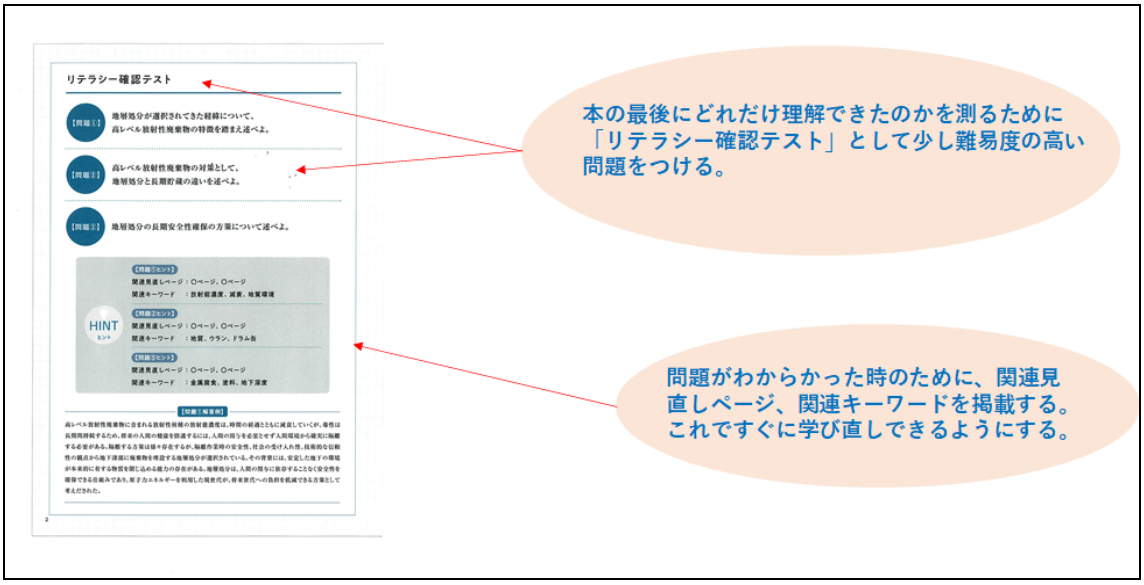


図 3.2-12　教材全体の理解度をはかる「リテラシー確認テスト」の例

次に、項目によっては、1 項目を見開き 2 ページで構成するという基本パターンから外れ、3 ページとなる場合も想定される。次の項目を見開きに戻すためには、1 ページはさむ必要がある。そのための読み切りのコラム（実際の事業従事者の体験談など）を用意する（図 3.2-13、別添資料 2-14 及び 2-15、別添資料 2-15 は別パターン）。コラムは読者にとって息抜きとなり、学習意欲の継続に貢献可能であると考えられる。

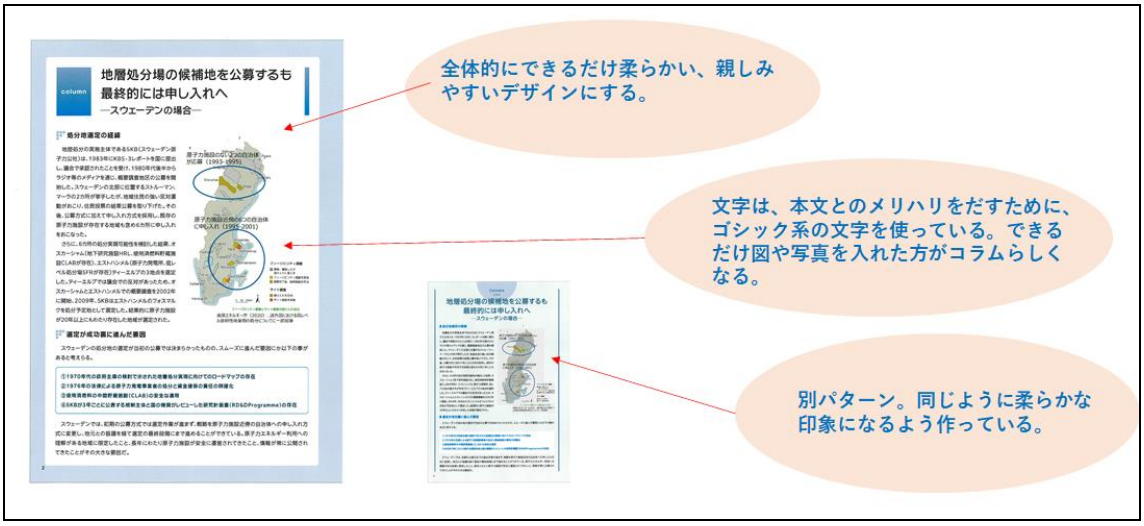


図 3.2-13　コラムの作成例

表紙のデザイン（カバーデザイン）は、教材を実際に書籍として作成する場合に、教材の印象に影響を与える重要な要素である。そのため、カバーデザインについて 2 種類の例を作成した。

一つ目の例では、この本が“教育教材”ということをイメージさせるタイトル付けと、落ち着いた色調にし、呼びかけ、リードなども少し固い感じの文書とした。真中部分には、地層処分の代表的なイラストなどを入れている（図 3.2-14、別添資料 2-16）。

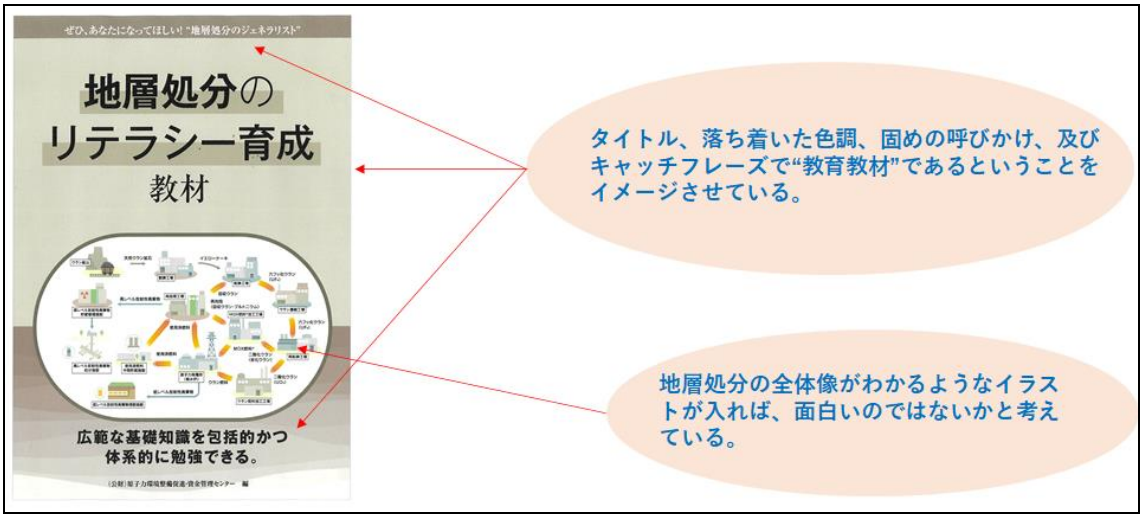


図 3.2-14　カバーデザインの例①

2 つ目のカバーデザインの例では、カジュアルなイメージを前面に押し出し、重くならないように配慮した。タイトルもデザインも軽めの感じとして、デザインには、地層処分に関連したできるだけ明るい感じの写真を使用した。呼びかけやリードも同イメージに沿うように作成した。

その他の教材の改訂の提案を以下に示す。

- 用語集を作成する。この本の読者の専門分野は多岐にわたることから、専門用語も他の分野の学習者にはなじみがない、また、同じ用語でも分野ごとに意味・用法が異なることも想定されることから、認識を共通とすることなどを目的とする。
- 学習者の学習の進行を支援するため巻末に「索引」を付ける。
- 全体的に文字数が多いため、文字数を低減する見直しが必要な可能性がある。文字の代わりに「図解する」ことを念頭に構成を考えることも必要である。この場合には、図をある程度大きくする必要があり、例外的に 1 項目を 3 ページにするなども対応も必要である。

(c) 内容について

教材の構成に関連する範囲において内容についての検討も実施した。内容についての改善案を以下に示す。

- 「はじめに」において、章立て、項目立てしたうえである程度の分量を使い「地層処分の意義」を明確にする。また、人材育成の必要性に関して、足りない人材・組織とそれらを補う方法に言及し、「このような学習が必要」として学習の必要性を示す。
- 学習意欲の喚起方法の一つとして、この分野に従事することの将来的なメリットや具体的な職業・給与、この分野に関連する企業のイメージなどを示すことも考えられる。
- 地層処分に関する教材ということで、地層処分の方法についてその流れを図解で丁寧に示すことも必要ではないか。加えて、以下などを入れることで、より事業を身近に感じることができるようになる可能性がある。
  - ・地層処分事業のスケジュールとどの程度の期間行われるのか
  - ・どのような手順と方法でどのような規模で行うのか
  - ・その程度の費用がかかり、どのように賄うのか

・どのような利益・不利益があり、風評被害の責任は誰が負うのか

(d) その他

学習者が実際の地層処分の流れなどの映像を見ることができると、具体的に自身が学んでいることをイメージすることができるため、学習意欲の継続等につながると考えられる。これを実現する方法の一つとしては、AR（拡張現実）[5]と呼ばれるものがある。この技術を用い、教材に掲載されている写真にスマートフォンやタブレット端末をかざすことで、その関連する動画や画像を表示することができる。臨場感のある動画等を表示することができる。

(e) まとめ

以上をまとめると、以下のような教材の姿となる。

- B5 判・並製・オールカラー
- 文字サイズ：13Q（約 9pt）
- 見開き 2 ページで 1 項目とし、1 ページ目に項目タイトル、リード（この項目で何を学ぶのか)、本文、写真・図を入れる。文字と色使いを明確にする
- 2 ページ目は、最後に「ポイント」を置く
- 章の最後にはその章の内容を問うチェックリスト、またはチェック問題を入れる

c. 教材の構成・デザインの見直しのまとめ

教材の構成・デザインに関する見直しとして、学習意欲の向上・継続（3.2.2 (3) a. 参照）及び理工系図書としてのわかりやすさの向上（3.2.2 (3) b. 参照）の観点からのレビューを行った。これらのレビュー結果を踏まえ、来年度以降、特に反映すべきと考えられる主な項目をまとめる。なお、詳細な検討は今後行うため、ここで示す項目は現時点での案であり、今後変更する場合もある。

[5] 景色や本などの現実世界のものにコンピュータで情報を加える技術

(a) 教材の大きさ・体裁

- B5 判・並製・オールカラー
- 文字サイズ：13Q（約 9.1pt）
- 見開き 2 ページで 1 項目とし、1 ページ目に項目タイトル、リード（この項目で何を学ぶのか)、本文、写真・図を入れる。文字と色使いを明確にする。

(b) 教材の構成

- 「はじめに」で教材の目的・意義等を記載
- 「本書の構成・使い方の説明」を追加し効率的な使い方の提案を記載
- 「索引」、「用語集」、「参考文献」の追加
- 章扉に本章で学ぶことを記載
- 章のまとめ・チェックリスト的なものを各章の最後に追加
- 必要に応じ、コラム（読み物）の追加

(c) 教材のデザイン

- 側注・ツメ・柱の追加

3.2.3 ポータル教材作成に関する今年度の実施内容

今年度の作成計画に従い、リテラシー教材の作成・改訂を進める一方で、ポータル教材の検討を進めた。まず、昨年度作成した、ポータル教材の内容、項目等を定める「学習指導要領」の見直しを行った。見直しでは、各学習ジャンルや学習項目の内容・構成を見直すとともに、情報の展開を下表のように、「学習ジャンル＞概要＞学習項目＞重要事項＞関連メタ情報」のように設定した。

また、ポータル教材については、各学習項目の重要事項について作成し、関連メタ情報については、関連する文献の紹介をするページを作成し重要事項内からリンクを張ることとした（図 3.2-15 参照)。

表 3.2-7　ポータル教材の学習指導要領改訂の例

学習ジャンル	概要	学習項目	重要事項	関連メタ情報
4.1.1 地層処分における地質環境特性の調査・評価とモデル化手法	段階的に進められるわが国の地層処分事業における各段階での地質環境調査・評価及びモデル化の手法について、海外での考え方を参照して研究開発されてきた手法について、事例とともに理解する。	4.2 地質環境の調査・評価	4.2.1 法定要件と地質環境調査・評価 4.2.2 地質環境調査・評価の基本的考え方と目的 4.2.3 サイト選定段階での地質環境の調査・評価の進め方	・ 最終処分法法定要件、地層処分技術 WG とりまとめ ・ 地質環境調査・評価の基本的考え方、サイトへの要件と影響要因 ・ NUMO の好ましい地質環境特性、Geo-synthesis レポート ・ NUMO 地質環境調査・評価の体系的な流れ
		4.3 地質環境特性の調査・評価項目と技術	4.3.1 統合化データフローダイアグラム 4.3.2 文献調査と概要調査段階での調査・評価項目 4.3.3 地質環境特性の調査・評価技術	・ Nagra のデータフローダイアグラム ・ NUMO の文献調査段階でのシステムフロー ・ NUMO の調査技術シート、文献調査段階データ管理システム
		4.4 地質環境モデル（SDM）化手法	4.4.1 地質環境モデル（SDM）とは 4.4.2 SDM の作成のガイドライン 4.4.3 SDM を構成する要素 4.4.4 NUMO の地質環境モデル	・ SKB が提唱した SDM の概要 ・ SKB の SDM 作成事例 ・ JAEA 平成 17 年レポートでの SDM 構築研究 ・ NUMO での SDM 作成技術
		4.5 地質環境の長期変動モデル化手法	4.5.1 地質環境特性の長期変動とは 4.5.2 地質環境変動予測モデル（GEM）の開発状況 4.5.3 JAEA の GEM の種類	・ NUMO の沿岸域での地質環境特性の状態設定 ・ JAEA 地質環境長期安定静評価確証技術開発 ・ METI 地層処分研究開発に関する全体計画 ・ 幌延地区を対象とした地質環境変遷モデル化例 ・ Nagra の Wellenberg を対象に作成した変遷モデル

(1) ポータル教材の概念の開発

ポータル教材で扱う学習項目と重要事項について、以下の考え方に従い作成することとした。

- ✓ 専門知識として学ぶ**「学習項目と重要事項」**は、地層処分に係る多くの分野のうち、ジェネラリストとして理解しておくべき現時点での**最先端の知識**とする。このことから学習項目とこれに係る重要事項に係る知識の多くは、NUMO の包括的技術報告書に基づく。
- ✓ リテラシー教材では、歴史的な背景を含め、地層処分に係る科学・技術的及び社会学的な観点からの包括的に学ぶ学習項目を設定しているが、専門知識としての**「学習項目と重要事項」**は、考え方や思想的な事項より、調査、設計、評価などの実務的な行為に関する手法や事例を学ぶことを目的として設定する。
- ✓ 専門分野の学習ジャンルは、リテラシー教材のジャンルも考慮し 10 ジャンルとする。前述のように、このジャンルに属する**「学習項目」**を設定し、それに係る**「重**

要事項」を設定する流れとする。設定した「重要事項」については、今後の検討を踏まえ、更新・修正・追記していく。

- ✓ 専門分野の学習ジャンルは、リテラシー教材の分野のような相互の関係はなく、学習したい任意のジャンルを選択し、興味ある**「学習項目と重要事項」**を選択できるように設定する。
- ✓ 専門分野を学ぶ学習者が、ジャンルごとの**「学習項目と重要事項」**を俯瞰することで、どの内容を学ぶのか選択できるようにする。

また、ポータル教材の構成については、10 の学習ジャンルを示すポータルサイト（ページ）を作成し、いずれかのジャンルを選ぶと、各ジャンルを構成する学習項目を示すポータルサイト（ページ）が開くように設定する。このページで各ジャンルを構成する学習項目の一つを選択すると、その学習項目の説明画面が表示される。選択した学習項目の説明画面では、学習項目の概要と学習項目を構成する重要事項の目次がまず表示され、その下に各重要事項の説明が示されるとともに、説明内の関連する用語等からメタ情報（文献情報）へのリンクを張る。下図にポータル教材の構成の概念を示す。

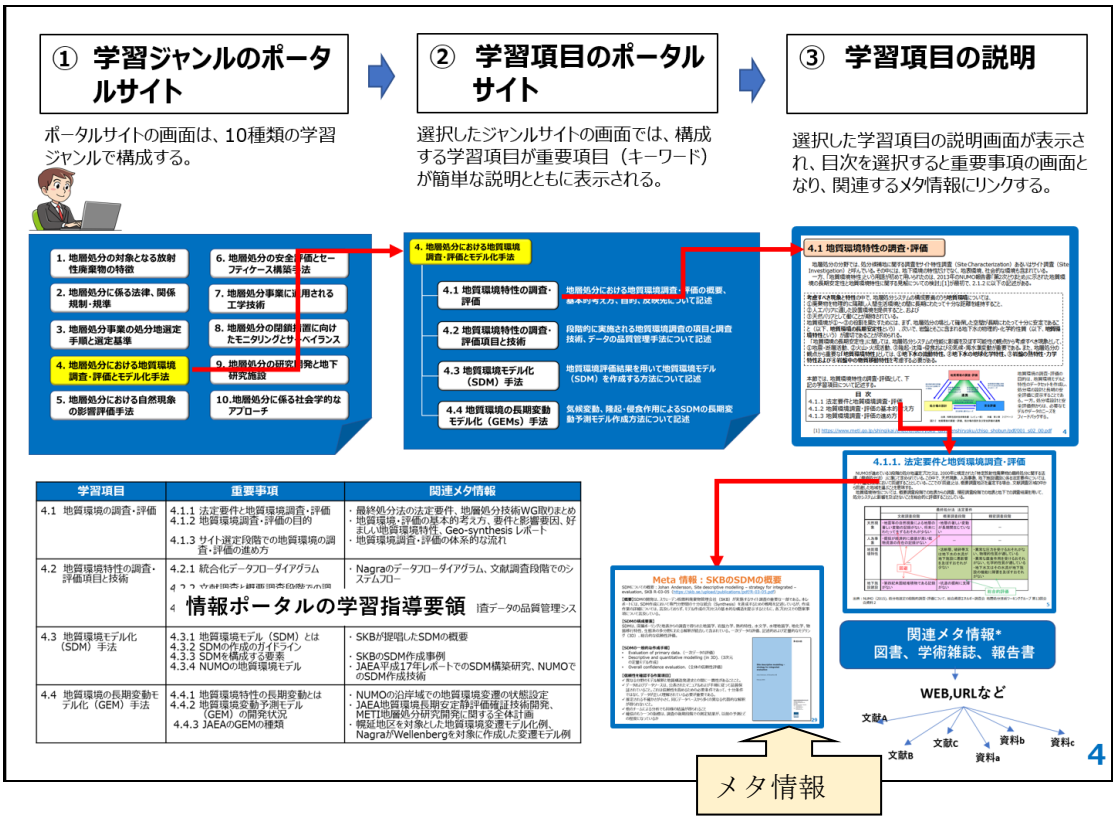


図 3.2-15　ポータル教材の構成・構造の概念

(2) ポータル教材（コンテンツ）の作成

設定したポータル教材の概念に基づき、実際のコンテンツの作成を行った。ただし、最終的な教材の形式は検討段階にあるため、構造（リンクの設定やページ構成）は仮のものとして、現時点では MicorsoftPowerPoint のスライドで作成している。

学習項目の説明ページ（図 3.2-16）では、学習項目の概要を説明するとともに、当該学習項目を構成する重要事項の目次を示しており、目次をクリックすると各重要事項のページにアクセスできるように設定する（図 3.2-16、ただし、現時点では PowerPoint で作成しており、重要事項のページへのアクセスは設定していない）。

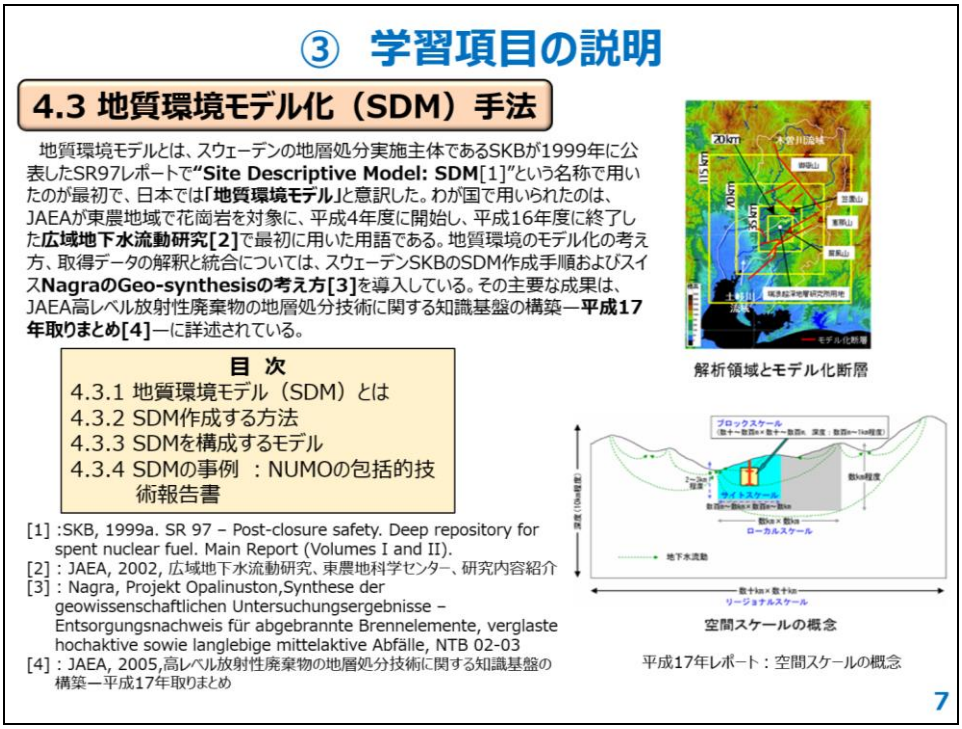


図 3.2-16　学習項目の説明ページ

学習項目の説明ページ内の重要事項の目次（図 3.2-16 の黄色の枠）の各重要項目の説明資料についても、そのコンテンツを Micorsoft PowerPoint のスライドとして作成した（図 3.2-17）。さらに、重要項目に関連する文献を紹介するメタ情報のページについても作成した（図 3.2-18）。これらのコンテンツは、全 10 ジャンル（含まれるすべての学習事項、重要事項、及びメタ情報）について作成した結果、PowerPoint のスライド数で約 500 枚となった。

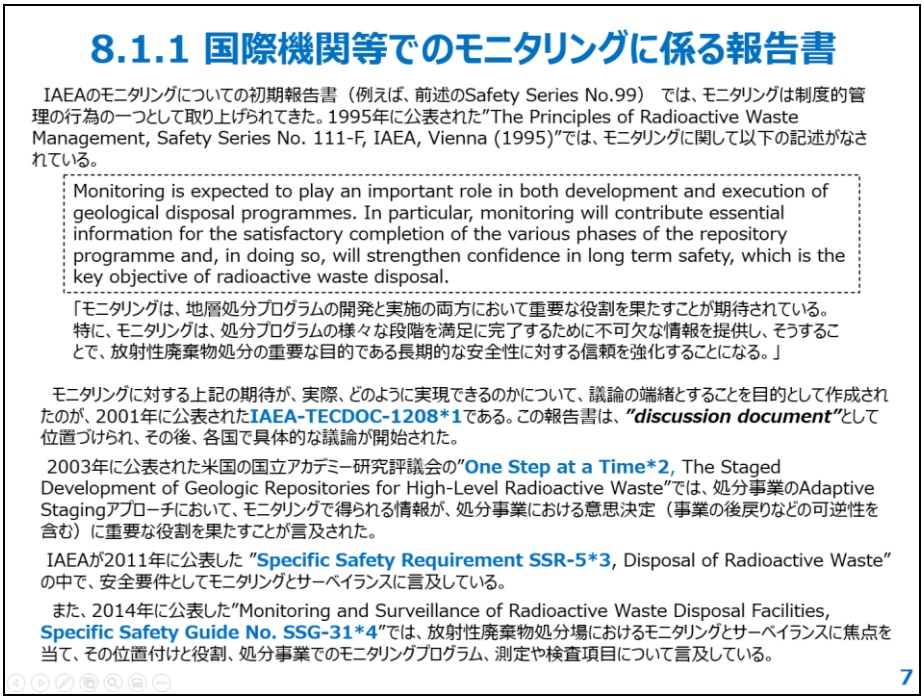


図 3.2-17　重要事項に関する説明事項の例

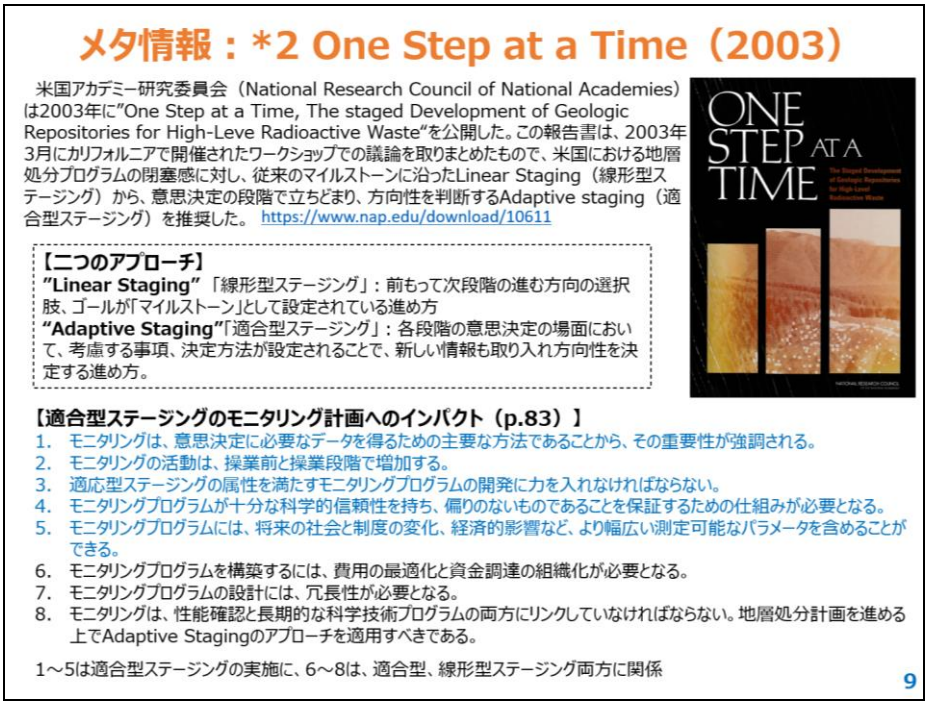


図 3.2-18　メタ情報（関連資料）の説明ページの例

3.2.4 教材作成に資する情報収集

来年度の作業において、リテラシー教材については、より効果的かつ使いやすい教材とするため、その構成や内容をさらに精査していく計画である。また、ポータル教材に関しては、掲載する項目などの内容をさら検討し、効果的な学習教材となるよう作業を進めていく計画である。そのため、既存の学習資料に関する情報収集を追加的に実施した。情報収集は、書籍や海外の地層処分に関する文献を対象とし、これらの資料から得られた情報、Know-how などは、今年度の教材改訂案の検討に用いたほか、来年度の教材作成に反映する予定である。

情報収集において購入した教材等に関する書籍を表 3.2-8 に示す。

表 3.2-8　教材作成に関する情報収集等のために購入した書籍

	書名	著者・編者名	出版社
1	教材設計マニュアル: 独学を支援するために	鈴木 克明	北大路書房
2	教育現場と研究者のための著作権ガイド[3]	上野 達弘	有斐閣
3	Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste 2nd Edition （電子書籍）[4]	Michael Apted and Joonhong Ahn	Elsevier

さらに、「Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste 2nd Edition」（表 3.2-8 の 5 件目の文献）については、表 3.2-9 に示すように、その内容と本事業で作成しているリテラシー教材及びポータル教材の内容との比較・分析を行った。その結果に基づき、関連する項目について内容を正確に把握し、教材作成に資する情報とするため、翻訳を実施した。ただし、予算の関係上、翻訳は、文献全体ではなく、特に関連の深い編や章を対象として実施した。

表 3.2-9　文献「Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste 2nd Edition」とリテラシー及びポータル教材との見出しの比較

（青字は作成中の教材との関連のある項目、NA：該当なし）

目次項目	リテラシー育成教材で関連する項目	ポータル教材で関連する項目
Part 1 導入編 Introduction to geological disposal of spent nuclear fuels and radioactive waste		
1. 初歩の初歩：放射性廃棄物を安全に処分するための地層処分場の多重バリアと隔離 Repository 101: multiple-barrier geological repository design and isolation strategies for safe disposal of radioactive materials	5. 地層処分の安全確保方策と評価	NA
2. 長期貯蔵の効果 Effects of very long-term interim storage of spent nuclear fuel and HLW on subsequent geological disposal	NA	NA
3. 処分場の深さ Surface, subsurface, intermediate depth, and borehole disposal	2. わが国における放射性廃棄物の処分形態	NA
4. 超深孔処分：米国での見通し Deep borehole disposal of nuclear waste: US perspective	NA	NA
5 地層処分場計画における地下研究所の意義 Relevance of underground rock laboratories for deep geological repository programs	10. 地層処分に対する信頼感の醸成	9. 地層処分の研究開発と地下研究施設
Part 2 地層処分場システム：サイト特性 Geological repository systems: characterization, site surveying and construction		
6 岩塩での処分場システム Salt repository systems: design development approach at the example of the Gorleben salt dome	NA	NA

7 米国ユッカマウンテン The Yucca Mountain license application	12. 地層処分計画における各国の挫折と成功例からの教訓 *※ただし、リテラシー教材で右ほどの詳細な内容ではない*	NA
8 地質学的環境の長期安定性に関する評価 Assessing long-term stability of the geological environment	NA	4. 地層処分における地質環境特性の調査・評価とモデル化手法 5. 地層処分における自然現象の影響評価手法
9 ファーフィールドプロセス解析と飽和媒体における核種移行モデル Far-field process analysis and radionuclide transport modeling for saturated media	NA	6. 地層処分の長期安全評価手法とセーフティケース構築手法
Part 3 工学バリアシステム：閉じ込めの技術 Engineered barrier systems for geological repositories: containment materials and technology		
10 核種の不動化と廃棄体 Immobilization of high-level radioactive waste and used nuclear fuel for safe disposal in geological repository systems	NA	1. 地層処分の対象となる放射性廃棄物の特徴 7. 地層処分事業に必要とされる工学技術
11 ニアフィールドプロセス Near-field processes, evolution, and performance assessment in geological repository systems	NA	6. 地層処分の長期安全評価手法とセーフティケース構築手法
12 ベントナイト緩衝材 Bentonite buffer: macroscopic performance from nanoscale	NA	7. 地層処分事業に必要とされる工学技術
13 キャニスタ Nuclear waste canister materials: corrosion behavior and long-term performance in geological repository systems	NA	7. 地層処分事業に必要とされる工学技術
Part 4 性能評価、専門家の判断、知識マネジメント Performance assessment, expert judgment and knowledge management for geological repository systems		
14 性能評価モデル Performance assessment modeling for a disposal facility in a semi-arid environment	NA	6. 地層処分の長期安全評価手法とセーフティケース構築手法

15 地層処分の安全評価 Safety assessment for deep geological disposal of high-level radioactive waste	5. 地層処分の安全確保方策と評価	6. 地層処分の長期安全評価手法とセーフティケース構築手法
16 低中レベル放射性廃棄物の浅地中処分の安全評価 Safety assessment for near-surface disposal of low and intermediate level wastes	NA	NA
17 性能評価における不確実性の取り扱い Treatment of uncertainty in performance assessments for the geological disposal of radioactive waste	9. 地層処分固有の取り組み	6. 地層処分の長期安全評価手法とセーフティケース構築手法
18 専門家の判断 Expert judgment elicitation: Application to science issues in siting facilities for geological disposal of nuclear waste	NA	NA
19 ベイズ・ネットワーク解析の応用 Application of Bayes Network analysis to RWGD siting: expert estimation of geological barrier effects due to climate change	NA	NA
20 使用済燃料の安全保障 Safeguard ability of a geological repository for spent nuclear fuel	NA	NA
Part 5 放射線防護、規制、環境モニタリング、社会のエンゲージメント Radiation protection, regulatory methodologies environmental monitoring and social engagement for geological repository systems		
21 放射線防護の原則と地層処分システムに向けた基準開発 スウェーデンの事例 Radiation protection principles and development of standards for geological repository systems	5. 地層処分の安全確保方策と評価	7. 地層処分事業に必要とされる工学技術
22 規制方法論とリスク・インフォームド・アプローチ Regulatory methodologies and the risk-informed approach	4. 地層処分の安全原則と規制・規準類	2. 地層処分に係る法律、関係規制基準

23 フィンランドの地層処分場は実現段階に Geological repository for high-level nuclear waste becoming reality in Finland	12. 地層処分計画における各国の挫折と成功例からの教訓	NA
24 環境モニタリングプログラムと公衆エンゲージメント：米国 WIPP の場合 Environmental monitoring programs and public engagement for siting and operation of geological repository systems: experience at the Waste Isolation Pilot Plant	9. 地層処分固有の取り組み	7. 地層処分事業に必要とされる工学技術
25 知識マネジメントシステム Application of knowledge management systems for safe geological disposal of radioactive waste	NA	NA
26 社会との対話手法 Methods for social dialogue in the establishment of radioactive waste management programs	11. 地層処分が直面する社会的側面	10. 地層処分と社会学的なアプローチ

3.3 2021 年度の人材育成セミナーの開催

3.3.1 これまでのセミナー開催経験からの考察と今年度のセミナーのコンセプト

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。2019 年度の人材育成セミナーは、受講者の満足度・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。

- 講義が主体で受講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が過密となる
- 3 日間フルに講師や受講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 2019 年度の人材育成セミナーからの教訓を考慮し、昨年度（2020 年度）には、（国研）産業技術総合研究所の協力のもと、駿河湾沿岸での地下水流動をテーマとして、少人数の受講者で講義、机上での実習、現場の見学、グループディスカッションを組み合わせたセミナーを静岡県富士市において開催した。2020 年度の人材育成セミナーでは、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、受講者が受け身ではなく、主体的に参加し受講者間で対話が促される講義・グループワークを行った。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を志向した。

2020 年度の人材育成セミナーでのアンケート結果等からは、以下の教訓等が得られた。

- 実習における背景等の説明不足、受講者の従事年数や事前知識の差など実施における問題点が存在した。
- 座学だけではなく、実施したセミナーのように実習やエクスカーション等との組み合わせの学習効果が高いと考えられる。
- グループワークや自己紹介については、当初想定したとおりの効果があったと考えられ、今後のセミナーでも同様の企画を実施するよう検討する。

- メンバー構成（専門分野や年齢構成)、講師の関与などを考えることで、グループワークを活性化し、学習効果を上げることができる可能性がある。
- グループワークのメンバーは、異なる専門分野を持つメンバーで構成したほうが、他分野の専門家とのコミュニケーションの観点での気づきを得る可能性がある。
- 地層処分に関する特定のテーマを題材としたグループワーク（2020 年度は地下水）は、単にコミュニケーションを題材とするよりも、他人の考えを聞くという面ではより効果的と思われる一方で、受講者の知識レベルによって議論への参加が難しい場合もある。
- 今後のセミナーのテーマとしても異なる分野間でのデータのやり取り・受け渡しをシミュレートした演習などが好ましいと考えられる。

これらの教訓等を踏まえ、2021 年度の人材育成セミナーについても原則として、2020 年度のセミナーと同じコンセプトでテーマ・開催地（見学先）を変更し開催することとした。具体的には、以下のコンセプトで実施することとした。

- 受講者数は小人数（最大 15 名程度）としモニターとして参加することで、終了後にはアンケートへの回答を依頼する。
- 受講者が能動的に参加できるよう、アクティブラーニング形式を採用し、座学だけでなく、実習、演習、見学、グループワーク等で構成する。
- 受講者は、地層処分の主要研究分野である、地質環境分野、工学技術分野、安全評価分野をはじめとする異なる専門分野を有す比較的若手（実務経験 5 年以内程度）で構成する。
- 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グループワーク等の時間を確保する。

3.3.2 セミナーの企画の検討

前述のように、2021 年度の人材育成セミナーは、2020 年度の人材育成セミナーのコンセプトを踏襲し、テーマを変更して実施することとした。2020 年度は地質環境調査分野（地下水）からテーマを選定したことから今年度は、工学技術または安全評価分野を対象として、テーマを検討することとした。また、地層処分スキルアップ研究会の参加機関と

今年度のセミナーのテーマ及び参加機関からのセミナー開催に対する協力について協議した結果、今年度は、北海道幌延町の（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で行われている研究開発を題材として、同センターの見学を組み合わせて実施すること、実施に向けて JAEA から講師の派遣等協力を得ることができることとなった。

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テーマ及び内容の検討

2021 年度人材育成セミナーの内容検討のため、講師の派遣や見学を行う施設を有する JAEA との間でセミナーの主テーマ等を検討するため会合を実施した。会合には、毎年受講者を多数派遣する原子力発電環境整備機構（NUMO）のセミナーに対する要望や意見を反映するために、NUMO からも代表者が参加した。JAEA 及び NUMO 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　JAEA 及び NUMO とのセミナーのテーマ及び内容検討のための会合

日付	場所（参加機関）	内容
2021 年 5 月 10 日	オンライン（JAEA・NUMO）	人材育成セミナーのコンセプト等の説明、今後の実施計画の共有
2021 年 5 月 31 日	オンライン（JAEA・NUMO）	セミナーのテーマ案に対する意見・情報共有
2021 年 6 月 14 日	オンライン（JAEA・NUMO）	セミナーのテーマ案に対する意見交換、3 日間のセミナースケジュールに関する意見交換
2021 年 7 月 2 日	オンライン（JAEA・NUMO）	セミナーのテーマ案に関する検討、セミナーの日程について確認
2021 年 7 月 20 日	オンライン（JAEA のみ）	JAEA 担当の座学、グループワークの内容に関する検討・意見交換
2021 年 7 月 29 日	オンライン（JAEA・NUMO）	セミナーの各プログラム（実習、講義等）の検討
2021 年 8 月 25 日	オンライン（JAEA・NUMO）	セミナーの各プログラムの実施内容の検討、新型コロナウイルス感染拡大に伴うセミナー開催に関する検討
2021 年 9 月 13 日	オンライン（JAEA・NUMO）	セミナーの各プログラムの実施内容の確認、セミナー開催方法の決定
2021 年 10 月 6 日	オンライン（JAEA・NUMO）	セミナーの予行（実施内容の最終確認）

検討の結果、2021 年度の人材育成セミナーは、JAEA 幌延深地層研究センター（新第三紀堆積岩）で実施されている「人工バリア性能確認試験」を題材として、受講者が、人工バリアや周辺岩盤の観測データを取得するためにどのような準備をしてきたのかを知り、実際に取得されたデータを扱いつつ、THMC 連成現象（熱－水－応力－化学）をどう解釈するかを自分の頭で考えながらグループで学習することを目的として実施することとした。

また、開催日程は、2021 年 10 月 11 日（月）～13 日（水）の 3 日間で「地下研から学ぶ！～データの準備・解釈・伝え方～」と題し、主会場は、各地からの受講者や講師の利便性を考慮し、稚内市内のホテルとして会場を確保して検討を進めた。JAEA の幌延深地層研究センターの見学に際しては、バスをチャーターし稚内市内から移動することとした。

なお、2021 年 7 月から 8 月にかけて、全国的に新型コロナウイルスの感染拡大が続き、セミナー開催に伴いクラスターの発生などを避けるため、対面でのセミナーの開催が難しいことも考えられたことから、オンラインでの開催のための技術的な準備・検討、セミナープログラムの見直しなども並行して進めた。

(2) 人材育成セミナーの構成

前述のように、今年度の人材育成セミナーは、2020 年度人材育成セミナーのコンセプトを踏襲しており、その構成についても原則として同様のものとして検討を開始し、協力機関である JAEA や多くの受講者を派遣する NUMO の意見も反映し修正したものとなった。対面開催の場合の 2021 年度の人材育成セミナーの構成（下記の順番は必ずしもプログラム構成と一致していない）及びそれぞれの目的等は以下のとおりとした。特に、座学を単なる受け身の講義とするのではなく、グループワークや演習を組み合わせるなどの工夫を行った。

なお、セミナー内容の検討途中に完全にオンラインでセミナーを実施することとしたため、以下の対面形式のセミナー内容は、その検討時点でのものであり、オンライン開催で実施した実際の内容、構成、目的等とは異なっている。オンライン開催のプログラム等は後述する。

①前振り（担当：JAEA 及び当センター）

セミナーの目的と意義、セミナープログラムの仕立てと学習到達目標について説明し、セミナーの位置づけを明確にするとともに、それぞれの受講者が目標を意識してセミナー

に参加できるようにする。

②ミニグループワーク（自己紹介）

各受講者自身が実施している研究開発の内容や今後の研究活動方向性と、処分事業との位置づけを図に示し、自己紹介を兼ね各グループ内で紹介することでメンバーの一員として共に作る場への参画を容易にする（チェックイン[6]）。各自の研究内容の地層処分事業との関係・リンクをあらためて理解する。

NUMO の包括的技術報告書で地層処分システム全体のふるまいを俯瞰し、時間・空間スケールに関する整合性を確認できるようにする表現方法として導入されている「ストーリーボード」を一部修正したものを利用し、各受講者が自身の研究内容や今後の方向性の処分事業における位置づけを記入し、紹介することを企画した（図 3.3-1 参照）。

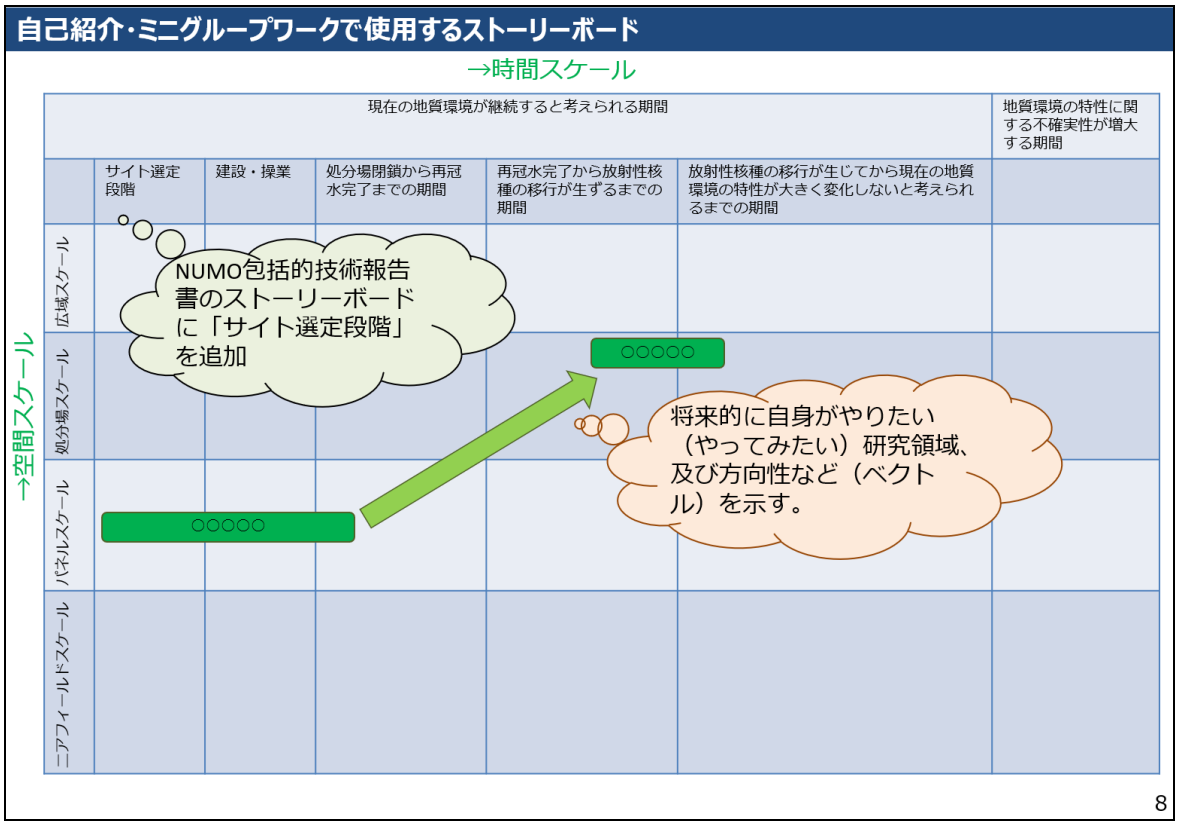


図 3.3-1　自己紹介で用いるストーリーボードと記入例

6 『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。

③座学及びグループワーク or 実習（Excel を利用した一次元熱伝導解析の実習）

座学は、JAEA の地下研究所とそこで行われている研究開発に焦点を当てた内容で 1 日目及び 2 日目に行うことにした。1 日目の座学では、ジェネリックな地下研究所の処分事業における役割と貢献について講義を実施する。その後、JAEA が平成 26 年（2014 年）に公表した「幌延の必須の課題」をストーリーボード上にマップして、研究開発と処分事業の関わりについて各グループで議論し考えを深める。さらに、ジェネリック地下研究所でカバーすべき研究開発と将来のオンサイトの地下研究所でなすべきことの違いを説明するポイントはどこにあるのかをグループで議論を実施する。異なる専門性を有する受講者間で、処分事業とジェネリックな地下研究所の役割等を議論することで、地層処分事業の推進に多分野の専門家の協力が必須であることの気づきを与えるとともに、研究テーマの処分事業とのリンクを考える機会を与える。

2 日目の座学では、JAEA が幌延深地層研究センターで実施している、処分場ニアフィールドでの廃棄体定置後に起こる現象に関する「人工バリア性能確認試験」について説明を行う。また、グループワークとして、事前知識のみで、廃棄体定置後にニアフィールドで発生する現象（現象間の関係）を記述する。さらに、同プロジェクトについての理解を深めるために、実習として Excel を用いた一次元熱伝導解析を行う（必要なファイルは事前に準備）。実習の結果を考慮の上、さらに THMC（熱-水-応力-化学）連成解析について学習する。

④地下研究施設の見学

2 日目に幌延深地層研究センターの地下施設の見学を行い、座学で履修した研究開発プロジェクトが実際に行われている現場を見学するとともに、地下環境を実際に体験することで、座学で学んだ知識の理解の向上や知識の定着を期す。

⑤講師と受講者の対話の時間

2020 年度のセミナーでの経験から、受講者が講師と自由な雰囲気の中で質問や意見交換ができることが、講義の内容や異分野間の協力の必要性の理解向上に役立つことが示唆されたことから、2 日目の夕食時に受講者が講師と意見交換等できる時間を設定する。

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、それぞれの受講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、他の受講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。

これらのプログラムを 3 日間の日程にあてはめ調整をした結果を以下に示す。なお、前述のように、以下は、対面開催の場合の検討段階の仮のプログラムである。

●1 日目

1. プログラム案：セミナー詳細と各プログラムの意図等（1日目）	
13:30～13:50	前振り
セミナーの目的と意義、セミナープログラムの仕立てと学習到達目標について説明し、受講者に対して、**セミナーの位置づけを明確**にするとともに、それぞれの**受講者が目標を意識してセミナーに参加**できるようにする。 講師：JAEA、RWMC	
13:50～14:50	ミニグループワーク（自己紹介）
各受講者が自身が実施している研究開発の内容や今後の方向性と、処分事業との位置づけを図に示し、自己紹介を兼ね各グループ内で紹介することで**メンバーの一員として共に作る場への参画を容易**にする（チェックイン）。**各自の研究内容の地層処分事業との関係・リンクをあらためて理解**する。 進行：RWMC	
14:50～15:00	休憩
15:00～16:20	座学1 「地下研の役割、幌延深地層研究センターでの研究開発」
地層処分事業におけるジェネリックな地下研究施設に関する一般的な役割、サイト・スペシフィックの地下研との役割の違い等の情報提供。我が国の地下研究施設での研究開発の紹介。**我が国の地層処分事業におけるジェネリックな施設である幌延深地層研究センターの役割についての情報提供。** 講師：JAEA	
16:20～16:30	休憩
16:30～18:30	グループワーク1「幌延深地層研究センターでの研究成果等の活用について」
幌延でこれまで行われてきた研究開発・今後の計画等を踏まえ、NUMOの処分事業を進める場合に、成果や経験をどう生かすことができるか議論。自身と異なる専門分野を持つ他の参加者と幌延の役割・意義について幅広く議論・意見交換することで、**地層処分事業の推進に多分野の専門家の協力が必須であることの気づきを与えるとともに、研究テーマの処分事業とのリンクを考える機会を与える。** 講師：JAEA	
18:30～19:30	夕食

●2 日目

1. プログラム案：セミナー詳細と各プログラムの意図等（2日目）	
9:00～10:15	移動（バス）：ホテル（稚内市内）⇒幌延（JAEA深地層研究センター）
10:15～12:30	JAEA深地層研究センター見学
深地層研究センターの地上施設・地下施設を訪問し、実際に研究開発プロジェクトが行われている場所で説明を聞く、目で見ることで、**前日の座学で学んだ内容を再確認することで、理解の向上につなげる。** 講師：JAEA	
12:30～15:00	移動＋昼食（トナカイ牧場）
15:00～16:20	実習＋座学2「人工バリア性能確認試験の概要」
幌延深地層研究センターで行われている人工バリア性能確認試験の概要の説明。単なる座学だけではなく、アクティブラーニングの一環として廃棄体処分後に想定される現象のイメージ図を作成。**ニアフィールドで廃棄体定置後に起こる現象についてイメージを得る。** 講師：JAEA	
16:20～16:30	休憩
16:30～18:20	座学3＋実習「実測データと解析結果」
人工バリア性能確認試験の概要の説明（続き）。計測データの解釈。1次元の熱伝導解析から**THM連成解析の必要性を学ぶ。** 講師：JAEA	
18:20～19:30	夕食（講師とともに）
各グループに講師を配し、受講者と講師が食事をともにしながら、実施したグループワークや幌延での研究開発の内容などについて受講者が質問や意見交換が可能な場にする。**受講者が講師との対話を通じてグループワークや座学の内容等について、より深く考える機会を提供**する。 講師・受講者	

5

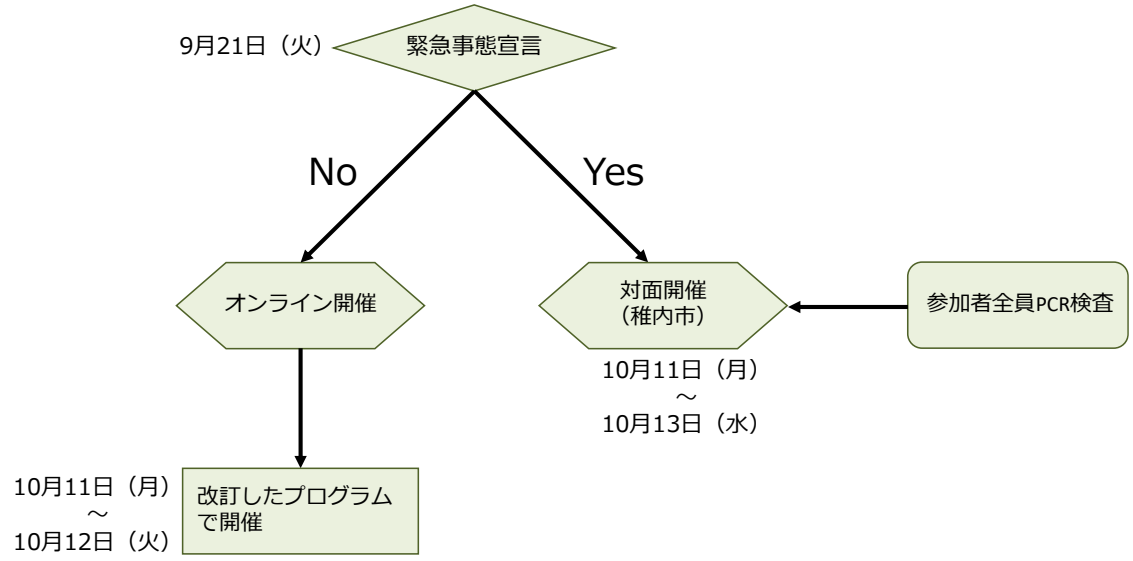
●3 日目

1. プログラム案：セミナー詳細と各プログラムの意図等（3日目）	
8:30～9:00	座学４「地層処分に関する説明について」
NUMOが一般等に対して行っている情報提供や説明の手法を通して、地層処分事業におけるコミュニケーション方法について、難しい点、工夫が必要な点などを考える。 講師：NUMO	
9:00～10:40	グループワークII「今後の処分事業での役割を考える」
座学４でNUMOが行っている地層処分に関する説明を前提に、よりわかりやすく伝えるためには、どのようにしたらよいか、また、安全性を伝えるうえで重要な点は何かなど議論する。これにより、自身の研究内容等を踏まえ、**処分事業におけるコミュニケーションでの役割（自分に何ができるのかなど）を考える。** 講師	
10:40～10:45	休憩
10:45～11:20	ふりかえり
3日間のふりかえりとして、各受講者が「良かったと思うこと」、「新たな気づき」などをグループ内で話し、グループとして発表する。今回の人材育成セミナーで得たものについて**各受講者がはっきりと認識**することができるようにする。 講師：RWMC	
11:20～11:25	事務連絡 RWMC
終了	

(3) オンライン開催への変更及びプログラムの見直し

2021 年 7 月から 8 月にかけて、日本全国で新型コロナウイルス感染者数が大幅に増加し、東京都などに緊急事態宣言が発出された。人材育成セミナーを対面で予定通り北海道稚内市（幌延町への訪問を含む）で開催した場合、受講者や講師の間で新型コロナウイルス感染のクラスターや北海道への移動に伴う感染拡大などが懸念された。このため、対面での開催と並行して、オンライン開催の準備を進めた。また、対面、またはオンライン開催の判断の期日、及び基準等として以下を設定した。

2021 年 9 月 21 日（火）の時点で首都圏、または開催地である北海道に緊急事態宣言が発出されている場合には、セミナーは北海道（稚内市）では開催せず、同一の日程でオンライン開催とする。また、現地開催とする場合には、受講者、講師、事務局など参加者全員が PCR 検査を受け、陰性であることを確認することとした。



結果として、2021 年 9 月 21 日（火）の段階では、東京都を含む首都圏、及び北海道において緊急事態宣言が発出されている状況であったことから、2021 年度の人材育成セミナーは対面での開催は行わず、オンラインで開催することとした。オンラインで開催する場合には、幌延深地層研究センターの見学を行うことはできず、全体で 2 日間の日程に短縮することとし、そのためにプログラムを修正することとした。

以下が 3 日間の対面でのセミナープログラムを 2 日間に短縮したものである。各実施内容の概要も示している。

●1 日目（10 月 11 日（月））

時間	演目	内容
10:00～	ミーティング会場オープン	
10:30～	前振り (RWMC)	プログラムの狙いと全体紹介
10:35～	《アイスブレーク》 ストーリーボードを使って 自分の仕事を語ってみよう！	処分システムの状態の理解を助ける目的のストーリーボード上に、自分の仕事や関心領域の時間と空間をマップして自己紹介してみましょう。自身の処分事業との関わりを内省できるかも？！
11:35～	《イントロ／情報提供》 包括的技術報告書に関する科学技術分野間の相互理解へのチャレンジ (NUMO) 地層処分技術における分野間理解への意見交換 (ﾌｧｼﾘﾃｰﾀ：NUMO)	社会からの信頼、地域対話の重視が重要と認識して、どう安全な地層処分を実現していこうとするかを伝えたい。原子力学会の分野専門家によるレビューや一般の方との意思疎通について考えます。 地層処分に関する他分野との相互関係について受講者からの成功/失敗体験や思うことなどを意見交換して、分野間連携について意識してみましょう。
12:35～	昼休み（60 分）	
13:35～ 14:20～ 14:55～ 15:35～ 15:55～	《座学 1＋》JAEA を知る **地下研究所の役割と貢献** （JAEA） 1. 知識とその習得方法 ・講義（5 分） 2.深地層の研究施設の役割 2.1 瑞浪超深地層研究所計画 ・講義（40 分） ・グループディスカッション（20 分） (休憩 15 分) 2.2 幌延深地層研究計画 ・講義（40 分） ・グループディスカッション（20 分） 2.3 JAEA 地下研の経験まとめ 瑞浪と幌延の計画のまとめとジェネリックな地下研の役割・講義（20 分） ・グループディスカッション（20 分）	〔受講者主体の学習デザイン〕 ２日目に取り上げる人工バリア性能確認試験等、地下研究所を活用した研究開発により、地層処分技術の重要な成果が生み出されています。JAEA のジェネリックな地下研究所での研究開発が、どのような時代背景で必要となり、どのような研究開発がなぜ実施されてきたかを考えます。 《グループディスカッション》 2.1 と 2.2 の講義の後、グループ別にメンバーの疑問を話し合って解決/整理して、代表質問をまとめ発表してもらいます。 《グループディスカッション》 2.3 の講義の後、瑞浪と幌延での研究開発等から、ジェネリック地下研でカバーすべき研究開発と将来のオンサイト地下研究の相違点／違いはどこにあるかをグループで話し合います。
16:35	1 日目終了	

●2 日目（10 月 12 日（火））

時間	演目	内容
10:30 ～ 11:50 (80 分)	《座学 2+》パート１ **THMC 連成現象と人工バリア性能確認試験** （JAEA） 1. バーチャル視察 （35 分） 2. 現象解説と実習 （20 分） 3. 実試験の概要説明 （25 分）	 ≪バーチャル視察≫ 地下 350 メートルの空間の空気はわかりませんが、地中に身を置いて地下空間の大きさや内部を俯瞰します。現実にはできない体験です。 ニアフィールドで予想される熱－水－応力－化学（THMC）連成現象のモデル化について、その目的/目標、開発手法、検証／妥当性確認に必要なデータ取得に向けた大規模な試験計画立案と実施までを関連させながら、理解を深めます。
11:50～	昼休み（70 分）	
13:00 ～ 14:50 (110 分)	《座学 2+》パート２ **THMC 連成現象と人工バリア性能確認試験** （JAEA） 4. 実測データとその解釈 （40 分） 5. 一次元熱伝導解析（演習） （50 分） 6. THMC 連成解析の今 (20 分)	 人工バリア性能確認試験で得られたデータを読み解きます。欲しいデータを得るために何をコントロールして、何を測定するかを考えつつ、グラフから現象を解釈する実際を学びます。 《個人演習》 各自のパソコンで Excel を用いた一次元熱伝導解析を行います。実験値と解析結果が乖離する理由を考えてみましょう。 演習の後、THMC 連成解析モデルの現状を解析結果の例と比較しつつ学びます。
14:50～	休憩（10 分）	
15:00～	セミナー全体ふりかえり	①各自でのふりかえり アンケートを記入し、セミナー2 日間での気づきをふりかえります。 ②グループでのふりかえり 各自の気づきをグループ内で共有し、新たな気づきを発見するとともに、それをさらに発展させるようなディスカッションを行います。 ・セミナープログラムに期待していたこと ・セミナーで良かったこと、物足りなかったこと ・さらに深掘りしたいこと、他の分野で知りたいこと
15:50	終了	

2 日間のオンライン開催へのプログラム変更におけるポイントを以下に示す。

- NUMO から包括的技術報告書の概要の説明及び専門家間や一般大衆とのコミュニケーションの課題等の全体でのディスカッションを行うセッションをイントロ・情報提供として初日の冒頭に設定
- 座学 1 の中で短時間のグループワークを行い、講義に関する疑問や意見などをグループ内で共有したのち、講師に質問を行うように時間を配分
- 幌延深地層研究センターの見学の代わりに、オンラインで同研究センターの地下施設の様子を体験できるバーチャル視察を実施

3.3.4 人材育成セミナーの開催に向けて

(1) 受講者（モニター）募集

昨年度の人材育成セミナーと同様に、今年度の人材育成セミナーは、単分野に専門性を有す若手（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、地下研究施設の役割や行われている研究開発等を題材とし、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。

受講者（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）に派遣を依頼した。今年度についても、小規模での実施としたため、大学や民間企業からの受講者は募集しないこととした。

結果として、15 名の受講者（モニター）が参加することとなった。受講者の属性（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　人材育成セミナー受講者（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	その他（溶液化学）	5 年未満（2 年）	40 歳未満
JAEA	安全評価技術	5 年未満（2 年）	40 歳未満
JAEA	地質環境調査評価技術	10 年以上（11 年）	40 歳未満
NUMO	地質環境調査評価技術	5－10 年（6 年）	40 歳未満
NUMO	安全評価技術	5－10 年（7 年）	40 歳未満
NUMO	その他（環境分析）	5 年未満（2 年）	40 歳以上
NUMO	その他（知識マネジメント）	5－10 年（5 年）	40 歳未満
NUMO	工学技術	5－10 年（7 年）	40 歳未満
NUMO	地質環境調査評価技術	10 年以上（11 年）	40 歳未満
RWMC	安全評価技術	5 年未満（4 年）	40 歳未満
RWMC	工学技術	5 年未満（6 年）	40 歳未満
RWMC	工学技術	5 年未満（1 年）	40 歳以上
AIST	地質環境調査評価技術	10 年以上（12 年）	40 歳以上
CRIEPI	工学技術	5 年未満（2 年）	40 歳未満
CRIEPI	安全評価技術	5 年未満（3 年）	40 歳未満

結果として、受講者（モニター）については、本セミナーがターゲットと想定している従事年数 5 年程度（±2 年）の専門家が半数以上を占める結果となった。

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た。

(2) オンラインにおいて効果的にセミナーを行うための工夫

今回、全国的な新型コロナウイルス感染拡大という状況を受け、セミナーの開催までひと月を切った段階でオンラインでの開催へと方針を変更せざるを得なかった。オンラインでの開催の場合には、実際に他の受講者の顔を見て話すことができないなど対面開催との違いもあるため、円滑なセミナー実施のためには、事前に工夫・準備を行う必要があると

考えられた。以下に、オンライン開催に向けて行った工夫や準備を整理する。

① オンライン開催のアプリケーション

オンラインでのセミナー開催に際しては、オンライン会議のアプリケーションである Zoom を使用した。このアプリケーションが広く使われており、事務局や受講者を含めてなじみがあること、また、グループワーク・ディスカッションのための「ブレイクアウトルーム」を設置することができること、ファイルやホワイトボードの共有などが可能であることなどがこのソフトを選んだ理由である。

② オンライン参加のためのマニュアルの作成

Zoom でのオンライン会議への参加に不慣れな受講者がいる場合に備え、参加のためのマニュアルを作成し事前に配布した。これには、参加にあたっての受講者への依頼事項（画面に表示される名前の表記方法など）についても含めた。

③ 主配信会場として外部の会議室を利用

セミナーの進行や趣旨説明等を行う事務局の配信会場として、十分な広さかつ十分な速度のインターネット接続が可能な会議室等が必要であった。また、グループワーク・ディスカッションでは、各グループに事務局から 1 名ファシリテータが参加することにしていたため、それぞれが参加するための設備（会議室）も必要であった。さらには、参加に際して、音声のハウリングを回避する、また、他の音声の混入を防ぐ必要があった。当センターの設備・会議室は十分な数を利用はできず、また、音声の混入などの問題を解決することが不可能であったことから、外部の有料会議室を利用することとした。事務局が配信を行う主会場のほか、3 名の事務局員（ファシリテータ）が参加する部屋を 3 部屋外部に確保しセミナーを実施した。

④ スイッチャーを活用

Zoom での会議等において、1 台の PC を用いた場合には、プレゼンテーションファイルなどの共有作業を円滑に行うことが難しいため、複数台の PC と画面のスイッチャーを用いた。このための機材としてスイッチャーを購入した。

(3) 受講者のグループ分け

オンライン開催ではあったが、受講者が他の受講者等と議論を行い、他分野を専門とする受講者とのコミュニケーションの難しさや重要性を理解するきっかけを作るため、2 日間のプログラム中に複数回のグループワーク・ディスカッションを企画した。グループワーク・ディスカッションでは、各グループのメンバー構成も議論の発展、ひいてはグループワーク・ディスカッションの目的の達成に重要な要素であることがこれまでのセミナーから得られた教訓であった。

今年度のセミナーでは、異なるバックグランド（専門性、処分事業の従事年数、年齢、所属機関）を有す受講者が議論できるよう、メンバーのバックグランドが可能な限り多様となるようグループ分けを行った。

15 名の受講者を 5 名ずつの 3 つのグループに分けることとした。以下が設置した 3 つのグループのメンバー構成である。

●グループ 1

所属	専門分野	従事年数	年齢
JAEA	安全評価技術	5 年未満（2 年）	40 歳未満
RWMC	工学技術	5 年未満（1 年）	40 歳以上
AIST	地質環境調査技術	10 年以上（12 年）	40 歳以上
NUMO	地質環境調査技術	5－10 年（6 年）	40 歳未満
NUMO	その他 （知識マネジメント）	5－10 年（5 年）	40 歳未満

●グループ 2

所属	専門分野	従事年数	年齢
JAEA	その他（溶液化学）	5 年未満（2 年）	40 歳未満
NUMO	その他 （環境分析）	5 年未満（2 年）	40 歳以上
NUMO	地質環境調査技術	10 年以上（11 年）	40 歳未満
RWMC	工学技術	5－10 年（6 年）	40 歳未満
CRIEPI	安全評価技術	5 年未満（3 年）	40 歳以下

●グループ 3

所属	専門分野	従事年数	年齢
JAEA	地質環境調査技術	10 年以上（11 年）	40 歳未満
NUMO	安全評価技術	5－10 年（1 年）	40 歳未満
NUMO	工学技術	5－10 年（1 年）	40 歳未満
RWMC	地質環境調査技術	5 年未満（4 年）	40 歳未満
CRIEPI	工学技術	5 年未満（2 年）	40 歳未満

前述のように、グループワーク・ディスカッションにおいては、ファシリテータが 1 名ずつ各グループに参加し円滑なディスカッションの促進等の役割を担った。

(4) 予行の実施等

セミナーの全体の流れや座学等の内容等を事前に確認しておくため、2021 年 10 月 6 日に最終確認をオンラインで実施した。最終確認には、NUMO や JAEA の講師も参加し、問題点や改善点等の洗い出しを行った。

(5) アンケートの作成・設計

人材育成セミナーにおいては、受講者（モニター）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受講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、受講者（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、セミナープログラムの各構成要素（各座学や演習など）に対する設問と、セミナー全般に関する設問及び受講者に関する質問の大きく以下の 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 2-17 参照）。

1. イントロ／話題提供「包括的技術報告書に関する科学技術分野間の相互理解へのチャレンジ」

   情報提供として説明した NUMO の包括的技術報告書の概要の理解度、これまでの異分野コミュニケーションの経験、さらに聞いてみたい内容等の質問を設定

2. 地下研究所の役割と貢献

これまでの地下研究施設関連の研究開発の実施経験、地下研究施設の性質や役割の違いの理解度、自身の仕事との関連などの質問を設定

3. バーチャル方式による幌延深地層研究センター視察

幌延地下施設訪問歴の有無、バーチャル見学の有用性、メリット・デメリット等を問う質問を設定

4. THMC 連成現象と人工バリア性能確認試験

廃棄体定置後のニアフィールドでの現象の理解、人工バリア性能確認試験の意義、実習の実施状況とそこから学んだこと等に関する質問を設定

5. セミナー全般に関して

グループでの作業状況、多分野の専門家との作業からの気づき等の有無、オンライン形式のセミナーに関する問題点等、各実施内容に関する満足度等の質問を設定

6. 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、積極性など受講者（モニター）個人の基本情報に関する質問を設定

アンケートは、電子ファイルを事前に配布し、2021 年 10 月 29 日（金）を提出期限として提出するようセミナー実施中に依頼した。

また、2 日目の「ふりかえり」では、グループ及び全体で受講者の気づきを共有するため、設問 1～4 までの回答をふりかえりの時間内に記入してもらった（詳細は後述）。

3.3.5 人材育成セミナーの開催

(1) 2021 年度人材育成セミナーの開催概要

2021 年度人材育成セミナーは、「地下研から学ぶ！～データの準備・解釈・伝え方～」と題し、以下の日程においてオンラインで実施した。

①開催日時：2021 年 10 月 11 日（月）～12 日（火）

②参加者：受講者（モニター）：15 名、講師（JAEA）：4 名、講師（NUMO）：1 名、
ファシリテータ（NUMO・RWMC）：5 名

受講者内訳：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）：3 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）：3 名

（一財）電力中央研究所（CRIEPI）：2 名

(2) 1 日目（10 月 11 日（月））の開催概要

セミナーの初日は午前から開始し、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った。続いて、アイスブレークとして、各受講者が自己紹介を兼ねて、「ストーリーボード」内に以下を記入（図 3.3-2）したうえで各自に説明をしてもらった。

1）現在実施している研究開発とその処分事業とのかかわり

2）今後、自身がかかわっていきたい分野・研究開発課題

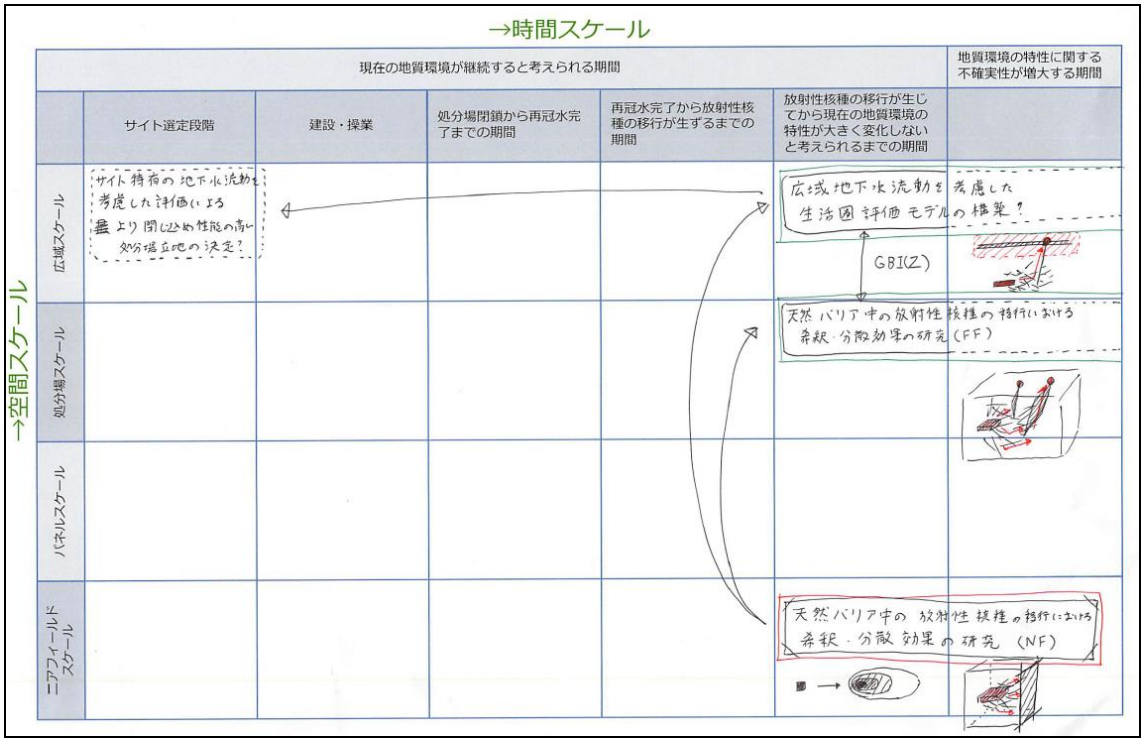


図 3.3-2　ストーリーボードの記入例

次にイントロ／情報提供として、NUMO から包括的技術報告書に関する専門家や一般公衆とのコミュニケーションについて話題提供を行ったうえで、地層処分技術に関する分

野間理解について NUMO のファシリテーションにより受講者全員での意見交換を行った（図 3.3-3）。意見交換時の受講者のこれまでの異分野間でのコミュニケーションに関する経験・意見には以下のようなものがあった。

- 農学系、地質系などの地層処分にかかわりのない専門家とのコミュニケーションの際に「なぜ、地層処分？」という根本的な話になりコミュニケーションがなかなか進まない（本題に入れない）。
- 多分野の専門家との間で、データの不均質があるときにどう受け渡すのか。受け渡しがうまくいかない。
- 専門家が説明したいことと、一般の人などが知りたい情報との間に乖離がある。何が知りたくて何が分からないのか理解できるように伝えることが必要である。
- 一般の人、地層処分分野の人も含め、コミュニケーション時にはお互いを知る必要がある。

図 3.3-3　1 日目のイントロ／情報提供の様子

次に、JAEA から「地下研究施設の役割と貢献」とのタイトルで、座学として、知識とその習得方法、JAEA の保有する 2 か所（1 か所は閉鎖）の地下研究施設における研究計画と両研究施設での経験について説明を実施した。これらの座学の合間に、グループディスカッションとして、JAEA からの説明に関する疑問点、意見などを各グループ内で話したうえで全体で共有し、JAEA の講師から回答・意見を提供した。グループディスカッシ

ョンは、以下の 3 つのテーマに対して行った。

- 瑞浪の研究計画等に対する質問
- 幌延の研究計画等に対する質問
- ジェネリックな地下研の役割等に対する質問

受講者からの質問及びそれらへの回答には以下のものがあった（抜粋）。

表 3.3-3　受講者からの質問と講師からの回答

受講者からの質問	講師からの回答
研究所での情報・データ　地質分野⇒工学・安全評価分野とのやり取りの苦労・気づき、地質分野内での連携での苦労・気づきなどを教えてほしい	役割分担のもとで、同じ方向で目的を共有しておくことが大事。
瑞浪は閉鎖されたが、結晶質岩での人工バリアの研究課題は残っていないのか。	課題は残っているが、結晶質での人工バリアについては海外の知見もある。また、NUMO が実際の処分地での調査施設で明らかにすることができる。
過去の経験、教訓に関する報告書を勉強したい。当初計画と実際の計画の乖離の理由も勉強したい。	-
幌延の深度 500m での研究開発の意義を教えて欲しい。	幌延で処分を行うわけではないが、幌延の深度 500m はより好ましい性質を有している可能性がある。そのため、今まで以上に処分事業に貢献可能である。

(3) 2 日目（10 月 12 日（火））の開催概要

2 日目は、「THMC 連成現象と人工バリア性能確認試験」として、午前中は、まず、幌延深地層研究センターのバーチャル視察、ニアフィールドでの廃棄体定置後の現象理解のための演習を実施した。演習では、受講者が事前の知識のみでニアフィールドでの現象の予測を行った（図 3.3-5 参照）。その後、幌延深地層研究センターで行われている人工バリア性能確認試験の概要の説明を行った。

午後は引き続き、JAEA から人工バリア性能確認試験で得られたデータとその解釈に関する説明を行ったうえで、Excel を用いた一次元熱伝導解析の実習を行い、THMC 連成解析の必要性を学んだ。その後、人工バリア性能確認試験の最新の動向について説明を行った。

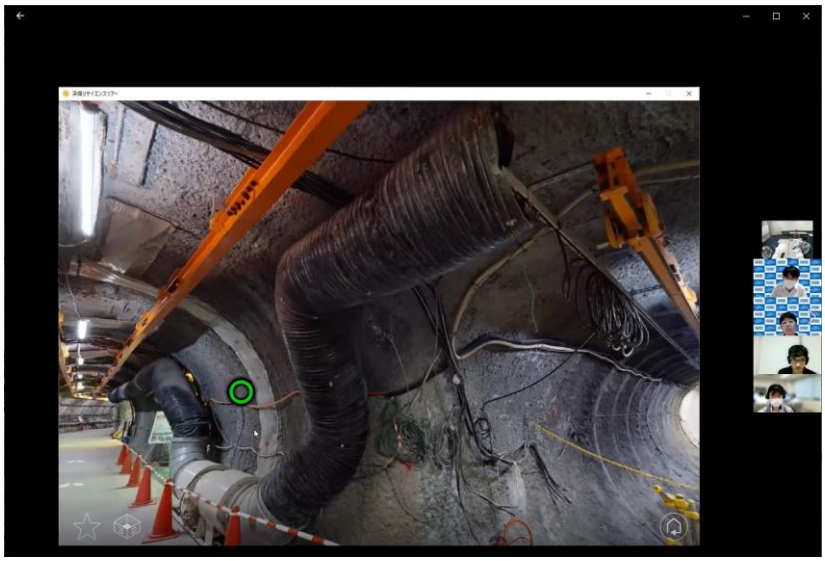


図 3.3-4　幌延深地層研究センターのバーチャル見学の模様

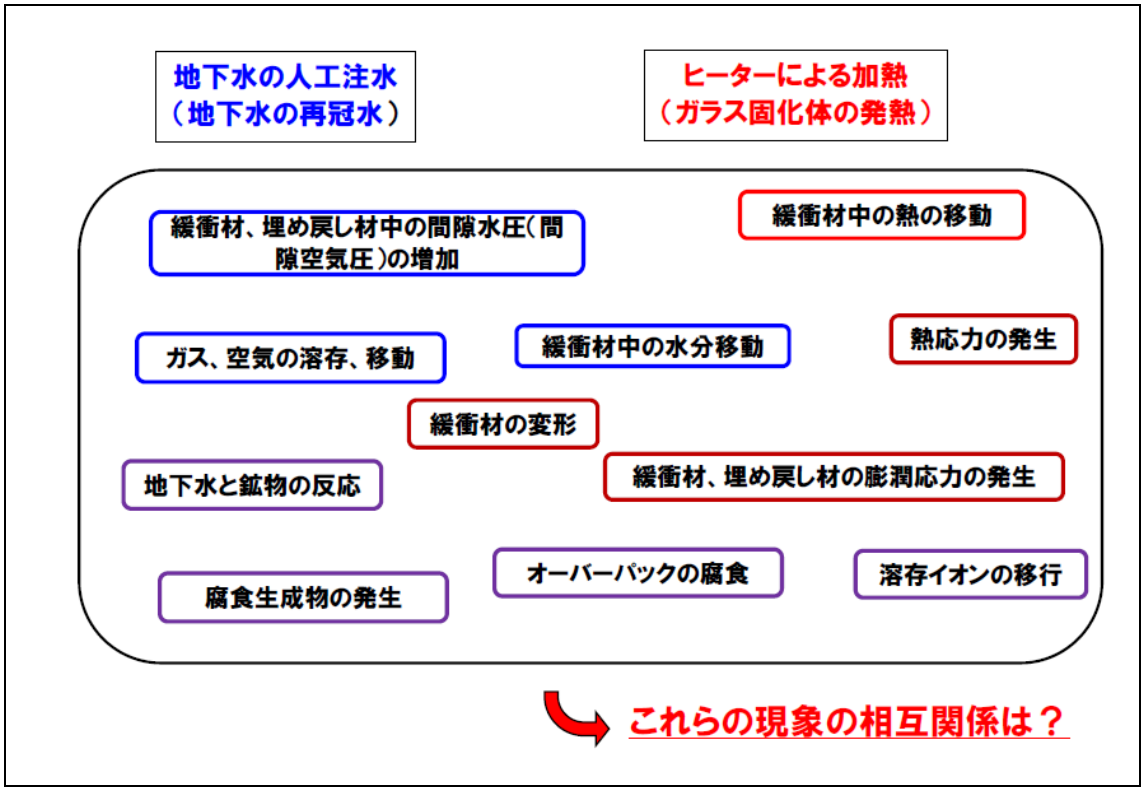


図 3.3-5　ニアフィールドでの現象予測のためのシート
受講者は各現象間の関連についてこのシートに自身の予測・考えを記入

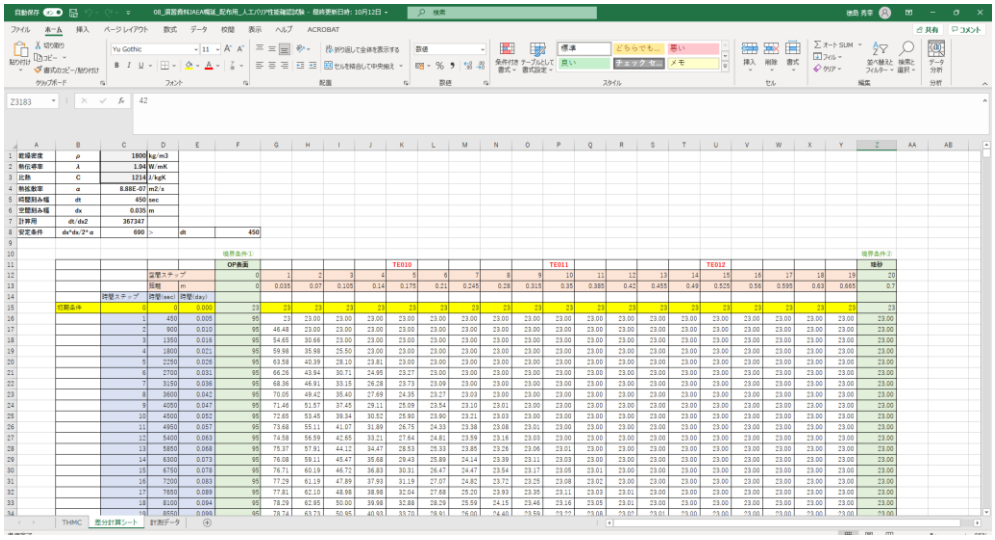


図 3.3-6　一次元熱伝導解析で用いた Excel シート

2 日目の最後に、2 日間のまとめとして、「ふりかえり」を行った。ふりかえりでは、各グループに分かれ、図 3.3-7 に示したスライドを用い、2 日間のセミナーで興味を持ったこと、もっと知りたいと思ったこと、今後議論してみたいことなどを話し合った。グループ内での議論は、以下の流れで行った。

●ステップ 1

セミナーへ期待したこと（得たいと思ったこと）は？

●ステップ 2

興味深かったこと、興味を持てなかったことは？

●ステップ 3

継続すると良いこと、もっと知りたいこと、改善したほうが良いことは？

●ステップ 4

次回是非行ってほしいことは？

その後、全体で各グループ内での議論・意見を共有して終了した。

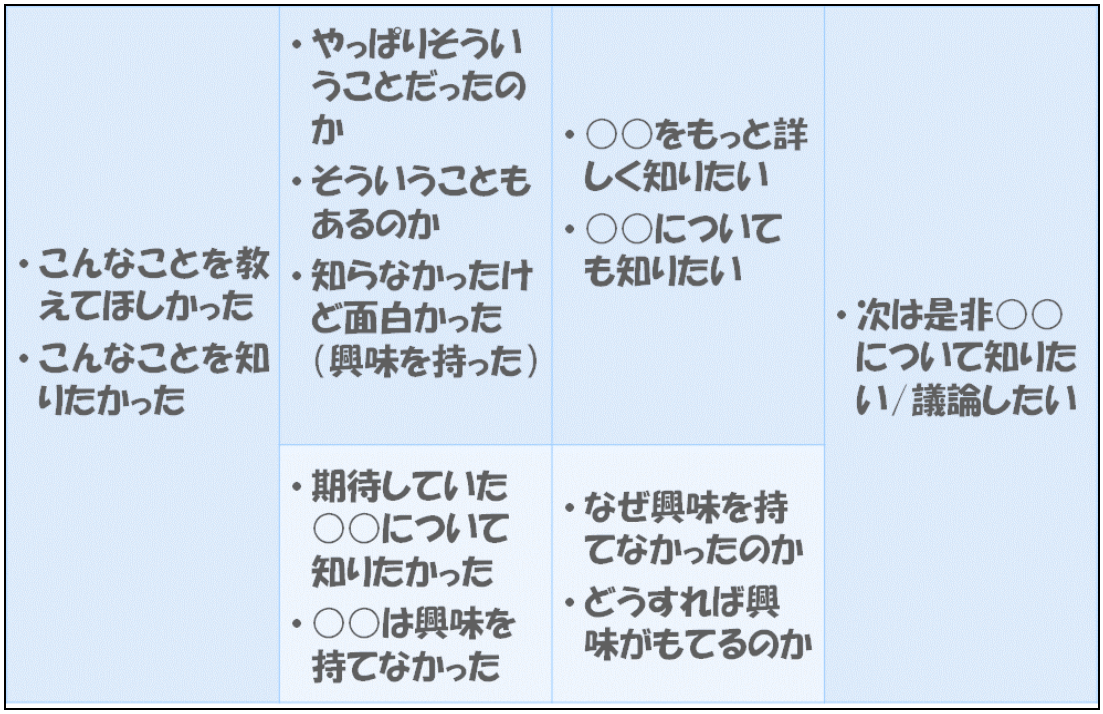


図 3.3-7　「ふりかえり」で用いたスライド

ふりかえりで出された主な意見を大まかな分類ごとに下表に示す。

表 3.3-4　ふりかえりでの大まかな分類ごとの主な意見

●技術者間の対話／分野間連携 　コミュニケーションの取り方や実例を知りたいと考えセミナーに参加した結果、コミュニケーションを行う上で重要な姿勢について示唆を得ることができたが、JAEA 内の分野間連携の例や「伝え方」の部分についてもう少し議論等できるとよかった。
●技術的関心（地下研研究所・THMC を含む） 　受講者の事前の関心としては、THMC や地下研（サイト選定から得られた成果まで）があり、セミナーからの発見としては、バーチャル見学で地下施設を俯瞰的に見ることができ良かった、また、地下研の種類が学習できた。 　今後のテーマとしては、天然バリアに着目した地質・工学の連携、文献調査、回収可能性などに関心がある。
●セミナー形式・実施方法 　ストーリーボードを使った自己紹介は、自分の立ち位置や処分事業とのかかわりが把握でき良かった。グループワークの時間が短かった、また、参加者間での議論があまり深まらなかった。ただし、メンバーに地下研での研究開発の従事経験者がいたグループでは、補足や多面的な議論が可能であった。

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受講者（モニター）の意見をアンケートによって聴取した。今年度のセミナーの受講者（モニター）は 15 名と少数であったため、アンケートの取りまとめでは、統計的な評価・検定は行わず、受講者（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、以下についてアンケート結果とその評価・考察をまとめる。

① 「セミナー全体の満足度・気づき」及びその評価の理由
② 「資料や講師の話の満足度・気づき」及びその評価の理由
③ 「現場視察（バーチャル見学）の満足度・気づき」及びその評価の理由
④ 「計算演習（熱伝導解析）の満足度・気づき」及びその評価の理由
⑤ 「自己紹介の満足度・気づき」及びその評価の理由
⑥ 「理解したことや疑問を参加者と共有の満足度・気づき」及びその評価の理由
⑦ 「セミナーの進行の満足度・気づき」及びその評価の理由
⑧ 「セミナーで扱うテーマの満足度・気づき」及びその評価の理由
⑨ その他

(1) 「セミナー全体の満足度・気づき」及びその評価の理由

セミナー全体に関する満足度については、5 段階評価で過半数が 4 点以上を付けており、1 点を付けた受講者（モニター）もいなかったことから、大きな不満はなかったと考えられる（図 3.3-8）。また、受講者を処分事業への従事年数によるカテゴリごとに満足度の平均をとった場合、従事年数が 3～7 年の層の満足度が一番高い結果となった（図 3.3-9）。このセミナーの想定対象者を従事年数 5 年程度としていたが、従事年数が 3～7 年の満足度が高ったことから、今回のセミナーの内容としては、対象者に対して概ね適切であったと考えられる。ただし、以下のような意見もあったことから、今後のセミナーにおける改善点として今後検討を行う。

- テーマは良いが、そのテーマについて十分掘り下げられていない
- 異分野の専門家との共同作業が期待したほど多くなかった
- 何を伝えたいセミナーなのかよくわからなかった

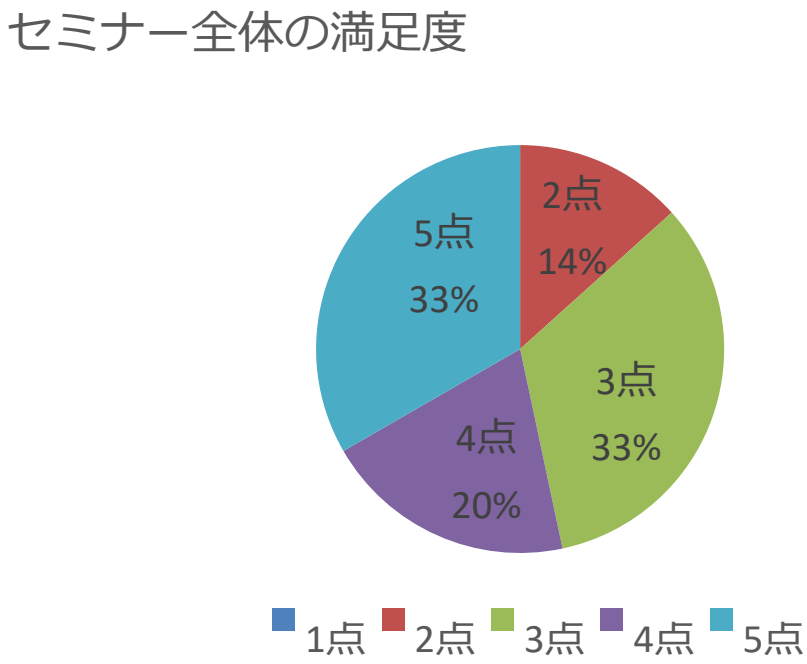


図 3.3-8　セミナー全体の満足度に関する集計結果
平均 3.7 点（n=15）

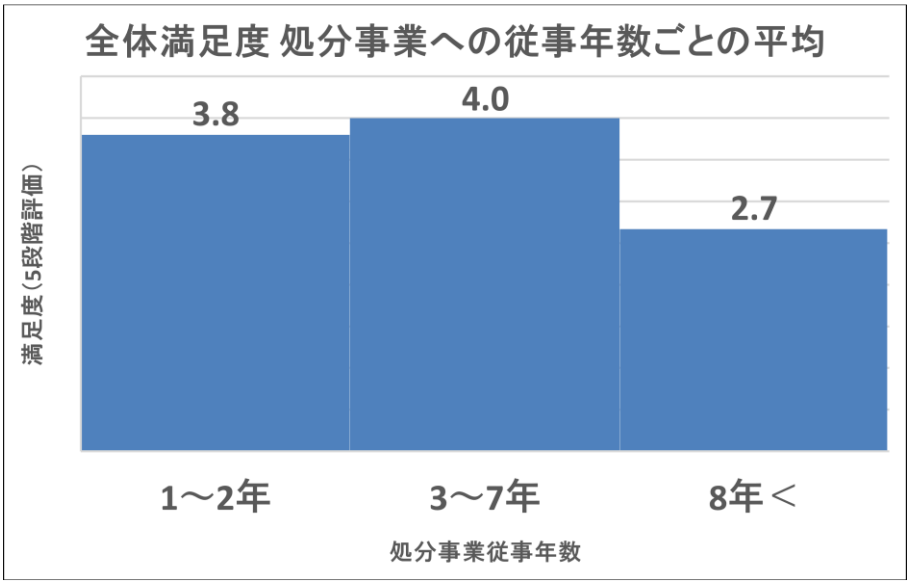


図 3.3-9　セミナー全体の満足度の処分事業への従事年数ごとで分けた場合の平均値

(2) 「資料や講師の話の満足度・気づき」 及びその評価の理由

講義の資料や講師の話に対する満足度では、7 割以上の受講者が 4 点以上と評価しており、全体として資料や講師の話について満足度は高かったと言える（図 3.3-10）。寄せられた意見の中には、研究者の実体験や経験に基づく話を聞くことができたことを評価する意見が複数あり、一般的な講義などでは聞くことのできない内容を評価していた。

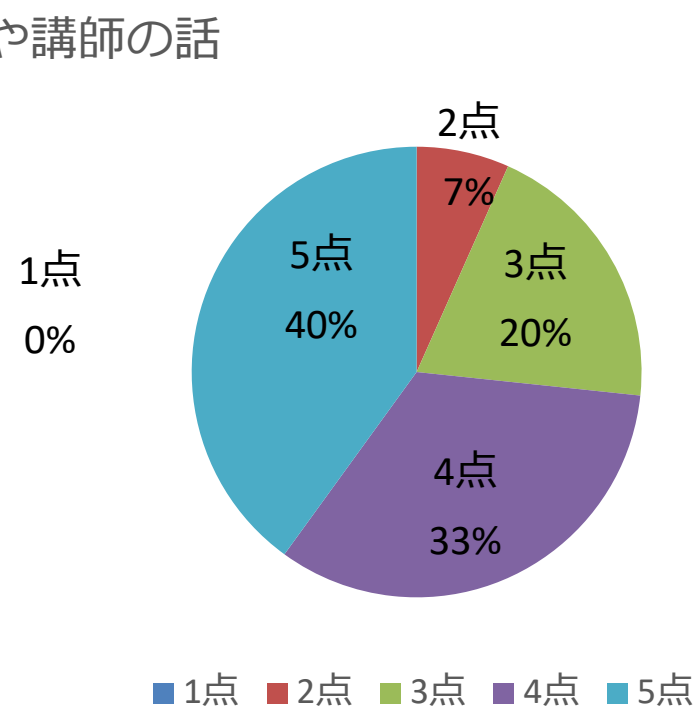


図 3.3-10　資料や講師の話の満足度に関する集計結果
平均 4.1 点（n=15）

(3) 「現場視察（バーチャル見学）の満足度・気づき」 及びその評価の理由

今回、幌延深地層研究センターの実際の地下施設の見学に代わり、バーチャル見学を行ったが、バーチャル見学の満足度は非常に高い結果となった（15 名中 1 名以外は 4 点以上）（図 3.3-11）。受講者の意見には、実際の見学では見ることのできない地下坑道の俯瞰図を見ることができたことが評価されていた。今回の受講者 15 名のうち、10 名は過去に幌延深地層研究センターの地下施設を訪問したことがあったため、バーチャル見学の効果・利点をより感じることができた可能性もある。バーチャル見学では、実際の地下の空気や音、地層などをリアルに感じることは難しいため、実際の見学との併用が効果的と考えられる。

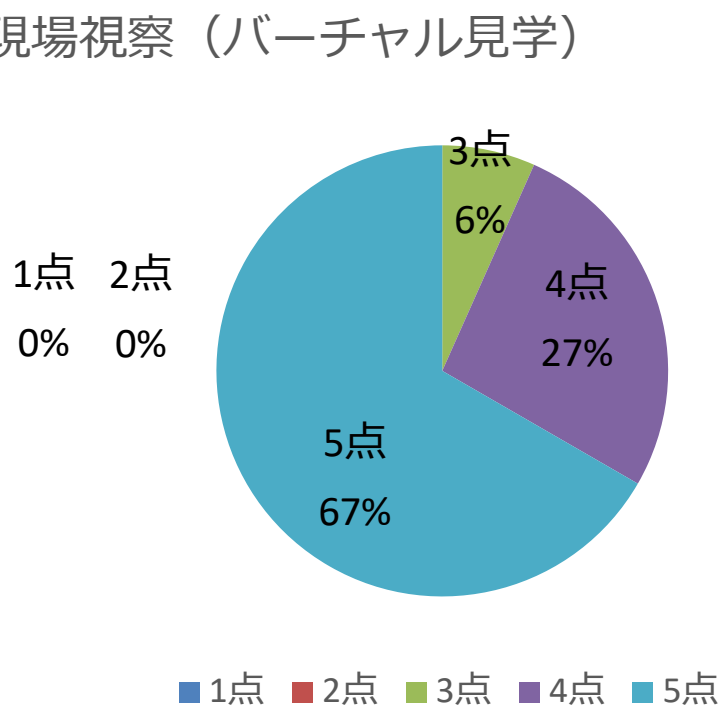


図 3.3-11　現場視察（バーチャル見学）の満足度に関する集計結果
平均約 4.6 点（n=15）

(4)「計算演習（熱伝導解析）の満足度・気づき」 及びその評価の理由

今回のセミナーでは、JAEA の人工バリア性能確認試験で実施している THMC 連成解析の必要性等を理解するため、一次元熱伝導解析を事前に用意した Excel シートを用い全受講者が実施した。この一次元熱伝導解析についても約 8 割が 4 点以上を付けており、全体として満足度は高かったと考えられる（図 3.3-12）。ただし、実習時間に対してデータ桁数が多く、時間切れになったなどの意見もあったため、実習時間とデータ数の関係を適切に設定することが必要である。

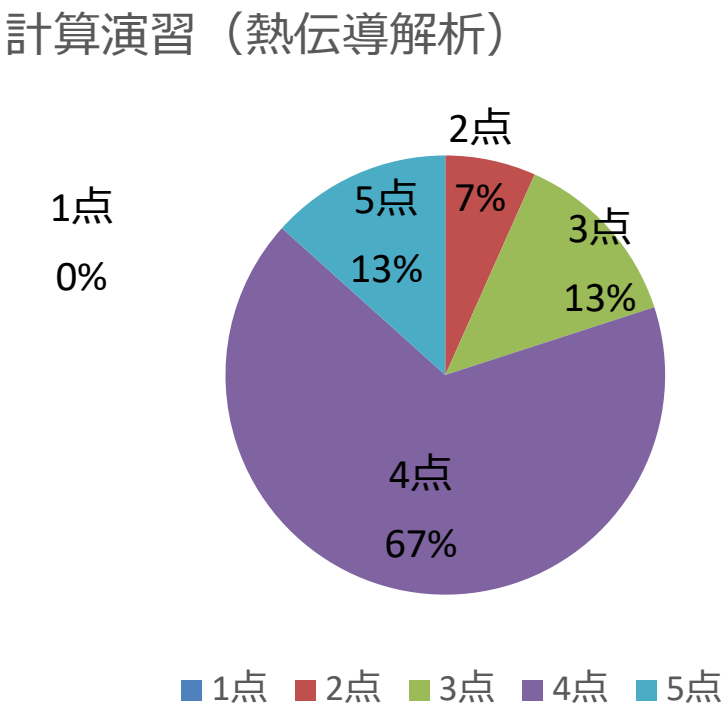


図 3.3-12　計算演習（一次元熱伝導解析）の満足度に関する集計結果
平均約 3.9 点（n=15）

(5)「自己紹介の満足度・気づき」 及びその評価の理由

今回は、ストーリーボードを使った自己紹介を企画したが、この満足度については、点数のばらつきは比較的あるが、半数は 4 点以上を付けており、満足度は概ね高かったと言える（図 3.3-13）。このストーリーボードを活用するアイデアについて、有益であったとする意見が多くあった。その一方で、ストーリーボードが十分に活用できていなかった、また、紹介だけに終わったことが残念であったとする意見もあった。単に所属や名前を口頭で紹介するだけでなく、ストーリーボードなどを活用して自己紹介することは有用であったが、もう少し時間をかけて各自の紹介に対する質疑や議論などを行うことが今後のセミナーでは有意義なものになると考えられる。以下に受講者からの意見をいくつか紹介する。

- ストーリーボードの活用はとてもよかったと思う。これだけでセミナーの半日使ってもよいのではないかと思った。
- ストーリーボードを含めた自己紹介はこの事業特有であり、また、他分野（地質、工学、評価）をつなげるプラットフォームとして有益であると感じた。

- ストーリーボードを用意したが、それを十分に活用できていなかったように思う。
- ストーリーボードを紹介だけだったのが非常に残念。研究紹介及び質疑、議論の時間を設けてほしかった。

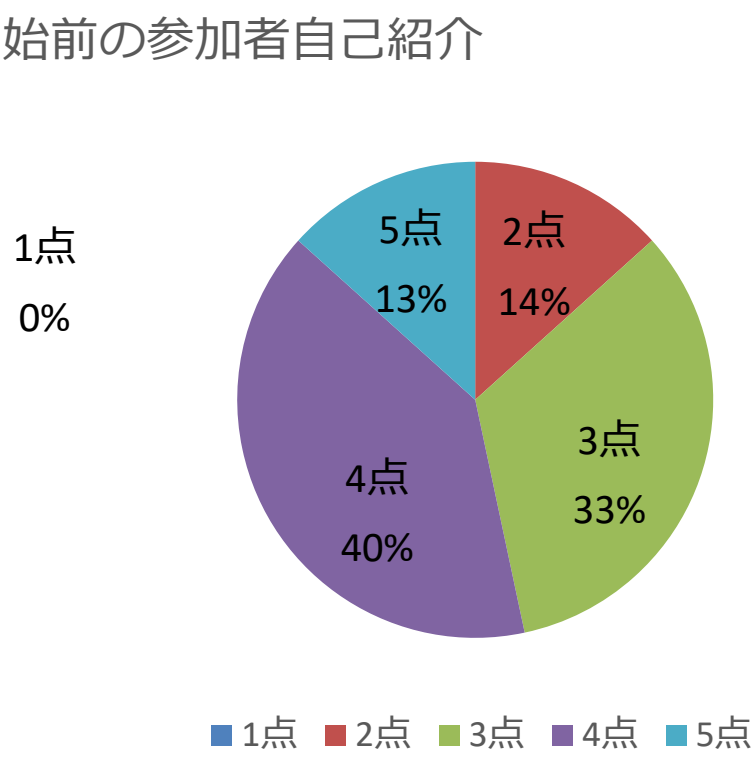


図 3.3-13　自己紹介に対する満足度に関する集計結果
平均 3.5 点（n=15）

(6)「理解したことや疑問を参加者と共有の満足度・気づき」 及びその評価の理由

今回のセミナーでは、1 日目の座学の間や最終日のふりかえりにおいて、異分野の専門家の考えや感じ方などの違いを感じる機会とする、また、他の受講者の考えを聞き自身の考えをまとめる機会とするなどを目的として、受講者間で理解したことや疑問を共有することを実施した。この共有する試みに関しては 6 割の受講者が 4 点以上を付けており、満足度は高かったと言える一方で、1 点や 2 点を付けた受講者も一定の割合存在していた（図 3.3-14）。

受講者間で議論する機会を設けることや受講者の能動的に参加するための試みとしては良かったと評価する意見があった一方で、受講者間の議論には至らなかった、議論が浅く相互理解はできなかったといった意見もあった。今回のセミナーはオンラインでの開催と

なり、グループディスカッションがファシリテータと各受講者のやり取りが主となり、受講者間の議論が難しかったことが、議論が深まらなかった原因の一つと考えられる。対面での開催がオンラインよりもグループディスカッションには向いていると考えられる。しかし、オンラインにおいても議論を深める方法のヒントが今回の 3 つのグループのうちの一つから得られた。このグループには、比較的従事年数が長く、幌延及び瑞浪の両地下研究施設での研究への従事経験を有した受講者が参加しており、この受講者が他のメンバーの質問等に答えることで受講者間の意見交換・議論がある程度できていた。このことは、グループ内に講師などの専門性の高い人物が入ることで議論が深まる可能性があることを示唆している。昨年度のセミナーでは、各グループに講師が参加していたが、これと同じように、今後のセミナーでは、講師がグループに入ることで議論を深めることが必要であると考えられる。

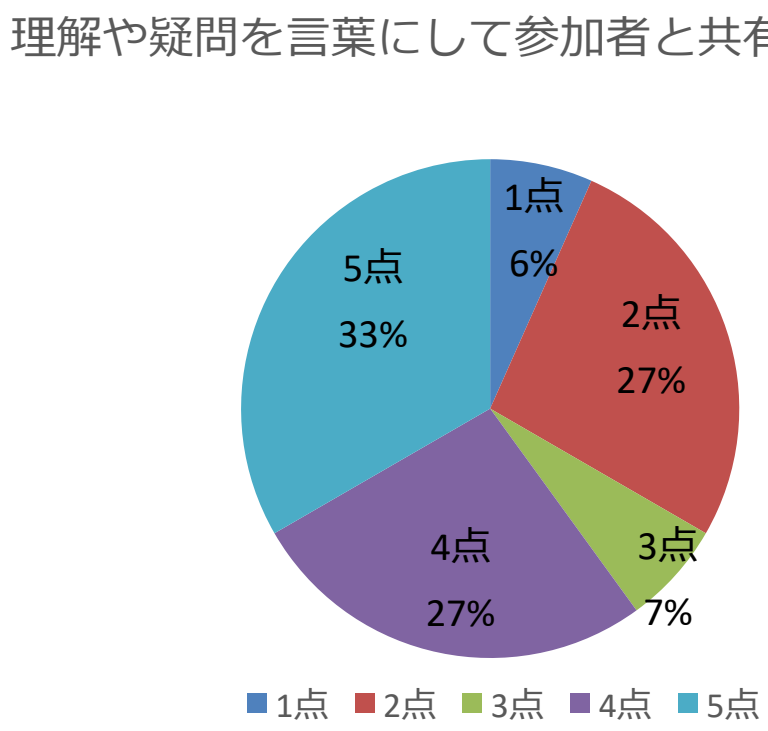


図 3.3-14　理解や疑問を参加者と共有する機会に対する満足度に関する集計結果
平均 3.5 点（n=15）

(7) 「セミナーの進行の満足度・気づき」 及びその評価の理由

セミナーの進行に対する満足度では、1 点及び 2 点を付けた受講者はおらず、9 割以上の受講者が 4 点以上を付けていた（図 3.3-15）。急遽オンラインでの開催となったが、事前に十分な準備を行い、時間通りの進行ができたことがこのような評価につながったと考えられる。グループディスカッションに事務局（ファシリテータ）が参加することについては、賛否両論があり、グループディスカッションの内容や時間により必要性を検討することが重要である可能性がある。

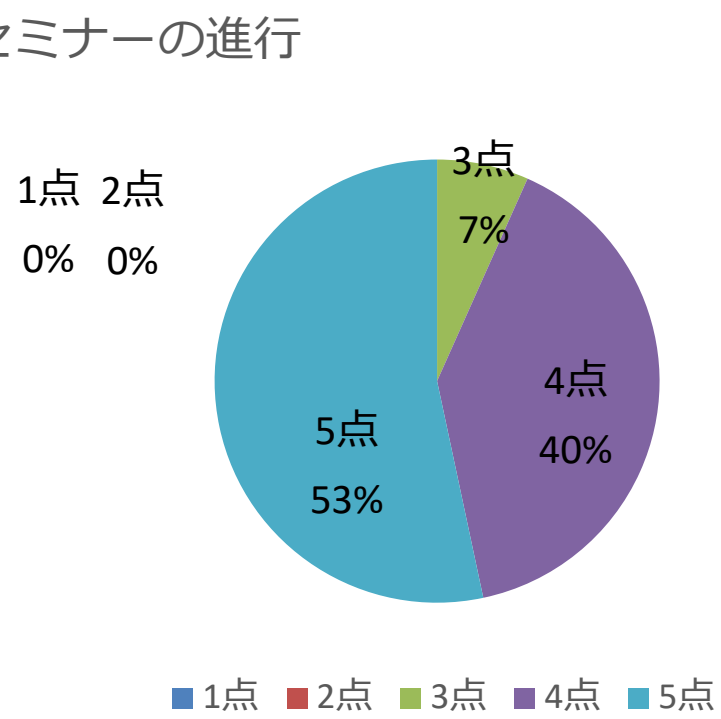


図 3.3-15　セミナーの進行の満足度に関する集計結果
平均 4.5（n=15）

(8) 「セミナーで扱うテーマの満足度・気づき」 及びその評価の理由

セミナーのテーマに対する満足度についても、6 割以上が 4 点以上を付けており、満足度は高かったと言える（図 3.3-16）。受講者からの意見の中に、本セミナーのタイトルにある「伝え方」について具体的な例を知りたかったといったものもあった。オンラインでの開催となり、受講者間の議論が十分にできなかったこともあり、「伝え方」の部分に関しては改善の余地があると考えられる。

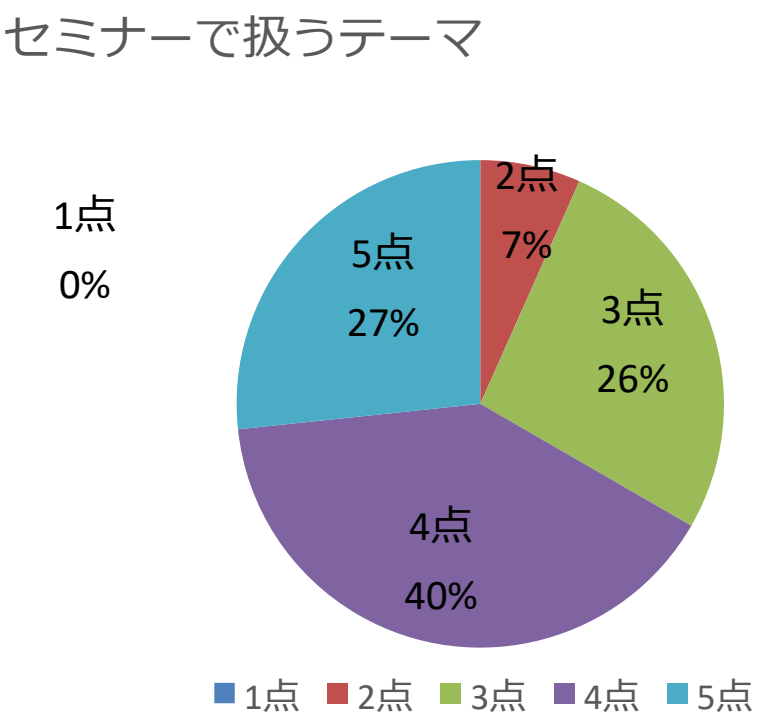


図 3.3-16　セミナーのテーマに関する満足度の集計結果
平均 3.9 点（n=15）

(9) その他のアンケート結果について

以降では、アンケートの設問のうち、今回のセミナーの目的の達成度や実施方法（オンライン開催）に関連する以下の設問を取り上げ、アンケートの結果を報告する。

●グループでの作業について、普段接しない異なる専門家とのグループでの作業を経験したことで、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。

●今後、通常の生活に戻った場合はオンライン会議形式のセミナーではなく対面式のセミナーに参加したいですか。

a. グループ作業で普段接しない異なる（分野の）専門家との作業を経験しての自身の専門性やマインドに関わる気付きの有無。

今回のセミナーの目的の一つでもあった異分野の専門家との議論や交流を通じて、自身の専門性やマインドに関わる気付き、例えば、異分野の専門家とのコミュニケーションの難しさ、重要性等への気付きを得るができたか尋ねる目的でこの質問を設定した。

回答の選択肢は以下のとおり。

5：あった

4：少しあった

3：どちらでもない

2：あまりなかった

1：なかった

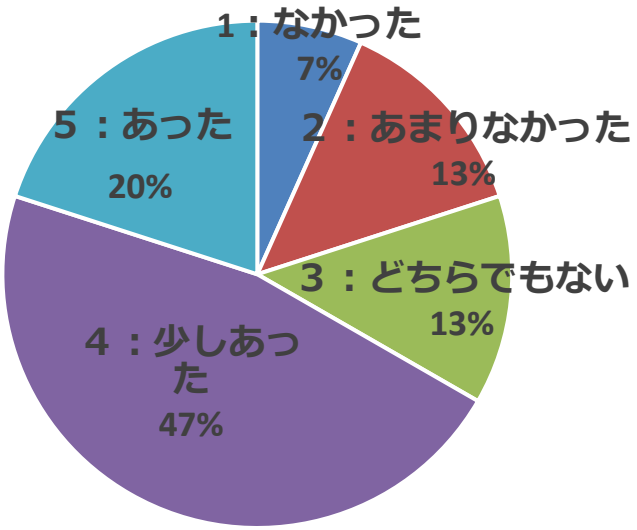


図 3.3-17　自身の専門性やマインドへの気付きの有無のアンケート結果

受講者の 6 割以上がなんらかの気付きがあったと回答しており、ある程度セミナーの目的は達成できたと考えられる（図 3.3-17）。「あった」と回答した受講者の意見では、「専門外の方でも分かるように説明することの大切さを改めて認識した」といったものや「研究機関と実施主体の方々で立場が違うこともあり、考え方が異なるのだと分かった。自分の研究が今後、どのように活かされていくのか、ということを考えるきっかけにはなった。」といったものがあった。一方でこの質問に対する受講者の回答では、1 点（なかった）及び 2 点（あまりなかった）も見受けられた（合計 20%程度）。1 点を付けた受講者の意見は、「グループでの作業が、講義の感想を言い合うことだけだったので、とくに異分野の専門家同士で意見を交わすような場はなかった」というものであった。2 点と付けた受講者の意見も概ね同様で、グループでの作業が必ずしも意図したものにならなかった可能性が示唆された。

今回のセミナーはオンラインでの開催となり、Zoom のブレイクアウトルームを用いて

グループディスカッションを行った。しかし、対面での実施と比べオンラインの場合には、他の受講者の顔は画面上に小さく表示されるのみで、顔を見て発言のタイミングをはかることや隣の受講者に意見を言う等が難しいと考えられる。そのため、実際、各グループに配置されたファシリテータと各受講者が話をし、他の受講者はその様子を見聞きするという状態になりがちであった。

この点は前述のとおり、セミナーを対面で開催することで、受講者同士のより活発な議論が可能となると考えられるが、オンラインで開催する場合には、テーマ設定や活発な議論を促す仕掛けの準備などを行う必要がある。

b. 今後、通常の生活に戻った場合、オンラインではなく対面式のセミナーに参加したいか

今回オンラインでのセミナー開催となったことから、今後の開催方法の検討に資するため、また、オンライン開催が対面開催に代わることが可能なのか評価するため、今回オンラインで受講した受講者に今後どちらの方式での参加を希望するかを聞いた。回答の選択肢は以下であった。

5：対面式のセミナーに参加したい

4：なるべく対面式で参加したいがオンライン形式での参加も残してほしい

3：どちらでもない

2：どちらかというとオンライン形式で参加したい

1：オンライン形式で参加したい

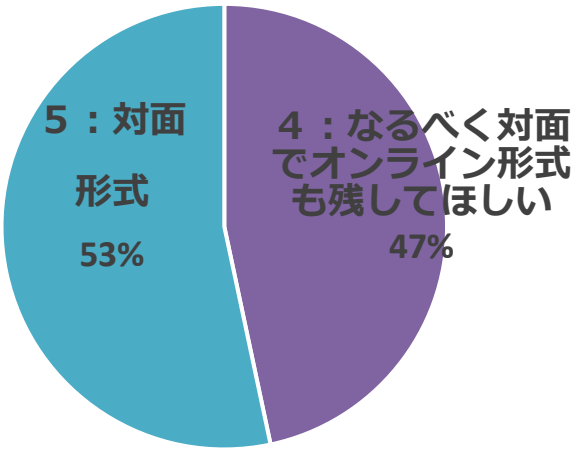


図 3.3-18　セミナーの開催方式（対面 or オンライン）に関するアンケート結果

アンケート結果では、対面方式への参加を希望する意見が圧倒的に多く、オンライン形式への積極的な参加を希望する意見は皆無であった（図 3.3-18）。受講者の意見を数件抜粋したものを以下に示す。

- ✓ Web 会議は意見交換や場の一体感などに難があると感じるため（５：「対面形式」を選択した受講者の意見）。
- ✓ このセミナーには業界内での横のつながりをつくることを期待しており、オンラインでは他の参加者を知る機会が非常に少なく、横のつながりをつくることが難しいため（５：「対面形式」を選択した受講者の意見）
- ✓ セミナーの効果としては，対面形式が最も優れていると思うが、業務状況や社会情勢に応じて、フレキシブルに選択できると良いと感じる．（４：「対面メインでオンラインも残す」を選択した受講者の意見）
- ✓ 現地での体験、議論も非常に重要ではありますが、オンライン形式での参加はより気軽に参加できるので、座学中心であればオンラインで良いと思いました。（４：「対面メインでオンラインも残す」を選択した受講者の意見）

3.3.7 今年度のセミナーのふりかえり及びアンケート結果等からの考察

ここまで示したアンケート結果から、今年度のセミナーからのセミナーの改善等に資する点について考察をまとめる。そのうえで、これまでのセミナーの実施からの教訓等を踏まえ、人材育成セミナーの基本構成要素等を考察する。

(1) オンライン開催について

今年度のセミナーは、コロナ禍での緊急事態宣言発出という状況で、受講者や講師を含め関係者の間で新型コロナウイルス感染症の拡大を起こさないための策として、オンラインでのセミナー開催という選択を行った。受講者に対するアンケート結果や事務局の気付き等から、オンライン開催における問題点及び利点をまとめるとともに、今後の活用について考察する。

オンライン開催では、受講者同士の直接の会話ができず、様々な制限があったと考えられる。主な問題（制限）点を以下に示す。

- グループでのディスカッションは、対面開催の場合よりも、そのグループのメンバー全員が参加することが困難になる
- 受講者が意見を出したいという要望、反応、感情を多様な方法で表現することができない
- 対面形式と比べ集中力を維持することが難しい
- 休憩時間、食事の時間や各日のプログラム終了後の非公式の時間における受講者間の交流ができない

一方でオンライン開催の利点は、時間的・空間的に容易に参加できることが最も大きな利点である。

以上のオンライン開催における制限及び利点を考慮し、本セミナーの目的である専門家間の議論や意見交換を行うことで専門性等に関する気付きを得ることを考慮すると、特に本事業における人材育成セミナーでは対面開催がより適していると言える。ただし、都合がつかず参加できない講師がオンラインで参加するなど、対面開催を主としつつも一部にオンラインでの参加を組み合わせるなど、状況に応じた参加方式を採用することが効率的な開催には必要と考えられる。

オンライン開催を選択せざるを得ない場合には、上記の制限事項を考慮し、以下などを実施することが必要である。

①グループディスカッションでは、ファシリテータだけでなく、講師やそのテーマに高い専門性を有す人物をグループに加える。

これにより、グループ内での講師を介しての多面的なディスカッションが促進される可能性があるとともに、ディスカッションの合間や休憩時間などでも講師などに受講者が質問する機会などもできる可能性がある。

②グループディスカッションなどで受講者が意見を述べる場合等の意思表示ツールを準備する。

今年度オンライン開催のためのツールとして用いた Zoom には、挙手機能などもあるが、これらの機能の活用と、これらの機能が十分ではない場合に備え、画面に映すことで意思表示ができるようなある程度の大きさの紙やボードを用意するなど、複数のツールで意思表示ができるようにすることで、受講者の意思表示のハードルを下げる

ことができると考えられる。

③受講者の集中力の維持のため、１日のプログラムは比較的短時間にする。
短時間のプログラムで開催日数を伸ばすなどすることでセミナーの効果を上げることができる可能性がある（今年度のセミナーは、この点はある程度達成できていたと考えられる）。

さらに、今回、オンライン開催に備え、主配信会場と事務局からの参加者のための別会場を利用するとともに、配信のための機材として映像スイッチャーを使用した。これらは不必要なノイズの混入防止や効率的な画面の切り替えなどに効果を発揮し、受講者の集中力や関心の維持に寄与したと考えられる。オンライン開催の場合には、このような配信のためのツールや適切な環境を準備することも重要である。

(2) 自己紹介（アイスブレーク）について

自己紹介は、セミナーの冒頭に行い、受講者がセミナーの場になじむこと、また、自身を他の受講者に知ってもらうこと、及び他の受講者を知ることを目的として行っている。昨年度のセミナーからの反省点として、チェックイン（自己紹介）の実施方法を見直し、各受講者の話す内容がより印象に残るようにすることがあった。このことを踏まえ、今年度のセミナーでは、NUMO の包括的技術報告書で用いられている「ストーリーボード」を用いて、受講者自身の専門分野と今後関わってみたい分野を紹介するという工夫を行った。

この「ストーリーボード」を用いた自己紹介は、アンケートでの受講者からの意見でも、他分野（地質、工学、評価）をつなげるプラットフォームとして有益であったというものがあり、ツールとしては効果的なものであったと考えられる。今回のセミナーでは、このストーリーボードを使った自己紹介に十分時間をさけなかったこと、また、受講者間のディスカッションが十分にできなかったことが反省点として挙げられる。今後のセミナーでストーリーボードを使い十分な時間をかけて自己紹介を行うことは有意義なことである。自己紹介（アイスブレーク）をうまく行うことで、受講者がその後のグループディスカッションにもスムーズに入ることができるようになり、グループディスカッションでの議論も活発になることが期待できる。

(3) 実習及び見学について

今年度のセミナーでは、実習として一次元熱伝導解析、見学については、オンライン開催となったため、幌延深地層研究センターの地下施設の見学の代わりに同センターのバーチャル見学を実施した。実習や見学を組み入れることは、アクティブラーニング方式の重要な要素の一つである。実習については、単に受動的に講義を受けるのではなく、受講者自身が手を動かして作業を行うことで、より理解が深まる、集中力を継続することができるなどの効果が期待できる。見学についても講義で聞くことを実際に見る、体験することで知識の定着が高まると考えられ、実習と同様の効果が期待できる。

昨年度及び今年度のセミナーのアンケートでも、実習や見学の有用性は示されており、今後のプログラムの中に組み込むことでセミナーの効果が上がることが期待できる。実習については、対象とする受講者のレベルに合わせた内容、作業時間を設定することが重要である。見学については、座学の内容に即した施設や場所を対象とすることが必須である。

(4) グループワーク・ディスカッションについて

昨年度のセミナーは、地下水（地質環境系）をテーマとして開催し、グループワークでは、受講者の専門分野に応じ 3 つのグループを設置した。一つのグループは専門分野が地質環境系の受講者のみで構成、一つのグループは地質環境分野を含む異なる専門分野の受講者で構成、もう一つのグループは地質環境系以外の専門分野を持つ受講者で構成した。これらの 3 つのグループでのグループワーク時の活動の様子の違いなどを含めてセミナーの効果の違いを考察した。その他の考慮事項もあり断定的なことを言うことは難しいが、複数の専門分野で構成されるグループのほうが議論が活発に行われる可能性があることが分かった。

この点を踏まえ、今年度のセミナーでは、受講者の専門性、処分事業への従事経験、年齢、所属機関が可能な限り多様となるように 3 つのグループのメンバー構成を決定した。今年度はオンライン開催となり、メンバー構成の影響以外の要素が発生したことで必ずしもメンバー構成による効果・影響をはかることはできなかったが、本事業におけるセミナーの目的である異分野の専門家との議論、コミュニケーションの重要性や必要性を知るということを考慮すると、多様なバックグランドを有すメンバー構成が良いと考えられる。

また、前述のように、各グループには、ファシリテータだけでなく、講師も参加し議論に加わることで、多面的かつ示唆に富む議論が可能となると考えられる。受講者が講師に

質問や意見をしやすくなるのも利点と考えられる。

このほか、これまでのセミナーのアンケートにおいて、基本的な知識が足りないため議論に参加できなかったといった意見もあったため、グループワーク・ディスカッションの効果を上げるためには、メンバー間のレベル（処分事業への従事年数など）はある程度そろっていたほうが良いと考えられる。

(5) セミナー全体の構成（基本的構成要素）について

昨年度、今年度と 2 度、単に座学での受動的な学習ではなく、アクティブラーニングを取り入れ、座学に実習や演習、グループワーク・ディスカッションを組み入れたセミナーを実施した。アンケートの結果から判断すると、受講者はこのアクティブラーニング形式を取り入れたセミナーを通じて、地層処分事業の推進において異分野の専門家とのコミュニケーションの重要性や難しさなどを理解・意識することができており、地層処分のジェネラリスト育成に関して効果的なセミナーであったと考えられる。また、結果的であるが、2020 年度には対面での開催、2021 年度にはオンライン開催となり、開催方法の差についても考察が可能となった。これまでの 2 年間のセミナーの実施経験から、特に本事業における人材育成に効果的と考えられる人材育成セミナーの基本要素及び各要素の内容を示す。

①自己紹介・アイスブレーク（チェックイン）

自己紹介・アイスブレークは、受講者が場になじみ、その後のセミナーでの活動に円滑に入っていくことで、セミナーの効果を高める効果がある。効果的な自己紹介・アイスブレークとしては、単に、受講者が名前、所属、専門分野などを口頭で話すだけでなく、今回使ったような「ストーリーボード」などに専門分野などを記入し、それをもとに受講者間で質疑などを行うことが有効である。そのためには、ある程度の時間を取り、また、小グループを作りグループでの質疑をすることも話が盛り上がり、アイスブレークとして効果的である。また、グループの特徴づけなどを行い、受講者全体で、各グループの特徴を共有することも考えられる。

②グループワーク・ディスカッション

本事業で実施している人材育成セミナーでは、異分野の専門家とのコミュニケーションや協力の重要性等に気付くことを目的の一つとしているため、異なる専門（分野）を

有すメンバーで構成されるグループでの共同作業やディスカッションは、必須かつ最も重要な構成要素の一つである。

グループワーク・ディスカッションでは、各グループで共通のテーマについて考えを図示するなどすることで、メンバー間の意見交換や議論、協働作業が生まれ、異分野間のコミュニケーションの難しさとその克服方法を理解する機会になると考えられる。

グループ分けに関しては、メンバーの多様性（専門分野、所属機関、年齢等）を持たせることのほか、ファシリテータのほか、セミナーのテーマに精通した専門家（講師など）を入れることが重要である。また、セミナーのテーマに対する知識・理解については、ある程度同じレベルであることが望ましい。極端に知識の無いメンバーがいた場合には、意見交換や議論に参加できない可能性があるため、事前学習資料を提供し事前学習を促す、グループワーク・ディスカッション前に座学（＋演習・実習）を十分に行うなどが必要である。

③座学＋演習・実習

本事業における人材育成セミナーでは、これまでの経験から、座学は受動的な講義だけではなく、関連する内容の演習や実習を組み入れ、受講者が実際に手を動かして能動的に参加できるようにすることが重要である。関連する内容の演習や実習を行うことで、座学のテーマに対する受講者の理解度向上につながるとともに、学習意欲の継続・向上にも役立つと考えられる。

また、座学は、単にテーマに関する知識を提供するだけではなく、グループワーク・ディスカッションに積極的に参加できるようテーマについて基礎知識を提供する、座学に演習や実習を組み入れることで、自分で手を動かして解析等行うことで深く理解するとともに、問題・課題を理解するなどの役割がある。また、グループワーク・ディスカッションのテーマを提供する役割とすることも考えられる。

演習では、マクロや計算式を事前に設定した Excel を使った簡単な解析などが、あまり時間もとる必要もなく組み入れることができるため有効である。実習については、テーマに関連する簡単な実験など会場で可能な範囲で行うことが考えられる。

④サイトの見学

今年度のセミナーは、オンラインでの開催となったため、サイト見学は実施できなかったが、昨年度は、駿河湾岸でのボーリング掘削現場の見学を行った。今年度も対面開催であった場合には、JAEA の幌延深地層研究センターを見学予定であった。セミナーのテーマに関連したサイトの見学を行うことは、テーマの理解促進につながるとともに、適度な息抜きにもなり、セミナーへの集中力の維持、ひいては、セミナーでの学習効果の向上につながることも期待できる。これらのことから対面でセミナーを開催する場合には、サイト見学を組み入れることは重要と考えられる。

3.4 今後の計画について

令和 4 年度は本事業の最終年度に当たるため、作成している 2 種の教材については、完成させる計画である。ただし、教材については、地層処分事業の進展に合わせた情報の更新、学習意欲の向上・継続のためのデザインや構成のさらなる見直し、より分かりやすい文章への修正など、継続した更新がより効果的で使いやすく有用な教材とするために今後も重要であると考えられる。このため、令和 4 年度末においては、その時点での完成品である教材 2 種と、その後の更新や見直しの方向性も示す予定である。

また、人材育成セミナーに関しては、来年度も今年度の方針を踏襲し、アクティブラーニングを取り入れた、少人数でのセミナーをテーマを変えたうえで開催する方針である。

以下に、教材の作成及びセミナーの開催に関する来年度の計画を示す。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 2022 年度の計画

① 地層処分のリテラシー育成教材の作成

地層処分のリテラシー育成教材については、今年度、地層処分スキルアップ研究会や外部有識者によるレビューを行い、その結果の反映を行うとともに、全体の記載内容や構成の見直しを継続して実施した。さらに、教材の利用者が自身の理解度を把握できるようにするための確認テストの作成を行った。加えて、利用者の学習意欲の向上・継続や理工系の内容のわかりやすく伝える観点からのデザインや構成などの見直しの検討を実施した。来年度は、まず、このデザインや構成での見直しの検討結果を精査し、本事業において作成する教材のデザインや構成を決めフォームを決定する。そのうえで、現在作成している教材のコンテンツに決定したフォームを適用する。また、内容面では、今年度翻訳を実施した文献も参考として、コンテンツ（文章や図表）の修正を行い第 3 案を作成する。第 3 案に対しては、実際の利用者を想定し、NUMO の技術部などの職員に、第 3 案を使ってもらい、第 3 案の使いやすさ、分かりやすさなどの面からの意見を得たうえで対応を検討する。このような実際の利用者による評価は、形成的評価[5)]と呼ばれており、教育分野において行われているものである。利用者による評価結果を反映し、4 年間の事業における最終版とする。このほかに、作成した教材で利用した図表に関しては、著作権者等から転載・利用の許可を取得する。なお、前述のように、常に効果的な教材とするためには、継

続した改訂が必要であり、改訂におけるポイント・方向性を来年度末までにまとめる計画である。

②地層処分のポータル教材の作成

今年度は、地層処分のポータル教材については、教材に含むべき内容を「学習指導要領」としてまとめるとともに、基本的な教材の概念・構造の検討を行い決定した。また、教材のすべての内容（コンテンツ）の作成を行った。

最終年度である 2022 年度には、地層処分のポータル教材の完成に向け、以下の手順で作成を進めていく計画である。

1. 今年度作成したポータル教材の概念・構造に従い、一部をサンプルとして実際に作成し、どのように各情報や文献（メタ情報）に飛ぶことができるのかなどを体感できるようにする。
2. 作成したサンプルを資源エネルギー庁殿、関係機関等に確認し概念・構造を最終決定する。
3. 確認した概念・構造に基づきポータル教材全体を作成する。
4. 必要なリンクなどを設定するとともに、サーバにアップして公開はせずに、動作や使いやすさの確認を行う。
5. 記述内容、動作等の確認、修正を行い完成版とする。

3.4.2 人材育成セミナーの 2022 年度の実施計画について

(1) 開催方針及び基本概念について

2019 年度は、（国研）産業技術総合研究所の協力を受け、「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。今年度は、（国研）日本原子力研究開発機構の協力により、地下研究施設とそこでの研究開発をテーマとして、昨年度同様、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企図してセミナーを開催した。このセミナーの方向性・方針は来年度も維持する。地層処分に関する知識等の提供は、作成している教材を使い学習することで得ることができる一方、教材の学習で

は得ることのできない経験をセミナーで提供するという構成で本事業における人材育成プログラムの作成を行っている。

このため、来年度の人材育成セミナーについても、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、一昨年度及び今年度と同様、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アクティブラーニング形式のセミナーを開催する。以降に現時点で想定している来年度の計画を示す。

(2) 来年度の構想

今年度の人材育成セミナーでは、新型コロナウイルス感染拡大を受け、当初予定した幌延深地層研究センターの見学を含めたセミナーの開催に代わり、セミナーの内容等を微修正したうえでオンラインでセミナーを開催した。

これまで述べたように、アクティブラーニング方式でセミナーを開催することが本事業の目的に合致したものであり、来年度のセミナーでもこの方式を継承する方針である。また、学習効果を考えた場合、オンラインではなく対面での開催が有効であり、また、関連施設などの見学を取り入れることが重要である。これらを加味した場合、来年度のセミナーとしては、今年度対面で開催ができなかった、JAEA の幌延深地層研究センターの見学を含み、北海道での対面での開催が一つの候補となる。その場合には、同センターで行われている研究開発プロジェクトの一つ（今年度の場合には人工バリア性能確認試験）をテーマとして、同センターを中心に据えた内容とする。ただし、実現のためには、JAEA からの協力が必要であり、来年度の早い時期から協議を開始する計画である。

仮に、幌延深地層研究センターを中心とした開催が困難な場合には、他の資源エネルギー庁委託事業でのサイトの活用などを検討する。セミナーのテーマとしては、今年度のセミナーでのアンケートなどから、以下などが考えられる。今後、関係機関との協議を行い、テーマ及び開催場所の選定、セミナープログラムの具体化などを進めていく。

- 回収可能性（技術的及び倫理的側面）
- 文献調査の現状
- 地域社会との対話を深堀
- 人工バリアの地下での挙動（腐食等）

また、2022 年度のセミナー実施のスケジュールについても今年度同様、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昨年度・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。

- 受講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・時間配分に余裕を持たせる
- チェックイン（自己紹介）の実施方法について、今年度用いたストーリーボードによるものを再度対面で行い、受講者同士の対話・議論が可能となるようにより長い時間を割り当てる
- 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
- グループディスカッションには、講師などそのテーマに精通した人物を各グループに配置し、議論が活発となるよう促す

参考資料

1) 地層処分研究開発調整会議、「地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～平成 34 年度)」（平成 30 年 3 月)、https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/data/pdf/20180329001_01.pdf

2) 鈴木克明、「魅力ある教材」設計・開発の枠組みについて一 ARCS 動機づけモデルを中心に一」、教育メディア研究　Vol. 1， No . 1， 50− 61

3) 上野 達弘、「教育現場と研究者のための著作権ガイド」有斐閣、2021 年 3 月

4) Michael Apted and Joonhong Ahn (eds), Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste 2nd Edition, Elsevior, 2021

5) 鈴木克明、「教材設計マニュアル 独学を支援するために」北大路書房、2002 年 4 月

別添資料 1

（各実施研究の 2021 年度報告）

研究報告 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　〔研究者：山口大学　林　久資〕

研究報告 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　〔研究者：早稲田大学　伊藤　大知〕

研究報告 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　〔研究者：鳥取大学　河野　勝宣〕

研究報告 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　〔研究者：北海道大学　菊池　亮佑〕

研究報告 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　〔研究者：筑波大学　向井　広樹〕

研究報告 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　〔研究者：京都大学　久保　大樹〕

研究報告 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　〔研究者：日本原子力研究開発機構　福田　将眞〕

研究報告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

山口大学　大学院創成科学研究科

林　久資

【 目 次 】

1. 背景・目的 1
2. 全体研究計画（2 ヵ年における全体計画） 2
3. 2021 年度研究実施内容 4
3.1 2021 年度の計画、実施方法 4
3.2 2021 年度の成果内容 10
3.3 残された課題と今後の計画 24
4. まとめ 25

参考文献

2021 年度外部発表

1. 背景・目的

地層処分施設の地下施設は，立坑，斜坑，連絡坑道，処分パネルが連接する処分パネル等から構成される. 地層処分施設の建設・操業は, 閉鎖までの間を含めれば数 10 年程度（50 年以上）にわたることが想定されており，掘削施工段階から維持管理段階までの長期安定性を把握することが必要である.

一方で，総合資源エネルギー調査会 地層処分技術 WG のとりまとめ資料 [1)] によると，地層処分施設が沿岸部に建設される際の妥当性についても提言されており，地層処分施設が沿岸部に建設される可能性も考慮した地層処分関連研究を遂行すべきと考える．もし，地下施設周辺地山や地下水に塩分を有している場合は，支保部材や設備等に何らかの悪影響を及ぼす可能性がある.

そこで本研究では，地層処分施設において処分坑道を対象とし，①地下空洞の長期安定性および②空洞内湧水が塩水の場合において，施設の長期安定性を解明するための研究を遂行する.

土木構造物において長期間メンテナンスが不要な構造物は基本的には存在せず，本研究において放射性物質が持ち込まれる地下施設を対象とした維持管理に関する研究を遂行することで，無人・非接触な坑道点検技術の技術開発が加速的に進んでいく可能性がある. この研究成果は，地層処分施設だけでなくトンネル構造物の維持管理技術の発展にも寄与するため，社会的な波及効果は高い．海水や地山に含まれる塩分がトンネルに及ぼす影響に関しても，海底トンネルや塩分が含まれる地山に掘削されるトンネル，飛来塩分が顕著なトンネルなどの建設・維持管理技術にも転用できる可能性があり，本研究で得られた結果は社会的に貢献度の高い研究となる可能性が高いと考える.

2. 全体研究計画（2 ヵ年における全体計画）

(1) トンネル点検結果の分析

地層処分施設の地下施設は，立坑，連絡坑道，処分坑道等から構成されており，これらの施設は操業を終えると埋め戻し，閉鎖することとされている．操業から閉鎖まで 50 年以上かかる可能性もあり，埋め戻しまで時間を要する箇所については長期間地下施設の健全性を保持する必要がある．本研究では，地下施設のうち坑道を対象に，長期健全性を予測し，維持管理の要否やその程度を検討するために，同様の工法で施工がされ，維持管理段階のトンネルが多数存在する道路トンネルの健全性を調査する．調査は地質状況や，土被り，地形等がトンネルの健全性に及ぼす影響を分析し，地層処分施設の地下施設の建設や維持管理に有益な情報を得ることを目指す．

分析には，道路トンネルの維持管理データおよび周辺地山の地質状況，地形，トンネルの掘削工法，経年年数などを用い，統計分析や機械学習により健全性の低下に高い影響を与えている条件を解明する．

(2) 坑道掘削解析

地層処分施設が建設できる地域は，必要な面積が確保できて，安定した場所であれば，内陸部や沿岸部、山地などさまざまな場所が考えられるとしており，沿岸部や島部では海域下に建設する可能性もある．例えば沿岸部や海域下に地下施設が建設される場合には施設周辺の地下水は塩水であることが考えられ，塩分が含まれる地下水によって支保部材等の腐食が促進される可能性がある．

そのような中で，地下施設のうち坑道は鋼製支保工，吹付けコンクリート，ロックボルトの支保部材などによって構築され，地山の掘削による応力再配分過程で支保部材には地山からの荷重が伝達される．支保部材のうち鋼製支保工やロックボルトは鋼製であり，塩分が含まれる地下水によって，維持管理段階において腐食する可能性がある．本研究では支保部材の腐食による坑道の安定性を数値解析によって検討する．具体的には，三次元有限差分法数値解析を用い，坑道を掘削することで地山の応力再配分により支保部材に生じる支保内圧などの影響をシミュレーションする．その後，坑道の維持管理段階において鋼製支保工などの鋼製部材が腐食したときに支保工や地山に及ぶ影響を解明する．

(3) 塩害に関する実験

海水直下およびその近傍に処分パネルが建設される場合，漏水等により坑道内は高湿度・塩分環境下に置かれる可能性がある．そのような環境下では，坑道の完成から閉鎖までの間に坑道内附帯設備および覆工（支保工）などに塩害が生じることが予想される．

海水直下および近傍に処分パネルが建設される場合において，坑道内附帯設備および覆工などに塩害が生じるか否かを腐食実験（恒温恒湿腐食試験）によって研究する．

まずここでは，廃棄体等運搬にレール方式が用いられると仮定し，レールの腐食実験を行い，成果を取りまとめる．

上述した(1)～(3)を遂行し，地層処分施設の長期健全性予測を行う．また，地層処分施設の地下施設が沿岸部に建設され，建設時・維持管理時に生じる空洞内湧水が塩水となった場合，地下施設の安定性・安全性に及ぼす影響を解明する．

3. 2021 年度研究実施内容

3.1 2021 年度の計画、実施方法

(1) トンネル点検結果の分析

地層処分施設の地下施設は，立坑，連絡坑道，処分坑道等から構成されており，これらの施設は操業を終えると埋め戻し，閉鎖することとされている．操業から閉鎖まで 50 年以上かかる可能性もあり，埋め戻しまで時間を要する箇所については長期間坑道等の健全性を保持する必要がある．そのため，地下施設の長期健全性を予測し，維持管理の要否やその程度を検討することは重要である．

しかしながら，地層処分の研究開発が行われている幌延深地層研究センターの地下施設は初期段階に建設されたものであっても，10 数年経年した程度である．また，諸外国でもわが国同様に地層処分施設が建設されていないケースが多く，建設が進んでいるフィンランドでも建設開始から数年しか経過していない．よって地下施設の長期健全性をわが国の地層処分研究開発施設や諸外国の地層処分施設で把握することはまだ難しい．

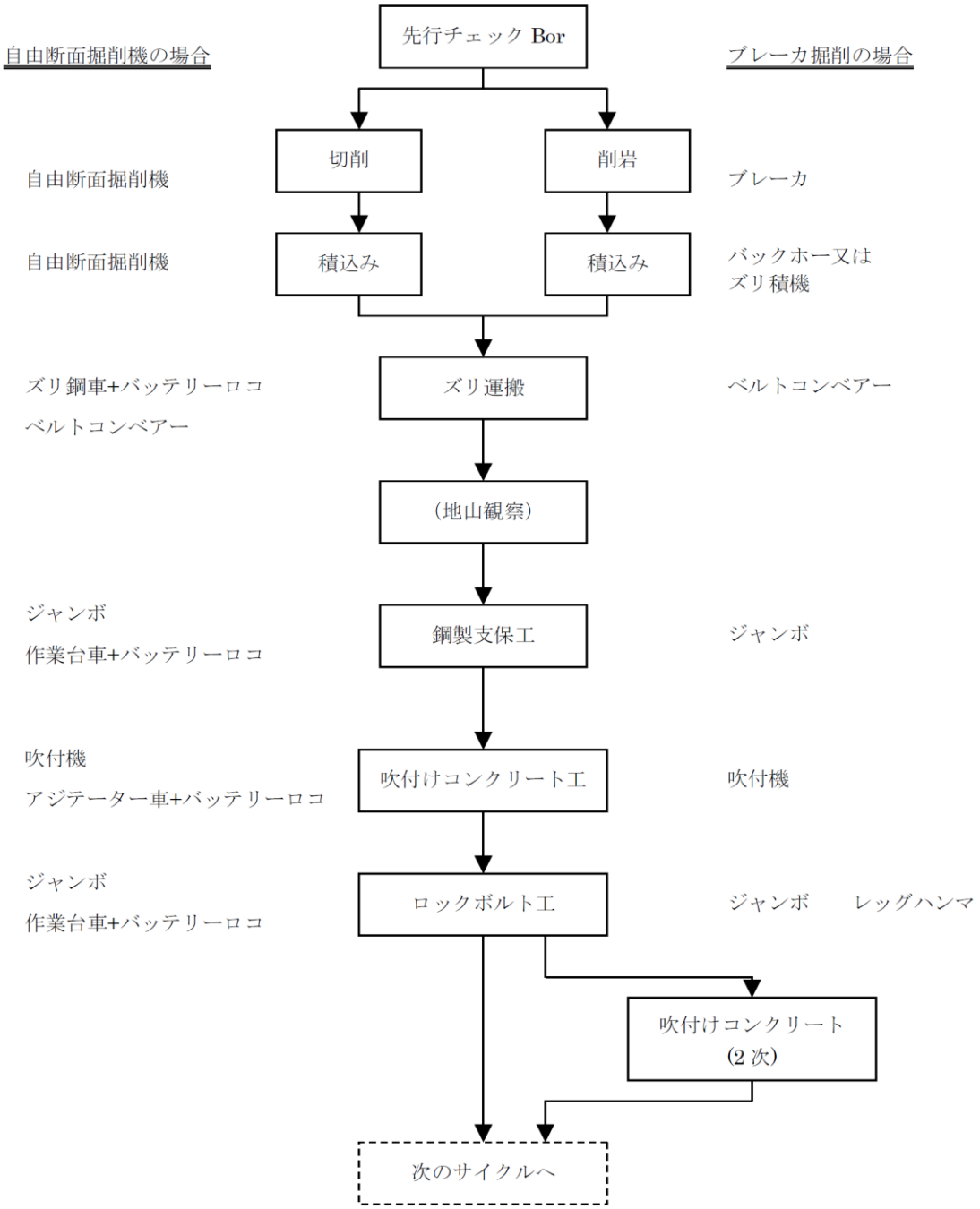
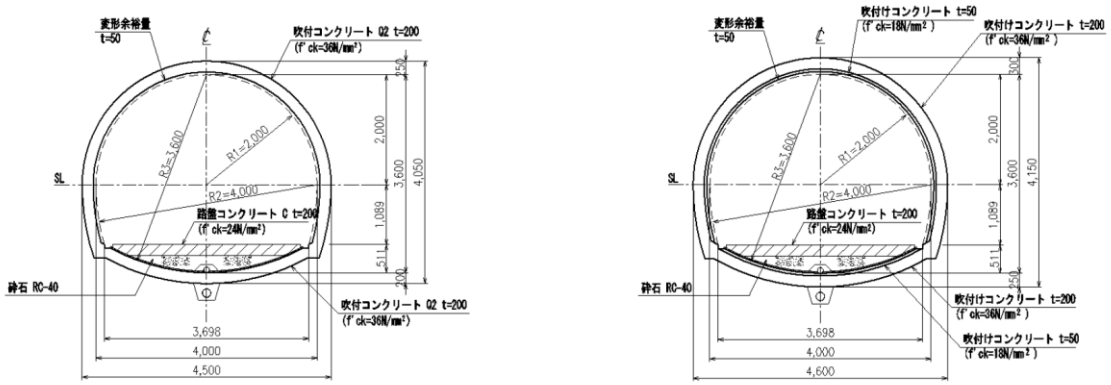


図 1　水平坑道掘削支保工の工事フロー（松永他（2005）より引用）[2)]

地層処分に関する研究施設である幌延深地層研究センターの地下施設の施工方法は，立坑はショートステップ工法，連絡坑道や処分坑道は吹付けコンクリートやロックボルトなどで構築する山岳トンネル工法（NATM）であり，地層処分施設の地下施設も同様の施工方法がとられる可能性がある．

幌延深地層研究センターの実施設計における水平坑道の工事フローを**図 1** に，水平坑道の代表的断面を**図 2** に示す．これらの図に示されているとおり，坑道の掘削，ズリ出し以降は，鋼製支保工の立込み，吹付けコンクリートの吹付け，ロックボルトの打設を行うことで坑道を構築する NATM が採用されている．



140m 坑道　　400m 坑道の場合

図 2　水平坑道の代表的断面（松永他（2005）より引用）[2)]

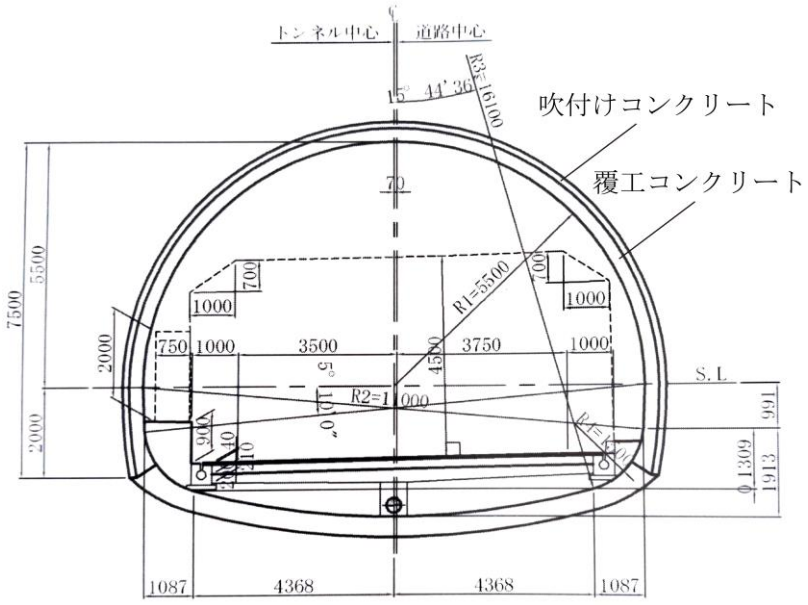


図 3　道路トンネル断面の一例（土木学会トンネル工学委員会（2016）より引用）[3)]

一方で，わが国の地下構造物のうち，数多く建設されている道路トンネルの断面の一例として二車線道路トンネルの断面を**図 3** に示す. **図 3** は NATM でのトンネルの断面であり，わが国における道路トンネルは，1980 年代以前は矢板工法，1980 年代以降は NATM が主流な工法で施工されたものが多い．

次に**表 1** を用い，道路トンネル（矢板工法，NATM）と幌延深地層研究センターの水平坑道の構築部材を比較する．道路トンネルのうち 1980 年代以前まで主流の工法であった矢板工法は，鋼製支保工および矢板，覆工コンクリートにより構築されている．また，現在主流である NATM は，覆工コンクリートで内巻を行う一方で，鋼製支保工，吹付けコンクリート，ロックボルトで支保を行う．この支保は，坑道の支保部材と同様である．

表 1　道路トンネルと幌延深地層研究センター水平坑道の構築部材比較

地下施設種別		鋼製支保工	吹付けコンクリート	ロックボルト	覆工コンクリート
道路トンネル	矢板	○			○
	NATM	○	○	○	○
坑道 （幌延深地層研究計画 地下施設実施設計）		○	○	○	（連接部の一部）

これらより，道路トンネルは矢板工法で建築されたものはおよそ 40 年以上，NATM で建築されたものはおよび 40 年未満経年しており，わが国の地層処分研究施設や諸外国の地層処分施設と比べ長期間供用されているものが多数存在することがわかる．また，幌延深地層研究センター水平坑道は，道路トンネルと建設方法で類似点を有しており坑道の長期健全性を予測するために道路トンネルの健全性を調査し，健全性の低下におよぼす影響を調査することは有益であると考える．

そこで，ここでは地下施設のうち坑道の長期健全性を予測し，維持管理の要否やその程度を検討するために，わが国で数多く建設されている道路トンネルを対象に健全性の分析を行う．具体的には，トンネル周辺地山の地質状況や，土被り，地形等がトンネルの健全性に及ぼす影響を分析し，地層処分施設の地下施設の建設や維持管理に有益な情報を得ることを目指す．

(2) 坑道掘削解析

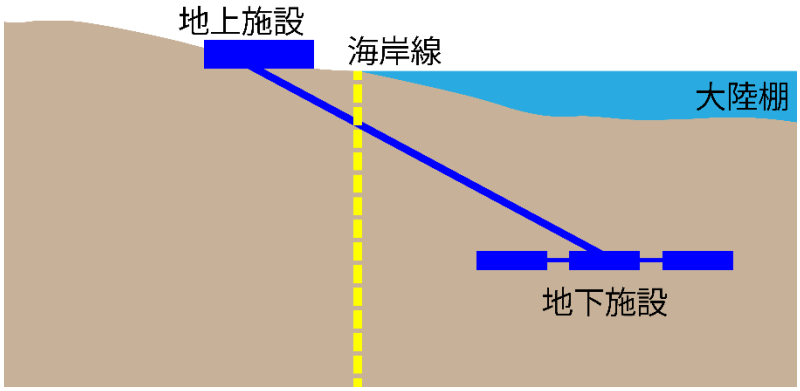


図 4　沿岸部に地層処分施設が建設された場合のイメージ図

地層処分研究開発施設である幌延深地層研究センターでは，坑道は鋼製支保工，吹付けコンクリート，ロックボルトの支保部材によって構築さる NATM が採用されているが，地層処分施設の坑道についても同様となる可能性がある．また，NUMO[4] は地層処分施設が建設できる地域は，必要な面積が確保できて，安定した場所であれば，内陸部や沿岸部、山地などさまざまな場所が考えられるとしており，沿岸部や島部では**図 4** のイメージ図のように海域下に建設することも可能であるとしている．例えば沿岸部や海域下に地下施設が建設される場合には施設周辺の地下水は塩水であることが考えられ，塩分が含まれる地下水によって支保部材等の腐食が促進される可能性がある．

ちなみに NATM では，トンネルの変位を抑制するために鋼製支保工，吹付けコンクリート，ロックボルト等によって支保を行うことで支保内圧（トンネル壁面に一様に作用する内圧と仮定）が作用する．この支保内圧は，トンネルを掘削する前にそこに存在する地山の初期地圧や，支保工規模，支保工設置タイミング等によって変化し，高初期地圧地山で発生変位を抑制するためには大きく発生する傾向となる．

支保内圧はトンネル構築後も支保工に作用し続けるが，例えば坑道構築後の支保工が腐食することで耐力が低下した場合，トンネル内空変位の発生や，トンネル周辺地山のゆるみ（地層処分研究では掘削影響領域 EDZ：excavation damaged zone と示されることが多い）の増大，長期健全性の低下などが懸念される．そこでここでは，地層処分施設の地下施設のうち，坑道が施工された際の支保工に発生する支保内圧や，支保工が腐食によって劣化した場合に及ぶ影響を数値解析によってシミュレーションする．

(3) 塩害に関する実験

海水直下およびその近傍に処分パネルが建設される場合，漏水等により坑道内は高湿度・塩分環境下に置かれる可能性がある．そのような環境下では，坑道の完成から閉鎖までの間に坑道内附帯設備および覆工（支保工）などに塩害が生じることが予想される．現在，廃棄体等の運搬方法の一つとしてレール方式が挙げられているが，レールは材質が金属で構成されている鋼製の部材のため，塩害が顕著に発生する恐れがある．塩害によるレールの健全性低下は大きな事故につながるリスクがある．そこで，高湿度・塩分環境下におけるレールの腐食量を明らかにすることを目的とし，坑道の高湿度・塩分環境下を模擬した腐食試験（恒温恒湿腐食試験）をレールに対して実施する．2021 年度は，腐食試験（恒温恒湿腐食試験）のための試験方法の決定や予備実験を主に行った．

・恒温恒湿腐食試験の手順

レールに対し実施する恒温恒湿腐食試験の手順を以下に示す．

a. エメリー紙によりレールを研磨する．
b. レールに対して脱脂処理を行う．
c. レールのさび厚と重量を計測する．さび厚は膜厚計 LN-990 により計測する．
d. レールの断面部等に防食のための樹脂シート（e シートクイック）を貼り付ける．
e. レールをイオン交換水で洗い，水分をふき取る．
f. レールに対して再度脱脂処理を行う．
g. レール直上から霧吹きでレールに人工海水（金属腐食試験用アクアマリン）またはイオン交換水を噴霧する（人工海水の噴霧高さおよび噴霧頻度は，以降に示す予備実験によりレールへの付着塩分量を定量した後に決定する．）．
h. 恒温湿度器に霧吹き後のレールを静置する（レールへの噴霧は恒温湿度器外で定期的に実施する．）．
j. 定期的に，レールのさび厚を膜厚計により計測する．加えて，定期的に，塩酸によるさび落とし後のレールの重量を計測し，減耗量を算出する．

・霧吹きの人工海水噴霧によるレールへの付着塩分量を定量するための予備実験

レールに対し実施する予備実験の手順を以下に示す.

a. 霧吹きで人工海水（金属腐食試験用アクアマリン）を 500mL のビーカーに噴霧し，霧吹き 1 回あたりの噴霧量を確認する.

b. レール直上から霧吹きでレールに人工海水を噴霧する. この際, 噴霧高さは 10, 20，30cm とし，実験回数はそれぞれの高さで 3 回ずつとする.

c. ガーゼふき取り法によりそれぞれの噴霧高さにおける付着塩分を採取する.

d. イオン交換水に採取した付着塩分を溶かし，イオンクロマトグラフ法により付着塩分量を求める.

3.2 2021 年度の成果内容

(1) トンネル点検結果の分析

・分析データについて

わが国の道路トンネルでは，平成 24 年に発生した笹子トンネル天井版落下事故以降，構造物の維持管理の重要性を再認識され，現在では 5 年に 1 度の定期点検が法律で義務づけられた．この定期点検は平成 26 年度から平成 30 年度でわが国のすべての道路トンネルの点検が一巡した.

わが国の道路トンネルのストック状況を**図 5** に示す．建設後 50 年を経過したトンネルの割合は全体の 21%であり，経年したトンネルが数多く維持管理されていることが読み取れる．国土交通省道路局が取りまとめた「道路メンテナンス年報（令和元年)」では，わが国のすべての道路トンネルの点検結果が示されており，トンネルの健全性はトンネル 1 本に対し 4 段階の判定区分で評価がされており，**表 2** のように評価されている.

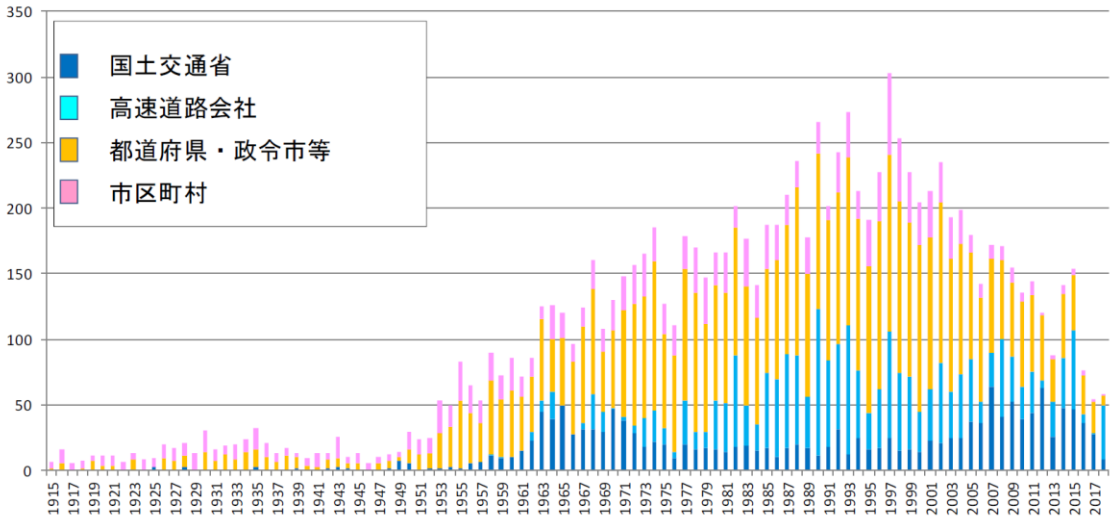


図 5　わが国の道路トンネルストック状況（国土交通省道路局（2019）より引用）[5)]

表 2　健全性の判定区分（国土交通省道路局（2019）より引用）[5)]

区分		状態
Ⅰ	健全	構造物の機能に支障が生じていない状態。
Ⅱ	予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。
Ⅲ	早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態。
Ⅳ	緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態。

わが国におけるすべての道路トンネルの判定区分の割合を**図 6** に示す．構造物の機能に支障が生じていない状態である判定区分 I と判定されたトンネルは全体の 2%である一方で，予防保全の観点から措置を講ずることが望ましいトンネルが 56%，早期もしくは緊急に措置を講ずるべきトンネルが 42%あることがわかる．つまり，経年した道路トンネルは道路トンネルとしての性能を保持するために，補修等の何らかの措置が必要なものが一定数以上あり，それを判定するための定期点検が必要であることが読み取れる．

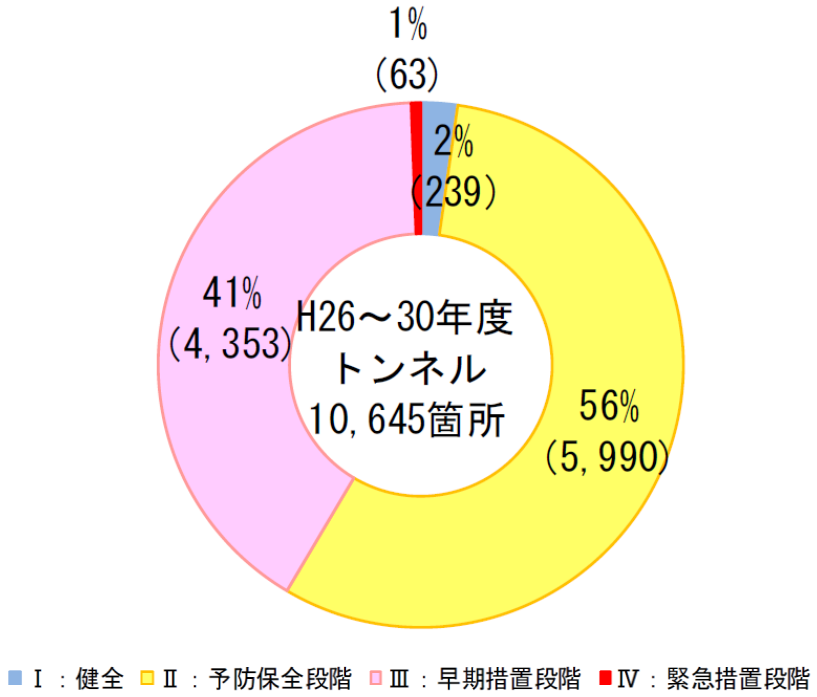


図 6　道路トンネルの判定区分（国土交通省道路局（2019）より引用）[5)]

次に，トンネル周辺地山の地質状況や，土被り，地形等がトンネルの健全性に及ぼす影響を分析するために，10645 トンネルのうち 52 本のトンネルを無作為に抽出し，詳細分析を行う．

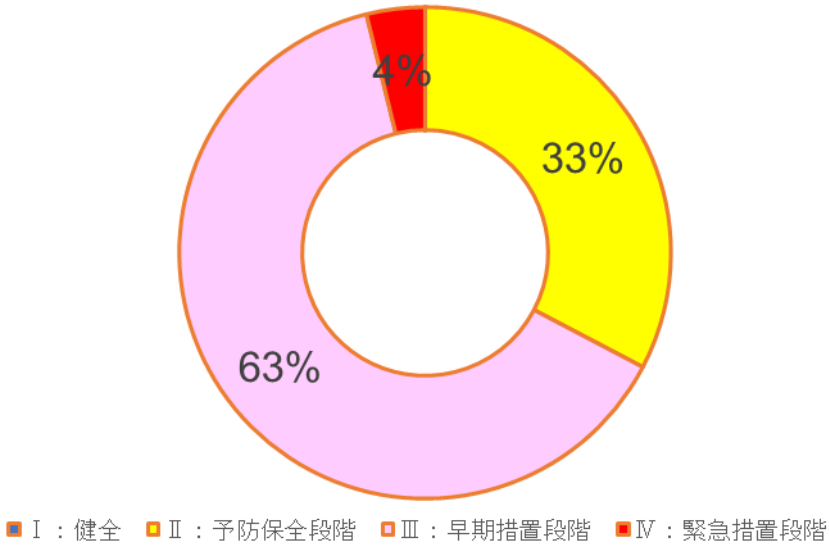


図 7　抽出した道路トンネルの判定区分

図 7 に抽出した 52 トンネルの判定区分を示す．抽出したトンネルは，構造物の機能に支障が生じていない状態である I と判定されたものは含まれていない．一方で，予防保全段階のⅡが 33%，早期措置段階Ⅲが 63%，緊急措置段階のⅣが 4%含まれている．

・抽出したトンネルの詳細分析

道路トンネルでは，トンネル毎の健全性の診断をする過程で，変状等の健全性の診断を行い，トンネルに生じる変状ごとに判定区分を判定している．ここでは上記で抽出した 52 トンネルに生じた変状のうち漏水と外力に着目し，分析を行った．

表 3　漏水等に対する変状に対する判定区分（日本道路協会（2020）より引用）[6)]

判定区分		変状の状態
Ⅰ		漏水がみられないもの，または漏水があっても利用者の安全性に影響がないため，措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	コンクリートのひび割れ等から漏水が浸出しており，利用者の安全性にはほとんど影響がないが，監視を必要とする状態
	Ⅱa	コンクリートのひび割れ等から漏水の滴水があり，将来的に利用者の安全性を損なう可能性のあるもの，または，排水不良により，舗装面に滞水を生じるおそれのあるため，重点的な監視を行い，予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ		コンクリートのひび割れ等から漏水の流下があり，または，排水不良により舗装面に滞水があり，利用者の安全性を損なう可能性のあるため，早期に対策を講じる必要がある状態
Ⅳ		コンクリートのひび割れ等から漏水の噴出があり，または，漏水に伴う土砂流出により舗装が陥没したり沈下する可能性があり，寒冷地において漏水等により，つららや側氷等が生じ，利用者の安全性を損なうため，緊急に対策を講じる必要がある状態

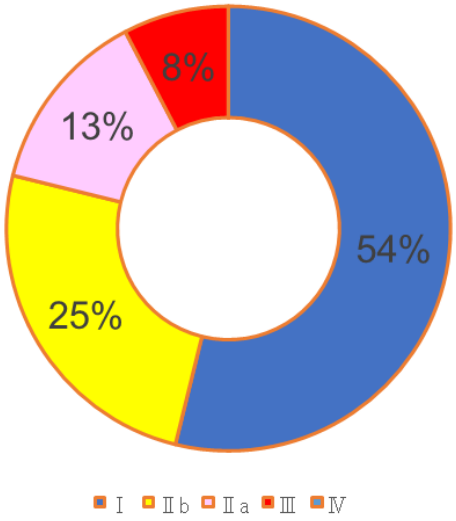


図 8　抽出した道路トンネルの漏水等による変状に対する判定区分

表 3 に漏水等による変状に対する判定区分を，**図 8** に抽出したトンネルの漏水等による変状に対する判定区分を示す．これらより，判定区分Ⅰが 54%，Ⅱb が 25%，Ⅱa が 13%，Ⅲが 8%，Ⅳが 0%であることがわかった．ちなみに，判定区分Ⅰは漏水が見られない場合も，軽微な漏水がみられる場合も同様の判定となるため，判定区分Ⅰのうち漏水がみられたものと見られないものの本数を調査した．その結果，判定区分Ⅰのトンネル 28 本のうち，漏水がみられるものは 9 本であった．

表 4　抽出したトンネルの漏水発生有無と周辺地質の関係

地質	漏水有（本）	漏水無（本）	合計（本）	漏水有の割合（%）
火成岩	18	10	28	64.3
堆積岩	13	7	20	65.0
変成岩	2	2	4	50.0

次に，**表 4** に抽出した 52 本のトンネルの周辺地山の地質を調査し，トンネル周辺地山の地質と漏水発生の有無について取りまとめた．これより，火成岩，堆積岩，変成岩すべてにおいて，50%～60%程度のトンネルで漏水が発生していることがわかり，ここではトンネル背面の地質のうちトンネル漏水に及ぼす影響が高い条件を確認することができなかった．

ここで分析したトンネルは,矢板工法やNATMで施工されたトンネルが含まれているが,両工法ともに漏水の発生がみられた．矢板工法で施工されたトンネルは，地山と覆工コンクリートの間に遮水を期待できる部材は設置されていないことから，コンクリートの貫通ひび割れや，コンクリートの打ち継ぎ目から漏水が発生する．NATM で構築されたトンネルは，覆工コンクリートを打設する前に防水シートを設置することが一般的であるが，防水シートの劣化や破損，接着不良などで漏水が発生することが考えられ，トンネル坑内への漏水を完全に止水することは難しいことが示唆されている．

幌延深地層研究センターの坑道は，主に鋼製支保工，吹付けコンクリートロックボルトの支保部材によって建設され，吹付けコンクリートが地山に密着して施工されるが，覆工コンクリートや防水シートは施工されず，一定以上の漏水が発生する可能性がある．また，坑道が沿岸部に建設される場合は漏水による支保工や坑内設備の塩害につながる恐れがある．

次に，トンネルに生じる外力について分析を行う．トンネルに生じる外力とは，圧ざ，ひび割れ，うき，はく離，変形，移動，沈下のような通常の外力と，突発性の崩壊現象がある．**表 5** に外力による変状に対する判定区分を，**図 9** に抽出したトンネルの外力による変状に対する判定区分を示す．これらより，判定区分Ⅰが 67%，Ⅱb が 11%，Ⅱa が 19%，Ⅲが 3%，Ⅳが 0%であることがわかった．この結果より，外力による変状に対する対策区分がⅠ以外のトンネルも見られ，中には補修等何らかの対策が必要な状態であることがわかった．今後は，外力による変状が見られたトンネルの周辺に分布する地質や，トンネル上に分布する土かぶりの厚さ等を調べ，変状の有無とそれらの関係について取りまとめる予定である．

表 5　外力による変状に対する対策区分（日本道路協会（2020）より引用）[6)]

変状種類[注1)] / 対策区分		①圧ざ，ひび割れ[注2)]	②うき・はく離[注3)]	③変形，移動，沈下
Ⅰ		ひび割れが生じていない，または生じていても軽微で，措置を必要としない状態	ひび割れ等によるうき・はく離の兆候がないもの，またはたたき落としにより除去できたため，落下する可能性がなく，措置を必要としない状態	変形，移動，沈下等が生じていない，またはあっても軽微で，措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	ひび割れがあり，その進行が認められないが，将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため，監視を必要とする状態	ひび割れ等により覆工コンクリート等のうき・はく離の兆候があり，将来的に落下する可能性があるため，監視を必要とする状態	変形，移動，沈下等しており，その進行が停止しているが，監視を必要とする状態
	Ⅱa	ひび割れがあり，その進行が認められ，将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため，重点的な監視を行い，予防保全の観点から計画的な対策を必要とする状態	ひび割れ等により覆工コンクリート等のうき・はく離の兆候があり，将来的に落下する可能性があるため，重点的な監視を行い，予防保全の観点から計画的な対策を必要とする状態	変形，移動，沈下等しており，その進行が緩慢であるため，重点的な監視を行い，予防保全の観点から計画的な対策を必要とする状態
Ⅲ		ひび割れが密集している，またはせん断ひび割れ等があり，構造物の機能が低下しているため，早期に措置を講じる必要がある状態	ひび割れ等により覆工コンクリート等のうき・はく離等がみられ，落下する可能性があるため，早期に措置を講じる必要がある状態	変形，移動，沈下等しており，その進行が見られ，構造物の機能低下が予想されるため，早期に措置を講じる必要がある状態
Ⅳ		ひび割れが大きく密集している，またはせん断ひび割れ等があり，構造物の機能が著しく低下している，または圧ざがあり，緊急に対策を講じる必要がある状態	ひび割れ等により覆工コンクリート等のうき・はく離等が顕著にみられ，早期に落下する可能性があるため，緊急に対策を講じる必要がある状態	変形，移動，沈下等しており，その進行が著しく，構造物の機能が著しく低下しているため，緊急に対策を講じる必要がある状態

注 1）変状種類の丸囲み数字は，**表-4.2.3** の丸囲み数字に対応する。
注 2）外力に起因するひび割れを対象とする。
注 3）外力に起因するひび割れ等にともなって発生するうき・はく離を対象とする。

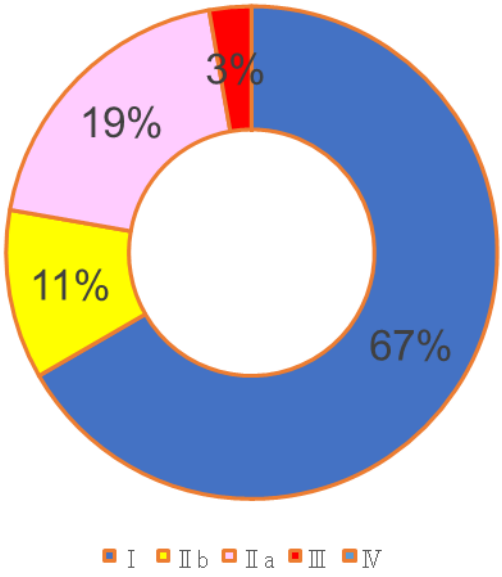


図 9　抽出した道路トンネルの外力による変状に対する判定区分

(2) 坑道掘削解析

・数値解析の概要

まず，地層処分施設の地下施設のうち，坑道が施工された際の壁面変位などの影響を数値解析によってシミュレーションする．数値解析コードは，三次元有限差分法コード FLAC3D を用いた．

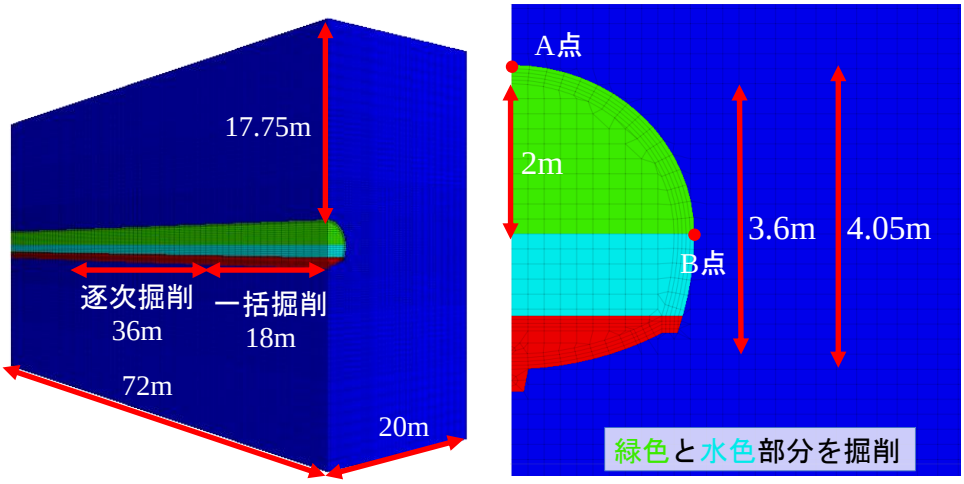


図 10　数値解析モデル

数値解析モデル鳥瞰図とトンネル周辺の拡大図を**図 10** に示す．**図 10** 右側に示すトンネル断面形状は，解析結果の妥当性検証のために幌延深地層研究センター地下 350m 地点における西連絡坑道を模擬した形状とし，当該箇所の掘削時計測データと比較を行う．解析領域は，対称性を考慮して半断面のみモデル化した．なお，地山及び吹付けコンクリートはソリッド要素，鋼製支保工は，ビーム要素でモデル化を行った．

地山解析物性値については，地層処分研究開発第 2 次取りまとめに示されているデータセット文献[7]を参考に**表 6** のように設定した．文献によると，データセットは SR-A から SR-E までの 5 つのパラメータが示されているが，本研究ではその上限値，中間値，下限値ある SR-A, SR-C, SR-E を用いた. 支保工の解析物性値については**表 7** のように設定した．解析モデルの境界条件については，上面以外をローラー支持とした．また，土被りは，地下 350m の初期地圧を再現するため，トンネル天端部に土被り 350m 相当が作用するようにモデル上端に等分布荷重を設定した．

表 6　解析入力物性値（地山）（核燃料サイクル開発機構（1999）より引用）[7]

項目		単位	物性値		
			SR-A	SR-C	SR-E
単位体積重量	γ	kN/m^3	24.5	22.0	17.0
一軸圧縮強さ	q_u	MPa	25	15	5
引張強さ	σ_t	MPa	3.5	2.1	0.7
弾性係数	E	MPa	5000	3500	1500
粘着力	c	MPa	5.0	3.0	1.0
内部摩擦角	Φ	deg	30	28	25
ポアソン比	ν	-	0.3	0.3	0.3

表 7　解析入力物性値（支保工）

項目		単位	物性値	
			吹付け	支保工（H-200）
単位体積重量	γ	kN/m³	23.5	78.5
一軸圧縮強さ	q_u	MPa	36	-
弾性係数	E	MPa	4,000	210,000
ポアソン比	ν	-	0.2	0.3
断面積	A	m²	-	6.35×10^{-3}

解析手順についてはまず初期応力解析を行い，その後坑道を坑口から 18m まで一括で掘削した．さらにその後は 1m ずつ逐次掘削解析を行った．坑道の掘削は全断面掘削とした．

・数値解析結果

図 11 に，坑口から 18m 地点の天端に着目した天端沈下履歴曲線を示す．ここでの切羽離れ 0m は，切羽が坑口から 18m 地点に到達した時点であり，さらに切羽が進行することで沈下が増大していく過程が見て取れる．このように，地山物性の違いによって切羽進行に伴って生じる天端沈下が異なってくることが分かる．

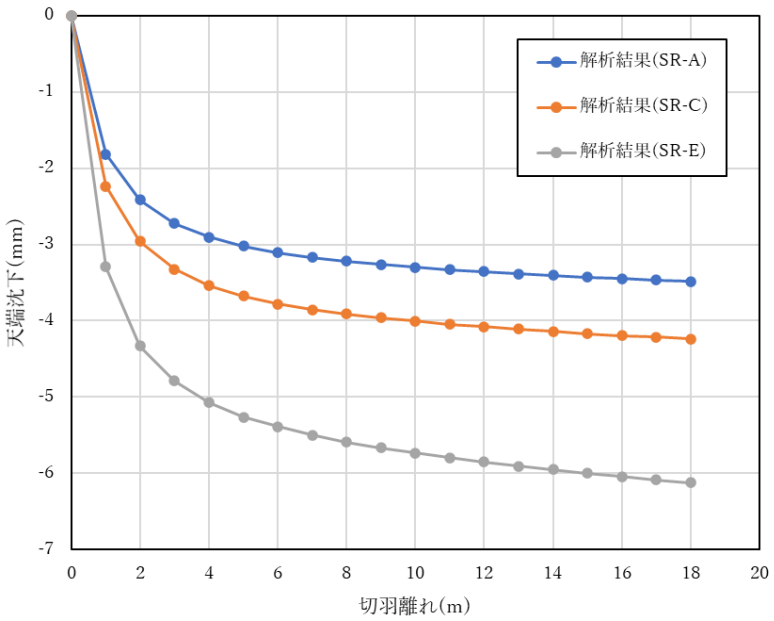


図 11　切羽進行に伴う天端沈下

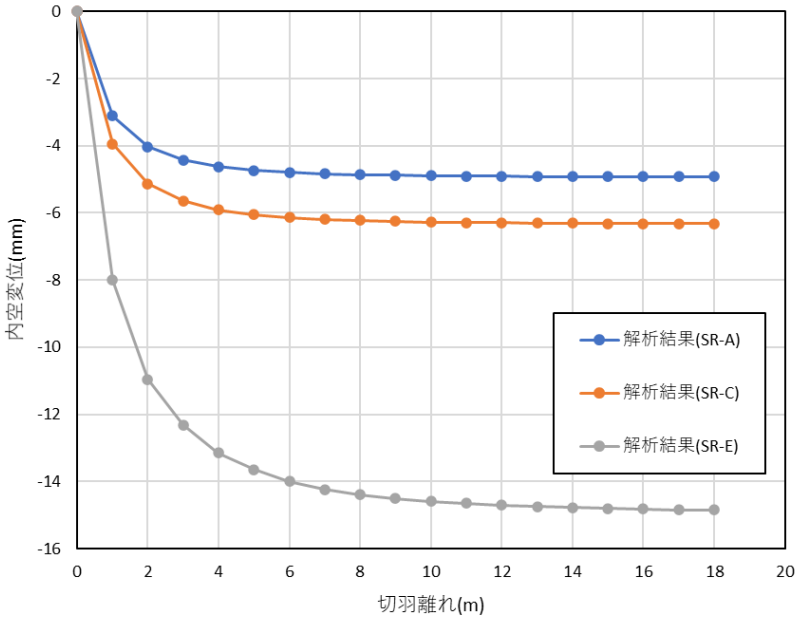


図 12　切羽進行に伴う内空変位

次に，**図 12** に坑口から 18m 地点の坑道側壁に着目した内空変位履歴曲線を示す．ここでは側壁の着目点の変位（内空側がマイナス）を 2 倍して示している．このように，天端沈下と同様に，地山物性の違いによって切羽進行に伴って生じる内空変位も異なってくることが分かる．

(3) 塩害に関する実験

・実験に使用するレールについて

本実験では，JIS 50kgN レールを用いた．**図 13** に実験に使用したレールの寸法，**表 8** に化学成分について示す．また，レールの厚さは約 15mm となるように切断した．

種類	寸法（mm）							断面積A（cm^2）	質量W（kg/m）
	A	B	C	D	E	F	G		
JIS 50kgNレール	153	127	65	49	74	30	15	64.2	50.4

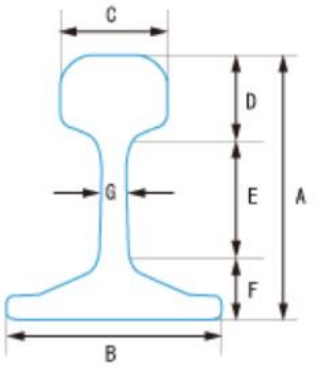


図 13　実験に使用したレールの寸法（JFE スチールホームページより引用）[8)]

表 8　実験に使用したレールの化学成分（JFE スチールホームページより引用）[8)]

種類	化学成分（%）				
	C	Si	Mn	P	S
JIS 50kgNレール	0.63～0.75	0.15～0.30	0.70～1.10	0.030 以下	0.025 以下

・予備実験による諸条件の決定

レールへの人工海水噴霧によって付着する塩分量を定量するため，予備実験を実施した．まず，市販の霧吹きでの霧吹き 1 回あたりの噴霧量を確認するために，人工海水（金属腐食試験用アクアマリン）を 500mL のビーカーに噴霧し増加質量を測定することにより噴霧量を計測した．その計測結果を**表 9** に示す．**表 9** から霧吹きの噴霧量にばらつきが少ないことから，市販の霧吹きの噴霧量の再現性が高いことが確認できた．続いて，レール直上 10，20，30cm から霧吹きでレールに人工海水を噴霧した際の付着塩分量を**表 10** に示す．**表 10** から，霧吹きを 7 日毎に吹きかけた場合の日平均飛来塩分量が 0.2mg/dm²/day (mdd) 程度であることがわかる．これは，耐候性鋼材を用いた裸仕様橋梁の適用可能範囲が 0.05 mg/dm² /day (mdd) であることから，十分な腐食環境下にあると考えられる．

表 9　使用した霧吹きの噴霧量

霧吹き回数	噴霧量(g)
1回目	0.94
2回目	0.88
3回目	0.87
4回目	0.9
5回目	0.94
6回目	0.94
7回目	0.93
8回目	0.92
9回目	0.91
10回目	0.95
平均	0.92

表 10　レールへの塩分付着量の推定

実験ケース	実験回数	付着塩分量		日平均付着塩分量	
		mg/m^2	平均(mg/m^2)	$mg/dm^2/day$(※)	平均($mg/dm^2/day$)
10cm	1回目	169	166	0.241	0.238
	2回目	158		0.225	
	3回目	173		0.247	
20cm	1回目	98.1	133	0.140	0.190
	2回目	165		0.236	
	3回目	136		0.195	
30cm	1回目	148	136	0.211	0.194
	2回目	140		0.200	
	3回目	120		0.172	

※霧吹きを7日毎に吹きかけた場合の値

・恒温恒湿腐食試験のための初期測定結果

レールの恒温恒湿腐食試験を実施するにあたり，レールの初期質量とさび厚の測定を行った．その結果を**表 11** に，さび厚測定箇所を**図 14** に示す．ここで，さび厚はレールの各部位で膜厚計により 10 回計測した際の平均の値とした．初期さび厚に関しては，レール両腹部に多い特徴が見られた．

表 11　レールの初期質量およびさび厚の測定結果

試験体番号	レール質量（g）	さび厚（μm）				
		頭頂部	左腹部	右腹部	左脚部	右脚部
No.1	775.7802	16.0	14.7	24.7	14.9	22.5
No.2	747.3544	14.5	15.2	33.6	18.7	23.2
No.3	773.9438	31.4	30.8	19.3	6.4	13.4
No.4	760.2022	19.1	25.1	31.9	11.1	11.6
No.5	780.3737	33.4	17.5	18.3	9.1	25.7
No.6	766.0278	11.0	28.9	30.1	14.4	9.3
No.7	768.3857	12.0	22.8	20.4	12.6	11.0
No.8	779.151	8.9	20.8	31.1	12.1	15.7
No.9	735.6105	11.5	15.2	33.2	14.3	9.3
No.10	779.0331	14.4	31.5	22.2	32.3	17.4
No.11	770.4108	8.6	37.1	21.6	16.3	11.3
No.12	765.5473	9.7	26.8	26.2	7.9	7.0
No.13	771.2547	9.9	19.0	33.4	13.5	15.2
No.14	779.173	10.2	18.9	29.7	8.4	9.2
No.15	730.6587	12.5	17.6	16.4	8.5	7.4
No.16	775.0342	11.9	18.5	23.5	11.3	6.0
No.17	785.4377	11.3	24.3	30.7	13.1	6.9
No.18	771.0556	8.1	19.9	30.0	11.0	6.7
No.19	768.5722	11.5	40.4	15.4	8.0	11.1
No.20	781.3075	15.9	28.1	25.8	8.3	8.7
No.21	779.2442	10.6	15.7	37.6	8.8	23.6
No.22	777.7163	11.1	34.0	33.5	10.7	8.5
No.23	770.6111	11.1	23.3	25.1	11.8	9.1
No.24	771.6161	11.4	23.5	15.1	7.9	11.7
平均	769.3126	13.6	23.7	26.2	12.1	12.6

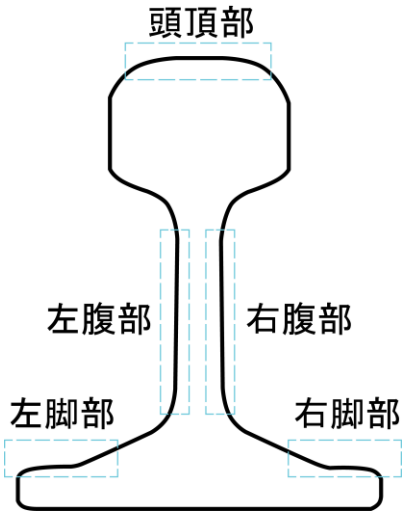


図 14　さび厚の測定箇所

3.3 残された課題と今後の計画

(1) トンネル点検結果の分析

2021 年度では，地質，地形，土被り，経年とトンネル健全性の関係を明らかにするには至っていない．今後は，道路トンネルの維持管理データの詳細分析を進め，健全性への寄与が高い条件を解明する．

分析方法としては，統計的手法，機械学習を用いて寄与度の高い条件を解明する．

(2) 坑道掘削解析

引き続き，数値解析による坑道掘削解析を行い，坑道掘削の応力再配分によって支保工に生じる影響（支保内圧）を解析によって解明する．

さらに，塩分が含まれる漏水によって支保工（例えば鋼製支保工）が腐食した場合のトンネル安定解析を行う．

(3) 塩害に関する実験

今後は，恒温湿度器内に静置されたレールを定期的に取り出し，霧吹きによる噴霧を行う．加えて，定期的にレールのさび厚を計測し，レールの減耗量も算出する．そして，これらにより高湿度・塩分環境下におけるレールの腐食量を明らかにしていく予定である．

4. まとめ

地層処分施設は，建設，操業，閉鎖までの間を含めれば数 10 年程度（50 年以上）にわたることが想定されており，掘削施工段階から維持管理段階までの長期安定性を把握することが必要である．さらに，地層処分施設が沿岸部に建設され，地下施設周辺地山や地下水に塩分を有している場合は，支保部材や設備等に何らかの悪影響を及ぼす可能性がある．

そこで本研究では，地層処分施設において処分坑道を対象とし，①地下空洞の長期安定性および②空洞内湧水が塩水の場合において，施設の長期安定性を解明するための研究を遂行するために，「トンネル点検結果の分析」，「坑道掘削解析」，「塩害に関する実験」を実施した．

その結果，現時点において得られた知見および，今後の課題を以下に示す．

トンネル点検結果の分析として，トンネルの健全性を詳細調査したトンネルを抽出し，漏水，外力が発生したトンネルの分析を行った．その結果，漏水や外力による変状の程度と割合，漏水が生じているトンネルと周辺地山の関係が明らかになった．今後は，地質，地形，土被り，経年とトンネル健全性の関係を統計的手法，機械学習を用いて明らかにする．

坑道掘削解析を行った結果，データセットが示されている地山の掘削影響を数値解析によって把握することが出来た．今後は，坑道掘削の応力再配分によって支保工に生じる影響（支保内圧）の把握，および塩分が含まれる漏水によって支保工（例えば鋼製支保工）が腐食した場合のトンネル安定解析を行う．

塩害に関する実験では，予備実験でレールへの人工海水噴霧によって付着する塩分量を把握することが出来た．今後は，恒温恒湿腐食試験を行い，定期的にレールのさび厚を計測し，レールの減耗量も算出する．これらにより高湿度・塩分環境下におけるレールの腐食量を明らかにする．

参考文献

1） 総合資源エネルギー調査会　電力・ガス事業分科会 原子力小委員会　地層処分技術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（地層処分技術WGとりまとめ），2017.

2） 松永 浩一，田村 彰教：幌延深地層研究計画 地下施設実施設計 -設計報告書-，2005.

3） 土木学会トンネル工学委員会：トンネル標準示方書［山岳工法編］・同解説，2016.

4） 原子力発電環境整備機構パンフレット:放射性廃棄物の地層処分に向けた取組み, 2015.

5） 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，2019.

6） 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本体工編】令和 2 年版，2020.

7） 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，1999.

8） JFE スチールホームページ：
https://www.jfe-steel.co.jp/products/katakou/rail/rail_a.html，2022.03.10 アクセス

研究報告 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

早稲田大学　創造理工学部社会環境工学科

伊藤　大知

【 目 次 】

1. 背景・目的 1
2. 全体研究計画（2 ヵ年における全体計画） 4
3. 2021 年度研究実施内容 6
3.1 2021 年度の計画、実施方法 6
3.1.1 使用した試料の概要 6
3.1.2 不攪乱供試体および再構成供試体の作製方法 9
3.1.3 膨潤圧測定実験の概要 10
3.1.4 一次元膨潤変形実験の概要 12
3.2 2021 年度の成果内容 14
3.2.1 新たに導入したベントナイト原鉱石の膨潤圧実験結果 14
3.2.2 新たに導入したベントナイト原鉱石の膨潤変形実験結果 18
3.2.3 高拘束圧の一次元膨潤変形実験結果 22
3.2.4 自己修復性評価手法の構築・提案 25
3.3 残された課題と今後の計画 33
4. まとめ 34
参考文献 35

参考文献

2021 年度外部発表

図表目次

図 1-1　地層処分システム概念図（JAEA, 2017）[4)] 1
図 3-1　原鉱石サンプルの様子（上段左から，月布産，劉房子産，Ten Sleep 産　下段左から細越産，白崎産，黒石産） 7
図 3-2　不攪乱供試体（左）と再構成供試体（右）の作製概念図 9
図 3-3　膨潤圧実験装置の概略図 11
図 3-4　一次元膨潤変形試験装置（左：拘束圧 19.6kPa の場合，右：拘束圧 100・500 kPa の場合） 13
図 3-5　白崎産原鉱石の膨潤圧の経時変化曲線 14
図 3-6　最大膨潤圧－乾燥密度関係（白崎産原鉱石） 15
図 3-7　細越産原鉱石の膨潤圧の経時変化曲線 15
図 3-8　最大膨潤圧－乾燥密度関係（細越産原鉱石） 16
図 3-9　黒石産原鉱石の膨潤圧の経時変化曲線 16
図 3-10　最大膨潤圧－乾燥密度関係（黒石産原鉱石） 17
図 3-11　膨潤変形率の経時変化曲線（白崎産原鉱石） 18
図 3-12　最大膨潤変形率－乾燥密度関係（白崎産原鉱石） 19
図 3-13　膨潤変形率の経時変化曲線（細越産原鉱石） 19
図 3-14　最大膨潤変形率－乾燥密度関係（細越産原鉱石） 20
図 3-15　膨潤変形率の経時変化曲線（黒石産原鉱石） 20
図 3-16　最大膨潤変形率－乾燥密度関係（黒石産原鉱石） 21
図 3-17　月布産原鉱石拘束圧 100 kPa の時間－一次元膨潤変形率関係 23
図 3-18　月布産原鉱石拘束圧 500 kPa の時間－一次元膨潤変形率関係 24
図 3-19　Ten Sleep 産原鉱石拘束圧 100 kPa の時間－一次元膨潤変形率関係 24
図 3-20　Ten Sleep 産原鉱石拘束圧 500 kPa の時間－一次元膨潤変形率関係 25
図 3-21　緩衝材の設計フローの一例 [3)] 26
図 3-22　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 27
図 3-23　月布産原鉱石の拘束圧－試験終了時乾燥密度関係 28
図 3-24　Ten Sleep 産原鉱石の拘束圧－試験終了時乾燥密度関係 28
図 3-25　劉房子産原鉱石の拘束圧－試験終了時乾燥密度関係 29

図 3-26　月布産原鉱石の拘束圧（対数軸）と試験後乾燥密度の関係 29
図 3-27　Ten Sleep 産原鉱石の拘束圧（対数軸）と試験後乾燥密度の関係 30
図 3-28　劉房子産原鉱石の拘束圧（対数軸）と試験後乾燥密度の関係 30
図 3-29　想定される緩衝材の経時的な状態変化 31
図 3-30　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 32

表 2-1　申請時における本研究の実施内容 5
表 3-1　2021 年度の研究スケジュール 6
表 3-2　原鉱石の基本的性質 8
表 3-3　月布産原鉱石の高拘束圧の一次元膨潤変形実験結果 22
表 3-4　Ten Sleep 産原鉱石の高拘束圧の一次元膨潤変形実験結果 23
表 3-5　2022 年度の研究スケジュール 33

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（使用済燃料の再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．

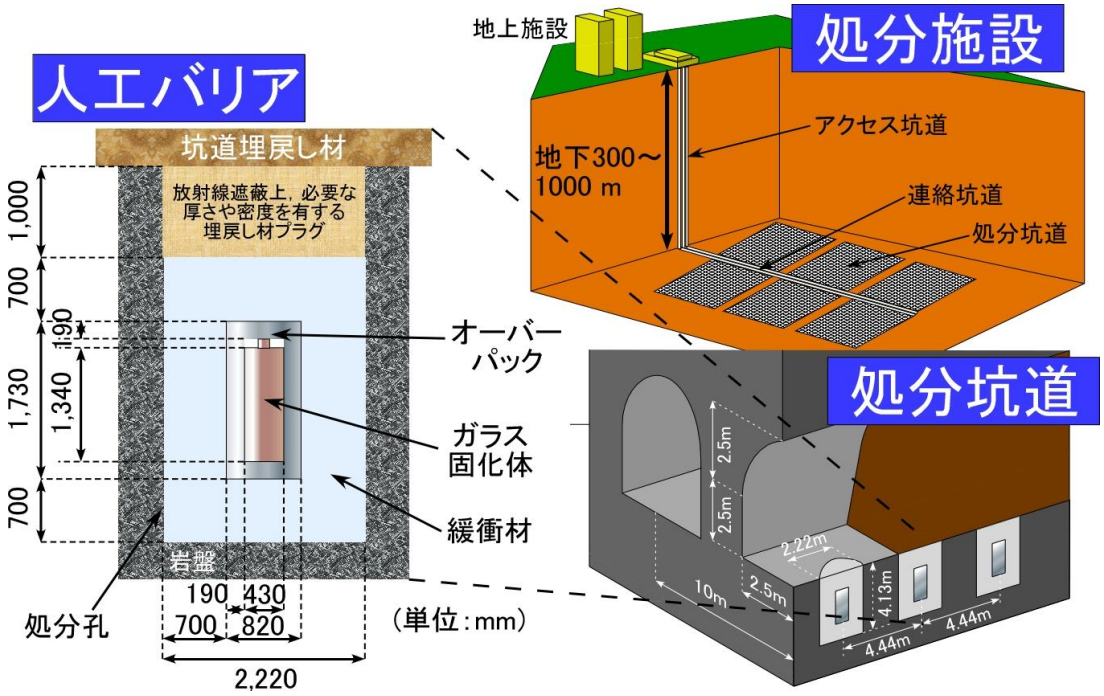


図 1-1　地層処分システム概念図（JAEA, 2017）[4)]

HLW に含まれる放射性核種の放射能の十分な低下には，数万年を要するため，ベントナイト系緩衝材の設計にあたっては長期的な健全性が求められる．緩衝材はそのような長期間にわたって，処分場の深度に起因する高い土圧の作用や，海水由来の塩分を含む地下水の流入を始めとする，緩衝材の健全性に対する阻害要因に晒される．この時，緩衝材内部にて膠結作用（モンモリロナイトや随伴鉱物が溶解し，間隙内で再結晶化して土粒子同士を固着させること）が発生する可能性がある [5]. この時, 緩衝材の土粒子骨格が緻密となり，強度や低透水性が向上すると考えられる一方で，自己シール性や応力緩衝性に関連する膨潤性や圧密（圧縮）性の材料特性が低下する可能性が考えられる．緩衝材の要求性能に関連する材料特性の長期健全性を評価する上で，膠結作用によるベントナイトの材料特性の経年変化の定量評価は極めて重要である．

緩衝材の長期挙動評価に向けて，これまでに各研究機関においてバッチ型 [6]やカラム型 [7] の実験装置を用いた変質加速試験や, 遠心力模型試験 [8]などを活用した取り組みが行われてきた．しかし，前者は経年と変質状況の相関に関する定量評価が困難であり，後者は時間スケールにおける加速可能期間が 100～200 年程度に留まることが課題である．このような室内試験によるアプローチの一方，地質学的観点からナチュラルアナログ研究と呼ばれる研究手法も数多く実施されている．これは，廃棄物やバリア材の天然の類似体（ナチュラルアナログ）を自然界から見出し，類似体における物質移動のプロセスとメカニズムを評価する研究手法である [9]．自然現象を研究対象とするため，数億年といった超長期間の変質現象についても評価することが可能であるが，ナチュラルアナログ研究の多くは，バリア材料の類似体の変質状況の鉱物学的観点に基づく定性評価にとどまっている [10]．故に，膨潤特性や透水特性等の物理特性の評価まで至っておらず，処分事業における緩衝材の仕様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，本研究ではナチュラルアナログ研究手法に着想を得て，ベントナイト系緩衝材の膠結作用に伴う変質現象をベントナイト鉱床の生成過程の一部とみなし，鉱床から産出されるベントナイト原鉱石に着目した．地質年代が数千万～数億年オーダーである数種類のベントナイト原鉱石を用いて，緩衝材の膠結作用に伴う変質とそれに伴う特性変化を定量的に評価し，それらを考慮した緩衝材の自己修復性評価手法を構築・提案することを本研究の目的とする．

本研究は，ベントナイト系緩衝材における膨潤特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．

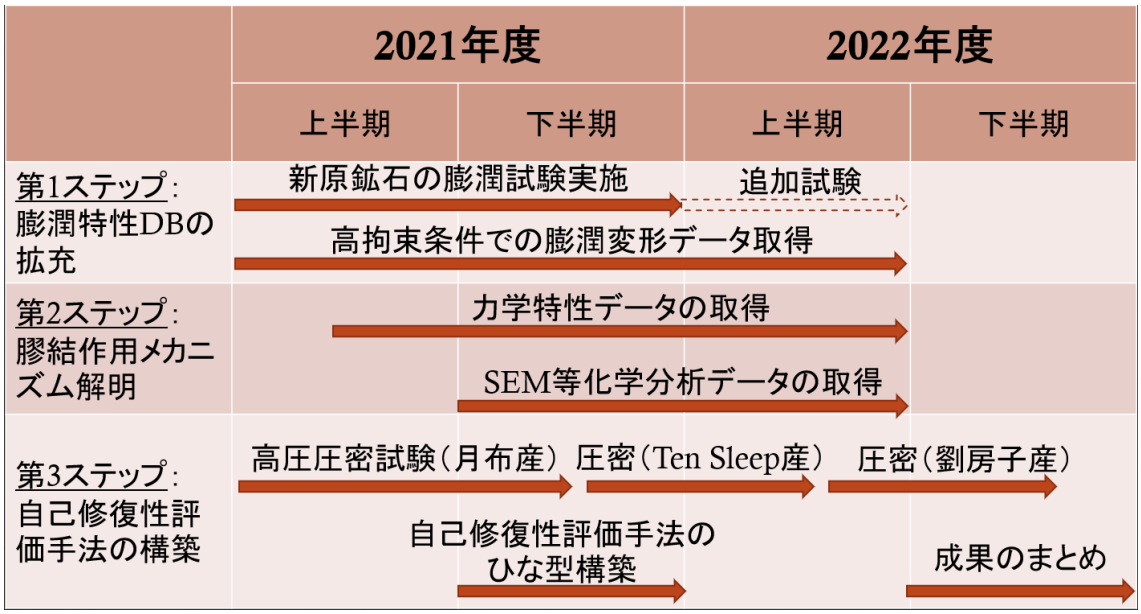
2. 全体研究計画（2 ヵ年における全体計画）

本研究では，実施項目を目的ごとに分けて，それぞれの詳細な検討事項を設定し，申請時において表 2-1 に示すように実施内容およびスケジュールを立案した．以下は実施計画に基づく，各年度の実施内容に関する詳細な説明である．

（1）2021 年度実施内容：応募者らのグループが過去に実施した研究において，山形県月布鉱山産（月布産原鉱石）・アメリカ合衆国ワイオミング州 Ten Sleep 鉱山産（Ten Sleep 産原鉱石）・中華人民共和国吉林省劉房子鉱山産（劉房子産原鉱石）の 3 種類の原鉱石を用いて検討を行った．それにより得られた原鉱石の膨潤特性データベースを高度化するため，今年度は，新たに 3 種類のベントナイト原鉱石を導入し，膨潤特性データベースの拡充を行う．また，力学特性の評価や化学分析を活用して，膠結作用のメカニズムの究明を行う．そして，地層処分事業への適用として，膨潤特性データベースに基づいた自己修復性評価手法の構築・提案を進める．

（2）2022 年度実施内容：2021 年度の進行状況に応じて，試料の追加や試験ケースの補強などを随時行い，膨潤特性データベースの拡充を図る．また，弾性波測定試験や針貫入試験をはじめとする，非破壊試験を中心に各種力学特性試験を行い，膨潤特性の低下度（変化度）と紐づけることで，地質年代に代わる新たな物理的指標を究明する．また，上記で得られた成果を取りまとめ，地層処分場の環境においてベントナイト系緩衝材中で膠結作用の発生が懸念される場合の，危険側を想定した劣化・特性低下の定量評価と，自己修復性評価手法の構築を完遂させる．

表 2-1　申請時における本研究の実施内容



3. 2021 年度研究実施内容

3.1 2021 年度の計画、実施方法

2021 年度においては，まず新たに導入した原鉱石の基本的性質を取得するとともに，不攪乱試料・再構成試料の膨潤圧・膨潤変形実験を行った．不攪乱試料は原鉱石における膠結作用による固結を残存させたまま各種試験に供したものであり，本研究においてはベントナイト系緩衝材が膠結作用を受けた場合の特性評価を想定している．再構成試料は破砕等により物理的に固結を除去した後に締め固めて各種試験に供したものであり，緩衝材の地層処分操業初期における特性評価を想定している．また，高拘束圧の膨潤変形試験（拘束圧 100，500 kPa の 2 ケース）について，上半期よりわが国の緩衝材候補材料に最も特性の近い月布産原鉱石の不攪乱試料・再構成試料を用いた試験を優先して開始し，乾燥密度―拘束圧関係のデータを拡充するとともに，自己修復性評価手法のひな型を提案した．

表 3-1　2021 年度の研究スケジュール

項　目	2021/4	5	6	7	8	9	10	11	12	2022/1	2	3
原鉱石の基本的性質の取得	→	→	→	→	→	→						
新規導入した原鉱石の膨潤圧特性の評価		→	→	→	→	→	→	→	→			
新規導入した原鉱石の膨潤変形特性の評価		→	→	→	→	→	→	→	→			
高拘束圧下の膨潤変形特性の評価				→	→	→	→	→	→	→		
2021 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実験，一次元膨潤変形実験および原鉱石の基本的性質に係る各種試験方法の概要について述べる．

3.1.1　使用した試料の概要

本研究で使用したベントナイト原鉱石は，これまでに代表者らのグループで用いてきた山形県月布産の Na 型ベントナイト（月布産），中華人民共和国吉林省劉房子産の Na 型ベン

トナイト(劉房子産),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(Ten Sleep 産）の 3 種類のほかに，今年度より新たに，新潟県白崎産の Na 型ベントナイト（白崎産)，新潟県細越産の Na 型ベントナイト（細越産)，および青森県黒石産の Na 型ベントナイト（黒石産）の 3 種類を加え，計 6 種を用いている．これらの原鉱石の成因として，月布産・劉房子産・Ten Sleep 産の 3 種類は続成変質作用，白崎産・細越産・黒石産は熱変質により生成されたと考えられている．また，地質学的検討から地質年代として月布産は約 1000 万年, 劉房子産は約 1 億 5000 万年, Ten Sleep 産は約 1 億年, 黒石産は約 1200 万年, 細越産および白崎産は約 1600 万年とそれぞれ推定されている [11),12),13)]. 図 3-1 に使用した原鉱石サンプルの様子を示す.

図 3-1　原鉱石サンプルの様子（上段左から，月布産，劉房子産，Ten Sleep 産　下段左から細越産，白崎産，黒石産）

本研究では，原鉱石の土質力学・粘土鉱物学的な各種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，浸出陽イオン量の測定を実施した．これらの測定に際しては，伊藤らの研究 [14)]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 [15)]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）[16)]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 [17)]として算出した．ま

た，モンモリロナイト結晶に吸着されている陽イオン（浸出陽イオン）の測定は，ベンジルトリメチルアンモニウムクロリド溶液（BTM 溶液）を用いた, SFSA（Steel Founder's Society of America）法をクニミネ工業により改良された方法（SFSA 改良法）に基づいて行った. 表 3-2 に以上の各試験から得られた，使用した原鉱石の基本的性質を示す.

表 3-2　原鉱石の基本的性質

	月布産	劉房子産	Ten Sleep 産	白崎産	細越産	黒石産
土粒子の密度(Mg/m^3)	2.77	2.73	2.67	2.58	2.58	2.71
液性限界(%)	438.5	541.6	588.2	411.2	254.9	329.6
塑性限界(%)	28.0	35.6	57.2	40.4	43.7	40.3
塑性指数	410.5	506.0	531.0	370.8	211.2	289.3
モンモリロナイト含有率(%)	44.7	51.1	50.4	52.2	55.3	66.5
浸出 Na^+イオン量 (meq/100g)	43.7	48.8	60.7	47.9	57.1	39.6
浸出 Ca^{2+}イオン量 (meq/100g)	5.6	21.0	14.4	8.0	13.9	25.0
浸出 Mg^{2+}イオン量 (meq/100g)	0.9	3.4	0.4	2.6	5.2	6.0
浸出 K^+イオン量 (meq/100g)	定量下限値以下	0.6	定量下限値以下	1.5	2.5	2.3

3.1.2　不攪乱供試体および再構成供試体の作製方法

本研究では，ベントナイト系材料の各特性における膠結作用の影響を評価するため，原鉱石の膠結作用による固結を残存させるため粉砕せず供試体サイズに切り出した不攪乱供試体と，破砕により固結を物理的に除去して締め固めた再構成供試体の 2 種類の供試体を作製し，用いた．以下にそれぞれの供試体の作製方法を示す．

不攪乱供試体は，カッターリング，包丁，トリマーなどのトリミング用器具を用いて，直径 28 mm，高さ 10 mm の円柱形を目標に成形し，作製した．その際，亀裂やリングと岩片との間に隙間が生じないように留意した．一方，再構成供試体は岩片をメノウ乳鉢，乳棒もしくは破砕機を用いてすりつぶした後に任意の目のふるいにかけ，通過した粉末試料に対し，静的荷重を 15 分間作用させることにより締固め，作製した．粒径 0.425 mm 以下の試料は 0.425 mm ふるいを通過したものを，粒径 0.850～2.00 mm の試料は 2.00 mm ふるいを通過かつ 0.850 mm ふるい上に残存したものを，粒径 2.00～4.75 mm の試料は 4.75 mm ふるいを通過かつ 2.00 mm ふるい上に残存した試料をそれぞれ指す．図 3-2 に不攪乱供試体と再構成供試体の作製概念図を示す．

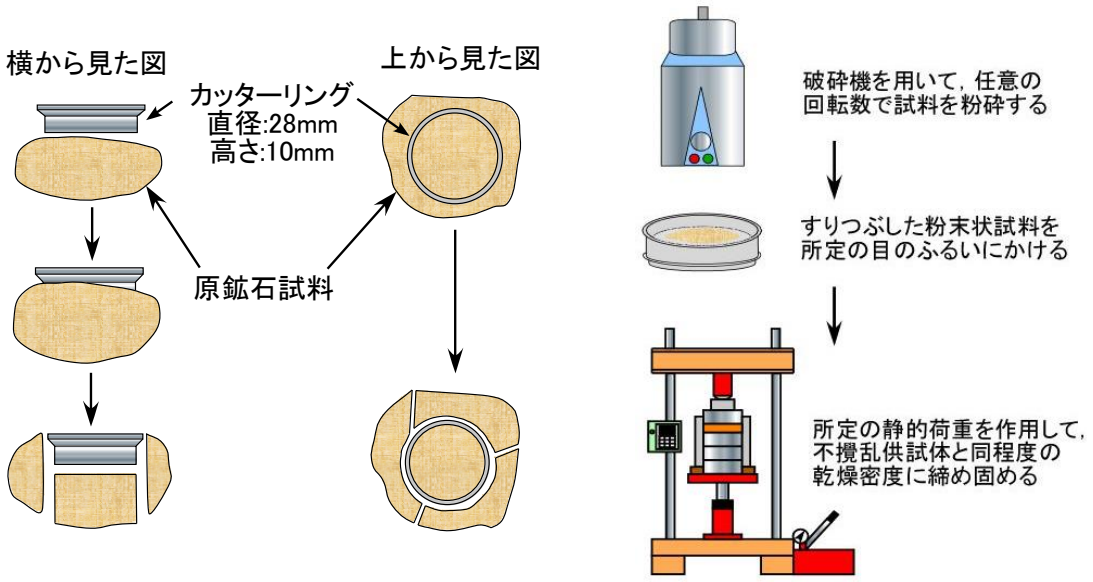


図 3-2　不攪乱供試体（左）と再構成供試体（右）の作製概念図

3.1.3　膨潤圧測定実験の概要

ベントナイト系緩衝材の吸水膨潤に伴い発生する膨潤圧に関して，過大である場合は他の人工バリアの損傷を引き起こす可能性があり，過小である場合地下水との接触に伴い流出による層厚の減少が考えられ，いずれの場合においてもバリア性能が低下を引き起こす可能性が考えられる．故に，緩衝材が膠結作用に伴い固結した場合の膨潤圧特性の変化を評価し，バリア性能の著しい低下が生じるかを照査することは非常に重要である．そこで本研究では，不攪乱供試体と再構成供試体を用いて膨潤圧測定試験を実施し，膨潤圧特性における膠結作用の影響に関して評価を行った．

本試験においては，図 3-3 に示す装置を用いた．本試験方法は参考文献 18)を参考として行ったものである．供試体下部から蒸留水を供給し，供試体の吸水膨潤に関して側方方向は SUS316L 製リングにより拘束し，鉛直方向の変形はクランプノブを締めることで抑制した．すなわち，本試験で測定する膨潤圧は，鉛直方向の膨潤変形を抑制するのに必要な圧力を指す．以下に本試験の手順を示す．まず，3.1.2 で述べた方法により作製した供試体を SUS316L 製リングに移し替え，供試体の上下端に定性ろ紙（No.5A）を設置し，膨潤特性実験容器を組み立てた．実験容器底板の下部給水口と二重管ビュレットをシンフレックスチューブにより接続した．次に，ベロフラムシリンダーの空気圧を調整することによりピストンを供試体上部に接触させ，クランプノブを締めることで鉛直方向の変位を固定した．そのまま 5 分程度放置した後，供試体への給水とロードセルによる膨潤圧および変形量の測定を開始した．また，試験開始時には 20～40 kPa の鉛直圧を作用させ，ピストンと供試体上端が確実に接触するよう留意した．膨潤圧の測定には，最大容量 50 kN，最小目盛 0.012 kN のロードセルを用いた．また，鉛直方向の変位は完全には抑制できないため，最大容量 25 mm，最小目盛り 0.002 mm の変位計を用いて変位量（膨潤変形量）を測定し，式(1)を用いて乾燥密度を補正した．

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

ここに，ρ_{d0}：乾燥密度補正値(Mg/m^3)，m：供試体乾燥質量(g)，A：供試体断面積(mm^2)，H_0：供試体初期高さ(mm)，Δd：供試体変位量(mm)である．

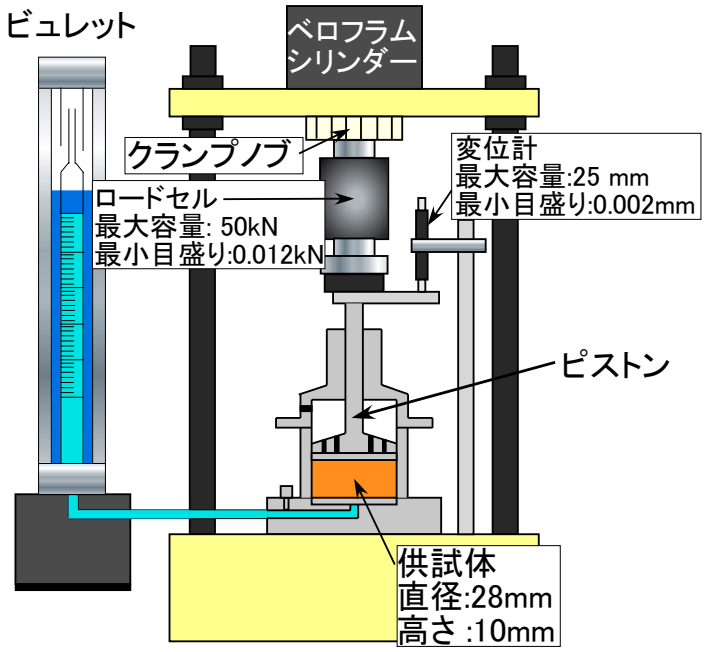


図 3-3　膨潤圧実験装置の概略図

3.1.4　一次元膨潤変形実験の概要

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．また，長期間経過後において，オーバーパック腐食により発生する水素ガスの発生・破過現象に代表される損傷部分の膨潤変形により充填すること（自己修復性）も要求性能として挙げられる．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，一次元膨潤変形率を測定した．

一次元膨潤変形実験装置においては，拘束圧を 19.6・100・500 kPa と設定した上で，供試体の上部に一定の死荷重を載荷し，供試体の鉛直方向の変形量を測定した．使用した装置を図 3-4 に示す．なお，拘束圧 100・500 kPa の場合は，膨潤圧実験装置と同一の載荷装置・フレームを用いて，クランプノブは締めずにシリンダーの空気圧を調整することにより載荷した．拘束圧 19.6 kPa の場合は，実験容器のピストン上部に鉛玉を入れたポリプロピレン容器を置くことで載荷した．なお，膨潤圧実験装置・一次元膨潤変形実験装置のいずれにおいても，一部ケースを除き供試体は直径 28 mm，高さは 10 mm の円柱形を目標として作製した．

3.1.3 で述べた膨潤圧測定実験との最大の違いは，本試験においては鉛直方向の膨潤変形を抑制せず，所定の鉛直圧のもとで膨潤変形量を測定する点である．本試験装置はステンレス製リング，ピストン，ペデスタル，載荷板から成る膨潤特性実験容器と，除震台，載荷用の重り，変位計，二重管ビュレットで構成される．載荷用の重りは載荷板，ピストンの重量と合わせて 19.6 kPa の載荷圧となるよう，ポリプロピレン製容器内に鉛玉を投入した．膨潤変形量の測定については，最大容量 25 mm，最小目盛り 0.002 mm の変位計を用いた．以下に本試験の手順を示す．まず，3.1.2 の方法で作製した供試体を SUS316L 製ステンレスリングに移し替え，その上下に定性ろ紙（No.5A）を設置し，膨潤特性実験容器を組み立てた．その後，載荷用の重りを載荷し，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 18）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），$\varepsilon_s(t)$：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，ε_{smax}：最大膨潤変形率（%）である．

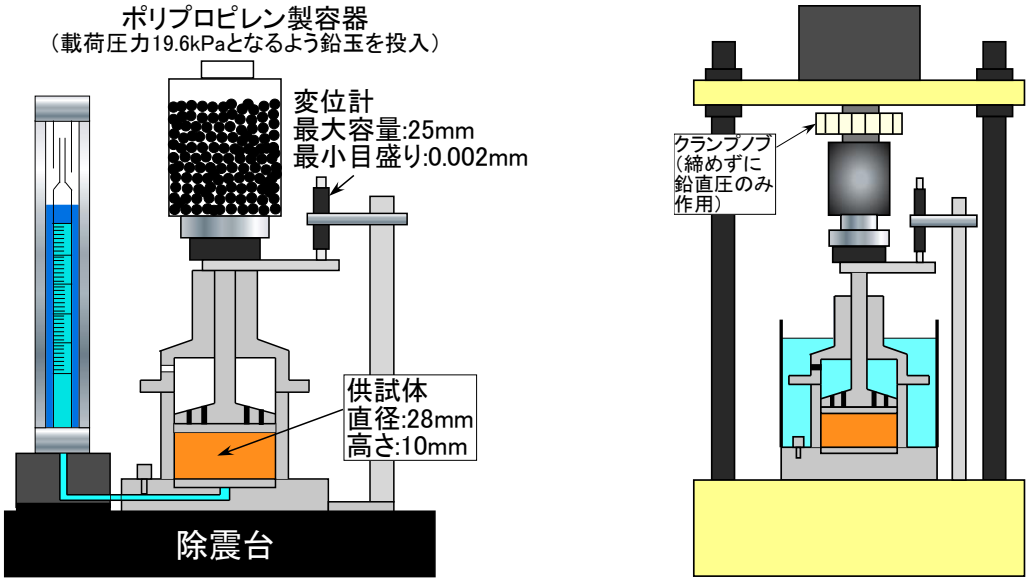


図 3-4　一次元膨潤変形試験装置（左：拘束圧 19.6kPa の場合，右：拘束圧 100・500 kPa の場合）

3.2 2021 年度の成果内容

3.2.1 新たに導入したベントナイト原鉱石の膨潤圧実験結果

本節では，今年度より新たに導入した 3 種類のベントナイト原鉱石について，膨潤圧実験を実施した結果について述べる．

・白崎産原鉱石

図 3-5 に，白崎産原鉱石の膨潤圧の経時変化を示す．これより，再構成供試体においては，実験開始直後に膨潤圧が急激に上昇した後に一度低下し，再度上昇に転じている経時変化が見受けられた．このような挙動は既往研究においてもみられており [19]，ベントナイトの飽和過程において土粒子構造の再配列が生じているためと推察される．一方，不攪乱供試体では，実験開始直後に膨潤圧が上昇した後に，一定値に収束している経時変化であった．

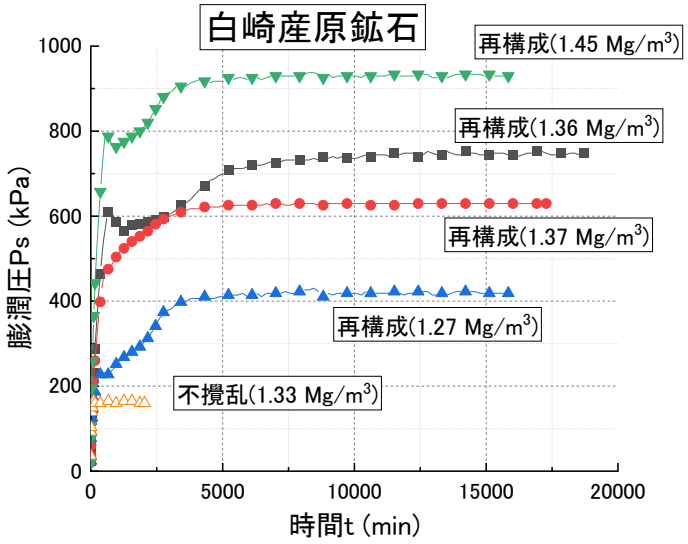


図 3-5 白崎産原鉱石の膨潤圧の経時変化曲線

図 3-6 に，最大膨潤圧と供試体乾燥密度の関係を示す．これより，再構成供試体においては乾燥密度の増加に応じて最大膨潤圧が比例的に増加していることが分かる．不攪乱供試体の最大膨潤圧は，再構成供試体に対しておよそ 1/3 に留まっており，これまでに得られ

ている原鉱石の膨潤特性データベースと同様の低下度であった.

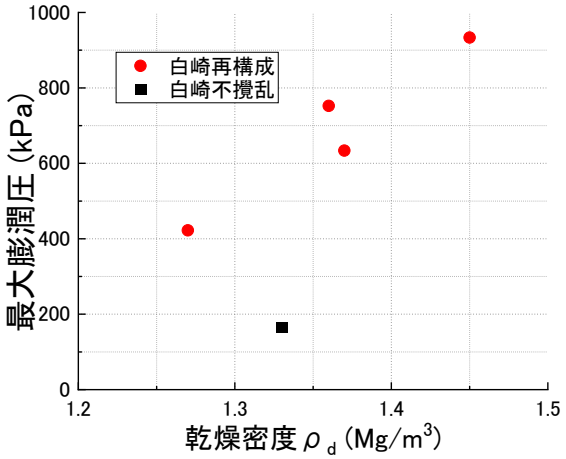


図 3-6　最大膨潤圧－乾燥密度関係（白崎産原鉱石）

・細越産原鉱石

図 3-7 に，細越産原鉱石の膨潤圧の経時変化曲線を示す．再構成供試体においては，白崎産原鉱石と同様，膨潤圧の上昇→一時低下→再上昇の経時変化が見られた．一方で，不撹乱供試体においては，開始直後より膨潤圧の増加は横ばい状態であった.

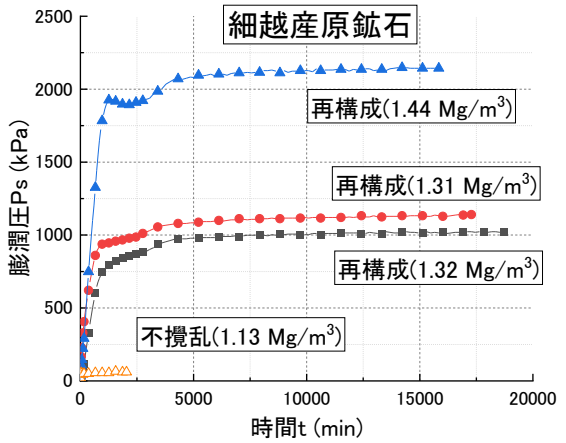


図 3-7　細越産原鉱石の膨潤圧の経時変化曲線

図 3-8 に，最大膨潤圧と乾燥密度の関係を示す．これより，再構成供試体においては最大膨潤圧と乾燥密度の間に比例関係が見られる.不撹乱供試体の最大膨潤圧はおよそ 60 kPa と低くとどまっており，これは乾燥密度が再構成供試体に比べて極めて低いことに因るも

のと考えられる．今後，再構成供試体の乾燥密度を調整したケースを実施し，データベースを拡充する予定である．

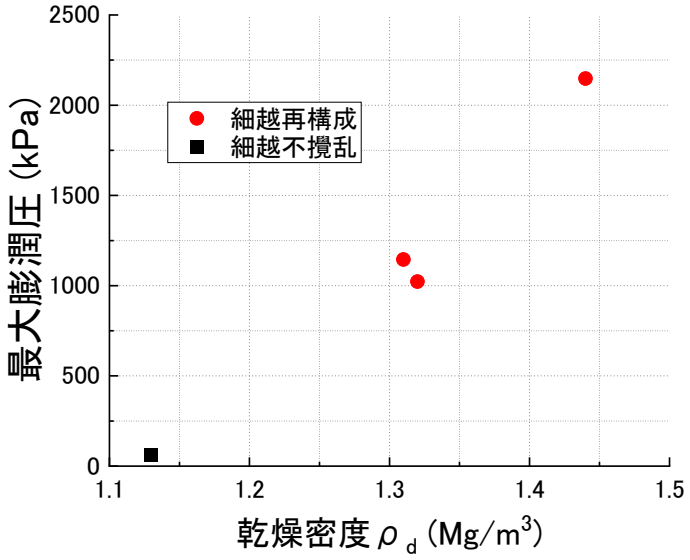


図 3-8　最大膨潤圧－乾燥密度関係（細越産原鉱石）

・黒石産原鉱石

図 3-9 に膨潤圧の経時変化曲線を示す．これより，再構成供試体において，膨潤圧の増加挙動は 2 段階に分かれていることが分かる．一方で，不撹乱供試体においては他の 2 種類の原鉱石と同様，実験開始直後から膨潤圧の増加は横ばい状態であった．

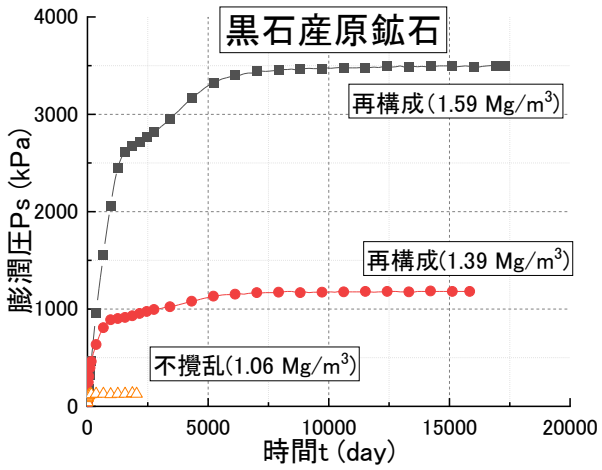


図 3-9　黒石産原鉱石の膨潤圧の経時変化曲線

図 3-10 に最大膨潤圧と乾燥密度の関係を示す．これより，再構成供試体においては最大膨潤圧と乾燥密度の間に比例関係が見られる一方，不攪乱供試体の最大膨潤圧はおよそ 130 kPa と低くとどまっており，これは乾燥密度が再構成供試体に比べて極めて低いことに因るものと考えられる．こちらについても，今後再構成供試体の乾燥密度を調整したケースを実施し，データベースを拡充する予定である．

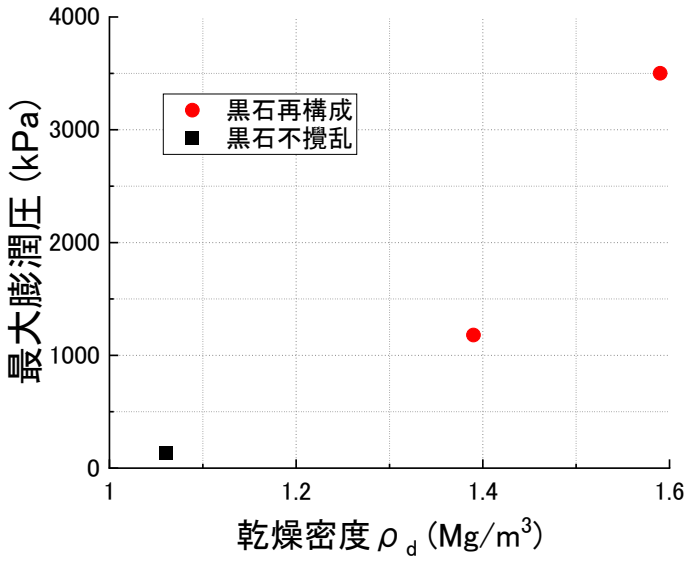


図 3-10　最大膨潤圧－乾燥密度関係（黒石産原鉱石）

以上から，今年度より新たに導入した白崎産・細越産・黒石産原鉱石において，これまでに代表者らの研究で明らかになったのと同様，不攪乱供試体では膠結作用の影響により膨潤圧が著しく低下することが分かった．今後，有効モンモリロナイト密度等の指標を用いて，異なる原鉱石間での統一的な評価を行う予定である．

3.2.2　新たに導入したベントナイト原鉱石の膨潤変形実験結果

本節では，今年度より新たに導入した 3 種類のベントナイト原鉱石について，拘束圧 19.6kPa のもとで膨潤変形実験を実施した結果について述べる．

・白崎産原鉱石

図 3-11 に膨潤変形率の経時変化曲線を示す．これより，再構成供試体の膨潤変形率の経時変化は，実験開始直後に急激に上昇した後に一定値に収束する双曲線形であることがわかる．一方，不攪乱供試体においては，試験開始直後より膨潤変形率の上昇が見られなかった．

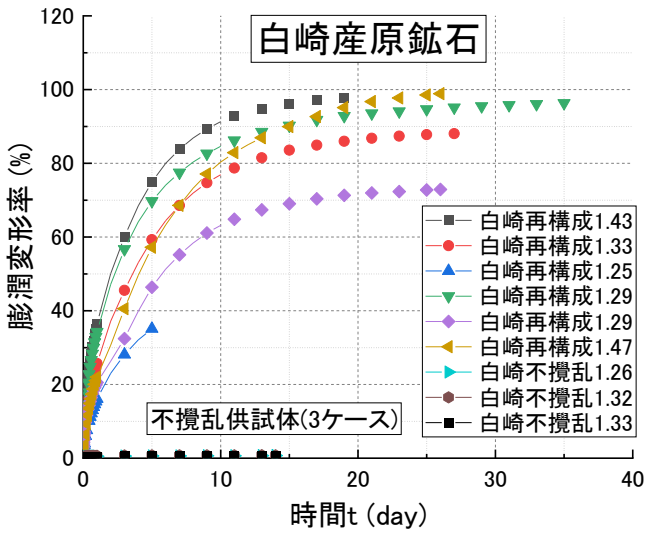


図 3-11　膨潤変形率の経時変化曲線（白崎産原鉱石）

図 3-12 に最大膨潤変形率と乾燥密度の関係を示す．これより，再構成供試体においてはバラつきが見られるものの，最大膨潤変形率と乾燥密度の間に比例関係が見られる．これは本研究でこれまでに見られている傾向と同様である．一方で，不攪乱供試体では最大膨潤変形率が極めて小さい値であった．今後，試験ケースを増やすことにより再現性や低くとどまった要因を明らかにする予定である．

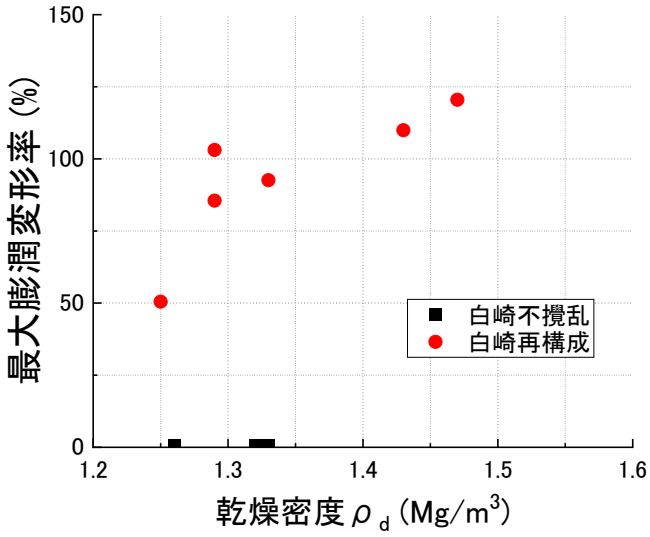


図 3-12　最大膨潤変形率－乾燥密度関係（白崎産原鉱石）

・細越産原鉱石

図 3-13 に膨潤変形率の経時変化曲線を示す．これより，再構成供試体の膨潤変形率の経時変化は，白崎産原鉱石と同様に実験開始直後に急激に上昇した後に一定値に収束する双曲線形であった一方，不撹乱供試体においては，試験開始直後より膨潤変形率の上昇が見られなかった．

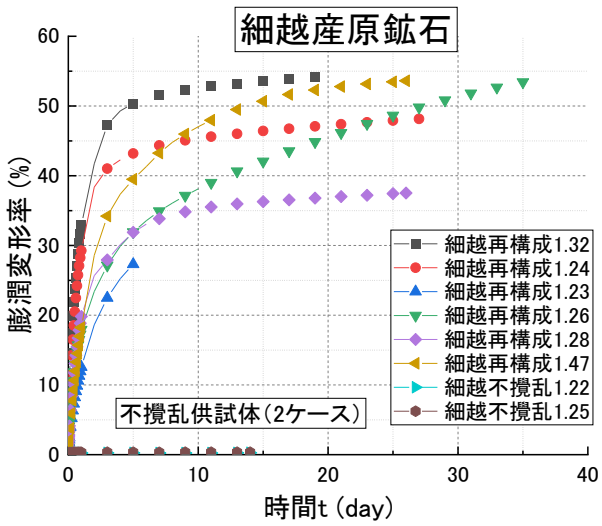


図 3-13　膨潤変形率の経時変化曲線（細越産原鉱石）

図 3-14 に最大膨潤変形率と乾燥密度の関係を示す．これより，再構成供試体においては

バラつきが大きいものの，乾燥密度が高いほど最大膨潤変形率も増加する傾向が見られる．不攪乱供試体については，白崎産原鉱石と同様極めて小さい膨潤変形率にとどまった．

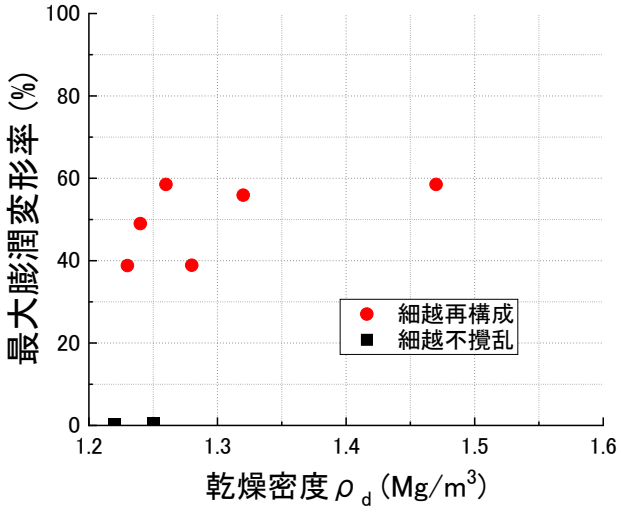


図 3-14　最大膨潤変形率－乾燥密度関係（細越産原鉱石）

・黒石産原鉱石

図 3-15 に膨潤変形率の経時変化曲線を示す．これより，再構成供試体の膨潤変形率の経時変化は，白崎産・細越産原鉱石と同様に実験開始直後に急激に上昇した後に一定値に収束する双曲線形であった．不攪乱供試体において，再構成供試体と比べて膨潤変形率は緩やかに増加していることが見受けられた．

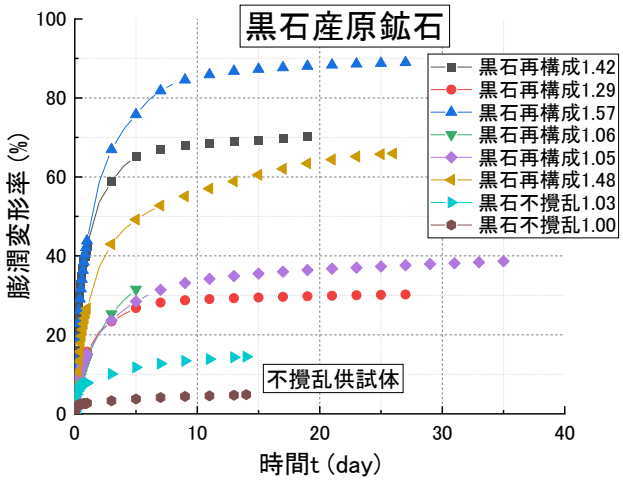


図 3-15　膨潤変形率の経時変化曲線（黒石産原鉱石）

図 3-16 に最大膨潤変形率と乾燥密度の関係を示す．これより，再構成供試体においては

細越産原鉱石と同様バラつきが大きいものの，乾燥密度が高いほど最大膨潤変形率も増加する傾向が見られる．不撹乱供試体については，再構成供試体に比べて 1/2 程度に留まっており，月布産原鉱石と同様の傾向であった．

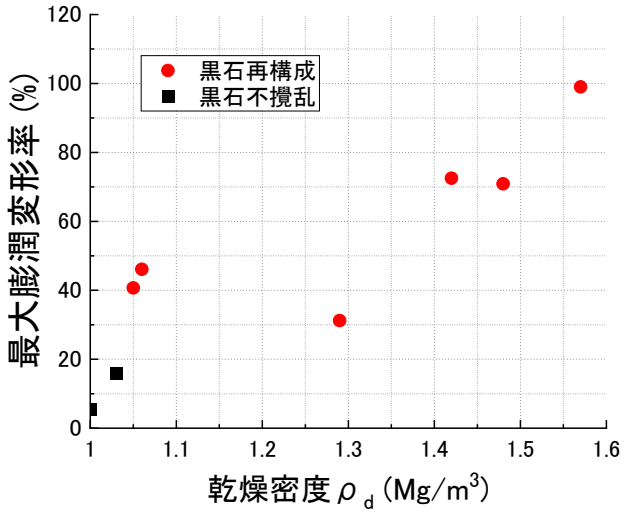


図 3-16　最大膨潤変形率－乾燥密度関係（黒石産原鉱石）

以上から，今年度より新たに導入した白崎産・細越産・黒石産原鉱石において，これまでに代表者らの研究で明らかになったのと同様，不撹乱供試体では膠結作用の影響により一次元膨潤変形率が著しく低下することが分かった．今後，有効モンモリロナイト密度等の指標を用いて，異なる原鉱石間での統一的な評価を行う予定である．

3.2.3　高拘束圧の一次元膨潤変形実験結果

ベントナイト系緩衝材が地下水圧やガス圧（オーバーパックの腐食に伴う水素ガス発生時）などによる高拘束圧を受けた場合における，膨潤変形による隙間充填現象を想定して，高拘束圧下における一次元膨潤変形実験を実施した．与えた拘束圧は 100 kPa，500 kPa とした．その際，膨潤圧実験装置においてクランプノブを締めずに解放しておき，ベロフラムシリンダー内の空気圧を調整して軸圧が 100 kPa，500 kPa で一定となる条件の下で膨潤変形量を測定した．

表 3-3 に月布産原鉱石，表 3-4 に Ten Sleep 産原鉱石の高拘束圧の一次元膨潤変形率結果を示す．また，図 3-17～図 3-20 にそれぞれのケースにおける時間－一次元膨潤変形率関係を示す．

表 3-3　月布産原鉱石の高拘束圧の一次元膨潤変形実験結果

	拘束圧 100 kPa		拘束圧 500 kPa	
供試体種別	不攪乱	再構成 （～0.425 mm）	不攪乱	再構成 （～0.425 mm）
試験開始時の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.75	1.67	1.71	1.60
試験終了時の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.29	1.16	1.70	1.52
試験終了時含水比（%）	41.9	51.6	31.8	55.9
試験終了時飽和度（%）	102.1	103.0	139.0	189.9
初期含水比(%)	8.5	7.2	8.4	10.0
初期飽和度（%）	40.7	30.4	37.5	37.8
最大一次元膨潤変形率 (%)	35.3	44.0	0.6	4.9

表 3-4　Ten Sleep 産原鉱石の高拘束圧の一次元膨潤変形実験結果

	拘束圧 100 kPa		拘束圧 500 kPa	
試料名	不攪乱	再構成（～0.425 mm）	不攪乱	再構成（～0.425 mm）
試験開始時の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.53	1.38	1.54	1.48
試験終了時の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.47	0.70	1.44	1.13
試験終了時含水比（%）	36.0	109.0	35.7	56.0
試験終了時飽和度（%）	118.0	104.2	112.8	109.9
初期含水比(%)	24.8	8.0	26.7	14.2
初期飽和度（%）	89.2	23.1	96.7	47.6
最大一次元膨潤変形率 (%)	4.1	97.3	6.3	31.3

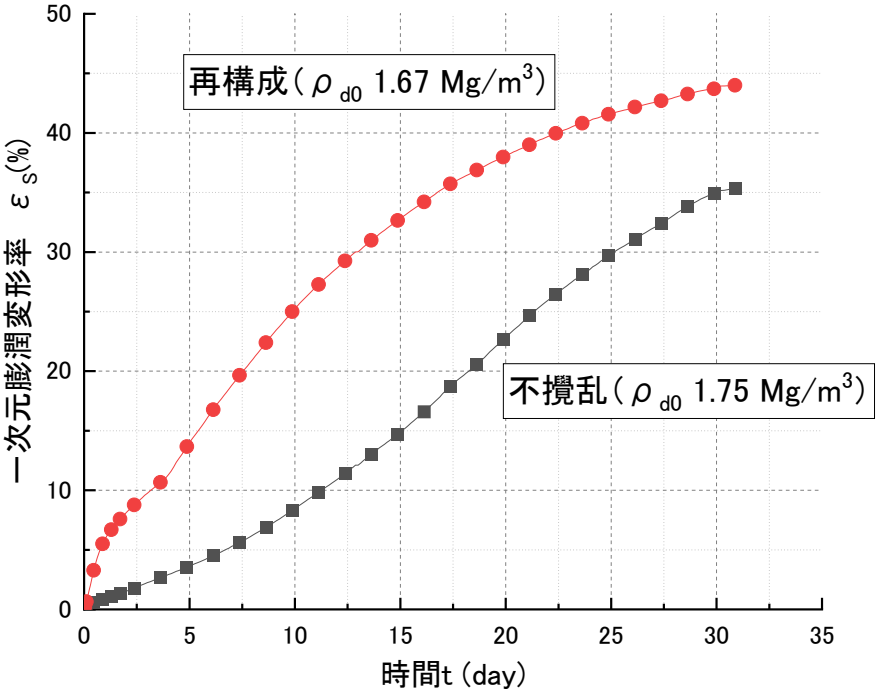


図 3-17　月布産原鉱石拘束圧 100 kPa の時間－一次元膨潤変形率関係

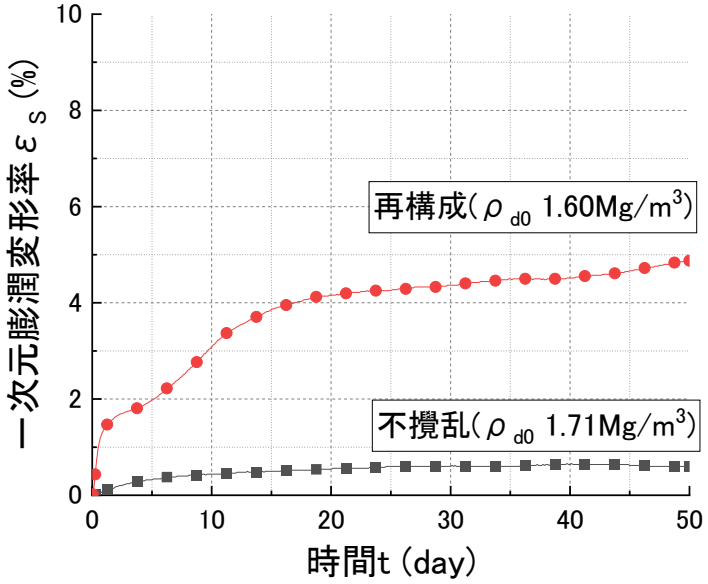


図 3-18　月布産原鉱石拘束圧 500 kPa の時間－一次元膨潤変形率関係

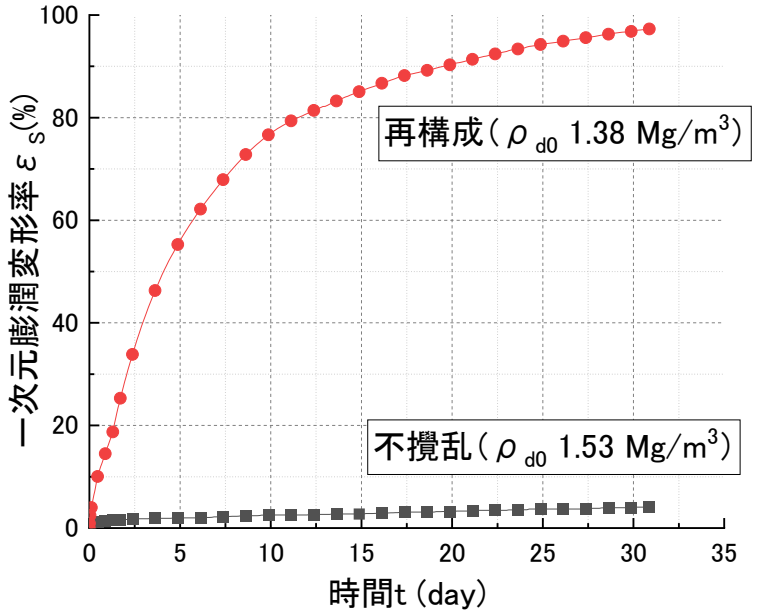


図 3-19　Ten Sleep 産原鉱石拘束圧 100 kPa の時間－一次元膨潤変形率関係

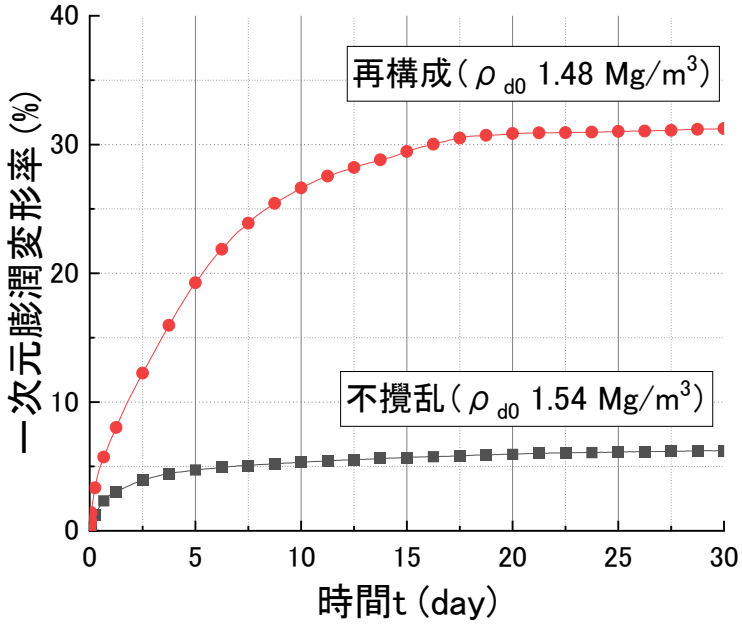


図 3-20　Ten Sleep 産原鉱石拘束圧 500 kPa の時間－一次元膨潤変形率関係

これより，再構成供試体においては，月布産・Ten Sleep 産原鉱石のいずれも低拘束圧（19.6 kPa）と同様，試験開始直後に一次元膨潤変形率が急激に上昇し，その後収束する双曲線形の経時変化であることが分かる．ただし，一次元膨潤変形率の値自体は，拘束圧が高まるにつれて低下した．

不攪乱供試体においては，月布産原鉱石（拘束圧 100 kPa）の条件のみ双曲線形の経時変化を示したが，それ以外のケースにおいては試験開始直後から最後に至るまで上昇が見られずほぼ一定の値に留まった．一次元膨潤変形率の値も拘束圧が高まるほど低下した．

3.2.4　自己修復性評価手法の構築・提案

本節では，地層処分システムの安全評価への本研究成果の適用方法として，膠結作用に伴う特性変化を考慮した緩衝材の自己修復性評価手法の概要について述べる．

ベントナイト系緩衝材の設計にあたっては，既往研究[3)]により設計フローが提示されている．本フローを図 3-21 に示す．このフローは仕様設計の概念に基づいて策定されており，低透水性や自己シール性等の要件項目に基づいた材質・厚さを設定し，第一段階として緩衝材単独の設計仕様を確定する．この時，低透水性など個別の性能ごとに，関連する物理指標の基準値を求め，それを満たす仕様（材質・厚さ・乾燥密度など）を設定する．その後，第二段階として，応力緩衝性や熱伝導性等，緩衝材とそのほかのバリア材の相互作用

を考慮した，人工バリアシステム全体における設計仕様を確定する．最後に第三段階として，化学的緩衝性や長期健全性など，性能評価に係る確認を行い緩衝材の設計仕様を確定する．このうち，本研究で対象としている，ベントナイトの膨潤特性における膠結作用の影響評価は，本フロー内の「性能評価等における確認」，特に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) [20]では，長期健全性に関わる緩衝材の技術要件として，自己修復性や耐熱性，緩衝材流出の抑制，自己シール性など 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．特に前者については，施工から長期間経過後に生じた隙間の充填も対象となるため，本研究で得られた成果は，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自己修復性が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．

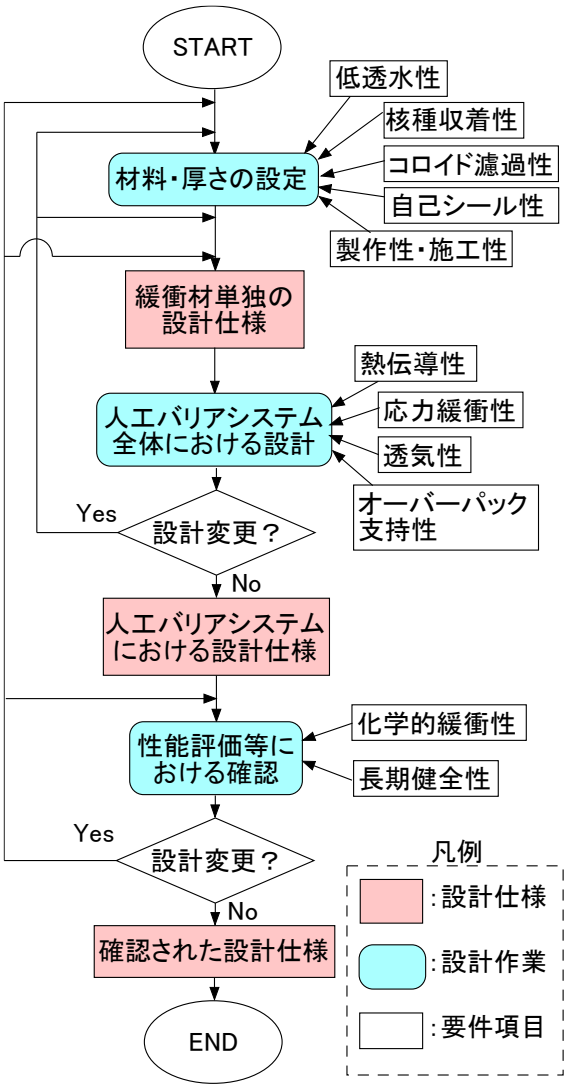


図 3-21　緩衝材の設計フローの一例 [3]

自己修復性において想定される緩衝材の主な損傷要因として，処分後 1000 年経過以降の発生が想定される，オーバーパック腐食に伴う水素ガス発生・破過現象が挙げられる [21]．図 3-22 に本現象の概念図を示す．還元環境下において，オーバーパック中の鉄と水との接触により水素ガスが発生し，緩衝材の低透気性により間隙水を置換するように緩衝材間隙にたまることが想定される．ガスの発生量（供給量）が過大となる場合，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することが懸念される [22]．この割れ目を膨潤変形により再充填することが，自己修復性として安全確保の上で緩衝材には長期的に求められる．

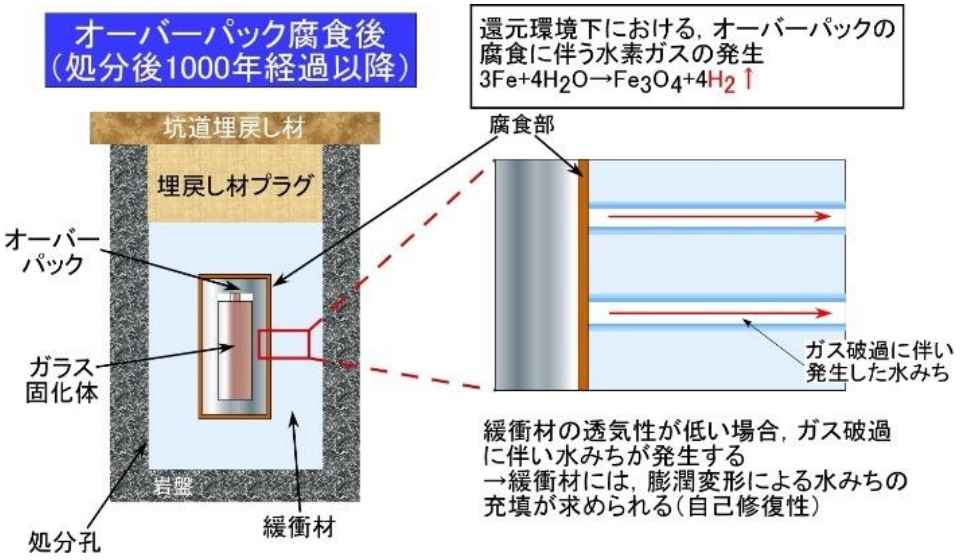


図 3-22　オーバーパックの腐食に伴う水素ガスの発生・破過に関する概念図

続いて，本研究で得られた実験データを活用して，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，自己修復性評価手法の概要を説明する．図 3-23～図 3-25 に，代表者らのこれまでの研究で得られた，各原鉱石における膨潤特性・自己シール性実験結果について，横軸を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・100 kPa・500 kPa）をそれぞれ指している．

これらから，いずれの原鉱石において，不攪乱・再構成供試体のいずれも拘束条件の差異に因らず，試験後乾燥密度と拘束圧の間には一意な関係が見受けられた．再構成供試体

において，粒度の差異による拘束圧への影響は見受けられなかった．また，乾燥密度が大きくなるにつれて，拘束圧が指数関数的に上昇する傾向が見受けられた．

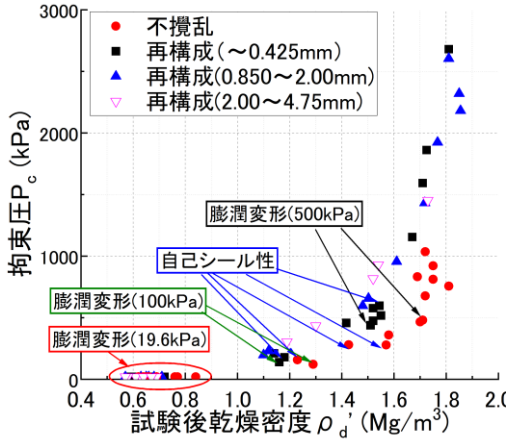


図 3-23　月布産原鉱石の拘束圧－試験終了時乾燥密度関係

（自己シール性：自己シール性試験結果，膨潤変形（○○kPa）：載荷圧○○kPa 下の膨潤変形試験結果（例えば膨潤変形（19.6kPa）は載荷圧 19.6kPa 条件下での膨潤変形試験結果），その他：膨潤圧試験結果　図 3-24・図 3-25 も同様）

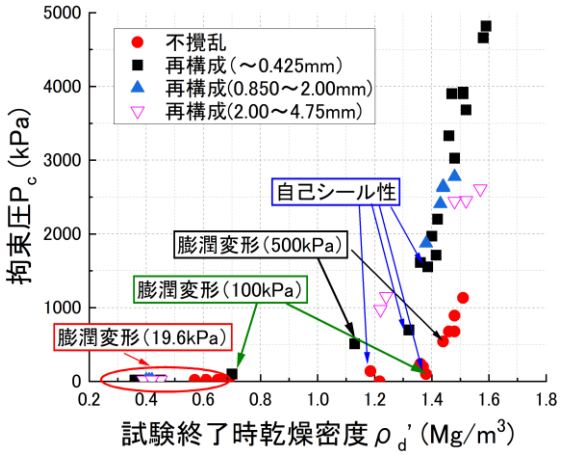


図 3-24　Ten Sleep 産原鉱石の拘束圧－試験終了時乾燥密度関係

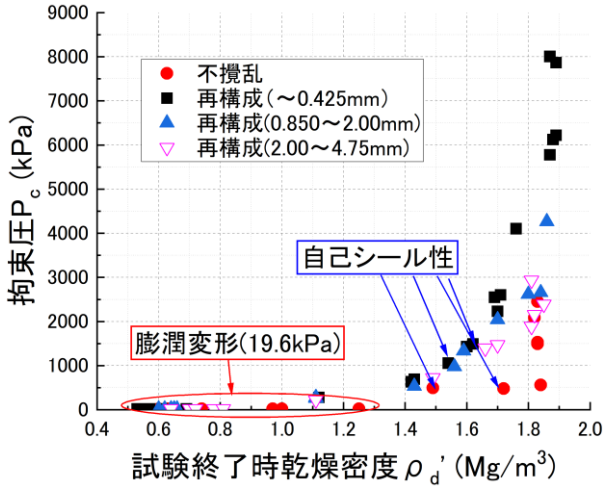


図 3-25　劉房子産原鉱石の拘束圧－試験終了時乾燥密度関係

また, 図 3-26～図 3-28 に, 図 3-23～図 3-25 の各図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[23]において明らかにされているためである.

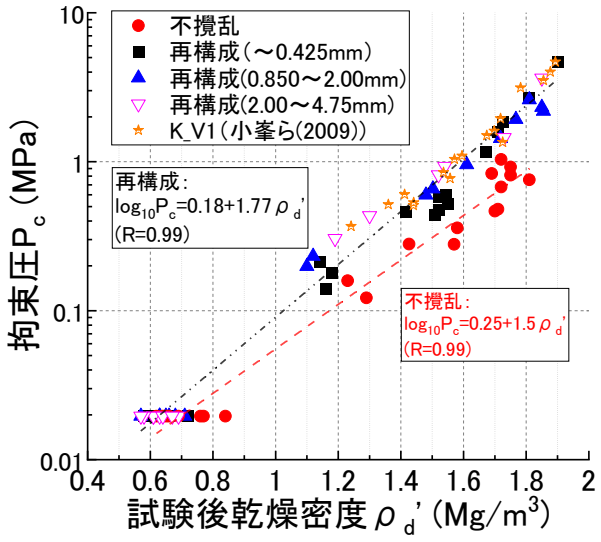


図 3-26　月布産原鉱石の拘束圧（対数軸）と試験後乾燥密度の関係

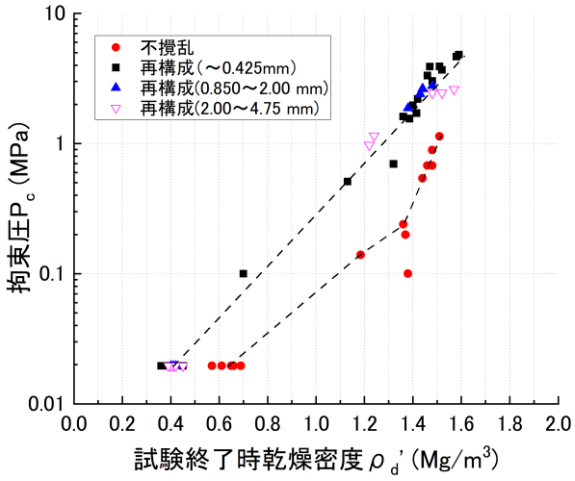


図 3-27　Ten Sleep 産原鉱石の拘束圧（対数軸）と試験後乾燥密度の関係

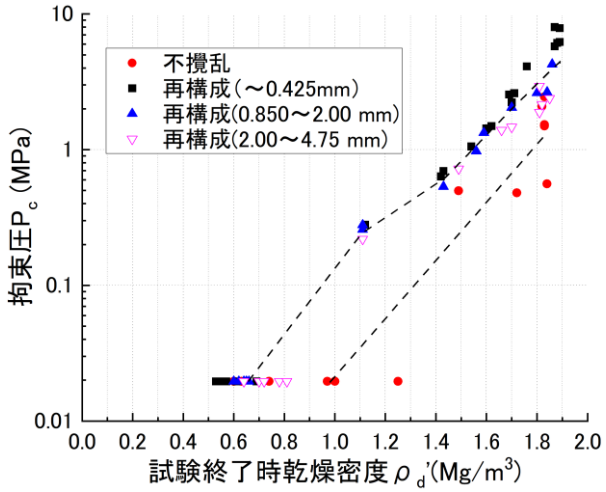


図 3-28　劉房子産原鉱石の拘束圧（対数軸）と試験後乾燥密度の関係

図 3-26 には，日本国内の地層処分に関連する研究で標準的に用いられているベントナイト試料である，クニゲル V1（クニミネ工業製，K_V1）の実験結果 [24]を併記した．これより，再構成供試体と K_V1 供試体の拘束圧－乾燥密度関係には高い整合性が見受けられる．また，再構成供試体と K_V1 供試体，および不撹乱供試体における，*Pc* と ρ_d'の実験関係式が一義的に示された．このことから，拘束条件に伴う乾燥密度の変動範囲が想定されれば，膨結作用を受けて変質した場合の発生圧力（拘束圧）の応答をこの関係から示すことができる．

そして，図 3-26～図 3-28 中に示している，再構成供試体と不撹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，Ten Sleep 産原鉱石・劉房子産原鉱石の

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，原鉱石の地質年代の古さに応じてギャップが増大しており，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と推察する．本検討条件下では，不攪乱供試体の拘束圧は再構成供試体に比べて 1/2 程度であったが，緩衝材が膠結作用を受けた場合でも，膨潤変形に伴う一定の圧力の発揮が期待できることが示された．

続いて，地層処分事業の開始から数千年～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 3-29 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 3-26）を用いた概念図を図 3-30 として示す．

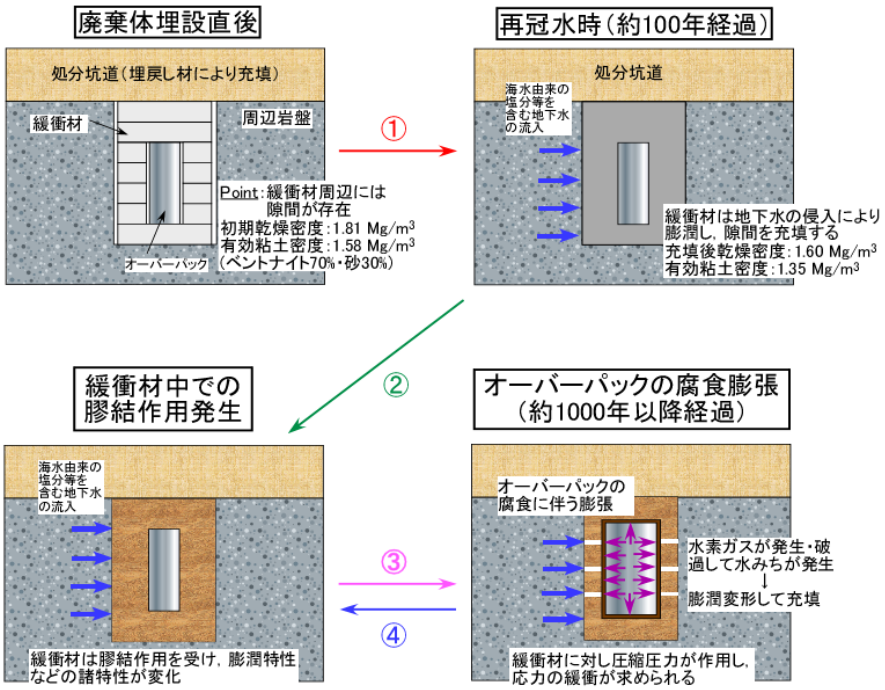


図 3-29　想定される緩衝材の経時的な状態変化

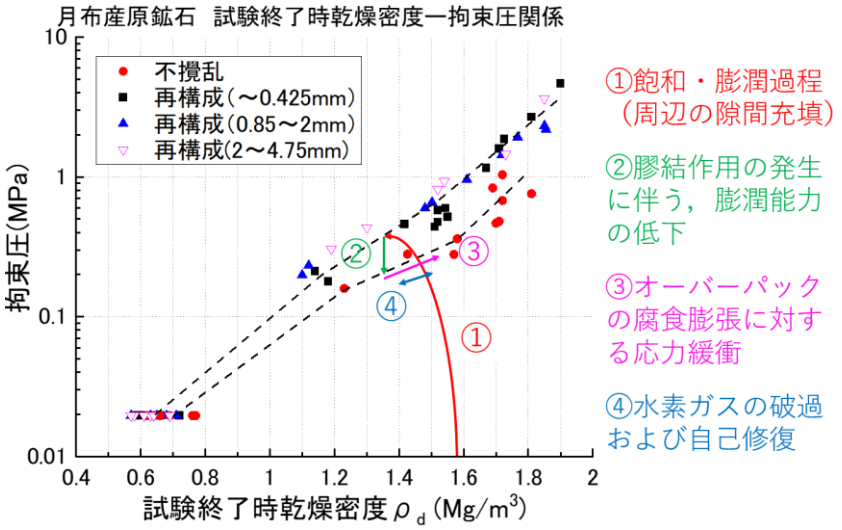


図 3-30　　緩衝材の経時的な状態変化に伴う乾燥密度-拘束圧関係の変化概念図

緩衝材が製作されて処分孔に設置される場合，参考文献 3)および 21)に依れば，初期乾燥密度は 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（ベントナイト乾燥密度）は 1.58 Mg/m^3 である．

操業後数十年から 100 年程度の期間において，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すると考えられる．周辺岩盤やオーバーパックの変形，あるいは緩衝材の流出を考慮しない場合，隙間充填後乾燥密度は 1.60 Mg/m^3，有効粘土密度は 1.35 Mg/m^3 となる [3),21)]（図 3-30 中の①に該当）．

その後，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）．

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．

3.3 残された課題と今後の計画

今年度の研究において残された課題を以下に示す.

1) 今年度より新たに導入した，白崎産・細越産・黒石産原鉱石における，不攪乱試料・再構成試料の膨潤特性にバラつきが見られたため，再現性の確認が必要となる.
2) 地質年代に代わる新たな力学指標を模索するため，不攪乱試料を用いて弾性波試験等の非破壊試験を実施する.
3) 膠結作用によるセメンテーションの程度を視覚的に把握するため，再構成試料の薄片供試体を作製して SEM-EDS 分析を行い，不攪乱試料－再構成試料間や原鉱石間での比較を行う必要がある.
4) 今年度において構築・提案した自己修復性評価手法において，シナリオの見直しや対象データの拡充による高度化が必要である.

上記の課題と 2 か年の研究計画を踏まえて，2022 年度の研究スケジュールを表 3-5 に示す.

表 3-5　2022 年度の研究スケジュール

項　目	2022/4	5	6	7	8	9	10	11	12	2023/1	2	3
白崎・細越・黒石産原鉱石の膨潤圧・膨潤変形特性の評価		→	→	→	→	→						
弾性波試験をはじめとする非破壊力学特性試験による地質年代に代わる代替指標の究明		→	→	→	→	→	→	→	→			
再構成試料の薄片作製と SEM 観察			→	→	→	→	→	→	→	→		
自己修復性評価手法の高度化							→	→	→	→	→	
2022 年度報告書作成										→	→	

4. まとめ

今年度，本研究で得られた成果を以下に示す.

1) 今年度より新たに導入した，3 種類の Na 型ベントナイト原鉱石から作製した不攪乱試料・再構成試料の膨潤圧，膨潤変形特性を評価した．その結果，白崎産・細越産・黒石産原鉱石において，不攪乱試料の膨潤圧特性は膠結作用の影響により約 1/2 以上低下することが明らかとなり，これまでに実施した Na 型ベントナイト原鉱石と同様の傾向が見られた．また，膨潤変形特性において，特に白崎産・細越産原鉱石の不攪乱試料において一次元膨潤変形率が著しく低くとどまっている傾向が見られ，黒石産原鉱石の不攪乱試料では再構成試料の約 1/2 に留まっていた．今後，再現性の確認を目的とした実験的検討を継続し，試験結果の精度向上とデータベースの拡充を目指す.
2) 月布産原鉱石・Ten Sleep 産原鉱石の不攪乱試料・再構成試料を用いて高拘束圧（100・500 kPa）下での膨潤変形特性を評価した．その結果をもとに拘束圧－乾燥密度関係として整理し，膨潤圧実験や低拘束圧下の膨潤変形実験結果と比較したところ，拘束条件に依らず不攪乱試料・再構成試料のいずれも拘束圧と乾燥密度の間に一意な関係にあることが示された.
3) これまでに得られた各種膨潤特性実験結果に基づいた拘束圧－乾燥密度関係と，緩衝材の状態変化シナリオ（操業初期→再冠水→膠結作用発生→オーバーパック腐食）を組み合わせて緩衝材の自己修復性評価手法の提案を行った．今後，シナリオの見直しや対象データの拡充により，本評価手法の高度化を目指す.

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) 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.

15) 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.

16) 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.

17) 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.

18) Komine, H., and Ogata, N.: Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite, Canadian Geotechnical Journal, Vol.31, No. 4, pp.478-490, 1994.

19) Wang, H., Komine, H., Gotoh, T. : A swelling pressure cell for X-ray diffraction test, Géotechnique, doi.org/10.1680/jgeot20.0005, 2021.

20) 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.

21) 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.

22) 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.

23) 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.

24) 小峯秀雄，安原一哉，村上哲：人工海水環境下におけるベントナイトの一次元自己シール性，土木学会論文集 C，Vol.65, No.2, 389-400, 2009.

2021 年度　外部発表

【学術論文】

1. （査読付き）伊藤大知，王海龍，小峯秀雄：高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるバリア材の超長期的劣化に伴う性能変化の評価方法－ベントナイト系緩衝材の膠結作用に伴う特性変化を考慮した自己修復性評価手法の提案，地盤工学会誌，2022 年 4 月号.（掲載決定，印刷中）

【口頭発表】

1. 伊藤大知，王海龍，小峯秀雄：種々の拘束条件におけるベントナイト原鉱石の拘束圧―乾燥密度関係の評価，第 56 回地盤工学研究発表会（オンライン），13-6-4-02，2021 年 7 月 13 日.

研究報告 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

鳥取大学　学術研究院 工学系部門

河野　勝宣

【 目 次 】

1. 背景・目的 1
2. 全体研究計画（2 ヵ年における全体計画） 3
3. 2021 年度研究実施内容 5
3.1 2021 年度の計画，実施方法 5
3.2 2021 年度の成果内容 16
3.3 残された課題と今後の計画 33
4. まとめ 33

参考文献

2021 年度外部発表

1. 背景・目的

放射性廃棄物の地層処分は，我が国でも現実味を帯びた重要課題である．**図 1** に示すように，これまで，人工バリア材（ベントナイト系材料）の膨潤特性・透水性・自己シール性 [1)-9)]，ベントナイトの隙間充填性 [10)-12)]，セメント系材料の接触やオーバーパックの腐食に伴うベントナイトの変質 [13)-21)]などの実験的研究，また，天然バリア材（結晶質岩や堆積岩）の透水性評価 [22)-24)]や亀裂の閉塞 [25)-32)]に関する研究など，多くの研究者・技術者らの努力により，膨大な研究成果が蓄積されてきている．

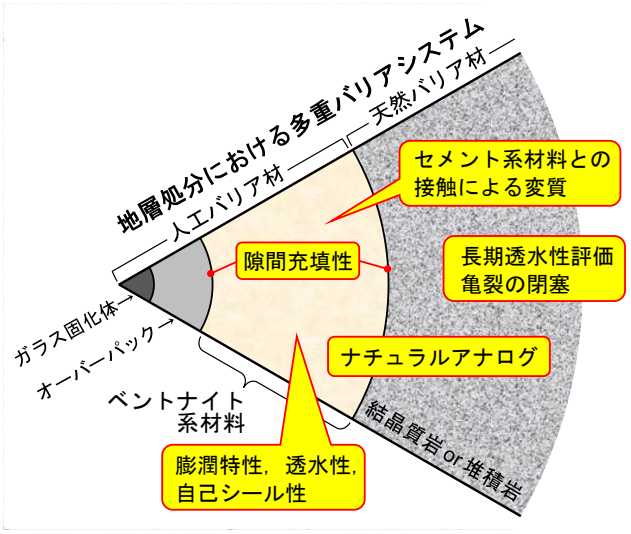


図 1　地層処分における人工バリア材および天然バリア材に関する研究動向

研究代表者も，粘土鉱物学的アプローチによるベントナイト系材料の膨潤特性や透水性評価 [33),34)]，微細鉱物で充填された亀裂を含む岩石の透水性評価 [35)]について実験的検討を多く実施してきた．地層処分において，EDZ 等の岩盤の損傷部や潜在亀裂部は遮蔽性を高めるためにも粘土鉱物等の微細鉱物で充填されている方が望ましい．このような岩盤の亀裂閉塞や透水性に関する共同研究 [30),31)]を実施してきた中で，「岩盤の亀裂閉塞は，地層処分に関しては，ベントナイト系材料が最も関与するのではないか？」等の議論を重ねてきた．ベントナイトと巨視亀裂を含む花崗岩を接触させた 2 層一体の供試体を用いて，予察的に行った実験では，ベントナイトにより岩石の亀裂が閉塞する様子を観察することができた（**図 2**）．また，研究代表者は，ベントナイト系材料は使用する溶液の種類の違いにより膨潤圧および透水係数が異なることを実験的に明らかにした [34)]．つまり，ベントナイト系材料

に作用する地下水中の化学成分の違いにより，亀裂の閉塞度合いもその岩盤の透水性も異なることが予想される．しかし，人工バリアと天然バリアの境界に着目して，ベントナイト系材料が受ける地下水中の化学成分の違いによる岩盤の亀裂閉塞の程度や，それに応じた岩盤の透水性を評価した研究例は国内外にない．このことから，地下水中の化学成分の作用（化学的作用）によるベントナイト系材料の性能劣化と岩盤の亀裂閉塞による性能向上の関係性に着目した下記の研究を着想するに至った．

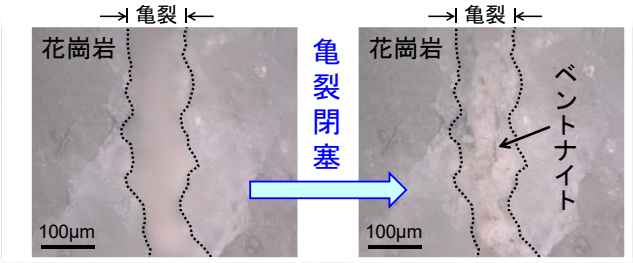


図 2　花崗岩中の亀裂のベントナイトによる閉塞の様子（予備実験）

放射性廃棄物地層処分において，化学的作用による人工バリア材（ベントナイト系材料）の膨潤性能や透水性能の低下は，緩衝材の性能を劣化させる負の効果である反面，化学的作用によるベントナイトの物性変化（粘性の低下や流動等）により，天然バリア材（岩盤）中の亀裂を閉塞させてバリア機能を高めるといった正の効果と捉えることもできる．ベントナイトに作用する地下水中の化学成分の種類の違いにより，岩盤中の亀裂の閉塞の程度も異なることが考えられ，それに対応して岩盤の透水性などの物性も大きく異なることが予想される．しかし，化学的作用によるベントナイトの性能劣化と岩盤の亀裂閉塞による性能向上の関係性を明らかにした例はない．そのため，人工バリア材と天然バリア材境界領域に着目して，ベントナイト系材料が受ける地下水中の化学成分の種類の違いによる劣化度合いと岩盤の亀裂閉塞の程度，それに応じた岩盤の物性を評価することは非常に重要である．

本研究では，地層処分において起こり得る化学的作用を想定して，種々の溶液に浸漬させて化学的作用を促進させたベントナイトを用いた各種実験を行う．特に，人工バリア材（ベントナイト系材料）と天然バリア材（岩盤）の物性に及ぼす溶液の化学成分の違いの影響を明らかにし，ベントナイト系材料の劣化に伴う岩盤亀裂充填性のモデル化を行う．さらに，人工バリアおよび天然バリアの両バリア材の相互作用関係から，化学的作用による

ベントナイトの性能劣化と岩盤の亀裂閉塞による性能向上の関係性を明らかにする．

本研究が完遂した際には，地層処分に関わる人工・天然バリア材のより確実な長期安全性の実現に対して，これまで知り得なかった情報を取得でき，さらに，地下環境の状況に応じた適切なバリア材の選定・管理にも貢献できると考える．一方，近年の地震，津波，火山噴火などの地表での被害を考えると，力学的に安定した地下岩盤利用の可能性を広げることは必須である．地下環境下での透水性などの物性の把握により，地下環境の有効利用やエネルギー資源抽出・掘削の際の安定性評価に関する研究にも展開できると予想される．このように，地盤工学や地殻工学・資源開発分野のみならず幅広い分野において波及効果が期待できる．

2. 全体研究計画（2 ヵ年における全体計画）

本研究は，地層処分において起こり得る化学的作用を想定して，種々の溶液に浸漬させて化学的作用を促進させたベントナイトの透水試験および膨潤・充填性同時試験とこれらのモデル化，化学的作用を促進させたベントナイトで充填された亀裂を含む岩石の透水試験，さらに，X 線回折分析および走査型電子顕微鏡による組成分析・構造解析を実施する．これにより，放射性廃棄物地層処分における人工・天然バリア材の超長期の安全性実現に大きく貢献できる基礎的データを得ることを目標とする．

2021 年度は，次の(1)～(4)の項目を実施する計画である．最後に，データの取りまとめを行い，報告書を作成する．

(1) 実験条件を決定するための文献調査

地層処分において起こり得る地下水の化学成分の作用（化学的作用）に関する文献調査を行い，ベントナイト試料の膨潤・充填性同時試験および透水試験の実験条件（亀裂開口幅，溶液の種類，溶液の通水方法，締固めベントナイトの初期含水比等）を決定する．

(2) ベントナイト試料の膨潤・充填性同時試験および透水試験

各種溶液環境下における締固めたベントナイトの一次元膨潤圧試験および透水試験を実施し，膨潤圧および透水係数のデータを取得し，ベントナイトの膨潤特性および透水性に及ぼす化学的作用の影響を確認する．また，締固めたベントナイトと亀裂を含む岩石と模擬亀裂を含むアクリルを接触させた供試体を用いて，膨潤・充填性同時試験を実施する．期間は 300 日間程度連続での実施を予定しており，10 日間程度ごとにベントナイトの膨潤

圧および隙間充填量のデータを取得する．ベントナイトの初期含水状態（乾燥状態または飽和状態），各種溶液の通水方法，亀裂開口幅等は文献調査結果を基に適切に設定する．試験前後には，各種分析（XRD, XRF, SEM, EPMA）を実施し，XRD, XRF では試験前後の鉱物組成の変化の確認を，SEM, EPMA では試料の構造の観察と分布の様子を観察する．これにより，亀裂部におけるベントナイトの充填物質だけでなく，各種溶液由来の析出物や岩石との反応生成物の有無についても確認する．

(3) ベントナイト試料の岩石亀裂充填性のモデル化

充填量には試料の膨潤圧が最も寄与するものと考えられるが，その他の因子も影響するのか否か，膨潤圧と試料の物性との関係，変質によるベントナイトの物性変化も含めて，ベントナイト試料の岩石亀裂充填性のモデル化を実施する．

(4) ベントナイト試料で充填された亀裂を含む岩石の透水試験装置の製作と予備試験

直径 50 mm，高さ 40 mm 程度の岩石供試体（インタクトおよび巨視亀裂を含む供試体）を用いて，地下の圧力環境を表現可能な定水位型透水試験装置を製作し，予備試験および各種データ取得環境の整備を実施する．

2022 年度は，次の(5)～(7)の項目を実施する計画である．最後に，データの取りまとめを行い，化学的作用によるベントナイトの性能劣化と亀裂閉塞による岩盤の性能向上の関係性について考察を行ったうえで，総括報告書を作成する．

(5) ベントナイト試料の膨潤・充填性同時試験および透水試験

前年度に引き続き同様の実験を実施し，データを取得する．ただし，前年度の実験結果および委員会での指摘事項を踏まえて実験条件等を修正，追加実験の実施を検討する．

(6) ベントナイト試料の岩石亀裂充填性のモデル化の改良

前年度の取得データおよび継続実験の取得データを踏まえて，モデルの改良を行う．

(7) ベントナイト試料で充填された亀裂を含む岩石の透水試験

岩石供試体（結晶質岩と堆積岩を予定）の巨視亀裂部にベントナイトを充填して透水試験を実施する．ここでは，封圧を変更しながら，地下 500 m 程度までの圧力環境下での実験を予定している．また，精製水および各種溶液を用いて透水する予定であり，化学的作用を促進させたベントナイトが岩石の遮蔽性能に及ぼす影響を調べる．

3. 2021 年度研究実施内容

3.1 2021 年度の計画，実施方法

前章で述べたように，2021 年度は**表 1** の工程で(1)～(4)の項目を実施する．以下，各項目の実施方法について記述する．なお，項目(4)の一部については，学術論文としてまとめ，外部発表済みである．

表 1　2021 年度の研究工程

研究項目	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
(1) 実験条件を決定するための文献調査	→											
(2) ベントナイト試料の膨潤・充填性同時試験および透水試験		→	→	→	→	→	→	→	→	→		
(3) ベントナイト試料の岩石き裂充填性のモデル化								→	→	→	→	
(4) ベントナイト試料で充填された亀裂を含む岩石の透水試験装置の製作と予備試験	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	
2021年度報告書作成										→	→	→

3.1.1　実験条件を決定するための文献調査

ベントナイト試料の膨潤・充填性同時試験および透水試験における実験条件（亀裂開口幅，溶液の種類，溶液の通水方法，締固めベントナイトの初期含水比等）を決定するために，関連する学術論文，研究ノート，国際会議プロシーディングス，研究報告，原子力発電環境整備機構（NUMO）報告書，日本原子力研究開発機構（JAEA）／核燃料サイクル開発機構（JNC）／動力炉・核燃料開発事業団（PNC）報告書，電力中央研究所（CRIEPI）報告書，原子力環境整備促進・資金管理センター（RWMC）報告書，関連書籍[例えば 36)-38)など]を用いて，地層処分において起こり得る化学的作用に関する文献調査を行った．このうち，本研究と関連深い文献（地層処分における緩衝材の流出／侵入特性に関する報告書）[39)-47)]と地層処分研究開発第 2 次取りまとめ[48)]，さらに，NUMO 包括的技術報告[49)]をはじめとする多数の NUMO 報告書を重点的に調査した．

3.1.2　ベントナイト試料の膨潤・充填性同時試験および透水試験

各種溶液環境下における膨潤・充填性同時試験および透水試験を実施し，ベントナイトの膨潤圧，隙間充填量および透水係数を取得する．

(1) 膨潤・充填性同時試験

ベントナイトの膨潤・充填性同時試験装置の概略図および写真を**図 3** に示す．本試験は恒温室（22±1℃）内にて実施した．本装置は，アクリル製の治具を用いて円柱のベントナイト供試体を固定し，ベントナイトの膨潤圧 P_s と亀裂への侵入距離 δ_e を同時に計測することが可能である．上中下のアクリル板の間に薄スペーサーを設置することで，上側と下側に 2 か所の模擬亀裂を表現した．また，上中板のアクリルを透明にすることで，ベントナイトの侵入距離の観察が可能である．ベントナイトの亀裂への侵入距離 δ_e は，**図 4** に示すように，ベントナイト供試体の側面からの距離とする．供試体の体積変化を拘束した状態で精製水（アズワン製 工業用精製水 A300）または各種溶液（KOH 水溶液，$Ca(OH)_2$ 水溶液，NaOH 水溶液，$MgCl_2$ 水溶液）に水浸させ，上方から写真撮影により，周方向に充填されるベントナイトの侵入距離を約 1 週間間隔で計測した．また，そのときの鉛直方向に発生する荷重 F は小型圧縮型ロードセル（ユニパルス(株)製 UNLS-5KN）およびデータロガー（(株)東京測器研究所製 TDS-303）を用いて 1 分間隔で測定し，式(1)より膨潤圧 P_s を算出した．

$$P_s = \frac{F}{A} \tag{1}$$

ここで，A は供試体の断面積である．液体の水位は中板中央となるように随時給水を行い，水位を維持し，液体を下側の模擬亀裂から供給させた．試験装置は 10 セット製作し，本年度は，**表 2** の条件において 180 日間（7 月 31 日～1 月 26 日）計測を行った．

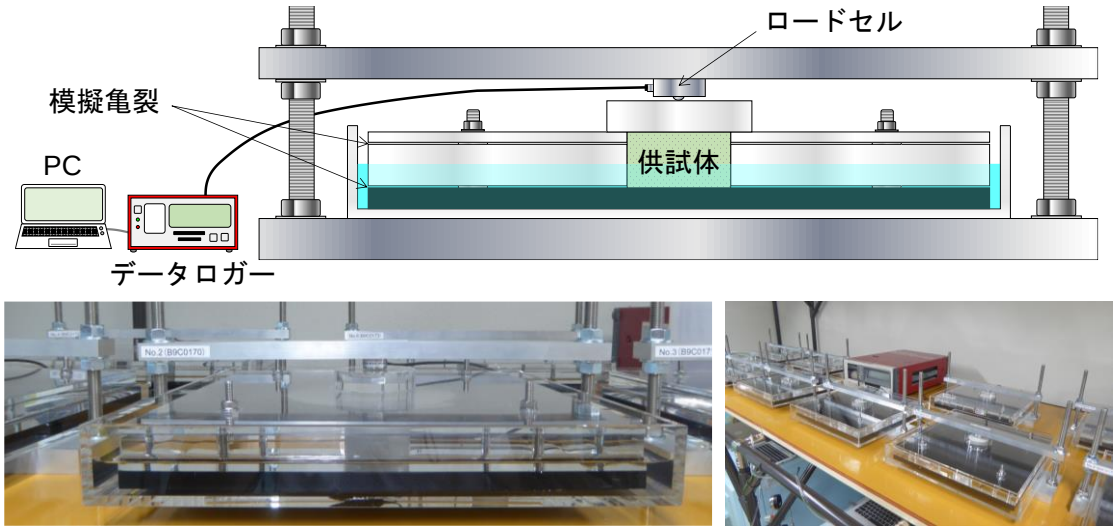


図 3　ベントナイトの膨潤・充填性同時試験装置の概略図および写真

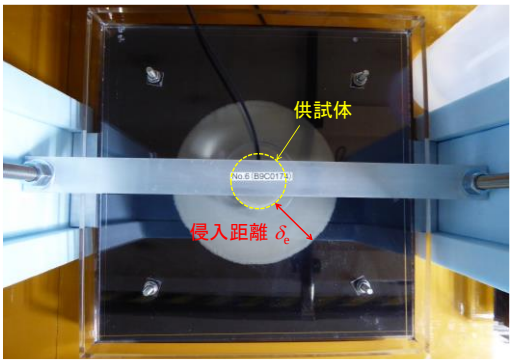


図 4　ベントナイトの亀裂への侵入距離δ_e

表 2　膨潤・充填性同時試験の試験条件

装置 No.	ベントナイトの 乾燥密度 [Mg/m^3]	亀裂幅 [mm]	使用液体
No.1（B9C0169）	1.8	0.5	精製水
No.2（B9C0170）	1.8	1.0	精製水
No.3（B9C0171）	1.8	1.5	精製水
No.4（B9C0172）	1.5	0.5	精製水
No.5（B9C0173）	1.5	1.0	精製水
No.6（B9C0174）	1.5	1.5	精製水
No.7（B9C0175）	1.5	1.5	KOH 水溶液
No.8（B9C0176）	1.5	1.5	$Ca(OH)_2$ 水溶液
No.9（B9C0177）	1.5	1.5	NaOH 水溶液
No.10（B9C0178）	1.5	1.5	$MgCl_2$ 水溶液

供試体は，直径 50 mm，高さ 27 mm の円柱で，所定の乾燥密度になるように静的に締固めて作製した（**図 5**）.

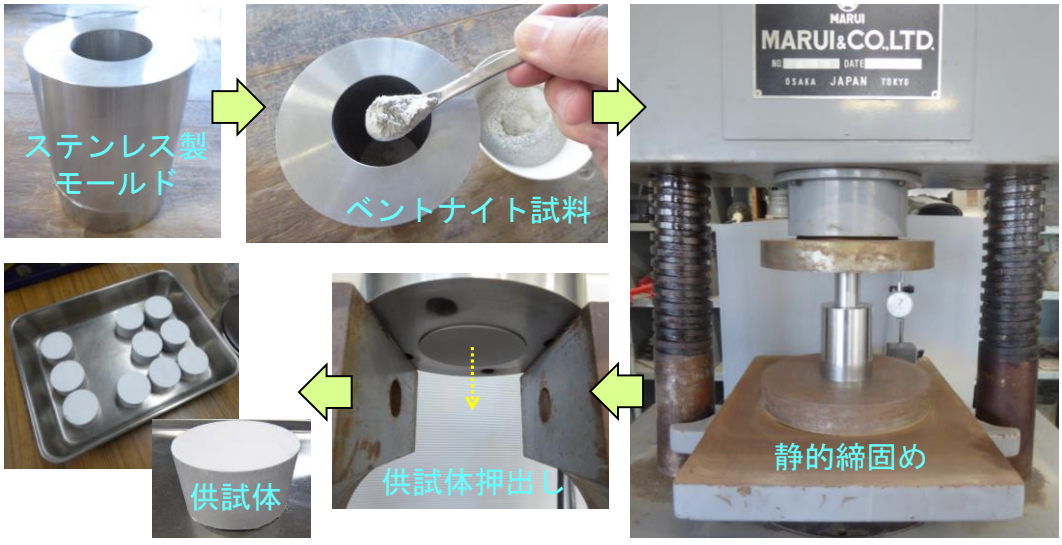


図 5　供試体の作成方法

(2) 透水試験

ベントナイトの透水試験装置の概略図を**図 6** に示す．試験はエアコンプレッサーおよび加圧容器を用いて，供試体に一定の透水圧で通水（精製水または各種溶液）して行った．供試体は，直径 50 mm，高さ 10 mm の円柱で，所定の乾燥密度になるように静的に締固めて作製した．試験は恒温室（22±1°C）内に断熱材で作製した恒温槽内にて実施した．透水係数 k は Darcy 則が成立すると仮定して式(2)を用いて算出した．

$$k = \frac{QL}{hAt} \tag{2}$$

ここで，Q は透水量，L は粘土供試体高さ，h は水位差，A は粘土供試体の断面積，t は測定時間である．透水量は分析天びん（(株)島津製作所製 AUX120，分解能 0.1 mg）を用いて，60 秒間隔でコンピュータにより計測した．水位差 h は加圧容器内の圧力（例えば，透水圧が 0.1 MPa の場合，h = 1020.4 cm）として計算した．透水圧は，透水係数の値に大きな影響を与えるような供試体の変形や，肉眼で確認できるほどの大きさの水みちが発生しないように，膨潤圧以下に設定した．また，分析天びんで計測される透水量は蒸発により刻々と減少していくが，この減少分はデータ整理の段階で透水量に加算することで，蒸発量も考慮した．なお，定圧透水試験装置は既報 [33),34)] と同一の装置であり，本装置を用いて得られたベントナイトの透水係数（5.3×10^{-13} m/s）[33)]は，同一試料・条件下で実施された透水係数（4.8×10^{-13} m/s）[1)]とほぼ同じであることが確認されている．

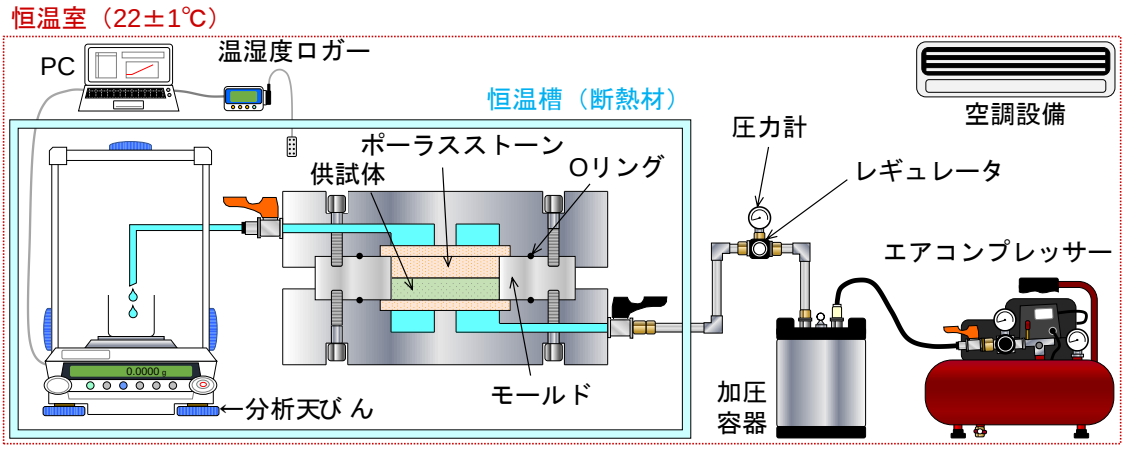


図 6　ベントナイトの透水試験の概略図

3.1.3 ベントナイト試料の岩石亀裂充填性のモデル化

膨潤を伴う緩衝材（ベントナイト）の亀裂への侵入量を予測する解析モデルの構築を行う．既往の報告 [41),42)]では固相拡散理論を適用してベントナイトの侵入現象に関する検討を行っている．固相拡散理論は，ベントナイト中に水が浸潤する挙動と水の浸潤に伴いベントナイトが膨潤する挙動を液相と固相の 2 相の連立した系における物質移動論 [50)]に基づいている（以下,「固相拡散モデル」と記す.）．以下に既往の報告 [41),42)]における水の浸潤に伴うベントナイトの膨潤に関する理論の概要を示す.

水の浸潤に伴うベントナイトの膨潤すなわち体積膨張は，移動論の観点から系内の土粒子の移動に伴う固相率の変化と考えることができる．この土粒子の移動は，固相の全ポテンシャルの勾配によって誘起されると考えると，鉛直一次元では固相内の任意位置の土粒子の流束 q_s は式(3)で与えられる．

$$q_s = -k_s \frac{\partial \psi_s}{\partial z} \tag{3}$$

ここで，k_s，ψ_s はそれぞれ透水係数と水分ポテンシャルのアナロジーとして導入された固相伝導係数および粒子ポテンシャル，z は座標である．また，固相拡散係数 D_s は式(4)で定義される．

$$D_s = k_s \frac{\partial \phi_{sT}}{\partial \sigma} \tag{4}$$

ここで，σ は固相率である．式(3), (4)より，式(5)が導出される．

$$q_s = -D_s \frac{\partial \sigma}{\partial z} \tag{5}$$

また，固相の移動に関する連続条件は式(6)で表される．

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial z} = 0 \tag{6}$$

式(5), (6)より，固相の移動は式(7)により表すことができる．

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(D_s \frac{\partial \sigma}{\partial z} \right) \tag{7}$$

ここで，飽和条件を仮定および土粒子と水の質量保存則を考慮し，式(8)に示すように粒子ポテンシャル ψ_s は膨潤圧 P_s と等価であると考えると式(4)は式(8)で表される．

$$D_s = \frac{\sigma k}{\rho_w g}\frac{dP_s}{d\sigma} \tag{8}$$

ここで，ρ_w は水の密度，g は重力加速度，k は透水係数である．コア部の固相拡散係数は，式(8)により表される．また，亀裂部の固相拡散係数は，Newton 流体の平面 Poiseuille 流れを仮定することにより，式(9)により表される．

$$D_s = \frac{\sigma a^2}{12\mu_s}\frac{dP_s}{d\sigma} \tag{9}$$

ここで，μ_s は固相の粘度，a は亀裂幅である．すなわち，固相拡散係数は透水係数と膨潤圧の関数となる．また，透水係数，膨潤圧は固相率の関数となるため，理論的に固相拡散係数は固相率の関数で表される．固相拡散理論では**図 7** に示すようにベントナイト中の水と土粒子の移動を考慮している．したがって，固相拡散モデルは無限に長いベントナイト層を仮定する必要があり，移動する土粒子の停止，すなわちベントナイトの侵入が停止する現象を考慮することが困難であると考えられる．また，岩盤の亀裂は先端が閉口していると考えられる．したがって，亀裂へ侵入したベントナイトの気固界面に亀裂中に封入された流体の圧力が作用すると考えられる．この封入された流体の圧力の影響は，固相拡散モデルでは考慮することが困難である．

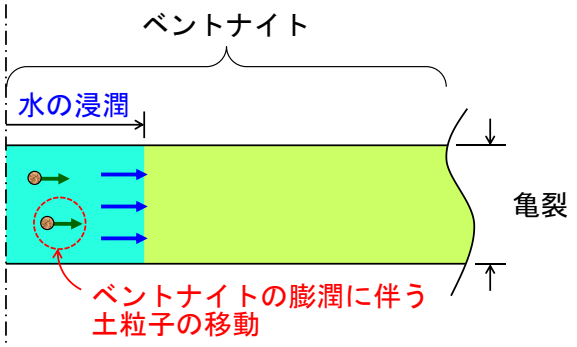


図 7　ベントナイト中の水および土粒子の移動

そこで，本研究では，ベントナイトを高粘度の流体と仮定し，先端が閉口した亀裂へ侵入する緩衝材の挙動を対象とした解析モデルを構築する．また，亀裂中は高湿度環境を想定し，この環境帯の流体（以下，「封入流体」と記す.）により，気固界面のベントナイトの膨潤を固相の封入流体吸収現象と見なして解析モデルに組み込むことを考える（**図 8**）.

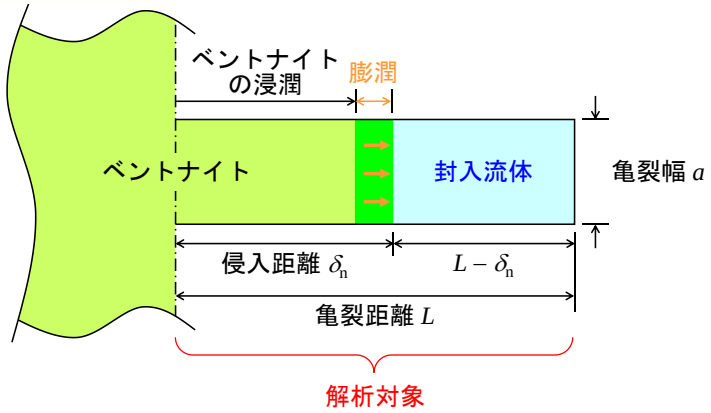


図 8　ベントナイトの亀裂への侵入と解析対象

3.1.4　ベントナイト試料で充填された亀裂を含む岩石の透水試験装置の製作と予備試験

2022 年度実施予定である「ベントナイト試料で充填された亀裂を含む岩石の透水試験」のための定水位型透水試験装置を製作し，予備試験および各種データ取得環境の整備を実施する．以下，装置の製作に至った経緯と研究方法について記述する．

(1) 岩石の定水位型透水試験装置の製作に至った経緯

地層処分といった地下空間利用の大規模プロジェクトの場として地下深部の岩盤層が考えられており，岩盤の透水性を理解することは極めて重要である．これまで，原位置および室内試験における岩盤・岩石の透水性に関する膨大な研究成果が蓄積されてきている．特に，室内試験では温度や圧力等の測定条件を自由に設定できるメリットが大きいため [51]，様々な条件下での岩石の透水試験が多く実施されている．室内試験による岩石の透水性評価には直接測定法として定水位法，変水位法，トランジェントパルス法，フローポンプ法など [51]が用いられる．特に，低透水性の岩石に対しては Brace ら [52]によって提案されたトランジェントパルス法を用いて透水性を評価する例が多い．トランジェントパルス法の詳細は，既に非常に多くの文献にて記述されているため既報に譲る．トランジェントパルス法は，測定温度に非常に敏感であるため，高精度の温度調整が必要であること [53]や微小な温度変化によって実験データに大きな影響を及ぼす [54]ことが指摘されているものの，特に，流量を測定する従来の方法とは異なり，流量計よりも相対的に測定精度の高い圧力計や差圧計を用いて圧力の変化を測定する方法であるため [55)-58)]，測定時間が比較的短く，高精度に低透水性岩石の透水性を評価できるメリットがある．一方，古典的な手法に位置づけられる定水位法を用いて岩石の透水性評価を実施した例 [53),59),60)]もある．ただし，定水位法は透水係数が 10^{-5} m/s 程度以上の比較的透水性の高い岩石に適用されることが多く [61),62)]，低透

水性岩石には定水位法は不適と思われており，ほとんど実施されていないのが現状である．これは，低透水性材料では非常に少ない透水量を計測することが困難であること[60]に加えて，長時間の計測により透水量の蒸発も無視できないためであると推察される．しかし，定水位法はトランジェントパルス法に対して次の 3 つの長所[53]があると言われている．①安定な透水量の測定結果が得られる，②配管やスリーブ等からリークがあった場合には容易に検知できる，③測定方法が単純であり，特殊なノウハウを必要としない．最近では，透水係数が 10^{-10} m/s 程度以下の低透水性材料（主に粘土試料やベントナイト系材料）の透水性評価に定水位法を用いる例[1),33),63)-66)]も非常に多くあり，供試体側面とスリーブとの間のリークや透水量の蒸発等の問題を適切に処理すれば，透水係数が同程度の岩石試料に対しても定水位法を適用できるのではないかと考えた．

そこで，本研究ではまず，上記の文献[1),33),63)-66)]における透水試験装置を岩石供試体に適用できるように改良した定水位型透水試験装置の製作を試みた．本装置は，封圧と透水圧（動水勾配）が自由に設定でき，かつ，透水量を分析天びんで計測する仕組みである．次に，本装置を用いてインタクトな稲田花崗岩供試体の透水係数を測定し，既往の研究結果（トランジェントパルス法）と比較することで，製作した試験装置の有用性について確認した．最後に，本装置を用いて種々のインタクトな岩石供試体の透水係数を測定し，封圧の上昇に伴い種々の岩石供試体の透水係数がどのように変化するかについて，既往の研究結果との整合性を確認した．

(2) 研究方法

岩石試料　本研究で用いた岩石試料は，稲田花崗岩（茨城県笠間市稲田産黒雲母花崗岩“稲田石”），豊岡玄武岩（兵庫県豊岡市赤石産橄欖石玄武岩“玄武洞玄武岩”），大山デイサイト（鳥取県大山町産黒雲母角閃石デイサイト），白浜砂岩（和歌山県白浜町産中粒砂岩），来待砂岩（島根県松江市宍道町来待産凝灰質砂岩“来待石”），札幌凝灰岩（北海道札幌市産溶結凝灰岩“札幌軟石”）および笏谷凝灰岩（福井県福井市足羽産火山礫凝灰岩“笏谷石”）の計 7 種類である．

岩石試料の供試体（直径 50 mm）端面の写真と物性値をそれぞれ**図 9** と**表 3** に示す．透水試験結果のばらつきの程度を確認するために，稲田花崗岩供試体については 3 本（A, B, C）準備した．花崗岩には rift 面，grain 面，hardway 面と称される石目（異方性）[67),68)]があることは周知のとおりである．本研究で用いた 3 本の稲田花崗岩供試体はいずれも grain 面に直交する方向のコア（G 方向コア）から得られたものである．

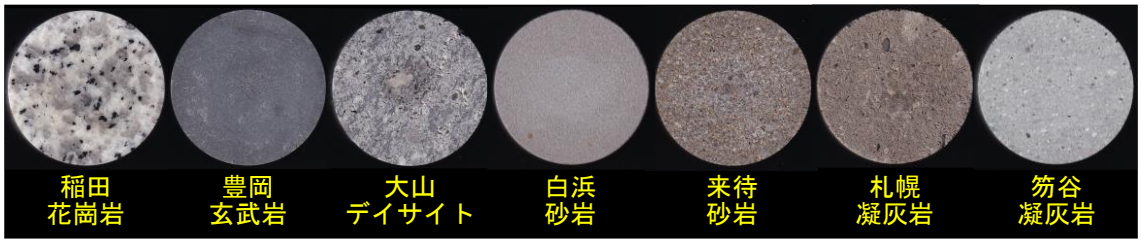


図 9　定水位型透水試験に用いた岩石供試体（直径 50 mm）の端面の写真

表 3　定水位型透水試験に用いた岩石供試体の物性値

岩石供試体	乾燥密度 [g/cm^3]	吸水率 [%]	有効間隙率 [%]	P 波速度 [km/s]
稲田花崗岩 A	2.61	0.33	0.86	4.37
稲田花崗岩 B	2.61	0.32	0.87	4.38
稲田花崗岩 C	2.62	0.33	0.88	4.36
豊岡玄武岩	2.71	2.40	6.59	3.44
大山デイサイト	2.22	7.01	15.69	2.02
白浜砂岩	2.29	6.59	15.03	2.58
来待砂岩	2.05	8.50	17.53	2.70
札幌凝灰岩	1.25	34.93	44.69	1.89
笏谷凝灰岩	1.98	13.51	26.93	3.14

定水位型透水試験　　定水位型透水試験装置の概略図および写真を**図 10** に示す．透水試験は恒温室（22±1°C）内に断熱材で作製した恒温槽内にて実施した．本装置は，主にエアコンプレッサー，加圧容器（最高使用圧力 0.5 MPa），SUS304 製円筒圧力容器（外径 250 mm，肉厚 40 mm），SUS304 製キャピラリーチューブ，水圧ポンプ（最高圧力 30 MPa），分析天びん（分解能 0.1 mg），パーソナルコンピュータから構成される．供試体は直径 50 mm，高さ 40 mm の円柱形とし，ポリオレフィン製の熱収縮チューブをヒートガンを用いて供試体側面に密着させた．なお，本装置は，各部品を容易に交換可能であり，透水量も分析天びんを用いて直接計測できるので，供試体を通過した水の水質を逐次チェックすることも可能である．今後，様々な測定条件下における多くの透水試験を容易に実施することが可能であると考えられる．

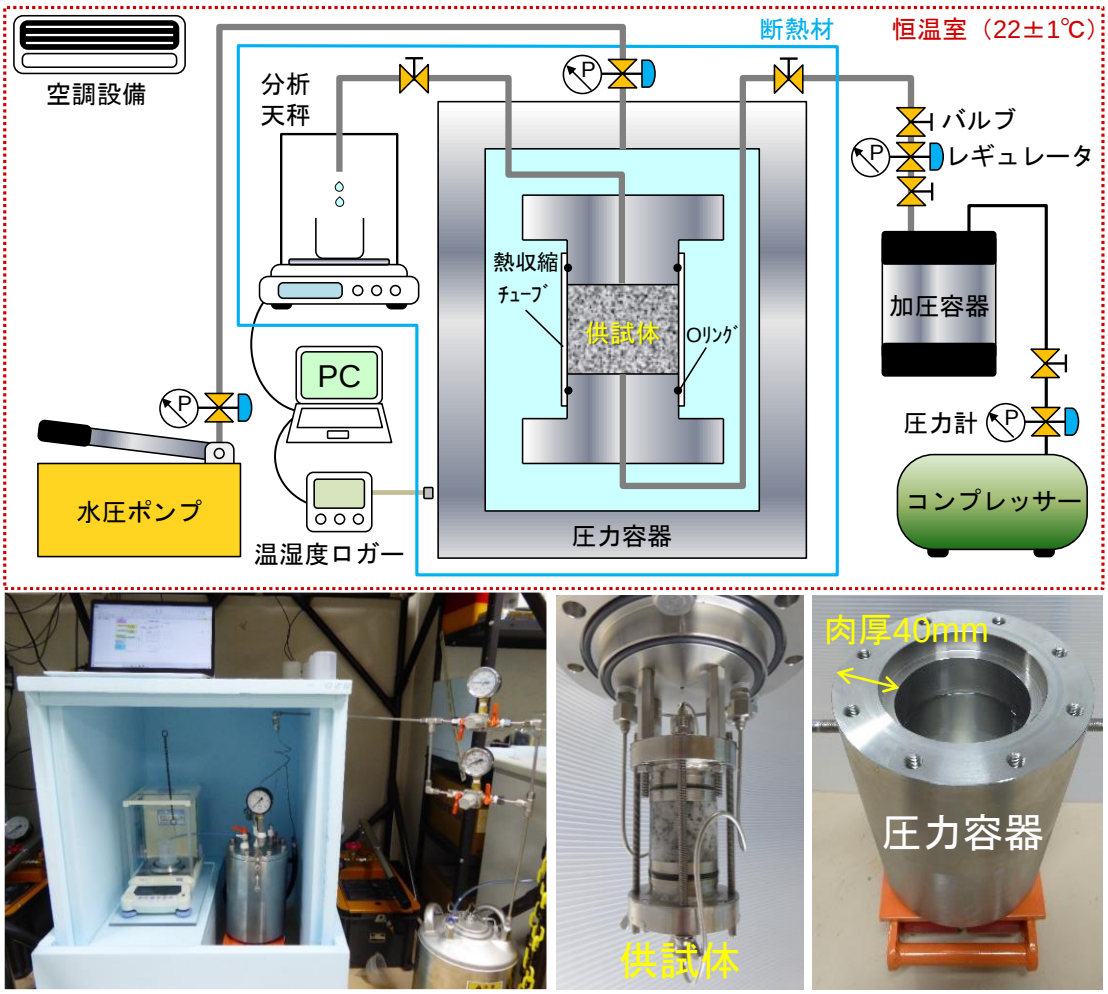


図 10　定水位型透水試験装置の概略図および写真

透水試験は，エアコンプレッサーおよび加圧容器を用いて供試体下部端面に一定の透水圧で蒸留水を通水して行った．この時，水圧ポンプを用いて供試体側面に熱収縮チューブを介して一定の封圧を与えている．ただし，供試体側面と熱収縮チューブの隙間からのリークを防ぐため透水圧は封圧より小さい値に設定した．なお，リークチェックは事前に不透水性の円柱アクリル材を供試体として透水試験を行い，リークがないことを確認している．供試体は水浸減圧容器を用いて脱気し，飽和状態とした．透水量は分析天びんを用いて，60 秒間隔でコンピュータにより計測した．ここで，稲田花崗岩供試体 A を用いた透水試験（封圧 $P_c = 5$ MPa の例）における開始 4 時間の透水量を**図 11** に示す．

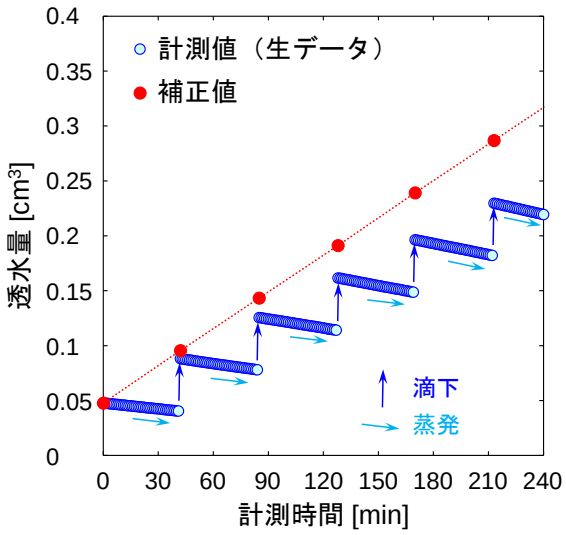


図 11　蒸発量を考慮した透水量の補正（稲田花崗岩供試体 A，封圧 P_c = 5 MPa の例）

供試体を通過した水は計量カップに滴下された後（**図 11** 右上向き矢印），分析天びんで計測される透水量は蒸発により刻々と減少（**図 11** 右下向き矢印）していることがわかる．この例では，約 40 分間隔で滴下している．この蒸発による減少分はデータ整理の段階で透水量に加算することで，蒸発量を考慮した補正値として透水係数の算出を行った．一つの設定した測定条件における透水量は，初めて透水量を確認してから 24 時間以上測定した．透水係数 k は Darcy 則が成り立つと仮定して式(2)を用いて算出した．水位差は透水圧を水頭に換算して計算した．以下，透水圧 P_w = 0.45 MPa，封圧 P_c = 1～12 MPa（1 MPa 間隔）の範囲における透水試験結果について記述する．なお，P_w = 0.45 MPa では h = 4591.8 cm となり，動水勾配 i（= h/L）は 1148 となる．定水位法による低透水性材料（主にベントナイト）の透水試験の例 [65]では，動水勾配が 60～2,000 程度の範囲であれば，動水勾配によらず，ほぼ一定の透水係数が得られることが示されている．また，本研究では事前に，透水圧 P_w = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.45 MPa における透水試験を実施し，この範囲では透水係数に大きな影響を与えていないことを確認している．そのうえで，測定時間をできるだけ短くできるように，かつ，加圧容器の性能（最高使用圧力 0.5MPa）を踏まえて，透水圧を 0.45 MPa と設定した．また，供試体下端部（上流側）に作用する間隙水圧は，透水圧 P_w = 0.45 MPa（ゲージ圧）と等しいものと考えられるので，後述する実験結果（**図-21～図-24**）の記載は，有効封圧 P_{ec}（= $P_c - P_w$）[67),69)]として整理した．

3.2 2021 年度の成果内容

2021 年度に実施した(1)～(4)の項目について，以下，得られた成果について記述する．なお，項目(4)の一部については，学術論文としてまとめ，外部発表済みである．

3.2.1 実験条件を決定するための文献調査

本研究と関連深い文献（地層処分における緩衝材の流出／侵入特性に関する報告書）[39)-47)]と地層処分研究開発第 2 次取りまとめ[48)]，さらに，NUMO 包括的技術報告[49)]を参考に，膨潤・充填性同時試験および透水試験で用いる溶液の種類とその濃度，通水方法，ベントナイト供試体の締固め密度，初期含水比等を設定した．ただし，これらの実験条件は，今後の実験結果や進行度合い，評価委員会の指摘等を踏まえて適宜変更する予定である．

本研究で用いたベントナイトは，山形県月布産の Na 型ベントナイト（クニミネ工業(株)製 クニゲル V1，土粒子密度 2.715 Mg/m^3）とした．本研究は，緩衝材（ベントナイト）と天然バリア（岩盤）の境界領域に着目し，地下水中の化学成分の作用（化学的作用）によるベントナイトの性能劣化と亀裂閉塞による岩盤の性能向上の関係性を明らかにすることを主目的としている．したがって，ベントナイトの諸特性（特に，膨潤性，透水性，亀裂充填性）に大きく影響を及ぼす現象として考えるべきことは外部からの地下水の流入である．そのため，オーバーパックの腐食に伴う鉄イオン，さらに，施設建設における掘削によって地上から運び込まれる酸素と鋼製支保工や岩盤内部の鉄分との反応によって生じる鉄イオンの影響については検討せず，処分場閉鎖後に地下水として懸念される次の 5 種の溶液について重点的の検討することとした．すなわち，セメント系材料が地下水と反応することによって生成される高アルカリ間隙水を想定して KOH 水溶液，$Ca(OH)_2$ 水溶液および NaOH 水溶液と，沿岸部における海水系地下水を想定して $MgCl_2$ 水溶液および NaCl 水溶液とした．溶液の濃度は，実験の効率性も考慮して，すべて 1 mol/L とした．ただし，$Ca(OH)_2$ 水溶液は難溶性のため，0.017 mol/L（飽和）である．供試体の締固め（乾燥）密度は 1.8 Mg/m^3 および 1.5 Mg/m^3 とし，初期含水比は 0%（試験前に 40°C で 24 時間炉乾燥）とした．膨潤・充填性同時試験における亀裂幅は，0.5 mm，1.0 mm および 1.5 mm とした．

3.2.2 ベントナイト試料の膨潤・充填性同時試験および透水試験

表 2 に示した試験条件における膨潤･充填性同時試験から得られた膨潤圧を**図 12** に示す．各試料の膨潤圧の初期挙動としては，数日で膨潤圧のピークを示し，その後，緩やかに低

下していく傾向が見られた．初期の膨潤圧のピークは，精製水に浸漬させたベントナイト（乾燥密度ρ_d = 1.8 Mg/m^3）で試験開始からおよそ 1 週間程度，精製水と Ca(OH)$_2$ 水溶液に浸漬させたベントナイト（ρ_d = 1.5 Mg/m^3）でおよそ 4 日程度，これら以外の試料ではおよそ 1 日程度で見られ，締固め密度が大きいほど遅く，浸漬させる溶液によって早く出現することがわかる．ベントナイトの膨潤圧の発生は，水浸により，モンモリロナイトの層間に多量の水を吸収することで単位層間の距離が増大することに起因していると考えられ，このことは多くの文献からも周知のとおりである．試験開始後 165 日後（2022 年 1 月 10 日時点）の各試料の膨潤圧は，精製水に浸漬させたベントナイトでは，ρ_d = 1.8 Mg/m^3 の供試体で 0.36 MPa～0.42MPa 程度，ρ_d = 1.5 Mg/m^3 の供試体で 0.16 MPa～0.19 MPa 程度であり，締固め密度の違いが確認できた．また，ρ_d = 1.8 Mg/m^3 の供試体については，亀裂幅の 1.5 mm の条件の場合，亀裂幅 0.5 mm および 1.0 mm の条件に比べて 1 割ほど膨潤圧が小さい．一方，各種溶液に浸漬させたベントナイトの膨潤圧は，Ca(OH)$_2$ 水溶液では P_s = 0.2 MPa 程度であり，精製水に浸漬させたベントナイトの膨潤圧と同程度であった．その他の溶液では，KOH 水溶液では P_s = 0.04 MPa 程度，NaOH 水溶液および MgCl$_2$ 水溶液では P_s = 0.09 MPa 程度であり，精製水に浸漬させたベントナイトに比べて膨潤圧は半分以下に小さくなることがわかる．したがって，浸漬させる溶液の種類によってベントナイトの膨潤圧の大きさが異なることがわかった．

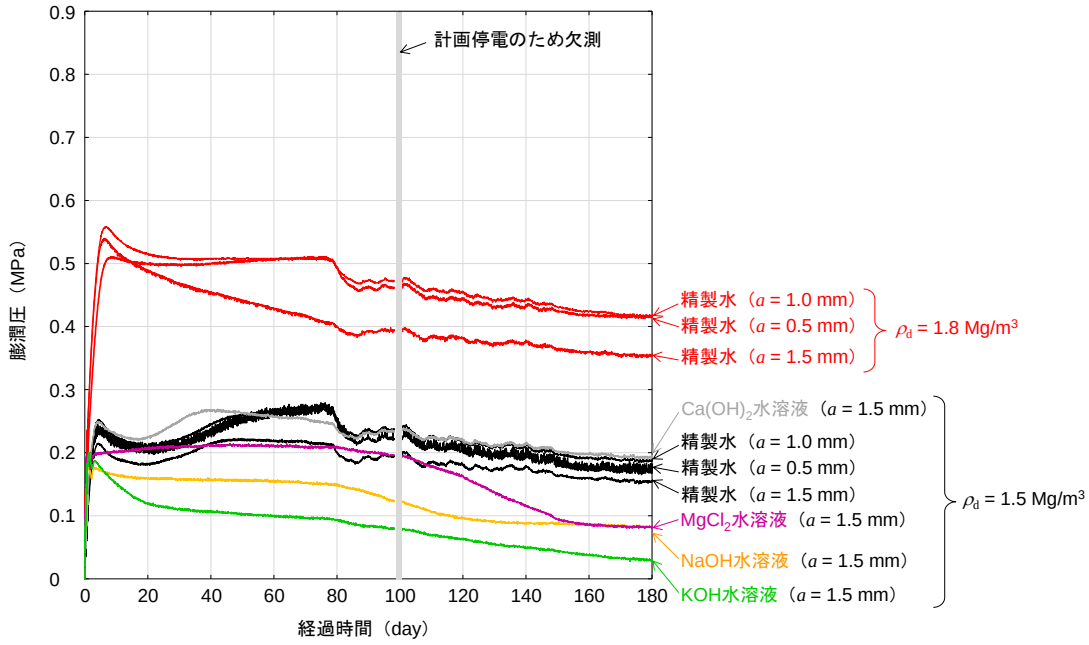


図 12　膨潤・充填性同時試験におけるベントナイトの膨潤圧

図 13　膨潤・充填性同時試験におけるベントナイトの侵入の様子の一例

なお，膨潤圧の値については，条件は若干異なるが，既往の研究（P_s = 0.48 MPa，供試体寸法：直径 50 mm・高さ 10 mm，精製水，ρ_d = 1.4 Mg/m^3）[33]と比較して小さいが，これは後述するように，亀裂への充填により供試体密度の低下に起因するものと考えられる．

次に，膨潤・充填性同時試験におけるベントナイトの侵入の様子の写真と計測された侵入距離を，それぞれ，**図 13** と**図 14** に示す．

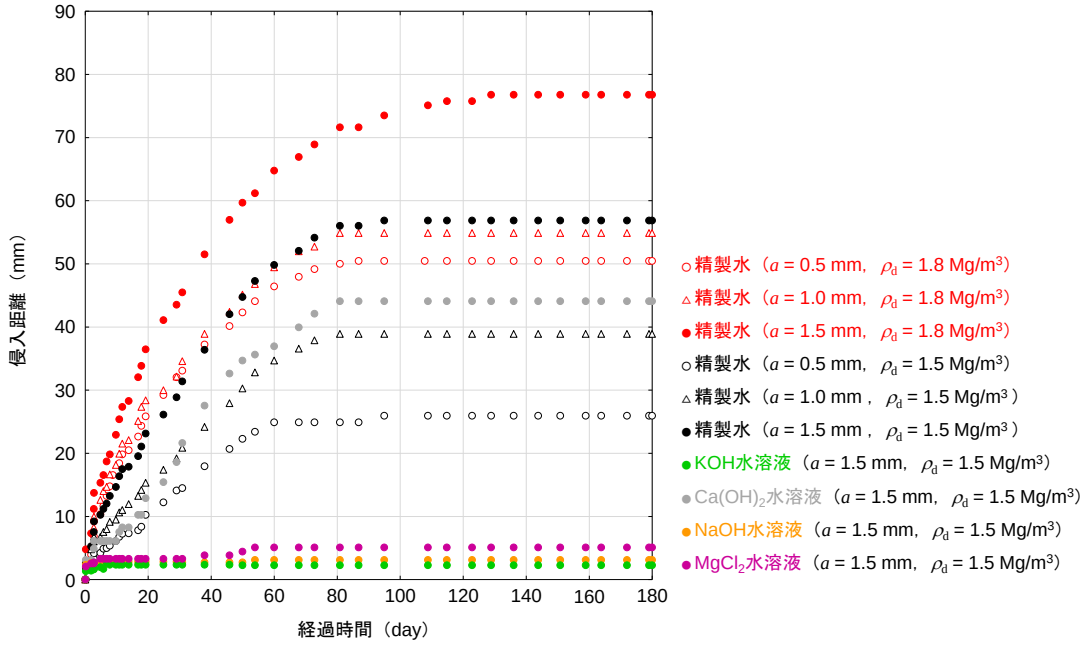


図 14　膨潤・充填性同時試験における経過日数と侵入距離との関係

図 13 より，いずれの例もベントナイトの侵入はほぼ同心円状に広がっていくことがわかる．KOH 水溶液におけるベントナイトの侵入距離が他の例と比較して非常に小さいが，$MgCl_2$ 水溶液および NaOH 水溶液についても同様の傾向であった．また，$Ca(OH)_2$ 水溶液におけるベントナイトの侵入状態に着目すると，侵入したベントナイトの先端部分にはひび割れのようなものが観察できる．このような傾向は他の溶液には見られず，今後，試験終了後の侵入部の各種分析を実施し，試料状態を把握することにより，原因について考察をする予定である．

図 14 は，**図 13** の写真を基に侵入距離を計測した結果である．計測はほぼ 1 週間間隔で行い，試験開始直後 2 週間程度は 1 日間間隔で行った．いずれの試料もある日数を境に平衡状態になることがわかる．すなわち，精製水に浸漬させたベントナイト（a = 1.5 mm，ρ_d = 1.8 Mg/m^3）で 150 日程度，それ以外の精製水に浸漬させたベントナイトおよび $Ca(OH)_2$ 水溶液に浸漬させたベントナイトで 100 日程度，それ以外の試料は 10 日程度（ただし，$MgCl_2$ 水溶液に浸漬させたベントナイトは，その後，侵入距離が延びて 60 日程度）で平衡状態に達している．試料の初期の締固め密度の違い（**図 14**：○と○，△と△，●と●）に着目すると，いずれの亀裂幅においても締固め密度が大きい方が侵入距離が長いことがわかる．膨潤圧が亀裂充填に大きく関与する駆動力であるならば，締固め密度の大きい（すなわち，膨潤圧の大きい）試料の方が侵入距離が長くなる結果は妥当なものと判断できる．亀裂幅の違

い（**図 14**：○と△と●，○と△と●）着目すると，いずれの締固め密度においても亀裂幅が大きいほど侵入距離が長いことがわかる．これは，既往の報告 [40]とも整合的である．溶液の違いに着目（**図 14**：●と●と●と●と●）すると，溶液に浸漬させたベントナイトの侵入距離はいずれも，精製水に浸漬させたベントナイトの侵入距離に対して短くなることが分かった．特に，KOH 水溶液，NaOH 水溶液および $MgCl_2$ 水溶液については，ほとんど隙間に侵入しておらず，これは，亀裂等の隙間を充填させる効果を期待する場面においては負の効果であると言える．

次に，既往の報告 [39),40),45)]を参考に，経過時間 t の平方根を用いてベントナイトの侵入距離 δ_e を整理し（$\delta_e = At^{1/2}$），これらの関係から比例定数 A（亀裂開口幅と材料に依存する定数）求めた（**図 15**，**表 4**）．**図 15** には，亀裂幅 a = 1.5 mm の条件における近似線のみを記載している．これらの結果から，侵入距離が短いほど比例定数 A の値は大きい傾向があることが確認でき，このことについては，既往の報告 [39),40),45)]とも整合的であった．既往の報告 [39),40),45)]におけるベントナイト（クニゲル V1，供試体寸法：直径 50 mm・高さ 50 mm，精製水，ρ_d = 1.8 Mg/m^3，初期含水比 10%）の比例定数 A は，A = 0.34（a = 0.5 mm），A = 0.98（a = 0.5 mm），A = 1.30（a = 0.5 mm）である．本研究と供試体寸法および初期含水比が異なるので安易に比較はできないが，近しい値であるとともに，亀裂幅の違いによる比例定数 A の大小関係は同じであった．

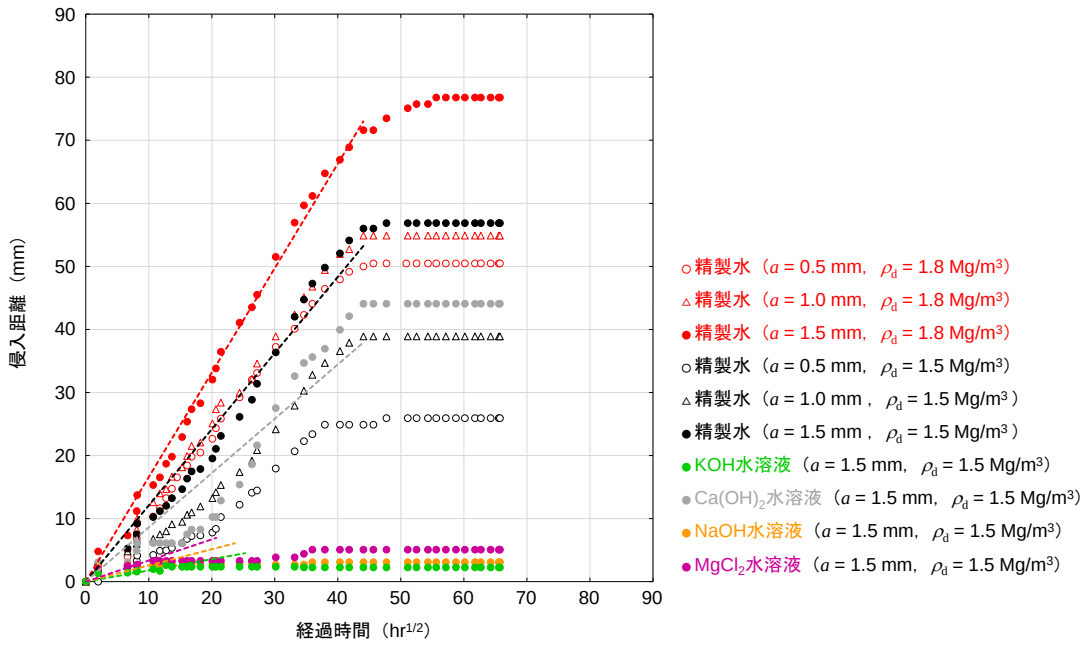


図 15　膨潤・充填性同時試験における経過時間の平方根によるベントナイトの侵入距離

表 4　充填性試験における経過時間と侵入距離の関係から求めた比例定数 A

ベントナイトの乾燥密度 [Mg/m^3]	亀裂幅 [mm]	使用液体	比例定数 A [mm/hr$^{1/2}$]	相関係数
1.8	0.5	精製水	1.18	1.00
1.8	1.0	精製水	1.27	1.00
1.8	1.5	精製水	1.66	1.00
1.5	0.5	精製水	0.55	0.98
1.5	1.0	精製水	0.82	0.99
1.5	1.5	精製水	1.21	0.99
1.5	1.5	KOH 水溶液	0.18	0.98
1.5	1.5	$Ca(OH)_2$ 水溶液	0.86	0.97
1.5	1.5	NaOH 水溶液	0.26	0.95
1.5	1.5	$MgCl_2$ 水溶液	0.34	0.97

ベントナイトの透水試験についての進捗状況を記述する．本研究では当初，精製水による飽和ベントナイト供試体を用いて，各種溶液を通水する透水試験を実施し，各種溶液環境下における透水係数を把握する予定であった．しかし，上述の膨潤・充填性同時試験において，溶液の違いによりベントナイトの浸透スピードに大きな違いがあることが観察された．そのため，膨潤・充填性同時試験の初期状態（含水比 0%）に合わせて透水試験を実施し，試験開始後から最初の透水量確認までの経過時間も併せて把握する必要があると考えた．予備試験では，溶液を通水する場合，初期の透水量が計測されるまでの経過時間が精製水を通水する場合に対して非常に速いという結果も得られているが，試験条件の設定や予備試験を試行錯誤検討している段階であるため，今年度の報告での記述は控えることとする．

3.2.3　ベントナイト試料の岩石亀裂充填性のモデル化

本研究では，ベントナイト（以下，「侵入流体」と記す.）を高粘度の流体と仮定し，先端が閉口した亀裂（以下，「閉口流路」と記す.）へ侵入する流体の挙動を対象とした解析モデルを構築する．また，亀裂中は高湿度環境を想定し，この環境帯（封入流体）により気固界面のベントナイトの膨潤を固相の封入流体吸収現象と見なして解析モデルに組み込むことを考える．

図 16 に示すように閉口流路内の侵入流体に 3 つの力が作用する．ここに，δ_n は侵入流体の侵入長さ，a は流路高さ（亀裂），B は流路幅，L は流路長さである．ベントナイトの膨潤圧により引き起こされる力 F_s は，侵入流体流れにおける駆動力である．また，侵入流体の粘性抵抗力 F_v が流速を低下させると同時に閉口流路内の加圧された封入流体により引き起

こされる力 F_p は流れに抵抗するように作用する．流路内の流れは層流であり，侵入流体に作用する慣性力を無視すると，侵入流体に作用する力のつり合いは式(10)となる．

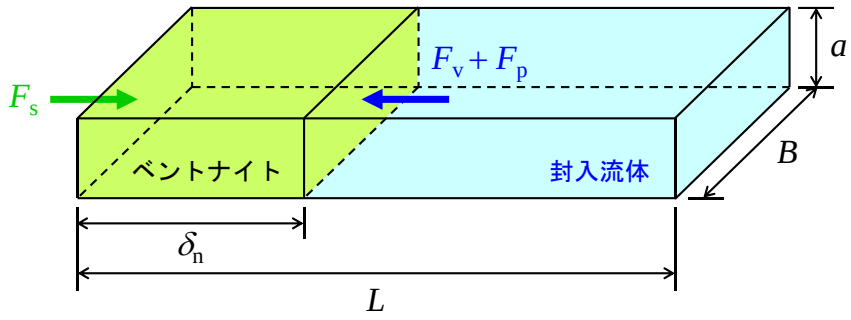


図 16　閉口流路内の侵入流体に作用する力

$$F_s + F_v + F_p = 0 \tag{10}$$

ここで，幅広流路（a << B）の場合，流路内の流れは**図 17** に示すような 2 次元流と見なすことができ，侵入流体の微小要素に作用する力のつり合いは式(11)となる．

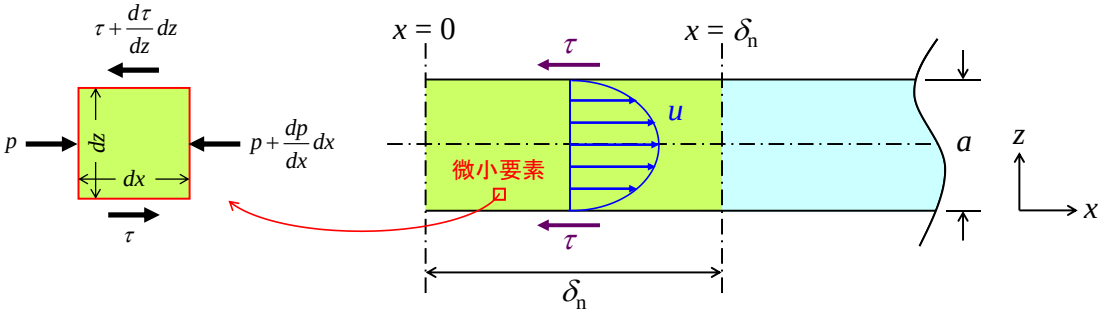


図 17　流路内の侵入流体の流速分布と微小要素に作用する力のつり合い

$$\frac{dp}{dx} = \frac{d\tau}{dz} \tag{11}$$

ここで，p と τ はそれぞれ侵入流体の微小要素に作用する圧力とせん断応力，x と z は座標である．また，Newton の粘性法則より式(12)が成り立つ．

$$\tau = \mu_s \frac{du}{dz} \tag{12}$$

ここで，u は x 方向の流速，μ_s は侵入流体の粘性係数である．式(12)を式(11)へ代入すると，

式(13)となる．

$$\frac{dp}{dx} = \mu_s \frac{d^2u}{dz^2} \tag{13}$$

また，境界条件は式(14), (15)となる．

$$u = 0 \quad \text{at } z = 0 \tag{14}$$

$$u = 0 \quad \text{at } z = a \tag{15}$$

式(13)を z に関して積分すると次式となる．

$$u = \frac{z^2}{2\mu_s}\frac{dp}{dx} + C_1 \cdot z + C_2 \tag{16}$$

ここで，C_1 と C_2 は積分定数である．式(14)より，$C_2 = 0$ である．また，式(15)より，$C_1 = -a/2\mu_s \cdot dp/dx$ となるので，これらの定数を式(16)へ代入することにより，式(17)を得る．

$$u = -\frac{1}{2\mu_s}\frac{dp}{dx} \cdot z(a - z) \tag{17}$$

式(17)を z に関して区間[0, a]において積分すると，流量 Q は式(18)のように表される．

$$Q = -\frac{a^3}{12\mu_s}\frac{dp}{dx} \tag{18}$$

式(18)より，平均流速 U（$= d\delta/dt$）は式(19)となる．

$$\frac{d\delta_n}{dt} = -\frac{a^2}{12\mu_s}\frac{dp}{dx} \tag{19}$$

ここで，図 18 に示すように，圧力勾配を式(20)のように近似する．

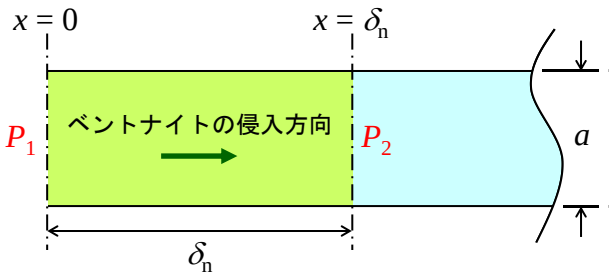


図 18　侵入流体に作用する圧力

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\Delta P}{\delta_n} \tag{20}$$

ここで，P_1 と P_2 はそれぞれ $X = 0$ と $X = \delta_n$ における圧力，ΔP は圧力差（$\Delta P > 0$）である．式(20)を式(19)へ代入すると式(21)となる．

$$\Delta P = \frac{12\mu_s}{a^2} \cdot \delta_n \frac{d\delta_n}{dt} \tag{21}$$

ここで，式(21)は平面 Poiseuille 流における圧力差である．式(21)の両辺に流路断面積 aB を乗じると式(22)となる．

$$\Delta F - \frac{12\mu_s B}{a} \cdot \delta_n \frac{d\delta_n}{dt} = 0 \tag{22}$$

ここに，ΔF（$= F_s + F_p$）は侵入流体に作用する力の合力である．また，式(22)より，粘性抵抗力 F_v は式(23)となる．

$$F_v = -\frac{12\mu_s B}{a} \cdot \delta_n \frac{d\delta_n}{dt} \tag{23}$$

一方，ベントナイトの膨潤圧により引き起こされる力 F_s は式(24)となる．

$$F_s = P_s \cdot aB \tag{24}$$

ここで，P_s はベントナイトの膨潤圧であり，本研究では一定であると仮定する．

また，本研究では，亀裂中の気固界面でベントナイトが封入流体を吸収することにより，ベントナイトの体積膨張が生じると考える．固相内への封入流体の吸収を考慮すると，亀裂中に封入された流体の質量は時間の経過とともに減少する．ここで，系内において質量保存の法則が成り立つと仮定すると，封入流体の質量減少に伴い，ベントナイトの質量が見かけ上増加する．このベントナイトの質量の増加を，ベントナイトが封入流体を吸収することにより生じる見かけの体積膨張と考える．また，固相内に吸収された封入流体は，濃度勾配に従い拡散すると仮定する．固相への封入流体分子の吸収は Henry の法則に従い，固相内の封入流体分子の拡散は Fick の法則に従う．この理論は Phan et al.[70]が提案した閉口流路内の封入気体が侵入流体へ溶解および拡散する現象を表す解析モデルを応用している．気固界面における封入流体分子の濃度 C は Henry の法則より式(25)で与えられる．

$$C = K_H \cdot P_g \tag{25}$$

ここに，K_H は Henry 定数（固相への封入流体分子の吸収率を表す），P_g は封入流体の圧力である．また，ベントナイトの侵入直前の封入流体分子の濃度 C_0 は式(26)で与えられる．

$$C_0 = K_H \cdot P_a \tag{26}$$

ここで，P_a は大気圧である．Fick の法則は，固相内の封入流体分子の質量拡散流束（単位

時間かつ単位面積当たり通過する質量）Φ_m（= 1/*aB*･*dm*/*dt*）を与える．

$$\Phi_m = -\frac{D_d M\left(C - C_0\right)}{\delta_n} \tag{27}$$

ここで，D_d は固相内の封入流体分子の拡散係数，M は封入流体のモル質量である．ここで，封入流体を理想気体と仮定すると状態方程式は式(28)となる．

$$P_g = \frac{mRT}{MaB\left(L - \delta_n\right)} \tag{28}$$

ここで，R はガス定数，T は絶対温度，m は封入流体の質量である．また，封入流体の初期質量は式(29)となる．

$$m_0 = \frac{P_a MaBL}{RT} \tag{29}$$

式(29)より大気圧 P_a は式(30)となる．

$$P_a = \frac{m_0 RT}{MaBL} \tag{30}$$

ここで，式(28), (30)より，封入流体により引き起こされる力 F_p（= $aB(P_a - P_g)$）は式(31)となる．

$$F_p = -\frac{RT}{M}\cdot\left(\frac{m}{L - \delta_n} - \frac{m_0}{L}\right) \tag{31}$$

式(23), (24), (31)を式(10)へ代入すると式(32)となる．

$$\frac{d\delta_n}{dt} = \frac{a^2}{12\mu_s\delta_n}\left\{P_s - \frac{RT}{MaB}\left(\frac{m}{L - \delta_n} - \frac{m_0}{L}\right)\right\} \tag{32}$$

また，式(25), (26), (28), (30)と式(27)を用いると質量変化率に関する関係式（式(33)）が得られる．

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{k_H D_d RT}{\delta_n L\left(L - \delta_n\right)}\left\{mL - m_0\left(L - \delta_n\right)\right\} \tag{33}$$

ここで，侵入流体の侵入長さ δ_n と封入流体の質量 m を正規化し，それぞれの物理量を $\delta_n{}^*$, m^* で表すと式(34), (35)となる．

$$\delta_n{}^* = \frac{\delta_n}{L} \tag{34}$$

$$m^* = \frac{m}{m_0} \tag{35}$$

また, 時間 t を先端が開口した流路を飽和するために必要な時間 t_f の 2 倍の時間で正規化し, 正規化した時間を t^* で表すと式(36)となる.

$$t^* = \frac{t}{2t_f} \tag{36}$$

ここで, 時間 τ_f は式(37)で表される.

$$t_f = \frac{6\mu_s}{P_s} \cdot \left(\frac{L}{a}\right)^2 \tag{37}$$

式(34)～(37)より, 式(32)と式(33)は, それぞれ, 式(38)と式(39)のように変形できる.

$$\frac{d\delta_n^*}{dt^*} = \frac{1}{\delta_n^*}\left\{1-\alpha\cdot\left(\frac{m^*}{1-\delta_n^*}-1\right)\right\} \tag{38}$$

$$\frac{dm^*}{dt^*} = \beta\cdot\frac{1-m^*-\delta_n^*}{\delta_n^*\left(1-\delta_n^*\right)} \tag{39}$$

ここで, α は大気圧 P_a と膨潤圧 P_s の比（$\alpha = P_a/P_s$）であり, β は封入流体の拡散率と侵入流体の侵入率の比（$\beta = 12\mu_s K_H D_d RT/(a^2 P_s)$）である. また, 初期条件（$t = 0$ のとき, $\delta_n = 0$ かつ $m = m_0$）は式(40), (41)となる.

$$\delta_n^* = 0 \quad \text{at } t^* = 0 \tag{40}$$

$$m^* = 1 \quad \text{at } t^* = 0 \tag{41}$$

式(38)と式(39)の連立常微分方程式は閉口流路内へ侵入する流体の運動方程式である. 初期条件（式(40), (41)）を適用してこの連立常微分方程式を数値積分すると, 数値解（δ_n^* と m^*）が導出される. 導出された数値解 δ_n^* が, 先端が閉口した亀裂中のベントナイトの侵入長さである.

構築した解析モデルを用いて, 7 ケースの解析を実施した. 解析条件（亀裂幅 a, 膨潤圧 P_s, 拡散係数 D_s）を**表 5** にまとめる. その他のパラメータは, いずれのケースも L = 0.5 m, B = 1.0 m, $\mu_s = 10^8$ Pa･s, $K_H = 10^{-4}$ mol/Pa･m^3, R = 8.3145 N･m/mol･K（水蒸気）, T = 298.15 K（25°C）, $M = 18.02\times10^{-3}$ kg/mol（水）とした. 本研究で得られた実験値（膨潤圧）や文献値を参考に解析条件を設定しているが, 構築した解析モデルに対して, どの要因が支配的であるのかに重きを置いてパラメータを設定していることに留意する必要がある. Case-1 と Case-2 では締固め密度（膨潤圧）の違いの比較, Case-2～Case-4 では亀裂幅の違いの比

較, Case-2 と Case-5 または Case-5 と Case-6 では溶液種の違いを拡散係数または膨潤圧の違いで比較，Case-7 では Case-6 に対して，膨潤圧が非常に小さく，かつ，溶液種が異なる（拡散係数を 2 オーダー大きい）場合をそれぞれ想定している．

表 5　解析条件

	亀裂幅 [mm]	膨潤圧 [MPa]	拡散係数 [m^2/s]
Case-1	1.5	0.4	10^{-12}
Case-2	1.5	0.2	10^{-12}
Case-3	1.0	0.2	10^{-12}
Case-4	0.5	0.2	10^{-12}
Case-5	1.5	0.2	10^{-10}
Case-6	1.5	0.1	10^{-10}
Case-7	1.5	0.1	10^{-8}

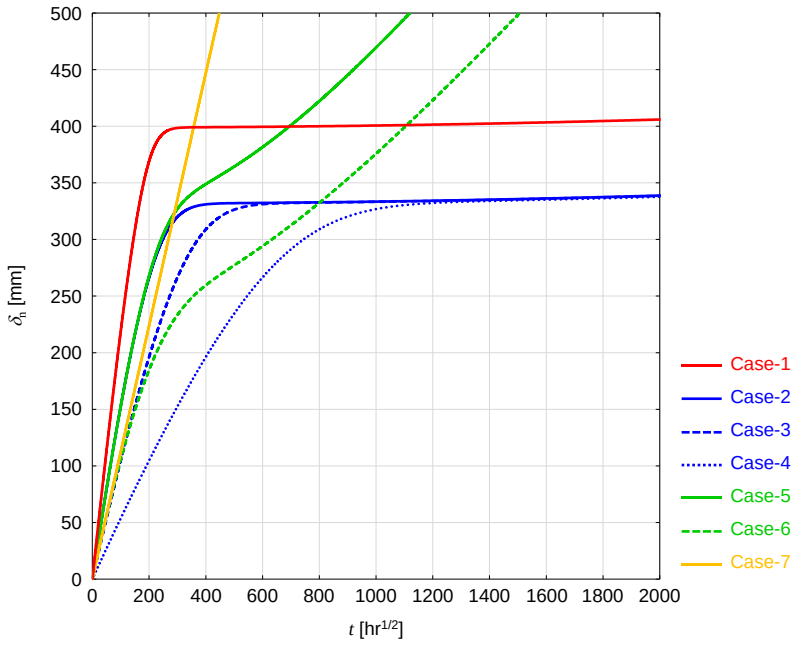


図 19　構築した解析モデルを用いた解析結果の一例

7 ケースの解析結果を**図 19** に示す. 本図の横軸は経過時間の平方根としてまとめている．まず，解析結果で示される数値が本研究で得られた実験値と乖離しているが，これについては前述のとおり，実験値の傾向の把握と，ベントナイトの侵入挙動に対して，どの要因が支配的であるのかを把握することが第一の目的である．ここで得られる結果・傾向を基に，今後，パラメータの設定についての議論，解析モデルの改良を行う計画である．

Case-1 と Case-2 を比較すると，Case-1 の方が，侵入距離δ_nと初期の傾き（比例定数 A）ともに大きく，これは実験結果の傾向とも整合的である．Case-2～Case-4 を比較すると，亀裂幅の違いによる初期の傾きの違いがみられ，実験結果の傾向とも整合的であるが，解析例では，3 ケースとも平衡状態に達すると，ある侵入距離で収束しているようである．Case-2 と Case-5 を比較すると，膨潤圧が同じであるため，初期は同じ経路をたどるが，拡散係数が大きい Case-5 のほうがある時間を境に急激に上昇し，侵入距離δ_n = 0.5 m（解析の終了値 : L = 0.5 m）に達している．一方，膨潤圧の異なる場合は Case-5 と Case-6 を比較すると，初期は異なる経路をたどるものの，拡散係数が同じであるため，侵入距離δ_n = 0.5 m に達する傾向は同様である．Case-7 では，Case-6 に対して拡散係数が 2 オーダー大きいため，侵入距離δ_n = 0.5 m に達する傾きがさらに大きい．以上の解析結果から，ベントナイトの亀裂充填には，浸透による初期段階（すなわち，比例定数 A の決定）では膨潤圧および亀裂幅による影響が支配的であると言える．そして，いずれ膨潤圧が封入流体の圧縮圧力とつり合うと，侵入距離は平衡状態となり，それ以降は拡散の影響が支配的になると言える．

3.2.4　ベントナイト試料で充填された亀裂を含む岩石の透水試験装置の製作と予備試験

(1) 稲田花崗岩の透水係数

計測時間 24 時間における透水量の補正値の一例（稲田花崗岩供試体 A）を図 20 に示す．

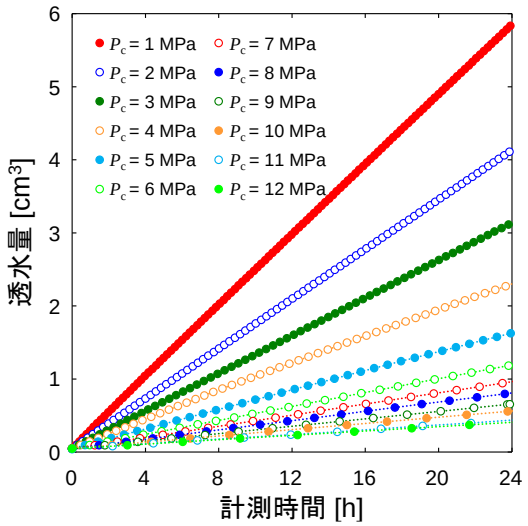


図 20　各封圧における透水量（稲田花崗岩供試体 A，封圧 P_c = 1～12 MPa の例）

いずれの封圧においても透水量の傾きはほぼ直線的であることから，同一の封圧下においては，試験時間の経過による供試体の透水係数に変化がないことがわかる．また，封圧が大きくなるにつれて透水量の傾きは小さくなることがわかる．分析天びん上の計量カップに落ちる 1 回の透水量はほぼ同量であるので，透水量の傾きが小さいということは，すなわち，計量カップに落ちる透水量の間隔時間が長いこと意味する．この間隔時間は，**図 21** からもわかるように，3 本の稲田花崗岩供試体において若干の差はあるものの，有効封圧が大きくなるにつれて指数関数的に大きくなる（すなわち，透水係数が低下する）ことが確認できる．

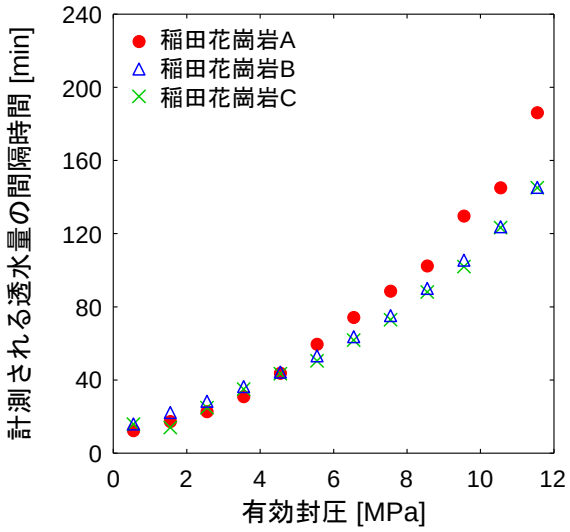


図 21　各有効封圧において計測される透水量の間隔時間（稲田花崗岩供試体の例）

封圧 P_c = 1～12 MPa 下における稲田花崗岩供試体の透水係数を**図 22** に示す．3 本の供試体の透水係数はそれぞれ，2.9×10^{-11}～1.8×10^{-12} m/s（供試体 A），2.1×10^{-11}～2.1×10^{-12} m/s（供試体 B）および 2.0×10^{-11}～2.0×10^{-12} m/s（供試体 C）の範囲であった．各有効封圧における透水係数の標準偏差の最大値は 2.0×10^{-12} m/s（有効封圧 P_{ec} = 0.55 MPa）であり，封圧 P_c = 1～4 MPa の範囲では透水係数に若干のばらつきが見られるものの，この程度のばらつきは岩石供試体の不均質性によるものと判断できる．また，いずれの供試体も有効封圧が大きくなるにつれて透水係数も小さくなる傾向が観察され，有効封圧 P_{ec} = 11.55 MPa では P_{ec} = 0.55 MPa に対して透水係数が 1 オーダー程度低下した．このような傾向は既往の研究結果[57),58),67)]とも整合的である．これは，供試体内部の微小な潜在クラック（花崗岩であれば，

主に石英，斜長石，黒雲母等の鉱物粒子の粒界）が有効封圧の増加に伴い徐々に閉塞 [71]されたことが理由であると考えられる．

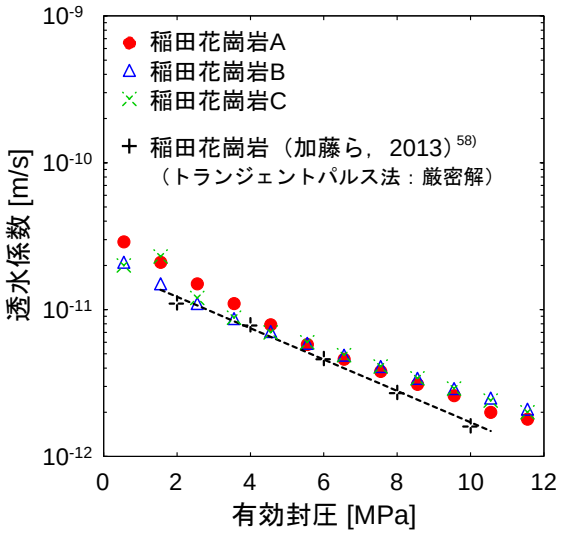


図 22　各有効封圧での稲田花崗岩供試体の透水係数とトランジェントパルス法との比較

次に，本研究で得られた稲田花崗岩の透水係数と既往の研究結果との比較を行った．加藤ら [58]は，トランジェントパルス法において，従来の解析手法よりもさらに汎用性を高めたものとして非線形最小二乗法（Gauss-Newton 法）を採用することにより，トランジェントパルス法で得られる水頭差の減衰曲線から厳密解を用いて透水係数を算出する手法を提案している．また，加藤ら [58]の実験では，稲田花崗岩（hardway 面に直交する方向の H 方向コアから作製された直径 50 mm，高さ 25 mm の円柱供試体）を用いて厳密にコントロールされた温度環境下（±0.01°C）において透水試験が行われており，さらに，同一測定条件下において複数回実験を実施することにより実験の再現性も検証している．したがって，本研究で得られた稲田花崗岩の透水係数を加藤ら [58]の研究結果と比較することで，製作した試験装置の有用性について確認することとした．**図 22** において，封圧 P_c = 2～10 MPa の範囲におけるトランジェントパルス法による稲田花崗岩の透水係数の数値 [58]（**図 22** ＋）と比較すると，封圧の増加に伴う透水係数の低下傾向が類似していることに加えて，さらに，透水係数の値も同一の封圧下では同程度であることがわかる．数値 [58]の近似線（**図 22** 破線；H 方向コア）と本研究における透水係数（G 方向コア）とを比較すると，後者の方が大きく，その差は 30%程度であった．この差は両者のコアの方向の違い（異方性）が表れ

ているものと考えられる．なお，両者の透水係数の仮数部を比較すると，その差は最大でも 1.1（有効封圧 3.55 MPa）であった．ここで，稲田花崗岩供試体（直径 50 mm，高さ 25 mm の円柱供試体）の透水係数に及ぼす異方性の影響について検討した結果 [57]をみると，H 方向コアと G 方向コアの透水係数（有効封圧 1～9 MPa の範囲）は，後者の方が大きく，その差は 40%程度であり，本研究と加藤ら [58]の近似線との差と同程度である．すなわち，本研究における装置を用いて H 方向コアの稲田花崗岩供試体の透水係数を求めれば，加藤ら [58]の近似線に重なってくるものと推測される．したがって，本研究で製作した定水位型透水試験装置を用いた手法でも，確立された信頼性の高いトランジェントパルス法と同様に低透水性岩石の透水性を評価することが十分可能であることが示せたと考える．

(2) 種々のインタクトな岩石の透水係数

封圧 P_c = 1～12 MPa 下における 7 種のインタクトな岩石供試体（稲田花崗岩を含む）の透水係数を**図 23** に示す．

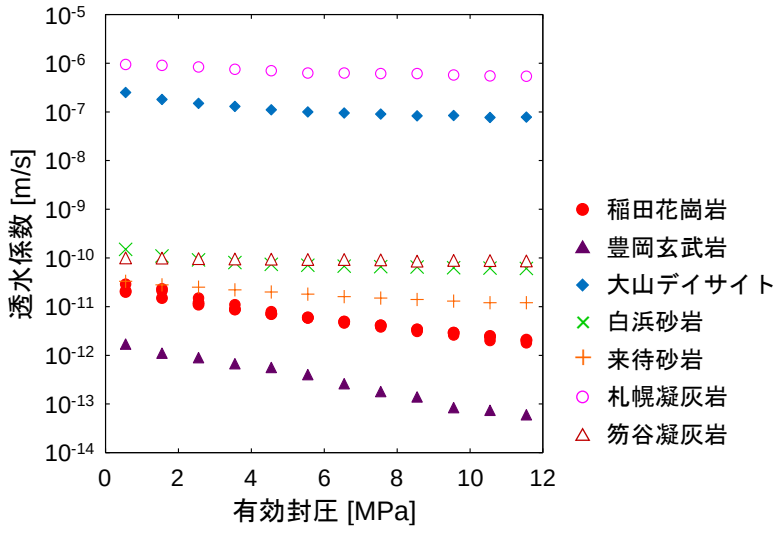


図 23　封圧 P_c = 1～12 MPa 下における種々のインタクトな岩石供試体の透水係数

各種の岩石供試体の透水係数はそれぞれ，1.7×10^{-12}～6.0×10^{-14} m/s（豊岡玄武岩），3.3×10^{-11}～1.2×10^{-11} m/s（来待砂岩），1.5×10^{-10}～6.1×10^{-11} m/s（白浜砂岩），1.0×10^{-10}～8.7×10^{-11} m/s（笏谷凝灰岩），2.5×10^{-7}～7.8×10^{-8} m/s（大山デイサイト），9.4×10^{-7}～5.4×10^{-7} m/s（札幌凝灰岩）であった．既往の研究で，来待砂岩の透水係数 k は 10^{-11} m/s 程度 [55),72),73)]および k = 10^{-10}～10^{-11} m/s 程度 [56)]，白浜砂岩は k = 10^{-10} m/s 程度 [74)]および k = 10^{-10}～10^{-11} m/s 程度 [56)]，札幌凝灰岩

は $k = 10^{-7}$ m/s 程度 [72]の透水係数が得られている．これらの研究は，供試体サイズ，温度・圧力等の測定条件が本研究と異なるため安易に比較すべきではないが，本研究で得られたこれらの岩石（来待砂岩，白浜砂岩および札幌凝灰岩）の透水係数のオーダーと同程度であることがわかる．

いずれの岩石供試体も，程度の違いはあるものの有効封圧が大きくなるにつれて透水係数が小さくなる傾向が観察され，花崗岩供試体と同様の傾向を示した．有効封圧の増加に伴う透水係数の低下については，来待砂岩 [55),56)]，白浜砂岩 [56),74)]においても報告されており，これらの研究結果とも整合的である．ここで，有効封圧の増加に伴う透水係数の低下度合いの違いを確認するため，有効封圧 $P_{ec} = 0.55$ MPa における透水係数を基準とした場合の各種岩石の透水係数の変化率を**図 24** に示す．

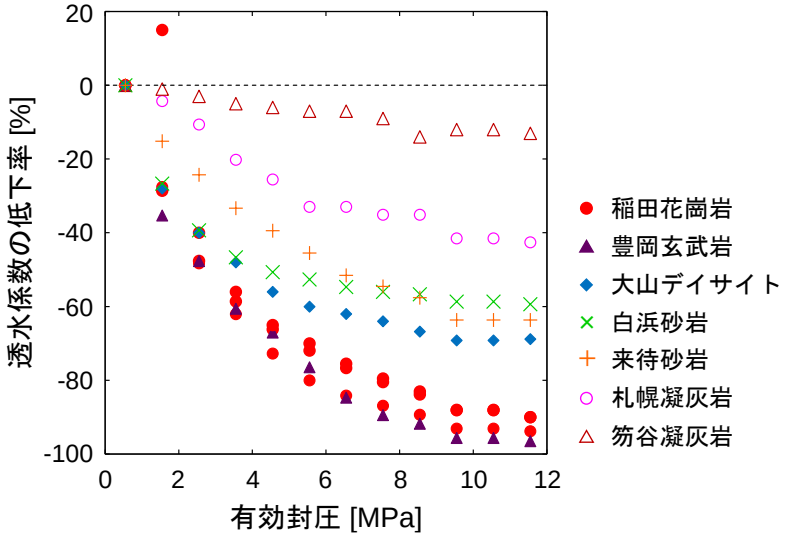


図 24　有効封圧 0.55 MPa における透水係数を基準とした各種岩石の透水係数の変化率

有効間隙率が数%と小さい豊岡玄武岩では，有効封圧の増加に伴う透水係数の低下度合いが大きく，$P_{ec} = 11.55$ MPa における低下率は 96.5%であり，稲田花崗岩と同程度であった．次いで，低下度合いが大きい供試体は，有効間隙率が十数%の大山デイサイト，白浜砂岩および来待砂岩の 3 種の岩石であり，$P_{ec} = 11.55$ MPa における低下率は 60%程度であった．笏谷凝灰岩の透水係数は，有効封圧の上昇に伴う顕著な変化は見られなかった．これは，笏谷凝灰岩の有効間隙率が 26.93%（**表 2**）と比較的大きく，有効封圧 $P_{ec} = 0.55$～11.55 MPa の範囲では，透水係数に大きな影響を与えるほどの空隙を閉塞させるに至らなかったため

と考える．ただし，札幌凝灰岩については笏谷凝灰岩よりも有効間隙率が非常に大きいにもかかわらず，有効封圧の増加に伴う透水係数の低下度合いが大きい．これは，**表 2** に示す物性値からもわかるように，札幌凝灰岩の乾燥密度および P 波速度は，笏谷凝灰岩に比べて非常に小さい．このことから，札幌凝灰岩は粒子骨格構造が脆弱であることが容易に推測され，空隙の閉塞に加えて供試体自体の圧縮が笏谷凝灰岩に比べて大きく，透水係数の低下につながったものと考えられる．

以上のように，本研究では製作した定水位型透水試験装置においても，封圧の上昇に伴う透水係数の低下傾向と，岩種の違いによる透水係数の低下度合いの違いについても既往の研究と整合的な結果が得られた．

3.3 残された課題と今後の計画

2021 年度は，特に，種々の溶液におけるベントナイトの膨潤特性および亀裂への充填性について検討したが，未実施の NaCl 水溶液を用いた検討を実施する必要がある．また，亀裂なし（a = 0 mm）の膨潤圧測定を実施し，亀裂の有無による供試体の密度低下を把握する必要がある．さらに，亀裂に侵入したベントナイトに対して各種分析を実施し，密度分布や組成の変化について確認する必要がある．これらの情報は，2022 年度実施予定の岩石の透水実験において必要不可欠な情報となる．これらの実験結果を踏まえてパラメータの設定についての議論および解析モデルのさらなら改良が必要である．そして，ベントナイトの膨潤による亀裂充填と浸食との関連性を明らかにすることが課題である．

以上の残された課題を加えて，2022 年度は，2 章の計画で示したように，ベントナイト試料の膨潤・充填性同時試験および透水試験の継続，ベントナイト試料の岩石亀裂充填性のモデル化の改良，ベントナイト試料で充填された亀裂を含む岩石の透水試験を実施する．なお，これらの検討は，今後の実験結果や進行度合い，評価委員会の指摘等を踏まえて適宜変更する予定であるが，引き続き，文献調査を実施し，最新の知見を取り入れながら研究計画へ反映させる予定である．

4. まとめ

2021 年度は，地層処分において起こり得る化学的作用に関する文献調査を行い，ベントナイト試料の膨潤・充填性同時試験および透水試験の実験条件の設定のための検討を行い，

ベントナイト試料の膨潤・充填性同時試験および透水試験，ベントナイト試料の岩石亀裂充填性のモデル化，岩石の透水試験装置の製作と予備試験を実施した．得られた成果をまとめると以下のとおりである．

ベントナイト試料の膨潤・充填性同時試験では，浸漬させる溶液の種類によってベントナイトの膨潤圧と侵入距離に違いが見られ，いずれも精製水に浸漬させたベントナイトの膨潤圧と侵入距離に比べて小さくなることが分かった．特に，KOH 水溶液，NaOH 水溶液および $MgCl_2$ 水溶液については，膨潤圧も大きく低下し，さらに，ほとんど隙間に侵入しておらず，これは，亀裂等の隙間を充填させる効果を期待する場面においては負の効果であると結論付けた．

ベントナイト試料の岩石亀裂充填性のモデル化では，既往の研究報告との違いを示した上で，本研究では，ベントナイトを高粘度の流体と仮定し，先端が閉口した亀裂へ侵入する流体の挙動を対象とした解析モデルを構築した．また，亀裂中は高湿度環境を想定し，この環境帯により気固界面のベントナイトの膨潤を固相の封入流体吸収現象と見なして解析モデルに組み込むことを考えた．構築した解析モデルを用いて，数例の解析を行い，実験値の傾向の把握と，ベントナイトの侵入挙動に対して，どの要因が支配的であるのかの把握を行った．解析結果から．ベントナイトの亀裂充填には，浸透による初期段階では膨潤圧および亀裂幅による影響が支配的であり，いずれ膨潤圧が粘性抵抗とつり合うと，侵入距離は平衡状態となり，それ以降は拡散の影響が支配的であることを結論付けた．

岩石の透水試験装置の製作と予備試験では，まず，低透水性岩石供試体に適用できるような定水位型透水試験装置の製作を試みた．次に，封圧 1〜12 MPa 下における種々のインタクトな岩石供試体（直径 50 mm，高さ 40 mm）の透水係数を測定した．さらに，封圧の上昇に伴い透水係数がどのように変化するかについて，既往の研究結果と比較して整合性を確認することで，試験装置の有用性について確認した．その結果，3 本の稲田花崗岩供試体の透水係数と既往の研究におけるトランジェントパルス法による稲田花崗岩の透水係数とを比較すると，封圧の増加に伴う透水係数の低下傾向が類似していることに加えて，透水係数の値も同一の封圧下では同程度であった．したがって，本研究で製作した定水位型透水試験装置を用いた手法でも，確立された信頼性の高いトランジェントパルス法と同様に低透水性岩石の透水性を評価することが十分可能であると考えられる．また，その他の各種の岩石供試体においても，封圧の上昇に伴う透水係数の低下傾向と，岩種の違いによる透水係数の低下度合いの違いが既往の研究結果と整合的であった．以上のことから，本

研究で製作した定水位型透水試験装置を用いた手法でも，透水係数が 10^{-5} m/s～10^{-14} m/s の範囲における岩石の透水性を評価することが十分可能であると結論付けた．

謝　辞

日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターの尾崎裕介氏には幌延泥岩のボーリングコア試料をご提供いただいた．**図 22** の作成に当たっては，北海道大学大学院工学研究院の加藤昌治氏に数値データ（参考文献 [58]）をご提供いただいた．評価委員会の先生方には数々の建設的なコメントを頂いた．記して，厚くお礼申し上げる．

参考文献

1) 鈴木英明，柴田雅博，山形順二，広瀬郁郎，寺門一馬：緩衝材の特性試験（I），*動力炉・核燃料開発事業団報告書*，PNC TN8410 92-057, 1992.
2) H. Komine, N. Ogata: Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite, *Canadian Geotechnical Journal*, **31**, 478–490, 1994.
3) L.H. Mollins, D.I. Stewart, T.W. Cousens: Predicting the properties of bentonite-sand mixtures, *Clay Minerals*, **31**, 243–252, 1996.
4) H. Komine, N. Ogata: Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal, *Soils and Foundations*, **39**, 83–97, 1999.
5) W.J. Cho, J.O. Lee, K.S. Chun: The temperature effects on hydraulic conductivity of compacted bentonite, *Applied Clay Science*, **14**, 47–58, 1999.
6) R. Pusch: Is Montmorillonite-Rich Clay of MX-80 Type the Ideal Buffer for Isolation of HLW?, *SKB Technical Report*, SKB-TR-99-33, 1999.
7) P.V. Sivapullaiah, A. Sridharan, V.K. Stalin: Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures, *Canadian Geotechnical Journal*, **37**, 406–413, 2000.
8) S.M. Shirazi, H. Kazama, F.A. Salman, F. Othman, S. Akib: Permeability and swelling characteristics of bentonite, *International Journal of the Physical Sciences*, **5**, 1647–1659, 2010.
9) K. Suzuki, H. Asano, R. Yahagi, I. Kobayashi, P. Sellin, C. Svemar, M. Holmqvist: Experimental investigations of piping phenomena in bentonite-based buffer materials for an HLW repository, *Clay Minerals*, **48**, 363–382, 2013.
10) 杉田　裕，千々松正和，雨宮　清：ベントナイトペレットを用いた緩衝材の隙間充填性

に関する検討（その 1）ベントナイトペレット膨潤後の止水性に関する検討，*平成 13 年度土木学会全国第 56 回年次学術講演会講演概要集*，CS1-001, 2001.

11) 千々松正和，雨宮　清，杉田　裕：ベントナイトペレットを用いた緩衝材の隙間充填性に関する検討（その 2）楔形状の隙間に対する充填性に関する検討，*平成 13 年度全国土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集*，CS1-002, 2001.

12) 杉田　裕，千々松正和，雨宮　清：ベントナイトペレットによる隙間充填性および人工海水下での性能確認，*平成 14 年度土木学会全国第 57 回年次学術講演会講演概要集*, CS10-038, 2002.

13) 小崎　完，河辺英樹，玉井秀明，佐藤正知，大橋弘士，高田實彌，森山裕丈：ベントナイト中の黄鉄鉱の酸化とそのオーバーパック材の腐食に与える影響，*原子力バックエンド研究*，**3**, 33–40, 1996.

14) 前田宗宏，棚井憲治，伊藤　勝，三原守弘，田中益弘：カルシウム型化及びカルシウム型ベントナイトの基本特性－膨潤圧，透水係数，一軸圧縮強度および弾性係数－，*動力炉・核燃料開発事業団報告書*，PNC TN8410 98-021, 1998.

15) S. Nakayama, Y. Sakamoto, T. Yamaguchi, T. Akai, T. Tanaka, T. Sato, Y. Iida: Dissolution of montmorillonite in compacted bentonite by highly alkaline aqueous solutions and diffusivity of hydroxide ions, *Applied Clay Science*, **27**, 53–65, 2004.

16) T. Yamaguchi, Y. Sakamoto, M. Akai, M. Takazawa, Y. Iida, T. Tanaka, S. Nakayama: Experimental and modeling study on long-term alteration of compacted bentonite with alkaline groundwater, *Physics and Chemistry of the Earth*, **32**, 298–310, 2007.

17) O. Cuisinier, F. Masrouri, M. Pelletier, F. Villieras, R. Mosser-Ruck: Microstructure of a compacted soil submitted to an alkaline PLUME, *Applied Clay Science*, **40**, 159–170, 2008.

18) 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.

19) T. Yamaguchi, T. Sawaguchi, M. Tsukada, M. Kadowaki, T. Tanaka: Changes in hydraulic conductivity of sand–bentonite mixtures accompanied by alkaline alteration, *Clay Minerals*, **48**, 403–410, 2013.

20) 笹本　広，J. Wilson，佐藤　努：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*，**20**, 39–52, 2013.

21) B. Chen, J. Guo, H. Zhang: Alteration of compacted GMZ bentonite by infiltration of alkaline solution, *Clay Minerals*, 51, 237–247, 2016.

22) H. Yasuhara, N. Kinoshita, H. Ohfuji, M. Takahashi, K. Ito, K. Kishida: Long-term observation of permeability in sedimentary rocks under high-temperature and stress conditions and its interpretation mediated by microstructural investigations, *Water Resources Research*, **51**, 5425–5449, 2015.

23) K. Aoyagi, E. Ishii: A method for estimating the highest potential hydraulic conductivity in the excavation damaged zone in mudstone, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **52**, 385–401, 2019.

24) T. Kubo, N. Matsuda, K. Kashiwaya, K. Koike, M. Ishibashi, T. Tsuruta, T. Matsuoka, E. Sasao, G.W. Lanyon: Characterizing the permeability of drillhole core samples of Toki granite, central Japan to identify factors influencing rock-matrix permeability, *Engineering Geology*, **259**, 105163, 2019.

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

26) 吉田英一 : 岩盤中の透水性亀裂とその長期的挙動－現状と今後の課題－, *地学雑誌*, **121**, 68–95, 2012.

27) G. Wang, T.M. Mitchell, P.G. Meredith, Y. Nara, Z. Wu: Influence of gouge thickness on permeability of macro-fractured basalt, *Journal of Geophysical Research*, **121**, 8472–8487, 2016.

28) M. Ishibashi, H. Yoshida, E. Sasao, T. Yuguchi: Long term behavior of hydrogeological structures associated with faulting: An example from the deep crystalline rock in the Mizunami URL, Central Japan, *Engineering Geology*, **208**, 114–127, 2016.

29) P. Pérez-Flores, G. Wang, T.M. Mitchell, P.G. Meredith, Y. Nara, V. Sarkar, J. Cembrano: The effect of offset on fracture permeability of rocks from the Southern Andes Volcanic Zone, Chile, *Journal of Structural Geology*, **104**, 142–158, 2017.

30) Y. Nara, M. Kato, R. Niri, M. Kohno, T. Sato, D. Fukuda, T. Sato, M. Takahashi: Permeability of granite including macro-fracture naturally filled with fine-grained minerals, *Pure and Applied Geophysics*, **175**, 917–927, 2018.

31) 奈良禎太，桑谷隆太，河野勝宣，佐藤稔紀，柏谷公希：カルシウムイオン濃度が異なる

水中に保存した岩石での鉱物析出，*材料*，**67**, 730–737, 2018.

32) 鎌田健人，奈良禎太，柏谷公希，多田洋平，藤井宏和，趙　越，松井裕哉，尾崎裕介：北海道幌延地域の原位置岩盤における炭酸水注入実験，*資源・素材学会関西支部 2021 年度第 18 回若手研究者・学生のための研究発表会講演要旨集*，講演番号 12，2021.

33) M. Kohno, Y. Nara, M. Kato, T. Nishimura: Effects of clay-mineral type and content on the hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures made of Kunigel bentonite from Japan, *Clay Minerals*, **53**, 721–732, 2018.

34) 河野勝宣, 西村　強 : 種々の溶液に浸漬させたベントナイト系材料の膨潤特性と透水性, *材料*，**71**,（印刷中）.

35) 浅野匡希，河野勝宣，西村　強，奈良禎太，加藤昌治：各種粘土鉱物を充填した巨視き裂を含む岩質材料の透水性，*第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演集*，471–476, 2021.

36) 島崎英彦, 新藤静夫, 吉田鎮男 編 : 放射性廃棄物と地質科学－地層処分の現状と課題, 東京大学出版会，1995.

37) 吉田英一：地層処分－脱原発後に残される科学課題－，近未来社，2012.

38) 杤山　修（原子力環境整備促進・資金管理センター 監修）: 放射性廃棄物処分の原則と基礎，ERC 出版，2016.

39) 菅野　毅，松本一浩：ベントナイト緩衝材の流出特性の評価（I），*動力炉・核燃料開発事業団報告書*，PNC TN8410 97-313, 1997.

40) 松本一浩，棚井憲治：ベントナイト緩衝材の流出特性の評価（II），*核燃料サイクル開発機構報告書*，JNC TN8400 2003-006, 2003.

41) 菅野　毅，岩田裕美子：緩衝材侵入現象モデルの検討（I），*核燃料サイクル開発機構業務委託報告書*，JNC TN8400 2003-026, 2003.

42) 菅野　毅，岩田裕美子：緩衝材侵入現象モデルの検討（II），*核燃料サイクル開発機構業務委託報告書*，JNC TN8400 2003-083, 2004.

43) 松本一浩，棚井憲治：緩衝材の流出／侵入特性，*核燃料サイクル開発機構報告書*，JNC TN8400 2003-035, 2004.

44) 松本一浩，棚井憲治：緩衝材の流出／侵入特性（II）－幌延地下水（HDB-6 号孔）を用いた緩衝材の侵入特性評価－，*核燃料サイクル開発機構報告書*，JNC TN8400 2004-026, 2005.

45) 松本一浩，棚井憲治：緩衝材の侵入現象モデルの適用性に関する検討，*日本原子力研究*

開発機構報告書, JAEA-Research 2009-070, 2010.

46) 松本一浩，藤田朝雄 : 緩衝材の侵入現象モデルの適用性に関する検討（II），*日本原子力研究開発機構報告書*, JAEA-Research 2010-058, 2011.

47) 松本一浩，藤田朝雄 : 緩衝材の流出／侵入特性（III），*日本原子力研究開発機構報告書*, JAEA-Research 2011-014, 2011.

48) 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－（総論レポート，分冊 1 わが国の地質環境，分冊 2 地層処分の工学技術，分冊 3 地層処分システムの安全評価，別冊 地層処分の背景），JNC TN1400 99-020, JNC TN1400 99-021, JNC TN1400 99-022, JNC TN1400 99-023, JNC TN1400 99-024, 1999.

49) 原子力発電環境整備機構 : 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－（要約，概要編，本編および付属書），NUMO-TR-20-01, NUMO-TR-20-02, NUMO-TR-20-03, 2021.

50) 中野政詩，雨宮　悠，藤井克己，石田朋靖，石井祐二 : 不飽和粘土の浸潤と膨潤，*農業土木学会論文集*，**1982**, 8-16, 1982.

51) 林　為人，高橋　学，廣野哲郎，佐々木　泰 : 岩石の透水係数の各種室内測定手法および測定結果の比較に関するレビュー，*資源と素材*，**119**, 519–522, 2003.

52) W.F. Brace, J.B. Walsh, T. Frangos: Permeability of granite under high pressure, *Journal of Geophysical Research*, **73**, 2225–2236, 1968.

53) 五十嵐敏文，田中靖治 : 難透水性岩盤の透水および溶質移行時性（その 1）－岩石マトリックス中の透水および溶質移行に関する室内試験－，*電力中央研究所報告*，U95054, 1996.

54) 加藤昌治，奈良禎太，福田大祐，河野勝宣，佐藤稔紀，佐藤　努，高橋　学 : 岩石の透水試験における環境温度の制御の重要性，*材料*，**65**, 489–495, 2016.

55) 杉本文男，松本浩二，遠藤　修 : トランジェント・パルス法による岩石の透水係数測定について，*応用地質*，**26**, 121–128, 1985.

56) 高橋　学，薛　自求，小出　仁 : 稲田花崗岩・白浜砂岩・来待砂岩・新第三紀泥質岩の透水特性について，*地質調査月報*，**42**, 3051–331, 1991.

57) 張　銘，竹中幹郎，江崎哲郎，高橋　学，遠藤秀典 : 拘束圧および異方性が岩石の透水・透気係数に及ぼす影響，*資源と素材*，**117**, 941–946, 2001.

58) 加藤昌治，高橋　学，金子勝比古：トランジェントパルス法を用いた低透水性岩石の水理定数の高精度評価，*Journal of MMIJ*, **129**, 472–478, 2013.

59) 奥野哲夫，斎藤　章：透水性の低い岩石の室内透水試験方法，*第 18 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集*，381–385, 1986.

60) 江崎哲郎，張　銘，竹田幹郎，高橋　学，坂井健太郎：難透水性地盤材料の定水位及び定流量透水試験法の理論的評価，*土木学会論文集*，**631**, 427–435, 1999.

61) The Japanese Geotechnical Society: Japanese Geotechnical Society Standards -Laboratory testing standards of geomaterials Vol. 1, JGS 0311-2009, Maruzen Publishing, 2015.

62) 資源・素材学会 残壁ハンドブック編集員会：残壁ハンドブック，丸善，2005.

63) 今村雅弘，千々松正和，杉田　裕，菊池広人，村田澄彦，雨宮　清，斎藤敏明：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緩衝材継目部の力学および浸潤特性，*土木学会論文集*，**673**, 61–70, 2001.

64) 菊池広人，棚井憲治，松本一浩，佐藤治夫，上野健一，鐵　剛志：緩衝材の飽和透水特性-II－海水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響－，*核燃料サイクル開発機構報告書*, JNC TN8430 2003-002, 2003.

65) 中村邦彦，田中幸久，廣永道彦：ベントナイト系材料に対する透水試験と膨潤圧試験の現状調査と試験による検討，*電力中央研究所報告*，N10026, 2011.

66) M. Kohno: Swelling-pressure and hydraulic conductivity of compacted clays focusing on the clay-mineral type, *Materials Transactions*, **62**, 1203–1209, 2021.

67) 高橋　学，平田実雄，小出　仁：稲田花崗岩の透水係数に及ぼす封圧および間隙水圧の影響について，*応用地質*，**31**, 105–114, 1990.

68) W. Lin: Permanent strain of thermal expansion and thermally induced microcracking in Inada granite, *Journal of Geophysical Research*, **107**, ECV 3-1–ECV 3-16, 2002.

69) 後藤龍彦，佐藤干城，深井　哲，入江正幸：2,3 の本邦岩石に対する間隙水圧効果－封圧下における岩石の力学的性質に関する実験的研究－，*日本鉱業会誌*, **98**, 393–398, 1982.

70) V.N. Phan, N.-T. Nguyen, C. Yang, P. Joseph, L. Djeghlaf, D. Bourrier, A.-M. Gue: Capillary filling in closed end nanochannels, *Langmuir*, **26**, 13251–13255, 2010.

71) J.B. Walsh, W.F. Brace: The effect of pressure on porosity and the transport properties of rock, *Journal of Geophysical Research*, **89**, 9425–9431, 1984.

72) 中村　大，後藤隆司，鈴木輝之，伊藤陽司，山下　聡：岩石の凍上に関する基礎的研究

－岩石の内部構造，物性値の比較を基にした凍上メカニズムの解明－，*Journal of MMIJ*, **124**, 231–239, 2008.

73) 高田迪彦，藤井義明，児玉淳一：三軸圧縮破壊過程における岩石の透水性に封圧が及ぼす影響に関する研究，*Journal of MMIJ*, **127**, 151–157, 2011.

74) 奈良禎太，中林　亮，米田哲朗，金子勝比古，P.G. Meredith：静水圧下における砂岩の透水性および弾性波速度，*材料*, **61**, 214–221, 2012.

2021 年度　外部発表

【学術論文】

1. 河野勝宣，坂田琴美，浅野匡希，野波将宏，小野祐輔，西村　強：定水位型透水試験装置を用いた種々のインタクトな岩石の透水性評価，*材料*, **71** (3), March 2022（印刷中）.
2. Masanori Kohno, Masaki Asano, Yusuke Ono, Tsuyoshi Nishimura: Evaluation of permeability of intact rock under confining pressure condition using a constant-head permeability tester, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Proceedings of the 11th Asian Rock Mechanics Symposium)*, **861** (2), 022046, Octorber 2021.

研究報告 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

北海道大学　大学院工学研究院

菊池　亮佑

目次

1　研究の背景と目的.....1
2　全体研究計画（2 ヶ年）.....4
3　令和 3 年度の研究実施内容.....5
3.1　令和 3 年度の計画、実施方法.....5
3.1.1　調査地域.....5
3.1.2　試料.....7
3.1.3　分析方法.....10
3.2　令和 3 年度の成果内容.....16
各ベントナイト原鉱石の鉱物組成および化学組成の特徴.....16
各ベントナイト試料の岩石組織.....23
TEM 観察に基づくベントナイト原鉱の微細構造.....28
全岩化学組成と母岩の推定.....31
酸素水素同位体比測定.....38
TCN 核種を用いた侵食速度の推定方法に関する検討.....41
3.3　課題と今後の計画.....44
4　まとめ.....45
参考文献.....47
謝辞.....50

1　研究の背景と目的

使用済燃料の再処理に伴い発生する高レベル放射性廃棄物の処分方法として、我が国では、300m 以深の深地層に埋設する地層処分が計画されている。高レベル放射性廃棄物の放射能は廃棄体に含まれる放射性核種の崩壊によって徐々に低下するが、十分に低いレベルとなるまでに長い期間を要する（図 1-1）。その間、放射性核種が人間の生活圏に悪影響を及ぼさないように、高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、ガラス固化体とその周囲を囲むオーバーパック（炭素鋼）、膨潤性粘土鉱物を主成分とするベントナイト緩衝材で構成された人工バリアと、処分サイト周辺の岩盤からなる天然バリアの組み合わせによる多重バリアシステムによる封じ込めが想定されている（図 1-2）。

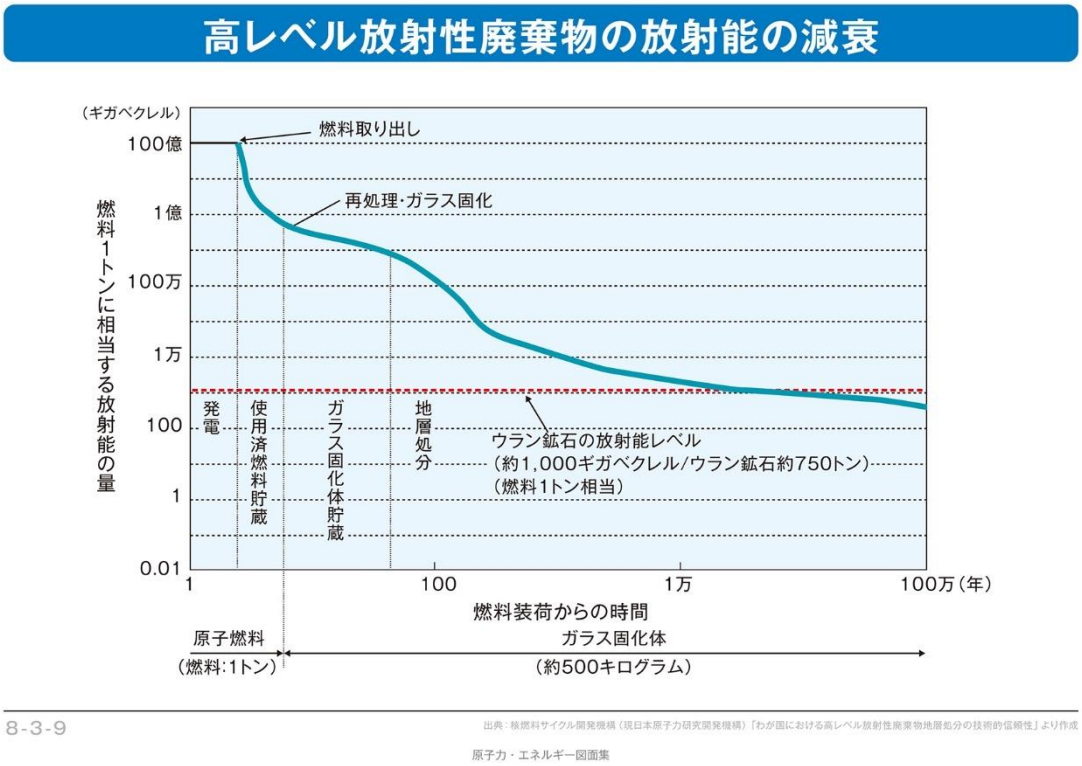


図 1-1　高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の放射能の減衰（日本原子力文化財団、2022）

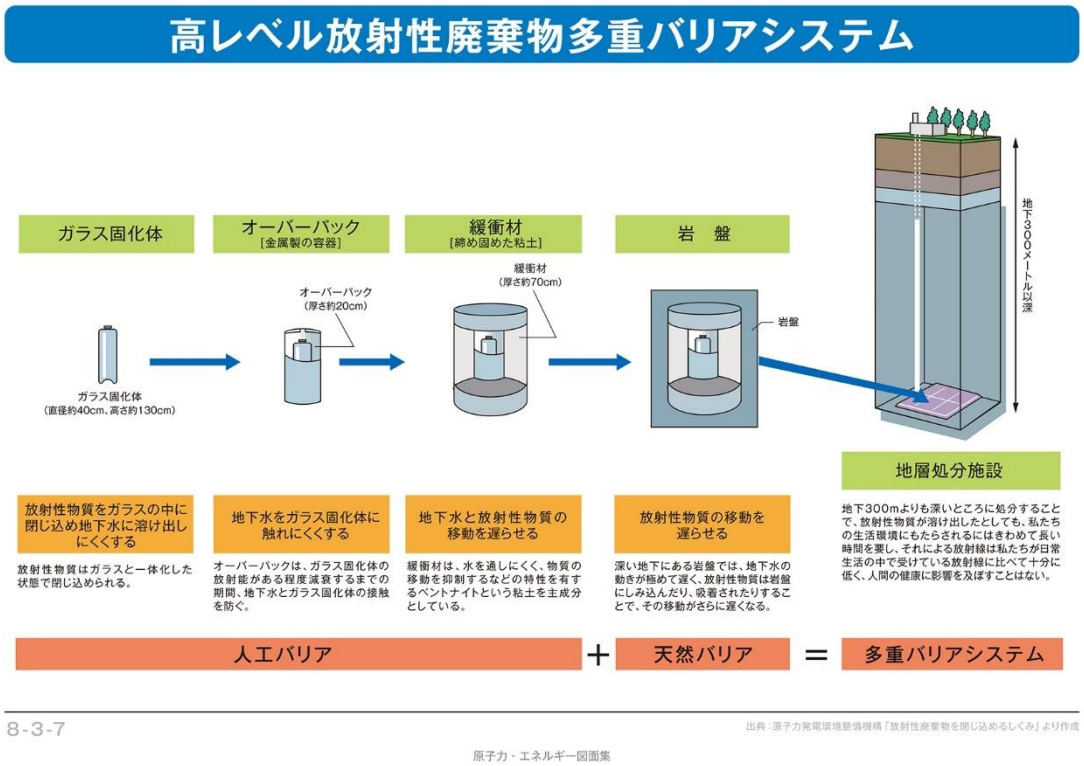


図 1-2　高レベル放射性廃棄物の地層処分における多重バリアシステム（日本原子力文化財団、2022）

地層処分研究開発に関する全体計画の中では、廃棄体定置後から閉鎖後長期にわたる安全性評価のためのシナリオ構築するために、ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化が進められている。これまで熱・水理・力学・化学・核種移行などの個別の現象に重点を置き、かつ保守的な条件のもとにニアフィールド（処分場近傍の 100 m 程度の領域）における安全性評価が行われてきた。今後は、オーバーパック・緩衝材・セメント系材料・岩石といった複数の構成要素からなるニアフィールドの構成要素間の界面でおこる相互作用を考慮した解析手法の検討や地質環境の条件に応じたパラメータの取得方法の検討が予定されている。

緩衝材は、廃棄体への地下水の接触や核種移行を抑制するために、低透水性・自己シール性（膨潤性）・地下水に対する化学的緩衝能・核種の収着能・応力緩衝能といった性能が要求される。これまでベントナイトを適切な密度に締め固めることでこれらの機能を満たすことができると考えられている（核燃料サイクル開発機構、1999）が、加えて諸性能が長期にわたって健全に保持されることが重要である。緩衝材として用いられるベントナイトの

諸性能は主要構成物であるモンモリロナイト（膨潤性の粘土鉱物）に大きく依存している。そのため、①モンモリロナイト自身の鉱物化学的変化（Ca 型化やイライト化・クロライト化など）、②モンモリロナイト周囲での二次鉱物の生成、③二次鉱物によるセメンテーションといった変質が生じた場合は緩衝材に期待されている機能が低下する懸念がある。

これらの変質シナリオの中でも、イライト化などに代表される①の変質シナリオは既に多くの研究がなされており、緩衝材周囲の地温を 100℃以下に抑えることでイライト化のシナリオが排除されている。一方、モンモリロナイト自身の鉱物学的変質が起こらないようなより常温に近い環境においても、モンモリロナイトあるいは随伴鉱物の溶解に伴う二次鉱物の間隙への沈殿や、発熱廃棄体の近傍での間隙水の蒸発・凝縮で生じる溶質の析出に伴って、粒子同士の固着が進行する現象、すなわちセメンテーションがベントナイトの膨潤性能の低下をもたらす可能性は除外できない。一方で、地下水との接触に伴ってベントナイトの一部がコロイド化し、溶液中に流出してしまう現象、すなわちケミカルエロージョンが起こるシナリオ（Reijonen & Marcos, 2017）においては、セメンテーションによる抑制効果が働く可能性が期待されている。このように、緩衝材の長期安定性に対してセメンテーションは正負どちらの効果も齎しうると考えられているが、そのメカニズムや定量化に対する知見・手法の欠如から人工バリアの変質シナリオや評価モデルには組み込まれていない。

長期的かつ複雑な変質現象であるセメンテーションの影響を室内実験のみで再現・評価することは困難であるため、自然界からバリア材の類似物質を見出だし、その物性やメカニズムを評価するナチュラルアナログ研究（吉田ら, 2010; 北山ら, 2010）の視点が必要となる。H30 年および H31 年度ニアフィールドシステム評価確証技術開発（2019, 2020）においては、山形県月布鉱山産のベントナイト原鉱石とそれを一度粉砕し圧縮成形し直した再構成試料の間での、膨潤圧・透水性・剛性といった基本特性データの取得が行われている。同様に、伊藤&小峯 (2020)においても、複数の鉱山から得られたベントナイト原鉱石および再構成試料間の膨潤特性が評価・比較されている。これらの研究では、セメンテーションを被った原鉱石では膨潤圧が低く留まる、あるいは膨潤圧上昇により時間を要する傾向が報告されている。一方で、透水性は原鉱石と再構成試料間で同程度の結果を示している。

上記を踏まえ本研究では、月布鉱山から得られる複数の原鉱石を、長期間天然環境においてセメンテーションを被った緩衝材のアナログ物質としてとらえ、ベントナイト原鉱石のセメンテーション物質の同定とその多様性を調査し、膨潤圧低下といった基本特性に影響を与えるメカニズムやセメンテーションの進行過程について検証を行う。

2　全体研究計画（2 ヶ年）

本研究では、山形県月布鉱山およびその周辺に分布する複数のベントナイト原鉱石を収集し、各原鉱石の構成鉱物や鉱物粒子を固着させているセメント物質の同定とその多様性の検証を行う。調査地域の選定理由は、これまで同鉱山産のベントナイトを対象に多数の試験が実施されている点を考慮した。筆者らの予察的観察（R2 年度ニアフィールドシステム評価確証技術開発 2021）では、月布鉱山で採掘されている主要なベントナイト間での岩石組織の違いが見られている。一般的に、室内実験と異なり、ナチュラルアナログ研究においては温度や反応時間などの実験パラメータを自由に振ることが困難であるが、月布鉱山周辺で見られる複数のベントナイト間を比較することで、セメンテーションの進行に影響を与える要因の解明が期待される。

本研究期間は令和 3 年度から令和 4 年度の 2 年間で、各年度の研究計画は以下の通りである。

令和 3 年度は、（1）山形県月布鉱山周辺での野外調査を実施し、複数のベントナイト試料を採取する。また、調査において現地露頭の確認、サンプリング位置の決定、サンプル採取方法の策定を行う。（2）採取したベントナイト試料の主要構成鉱物を調べるとともに、粉砕前の原鉱石の岩石組織やセメント物質を明らかにするために、走査電子顕微鏡あるいは透過電子顕微鏡による観察を行う。併せて、各ベントナイト層が続成作用時に経験した温度や、母岩となった火山灰の化学組成などの地球化学的パラメータの推定も行う。（3）セメンテーションによる侵食への抑制効果の検証に資するために、ベントナイト中の宇宙線生成核種（TCN）の同位体分析に基づいた侵食速度推定方法の適用可能性に関して検討を行う。

令和 4 年度は、（1）1 年目の検討で抽出された課題に対応するための野外調査および追加試料の採取を実施する。（2）追加試料については令和 3 年度と同様に鉱物学的手法による特徴付けを行う。鉱物学的微細観察によるセメント物質の同定を継続して実施する。鉱山内の試料に加えて、地表で採取される試料の分析も進める。（3）河川水との接触によるベントナイト層の侵食速度推定に関して、前年度の検討を基に、宇宙線生成核種の同位体測定を検討する。

3　令和 3 年度の研究実施内容

3.1　令和 3 年度の計画、実施方法

本年度は、山形県月布鉱山周辺での野外調査および試料採取を行うとともに、採取された多数の天然試料の鉱物学的特徴付けを行った。野外調査については、新型コロナウイルス感染症の流行の影響から当初の予定よりも遅れたタイミングでの実施となったが、令和 2 年度に別途採取した試料と併せて分析を進めた。

月布鉱山周辺に見られる複数のベントナイト層には層毎に、層厚や鉱物組成に違いがあることが知られている。R2 年度ニアフィールドシステム評価確証技術開発（2021）では、主に採掘されている 1 番層、29 番層、31 番層の間での岩石組織の違いが報告されている。より古い時代に堆積した火山灰から形成された下盤側のベントナイトほど、より深く埋没し続成作用の進行度が上昇しているということが想定されるが、天然環境における岩相の違いを生む要因としては、時系列変化・経験温度の違い・出発物質の違いといった複数の原因が考えられるため、これら地球化学的パラメータについてもそれぞれ検証を行った。それぞれ経験温度の推定のために酸素水素同位体比の測定を実施し、出発物質の化学組成の推定のために微量元素の定量を実施した。

3.1.1 調査地域

調査対象の月布ベントナイト鉱床は山形県大江町大字月布に分布する。この地域には新第三紀中新世の海成層である泥質岩および凝灰岩が広く分布している。地層の走向は主に南北系で、復背斜構造をなす。層厚に変化は見られるものの、側方連続性がよく数 km 以上にわたって追跡が可能である。クニミネ工業（株）はこれを下位から月布層および貫見層に区分しており、それぞれ山形(1963)の「水沢層」および「間沢層」に相当する。月布層は下位から（1）淡緑色砂質凝灰岩層部層、（2）褐色硬質頁岩部層（ベントナイト層を含む)、（3）暗褐色硬質泥岩部層に、貫見層は（4）灰色凝灰質細粒砂岩部層、（5）黒色泥岩部層に大別される。本地域の地質概略図・地質横断図を（図 3-1）に示す。

現在月布ベントナイト鉱床は、クニマイン（株）によって坑内掘りにより採掘されており、一つの背斜構造の東側背斜翼を梅ノ木田坑、西側背斜翼を川向坑と呼んでいる。両翼では炭酸塩鉱物やモンモリロナイトの組成・産状に違いが見られることが報告されている（横山ら, 2004)。

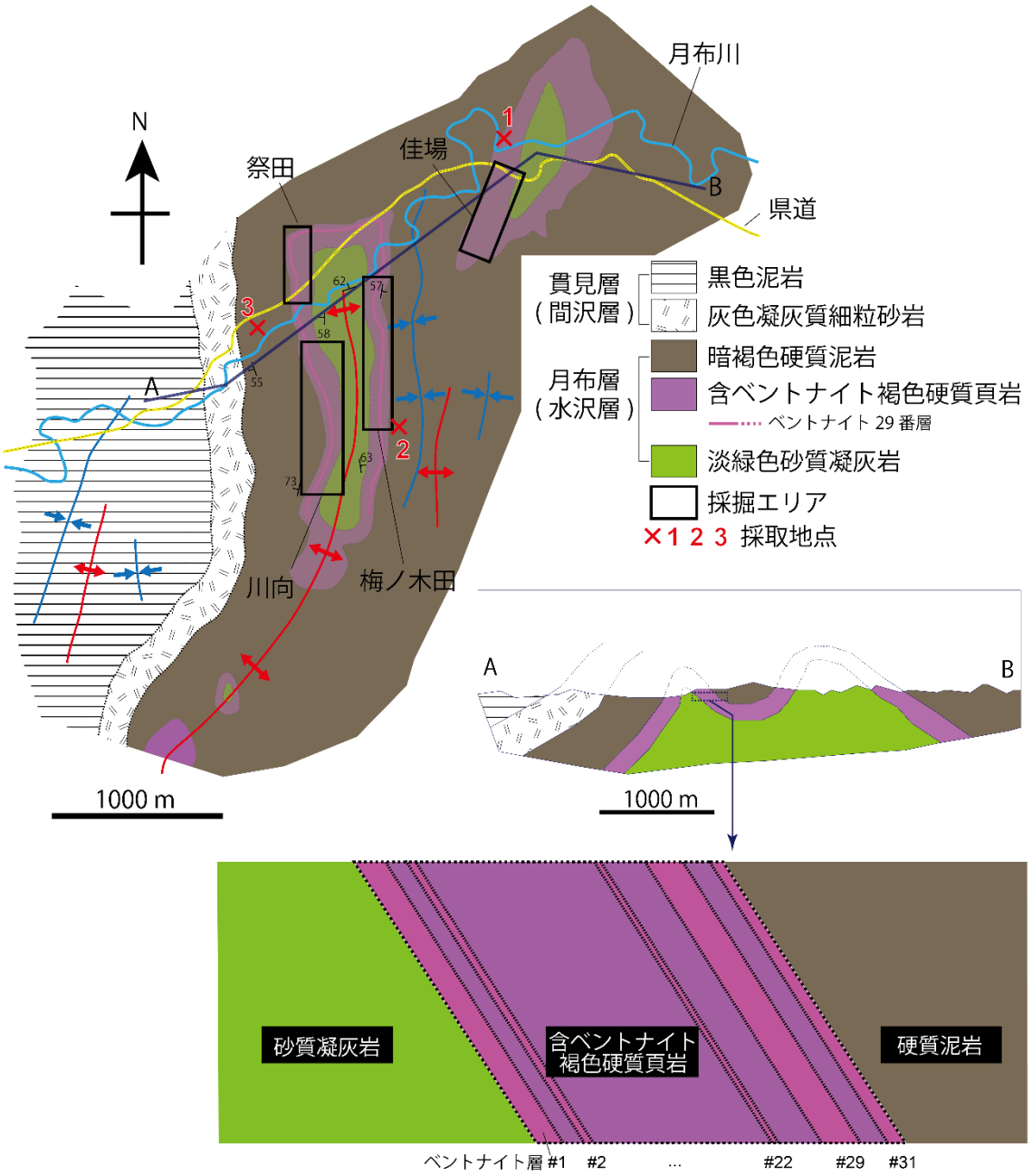


図 3-1 月布ベントナイト鉱床周辺地質図

岡本ら（1993）および Takagi （2005）を基に、月布川の河道・県道を現在の位置に修正。29 番層の分布、および走行傾斜は動力炉・核燃料開発事業団(1994, personal communication)の資料を基に作成。月布ベントナイト鉱床は、頁岩とベントナイトの互層構造になっており、砂質凝灰岩との境界にあたる下盤側から上盤側に向かって順に番号が付けられている（X番層とは下盤側からX番目のベントナイト層を指す）。

3.1.2 試料

本研究では、2020 年 12 月及び 2021 年 11 月に野外調査を通して採取したものを対象とした。図 3-1 上で×印を付けた 3 地点のうち、（1）において、地表に露出したベントナイト原鉱石を採取している。背斜軸東翼側の梅ノ木田抗に相当する（2）では、海抜 101m（地表面から約 265-270 m 下）に存在する横坑にて、主要なベントナイト層、ベントナイト層と隣接する褐色硬質頁岩、および 1 番層下盤に分布する凝灰岩から代表的試料を採取した。また、梅ノ木田坑側の試料との比較のため、川向坑側のベントナイト試料を（3）位置において実施されたボーリング調査のコア試料から分取した。コア試料中の地表下 312~437 m 部分に挟在するベントナイト層の中から、層厚が 1m 程度の層からは 1 点ずつ、2m 以上ある厚い層からは 2 点ないしは 3 点ずつ代表的試料を採取した。試料は、長期間保管されて一部表面が黄色く変色したものや、乾燥によるひび割れのあるものもあったが、見た目からなるべく保存状態の良いものを代表的試料として採取した。

採取位置別に試料一覧を表 3-1 から表 3-3 に示す。

表 3-1 梅ノ木田抗内、新通気抗道（**図 3-1** の採取地点２）からの採取試料

日付	サンプル名	説明
2020/12/2	TKN-tuff	1番層下盤側の砂質凝灰岩　黄褐色
2020/12/2	TKN-01	1番層。下盤側の凝灰岩との境目を採取。
2020/12/2	TKN-06	6番層。
2020/12/2	TKN-08	8番層
2020/12/2	TKN-12	12番層。濃灰色
2020/12/2	TKN-13	13番層。灰白色
2020/12/2	TKN-17	17番層。やや黄色がかった灰色
2020/12/2	TKN-22	22番層。灰色
2020/12/2	TKN-29-01	29番層。下盤側。
2020/12/2	TKN-29-02	29番層。上盤側。
2020/12/2	TKN-31	31番層。灰色
2021/11/9	TKN-U01	1番層
2021/11/9	TKN-U06	6番層
2021/11/9	TKN-U13	13番層
2021/11/9	TKN-U22	22番層
2021/11/9	TKN-U29-01	29番層下盤側
2021/11/9	TKN-U29-02	29番層上盤側
2021/11/9	TKN-U31	31番層
2021/11/9	TKN-UT01	1番層下盤の凝灰岩
2021/11/9	TKN-US01	6番層上盤の頁岩
2021/11/9	TKN-US02	13番層下盤中の頁岩
2021/11/9	TKN-US03	13番層下盤境界付近の頁岩
2021/11/9	TKN-US04	31番層上盤境界付近の頁岩
2021/11/9	TKN-US05	31番層上盤中の頁岩

表 3-2 川向抗側（採取地点３）のボーリングコア試料

日付	サンプル名	地表からの深度（m）	説明
2021/11/8	TKN-K02-01	436.0 - 437.0	2番層下側
2021/11/8	TKN-K02-02	434.0 - 435.0	2番層中
2021/11/8	TKN-K02-03	432.3 - 433.3	2番層上側
2021/11/8	TKN-K06	411.8 - 413.4	6番層
2021/11/8	TKN-K08	402.5 - 405.2	8番層
2021/11/8	TKN-K12	387.1 - 388.2	12番層
2021/11/8	TKN-K13	383.5 - 385.2	13番層
2021/11/8	TKN-K17	379.0 - 380.9	17番層
2021/11/8	TKN-K19	371.7 - 373.4	19番層
2021/11/8	TKN-K22	364.1 - 365.2	22番層
2021/11/8	TKN-K29-01	337.0 - 338.0	29番層下側
2021/11/8	TKN-K29-02	332.0 - 333.0	29番層上側
2021/11/8	TKN-K32-01		32番層下側
2021/11/8	TKN-K32-02	312.5 - 314.2	32番層上側

表 3-3 地表露頭（採取地点 1）から採取したベントナイト試料

日付	サンプル名	説明
2020/12/2	TKNS01	地表露頭で採取　風化が進んでおり、茶褐色・濃褐色に変色している部分あり。
2020/12/2	TKNS02	地表露頭で採取。流水につかっているが灰白色を示す綺麗な状態

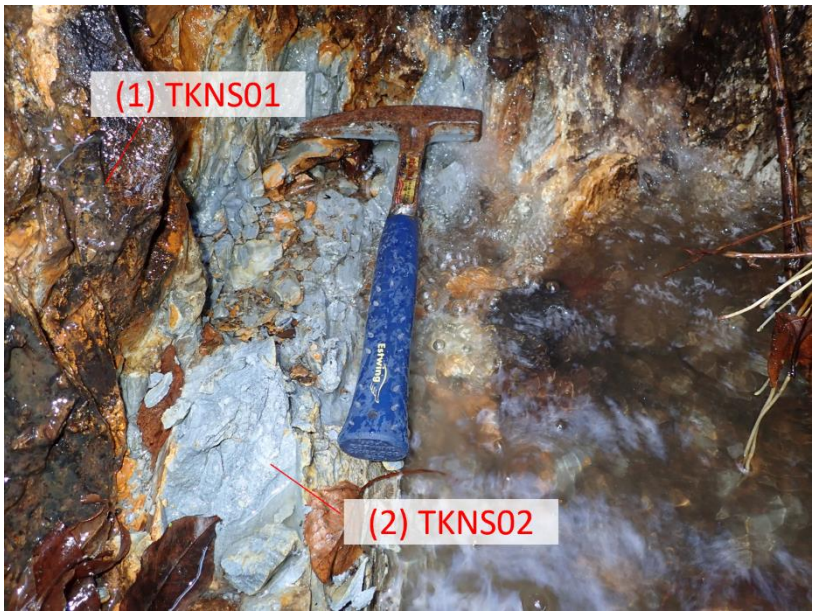


図 3-2 地表露頭のベントナイト試料（TKNS01 および TKNS02）の産状

3.1.3 分析方法

・薄片試料の作成

ベントナイト原鉱石および凝灰岩の鏡面研磨薄片を北海道大学大学院技術部薄片技術室に依頼し作成した。膨潤性の粘土鉱物に富むベントナイトの性質上、通常の岩石薄片作成法では分析用試料として必要な平面精度を得ることが極めて難しいため、加工中に水、油等の液体に触れさせない完全乾式による作成法（大和田ら, 2013）によって作成を行った。

・粉末 X 線回折（XRD）分析

岩石試料中に含まれる鉱物の同定及び粘土鉱物の底面間隔を調べるため、粉末 X 線回折分析（XRD）を行った。

① 全岩における構成鉱物の同定

採取したすべての試料について全岩における鉱物組成を同定するため、不定方位試料の XRD 分析を行った。試料はメノウ乳鉢を用いて細かく粉砕した。装置は株式会社リガク製の粉末 X 線回折分析装置 RINT1200 を用い、測定条件は 3～90°の範囲で測定した。サンプリング幅は 0.02°、スキャンスピードは 2 °/min、40 kV -15 mA で測定した。

② 粘土画分の定方位試料測定

ベントナイト試料および2021年度に梅ノ木田坑で採取した凝灰岩と頁岩の試料の粘土画分について、定方位試料を作製しXRD分析を行った。試料約10 mgを蒸留水 300 µgに懸濁させ、超音波分散機を用いてよく分散させた上でスライドガラスに均一に塗り、一晩常温で乾燥させて定方位試料を作製した。また含まれる粘土がスメクタイトであるかどうか確認するため、エチレングリコール処理（EG 処理）を行った。EG 処理では、定方位試料をエチレングリコールの入ったプラスチック製容器に直接接触しないように入れ、容器を70℃の恒温炉に12時間静置させて蒸発したエチレングリコールに晒した。続いて定方位試料を容器から取り出し、XRD分析を行った。装置は①と同様に株式会社リガク製の粉末 X 線回析分析装置RINT2100を用い、測定条件は3〜40°の範囲で測定した。サンプリング幅は0.02°、スキャンスピードは1 °/min、40 kV-15 mA で測定した。

③ 水簸によるスメクタイト単離の確認

後述する同位体比測定のため、水簸によりバルクの粉末試料から細かい粒径画分を抽出し、XRDによってスメクタイトの単離が適当に行えているかどうか確認した。定方位試料作製及び EG 処理は②と同様に行った。装置は RIGAKU 製の XRD Multiflexを用いた。測定条件は電圧：40 kV、電流：30 mA、モード：FT、計数時間2.0、スリット条件…DES：0.5°、SS：解放、RS：解放、管球：Cu、モノクロメータ：有　スキャンステップ0.02°、スキャンスピード2.0°/min、走査軸2θ/θ、測定範囲5–70°の条件で分析を行った。

・X 線蛍光分析

岩石試料の全岩化学組成の分析のため、蛍光 X 線分析（XRF）のガラスビード法を行った。

試料はハンマーによって粗砕した後、秒速粉砕機（Multi beads shocker , PG2000, 安井器械）により、メノウ製の粉砕媒体を用いて細かく粉砕し粉末試料にした。粉末試料約2 gを秤量し磁器るつぼに入れ、マッフル炉を用いて強熱減量を行った。強熱減量は、試料を110℃で一晩加熱し吸着水を取り除いた上で、1000℃で12時間加熱を行った。また、XRF分析で各元素の割合の合計が100±2%にならなかった試料については、1000℃加熱する時

間を 24 時間に延長した。試料中の揮発性物質（ベントナイトの場合、主に H_2O）の質量の指標となる強熱減量（LOI）は、110℃加熱した後の 1000℃加熱前後の重量変化から計算した。

続いて強熱減量した試料 0.4g を秤量、四ホウ酸リチウムと 1:10 の比率で混合し、剥離剤としてヨウ化リチウムを少量添加してガラスビードを作製した。ガラスビードの作製は、卓上型ビード&フェーズサンプラーTK-4100 によって行い、容器に白金るつぼを用いた。作製したビードを、北海道大学大学院理学院地球惑星固体物質解析システム研究室に依頼し、エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置（波長分散型 XRF, MagiXPRO, PANalytical）を用いて測定した。

・SEM

① 薄片を用いた岩石組織の観察

主要なベントナイト層の組織の観察のため、走査型電子顕微鏡（SEM）による薄片の観察を行った。装置は JEOL 製の JSM-IT200 を用いた。また EDS により、モンモリロナイトの化学組成を定量的に分析した。試料は 2020 年に採取したもののうち、凝灰岩とベントナイトの 1, 6, 8, 13, 17, 22, 29, 31 番層を用いた。

② 水簸によるスメクタイト単離の確認

後述する同位体比測定におけるスメクタイト単離を確認するため、水簸した粉末試料を SEM によって観察した。微量の試料を試料台の上に貼ったカーボンテープの上に薄く拡げ観察を行った。前述の XRD の結果と照らし合わせ、石英などスメクタイト以外の鉱物が見られない画分をスメクタイト単離の条件と判断した。

・透過型電子顕微鏡（TEM）による観察

SEM 観察で見られるシリカ微粒子とモンモリロナイトの界面や空隙構造を TEM で観察するための薄膜試料を収束イオンビーム（FIB）によって作成した。北海道大学工学研究院ナノマイクロマテリアル分析研究室の JIB-4600F/HKD（JEOL）を用い、加工には加速電圧 30 kV の Ga イオンビーム（仕上げ加工のみ 5 kV）、観察には加速電圧 10 kV の電子ビームを利用した。なお、加工中のビーム損傷を防ぐために、加工部分の表面にはタングステンの薄膜を形成した。

FIB-SEM によってシリカ微粒子とモンモリロナイト界面を含む超薄切片をピンポイントで作成した後、微細組織および各鉱物の化学組成を透過型電子顕微鏡（TEM）よって調べた。TEM による観察は北海道大学工学研究院ナノマイクロマテリアル分析研究室の JEM-2010（JEOL）を用いて加速電圧 200 kV にて使用した。画像は中間マウント CCD カメラ DV300V（Gatan）もしくはボトムマウント CCD カメラ MultiScan Camera Model 794（Gatan）で記録した。制限視野電子回折像を含む画像の処理は DigitalMicrograph（Gatan）および EDA（小暮, 2015）を用いて行った。

・酸素水素同位体分析

粘土鉱物中の酸素・水素同位体比は、結晶化した際の周囲の水と鉱物間での同位体分別と水中の同位体組成で決定される（Savin＆Epstein, 1970）。同位体分別効果は温度に依存することから、特定鉱物の形成温度推定のために同位体比を利用することが出来る。

① 水簸による試料の抽出

スメクタイトの結晶化した温度の推定のためには、純粋なスメクタイトのみを単離し、その酸素・水素同位体比を測定する必要がある。そこで各ベントナイト層からスメクタイトを単離できる粒径画分を調べた。

まず SEM による薄片の観察から、単離の際に最も混入しやすい微細な石英の粒径を大まかに見積もった。続いて水簸により複数の異なる粒径画分を抽出した。抽出した試料は凍結乾燥させた上で定方位試料とし、XRD 分析によりスメクタイト以外のピークが見られないかどうか確認した。また SEM による粉末の観察も行い、微細な石英が見られないかどうか確認した。XRD と SEM の両方で微細な石英が確認出来ない画分をスメクタイト単離の条件とした。

② 抽出したスメクタイト試料の K 飽和処理

スメクタイトの酸素・水素同位体比を測定する際には、しばしば層間の吸着水の影響が懸念される。スメクタイトは加熱によって脱水させても、数分で空気中の水蒸気を吸着することが知られている。吸着水は空気中の水蒸気の酸素・水素同位体比を反映するため、構造中の同位体比を測定するにあたって混入することは避けるべきである。そのため、試料を加熱後オートサンプラーに導入までの間にスメクタイトが復水しな

いよう、可能な限り速やかに試料を容器に封入しオートサンプラーに導入する必要がある。Kanik et al. (2021)は、スメクタイトの層間を Ca^{2+},$Na^{+}$$K^{+}$の各種イオンで飽和処理し比較した際、$K^{+}$で飽和させた試料が最も加熱後の復水の影響が少なく、構造中の水素同位体比をより正確に測定できることを報告している。本分析にあたってはこれに倣い、スメクタイトの層間陽イオンを K+に置換させた上で測定に臨んだ。

まず、水簸により抽出したスメクタイト試料を 2 M KCl 水溶液に浸し、15 分ほど振とうさせてから遠心分離機により固液分離した。この操作を 3 回繰り返した。続いて、過剰な塩を取り除くため試料をイオン交換水に浸し、同様に 15 分ほど振とうさせてから固液分離をした。この操作も 3 回繰り返した。その後、試料を凍結乾燥機に入れ十分に乾燥させ、メノウ乳鉢を用いて細かい粉末にした。

③ 同位体比測定

同位体比測定は Thermo Scientific 社の Delta V Plus によって行い、試料を熱分解型元素分析計前処理装置（TC/EA）にて 1450℃で加熱し熱分解させ、ガスクロマトグラフィーによるガスの分離を行った上で、ConFlo Ⅳ ユニバーサルインターフェースを用いて質量分析計に導入する。この装置の特徴としては、試料を高温下で瞬間的に熱分解し、酸素・水素同位体比の同時測定が可能である。TC/EA における燃焼温度を 1450℃、ガスカラム（GC）の温度を 90℃に設定して測定を行った。また測定にあたっては、同位体比が既知の標準試料を 2 種類以上用いて検量を行った。水素用の標準試料は、USGS57(biotite, δD=-91.5‰)と USGS58(muscovite, δD=-28.4‰)を用いた（Qi et al. 2017）。酸素用の標準試料は、NBS18(calcite, $\delta^{18}O_{VPDB}$=-23.0‰、換算して $\delta^{18}O_{VSMOW}$=7.15‰) 、 IAEA-602(benzoic acid, $\delta^{18}O_{VSMOW}$=71.28‰) 、NBS28(quartz, $\delta^{18}O_{VSMOW}$=9.6‰)を用いた。

酸素同位体比を測定するにあたって、珪酸塩鉱物は Si-O の強固な結合のネットワークを切断することが必要になる。Menicucci et al. (2013)は石英などの珪酸塩鉱物の試料と PTFE 粉末とグラファイト粉末を混合することで、珪酸塩鉱物から酸素を取り出し同位体比分析に供する方法を紹介している。従来は珪酸塩鉱物を BrF_5 と反応させて酸素を取り出すオフラインの測定が主流であったが、PTFE を使う方法はオンラインでより安全に効率的に分析が行えるメリットがある。この方法における石英の分解は以下の反応式で表される。

$$SiO_2 + C_2F_4 + C_{excess} \rightarrow 2CO + SiF_4 + C_{excess}$$

この反応では、同位体比測定に必要な CO ガスと副生成物としてフッ化ガスが生成される。このフッ化ガスの詳細な種類について検討は行われていないが、主に SiF_4 や CF_4 であることが推測される。PTFE を加熱した際に、分解により CF_4 が発生し、SiO_2 存在下ではより安定な SiF_4 が生成されることが報告されている（Hirai et al., 2017; Mogab et al., 1978）。Al_2O_3 存在下でも同様に、より安定な AlF_3(g)や AlF_3(s)が生成され、PTFE が過剰な場合は CF_4 が発生することが報告されている（Hobosyan et al., 2015）。石英やスメクタイトなどの珪酸塩鉱物は構造中に Si や Al、Mg を含み、TC/EA で反応させた際に Si や Al を含むフッ化ガスが生成されると考えられる。

これらフッ化ガスは、同位体比測定の際に干渉を起こすことやバックグラウンドを乱すおそれがあるため、質量分析計導入の前に除去する必要がある。これらのガスを除去する方法として、Gehre et al. (2003)はアスカライト II®（バーミキュライト表面に NaOH を塗布した吸着材）のカラムを用いている。Menicucci et al. (2017)では、アスカライトとシカペント（sicapent, P_2O_5）を用いている。本分析では、長さ 30cm の吸着管を用いて、上流側にアスカライトを 20cm、下流側に吸水用の過塩素酸マグネシウム（$Mg(ClO_4)_2$）を 10cm 詰めたカラムを作製し、TC/EA と GC の間の流路に設置した。

IAEA-602 以外の試料は、るつぼに入れ恒温炉で 220℃で 4 時加熱した上で銀カプセルに封入した（Kanik et al., 2021）。水素同位体比測定用の試料は、水素重量が 0.02 mg になるようにマイクロ天秤を用いて秤量した。酸素同位体比測定用の試料は、酸素重量が 0.1 mg になるように秤量した。同位体比測定では量依存効果があるので、重量の誤差が±5%以内に収まるように秤量した。酸素同位体比測定用の試料のうち Si を含む NBS18 とスメクタイトについては、試料中の Si に対して PTFE(C_2F_4)のモル比が 2.3 以上になるように PTFE を添加した(Menicucci et al., 2013)。なお、吸着水の影響を最小限に抑えるため、銀カプセルと PTFE も試料と同様に事前に 220℃で 4 時間以上の加熱を行った。封入した試料は、ガラス試験管に入れて恒温炉で 220℃で 4 時間以上加熱してから、速やかにオートサンプラーに導入した。なお、IAEA-602(benzoic acid)は融点が 122℃と低いことから、封入前後の加熱を行わなかった。

3.2　令和 3 年度の成果内容

各ベントナイト原鉱石の鉱物組成および化学組成の特徴

各試料の XRD プロファイルを図 3-3 から図 3-8 に示す。ベントナイトの試料はスメクタイトと石英が主体で、長石や沸石、黄鉄鉱などのピークも確認された。スメクタイトと石英の強度比は試料によって差が見られた。

沸石相について、梅ノ木田坑の試料では、深度の大きい凝灰岩や 1 番層では方沸石が見られた一方で、比較的浅い 29 番層や 31 番層では斜プチロル沸石が見られた。川向坑の試料では、深度の大きい 2 番層だけでなく、比較的浅い 29 番層（K29-02）でも方沸石の存在が確認された。一方で、斜プチロル沸石はほとんど見られなかった。また、川向抗側の TKN-K08 の試料は方解石のピークが強く表れており、後述の全岩 XRF 分析でも炭酸カルシウムの存在が示唆される。

頁岩はほとんどの試料で石英が主体で、沸石とスメクタイトも確認された。沸石相は、すべての試料で斜プチロル沸石であった。定方位測定及び EG 処理の結果、すべての試料でスメクタイトの底面間隔の膨脹が認められた。ベントナイトとの境界付近の試料（US03,US04）については、スメクタイトのピークが鋭い傾向が見られたが、ベントナイトから離れた試料はやや幅の広いピークとなった。

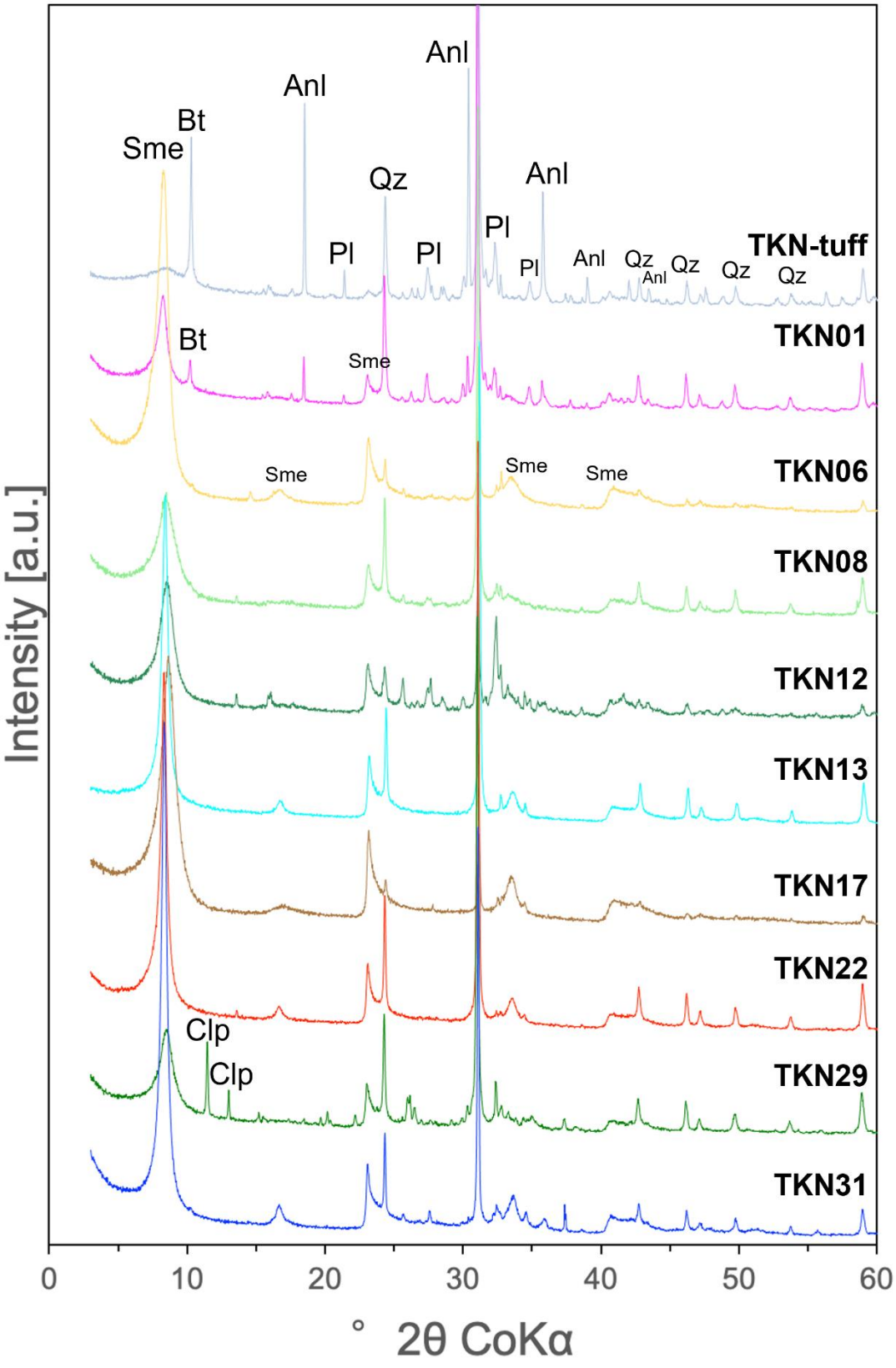


図 3-3 梅ノ木田抗ベントナイト試料（2020 年採取分）の不定方位 XRD プロファイル

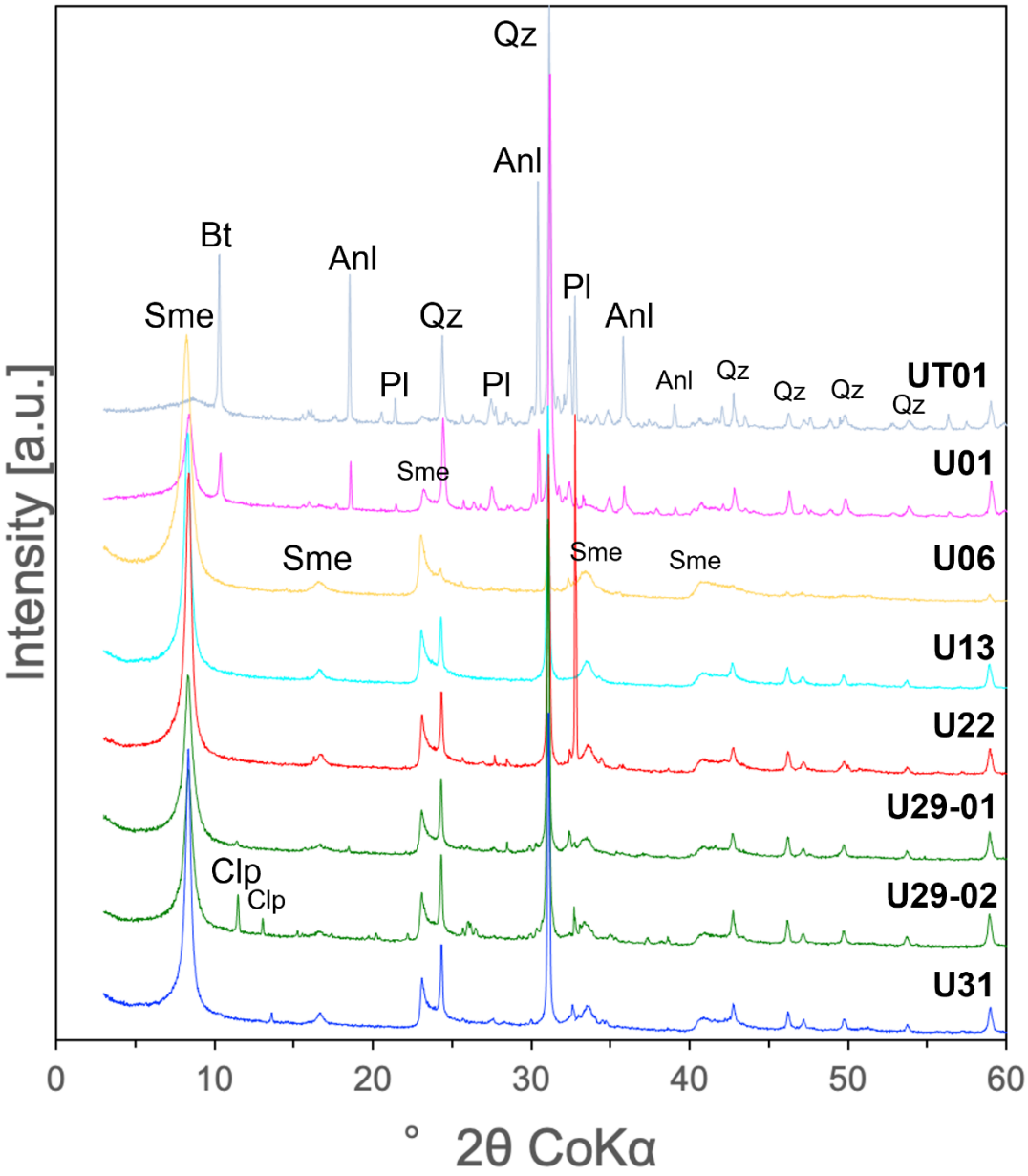


図 3-4 梅ノ木田抗の頁岩・凝灰岩（2021 年採取分）の不定方位 XRD プロファイル

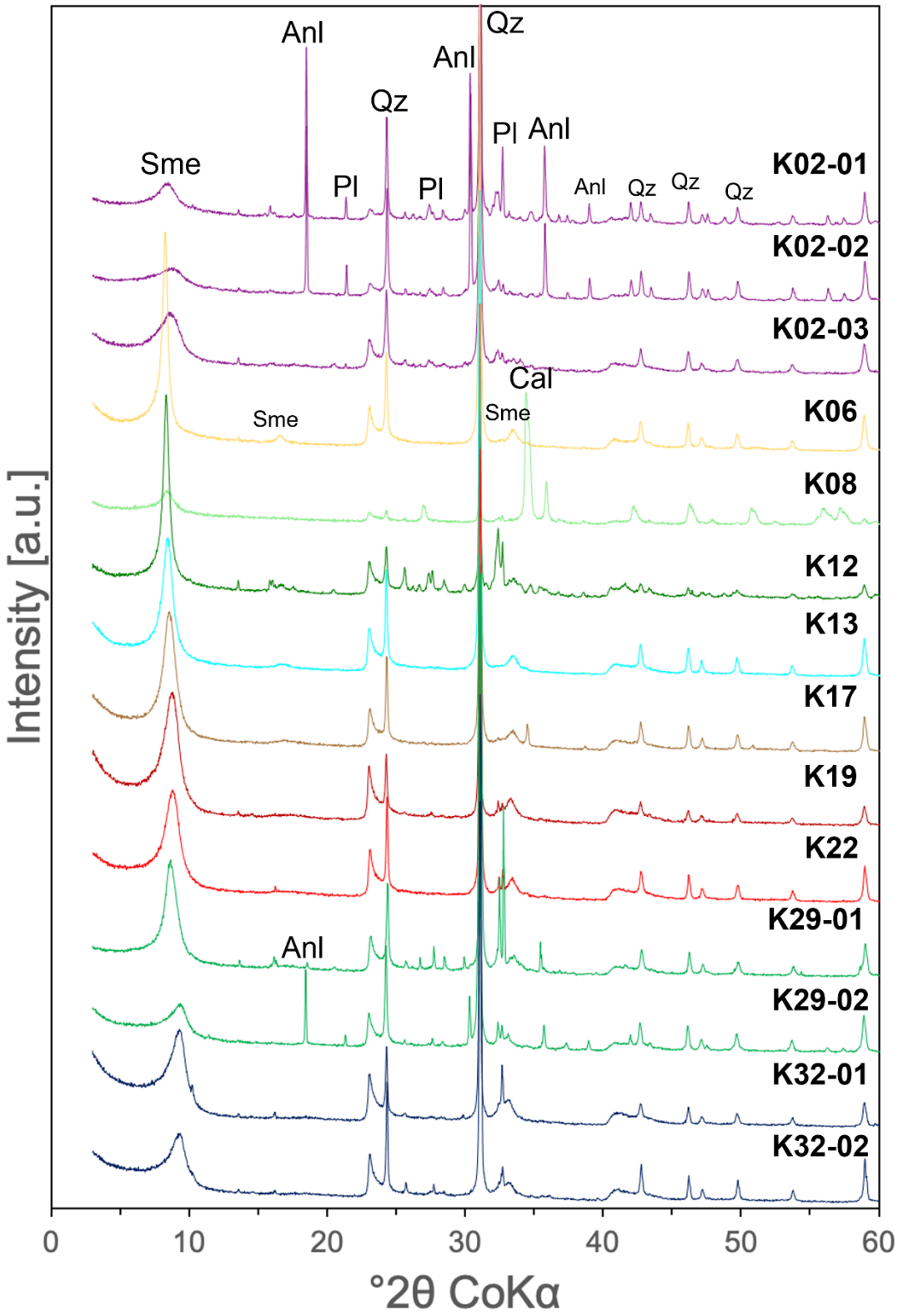


図 3-5 川向側のベントナイト試料の不定方位 XRD プロファイル

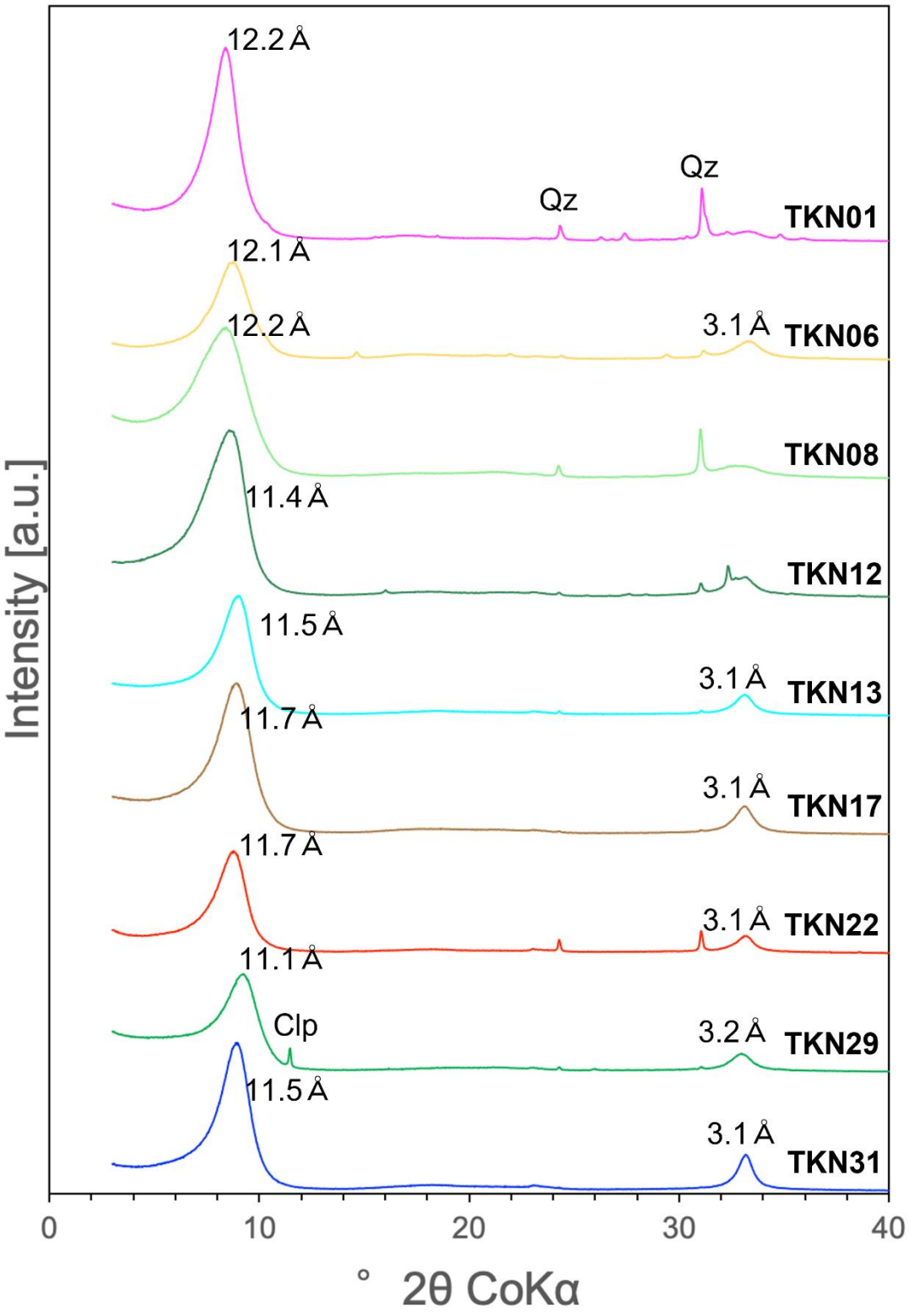


図 3-6　定方位試料の XRD プロファイル（ベントナイト試料のみ）

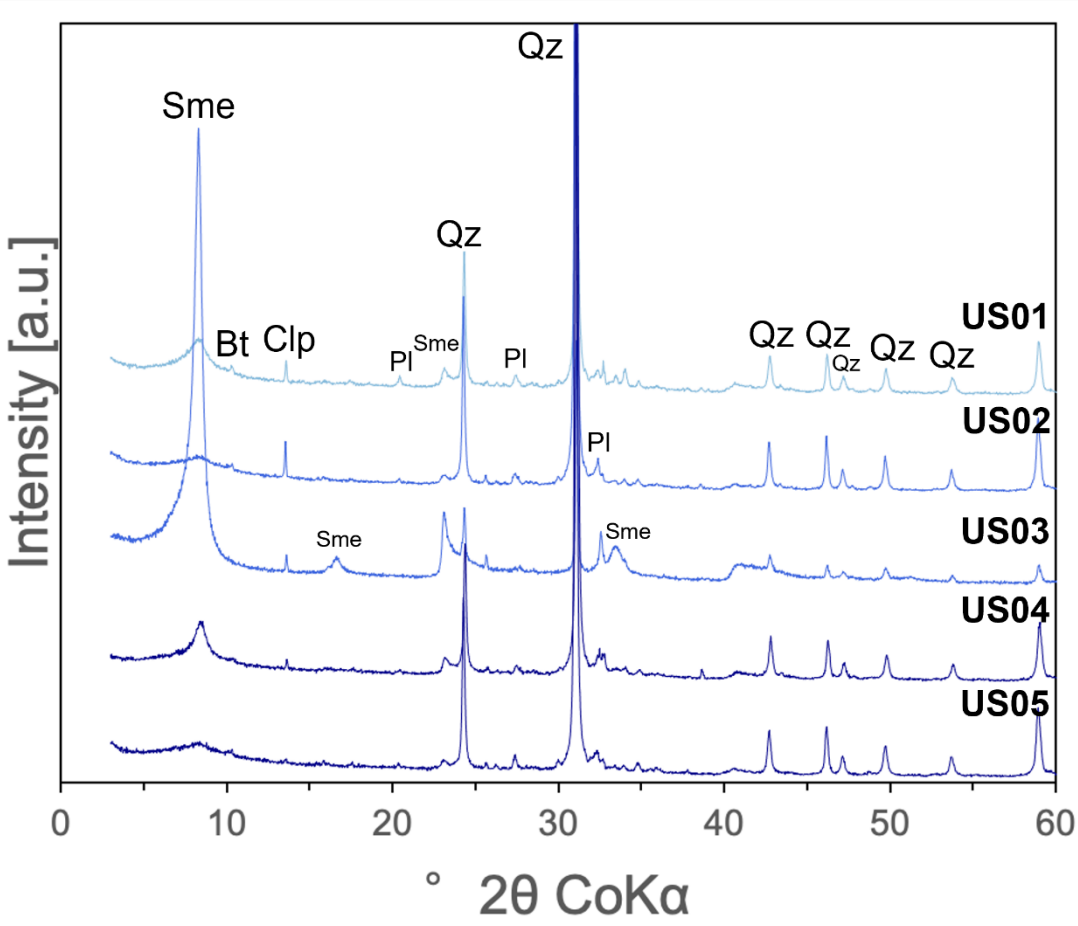


図 3-7　梅ノ木田抗頁岩の不定方位 XRD プロファイル

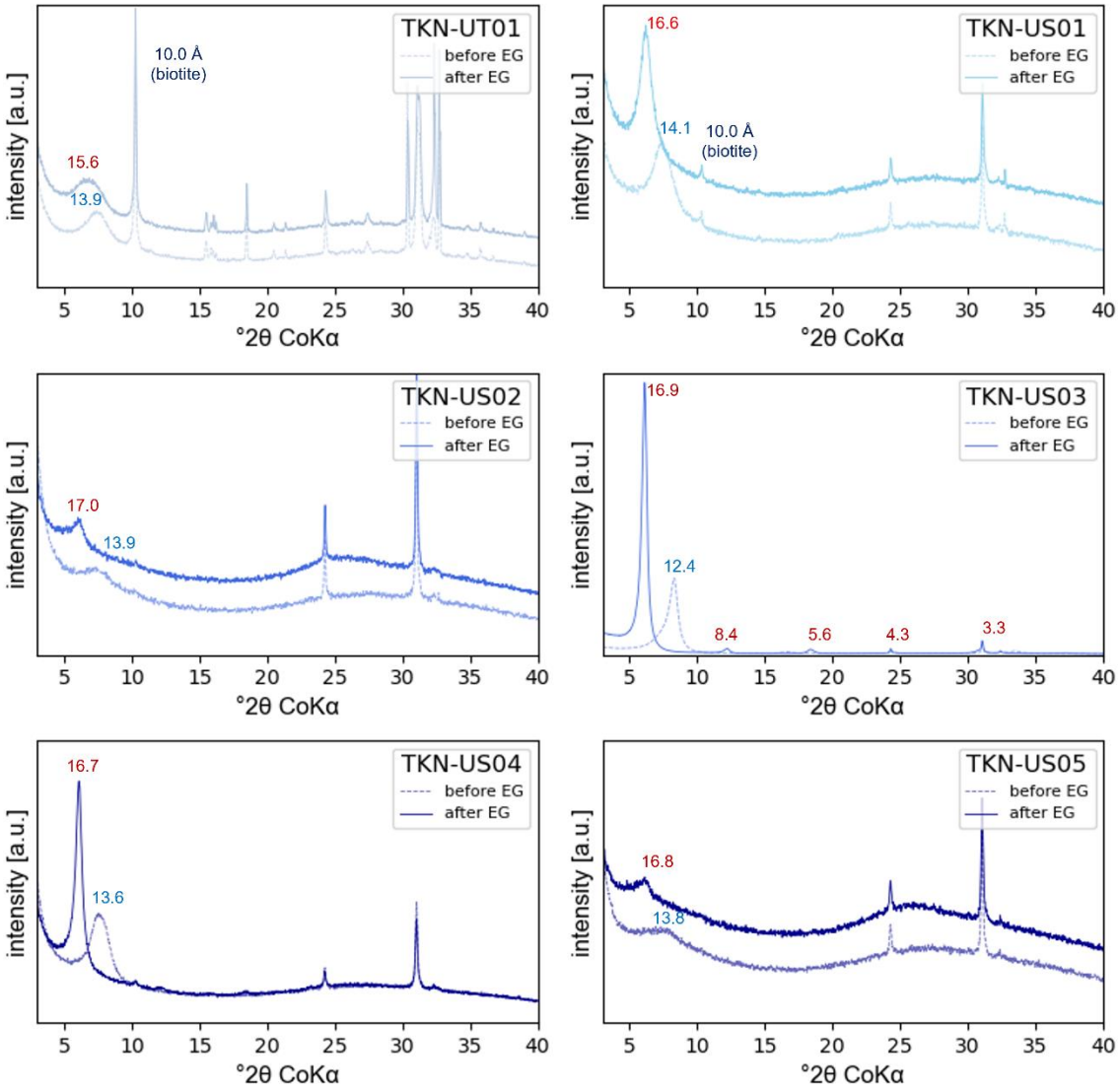


図 3-8　頁岩および凝灰岩試料の定方位 XRD プロファイル

EG 処理前後のプロファイルをそれぞれ載せている。

各ベントナイト試料の岩石組織

乾式研磨薄片を SEM で観察することで、梅ノ木田抗側のベントナイト層および砂質凝灰岩中の主要鉱物の産状を比較した（図 3-9 および図 3-10）。

SEM-EDS による組成分析から各鉱物の同定を行うと、粉末 X 線回折プロファイルで見られた各層の主要構成鉱物と一致する。ただし、例外的に TKN-tuff では、X 線回折では識別の難しい火山ガラスの存在が確認される（図 3-9a, b）。さらに、より高倍率で観察すると粒径が数 μm の大きさの微細なシリカ粒子（以下、シリカ微粒子）が全ての原鉱石に含まれている。

TKN-01 では、比較的粗大な石英や長石、黒雲母の粒子が観察され、より高倍率で見ると、1 μm 程度の等粒状の微細粒子が粗大粒子の間に広く分布している。微細粒子は SiO_2 の組成あるいは方沸石の組成をもつが、これらシリカ微粒子と方沸石は粒径・粒形が似通っているため反射電子像上で見分けがつきにくい。さらに、モンモリロナイトはそれらの間にある小さな隙間を埋めるように分布している（図 3-9c, d）。TKN-06 および TKN-08 は他のベントナイト層と比べると粗大な石英や長石粒子に乏しくモンモリロナイトの占める面積が大きい（図 3-9e-h）。特に、TKN-06 はシリカ微粒子のサイズが 1 μm 以下となっている。TKN-22 や TKN-29 では、モンモリロナイトが石英や長石などの鉱物の間を脈状に分布し、比較的大きい空隙中に斜プチロル沸石が密集している様子が確認できる。これらの試料では、モンモリロナイトが脈状に分布する点が特徴だが、シリカ微粒子も脈に沿って鎖状に連なった分布をとる特徴が見られた。TKN-31 は、他の番層と比べて、石英や黄鉄鉱などの鉱物粒子の粒径が大きいことがわかる。一方で、シリカ微粒子の密度は他の番層と比べると少なく、相対的にモンモリロナイトが占める面積が大きくなっている。また、シリカ微粒子が鎖状に連なって分布している部分も見られる。

また、セメント物質の候補としてよく挙げられる方解石についても、空隙を充填する不定形の粒子として散見される（図 3-10c）。試料全面に広く分布しているシリカ微粒子と比べると、量的には少ないものの、局所的に方解石によるセメンテーションが生じていると考えられる。

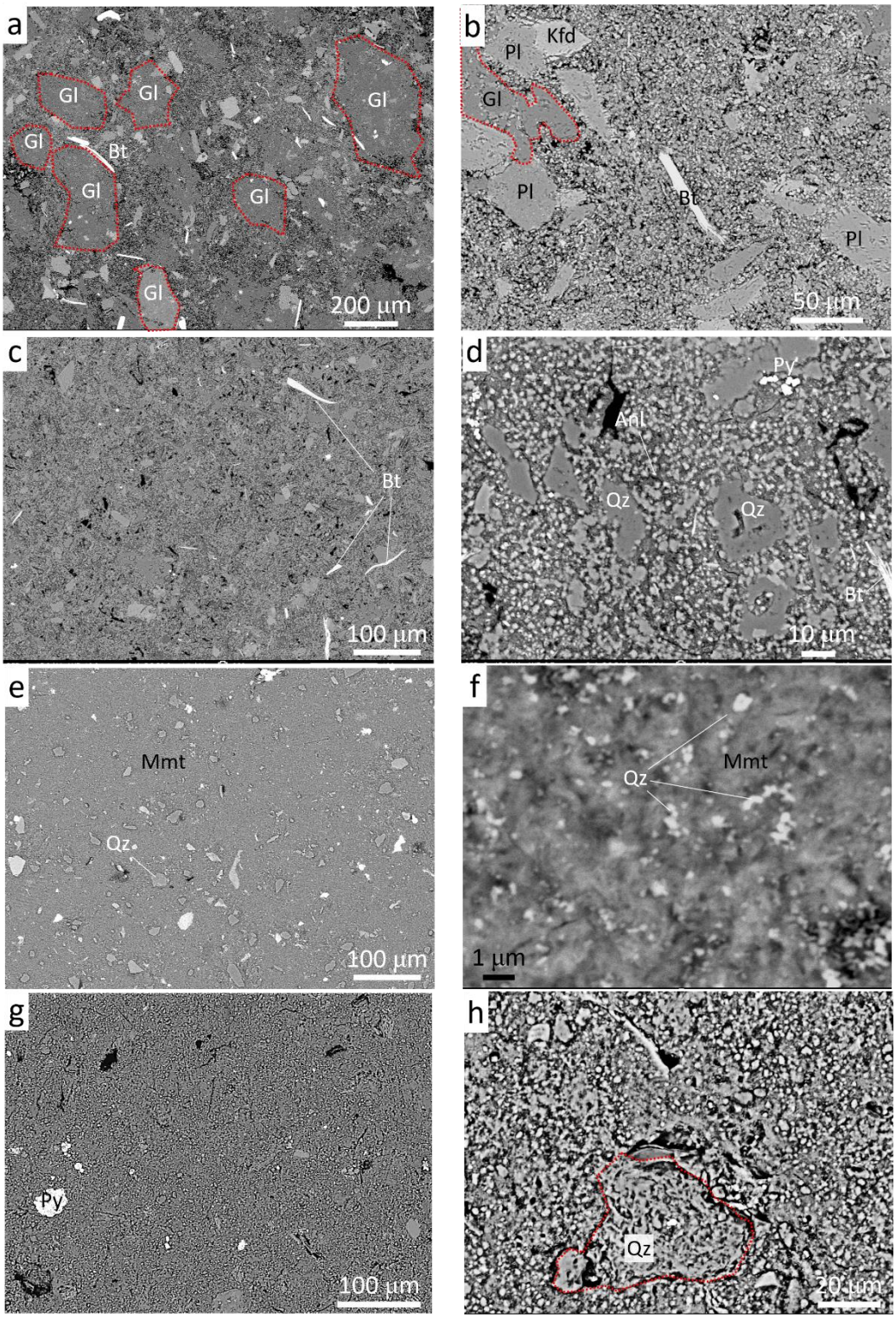


図 3-9　梅ノ木田抗ベントナイトおよび凝灰岩の鉱物産状

各試料の SEM 反射電子像を並べた。上段から順に TKN-tuff (a, b)、TKN-01(c, d)、TKN-06(e, f)、TKN-08(g, h)。Gl：火山ガラス、Qz：石英、Pl：斜長石、Kfd：カリ長石、Bt：黒雲母、Py：黄鉄鉱、Mmt：モンモリロナイト

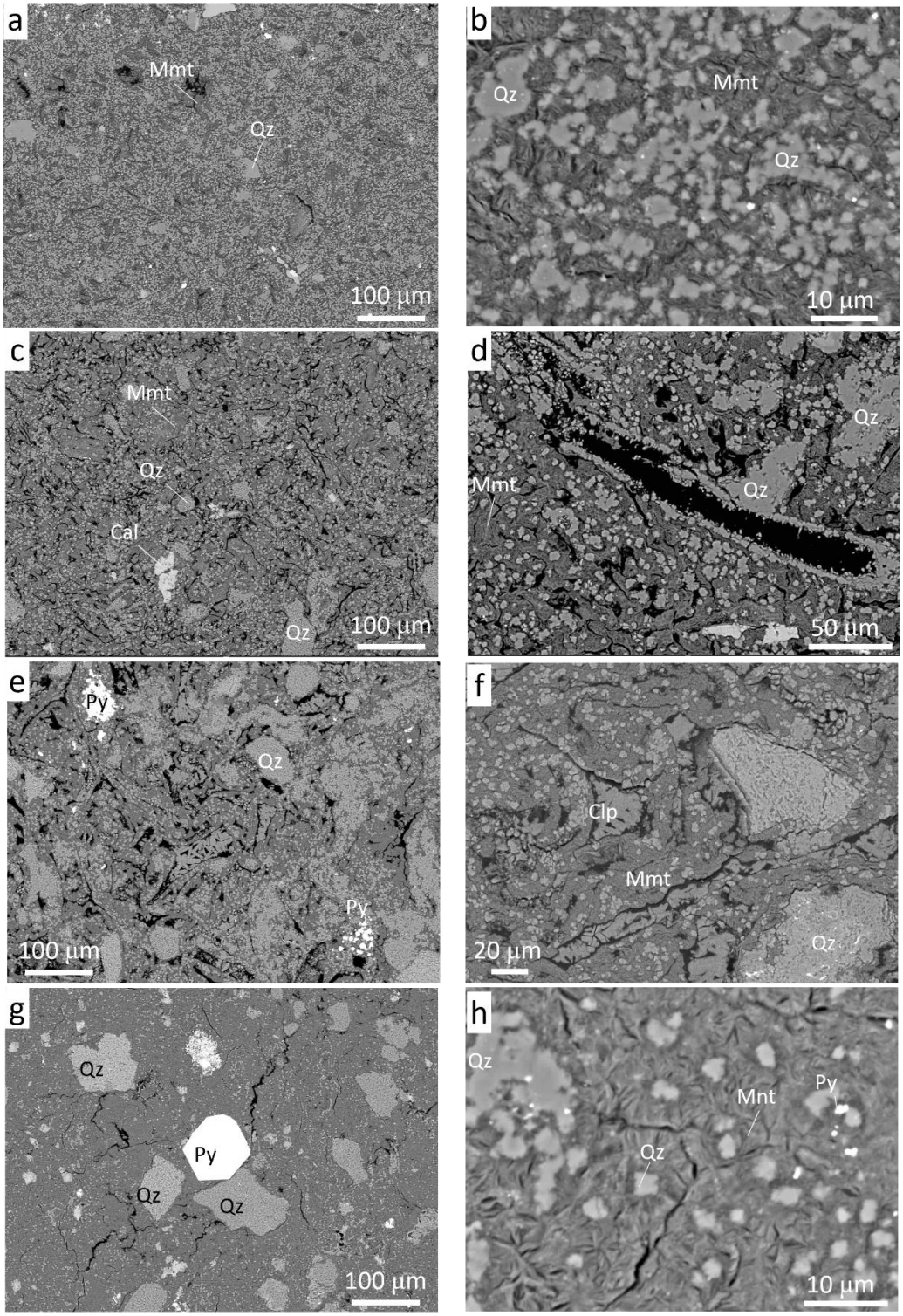


図 3-10　梅ノ木田抗ベントナイトの鉱物産状

各試料の SEM 反射電子像を並べた。上段から順に、TKN-13(a, b)、TKN-22(c, d)、TKN-29(e, f)、TKN-31(g, h)。Gl：火山ガラス、Qz：石英、Pl：斜長石、Kfd：カリ長石、Bt：黒雲母、Py：黄鉄鉱、Mmt：モンモリロナイト、Clp：斜プチロル沸石

地表露頭のベントナイト試料について（TKNS01 および TKNS02）も同様に SEM による観察を行った（図 3-11）。TKNS01 は、黄鉄鉱が見られないことを除けば、主要鉱物は他のベントナイト試料と変化はない。酸化的な地表水との反応によって黄鉄鉱が酸化、溶脱して消失していると考えられる。ただし、モンモリロナイトは Na ではなく Ca 型であり、これは地表水によって Na が Ca にイオン交換された結果と考えられる。TKNS02 についても同様に、モンモリロナイトは Ca 型化している。TKNS02 では黄鉄鉱が一部溶解している様子も見られるが、残存している。石英・長石ともに粒径の大きいものが多く、かつモンモリロナイト主体の部分と粗大粒子主体の部分が互層状に分布している点（図 3-11e）など、全体的な組織は、坑内で採掘されているベントナイト層のうち 31 番層と類似している。

TKNS01 には肉眼で濃褐色を呈する部分が確認されるが、これはシリカ微粒子とモンモリロナイトの周囲に存在する Fe, Mn 水酸化物あるいは酸化物を反映している。モンモリロナイトの集合組織と類似した様子を呈し、モンモリロナイト表面に析出していると思われる。元素分布をみると Fe, Mn 濃度の高い（反射電子像上でコントラストの高い）領域は砕屑性の石英やシリカ微粒子の周囲に集まっており、モンモリロナイトを主体とする部分には少ない。薄片作成の途上で、モンモリロナイト部分は乾燥によって収縮し亀裂を生じさせているが、もともと飽和した状態においてはモンモリロナイト部分の透水性が低く、地表水の主要な通り道が石英周辺に限定されていると推測される。一方で、Ca の分布についてはモンモリロナイトの分布に対して一様である。月布ベントナイト鉱床における地表付近のベントナイトの交換性陽イオン組成の変化に関しては、伊藤ら（1993）および佐治ら（2005）で報告されており、地表下数 m から数 10m にかけて Na ベントナイトが Ca に交換している状況が観察されている。本試料でも地表に露出する以前に Ca 型化が進行していたと想定される。

したがって、地表水の経路から離れた大部分のモンモリロナイトに対しては、酸化的な地表水による生じた Fe, Mn 水酸化物もしくは酸化物によるセメンテーションの影響は大きくない。そのため、地表露頭のベントナイト試料の物性変化（膨潤圧など）はモンモリロナイトの Ca 型化を除けば、限定的ではないかと推測される。

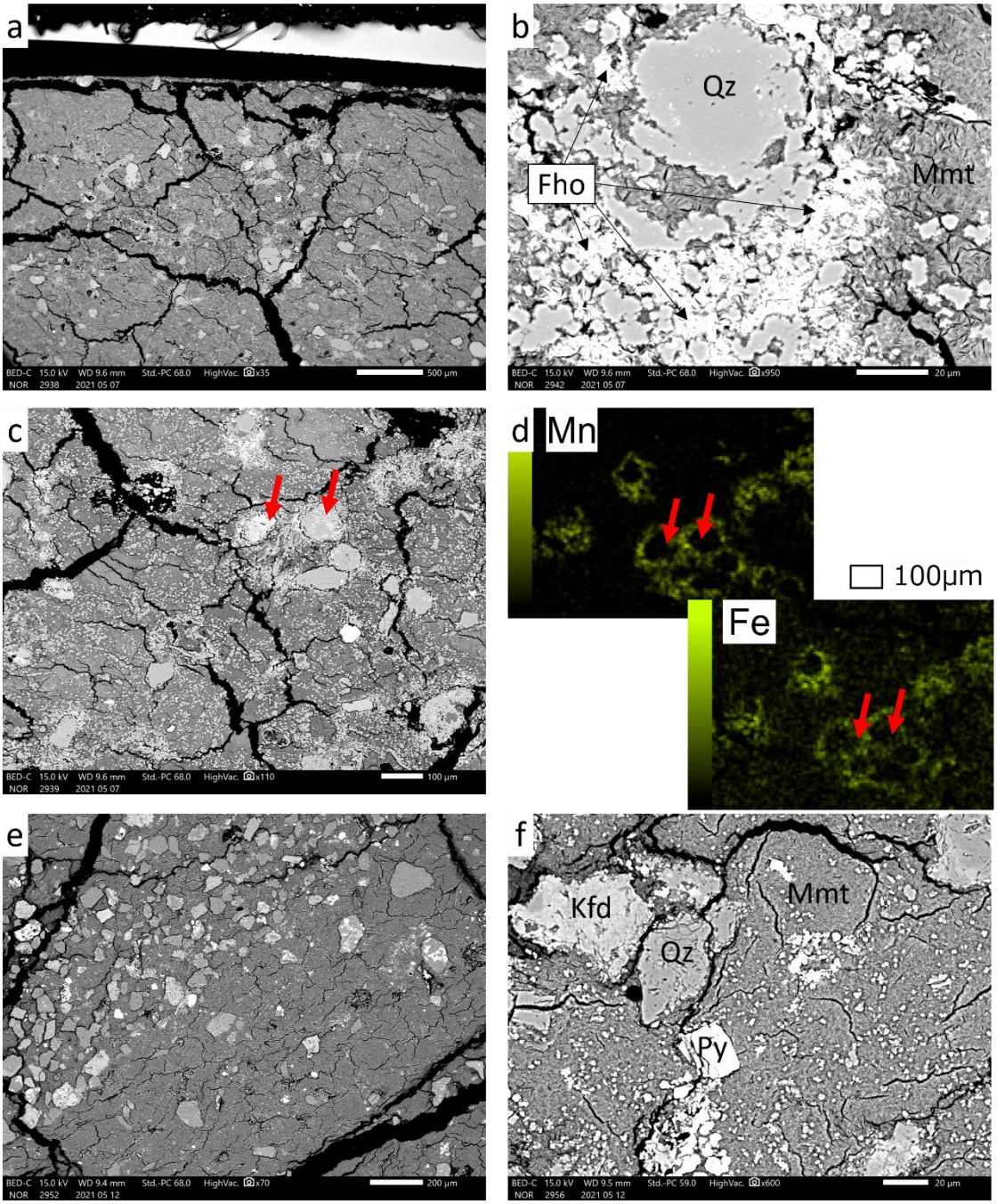


図 3-11　地表露頭のベントナイトの SEM 観察結果(反射電子像および元素マップ)
TKNS01 (a-d)および TKNS02(e, f)。(c)の観察範囲の一部が(d)の元素マップ範囲と重なる。同一粒子を赤矢印で表示。Qz：石英、Mmt：モンモリロナイト、Fho：鉄・マンガン酸化物あるいは水酸化物、Kfd：カリ長石、Py：黄鉄鉱。

TEM 観察に基づくベントナイト原鉱の微細構造

ベントナイト原鉱石の大部分を占めているモンモリロナイトと、粗大な石英粒子とは別に存在しているシリカ微粒子について、その粒子の形状や接合組織を明らかにするためには SEM による観察だけでは空間分解能の点で不十分であると考えられる。そこで、薄片試料の一部を収束イオンビーム装置で切り出して薄膜化、作製した薄膜試料を透過型電子顕微鏡によって観察した。

主要なベントナイト層である 1 番層（TKN-01）および 31 番層（TKN-31）の試料の観察結果をそれぞれ図 3-12 と図 3-13 に示す。

TKN-01 は SEM でも観察されたようにシリカ微粒子や方沸石、黒雲母の粒子間にモンモリロナイトが存在している。また、制限視野電子回折像から、各シリカ微粒子の多形を識別することが出来、TKN-01 中には低温型石英とアモルファスシリカの両方が混在していることが確認される。特にアモルファスシリカについては不定形の凝集体となっており、モンモリロナイト端面と接合する組織が観察される（図 3-12b）。TKN-31 では TKN-01 と異なり長石・方沸石・黒雲母の粒子はほとんど見られず、シリカ微粒子とモンモリロナイト、少量の黄鉄鉱で構成されている。こちらで観察されるシリカ微粒子は石英のみであったが、不定形の石英微粒子とモンモリロナイトと接合する組織が見られる点は TKN-01 と同様である。

R2 年度ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書においても同様の手法で 29 番層のベントナイト原鉱石の観察を行っているが、こちらでも微細な石英とモンモリロナイト端面が接合する組織が観察されている。これらベントナイト原鉱石中で見られるシリカ微粒子に共通する特徴として以下の点が挙げられる：(i) 自形性の強い石英粒子とは別に、不定形の石英またはアモルファスシリカの粒子が存在している、(ii) この不定形の石英またはアモルファスシリカと、モンモリロナイト粒子の端面が接合している組織が見られる、(iii)不定形の石英微粒子は粒子内で結晶方位の僅かにズレた部分が集合している。

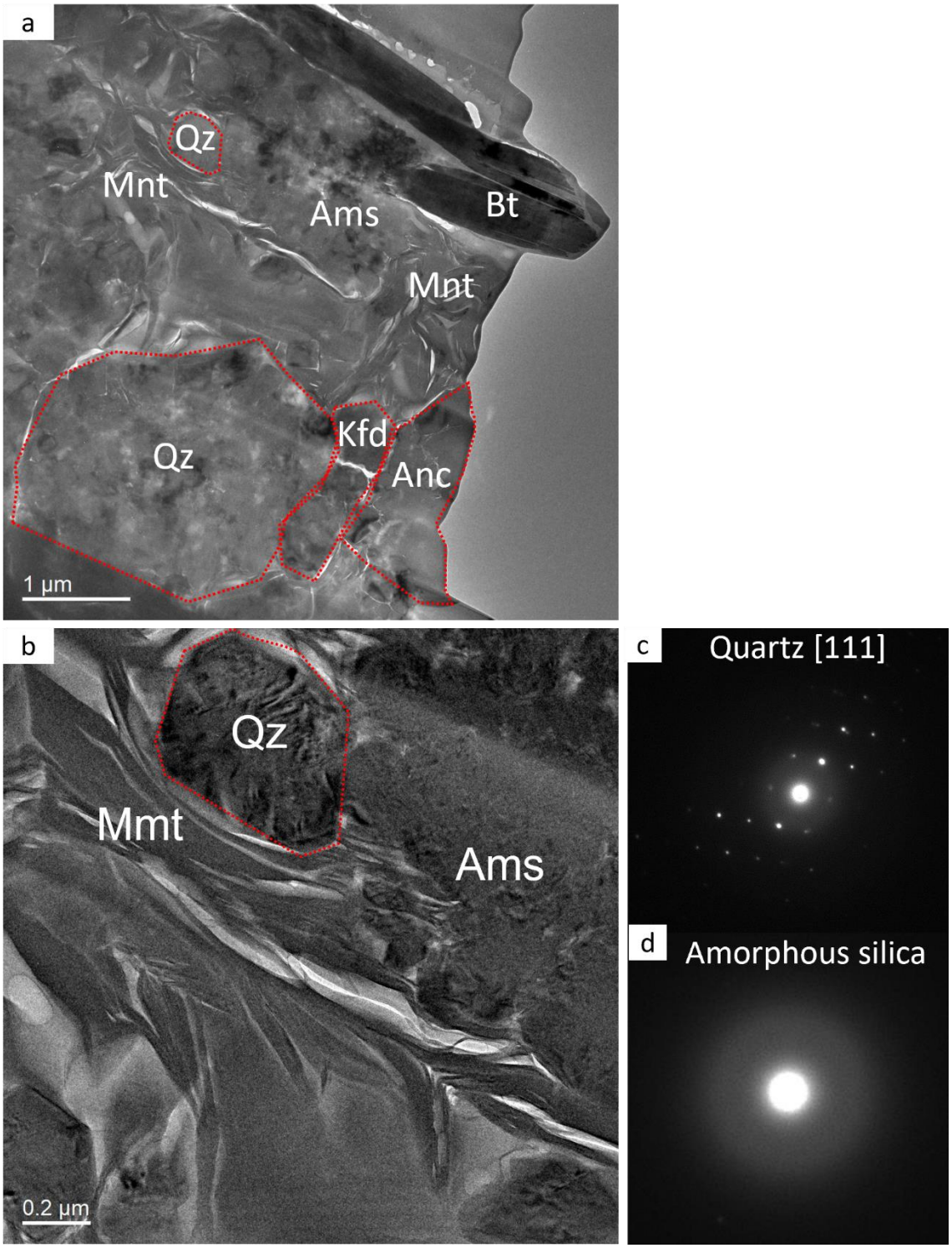


図 3-12　TKN-01 の微細構造

(a)FIB で作成した薄膜試料全体の TEM 明視野像。(b)モンモリロナイト（Mmt）と微細な石英粒子（Qz）、アモルファスシリカ（Ams）の境界部分における組織。(c)および(d)は(b)中の Qz と Ams のそれぞれ部分からの制限視野電子回折像。Anc：方沸石、Bt：黒雲母

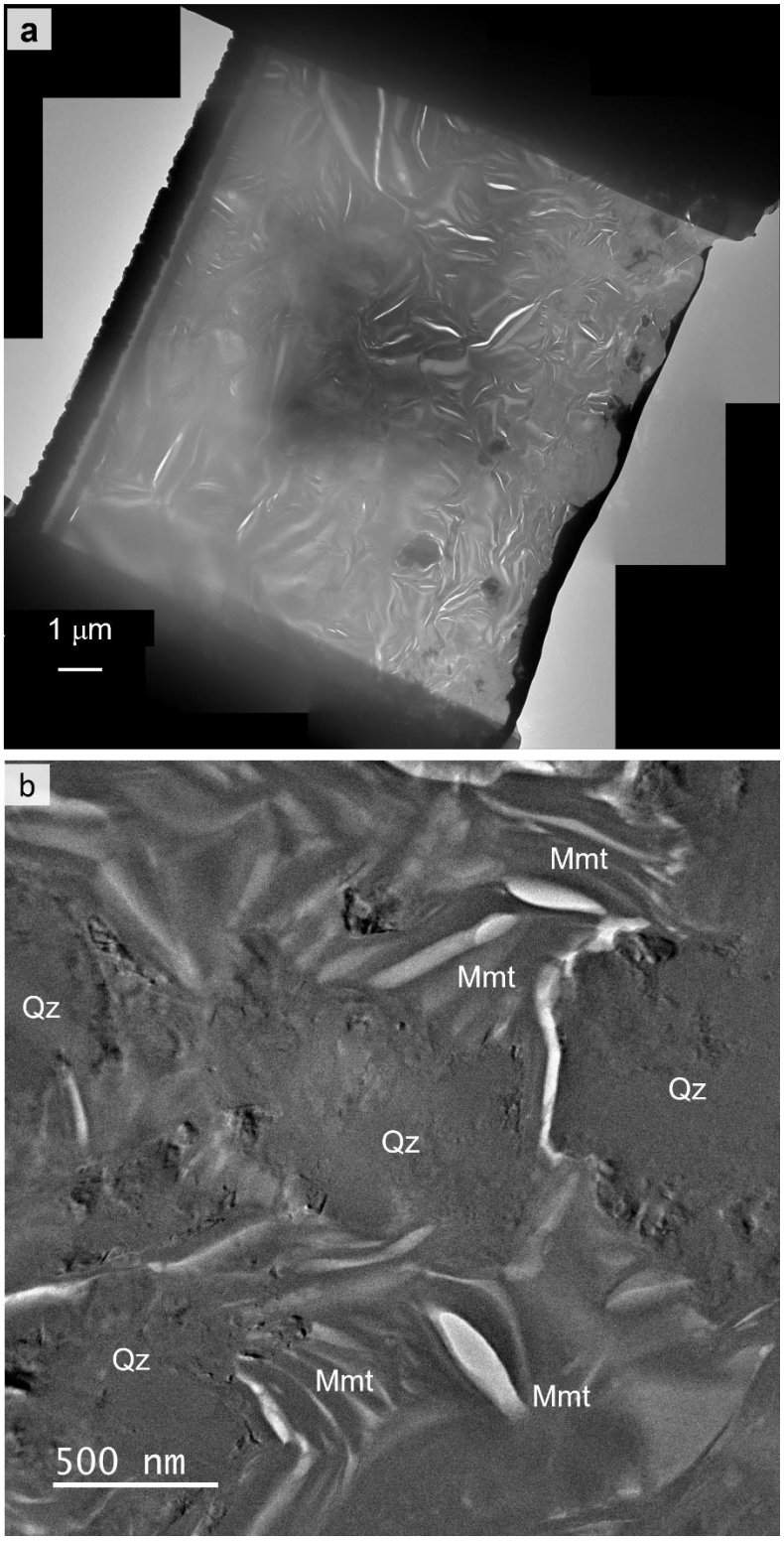


図 3-13　TKN-31 の微細構造

(a)FIB で作成した薄膜試料全体の TEM 明視野像。(b)モンモリロナイト（Mmt）と微細な石英粒子（Qz）の境界部分における組織。

全岩化学組成と母岩の推定

XRF 分析により得られた全岩化学組成を表 3-4 から表 3-7 に示す。主要元素の濃度の合計が 100±2%の範囲に収まらなかった試料は、合計値を赤字で示し参考値として扱う。また強熱減量を 24 時間行った試料については、LOI の値をオレンジ色で示している。

すべての層において SiO_2 が主体であり、ついで Al_2O_3 や MgO、Na_2O、Fe_2O_3 などが多くなっている。黒雲母が確認された梅ノ木田坑の凝灰岩と 1 番層では、K_2O も多く含まれている。SiO_2/Al_2O_3 比や MgO の濃度は XRD で見られたスメクタイトのピークの相対的な大きさと整合的で、Al や Mg がスメクタイトに由来するものであると考えられる。隣接する凝灰岩と 1 番層では、比較的近い鉱物組成を示したが、MgO の濃度は 1 番層の方が大きい傾向が見られた。またモンモリロナイトは Na 型であるが、長石なども Na のホストとなるので、スメクタイトの量比（XRD におけるピークの大きさ）との相関は認められない。Fe_2O_3 の濃度が比較的高いのは、微量に含まれる黄鉄鉱に由来するものであると考えられる。ベントナイト試料のうち、例外的な試料は TKN-K08 で、LOI が 30.70w%と高く、かつ CaO も 34.21wt%と高い。炭酸塩鉱物を多量に含む試料だと判断され、X 線回折プロファイル上で方解石のピークが確認されることと整合的である。

ベントナイト試料と頁岩・凝灰岩を比較すると、後者と 1 番層のみは K_2O の割合が高く、1 番層を除くベントナイト試料は MgO の割合が高い傾向にある。MgO の割合はモンモリロナイトの比率を反映していると考えられ、頁岩試料のうち MgO が高い TKN-US03 の XRD プロファイルの特徴と整合的である。

地表露頭のベントナイト試料（TKNS01 および TKNS02）はどちらも LOI の値が 14wt%となり、坑内のベントナイト試料と比べて高くなっている。SEM 観察から Fe、Mn 酸化物あるいは水酸化物の存在が確認されていることから、水酸化物中の構造水を反映していると考えられる。

表 3-4 梅ノ木田抗のベントナイト原鉱の全岩化学組成

(wt%)	TKN-Tuff	TKN01	TKN06	TKN08	TKN12	TKN13	TKN17	TKN22	TKN29-01	TKN29-02	TKN-31
SiO2	66.97	74.11	62.78	71.71	60.86	73.80	63.47	73.83	72.30	75.01	60.92
TiO2	0.10	0.12	0.15	0.39	0.22	0.09	0.15	0.09	0.23	0.16	0.11
Al2O3	14.27	12.43	19.15	12.47	17.15	13.40	19.87	12.34	14.13	12.77	16.86
Fe2O3	2.82	1.33	1.93	2.62	2.79	1.59	2.93	1.52	2.47	1.64	1.91
MnO	0.15	0.02	0.02	0.02	0.15	0.06	0.06	0.07	0.03	0.01	0.24
MgO	0.50	0.98	4.32	2.13	2.44	2.32	3.23	2.21	1.71	1.70	3.02
CaO	0.50	0.33	0.57	1.08	3.44	2.29	1.60	1.77	1.03	0.77	5.19
Na2O	4.72	3.21	3.06	2.03	3.81	2.11	3.02	1.97	2.74	2.37	2.66
K2O	3.36	2.56	0.63	0.92	1.92	0.15	0.14	0.21	0.42	0.25	0.12
P2O5	0.03	0.03	0.03	0.07	0.04	0.02	0.03	0.02	0.05	0.04	0.03
LOI	5.27	3.79	5.36	4.69	5.15	5.11	5.52	4.48	3.86	3.72	7.90
Sum	98.75	98.96	98.00	98.15	98.03	101.09	100.13	98.52	99.15	98.66	98.95
(ppm)											
Sc	9.90	n.d.	13.57	14.59	14.74	12.00	11.29	11.35	10.66	7.97	12.38
V	10.89	9.25	9.25	30.37	25.80	8.75	7.06	7.50	17.04	16.21	9.71
Cr	3.38	6.09	8.61	8.86	4.51	4.97	7.55	6.56	7.88	5.12	11.64
Co	n.d.	n.d.	4.73	4.26	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ni	4.36	n.d.	15.52	1.81	15.82	n.d.	6.18	n.d.	2.39	2.36	n.d.
Cu	82.74	14.29	18.33	23.24	15.40	38.66	20.51	24.80	6.03	22.50	16.58
Zn	47.08	35.32	70.91	48.06	85.04	100.06	112.21	70.64	58.04	61.76	48.42
Sr	54.88	55.17	178.43	207.66	209.88	146.69	230.82	126.92	217.17	206.51	163.43
Zr	110.40	90.95	167.59	118.57	175.20	119.00	240.52	111.15	178.87	164.02	117.66
Nb	15.06	12.29	12.38	5.18	9.62	8.56	7.82	7.75	5.47	7.11	9.59
Pb	37.95	20.93	33.90	17.39	86.42	20.05	21.86	19.06	20.69	24.67	43.93
Rb	99.35	49.25	8.29	21.18	22.85	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Y	46.17	52.70	64.68	33.76	72.54	35.44	57.08	37.67	42.57	41.89	71.90
Ba	616.37	392.82	258.31	478.13	585.85	399.12	396.20	312.40	1664.60	2088.68	253.93

表 3-5 梅ノ木田抗側の凝灰岩・頁岩の全岩化学組成

(wt%)	U01	U06	U13	U22	U29-01	U29-02	U31	UT01	US01	US02	US03	US04	US05
SiO2	74.58	64.14	70.43	69.07	71.70	74.84	64.65	70.99	75.58	84.14	67.13	79.91	83.57
TiO2	0.12	0.18	0.09	0.14	0.27	0.18	0.13	0.13	0.22	0.17	0.16	0.17	0.18
Al2O3	12.51	19.39	14.89	14.97	14.57	12.78	17.50	13.59	8.97	5.00	16.02	7.15	5.25
Fe2O3	1.32	1.95	1.81	1.97	2.47	1.75	1.89	1.25	2.40	1.40	3.39	1.65	1.26
MnO	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.01	0.09	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
MgO	1.16	4.43	2.61	2.61	1.61	1.69	3.00	0.46	1.44	0.48	2.63	0.83	0.42
CaO	0.32	0.48	0.88	2.25	1.30	0.71	2.87	0.41	0.35	0.30	0.82	0.30	0.27
Na2O	2.59	3.11	2.37	2.40	2.96	2.40	2.76	4.76	1.36	0.82	2.97	1.40	0.85
K2O	3.01	0.69	0.11	0.14	0.46	0.24	0.16	2.69	1.60	1.47	0.66	1.22	1.64
P2O5	0.03	0.03	0.02	0.02	0.06	0.04	0.02	0.03	0.09	0.12	0.03	0.07	0.06
LOI	2.51	4.42	4.17	4.59	3.18	3.25	5.66	3.94	6.15	4.25	4.21	4.83	4.89
Sum	98.19	98.88	97.39	98.21	98.68	98.06	98.73	98.28	98.123	98.144	98.09	97.50	98.39
(ppm)													
Sc	10.87	7.85	14.49	11.79	6.89	n.d.	8.95	5.54	5.76	10.07	8.01	7.69	4.66
V	11.44	8.19	5.57	n.d.	10.55	12.44	7.80	4.45	33.23	32.29	n.d.	37.40	38.96
Cr	5.20	7.88	4.02	6.05	6.78	n.d.	5.86	6.86	27.87	18.55	3.61	20.36	26.49
Co	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	6.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ni	n.d.	n.d.	7.34	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	22.05	18.14	n.d.	19.73	18.01
Cu	6.08	n.d.	16.99	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	13.00	8.75	n.d.	16.48	3.41
Zn	45.76	65.27	97.52	77.69	51.16	54.02	47.54	43.60	94.92	72.51	225.31	67.97	52.29
Sr	44.58	141.80	159.91	173.11	176.17	181.20	141.81	59.85	74.00	41.86	217.40	49.04	34.52
Zr	92.08	159.72	152.20	149.05	192.60	158.34	128.63	100.53	76.18	49.75	220.10	59.21	50.70
Nb	11.19	10.19	8.03	8.55	8.19	7.44	8.52	13.19	5.78	5.08	8.19	5.68	5.35
Pb	29.89	21.12	23.79	19.93	20.15	18.33	22.30	21.89	15.57	11.82	34.68	21.37	27.68
Rb	60.40	9.81	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	61.96	33.21	27.36	n.d.	25.87	35.81
Y	37.17	49.37	33.61	50.20	40.95	38.18	48.22	49.12	24.63	24.91	53.79	24.03	15.62
Ba	377.28	282.08	238.39	420.84	558.36	1799.99	271.21	478.29	238.78	249.38	390.48	276.38	273.31

表 3-6 川向抗側のベントナイト原鉱の全岩化学組成

(wt%)	K02-01	K02-02	K02-03	K06	K08	K12	K13	K17	K19	K22
SiO2	72.70	72.91	72.53	76.13	19.73	62.70	77.03	71.91	74.10	75.42
TiO2	0.20	0.20	0.28	0.13	0.19	0.22	0.11	0.14	0.14	0.12
Al2O3	13.06	12.51	11.93	11.83	5.67	17.81	12.08	15.13	13.20	13.14
Fe2O3	1.54	1.45	3.25	1.53	3.44	3.26	1.50	1.77	1.76	1.30
MnO	0.04	0.02	0.03	0.01	1.04	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01
MgO	0.60	0.74	1.84	2.14	2.35	1.72	1.87	2.35	2.23	2.19
CaO	0.56	0.44	0.80	0.51	34.21	1.10	0.34	0.51	0.37	0.43
Na2O	4.43	4.21	1.79	1.81	0.86	3.96	1.96	2.40	2.11	2.27
K2O	1.90	1.23	1.22	0.26	0.25	1.80	0.20	0.14	0.36	0.14
P2O5	0.04	0.03	0.15	0.05	0.10	0.05	0.02	0.02	0.03	0.02
LOI	3.91	4.31	5.02	3.88	30.70	5.07	3.85	4.12	3.72	3.53
Sum	99.001	98.051	98.896	98.28	98.01	97.73	99.00	98.539	98.046	98.58
(ppm)										
Sc	10.12	7.86	11.06	n.d.	27.85	18.31	7.97	6.42	13.49	7.67
V	8.99	10.18	20.98	15.98	14.30	25.07	8.39	4.51	6.23	n.d.
Cr	7.11	4.01	11.07	4.71	4.53	6.07	n.d.	2.91	2.85	n.d.
Co	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ni	n.d.	n.d.	n.d.	2.36	8.68	5.95	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cu	n.d.	n.d.	n.d.	5.12	29.10	6.49	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Zn	60.96	68.77	73.31	50.19	42.82	88.48	87.69	97.08	110.72	63.03
Sr	89.03	99.71	139.22	129.67	308.71	190.57	128.01	154.30	134.31	116.87
Zr	135.41	150.97	140.60	89.56	63.23	176.10	120.67	179.07	235.93	124.68
Nb	5.52	7.05	6.78	5.90	2.48	10.65	6.35	7.38	9.74	6.64
Pb	24.68	23.80	34.15	26.19	n.d.	27.35	22.88	18.24	19.61	18.33
Rb	36.87	20.05	15.77	n.d.	n.d.	25.14	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Y	43.44	46.41	46.96	34.80	27.57	65.54	44.22	54.38	67.21	38.63
Ba	362.20	425.45	526.45	249.06	278.86	571.79	411.64	426.83	295.61	173.67

表 3-7 川向抗側および地表露頭のベントナイト原鉱の全岩化学組成

(wt%)	K29-01	K29-02	K32-01	K32-02	TKNS01	TKNS02
SiO2	74.52	75.63	70.48	72.74	65.76	60.85
TiO2	0.26	0.19	0.13	0.15	0.11	0.13
Al2O3	13.23	12.20	16.41	14.04	12.56	15.36
Fe2O3	1.82	1.57	1.47	1.42	1.13	1.76
MnO	0.03	0.04	0.02	0.04	0.04	0.02
MgO	1.46	1.31	2.44	2.11	2.54	3.11
CaO	1.01	0.62	0.43	0.39	1.21	1.64
Na2O	2.89	2.94	2.77	2.31	0.47	0.90
K2O	0.32	0.23	0.19	0.42	0.20	0.63
P2O5	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
LOI	3.31	3.38	4.08	3.59	14.30	14.39
Sum	98.93	98.059	98.43	97.20	98.33	98.82
(ppm)						
Sc	9.71	n.d.	4.91	n.d.	n.d.	7.20
V	13.00	5.32	5.38	n.d.	4.82	7.85
Cr	7.03	4.45	4.38	4.51	7.08	6.69
Co	4.89	n.d.	n.d.	4.43	n.d.	n.d.
Ni	2.30	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	11.16
Cu	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8.62	28.21
Zn	52.95	54.06	67.98	192.67	28.86	287.93
Sr	140.98	106.10	128.57	102.81	79.94	102.69
Zr	173.48	159.58	116.44	99.70	102.85	122.06
Nb	5.99	5.73	10.49	9.38	7.74	10.24
Pb	26.75	18.25	21.85	34.06	14.82	40.39
Rb	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Y	35.10	38.21	50.55	50.34	37.73	58.52
Ba	172.80	159.00	161.76	134.01	145.15	161.82

月布鉱床ではベントナイトや凝灰岩は続成作用による変質を受けていない母岩は見られず、したがって現在の化学組成から各ベントナイト層が同様の化学組成の出発物質から生成したかどうかを検証するには工夫が必要となる。例えば、変質時の移動性に着目し、非移動性の元素からベントナイトの材料となった火山灰の供給源の推定や、移動性元素から続成過程時の情報を復元する試みがなされている（Kiipli et al. 2014）。ここでは、Winchester and Floyd (1977)が報告した Ti, Zr, Y, Nb, Ce, Ga, Sc による火山岩の分類と、それに基づいた Nb/Y と Zr/TiO2 比ダイアグラム（Pearce et al. 1984）によるマグマソースの推定方法を適用し、ベントナイトの原料となった火山灰の化学組成を検証した。

結晶分化やアルカリ度の指標となる Zr/TiO_2 比と Nb/Y 比を軸に取ってプロットし、経験的に領域を区切ることによって判別できるダイアグラムである。月布鉱床のベントナイトと凝灰岩の試料についてこのプロットを試みたところ、ほとんどの層で元の火山灰の組成が流紋岩質からデイサイト質であると推定される（図 3-14）。2020 年に梅ノ木田抗側で採取した試料間に着目すると、番層とプロットの位置には系統的な変化見られなかった（図 3-14a）。さらに、採取した年と背斜翼で分類してみても、傾向に大きな差異は認められなかった（図 3-14b）。

なお、例外的に安山岩質の領域にプロットされた試料は、梅ノ木田坑と川向坑それぞれの 8 番層で一致している。

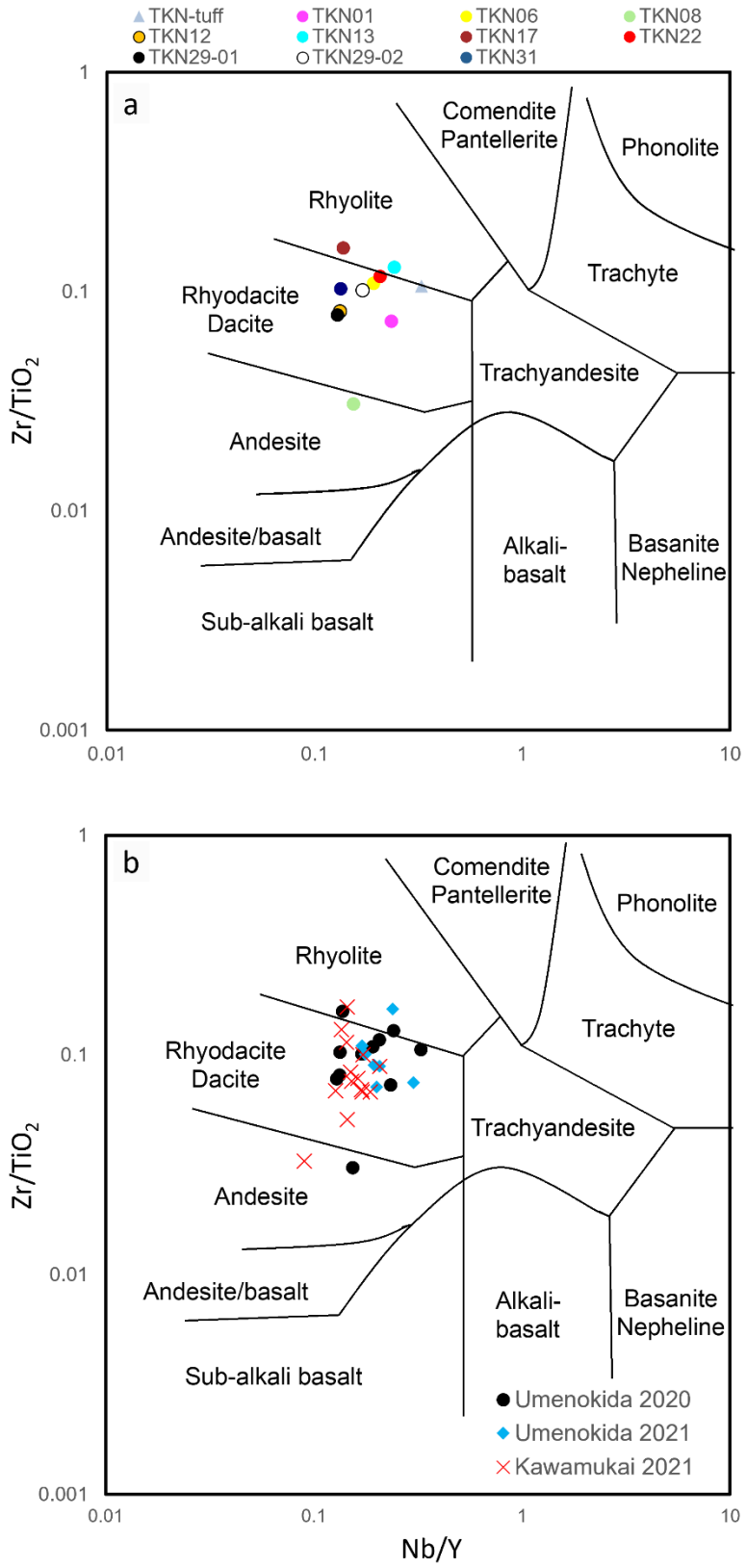


図 3-14 Zr/TiO_2 vs Nb/Y ダイアグラム

酸素水素同位体比測定

水簸により複数の粒径画分を抽出し、XRD と SEM による確認を行った結果、1 番層では<0.2μm，29 番層では<1.0μm、31 番層では<2.0μm の画分がスメクタイトを単離するために必要な条件であると判断した。

水素同位体比の標準試料を繰り返し測定した結果、USGS57 の測定値はδD=-97.2‰（σ=0.63, n=6)、USGS58 の測定値はδD=-35.8‰（σ=0.47, n=7)となった。この 2 点により検量を行ったところ、各試料の同位体比の補正値は表 3-8 のようになった。SWy-1 は、測定値が標準試料の 2 点間に収まらなかったが、外挿することにより計算を行った。

表 3-8 水素同位体比(δH)の測定値

Sample	δD(‰)	σ(‰)	n
SWy-1	-136.0	0.4	2
TKN01	-86.9	-	1
TKN29	-81.3	0.8	3
TKN31	-81.5	0.2	3

SWy-1 については、Kanik et al. (2021)で報告されている<2μm の画分の水素同位体比（δD=-138.5±2.8‰）に近い値を取った。月布ベントナイトから抽出した試料については、1 番層がやや低い値となったが、いずれの層もδD=-80‰に近い値を取った。標準偏差は 1‰未満に収まっており、同一試料内での値のばらつきは小さかった。

酸素同位体について、Si を含まない標準試料を繰り返し測定した結果、NBS18 の測定値は$\delta^{18}O_{VSMOW}$=7.15(σ=0.17, n=4)、IAEA-602 の測定値は$\delta^{18}O_{VSMOW}$=66.20(σ=1.03, n=4)となった。一方で、Si を含む試料である NBS28 と SWy-1 については、質量分析計に流れ込む CO ガスのピークが裾を引く非対称の形状を呈し、正確な同位体比の測定が行えなかった（図 3-15)。この図における縦軸の電圧は、ガス発生量の指標となる。珪酸塩鉱物でない NBS18 や IAEA-602 と珪酸塩鉱物である NBS28 や SWy-1 からの CO ガスの発生の様子を比較すると、珪酸塩鉱物では頂点が低く右裾の長いピークとなっていることが確認出来る。これらケイ酸塩鉱物の試料では、反応炉内で熱分解反応が瞬間的に起こらず、CO ガスが徐々に放出されていると考えられる。同位体比測定の際には、熱分解反応が瞬時に完了し、幅が狭く左右対称に近いガスのピークを得ることが必要になる。そこで、珪酸塩鉱物の熱分解反応を瞬間的に起こすための条件を比較検討することにした。

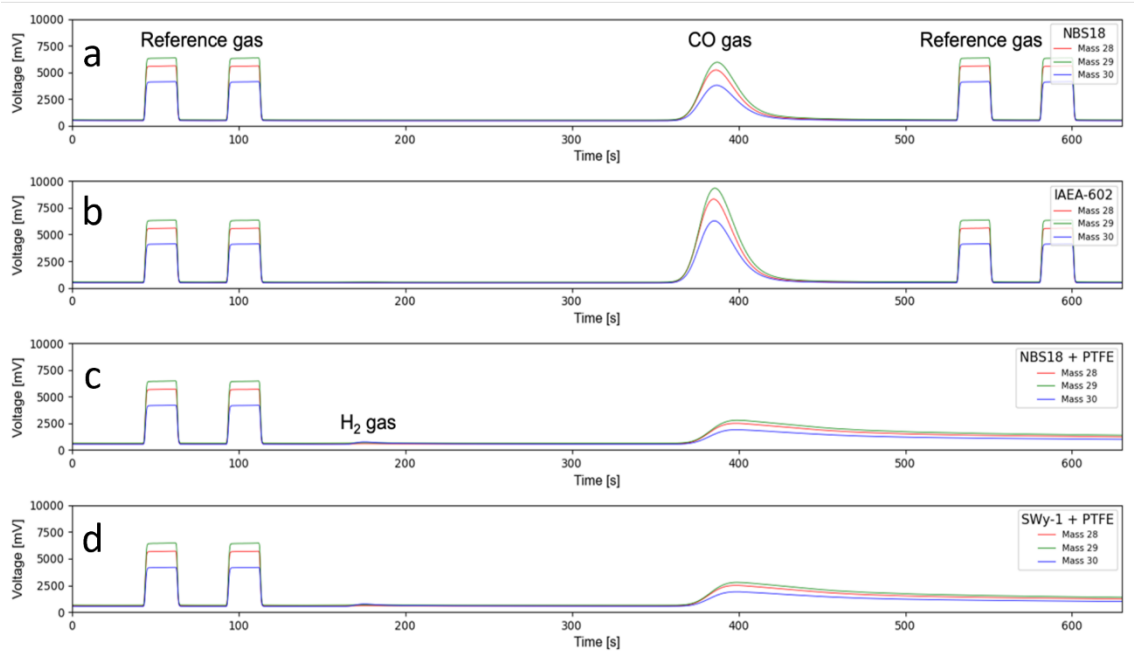


図 3-15 酸素同位体用標準試料および標準粘土試料の熱分解クロマトグラフ
上から順に、(a)NBS-18（方解石）、(b)IAEA-602（安息香酸）、(c)NBS-28（石英）、(d)SWy-1（モンモリロナイト）について、時間（横軸、単位：秒）に対する質量数 28、29 および 30 の信号強度の変化。

試料は、NBS28 と SWy-1 を用いた。比較する条件は次の 3 つである。
条件①　試料と PTFE を銀カプセル中で混合する。
条件②　試料と PTFE と Ni/C を銀カプセル中で混合する。
条件③　試料と PTFE と Ni/C を予めメノウ乳鉢中で均質化し、銀カプセルに詰める。

PTFE は PTFE(C_2F_4)と Si のモル比が 2.3 以上になるように添加し、Ni/C は（試料 0.1 mg に対し Ni/C が 0.3mg 以上）になるように添加した（Menicucci et al., 2013; Gehre and Strauch, 2003）。Ni は触媒としての効果が期待され、過剰な C は Si-O 間の結合の切断を促進すると考えられる。またメノウ乳鉢による均質化は、試料と PTFE や Ni/C が密に接し反応しやすくなるほか、試料の粒径を小さくすることで表面積が大きくなり反応しやすくなると考えられる。

3 つの条件を比較したプロファイルを以下に示す（図 3-16）。NBS28 に注目すると、Ni/C を加えたものほど、また均質化したものほどピークの高さが大きくなり、より瞬間的に分解反応が起こったことが窺える。ただし、CO ガス発生効率に明確な向上が見られたものの、正確な酸素同位体比の定量のためには至らなかった。

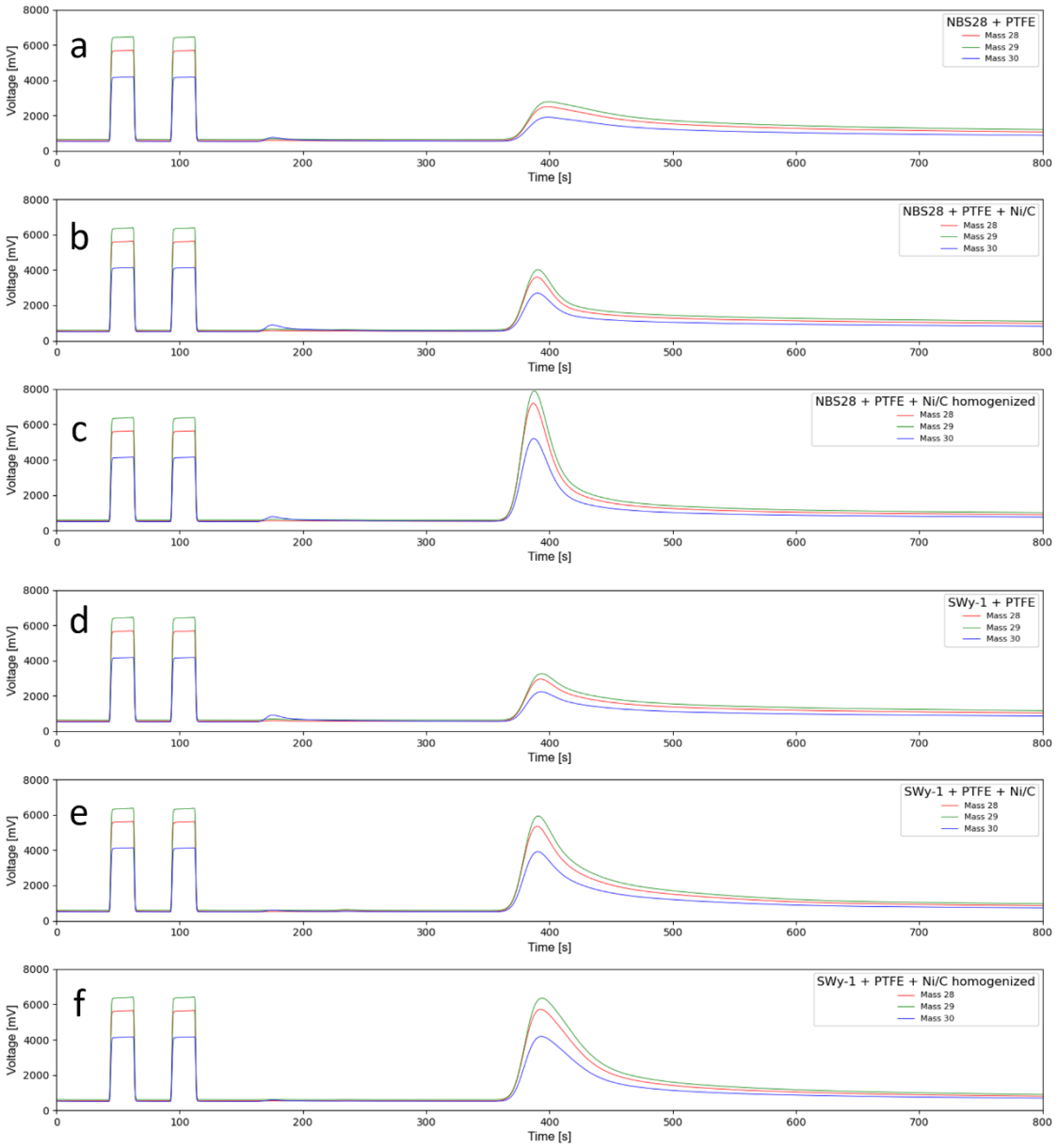


図 3-16　石英および標準粘土試料の熱分解クロマトグラフへの添加物の影響
NBS-28（石英）および SWy-1（標準粘土試料）に対して、PTFE のみ添加(a, d)、PTFE と Ni/C を添加(b, e)、PTFE と Ni/C を添加しさらに均質化させた(c, f) 、の 3 条件でそれぞれ熱分解させた際のクロマトグラフを比較している。

TCN 核種を用いた侵食速度の推定方法に関する検討

地表面近傍の造岩鉱物中の宇宙線生成核種を用いた、岩石の長期的な削剝速度や岩盤の風化速度の定量化手法は地形学において常套手段となっているが、ベントナイトを対象にした研究例はこれまで報告されていない。ここでは、先行研究の（松四, 2017; Lal, 1991）によって行われている、核種濃度の時間変化と削剝速度依存に関するモデル計算を基に、本研究で着目するベントナイト試料に適応が可能かどうかを検討した。

まず、地表近傍における TCN 核種の生成率を検討する。水平な地表面における TCN 核種の生成率は、緯度と標高に依存することが知られており（Dunai, 2010）、地表面下における生成率は、地形抗生物質の密度に依存して、深部に向かって指数関数的に減少する性質を持つ。松四（2017）による生成率の計算では、削剝が無視できる場合、^{26}Al の生成量は地表付近で 3×10^{1} atoms g^{-1} yr^{-1}、地下 3m 付近で 10^{0} 程度と見込まれる。同様に、^{10}Be の生成量は地表付近で 0.7×10^{1} atoms g^{-1} yr^{-1}、地下 3m 付近で 0.1×10^{1} atoms g^{-1} yr^{-1} と見込まれる。なお、この計算では地表面化の物質の密度を 2.6 g cm^{-3} とし、緯度を 35 度、標高を 500 m と仮定している。なお、本研究で対象としている月布鉱山は北緯 38 度、標高が 200-300 m ほどで生成率は大きく変化しない。

この核種生成率を深さの関数としてモデル化すると以下の式で表現される（Lal, 1991）。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = P_0 \cdot e^{-\frac{\rho x}{\Lambda}} - C\lambda + \frac{D}{\rho}\cdot\frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

これは任意の深さ x [m]における核種濃度 C[atoms g^{-1}]の関係式で、t は時間[s]、P_0 は地表における生成率[atoms g^{-1} yr^{-1}]、ρ は地表下の物質密度[g m^{-3}]、Λ は宇宙線の平均減衰長[g m^{-2}]、D は地表面での削剝速度 [g m^{-2} yr^{-1}]、λ は核種の壊変定数 [yr^{-1}]である。ここでは単純化のために核種生成率が単一の指数関数で表現できるものとしている。実際には、核種生成率の深度分布は単一の指数関数ではなく、元素と鉱物の組み合わせ毎により複雑になるが、式（1）を用いることで侵食速度に対する依存性を以下のように解析的に検討することが可能になる。

定常的な侵食を受けている地表面下における核種濃度の深度分布の解は、（１）式から次のように表される。

$$C = \frac{P_0}{D/\Lambda+\lambda}\cdot e^{-\frac{\rho x}{\Lambda}}\cdot\left[1 - e^{-\left(\lambda+\frac{D}{\Lambda}\right)t}\right] \quad (2)$$

ここでは、初期条件を $C|_{t=0}=0$，境界条件を $C|_{x=\infty}=0$ として与え、削剝速度や生成率などが時間変化しないことを仮定している。この関係式を用いて、侵食速度別に地表面での核種濃度が時間変化する様子を図示すると図 3-17 のようになる。ここでは削剝を考慮した露出時間と地表面での TCN 核種濃度。削剝速度 D [g m^{-2} yr^{-1}]を 4 条件に分けて計算した。グラフからは削剝がない場合でも 10^{6} 年程度が経過すれば放射平衡に達すること、地表面の削剝が大きい程核種濃度はより短いタイムスケールで動的平衡に達する傾向が見て取れる。

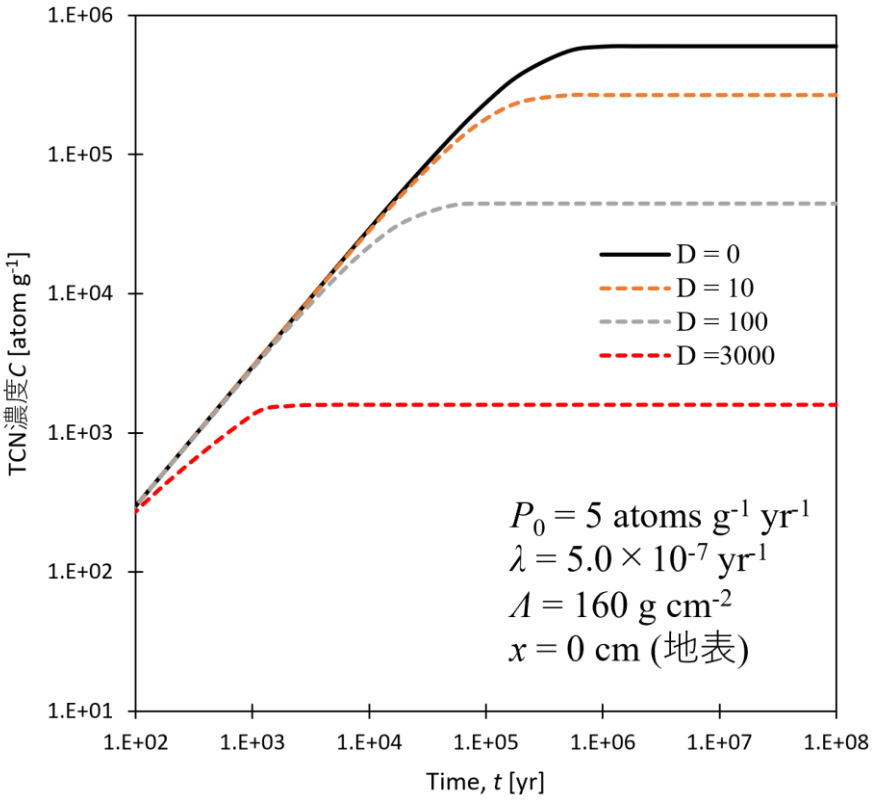


図 3-17　露出時間と削剥速度に依存した TCN 核種濃度の変化

対象となる岩層において、継続的な生成による蓄積と削剥による除去とのバランスによって動的平衡状態が保たれる場合、式(2)の C について $t \rightarrow \infty$ の極限をとった以下の式

$$D = \Lambda \cdot (P_0/C - \lambda) \quad (3)$$

に TCN 核種の濃度は漸近する。この式は、蓄積された TCN 濃度 C から削剥速度 D を求めることが出来ることを意味する。また、削剥速度 D に応じて TCN 濃度 C がどれくらいの濃度になるのかを見積もっておけば、測定前に対象となる TNC 濃度が質量分析上、検出下限を超えるかどうかを判断することができる。松四 (2017)では、削剥によって動的平衡状態に達した場合に、地表面の石英中の ^{10}Be, ^{26}Al および ^{36}Cl の濃度を算出しており、これを参考とすることが出来る。ある削剥速度における地表面での TCN 濃度がどれくらいになるかを見積もると、標高が 200 m において、その削剥速度が 1 mm yr^{-1} の場合は地表面における ^{10}Be は＜10^4 atoms g^{-1} になると見込まれ、加速器質量分析の検出下限を下回ると予想される。^{26}Al および ^{36}Cl についてはそれぞれ 5×10^4、2×10^4 atoms g^{-1} 程度で検出下限と同程度～1 桁程度高い濃度が期待される。

結論として、動的平衡状態に達するような＞10^3 年程度のタイムスケールの間、定常的に河川水と接触によって削剥され、かつ削剥速度が年間 1 mm を下回るような場所にベント

ナイトが露出している場合、その ^{26}Al 濃度からベントナイトの侵食速度の見積もることは理論上可能だと考えられる。ただし、測定上あるいは前処理過程上で起こる誤差等についての検討は別途必要である。また、検出下限を大きく上回ることは期待できず、予め試料の量を増やすなどの分析精度を上げる工夫が併せて必要となると考えられる。

ここまで、先行研究での理論モデルを基にして、TCN 核種の適用可能性を検討した。一方、令和 3 年度の野外調査では、月布鉱山周辺での野外調査が年度後半に一度しか実施できず、対象となりうる地表露頭の観察が十分に行えなかったため、上記の検討を踏まえた上で、令和 4 年度の野外調査を計画する必要がある。

3.3　課題と今後の計画

一部の試料において炭酸塩鉱物や、地表付近では鉄マンガン酸化物が確認されているが、月布ベントナイト鉱床においてベントナイトを固結させている主たる存在はシリカ（SiO_2）であろうと思われる。本研究で観察されているシリカ微粒子の特徴として、（1）数ミクロンサイズの球状もしくはその球状粒子の集合体であることが多い。（2）TEM で見ると自形性は高くなく、不定形をしていることが多い、（3）不定形の粒子内部での結晶方位がズレている場合が多い、（4）シリカ微粒子は薄片上で鎖状に連なる形態あるいはクラスター状に分布しているものが見られる。類似したシリカ微粒子については、海底下の泥質岩の続成過程においても報告がされている（Thyberg et al. 2010）。鎖状あるいは小さなクラスター状のシリカ微粒子は、泥質岩中でのシリカの低い移動性と閉鎖系に近い続成作用環境によって形成されたもので、石英の形成速度が十分に遅いために粒径の大きい石英の形成が抑制されていることを反映していると考えられる。このシリカ微粒子の Si の供給源としては、(A) モンモリロナイトのバイデライト化に伴う余剰分の Si、(B) 沸石相の変化（斜プチロル沸石から方沸石への変化）に伴う余剰分の Si、(C) 火山灰からベントナイトが生成される過程において火山ガラスから溶脱した Si などが考えられる。A の可能性については今後、それぞれのベントナイト中のモンモリロナイトに対する Greene-Kelly テスト（Green-Kelly, 1952, 1953）によってバイデライト成分を検証する。

月布鉱山における各ベントナイト原鉱石の鉱物組成の比較から、梅ノ木田抗側および川向抗側の両方において、沸石相が上盤側で斜プチロル沸石、下盤側で方沸石となっている傾向が見られた。一般的に続成作用の進行度の指標となる沸石相は、続成初期の火山ガラス帯から斜プチロル沸石・モルデン沸石帯、方沸石・輝沸石帯、濁沸石帯・曹長石帯へと変化することが知られている（Aoyagi, Kazama, 1980; 水谷ら, 1987）。したがって沸石相の変化からは、下盤側ほどより高温の続成作用を経験していることが示唆される。一方で、1 番層から 31 番層までの層厚が 100 m 前後しか存在しないことや、水平距離にして数百 m しか離れていない梅ノ木田抗側と川向抗側の同一地層でも沸石相が変化していることは、何らかの地質構造変化を仮定しなければ説明が難しい。温度だけでなく、褶曲作用時の応力による生成鉱物の変化についても検証が必要だと考えられる。

R3 年度は、様々なベントナイト原鉱石の収集とその鉱物組成・産状の記載を行った。モンモリロナイトの含有率や主たるセメント物質であると考えられるシリカ微粒子の存在量について定性的に番層間の違いが確認できるものの、定量的な把握は R4 年度に持ち越しとなった。後者については X 線回折上で粗大な石英との識別が難しいため、SEM 像の画像解析から定量する方法の確立を別途共同研究にて進めているので、その手法を今後適応する予定である。そうして、セメント物質の定量を行った上で、膨潤圧や透水性・一軸圧縮強度などの物理特性との関係についても、今後検証を進める必要がある。したがって、R 4 年度

には物理特性の測定も並行して進めていく。

最終的に、セメンテーションの影響を考慮した緩衝材性能の評価を行うためには、原鉱石中のセメント物質の同定と、そのセメント物質の生成する反応メカニズムに基づいて、ベントナイト中の空隙が減少・構成粒子間が膠結していくモデルの構築が求められる。続成作用に伴う空隙率の変化については、石油・天然ガスの貯留岩となる砂岩中の空隙が石英によって充填されていく反応モデルなどが存在する（Worden et al. 2020; Lander et al. 2008; Walderhaug, et al. 2000）。こうしたモデルを参考に、温度変化・時間変化に対するベントナイト中の空隙率の変化や、それに伴う透水性の変化について検証が今後進めるべきだと考えられる。一方、モンモリロナイトの一部がセメント物質で被覆された場合に、膨潤性にどのように影響を及ぼすのか、その影響を定式化する方法についても検討が必要だと考えられる。

4　まとめ

本年度は、調査地である月布鉱山の周辺におけるベントナイト原鉱石のサンプリングを実施し、採取した試料の鉱物学的分析を進めた。鉱物組成や全岩化学組成の分析と併せて、各ベントナイト原鉱石に含まれる鉱物の産状・組織を観察した。また、鉱物組成、微量元素の組成や酸素水素同位体比からベントナイトの経験温度や出発物質である火山灰の化学組成の推定についても検証を進めた。得られた結果は以下の通りである。

1. 複背斜構造をもつ月布鉱山の含ベントナイト褐色硬質頁岩部層のうち、背斜軸を挟んだ 2 地点（梅ノ木田、川向）において主要なベントナイト原鉱石を収集し、その鉱物組成・全岩化学組成・鉱物の産状について調べた。
2. 梅ノ木田抗側および川向抗側の両方において、沸石相が上盤側で斜プチロル沸石、下盤側で方沸石となっている傾向が見られた。続成過程において高温相である方沸石が見られる下盤側のベントナイト層がより高温に達したことが示唆される。一方で、同じ番層でも川向抗側ではより方沸石が観察される。同一の地層で、水平距離にして数百 m しか離れていない 2 地点で経験温度に違いが生じるには、非対称性の褶曲作用に伴う地温勾配の変化や褶曲作用の際に働いた応力に差があったことを想定しなければ説明が難しい。
3. 続成過程における変質時に移動しないと考えられる微量元素に基づいて、ベントナイトの材料となった火山灰の化学組成の推定を行った。梅ノ木田抗側および川向抗側の 8 番層のみ安山岩質に分類されたが、その他のベントナイトおよび凝灰岩試料は流紋岩質からデイサイト質のマグマを由来とする火山灰から生成されたと推定される。
4. 経験温度の推定のために必要な情報である酸素水素同位体比について、熱分解型質量分計を用いた測定方法の模索を行った。水素同位体については、標準試料およびベント

ナイト試料で比較的安定した同位体比・収量を得ることができた。一方、酸素同位体については、ケイ酸塩鉱物からの CO ガスの生成効率が十分でなく、測定方法に改良の余地があることが分かった。Si－O 結合をより効率よく切断し CO ガスを生成するには、反応炉内でフッ化ガスが十分にケイ酸塩鉱物と反応できるようにフッ素化合物添加剤と触媒となる Ni/C の添加量や封入方法の改善が求められることが分かった。

5. 月布ベントナイト鉱床の原鉱石の鉱物学的分析および微細観察からは、原鉱石を固結させている主要なセメント物質はシリカだと推定される。微粒子状のシリカは、アモルファスシリカと石英のどちらも確認された。シリカ微粒子はモンモリロナイト端面と接合する組織を呈する。全ての原鉱石においてシリカ微粒子が広く分布していることが確認された一方で、試料中の一部の間隙は方解石が充填している部分もいくつか散見された。
6. 地表水の影響を受けたベントナイト試料の観察からは、原鉱石中で水の通り道となっている間隙が非常に不均質に分布していることが示唆される。これはベントナイト原鉱石中でモンモリロナイトと石英などの粗大粒子が均質に分布しておらず、モンモリロナイトを主体とする透水性の低い領域が形成されているからだと考えられる。
7. 一度粉砕し、圧縮成型し直した試料と比べて、原鉱石の膨潤圧が低く留まるあるいは膨潤圧の上昇に時間を要するメカニズムとして、（1）モンモリロナイト端面がシリカで被覆されること、（2）水が透過できる間隙が不均質に分布し、一部のモンモリロナイトに対して水が浸透しづらくなっていることの 2 点が作用している可能性が示唆される。
8. 地表におけるベントナイトの侵食速度を見積もる方法として宇宙線生成核種の同位体組成に基づく推定方法の適用可能性について、先行研究で行われている理論モデルを基に検討を行った。継続的な生成による蓄積と削剥による除去が釣り合う動的平衡状態に達するような＞10^3年程度のタイムスケールの間、定常的に削剥され、かつ削剥速度が年間 1 mm を下回るような場所にベントナイトが露出している場合、その ^{26}Al 濃度からベントナイトの侵食速度の見積もることは理論上可能だと考えられる。一方で、大きな核種蓄積量は期待できず、加速器質量分析での検出下限に近いことが予想されるため、分析精度を上げる工夫が別途必要と考えられる。

参考文献

Aoyagi, K., & Kazama, T. (1980). Transformational changes of clay minerals, zeolites and silica minerals during diagenesis. *Sedimentology*, *27*(2), 179-188.

日本原子力文化財団 2022, 原子力・エネルギー図面集, https://www.jaero.or.jp/data/03syuppan/energy_zumen/energy_zumen.html, 2022 年 1 月 10 日閲覧.

Dunai, T. J. (2010). *Cosmogenic nuclides: principles, concepts and applications in the earth surface sciences*. Cambridge University Press.

Gehre, M., & Strauch, G. (2003). High-temperature elemental analysis and pyrolysis techniques for stable isotope analysis. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, *17*(13), 1497–1503.

Greene-Kelly, R. (1952). A test for montmorillonite. *Nature*, *170*(4339), 1130-1131.

Greene-Kelly, R. (1953). The identification of montmorillonoids in clays. *Journal of Soil Science*, *4*(2), 232-237.

Hirai, D., Sawai, O., Nunoura, T., & Hiroi, Z. (2018). Facile synthetic route to transition metal oxyfluorides via reactions between metal oxides and PTFE. *Journal of Fluorine Chemistry*, *209*(November 2017), 43–48.

Hobosyan, M. A., Kirakosyan, K. G., Kharatyan, S. L., & Martirosyan, K. S. (2015). PTFE–Al2O3 reactive interaction at high heating rates. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *119*(1), 245-251.

伊藤雅和. (1993). ベントナイトの風化に関する検討 (その 1)-ベントナイトの物性. *原子力学会秋の大会*.

伊藤雅和, 石井卓, 中島均, & 平田征弥. (1999). ベントナイトの成因・生成環境に関する一考察 国内 4 鉱床の比較. *粘土科学*, *38*(3), 181-187.

核燃料サイクル開発機構 (1999). 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, IV-69.

Kanik, N. J., Longstaffe, F. J., Kuligiewicz, A., & Derkowski, A. (2022). Systematics of smectite hydrogen-isotope composition: Structural hydrogen versus adsorbed water. *Applied Clay Science*, *216*, 106338.

Kiipli, T., Hints, R., Kallaste, T., Verš, E., & Voolma, M. (2017). Immobile and mobile elements during the transition of volcanic ash to bentonite – An example from the early Palaeozoic sedimentary section of the Baltic Basin. *Sedimentary Geology*, *347*, 148–159.

北山一美, 佐藤努, & 吉田英一. (2010). ナチュラルアナログ; 自然に学ぶ地層処分 数万年先を予測する工学技術とは? 第 2 回. *日本原子力学会誌 ATOMOΣ*, *52*(9), 553-558.

日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター(2019). 平成 30 年度 地層処

分技術調査等事業 ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書 平成 31 年 3 月.
日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター(2020). 平成 31 年度 地層処分技術調査等事業 ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書 令和 2 年 3 月.
日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター(2021). 令和 2 年度 地層処分技術調査等事業 ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書 令和 3 年 3 月.
Lal, D. (1991). Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models. *Earth and Planetary Science Letters*, *104*(2-4), 424-439.
Lander, R. H., Larese, R. E., & Bonnell, L. M. (2008). Toward more accurate quartz cement models: The importance of euhedral versus noneuhedral growth rates. *AAPG bulletin*, *92*(11), 1537-1563.
松四雄騎. (2017). 宇宙線生成核種を用いた岩盤の風化と土層の生成に関する速度論― 手法の原理, 適用法, 研究の現状と課題―. *地学雑誌*, *126*(4), 487-511.
Menicucci, A. J., Matthews, J. A., & Spero, H. J. (2013). Oxygen isotope analyses of biogenic opal and quartz using a novel microfluorination technique. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, *27*(16), 1873–1881.
Menicucci, A. J., Spero, H. J., Matthews, J., & Parikh, S. J. (2017). Influence of exchangeable oxygen on biogenic silica oxygen isotope data. *Chemical Geology*, *466*, 710-721.
水谷伸治郎・斎藤靖二・勘米良亀齢編 (1987). 日本の堆積岩, iv, 岩波書店
Mogab, C. J., Adams, A. C., & Flamm, D. L. (1978). Plasma etching of Si and SiO2 – The effect of oxygen additions to CF4 plasmas. *Journal of Applied Physics*, *49*(7), 3796–3803.
大和田朗, 佐藤卓見, & 平林恵理. (2013). 新開発乾式法による脆弱岩石試料の薄片・研磨薄片製作. *地質調査研究報告*, *64*(7-8), 221-224.
岡本真由美, et al. （1993）. P21 月布ベントナイト中のスメクタイトの鉱床別比較（その 3), *粘土科学討論会講演要旨集 第 37 回粘土科学討論会講演要旨集*. 一般社団法人日本粘土学会.
Qi, H., Coplen, T. B., Gehre, M., Vennemann, T. W., Brand, W. A., Geilmann, H., Olack, G., Bindeman, I. N., Palandri, J., Li, H. & Longstaffe, F. J. (2017). New biotite and muscovite isotopic reference materials, USGS57 and USGS58, for δ2H measurements–A replacement for NBS 30. *Chemical Geology*, *467*, 89–99.
Reijonen, H. M., & Marcos, N. (2017). Chemical erosion of the bentonite buffer: Do we observe it in nature? *Geological Society Special Publication*, *443*(1), 307–317.
佐治 慎一, 伊藤 雅和, 柴田 雅博, 神徳 敬, 磯貝 武司（2005）河川水と接触したベントナイト鉱床の科学特性変化：試料採取と分析結果, *JNC-TN84000*, 2005-017, 86.
Savin, S. M., & Epstein, S. (1970). The oxygen and hydrogen isotope geochemistry of clay minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *34*(1), 25-42.
Takagi, T. "Bentonite in Japan–geology and industries." *Open file report of Geological Survey of Japan* 425 (2005).

Thyberg, B., Jahren, J., Winje, T., Bjørlykke, K., Faleide, J. I., & Marcussen, Ø. (2010). Quartz cementation in Late Cretaceous mudstones, northern North Sea: Changes in rock properties due to dissolution of smectite and precipitation of micro-quartz crystals. *Marine and Petroleum Geology*, *27*(8), 1752–1764.

Walderhaug, O., Lander, R. H., Bjørkum, P. A., Oelkers, E. H., Bjørlykke, K., Nadeau, P. H., ... & Morad, S. (2000). Modelling quartz cementation and porosity in reservoir sandstones: examples from the Norwegian continental shelf. *Quartz cementation in sandstones*, *29*, 39-49.

Winchester, J. A., & Floyd, P. A. (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, *20*(C), 325–343.

Worden, R. H., Griffiths, J., Wooldridge, L. J., Utley, J. E. P., Lawan, A. Y., Muhammed, D. D., … Armitage, P. J. (2020). Chlorite in sandstones. *Earth-Science Reviews*, *204*(January), 103105.

山形　理（1963）山形盆地の地史学ならびに花粉学的研究（I）山形大学紀要 5、4、913-928pp.

横山 信吾, 黒田 真人, 筒井 政則, 佐藤 努, 鈴木 啓三, 榎戸 洋之 (2004). 月布ベントナイト鉱床における川向坑産ベントナイトと梅ノ木田坑産ベントナイトの鉱物学的比較, *粘土科学, 44*, 2, 45-52.

吉田英一, 北山一美, 佐藤努, & 小林容子. (2010). ナチュラルアナログ; 自然に学ぶ地層処分 数万年先を予測する工学技術とは? 第 1 回. *日本原子力学会誌 ATOMOΣ*, *52*(8), 473-477.

謝辞

本調査実施にあたり、坑内での試料採取およびボーリングコア試料の提供に関して、クニミネ工業（株）の伊藤雅和氏、諸留章二氏には多大な協力を頂いた。試料の分析にあたっては、北海道大学理学研究院薄片技術室および地球惑星科学専攻、工学研究院ナノマイクロマテリアル分析研究室、工学研究院複合量子ビーム超高圧電子顕微鏡解析研究室、低温科学研究所宇宙物質科学・宇宙雪氷学グループに協力頂いた。

研究報告 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

筑波大学　生命環境系

向井　広樹

【 目 次 】

1. 背景・目的 1
2. 全体研究計画（2 ヵ年における全体計画）.....3
3. 2021 年度研究実施内容.....5
3.1 2021 年度の計画、実施方法.....5
3.2 2021 年度の成果内容.....7
3.3 残された課題と今後の計画.....17
4. まとめ.....18

参考文献

1. 背景・目的

地層処分事業において、種々の放射性核種の環境中における挙動について理解することは重要となる。処分対象とされている高レベル放射性廃棄物は、ガラス固化体、金属製のオーバーパック、緩衝材であるベントナイトといった多重の人工バリアによって覆われるが、数千年以上の時間スケールではこれらのバリア機能は徐々に喪失していく可能性が考えられる。ガラス固化体中の種々の放射性核種は地下水へ溶出し、さらには地表付近の環境へと移行していくことが懸念される。こうしたことを考慮すると天然バリアである地中環境や地表付近における放射性核種の挙動について理解することが必要とされる。

ガラス固化体の放射性核種のうちセシウム（Cs）-137（半減期約 30 年）やストロンチウム（Sr）-90（半減期約 29 年）は数百～数千年程度の短中期的には主たる放射能源であり、環境中へ溶出した場合の影響が大きい核種である。ただこれらの放射性核種の環境中での挙動についてはチェルノブイリや福島第一原子力発電所の事故を通じてよく研究がなされてきている（Torstenfelt et al., 1982; Yasunari et al., 2011; Buesseler et al., 2015）。しかし一方で、数千年以上の時間スケールで主要な放射線源となるアメリシウム（Am）-241（半減期約 433 年）、Am-243（半減期約 7370 年）、ネプツニウム（Np）-237（半減期約 214 万年）といった潜在的有害度が高いアクチノイド系列の放射性核種についての研究は比較的限られている。実験的には人工バリアの一部として用いられる予定のベントナイトを主に構成しているモンモリロナイトおよびそれが熱変成して形成されるイライトを中心に研究がなされている（Bradbury et al., 2002; Fernandes et al., 2016; Nagasaki et al., 2017; Verma et al., 2019）が、天然バリアを含む環境中での挙動、その他の粘土鉱物についての研究はまだあまり進んでいない。

粘土鉱物は大きな表面積と優れた吸着能を持つことから、環境中で特に陽イオンの挙動に対して大きな影響を与えている（Sawhney et al., 1972）。地層処分事業においても緩衝材として粘土鉱物の一種であるモンモリロナイトを主成分とするベントナイトの使用が予定されており、放射性核種の漏洩を遅らせる役割が期待されている。Cs についても強固に固定し、福島原発の事故で放出された放射性 Cs が土壌表層付近に固定される要因になっている（Mukai et al., 2014; 2016）。ただ粘土鉱物は多様な種類があり、その吸着・脱離能には大きな差異があることが分かっている。また pH やイオン強度、放射性核種の濃度といった要素も影響を与えると考えられる（Fuller et al, 2014; Jin et al., 2014）。さらに長期的な挙動を考え

るには、その粘土鉱物における各放射性核種の存在状態について理解することが必要とされる。

以上のことから、本研究ではアクチノイド系列放射性核種の環境中での挙動について理解するため、特に各種の粘土鉱物におけるこれらの元素の吸着・脱離能や存在状態について明らかにすることを目的とする。

全体研究計画（2 ヵ年における全体計画）

本研究では、各種の粘土鉱物について、アクチノイド系列放射性核種および特にアメリシウムのアナログとされているユーロピウム（Eu）を用いて吸着・脱離実験を行う。測定には、誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS）を主に使用する。また試料には日本およびアメリカの粘土学会で標準試料となっているカオリナイト、黒雲母、ハイドロバイオタイト、モンモリロナイト等を用いる。各粘土鉱物については、篩を用いておよそ粒径を揃え比表面積の測定を行う。吸着実験においては、地下水の条件を考慮しつつ pH や元素の濃度を変化させ、それらの影響を各粘土鉱物種について調べていく。特に pH については、吸着に非常に大きな影響を与えることが報告されている（Bradbury et al., 2005; Guo et al., 2009）ことから pH を 3〜9 程度で幅広く変化させて実験を行っていく。一方、脱離実験については Na などの電解質溶液を用いて行う。元素を吸着させた試料についてどの程度脱離するのか、溶液の濃度や pH の影響とともに明らかにする。またアナログである Eu を用いるのは、ある程度高濃度の放射性核種を吸着させた試料は取り扱いが難しく、またアイソトープセンター管理区域外へ持ち出して試料の分析を行うことができないためである。そのため、低濃度から高濃度までの幅広い濃度（ppb~ppm オーダー）ではこの Eu を用いて吸着・脱離実験を行う。さらに元素を吸着したこれらの試料について走査型および透過型電子顕微鏡（SEM, TEM）、電子プローブマイクロアナライザ（EPMA）等を用いて詳細な観察や元素分析を行う。一方、極低濃度の領域（ppb 以下）では、必要に応じて放射性核種を用いて吸脱着実験を行う。測定には ICP-MS を基本的に用いるが、ppt 以下の極低濃度領域では必要に応じて Ge 半導体検出器も用いることを考えている。また基板上に各種の粘土鉱物を並べて放射性核種の溶液を滴下し、特にどの粘土鉱物がよく放射性核種を収着するのかイメージングプレート（IP）のオートラジオグラフィを用いることによって直接的に比較する。以上の研究によって、種々の環境条件における放射性核種の挙動について理解することを目指す。

2021 年度 : Eu を用いて、各種の粘土鉱物について吸着実験を低〜高濃度（10^{-3}~10^{-7} M）、幅広い pH（3〜9 程度）の条件で行い、また脱離実験を行う。これら吸着脱離実験の測定は ICP-MS で行う。さらに Eu 吸着試料について EPMA、TEM、XRD などによって詳細に観察・分析を行い、Eu の存在状態について調べていく。また年度の後半には取得したデータの取りまとめ、整理を行う。

2022 年度：前年度十分なデータが得られなかった Eu の濃度や pH の条件において吸着脱離実験を行う。また Eu 吸着試料についての EPMA・TEM による観察・分析も引き続き行っていく。さらに極低濃度下（Eu: 10^{-7} M 以下）での吸着脱離実験を、必要があれば放射性核種を用いて行う。データの取りまとめ、整理は随時行い、年度末に 2 年間の総括をする。

表 1　全体研究計画

	2021年度	2022年度
粘土試料についての Eu吸着実験	→	→
Eu吸着粘土試料についての 脱離実験	→	→
Eu吸着粘土試料についての EPMA/TEMによる観察・分析	→	→
極低濃度下での吸着・脱離実験		→
実験データの整理・取りまとめ	→	→

2. 2021 年度研究実施内容

2.1 . 2021 年度の計画、実施方法

3.1.1. 実験試料

試料として、黒雲母（インド)、カオリナイト（ジョージア)、モンモリロナイト（月布)、ハロイサイト（Aldrich)、ハイドロバイオタイト（南アフリカ）といった各種の粘土鉱物を準備する。これらの粘土試料は篩によって 53 μm 以下に粒度分別した後、比表面積をそれぞれ測定し、また XRD（Bruker: D8 Advance）を用いて結晶学的情報を得る。

3.1.2. 吸着脱離実験

粒度分別された各粘土鉱物試料を用いて Eu の吸着実験を行う。溶液のイオン強度を過塩素酸ナトリウム（$NaClO_4$）によって 0.1 M とし、Eu の濃度を塩化ユウロピウム（$EuCl_3$）によって 10^{-3}~10^{-7} M 程度で変化させる。また pH を水酸化ナトリウムおよび塩酸によって 3～9 程度に調整する。固液比を 1:20（0.05 g, 10 ml），反応時間を 24 時間として、反応後、遠心分離によって溶液及び粉末試料をそれぞれ回収する。これらの吸着実験は CO_2 の影響を抑えるため N_2 を充填したグローブボックス内で行う。溶液試料については、0.2 μm のフィルターを通して、硝酸で適宜希釈し ICP-MS (Perkinelmer: ELAN-DRC-e)によって Eu の濃度を測定する。そして吸着率あるいは以下の式で求められる分配係数（K_D）を各溶液試料について決定する。

$$K_D\,(\mathrm{ml/g}) = \frac{(C_{initial} - C_{final})}{C_{final}} \frac{V}{M}$$

$C_{initial}$: 反応前溶液の Eu 濃度、C_{final}: 反応後溶液の Eu 濃度、

V: 溶液の体積（ml)、M: 粉末試料の質量（g）

また Eu を吸着した各粉末試料について $NaClO_4$ (0.1, 1 M)によって脱離実験を行う。24 時間反応後、吸着実験と同様に遠心分離によって各試料を回収し、各溶液は ICP-MS によって Eu の濃度を測定して、Eu の脱離率を求める。

3.1.3. Eu 吸着試料についての観察と分析

粉末試料、特に比較的凝集しにくい黒雲母およびハイドロバイオタイトについては樹

脂埋めして断面の研磨片試料を作製し、そして帯電を防ぐため炭素蒸着する。粉末試料は Eu 10^{-3} M, $NaClO_4$ 0.1 M, pH 5.2 の溶液で 24 時間反応させた試料を用いる。そして EPMA（JEOL JXA-8530F）を用いて Eu が粒子のどの部分に吸着しているのか明らかにする。加速電圧を 20 kV, 電流値を 10^{-8} A の条件で、Eu, K, Mg といった元素についてマッピングを測定する。

さらにハイドロバイオタイトについては TEM（JEM-ARM200F-G）によって詳細に観察・分析を行う。集束イオンビーム加工装置（FIB: JIB-4000）を使用して Ga イオンビームによって粒子の端付近を加工する。そしてマイクロマニピュレータによって加工した切片をピックアップし、Cu グリッドに固定したのち FIB によって薄膜化し TEM 試料とした。TEM では試料の概観を観察するとともに結晶学的情報を得るために電子回折像を記録した。さらに原子番号に応じたコントラストを得られる走査型透過電子顕微鏡の高角度散乱暗視野（HAADF-STEM）法によって観察し、またエネルギー分散型 X 線分光法（EDS）によって元素マッピングを測定し微小領域において Eu がどのように分布しているのか調べる。

2.2 2021 年度の成果内容

3.2.1. 実験試料についての評価

粒度分別した各種の粘土鉱物について比表面積を測定した結果、各粘土鉱物の BET 比表面積は、9.63 m^2/g（黒雲母）、11.17 m^2/g（ハイドロバイオタイト）、9.72 m^2/g（カオリナイト）、8.65m^2/g（モンモリロナイト）、53.87m^2/g（ハロイサイト）となっており（表 2）、ハロイサイトが他と比べて特に大きな比表面積を持っていることがわかる。また各粘土鉱物について粉末 X 線回折パターンを測定した結果を図 1 に示す。さらに図 2 はハイドロバイオタイトについて、53 μm 以下、150-300 μm、300-1180 μm の各粒度で Eu 吸着実験を行った結果であり、粒度が大きくなるほどに吸着率が減少していることがわかる。粒度が大きくなるにつれて比表面積は減少すると考えられ、他と比べて大きな比表面積を持つハロイサイト以外の 4 種の粘土鉱物を本研究の吸着脱離実験で用いることとした。

表 2. 粒度分別した各粘土鉱物試料の BET 比表面積測定結果。

Mineral Name	BET surface area (m^2/g)
biotite	9.629
hydrobiotite	11.17
montmorillonite	8.652
kaolinite	9.721
halloysite	53.87

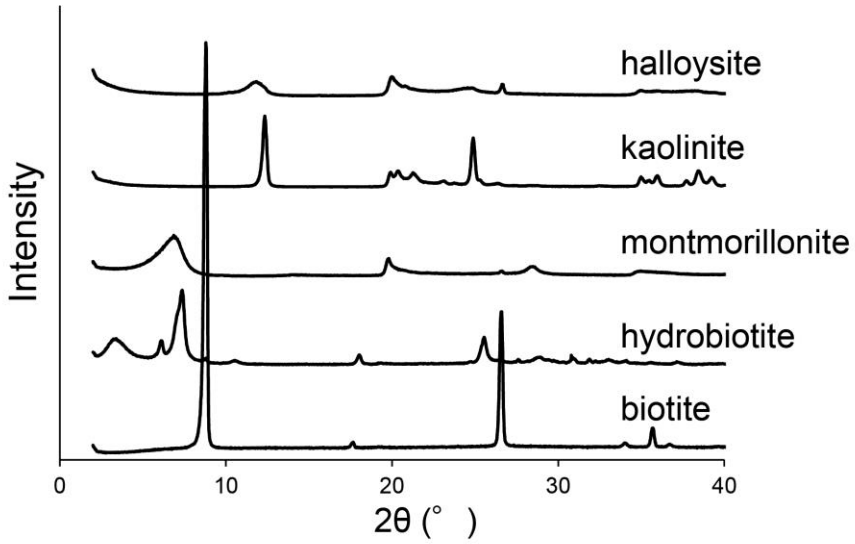


図 1. 各粘土鉱物試料の粉末 X 線回折パターン。

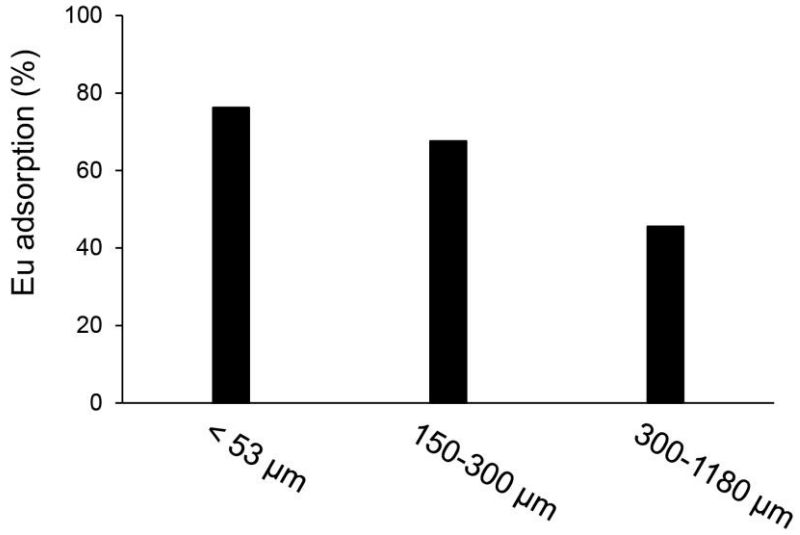


図 2. ハイドロバイオタイトについて各粒度で行った Eu 吸着実験の結果

（Eu: 10^{-3} mol/L, pH: 5.2, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$）。

3.2.2 Eu 吸着実験

53μm 以下に粒度分別した黒雲母、ハイドロバイオタイト、カオリナイトおよびモンモリロナイトについて Eu の吸着実験を行った。図 3、4 はそれぞれ Eu: 10^{-4}, 10^{-6} M, pH: 3-9 で吸着実験を行った吸着率および K_D についての吸着エッジのグラフとなっている。各粘土鉱物において pH の上昇とともに Eu 吸着率が増加する傾向が見られた。Eu が低濃度（10^{-6} M)の場合、高濃度（10^{-4} M)の時より、高い吸着率を各粘土が示した。また Eu 濃度が低い場合の方が pH の変化に対する Eu 吸着率の急激な変化が特に黒雲母、カオリナイトにおいて見られている。低 pH（3~5 程度）においてはハイドロバイオタイトが特に他の粘土鉱物よりも高い吸着率を示していた。黒雲母やカオリナイトは低 pH においては低い吸着率となっていたが、高 pH では他の粘土鉱物と同様 100%近い吸着率を示していた。

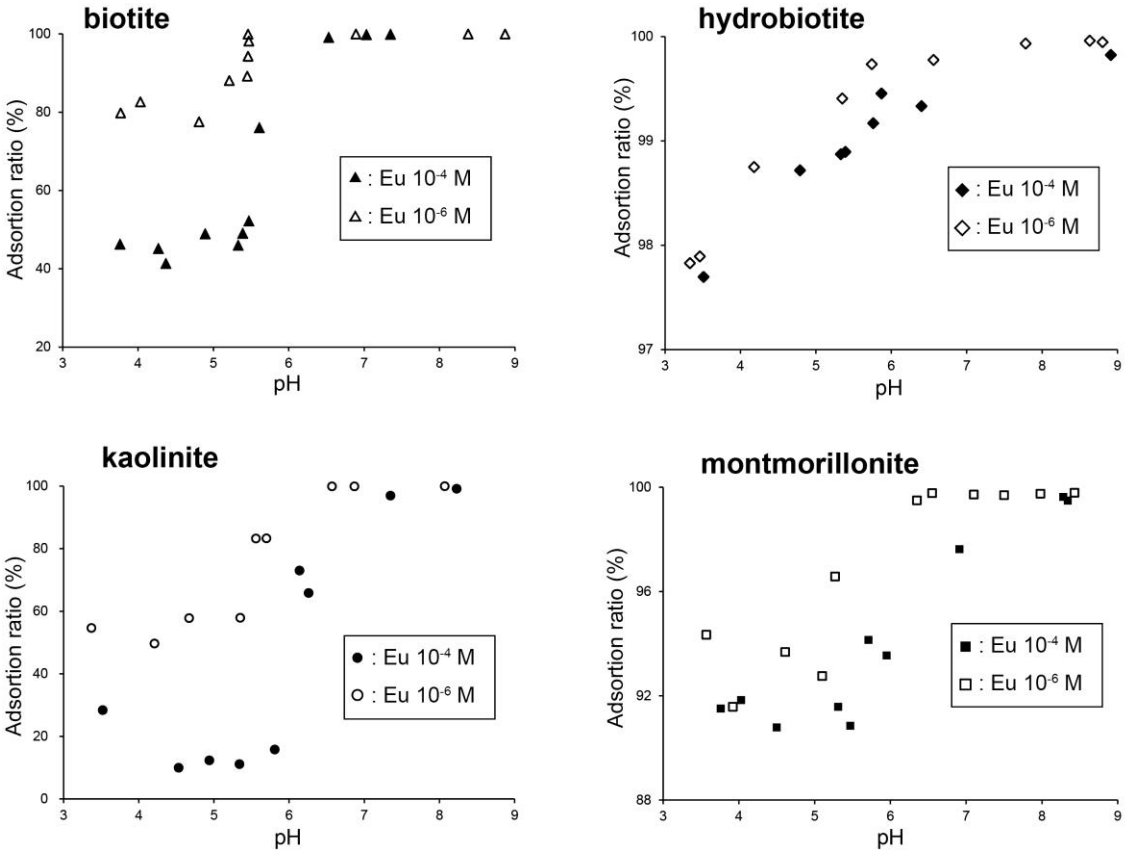


図 3. 各粘土鉱物試料についての Eu 吸着エッジ（縦軸：吸着率）の測定結果

（Eu: 10^{-4} or 10^{-6} mol/L, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$）。

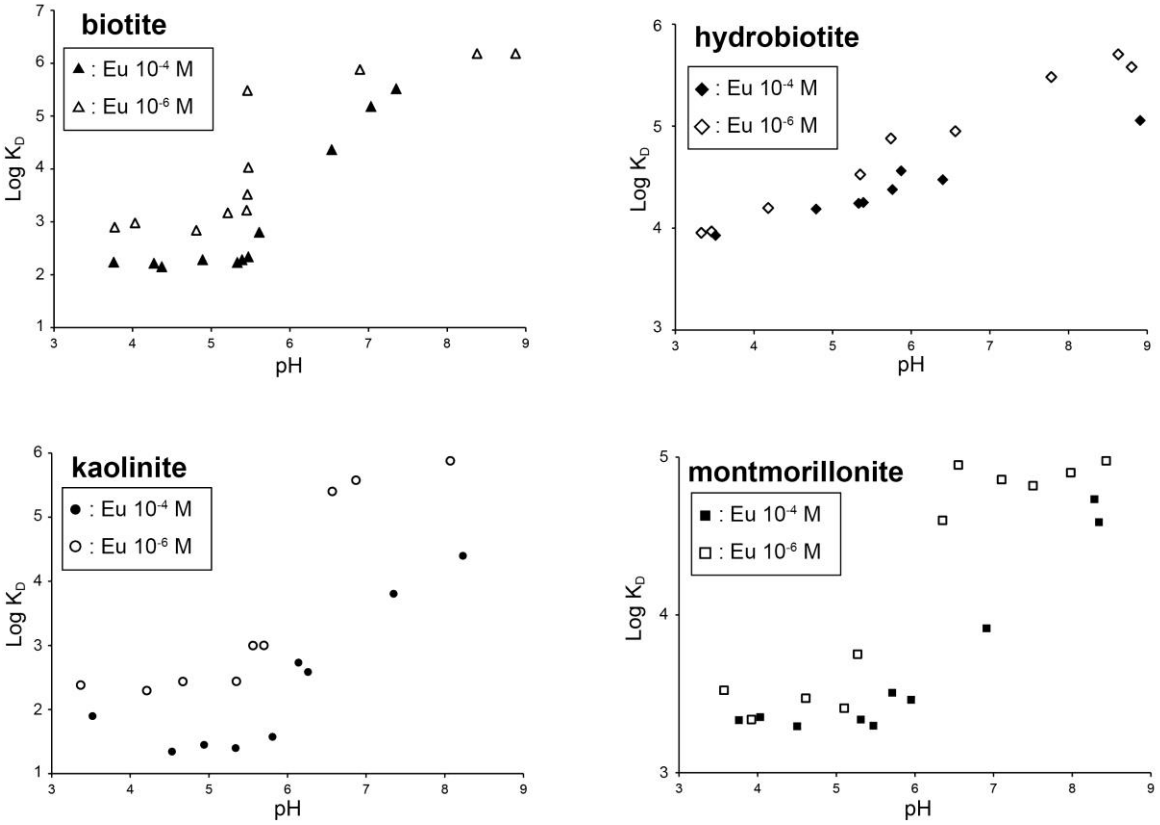


図 4. 各粘土鉱物試料についての Eu 吸着エッジ（縦軸：K_D）の測定結果

（Eu: 10^{-4} or 10^{-6} mol/L, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$）。

3.2.3. Eu 脱離実験

次に Eu 脱離実験を吸着実験において Eu を吸着させた粘土試料について行った。特に Eu: 10^{-4}, 10^{-6} M, pH: ~5.2 で吸着実験を行った試料について、$NaClO_4$ (0.1 or 1 M)の溶液によって pH: 5.2 で脱離実験を行い、ICP-MS によって脱離率を求めた（図 5-7）。これら脱離実験の結果において、黒雲母およびハイドロバイオタイトの脱離率は非常に低く（1 %以下）、これらの粘土鉱物において Eu が非常に強く固定されていることが示唆される。一方でカオリナイトから Eu は非常によく脱離しており、弱く吸着していることが考えられる。また吸着実験時の Eu の濃度が高い（10^{-4} M）方（図 5）が低い場合（10^{-6} M）（図 6）より、多く脱離する傾向が見られた。特にカオリナイトでは大きな違いが見られている。さらに $NaClO_4$ (1 M)の溶液では、$NaClO_4$ (0.1 M)の溶液よりも脱離率は全体に上昇しており、特にカオリナイト、モンモリロナイトで大きく上昇していた（図 7）。

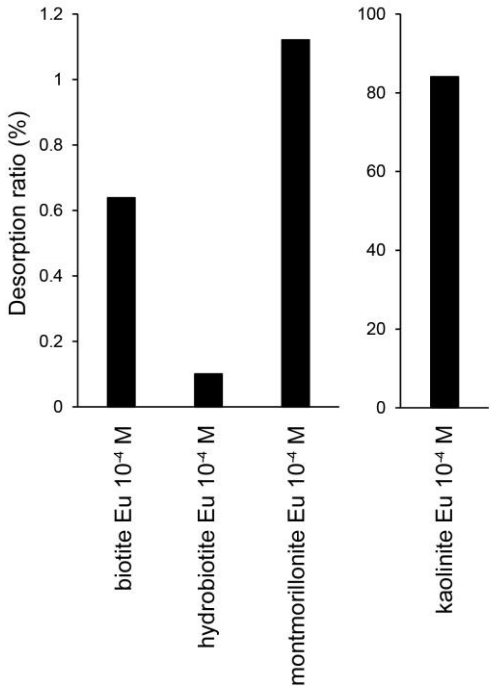


図 5. 各粘土鉱物試料についての 0.1 mol/L $NaClO_4$ 溶液による Eu 脱離実験の結果。各試料は吸着実験（Eu: 10^{-4} mol/L, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$）によって Eu を吸着した試料を用いた。

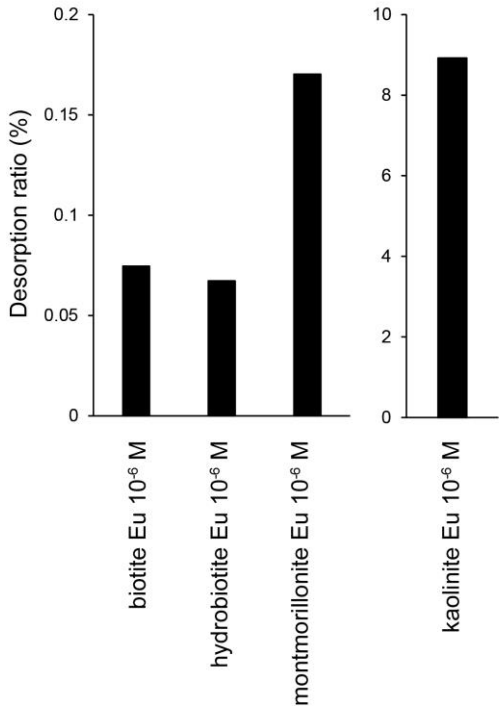


図 6. 各粘土鉱物試料についての 0.1 mol/L $NaClO_4$ 溶液による Eu 脱離実験の結果。各試料は吸着実験（Eu: 10^{-6} mol/L, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$）によって Eu を吸着した試料を用いた。

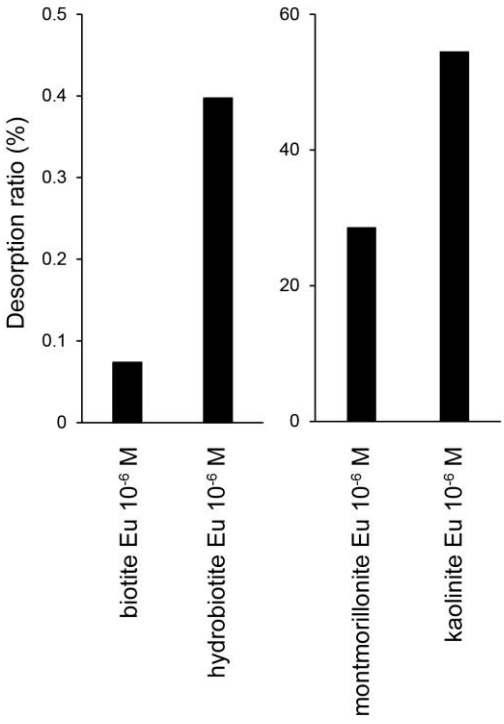


図 7. 各粘土鉱物試料についての 1 mol/L $NaClO_4$ 溶液による Eu 脱離実験の結果。各試料は吸着実験（Eu: 10^{-6} mol/L, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$）によって Eu を吸着した試料を用いた。

3.2.4. 電子プローブマイクロアナライザ（EPMA）による分析

Eu が比較的高濃度の溶液（10^{-3} M, pH: 5.2）で Eu を吸着させた黒雲母およびハイドロバイオタイトの試料について断面の研磨片試料を作製した。そして EPMA によって粒子に吸着された Eu, および K, Mg について元素マッピングを測定した。その結果、黒雲母では断面試料の端の方に Eu が濃集していることが明らかになった（図 8）。定量分析を行うと、粒子内部ではほぼ Eu が検出されなかったが、粒子端部では数千 ppm の Eu が検出された。また粉末 X 線回折測定を溶液反応前後の試料あるいは $NaClO_4$ 溶液に浸漬後の試料について行ったところ、底面反射の位置はほとんど変化しておらず（図 9）、層間に Eu や Na はほとんど侵入していないと考えられる。一方ハイドロバイオタイトではやはり粒子の端の方に Eu がよく濃集していたが、粒子の層間にも Eu が侵入していることが観察された（図 10）。ハイドロバイオタイトは、黒雲母と比較すると、層間に K に加えて水和した Mg が存在している。すなわちハイドロバイオタイトでは、水和した Mg を置換して Eu が層間に侵入したと考えられる。

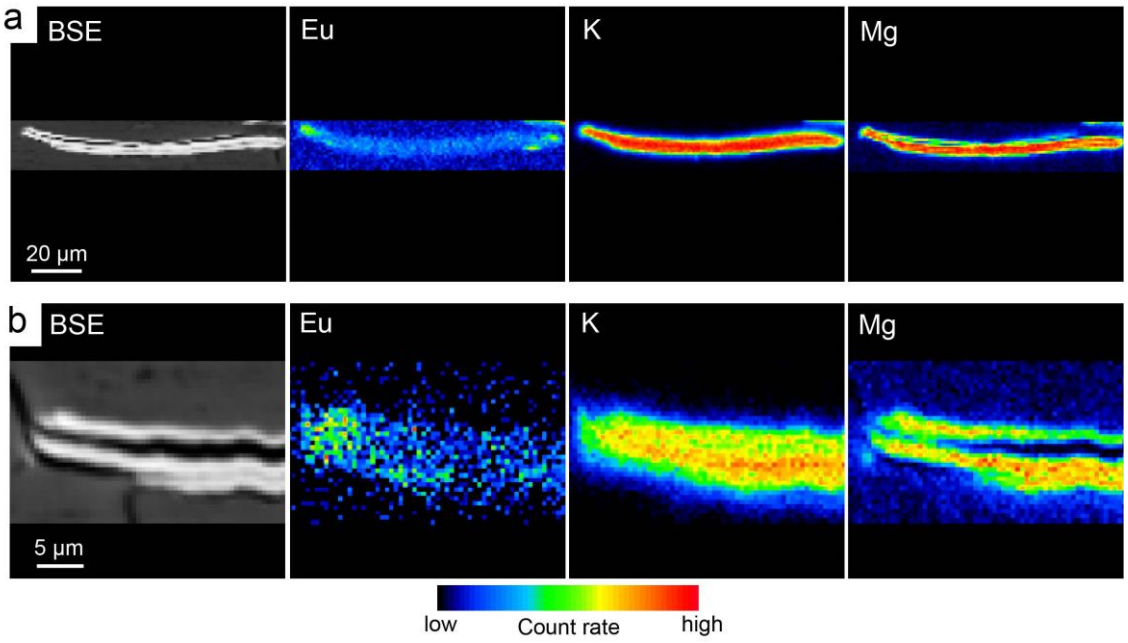


図 8. 黒雲母断面試料における(a) 粒子全体、(b) 端部付近についての EPMA による元素マッピングの結果。試料は吸着実験（Eu: 10^{-3} mol/L, pH: 5.2, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$）によって Eu を吸着した試料を用いた。

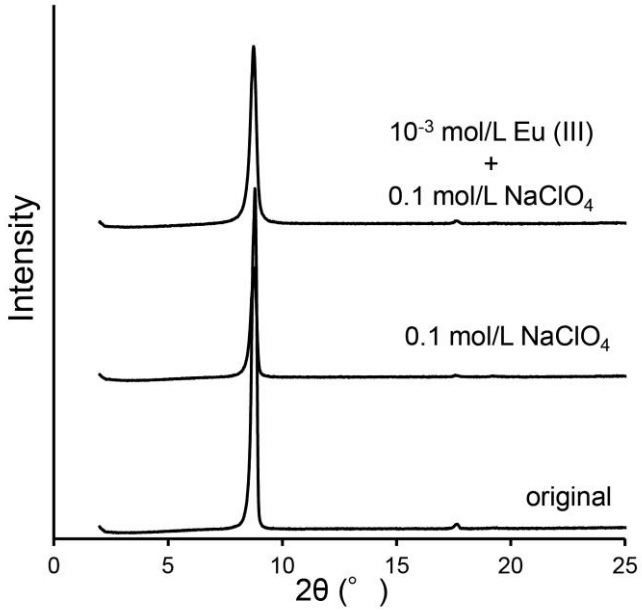


図 9. 溶液反応前の黒雲母および、0.1 M $NaClO_4$, 0.1 M $NaClO_4$ + 10^{-3} M Eu 溶液との反応後の粉末 X 線回折パターン。

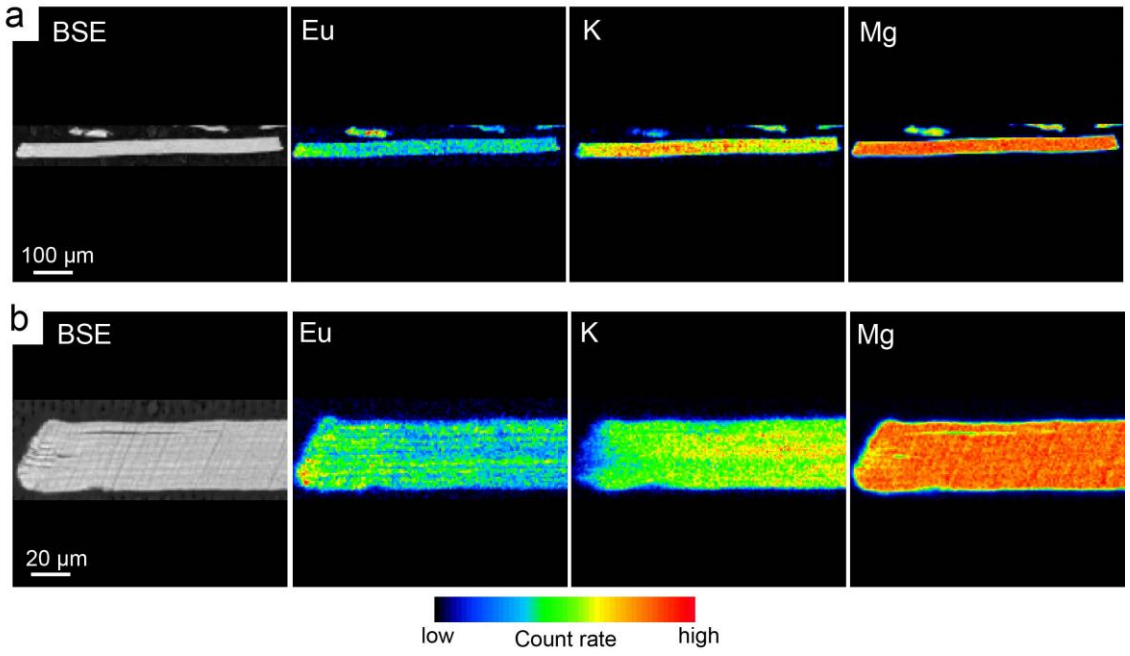


図 10. ハイドロバイオタイト断面試料における(a) 粒子全体、(b) 端部付近についての EPMA による元素マッピングの結果。試料は吸着実験（Eu: 10^{-3} mol/L, pH: 5.2, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$）によって Eu を吸着した試料を用いた。

3.2.5. 透過型電子顕微鏡（TEM）による観察・分析

次にハイドロバイオタイトについて TEM によって観察・分析を行った。そのためにまず EPMA によって分析した研磨片試料において、粒子の端部付近で FIB 加工を行い、TEM 試料を作製した（図 11）。TEM、HAADF-STEM 観察および制限視野電子回折像から、粒子が不純物をほとんど含まない層状構造を持っていることがわかった（図 12）。ただ層状構造の端部がほつれた様子も観察された。そして STEM-EDS によって元素マッピングをこの端面付近について測定した（図 13）。その結果、Eu はこのほつれた端部によく濃集しており、また表面や一部の層間にも存在している様子が観察された。

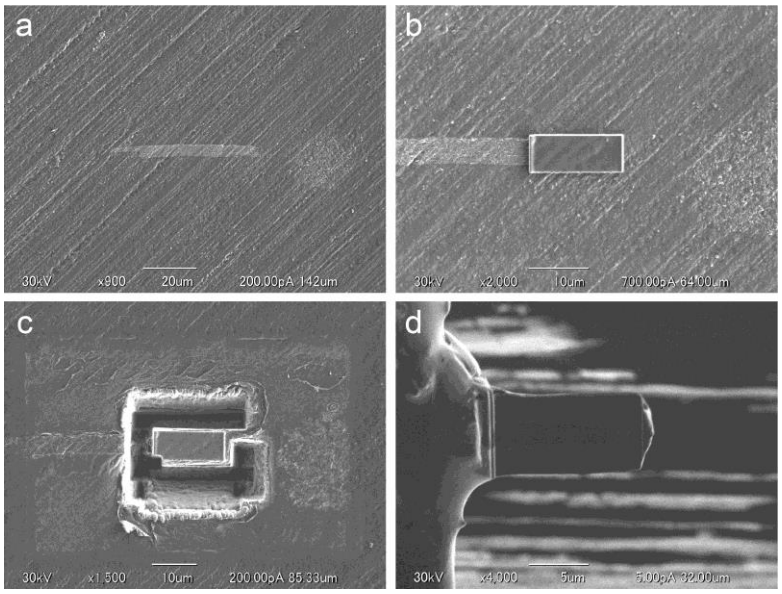


図 11. 集束イオンビーム（FIB）によるハイドロバイオタイトからの TEM 試料の作製過程についての二次イオン像。(a) 加工するハイドロバイオタイト粒子、(b) 炭素保護膜の形成、(c) 保護膜周辺部の加工、(d) Cu グリッドに固定された試料切片。試料は吸着実験（Eu: 10^{-3} mol/L, pH: 5.2, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$）によって Eu を吸着した試料を用いた。

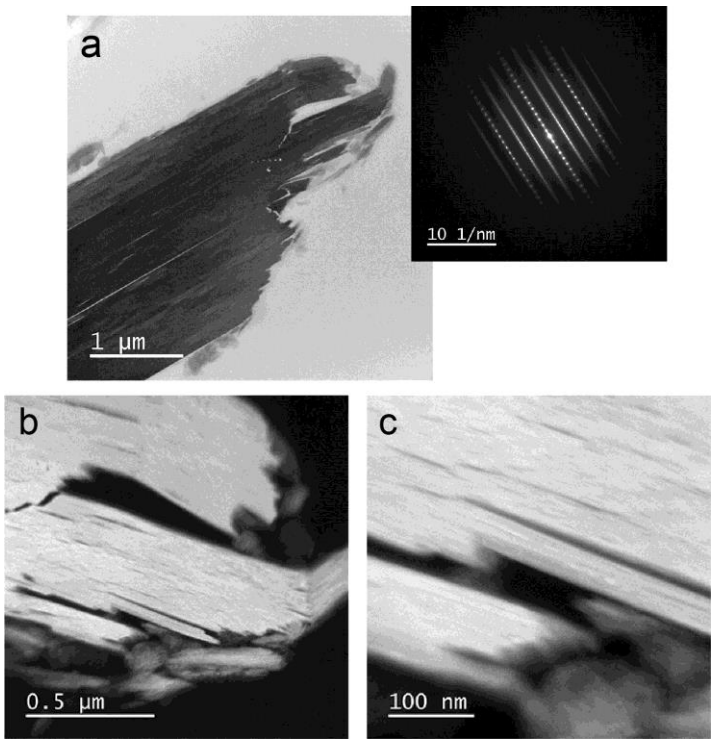


図 12. ハイドロバイオタイト断面試料についての TEM による観察・解析。(a) TEM 像および制限視野電子回折像、(b, c) 端部付近についての HAADF-STEM 像。

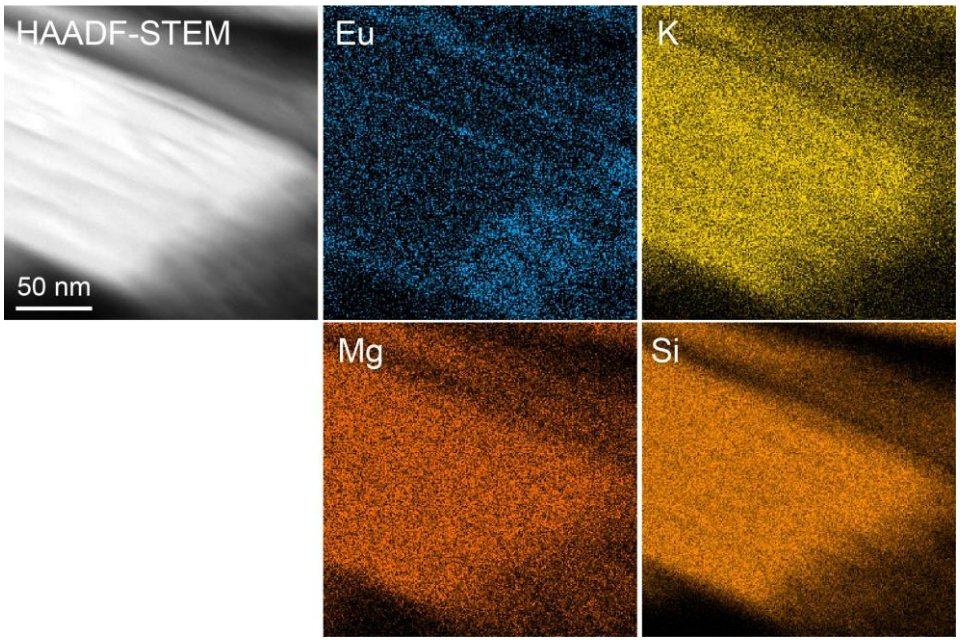


図 13. ハイドロバイオタイト粒子端部についての STEM-EDS による元素マッピング。

2.3 残された課題と今後の計画

2021 年度は、各種の粘土鉱物の Eu の吸着・脱離に対するおよその性質について知ることができたが、pH 依存性や Eu の濃度依存性あるいは粘土鉱物の違いについてより明確にしていく必要がある。これまでの研究で pH 5.2 付近で Eu を吸着させた粘土鉱物について脱離実験を行っているが、例えば地下水等の環境下ではより高 pH であり、天然バリアにおける放射性核種の挙動を考慮し、pH 8 程度の高 pH での脱離実験を行う予定である。また電子顕微鏡等による Eu を吸着した粘土鉱物についての観察は、これまで pH 5.2 でのハイドロバイオタイトあるいは黒雲母のみに限られている。特にモンモリロナイトについては極微細であるが、他の粘土鉱物についても可能であれば観察・分析を行う。また pH 8 付近で Eu を吸着させた場合、Eu 吸着率は各粘土鉱物で上昇していた。この pH 8 付近で Eu を吸着させた試料についても黒雲母、ハイドロバイオタイト他の試料を観察・分析を行い、pH 5.2 の場合と比較して Eu の存在状態の違いを明らかにする。また人工バリアから天然バリアや環境中に漏出してくる放射性核種は極低濃度であることが予想されるため、さらに低濃度での実験を行う。必要に応じて Eu あるいは Am の放射性核種を用いることを考えている。イメージングプレートのオートラジグラフィを使うなどして各粘土鉱物間の放射性核種の挙動について調べる。

3. まとめ

2021 年度の研究では、各粘土鉱物について Am のアナログとして Eu を用いて低～高濃度（10^{-4}~10^{-6} M）、pH を 3~9 まで変化させ吸着実験を行った。各粘土は pH が上昇するとともに Eu 吸着率が上昇する傾向が見られ、Eu が高濃度の場合より、低濃度でより高い吸着率を示していた。また低 pH でハイドロバイオタイトが比較的高い吸着率を示していたが、高 pH では各粘土が 100%近い吸着率を示した。また Eu 脱離実験においては黒雲母、ハイドロバイオタイトからほとんど Eu は脱離せず、これらの鉱物において Eu が強く固定されていることが示唆された。一方でカオリナイトからは Eu はよく脱離し、粒子表面に弱く吸着していると考えられる。また EPMA, TEM によって Eu を吸着したハイドロバイオタイト、黒雲母について観察・分析を行ったところそれぞれ粒子の端部付近によく Eu が濃集していることがわかった。さらにハイドロバイオタイトでは粒子の層間にも一部 Eu が侵入していることが観察された。こうした箇所において Eu は強固に固定されていると考えられた。

今後は今年度十分なデータが得られなかった高 pH での脱離実験および電子顕微鏡による観察・分析を進めていく予定である。またさらに極低濃度においての実験を、場合によっては放射性核種を用いて吸脱着実験を行うことを考えている。

参考文献

1. Bradbury, M. H.; Baeyens, B., Sorption of Eu on Na- and Ca-montmorillonites: Experimental investigations and modelling with cation exchange and surface complexation. Geochimica Et Cosmochimica Acta 2002, 66, (13), 2325-2334.
2. Bradbury, M. H.; Baeyens, B.; Geckeis, H.; Rabung, T., Sorption of Eu(III)/Cm(III) on Ca-montmorillonite and Na-illite. Part 2: Surface complexation modelling. Geochimica Et Cosmochimica Acta 2005, 69, (23), 5403-5412.
3. Buesseler, K. O.; German, C. R.; Honda, M. C.; Otosaka, S.; Black, E. E.; Kawakami, H.; Manganini, S. J.; Pike, S. M., Tracking the Fate of Particle Associated Fukushima Daiichi Cesium in the Ocean off Japan. Environmental Science & Technology 2015, 49, (16), 9807-9816.
4. Fuller, A. J.; Shaw, S.; Peacock, C. L.; Trivedi, D.; Small, J. S.; Abrahamsen, L. G.; Burke, I. T., Ionic strength and pH dependent multi-site sorption of Cs onto a micaceous aquifer sediment. Applied Geochemistry 2014, 40, 32-42.
5. Guo, Z. J.; Xu, J.; Shi, K. L.; Tang, Y. Q.; Wu, W. S.; Tao, Z. Y., Eu(III) adsorption/desorption on Na-bentonite: Experimental and modeling studies. Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects 2009, 339, (1-3), 126-133.
6. Jin, Q.; Wang, G.; Ge, M. T.; Chen, Z. Y.; Wu, W. S.; Guo, Z. J., The adsorption of Eu(III) and Am(III) on Beishan granite: XPS, EPMA, batch and modeling study. Applied Geochemistry 2014, 47, 17-24.
7. Marques Fernandes, M.; Scheinost, A. C.; Baeyens, B., Sorption of trivalent lanthanides and actinides onto montmorillonite: Macroscopic, thermodynamic and structural evidence for ternary hydroxo and carbonato surface complexes on multiple sorption sites. Water Research 2016, 99, 74-82.
8. Mukai, H.; Hatta, T.; Kitazawa, H.; Yamada, H.; Yaita, T.; Kogure, T., Speciation of Radioactive Soil Particles in the Fukushima Contaminated Area by IP Autoradiography and Microanalyses. Environmental Science & Technology 2014, 48, (22), 13053-13059.
9. Mukai, H.; Hirose, A.; Motai, S.; Kikuchi, R.; Tanoi, K.; Nakanishi, T. M.; Yaita, T.; Kogure, T., Cesium adsorption/desorption behavior of clay minerals considering actual contamination conditions in Fukushima. Scientific Reports 2016, 6.

10. Nagasaki, S.; Riddoch, J.; Saito, T.; Goguen, J.; Walker, A.; Yang, T. T., Sorption behaviour of Np (IV) on illite, shale and MX-80 in high ionic strength solutions. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 2017, 313, (1), 1-11.
11. Sawhney, B. L., Selective Sorption and Fixation of Cations by Clay-Minerals - Review. Clays and Clay Minerals 1972, 20, (2), 93-100.
12. Torstenfelt, B.; Andersson, K.; Allard, B., Sorption of Strontium and Cesium on Rocks and Minerals. Chemical Geology 1982, 36, 123-137.
13. Verma, P. K.; Semenkova, A. S.; Krupskaya, V. V.; Zakusin, S. V.; Mohapatra, P. K.; Romanchuk, A. Y.; Kalmykov, S. N., Eu (III) sorption onto various montmorillonites: Experiments and modeling. Applied Clay Science 2019, 175, 22-29.
14. Yasunari, T. J.; Stohl, A.; Hayano, R. S.; Burkhart, J. F.; Eckhardt, S.; Yasunari, T., Cesium-137 deposition and contamination of Japanese soils due to the Fukushima nuclear accident. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 2011, 108, (49), 19530-19534.

研究報告 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

京都大学　大学院工学研究科

久保　大樹

【 目 次 】

1. 背景・目的 1
2. 全体研究計画（2 ヵ年における全体計画） 2
3. 2021 年度研究実施内容 3
3.1 2021 年度の計画、実施方法 3
3.2 2021 年度の成果内容 4
3.2.1 亀裂シミュレーション手法『GEOFRAC』の改良 4
3.2.2 プローブ型浸透率測定器の改良 9
3.2.3 瑞浪地域の水理試験および亀裂データの再整理 12
3.3 残された課題と今後の計画 14
4. まとめ 15

参考文献

2021 年度外部発表

1. 背景・目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設の建設においては，施設周辺の地下水流動形態の把握が重要となる。解析に用いられる地下水理構造モデルでは，断層や透水性亀裂が主要な地下水流動パスあるいは遮水性構造として重視される。しかしながら，地層処分で求められる超長期時間スケールを対象とする場合，マイクロクラックや鉱物粒界で生じる岩体基質部の透水性も無視できない要素となる。基質部での地下水流動（マトリクス拡散）に関するラボスケールでの検証や原位置試験は報告されているものの（例えば，石橋ほか, 2016; Tachi et al., 2018），広域地下水流動解析とどのように組み合わせるのか，どれほどの効果が現れるのかについては，いまだ明確な結論を出せていない。今後の地層処分計画に関する測定・解析スキームの構築のためにも詳細な検討・検証が求められている。

本研究課題では，亀裂部（移流）と岩体基質部（拡散）の水理特性を統合した水理構造モデルの構築を最終的な目標とする。特に亀裂構造が重要な要素となる結晶質岩体を対象とし，亀裂モデリング手法の開発と，岩体基質部における透水性の定量化手法を数値解析と実測を通して実施する。これにより，広域地下水流動形態の解明だけでなく，超長期時間スケールで生じる亀裂から岩体への流体・物質の拡散による水－岩石反応のシミュレーションが可能となり，数百から数万年単位での施設の安全性についての議論に貢献することができる。

2. 全体研究計画（2 ヵ年における全体計画）

本研究課題は，（１）地球統計学的手法を用いた亀裂モデリング，（２）実測による岩体基質部の水理特性の定量化，（３）亀裂モデルと基質部水理特性の統合による複合的な地下水理構造モデルの構築，を主要な課題として実施する。

（１）数値解析による亀裂モデリング

申請者の所属研究室にて開発している地球統計学的手法を用いた亀裂シミュレーション法である『GEOFRAC』を瑞浪地域で取得されている亀裂観測データに対して適用する。適用に際して，地球統計学分野の最新の解析手法やプログラミング言語・画像処理関係の技術の最適化を行い，解析手法のアップデートを実施する。

（２）実測による岩体基質部の水理特性の定量化

迅速かつ非破壊での測定が可能なプローブ型浸透率測定器を用いて土岐花崗岩試料の浸透率測定を実施する。また密度測定や薄片観察を通してマイクロクラックや変質程度など岩体基質部の透水性に影響する要素を見出し，浸透率測定結果と比較することでその関連性を明らかにする。これによりボーリング調査で実施されている各種検層データや地表からの物理探査結果から，広域的な透水係数の分布推定を可能とする。

（３）亀裂モデルと基質部水理特性の統合による複合的な地下水理構造モデルの構築

実施内容（１）（２）で得られた結果を統合し，流体パスとなる亀裂部分と浸透流が支配的となる岩体基質部の透水性を複合的に考慮した地下水理構造モデルの構築を行う。この数値モデルは，地下水流動解析や各種シミュレーションへの応用が容易な Stochastic（連続）モデル型を想定している。本モデルを利用し，MODFLOW などを用いた地下水流動シミュレーションを実施し，モデルの有効性の検証を実施する。

3. 2021 年度研究実施内容

3.1 2021 年度の計画、実施方法

2021 年度の実施計画は以下のとおりである。

(1) 亀裂シミュレーション手法『GEOFRAC』の改良

GEOFRAC のオリジナルコードは約 20 年前に作成されたものであり,現在のコンピュータやプログラミング言語に最適化されておらず，データの入出力が煩雑であり計算速度も高速化の余地がある。コードの改良により操作性・計算速度を向上させることで，様々な条件での検証作業を実行できるようにする。

(2) プローブ型浸透率測定器の改良

プローブ型浸透率測定器は，迅速かつ簡便に岩石試料の透水性を求められる利点があるが，特に結晶質岩を対象とした場合の測定値のばらつきや，試料表面の状態によるガスリークなど測定精度についての問題を多く残している。密着性を高めた測定プローブの製作や，多孔質セラミックなど透気率が既知の試料を用いた計測，高精度カメラを用いたガス流路の検出などにより，信頼性の高い測定装置・測定手法の開発を行う。

(3) 瑞浪地域の水理試験および亀裂データの再整理

（国研）日本原子力研究開発機構（以下，JAEA）瑞浪超深地層研究所から提供されている大深度ボーリング調査で取得された水理試験データとボアホールカメラによる観測亀裂データの整理を行い，その統計的特徴について再検討を行う。特に，水理試験区間内に存在する亀裂の配向性や開口幅と水理試験値を比較し，亀裂が岩盤の透水性に与える影響の大きさについて決定論的な検証を実施する。

本研究課題では，深部地質に関する情報が数多く集積されている JAEA 瑞浪超深地層研究所用地を含む岐阜県東濃地域をケーススタディの対象とする。本地域では，JAEA を中心として多分野にわたる深地層の科学的研究が進められており（核燃料サイクル開発機構, 2002），図 3.1 に示されるように 20 孔以上からなる深度 500～1000 m 程度の深層ボーリングや複数の水平坑道を利用した調査・計測が実施されている。これらのデータを利用した深部地質の構造や環境に関する研究（例えば，笹尾ほか, 2006; 持田ほか, 2007）も数多く報告されており，本研究課題のケーススタディサイトとして適したフィールドである。著者自身も，本地域を対象とした亀裂・地下水流動シミュレーションや，岩石の浸透率測定についての学術論文を発表済みである。

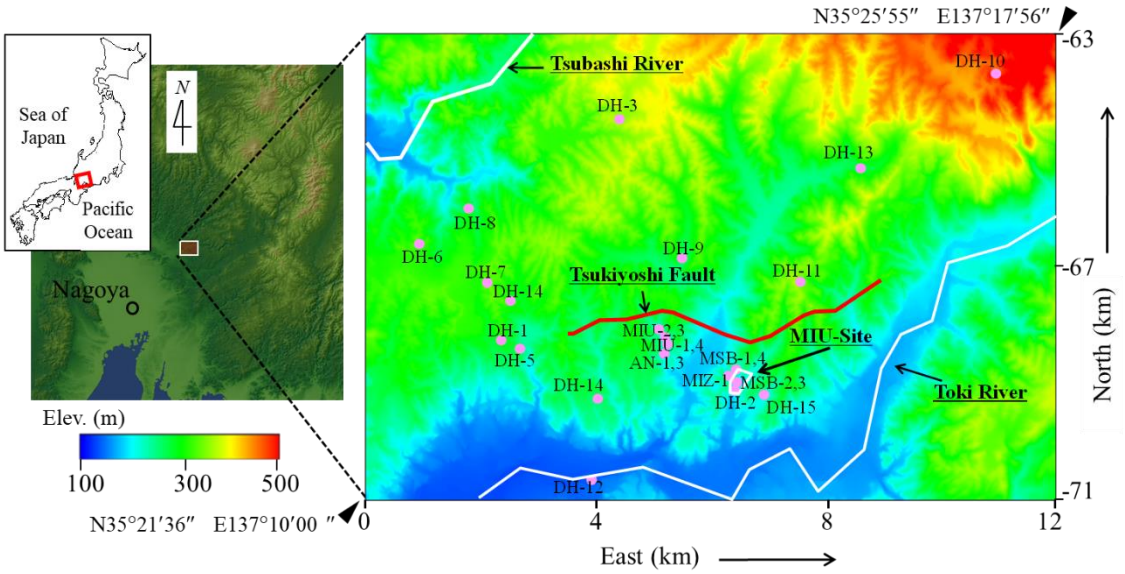


図 3.1 岐阜県東濃地域の地形図と深層ボーリングの分布図（久保ほか, 2013）

3.2 2021 年度の成果内容

3.2.1 亀裂シミュレーション手法『GEOFRAC』の改良

3.2.1.1 GEOFRAC の概略

複数の地球統計学的手法を組み合わせた亀裂分布シミュレーションプログラムである GEOFRAC（GEOstatistical FRACture simulation：小池ほか, 2008; Koike et al., 2012）は，ボーリング孔や坑道壁面より得られた亀裂の位置・走向・傾斜のデータをもとに 3 次元モデルを構築することができる。一般的な亀裂分布モデリング手法では，亀裂面の方向性や大きさは事前に設定された確率モデルに基づいて与えられるのに対し，GEOFRAC では走向・傾斜についても地球統計学を用いた計算を行い，その結果に基づいた単位亀裂要素の連結によって推定亀裂面を表現することが特色として挙げられる。

しかしながら，GEOFRAC のオリジナルコードは約 20 年前に作成されたものであり，現在のコンピュータやプログラミング言語に最適化されていない。そのため，データの入出力が煩雑であり計算速度も高速化の余地がある。また，単位亀裂要素の連結に関するパラメータについても試行錯誤的に決定されており，これに関する検証もより正確なモデリングのために重要となる。

GEOFRAC の計算時間の短縮のために，図 3.2 に示される各計算ステップを独立したコードに分割した。これにより，修正の必要な個所に限定して再計算が可能となり，繰り返しの検証作業における計算時間の短縮が可能となった。

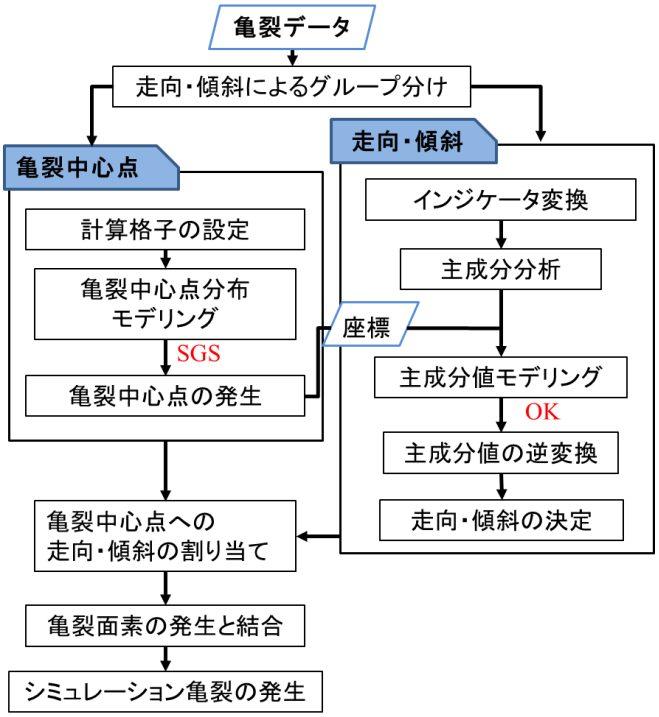


図 3.2 GEOFRAC の計算ステップ

分割後のコードを使用し，GEOFRAC の検証を目的とした解析を実施した。解析では，検証モデルとして，東西方向に 2.0 km，南北方向に 2.8 km，深度方向に 0.9 km の領域内に亀裂面を発生させ，仮想的に設定したボーリング孔に現れる亀裂データに基づいて GEOFRAC モデルを作成した（図 3.3）。発生させる亀裂面や，ボーリング孔の条件を変更することにより，GEOFRAC の適用できる範囲や妥当性についての検証を行った。

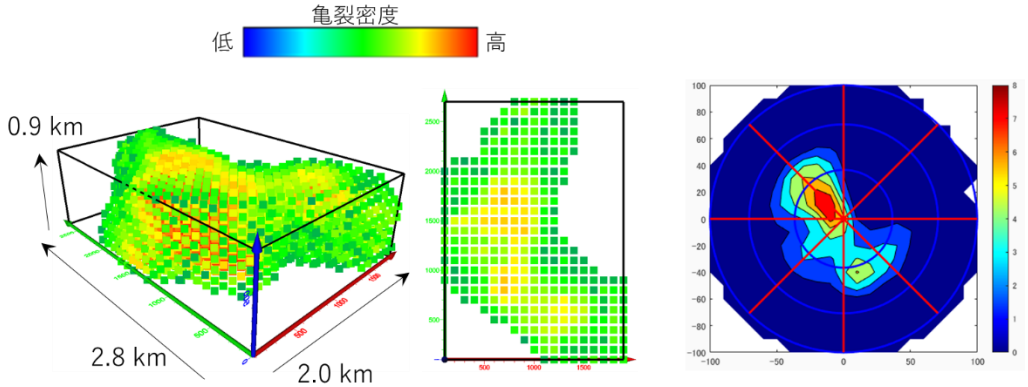


図 3.3 検証モデルの亀裂密度分布と亀裂面の方位分布（シュミットネット下半球投影）

検証(1)：ボーリング分布位置に関する検証

図 3.4 のように仮想ボーリングの掘削位置と点数を変更し，それぞれの条件で GEOFRAC モデルの作成を行った。CASE 1-1 は 4 本，1-2 は 8 本，1-3 は 15 本で，間隔は 500 – 1000 m 程度で，深度方向の深さは表層から底面までとした。各ケースの仮想ボーリングから取得された亀裂データで作成した GEOFRAC モデルより，亀裂密度分布と方位分布（シュミットネット下半球）を再計算し図 3.5 にまとめる。いずれのケースにおいても，方位分布は図 3.2 の検証モデルと類似した傾向を示すが，密度分布についてはボーリング本数の少ない CASE 1-1 の南西部に元の検証モデルには存在しない高密度領域が発生している。これは亀裂密度の算定に地球統計的手法である逐次ガウスシミュレーション法（SGS: sequential gaussian simulation）を利用しているため，観測データが少ない場合に不正確な値に収束するためと考えられる。

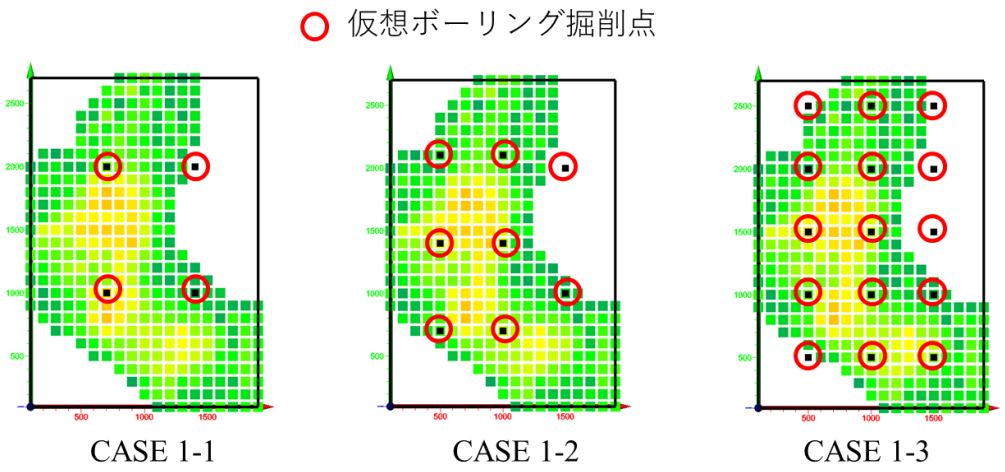


図 3.4 各検証ケースにおける仮想ボーリングの分布

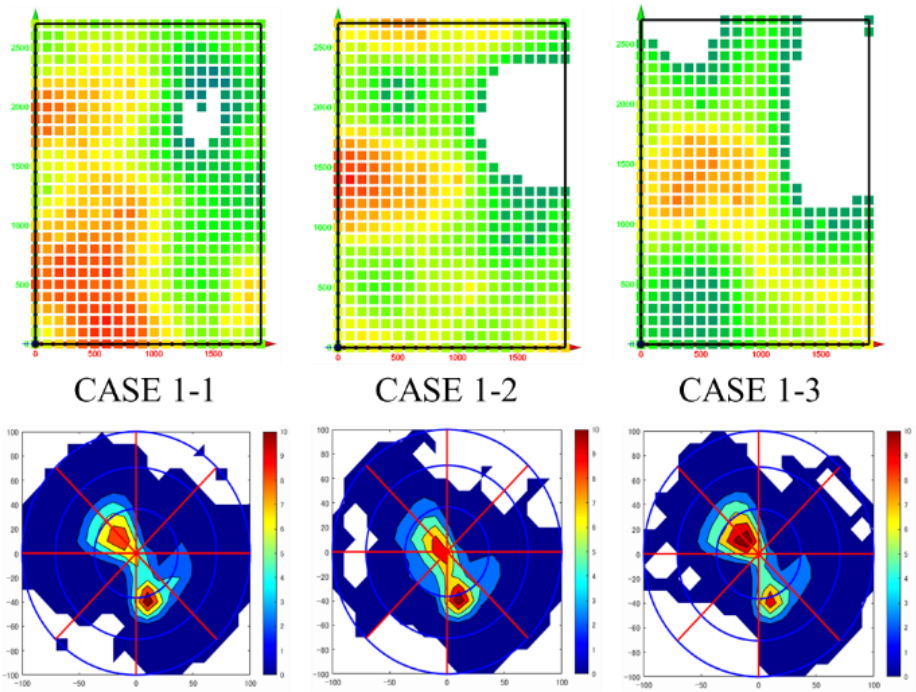


図 3.5 各検証ケースにおいて GEOFRAC から再計算された亀裂密度分布（上）と
シュミットネット下半球投影図による方位分布（下）

検証(2)：亀裂傾斜に関する検証

ボーリング孔を利用した亀裂の観測では，その掘削方向に平行する方向性の亀裂が過小評価になる傾向がある（Terzaghi, 1965; Martel, 1999）。この影響の大きさについて検証するため，図 3.3 の仮想亀裂の傾斜に重みづけを行い，緩い亀裂面が卓越する CASE2-1，急な亀裂面が卓越する CASE2-2 の検証モデルを作成した。仮想ボーリング点数は 8 点で，すべて垂直方向の掘削である。これらに加えて，CASE2-2 のランダムな掘削方向を持つ仮想ボーリング 8 点を設定した CASE2-3 を加え，検証(1)と同様の作業を実施した。各仮想亀裂モデルの亀裂密度分布と仮想ボーリング点の位置，シュミットネット下半球投影による亀裂の極の方位分布を図 3.6 に示す。各ケースの仮想ボーリングから取得された亀裂データで作成した GEOFRAC モデルより，亀裂密度分布と方位分布（シュミットネット下半球投影）を再計算し図 3.7 にまとめる。ボーリングと交差しやすい緩い亀裂面が卓越する CASE2-1 は比較的妥当な結果が得られているが，急な傾斜が卓越する CASE2-2 では元のモデルで卓越していた NE-SW 走向の亀裂の再現性が低くなっている。しかしながら，ボーリング掘削方向に傾斜を持たせた CASE2-3 では，大きく改善されている。以上のことから，亀裂面の方向性とボーリング掘削方向の関係はモデリングの妥当性に大きな影響を与える

こと，それらは傾斜掘削の導入によって改善できることが確かめられた。本研究課題で対象とする瑞浪地域では，比較的傾斜の緩い亀裂の卓越が確かめられており，複数の傾斜孔も存在しているため，GEOFRAC による亀裂モデリングはある程度の妥当性を有していると考えられる。

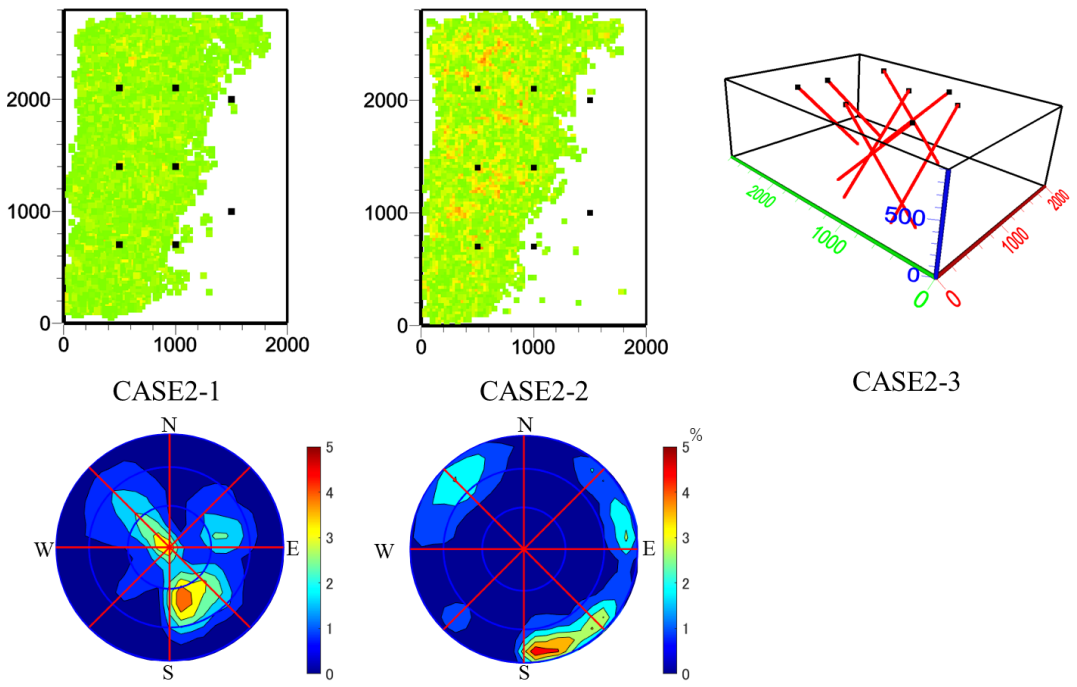


図 3.6 各検証ケースにおける亀裂密度分布と方位分布（シュミットネット下半球投影）

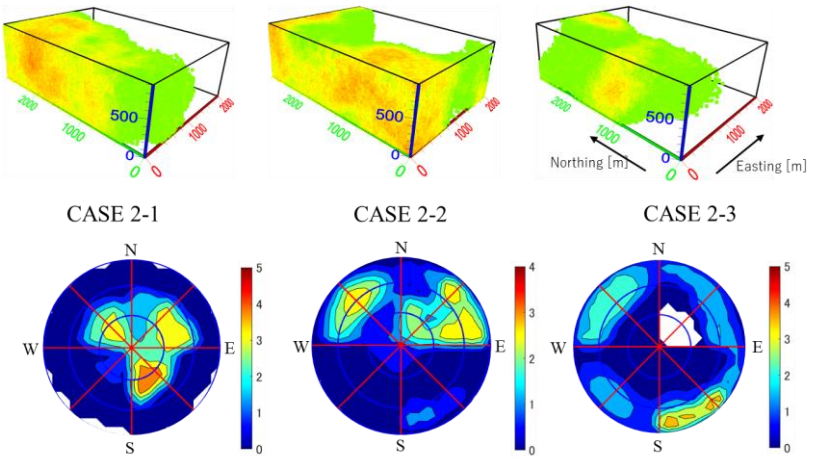


図 3.7 各検証ケースにおいて GEOFRAC から再計算された亀裂密度分布（上）と
シュミットネット下半球投影図による方位分布（下）

3.2.2 プローブ型浸透率測定器の改良

3.2.2.1 プローブ型浸透率測定器の概略

窒素ガス圧入式プローブ型浸透率測定器（以下，パーミアメーター）を使用し，土岐花崗岩試料の透水性の測定を実施した。パーミアメーターは迅速かつ簡便に試料の透水性を求められる利点があるが，特に結晶質岩を対象とした場合には測定値のばらつきや，試料表面の状態によるガスリークなど測定精度についての問題を多く残している。これらの課題を，パーミアメーター本体や測定手法の改良によって解決し，岩相や変質程度の異なる土岐花崗岩試料の計測を行うことで，その透水性の変化を明らかにすることを試みた。

パーミアメーターはプローブを試料に押し付けることで浸透率を測定でき，試料の破壊・整形をする必要がないことが特徴である。これにより，小規模な不均質構造を含む岩石コアの浸透率の変化を把握することに適している（A.P.I.，1998）。本研究で使用した TEMCO 社製窒素ガス圧入式パーミアメーターMP401C は窒素ガスの圧入によって求められるガス浸透率によって透水性の評価を行う。浸透率（permeability）とは多孔質媒体における流体の流れやすさを表す指標である。1 cm^3 の流体が 1 秒に 1 cm^2 の断面積を 1 気圧で 1 cm の長さを通過する状態が 1 ダルシー（darcy）と定義され，これを d と表記する。1 d は透水係数では 10^{-5} m/s または 10^{-12} m^2 に近似される（地盤工学会，1999）。

浸透率を k（m^2）とおくと

$$Q = -A\frac{k}{\mu}\cdot\frac{dp}{dx}$$

$$v = -\frac{k}{\mu}\cdot\frac{dp}{dx}$$

というダルシー則が成り立つ。ここで Q は流量，A は流体が流れる断面積，dp/dx は両端の圧力勾配，μ は流体の粘性度である。ただし，上式は十分な大きさの流路を通過する場合に成り立つものである。岩石中の微小亀裂や空隙のような極小さな流路を対象とした場合には，スリップ効果などの影響が生じるため，ガス浸透率を単純に流体の浸透率に変換することは適切ではない。したがって，以下で浸透率（md，m^2）と表記する場合には，パーミアメーターによる窒素ガスの実測浸透率を意味するものとする。

3.2.2.2 測定システムの改良

Kubo et al. (2019)において，パーミアメーターを使用した土岐花崗岩サンプルの計測を

実施している。上記論文においては，測定時の試料やプローブ先端の変形を懸念し過度の荷重をかけない方針を取っていたが，試料表面形状とプローブ先端のゴムキャップの密着が不十分でガスリークが生じている可能性が考えられた。そこで，同様にプローブ型パーミアメーターを使用した Scibek and Annesley (2021)を参考に，写真 3.1（左）のように測定箇所にエポキシパテによるシーリング加工を行った。さらにリークの有無を確認するため，石鹸水を霧吹きで散布し，接触面からの泡の吹き出しの有無を観察した。この検証の結果，ガスリークを防ぐためにはある程度の荷重が必要であること，ガスリークが無い状態であれば荷重を変化させても測定値に変化がないことが確かめられた。

加えて，パーミアメーターでは 0.1 md 以下の低透水試料の計測が不可能である（表示上 0 d となる）ことが確かめられた。この値は，透水係数では 10^{-9} m/s (10^{-16} m^2)に近似され，極度の変質帯や断層周辺を除く土岐花崗岩試料のほとんどが検出下限値を下回ることとなる。そのため, TEMCO パーミアメーターの圧力センサを WIKA 社製のものへと変更した。センサ変更前後での浸透率測定結果の比較を図 3.8 に示す。特に 10^{-14} ~ 10^{-15} m^2 (10^{-7} ~ 10^{-8} m/s)の範囲では TEMCO センサ・WIKA センサともよく対応している。また，WIKA センサでは TEMCO センサで計測ができていない 10^{-17} m^2 以下の値についても結果が得られている。

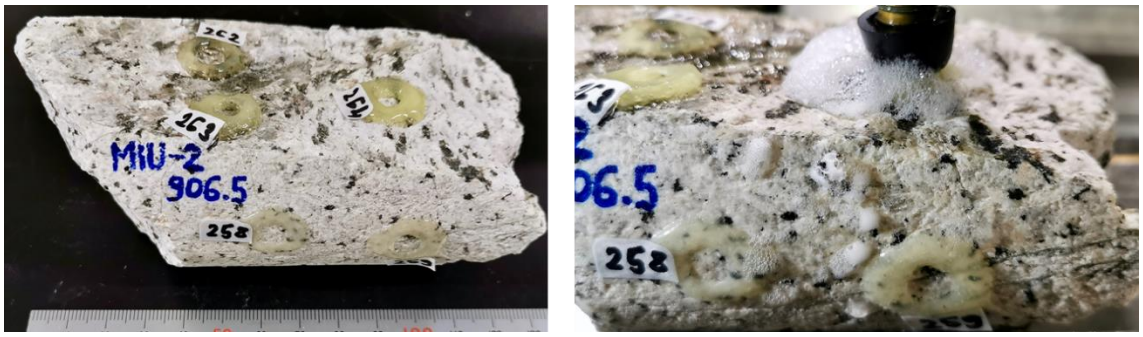


写真 3.1 浸透率測定点のエポキシパテによるシーリング加工（左）

石鹸水を用いたガスリーク確認の様子（右）

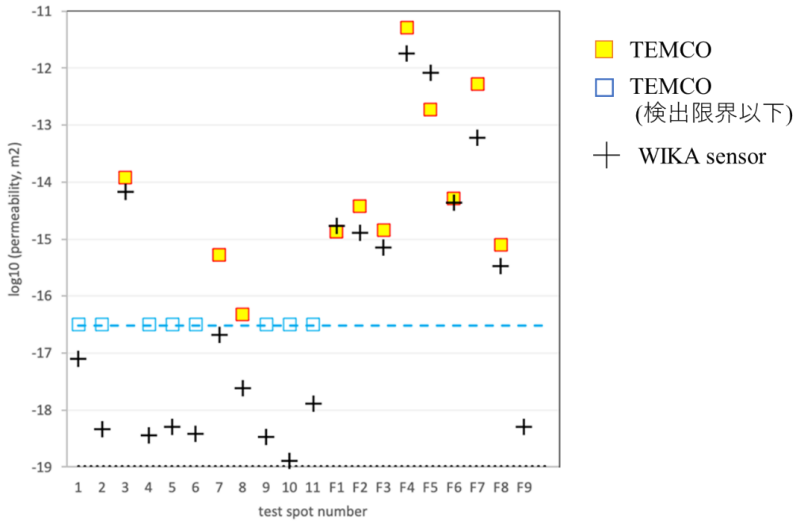


図 3.8 圧力センサ交換前後での浸透率測定結果の比較（MIU-2 深度 127 m サンプル）

3.2.2.3 WIKA センサを使用した土岐花崗岩試料の計測

パーミアメーターによる実測テストとして，JAEA から提供を受けた土岐花崗岩コアを使用した計測を行った。健岩部に加えて，変質帯や断層帯など特徴的なコアを選び，パーミアメーターによって浸透率を，浮力法によって間隙率を求めた。図 3.9 に示すように，コアごとにばらつきはあるが，間隙率と浸透率の間に明瞭な正の相関関係が確認できる。このことから，パーミアメーターによるガス浸透率を直接的に透水係数に変換することはできないが，透水性の大小関係の把握やモデル化に際しての重みづけの検証に用いることは可能であると判断できる。

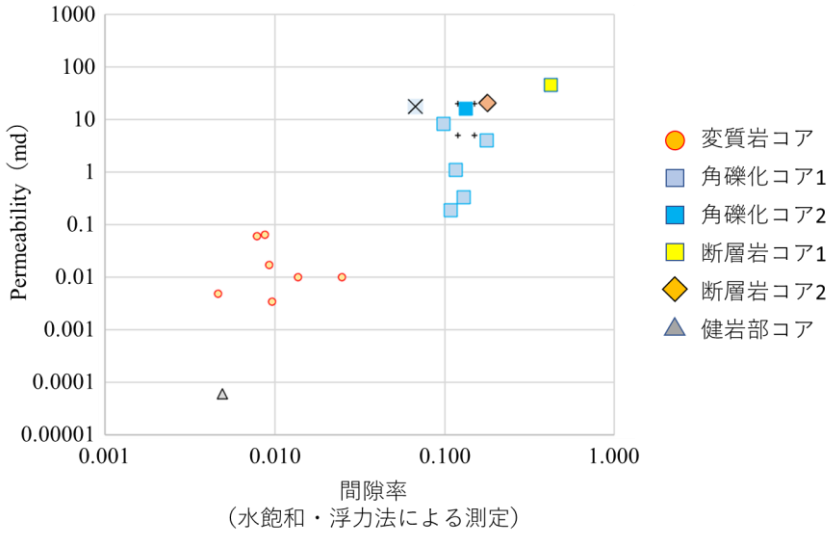


図 3.9 パーミアメーターによる各種土岐花崗岩の浸透率と間隙率の比較

3.2.3 瑞浪地域の水理試験および亀裂データの再整理

3.2.3.1 瑞浪超深地層研究所提供データの統計分析

筆者の公開している瑞浪地域に関連した論文（久保ほか, 2013; Koike et al., 2015; Kubo et al., 2019）に関連して，JAEA より提供されている瑞浪地域における各種測定データの統計的な分析を実施した。

図 3.10 は瑞浪地域で実施された全 19 孔の大深度ボーリング孔で得られている水理試験値（透水係数 m/s）とその試験区間内で観測されている亀裂本数の比較である。亀裂を開口幅有り，無しと分類した場合のどちらにおいても，水理試験値と亀裂本数の間に相関性は見られない。

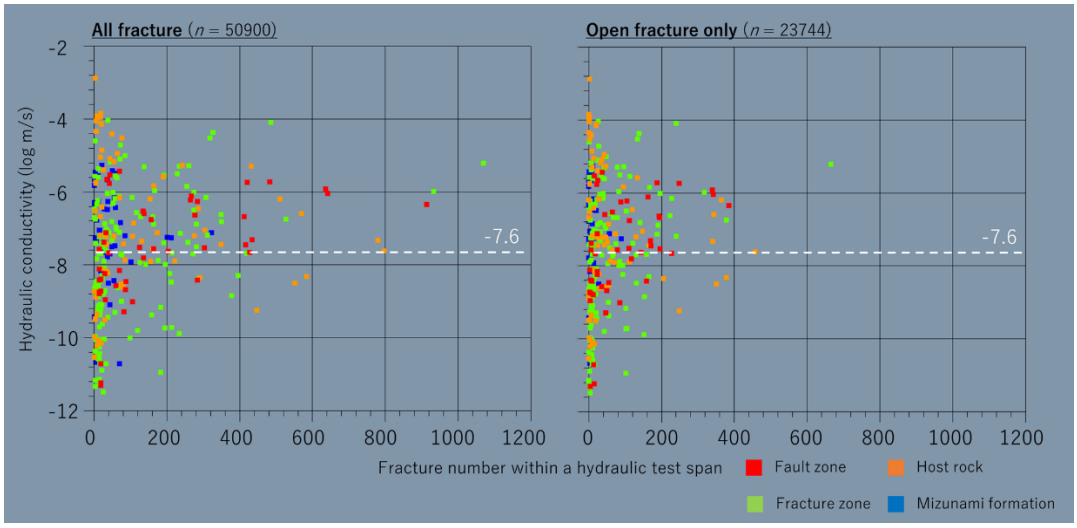


図 3.10 各水理試験区間における亀裂本数と透水係数の比較

しかしながら，水理試験区間長を 20 m 以下に限定した場合には，図 3.11 のように亀裂本数と水理試験値の間に弱い正の相関関係を見ることができる。このことから，土岐花崗岩体の透水性は単純な亀裂本数の大小のみで決定されず，(1)透水性変化への寄与が大きい亀裂の存在，(2)亀裂以外の透水性を変化させる地質構造の存在，が示唆される。(1)については，水理試験区間に対する亀裂の配向性の影響を考えることができる。図 3.12 は，MIU-2 号孔の水理試験値に対し，亀裂を傾斜に基づいて低・中・高角度に分類し，それぞれの本数と比較した結果である。亀裂の掘削方向（＝水理試験での水の流れ）と直交に近い角度で交差する低角度亀裂の本数と水理試験値はほぼ無相関であり，中角度亀裂との間に正の相関関係が見られる。高角度亀裂との相関関係は小さいが，これは高角度亀裂が断層ガウジなど遮水性の充填鉱物を伴う断層部に集中しているためと考えられる。以上のように，

亀裂はその配向性や性状によって岩体の透水性に与える影響が大きく変化することが示唆され，こうした情報は亀裂分布モデルから水理構造モデルを作成する際に考慮すべき重要な要素となる。

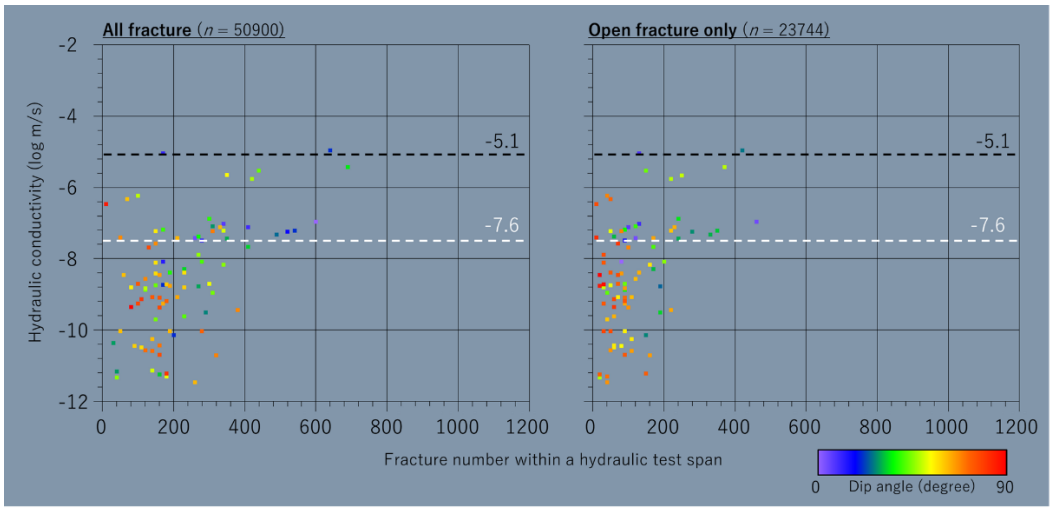


図 3.11 各水理試験区間（区間長 20 m 以下）における亀裂本数と透水係数の比較

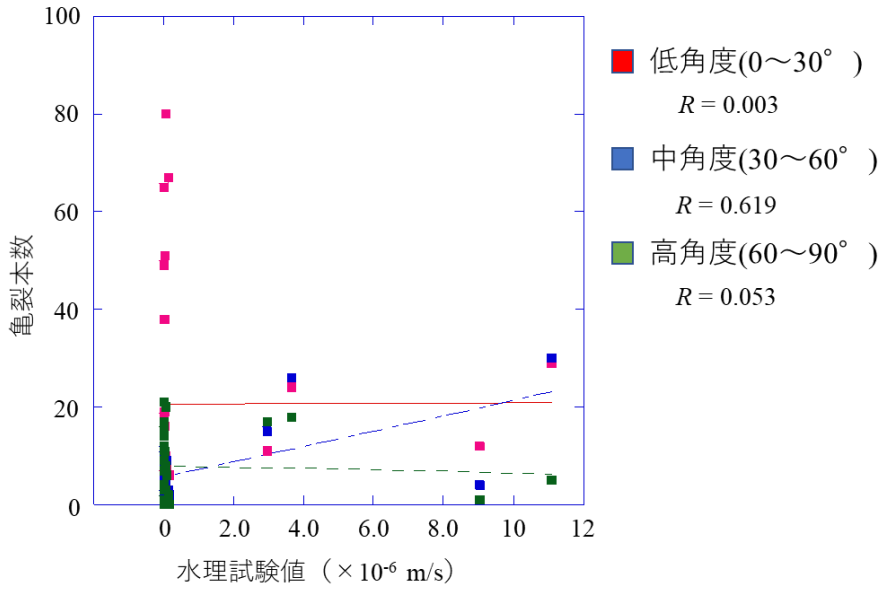


図 3.12 MIU-2 号孔の水理試験値と亀裂本数の比較

亀裂は傾斜によって 3 グループに分類している

また，(2)については岩相や変質の影響を考えることができる。2021 年 12 月に瑞浪超深地層研究所を訪問し，新たに複数のボーリングサンプルの提供を受けた。対象は主に対象地域の主要な断層である月吉断層を貫通する MIU-2，3，4 号孔である。特徴的なサンプル

として，MIU-2 号孔の月吉断層交差部より下層側（深度 980 m 付近）において，写真 3.2 のように複数の晶洞の形成が観察された。岩相自体は数 m のスパンで亀裂の見られない極めてインタクトな花崗岩である。この晶洞が岩体内部で連結性を有しているかについては検証が必要であるが，亀裂以外に大きく透水性を変化させる要因のひとつである可能性は高く，水理構造モデルにおいて岩相や変質程度の情報を取り込むことの有用性を示唆する。

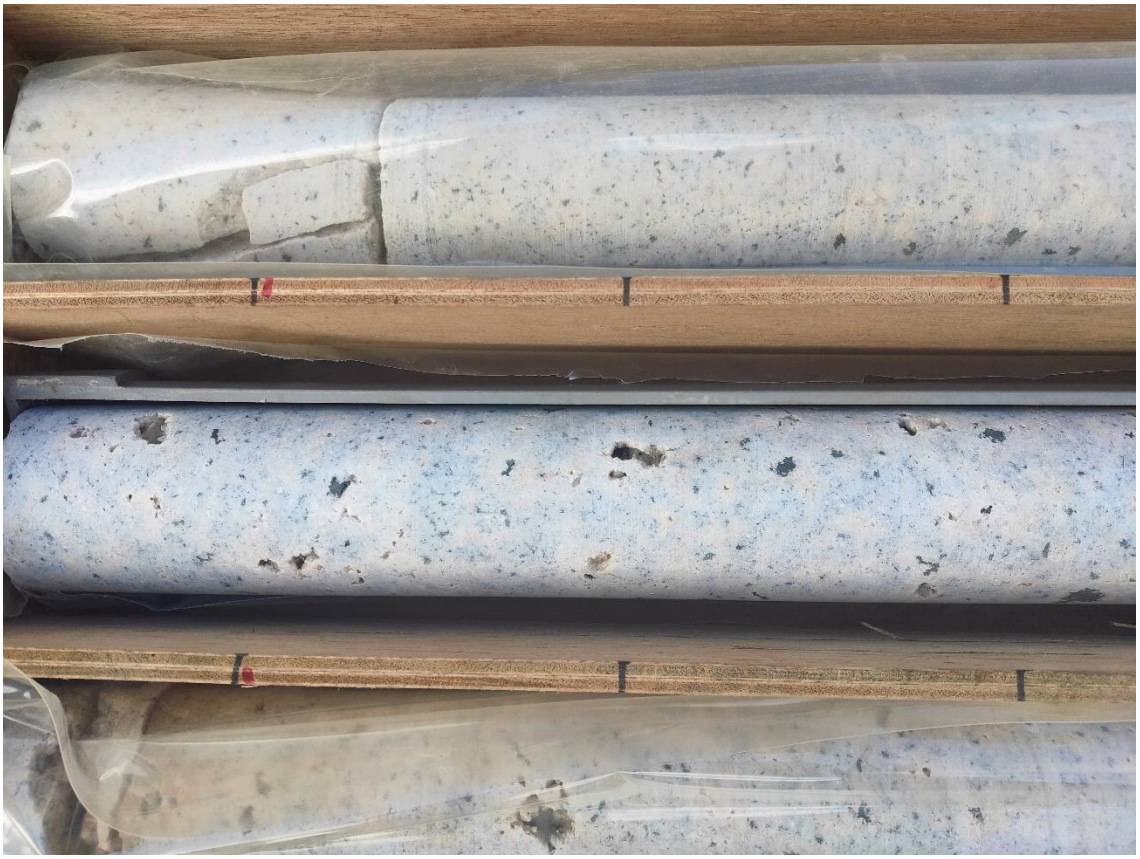


写真 3.2 土岐花崗岩（MIIU-2 号孔深度 980 m 付近）のボーリングコア

複数の晶洞の形成が確認できる。

3.3 残された課題と今後の計画

2021 年度は，研究計画に則り，(1) 亀裂シミュレーション手法『GEOFRAC』の改良，(2) プローブ型浸透率測定器の改良，(3) 瑞浪地域の水理試験および亀裂データの再整理，を実施した。研究計画(1) (2)に関しては，GEOFRAC およびプローブ型浸透率測定器の改良は完了し，その有効性を示すことができた。しかしながら，評価委員会での指摘にあるように詳細な検証についてはまだ課題が残されており，これらについては 2022 年度に実施計画である**「ボーリング試料の各種物性および浸透率計測による岩体基質部の水理特性の検討」**における実際の解析・計測と並行

して進めていく予定である。研究計画(3)については，水理試験と亀裂観測データの統計分析から，亀裂の配向性が透水性に与える影響の存在を示すことができたが，定量的なパラメータ化には至っていない。また，同様にボーリングコアサンプルの観察から岩相・岩種による透水性の影響が示唆された。その影響については，2022 年度のパーミアメーターを用いた浸透率測定によって評価を行う予定である。

最終的な水理構造モデルは，岐阜県東農地域の JAEA 瑞浪超深地層研究所用地を含む N-S : 8 km，E-W : 12 km，深度方向 : 1.5 km の範囲を対象とし，1 グリッドが 50～100 m 四方程度の解像度を予定している。これは，久保ほか（2013）とほぼ同一の領域と解像度であり，既に作成されているグリッドモデルなどを利用するためである。この対象領域で作成された GEOFRAC による亀裂モデルと，地質柱状図に基づく地質構造モデル（岩相・変質の分布）を重ね合わせ，パーミアメーターによる実測やボーリングデータの統計分析によって推定された透水性のパラメータを各グリッドに分配することによって，最終的な水理構造モデルが構築される（図 3.13）。

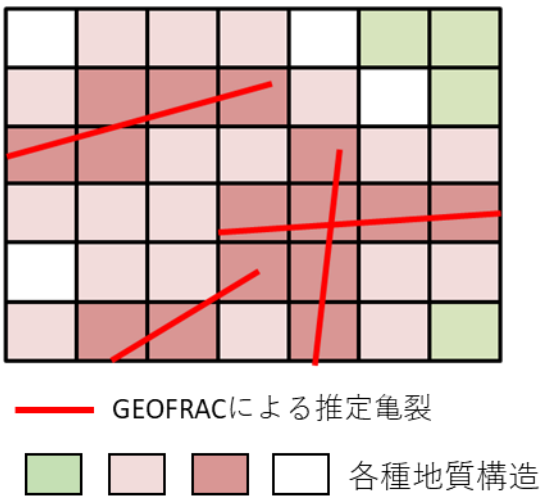


図 3.13 GEOFRAC 亀裂と地質構造モデルの重ね合わせによる最終的なモデルの概念図

4. まとめ

本研究課題は，高レベル放射性廃棄物の地層処分施設の建設計画において重要となる広域地下水流動形態の把握のために，実測と数値解析を組み合わせた新たな水理構造モデル構築の手法を提案することを目的とする。特に難透水性の結晶質岩体を対象として設定し，透水性に最も大きく寄与する亀裂分布の 3 次元分布を基盤とし，これに岩体基質部の情報

を加味することによって，より詳細な連続体モデルとして地下水理構造を表現する。

2021 年度には, 3 次元亀裂モデリング手法である GEOFRAC の改良と妥当性の検証を実施し，亀裂の配向性とボーリング掘削方向による推定精度への影響について明らかにした。また，岩体基質部の透水性測定に使用する目的でプローブ型浸透率測定器の開発を行い，浸透率 10^{-17} m^2 以下の低透水性サンプルの測定まで可能な高精度化を実現した。さらに，最終的な水理構造モデル構築の対象サイトである岐阜県瑞浪地域で実施された大深度ボーリングでの水理試験結果と亀裂観察データの統計分析，およびコアサンプルの観察によって，亀裂の配向性や，岩相や変質程度など亀裂以外の要素が透水性の変化に影響を及ぼすことを明らかにした。

2022 年度は，実際のコアサンプルの測定と 3 次元亀裂モデルの構築を行い，その統合によって最終的な水理構造モデルの構築を行う予定である。両者の統合のために，健岩部・変質部・断層部などの複数のコアサンプルの実測を行い，各領域での透水性の変化をパラメータ化する。さらに水理試験結果と亀裂・岩相の関連性の分析をさらに深化させ，その組み合わせから透水係数の推定を行うことにより，広域的な連続モデルとして表現する。その妥当性および本研究課題で提案した手法の有効性の検証として，地下水流動解析を実施し，実際に観測されている地下水流動形態との比較を実施する予定である。

参考文献

American Petroleum Institute (A.P.I)., 1998. APIRP-40 Recommended practice for core analysis, American Petroleum Institute (API).

石橋正祐紀・笹尾英嗣・濱克宏（2016）: 深部結晶質岩マトリクス部における微小移行経路と元素拡散現象の特徴. *原子力バックエンド研究*. 23, 121-130. https://doi.org/10.3327/jnuce.23.2_121

核燃料開発サイクル機構 (2002): 超深地層研究所 地層科学研究基本計画. *サイクル機構技術資料.* JNC TN7410-2001-018.

小池克明・劉春学・天野健治・栗原新 (2008): 広域的な地質構造・物性分布の空間モデル作成と有効性の検証―東濃地域における亀裂分布を主としたケーススタディ―. *Journal of MMIJ*. 124, 700-709.

Koike, K., Liu, C., Sanga, T., 2012. Incorporation of fracture directions into 3D geostatistical methods for a rock fracture system. *Environmental Earth Sciences*. 66, 1403–1414.

Koike, K., Kubo, T., Liu, C., Masoud, A., Amano, K., Kurihara, A., Matsuoka, T., Lanyon, B., 2015. 3D geostatistical modeling of fracture system in a granitic massif to characterize hydraulic properties and fracture distribution. *Tectonophysics*. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.06.008

久保大樹・小池克明・劉春学・栗原新・松岡稔幸（2013）: 地球統計学的手法による亀裂性花崗岩体の 3 次元透水係数モデリングと広域地下水流動解析への応用. *地学雑誌.* 122, 139-158. https://doi.org/10.5026/jgeography.2012ap02

Kubo, T., Matsuda, N., Kashiwaya, K., Koike, K., Ishibashi, M., Tsuruta, T., Matsuoka, T., Sasao, E., Lanyon, G.W., 2019. Characterizing the permeability of drillhole core samples of Toki granite, Central Japan to identify factors influencing rock-matrix permeability. *Eng. Geol*. 259, 105163. https://doi.org/10.1016/J.ENGGEO.2019.105163

Martel, S.J., 1999. Analysis of Fracture Orientation Data From Boreholes. *Environmental & Engineering Geoscience*. 5, 213-233. https://doi.org/10.2113/gseegeosci.V.2.213

持田裕之・天野健治・鶴田忠彦 (2007): 3D レーザースキャナーの受光強度画像を用いた画像処理による岩相区分の試み―瑞浪超深地層研究所に分布する瑞浪層群での適用事例―. *応用地質.* 48, 126-131.

笹尾英嗣・岩月輝希・天野由記 (2006): 東濃ウラン鉱床でのナチュラルアナログ研究からみ

た古水理地質研究の役割. *資源地質.* 56, 125-132.

Scibek, J. and Annesley, I. R., 2021. Permeability Testing of Drill Core from Basement Rocks in the Fault-Hosted Gryphon U Deposit (Eastern AthabascaBasin, Canada): Insights into Fluid–Rock InteractionsRelated to Deposit Formation and Redistribution. *NRR*. 30, 2909-2956. https://doi.org/10.1007/s11053-021-09811-x

Tachi, Y., Ito, T., Akagi, Y., Satoh, H., Martin, A.J., 2018. Effects of Fine-Scale Surface Alterations on Tracer Retention in a Fractured Crystalline Rock From the Grimsel Test Site. *Water Resources Research.* 54, 9287 - 9305. https://doi.org/10.1029/2018WR023145

Terzaghi, R.D., 1965. Sources of error in joint surveys. *Geotechnique*. 15, 287-304.

地盤工学会: (1999) 地盤工学ハンドブック

研究報告 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

日本原子力研究開発機構　東濃地科学センター

福田　将眞

【 目 次 】

1. 背景・目的 1
2. 全体研究計画（2 ヵ年における全体計画） 3
3. 2021 年度研究実施内容 6
3.1 2021 年度の計画、実施方法 6
3.2 2021 年度の成果内容 9
4. 残された課題と今後の計画 16
5. まとめ 17
6. 謝辞 17

参考文献

2021 年度外部発表

1. 背景・目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分において，10 万年スケールの隆起・侵食の評価は重要課題の一つであり，日本原子力研究開発機構東濃地科学センターでは，熱年代学などに基づく隆起・侵食の調査・評価技術の高度化を進めている．当所で実施可能な熱年代法の一つである(U-Th)/He 法（以降，He 法）は，アパタイトやジルコンと呼ばれる含ウラン鉱物を対象としており，これらは堆積岩や火成岩，変成岩中から広く産出するため，He 法は様々な地質体に対して適用可能であることが特長として挙げられる．また，実用化された熱年代法の中でも閉鎖温度が低い手法（<200℃）に分類されることから（Reiners et al., 2005），高い熱感度を利用して数十万年～千万年スケールでの冷却履歴を推定できるため，温度変化を伴う幅広い地球科学的現象（地殻浅部の隆起・侵食，堆積盆の進化史など）の推定に応用可能である（例えば，Ault et al., 2019）．特に，地層処分においては，処分サイトの隆起・侵食評価だけでなく，深部流体や断層運動による熱イベントの温度・時間情報の推定などへの応用が期待されている．また，ジルコンは他の熱年代法であるフィッション・トラック（FT）法や U-Pb 法の対象鉱物として共通していることから，1 つの岩石試料に対して複数の熱年代法の適用が可能であり，複数の熱年代値に基づき高精度な熱履歴の復元が期待される．したがって，概要調査・精密調査のフェーズにおける，過去数十万年から数百万年における隆起・侵食評価や，地下で発見された断層や熱水脈などの活動性の評価技術として活用できると考えられる．

年代値の正確性は，そのデータから推定される温度―時間履歴や隆起・侵食速度の信頼性にも直結するため，年代分析の高精度化は重要であると考えられる．一方で，He 法には，分析に必須となる年代標準試料が国際的にも未確立であるという問題が存在する．特にジルコン He 法（ZHe 法）の場合，ジルコン FT 法（ZFT 法）における年代標準試料を慣例的に流用しているが，各年代測定法間で要求される試料の条件は異なるため，FT 法の年代標準ジルコンであっても He 法に適しているとは限らない．したがって，He 年代分析に適した年代標準試料の確立は解決すべき課題の一つである．He 法の粒子年代のばらつきの要因は複数存在し，親核種濃度の不均質や包有物（Farley et al., 2011; Danišík et al., 2017），放射線損傷（Shuster et al., 2006; Guenthner et al., 2013），結晶の粒径や形状（Farley, 2000）などの影響が挙げられる．例えば，ZFT 法の年代標準試料である Fish Canyon Tuff ジルコン（Gleadow et al., 2015）であっても，ZHe 年代分析の結果，単一粒子内の親核種

濃度の不均質（200～3500 ppm）が原因で単粒子の年代値がばらつくという研究結果が報告されている（Dobson et al., 2008）．先述のように，ZHe 年代のずれに作用する要因は多様である一方，他の年代測定法には影響がないものが多く，加えて実際に ZHe 年代測定するまで正確な ZHe 年代値が得られるかどうかはもちろん，どのような要因によって年代がばらつくかを把握することは困難である．このように，年代標準試料の適性を事前に判断するのは難しく，ZHe 法のばらつきの要因が複合して年代のずれに作用するため，地質試料の選定と慎重な年代学的解釈が求められる．ただし，複数の年代測定法によって参照年代値が決定されている年代標準試料やその候補となる年代既知の地質試料では，年代標準試料の条件に必要な均質な年代が得られる可能性が高く，参照値となる既往データとの整合性を検証することで適性を評価できると期待される．

本研究では，年代標準試料の候補として期待される複数のジルコン試料に対して，He 年代学的特徴を定量的に解明し，個々の粒子年代のばらつきをもとに年代標準試料としての適性を評価する．本研究では既往研究における複数の年代データに基づき，均質な年代値が決定されている地質試料を選出し，ZHe 年代分析を実施する．ZHe 年代標準試料の候補として，ZFT 法の年代標準試料や国内の地質試料候補の ZHe 年代分析を実施し，定量的に評価・比較することで，各地質試料の適性を評価し，ZHe 年代標準試料の確立を目指す．

2. 全体研究計画（2 ヵ年における全体計画）

本研究では ZHe 年代標準試料の確立を目的に，2 か年の全体計画として以下の 4 項目を実施し，各地質試料についての適正を定量的に評価する．これらの研究項目を実施することにより，複数試料における ZHe 年代の標準試料としての評価が可能なだけでなく，個々の地質試料における単粒子年代のばらつきの要因を追究することに繋がると期待される．

(1) 地質試料の候補の選定

年代標準試料の一般的な要件として，Hurford (2019)に倣うと，年代値が均質で解釈が容易であることや，異質岩片・粒子を含まないこと，地質学的研究が豊富，露頭までのアクセスが容易，対象鉱物が多産であることなど複数の条件を満たす必要性がある．加えて，前述の通り ZHe 法には年代のずれに作用する要因が多いため，ZHe 法独自の要件として，放射線損傷の影響が小さいと期待できる 100 Ma より若い試料であり，粒子内の親核種濃度が均質，包有物が極めて少なく一定の粒径（～200 μm）・自形性を有することを試料選出の追加条件とした．本研究に用いる地質試料の候補として，以下の 6 試料のジルコンを対象として分析を試みる(表 1)．まず, ZFT 法の年代標準試料である Buluk Tuff や Mt. Dromedary を候補とした．これらの年代標準試料は現在に至るまで国際的にも運用されている標準試料であり，参照可能な ZFT 年代値の信頼性は高い．続いて，国内の U-Pb 年代標準試料である OD-3 も分析設備やルーティンの異なる複数の研究機関や大学におけるラウンドロビンテストを終えており，年代的に均質な試料であることが確認されているため，同様の理由で対象とした．国内の ZFT 法の年代標準試料の候補となる地質試料は，角井（1993）にまとめられており，そのうち歌長流紋岩，鷲走ヶ岳月長石流紋岩，濃飛流紋岩などを対象とする．また，角井 (1993) において紹介された仁左平デイサイトについては，福田ほか (2021) による ZHe 年代分析の結果を参照し，これらの分析結果と比較検討を行う．

(2) 採取およびジルコンの抽出

本研究に使用するジルコン試料は研究代表者が所有するものを使用するが，一部は外部から提供されたものを用いる．本研究で用いる年代標準試料の候補となる地質試料の一つとして，歌長流紋岩については野外調査に基づいて岩石試料を採取し，鉱物分離作業によって目的鉱物であるジルコンを抽出する．ジルコンの抽出に係る作業手順の概要は，岩石の粉

砕，洗浄・篩掛け，重液分離，ハンドピックによる精選である．

(3) ZHe 年代分析

He 法は，ウラン含有鉱物であるアパタイトやジルコン中の U や Th 系列の放射性核種がα壊変することを利用した年代測定法である．親核種は ^{238}U や ^{235}U，^{232}Th であり，子孫核種はα粒子である ^{4}He 原子核を測定することで年代を決定できる．これらの親核種が最終生成核種である Pb の安定同位体に到達するまでに，それぞれ 8 回，7 回，6 回のα壊変を起こすことを利用すると，以下の等式が導出できる：

$$[^4He] = 8 \times {}^{238}U(e^{\lambda_{238}t}) + 7 \times {}^{235}U(e^{\lambda_{235}t}) + 6 \times {}^{232}Th(e^{\lambda_{232}t})$$

ここで，^{4}He，^{238}U，^{235}U，^{232}Th は時刻 t における各同位体の個数であり，$\lambda_{238}, \lambda_{235}, \lambda_{232}$ はそれぞれの核種における壊変定数を示す（各壊変定数の値は，順に，1.55125×10^{-10}/yr, 9.8485×10^{-10}/yr, 0.49475×10^{-10}/yr）．したがって，試料中の ^{4}He，^{238}U，^{235}U，^{232}Th の濃度を測定することで一意的に年代 t を決定できる．

分析は以下の手順で実施する．測定に適したジルコン粒子の選別，幾何学的パラメータの測定，金属パケットへの封入，レーザー加熱式の希ガス質量分析計による He 脱ガスおよび測定，高温加圧酸分解容器を利用した硝酸・フッ酸によるジルコンの溶解を行い，誘導結合プラズマ質量分析計（ICP-MS）で U-Th 濃度を測定する．得られた各種同位体の濃度をもとに，粒子ごとの ZHe 年代および試料の加重平均年代を計算する．一連の分析は東濃地科学センターおよび Melbourne 大学で実施する．その後，年代のばらつきや既報年代値との整合性を検討し，幾何学パラメータや放射線損傷（eU= [U]+0.234[Th]: Shuster et al., 2006）濃度などとの相関関係を調べることで，ばらつきの要因の特定を行う．また，分析結果のラボ間比較のため，本研究によって年代標準試料候補として有力と判断されたジルコン試料を配布し，外部の研究機関に協力を依頼してラウンドロビンテストを実施する．

(4) 化学分析

ZHe 単粒子年代のばらつきの要因として，ジルコン粒子内の U-Th 濃度の不均質や包有物の有無が挙げられる．ZHe 年代分析では，湿式法によって同位体測定を行う性質上，分析後にはこれらの情報は失われる．したがって，各ジルコン試料について別途化学分析を実

施することで，試料内の化学的特性の把握を試みる．具体的には，レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析装置（LA-ICP-MS）や電子線マイクロアナライザー（EPMA）を使用し，カソードルミネッセンス（CL）像の取得に基づくジルコンの組織構造や包有物の観察，鉱物粒子内の親核種濃度分布のマッピングなどを実施する．

表 1：本研究に使用するジルコン試料の一覧

試料名	分析予定年度		補足（文献）
	2021 年度	2022 年度	
Buluk tuff	○		ZFT 法年代標準試料（Hurford & Watkins, 1987）
Mt. Dromedary		○	ZFT 法年代標準試料（Green, 1985）
OD-3		○	U-Pb 法年代標準試料（Iwano et al., 2013）
歌長流紋岩	○		ZFT 法年代標準試料候補（角井，1993）
鷲走ヶ岳月長石流紋岩		○	複数の既往年代が報告（例えば，伊藤ほか，2001）
濃飛流紋岩		○	複数の既往年代が報告（例えば，星ほか，2016）

3. 2021 年度研究実施内容

3.1 2021 年度の計画、実施方法

2021 年度には，以下の計画および実施方法の元で研究を実施した.

(1) 歌長流紋岩の地質試料採取，鉱物分離

兵庫県北西部の美方郡新温泉町付近に分布する歌長流紋岩は，照来層群の鮮新世～更新世の流紋岩質凝灰岩～溶岩に相当し，地質学的・年代学的研究が豊富な試料である（例えば，古山・相川，1983；宇都ほか，1994；古山・長尾，2004 など）．特筆すべき点として，国内では数少ない ZHe 年代分析の先行データが得られている試料であり（Tagami et al., 2003)，既往研究の ZFT 年代（宇都ほか，1994）や黒雲母の K-Ar 年代（宇都・石塚，1999)，Ar/Ar 年代値（Uto et al., 1997）とも整合的である．加えて，ZHe 年代値のばらつきも比較的小さいため，本研究で探求する ZHe 年代標準試料として有力な候補であると考えられる．本年度には歌長流紋岩の採取を行い，ZHe 年代分析に供するジルコンを抽出する．既往研究で年代分析が実施されている露頭の位置は研究協力者に情報提供いただく（図 1)．

(2) ZHe 年代分析

候補として選定したジルコン 6 試料のうち，本年度は 2 試料について各 30 粒子を目安に ZHe 年代分析を実施する．一連の分析は Melbourne 大学で行う．初めに，測定に適したジルコン粒子の選別を行う．分析に適切な粒子の条件として，瑕疵や包有物をほとんど含まず，自形かつ一定の粒径(~200 μm)を有した粒子を実体顕微鏡下で選別する．選別した粒子は，顕微鏡に付属したデジタルカメラによって粒子を撮影し，幾何学的パラメータとしてジルコンの長軸方向の長さと粒径に相当する幅を計測用ソフトウェア（ImageJ 等）で測定する．測定が終わった粒子は，Pt パケットへ封入する．パケットへの封入が終わったら，Coherent 製 Quattro FAP（ファイバー結合型 820nm ダイオードレーザー）のサンプルステージに導入し，パケットごと 1300℃で 20 分間レーザー加熱して ^{4}He の脱ガスおよび測定を行う．ジルコン単粒子の ^{4}He 濃度は，^{3}He スパイクを添加した同位体希釈法に基づき，Balzers 製の希ガス四重極質量分析計（Prisma QMS 200）にて測定する．脱ガスが終了したのちにホットブランク測定を行い，粒子内のすべてのガスが完全に抽出されたか確認を行う．He ガスの測定が終了後，親核種である U や Th 濃度を測定するため，高温加圧酸分解容器（Parr

製, model 4748）を利用したフッ酸によるジルコンの完全溶解を行う．Pt パケットから脱ガス後のジルコンを取り出し，テフロン製のマイクロバイアル（0.3～0.5 mL）中に入れた ^{233}U および ^{229}Th スパイクを添加したフッ酸に浸漬させ，240℃で 40 時間加熱する．同様のスパイクを添加した標準溶液もブランク試料として同時に加熱する．次に，ジルコン溶液を蒸発乾固させて得たフッ化塩を，再度高温加圧酸分解容器に入れて 200℃の HCl で 24 時間加熱する．完全に溶液化したら，溶液 ICP-MS（Agilent 7700x）で U-Th の同位体濃度を測定する．得られる U-Th 同位体濃度の分析誤差は 2%以下であり，ZHe 年代データについては 6%程度かそれ以下である．最後に，ZHe 年代の整合性や単粒子年代のばらつきに関して，放射年代学の専門家と議論を行い，年代標準試料としての適性を定量的に評価する．

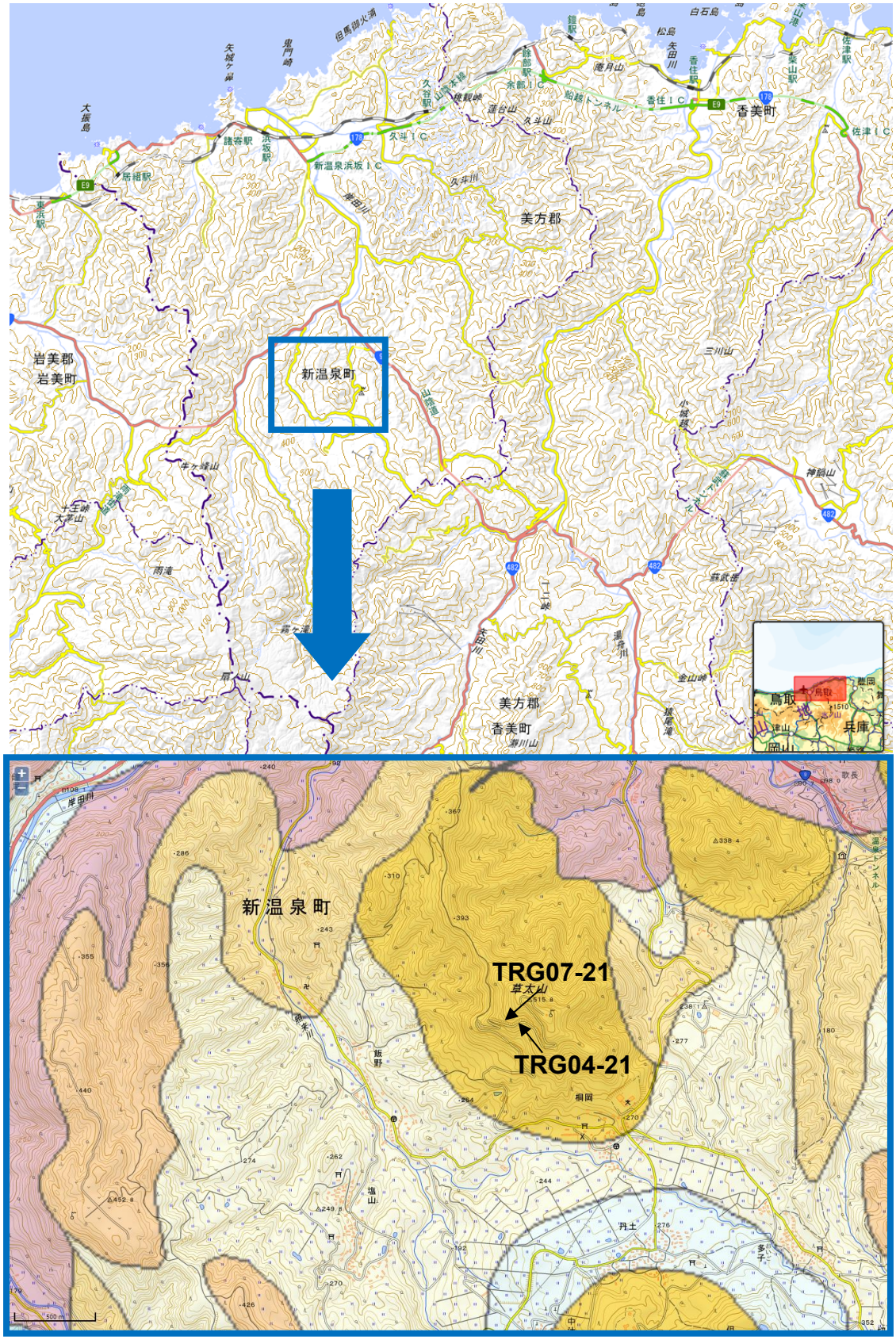


図 1：歌長流紋岩の試料採取位置図（地理院地図およびシームレス地質図）.

3.2 2021 年度の成果内容

(1) 歌長流紋岩の採取・鉱物分離結果

ZHe 年代分析に供する地質試料として，歌長流紋岩の採取を行うため，研究協力者による情報提供および補助のもと野外調査を実施し，先行研究で採取された位置を参照し現地の情報を確認した．その後，研究協力者によって人力で採取された各 3 kg 程度の岩石試料 2 点を受領し（TRG04-21, TRG07-21：図 1，2），本研究の分析に用いた．これらの試料の薄片観察の結果，どちらの試料も斜長石および黒雲母を斑晶に含む流紋岩質凝灰岩であると判断された（図 3）.

次に，ZHe 年代分析に使用するジルコンを抽出するため，株式会社京都フィッション・トラックに鉱物分離を依頼した. 京都フィッション・トラックにおける鉱物分離の詳細な手順としては，まず風化部や植生などによる汚染部を除去し，ハンマーやステンレス乳鉢，ロッドミル等で適当な大きさの粉末になるまで粉砕する. 粉砕した試料粉末を水洗し，乾燥させた状態で<＃60 以下の篩を通し，通過した細粒側の粉末を腕かけによって再度水洗する. 乾燥したら，永久磁石（NEOMAX）を近づけて常磁性・強磁性鉱物を除去する．磁性鉱物を除いたフラクションに対して，比重の異なる 2 種類の重液を使って重い鉱物のみを濃集させる．まず，比重の調製が可能で安全なポリタングステン酸ナトリウム溶液（SPT 溶液 : 檀原ほか，1992，比重 3.06 g/cm^3 に調製）を使い，鉱物フラクションを軽鉱物と重鉱物に分離する．次に，重鉱物のフラクションに対してジヨードメタン（比重 3.33 g/cm^3）を使い，比重の近いアパタイト（比重 3.16~3.22 g/cm^3）と今回の目的鉱物のジルコン（比重 4.6~4.7 g/cm^3）を分離し，抽出する．その後，ハンドピックによってゴミの除去や自形粒子の精選を行い，蒸留水で洗浄したのちに乾燥させる．本研究での試料の処理量は各 1.0 kg とし，結果としてそれぞれ 1 万粒程度のジルコンを得た．得られたジルコン試料は分析に利用するには十分量あり，粒径も適当かつ自形であった（図 4）.

(2) ZHe 年代分析結果と年代学的解釈

本年度は，歌長流紋岩（TRG04-21，TRG07-21）および Buluk tuff の 2 試料について，ZHe 年代分析の結果を報告する（表 2）．はじめに年代標準試料の測定結果として，Fish Canyon Tuff の ZHe 年代は 28.2±4.8 Ma であり（以降，誤差範囲はすべて 95%信頼区間），既報年代値（28.5±0.4 Ma: Gleadow et al., 2015）と整合的な結果であることから，今回の未知試料の年代値の信頼性は保証された．本研究の ZHe 年代測定結果として，

TRG04-21 で 2.42±0.13 Ma, TRG07-21 で 2.77±0.20 Ma，Buluk tuff で 17.7±1.74 Ma の年代値を得た（表 2，図 5）．すべての試料について，単粒子年代と eU には明瞭な相関関係は見られなかった（$R^2 < 0.4$）．単粒子年代の分布に着目すると，TRG04-21 については，1.9～3.7 Ma の範囲で比較的集中しており，データのばらつきの指標となる MSWD（Mean Square of Weighted Deviates）値も 5.47 と比較的妥当である（MSWD 値が 1 からオーダーが変わるほど大幅に超えるとデータがばらついていると評価される）．これに対し，TRG07-21 および Buluk tuff については，年代の分布範囲は，2.0～5.0 Ma および 10～40 Ma と比較的広く，MSDW 値はそれぞれ，13.6，20.2 とばらつきも大きい．加えて，福田ほか（2021）において報告されている仁左平デイサイトの ZHe 年代分析の結果は，21.5±0.3 Ma (n=79/81)（MSWD: 10.4）であり，単粒子年代の範囲も 15～40 Ma と比較的幅広い．したがって，本研究の結果から TRG04-21 のみが比較的年代が集中し，その他の試料については年代がばらついていると判断された．

次に，本研究における ZHe 年代測定結果と先行研究における ZHe 年代値を比較する．Tagami et al. (2003) では，TRG04-21 については同一地点で測定例があり，その ZHe 年代は 2.61±0.35 Ma (n=8/8)（原文中では 1σ 表記だったため，95%信頼区間に再計算）と報告され，誤差範囲を考慮すると本研究と整合的である．同様に，年代標準試料である Buluk tuff については，16.1±1.6 Ma (n=11/11) と報告されており，本研究の結果と矛盾はない．TRG07-21 については，同一試料についての ZHe 年代の報告例はないが，近接する地点（～50 m 程度）である TRG04(-21) の既報 ZHe 年代値とは整合的である．一方で，本研究における TRG04-21 のデータとは誤差範囲を考慮しても重複しない．薄片やジルコン粒子の観察からも目立った差異は見られず，露頭位置の間隔が近いにも関わらず TRG07-21 でのみ年代のばらつきが大きい理由は不明である．

以上の観察事実をまとめると，TRG04-21 については年代標準試料としての適性が認められる一方で，TRG07-21 や Buluk tuff，仁左平デイサイトについては年代のばらつきにより適性が低いという結果となった．仁左平デイサイトについては，親核種濃度の不均質や，異質岩片の混入が主要な要因として示唆されている（福田ほか，2021）が，他の試料の年代のばらつきの要因の究明は今後の課題である．

図 2：歌長流紋岩の露頭写真（上：TRG04-21，下：TRG07-21）.

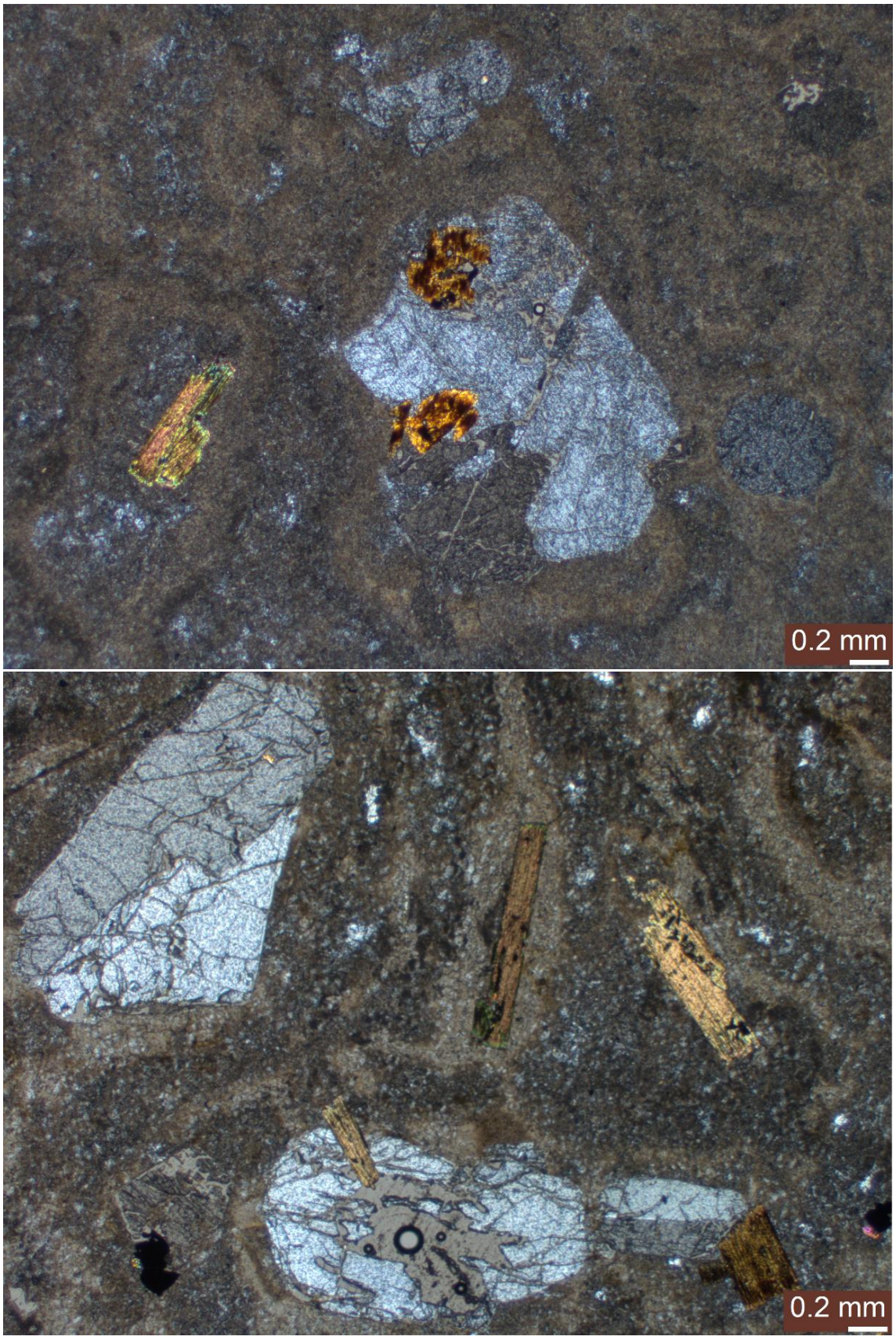


図 3：薄片写真（上：TRG04-21，下：TRG07-21）.

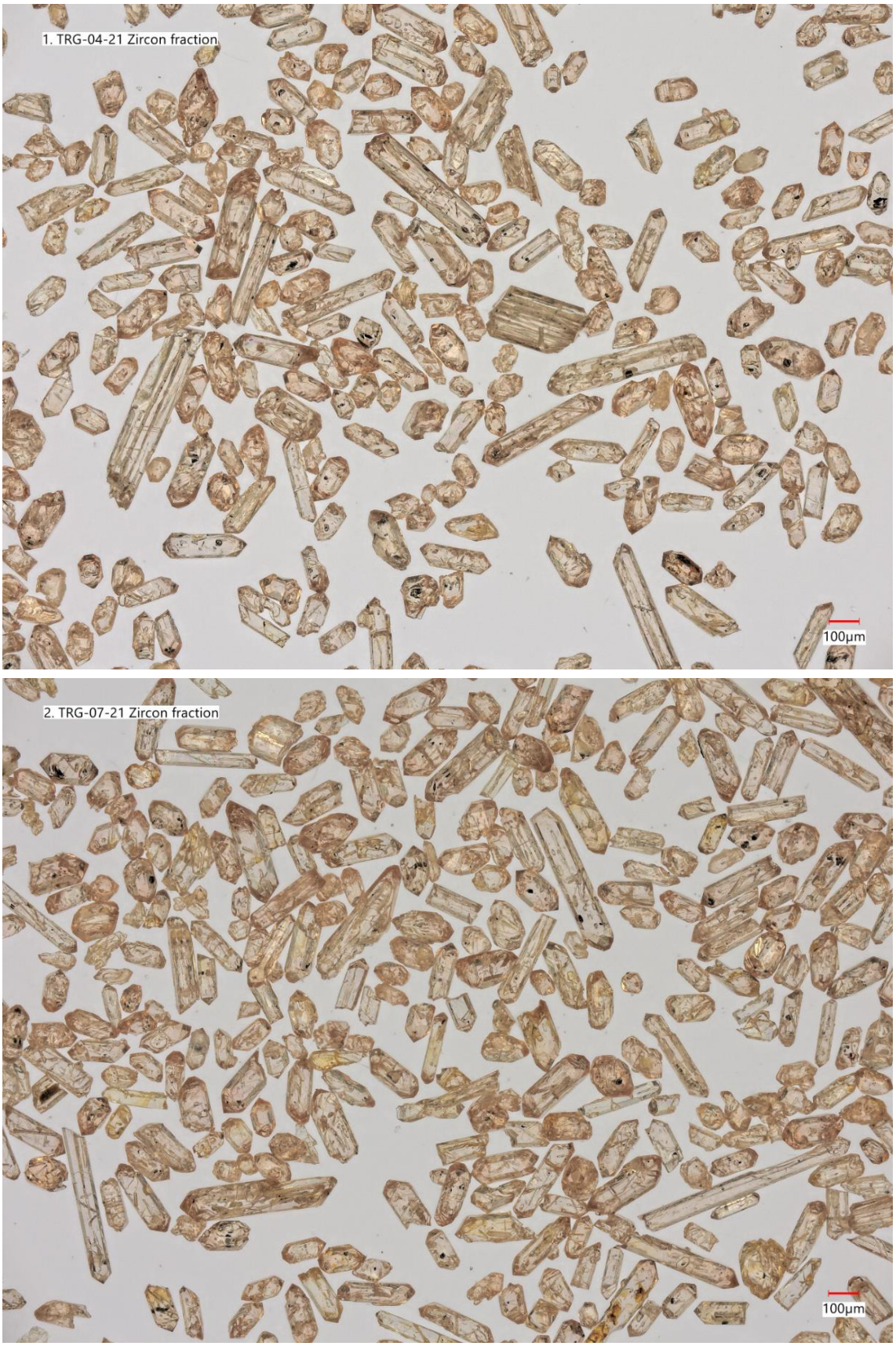


図 4：抽出処理後のジルコン試料（上：TRG04-21，下：TRG07-21）.

表 2：ZHe 年代測定結果のまとめ

試料名	分析粒子数	ZHe 年代±95％信頼区間（Ma）	MSWD 値	単粒子年代の分布幅（Ma）
未知試料				
TRG04-21	32/33	2.42±0.13	5.47	1.9～3.7
TRG07-21	42/42	2.77±0.20	13.6	2.0～5.0
Buluk tuff	36/37	17.7±1.74	20.2	10～40
年代標準試料				
Fish Canyon Tuff	4/4	28.2±4.8		

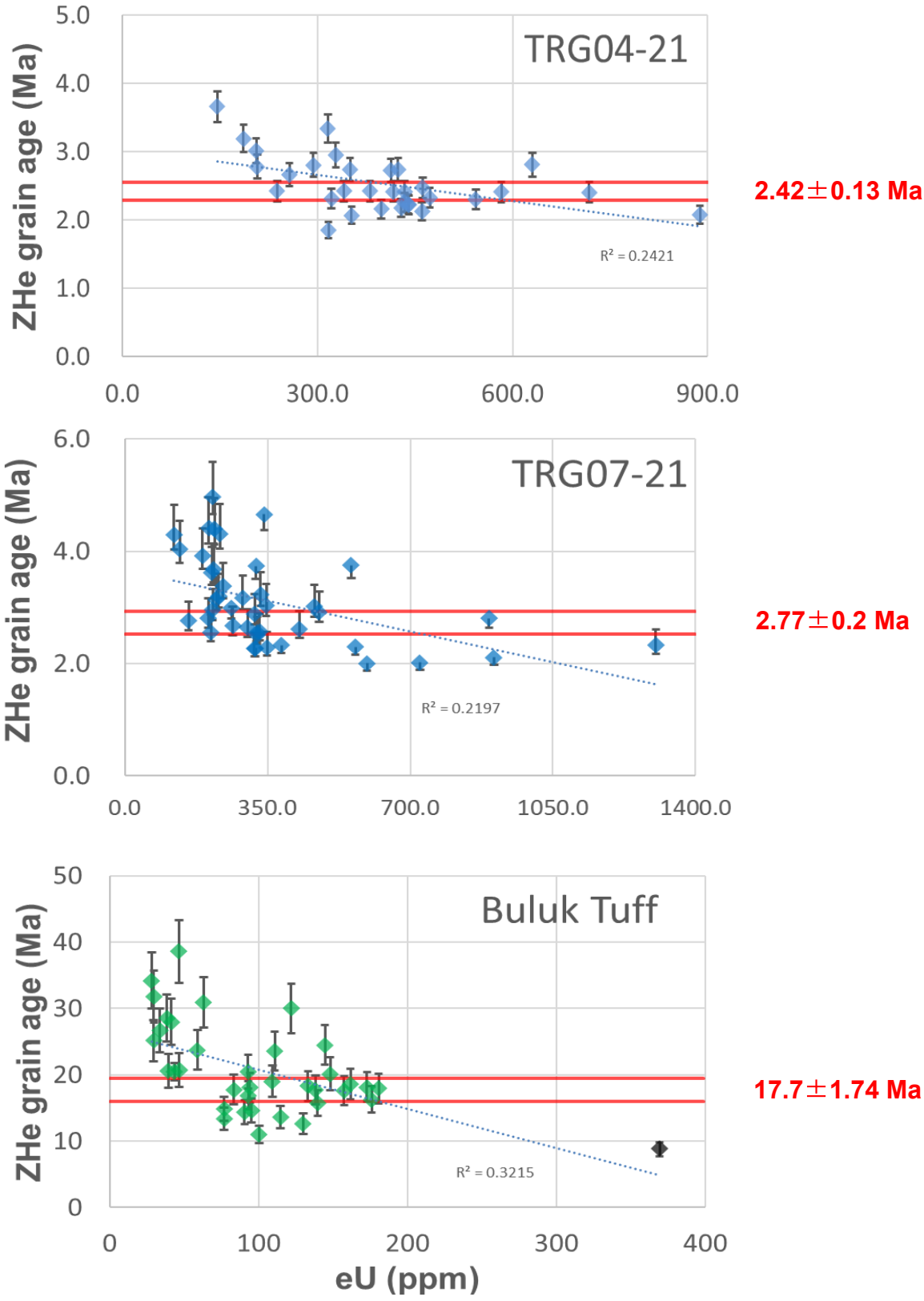


図 5：TRG04-21，TRG07-21 および Buluk tuff における ZHe 単粒子年代と eU のプロット．中央の赤線は加重平均年代値の範囲を示す．単粒子年代の誤差範囲は 2σ.

4. 残された課題と今後の計画

今後の課題および 2022 年度の研究実施計画は，以下の通りである．

(1) ZHe 年代分析の継続

2021 年度は選定した 6 試料中 2 試料の ZHe 年代分析が完了した．2022 年度には残り 4 試料（Mt Dromedary，OD-3，鷲走ヶ岳月長石流紋岩，濃飛流紋岩,）についての ZHe 年代分析を実施予定である．すべての ZHe 年代分析が完了した時点で，どのジルコン試料が年代標準試料として適切であるか比較・検討し，定量的に評価する．

(2) 歌長流紋岩のラウンドロビンテストおよび追加試料採取

ZHe 年代標準試料の候補として，現時点では歌長流紋岩（TRG04-21）の適性が高く評価された．本試料について，国内外の研究機関での年代分析結果と比較するため，まずは東濃地科学センターにおいても同様の分析を実施予定である．加えて，国外の研究機関にも送付し，分析条件の異なるラボ間での年代の均質性を評価する．ただし，現在の残量では，ラウンドロビンテストに堪えるだけの数量が確保できていないため，2022 年度には，同一露頭で 100 kg 程度の岩石の再サンプリングを実施し，十分量のジルコン試料を確保する予定である．

⑶ ZHe 年代のばらつきの要因の究明

ZHe 年代のばらつきに作用している要因を検討するため，LA-ICP-MS や EPMA を使用した鉱物内部の組織観察および鉱物粒子内の親核種濃度分布のマッピングなどの化学分析を実施予定である．今回の結果からは，放射線損傷と年代との相関は見られなかったため，それ以外の要因について検討する必要性があると考えられる．併せて，U-Pb 年代測定を実施し，岩石・鉱物の形成年代を制約するとともに，ZHe 年代までの冷却履歴についての情報を得る．

5. まとめ

隆起・侵食の評価技術の高度化のため，本研究では ZHe 法における年代標準試料の確立を目的とした年代分析を実施している．候補として選定した 7 つの地質試料のうち，2021 年度には歌長流紋岩（TRG04-21, TRG07-21），Buluk tuff，および先行研究で実施された仁左平デイサイトの 3 試料の ZHe 年代分析が完了している．結果として，TRG04-21 は ZHe 年代のばらつきが小さく，既往研究の年代データと整合的であることから標準試料としての潜在性が認められた一方で，TRG07-21 と Buluk tuff，仁左平デイサイトでは広い ZHe 単粒子年代のばらつきにより，年代標準試料としての適性は低いという結果が得られた．

2022 年度は，残り 4 つの候補試料（鷲走ヶ岳月長石流紋岩，濃飛流紋岩，Mt. Dromedary，OD-3）についての ZHe 年代分析を継続し，それぞれのジルコン試料について標準試料としての適性を定量的に比較する．また，年代のばらつきの原因の究明を行うため，LA-ICP-MS および EPMA などを利用したジルコンの鉱物組織の観察や化学分析，U-Pb 年代測定による岩石の形成年代を推定する予定である．

6. 謝辞

京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻の田上高広教授には，本研究で用いた年代測定用の鉱物試料の提供，歌長流紋岩の採取に係る現地情報の共有および岩石試料をご提供いただいた．株式会社京都フィッション・トラックには，本事業で使用する鉱物試料の提供，および歌長流紋岩の鉱物分離を実施していただいた．Melbourne 大学の Barry Kohn 教授には，本研究における一連の ZHe 年代分析を実施していただいた．

参考文献

Ault, A. K., Gautheron, C., King, E.G. (2019): Innovations in (U–Th)/He, fission track, and trapped charge thermochronometry with applications to earthquakes, weathering, surface-mantle connections, and the growth and decay of mountains. Tectonics, 38(11), 3705-3739.

檀原 徹, 岩野英樹, 糟谷正雄, 山下 透, 角井朝昭 (1992): 無毒な重液 SPT（ポリタングステン酸 ナトリウム）とその利用, 地質ニュース, 455,31-36.

Danišík, M., McInnes, B. I., Kirkland, C. L., McDonald, B. J., Evans, N. J., Becker, T. (2017): Seeing is believing: Visualization of He distribution in zircon and implications for thermal history reconstruction on single crystals. Science advances, 3(2), e1601121.

Dobson, K. J., Stuart, F. M., Dempster, T. J. (2008): U and Th zonation in Fish Canyon Tuff zircons: Implications for a zircon (U–Th)/He standard. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72(19), 4745-4755.

Farley, K. A. (2000): Helium diffusion from apatite: General behavior as illustrated by Durango fluorapatite. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105(B2), 2903-2914.

Farley, K. A., Shuster, D. L., Ketcham, R. A. (2011): U and Th zonation in apatite observed by laser ablation ICPMS, and implications for the (U–Th)/He system. Geochimica et Cosmochimica Acta, 75(16), 4515-4530.

福田将眞，末岡 茂，菅野瑞穂，Barry P. Kohn，田上高広 (2021):ジルコン(U-Th)/He 法の年代標準試料の探求：仁左平デイサイトにおける年代学的検討，フィッション・トラックニュースレター第34号, 9-13.

古山勝彦, 相川信之 (1983): 兵庫県北西部の鮮新世歌長流紋岩類. 岩石鉱物鉱床学会誌, 78(8), 295-305.

古山勝彦, 長尾敬介(2004): 照来コールドロンの K-Ar 年代. 火山 49(4), 181-187.

Gleadow, A., Harrison, M., Kohn, B., Lugo-Zazueta, R., Phillips, D., (2015): The Fish Canyon Tuff: A new look at an old low-temperature thermochronology standard. Earth and Planetary Science Letters, 424, 95-108.

Guenthner, W. R., Reiners, P. W., Ketcham, R. A., Nasdala, L., Giester, G. (2013): Helium diffusion in natural zircon: Radiation damage, anisotropy, and the interpretation of zircon (U–Th)/He thermochronology. American Journal of Science, 313(3), 145-198.

Green, P. F. (1985): Comparison of zeta calibration baselines for fission-track dating of apatite, zircon and sphene. Chemical Geology: Isotope Geoscience section, 58(1-2), 1-22.

星 博幸, 岩野英樹, 檀原 徹, 酒向和希 (2016): 濃飛流紋岩のジルコンU-Pb年代: 約70 Maの急速形成, 日本地質学会学術大会講演要旨, 第123年学術大会（東京・桜上水）.

Hurford, A. J., Watkins, R. T. (1987): Fission-track age of the tuffs of the Buluk Member, Bakate Formation, Northern Kenya: a suitable fission-track age standard. Chemical Geology: Isotope Geoscience section, 66(3-4), 209-216.

Hurford, A. J. (2019): An historical perspective on fission-track thermochronology. in Malusà M. G, Fitzgerald, P. G. (eds): Fission-Track Thermochronology and its application to geology, 3-23.

伊藤康人, 土志田正二, 北田数也, 檀原 徹 (2001): 石川県に分布する鷲走ヶ岳月長石流紋岩質溶結凝灰岩の古地磁気とフィッション・トラック年代, 地質調査研究報告, 第52巻, 第12/12号, 573-579.

Iwano, H., Orihashi, Y., Hirata, T., Ogasawara, M., Danhara, T., Horie, K., Hasebe, N., Sueoka, S., Tamura, A., Hayasaka, Y., Katsube, A., Ito, H., Tani, K., Kimura, J., Chang, Q., Kouchi, Y., Haruta, Y., Yamamoto, K. (2013): An inter-laboratory evaluation of OD-3 zircon for use as a secondary U–Pb dating standard. Island Arc, 22(3), 382-394.

Reiners, P. W., Todd A. E., Peter K. Z. (2005): Past, present, and future of thermochronology. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 58(1), 1-18.

Shuster, D. L., Flowers, R. M., Farley, K. A. (2006): The influence of natural radiation damage on helium diffusion kinetics in apatite. Earth and Planetary Science Letters, 249(3-4), 148-161.

角井朝昭 (1993): 年代標準試料設定プロジェクトについて. フィッション・トラックニュースレター第6号, 66-67.

Tagami, T., Farley, K.A., Stockli, D.F. (2003): (U–Th)/He geochronology of single zircon grains of known Tertiary eruption age. Earth and Planetary Science Letters, 207(1-4), 57-67.

宇都浩三, 田上高広, 内海茂 (1994): 山陰地方東部, 鮮新統照来層群火山岩類の K-Ar およびフィッショントラック年代. 地質学雑誌, 100(10), 787-798.

宇都浩三, 石塚治(1999): K-Ar, 40Ar/39Ar 法による第三紀火山岩の年代測定の現状と将来. 石油技術協会誌, 64(1), 63-71.

Uto Kozo, Ishizuka Osamu, Matsumoto Akikazu, Kamioka Hikari, Togashi Shigeko (1997): Laser-heating $^{40}Ar/^{30}Ar$ dating system of the Geological Survey of Japan: System outline and preliminary results. Bull. Geol. Surv. Japan, 48, 23-46.

2021 年度　外部発表

【学術論文】

該当なし.

【口頭発表】

Shoma Fukuda, Kohn Barry. P, Shigeru Sueoka, Saya Kagami, Yuya Kajita, Saki Minami, Akira Okamoto, Takahiro Tagami (2021): Evaluation of zircon from the Pliocene Utaosa rhyolite Japan as reference material for (U-Th)/He thermochronometry 17th International Conference on Thermochronology (Thermo2021).

福田 将眞, Barry Kohn, 末岡 茂, 檀原 徹, 岩野 英樹, 田上 高広 (2022): ジルコン(U-Th)/He法の年代標準試料の探求（続報）: 複数のジルコン試料における年代学的検討, ESR応用計測研究会・ルミネッセンス年代測定研究会・フィッション・トラック研究会2021年度合同研究会.

福田 将眞, 鏡味 沙耶 (2022): (U-Th)/He法における高温加圧酸分解容器 を用いたジルコンの完全溶解の試み, ESR応用計測研究会・ルミネッセンス年代測定研究会・フィッション・トラック研究会2021年度合同研究会.

長田 充弘, 福田 将眞, 末岡 茂, 中嶋 徹, 梶田 侑弥, 南 沙樹, 岡本 晃, 田上 高広 (2022): 照来層群歌長流紋岩から得られたジルコンU-Pb年代, ESR応用計測研究会・ルミネッセンス年代測定研究会・フィッション・トラック研究会2021年度合同研究会.

別添資料 2

（人材育成プログラム関連資料）

別添資料 2-1　地層処分に関するリテラシー育成教材のページ構成案
別添資料 2-2　地層処分に関するリテラシー育成教材の紙面デザイン案　その 1
別添資料 2-3　地層処分に関するリテラシー育成教材の紙面デザイン案　その 2
別添資料 2-4　地層処分に関するリテラシー育成教材の紙面デザイン案　その 3
別添資料 2-5　地層処分に関するリテラシー育成教材の紙面 A5 サイズ試作ページ
別添資料 2-6　地層処分に関するリテラシー育成教材の紙面 B5 サイズ試作ページ
別添資料 2-7　地層処分に関するリテラシー育成教材の紙面 A4 サイズ試作ページ
別添資料 2-8　地層処分に関するリテラシー育成教材の紙面 B5 デザイン案　その 1
別添資料 2-9　地層処分に関するリテラシー育成教材の紙面 B5 デザイン案　その 2
別添資料 2-10　地層処分に関するリテラシー育成教材の紙面 B5 デザイン案　その 3
別添資料 2-11　地層処分に関するリテラシー育成教材の章扉デザイン案
別添資料 2-12　地層処分に関するリテラシー育成教材のテストページデザイン案　その 1
別添資料 2-13　地層処分に関するリテラシー育成教材のテストページデザイン案　その 2
別添資料 2-14　地層処分に関するリテラシー育成教材のコラムページデザイン案　その 1
別添資料 2-15　地層処分に関するリテラシー育成教材のコラムページデザイン案　その 2
別添資料 2-16　地層処分に関するリテラシー育成教材の表紙デザイン案
別添資料 2-17　2021 人材育成プログラムモニターアンケート

地層処分に関するリテラシー育成教材のページ構成案

	通しノンブル	ページ数		内容等
	表紙１			
	表紙２			
1	1	1	はじめに	
	2	2	本書の使い方	
	3			
	4	1	目次	
	5	1	1.わが国における放射性廃棄物の特徴（扉）	
	6	2	1.1	核燃料サイクルと放射性廃棄物
	7			
	8	2	1 2	放射性廃棄物の発生源と分類
	9			
	10	2	1.3	放射性廃棄物管理と実施主体
	11			
	12	2	1.4	放射性廃棄物の種類別発生量
	13			
	14	2	1.5	地層処分の対象となる放射性廃棄物
	15			
	16	4	確認テスト	＜問題＞
2	17			
	18			＜解答解説＞
	19			
	20	3	コラム・読み物	
	21			
	22			
	23	1	2　わが国における放射性廃棄物の処分形態（扉）	
	24	2	2.1	廃棄物の濃度区分と処分形態
	25			
	26	2	2 2	わが国での放射性廃棄物処分と関連施設
	27			
	28	2	2.3	浅地中トレンチ処分：L3
	29			
	30	2	2.4	浅地中ピット処分：L2
	31			
	32	2	2.5	中深度処分：L1
3	33			
	34	2	2.6	地層処分：HLW、TRU
	35			
	36	4	確認テスト	＜問題＞
	37			
	38			＜解答・解説＞
	39			
	40	3	コラム・読み物	
	41			
	42			
	43	1	3　高レベル放射性廃棄物対策：地層処分の選択（扉）	
	44	2	3.1	地層処分選択の歴史的背景
	45			
	46	2	3 2	放射能の減衰特性が示唆すること
	47			
	48	2	3.3	倫理的側面と地層処分の選択
4	49			
	50	2	3.4	高レベル放射性廃棄物対策の種類
	51			
	52	2	3.5	高レベル放射性廃棄物処分方法の選択肢
	53			
	54	2	3.6	処分オプションの検討事例と比較評価
	55			

	56	2	3.7	わが国における地層処分選択の経緯
	57			
	58	2	3.8	世界とわが国の地層処分に係る歴史
	59			
	60	4	確認テスト	＜問題＞
	61			
	62			＜解答・解説＞
	63			
	64	3	コラム・読み物	
5	65			
	66			
	67	1	4　地層処分の安全朦剛と規綱・規準類（扉）	
	68	2	4.1	IAEA：地層処分に着目した基本指針 (1981)
	69			
	70	2	4 2	IAEA: 地層処分の安全原則と技術規準 (1989)
	71			
	72	2	4.3	IAEA: 放射性廃棄物マネジメントの原則 (1995)
	73			
	74	2	4.4	IAEA: 基本的安全原則 (2006)
	75			
	76	2	4.5	IAEA: 放射性廃棄物処分に係る安全要件 (2012)
	77			
	78	2	4.6	ICRP ：放射性廃棄物の処分に関連する勧告
	79			
	80	2	4.7	わ妍国の地層処分の安全規制（その1)（その2)
6	81			
	82	4	確認テスト	＜問題＞
	83			
	84			＜解答・解説＞
	85			
	86	3	コラム・読み物	
	87			
	88			
	89	1	5　地層処分の安全確保方策と評価（扉）	
	90	2	5.1	地層処分の安全確保の原則：隔離と閉じ込め
	91			
	92	2	5 2	わが国における多重バリアシステムの概念
	93			
	94	2	5.3	安全確保方策の確認：安全評価手法の導入
	95			
	96	2	5.4	安全評低シナリオ設定とリスク論的アプローチ
7	97			
	98	2	5.5	最新の安全評低の流れ：NUMO包括的技術報告書
	99			
	100	2	5.6	安全評価とセーフティケース
	101			
	102	2	5.7	わが国固有の安全確保方策（地質環境の安定性）
	103			
	104	2	確認テスト	＜問題＞
	105			＜解答・解説＞
	106	3	コラム・読み物	
	107			
	108			
	109	1	6　地層処分の実現性に関する報告書（扉）	
	110	2	6.1	地層処分の実現性を明示した最初の報告書：KBS-3とProject ProjectGewahr1985
	111			
	112	2	6 2	わが国での地層処分の技術的実現性を明示した報告書：第2次取りまとめ
8	113			
	114	2	6.3	二つの代表的な処分概念とわが国での処分概念
	115			

	116	2	6.4	わが国における地層処分のセーフティケースを示した報告書：NUMO包括的技術報告書
	117			
	118	4	確認テスト	＜問題＞
	119			
	120			＜解答・解説＞
	121			
	122	1	コラム・読み物	
	123	1	7. NUMO包括的技術報告書―適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築（扉）	
	124	2	7.1	包括的技術報告書の全体概要
	125			
	126	2	7 2	地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化
	127			
	128	2	7.3	処分場の設計と工学技術
9	129			
	130	2	7.4	閉鎖前の安全性
	131			
	132	2	7.5	閉鎖後長期の安全性
	133			
	134	2	7.6	地層処分事業のマネジメント
	135			
	136	4	確認テスト	＜問題＞
	137			
	138			＜解答・解説＞
	139			
	140	3	コラム・読み物	
	141			
	142			
	143	1	8　地層処分の段階的な進め方（扉）	
	144	2	8.1	段階的な意思決定：OECD/NEAからの提言(2004)
10	145			
	146	2	8 2	Adaptive Staging :全米科学アカデミーからの提言(2003)
	147			
	148	2	8.3	わが国の段階的な処分地選定プロセス
	149			
	150	2	8.4	科学的特性マップと作成の背景
	151			
	152	2	8.5	わが国で地層処分場立地が想定される環境
	153			
	154	2	8.6	原子力規制委員会の段階的な進め方への係わり方
	155			
	156	4	確認テスト	＜問題＞
	157			
	158			＜解答・解説＞
	159			
	160	1	コラム・読み物	
11	161	1	9　地層処分固有の取り組み（扉）	
	162	2	9.1	長期の評価に付随する不確実性への対応
	163			
	164	2	9 2	長期の時間枠への対応：OECD/NEAレポート
	165			
	166	2	9.3	地層処分への放射線防護原則の適用
	167			
	168	2	9.4	放射性廃棄物処分のマネジメントの最適化
	169			
	170	2	9.5	閉鎖後のパッシブセーフティの導入
	171			
	172	2	9.6	制度的管理とモニタリング
	173			
	174	2	9.7	学際的なアプローチの必要性
	175			

	176	2	9.8	地層処分と環境影響評価への対応
12	177			
	178	4	確認テスト	＜問題＞
	179			
	180			＜解答・解説＞
	181			
	182	3	コラム・読み物	
	183			
	184			
	185	1	10.地層処分に対する信頼感の醸成 （扉）	
	186	2	10.1	科学・技術的な視点からの信頼感の醸成
	187			
	188	2	10 2	社会的な視点からの信頼感の醸成
	189			
	190	2	10.3	地下研究施設の役割
	191			
	192	2	10.4	不信感をもたらす要素
13	193			
	194	2	10.5	地層処分の専門家と他の専門家との認識の乖離
	195			
	196	2	10.6	ナチュラルアナログの活用
	197			
	198	2	10.7	考古学的アナログの活用
	199			
	200	4	確認テスト	＜問題＞
	201			
	202			＜解答・解説＞
	203			
	204	3	コラム・読み物	
	205			
	206			
	207	1	11　増層処分が直面する社会的側面（扉）	
	208	2	11.1	地層処分とNIMBY
14	209			
	210	2	11 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
	211			
	212	2	11.3	信頼感の醸成に係る国際フォーラムの活動
	213			
	214	2	11.4	地層処分の可逆性と回収可能性
	215			
	216	2	11.5	協調的アプローチと段階的アプローチによる意思決定
	217			
	218	2	11.6	地層処分事業における地域共生とパブリック・プライベート・パートナーシップ（PPP）
	219			
	220	4	確認テスト	＜問題＞
	221			
	222			＜解答・解説＞
	223			
	224	1	コラム・読み物	
15	225	1	12　地層処分計画における各国の挫折と成功例からの教訓（扉）	
	226	2	12.1	スウェーデン：公募方式から申し入れ方式に
	227			
	228	2	12 2	スイス：住民投票で敗北から国の積極的関与に
	229			
	230	2	12.3	米国：政治的サイト選定が生んだ混沌と頓挫
	231			
	232	2	12.4	英国：不透明な選定プロセスから国主体の選定に
	233			
	234	2	12.5	フランス：議員の介入と誘導による計画の見直し
	235			

	236	2	12.6	カナダ：研究主体から実施主体への移行
	237			
	238	2	12.7	フィンランド：初期のマイルストーン通り
	239			
	240	4	確認テスト	＜問題＞
16	241			
	242			＜解答・解説＞
	243			
	244	2	コラム・読み物	
	245			
	246	8	索引	
	247			
	248			
	249			
	250			
	251			
	252			
	253			
	254	4	参考文献	
	255			
	256			
	257			
	258	1	奥付	
	259	余白		
	260	余白		

表紙３			
表紙４			

第1章　わが国における放射性廃棄物の種類と特徴

わが国の原子力エネルギー利用の国家政策である核燃料サイクルの推進から発生する放射性廃棄物、その 他の発生源の違いによる放射性廃棄物の種類と濃度区分の考え方、発生源別の処分実施主体、予測発生量などについて、概括的な知識として理解する。

1.1 核燃料サイクルと放射性廃棄物

本章のねらい

わが国の原子力政策のうちで最も重要となる「核燃料（原子燃料）サイクル」について、そもそもの発想と仕組み、高速増殖炉原型炉（もんじゅ）の廃止措置決定による路線の変更、現状での関連施設の準備状況、核燃料サイクル施設の運転から発生する放射性廃棄物の種類について学ぶ。

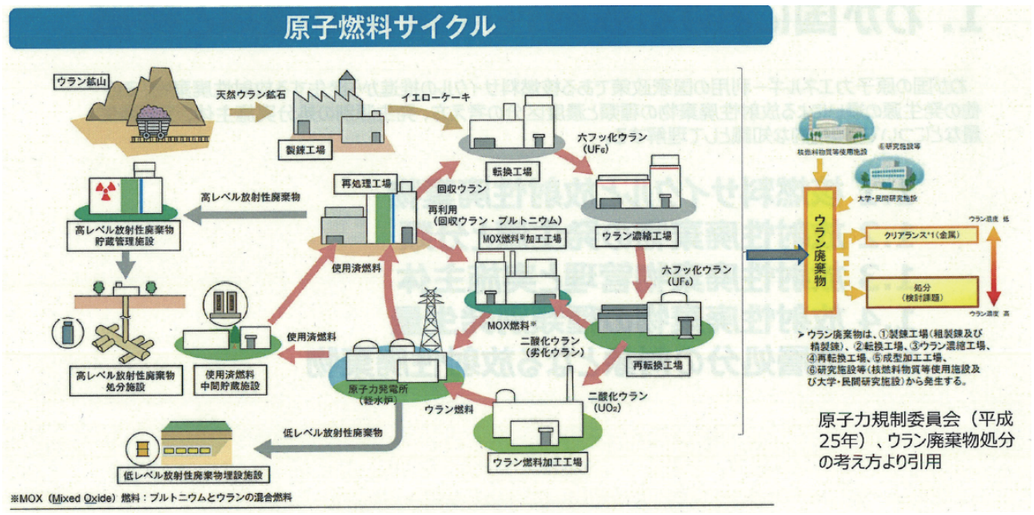


図 1-1　日本原子力文化財団（2019）、原子力・エネルギー図面集 7-2-1

わが国の原子力政策で最も重要かつ基盤となるのが、1967年に政策決定された「核燃料（原子燃料）サイクル」である。核燃料サイクル施設のうち、ウラン濃縮工場、再処理工場、MOX 燃料加工工場は青森県六ヶ所村に建設されている。核燃料サイクルで重要なことは、再処理から発生するプルトニウムに対するセキュリティと保障措置である。また、この核燃料サイクルから放射性廃棄物が発生するが、その対応については核燃料サイクルには含まれない。

●施設の建設　わが国では、1967年に原子力委員会が核燃料サイクル（原子燃料サイクルとも呼ばれる。）方策を「国のプロジェクト」として進めることを決定し、青森県六ヶ所村に関連する施設を建設している。（☞図 1-2）2020年に再処理施設の新規性基準への適合性審査に合格し、現在、設工認申請の対応を進めている。

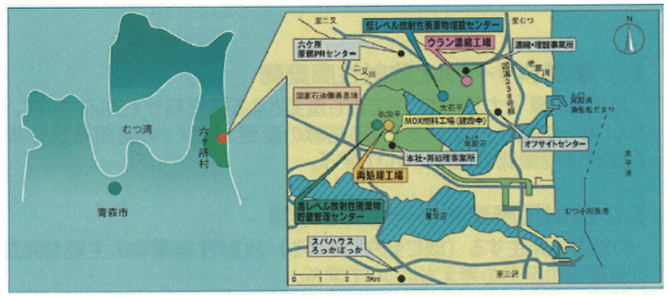


図 1-2　青森県六ヶ所村の日本原燃の核燃料サイクル施設（日本原燃 HP より）
当初の構想から高速増殖炉の廃止措置が決定されたこともあり、核燃料サイクル方策を継続することに対する是非が議論されている。

●TRU 廃棄物の返還　わが国の核燃料サイクルは、2022 年時点でまだ稼働しておらず、海外（英国、フランス）に再処理を依頼し、プルトニウム、ガラス固化体、低レベル放射性廃棄物（TRU 廃棄物※1）が返還され、六ヶ所村の核燃料サイクル施設敷地内で保管されている。また、核燃料サイクル図（☞図 1-1）では、再処理により発生する高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）や、発電所の運転からの低レベル放射性廃棄物について言及されている。

●MOX燃料　核燃料サイクル図（☞図 1-1）には、再処理工場で抽出されたプルトニウム燃料を用いた高速増殖炉が含まれていたが、原型炉である「もんじゅ」※2 の廃止措置が 2017 年に原子力規制委員会で認可されたこともあり、再処理からのプルトニウムはMOX燃料として加工され、原子力発電所で使用されるような図式になっている。MOX 燃料の再処理の有無は現在のところ未定である。

●乾式貯蔵施設の不足　原子力発電所からの使用済燃料は、再処理施設の稼働まで発電所敷地内で湿式あるいは乾式保管されているが、核燃料サイクルが進まないことにより、原子力発電所における乾式貯蔵施設※3 の貯蔵容量が切迫している。

核燃料サイクルからは、以下の放射性廃棄物が発生する。
◆高レベル放射性廃棄物：再処理から発生するガラス固化体
◆TRU 廃棄物：再処理から発生する廃棄物
◆低レベル放射性廃棄物：再処理及び原子力発電所の運転から発生する廃棄物（ウラン廃棄物も含む）

※1　TRU 廃棄物に関する側注を入れる

※2　もんじゅに関する側注を入れる

※3　乾式貯蔵施設に関する側注を入れる

この章のまとめ

以下の項目について説明できるようになりましたか？

- □ 青森県六ケ所村に建設している加工工場施設の設備
- □ 核燃料サイクルで重要な事項
- □ 核燃料サイクル施設の運転によって発生する放射性廃棄物の種類
- □ 我が国の放射性廃棄物政策の方向性

キーワード

- □ TRU 廃棄物
- □ MOX 燃料
- □ もんじゅ

1.2　放射性廃棄物の発生源と区分

わが国における放射性廃棄物の発生源の種類は、次の①～⑤の 5 つに大きく分類され、廃棄物の区分は高レベル放射性廃棄物，低レベル放射性廃棄物の２種類と規定されている。

① 原子力発電所の運転と廃止措置から発生する廃棄物
② 使用済燃料の再処理から発生する廃棄物
③ 原子力施設の廃止措置から発生する廃棄物
④ 医療、産業、研究行為から発生する廃棄物（MRI 廃棄物とも呼ばれる）
⑤ 核燃料サイクル等から発生するウラン廃棄物

◆高レベル放射性廃棄物
◆低レベル放射性廃棄物

※この発生源の区分には、福島第一原子力発電所（以下、「福島第一」）の廃炉や除染からの放射性廃棄物は含まれていない。これらの事故由来放射性廃棄物については、今後その区分や処理・処分方法が規定されると考えられる。

わが国における放射性廃棄物区分は、図 1-1 にある、a と B および Y の放射性核種濃度（Ba/t）で区分されている。原則、高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物に大別されている。このほか、比較的 a 核種の含有量が多いウラン廃棄物も区分されている。

・高レベル放射性廃棄物（HLW）*
・低レベル放射性廃棄物（LLW）

* わが国では再処理から発生するガラス固化体を高レベル放射性廃棄物と定義している（METI の HP）。国際的には使用済燃料も含めて高レベル放射性廃棄物と呼ばれている（例えば、米国 NRC）。IAEA の廃棄物分類では放射能レベルが高い廃棄物としており，ガラス固化体，の区別はしていない。IAEA の廃棄物分類では放射能レベルが高い廃棄物としており、ガラス固化体、SF の区別はしていない。

このうち、低レベル放射性廃棄物は、以下のように分類されている。

◆ RU 廃棄物……TRU
◆ 炉心等廃棄物（仮称）……L1
◆ 均質固化体・充填固化体等……L2
◆ 極低レベル放射性廃棄物……L3
◆ ウラン廃棄物（a 核種の濃度は、10^{10} Bq/t～10^{6} Bq/t まで幅広く分布）

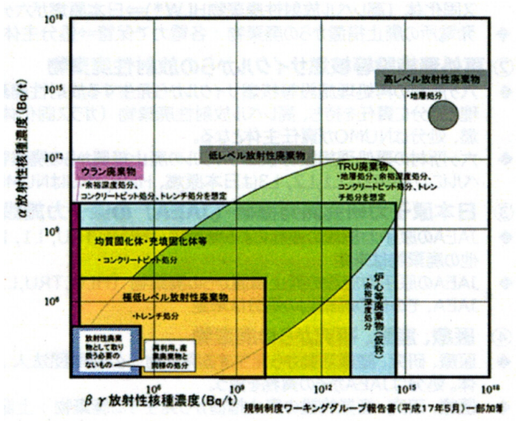
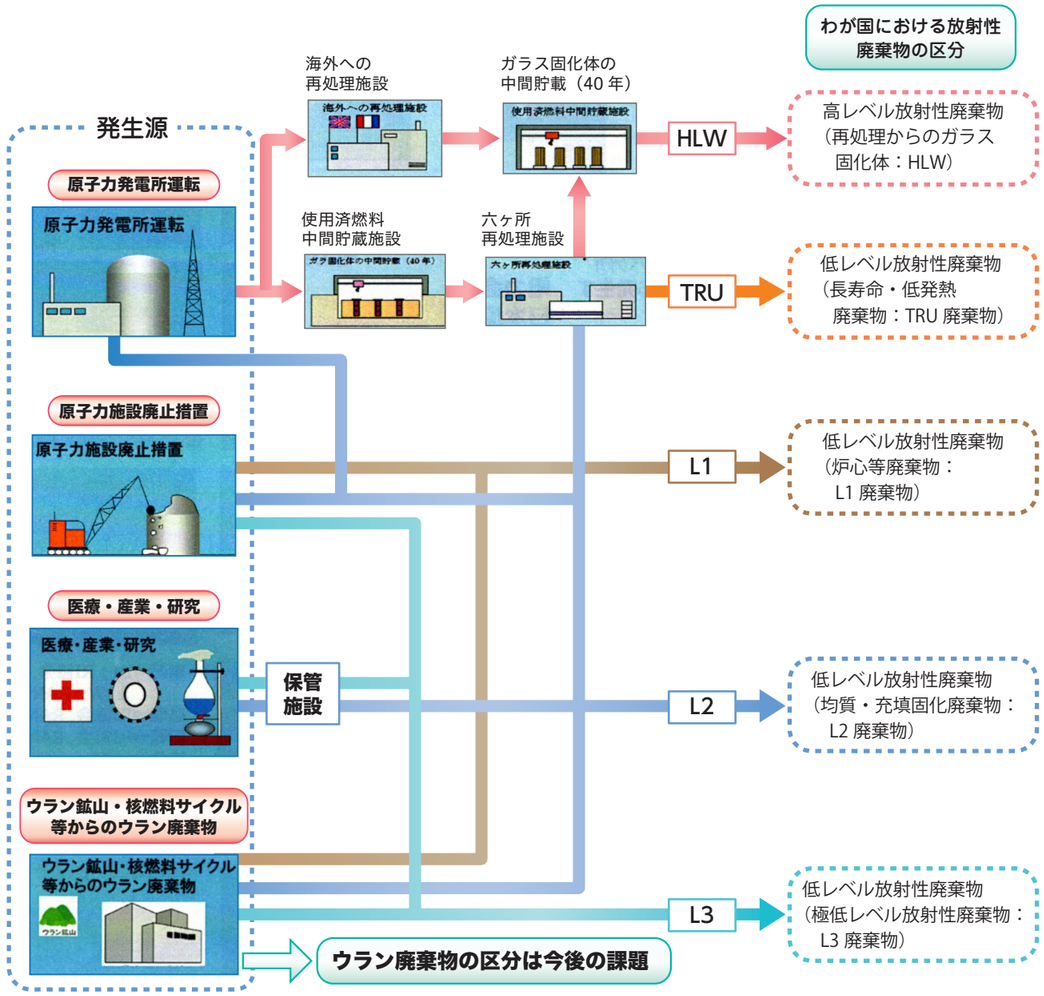


図 1-1　放射性廃棄物の濃度区分及処分方法

出所：総合エネルギー講演会　原子力安全・保安部会　廃棄物安全小委員会報告書：
「低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る安全規制について（中間報告）（平成 19 年 3 月 20 日）p.23/63



※本図の版権は著者

図 1-2　放射性廃棄物の発生源と区分の解説

わが国で発生している放射性廃棄物の主たる発生源の種類および区分は上図に示すものとなる。大きくは高レベル放射性 廃棄物と低レベル放射性廃棄物に分類されている。このほかには、福島第一原子力発電所（以下、福島第一」）の廃止措置や敷地外の除染廃棄物があるが、その区分や処分方法については現状では規定されていない。

この章のまとめ

以下の項目について説明できるようになりましたか？

☐ わが国で発生している放射性廃棄物の発生源
☐ わが国における放射性廃棄物の区分
☐ 高レベル放射性廃棄物
☐ TRU / LA / L2 / L3 の違い

キーワード
☐ 高レベル放射性廃棄物
☐ 低レベル放射性廃棄物

9.8　地層処分と環境影響への対応

わが国における**環境影響評価法**の対象となる廃棄物最終処分場は、**「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」**に基づく処分場であり、「平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」の基本方針に基づく**指定廃棄物の処分場**及び「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」に基づく**最終処分施設**は含まない（環境省（2014）：環境影響評価法に基づく基本的事項等に関する技術検討委員会報告書，環境影響評価法に基づく基本的事項等に関する技術検討委員会）。したがって現在の枠組みでは、環境影響評価法に基づく環境アセスメントは必要とされないが、NUMO は事業者として自主的に環境影響の評価や必要な周辺環境保全について取り組んでいくとしている（NUMO2021 包括的技術報告書第２章より抜粋）

一方で新たな仕組みである**戦略的環境影響評価**（Strategic Environmental Assessment（SEA））は、事業が開始される前段階での計画段階で要求される評価で、事業の異なる段階での周辺環境へのあらゆる影響から防護する原則を採用しており、**予防原則**とともに地層処分事業が着目しておく必要のある評価である。特に沿岸域での処分場立地に際しての海洋を含む環境影響については、国際基準や欧州各国での取り組みに留意しておく必要がある。

表 1-1　従来の環境影響評価と戦略的環境影響評価との比較

従来の環境影響評価	戦略的環境影響評価
□ 最終的な意思決定段階で求められる	□ 意思決定の初期段階から求められる
□ 評価プロセスと項目が決められている	□ 方針設定、計画の変更ごとに対応が変わる
□ 特定の開発提案に対応する	□ 様々な開発提案に向けて積極的かつ前向きなアプローチ
□ プロジェクトの構成要素による影響に対する因果関係の詳細な解析	□ 領域間のリンクに焦点をあてた広範な解析レベル
□ 実現可能な限定した範囲での検討（プロジェクトをどのように実行するか）	□ 幅広い開発代替案を検討
□ プロジェクトレベルにおける蓄積された影響を指摘する限定された機会	□ 影響が蓄積されるまでの早期の警告（対象領域あるいは広域）
□ 影響の緩和と最小化に重点	□ 持続可能な目標と保護の達成に重点
□ 害がない / 害が少ないことに焦点を当てる	□ 最も良いことに焦点を当てる、すなわち最高の開発を探求する

▷地層処分の分野では、地層処分事業が周辺環境に与える影響（プラス・マイナスの影響）を含めて「環境影響評価書：Environmental Impact Statements」として取りまとめている国がある（例えばフィンランド、米国、英国など）。
▷この EIS は、環境省が規定しているいわゆる環境影響評価より対象を幅広くとらえており、放射線影響のみならず社会資本やインフラへの影響（プラス面）も含めて取り扱っている。
▷わが国では科学技術的な観点からの環境防護や生態系の保全などが対象となっており、EIS とは内容が異なっていることに留意しておく。

戦略的環境影響評価の在り方を議論した中央環境審議会は、2010 年（平成 22 年）に**「今後の環境影響評価制度の在り方」**の答申を公表した。その中で、対象事業として「放射性廃棄物処分事業」について下記に言及している。（下線部は筆者）

> **2. 対象事業について**
> （4）将来的に実施が見込まれる事業種への対応
> 現時点で、将来的に実施が見込まれる事業のうち、規模が大きく環境影響の程度が著しいと考えられる事業としては、放射性廃棄物処分場の建設事業及び国内での実証試験実施に向けた検討が開始されている二酸化炭素の回収・貯留に関する事業がある。これらの事業については、国の関与のもとに、何らかの形で環境影響評価を行う仕組みの検討が必要である。
> しかしながら、放射性廃棄物最終処分場での最終処分の開始は平成 40 年（2028 年）代後半目途であり、二酸化炭素の回収・貯留については平成 32 年（2020 年）までの実用化が目指されている等、これらの事業は現時点では実証試験等の段階にあることから、知見を蓄積し、実用化の状況を見た上でこの法律の対象に追加するかどうかを判断すべきである。

●放射性廃棄物処分のマネジメントの原則（IAEA 1995 Fundamental）の原則 2（Protection of Environment）で規定された「環境への防護」については、人間が電離放射線被ばくに対して最も敏感であるので、人間への影響が受け入れられるレベルにあれば、環境（他の種）への影響は防護されるとする考え方（ICRP pub 60）が導入されている。この考え方は、現在の環境影響への配慮の観点から見直す必要がある。もちろん、放射性廃棄物に含まれる化学物質による環境への影響は評価され、防護されなければならない。

●国際放射線防護委員会 ICRP は環境防護について、2013 年に公表した "Radiological Protection in Geological Disposal of Solid long-lived Radioactive Waste" の中で、以下に記述している。

> （96）環境が施設からの放出による有害な影響から防護されている、あるいは防護されるであろうということを示すことが、国の立法行為や長寿命廃棄物の管理を含む人間の活動に関連して、ますます要求されるようになってきている。…略
> （97）環境防護に関する ICRP のアプローチは、汚染の存在又は資源としての環境に影響を及ぼす可能性のあるその他の要因の存在ではなく、**「生物多様性の維持、種の保存、又は自然の生息環境、群集及び生態系の状態へのインパクトが無視できるレベルになるように、動物相及び植物相に対する有害な影響の発生を防止又は頻度を低減する」**という目的に基づいている。環境影響評価書では、とりわけ、目に見える視覚的な影響、科学毒性の影響等、騒音、土地利用、快適性に対する影響などの要素を含めたより広範な意味での影響が検討される。
> （98）防護のための標準的な手段と防護対策は、ICRP がこれまで提唱してきた**標準動物及び標準植物の一群**を使用すべきである。…略
> （100）地層処分において考慮される長い時間を通じて生物圏は変化すると考えられ、しかも大幅に変わる可能性がある。そのような変化は、時間の経過に伴い、自然による、あるいは人間の行動を通じて促進されたり防止されたりすることで生物圏の変化を引き起こす可能性がある。
> 寄与の要因としては、氷河作用サイクルを含めた気候変動、地番隆起又は沈下などが考えられる。**様々な生物圏についての現在の知識とそうした生物圏における標準動物及び標準植物への影響評価**は、可能性のある生物圏の変化の理解の助け、それにより環境防護に関連した意思決定に必要な情報を提供すると考えられる。

この章のまとめ

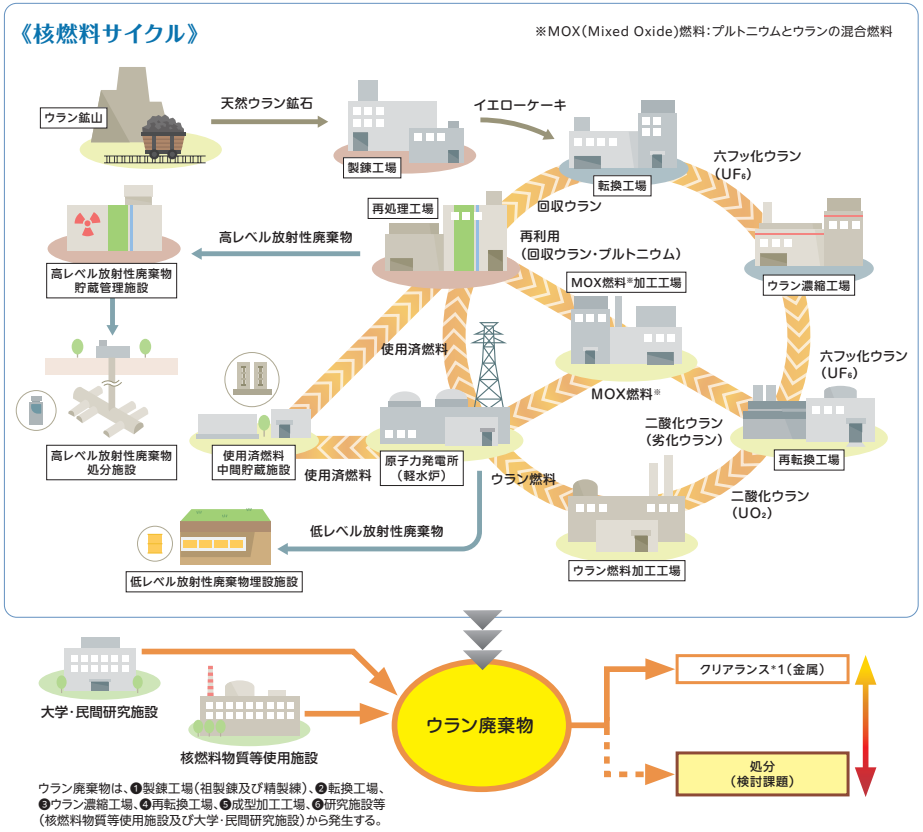
以下の項目について説明できるようになりましたか？

□ 廃棄物の処理及清掃に関する法律
□ 戦略的環境影響評価
□ 放射性廃棄物処分のマネジメントの原則
□ 今後の環境評価影響制度のあり方

キーワード
□ 環境影響評価法
□ 戦略的環境評価
□ 予防原則
□ 今後の環境影響評価制度のあり方

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で最も重要かつ基盤となるのが1967年に政策決定された「核燃料（原子燃料）サイクル」である（下図）。核燃料サイクル施設の内、ウラン濃縮工場、再処理工場、MOX燃料加工工場が青森県六ヶ所村に建設されている。核燃料サイクルで重要な事項は、再処理から発生するプルトニウムに対するセキュリティと保障措置となる。この核燃料サイクルからは放射性廃棄物が発生するがその対応については核燃料サイクルには含まれない。



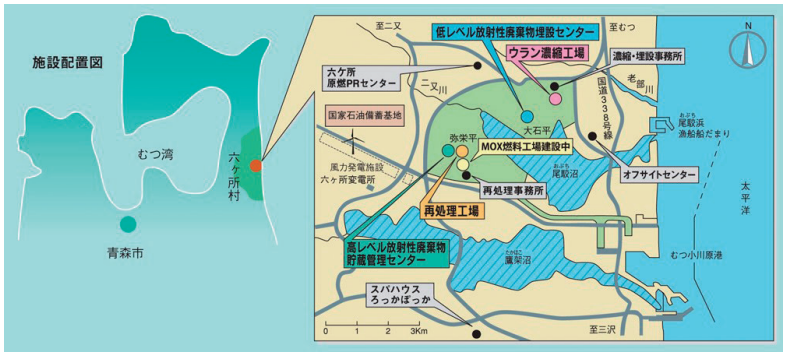
出典：原子力規制委員会（平成25年）、ウラン廃棄物処分の考え方より引用

解説

わが国では、1967年に原子力委員会が核燃料サイクル（原子燃料サイクルとも呼ばれる。）方策を「国のプロジェクト」として進めることを決定し、青森県六ヶ所村に関連する施設を建設している。現在再処理施設の新規性基準への適合性審査が2020年合格し、設工認申請の対応を進めている。わが国の核燃料サイクルは、2021年現在まだ、稼働しておらず、海外に再処理を依頼（英国、フランス）したことによるプルトニウム、ガラス固化体、低レベル放射性廃棄物（TRU廃棄物）が返還されてきており、六ヶ所村の核燃料サイクル施設敷地内で保管されている。また、核燃料サイクル図では、再処理により発生する高レベル放射性廃棄物 ガラス固化体、発電所の運転からの低レベル放射性廃棄物について言及されている。

核燃料サイクル図には、再処理工場で抽出されたプルトニウム燃料を用いた高速増殖炉が含まれていたが、2017年に原型炉である「もんじゅ」の廃止措置が原子力規制委員会で認可されたこともあり、再処理からのプルトニウムはMOX燃料として加工され、原子力発電所で使用されるような図式になっている。MOX燃料の再処理の有無は現在のところ未定である。

原子力発電所からの使用済燃料は、再処理施設の稼働まで発電所敷地内で湿式あるいは乾式保管されているが、核燃料サイクルが進まないことにより、原子力発電所における乾式貯蔵施設の容量が切迫している。



青森県六カ所村の日本原燃の核燃料サイクル施設（日本原燃HPより）

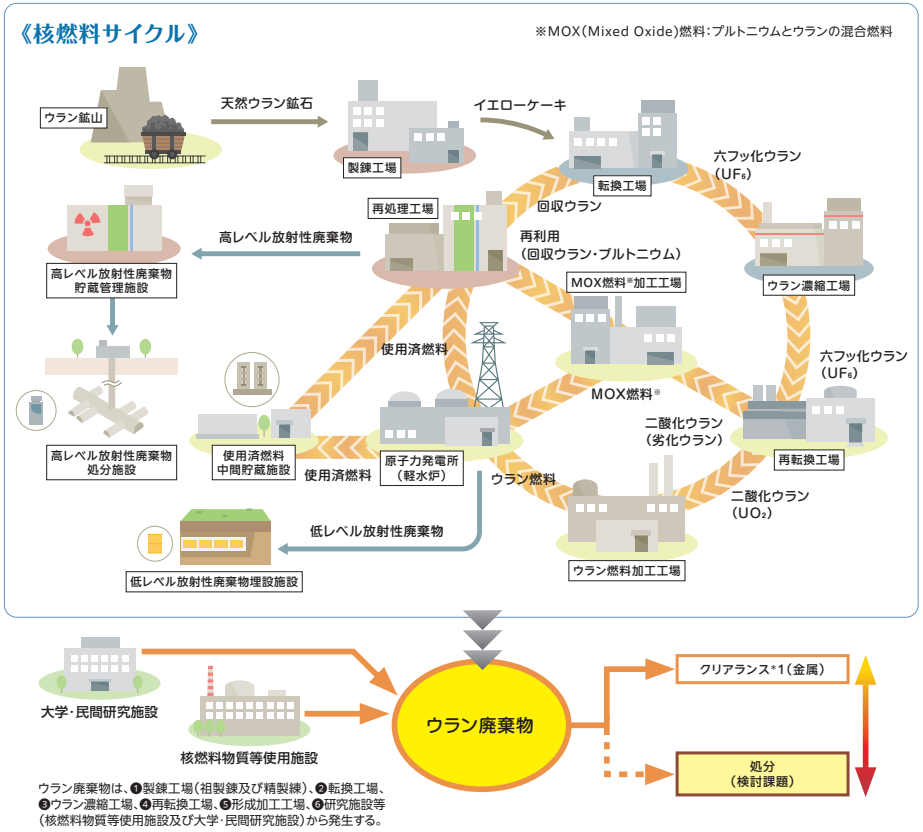
当初の構想から高速増殖炉の廃止措置が決定されたこともあり、核燃料サイクル方策を継続することに対する是非が議論されている。

核燃料サイクルから発生する、放射性廃棄物

- レベル放射性廃棄物：再処理から発生するガラス固化体
- TRU廃棄物：再処理から発生する廃棄物
- 低レベル放射性廃棄物：再処理及び原子力発電所の運転から発生する廃棄物（ウラン廃棄物も含む）

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で最も重要かつ基盤となるのが1967年に政策決定された「核燃料（原子燃料）サイクル」である（下図）。核燃料サイクル施設の内、ウラン濃縮工場、再処理工場、MOX燃料加工工場が青森県六ヶ所村に建設されている。核燃料サイクルで重要な事項は、再処理から発生するプルトニウムに対するセキュリティと保障措置となる。この核燃料サイクルからは放射性廃棄物が発生するがその対応については核燃料サイクルには含まれない。



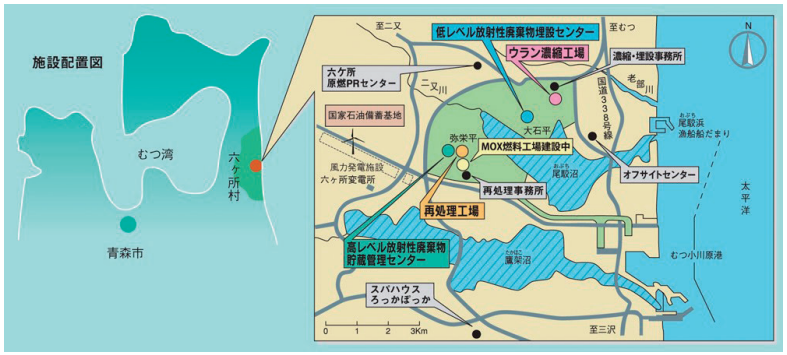
出典:原子力規制委員会（平成25年）、ウラン廃棄物処分の考え方より引用

解説

わが国では、1967年に原子力委員会が核燃料サイクル（原子燃料サイクルとも呼ばれる。）方策を「国のプロジェクト」として進めることを決定し、青森県六ヶ所村に関連する施設を建設している。現在再処理施設の新規性基準への適合性審査が2020年合格し、設工認申請の対応を進めている。わが国の核燃料サイクルは、2021年現在まだ、稼働しておらず、海外に再処理を依頼（英国、フランス）したことによるプルトニウム、ガラス固化体、低レベル放射性廃棄物（TRU廃棄物）が返還されてきており、六ヶ所村の核燃料サイクル施設敷地内で保管されている。また、核燃料サイクル図では、再処理により発生する高レベル放射性廃棄物 ガラス固化体、発電所の運転からの低レベル放射性廃棄物について言及されている。

核燃料サイクル図には、再処理工場で抽出されたプルトニウム燃料を用いた高速増殖炉が含まれていたが、2017年に原型炉である「もんじゅ」の廃止措置が原子力規制委員会で認可されたこともあり、再処理からのプルトニウムはMOX燃料として加工され、原子力発電所で使用されるような図式になっている。MOX燃料の再処理の有無は現在のところ未定である。

原子力発電所からの使用済燃料は、再処理施設の稼働まで発電所敷地内で湿式あるいは乾式保管されているが、核燃料サイクルが進まないことにより、原子力発電所における乾式貯蔵施設の容量が切迫している。



青森県六カ所村の日本原燃の核燃料サイクル施設（日本原燃HPより）

当初の構想から高速増殖炉の廃止措置が決定されたこともあり、核燃料サイクル方策を継続することに対する是非が議論されている。

核燃料サイクルから発生する、放射性廃棄物

- レベル放射性廃棄物:再処理から発生するガラス固化体
- TRU廃棄物:再処理から発生する廃棄物
- 低レベル放射性廃棄物:再処理及び原子力発電所の運転から発生する廃棄物（ウラン廃棄物も含む）

1-1

核燃料サイクルと放射性廃棄物

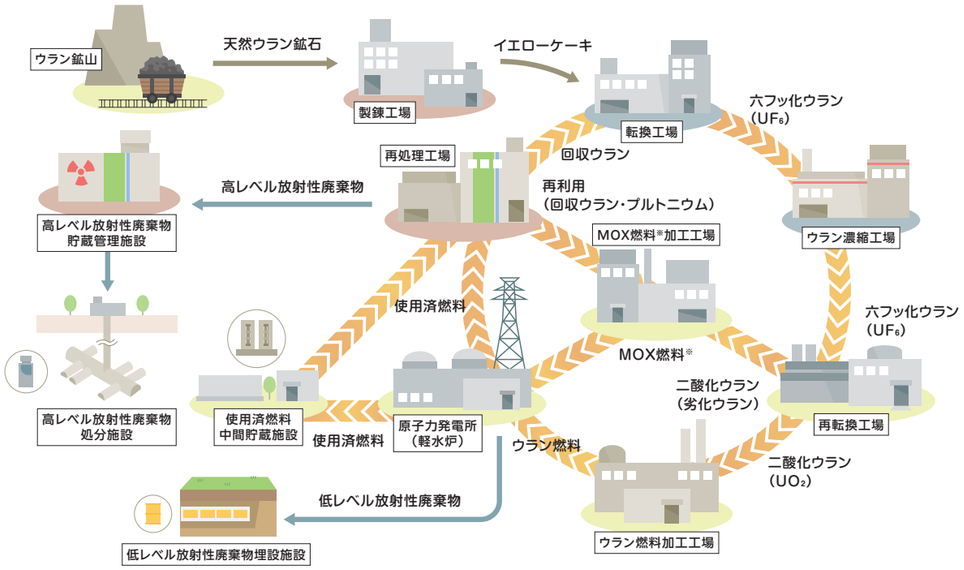
原子力政策のうち、最も重要となる「核燃料サイクル」とは？
また、その施設から発生する放射性廃棄物にはどんなものがあるのか？

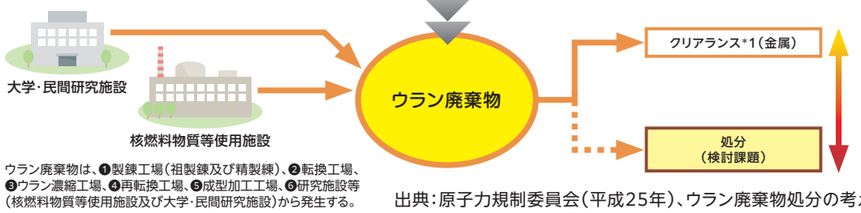
ポイント

❶ わが国の原子力政策で最も重要かつ基盤となるのが
1967年に政策決定された「核燃料（原子燃料）サイクル」である（下図）。
❷ 核燃料サイクル施設の内、ウラン濃縮工場、再処理工場、MOX燃料加工工場が
青森県六ヶ所村に建設されている。
❸ 核燃料サイクルで重要な事項は、再処理から発生するプルトニウムに対する
セキュリティと保障措置となる。
❹ この核燃料サイクルからは放射性廃棄物が発生するが
その対応については核燃料サイクルには含まれない。

核燃料サイクル

※MOX（Mixed Oxide）燃料：プルトニウムとウランの混合燃料





ウラン廃棄物は、❶製錬工場（祖製錬及び精製錬）、❷転換工場、❸ウラン濃縮工場、❹再転換工場、❺成型加工工場、❻研究施設等（核燃料物質等使用施設及び大学・民間研究施設）から発生する。

出典：原子力規制委員会（平成25年）、ウラン廃棄物処分の考え方より引用

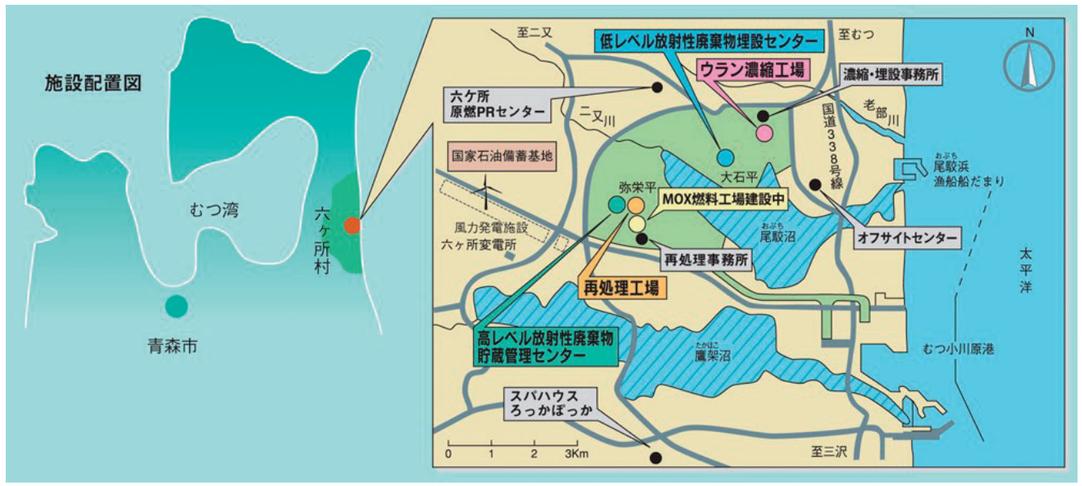
くわしく知りたい！

わが国では、1967年に原子力委員会が核燃料サイクル（原子燃料サイクルとも呼ばれる。）方策を「国のプロジェクト」として進めることを決定し、青森県六ヶ所村に関連する施設を建設している。現在再処理施設の新規性基準への適合性審査が2020年合格し、設工認申請の対応を進めている。

わが国の核燃料サイクルは、2021年現在まだ、稼働しておらず、海外に再処理を依頼（英国、フランス）したことによるプルトニウム、ガラス固化体、低レベル放射性廃棄物（TRU廃棄物）が返還されてきており、六ヶ所村の核燃料サイクル施設敷地内で保管されている。また、核燃料サイクル図では、再処理により発生する高レベル放射性廃棄物 ガラス固化体、発電所の運転からの低レベル放射性廃棄物について言及されている。

核燃料サイクル図には、再処理工場で抽出されたプルトニウム燃料を用いた高速増殖炉が含まれていたが、2017年に原型炉である「もんじゅ」の廃止措置が原子力規制委員会で認可されたこともあり、再処理からのプルトニウムはMOX燃料として加工され、原子力発電所で使用されるような図式になっている。MOX燃料の再処理の有無は現在のところ未定である。

原子力発電所からの使用済燃料は、再処理施設の稼働まで発電所敷地内で湿式あるいは乾式保管されているが、核燃料サイクルが進まないことにより、原子力発電所における乾式貯蔵施設の容量が切迫している。



青森県六カ所村の日本原燃の核燃料サイクル施設（日本原燃HPより）

当初の構想から高速増殖炉の廃止措置が決定されたこともあり、核燃料サイクル方策を継続することに対する是非が議論されている。

核燃料サイクルから発生する、放射性廃棄物

- **レベル放射性廃棄物:再処理から発生するガラス固化体**
- **TRU廃棄物:再処理から発生する廃棄物**
- **低レベル放射性廃棄物:再処理及び原子力発電所の運転から発生する廃棄物（ウラン廃棄物も含む）**

核燃料サイクルと放射性廃棄物

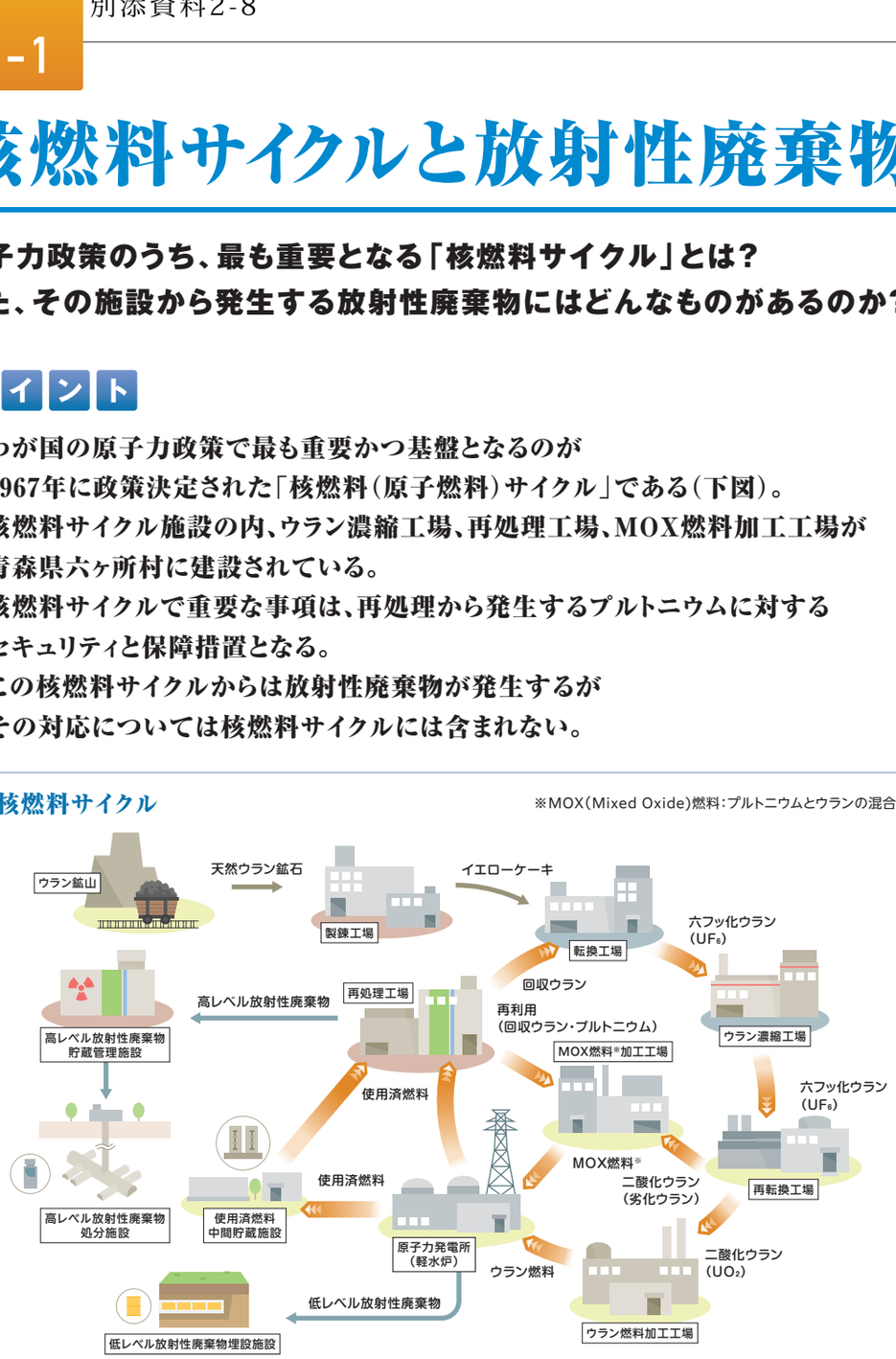
原子力政策のうち、最も重要となる「核燃料サイクル」とは？
また、その施設から発生する放射性廃棄物にはどんなものがあるのか？

ポイント

❶ わが国の原子力政策で最も重要かつ基盤となるのが
1967年に政策決定された「核燃料（原子燃料）サイクル」である（下図）。
❷ 核燃料サイクル施設の内、ウラン濃縮工場、再処理工場、MOX燃料加工工場が
青森県六ヶ所村に建設されている。
❸ 核燃料サイクルで重要な事項は、再処理から発生するプルトニウムに対する
セキュリティと保障措置となる。
❹ この核燃料サイクルからは放射性廃棄物が発生するが
その対応については核燃料サイクルには含まれない。

核燃料サイクル

※MOX（Mixed Oxide）燃料：プルトニウムとウランの混合燃料



ウラン廃棄物は、❶製錬工場（祖製錬及び精製錬）、❷転換工場、❸ウラン濃縮工場、❹再転換工場、❺成型加工工場、❻研究施設等（核燃料物質等使用施設及び大学・民間研究施設）から発生する。

出典：原子力規制委員会（平成25年）、ウラン廃棄物処分の考え方より引用

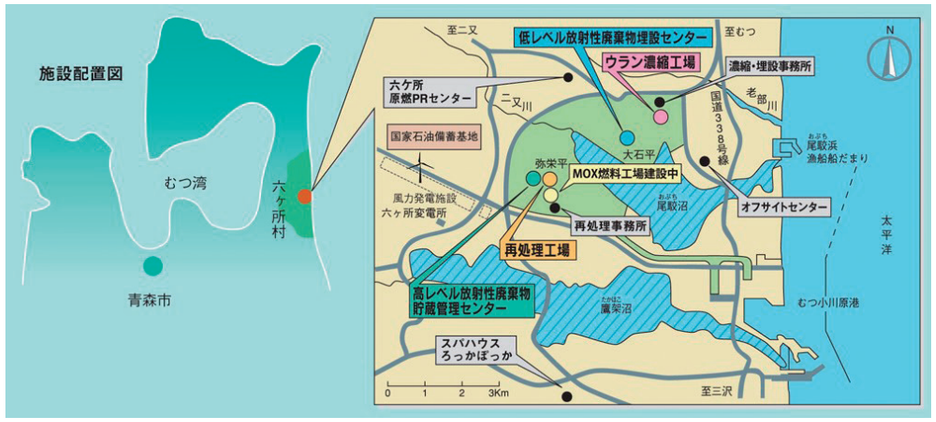
くわしく知りたい！

わが国では、1967年に原子力委員会が核燃料サイクル（原子燃料サイクルとも呼ばれる。）方策を「国のプロジェクト」として進めることを決定し、青森県六ヶ所村に関連する施設を建設している。現在再処理施設の新規性基準への適合性審査が2020年合格し、設工認申請の対応を進めている。

わが国の核燃料サイクルは、2021年現在まだ、稼働しておらず、海外に再処理を依頼（英国、フランス）したことによるプルトニウム、ガラス固化体、低レベル放射性廃棄物（TRU廃棄物）が返還されてきており、六ヶ所村の核燃料サイクル施設敷地内で保管されている。また、核燃料サイクル図では、再処理により発生する高レベル放射性廃棄物 ガラス固化体、発電所の運転からの低レベル放射性廃棄物について言及されている。

核燃料サイクル図には、再処理工場で抽出されたプルトニウム燃料を用いた高速増殖炉が含まれていたが、2017年に原型炉である「もんじゅ」の廃止措置が原子力規制委員会で認可されたこともあり、再処理からのプルトニウムはMOX燃料として加工され、原子力発電所で使用されるような図式になっている。MOX燃料の再処理の有無は現在のところ未定である。

原子力発電所からの使用済燃料は、再処理施設の稼働まで発電所敷地内で湿式あるいは乾式保管されているが、核燃料サイクルが進まないことにより、原子力発電所における乾式貯蔵施設の容量が切迫している。



青森県六カ所村の日本原燃の核燃料サイクル施設（日本原燃HPより）

当初の構想から高速増殖炉の廃止措置が決定されたこともあり、核燃料サイクル方策を継続することに対する是非が議論されている。

核燃料サイクルから発生する、放射性廃棄物

- **レベル放射性廃棄物：再処理から発生するガラス固化体**
- **TRU廃棄物：再処理から発生する廃棄物**
- **低レベル放射性廃棄物：再処理及び原子力発電所の運転から発生する廃棄物（ウラン廃棄物も含む）**

核燃料サイクルと放射性廃棄物

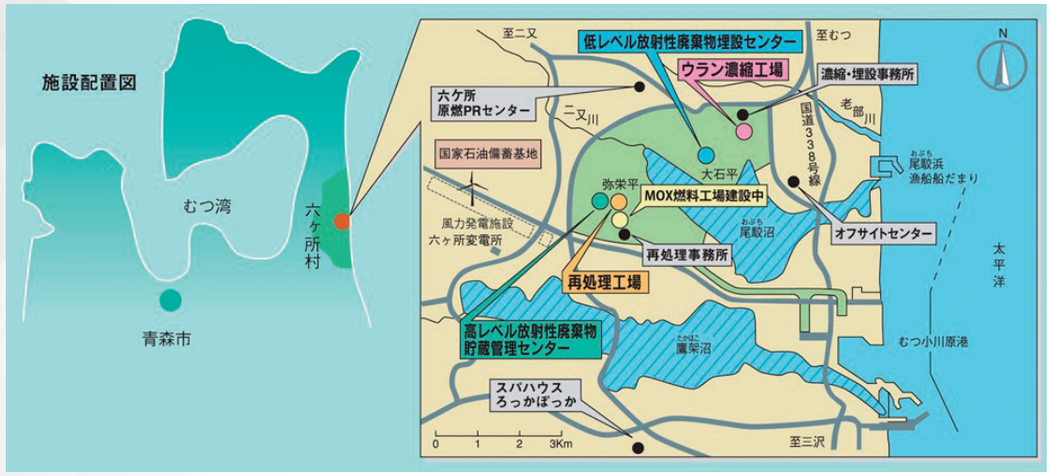
原子力政策のうち、最も重要となる「核燃料サイクル」とは?
また、その施設から発生する放射性廃棄物にはどんなものがあるのか?

わが国では、1967年に原子力委員会が核燃料サイクル（原子燃料サイクルとも呼ばれる。）方策を「国のプロジェクト」として進めることを決定し、青森県六ヶ所村に関連する施設を建設している。現在再処理施設の新規性基準への適合性審査が2020年合格し、設工認申請の対応を進めている。

わが国の核燃料サイクルは、2021年現在まだ、稼働しておらず、海外に再処理を依頼（英国、フランス）したことによるプルトニウム、ガラス固化体、低レベル放射性廃棄物（TRU廃棄物）が返還されてきており、六ヶ所村の核燃料サイクル施設敷地内で保管されている。また、核燃料サイクル図では、再処理により発生する高レベル放射性廃棄物 ガラス固化体、発電所の運転からの低レベル放射性廃棄物について言及されている。

核燃料サイクル図には、再処理工場で抽出されたプルトニウム燃料を用いた高速増殖炉が含まれていたが、2017年に原型炉である「もんじゅ」の廃止措置が原子力規制委員会で認可されたこともあり、再処理からのプルトニウムはMOX燃料として加工され、原子力発電所で使用されるような図式になっている。MOX燃料の再処理の有無は現在のところ未定である。

原子力発電所からの使用済燃料は、再処理施設の稼働まで発電所敷地内で湿式あるいは乾式保管されているが、核燃料サイクルが進まないことにより、原子力発電所における乾式貯蔵施設の容量が切迫している。



青森県六カ所村の日本原燃の核燃料サイクル施設（日本原燃HPより）

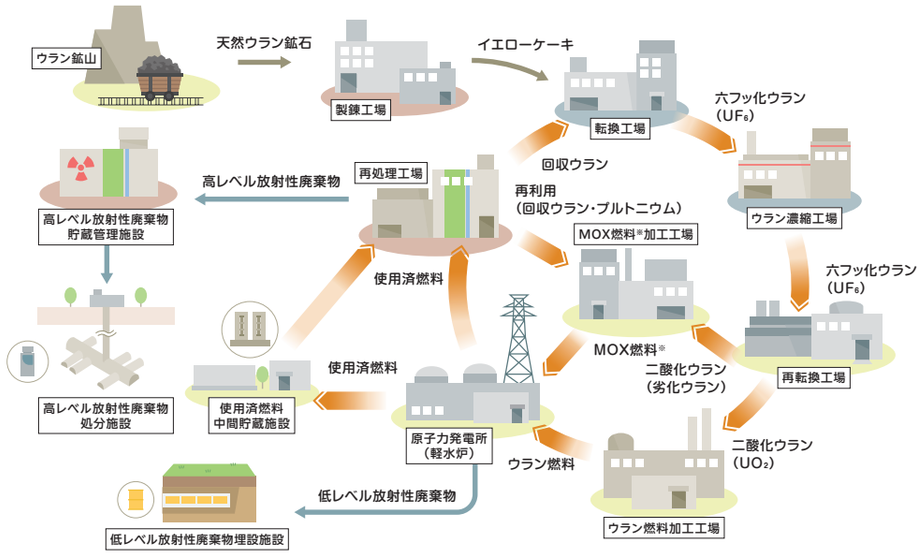
当初の構想から高速増殖炉の廃止措置が決定されたこともあり、核燃料サイクル方策を継続することに対する是非が議論されている。

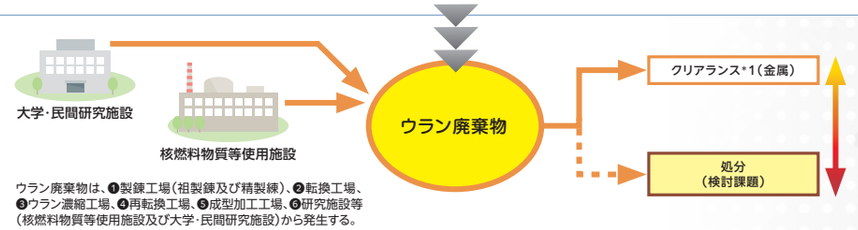
核燃料サイクルから発生する、放射性廃棄物

- レベル放射性廃棄物:再処理から発生するガラス固化体
- TRU廃棄物:再処理から発生する廃棄物
- 低レベル放射性廃棄物:再処理及び原子力発電所の運転から発生する廃棄物（ウラン廃棄物も含む）

核燃料サイクル

※MOX(Mixed Oxide)燃料:プルトニウムとウランの混合燃料





出典:原子力規制委員会(平成25年)、ウラン廃棄物処分の考え方より引用

これだけは覚えよう!

❶わが国の原子力政策で最も重要かつ基盤となるのが1967年に政策決定された「核燃料(原子燃料)サイクル」である(上図)。
❷核燃料サイクル施設の内、ウラン濃縮工場、再処理工場、MOX燃料加工工場が青森県六ヶ所村に建設されている。
❸核燃料サイクルで重要な事項は、再処理から発生するプルトニウムに対するセキュリティと保障措置となる。
❹この核燃料サイクルからは放射性廃棄物が発生するがその対応については核燃料サイクルには含まれない。

1-1 核燃料サイクルと放射性廃棄物

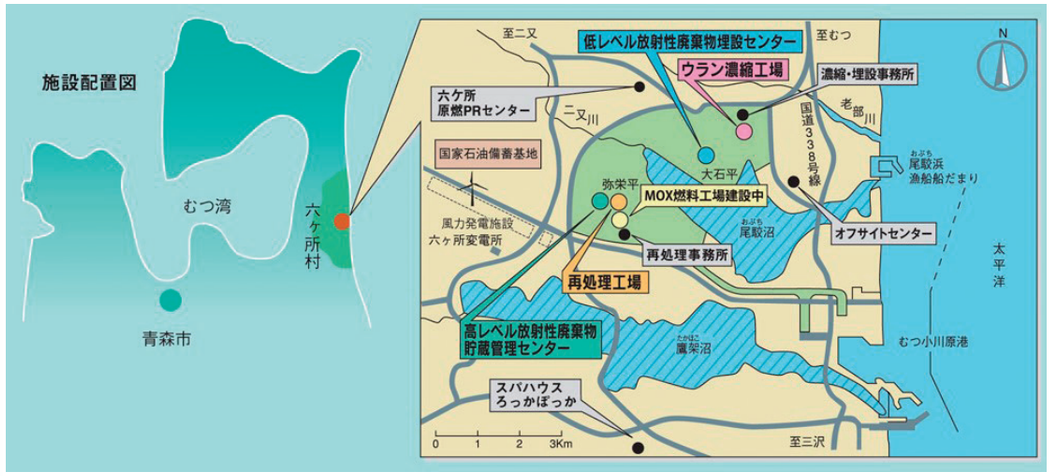
原子力政策のうち、最も重要となる「核燃料サイクル」とは？ また、その施設から発生する放射性廃棄物にはどんなものがあるのか？

わが国では、1967年に原子力委員会が核燃料サイクル（原子燃料サイクルとも呼ばれる。）方策を「国のプロジェクト」として進めることを決定し、青森県六ヶ所村に関連する施設を建設している。現在再処理施設の新規性基準への適合性審査が2020年合格し、設工認申請の対応を進めている。

わが国の核燃料サイクルは、2021年現在まだ、稼働しておらず、海外に再処理を依頼（英国、フランス）したことによるプルトニウム、ガラス固化体、低レベル放射性廃棄物（TRU廃棄物）が返還されてきており、六ヶ所村の核燃料サイクル施設敷地内で保管されている。また、核燃料サイクル図では、再処理により発生する高レベル放射性廃棄物 ガラス固化体、発電所の運転からの低レベル放射性廃棄物について言及されている。

核燃料サイクル図には、再処理工場で抽出されたプルトニウム燃料を用いた高速増殖炉が含まれていたが、2017年に原型炉である「もんじゅ」の廃止措置が原子力規制委員会で認可されたこともあり、再処理からのプルトニウムはMOX燃料として加工され、原子力発電所で使用されるような図式になっている。MOX燃料の再処理の有無は現在のところ未定である。

原子力発電所からの使用済燃料は、再処理施設の稼働まで発電所敷地内で湿式あるいは乾式保管されているが、核燃料サイクルが進まないことにより、原子力発電所における乾式貯蔵施設の容量が切迫している。



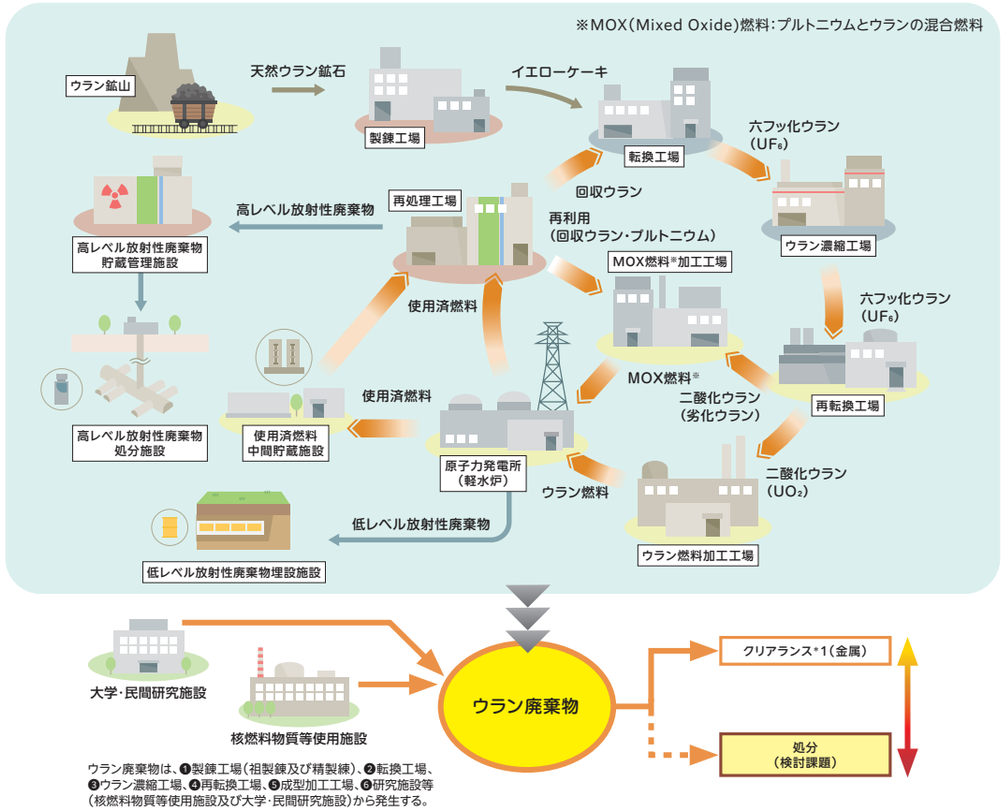
青森県六カ所村の日本原燃の核燃料サイクル施設（日本原燃HPより）

当初の構想から高速増殖炉の廃止措置が決定されたこともあり、核燃料サイクル方策を継続することに対する是非が議論されている。

核燃料サイクルから発生する、放射性廃棄物

- レベル放射性廃棄物：再処理から発生するガラス固化体
- TRU廃棄物：再処理から発生する廃棄物
- 低レベル放射性廃棄物：再処理及び原子力発電所の運転から発生する廃棄物（ウラン廃棄物も含む）

核燃料サイクル



出典：原子力規制委員会（平成25年）、ウラン廃棄物処分の考え方より引用

Points of learning

❶わが国の**原子力政策で最も重要**かつ基盤となるのが1967年に政策決定された**「核燃料（原子燃料）サイクル」**である（上図）。

❷核燃料サイクル施設の内、**ウラン濃縮工場、再処理工場、MOX燃料加工工場**が**青森県六ヶ所村に建設**されている。

❸**核燃料サイクルで重要**な事項は、再処理から発生する**プルトニウム**に対する**セキュリティと保障措置**となる。

❹この核燃料サイクルからは**放射性廃棄物**が発生するがその対応については**核燃料サイクル**には**含まれない。**

第1章

わが国における放射性廃棄物の種類と特徴を知る

この章では、わが国の原子力エネルギー利用の国家政策である核燃料サイクルの推進から発生する放射性廃棄物、その他の発生源の違いによる放射性廃棄物の種類と濃度区分の考え方、発生源別の処分実施主体、予測発生量などについて、概括的な知識として理解する。

ここがポイント!

1.1 ● 核燃料サイクルとは? » そこから発生する放射性廃棄物の種類とは?
1.2 ● 放射性廃棄物の主要発生源とは? » 放射線濃度分類による廃棄物の区分とは?
1.3 ● 各種放射性廃棄物の管理と処分実施主体はどこになる?
1.4 ● 今後発生する可能性のある放射性廃棄物の種類と量は?

これだけは憶えておこう！

第1章 振りかえりチェックシート

第1問	わが国の原子力政策で最も重要かつ基盤となるのは、1967年に政策決定された　　である。
第2問	核燃料サイクル施設の内、ウラン濃縮工場、再処理工場、MOX燃料加工工場は　　県　　に建設されている。
第3問	核燃料サイクルで重要な事項は、再処理から発生するプルトニウムに対する　　と　　と、　　となる。
第4問	わが国で発生している放射性廃棄物の主たる発生源の種類は、大きくは　　廃棄物と　　廃棄物に分類される。
第5問	このほかには、福島第一原子力発電所の除染廃棄物があるが、その区分や処分方法については　　。
第6問	原子力発電所の運転と廃止措置から発生する廃棄物（福島第一の廃止措置は含まない）の管理実施主体は　　である。
第7問	海外に委託した再処理からの返還廃棄物と六ヶ所村での再処理施設の稼動及び施設解体から発生する廃棄物の管理実施主体は　　である。
第8問	ウラン廃棄物は、①製錬工場（粗製錬及び精製錬）、②転換工場、③ウラン濃縮工場、④再転換工場、⑤成型加工工場、⑥　　等から発生するが、その管理実施主体は、　　である。
第9問	わが国で計画している地層処分の対象となる廃棄物は、「　　に関するる法律」において　　（ガラス固化体）と（TRU廃棄物）と規定されている。
第10問	地層処分する廃棄物は、2007年に改訂された原子炉等規制法において、　　に相当する廃棄物である。

リテラシー確認テスト

【問題①】 地層処分が選択されてきた経緯について、高レベル放射性廃棄物の特徴を踏まえ述べよ。

【問題②】 高レベル放射性廃棄物の対策として、地層処分と長期貯蔵の違いを述べよ。

【問題③】 地層処分の長期安全性確保の方策について述べよ。

HINT ヒント

【問題①ヒント】
関連見直しページ：〇ページ、〇ページ
関連キーワード　：放射能濃度、減衰、地質環境

【問題②ヒント】
関連見直しページ：〇ページ、〇ページ
関連キーワード　：地質、ウラン、ドラム缶

【問題③ヒント】
関連見直しページ：〇ページ、〇ページ
関連キーワード　：金属腐食、塗料、地下深度

【問題①解答例】

高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性核種の放射能濃度は、時間の経過とともに減衰していくが、毒性は長期間持続するため、将来の人間の健康を防護するには、人間の関与を必要とせず人間環境から確実に隔離する必要がある。隔離する方策は様々存在するが、隔離作業時の安全性、社会の受け入れ性、技術的な信頼性の観点から地下深部に廃棄物を埋設する地層処分が選択されている。その背景には、安定した地下の環境が本来的に有する物質を閉じ込める能力の存在がある。地層処分は、人間の関与に依存することなく安全性を確保できる仕組みであり、原子力エネルギーを利用した現世代が、将来世代への負担を低減できる方策として考えだされた。

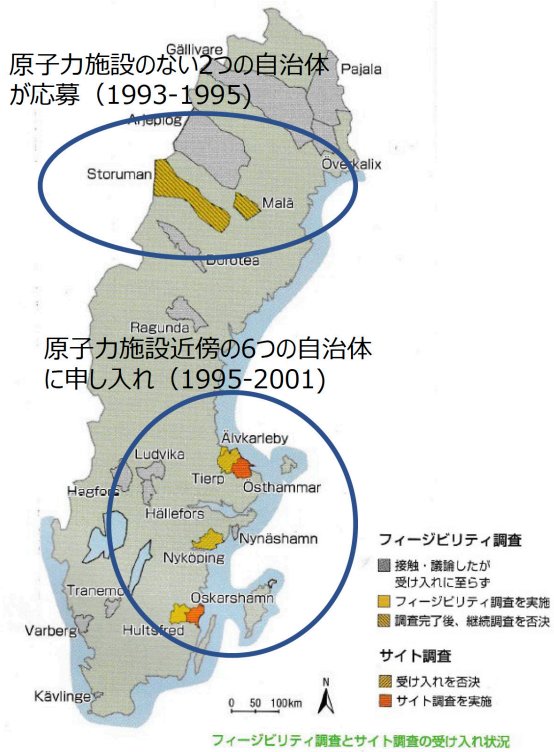
column

地層処分場の候補地を公募するも最終的には申し入れへ
―スウェーデンの場合―

処分地選定の経緯

地層処分の実施主体であるSKB（スウェーデン原子力公社）は、1983年にKBS-3レポートを国に提出し、議会で承認されたことを受け、1980年代後半からラジオ等のメディアを通じ、概要調査地区の公募を開始した。スウェーデンの北部に位置するストルーマン、マーラの2カ所が挙手したが、地域住民の強い反対運動がおこり、住民投票の結果公募を取り下げた。その後、公募方式に加えて申し入れ方式を採用し、既存の原子力施設が存在する地域も含め6カ所に申し入れをおこなった。

さらに、6カ所の処分実現可能性を検討した結果、オスカーシャム（地下研究施設HRL、使用済燃料貯蔵施設CLABが存在）、エストハンメル（原子力発電所、低レベル処分場SFRが存在）ティーエルプの3地点を選定した。ティーエルプでは議会での反対があったため、オスカーシャムとエストハンメルでの概要調査を2002年に開始、2009年、SKBはエストハンメルのフォスマルクを処分予定地として選定した。結果的に原子力施設が20年以上にもわたり存在した地域が選定された。



フィージビリティ調査とサイト調査の受け入れ状況

資源エネルギー庁（2020）、諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分についてに一部加筆

選定が成功裏に進んだ要因

スウェーデンの処分地の選定が当初の公募では決まらかったものの、スムーズに進んだ要因にか以下の事があると考えらる。

①1970年代の政府主導の検討で示された地層処分実現に向けてのロードマップの存在
②1976年の法律による原子力発電事業者の処分と資金確保の責任の明確化
③使用済燃料の中間貯蔵施設（CLAB）の安全な運用
④SKBが3年ごとに公表する規制主体と国の機関がレビューした研究計画書（RD&DProgramme）の存在

スウェーデンでは、初期の公募方式では選定作業が進まず、戦略を原子力施設近傍の自治体への申し入れ方式に変更し、地元との協議を経て選定の最終段階にまで進めることができている。原子力エネルギー利用への理解がある地域に限定したこと、長年にわたり原子力施設が安全に運営されてきたこと、情報が常に公開されてきたことがその大きな要因だ。

Column

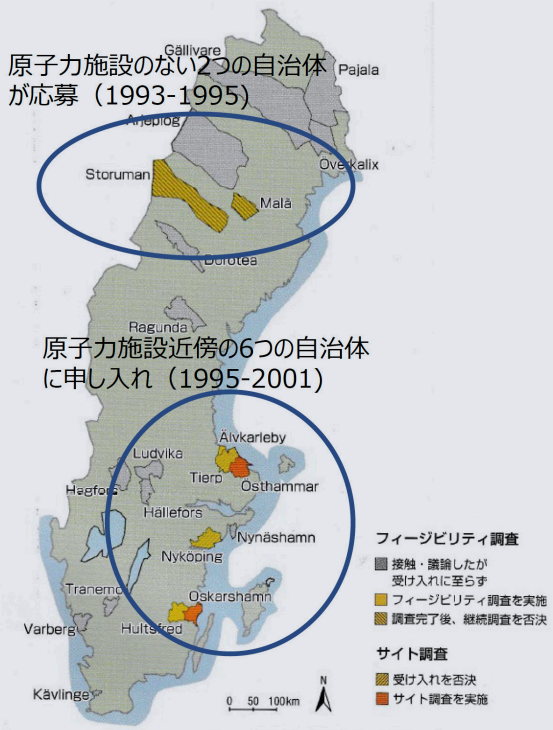
地層処分場の候補地を公募するも最終的には申し入れへ

―スウェーデンの場合―

■ 処分地選定の経緯

地層処分の実施主体であるSKB（スウェーデン原子力公社）は、1983年にKBS-3レポートを国に提出し、議会で承認されたことを受け、1980年代後半からラジオ等のメディアを通じ、概要調査地区の公募を開始した。スウェーデンの北部に位置するストルーマン、マーラの2カ所が挙手したが、地域住民の強い反対運動がおこり、住民投票の結果公募を取り下げた。その後、公募方式に加えて申し入れ方式を採用し、既存の原子力施設が存在する地域も含め6カ所に申し入れをおこなった。

さらに、6カ所の処分実現可能性を検討した結果、オスカーシャム（地下研究施設HRL、使用済燃料貯蔵施設CLABが存在）、エストハンメル（原子力発電所、低レベル処分場SFRが存在）ティーエルプの3地点を選定した。ティーエルプでは議会での反対があったため、オスカーシャムとエストハンメルでの概要調査を2002年に開始、2009年、SKBはエストハンメルのフォスマルクを処分予定地として選定した。結果的に原子力施設が20年以上にもわたり存在した地域が選定された。



フィージビリティ調査とサイト調査の受け入れ状況

資源エネルギー庁（2020）、諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分についてに一部加筆

■ 選定が成功裏に進んだ要因

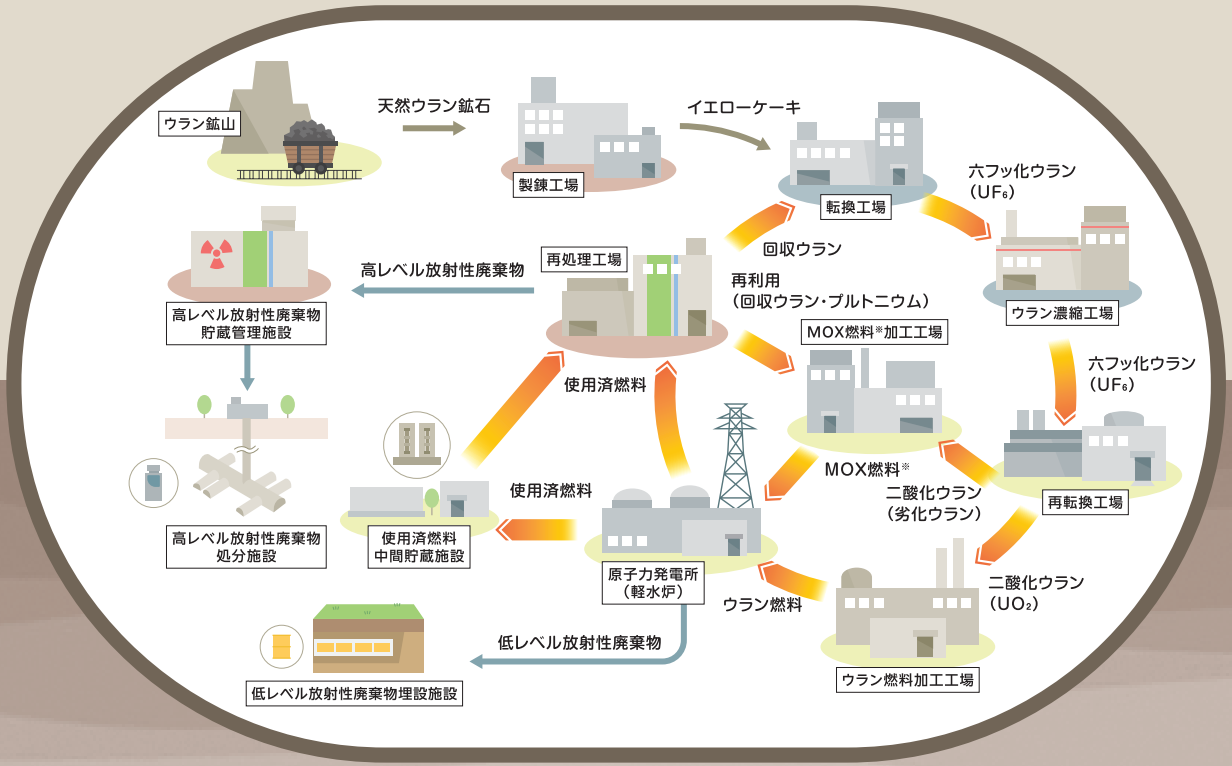
スウェーデンの処分地の選定が当初の公募では決まらかったものの、スムーズに進んだ要因にか以下の事があると考えらる。

①1970年代の政府主導の検討で示された地層処分実現に向けてのロードマップの存在
②1976年の法律による原子力発電事業者の処分と資金確保の責任の明確化
③使用済燃料の中間貯蔵施設（CLAB）の安全な運用
④SKBが3年ごとに公表する規制主体と国の機関がレビューした研究計画書（RD&DProgramme）の存在

スウェーデンでは、初期の公募方式では選定作業が進まず、戦略を原子力施設近傍の自治体への申し入れ方式に変更し、地元との協議を経て選定の最終段階にまで進めることができている。原子力エネルギー利用への理解がある地域に限定したこと、長年にわたり原子力施設が安全に運営されてきたこと、情報が常に公開されてきたことがその大きな要因だ。

ぜひ、あなたになってほしい！“地層処分のジェネラリスト”

地層処分のリテラシー育成教材



広範な基礎知識を包括的かつ
体系的に勉強できる。

（公財）原子力環境整備促進・資金管理センター　編

2021 年度人材育成セミナー

地下研から学ぶ！
～データの準備・解釈・伝え方～
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企画・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、来年度以降の人材育成セミナーの改善を行ってまいります。
ぜひ、アンケートにご協力ください。

※設問 1～4 は 2 日目のセミナー全体ふりかえり（10 月 12 日　15：00～）の時間内で記入してもらいます。

後日、アンケート電子ファイルを事務局宛にご送付下さい。**提出期限：１０月２９日（金）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。

1：イントロ／話題提供

1 日目の**イントロ・話題提供「包括的技術報告書に関する科学技術分野間の相互理解へのチャレンジ」**（座学）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）
1.1 地層処分が選択されてきた経緯についてあなたは知っていましたか。	5：知っていた 4：ある程度知っていた 3：どちらでもない 2：あまり知らなかった 1：知らなかった		
1.2 NUMO 包括的技術報告書の概要について理解できましたか。	5：理解できた 4：やや理解できた 3：どちらでもない 2：あまり理解できなかった 1：理解できなかった		
1.3 あなたはこれまでに異分野の専門家と仕事をした際に文化の違いを感じたとはありますか。	5：ある 4：ややある 3：どちらでもない 2：あまりない 1：ない		
1.4 異なる専門家と仕事を進める上での安全コミュニケーションの重要性について理解しましたか。	5：理解できた 4：やや理解できた 3：どちらでもない 2：あまり理解できなかった 1：理解できなかった		
1.5 本講義を聴講した結果、今現在あるいは将来のあなた自身の仕事において、気付きや意識しようと感じたものがありましたか？	5：ある 4：ややある 3：どちらでもない 2：あまりない 1：ない		
2.2-6 本講義に関連してさらに聴きたいと思った内容がありましたら記載ください。			

2：地下研究所の役割と貢献

1 日目の**地下研究所の役割と貢献**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）
2.1 あなたはこれまで地下研究所に関係した仕事をしたことがありますか。 （地下研究所に行った経験の有無は問いません）	5：ある 4：少しある 3：どちらでもない 2：あまりない 1：ない		
2.2 ジェネリックな地下研究所とサイトスペシフィックの地下研究所の役割が違うことについて知っていましたか。	5：知っていた 4：ある程度知っていた 3：どちらでもない 2：あまり知らなかった 1：知らなかった		
2.3 グループディスカッションをした結果、ジェネリックな地下研究所とサイトスペシフィックの地下研究所の役割の違いについて理解が深まりましたか。	5：深まった 4：やや深まった 3：どちらでもない 2：あまり深まらなかった 1：深まらなかった		
2.4 ジェネリックな地下研究所で実施される研究開発において、どのようなことが一番重要と考えますか。			
2.5 座学+グループワークで学んだこと、議論した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		

3：JAEA 幌延深地層研究センター視察

2 日目のバーチャル方式による**幌延深地層研究センター視察**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）**
3.1 これまでに幌延深地層研究センターの地下坑道に入ったことはありますか。	（どちらかを選択して（残して）ください） （　はい　　いいえ　）		
3.2 バーチャル見学は興味を持てましたか。	5：面白かった 4：やや面白かった 3：どちらでもない 2：あまり面白くなかった 1：面白くなかった		
3.3 バーチャル見学により地下研究所の全体像や試験概要がおおまかに把握できましたか。	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		
3.4（幌延に入ったことがある方のみ） バーチャル見学と実際の現地坑道見学を経験して、あなたが思ったそれぞれのメリットを記載ください。	（バーチャル見学） （現地坑道見学）		

4：THMC 連成現象と人工バリア性能確認試験

2 日目の **THMC 連成現象と人工バリア性能確認試験**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）
4.1 人工バリアの変遷についての理解が深められましたか。		5：深まった 4：やや深まった 3：どちらでもない 2：あまり深まらなかった 1：深まらなかった		
4.2 人工バリア性能確認試験を行った背景・狙いについて理解できましたか。		5：理解できた 4：やや理解できた 3：どちらでもない 2：あまり理解できなかった 1：理解できなかった		
4.3 地下研究所の現場試験でのデータ解釈においては様々なことに留意する必要性があります。あなたはこのような現場を通じた経験が自身の研究や業務に役立つと思いますか。		5：今役立つ 4：近いうちに役立つ 3：数年後に役立つ 2：いつかは役立つ 1：あまり役立たない		
4.4 演習「一次元熱伝導解析」	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		
	現地試験結果との比較を通じて、モデル改良の重要性を実感できましたか。	5：実感した 4：やや実感した 3：どちらでもない 2：あまり実感できなかった 1：実感できなかった		

5：セミナー全般に関して

5.1：グループでの作業について

今回のセミナーでは一部で、グループ毎で作業を行いました。グループでの作業に対する感想について伺います。

	5段階評価	回答	ご意見記載欄
5.1-1 自分は「主体的」にグループの作業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）
5.1-2 グループメンバー全体でのグループでの作業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）
5.1-3 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）
5.1-4 普段接しない異なる専門家とのグループでの作業を経験したことで、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？	5：あった 4：少しあった 3：どちらでもない 2：あまりなかった 1：なかった		（なぜそう思いましたか）
5.1-5 オンライン会議形式のグループの作業は問題なく実施できましたか。	5：問題なくできた 4：ある程度問題なくできた 3：どちらでもない 2：少し問題があった 1：問題が多かった		（なぜそう思いましたか）

5.2：オンライン会議形式のセミナーについて

今回のセミナーは、新型コロナウイルス感染症に伴う緊急事態宣言の状況を鑑みて、対面式ではなくオンライン会議形式で行うこととなりました。
オンライン会議形式でのセミナー開催に対する感想について伺います。

	５段階評価	回答	ご意見記載欄
5.2-1 インターネット通信状態やパソコンの技術的トラブルがありましたか。	5：問題なく受講できた 4：ある程度問題なく受講できた 3：どちらでもない 2：受講において少し問題があった 1：受講するには問題が多かった		（なぜそう思いましたか）
5.2-2 オンライン会議形式のセミナーをより良く実施できるようにするためのアイデアがあれば記載ください。	（あなたのアイデアをご記入下さい）		
5.2-3 今後、通常の生活に戻った場合はオンライン会議形式のセミナーではなく対面式のセミナーに参加したいでか。	5：対面式のセミナーに参加したい 4：なるべく対面式で参加したいがオンライン形式での参加も残してほしい 3：どちらでもない 2：どちらかというとオンライン形式で参加したい 1：オンライン形式で参加したい		（なぜそう思いましたか）

5.3：セミナーの満足度・気付き

今回のセミナープログラムではジェネリックな地下研の役割と連成現象と人工バリア性能確認試験を取り上げ、講義や演習、グループワークを通じて学ぶ流れでした。

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）
5.3-1 全体として		
5.3-2 資料や講師のお話		
5.3-3 現場視察（バーチャル見学）		
5.3-4 計算演習（熱伝導解析）		
5.3-5 少人数グループでの話し合い		
5.3-6 開始前の参加者自己紹介		
5.3-7 講師との質疑応答だけでなく、理解したことや疑問を言葉にしてグループ参加者と共有する時間を取り入れる点		
5.3-8 セミナー進行		
5.3-9 セミナーで扱うテーマ		

6：あなた自身について

最後に、あなた自身について教えてください。

6.1 年代	歳代（20,30 などを記入）
6.2 最終学歴（学士、修士、博士）	
6.3 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
6.4 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
6.5 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）
6.6 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）
6.7 自組織への帰属意識と対外関係 6.7.1　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
6.7.2　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）
6.7.3　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）

アンケートは以上です。ご協力ありがとうございました。