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

（２０２２年度分）

２０２３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 2022 年度及び 4 カ年の成果を取りまとめたものです。

（※本事業は 2019～2022 年度の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 2022 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：東京大学　高橋　嘉夫 14

2.1.6 実施研究 6　研究者：京都大学　久保　大樹 16

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 18

2.2 評価委員会による 2022 年度の研究成果に対する評価 20

2.2.1 第 1 回評価委員会（中間報告） 20

2.2.2 第 2 回評価委員会（最終報告） 21

2.3 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テーマの実施に関する 4 年間のまとめ 36

3. 人材育成プログラムの実施・作成 41

3.1 実施方針 41

3.1.1 前提・背景及び今年度の実施概要 41

3.1.2 実施体制 42

3.1.3 本事業におけるジェネラリストの定義 44

3.2 教材の作成 48

3.2.1 昨年度までの実施内容と今年度の実施計画 48
3.2.2 リテラシー教材作成の今年度の実施内容 49
3.3 2022 年度の人材育成セミナーの開催 63
3.3.1 これまでのセミナー開催経験からの考察 63
3.3.2 2022 年度のセミナーの開催方針 66
3.3.3 人材育成セミナーの内容の検討 67
3.3.4 人材育成セミナーの開催に向けての準備等 75
3.3.5 人材育成セミナーの開催 80
3.3.6 アンケート結果の整理及び考察 90
3.4 人材育成プログラム開発の 4 年間のまとめ・成果・今後の課題等 112
3.4.1 教材作成の成果・課題、今後必要な作業等 112
3.4.2 人材育成セミナーの開催 114
3.4.3 地層処分人材育成について 124

別添資料 1　実施研究報告
別添資料 2　実施研究の総括
別添資料 3　地層処分に関するポータル教材の構成（学習指導要領）
別添資料 4　地層処分に関するリテラシー育成教材（試作版）
別添資料 5　2022 年度人材育成プログラムモニターアンケート

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ヵ年程度で実施する。

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する。

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、2022 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

2022 年度は、4 か年の最終年度にあたるため、人材育成プログラムの作成でこれまで行ってきた教材作成及びセミナー開催のまとめを含め、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。
- 地層処分に関するリテラシー育成教材を作成する。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、昨年度実施した教材としての構成・デザインなどの見直しを教材全体に反映する。
- 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、印刷用版下、ホームページ等掲載用 pdf ファイルを作成する。
- 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、安全評価を題材とし、幌延深地層研究センターのサイト見学、グループワーク等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、及び年度末に研究開発内容・進捗状況に関する報告を研究実施者に行わせ、有識者による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、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。このほか、今年度の実施計画や 2 ヵ年の成果の取りまとめ方針等について意見交換を行うため、大学等への訪問による打ち合わせを行い、進捗管理を実施した。なお、今年度で 2 ヵ年の研究期間が終了することから、研究実施者には、研究成果の概要をまとめた総括の作成を依頼した。

以下の 2.1 節において、以下に示す 7 件の研究テーマの 2022 年度の成果概要を、2.2 節では評価委員会における 2022 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 2022 年度報告書については別添資料 1 に、2 ヵ年の研究成果概要となる総括については別添資料 2 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：東京大学　高橋　嘉夫〕[c]

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 2022 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及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。

＊＊＊＊＊

（2022 年度の実施計画）

2022 年度は、塩分を含む地下水によってトンネルの鋼製支保工が腐食減耗した際の影響を把握するために、鋼製支保工の減耗を模擬した載荷実験を行う。また、塩害腐食による鋼製支保工の減耗が坑道安定性に及ぼす影響を把握することを目的とし、軟岩（新第三紀堆積岩）地山内に建設される処分坑道を模擬した坑道の掘削解析を行い、さらにその解析を基に減耗を考慮した鋼製支保工の応力解析を実施する。また、沿岸海底下等の海水の直

[c] 本研究テーマは 2020 年度に筑波大学に所属していた向井広樹氏が提案・応募し、選考を経て採択された。2021 年度から向井氏が研究を実施していたが、2022 年度に向井氏が東京大学へ異動し、諸事情により研究代表者が変更となった。

下及びその近傍に処分パネルが建設される場合の、高湿度・塩分環境下での坑道内附帯設備及び覆工（支保工）などへの塩害の程度を明らかにするために、処分施設に用いられる可能性があるレールに対する腐食試験（恒温恒湿腐食試験）を実施する。

＊＊＊＊＊

（2022 年度の成果概要）

鋼製支保工の減耗を模擬した載荷実験によるトンネル耐荷力に及ぼす影響把握については、下フランジ厚さが異なる鋼製支保工とコンクリートの合成構造物を対象として載荷実験を実施した。その結果、最も健全な鋼製支保工の状態において最も終局耐力が大きくなり、鋼製支保工の厚さが小さくなるにつれ、終局耐力も低下した。塩害腐食によって下フランジが 1/2 まで減耗した場合、健全な鋼製支保工と比べ耐荷力が約 6 割に低下することが示唆された。

鋼製支保工の減耗を模擬した数値解析によるトンネル支保工に及ぼす影響把握については、解析の結果、減耗の程度が顕著なほど鋼製支保工の内縁側・外縁側の圧縮応力が卓越し、その傾向は地山等級が低下するほど顕著になることが明らかとなった。また、地山等級が良好な場合や鋼製支保工が健全な場合には、鋼製支保工は地山からの荷重を軸力によって受け持つ一方で、地山等級が低下した場合や鋼製支保工が不健全な場合には、鋼製支保工に軸力に加え、曲げモーメントが発生することが示唆された。

塩害に関する検討については、レールを対象として腐食試験（恒温恒湿腐食試験）を実施し、レールのさび厚の測定及び減耗量の測定を行った。その結果、日平均飛来塩分量 0.2mg/dm²/day（mdd)の条件で塩分を噴霧したレールは、すべての測定箇所において概ね経時的に平均さび厚が増大し、レールの頭頂部、脚部、腹部の順に平均さび厚が大きくなる結果が得られた。レールの減耗量を調査した結果、塩分を噴霧したレールは、実験開始から 173 日経過後に約 30～35μm 腐食減耗した。その一方で、塩分を付着させないケースでは約 10μm 以下の減耗量にとどまる結果となった。

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。

＊＊＊＊＊

（2022 年度の実施計画）

2022 年度は、白崎・細越・黒石産の 3 種類のベントナイト原鉱石を対象として、不攪乱供試体の膨潤圧及び膨潤変形率について追加計測を実施する。また、月布・Ten Sleep・劉房子産原鉱石を対象として、地質年代に代わる代替指標の模索の一環として、非破壊力学試験である弾性波試験を実施する。膠結作用のメカニズムの追究に向けては、これまでの月布産原鉱石の不攪乱試料に加えて、今年度は新たに月布産原鉱石の再構成試料や、Ten Sleep 産、及び地質年代の古い劉房子産原鉱石の不攪乱試料・再構成試料について薄片試料を作製し、走査電子顕微鏡（SEM）観察を通して粒子構造や含有鉱物の観点から考察を行う。さらに、以上の成果を統合し、自己修復性評価手法の高度化について検討する。

＊＊＊＊＊

（2022 年度の成果概要）

白崎産・細越産・黒石産の不攪乱供試体の膨潤圧試験の結果、すでにデータが得られている再構成供試体と比較して、膨潤圧特性が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った。この結果はこれまでに実施した Na 型ベントナイト原鉱石の膨潤特性の結果と同様の傾向となった。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。

月布・Ten Sleep・劉房子産の 3 種類の原鉱石を対象とした、弾性波試験の結果、P 波・S 波速度のいずれも再構成供試体と比較して不攪乱供試体の方が速く、不攪乱供試体の内部構造が緻密であることを示す結果が得られた。しかしながら、3 種類の供試体の弾性波速度と年代や膨潤特性の間で明確な相関がみられなかったことから、他の代替指標を模索する必要がある。

不攪乱試料・再構成試料の薄片試料について SEM 観察とエネルギー分散型 X 線分光法（EDS）分析を行ったところ、粒子・鉱物構造として不攪乱供試体の方がミクロ・マクロの両方の視点で見て緻密であることが示された。また、EDS 分析による元素マッピングの結果から、膠着物質としてシリカ系鉱物が有力であることが示唆された。

月布産・Ten Sleep 産・劉房子産原鉱石について実施した膨潤特性実験結果に基づき、拘束圧－乾燥密度の関係と緩衝材の状態変化シナリオと組み合わせることで、膠結作用に伴う特性低下を考慮した緩衝材の自己修復性評価手法を提案した。これにより、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。

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。

＊＊＊＊＊

（2022 年度の実施計画）

2022 年度は、ベントナイトの膨潤特性と透水特性に及ぼす化学的作用の影響を明らかにするために、各種溶液環境下における膨潤・充填性同時試験及び透水試験を昨年度に引き続き継続して実施し、ベントナイトの膨潤圧、隙間充填量及び透水係数を取得する。また、長期的な岩盤へのベントナイト侵入挙動を予測するための岩石亀裂充填性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を行う。

＊＊＊＊＊

（2022 年度の成果概要）

NaCl 水溶液及び（国研）日本原子力研究開発機構（JAEA）幌延深地層研究センターで採取された地下水を用いた膨潤・充填性同時試験の結果、いずれも精製水に浸漬させた条件と比較してベントナイトの膨潤圧と侵入距離が小さくなることが分かった。特に NaCl 水溶液への浸漬ベントナイトの膨潤圧は大きく低下し、ほとんど模擬亀裂に侵入していなかったため、NaCl 溶液条件ではベントナイトが亀裂等の隙間を充填させる効果が期待できないことが示唆された。膨潤・充填性同時試験より得られた結果から、ベントナイトの

平衡膨潤圧、亀裂侵入距離、亀裂開口幅と材料に依存する比例定数の間には、非常に強い相関関係があることがわかった。

ベントナイト試料の透水試験の結果、各種溶液に浸漬させたベントナイトは、精製水に浸漬させたベントナイトに比べて透水係数が上昇した。このことから、地層処分におけるベントナイト系材料が地下水の化学的作用の影響により、透水性能が低下するとともに、接触する地下水の水質によってその劣化度合いが異なることが示唆された。

ベントナイト試料の岩石亀裂充填性のモデル化の改良では、経時変化する外部膨潤圧及び侵入流体（ベントナイト）の粘度を、それぞれ時間の経過とともに指数関数的に上昇または低下するように定式化することで、侵入量予測に関する支配方程式に組み込むことを試みた。解析的検討を行った結果から、地層処分における長期的なベントナイトの侵入は、亀裂中のベントナイトの封入流体吸収・拡散に起因する挙動と判断した。このことから、構築した閉口流路内の流体侵入に関する支配方程式が、地層処分における亀裂中のベントナイトの長期的な侵入挙動を表す可能性があることが示唆された。

幌延泥岩及び万成花崗岩試料を用いた、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結果、岩石の種類によらず各種溶液浸漬ベントナイトで充填された亀裂を含む供試体の透水係数は、いずれも巨視亀裂を含む供試体よりも小さい値を示した。この原因として、透水性の低下は巨視亀裂中のベントナイトのシーリングによるものと考えられる。これらの結果から、亀裂のある岩石の透水性は上昇するものの、割れ目が緩衝材（ベントナイト）でシーリングされることで低下すること、その低下度合いは地下水の化学的作用の影響によって異なる可能性があると示唆された。

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放射性核種の閉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。

＊＊＊＊＊

（2022 年度の実施計画）

2022 年度は月布鉱山の周辺における同一のベントナイト層内での不均質性の評価を行うために、ベントナイト原鉱石のサンプリングを追加実施し、セメント物質の成因を推定するために採取した試料の鉱物学的分析を進める。鉱物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・組織を観察する。また、鉱物組み合わせ、カソードルミネッセンス法による分析、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する。

＊＊＊＊＊

（2022 年度の成果概要）

月布鉱山周辺で採取したベントナイト原鉱石について X 線回折分析、偏光顕微鏡・走査型電子顕微鏡観察を行った結果、月布のベントナイト層の中でも上盤側から下盤側にかけて原鉱石中の沸石相の変化やモンモリロナイト量の変化が確認された。特に下部ではモンモリロナイト量が少なく、空隙が目立ち、その一部が方解石によって充填されている組織が見られた。原鉱石を加圧酸分解し微量元素を質量分析した結果、ベントナイト層内で微

量元素のパターンは類似した結果となったことから、層内のモンモリロナイト量や空隙等の違いは出発物質の火山灰の化学組成ではなく、構成粒子の粒径とそれに伴う空隙率、及び堆積後に反応する海水との混合率に影響されている可能性が示唆された。

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、その粒子の起源や形成メカニズムを明らかにするために、粗大石英及びシリカ微粒子を対象にカソードルミネッセンス法による測定を行った。その結果、火山岩由来の粗粒石英と異なり、シリカ微粒子はより低温の続成過程において形成されたと示唆された。

経験温度の推定のために必要な情報である酸素同位体比について、同位体測定のために酸素を効率的に CO ガス化するためのフッ素化合物との反応性を向上させる検討を行った。7 種類のフッ素化合物による CO ガスの発生効率・収率や作業性を考慮した結果、NaF が最も適していることが分かった。その結果、スメクタイトについては酸素の収率が 90%前後まで向上したものの、石英の測定や正確な酸素同位体比の測定には、更なる反応性の向上が今後の課題となった。

2.1.5 実施研究 5　研究者：東京大学　高橋　嘉夫

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、特に核種の粘土鉱物における吸着・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。

＊＊＊＊＊

（2022 年度の実施計画）

2022 年度は、ユウロピウム（Eu）の脱離実験を多様な電解質溶液を用いて行い、粘土鉱物における Eu の脱離挙動について明らかにする。また、Eu を吸着した粘土鉱物試料について、電子プローブマイクロアナライザ（EPMA）及び透過型電子顕微鏡（TEM）による観察・分析を行い、Eu の粘土鉱物における詳細な分布について直接的に明らかにする。さらに放射性核種（Eu-152）を用いて、黒雲母を対象として極低濃度下で Eu の吸着脱離実験行う。

＊＊＊＊＊

（2022 年度の成果概要）

Eu を吸着させた各粘土鉱物に対して脱離試験を実施した結果、カオリナイトが他の粘土鉱物に比べてはるかに高い脱離率を示し、また、ハイドロバイオタイトが特に低い脱離率を示した。また、0.1 mol/L KCl、0.1 mol/L シュウ酸の順番による逐次脱離実験では、最初の 0.1 mol/L KCl によってカオリナイトからの Eu 脱離が大きく、ハイドロバイオタイトからの脱離が特に低い結果となった。0.1 mol/L シュウ酸の場合は、カオリナイトとモンモリロナイトからほぼすべての Eu が脱離し、黒雲母、ハイドロバイオタイトからも 80~90%程度の Eu が脱離した。

Eu を吸着した粘土鉱物を EPMA で元素マッピングしたところ、pH6.5 での吸着では、黒雲母の場合は、粒子の端付近に Eu がよく濃集している様子が見られた。ハイドロバイ

オタイトでは、黒雲母の場合とは異なり、粒子内部まで Eu が侵入している様子が見られた。一方で、pH8.5 付近での吸着の場合では、Eu は粒子内部に侵入せず表層に濃集していることが明らかとなった。

同様に Eu を吸着した粘土鉱物を TEM で観察し、STEM-EDS で元素分析を行ったところ、黒雲母の場合は、粒子端部においてはおよそ Eu が均質に検出された。また、ハイドロバイオタイトの元素マッピングの結果から K と Eu が逆相関していることがわかった。ハイドロバイオタイトは、黒雲母とバーミキュライトの規則的混合層を形成するため、Eu は特にバーミキュライト層の層間に選択的に侵入していることが示唆された。

Eu-152 を用いた、黒雲母を対象とした極低濃度下で Eu の吸着脱離実験の結果、Eu を pH 5、6.5 で黒雲母に収着させたところ、およそ粒子の端部を中心に Eu-152 がよく濃集していることがわかった。このことから、EPMA や STEM-EDS で観察された、より高濃度（10^{-3} mol/L）で Eu を吸着した場合とおよそ収着サイトは変わらないことが示唆された。

これらの結果は、環境中において黒雲母やバーミキュライトに吸着された Am-241、243 といったアクチノイド系列放射性核種の吸着・脱離挙動の評価に資する可能性があるが、本研究でアナログとして用いた Eu とは別に Am-241、243 といった核種を用いた検討との比較が今後の課題である。

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。

＊＊＊＊＊

（2022 年度の実施計画）

2022 年度は、2021 年度に改良したパーミアメーターを用いて JAEA 瑞浪超深地層研究所で採取されたボーリングコアを対象として浸透率の測定を行い、岩体基質部の水理特性を明らかにする。また、亀裂モデルと水理試験データの統合による水理構造モデルの構築を行う。さらに、構築された水理構造モデルを用いて広域地下水流動解析を実施し、対象地域の既知の情報と比較することにより妥当性の検証を行う。

＊＊＊＊＊

（2022 年度の成果概要）

瑞浪地域のボーリングコアのパーミアメーターによる浸透率測定は、ひとつのコア試料につき 10～20 点の計測を実施した。得られた浸透率を透水係数へ変換し、3D スキャナを用いたコア試料の体積測定と乾燥重量から求めた計測密度を比較したところ、両者は負の相関を示した。この結果から、密度が大きい＝空隙が少なく浸透率が小さいという一般的な解釈と合致する結果が得られ、パーミアメーターによるコア試料の複数点の浸透率測定によって、ある程度妥当にボーリングコア全体の代表的な浸透率を示すことができることが示唆された。

亀裂モデルと水理試験データの統合による水理構造モデルの構築については、ボーリングコアが採取された瑞浪超深地層研究所の MIU-2、3、4 号孔を対象として、既存のボーリング検層データ（岩石・亀裂密度）と水理試験データに実測データを加え、重回帰分析を行うことで、岩石密度と開口亀裂密度を説明変数として透水係数を求める回帰式を得た。この回帰式を、岩石密度・開口亀裂密度の空間分布モデルに適用することにより、亀裂・岩体基質部の構造を統合した複合的な広域的な地下水理構造モデルを構築することができた。

水理構造モデルを用いた広域地下水流動解析については、物理検層データと水理試験値を用いた重回帰式から得られた透水係数分布モデルを用いて、瑞浪地域を対象として地下水流動解析を実施した。その結果、北→南方向のセル間流量を抽出し表示したモデル分布は、対象地域の標高分布に基づいて推定される北東部から南方向への主要な流動方向と整合した結果となった。また月吉断層の東側を境界としてその連続性が遮断されていることから、断層が遮水性境界として機能していることが示唆された。一方、月吉断層西側の深部は比較的大きい南方向の流動が確認できたが、今回の検討により、断層下部側に存在する多数の空隙を持つ領域が流路を形成し、影響していることが明らかとなった。

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。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。

＊＊＊＊＊

（2022 年度の実施計画）

2022 年度は、標準試料の候補 6 試料の内、前年度に分析した 2 試料以外の 4 試料（Mt Dromedary、OD-3、鷲走ヶ岳月長石流紋岩（WSF1)、濃飛流紋岩（Site-43)）について、1 試料当たり 30 粒子のジルコンを対象として ZHe 年代分析を実施する。また、昨年度メルボルン大学において分析し、標準試料としての適性が高いと見込まれている歌長流紋岩（TRG04-21）の試料について、JAEA の分析装置においても測定し、データを比較して信頼性を検証するラウンドロビンテストのための追加試料採取を行う。さらに、ZHe 年代のばらつきの要因を解明するために、単粒子年代と放射線損傷や幾何学パラメータとの相関関係について検討し、ばらつきの要因の定を試みる。

＊＊＊＊＊

（2022 年度の成果概要）

4 試料の年代分析の結果、, Mt. Dromedary ：95.34±2.37 Ma[d] 、OD-3 ：29.76±2.44

[d] Ma は百万年前を意味する。

Ma、WSF1： 17.77±1.05 Ma、Site43：は 50.59±2.93 Ma となり、単粒子年代ばらつきを示す MSWD 値は、それぞれ、1.24、12.1、5.38、5.67 であった。

有力な年代標準試料候補の TRG04-21 の追加試料採取については、同一の現地の露頭で 100 kg 程度のサンプリングを実施し、その内 21 kg 程度の地質試料について鉱物分離を行った。その結果、1.154g のジルコンを抽出でき、十分量を確保した。JAEA の分析装置の不具合のため追加の ZHe 分析は実施できなかったが、今後、JAEA での分析とともに、国外の研究機関に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ことが課題である。

年代のばらつきについて考察するため、ジルコン粒子の放射線損傷と年代、及びジルコン粒子の粒径と単粒子年代の相関関係について検討したところ、両者とも有意な相関が無かったため、ばらつきについては別の要因である可能性が示唆された。

以上の結果から、候補 6 試料の中で、歌長流紋岩から分離した TRG04-21 試料が ZHe 年代標準試料として最も適当であり、次いで Mt. Dromedary についても適性が認められた。今後は詳細な化学組成分析や包有物の特定などの評価を含めて、標準試料ジルコンとしての適性についても検討を深めていくことが課題である。

2.2 評価委員会による 2022 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 ヵ年の期間で研究を実施する 7 件の研究テーマについて、2022 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）ほか 6 名の委員で構成）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。評価委員会は、年度中 2 度開催し、第 1 回を中間報告と位置づけ、第 2 回を最終報告とした。以降に今年度実施した評価委員会によるチェックアンドレビューの実施内容を示す。

2.2.1 第 1 回評価委員会（中間報告）

2022 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。

2022 年度　第 1 回評価委員会 日時：2022 年 9 月 26 日（月）　10：00～15：30 場所：オンライン会議（事務局：当センター第 2 会議室）

中間報告では、各研究者から 2022 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などの目的でオンライン会議形式で実施した。

各研究者には、以下を含めた資料を作成し説明するよう依頼した。

・研究背景・目的

・全体計画、2022 年度計画

・2021 年度の実施内容

・2022 年度年度のこれまでの進捗

・2022 年度後半の計画

研究者による発表に対して、各委員には 2022 年度の中間報告時点までの研究進捗に対する評価、及び当該研究に関する今後の実施に向けた意見を自由に記入してもらった。評価結果は、2022 年度後半の研究実施等に資するため、取りまとめた上で各研究者に送付した。

2.2.2 第 2 回評価委員会（最終報告）

2022 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。

2022 年度　第 2 回評価委員会 日時：2023 年 2 月 27 日（月）　10：00～16：00 場所：オンライン会議（事務局：当センター第 2 会議室）

最終報告では、各研究者から 2022 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。研究者には、以下を含めた発表資料を準備するよう依頼した。

・研究背景及び目的

・2021 年度の成果

・2022 年度の実施内容・成果

・2 年間の研究成果（総括）

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などの目的で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 5 段階（5（高い）～1（低い））で評価点数を付け、また 2022 年度の研究内容等に対する意見、今後の研究の方向性等に対する助言等を自由意見として記入する形式で行った。

- 実施研究は当初計画を達成したか
- 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

なお、最終報告に対する評価結果は、今後の研究実施等に資するため、各研究者に送付した。

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。

2022 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）
・実施研究は当初計画を達成したか	4.1
・実施研究は新規性・独創性があるか	4.0
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.9

自由意見	・ 実環境で期待する期間に対して，どのように設計施工すれば健全性が保たれるのか、健全性に影響を与える腐食の影響はどの程度であり、今後何を検討すればそれがわかるのか、今のところ良い答えが見当たりません。道路トンネルの要求性能はどのように定められているのか、孔壁ではなくコンクリート中の鉄鋼支保工の腐食劣化は、これまでの経験ではどうなっていて、酸素を含む地下水や塩水が供給される場ではどのくらい腐食が進行しやすくなるのか、等、「何が知りたいのか」を整理して今後の研究を進めていただければと思います。 ・ 塩水による支保の腐食は重要な問題であり、その評価に関するものである。事象に関して支保の減肉を元に評価を実施しているが、現場の事例の観察をもっと詳細に行い、減肉以外にも腐食生成物の膨張・コンクリート空隙の閉塞・圧縮等の影響についても検討を加え、それらの影響を定性的・定量的に評価する必要があると感じた。 ・ 「外力発生の有無とトンネル周辺地質との関係」や「漏水発生の有無」では、変成岩が有意に大きな割合を示していますが、岩石の種類別だけでなく、もう一歩踏み込んで、何に原因があるのか、例えば、変成岩ならば異方性が効いているかなど、今後どのように対策すれば、よりよい方向に向かう可能性があるのかまで、追求していただけるとよいと思いました。 ・ 「漏水発生の有無とトンネル周辺地質との関係」においては，NATM でも 20 年以上経過したものは割合が高くなる傾向にあることを、委員会では施工方法の高度化も考える必要があるとのお話しでした。結果だけが一人歩きしないように、そのあたりについては適切な記述で最終報告書に記載していただけますようお願いしたいです。 ・ 今回は鋼製支保工の腐食を扱われていましたが、NATM ではロックボルトも重要な構成要素です。これの腐食や、鋼製支保工との関係（受け持つ分担荷重の変化）などについても合わせて、検討していただけるとよいと思いました。 ・ 岩種、施工方法、土被り、経年によって、漏水の有無の整理ができたことは大きな成果となる思います。これらの原因調査がさらに進むことが期待されます。

	・ 支保工の耐荷力に及ぼす塩害腐食による減耗の影響が明確に実験的に示すことができている。その対策についても言及されています。 ・ 解析では実験によって見られた剥離などは考慮できていないことから、連続体としての取り扱いの限界を含めて解析手法自体についても今後検討し、曲げモーメントの発生などを解析に入れていく必要があると考えます。その方向性についても報告書に記載していただければと存じます。 ・ レールによる腐食量から、地下水の塩分状況の把握や漏水対策の重要性が示され、実験手法の確立に寄与している。前回も指摘させて頂いたように、データを蓄積して速度論的に（化学反応工学的に）考察するのもといいかと思います。 ・ この 2 年間での研究として、従来トンネルの情報の整理及びそれらに基づいた実験研究によって、初期の成果が得られていると判断・評価します。一方で、従来トンネルの知見に関しては、地質情報、地下水（特に成分）についてのリンク、総合取りまとめが未だ不十分の部分は取りまとめの際にさらに意識していただければと思います。また腐食による強度低下については、地層処分におけるどの時空間のどういった現象を模擬していると理解しているのか、そのアナログ性などを意識していただければと思います。さらに、腐食などの地球化学的なアプローチが不十分なので、ぜひ、今後それらの専門家とのリンクも含め、意識して展開されることを期待します。 ・ 実存トンネルを対象としたデータ集積とその分析からは実証的かつ実際的な結果を導き出していることを評価いたします。一方、鋼材の塩水による腐食実験が事故防止の観点からレールの腐食に限定され、前半のトンネルの安定性評価には直接の繋がりが見えません。塩水腐食がトンネル安定性に対して重要な評価項目であるかどうか、例えば、海底トンネルのデータに着目して支保工やロックボルトの腐食が影響を与えているかどうかを分析する、あるいは、解析的にこれらの腐食がトンネル安定性に影響を与える可能性があることを示す、という方向があれば、鋼材の腐食が重要な評価因子であることが明確になると思います。 ・ トンネル点検のビッグデータをとりまとめて、それらと地質環境など周囲の緒環境との関係を分析して、更に解析や実験に進んでいく研究手法は素晴らしいものと感じました。この研究手法は地層処分を含めて様々な分野に活用できるものと思います。今後の研究発展を大いに期待します。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2022 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）
・実施研究は当初計画を達成したか	3.9
・実施研究は新規性・独創性があるか	4.1
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.6

自由意見	・ ベントナイト試料については、膠結作用の進展とともに、自由水が絞り出され、アモルファスシリカによるセメンテーションが進行するとして、それが周囲の温度と水の活量（湿度、地下水）との関連のもとでどの程度進行すると考えるのか。粘土鉱物における膠結作用は、鉱物の変質と比べてどのくらい不可逆的な反応なのか。ご研究の結果から見ると、膠結反応では、外部の圧力の増加と水の活量の減少により層間のイオンに水和していた水が絞り出され、層間が狭められ、外部からの水が浸入できなくなっているだけのように見えます。膠結反応では、水のみが出入りしていて、再構成すれば水が接触でき浸入できる表面積が増えて可逆的に膨潤圧が得られると考えれば、割れ目などが生じても地下水が来れば自己修復が起こると考えられるのではないでしょうか。膠結作用により水のみが出入りしているのか、粘土鉱物とアモルファスシリカの割合に変化があるのかを整理していただければ、よいストーリーが見えてくるように思います。 ・ 圧密ベントナイトの施工時の検査基準として音速が良い指標になることが示されている。膠結作用がシリカ系鉱物によることを解明している。評価においては、コンクリートからのシリカ系鉱物の侵入を考慮していないので、今後これも評価する必要がある。 ・ 乾燥密度を中心としてデータ整理をされていますが、膨潤圧や膨潤変形率は間隙水と粘土鉱物との相互的な関係であると思いますので、間隙率、間隙径分布、比表面面積などをパラメータとして整理したほうが、現象理解につながるように思います。 ・ P 波 S 波の速度測定では、飽和度との関係の一般的な傾向を踏まえたほうがよいと思います。P 波と飽和度の関係は、線形ではなく V 字のような形となること、また飽和度 100%では水自体の P 波速度に近くなる傾向にあります。また S 波は液体の中を通りにくいことを踏まえると、変形しなければ飽和度に関係なく一定となる傾向があると思います。 ・ 弾性波試験結果において、s 波速度と乾燥密度や飽和度との相関が多くの試料について明確になっています。これらの一連の結果は膠結作用による緻密化が関係していることは直観的には理解できますが、定量的な評価に繋げるための課題の整理をお願いできればより良いと思います。 ・ 膠結物質としてシリカ系鉱物が有力であり、前回の意見交換でもアモルファイルあるいはそれに近いとのご意見でしたが、ケイ素の再分配がなぜ生じるのかについての言及を是非にお願いしたいと思います。 ・ 自己修復についての知見がこれまでの膠結作用の結果を基盤に整理されてき

	たと思います。今後の研究の発展に期待しております。 ・ 2 年間での研究の成果が得られていると判断します。内容に関して言えば、ベントナイトの膨着作用について、できればそのプロセスについて、地球科学、地球化学的な事例も参考にした上で取りまとめを行っていただけるとありがたいと思います。特に、この現象がどれくらいの時間スケールで生じるのか、そのスケール感については、なかなか定量的には言えないとは思いますが、多少でも現象についての時間スケール感が見えてくれば、地層処分におけるこの研究の意義が見えてくるのではと思った次第です。引き続きの研究展開を期待します。 ・ 膨結作用の原因物質がシリカであることまで突き止めた点は非常に良い結果であると思います。一方、再構成試料である「圧縮ベントナイト」が処分の時間スケールの中でどの程度の膨結作用を生ずるのか、時間因子まで遡れなかったのは非常に惜しまれる点です。時間因子がはっきりしないので、「自己修復性評価手法」の密度－拘束圧関係の図も、②の過程でいきなり不攪乱試料の値にまで引き下ろすのは過大ではないかという疑問も残ります。原鉱石がその膨結状態になるまでに相当な時間を経ているはずですが、それを一気に、拘束圧だけで説明するには、もう少し納得できる情報が必要に思われます。ナチュラルアナログの研究では時間因子がどうしても不明瞭になる懸念がありますので、もう一歩踏み込んでいただくと、処分事業への寄与がより一層増すのではないかと考えます。 ・ ベントナイトの膨結作用の原因がシリカ鉱物の生成によるものと分かってきたことは評価できます。ただ、その時間スケールについて（どのくらいの時間が必要か）更に検討を進めて頂ければ、地層処分事業に大いに役立つと思います。今後の発展を期待します。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2022 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）
・実施研究は当初計画を達成したか	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	3.9

自由意見	・ ベントナイトスラリーを亀裂充填材に使う研究が岡山大学らの仕事にありました。また，ベントナイトがエロージョンによりコロイドとして亀裂中に失われるという研究もされています。これらの研究ではどの程度の充填材（非ニュートン流体としてのスラリー）をどのように加えればグラウトとして使えるのかが整理されていると思います。これらとの関係の下に研究を進めていただければよかったと思います。 ・ 岩石への侵入ベントナイトの状況、侵入に伴う透水係数の変化を系統的に調べられており良い結果が得られている。侵入物の鉱物組成・粒径が本体のベントナイトと異なるかどうかの情報も調べて欲しい。 ・ 今回、幌延地下水の実験を加えられたことで、研究の立ち位置がよりはっきりしたように感じます。 ・ モデル化では、支配している現象を簡単な関係として表現することによって、うまく再現されているように思いました。 ・ 委員会でも発言しましたように、今後は実務への敵用を視野に、地下水流動場のある中での挙動についてご検討いただけることを期待しております. ・ 定水位型と変水位型での実験において、透水係数には違いがありましたでしょうか。 ・ 充填物の乾燥密度と透水性との関連について、岩種や間隙構造の違いなども考慮し、更に検討を加えていただければと期待します。 ・ 密度、粘度の低下を考慮するモデルの改良が進み、優れた成果が得られており、更なる詳細な検討により、化学的な作用を含めた課題をも整理できれば、地層処分への寄与が期待できると考えます。 ・ この 2 年間での研究成果が得られていると判断・評価する。一方で、今回の実験研究は、人工的にカットした断面での研究でもあるので、これが天然の亀裂（充填鉱物が存在する場合）での影響についても検討していただければというのと、もう 1 つは、地球化学的（化学的反応プロセス）についても検討いただけると、より地層処分対象岩種に対しての一般的現象として取りまとめられるのでは、と思いました。 ・ 人工構造物と自然環境との接点に着目した研究は独自性があると思います。力学モデルを構築し、実測データの傾向を定性的に説明できるところまで成果がでています。一方、溶液組成がどのような影響を与えるかについては整理が難しい点があり、実測に留まっているのは非常に惜しいところです。例えば、折角モデルを構築したのですから、構築したモデルを実測値にフィットさせることでのパラメータ（γ や η）の値を決め、その値と溶液組成との

	関連を見るなどすれば、何か新しいことが見えてこないでしょうか。 ・ ご報告の中にあった、今後の課題を進めていただけると、新しい視点が生まれて地層処分に大いに役立つと思います。また、時間スケールの話を取り込むことも必要ではないかと思います。今後の研究の発展を期待しています。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2022 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）
・実施研究は当初計画を達成したか	4.4
・実施研究は新規性・独創性があるか	4.7
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	4.0

自由意見	・ 全体目標として挙げられているセメント物質は何か、その特徴・成因・形成環境はという課題に対してよく整理できています。特に火山ガラスから、ある温度・湿度の環境の下で、非常にゆっくりと変質（続成）を受けて、わずかに溶解したシリカがアモルファスシリカやシリカ微結晶とベントナイトを形成して、脱水・膠結していくというあらすじが何となく見えているような気がします。このような変質作用は非常にゆっくりと進むということが示されていて、地層処分の対象とする時間範囲では膠結による水みちの形成は気にする必要はないということが言えるのではないかと思います。 ・ 膠結作用だけでなく、侵食についても情報が得られている。ベントナイトの成因・過程とそれぞれの特質の説明が良くできている。 ・ 当初目的に対して、十分な研究成果が上がっていることを確認しました。大変興味深い多くの成果を出されたと思います。 ・ シリカ微粒子がベントナイト原鉱石に広く見られ、下盤側と上盤側との違い、微細組織観察及びカソードルミネッセンス観察より、シリカ微粒子の低温での生成（アモルファスシリカから続成作用により石英などに転移）が示唆されております。このことは本研究による大きな成果と言えると思います。下盤側と上盤側の年代情報をも併せ、今後、地層処分に掛かる知見として発展していくことも期待したいと思います。 ・ 2 年間での成果が出ていると判断・評価する。一方で、タイトルにもある「ナチュラルアナログ」としての意義と言いますか、反映について、例えば火山ガラス微粒子を人為的に混ぜることで膠着（セメンテーション）作用を高めて、透水性を下げるなど、現在の処分コンセプトにプラスアルファできるような知見を提案するなど、自然から何が学べたかなどを合わせて、今回の研究の意味を提示されたら、より研究の意味が深まるのではないかと思いますので、その辺の検討もよろしくお願いします。 ・ セメンテーションの原因物質が見えてきた良い成果が得られたと思います。モンモリロナイトの端面にシリカ微粒子が結合するメカニズムが単に静電的な力だけで説明できるのかについて解明が進むとセメンテーションの影響を定量的に評価する道に繋がってくると思います。ところで、処分では、わざわざ石英砂をベントナイトに混合する設計を考えていますが、これは「益」なのか「損」なのかを判断するうえで、この研究の成果が応用できるのではないでしょうか。 ・ 研究の幅を広げすぎた感があります。そのため到達できなかった研究項目が発生したものと思われます。特に、野外での固結ベントナイトの耐浸食性の

	研究は面白いと思いますが、手法については検討する余地が多いと思われます。年代測定に宇宙線生成核種法の利用など分解能の低い、まだ実用性の乏しい手法の採用など、研究目的がどこにあるのか理解できません。地表での浸食速度の推定なら、もっと効果的・有効な方法があると思います。ご検討をお願いします。ご研究の発展を期待しています。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2022 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 高橋　嘉夫（東京大学） （代理発表：向井　広樹（東京大学））

評価項目	評価（平均）
・実施研究は当初計画を達成したか	3.7
・実施研究は新規性・独創性があるか	4.1
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.6

自由意見	・ 鉱物に収着したイオンの脱離試験は、この分野においては広く用いられている方法で、それぞれの脱離剤で脱離可能なのは、収着イオンがイオン交換で収着されているのか、ある程度共有結合を含んだ形で収着されているのかを示しているといわれているようです。自然界で起こる岩石や鉱物への収着では、弱いイオン性の結合をつくるサイトと強く共有性の結合をつくるサイトがあり、収着と脱着が可逆的に起こるサイトと元素の組と、不可逆に起こるサイトと元素の組があると理解されています。地層処分では安全を考えるうえで、これらの収脱着が可逆的に起こるとして Kd が使われますが、実際に起こることは不可逆的です。また、EPMA やオートラジオグラフィーでは、ユウロピウムが端部にのみ凝集しており、収着から沈殿への変化が伺えて面白い観察が得られています。ユウロピウムのうちどの程度が収着媒体のうちのどのようなサイトとしっかりした固体骨格を形成していくのかどうか、わかるように整理していければ、自然界の理解につながっていくと思います。 ・ これまで、定性的に言われていた収着サイトについて視覚的な情報が得られている。また、逐次抽出実験によって結合状態についての情報も得られた。今後は Eu だけでなく、アクチニドについても同様な研究がされることを望む。 ・ 元素の分布を面的にお示しいただいたことで、収着と脱離といった現象がどのように生じているのかについて、大変理解が進みました。 ・ 地層処分が行われる 300m 以深では、高い水圧が作用していると考えられます。そのような高水圧下においても、今回お示しいただいた研究成果がそのまま援用できるか否かについて、ご検討いただきたいと考えております。 ・ 前回も指摘をさせて頂きましたが、biotite の場合、pH が高い際(pH8～9)の EPMA の結果はいかがだったでしょうか。 ・ biotite への Eu の収着は端部とのことですが、これは pH が 6.5 以下の場合の挙動であり、pH8.5 程度ではどうでしょうか。 ・ 上述について、biotite は地層処分では興味のある鉱物であり、地下水の pH である 8 以上での知見について報告書には提示して頂きたく思います。 ・ 標題にあるアクチノイドについての吸着・脱着特性及び存在状態についての言及を報告書ではお願いしたいと存じます。 ・ 手法や実験方法など最新の手法を用いているなど、ある程度の成果は得られていると判断するものの、新規性及び独創性について、この研究の主目的並びに地層処分におけるスタンディングポイントについての不明瞭感は拭えな

	かなった（基本、最終結果に示される Am-241,243 の花崗岩中での固定などについては、従来の研究でも指摘されていることではないか、と個人的には認識しているので)。最終取りまとめでは、もう少し岩盤や地下環境での情報も織り込めつつ、この研究の意義を展開されることを期待したい。 ・ 既往の研究から言われてきたことが、今回の実証的な研究により明確になったと感じます。いっぽうで、TRU 元素の代替（アナログ）としての Eu の位置づけからすると、Eu で得た知見から TRU（例えば Am）の挙動にどう繋げていくのかという道筋は不鮮明であったように思います。TRU を用いた実験を行うには制約が多いので、これら実験が可能な外部研究者と共同で進めていくことも考えてみてはいかがでしょう。 ・ 発展性のある研究と思いますが、新たに吸着特性の優れた粘土鉱物が見つかったというような話ではないので、地層処分への寄与は総じて不明です。しかし、理学研究としての意義は大きいと思われますので、今後の研究の発展を期待します。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2022 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）
・実施研究は当初計画を達成したか	3.4
・実施研究は新規性・独創性があるか	3.9
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.3

自由意見	・ NUMO の包括的技術報告書では、空間スケールと岩種に応じて割れ目の大きさと方向の分布と透水係数の分布を考えて水理地質構造モデルを構築しています。ここでは、密度とガスの浸透率から透水係数を再現しようとされています。いきなり瑞浪の不均質試料に適用されていますが、まず訳の分かった試料（多孔質セラミック）などで、基本的な考え方が成立することを示されてから研究を進めてはいかがでしょう。 ・ 独自のパーミアメーター装置の開発・測定に加え、広域水理モデルへの適用について良くまとめられている。データの取得法やモデル適用について、スケール則やフラクタル構造の適用も試みると面白い有効なモデルが構築できるように思える。 ・ コアを用いた浸透特性の把握と、後半の水理地質構造のモデル化の間に大きなギャップがあるように思いました。このアップスケーリングを如何に行うかを今後ご検討いただければと感じました。 ・ 地層処分では、地下に坑道を掘削して、初期の応力場を乱すことになります。したがって、坑道周りの岩盤の浸透特性もその応力場の変化に対して変化すると考えられます。 ・ どこをターゲットにするかに依りますが、今回開発されているような手法を適用するのであれば、このような坑道周辺の応力場の変化に伴う亀裂を含んだ岩盤の浸透特性の変化にフォーカスするのもよいのではと思いました（多孔質セラミック試料の利用も期待できるように思いました。）. ・ プローブ型パーミアメーターによる gas permeability の結果と公称透気率の結果は、前者の方が局所的な健全部領域での結果であり、微細な亀裂を避けていることが理由とのことでしたが、試料に存在する微細な亀裂についての情報をも付加して頂けるといいと思います。 ・ 亀裂、変質程度及び岩相など透水性に関する各要素を、線型結合をさせる際の係数の決定について、サイトのデータに基づくと存じますが、それは結局、特定の位置や範囲の水理試験の再現のみ可能ということにはならないのかが気になりました。 ・ 取り組まれた研究成果の広域水理モデルの構築への適用性（妥当性）の確認が必要かと存じます。 ・ 基本、チャンレンジングな研究で努力は認めますが、一方で地層処分の地下水流動モデルにおいて、今回の新たな手法を用いて、実験室レベルでの測定手法が広域スケールの地下水流動モデルの「最適化」に反映（貢献できる）されるのかのロジックを、明確に提示することが重要と考えますので、取りまとめにおいてはその辺についての踏み込んだ検討をお願いできればと思い

	ます。 ・ パーメアメータという実測手段を使って、水理構造モデルを構築するというアイデアは独創的だと思います。測定方法の改良に苦労の跡が見られますが、少しずつ安定した結果が得られるようになったと思われます。一方で、パーメアメータの測定結果が何を代表しているのか、構築を目指す領域の大きさと、パーメアメータの測定のサイズ感がどうも一致しません。例えば、4cm 角や 6cm 角の多孔質の内部に亀裂があると、パーメアメータでは表層の値を拾ってしまい、バルクの平均的な値とは違っています。もし、構築を目指すモデルの領域が大きければ、4～6cm に留まらずもっと大きなサイズの平均的な値の方が必要なのではないかという疑問が抜けきれませんでした。 ・ チャレンジングな研究で新規性は認められます。ただ、自然現象を単純化しすぎて大雑把な推定になっており、その結果に対する実証的な検証が必要と思われます。検証がなくては地層処分への有効性は確認できません。しかし、他のいろいろな分野への活用は期待できると思います。今後の研究発展を期待しています。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2022 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）
・実施研究は当初計画を達成したか	4.3
・実施研究は新規性・独創性があるか	4.0
・地層処分事業へ寄与できる成果が上がっているか	3.6

自由意見	・ TRG-04-21 と Mt. Dromedary が年代標準試料として適当であるとの知見が得られたことは良い成果であると評価します。標準試料として適していると評価する理由については、分野外の人にも理解できるように整理して説明いただければ年代測定はどのようになされるか、その重要性（または問題点？）について説得力が増すと思います。 ・ 新しい年代標準の探索に関するもので、実用化されると新たなツールを提供できる。一方で、十分小さなバラツキを得られているが、バラツキの原因が特定されていないことが懸念材料である。包有物の影響などの検討を進めて欲しい。 ・ 当初目的であった年代標準試料の有力な候補が見つかったことは評価に値すると思います。これまで年代標準試料の選択にこれだけ多くの労力が費やされてきたことを知らなかったので、大変勉強になりました。 ・ 今後実際されるラウンドロビンテストの結果を楽しみにしております。 ・ 本研究では ZHe 法による年代測定について、試料の多くが年代と放射線損傷や粒径との相関がみられなかったことから、ばらつきの要因の特定に至る今後の課題の整理を是非にお願いしたいと思います。 ・ 成果の公表を着実に行い、また、今後も予定されているなど、是非に進めていただき、当分野を引き続き牽引しつつ、地層処分のおける隆起・侵食の評価手法の高度化に寄与していただければと存じます。 ・ 「標準試料」の探究という点において、初期の目的は概ね達成できたと判断できるものの、その適正評価に関しては、さまざまな判断基準、項目があるのは理解する上で、判断記述を第三者にわかりやすい形で成果の取りまとめを行っていただけるといいのではないかと考えます。 ・ 標準試料として有望な試料を選定できたものと思います。歌長と Mt.Dromedary が妥当な試料であることが説得力を持って示されています。ところで、放射線損傷との相関を示した図を見ると、全ての試料で「相関は無い」との結論としていますが、どうも右下がりの傾向があるように思えて仕方がありません。繰り返し精度だけから見ると、歌長よりも Mt.Dromedary が高精度ですが、Mt.Dromedary は放射線損傷の大きな領域にしか測定値がなく（年代が古いから当然ですが）、若いサンプルを測ったときに誤差を生じないかが気になりました。 ・ ジルコン He 年代測定法は、期待できる年代測定法で今後の研究発展を大いに期待しています。ただ、実用となるとまだ先は長いような気がします。特

	に地層処分との関係を考えるときには、この手法を地史や地殻変動の解明にどう役立てていくか、という点についてもっと深く考えて頂ければと思います。今後の研究発展を期待します。

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

2.3 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テーマの実施に関する 4 年間のまとめ

本事業（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））は、2019～2022 年度の 4 ヵ年事業であり、萌芽的・先進的かつ重要な研究開発テーマの実施については、4 ヵ年の事業期間中に合計 14 件の研究テーマについて大学等に委託した（表 2.3-1）。なお、2019～2020 年度に実施された 7 件の研究テーマは、2018 年度の事業（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 3 ヵ年の予定で採択され、2020 年度まで実施された研究テーマである。

表 2.3-1　本事業で実施された研究テーマ

年度	研究テーマ	研究者
2018～2020	ジオポリマー技術による人工バリア構築のための基礎的検討	胡桃澤清文（北海道大学）
	新規析出促進法によるベントナイト緩衝材中の二次鉱物が拡散および透水挙動に与える影響評価	田中真悟（北海道大学、電力中央研究所）
	結晶質岩形成時に内包された割れ目発生・分布の潜在性の解明	湯口貴史（山形大学）
	飽和度の変化に伴う堆積岩の変形異方性と放射性廃棄物の合理的な埋設方法に関する研究	富樫陽太（埼玉大学）
	メタンをエネルギー源とした微生物生態系の地質環境への影響評価	鈴木庸平（東京大学）
	ナチュラルアログ手法 による締固めたベントナイトの膨潤特性・自己シール性能の年代変化に関する評価	王海龍（早稲田大学）
	断層周辺の地下水流動特性および物質移行特性に関する包括的研究	渡辺勇輔（JAEA）
2021～2022	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）
	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）
	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）
	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）
	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	高橋嘉夫（東京大学） 向井広樹（筑波大学、東京大学）
	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）
	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（JAEA）

上記の研究テーマについて、2018～2020 年度及び 2021～2022 年度のそれぞれ 3 ヵ年と 2 ヵ年の期間において、概ねテーマ採択時の実施計画に従い研究を実施できた。2018 年度から 2022 年度までの期間における、上記の 14 件の研究テーマの実施からは、投稿予定を含めて 49 件（学術論文 16 件、国内学会 20 件、国際学会 13 件（2023 年 3 月時点））の外部発表があった。なお、研究者には研究実施期間終了後も精力的に外部発表を行うことを呼びかけている。

前述のように、2021～2022 年度に実施された研究テーマは、諸事情により 2 ヵ年での研究期間となり、これまでに実施されてきた研究テーマと比較して 1 年短い研究期間であった。しかし、有識者委員会における委員の意見や評価結果から、2 年間の研究期間であったが研究者による精力的な研究実施等により一定の研究成果が得られたと判断している。このことから、研究テーマや実施者次第ではあるものの、2 ヵ年の研究期間でも一定の成果を出すことは可能と言える。しかしながら、そのような場合でも研究期間を 1 年延長し 3 ヵ年とした場合に、さらなる成果が期待できる研究テーマもあったと考えられる。また、有識者委員会の委員からも 2 年の研究期間は短いとする意見もあったことから、今後の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テーマの実施においては、3 年程度の研究期間を確保することが望ましいと考えられる。なお、仮に本事業の実施期間との関係で、2 ヵ年で研究テーマを実施せざる得ない場合には、有識者委員会の委員との意見交換の場の設定など、研究実施者に対する追加的な支援を行うことも所定の成果を挙げるために役立つと考えられる。

本事業で実施している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テーマは、直ちに地層処分事業に資する研究を対象としたものではないものの、これまでの本事業における研究実施者の中には、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ワーキンググループ委員、地層処分研究開発調整会議外部有識者、NUMO の技術アドバイザリー委員会の委員等で地層処分事業に関連し活躍をしている例も多くあり、地層処分事業を支援する研究者の育成などの点でこの事業の成果は確実に上がっていると考えられる。有識者委員会からも、今後も地層処分分野の人材の裾野を広げるなどのために、若手研究者への研究助成を継続して欲しいとの意見もある。地層処分に係る萌芽的・先進的かつ重要な研究開発を大学等に委託し実施するという研究者の裾野の拡大等を目的とした事業は他に例がなく、今後も本事業における大学等への委託研究を継続していくことが極めて重要である。

以下に、研究実施期間以外でこの 4 年間の事業実施において得られた、今後も本事業において萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の実施していくうえでの課題や、より良く実施していくためのアイデアなどを示す。

〇評価委員会の開催方法について

本事業の実施期間中、わが国においても新型コロナウイルス感染症の流行が拡大し、大学等による研究テーマの実施についても様々な影響を受けた。2018～2020 年度に実施された研究テーマについては、研究実施期間の最後の 1 年に、研究実施者の所属大学により、大学の研究室への立ち入り禁止措置や海外への渡航制限などが行われた。このため、研究実施の遅延や国際学会への参加ができないなどの影響を受けた。2021 年～2022 年に実施された研究テーマについては、大学の研究室への立ち入り禁止措置や海外への渡航制限などが徐々に緩和傾向となっていったものの、研究実施において引き続き影響を受けていた。このような状況を考慮すると、外部発表が合計 49 件得られたことは、コロナ禍での研究でも成果を出すことができたと言える。

また、新型コロナウイルス感染拡大は、有識者による研究進捗状況をチェック＆レビューを行う評価委員会に対しても影響があった。2020 年度以前は、すべて対面で委員会を開催していたが、それ以降は対面で実施することができずにオンライン会議形式での開催となった。オンライン会議形式での委員会開催については特段大きな問題は発生せずに開催できたが、オンライン開催を問題なく実施するため、以下などの準備・工夫を行った。

- 研究実施者や有識者委員の多くがなじみのあるオンライン会議システムを使用
- 研究実施者の発表では、オンライン会議システムの画面共有機能でプレゼンテーションを共有するだけでなく、印刷したものを事前に全有識者委員に送付
- オンライン会議が広く普及してきた初期段階にあたる 2020 年度には、研究実施者と事前にオンライン会議のデモを行い、パソコンの操作や映像・音声の確認を実施

また、2021～2022 年度の研究研究者の一部からは、対面での委員会で直接委員の意見を聴き、意見交換を行いたいという希望があった。一方で有識者委員は一般的に多忙であり、会議の開催場所への移動時間を必要としないオンライン会議での参加を

望む傾向が強かった。そのため、研究実施者と有識者委員との希望の間にミスマッチが起こった。オンライン開催は、スケジュールの調整が容易になるなどの利点もある一方で、研究実施者が有識者委員と直接意見交換をし、その後の協力関係を構築する、また研究実施者同士が情報交換を行うなどの点では、対面での開催が有効であると考えられる。今後、通常の生活に戻ったとしても、有識者委員は引き続きオンラインでの委員会開催を好む傾向があると予想されるが、本事業の目的を考慮すると、実施期間中に少なくとも一度は対面での委員会を実現する取り組みが必要と考えられる。

○公募における応募件数について

本事業においては、2018 年度、及び 2020 年度に研究テーマ及び研究実施者の公募を行った。この研究テーマ及び研究実施者の公募においては、採択件数を考慮すると応募件数は多くはなかった。地層処分事業に関連し質の高い、将来地層処分事業に反映できるように発展するような研究テーマを実施していくためには、多くの応募テーマの中から有望と考えられるものを選定することが有効である。このため、公募における応募件数を増やすための取り組みが重要である。公募においては、当センターホームページへの掲載のほか、関連学会や公募情報のポータルサイトへの掲載などを行ってきたが、これらのほか、NUMO や関係機関に研究者に対して応募を促してもらうなどの取り組みも必要と考えられる。また、地層処分に係る人材の裾野を広げるためには、これまで地層処分には関係していない研究者の応募を増やすための取り組みが課題となる。このためには、この事業をさらに周知していくため、関連学会の学会誌などでこの事業の紹介記事を掲載するなど、本事業の広報を強化することが一案である。

○採択期間中の研究実施に関する意見聴取について

本事業における大学等への委託による研究テーマの実施からより成果を挙げるためには、これまで実施してきた運営方法等を必要に応じ改善していくことも必要である。例えば、実際に研究を実施した研究実施者からの意見を聴取し、今後の事業運営に反映することもより良い事業実施のためには有効であるかもしれない。本事業の研究テーマ実施において、実施してみてどうだったのか、応募のための準備の煩雑さ、公募期間、実施期間、予算、実施中の事務局の対応など、研究期間が終了した研究者にア

ンケートを実施し、課題があった場合には、対応を行っていく。これにより実際に研究を実施した研究者からのフィードバックを反映して事業を継続して改善していくことが可能になると考えられる。また、前述の応募件数を増やすためのヒントなどが見えてくる可能性もある。

○研究実施者や有識者委員の連携（つながり）について

本事業では研究実施者や有識者委員間でのつながりを作ることも今後の地層処分事業に関わる研究者や事業を支援するような研究者を増やすことにつながると考えられる。このことに関連し、研究実施者間の情報交換や理解促進のため、各研究者の了解を得た上で、他の研究実施者の発表を別の研究実施者が聴講できる機会を作った。このような取り組みは、関連する研究実施者同士のその後の連携などにつながる可能性もあり、有効な取り組みと考えられる。一方で、各研究テーマは専門が多岐にわたるため、最初の機会に他の研究者の発表を聴講したとしても 2 回目以降は他の研究者の発表の聴講はなされなかった。そのため、研究実施者間、外部有識者と研究実施者との間の関係構築などのための意見交換会などを設定することも地層処分事業に継続して関わるようになることに貢献できるのではないかと考えられる。

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・背景及び今年度の実施概要

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[e]。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、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。2018 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）」（以降、「本事業」という）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研究の主要 3 分野を

[e] なお、令和 5 年度～令和 9 年度の 5 年間を対象とした新しい地層処分研究開発に関する全体計画が 2023 年 3 月に公表された。

含む 19 の講義を行った。また、2020 及び 2021 年度は、4 ヵ年の事業期間のうち 2 年目及び 3 年目にあたり、地層処分研究の主要 3 分野に関して、進行中の資源エネルギー庁事業の成果を振り返りつつ、教育材料として活用する可能性を追求することとし、地層処分に係る様々な項目を異なるステークホルダーに適切な言葉で説明することができる人材育成に資する教材の作成、及び人材育成セミナーを開催した。

今年度に関しては、4 年間の最終年度として、引き続き、教材の作成の継続及び人材育成セミナーを開催した。このうち、教材については昨年度まで 2 種類を作成することとして、作成を進めてきたが、4 カ年の最終年度である今年度は、「地層処分のリテラシー育成教材の作成」に重点を置くこととし作業を進め、全体で 11 章からなる教材を作成した。

人材育成セミナーに関しては、（国研）日本原子力研究開発機構（JAEA）の協力により、幌延深地層研究センターの見学を含む、3 日間の日程で北海道稚内市及び幌延町を開催地として 2022 年 10 月に実施した。本章では、今年度の人材育成プログラムの作成に関する実施内容、及び 4 カ年の成果・まとめを示す。

3.1.2 実施体制

本事業の 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、セミナーを開催し、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。セミナーでは、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、本事業で開催するセミナーは、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、セミナー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、セミナーの開催、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、国の基盤研究機関である 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）からセミナーへの講師・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、この地層処分スキルアップ研究会において、セミナーの内容をはじめ、本事業における人材育成プログラム作成に対する助言などを得て進めていく体制とした。

さらに、今年度は昨年度に引き続き、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、及び講師を担当した 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の構成を以下に示す。

表 3.1-1　地層処分スキルアップ研究会構成機関

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

今年度、地層処分スキルアップ研究会は、以下の日時・内容で 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	2022 年 8 月 29 日（月） （オンライン開催）	2022 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、今後の人材育成プログラム作成に関する意見交換

また、JAEA 及び NUMO との人材育成セミナー開催に向け、すべてオンライン形式で以下の日時及び内容で会議を開催した（詳細は後述）。さらに、教材作成に関しては、内容の検討を行う外注先やデザイン等の検討や版下作成を行う外注先との会合を多数実施した。

3.1.3 本事業におけるジェネラリストの定義

2019 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、昨年度、再度検討を実施した。以下に検討内容・結果を再掲する。

まず、セミナーや e-ラーニングなどの地層処分や放射性廃棄物処分に関する既存の人材育成プログラム（人材育成に活用可能な講座などを含む）について整理を行い、どのようなものが活用可能であり、また、どのようなプログラムが現状存在しないのかを明らかにすることとした。さらに、既存のプログラムを整理するにあたり、各プログラムが地層処分事業のキャリア形成のどこの部分で活用可能であるか明らかにするため、地層処分事業におけるキャリアパスを整理した（図 3.1-1）。

このキャリアパスでは、キャリアのスタート（大学院卒の新入社員等）から、特定分野のスペシャリスト（専門家）、ジェネラリスト等に至る経路を示し、各経路に番号を振っている。スペシャリストやジェネラリストは、その中にもレベル・階層があると考えられるため、複数のレベル・階層で表し、各レベル・階層間の経路も示している（図 3.1-1 の矢印⑦や⑧）。本事業で 2020 年度から開催している人材育成セミナーは、図 3.1-1 の経路のうち、概ね①、③、④、⑤に対応していると整理した。

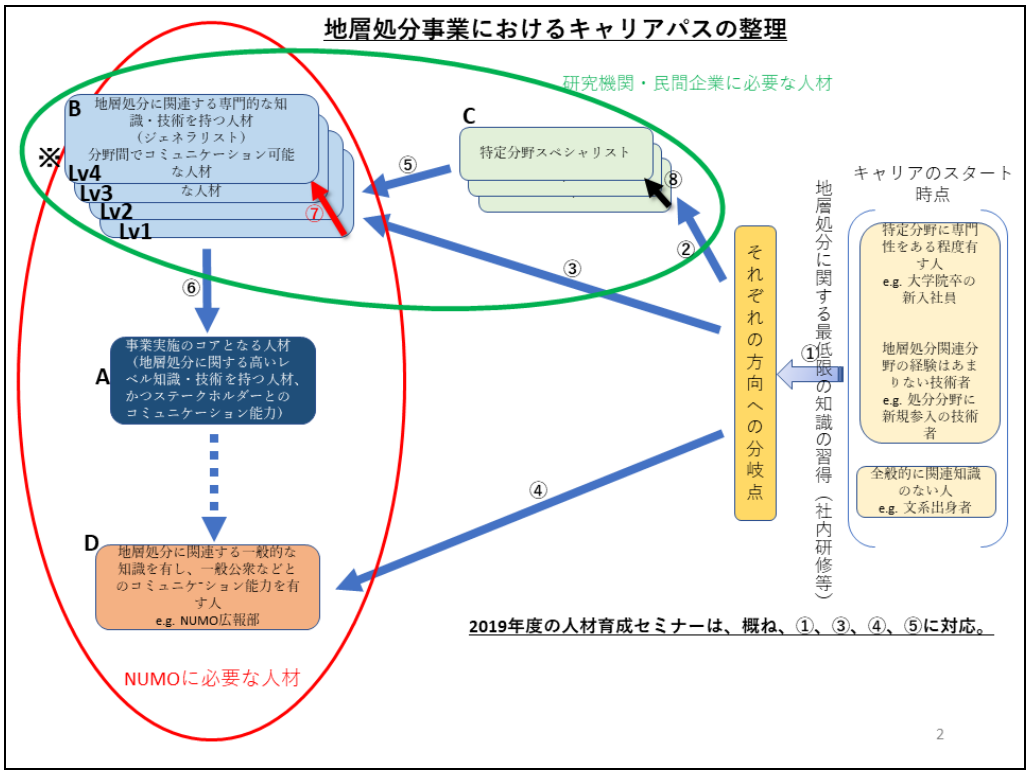


図 3.1-1　地層処分事業におけるキャリアパスの整理

次に、地層処分や放射性廃棄物処分に関する講座等の既存の人材育成プログラムについて、その構成、対象者、想定される活用例（図 3.1-1 のキャリアパスにおける活用例）を整理した。また、図 3.1-1 に示したジェネラリストのレベル・階層のそれぞれについてのイメージを検討した（図 3.1-2）。

表 3.1-3　地層処分を含む放射性廃棄物処分の既存人材育成プログラムとその活用例

	構成	対象	活用
オープン教材の作成・活用による実践的原子力バックエンド教育	専門教育コース・講義 基礎教育コース・実験 専門教育コース・実験 施設見学・フィールド実習・国際セミナー	高専生・大学生・社会人	①③④⑤
原子力学会バックエンド部会週末基礎講座	講義 施設見学 グループディスカッション	学生・新規参入者からあらためて知識の確認をする人	①③④⑤
原環センターセミナー ※安全評価分野	放射性廃棄物処分の安全評価の基礎 I	安全評価の入門的知識を基礎から習得したい技術者・研究者向け	③⑤ 安全評価分野を専門とする人以外
	放射性廃棄物処分の安全評価の基礎 II	安全評価の基礎知識を持ち、それを深めたいと考えている技術者・研究者	③⑤ 安全評価分野を専門とする人以外
	放射性廃棄物処分の安全評価の基礎 III	安全評価の基礎的知識を持ち、これを更に深めたいと考えている技術者・研究者	②③⑤
産総研・ジオスクール ※地質環境調査分野	地質調査研修 地形判読実習 鉱物肉眼鑑定研修 地震・津波・火山に関する自治体職員用研修プログラム	企業・自治体職員・大学関係者	③⑤ 地質分野を専門とする人以外
JAEA　原子力人材育成センター	「原子力エネルギー技術者の養成」の一つの講義：放射性廃棄物管理	原子力関係業務従事者又はこれから従事される方	①④
E-learning: IAEA Spent Fuel and Radioactive Waste Management, Decommissioning and Environmental Remediation Curriculum, Course on Geological Disposal	E-learning (ウェブ上での講義、確認のテスト)	若手、及びこの分野への新規参入者	①③④⑤
IAEA Training Workshop on Planning and Implementing Site Investigations for Geological Disposal ※サイト調査	講義・参加者（講師）間でのディスカッション	処分実施主体、規制機関、技術支援機関、大学等の若手専門家	③⑤
SKB, SKB・SKB Int. 「地層処分技術研修スクール」	講義	実施主体、規制当局、処分技術関連企業などに所属し、安全評価、人工バリアの開発、処分場設計等の分野で数年の経験ある方々	③⑤

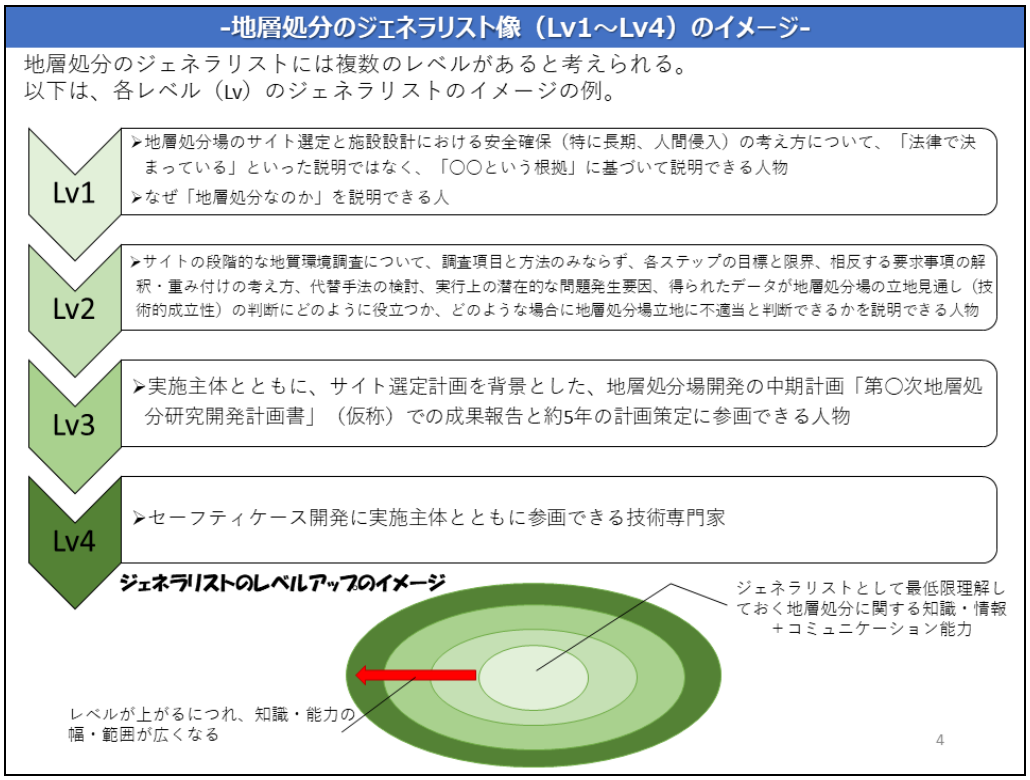


図 3.1-2　地層処分のジェネラリストのレベルのイメージ

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 3.1-3 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。）

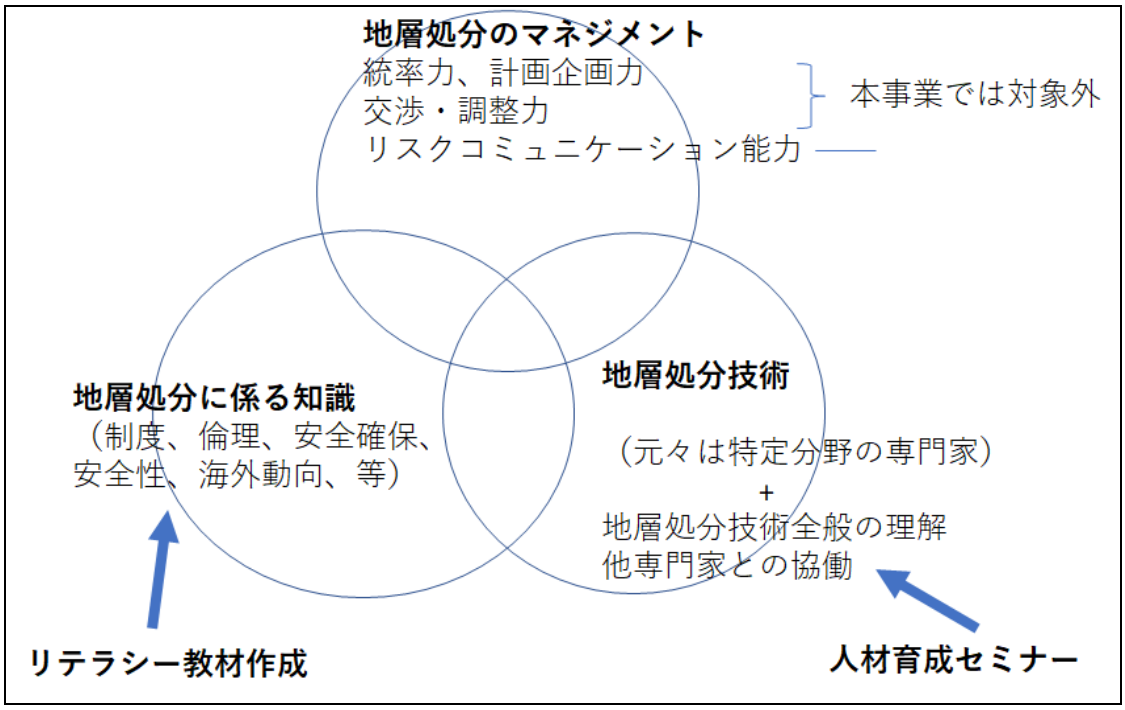


図 3.1-3　地層処分のジェネラリストの定義の再検討結果

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してきた。地層処分のマネジメントについては各組織での職場内訓練（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する教材の作成
- 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。そのうえで、4 年間の成果をまとめる。

3.2 教材の作成

3.2.1 昨年度までの実施内容と今年度の実施計画

昨年度までに次の 2 種類の教材を作成することとして、内容の検討、作成を進めてきた。

- 「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）
  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
- 「地層処分のポータル教材」（以下、「ポータル教材」という）
  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

2020 年度までに、リテラシー教材については、章立て、各章の内容や学習目標等を明示した「学習指導要領」の作成、学習指導要領に基づく教材の内容案の作成を進め、全 12 章からなる第 1 案を作成した。また、2021 年度は、外部の有識者等のレビュー結果の反映、利用者の理解度を確認するための理解度テストの構想、素案の作成を行った。さらに、内容面だけでなく、デザインなどを含めた教材の使いやすさ、学習意欲が維持され継続して使われる工夫などのレビュー・見直し等を実施した。

一方、ポータル教材については、昨年度、「学習指導要領」のさらなる検討を進めるとともに、教材の概念の検討、及びサンプルとして一部のコンテンツ（内容）の作成を実施した。

教材作成開始当初（2020 年度）に予定したスケジュールでは、2022 年度には両教材を完成させる予定であった（表 3.2-1）。しかし、リテラシー教材は、他に類する既存教材は存在せず、作成の優先度が高いと考えられることから、今年度（2022 年度）の作業は、リテラシー教材を完成させることに注力することとした。また、ポータル教材については、2020 年度の地層処分スキルアップ研究会において、この事業であらためて作成するのではなく、既存の利用可能な資料（書籍等）を利用することで良いとの意見や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との意見があった。このことから、必要な知識のアウトラインなどを示すための資料である、2021 年度までに作成したポータル教材に関する学習指導要領を本事業における成果物の 1 つとすることとした（ポータル教材の学習指

導要領を別添資料 3 として添付)。

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

リテラシー教材の完成に向けて 2022 年度は、次の作業を主に実施することとした。

- 2021 年度に検討したデザインの全ページへの適用可能性の調査及び適用作業の実施
- 内容の見直し（ポータル教材との章の入れ替えや各ページの文字数の調整を含む）
- 使用する図表の著作者からの利用許諾の取得
- 表紙、確認テスト、索引の作成
- 印刷用版下、及び pdf ファイルの作成
- 簡易製本した試作版 50 部の作成

以降に 2022 年度に実施した内容を示す。そのうえで、リテラシー教材作成における課題等をまとめる。

3.2.2 リテラシー教材作成の今年度の実施内容

(1) ページデザイン等に合わせた内容の見直し

2021 年度、教科書出版会社及び工学・産業系書籍出版社の 2 社に委託し、学習意欲が継続しやすく使いやすい教材のデザイン等の検討を行い、両者からの提案を受領した[f]。両社の提案内容を検討した結果、工学・産業系書籍出版社の提案を採用し、以下の体裁の教材とすることとした。本教材は、独学で使うことを基本としたものであり、工学・産業系書籍出版社の提案のほうが、より独学で使う教材としては適しているとの判断による。

[f] （公財）原子力環境整備促進・資金管理センター、「平成３１年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務（国庫債務負担行為に係るもの）報告書（２０２１年度分)」、2022 年 3 月」参照
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2021/3fy_juyokiso.pdf

- 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。
- 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

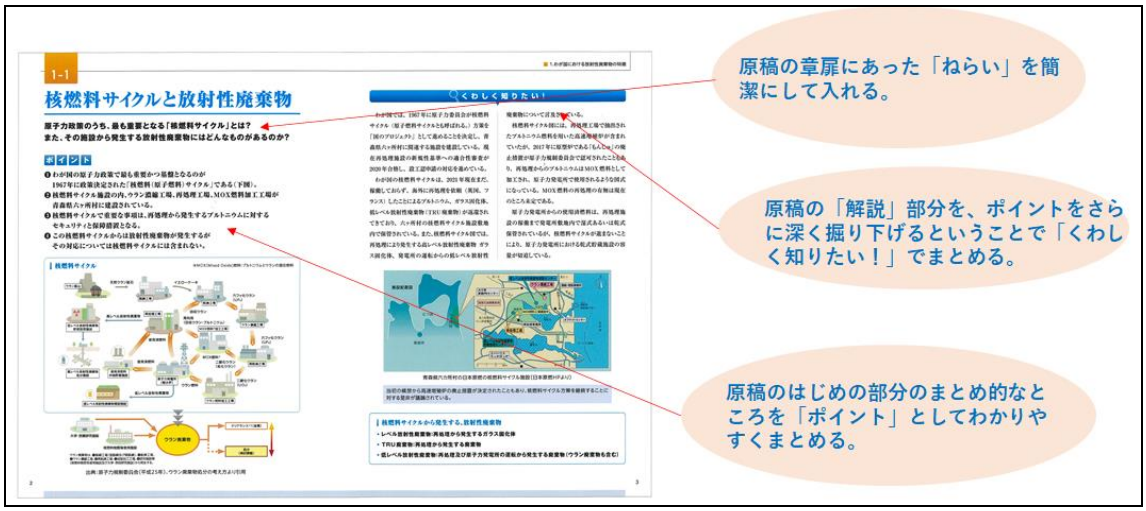


図 3.2-1　2021 年度の工学・産業系書籍出版社の提案の例

2021 年度の検討では、自習教材書籍としての性格を強化する目的で検討を行った、使用者にとってわかりやすく、学習意欲の湧くデザイン等について、教材（案）の一部のページに検討結果を適用しサンプルを作成した。そのうえで、基本デザイン等を決定した。しかし、教材（案）の各ページは、図表の大きさや配置、構成や文字数などが大きく異なっているため、全ページに基本デザインを適応するためには、まずは全ページへの適用可能性を検討・確認する必要があった。

そのため、昨年度までに作成していた教材（案）（教材のコンテンツ）を用い、教材（案）の全ページに対する基本デザインの適用可能性を検討した。検討においては、約 300 ページからなる教材（案）の各ページに対して基本デザインを試験的に適用し、可能性を確認し、問題点をピックアップした。確認結果については、以下のように分類可能であった。

① 基本デザインがそのまま適用可能なページ

② 文字数の削減のみで適用可能なページ

③　図表の大きさや配置等の修正が必要なページ

④　他のページと図表や文字等の構成や配置が異なり、基本デザインが直ちには適用が難しいページ

②に関しては、ページ内に収まらない文字数を把握したうえで、文字数の削減のため文章の修正を実施した。基本デザイン等が直ちに適用困難なページに関しては、書籍全体としての統一感を維持したうえで、基本デザインの修正等行い、適用可能なデザイン等を工夫して対応した。これらの作業により、最終的にすべてのページのデザイン、ページ構成、図表の配置等が決定した。

図 3.2-2　デザイン等の適用検討及び貴センターとの調整作業の例

また、並行して昨年度までに作成していた内容についても、本教材のレベルの適正の確認や各章・節での内容の重複の排除、取り上げるべき内容の取捨選択等を再度実施し、文章の改訂等を進めた結果、当初、全 12 章で 300 ページを超える内容となっていたところ、全 11 章で約 200 ページの構成となった。以下に全 11 章の目次構成を示す。

表 3.2-2 リテラシー教材の構成

はじめに
序章　学習を始める前に

1. 日本における放射性廃棄物の種類と特徴
   1.1　核燃料サイクルと放射性廃棄物
   1.2 放射性廃棄物の発生源と区分
   1.3 放射性廃棄物の種類別発生量
   1.5 地層処分の対象となる放射性廃棄物
   1.6　日本における最終処分（地層処分）の実施体制

2. 放射性廃棄物対策 - 地層処分選択の背景 -
   2.1　放射能の減衰特性が示唆すること
   2.2　高レベル放射性廃棄物管理の倫理的側面
   2.3　地層処分の選択
   2.4　日本における地層処分選択の経緯
   2.5　地層処分の進め方に関する提言

3. 日本における放射性廃棄物の処分形態
   3.1 放射性廃棄物の処分形態
   3.2 放射性廃棄物処分と関連施設
   3.3 浅地中トレンチ処分：L3 廃棄物
   3.4 浅地中ピット処分：L2 廃棄物
   3.5 中深度処分：L1 廃棄物
   3.6 地層処分：HLW、TRU 廃棄物

4. 地層処分の安全原則と規制・基準類
   4.1　地層処分の安全原則
   4.2　原子力全般の基本安全原則
   4.3　放射性廃棄物処分に係る安全要件
   4.4　放射性廃棄物処分への ICRP 勧告
   4.5　日本の地層処分の安全規制

5. 地層処分の安全確保策と安全評価
   5.1 地層処分の長期安全確保原則
   5.2 多重バリア概念
   5.3　安全評価の考え方と評価手法
   5.4　リスク論的考え方による安全評価と評価基準
   5.5　最新の安全評価の流れ
   5.6 安全評価とセーフティケース
   5.7　地層処分に影響を及ぼす自然現象への対応

6. 地層処分の実現性に関する報告書
   6.1　地層処分の実現性を示した初期の報告書
   6.2　二つの代表的な処分概念
   6.3　日本における地層処分の技術的実現性
   6.4　日本における地層処分のセーフティケース

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-
   7.1　包括的技術報告書で示されたセーフティケースとその役割
   7.2　地層処分に適した地質環境の選定とモデル化
   7.3　地層処分場の設計
   7.4　処分場の閉鎖前の安全性
   7.5　処分場閉鎖後の長期安全性

8. 地層処分の段階的な進め方
  8.1　段階的な進め方の必要性
  8.2　段階的な進め方の種類と特徴
  8.3　段階的な進め方の導入
  8.4　三段階の処分地選定プロセス
  8.5　新たな取り組みと科学的特性マップ
  8.6　段階的な処分地選定の経緯

9. 地層処分固有の取り組み
  9.1　長期評価に伴う不確実性
  9.2　長期の時間枠への対応
  9.3　放射線防護原則の地層処分への適用
  9.4　閉鎖後の受動的安全性の仕組み
  9.5　地層処分におけるモニタリング
  9.6　地層処分と環境アセスメント

10. 地層処分に対する信頼
  10.1　信頼感の醸成
  10.2　可逆性と回収可能性
  10.3　地下研究施設の役割
  10.4　ナチュラルアナログの役割
  10.5　地域とのパートナーシップ

11. 諸外国における地層処分事業の経緯
  11.1 各国の地層処分計画
  11.2 フィンランド：初期のマイルストーン通りの展開
  11.3 スウェーデン：公募方式から申し入れ方式への変更
  11.4　フランス：議会の主導による計画の見直し
  11.5 スイス：住民投票での否決から国の積極的関与
  11.6 英国：地元の主体的参加を尊重
  11.7 カナダ：廃棄物処分政策と公衆関与
  11.8 米国：政治的なサイト選定が生んだ混沌と頓挫

(2) 使用する図絵の著作者からの利用許諾の取得

リテラシー教材において使用する図表については、その多くが国内外の既存の報告書、広報資料、プレゼンテーション資料などから当該のページ内容に沿った適切なものを利用している。そのため、完成したリテラシー教材をインターネット上で公開し、広く関係者の使用に供するためには、これらの図表の使用許諾を著作権者から取得する必要がある（今年度作成した試作版についてもネット上での公開のため、使用許諾が必要である)。使用許諾取得のため、リテラシー教材の原案段階で使用されているすべての図表をリストアップし、各図表について許諾申請先を整理した（図 3.2-3）

	A	B	C	D	E	F	G	H
4		確認欄	章	ページ	種類（カッコ内は重複を示す）	出典元	著作権者等	特徴・説明の内容
5			序章	4	図-1	DOE アイダホ国立研究所（INL)パンフレット	米国DOE	コンテナからドラム缶 10/07/69 NRTS BRIALGROUND WASTE DISPOSAL 米国のアイダホ国立研究所では、軍事利用からの大量の長寿命廃棄物（TRU廃棄物ら敷地内のトレンチに埋設された。この廃棄物が地下水の汚染を招くことが調査で分かり、れTRU廃棄物処分場であるWIPPに搬出されています。
6				5	図-3	経済産業省 資源エネルギー庁「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について2020年度版」に加筆	資源エネルギー庁（原環センター）	各国の処分事業の段階（国旗にて表示）
7				5	図-4	DOE WIPP パンフレット	米国DOE	米国WIPP処分場：軍事利用から発生したTRU廃棄物の地層処分場、原子力施設の物も受け入れている
8				5	図-5	POSIVA ONKALOのパンフレット	フィンランドPOSIVA	フィンランドのオルキルオトに建設中の使用済燃料を対象とした地層処分場（上図は、O直施設）
9				8	図-6	新規作成	河村	リテラシー教材学習ジャンル相互の関係
10				8	表-1	新規作成	河村	リテラシー教材学習ジャンル
11			第１章	11	図 1.1-1	原子力・エネルギー図面集7-2-1	日本原子力文化財団(2019)	核燃料（原子燃料）サイクルと発生廃棄物
12				11	図 1.1-1	ウラン廃棄物処分の考え方より引用	原子力規制委員会（平成25年）	ウラン廃棄物
13				12	図 1.1-2	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	青森県六ヶ所村の日本原燃の核燃料サイクル施設
14				13	図 1.2-1（1.3の図)	新規作成	河村	放射性廃棄物の発生源と区分

図 3.2-3　使用許諾取得のための整理表

著作権者（許諾請求先）には、経済産業省、原子力委員会、NUMO、JAEA、原子力学会などの国内関連機関・団体のほか、米国エネルギー省（DOE)、経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）など海外組織が含まれていた。これらのうち、一部については、出典の記載などの条件を満たせば利用可能なものが含まれていた。それ以外については、利用許諾の取得を行うこととし、著作権者に許諾の申請を行った。

多くについて許諾を得ることができたが、許諾の得られなかった図絵については、代替となるものを利用する、または、作成（リライト）することで対応した（図 3.2-4)。リライトを行った図表は合計で約 60 点であった。結果として、教材で利用している図表についてはすべて、使用許諾を得たもの、または使用許諾の必要のないもの（当センターで作成したもの、またはそもそも許諾が必要ないもの）となり、今年度作成した試作版を含め、完成したリテラシー教材は、インターネット等で公開が可能となった。

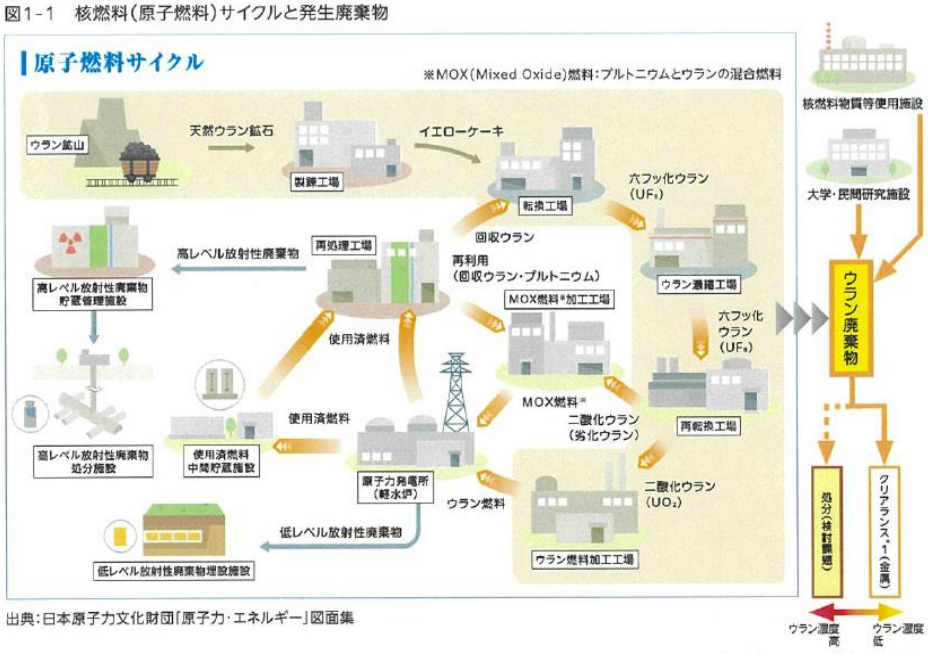


図 3.2-4　作成（リライト）した図の例

(3) 確認テストの作成

学習教材の利用の際に、学習者が自身の理解度を確認するための理解度確認テスト（以下、「確認テスト」という）があった場合、学習者自身で努力や目標達成度の確認が可能となり、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期待される[2]。そのため、リテラシー教材を利用者にとって学習意欲が継続して使いやすいものとする方策の 1 つとして、確認テストを作成し、教材に含めることとした。

確認テストについては、学習者が自身でテストを実施し自己採点を行い、到達レベルを確認できるよう、問題形式（①及び②）の場合には解答を提供し、記述式のテストの場合、解答例を示すこととした。また、確認テストとしては、以下の 3 つの異なる方式の問題を作成することとした。

① 振り返りチェックシート（「知識」を問う、文章の穴埋め式）

② ○×テスト（「用語」に関しての理解を問う）

③ 記述式テスト（内容についての理解を問う、指定された用語を用い 300 字程度で自分の言葉で説明する）

各章の学習後にこれらの 3 つの形式の問題で理解度を確認することができるよう、各章の最後に確認テストを設置した。各章につき、振り返りチェックシートは 10 問程度、○×テストは 3 問程度、記述式テストは 1 問とした（図 3.2-5）。

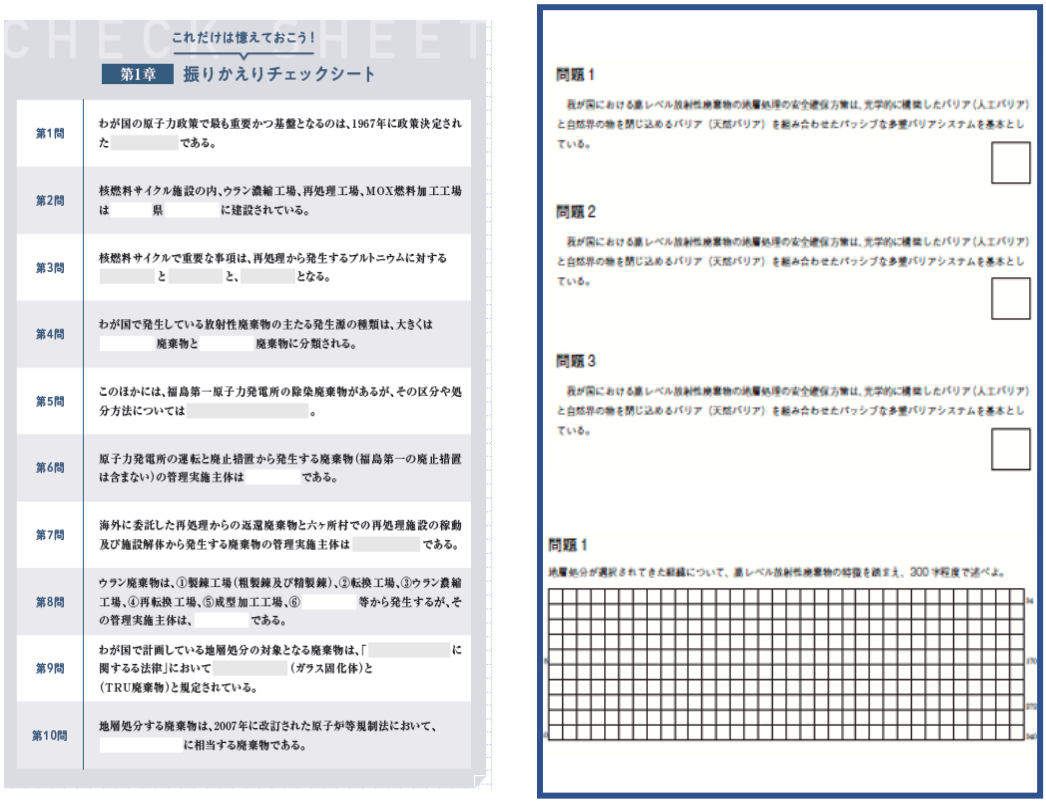


図 3.2-5　作成した確認テストのイメージ
（左：振り返りチェックシート、右上：○×テスト、右下：記述式テスト）

前述のように、学習者が自身で確認ができるよう、問題の次のページに確認テストの回答を配置した。

(4) この他のコンテンツの作成

この他、学習者がこの教材を使用するにあたり、推奨される教材の利用方法、知りたい語句が含まれるページの把握の容易さ、各章での学習のポイントなどを示すため、「はじめに」、「序章」、「索引」、「各章扉ページ」を作成した。以下にそれぞれの目的などを示す。

●はじめに

現在のわが国の高レベル放射性廃棄物処分計画や研究開発の現状、及び地層処分技術全体を俯瞰できる技術者の必要性を踏まえ、本教材の必要性、作成の背景や目的、内容を示すことで、読者が本教材の意図や学習する目的を理解し、意識しながら学習できるよう企図している。

●序章

本教材で学習を始める前に、なぜ放射性廃棄物処分、特に高レベル放射性廃棄物の地層処分が必要なのか、その歴史的経緯、及びわが国を含めた世界各国で地層処分が計画されていることをあらためて理解することを目的とした内容としている。そのうえで、本教材の構成及び各章のつながりと学習の流れを示し、基本的内容を学んだ後は学習者が興味ある内容を選んで学習できるよう配慮している（図 3.2-6）。

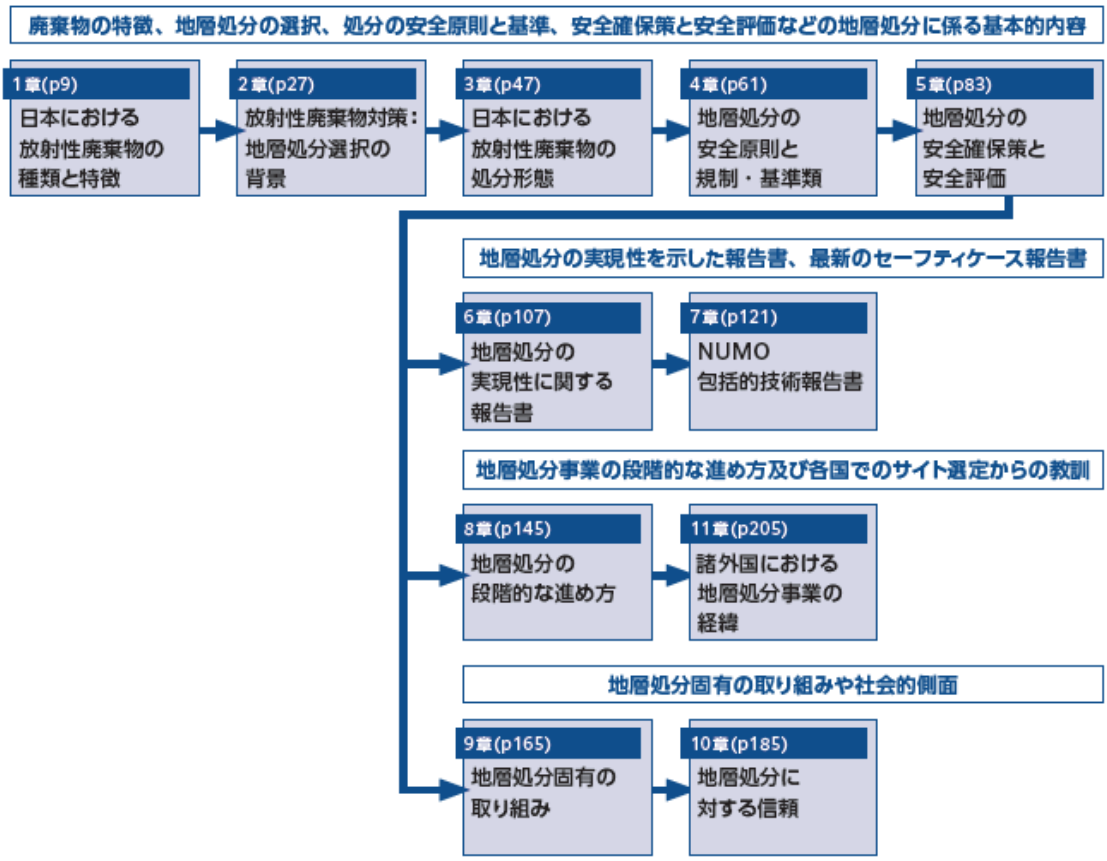


図 3.2-6　リテラシー教材の各章のつながり

●略語・索引

学習者にとってなじみがないと考えられる、本教材内で使用している略語（国内外の機関の略称や地層処分関連用語）について、その正式名称を提供している。また、辞書的な使い方も可能となるように、学習者がその用語の意味や内容を把握したいと考える可能性のある地層処分に関連した用語について、どのページを見れば良いのか示す索引を作成した。索引ページでは、その用語が含まれているすべてのページを示しているが、その中で主要なページ（最も詳しいページ）を太字で示すよう工夫をした（図 3.2-7 参照）。

索引

	用語	ページ数
あ行	安全評価	63.66.68.76.77.85.**88**.89.90.91.92.93.94.96.99.109.111.112.113.115.122.123.125.126.127.128.136.137.138.139.166.167.169.171.173.175.178.196.206.208.211
	ウラン濃縮	**10**.11.15.51
か行	回収可能性	33.35.77.128.133.156.158.**188**.189
	可逆性	133.148.149.150.156.158.**188**.189.195.207.212.213
	核燃料サイクル	**10**.11.12.17.18.19.29.38.48.50.51.86.111
	原子力委員会	11.32.38.39.40.50.113.152
	原子力規制委員会	54.**75**.77.220
	原子炉等規制法	12.13.18.48.49.**74**.75.77.174
さ行	最終処分法	18.20.21.40.41.51.75.76.113.129.152.**154**.155.159
	再処理	**10**.11.12.14.15.17.18.19.21.38.39.48.51.110.152.208.216.220
	サイト選定	63.91.98.99.100.101.115.122.124.125.126.139.151.175.186.198.199.**206**.207.208.210.211.213.215.216.217.218.219.220.221
	シナリオ	76.88.**89**.90.91.92.93.94.101.112.115.134.135.136.137.138.139.167.173.175
	人工バリア	49.54.55.68.85.**86**.87.89.95.101.110.111.112.113.115.124.126.128.129.130.132.133.147.173.174.176.192.195.215
	セーフティケース	66.87.92.93.**96**.97.98.99.114.115.122.123.136.148.166.167.168.169.171.175.196.197.209
た行	第一種廃棄物埋設事業	13.48.74.77
	第二種廃棄物埋設事業	13.48.49.74
	第２次取りまとめ	50.86.88.92.95.111.**112**.113.114.126.130.166
	多重バリア	38.54.55.63.84.85.**86**.87.88.89.109.110.111.113.124.166.172.173
	直接処分	110
	天然バリア	55.68.84.85.**86**.87.95.110.111.124.173.174
は行	廃止措置	11.**12**.14.15.17.52.64.75.76.97.174.175.216
	不確実性	15.71.85.86.88.90.91.92.94.95.96.97.98.99.100.115.126.128.136.139.**166**.167.168.169.172.216
	FEP（特質、事象、プロセス）	**89**.92.93.94.137.167
	包括的技術報告書	19.92.93.97.98.100.114.**122**.123.127.128.129.130.132.133.134.136
	放射線被ばく	33.63.65.88.94.**170**
	放射線防護	62.65.67.70.71.72.73.89.90.132.**170**.171.220
ま行	MOX燃料加工	**10**.21
	モニタリング	33.52.54.62.66.77.147.172.173.**174**.175.176.177.187.192.194.214.215

図 3.2-7　リテラシー教材の索引ページ

●各章扉ページ

各章の最初には、扉ページを作成し、各章の構成と各章で学ぶ内容、理解すべきポイントを示し、学習者が目的をもって学習を進められるよう配慮している。

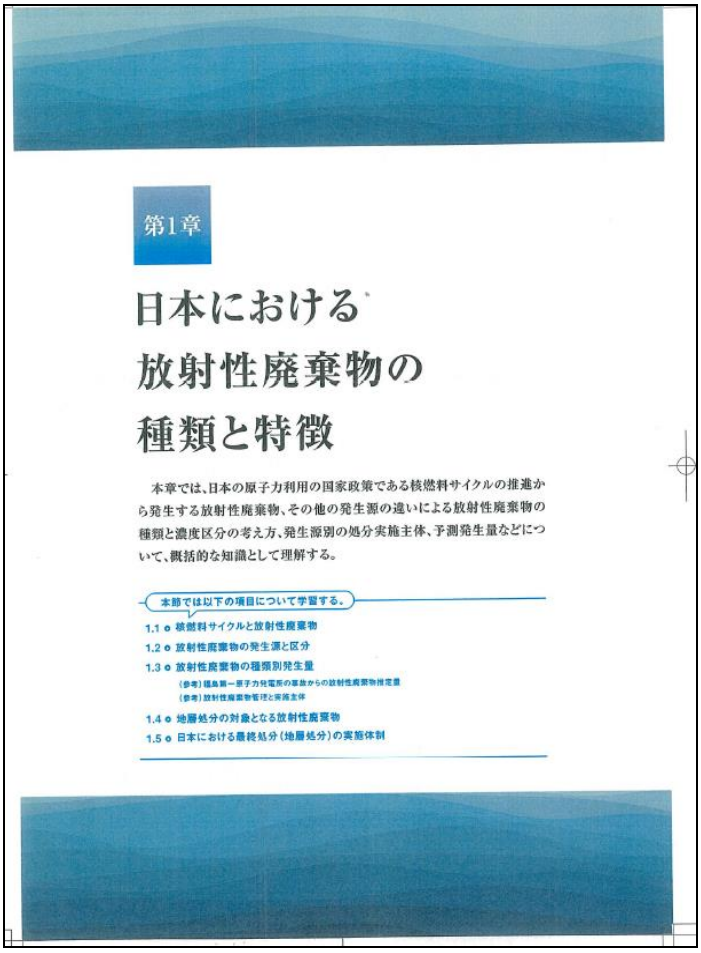


図 3.2-8　各章の扉ページの例

●その他

その他、学習者がさらに詳しく学習したいと思った場合、またはリテラシー教材に記載された内容を原典で確認したい場合などに参照が可能となるように、内容作成に用いた文献を参考文献として、各章の最後にリストを付加した。

参考文献 第1章 日本における放射性廃棄物の種類と特徴

●原子力委員会(1967)、原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画
●日本原子力文化財団、「原子力・エネルギー」図面集
●原子力学会特別専門委員会報告書(2015)、低レベル放射性廃棄物処分におけるウランの扱いについて−浅地中トレンチ処分に係る規制への提言−平成26年度報告書
http://www.aesj.or.jp/special/report/2014/s_1fteilevel_report2014.pdf
●日本原燃(株)Webサイト、原子燃料サイクル施設の概要
●核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律(原子炉等規制法)
●経済産業資源エネルギー庁Webサイト、放射性廃棄物について
●U.S. NRC Web site, Definition of High-Level Waste
●総合資源エネルギー調査会 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
●河村秀紀(2018), 日本における放射性廃棄物インベントリと廃棄物ストリーム、日本原子力学会2019年春の年会
●原子力規制委員会(2015)、廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合(第2回)資料2-1、原子力発電所等の廃止措置及び運転に伴い発生する放射性廃棄物の処分について(電気事業連合会作成)
●特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律(最終処分法)(2000)
https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=412AC0000000117
●原子力規制委員会Webサイト、クリアランス制度の概要
●坂井章浩(2022)、研究施設等廃棄物処分の基本的な考え方と処分技術の開発状況、放射性廃棄物処分技術の最新動向に関する総合シンポジウム
●文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会、原子力分野の研究開発に関する委員会(2006)、RI・研究所等廃棄物(浅地中処分相当)処分の実現に向けた取り組みについて
●H. Kawamura, S. Yashio, I. McKinley (2007), Decommissioning and Environmental Remediation Scenario Development for Fukushima Daiichi, IAEA TopSafe
●復興庁(2017)、原子力災害からの福島復興再生協議会(第15回)資料5 (環境省、除染・中間貯蔵施設等の現状について) https://www.reconstruction.go.jp/topics/main-cat1/sub-cat1-4/20170806_kyougikai_07shiryo5.pdf
●総合資源エネルギー調査会原子力安全保安部会廃棄物安全小委員会報告書(2008)、高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について(平成20年1月18日)https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/1246938/www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g80118b01j.pdf
●原子力発電環境整備機構(NUMO)(2021)、処分場設計と閉鎖前の安全性の評価、地層処分技術オンライン説明会(改訂した包括的技術報告書)処分場設計、2021年5月26日

図 3.2-9　参考文献のページ

これらのページ等については、いずれも学習者の学習のしやすさや学習の意図を理解したうえで進められるよう配慮したもので、学習意欲の向上・維持や理解度の向上につながることを期待している。

(5) 電子ファイル及び試作品の作成

将来的な印刷製本（出版）を見据え、印刷用版下を作成した。また、プリンタでの印刷を可能とすること、及びウェブサイト上に掲載するため、pdf ファイルも作成した。なお、

印刷用版下及び pdf ファイル作成までに全ページの校正を 4 回程度実施した。

また、試作品として、全ページを印刷し簡易製本したものを 50 部作製した。これらは、見本として関係機関等に示すために用いるとともに、ユーザーによるレビューなどに用いることを想定している。なお、表紙については、今年度末の段階で仮の完成という位置づけとなっているため、詳細なデザイン等は行わず、単に教材のタイトルなどを示したものとした（図 3.2-10）。

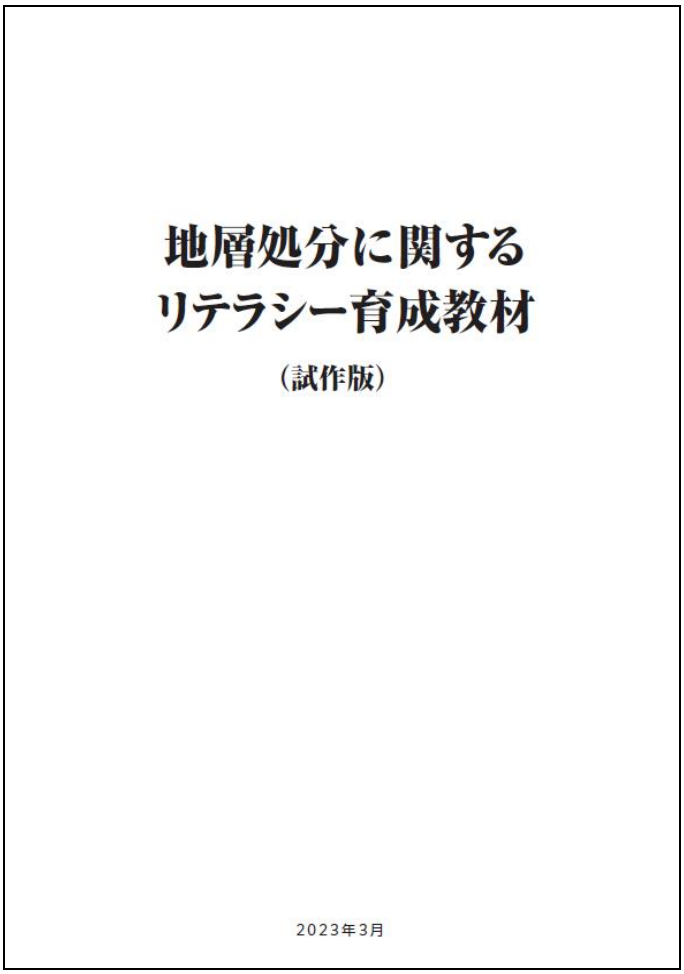


図 3.2-10　リテラシー教材（試作版）の表紙

なお、リテラシー教材の試作品の pdf ファイルを本報告書に添付する（別添資料 4）。

3.3 2022 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

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、2020 年度には、（国研）産業技術総合研究所（AIST）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、少人数の受講者を対象として講義、机上での実習、現場の見学、グループワーク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[g]。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。

[g] （公財）原子力環境整備促進・資金管理センター、「平成３１年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務（国庫債務負担行為に係るもの）報告書（２０２０年度分）」、2021 年 3 月
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2020/2fy_juyokiso.pdf

- 座学だけではなく、（2020 年度に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ことが望ましい。
- 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高い。
- 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。

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）を変更し開催した。具体的には、以下のコンセプトで実施した。

- ✓ 受講者は小人数（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
- ✓ 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
- ✓ 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
- ✓ 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の時間を確保
- ✓ 2020 年度は地質環境（地下水）をテーマとしたため、工学をテーマとして実施

しかし、上記のうち、セミナーのテーマについては、当センター内での検討や関係機関との調整や議論をした結果、地下研究施設をテーマとしてセミナーを開催した[1]。また、

新型コロナウイルス感染拡大の影響を考慮し、最終的には、セミナーはオンラインでの開催となった。

2021 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。

- 対面開催に完全に代わるものではないが、オンライン開催でもセミナーの目的を概ね達成することが可能であった。今後は、状況により、一部オンラインの併用などの可能性も考えられる。
- 全体として、テーマ設定やセミナーの内容（講義やグループディスカッション等）について、受講者の満足度も高く、また、今回想定した受講者層（処分事業への従事年数 5 年程度）に適した内容であった。
- 幌延深地層研究センターのバーチャル見学も実際の見学では見ることのできない地下坑道の俯瞰ができるなど実際に訪問できない場合の手段としては利点もあった。特に、実際に幌延を訪問したことのあった参加者には好評であった。バーチャルだけでなく、実際の見学を組み合わせることが有効と考えられる。
- グループでの議論については、時間が短かったこと以外に、グループワークでメンバー間での意見交換や議論があまり深まらなかった（メンバーとファシリテータ間のやり取り中心になり受け身で終わりがちであった）ケースもあった。ただし、グループ内にテーマについて詳しいメンバーがいる場合には、メンバー間での多面的な議論が可能であったため、実施方法の工夫によってはメンバー間での深い議論を行うことが可能である可能性も有ると考えられる。

2020 年から 2021 年の 2 カ年のセミナー開催からわかったことをまとめると、以下が挙げられる。

- 受講者が受け身ではなく、能動的にセミナーに参加できるよう、講義、見学（視察）やグループワーク、演習などを組み合わせたアクティブラーニング形式のセミナーが効果的である。
- グループワークでは、ファシリテータやテーマに関する専門家をグループに加え、受講者間の議論をサポートすることがグループでの議論の活性化等につながる。
- グループワークにおいて自身の専門分野とは異なる分野の専門家との協働の重要性やコミュニケーションの難しさを経験・理解するためには、様々な分野・所属・従事年数の専門家で構成されるグループでディスカッションを行うことが有効である。

- 関連した施設やデータを実際に取得している現場の見学を組み入れることが、セミナーの活性化、受講者の積極的な姿勢の維持等に役立つ。ただし、セミナーのテーマに関連した見学先を設定することが重要である。
- セミナーの最初に、導入として自己紹介や自身の研究内容等の紹介を行うことで、グループでの議論に受講者が参加しやすくなる、議論が活発に行われやすくなるなどの効果があると考えられる。

3.3.2 2022 年度のセミナーの開催方針

前述のように、2019 年は 60 名程度の受講者で地層処分に関する 3 分野を広くカバーするセミナーを行い、2020 年度及び 2021 年度には、受講者を少人数に絞り、アクティブラーニング形式を取り入れ、受講者が単に講義を聞くのではなく、グループワークなどで積極的に意見を交わすなど能動的に参加できる形式とした。また、アクティブラーニング形式を取り入れたセミナーで、2020 年度からの 3 カ年で、地層処分の主要な研究開発分野である地質環境、工学技術、安全評価の 3 分野を主テーマとして開催することを計画していた。

表 3.3-1　2020 年度から 3 カ年のセミナーの主テーマ
（当初計画と結果）

	当初計画したテーマ	実際に開催したテーマ
2020 年度	地質環境	地質環境（地下水）
2021 年度	工学技術	地下研究所
2022 年度	安全評価	安全評価

この 3 カ年で地層処分の 3 つの主要研究分野をテーマとしてセミナーを行う方針に従い、2022 年度は、安全評価をテーマとしたセミナーの開催を検討することとした。このように、テーマを変えて実施することで、当センターの構想するアクティブラーニング形式により、異なる専門分野を有す専門家がコミュニケーションをとることで、地層処分事業における異分野コミュニケーションの重要性、難しさ等への気付きを与えるという目的達成に適したテーマを検証することが可能となると考えれらる。

また、2021 年度に北海道幌延町の（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において、同センターの見学を含めたセミナーの開催準備をしていたが、新型コロナ感染症拡大のため、オンライン開催となり、同センターの見学が実施できなかった。このため、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、開催場所については、北海道稚内市内のホテルを主会場とし、JAEA 幌延深地層研究センターの見学を組み入れたものとすることを決定した。セミナーは 3 日間の日程とし、2 日目に幌延深地層研究センターの見学を組み込むこととした。実施のためには、JAEA の協力が不可欠であるが、JAEA との協議の結果、幌延深地層研究センターの見学及び講師の派遣に関して協力が得られることとなった。また、講師の派遣について NUMO からの協力も得られることとなった。

また、JAEA 幌延深地層研究センターの見学後、稚内市内に戻る場合には、2 日目に十分な時間を取ることが難しくなるため、見学後は幌延町内においてセミナーを行い、終了後に稚内市内に戻るスケジュールとした。

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

2022 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、毎年講師や多数の受講者（モニー）を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 3.3-2　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
2022 年 5 月 27 日	オンライン（JAEA・NUMO）	昨年度のセミナーの報告、2022 年度の人材育成セミナーの計画の説明、協力の依頼
2022 年 6 月 20 日	オンライン（JAEA・NUMO）	セミナーのテーマ案に対する議論
2022 年 7 月 11 日	オンライン（JAEA・NUMO）	セミナーのテーマ案、及び 3 日間のセミナースケジュールに関する意見交換
2022 年 8 月 22 日	オンライン（JAEA・NUMO）	講義、グループワークの具体的な実施内容案に対する意見交換
2021 年 9 月 6 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、今後のスケジュールの確認
2022 年 9 月 6 日	対面（NUMO のみ）	NUMO 担当の座学に関して、講師の依頼及び内容についての意見交換、今後のスケジ

		ュールの確認
2022 年 9 月 21 日	オンライン（JAEA・NUMO）	事前確認として、会場等の確認、全体の流れ、各パートの内容の確認

当センター内部での検討及び JAEA・NUMO との協議の結果、2022 年度の人材育成セミナーは、安全評価のうち、包括的技術報告書でのガラス固化体・TRU 廃棄物処分の安全評価、及び使用済燃料の直接処分と題材とした開催することとなった。この 2022 年度のセミナーでは、わが国の地層処分対象廃棄物であり、受講者にとって最もなじみのある、ガラス固化体の処分を一旦離れ、廃棄物をガラス固化体から使用済燃料に変えて安全評価を考えることで、地層処分技術をあらためて考えることを目論見とした（図 3.3-1）。

また、開催日程は、2022 年 10 月 3 日（月）～5 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、稚内市内のホテルを会場として確保し検討を進めた。JAEA の幌延深地層研究センターの見学に際しては、2 日目の 4 日（火）にバスをチャーターし稚内市内から移動して実施することとした。前述のように、時間の有効活用のため、2 日目の見学後は、幌延町内の会場（JAEA の国際交流施設）において、セミナーの一部を開催することとした。

図 3.3-1　セミナーのもくろみ及び 3 日間の構成

(2) 人材育成セミナーの構成

今年度の人材育成セミナーは、2020 年度及び 2021 年度の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、セミナーの構成を決定した。ポイントは、安全評価において対象廃棄物をガラス固化体から使用済燃料の直接処分に代えるという、受講者にわかりやすい例を考えることにより、処分対象の廃棄物、処分場の設計や処分する場所の特性（地質環境）との関わりを多面的に考えてもらうことにした。自分自身での内省あるいはグループ内の他者との対話を通じて、地層処分技術を広く俯瞰的に思考する機会を創出する狙いのため、座学（講義）の間に『学びを深めるコーナー』の時間を設定し、事務局側が用意した問題や作業に取り組むことで、能動的に学び、対話的に思考する時間を意識的に設定した。今回のセミナーの講師等は、JAEA 及び NUMO の協力を得るとともに、当センターも一部担当した。以下にセミナーの構成及び各セッションの目的を示す。

①前振り（担当：RWMC）

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）

各受講者が自身の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[h]）。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

h 『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。

処分事業における位置づけを記入し、紹介する（図 3.3-2 参照）。

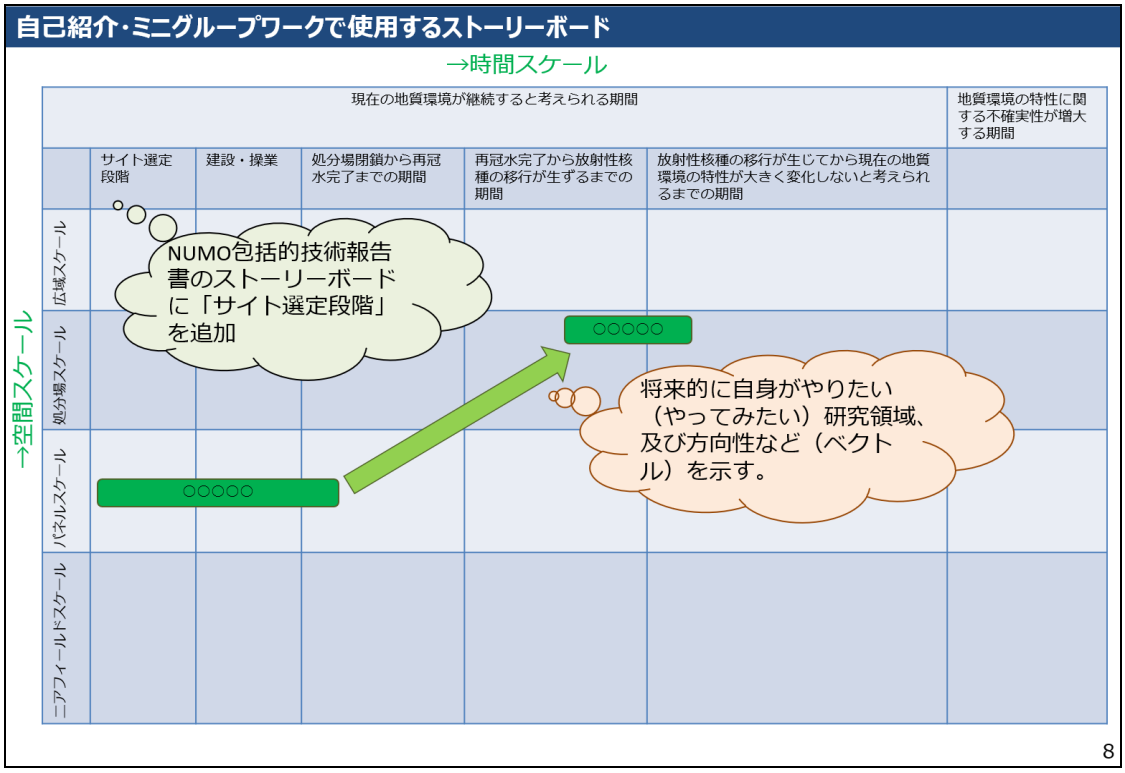


図 3.3-2　自己紹介で用いるストーリーボードと記入例

②座学及びグループワーク（ナビゲータ：RWMC、講師：RWMC、NUMO、JAEA）

3 日間の座学とグループワークの組み合わせ全体で、安全評価について、ソースタームに着目し異なる線量評価結果となる理由をさぐり、地層処分技術をより全体的に捉える見方を体験的に養うとともに、対話的に学習するというねらいを設定した。

具体的には、1 日目は、放射性廃棄物に関する基礎的知識を提供する座学（座学 0「地層処分対象の廃棄物について」）をまず行い、その後、安全評価の基礎及び NUMO の包括的技術報告書における安全評価を事前知識として提供するための座学 1「安全評価の基礎」及び座学 2「包括的技術報告書における安全評価」、「復習と学びを深めるコーナー」と題したグループワークを行う流れとした。グループワークでは、ナビゲータから問題を出し、グループで回答を考える形式で、異なる廃棄体からの溶出挙動と母岩の違いにより、異なる線量評価結果となることを学ぶ構成とした。最後に、閉じ込め機能を向上させるための研究開発の事例として、TRU 廃棄物処分における廃棄体開発に関する講義を行う構成とした。

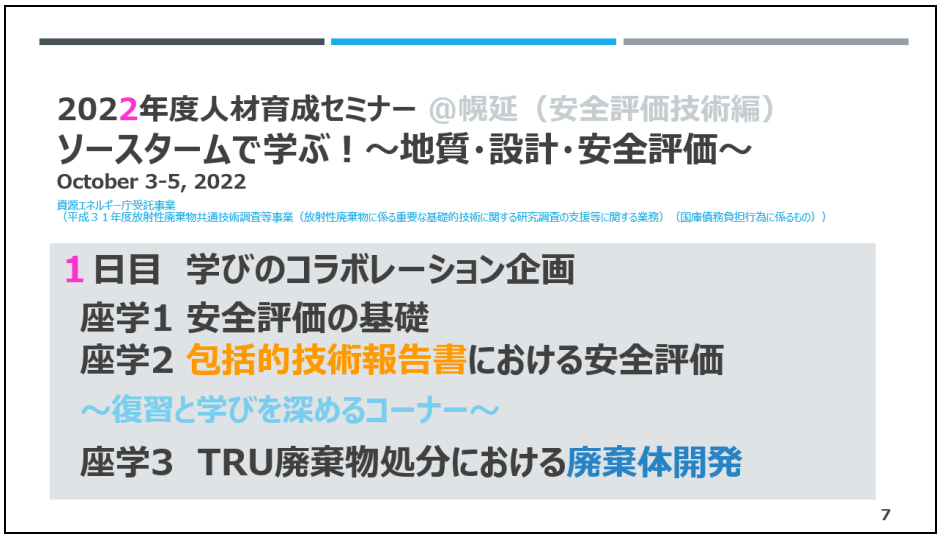


図 3.3-3　セミナー1 日目の企画

2 日目は、まず、稚内市内のホテルから幌延町の JAEA 深地層研究センターへ移動し、同センターの地下施設とゆめ地創館の見学、同センター近傍のボーリング調査実施場所の見学を行う。その後、2 日目から 3 日目の座学及びグループワークとして、座学 IV「使用済燃料の特徴」と座学 V「直接処分研究開発の取り組み」を行い、「復習と学びを深めるコーナー2」として、グループでナビゲータからの質問への回答を考える時間を設けた。最後にこのグループでの検討結果を 3 日目に紹介するという構成とした。この 2～3 日目は、ガラス固化体を使用済燃料に変えること、また、海外の異なる地質環境での使用済燃料の処分を考えることで、地層処分の安全性における母岩の役割を考えることにポイントを置いた。

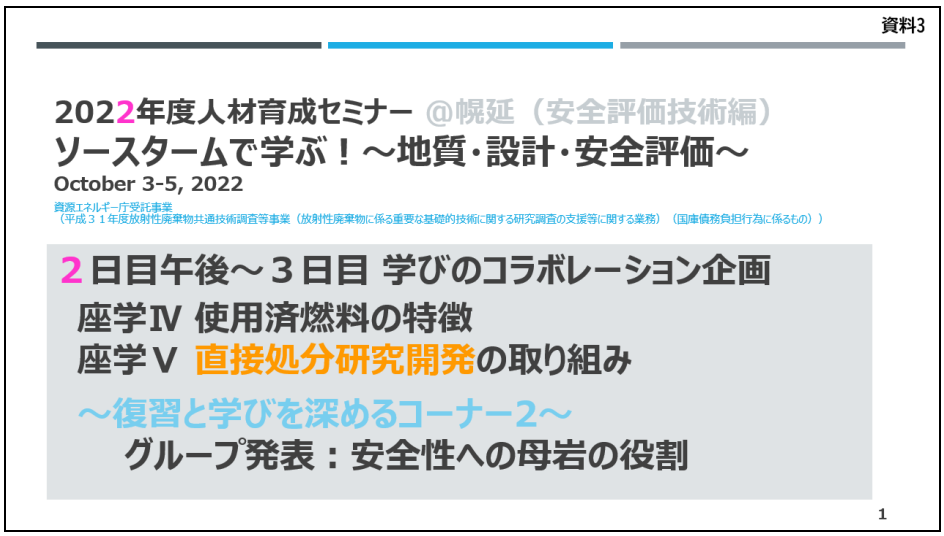


図 3.3-4　セミナー2 日目の企画

③幌延深地層研究センターの見学（説明：JAEA）

2 日目に幌延深地層研究センターの地下施設の見学、及び資源エネルギー庁委託事業「岩盤中地下水流動評価技術高度化開発」の一環で同センターの近傍で行われているボーリング調査（HFB-1 孔）の視察を行う。地下環境を実際に体験することで、地層処分場や地下環境がどのようなものか、またそこで行われている研究開発の状況などを把握することを目的とする。さらに、ボーリング調査の現場を見学し、今後行われることになる地層処分場のサイト選定における概要調査がどのようなものになるのか体験する。

以下に示すように、幌延深地層研究センターの見学では、一度に地下へ入坑できる人数に限りがあることから、受講者を 2 つの班に分け、地下施設と地上施設（ゆめ地創館）の見学を交互に実施することとした。

時刻	1 班	時刻	2 班
9:30-9:50	概要説明	9:30-9:50	概要説明
9:50-10:00	入坑にあたっての注意事項	9:50-10:00	入坑にあたっての注意事項
10:00-10:10	着替え	10:00-10:30	地上施設見学 ・ゆめ地創館 ・地層処分実規模試験施設
10:10-11:10	バス移動（10:10～10:15） 西立坑から入坑 バス移動（11:05～11:10）	10:30-10:40	着替え
11:10-11:20	着替え	10:40-11:40	バス移動（10:40～10:45） 西立坑から入坑 バス移動（11:35～11:40）
11:20-11;50	地上施設見学 ・ゆめ地創館 ・地層処分実規模試験施設	11:40-11:50	着替え
11:50-12:00	質疑	11:50-12:00	質疑

④振り返り（グループワーク）（担当：RWMC）

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。アンケートの回答をまとめることに役立つことが期待できる。

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。

●1 日目

時間	演目	内容	担当（敬称略）
13:30-13:35	前振り	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。	RWMC
13:35-14:25	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。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。	RWMC
14:25-14:35	休憩		
14:35-14:40	座学 0「地層処分対象の廃棄物について」	ガラス固化体や TRU 廃棄物の発生原因を簡単に説明（5 分）	RWMC
14:40-14:45 14:45-15:05 15:05-15:35	座学 1 「安全評価の基礎」	安全評価の概観 基本的な安全評価の進め方 安全機能と関連する核種移行プロセス（パラメータ）	JAEA
15:35-15:50	休憩		
15:50-16:40	座学 2	包括的技術報告書における閉鎖後長期の安全性の評価	NUMO
16:40-17:30	学びを深めるコーナー1	ナビケータが座学１&２から問題を出しつつ、一人ではなく受講者みんなで対話的に考えることにより、他の人に話す／他の人の考えを聞く機会をつくりつつ、理解を深める	RWMC グループ支援 JAEA・RWMC
17:30-17:35	座学 2+ 線量評価結果の読み解き／洞察力＝Insight	学びを深めるコーナーの問題を安全評価屋の視点で補足しつつ、安全評価の結果から、地質環境や工学設計へのフィードバックを紹介	NUMO
17:35-17:50	休憩		
17:50-18:10	座学 3 「TRU 廃棄物処分における廃棄体開発について」	ここまでの内容を踏まえ、エネ庁事業で TRU の研究開発が行われている背景、戦略、方向性（アプローチ）等を紹介（20 分）	RWMC

●2 日目

時間	演目	内容	担当
8:30-9:30	バス移動	稚内⇒幌延深地層研究センター 車内で幌延深地層研究センターにおいて行っている研究開発に関する説明を実施	JAEA
9:30-12:00	JAEA 深地層研究センター見学※	実際の地下施設の現場の見学	JAEA
12:00-13:00	昼食	ゆめ地創館の多目的室	
13:00-14:00	ボーリング調査現場の見学	エネ庁事業「岩盤中地下水流動評価技術高度化開発」での HFB-1 孔の見学	JAEA
14:00-14:30	バス移動	深地層研究センター⇒JAEA 国際交流施設	
14:30-15:00	話題提供（見学のふりかえり）	普段見る機会のない地下施設を見ての感想と地下研究施設の今後の活用方法などについて受講者の意見を聞く（30 分）	JAEA
15:00-15:02	導入	ガラスと使用済燃料の両方を一つの処分場で処分する国は多いことを説明	RWMC
15:00-15:05	座学 4 「使用済燃料の直接処分の研究開発－使用済燃料の特徴（ガラス固化体との違い） －」	直接処分検討の背景（5 分）	JAEA
15:05-15:20		高レベルガラス固化体と使用済燃料のインベントリの違いやソースターム（瞬時放出成分など）について（15 分）	JAEA
	つなぎ		RWMC
15:20-16:00	座学 5 「使用済燃料の直接処分の研究開発－原子力機構における研究開発の現状と課題－」	JAEA の直接処分研究開発の取り組み（40 分）	JAEA
16:00-16:10	休憩		
16:10-17:30	学びを深めるコーナー2	● ナビケータが座学ー IV&V から問題を出しつつ、一人ではなく受講者みんなで対話的に考えることにより、他の人に話す／他の人の考えを聞く機会をつくりつつ、理解を深める 受講者は、翌日（3 日目午前）のグループ発表のための準備	RWMC
17:30-18:30	バス移動		

●3 日目

時間	演目	内容	担当
9:00-9:05	事務連絡		
9:05-9:45	学びを深めるコーナー2 グループ発表 「多重バリア処分システムにおける母岩と地圏の役割」	昨日グループで議論した内容をグループごとに発表し、他のグループとの意見交換を実施（40 分）	RWMC
9:45-9:50	学びを深めるコーナー2 のまとめ	まとめ（5 分）	RWMC
9:50-10:00	休憩		
10:00-11:10	全体ふりかえり	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。（70 分）	RWMC
11:10-11:20	講評・終了		

3.3.4 人材育成セミナーの開催に向けての準備等

(1) 受講者（モニター）募集

2020 年度及び 2021 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うこととした。これは、3 年間でテーマを変えて実施する計画であり、対象とする受講者（モニター）層はそろえる必要があるためである。

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、14 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）及び属性別の人数は、以下の表 3.3-3 及び表 3.3-4 とおりである。

表 3.3-3　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（30 歳以上、未満）
JAEA	地質環境調査評価技術	5 年未満（4 年）	30 歳以上
JAEA	地質環境調査評価技術	5 年未満（2 年）	30 歳以上
JAEA	地質環境調査評価技術	5 年未満（1 年）	30 歳未満
JAEA	安全評価技術	5 年未満（3 年）	30 歳未満
JAEA	工学技術	5 年未満（2 年）	30 歳未満
NUMO	安全評価技術	5 年未満（4 年）	30 歳未満
NUMO	工学技術	5 年未満（4 年）	30 歳未満
NUMO	工学技術	5 年未満（2 年）	30 歳以上
NUMO	その他（環境影響評価）	5 年未満（2 年）	30 歳以上
RWMC	工学技術	10 年以上（12 年）	30 歳以上
RWMC	工学技術	5 年未満（2 年）	30 歳以上
RWMC	安全評価技術	5 年未満（3 年）	30 歳以上
AIST	地質環境調査評価技術	10 年以上（14 年）	30 歳以上
CRIEPI	安全評価技術	5 年未満（3 年）	30 歳未満

表 3.3-4　人材育成セミナー受講者（モニター）の属性別の人数

所属機関の略称は次のとおり。JAEA：（国研）日本原子力研究開発機構、NUMO：原子力発電環境整備機構、AIST：（国研）産業技術総合研究所、CRIEPI：（一財）電力中央研究所、RWMC：（公財）原子力環境整備促進・資金管理センター

			地質環境	工学技術	安全評価	その他
性別	男性	11	3	4	3	1
	女性	3	1	1	1	0
年齢層	20代	6	1	2	3	0
	30代	4	2	0	1	1
	40代	4	1	3	0	0
従事年数	5年未満	12	3	4	4	1
	5年～10年	0	0	0	0	0
	10年以上	2	1	1	0	0
	計	14	4	5	4	1

受講者についてはキャリア 5 年程度を対象として各機関に派遣を要請したが、各機関で

の業務の関係などにより、今回のセミナーでは、地層処分事業への従事年数の比較的短い受講者（モニター）が大半となった（14 名中 12 名；表 3.3-3)。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）の受講者も比較的少ない結果となった。一方で、専門分野に関しては、地質環境調査技術が 4 名、工学技術が 5 名、安全評価が 4 名、その他が 1 名となり、地層処分研究開発の主要 3 分野が概ね均等に含まれている結果となった。

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) 受講者のグループ分け

本セミナーでは、受講者が少人数のグループにおいて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ことを目的の 1 つとしているため、グループワークが円滑に行われることは重要な要素であり、このためにはグループ構成が非常に重要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る。

また、本セミナーの目的（異なる分野の専門家とのコミュニケーションの難しさや重要性の理解）のためには、グループメンバーの専門分野の多様性を増すことが有効であることがわかっている。このため、今年度のセミナーでは、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）が可能な限り多様となるよう、14 名を 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	地質環境調査技術	5 年未満（2 年）	30 歳以上
NUMO	安全評価技術	5 年未満（4 年）	30 歳未満
RWMC	工学技術	10 年以上（12 年）	30 歳以上
CRIEPI	安全評価技術	5 年未満（3 年）	30 歳未満

●グループ 2

所属	専門分野	従事年数	年齢
JAEA	地質環境調査技術	5 年未満（4 年）	30 歳以上
JAEA	工学技術	5 年未満（2 年）	30 歳未満
NUMO	工学技術	5 年未満（2 年）	30 歳以上
NUMO	その他（環境影響評価）	5 年未満（2 年）	30 歳以上
RWMC	安全評価技術	5 年未満（3 年）	30 歳以上

●グループ 3

所属	専門分野	従事年数	年齢
JAEA	安全評価技術	5 年未満（3 年）	30 歳未満
JAEA	地質環境調査技術	5 年未満（1 年）	30 歳未満
NUMO	工学技術	5 年未満（4 年）	30 歳未満
AIST	地質環境調査技術	10 年以上（14 年）	30 歳以上
RWMC	工学技術	5 年未満（2 年）	30 歳以上

さらに、グループワークにおいては、テーマに専門性を有す専門家がグループに入り、議論を支援することができた場合には、議論が活発に行うことができるようになり、各メンバーの理解も進む可能性が高いと考えられる。このため、3 日間のセミナー期間中に座学を担当してもらった講師に各グループに参加してもらい議論の支援を行ってもらうこととした。

(3) 最終確認の実施等

セミナーの全体の流れや座学等の内容を事前に確認しておくため、2022 年 9 月 21 日にオンラインで最終確認を実施した。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。

(4) 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、これまでの本事業でのセミナーと同様に、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設計した。

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 7 つの項目で構成することとした（アンケートは別添資料 5 参照）。

1. 座学 0「地層処分対象の廃棄物について」及び座学 1「安全評価の基礎」について
   安全評価のための前提条件としての廃棄物の発生、処理、また、安全評価の基本的な進め方、安全機能に関連するパラメータなどの理解度、関連して聞いてみたい内容等に関する質問を設定
2. 包括的技術報告書の閉鎖後長期安全評価（座学 2～復習・学びを深めるコーナー～座学 3）
   1 日目に包括的技術報告書の安全評価を題材とし、座学と演習を交えて学習した線量寄与が高い核種とその理由に関連して、移行特性等により安全評価結果の差がでること等の理解度の確認のほか、学習したことが自身の今後に役立つと思うか、また、線量評価結果に影響の大きな核種からの線量を下げるためにはどのような研究開発が必要かなどの質問を設定
3. 幌延深地層研究センターの視察
   2 日目に実施した JAEA の幌延深地層研究センター及びボーリングサイトの視察に関連して、これまでの同センターの視察経験の有無、同センターの視察を他の人に勧めるか、ボーリングサイトの見学により、サイト選定における地上からの調査のイメージがつかめたかなどの質問を設定
4. 使用済燃料の直接処分研究開発及び海外事例を用いたグループワーク
   使用済燃料の直接処分研究開発の必要性、廃棄物としての使用済燃料の特徴の理解、地質環境により人工バリアに期待する役割が変わることなどの理解についての質問を設定
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、各実施内容

に関する満足度等の質問を設定

6. 地層処分に関わる学びの手段・機会

普段の業務における他の組織や異なる専門分野の人との交流の有無、一緒に仕事をしていく場合に難しい点、地層処分に関する一般的な教養がどの程度あるのかなどの質問を設定

7. 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、電子ファイルを受講者に事前に配布し、2022 年 10 月 17 日（月）を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、3 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、ふりかえりの時間内に一部の質問の 5 段階評価の部分の回答を記入してもらった（詳細は後述）。

3.3.5 人材育成セミナーの開催

(1) 2022 年度人材育成セミナーの開催概要

2022 年度人材育成セミナーは、「ソースタームで学ぶ！～地質・設計・安全評価～」と題し、以下の日程・参加者で北海道稚内市及び幌延町で開催した。

①開催日時：2022 年 10 月 3 日（月）～5 日（水）

②参加者：受講者（モニター）：14 名、講師（JAEA）：4 名、講師（NUMO）：1 名、講師（RWMC）：1 名、ナビゲータ（RWMC）：1 名、オブザーバ（AIST）：1 名

受講者内訳：原子力発電環境整備機構（NUMO）：4 名、
（国研）日本原子力研究開発機構（JAEA）：5 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）：1 名

以降に 3 日間の開催概要を示す。

(2) 1日目（10月3日（月））の開催概要

セミナーの初日は、東京からの受講者や講師が、当日の直行便で稚内市に移動して参加できるよう、プログラムは午後から開始とした。

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 3.3-5）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

なお、ストーリーボードは事前にファイルを配布し、当日記入し印刷したものを持参するよう依頼しておいた。

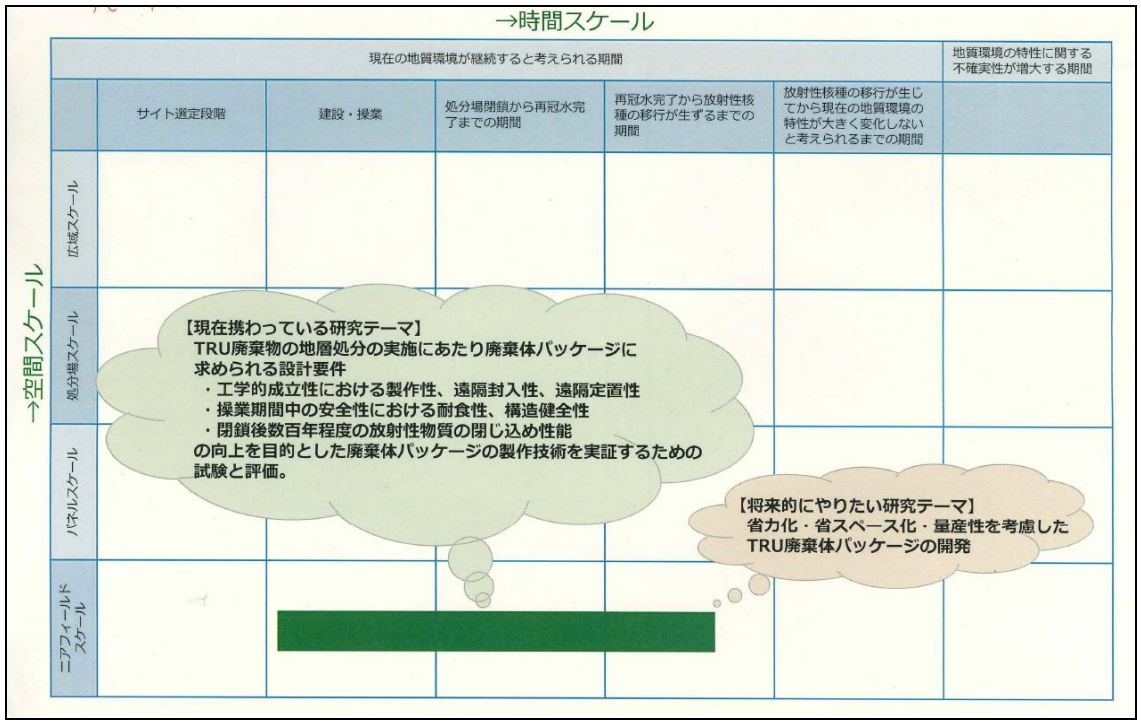


図 3.3-5　ストーリーボードの実際の記入例

その後、1 日目のメインセッションを行った。メインセッションは、ナビゲータ役（RWMC が担当）が進行を行い、図 3.3-6 に示すように、座学と学びを深めるコーナーと題したグループで問題を考える時間で構成した。まずは、安全評価に関する基礎的な知識を提供する座学 0 及び 1 を行った後、NUMO の包括的技術報告書における閉鎖後長期の

安全評価について NUMO から講義を行った。

時間（質疑応答含む）			内容	
14:35	14:40	5分	座学0 地層処分対象の廃棄物について〔8枚〕	RWMC
14:40	15:35	55分	座学1 安全評価の基礎〔38枚〕講演＋質疑応答で55分	JAEA
			小休憩（15分）	
15:50	16:40	50分	**座学2 包括的技術報告書における閉鎖後長期の安全性の評価〔44枚〕** 講演40分＋質疑応答10分を予定（質疑は次のコーナー内でも対応できそう）	NUMO
16:40	17:35	55分	**学びを深めるコーナー** ナビケータが座学１&２から問題を出しつつ、一人ではなく受講者みんなで対話的に考えることにより、他の人に話す／他の人の考えを聞く機会をつくりつつ、理解を深める ● コーナー問題１，２（RWMC） ● 座学2+（10～15分）〔7枚〕 ● コーナー問題３（RWMC）	RWMC NUMO
			小休憩（15分）	
17:50	18:10	20分	座学3 TRU廃棄物処分における廃棄体開発について〔14枚〕	RWMC

図 3.3-6　１日目のセッションの構成

NUMO により包括的技術報告書の閉鎖後長期の安全評価の講義の後、包括的技術報告書の安全評価結果に基づき、ナビゲータから各グループで議論し回答を考えるための問題を提供した（図 3.3-7）。その際には、JAEA 及び RWMC の講師が議論を支援するために各グループに参加した。

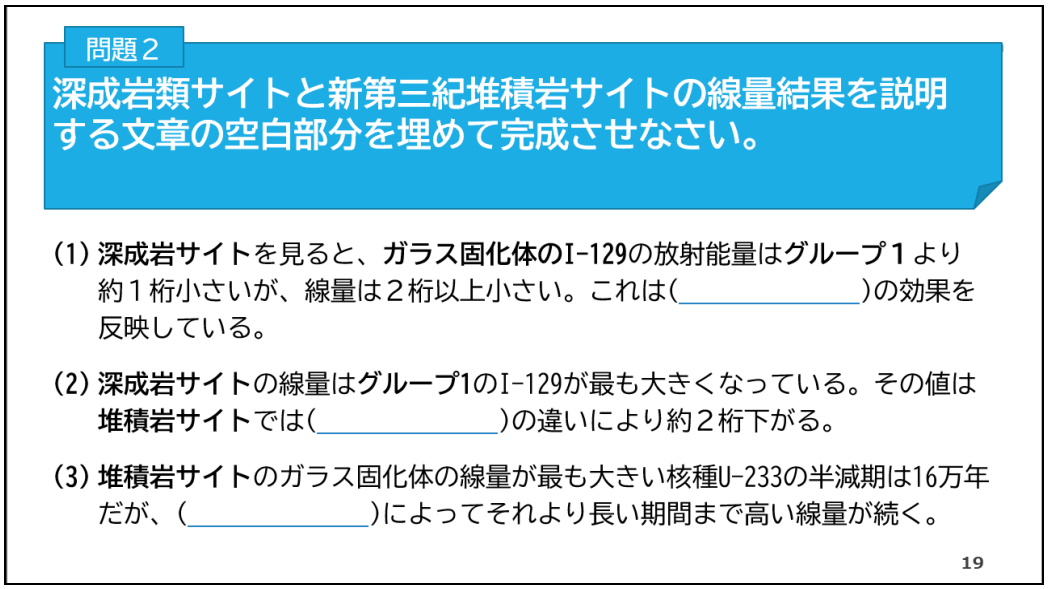


図 3.3-7　学びを深めるコーナーでの問題

図 3.3-8　1 日目の学びを深めるコーナーの様子

さらに、学びを深めるコーナーの問題を安全評価の専門家の視点で補足しつつ、安全評価の結果からわかることと、地質環境や工学設計へのフィードバックについて NUMO から解説を行った。その後、ナビゲータより、再度課題を提供し、グループで議論し考える時間を取った。ここまでの講義やグループでの議論を踏まえ、線量評価結果に影響する閉じ込め機能を向上させるための研究開発（R&D）である、資源エネルギー庁事業での TRU 廃棄物処分における廃棄体開発の事例を紹介し 1 日目を終了した。

(3) 2 日目（10 月 4 日（火））の開催概要

2 日目は、稚内市内のホテルからチャーターしたバスで、幌延町の JAEA 深地層研究センターに移動した。移動の車内において、JAEA から幌延深地層研究センターの基本情報を含め、現在行われている研究開発などの簡単な説明を行った。

幌延深地層研究センターでは、受講者は 2 班に分かれ、同センターの地下施設と地上のゆめ地創館を交互に見学を行った（図 3.3-9）。ただし、今回の見学では、地下坑内での作業等の関係で、深度 250m の調査坑道の見学となり、研究開発が現在進行中である深度 350m の調査坑道の見学を行うことはできなかった。

図 3.3-9　地下施設の見学の模様

2 日目の午後、幌延深地層研究センターの近傍において実施されている、資源エネルギー庁事業「岩盤中地下水流動評価技術高度化開発」でのボーリング（HFB-1 孔）の掘削現場の見学を行った。

図 3.3-10　「岩盤中地下水流動評価技術高度化開発」でのボーリング（HFB-1 孔）の掘削現場の見学の様子

ボーリング現場の見学後、バスで幌延町内にある JAEA の国際交流施設に移動し、まずは、見学のふりかえりを行った（JAEA が主導）。その後、2 日目の講義・グループでの活動を実施した。2 日目の講義・グループでの活動は、図 3.3-11 に示すように、使用済燃料の直接処分に焦点を当て、廃棄体としての使用済燃料の情報提供、JAEA にて行われている使用済燃料の直接処分に関する研究開発の現状と課題の説明を行った後、ナビゲータから問題を提示し、グループで議論し回答を検討する「学びを深めるコーナー」を行った。以下にそれぞれの実施概要を示す。

時間（質疑応答含む）			内容	
08:30	14:30		幌延深地層研究センター 地下＆ボーリング調査現場 視察	
14:30	15:00		市内交流センターにて「地下を見た」視察ふりかえり　と 小休憩	JAEA幌延
15:00	15:02	2分	導入〔4枚〕…ガラスと使用済燃料の両方を一つの処分場で処分する国は多い	RWMC
15:02	15:20	18分	座学4 使用済燃料の特徴（ガラス固化体との違い）〔12枚〕 ● 直接処分検討の背景 ● インベントリや放出挙動の違い	JAEA
			つなぎ〔2枚〕	RWMC
15:20	16:00	40分	座学5 原子力機構における直接処分研究開発の現状と課題〔31枚〕	JAEA
			小休憩（10分）	
16:10	17:30	80分	学びを深めるコーナー ● ナビゲータが座学－4＆5から問題を出しつつ、一人ではなく受講者みんなで対話的に考えることにより、他の人に話す／他の人の考えを聞く機会をつくりつつ、理解を深める ● 受講者は、翌日（3日目午前）のグループ発表のための準備	RWMC グループ支援 JAEA/RWMC
17:30	18:30	20分	バス移動：交流センター（幌延市内）→稚内（宿泊所）	

図 3.3-11　セミナー2 日目のセッションの構成

座学 4「使用済燃料の特徴」では、わが国における直接処分研究経緯、使用済燃料の廃棄物としての特徴、特にガラス固化体との違いなどについて情報提供を行った。処分においては、以下を考える必要があることなどを説明した。

- 時間の経過に伴う全放射能の減衰が遅い
- ガラス固化体に比べて，発熱量が高い
- 臨界可能性を考慮した設計・評価が必要
- 保障措置・核セキュリティに係る諸制度の適用等についての検討が必要
- 放射線分解の影響が大きい可能性があり、この検討・評価が必要

次に座学 5「使用済燃料の直接処分の研究開発－原子力機構における研究開発の現状と課題－」では、2015 年に公表された、直接処分研究開発に関するわが国で最初の総合的な

取りまとめ報告書「わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価-直接処分第 1 次取りまとめ-」（以降、「直接処分第 1 次取りまとめ」という）の概要について情報提供を行った。その後、復習と学びを深めるコーナーとして、図 3.3-12 に示すように、以下の 4 つの項目について個人やグループで考えるための問題を提示した。

- Q1：自分の仕事と自分の仕事と直接処分研究開発との接点を考えてみる
- Q2：数%の瞬時放出成分のインパクトの大きさを確かめる
- Q3：地質による処分場概念のバリエーションを見る
- Q4：地圏／母岩の役割について考えを深める

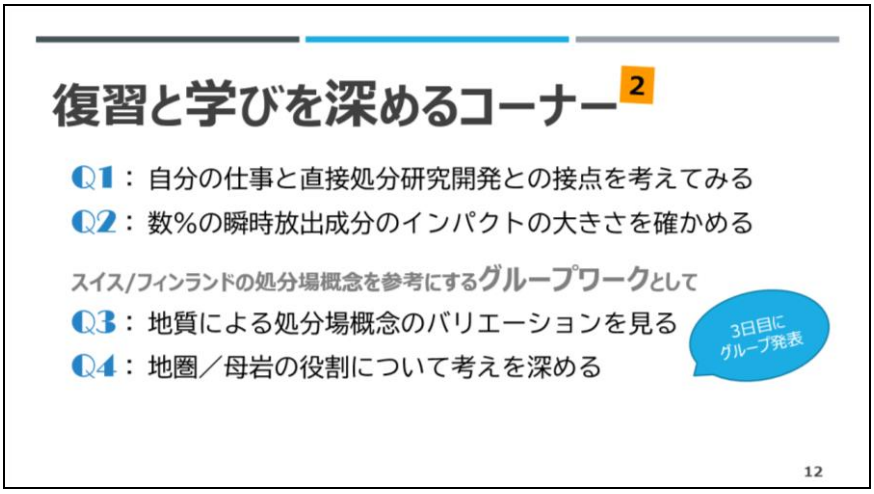


図 3.3-12　2 日目の復習と学びを深めるコーナーの内容

Q1（図 3.3-12）では、海外の使用済燃料直接処分の事例を考える前の予備知識として、直接処分の成立性の確認において抽出された課題を示す図上[3]で、自身の業務との接点があると思われる部分に青いシールを張ってもらうことで、直接処分と自身の業務とのつながりを考えてもらった（図 3.3-13）。

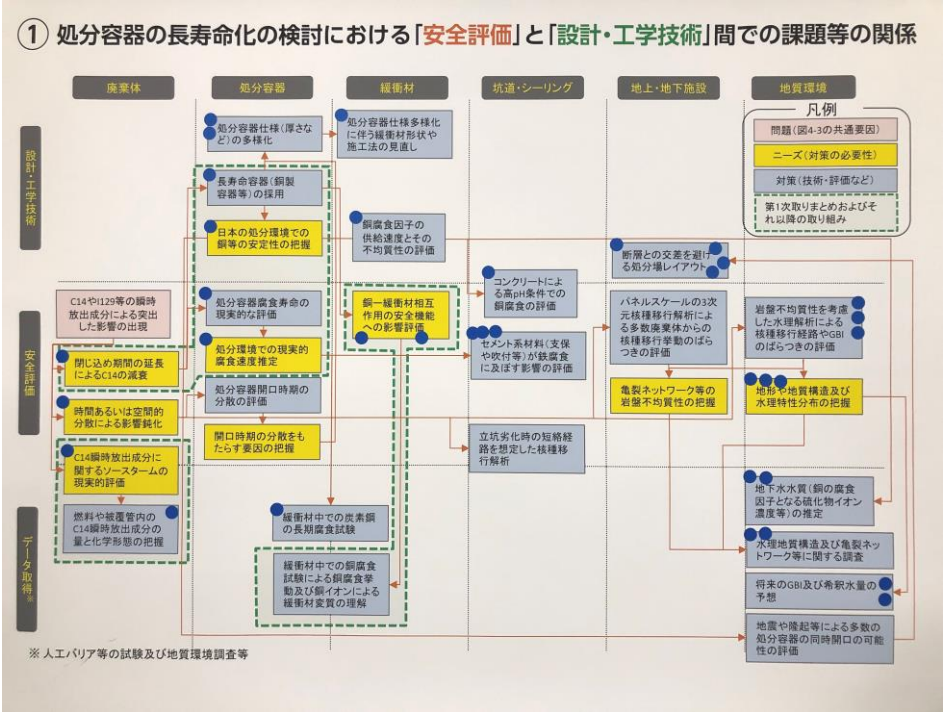


図 3.3-13　Q1（図 3.3-12）で受講者がシールを張った結果（元図の出典は[3]）
青い丸は受講者が張ったシール

次に、Q2（図 3.3-12）では、使用済燃料からの瞬時放出成分が、人工バリアや母岩からの核種移行率に与える影響を考える課題を与えた。その後、1 人ではなく受講者全員で対話的に考えることにより、他の人に話す／他の人の考えを聞く機会を作りつつ、理解を深めることを目的として、ナビケータが座学 4 及び 5 から問題（Q3 及び Q4）を提示した。具体的には、スウェーデンとスイスの使用済燃料直接処分の母岩を含めた処分概念の違い、両国の閉鎖後長期の安全評価結果から母岩の役割をグループで考える課題とした。各グループが考えた結果は、模造紙に記入してもらい、3 日目の午前に発表してもらった（図 3.3-14）。

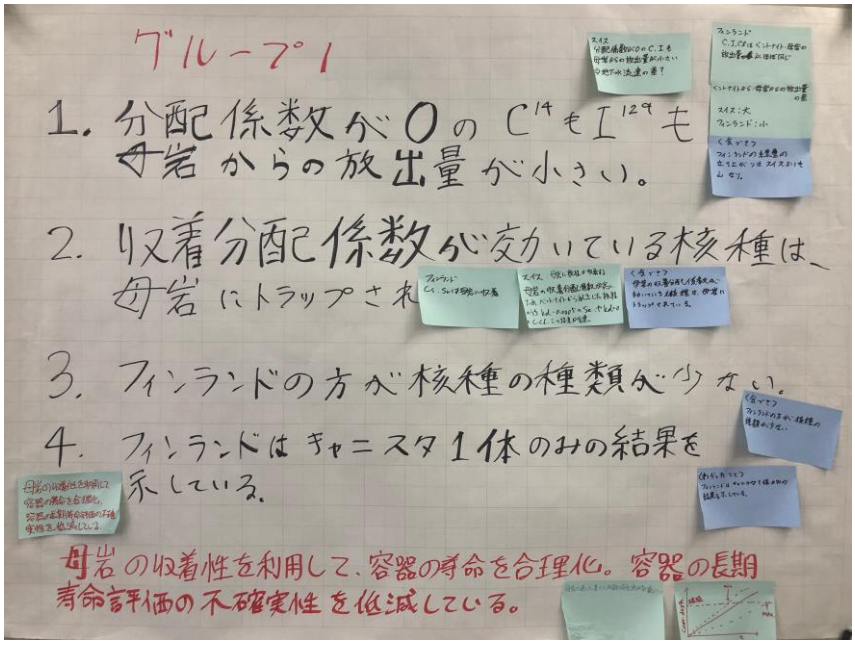


図 3.3-14　海外の直接処分結果を用い母岩の役割等を考えるグループワークの結果の例

(4) 3 日目（10 月 5 日（水））の開催概要

3 日目は、前述のように、まず 2 日目に各グループで議論しまとめた課題の検討結果をグループごとに発表してもらった（図 3.3-15）。

図 3.3-15　2 日目のグループワークの取りまとめ結果発表の様子

その後、3 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 3.3-16 に示したスライドを用い、3 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。

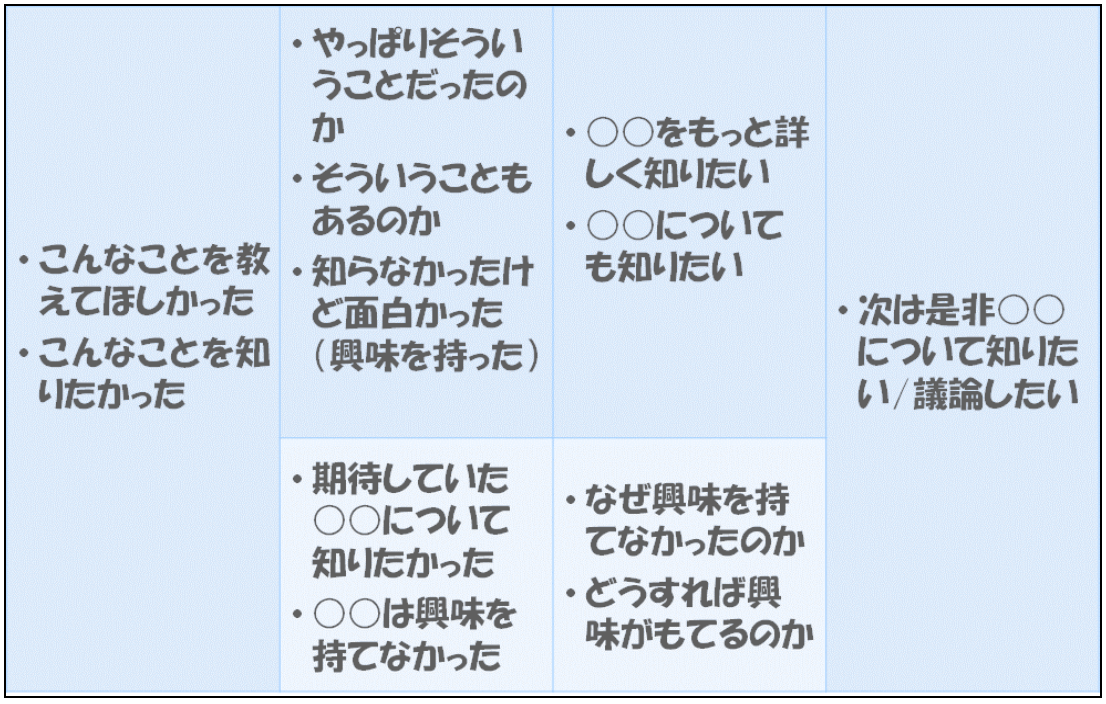


図 3.3-16　「ふりかえり」で用いたスライド

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 3.3-5　ふりかえりでの大まかな分類ごとの主な意見

STEP1	STEP2	STEP3	STEP4
当初の期待 ・こんなことを知りたかった	自身の発見 ・そういうこともあるのか	自身が深めたい事柄 ・～についてもっと詳しく知りたい	次回セミナーにおいて皆で議論したいテーマ提案
【技術的関心】 ・安全評価の対象にする核種の選び方についても教えて欲しかった。（なぜ、その核種の影響を評価することになったのか？） ・我が国が現状の安全評価手法を選択したプロセス ・核種移行率の計算方法（1 次元の解析解） ・包括的技術報告書での安全評価の設定・考え方の解説 ・地下研の見学⇒安全評価への貢献？ ・地層処分における「地質」の役割について知りたかった ・性能評価に対する他分野・異分野の方の考えか認識 ・安全評価の種類や目的、安全評価と他分野のつながり ・ソースタームとは・・・・ 具体的に学べるのだと思った。 ・一般の方（幌延の見学者）の地層処分に対する姿勢や意見と職員の対応 ・安全評価結果の使い方	【技術的関心】 ・直接処分の安全評価・第 1 次とりまとめ （知らなかったが興味を持った） ・安全評価上の工夫 地質 評価の見せ方 ・安全評価の前提条件や図の見方を知れてよかった。 ・地質について興味を持った ・地層処分における「地質」の位置づけについて理解できた	【技術的関心】 ・セーフティケースが 1,000 年後の全量破損を設定した安全戦略 （地質環境未定な中で） ・工学技術の現在の課題（工程を考えたときに実現可能か） ・生物圏での影響評価の概要 ・より精緻な安全評価への展開と実際に取得可能な情報、実現可能な品質との兼ね合い ・工学・調査にとって安全評価の意義や求めること ・シナリオ設定の難しさ 戦略 分野間連携 ・NUMO SC ・違う方法論での R&D ガラス固化、TRU ・前提条件を決めるプロセスや経緯を知りたかった ・安全評価の話も知りたい 【セミナー内容面】 ・フィンランドとスイスの安全評価が示された理由について	【技術的関心】 ・知識マネジメントの現在。誰が全ての組織の知見・データをまとめるのか ・知識・経験の伝承 ・違う方法論での R&D ・ガラス固化、TRU ・社会や事業者のニーズ 【技術者間の対話】 ・調査、設計、評価それぞれの他分野の人への思い、考え、ニーズ、課題 【セミナー形式面】 ・話を聞く割合よりも手を動かす、議論する割合を増やす方が、対面の価値があると考えました。 ・各分野でざっくばらんに言いたいことを言う場（ゆるやかなブレスト） ・少し時が経た後のフォローアップ

3.3.6 アンケート結果の整理及び考察

本事業の目的である人材育成プログラムの作成、来年度以降のセミナーへの反映等のため、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 14 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。

アンケートの回答から、以下について評価・考察をまとめる。

① 受講者のデータ（特徴、バックグランド等）

② 安全評価の何を学ぶことができたのか（目論見との比較等）

③ 地下研究施設見学の意義

④ 異分野交流の意義

⑤ その他

⑥ まとめ

(1) 受講者のデータ（特徴、バックグランド等）

受講者に事前に記入してもらった申込書、及びアンケート結果から今回の受講者のバックグランド、これまでの安全評価との接点などを分析する。

●セミナーに期待すること

受講申込書に記載のセミナーに期待することの抜粋を下表（表 3.3-6）に示す。これらの期待することを把握したうえで、アンケート結果を考察することで、受講者のセミナーに対する感想・意見の背景を分析することができると考えられる。

表 3.3-6 受講者のセミナー参加前のセミナーに対する期待（抜粋）

地質環境で得られたデータの安全評価での役割
閉鎖後長期の安全性を確保するための手法や、ソースターム評価に対する考え方を学ぶことで、普段担当している分野である工学的対策の有効性について理解を広める
安全評価に対する他分野・異分野の方の考え方
安全評価の種類や目的、安全評価と他分野のつながり
地層処分の工学技術に加え、安全評価に係る知見や、他分野の方々との交流を通した、自己の能力の底上げ
安全評価のパラメータの設定方法や考え方、計算方法
安全評価結果の使い方

●本セミナー以前の安全評価への接触度

受講者に対して、これまでに地層処分の安全評価に関わったことがあるのかをアンケートにおいて聞いた。その結果を図 3.3-17 に示す。また、専門分野別で分類した結果を図 3.3-18 に示す。

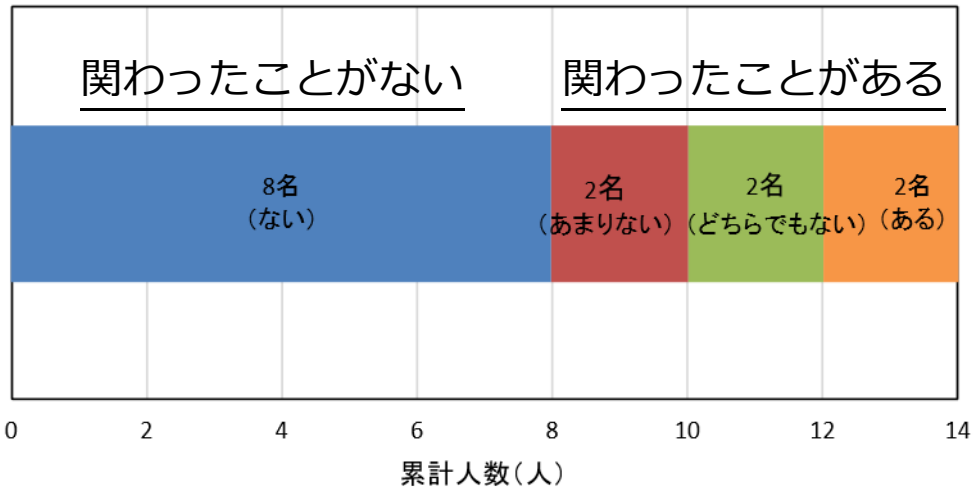


図 3.3-17　安全評価への関与経験の有無

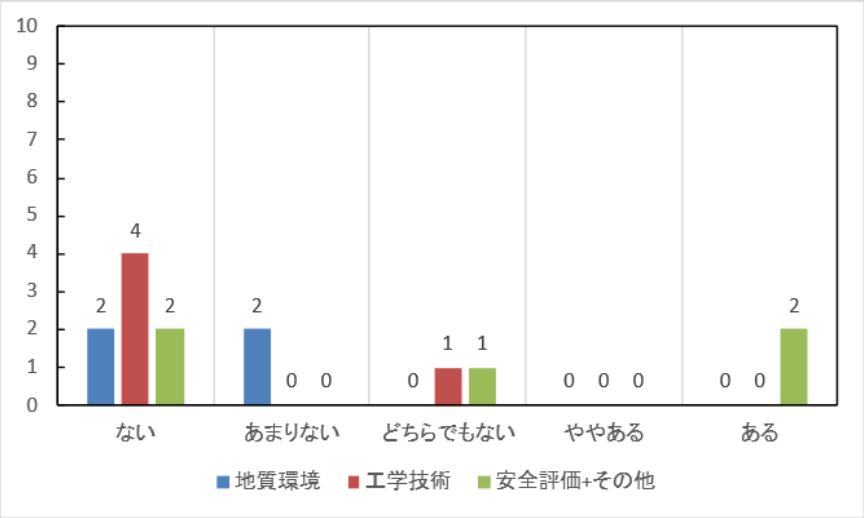


図 3.3-18　安全評価への関与経験の有無（分野別）

さらに、この質問の回答に対する受講者からの意見を以下に示す。

- 工学分野の担当に従事しており、安全評価を担当する機会がなかった。
- 安全評価について携わったことがないため、関連する研究者と議論することができてよかった。
- 安全評価に直接関わった経験はほとんどなかった。今回のセミナーを通じて、安全評価という言葉の意味や使われ方を考えることができた。地質・設計・安全評価を統合的に考えることが重要であることが認識できた。
- 従事している研究は安全評価の基盤となるものであり、その点では安全評価に関わ

りがあると考えている。一方で、シナリオ作成や線量評価などには直接関わってきてはいない。

これらの結果からは、専門分野が地質環境評価技術や工学技術の場合には、これまでほとんど安全評価に関わってきていないことがわかる。また、受講者の意見からは、地層処分に関する研究開発を行っている専門家であっても、業務に関係のない分野を学ぶ機会はない（積極的に学ぼうとはしない、または学ぶ時間がない？）現状が見て取れる。

●本セミナー以前の安全評価（NUMO 包括的技術報告書）への接触度

受講者の本セミナーへの参加以前における、地層処分の閉鎖後長期の安全評価への関わり度合を知るために、NUMO の包括的技術報告書の閉鎖後長期の安全評価に係る章を読んだことがあるのか質問した。その結果を図 3.3-19 に示す。また、専門分野別に分類したものを図 3.3-20 に示す。

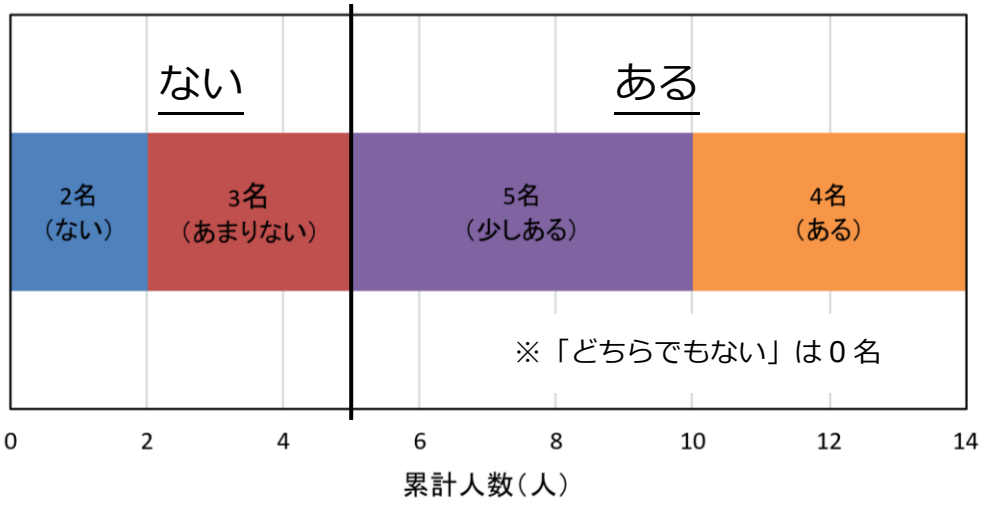


図 3.3-19 NUMO 包括的技術報告書の閉鎖後安全評価の章の読書経験の有無

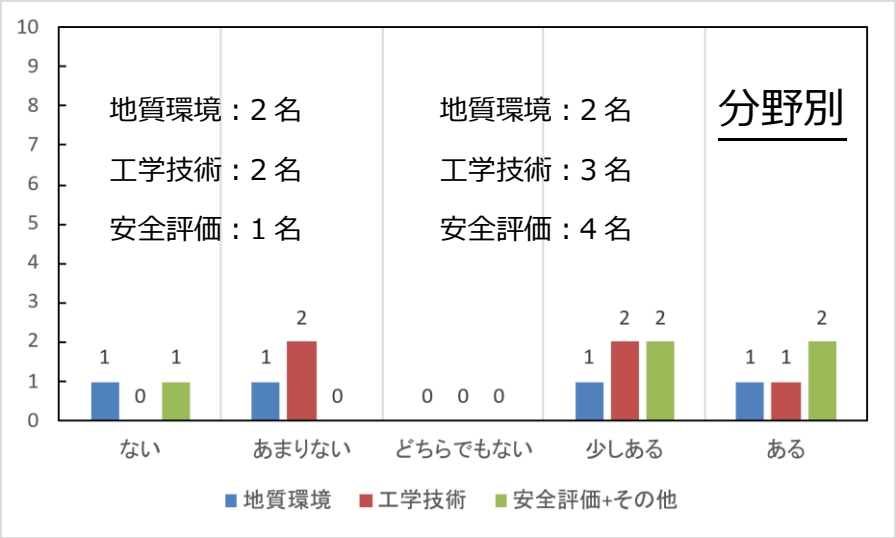


図 3.3-20　NUMO 包括的技術報告書の閉鎖後安全評価の章の読書経験の有無（専門分野別）

さらに、この質問の回答に対する受講者からの意見を以下に示す

- 自らが関わっている研究分野との関連性が低いため、読んだことがない。
- 本セミナー参加が決まってから、概要版を少し読んだ。
- 業務に関連する章しか読んでおらず、閉鎖後長期安全評価に関連する章はまだ読んでいませんが、今回のセミナーで関心が高まりましたので読みたい。
- 包括的報告書については長期安全評価の章を含む概要編のみ読んだことがある。
- 研究対象としている緩衝材に関する部分に関しては、該当する章の内容を一部読んだことがある。
- 包括的技術報告書は一通り読んだことがあるため、経験としてはあるものの専門的な内容については深く理解できていない部分も多い。

NUMO の包括的技術報告書の閉鎖後長期の安全評価を読んだことの有無について分野間の偏りはあまりないという結果であった（図 3.3-20）。また、NUMO の包括的技術報告書に関しても、自身の業務を関連性のある部分を読んだことはあるが、関連性が低い場合には閉鎖後長期の安全評価の章は読んでいないという受講者が比較的いることがわかる。また、このセミナーがきっかけで読んだ（または関心を持った）という意見もあり、専門以外の分野を学習する機会創出という観点で、本セミナーが貢献可能であると言える。

●業務における他組織や他の専門分野の人とのかかわり

受講者の他の組織や専門分野の異なる人との業務でのかかわりについて質問した。結果は、過半数（8 名）の受講者が「あまりない」と回答し、5 名が「ある程度ある」との回答であった。「日常的にある」と回答した受講者は 1 名のみであった（図 3.3-21）。受講者の専門分野別では、特に傾向の偏りは見られなかった（図 3.3-22）。

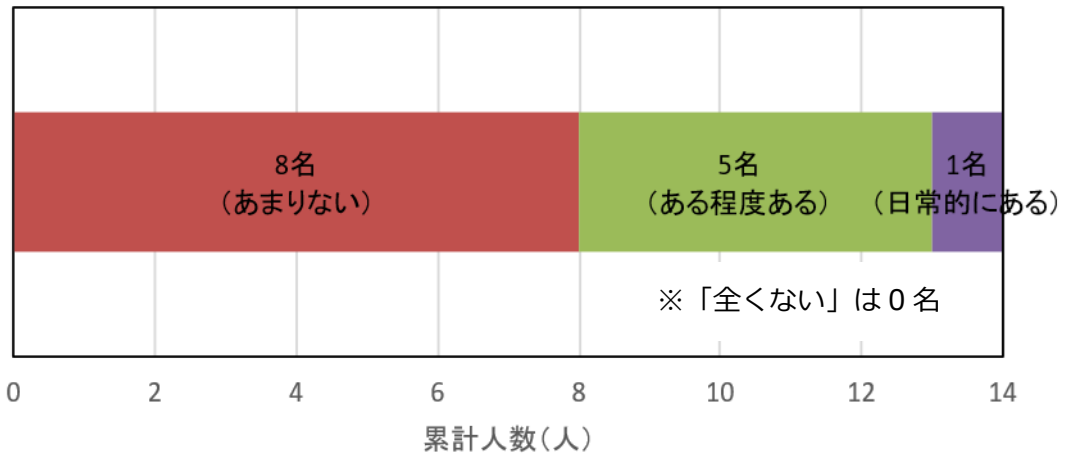


図 3.3-21　他組織・分野とのかかわりの有無

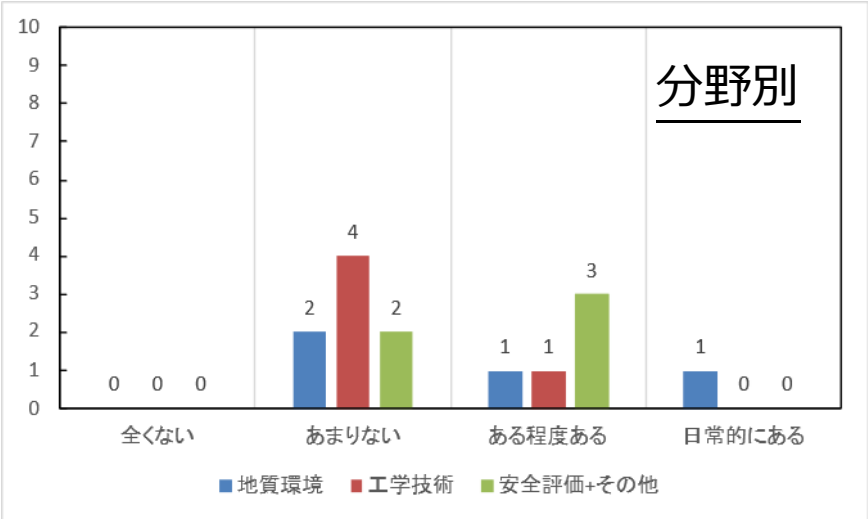


図 3.3-22　他組織・分野とのかかわりの有無（分野別）

この設問に対する受講者の意見を以下に示す。

- 閉鎖前の空洞安定性評価を担当しており、特に、閉鎖後に、影響が大きな人工バリアの設計や、核種移行の安全性評価を携わっていない。
- 専門分野が大きく異なる研究者、技術者との意見交換や発表の場が多い。

- プロジェクトリーダーとして他の組織や異なる専門分野の人たちとワーキンググループなどを通じて積極的にコミュニケーションを取っている。
- 日常的に監督官庁に業務の執行状況・進捗状況について報告を行っているほか、委託業務管理で、学会や関連企業を含む他組織との関わりが日常的にある。
- 研究業務を進めるうえで、異なる専門分野の上司に指導してもらっている。

これらの結果や意見からは、地層処分関連研究開発に関わっており、普段、他組織や分野の人と全く関わりのない受講者は少ないが、かかわりの程度はあまり高くないことが読み取れる。

●放射性廃棄物の発生源と種類に関する知識の有無

地層処分の対象である放射性廃棄物については、地層処分に関する基本的な知識であり、普段の業務内容（研究開発内容）に関わらず、地層処分に関する広範な知識を構成するものとしては必須のものであると考えられる。そこで、本セミナー参加以前に、放射性廃棄物の発生源と種類についてどの程度知識があったのかについて受講者に聞いた。

この結果、多くの受講者は放射性廃棄物の発生源と種類についてある程度の知識を有していることが分かった（図 3.3-23）。しかし、一方で特に地質環境調査技術分野を専門とする受講者が放射性廃棄物に関する基礎知識を有していないという結果となった（図 3.3-24）。

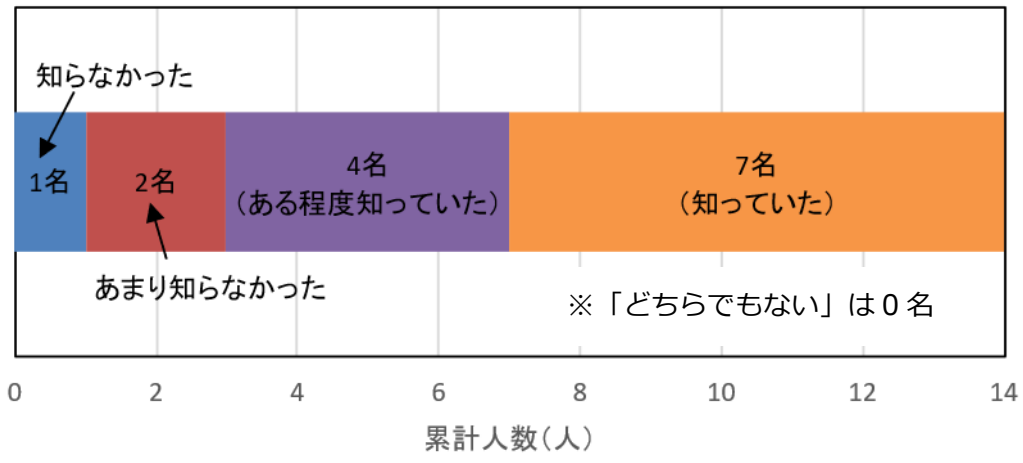


図 3.3-23　放射性廃棄物の発生源と種類に関する知識の有無

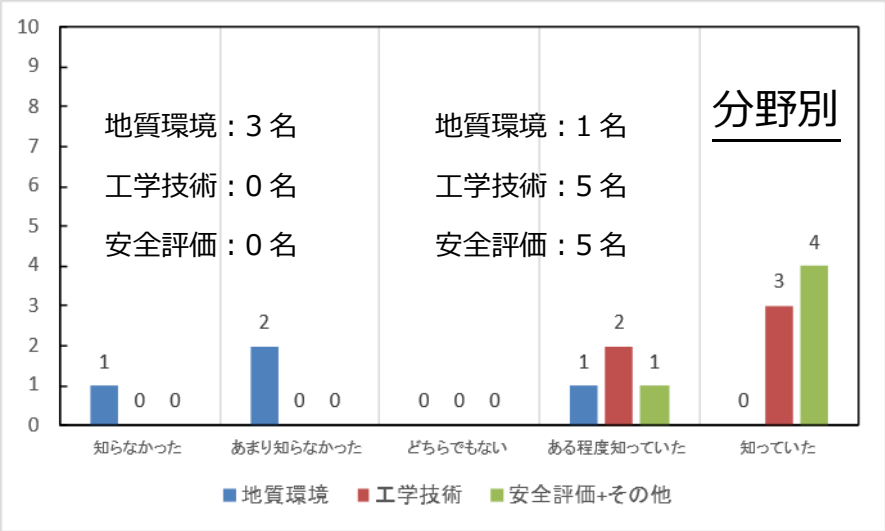


図 3.3-24　放射性廃棄物の発生源と種類に関する知識の有無（分野別）

以下は、この質問に対する受講者の意見である。上記の結果と以下の意見からは、地質環境分野のように、自身の専門分野との関連性が低い場合には放射性廃棄物に関する知識を持っておらず、他の分野との連携が必須である安全評価分野等の受講者は事前に知識を有していたことが分かる。また、これまでにセミナー等で学んだという受講者もおり、セミナー等が学習の機会を提供するものとして価値があるということが言える。

- 自らが関わっている**研究分野との関連性が低い**。
- **発生源と種類については専門分野とはかけ離れていた**ためほとんど知らなかった。今回のセミナーを通じてそのあたりも深めていきたい。
- 地層処分対象の廃棄物の発生源と種類については、所属組織への入構時に**自主学習**した。また、業務を通じても学ぶ機会があった。
- 処分場閉鎖後の緩衝材に係る研究業務に携わっており、廃棄物の発生に関しては**書籍等で勉強**していたため。また一部廃棄物に関しては、研究の背景情報として過去の報告書等も参照していた。
- これまでに受けてきた**人材育成セミナーや他の研修**でも解説を受けたことがあった。

●まとめ

今回のセミナーの受講者のバックグランドや有していた知識などに関するアンケート結果からは、大まかな傾向として以下が言える。

- 自身の業務に直接関連していない分野にはなじみがない
- 異分野との交流の度合いもさほど高くない

このことから、地層処分全体の理解、自身の研究内容の事業における位置づけ（事業との関係性）の理解を深めるためには、地層処分の他の分野の内容学習や他分野の専門家との議論等が必要であり、学習機会や異分野の専門家との交流機会の創出が必要と考えられる。本事業で 2020 年度から実施してきたセミナーは、そのような機会を提供可能なものとして価値があるものと考えられる。

(2) 安全評価の何を学ぶことができたのか（目論見との比較等）

3.3.3 で示したように、今回のセミナーでは、安全評価をテーマとして採用し、安全評価において対象廃棄物をガラス固化体から使用済燃料の直接処分に代えるという、受講者にわかりやすい例を考えることにより、安全評価と、処分対象の廃棄物、処分場の設計や処分する場所の特性（地質環境）との関わりを多面的に考えるという目論見で実施した。

セミナーにおいてこの考えに沿った成果が得られたかどうか、以下の関連するアンケートの設問への受講者の回答から検証する。

A) 廃棄物として処分する際の使用済燃料の特徴を理解できたか

B) 処分場の母岩の違いにより、キャニスタや緩衝材に期待される役割が変わることが理解できたか

これらの質問は上記のセミナープログラムの設定における当センターの目論見に関連した設問であり、これらの質問への回答から、当センターの目論見が達成されたのかある程度判断可能と考えられる。以下に上記の A)及び B)の設問、その回答、受講者の意見の抜粋を示す。

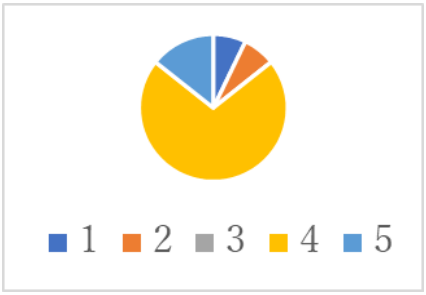
A)【質問】廃棄物として処分する際の使用済燃料の特徴を理解できたか 5:理解できた　4:やや理解できた　3:どちらでもない　2:あまり理解できなかった　1:理解できなかった	
回答結果  **平均：3.8**	• 使用済燃料の特徴として、燃料の多様性、ガラス固化体との特徴の違い(放射性物質の種類、発熱量、安全評価上の取り扱い)を有することが理解できた。 • ガラス固化体に比べ、使用済燃料は複雑な特徴もつことがわかった。 • ガラス固化体より、直接処理の使用済燃料の重量が重く、放出する放射性物質も多いことと、熱量も多いため、安全性評価がより複雑であることを理解した。 • ガラス固化体とは異なり瞬時放出が想定されるため、瞬時に放出される分と緩やかに放出される分を分けて評価する必要性を理解した。

図 3.3-25 質問 A)と回答のまとめ、自由記入意見の抜粋

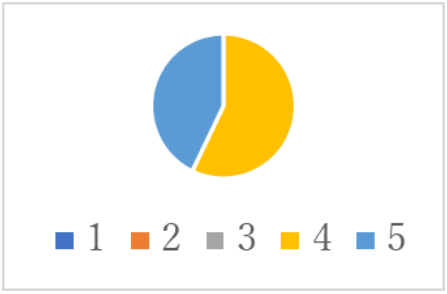
B)【質問】処分場の母岩の違いにより、キャニスタや緩衝材に期待される役割が変わることが理解できたか 5:理解できた　4:やや理解できた　3:どちらでもない　2:あまり理解できなかった　1:理解できなかった	
回答結果  **平均：4.4**	• 使用済燃料の特徴として、燃料の多様性、ガラス固化体との特徴の違い(放射性物質の種類、発熱量、安全評価上の取り扱い)を有することが理解できた。 • ガラス固化体に比べ、使用済燃料は複雑な特徴もつことがわかった。 • ガラス固化体より、直接処理の使用済燃料の重量が重く、放出する放射性物質も多いことと、熱量も多いため、安全性評価がより複雑であることを理解した。 • ガラス固化体とは異なり瞬時放出が想定されるため、瞬時に放出される分と緩やかに放出される分を分けて評価する必要性を理解した。

図 3.3-26　質問 B)と回答のまとめ、自由記入意見の抜粋

A)の質問に対する受講者の回答からは、処分対象の廃棄物（使用済燃料）の特徴の理解が進んだことが示されており、処分の安全評価を行う際には、対象の廃棄物やその特徴を理解する必要があることへの意識付けがある程度できたものと考えられる。B)の質問では、処分場の母岩の違い（今回のセミナーではスイス（堆積岩）とフィンランド（結晶質岩）を例として挙げた）により、キャニスタや緩衝材に期待される役割が変わることに理解が進んだと言える。このことは、処分場の安全評価では、母岩（処分サイト）の違いで地質

環境特性が変わり、それに応じ、人工バリアの設計等も考慮する必要があることを意識して進める必要があることの理解が進んだと考えられる。

これらの 2 つの結果から、安全評価において対象廃棄物をガラス固化体から使用済燃料の直接処分に代えるという、わかりやすい例を題材とすることにより、処分場の設計や地質環境との関わりを多面的に考えてもらうことができたと考えられる。

(3) 地下研究施設見学の意義

今回のセミナーでは、2 日目に JAEA の幌延深地層研究センターの見学を行った。実際に研究開発が行われている場所の見学、地下の雰囲気を体感すること、適度な気分転換になり座学やグループワークへの集中力等が増すなどの効果があると考え、プログラムに組み込んでいるが、実際に地下施設の見学を行った受講者がどのように感じたのか、どのような意義があると考えられるのか、若手の地層処分従事者・研究者にとっての「地下を見ることの意味」や問題点（要改善点）について、アンケート結果から次のステップで考察する。

I. 幌延の地下施設の見学経験の有無による、地下施設見学の意義について意見の差異
II. 地下研究施設の意味について、受講者からの意見から考察
III. 今回の見学の問題点（要改善点）の考察

※なお、今回は一般見学として入坑し、見学をしたのは 250m の調査坑道であった。

まず、上記 I.の結果について、受講者の幌延深地層研究センターの地下施設の事前の見学経験の有無別に、以下の 2 つの質問への回答結果を表 3.3-7 に示す。

a. 実際に研究開発が行われている地下の坑道を見学した感想はいかがですか。 5：興味深い　4：やや興味深い　3：どちらでもない 2：さほど興味を引かれない　1：興味を引かなかった
b. 地層処分事業に関わっている人に幌延深地層研究センター地下の視察を勧めたいですか。 5：必須だとして勧めたい　4：ぜひ勧めたい　3：前向きに勧めたい　2：見ておいた方が良い程度　1：見なくてもよい

表 3.3-7　地下研究施設関学経験の有無別の回答（5 点満点の平均値）

	経験あり	経験なし
a. の回答平均	4.4	4.5
b. の回答平均	3.9	4.7

この結果からは、地下施設見学の感想に地下施設の見学経験の有無によって大きな変化はなく、どちらの群も見学を興味深いものであったと評価している。一方で、地下施設の見学を地層処分に関わっている他の人に勧めたいかという質問に対しては、地下施設の見学経験の有無によって比較的大きな差が生じた。これまで地下施設の見学経験のない受講者は、他の人に勧めたいという評価であったが、見学経験のある受講者はない受講者に比べ、他の人に地下見学を勧めるかに関して平均点が低い結果となった。地下見学の経験者で b.の質問に「2」以下を付けた受講者の自由回答意見を以下に示す。

- 研究者や技術者がサイエンスの視点で見たときにはすでに事件やモニタリングが終了している 250m 坑道ではあまり意味ないように思う。
- データ取得をする現場だけを見せたとしても現在の説明では簡単にデータがとれるような印象を与えてしまうため、関係者向けの見学会では困難なことや苦労したことを具体的に情報提供した方が学びは深いと思いました

このように、地下で現在研究開発が行われている 350m の調査坑道の見学ができなかったことが、地下見学の経験のある受講者の低い評価につながったと考えられる。

次に、受講者の自由回答意見から地下研究施設見学の意義に関連するものを抽出し、見学の意義として考えられるものごとに整理した（表 3.3-8)。

表 3.3-8　地下研究施設見学に対する受講者の意見と見学の意義

見学の意味 1：研究施設を見るという側面

- より現場に近い環境での試験がどのようになるのか自分の目で確認できて有意義。
- 実際に地下施設を見学し、自分の目で見て感じる経験により、地層処分に携わる人としては、紙面上で見ていた設計やデータに関して、より具体的なイメージを持つことができる
- 実験で得られたデータを使用して解析評価を行い安全評価へとつなげるので、そのデータをどのような環境で取得しているのか、また実験のためにどれほどの労力が投入されているかなど、データの質と重さについて理解する上で重要
- 地上の研究施設等では要素試験スケールの試験が中心であると考えるので、より

現場に近い環境での試験がどのようになるのか自分の目で確認できて有意義
見学の意味 2：将来の施設（処分場等）を体験という側面 • 地層処分の精密調査において、どのような施設を使って、どのような実験を行うかという点において地下施設を自分の目でみることは有効 • 操業安全を考える上で、地下研究施設での換気、排水、メタンガスなどの可燃性ガスに対する火災対策などへの施策を学ぶことができ、安全確保のための対策を改めて考え直すきっかけにできる点
見学の意味 3：地層処分の実現性に対する理解促進 • 地下に人間や機械が作業可能な環境を創出することが技術的に可能であると身をもって体験することで、地層処分の実現性の理解促進につながるほか、安心感の醸成に寄与
見学の意味 4：知識の定着促進 • 講義中に聞いたことや習ったことに関して、実物を見たり、地下施設で実感できることがあったりするとより理解が深まり、知識として定着

このように、地下施設の見学に関しては、上記のような意義があると考えられるが、今回の見学及びアンケート結果からは次のような改善点（問題点）も明らかとなった。

- 研究者や技術者がサイエンスの視点で見たときには 250m 坑道ではあまり意味ない。
- 現場の都合で仕方が無いことではあるが、一般施設見学の枠ではない方法は無かったか。将来の事業を支える人材であるから、入坑に便宜を働いても良い気がする
- データ取得をする現場だけを見せたとしても現在の説明では簡単にデータがとれるような印象を与えてしまうため、関係者向けの見学会では困難なことや苦労したことを具体的に情報提供した方が学びは深い
- 施設見学と座学の内容があまりリンクしていなかったので、施設見学については唐突感があった。

以上をまとめると、地下研究施設の見学をセミナーに取り入れることは、表 3.3-8 に示したような意義がある一方で、実際にデータが取得される現場を知るなどの観点からは、現在研究開発が行われていない 250m の調査坑道ではなく、350m の調査坑道（現在進行形で研究開発が行われている場）の見学が必須であると考えられる。また、座学やグループワークのテーマなどと、地下研究施設で行われている研究開発とセミナーの内容をリンクさせ、見学の意味づけをすることが重要である。なお、本事業では対象とはしなかったが、大学生／大学院生やより従事年数の浅い層を対象とした場合には、一般的な見学も地下や将来の処分場の雰囲気を知るという観点で、250m の調査坑道の見学も意義はあると考えられる。

(4) 異分野交流の意義

本セミナーでは、他組織／異分野の専門家との対話を通じて、地層処分技術を広く俯瞰的に思考する、他の分野の専門家とのコミュニケーションの難しさ、地層処分事業における他の分野の専門家との協力・協働の重要性を理解することをねらいとしていた。今回のセミナーでこのねらいが達成されたか以下の 2 ステップで検証する。

I. グループ作業において、異なるバックグランド（組織・専門分野）を有す受講者間でのコミュニケーション・作業が活発に行われていたのか。
   コミュニケーションが活発、かつ主体的に行われることが、上記のねらいを達成するためには重要と考えられる。

II. 異なるバックグランドの受講者とのコミュニケーションを経験して、自身の専門性やマインドに関わる気付き・発想はあったか。

まず、I.のグループ作業で異なるバックグランドを有すメンバー間でコミュニケーション・作業が活発に行われていたのかを検証する。アンケートの設問のうち、「受講者自身が主体的にグループ作業に関わったか」、及び「グループ全体が作業に主体的に関わったか」への回答を図 3.3-27 に示す。この結果によると、自身が主体的に関われたかについては、若干低い点数を付けた受講者もいたが、全体として各受講者及びグループ全体ともに、主体的にグループ作業に参加していたと判断でき、活発な議論は行われていたと結論できる。

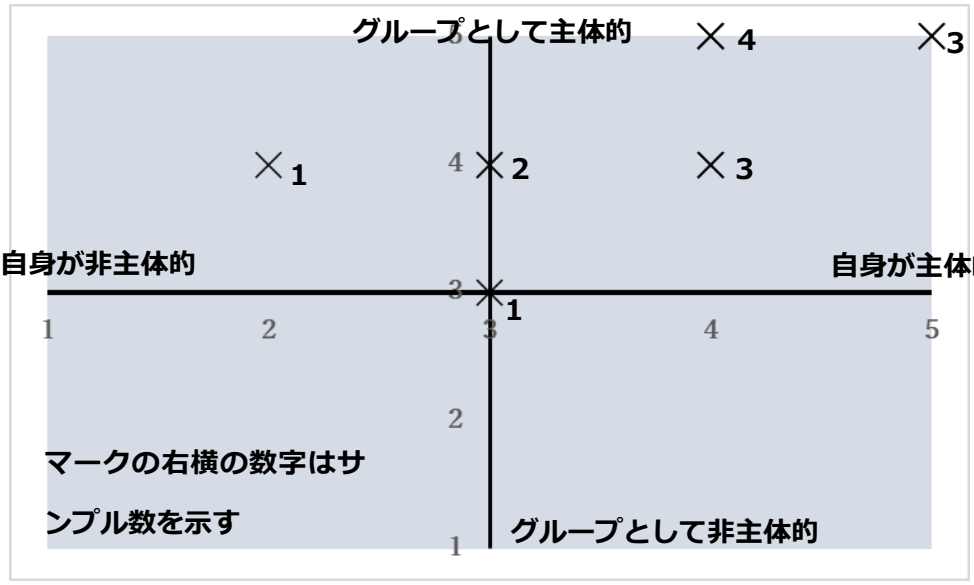
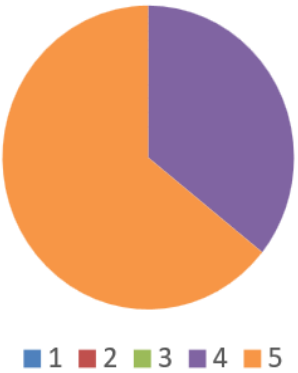


図 3.3-27　受講者自身及びグループが主体的に関わっていたか
（受講者は両質問に対し 5 段階で回答。5 が最も高い評価。
縦軸・横軸はそれぞれ評価結果の点数を示す）

次に、上記 II.の「異なるバックグランドの受講者とのコミュニケーションを経験して、自身の専門性やマインドに関わる気付き・発想はあったか。」という点について、「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。」という質問に対する回答から推察する。

【質問】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

回答結果



平均：4.6

- グループ作業を通じて専門性の違いによる着眼点の差を感じることができた。
- 普段とは異なる視点からの意見を知ることができ、様々な意見や考え方を知っておくことの重要性を感じた。
- 自分の専門が地層処分事業において、どの立場にあるのか、他分野の方とお話しすることで理解が進んだ。
- 分野間連携において、重要となる相手と同じ目線になるということの大切さを改めて認識できた。

図 3.3-28「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。」という質問への回答

この質問に対する回答結果（図 3.3-28）からは、**異分野の専門家とのグループ作業**が専門性の違い等に関して気付きを与えることに役立ったことがわかる。また、一方、この点は、受講者のほぼ全員が自身の専門性やマインドに関わる気付きがあったとしていることから、普段の他の組織や異なる専門分野の人とのかかわり度合によらないと言える（図 3.3-22 参照）。

加えて、地質環境分野の特定の受講者 3 名のセミナーを通じてのマインドの変化をアンケートの回答により追った（表 3.3-9）。

表 3.3-9　地質環境分野の受講者のセミナーを通じてのマインド変化の追跡結果
各質問で同じ色・番号の回答は同じ受講者のもの

質問：安全評価の基本的な進め方について理解できましたか。（設問 1-3 の番号は同一の受講者の回答） ① 将来モデルの構築等の断片的な情報は知っていたが、安全評価の進め方について、体系的な理解は不足していたと感じており、本セミナーで理解が進んだと感じている。 ② 安全評価のためのシナリオを構築する際のアプローチやモデル化、線量評価までの一連の進め方を理解することができた。シナリオを構築する際に、FEP を考慮するということは知っていたが、あまりイメージがついていなかった。今回の講義を受けて、具体的な手順を知ることができ、少しイメージができるようになった。 ③ 同じグループの安全評価に関わる研究職員から内容について聞けたので、基本的な内容を知ることができたと思います。
質問：核種移行に関連したパラメータや処分場の安全機能について理解できましたか。 ① 収着分配係数の具体的な数字を考慮しつつ、線量評価からみたスイスとフィンランドの処分場の安全機能を考察するなど、具体的な例があったため、理解しやすかった。 ② 処分場の各要素（要素間）でどのような現象があり、解析モデルの際にどのようなパラメータとして計算されるか理解することができた。 ③ 同じグループの安全評価に関わる研究職員から内容について聞けたものの、より専門的な内容になってくるとほとんどついていけなくなることもあったため、そのあたりの私の理解は乏しいかもしれないと思いました。
質問：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。 ① 安全評価は定量的なパラメータを含めて考えるとわかりやすい気がしたが、そもそものパラメータの意味や、原理について知れたらよかったと思う。 ② 人工バリアや母岩中での核種移行についてはどのようにモデルに反映されているか理解できたが、地質環境の研究がどのように安全評価に反映されているかもう少し詳しく知りたい。 ③ グループでは、地質系、工学系、安全評価系の研究者の方々がいらっしゃったため、それぞれの専門についていろいろ話を聞くことができたと思います。しかし、同グループには性能評価系の方はおらず、性能評価についても聞きたかったため今後参加する機会があればその点についてもきいてみたい。

表 3.3-9 の 3 名の受講者の意見からマインドの変化の内容を分析すると概ね図 3.3-29 のようになる。まず、安全評価に関する座学等で自身の安全評価に対するこれまでの立ち位置を把握したうえで、基礎の理解が進んだ。グループワークで直接処分や海外の事例など

の具体的な例で議論したことで、より理解が深まり、さらにパラメータ設定や地質環境調査結果がどのように安全評価に反映されているのかなど、安全評価の詳細を知りたいと思うように変化していった。

以上の結果から、異なる専門分野を有す受講者が対話的に議論することで、地層処分技術を広く俯瞰的に思考する、他の分野の専門家とのコミュニケーションの難しさ、地層処分事業における他の分野の専門家との協力・協働の重要性を理解するという今回のセミナーで目的は概ね達成できたと考えられ、異分野との交流にはこのような意義があると言える。さらに、これまで安全評価になじみのなかった受講者が、安全評価と自身の関係を理解し、さらに学んでいきたいと思うようになるという意識の変化を促すことも期待できる。

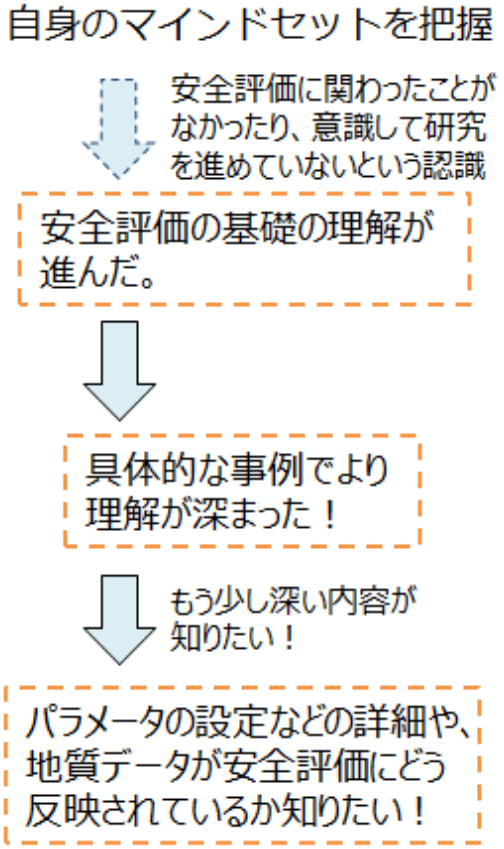


図 3.3-29　表 3.3-9 に基づくマインドセットの変化

(5) セミナーでのグループ作業を円滑・活発にすすめるための試みの検証

今回のセミナーでは、2021 年度までのセミナーの開催経験から、安全評価に関する知識があまりない受講者でも、グループでの作業に円滑・活発に参加することができるようになると期待される方策、ひいては、本セミナーの「ねらい」の達成支援に資する方策を取

り入れた。受講者からのアンケート結果に基づき、これらの方策の効果を検証する。なお、以下の検証でアンケートでの意見を抜粋しているが、それらは、各方策について聞いた設問に対する意見ではなく、自由記入意見などの中で受講者が示したものである。このため、少数であっても直接聞かれていないことに言及しているものであり、それだけ受講者の印象に残ったこと（良いと思ったこと）であると言える。

①各グループに講師を配置しグループでの議論や作業を支援

2021 年度のセミナーは、オンラインで開催したが、各グループでの議論が活発に行うことができなかった場面も見受けられた。議論が活発にならなかったことの原因にはいくつかあると考えられるが、グループ内にセミナーのテーマであった「地下研究所」に精通した受講者がいたグループでは、この受講者が議論を支援することで活発で有意義な議論を行うことができていた。このことから、今回のセミナーでは、各グループに講師として座学を担当した JAEA 及び RWMC の専門家に参加してもらい、グループでの議論・対話の支援をしてもらった。アンケート結果から専門家に議論・対話の支援をしてもらうことに関連する意見を抜粋する。

- 作業が滞った際には、講師の方から適宜コメントがあり、作業を進めやすくするための工夫があった
- グループに講師が入ったこともあり、より突っ込んだ質問や議論ができた

少数の意見ではあるが、アンケートに具体的に、グループ内に講師に参加してもらう効果を示す意見があったことから、講師をグループに配し議論や対話を支援してもらうことは、グループでの作業の効率化やより深い内容での議論を行うことができるという効果があることを検証することができた。

②グループ分けの工夫（少人数で所属機関、専門分野、地層処分に関する従事年数が多様となるようグループ分け）

2020 年度のセミナーでは、地質環境（具体的には地下水）をテーマとしたセミナーを開催したが、その際には、グループ分けの試みとして、次の構成で 3 グループを設置した。

- 地質環境分野を専門とする受講者のみで構成
- 地質環境分野以外を専門とする受講者のみで構成

- 地質環境分野を含む専門分野が異なる受講者（混成）で構成

2021 年度のセミナーでは、専門分野、所属機関、地層処分事業への従事年数、年齢等が多様な受講者で構成される 3 つのグループでグループワークを行った。

これらの経験から、グループワークにおいて、本セミナーがねらいを達成するためには、グループ分けは、少人数を基本とし、専門分野、所属機関、地層処分事業への従事年数、年齢等が多様となるようにすることが効果的と考えられた。このため、今回のセミナーでは、このようなメンバーの多様性が高くなるようなグループ分けを行い（3.3.4 (2) 参照）、アンケートにおいてその効果を検証した。以下に受講者のアンケート結果から関連する意見を抜粋する。

- グループが少数であったため、質疑応答等を含めた発言しやすい環境であり、グループ間での情報共有はスムーズであった
- グループ内で安全評価に携わっているのが自分であり、得意分野であったほか、質問や不明点について解説、回答を行った
- 参加者各自のバックグランドと絡めてグループ討議をすることで、意見の出方が多様であったと感じた
- グループ内で業務経験の長さに大きく差があったため、若手の気付きや意見とベテランの考察や経験とがうまく組み合わさってよい議論になった

このように、少人数のグループで専門分野や地層処分事業への従事年数等が多様となるようグループ分けすることが、発言しやすく、意見も多様となり、受講者にとって良い議論ができたと感じることができたと考えられ、本セミナーのねらいである、異分野間のコミュニケーションの重要性等の理解につながると考えられる。

③グループワークのテーマ（議題）設定

2021 年度のセミナーにおいて、グループでの議論が活発とならなかった原因の一つとして考えているものに、グループで議論する際のテーマ設定が、あまり具体的ではなく話しやすいものではなかったことが挙げられる。このため、本年度のセミナーでは、グループメンバー間で話し合いやすいテーマを明示的に設定し、かつグループでの議論を他グループに向けて発表・共有してもらうという場を設定することとした。その効果を受講者から

のアンケート結果の意見に基づき検証する。

- 「○○について考えてみる」というざっくりとしたグループワークではなく、問題（クイズ形式）に対してみんなで回答を考え理解を深めるというのは、非常に良かった
- 必ず発表しないといけないということもあり、グループの皆さんがお互いの意見を交換でき、活発だと思います

このように、明示的なテーマ（質問）を設定し、グループで議論した結果を全体に対して発表するようにした結果、これらの方策に対する肯定的な意見があった。このことは、今回設定した話しやすい質問と必ず議論の結果を発表しなくてはならないという状況設定が、グループ内での議論を活性化することにつながることを示唆している。

(6) その他

ここでは、本年度のセミナーのテーマ設定、及びセミナーの開催方法に関する受講者からの意見を取り上げ、今後のセミナーを含む、人材育成プログラムに反映可能な点を考察する。

●セミナーのテーマ設定について

前述のように、本事業では、2020 年度は地質環境（地下水）、2021 年度は地下研究所、2022 年度は安全評価をテーマとしてセミナーを開催した（表 3.3-1）。本年度のセミナーのテーマである安全評価に関する受講者の意見の抜粋を以下に示す。

- 母岩の違いにより、キャニスタ、緩衝材等の人工バリアに期待する役割が異なることを理解できた
- 海外事例を比較することにより、母岩に期待できる性能が異なり、それを踏まえて人工バリアに求められる要件が異なる事が理解できた。
- 地質調査・工学設計・安全評価の主要分野のうち最も後段に位置する安全評価について学ぶことにより、同時に前段の考え方や手法について部分的ながらも考え方を知ることができた
- 安全評価や直接処分など、自身の専門とは異なる分野であり、機会がないとなかなか勉強できない内容を学ぶことができてよかった
- 安全評価や直接処分に関して、報告書等で勉強しても理解度が上がらない内容だったので、今回のセミナーを通して全体概要の理解を深めることができ、非常に有意

義だった

- 地層処分に関する技術の取りまとめのテーマであり、自分の得たデータや経験がどう活かされているのかを知っていただく良い場となった

上記の受講者の意見からは、今回のセミナーで廃棄物を使用済燃料に変え、また、海外の事例を比較し考えることにより、安全評価を理解するというアプローチの試行は、安全評価の理解のための工夫としてはうまくいったと考えられる。安全評価になじみの無い受講者に対して、安全評価のような内容を理解してもらうためには、このような工夫である。

受講者の意見でも示されているように、地層処分の主要な研究開発分野である、地質環境調査技術、工学技術、安全評価技術のうち、安全評価技術は、地質環境調査結果や工学設計の結果を反映して実施する必要があり、3 分野の関連性やデータの受け渡しなどを意識する必要がある。このように地層処分事業を俯瞰することが必要となることから、本事業のように、多分野との連携、コミュニケーション等の重要性・必要性を理解することを目的としたセミナーのテーマとしては、安全評価が最も適している可能性がある。また、報告書等を題材として独学では理解度が上がらない題材であり、普段の業務で関係しない場合には学ぶ機会がないため、安全評価のようなテーマを取り上げ、学習する機会を創出することが、地層処分の様々な分野を理解する専門家の育成に役立つと考えられる。

●セミナーのスケジュールについて

今年度のセミナーは、2022 年 10 月 3 日～5 日までの 3 日間の日程で開催したが、実際のプログラムの時間としては、1 日目の午後から 3 日目の午前までの正味 2 日間であった。このスケジュール全体及びセミナー中の個々のプログラムである、座学、施設見学及びグループワークのそれぞれに対して受講者のアンケートでは、時間が短いという意見があった。以下の意見の抜粋を示す。

- 時間の余裕がなかった
- グループ作業の時間が比較的足りない印象があったので、時間を増やすなど工夫が必要と感じた
- 内容の深さに対して時間が短いと感じた
- １個１個のグループワーク時間を長くできれば、お互いの知見や議論をさらに深めることができたと思う

今年度のセミナーでは移動時間を含め 3～4 日程度受講者を拘束する日程であった。受講者は、NUMO をはじめ、関係機関の職員であり、あまり長期間セミナーのために拘束することはできず、今回以上に、セミナー全体の長さを伸ばすことは難しいと考えられる。セミナー全体の時間を延ばさずに、個々の内容により多くの時間を割くための方法としては以下などが考えられる。

A) 日程を 1～2 日程度ずつの 2 回に分ける
B) 移動に時間のかかる場所での開催を避け、セミナーのための時間を可能な限り確保する
C) 基礎知識提供目的の座学は e-ラーニング化し、オンラインで事前の必須学習とし、セミナー当日は e-ラーニング学習内容への質問への回答程度のみを行う

これまで本事業で行ってきたセミナーでは、テーマに関して知識の無い受講者に基礎的な知識を提供する、また、グループワークでの議論のために必要な前振りなどの目的で座学（講義）を行ってきた。この時間を短縮することができれば、その他の施設見学やグループワークの時間をより伸ばすことが可能となり、より充実したセミナーにできる可能性がある。その点では、上記の C)で示した、座学の e-ラーニング化が有効であると考えられる。C)に示したように、事前の情報提供等の目的の座学を e-ラーニング化し、セミナーの開催前に受講者には独学しておくよう連絡をする。例えば、2－3 週間の期間を設け、学習してもらい、その間に疑問があれば質問を投稿できるようなシステムとする。そのうえで、セミナー当日は、簡単な復習と寄せられた質問への回答（可能であれば簡単なグループでの議論を含む）を示すセッションを行うことで、座学の代わりとする。このようにすることで、これまで多くの時間を割いてきた座学の時間を短縮し、それ以外の施設見学やグループワークに、より時間を割くことができるようになる。ただし、この方法を成功させるためには、以下などが重要となる。

- e-ラーニング教材をわかりやすいだけでなく、学習意欲の継続するものとする
- 事前学習期間を十分にとる
- 学習の進捗が学習者だけでなく、セミナー主催者側でもわかるようなシステムとする（学習が進んでいない場合には、受講者に事前学習を促す連絡をするなどの対応を可能とする）

3.4 人材育成プログラム開発の 4 年間のまとめ・成果・今後の課題等

2019 年度からの 4 年間、人材育成プログラムの作成を進めてきた。大きな柱としては、地層処分に関する教材の作成及び人材育成セミナーの毎年度の開催である。4 年間の本事業実施による、これらの成果及び今後の課題を教材作成及び人材育成セミナー開催のそれぞれについて振り返りを行ったのち、事業実施から明らかとなった人材育成プログラム作成に関する今後の課題や方向性について示す。

3.4.1 教材作成の成果・課題、今後必要な作業等

(1) 教材作成の成果

地層処分に関する教材については、2020 年（4 カ年のうち 2 年目）から作成を開始した。当初は、そのレベルに合わせ、以下の 2 つの教材を作成する計画であった。

- 地層処分に関するリテラシー育成教材（以降、「リテラシー教材」という）
- 地層処分に関するポータル教材（以降、「ポータル教材」という）

しかし、地層処分スキルアップ研究会での意見などに基づき、ポータル教材は、学習すべき内容や参照すべき資料等を示した学習指導要領までを作成することとした（詳細は 3.2.1 参照）。そのため、教材作成に係る主な成果としては以下が挙げられる。

① リテラシー教材の試作版の完成
② ポータル教材の「学習指導要領」の作成

リテラシー教材については、2022 年度までの事業において、骨子、内容、確認テスト等の検討は終了し、約 200 ページ、11 章からなる教材の試作版の作成まで終了している。地層処分のジェネラリストが知っておくべき知識の一部をカバーする講座・教材等は一定数存在するが、単独の教材・講座でジェネラリスト育成に活用可能なものはほとんどないと考えられる。リテラシー教材は、このような単独で地層処分に係る広範な知識を提供することができ、地層処分事業に今後関わる人々が学習に活用することで、事業の推進に貢献する人材育成の一旦を担うことができると考えられる。

一方、ポータル教材については、当初、本事業で教材自身の作成までを行う計画に基づき、作成過程においてその内容や章立てを検討しそれらをまとめた「学習指導要領」を作成した。ポータル教材の「学習指導要領」では、学習内容のみならず、何を学習すべきな

のか、また、そのソース（情報源）も示している。そのため、「学習指導要領」を作成したことで、取り上げるべき内容、その範囲等を定めることができたとともに、リテラシー教材の学習の終わった人々が、次に何を学ぶべきなのか、そのためには何を教材・資料とすべきかを示すものとして活用することができると考えられる。

(2) 教材作成の課題・今後必要な作業等

リテラシー教材については、作製過程において様々な検討を行い、外部有識者、関係機関等のインプットの反映などを行ってきた。また、この過程においては、試行錯誤を繰り返し、当初作成する方針であったものの作成をやめる（例えば、用語集など）、一方で当初予定していなかったものを作成するなども行ってきた（例えば、○×問題など）。さらには、内容についても当初 12 章で作成を進めていたが、精査を行った結果、全体で 11 章構成となり、総ページ数も 300 ページ以上となる見込みであったものが、最終的には 200 ページ程度となった。このような試行錯誤の繰り返しとなったのは、教材の対象としたレベル（層）の学習者が理解・把握しておく知識・内容はどの程度のものであるのか、範囲だけでなく深さを含めてどこまでであるのかというような判断が非常に難しいことであったことに起因している。今回、3 年間にわたる成果としてリテラシー教材の内容を含めて試作が終了した段階と位置付けているが、ここで述べたどこまでの範囲・深さを含めるべきなのかという点は、今後の最終版の作成に向けた解決すべき課題として挙げられる。

この課題に対応し、リテラシー教材を完成するための方策としては、ユーザーレビュー（実際に使ってもらい、内容について評価をしてもらう）を行うことが挙げられる。以下に、考えられるユーザーレビューの内容等を示す。ユーザーレビューは、今年度までに作成したリテラシー教材の内容等のレベル・範囲の適正を確認するものであるため、異なるレベル（層）のユーザー（以下参照）に教材を使ってもらう（教材を学習し、確認テストに回答してもらう）ことで、内容のレベルや範囲の適正を判断する。

① 地層処分事業にすでに数年程度関わっている層（中堅）
② 本来この教材の対象と想定していた地層処分全体についての知識が不足している若手研究者・技術者（事業経験 1～2 年程度）
③ 関連研究を行っている大学院生・大学生

これらの 3 つの層のユーザーによる確認テストの結果を分析し、内容の適正を判断したうえで、改訂を行うことが有効であると考えられる。

3.4.2 人材育成セミナーの開催

本事業では、2019 年度から 4 カ年で地層処分に関する広範の知識を有する専門家を育成するための人材育成プログラムの作成の一環として、毎年セミナーを開催してきた。まずは、この 4 年間のセミナーの概要を再掲する（表 3.4-1）。2019 年度は、地層処分の主要研究開発分野である地質環境調査技術、工学技術、安全評価技術を広くカバーするセミナーを開催した。2020 年度からアクティブラーニング方式を取り入れ、受講者を少人数に絞り、テーマを変えて開催してきた。これまでのセミナー開催により得られた成果等としては、毎年度のセミナーの開催、セミナーの基本構成・内容の設定、オンラインセミナーの可能性、セミナーに適したテーマの検討が挙げられる。以下にそれぞれの成果内容を示したうえで、今後のセミナー開催に対する課題を示す。

表 3.4-1　2019 年度から 2022 年度までの人材育成セミナーの概要

	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
開催日	2020 年 1 月 8 日（水） ～10 日（金）	2020 年 12 月 21 日（月）～23 日（水）	2021 年 10 月 11 日（月）～12 日（火）	2022 年 10 月 3 日（月）～5 日（水）
テーマ	地層処分全般	地下水	地下研究所	安全評価
タイトル		地質環境モデルの構築に向けて ～地下水データをみる・よむ・とく～	地下研から学ぶ！ ～データの準備・解釈・伝え方～	ソースタームで学ぶ ～地質・設計・　安全評価～
受講者数	約 60 名 （講師を含む）	12 名	15 名	14 名
開催場所 （開催方法）	千葉県成田市	静岡県富士市	オンライン開催	北海道稚内市
コンセプト	地層処分の主要研究分野である地質環境調査、工学技術及び安全評価の 3 分野を幅広くカバーするとともに、技術コミュニケーションの招待講義等を組み合わせて実施。	テーマを「地下水」に絞り、アクティブラーニング形式により、講義や現場見学、実習を通じ基礎となる知識を学んだ後、総合学習のグループワークで多様な専門家とディスカッションを実施し、異分野の専門家との相互理解や協働の重要性、及び地層処分全体理解の重要性への気づきが得られる機会を提供。	異分野の専門家との相互理解や協働の重要性、及び地層処分全体理解の重要性への気づきが得られるよう、アクティブラーニング形式により、幌延深地層研究センター及びそこで行われている研究開発である人工バリア性能確認試験等を学習し、ジェネリックな地下研究所の役割を理解する機会を提供。	安全評価をテーマとしつつ、アクティブラーニング形式で自分自身での内省あるいはグループ内の他者との対話を通じて、地層処分技術を広く俯瞰的に思考する機会を創出する狙いで 3 日間のプログラムを設定。安全評価において対象廃棄物をガラス固化体から使用済燃料の直接処分に代えるという、受講者にわかりやすい例を考える題材とすることにより、処分場の設計や地質環境との関わりを多面的に考えてもらうことをねらいとして設定。また、座学（講義）の間に『学びを深めるコーナー』を設定し、事務局側が用意した問題や作業を組み込むことで、能動的に学び、対話的に思考する時間を意識的に設定。

(1) セミナーの開催

2019 年度は地層処分の主要な研究開発分野を広く浅くカバーする座学を主としたセミナーを開催したが、単に講師の説明を聞くことで受講者が受け身になりがちなこと、時間的にも主要分野を広くカバーするのは難しいことなどから、2020 年度からは、アクティブラーニング形式を取り入れ、受講者が能動的に参加し学ぶことができるセミナーを開催してきた。また、受講者数を少人数とし、テーマも絞ることで、1 つのテーマを深く学ぶことができるように配慮した。さらに、知識の習得を主とするのではなく、異なる専門分野を有す他の受講者議論・対話することで、地層処分事業に関わる専門家の多様性、コミュニケーションの難しさや重要性などに気付き、他の分野の専門家との円滑なコミュニケーションを行っていく努力をし、地層処分事業を俯瞰できるようになっていくことを期待した内容としてきた。このようなセミナーは、学会の学術集会や既存の人材育成を目的とした講座などとは異なっており、他にはない取り組みであると言える。特に、異分野の専門家同士が特定テーマに関して議論することで、異分野の専門家とのコミュニケーションの重要性等を学ぶためのグループワークを組み込んだものは、他には類を見ない本事業の独自のものであると言える。受講者（モニター）からは、分野間連携の重要性や様々な意見や考え方があることを理解したなどの意見が得られており、セミナーの目的は概ね達成してきたと言える。このようなセミナーを企画し実施してきたことは本事業の大きな成果の 1 つである。

また、2020 年度以降の 3 年間のグループワークの観察結果から、受講者の傾向として、セミナー参加に際して何を学びたいかしっかりと考えを持ち参加するような意識の高い受講者が多く、全体的に、セミナーでは各グループで積極的に課題に取り組む姿勢が見えていた（表 3.3-6）。しかし、アンケート結果などからは、業務に関連しない分野については、OJT での学習はなかなか難しい面があり、組織、分野や業務の守備範囲外については学習できていない現状が見受けられる。このような状況において、本事業でのセミナーは、業務とは直接かかわらない分野の学習機会の提供や専門分野の異なる受講者間での対話の機会の創出など、地層処分事業全体を俯瞰できる専門家育成に貢献できるものであり、このような組織や分野などの壁を取り払う試みとして貴重なものと考えられ、継続して取り組む必要がある。

なお、本事業の人材育成プログラムの作成では、セミナーに参加して受講者の人材育成そのものが主目的ではないが、2019 年度からの毎年のセミナーでは、合計で 100 名近い

受講者が参加してきた。これらの受講者の地層処分に関する知識の向上、学習のモチベーション向上等に役立ったことが期待され、これも本事業の成果を言える。

(2) セミナー全体の構成（基本的構成要素）について

本事業におけるセミナーの特徴は、アクティブラーニング形式を取り入れ、異なる専門分野を持つ受講者同士が議論・対話し、地層処分事業における他分野との連携や協働の必要性、その際のコミュニケーションの難しさなどに気付くことをねらいとしたことであった。これまでの 3 年間のこのようなセミナーの実施経験から、特に本事業で設定したねらいを達成するため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についての構想を得ることができた。これも本事業における成果の 1 つと言える。

以下に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ができるようにする役割があり、セミナーのねらい達成の可能性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、紙やボードなどに自身に関する話題（本事業では専門分野を用いた）について記入したものを用いる方がより活発に話ができ、効果的であると考えられる。2020 年度のセミナーでは、単に受講者が口頭で名前、所属、専門分野を話すだけであったが、2021 年度のセミナーから「ストーリーボード」を使った自己紹介を実施した（3.3.3 参照）。アンケート結果などからもこのような「ストーリーボード」などを利用し、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と考えられる。まずグループ内で自己紹介だけでなく、質疑や簡単な意見交換を行うことで、その後のグループワークへの参加がしやすくなり、アイスブレークとして効果的である。また、グループ内で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グループ内で何らかの結果・結論を導かなければならず、議論が進む効果があると考えられる。

②グループワーク

本事業のセミナーでは、異なる専門を有すメンバーで構成されるグループでの共同作業や議論・対話は、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、異分野間での考えや用語の違いを認識し、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、ファシリテータや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、グループワーク前に座学（＋演習・実習）を十分に行うなどが必要である。

この他に、グループワークにおいては、取り組みやすく明示的な課題を与えることも重要である。2022 年度のセミナーのように、具体的な問題を出すことで、グループのメンバーが積極的に意見を出せるようになり、メンバー間（異分野専門家間）の議論・対話が促進される。

③座学＋演習・実習

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、学習意欲の維持・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、グループワークに積極的に参加可能とするような情報提供になっていなければならず、テーマについてより深く理解できるようにするなどの工夫が重要である。

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、あまり時間も必要もなく組み入れることができるため有効であると考えられる。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。

さらに、3.3.6 (6) で述べたように、セミナー全体の時間短縮、効率化のためには、座学を e-ラーニング化することも必要に応じ実施する価値があると考えられる。

④サイト等の見学

2021 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、2019 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。また、2022 年度は JAEA の幌延深地層研究センターの見学を実施した。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。ただし、見学する場所・施設は、テーマとの関連性を有したものであることが望ましく、本事業で対象とする地層処分の研究開発等に関わっている受講者を対象とする場合には、実際にセミナーのテーマに関連した研究開発が行われている場の見学という側面を重視すべきである。

なお、上記①～④でも説明しているが、より効果的ものとするためには、座学や演習、グループワークの内容のつながり・関連性を考え、プログラム全体として目標・ねらいである「気づき」を与えることができるよう、設計することが重要であると考えられる。2022 年度のセミナーでは、図 3.4-1 に示したように、具体的な実例を用い、座学とグループワークを組み合わせることで相乗効果が得られることを期待した構想とした。

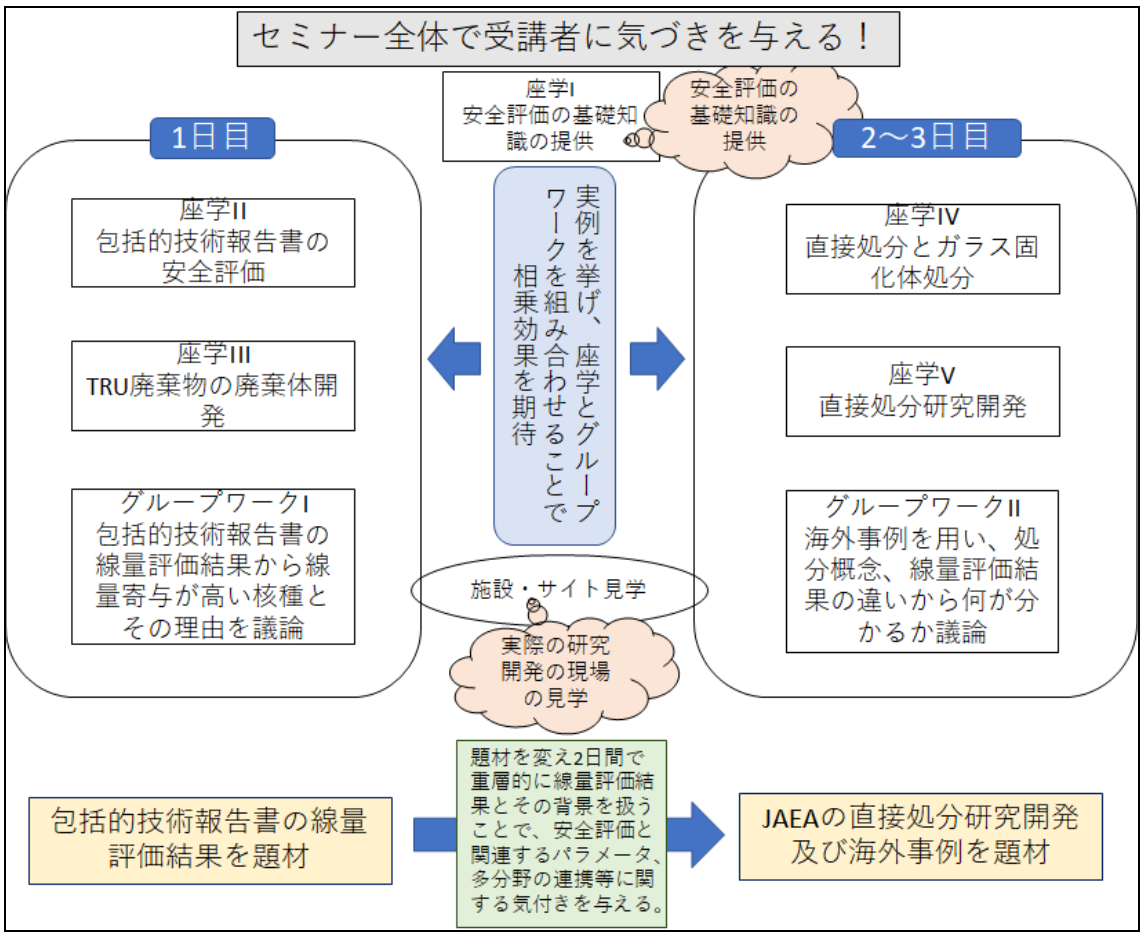


図 3.4-1　2022 年度セミナーの構想

(3) オンライン開催について

2021 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参加者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。結果として、本事業におけるセミナーでのオンライン開催の可能性を考える機会となった。結論としては、オンラインで開催した 2021 年度のセミナーにおいても、設定したねらいは概ね達成できたと評価しており [g]、オンライン開催でも工夫をすることで本事業のセミナーでも活用可能であることがわかった。このオンライン開催の可能性に関する知見を得ることができたことも本事業の成果である。

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、対面開催がより適しているとも言えるが、以下に、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、今後の活用における注意点について考察する。

オンライン開催では、受講者同士の直接（対面で）の会話ができず、様々な制限があると考えられる。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（対面の場合には、表情で分かる場合もある）
- 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・空間的な制約が少なく、スケジュールの都合が付きやすく、容易に参加できることが最も大きな利点である。

オンライン開催の場合には、以下などの工夫をすることでよりセミナーの目的達成のためより効果的であると考えられる。

①対面の場合でも同じであるが、グループワークでは、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

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に受講者が質問する機会もできる可能性がある。

②グループワーク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

2021 年度にオンライン開催のためのツールには、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

オンライン開催の場合、セミナー参加のための移動時間が必要ない、また、施設見学もないため、スケジュール的には比較的自由度があることが想定される。1 日のプログラムを比較的短時間とし、必要に応じ、開催日数を伸ばすなどでセミナーの効果を

上げることができる可能性がある。

④オンライン配信のためのツールの活用や適切な配信環境の準備

周囲の雑音などの不必要なノイズの混入防止のため配信のための部屋を用意すること、また、プレゼンテーションのスライドと他の画面の切り替えに時間がかからないようにするなどの対策を行うことで、受講者の集中力の向上や関心の維持につながる可能性がある。オンライン開催で必要な成果を得るためには、このような工夫も考慮する必要がある。

(4) セミナーのテーマについて

2019 年度から今年度までの 4 カ年、セミナーのテーマを地層処分全般から、地層処分の主要な研究開発分野である地質環境、工学技術（実際は地下研究施設）、安全評価と変えセミナーを実施してきた。これらの結果から本事業のセミナーの目的・ねらいの達成のためには、テーマとしては安全評価が最も適している可能性があると考えられた（3.3.6 (6) 参照）。これは、本事業において 4 年間テーマを変えセミナーを実施して得られた成果であると言える。

安全評価は、地質環境調査のデータ、及び地質環境調査データを踏まえた処分場や人工バリアの設計・仕様などを反映したうえで実施されるもので、これらの 3 分野の中では最も他分野との連携が必要であることを考慮すると妥当な結論であると言える。

安全評価をテーマとする場合には、事業報告書には書かれていない、取得した実データの扱い方、パラメータの線量評価結果への影響度などを扱うのが、単に報告書を読むのではなく、このセミナーでしか得られない経験をできるという点で良いと考えられる。しかし、そのためには、NUMO の包括的技術報告書で用いたデータのような実データが利用可能である必要があり、利用できない場合には異なる分野間で議論するための素材の作成が難しくなる。

地質環境調査技術分野及び工学技術分野のテーマとしての可能性についての所感も以下に示す。

地質環境調査技術分野の場合、サイト選定時の調査データを如何に他の分野に受け渡すのか、工学技術や安全評価分野の専門家がどのようなデータ（種類、測定間隔等）が必要と考えているのかなどをグループで議論するようなテーマ設定が本事業のセミナーには適していると考えられる。

工学技術の場合には、同様に、どのような地質環境データを受け取り、工学設計等の結果をどのように安全評価に受け渡すのか、さらには、安全評価結果からのフィードバックを受け、工学設計・仕様の見直しを行うなどを意識できるようなテーマ設定ができると本事業のセミナーのテーマとして活用が可能であると考えられる。ただし、工学技術の場合には、処分場の設計、坑道の掘削、人工バリアや定置・閉鎖技術など広範にわたっており、適切なテーマ設定は非常に難しいと考えられる。

(5) セミナー開催に関する今後の課題等

人材育成セミナーのテーマをどの分野に設定した場合でも、講師の派遣、技術的内容の資料作成への支援等には、それぞれの分野の専門家のサポートが不可欠である。過去 4 年間、AIST、JAEA、NUMO、CRIEPI からセミナーの実施内容の検討時点から協力を得てセミナープログラムを作成し、セミナーを開催してきた。本事業における今後のセミナー開催においても、これらの機関や機関に所属する専門家の協力が不可欠である。一方で、地層処分事業には、実施主体の NUMO だけでなく、JAEA などの研究機関やゼネコンなども関わっており、これらの機関の間では、必要とされる人材のニーズが必ずしも一致していない。本事業で各機関からの協力を得るために設置した地層処分スキルアップ研究会の参加機関からの要望・意見もそれぞれの機関のニーズを反映したものも含まれていた。このような異なる意見に対してどのように対応していくのかが本事業の舵取りの難しかった点でもある。今後、特に必要だと考えられるのは、人材育成に熱意を持った人物の協力・関与である。本事業の 4 カ年において、このような地層処分に関する専門性を有し人材育成に熱意を持った人物を見つけることは非常に難しいことであった。このような人物を見つけ、協力を得ていくことが、今後本事業においてセミナーをスムーズに開催していくための重要な課題の一つであると言える。

また、本事業のセミナーで対象としたのは、地層処分の人材育成のうちの一部であり（3.1.3 参照）、長期にわたる地層処分事業を支える人材の育成のためには、地層処分に関する人材の裾野の拡大も必要で、そのためには、ゼネコンなどの民間企業の社員や関連する研究を行っている大学や大学院生を関与させていくことも考えていく必要がある。予算当の関係から本事業ですべてを対象としていくことはできないが、より多くの受講者を対象とすることや対象とする階層の異なるセミナーを複数回開催していくことも必要になる。このためには、セミナーの全部、または一部の e-ラーニング化を行い、受講者は事前に基

礎知識を学習してくる（3.3.6 参照）、または完全にオンラインで学習するようにするなどの工夫も必要になってくると考えられる。

3.4.3 地層処分人材育成について

本事業では、人材育成プログラムの作成の一環として、教材の作成及びセミナーの開催を行ってきた。本章に示したように、本事業で作成したリテラシー教材を用いることや構成・内容を設定したセミナーを実施することで、地層処分に関する広範な知識を有する専門家育成につながると期待される。

一方で、前節や 3.1.3 に示したように、本事業で対象とした内容は、地層処分のジェネラリストの要素の一部であり、階層があると考えられるジェネラリストの層・レベルについても一部のみを対象としたものである。地層処分事業については、2020 年より、北海道の 2 地域において文献調査が開始されており、今後のサイト選定や事業の進捗のためには、地層処分事業全体を俯瞰することができる人材が必須であり、このような人材を長期的に継続して育成していく必要がある。そのためには、本事業で開発した教材の活用やセミナーの開催のほか、本事業で対象とした要素以外の部分に対応した人材育成プログラムを作成していく必要がある。また、前節では、今後のセミナー開催において人材育成に熱意を有す専門家の必要性（3.4.2 参照）を述べたが、長期的に人材育成を続けていくためには、そのような個人に頼るのではなく、人材育成のための取り組みを継続して実施していくための仕組みが必要と考えられる。このような地層処分のための人材育成のための取り組みが、今後継続して走り続けるようにするものとして、NUMO や JAEA などの地層処分に関わっている研究機関による人材育成のための枠組みを創設することも有効な方策であると考えられる。これらの機関が中心となり、大学や民間企業と連携しセミナー、勉強会等を開催、必要な学習のための教材の開発などを実施していく体制を構築することが有効と考えられる。これには、本事業で人材育成のために関係機関からの協力や助言を得ることために設置した「地層処分スキルアップ研究会」のような枠組みが活用できると考えられる。「地層処分スキルアップ研究会」を大学や民間企業との連携を行うよう拡張し、この枠組みでセミナーの実施し、これに民間企業や大学に参加してもらうことで地層処分事業の裾野の拡大を行っていくイメージである（図 3.4-2）。このような枠組みが、地層処分事業に必要な人材の育成プログラムの開発、実施を主導していくことで、プログラムの抜けや重複、取り組みの不足などを無くすことが可能となり、長期にわたり継続した人材育成

が可能になると考えられる。

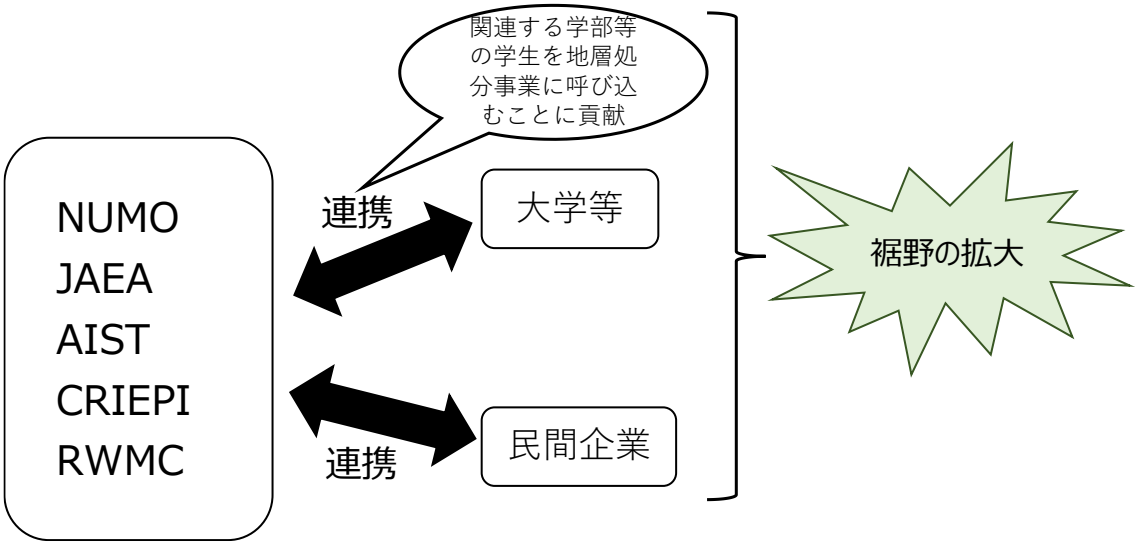


図 3.4-2　地層処分に関する人材育成ネットワークのイメージ

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) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 直接処分等代替処分技術高度化開発 報告書 令和 2 年 3 月

別添資料 1

（各実施研究の 2022 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：東京大学　高橋　嘉夫〕

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 年度の成果概要 4
4. 2022 年度研究実施内容 18
4.1 2022 年度の計画、実施方法 18
4.2 2022 年度の成果内容 26
5. まとめ 33

参考文献

2022 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) 鋼製支保工の腐食減耗を模擬した数値解析

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) 鋼製支保工の腐食減耗を模擬した載荷実験

沿岸部や海域下に地下施設が建設される場合には、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。そのような場合、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。本研究では坑道を構築する支保部材のうち鋼製支保工の腐食減耗に着目し、支保工の耐荷力に及ぼす影響を、載荷実験を行い解明する。

(4) 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)～(4)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ために必要な基礎的研究を遂行する。

3. 2021 年度の成果概要

(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板落下事故以降、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 3-1 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 3-1 のように評価されている。

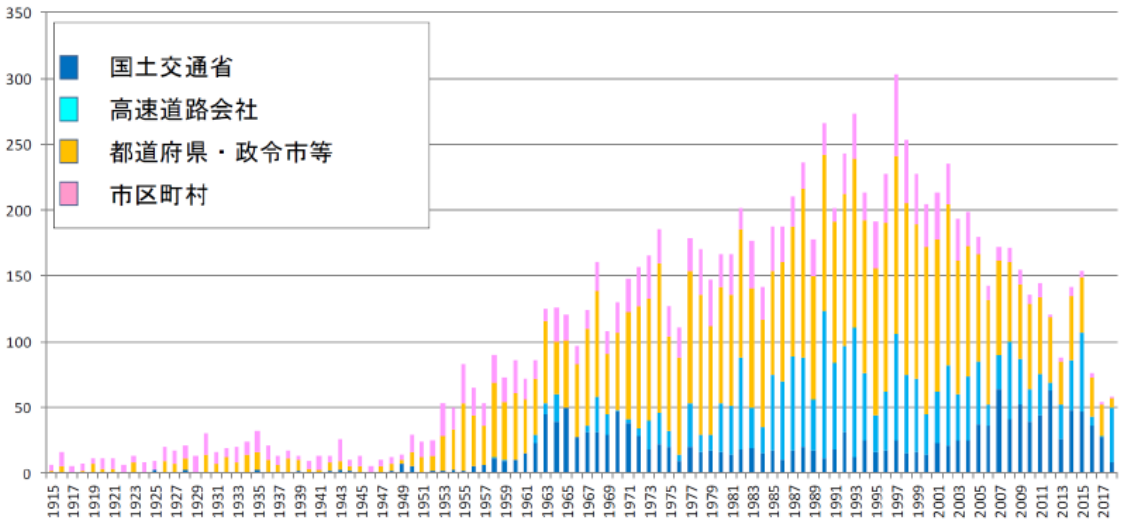


図 3-1　わが国の道路トンネルストック状況（国土交通省道路局（2019）より引用）[2)]

表 3-1　健全性の判定区分（国土交通省道路局（2019）より引用）[3)]

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 3-2 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。

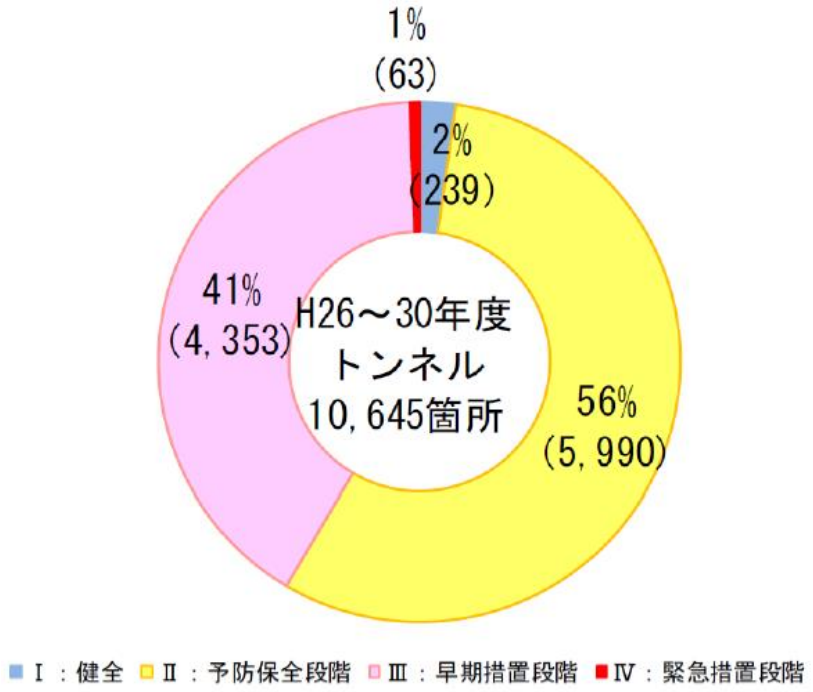


図 3-2　道路トンネルの判定区分（国土交通省道路局（2019）より引用）[2)]

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。

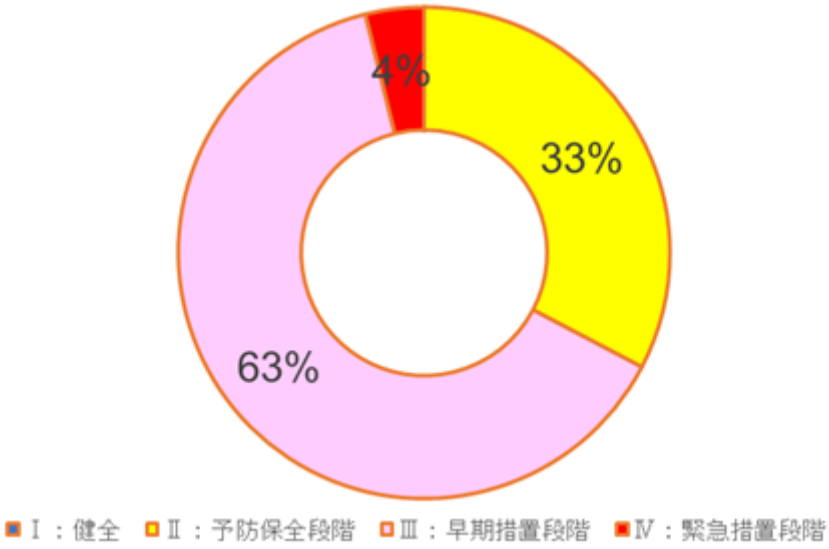


図 3-3　抽出した道路トンネルの判定区分

図 3-3 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 3-2　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）[3)]

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

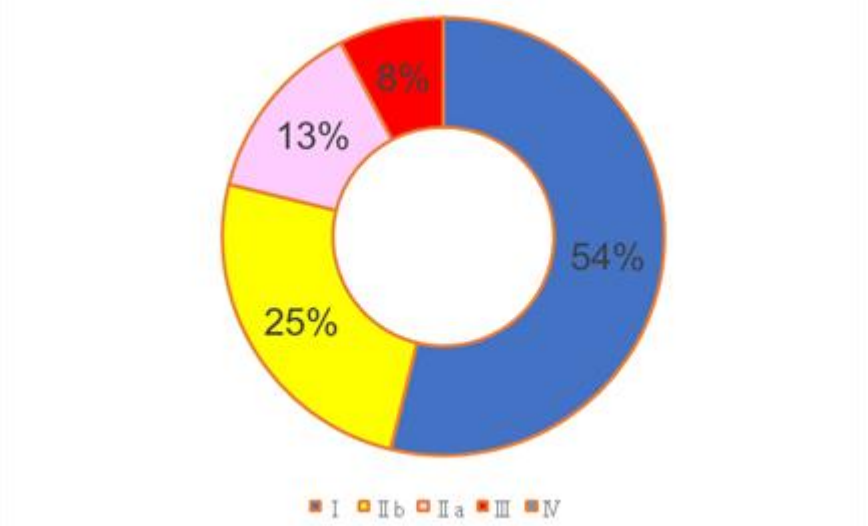


図 3-4　抽出した道路トンネルの漏水等による変状に対する判定区分

表 3-2 に漏水等による変状に対する判定区分を、図 3-4 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 3-3　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 3-3 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 3-4 に外力による変状に対する判定区分を、図 3-5 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。一方で、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ことが今後の課題となった。

表 3-4　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）[3)]

対策区分＼変状種類[注1)]		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。

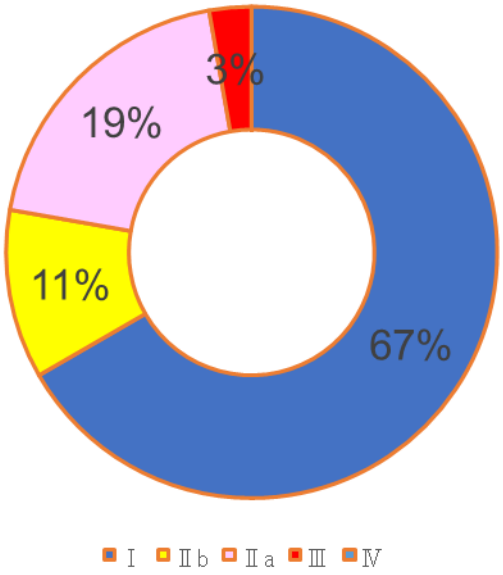


図 3-5　抽出した道路トンネルの外力による変状に対する判定区分

(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。

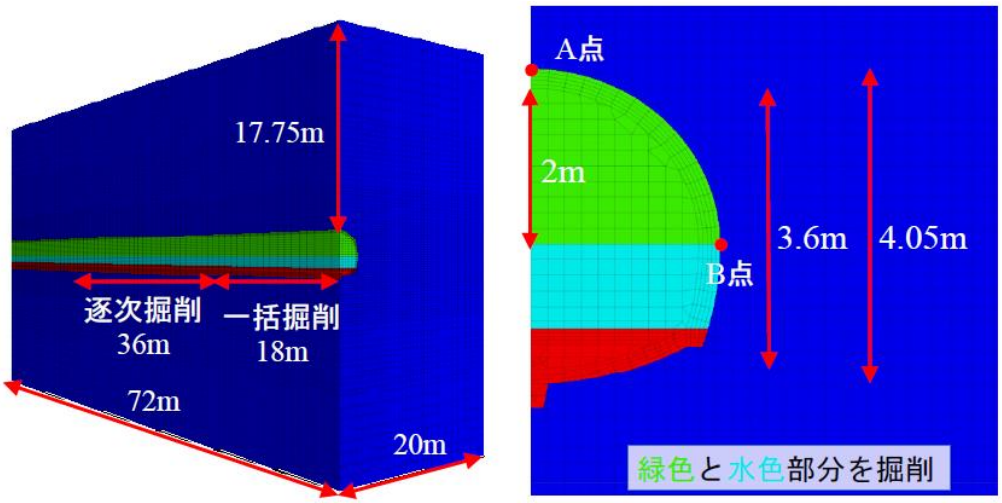


図 3-6　数値解析モデル

数値解析モデル鳥瞰図とトンネル周辺の拡大図を図 3-6 に示す。図 3-6 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[4]を参考に表 3-5 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 3-6 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 3-5　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）[4]

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 3-6　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/m^3	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	m^2	-	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 3-7 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。

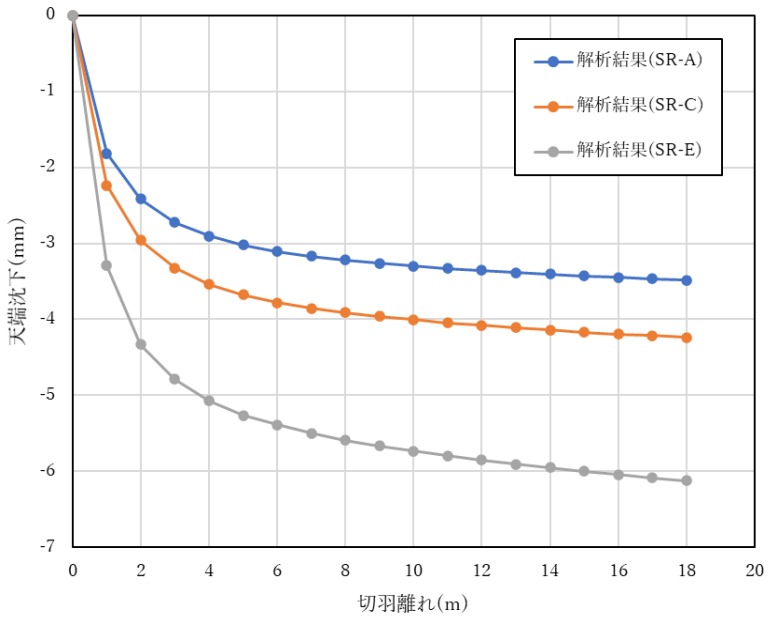


図 3-7　切羽進行に伴う天端沈下

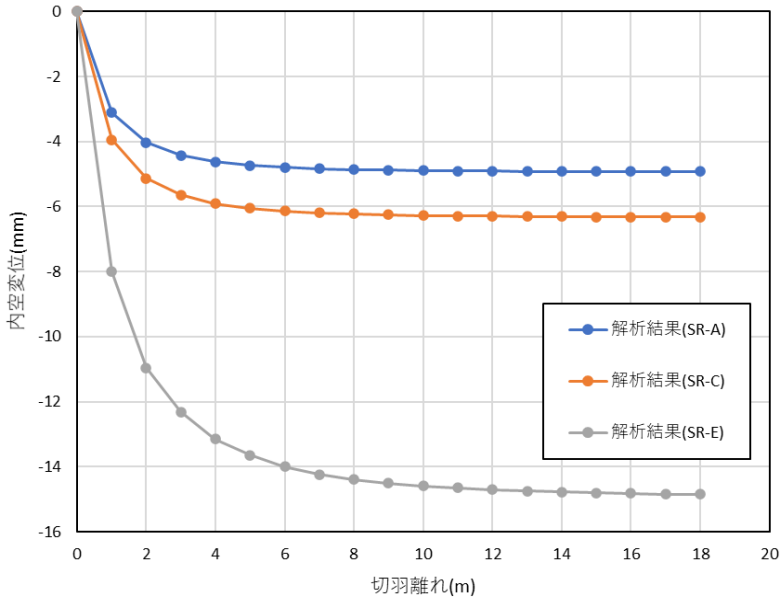


図 3-8　切羽進行に伴う内空変位

次に、図 3-8 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 3-9 に実験に使用したレールの寸法、表 3-7 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

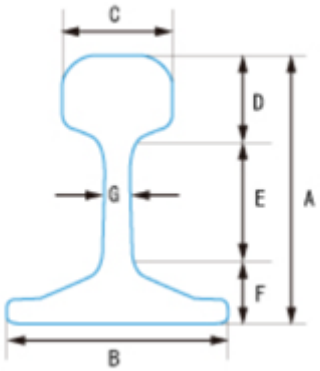


図 3-9　実験に使用したレールの寸法（JFE スチールホームページより引用）[5)]

表 3-7　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）[5)]

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 3-8 に示す。表 3-8 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 3-9 に示

す。表 3-9 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 3-8　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 3-9　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 3-10 に、さび厚測定箇所を図 3-10 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 3-10　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

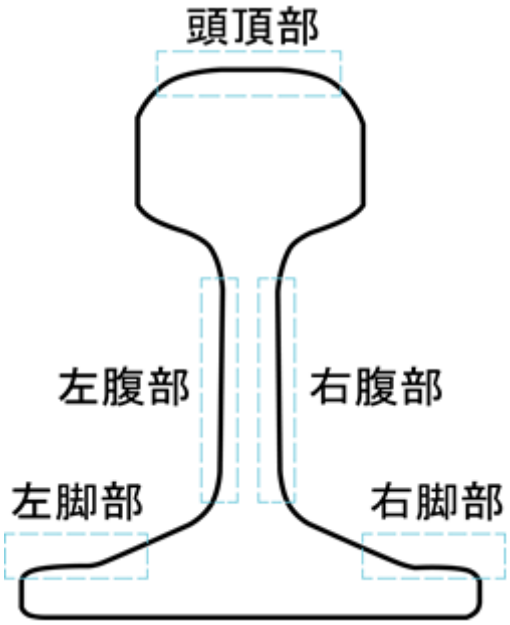


図 3-10　さび厚の測定箇所

4. 2022 年度研究実施内容

4.1 2022 年度の計画、実施方法

(1) 鋼製支保工の減耗を模擬した載荷実験によるトンネル耐荷力に及ぼす影響把握

1980 年代、NATM(New Austrian Tunneling Method)が我が国に導入されて以降、山岳トンネルにおける工法は NATM が採用されるようになった。NATM は吹付けコンクリート、ロックボルトと鋼製支保工を支保構成部材とし、グラウンドアーチを形成することで、土圧を地山自身の保持力によって受け持たせることによりトンネルを施工する工法である。

NATM において、吹付けコンクリートやロックボルトによって補強された地山が荷重を支保していることが確認されているため、二次覆工は単に化粧的な役割や支保工の安全性を高める目的が大きい[6]。

我が国には二次覆工を施工しないトンネルがあり、高レベル放射性廃棄物の地層処分の各種試験のために掘削された坑道などが挙げられる。地層処分の研究を行う幌延深地層研究センターでは、漏水が塩水であったことが報告されている。トンネル内部に剝き出しの鋼製支保工が、塩分を含む漏水が支保工を透水（浸透）するため、腐食を引き起こす可能性がある。トンネルが長期的な塩害を受けた場合、鋼材の断面減少やコンクリートとの付着力低下による、耐力やじん性の低下の可能性がある[7]。塩害の劣化機構について研究がなされているが、二次覆工を施工しない場合の研究事例は少なく、鋼材の腐食減耗における支保工の影響把握が十分に行われていない。

本研究では、二次覆工を施工しないトンネルが塩分を含む地下水によって塩害が引き起こされ、鋼製支保工が腐食減耗した際、支保工の耐荷力についての影響把握を目的とした。

図 4-1　試験体作成用型枠

鋼製支保工と吹付けコンクリートの合成構造の試験体を作成するために、型枠の作成、鋼製支保工の加工、コンクリートの配合設計を行った。

まず、試験体作成のための型枠を図 4-1 に示す。本型枠を用いることで、半径 5m のトンネルアーチ(長さ 1500mm×幅 125mm×厚さ 300mm)の天端部を模擬した試験体を作成することができる。

表 4-1　鋼製支保工の寸法（単位：mm）

	H	B	t1	t2
Case1	125	125	6.5	9
Case2	120.5	125	6.5	4.5
Case3	116	125	6.5	0

次に、型枠内に立込む鋼製支保工について言及する。鋼製支保工は、125×125×6.5×9(mm)の曲げ加工を施した H 形鋼(SS400)を用い、型枠の内側壁に沿わせて設置する。鋼製支保工は､腐食による減耗を模擬するために健全な状態､減耗した状態(減耗率 50%と 100%)を作成した（表 4-1 参照)。また､比較のために鋼製支保工を立込まない試験体も作成する。鋼製支保工の減耗を考慮する方法としては、鋼製支保工の下フランジ（坑道における内空

側フランジ）を切削した。本実験では、健全な状態（切削無し）を Case1、鋼製支保工の下フランジを厚さ 1/2 に切削したもの（減耗率 50%）を Case2、鋼製支保工の下フランジを切断したもの（減耗率 100%）を Case3、鋼製支保工を立込まないコンクリートのみを Case4 とした。それぞれのケースにおける試験体は 3 体、計 12 体作成した。

表 4-2　コンクリートの諸元および配合

諸元	呼び強度	18N/mm²	
	水セメント比	60.0%	
	骨材最大寸法	15mm	
	細骨材率	60.00%	
単位量 (kg/m³)	水	216	
	セメント	360	N
	細骨材	1025	
	粗骨材	700	
	混和剤	3.60	AE 減水剤 遅延形 I 種

型枠内に打込むコンクリートについては、坑道におけるコンクリートの施工方法として吹付けコンクリートが想定できることから、吹付けコンクリートを想定したコンクリートの配合設計を行った。表 4-2 に本研究で用いたコンクリートの諸元と配合について示す。吹付けコンクリートの配合条件は、コンクリート標準示方書に示されている吹付けコンクリートの配合条件の例より、設計基準強度（18N/mm²）、水セメント比（湿式：50～60%）、単位セメント量（360kg/m³）などを満足するように配合設計を実施した。

図 4-2　コンクリート打設の様子

試験体の打設の様子を図 4-2 に示す。まず型枠の清掃およびはく離用グリスの塗布を行う。生コン工場において計量、練り混ぜを行った上述した配合のコンクリートを、1/2 程度打設し、バイブレーターによる締め固めを行う。その後、鋼製支保工を内側壁に設置した後、さらにコンクリートを打設し、バイブレーターによる締め固めを行う。今回打設したコンクリートの圧縮強度の平均値は 21.37MPa であった。

また、コンクリート打設前には鋼製支保工表面に、打設後にはコンクリート表面にひずみゲージを貼付けた。

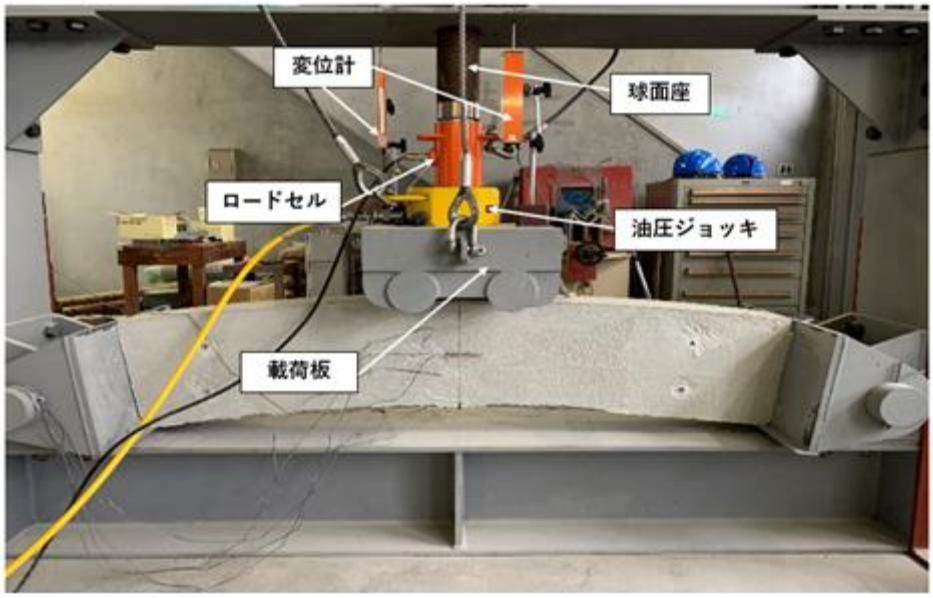


図 4-3　載荷実験の様子

コンクリート打設後、24 時間で脱枠した。試験体は、坑道建設現場を模擬するために気中養生とした。試験体は、打設後 30 日気中養生させた後、載荷実験を行った。載荷実験は、図 4-3 に示すとおり、載荷枠に試験体、載荷板、油圧ジャッキ、ロードセル、球面座、変位計を設置した。

(2) 鋼製支保工の減耗を模擬した数値解析によるトンネル支保工に及ぼす影響把握

本研究では塩害腐食による鋼製支保工の減耗が坑道安定性に及ぼす影響を把握することを目的とし、軟岩（新第三紀堆積岩）地山内に建設される処分坑道を模擬した坑道の掘削解析を行い、その解析を基に、鋼製支保工の減耗を考慮した解析を実施した。坑道掘削解析および鋼製支保工の減耗を考慮した解析には、有限差分解析コード FLAC3Dver5.0 を用いた。

図 4-4 に、本研究の解析モデルにおける解析領域と境界条件を示す。本解析は三次元解析であるが、平面ひずみ状態を仮定し、疑似二次元解析としている。また、図 4-5 に解析モデルの坑道周辺の拡大図と支保工モデルを示す。図中の解析モデルについては、軟岩地山内への建設が検討されている処分坑道を模擬している。地山と支保工の材料構成則や物性値については文献 [8)、9)、10)] を参考に表 4-3、表 4-4 に示すとおりに設定した。解析に使用する岩盤物性値は表 4-3 に示した 3 個の岩盤物性値を用いる。この岩盤は稚内層（硬質頁岩）の物性値で、岩盤への割れ目の頻度により H 級、M 級、L 級と分かれている。ここでは H

級の割れ目の頻度が低く、L 級の割れ目の頻度が高い。また、Hr 有の等級においては岩盤のヘアクラックを考慮した物性となっている。解析時の初期応力については、土被り 350m 相当の応力を作用させた等方応力状態とした。また、掘削解析手順については、初期応力の 68.9%[9]を解放させた全断面掘削を行った後に支保工モデルを設置して初期応力を 100%解放させる解析手順とすることで、坑道の全断面掘削の過程を考慮することとした。

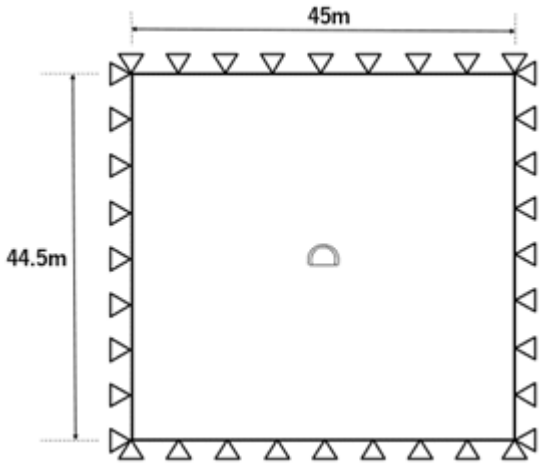
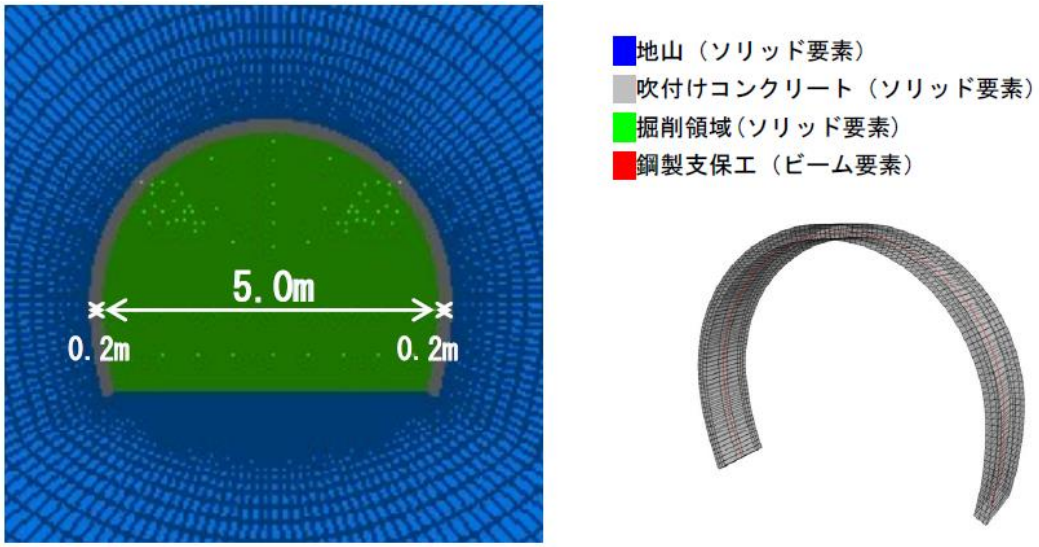


図 4-4　解析領域と境界条件



（a）トンネル周辺の拡大図　　（b）支保工モデル

図 4-5　解析モデル

表 4-3　解析岩盤物性値

地山　弾完全塑性体					
岩盤等級	ヤング係数(Mpa)	ポアソン比	粘着力(Mpa)	内部摩擦角(°)	引張強度(Mpa)
CM-H	500	0.186	5.2	25	1.63
CM-M			3.1		0.97
CM-L			1		0.31

表 4-4　解析支保物性値

支保工	吹付けコンクリート 線形弾性体	鋼製支保工 線形弾性体
ヤング係数(Mpa)	6000	210000
ポアソン比	0.2	0.3
断面積(cm^2)		46.64
断面二次モーメントIx(cm^4)		1978
断面二次モーメントIy(cm^4)		689

鋼製支保工の減耗については、掘削解析後の鋼製支保工を模擬したビーム要素の物性値を低下させることで考慮した。具体的には、鋼製支保工（H 形鋼）の坑道内空側のフランジを 2mm ずつ 12mm まですり減らした際の断面積及び断面二次モーメントを各解析ステップで用いた。

稚内層（硬質頁岩）と声問層（珪藻質泥岩）の全 10 種類の岩盤等級物性値を用いて内縁圧縮応力と外縁圧縮応力を比較した。ここで、声問層（珪藻質泥岩）は層が浅く、本研究の条件である地下 300m の地層にはふさわしくないと考え、稚内層の岩盤物性値を使用した。

解析結果として出た軸力と曲げモーメントの値から各岩盤の減耗量と圧縮応力の関係を示した。式(1)は圧縮応力を算出するために用いた式である。

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I} y \quad \cdots (1)$$

（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。2022 年度は、腐食試験（恒温恒湿腐食試験）を実施し、レールのさび厚の測定および減耗量の測定を行った。

実験では、2021 年度に準備した JIS 50kgN レールを用いた。レールの厚さは約 15mm となるように切断した。実験は、恒温恒湿器内の温度を 20℃、湿度を 90%と設定し、2021 年度の予備実験で設定した塩分濃度の塩水を霧吹きによって噴霧することで、坑道坑内の塩害環境を模擬した。

さび圧の測定には、膜厚計（LN-990）を用い、レールの頭頂部、左右腹部、左右脚部の計 5 か所を測定した。各測定箇所における測定回数は 10 回とし、平均値（平均さび厚）を求めた。

レール減耗量の測定は以下の通り実施した。

a. スクレーパーを用いて、レール表面の生成さびを極力除去する。

b. 膜厚計を用いて、レール表面の残存さび厚の平均を求める。

c. 残存さび厚の平均とレールの表面積から、必要な除さび溶液の量を算定し作製する。

ここで、除さび溶液 1L を作製する際の調合割合は以下に示すとおりである。

・塩酸 500mL　・ヘキサメチレンテトラミン 3.5g　・ヒビロン 3mL

・以上に蒸留水を加えて 1L にする。

d. レールに対して、除さび溶液への 1 分間の浸漬と水道水での洗浄を行う。

これを 2、3 回繰り返す。洗浄の際には、ブラシを用いてレール表面の残存さびを除去するようにする。

e. d 以降は、レールに対して除さび溶液への 5 分間の浸漬と水道水での洗浄を繰り返し実施する。

終点は、レール表面のレーティングナンバーが 9.8 以上になった時点とする。

レーティングナンバーの判定は、JIS Z 2371 の付属書図 1 を参考にする。

f. 除さび終了後は湯洗し、温風によりレールを乾燥させ、レールの質量を計測した。

そして、以下の式よりレールの減耗量(μm)を求めた。

4.2 2022 年度の成果内容

(1) 鋼製支保工の減耗を模擬した載荷実験によるトンネル耐荷力に及ぼす影響把握

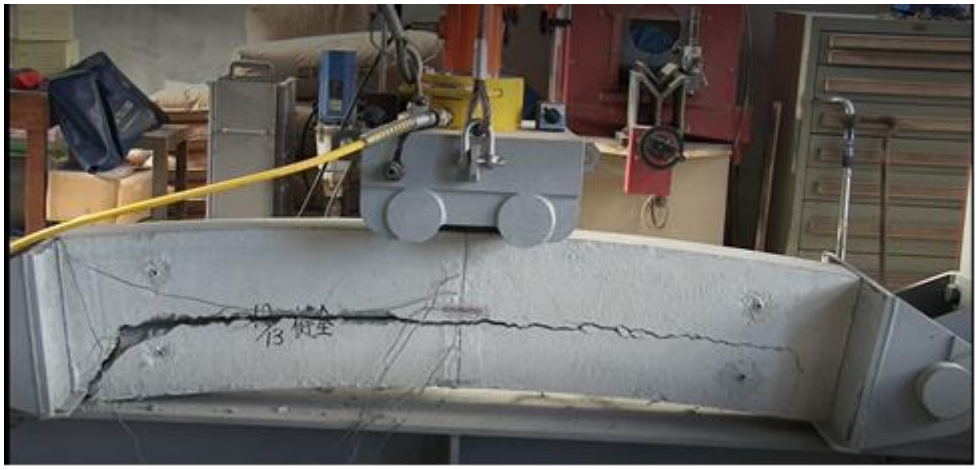


図 4-6　Case1 における破壊状況

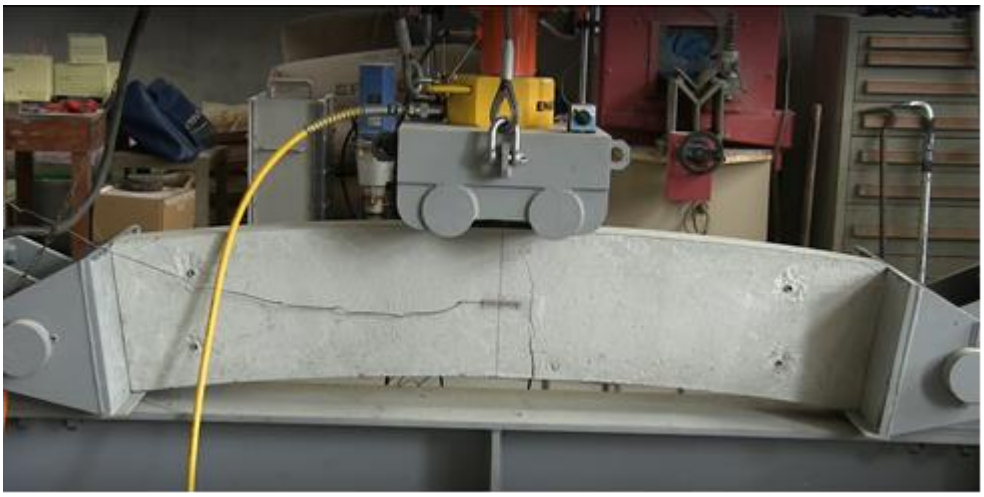


図 4-7　Case4 における破壊状況

図 4-6 に、健全な支保工によって試験体を作成した Case1 における支保工の健全性が失われた時点での状況を示した。荷重を天端背面より載荷すると、鋼製支保工とコンクリートの界面にひび割れが生じた。その後、さらに載荷を続けると鋼製支保工とコンクリートがはく離し、耐荷力が失われた状態となった。この破壊モードは、鋼製支保工とコンクリートの合成構造となっている Case1、Case2、Case3 で見られた。

一方で、図 4-7 に示すコンクリートのみで試験体を作成した Case4 では、引張りが卓越する天端内空側よりひび割れが発生し、載荷の増加に伴ってひび割れが進展した。

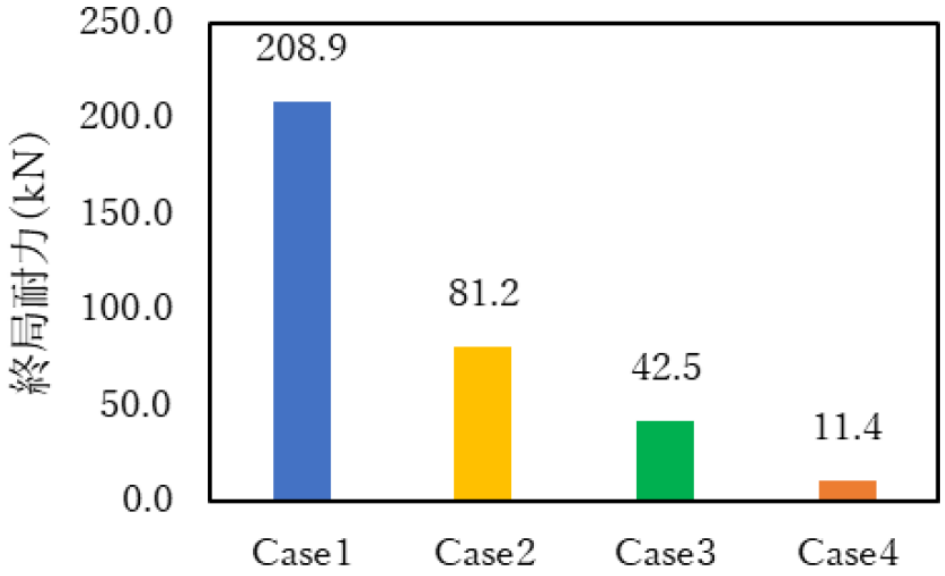


図 4-8　終局耐力の比較

次に、それぞれの実験ケースにおける終局耐力を図 4-8 に示す。ここでの終局耐力とは、鋼製支保工とコンクリートがはく離した時点、もしくはひび割れが大規模に生じた時点とした。このように、最も健全な鋼製支保工によって作成された Case1 では最も終局耐力が大きい結果となり、Case2、Case3 と鋼製支保工の健全性が低下するにつれて、終局耐力も低下することがわかる。この結果から、塩害腐食によって下フランジが 1/2 まで減耗した場合、健全な鋼製支保工とくらべ耐荷力が約 6 割に低下することが分かった。耐荷力が低下したメカニズムについては、現在データの取りまとめ、および考察を進めている。

(2) 鋼製支保工の減耗を模擬した数値解析によるトンネル支保工に及ぼす影響把握

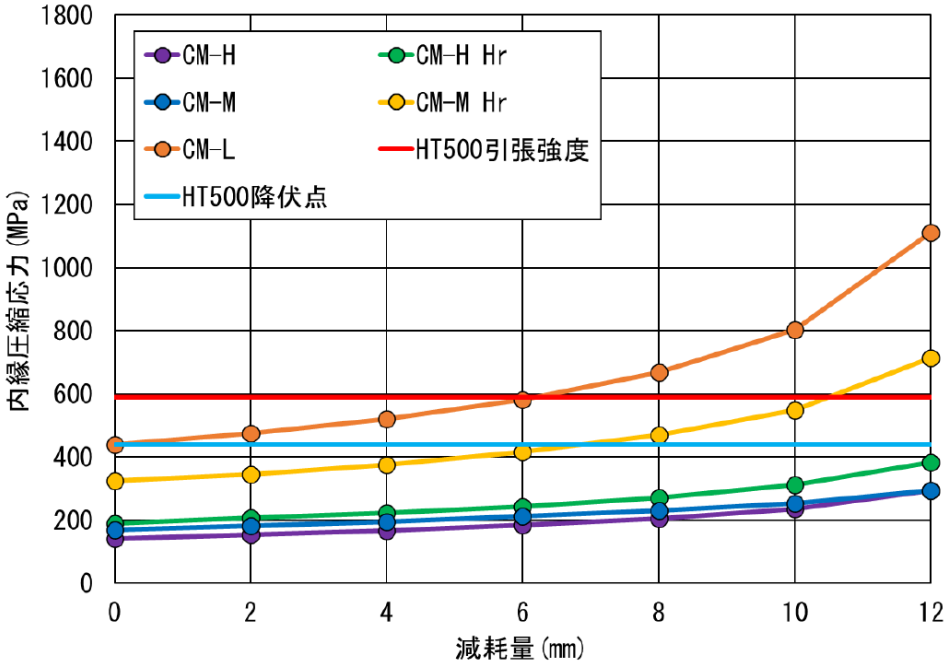


図 4-9　鋼製支保工の減耗量と内縁圧縮応力の関係

図 4-9 に減耗量と鋼製支保工の内縁側圧縮応力の関係を示す。この図より、減耗の程度が顕著なほど内縁側の圧縮応力が卓越することがわかる。また、地山条件が HM-M Hr では減耗量が 12mm、CM-M Hr では 8mm で HT500 の降伏点を超過することがわかる。

一方で、図 4-10 に減耗量と鋼製支保工の外縁側圧縮応力の関係を示す。地山条件が CM-H のケースや、CM-M、CM-H Hr、CM-M Hr における減耗の程度が軽微な条件においては、図 4-9 に示した内縁側圧縮応力と同様の圧縮応力が発生していることが分かる一方で、それ以外の条件においては外縁側圧縮応力が卓越する結果が得られた。この結果より、地山等級が良好な場合や、鋼製支保工が健全な場合には、鋼製支保工は地山からの荷重を軸力によって受け持つ一方で、地山等級が低下した場合や、鋼製支保工が不健全な場合には、鋼製支保工に軸力に加え、曲げモーメントが発生していることがわかる。

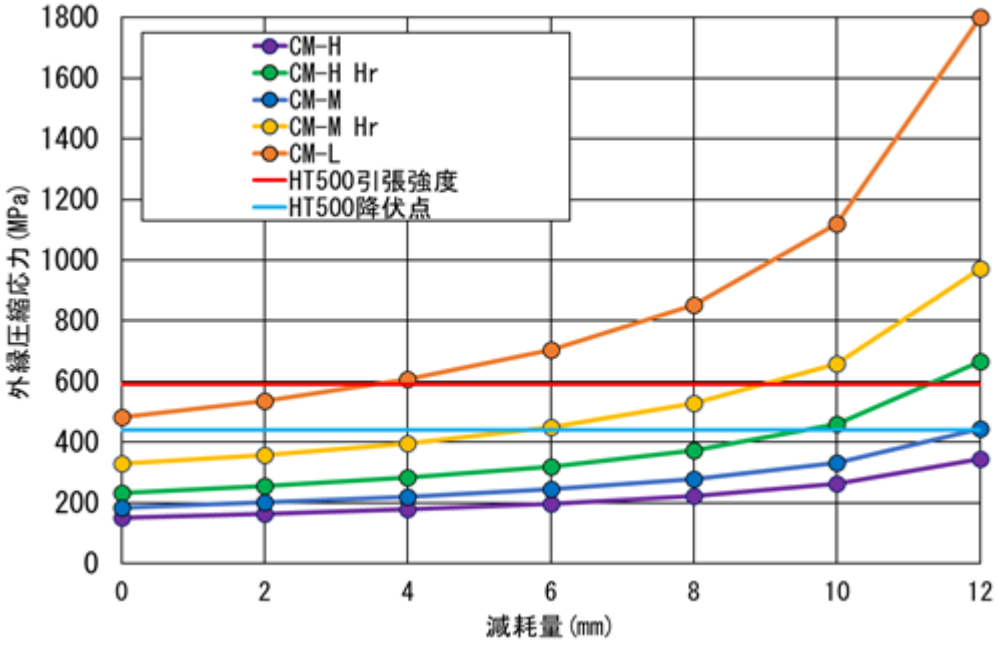


図 4-10　鋼製支保工の減耗量と外縁圧縮応力の関係

(3) 塩害に関する実験

レールの恒温恒湿腐食試験結果を示す。まずは、塩分を付着させた結果に着目する。ここでの塩分付着量は、昨年度実施した予備実験により、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っている。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 4-5 は、供試体 No.1 における経過日数 0 日、111 日、173 日、298 日における頭頂部、左腹部、右腹部、左脚部、右脚部のさび厚測定結果を示したものである。さび厚は、各部 10 回ずつ測定した平均値とした。

また、表 4-5 の結果をグラフに示したものを図 4-11 に示す。これらより、すべての測定箇所において概ね経時的に平均さび厚が増大していることがわかる。また、すべての測定日において頭頂部、脚部、腹部の順に平均さび厚が大きくなる結果が得られた。これらより、日平均飛来塩分量が 0.2mg/dm²/day (mdd) 程度の場合、すくなくとも 300 日間は経時的にレールの腐食が進み、腐食箇所は頭頂部、脚部、腹部の順に顕著であることが分かる。

表 4-5　さび厚の測定結果（塩分あり、単位μm）

No.1(塩分有り)						
計測年月日	経過日数	頭頂部	左腹部	右腹部	左脚部	右脚部
		平均さび厚	平均さび厚	平均さび厚	平均さび厚	平均さび厚
2022/3/5	0	15.95	14.65	24.71	14.86	22.46
2022/6/24	111	259.5	21.42	19.66	137.6	191.7
2022/8/25	173	415.1	153.2	45.72	258.5	376.0
2022/12/28	298	671.3	104.0	64.66	352.4	443.4

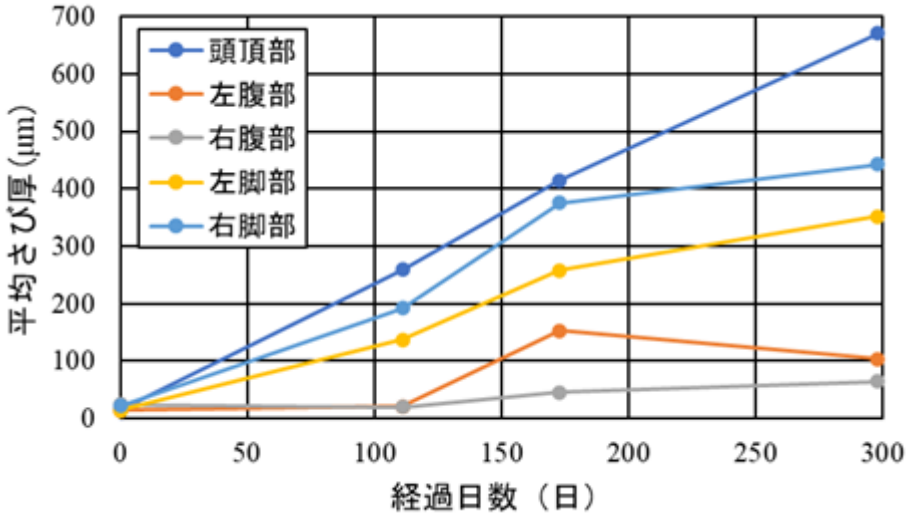


図 4-11　さび厚の経時変化（塩分あり）

次に、塩分を付着させない結果に着目する。塩分付着無しの実験ケースでは、上述した塩分付着有りと同量のイオン交換水を噴霧させた。表 4-6 は、供試体 No.11 における経過日数 0 日、111 日、173 日、298 日における頭頂部、左腹部、右腹部、左脚部、右脚部のさび厚測定結果を示したものである。さび厚は、各部 10 回ずつ測定した平均値とした。図 4-12 は表 4-6 の結果をグラフ化したものである。

表 4-6、図 4-12 の結果より、実験日数が進んでもさび厚に大きな変化は見られず、また測定部位ごとの差異も見られなかった。これらの結果から、レールの腐食には付着塩分量が大きく影響することがわかった。

表 4-6　さび厚の測定結果（塩分なし、単位μm）

No.11(塩分無し)						
計測年月日	経過日数	頭頂部	左腹部	右腹部	左脚部	右脚部
		平均さび厚	平均さび厚	平均さび厚	平均さび厚	平均さび厚
2022/3/5	0	8.61	37.09	21.57	16.26	11.33
2022/6/24	111	7.18	51.02	41.08	10.84	13.71
2022/8/25	173	8.10	50.71	24.91	10.81	16.72
2022/12/28	298	14.28	32.56	15.11	13.62	9.02

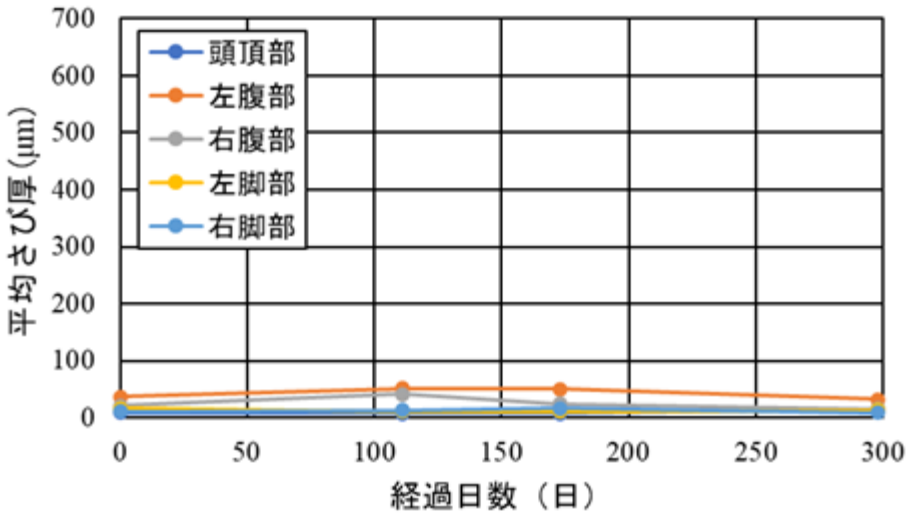


図 4-12　さび厚の経時変化（塩分あり）

さらに、表 4-7 と表 4-8 に付着塩分の有無によるレールの減耗量を示し、図 4-13 にはそれらの結果をグラフ化したものを示す。これらの結果より、付着塩分ありでは実験開始から 173 日経過すると約 30～35μm 腐食減耗する一方で、付着塩分なしでは約 10μm 以下の減耗量となった。

表 4-7　減耗量の測定結果（塩分あり）

減耗量_塩分有り							
計測年月日	経過日数	No.4(塩分有り)		No.5(塩分有り)		No.6(塩分有り)	
		質量(g)	腐食減耗量(μm)	質量(g)	腐食減耗量(μm)	質量(g)	腐食減耗量(μm)
2022/3/5	0	760.2022	0	780.3737	0	766.0278	0
2022/8/25	173	758.4378	33.75	778.6563	32.85	764.218	34.61

表 4-8　減耗量の測定結果（塩分なし）

減耗量_塩分無し							
計測年月日	経過日数	No.14(塩分無し)		No.15(塩分無し)		No.16(塩分無し)	
		質量(g)	腐食減耗量(μm)	質量(g)	腐食減耗量(μm)	質量(g)	腐食減耗量(μm)
2022/3/5	0	779.173	0	730.6587	0	775.0342	0
2022/8/25	173	778.7475	8.14	730.2907	7.04	774.563	9.01

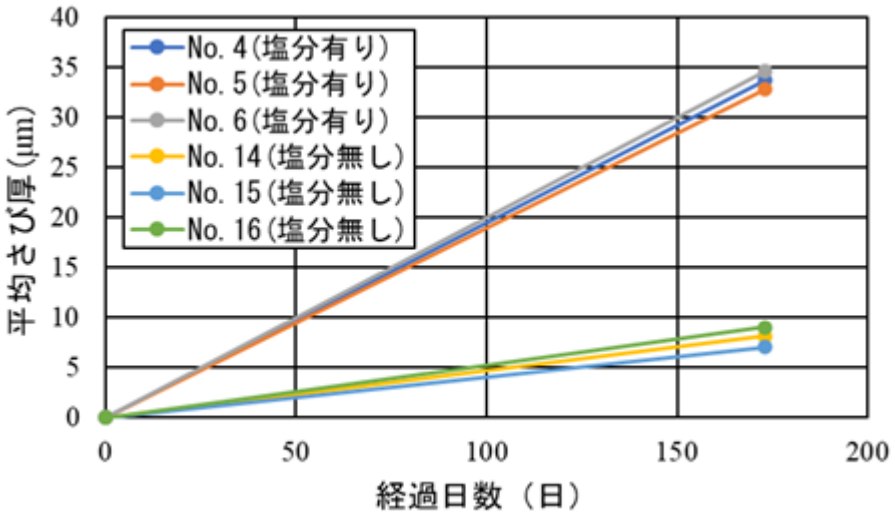


図 4-13　減耗量の経時変化

5. まとめ

本報告書では、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）において沿岸部に近接して施工された地下施設の掘削時から操業時までの健全性評価に関する研究を実施した結果を取りまとめた。

本研究では、地層処分施設においての処分坑道を対象とし、主に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した。

2021 年度には、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以下の結果が得られた。

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。

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。

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。

さらに、2022 年度には鋼製支保工の減耗を模擬した載荷実験によるトンネル耐荷力に及ぼす影響把握、鋼製支保工の減耗を模擬した数値解析によるトンネル支保工に及ぼす影響把握、塩害に関する実験を実施した。

「鋼製支保工の減耗を模擬した載荷実験によるトンネル耐荷力に及ぼす影響把握」では、二次覆工を施工しない坑道において、塩分を含む漏水によって鋼材に塩害が引き起こされ、鋼製支保工が腐食減耗した際、支保工の耐荷力に及ぼす影響を解明することを目的とした。具体的には、下フランジ厚さが異なる鋼製支保工とコンクリートの合成構造物を載荷実験し、塩害腐食による減耗が支保工の耐荷力に及ぼす影響を比較・検証した。

その結果、鋼製支保工とコンクリートの合成構造の場合、荷重を天端背面より載荷すると、鋼製支保工とコンクリートの界面にひび割れが生じ、その後さらに載荷を続けると鋼製支保工とコンクリートがはく離し、耐荷力が失われた状態となる。

終局耐力は、最も健全な鋼製支保工によって作成された Case1 では最も終局耐力が大き

い結果となり、Case2、Case3 と鋼製支保工の健全性が低下するにつれて、終局耐力も低下することがわかる。この結果から、塩害腐食によって下フランジが 1/2 まで減耗した場合、健全な鋼製支保工とくらべ耐荷力が約 6 割に低下することが分かった。

「鋼製支保工の減耗を模擬した数値解析によるトンネル支保工に及ぼす影響把握」においては、塩害腐食による鋼製支保工の減耗が坑道安定性に及ぼす影響を把握することを目的とし、軟岩（新第三紀堆積岩）地山内に建設される処分坑道を模擬した坑道の掘削解析を行い、その解析を基に、鋼製支保工の減耗を考慮した解析を実施した。坑道掘削解析および鋼製支保工の減耗を考慮した解析には、有限差分解析コード FLAC3Dver5.0 を用いた。その結果、減耗の程度が顕著なほど鋼製支保工の内縁側・外縁側の圧縮応力が卓越することがわかる。さらにその傾向は地山等級が低下したほど顕著になる。

また、地山条件が CM-H のケースや、CM-M、CM-H Hr、CM-M Hr における減耗の程度が軽微な条件においては、内縁側圧縮応力と同様の圧縮応力が発生していることが分かる一方で、それ以外の条件においては外縁側圧縮応力が卓越する結果が得られた。この結果より、地山等級が良好な場合や、鋼製支保工が健全な場合には、鋼製支保工は地山からの荷重を軸力によって受け持つ一方で、地山等級が低下した場合や、鋼製支保工が不健全な場合には、鋼製支保工に軸力に加え、曲げモーメントが発生していることがわかる。

「塩害に関する実験」では、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。2022 年度は、腐食試験（恒温恒湿腐食試験）を実施し、レールのさび厚の測定および減耗量の測定を行った。

その結果、塩分を噴霧したレールは、すべての測定箇所において概ね経時的に平均さび厚が増大していることがわかる。また、すべての測定日において頭頂部、脚部、腹部の順に平均さび厚が大きくなる結果が得られた。これらより、日平均飛来塩分量が 0.2mg/dm²/day (mdd) 程度の場合、すくなくとも 300 日間は経時的にレールの腐食が進み、

腐食箇所は頭頂部、脚部、腹部の順に顕著であることが分かる.

また、レールの減耗量を調査した結果、塩分を噴霧したレールは、実験開始から 173 日経過すると約 30～35 μ m 腐食減耗する一方で、付着塩分なしでは約 10 μ m 以下の減耗量となった。

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　地層処分技術ワーキンググループ：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） 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報、2019.

3） 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.

4） 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.

5） 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

6） 土木学会：トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説、2016.

7） 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]、2016.

8） 原子力発電環境整備機構：包括的技術報告：我が国における安全な地層処分の実現―最適なサイトの選定に向けたセーフティーケースの構築―、NUMO-TR-20-03、2021.

9） 岡崎泰幸ほか：トンネル掘削時のトンネル支保工応力に地山の不均質性が与える影響、土木学会論文集 F1（トンネル工学）、vol.72 、No.3、pp.I_6-I_7、2016.

10） 森岡宏之ほか：幌延深地層研究計画における地下施設の支保設計（実施設計）、JAEA-research、2008.

2022 年度　外部発表

【学術論文】

1. Masanao Yamasaki, Tatsuhiko Otani, Koji Ishiyama, Hisashi Hayashi, Masato Shinji: Suggestion of estimation method of the deterioration degree on lining for Shaft, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2022, 2022.
2. Yoshinobu Kondo, Hisashi Hayashi, Yasuyuki Okazaki, Masato Shinji: A Study of the Conditions for the Occurrence of Icicles in Road Tunnel, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2022, 2022.

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年度の研究成果概要 6
4. 2022年度研究実施内容 8
4.1 2022年度の計画、実施方法 8
4.1.1 使用した試料の概要 9
4.1.2 供試体作製方法 11
4.1.3 膨潤圧実験の概要 12
4.1.4 一次元膨潤変形実験の概要 14
4.1.5 エコーチップ試験の概要 16
4.1.6 弾性波試験の概要 18
4.1.7 薄片試料のSEM観察およびEDS分析の概要 19
4.2 2022年度の成果内容 21
4.2.1 膨潤圧実験結果 21
4.2.2 一次元膨潤変形実験結果 26
4.2.3 エコーチップ試験結果 31
4.2.4 弾性波試験結果 33
4.2.5 薄片試料の偏光顕微鏡・SEM観察およびEDS分析結果 39
4.2.6 膠結作用に伴う特性低下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 49
5. まとめ 57

参考文献

2022年度外部発表

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関する法律」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。

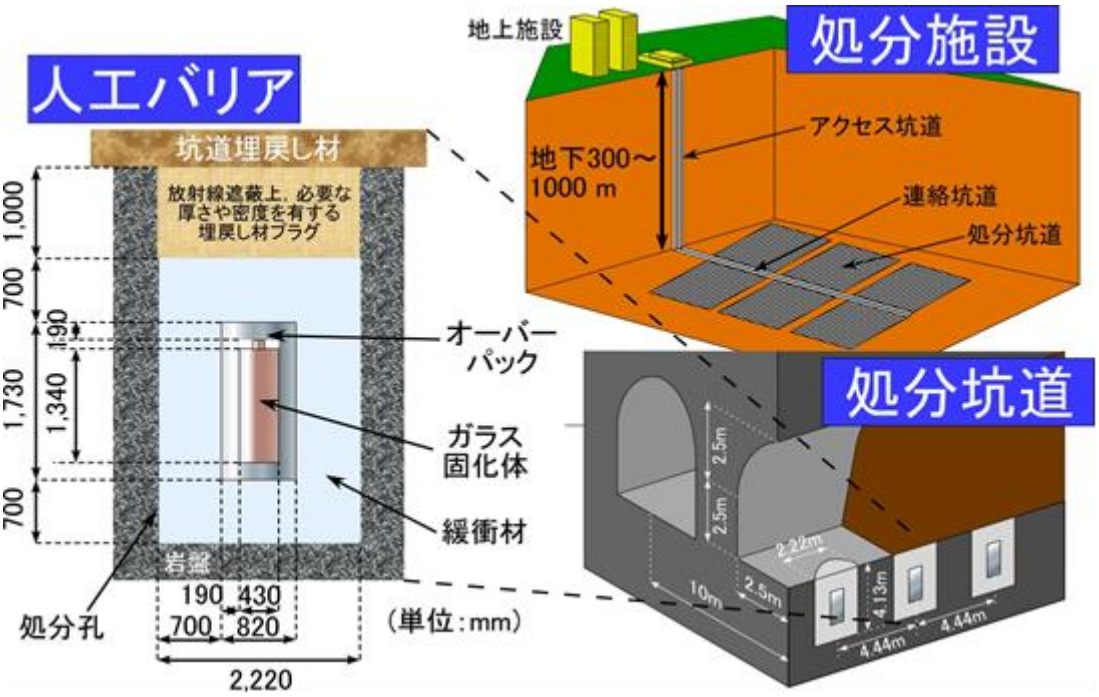


図 1-1　地層処分システム概念図（JAEA, 2017）[4)]

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。

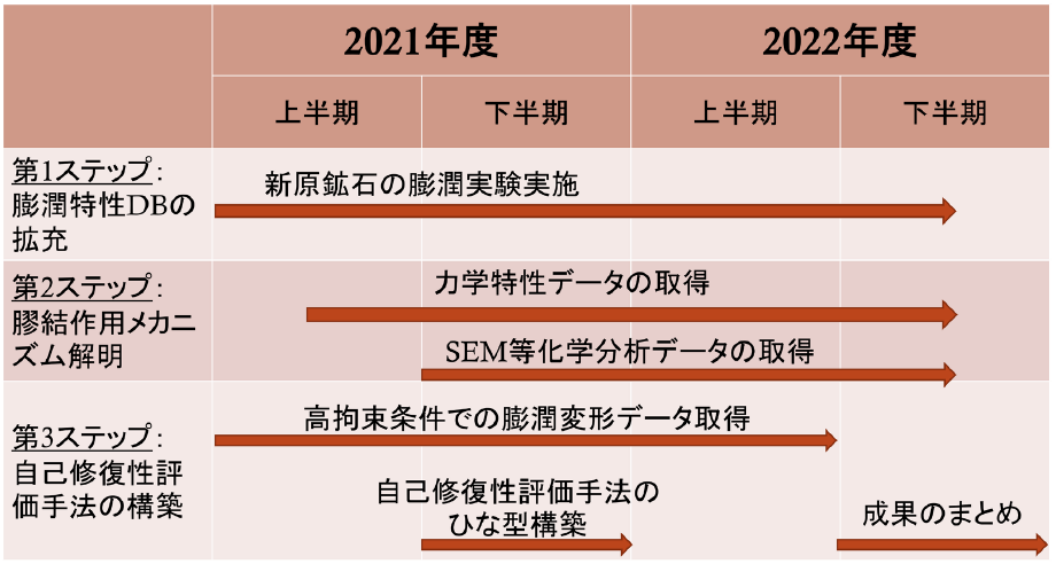
2. 全体研究計画（2 ヵ年における全体計画）

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 2020 年度以前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、当該年度は新たに 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った。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った。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・提案を進めた。

（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模索する。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　本研究の実施内容およびスケジュール



3. 2021 年度の研究成果概要

本研究において、2021 年度に得られた成果は大きく分けて以下の 3 点である。

1) 2021 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（細越産・白崎産・黒石産）について、不攪乱供試体と再構成供試体を作製し、膨潤圧・膨潤変形特性を調査した。その結果、いずれの原鉱石においても、不攪乱供試体の膨潤圧・膨潤変形率は膠結作用の影響により 1/2 以上低下することが明らかとなり、著者らの研究で取り扱ってきた月布産・Ten Sleep 産・劉房子産と同様の傾向であった。**図** 3-1 にその例として、白崎産・細越産・黒石産原鉱石の膨潤圧の経時変化曲線を示す。

2) 月布産・Ten Sleep 産原鉱石の不攪乱供試体と再構成供試体を用いて、高拘束圧（100・500 kPa）下での膨潤変形特性を評価した。それらの結果と膨潤圧・膨潤変形実験（拘束圧 19.6 kPa）・自己シール性実験の結果を統合して、拘束圧－乾燥密度関係を整理したところ、拘束条件によらず不攪乱供試体・再構成供試体のいずれも拘束圧と乾燥密度の間に一意な関係があることを示した。**図** 3-2 に Ten Sleep 産原鉱石の拘束圧 100 kPa・500 kPa における膨潤変形率の経時変化曲線を示す。

3) 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、膠結作用に伴う材料特性変化を考慮した、緩衝材の自己修復性評価手法を提案した。

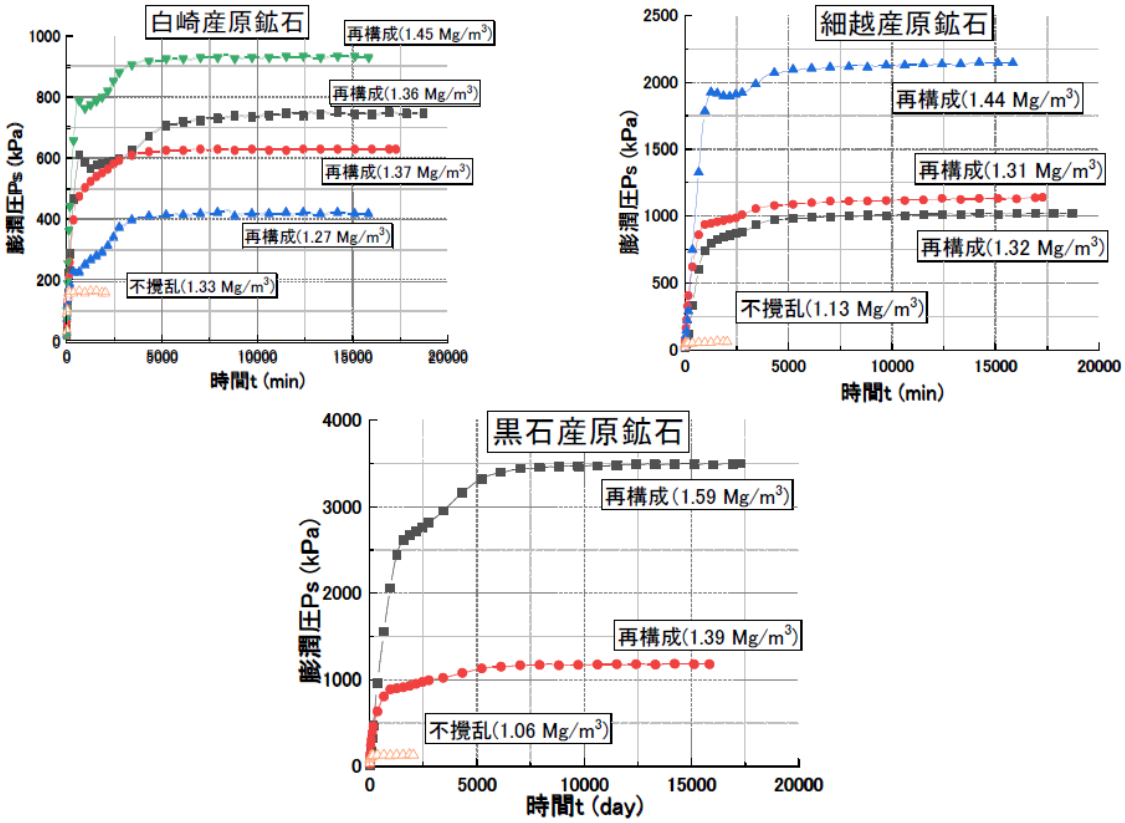


図 3-1　白崎産・細越産・黒石産原鉱石の膨潤圧の経時変化曲線

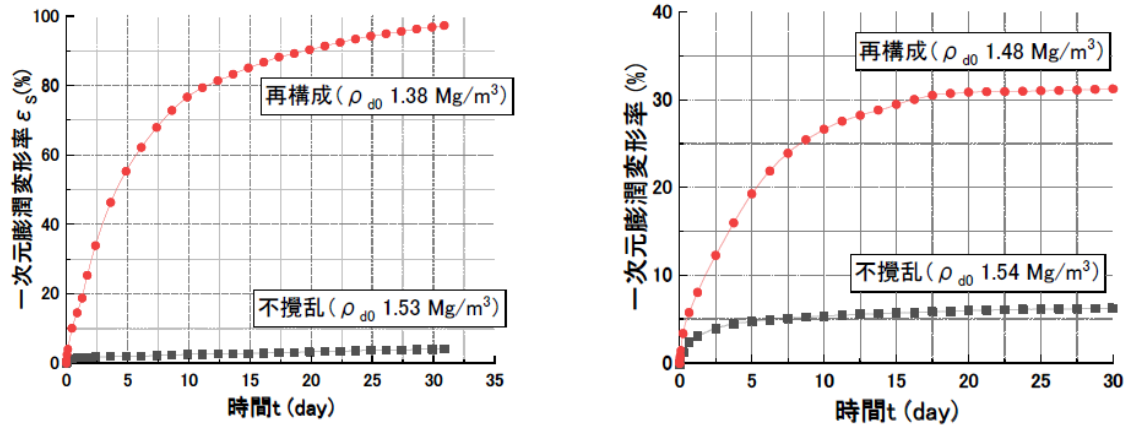


図 3-2　Ten Sleep 産原鉱石の高拘束圧下の膨潤変形率の経時変化曲線（左：100 kPa, 右：500 kPa）

4. 2022 年度研究実施内容

4.1 2022 年度の計画、実施方法

2022 年度においては、まず 2021 年度より新たに導入した白崎・細越・黒石産原鉱石の 3 種類について、データの不足していた不攪乱供試体の膨潤圧および膨潤変形率について追加計測を実施した。また、月布・Ten Sleep・劉房子産原鉱石を対象として、地質年代に代わる代替指標の模索の一環として、非破壊力学試験であるエコーチップ試験・弾性波試験を実施した。膠結作用のメカニズムの追究に向けては、これまでに月布産原鉱石の不攪乱試料から薄片試料を作製し SEM 観察を行ってきたが、今年度は新たに月布産原鉱石の再構成試料や、Ten Sleep 産原鉱石および地質年代の最も古い劉房子産原鉱石の不攪乱試料・再構成試料について薄片試料を作製し、SEM 観察を通して粒子構造や含有鉱物の観点から考察を行った。また、以上の成果を統合し、自己修復性評価手法の高度化を実施するとともに、成果を整理した。**表** 4-1 に 2022 年度の検討項目と実施スケジュールを示す。

表 4-1　2022 年度の検討項目と実施スケジュール

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										→	→	

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、エコーチップ試験、弾性波試験および SEM 観察の概要について述べる。

4.1.1 使用した試料の概要

本研究で使用したベントナイト原鉱石は、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、2021 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 種類を加えた、計 6 種類である。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 4-1** に使用した原鉱石サンプルの様子を示す。

図 4-1　原鉱石サンプルの様子
（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** 4-2 に以上の各試験から得られた、使用した原鉱石の基本的性質を示す。

表 4-2　**原鉱石の基本的性質**

	月布産	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

4.1.2 供試体作製方法

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撹乱供試体と、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。

不撹乱供試体は、カッターリング、包丁、トリマーなどのトリミング用器具を用いて、直径 28 mm、高さ 10 mm の円柱形を目標に成形し、作製した。その際、亀裂やリングと岩片との間に隙間が生じないように留意した。一方、再構成供試体は岩片をメノウ乳鉢、乳棒もしくは破砕機を用いてすりつぶした後に任意の目のふるいにかけ、通過した粉末試料に対し、静的荷重を 15 分間作用させることにより締固め、作製した。粒径 0.425 mm 以下の試料は 0.425 mm ふるいを通過したものを、粒径 0.850～2.00 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 4-2 に不撹乱供試体と再構成供試体の作製概念図を示す。

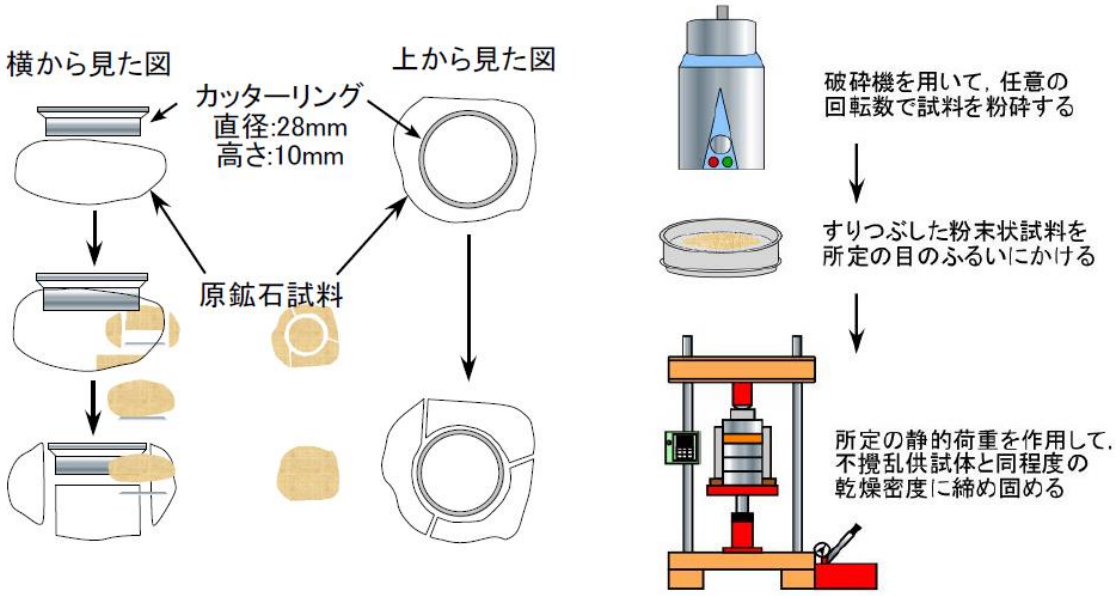


図 4-2　不撹乱供試体（左）と再構成供試体（右）の作製概念図

4.1.3 膨潤圧実験の概要

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の低下を引き起こす可能性が考えられる。故に、緩衝材が膠結作用に伴い固結した場合の膨潤圧特性の変化を評価し、バリア性能の著しい低下が生じるかを照査することは非常に重要である。そこで本研究では、不攪乱供試体と再構成供試体を用いて膨潤圧測定試験を実施し、膨潤圧特性における膠結作用の影響に関して評価を行った。

本試験においては、**図** 4-3 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、4.1.2 で述べた方法により作製した供試体を SUS316L 製リングに移し替え、供試体の上下端に定性ろ紙（No.5A）を設置し、膨潤特性実験容器を組み立てた。実験容器底板の下部給水口と二重管ビュレットをシンフレックスチューブにより接続した。次に、ベロフラムシリンダーの空気圧を調整することによりピストンを供試体上部に接触させ、クランプノブを締めることで鉛直方向の変位を固定した。そのまま 5 分程度放置した後、供試体への給水とロードセルによる膨潤圧および変形量の測定を開始した。また、試験開始時には 20～40 kPa の鉛直圧を作用させ、ピストンと供試体上端が確実に接触するよう留意した。膨潤圧の測定には、最大容量 50 kN、最小目盛 0.012 kN のロードセルを用いた。また、鉛直方向の変位は完全には抑制できないため、最大容量 25 mm、最小目盛り 0.002 mm の変位計を用いて変位量（膨潤変形量）を測定し、式(1)を用いて乾燥密度を補正した。

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

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。

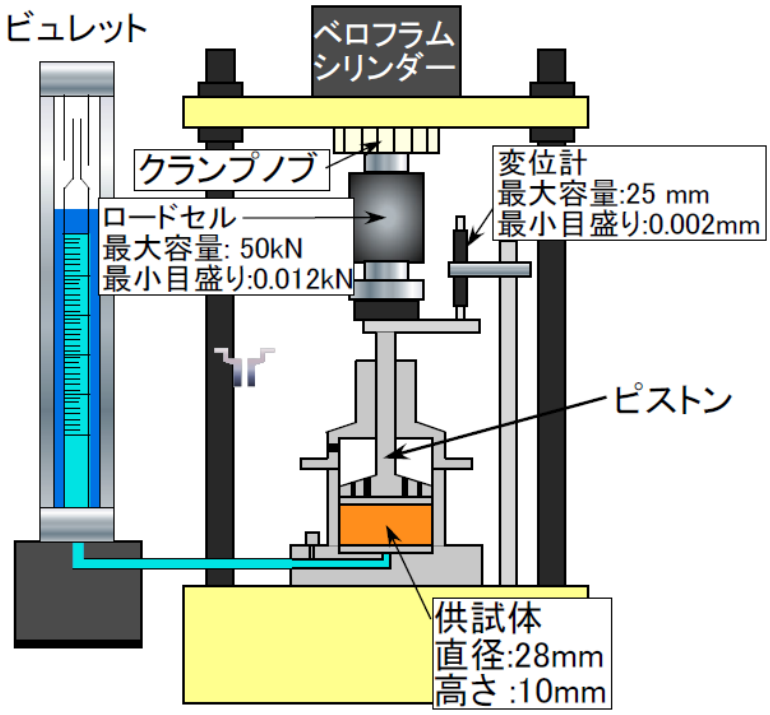


図 4-3　膨潤圧実験装置の概略図

4.1.4 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 4-4 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。

4.1.3 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。

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta S}{H_0} \times 100 \qquad (2)$$

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。

$$\varepsilon_s(t) = \frac{t}{a + bt} \ (\%) \qquad (3)$$

$$\varepsilon_{s\,max} = \lim_{t\to\infty} \varepsilon_s(t) = \frac{1}{b} \ (\%) \qquad (4)$$

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、$\varepsilon_{smax}\varepsilon_{s\,max}$：最大膨潤変形率（%）である。

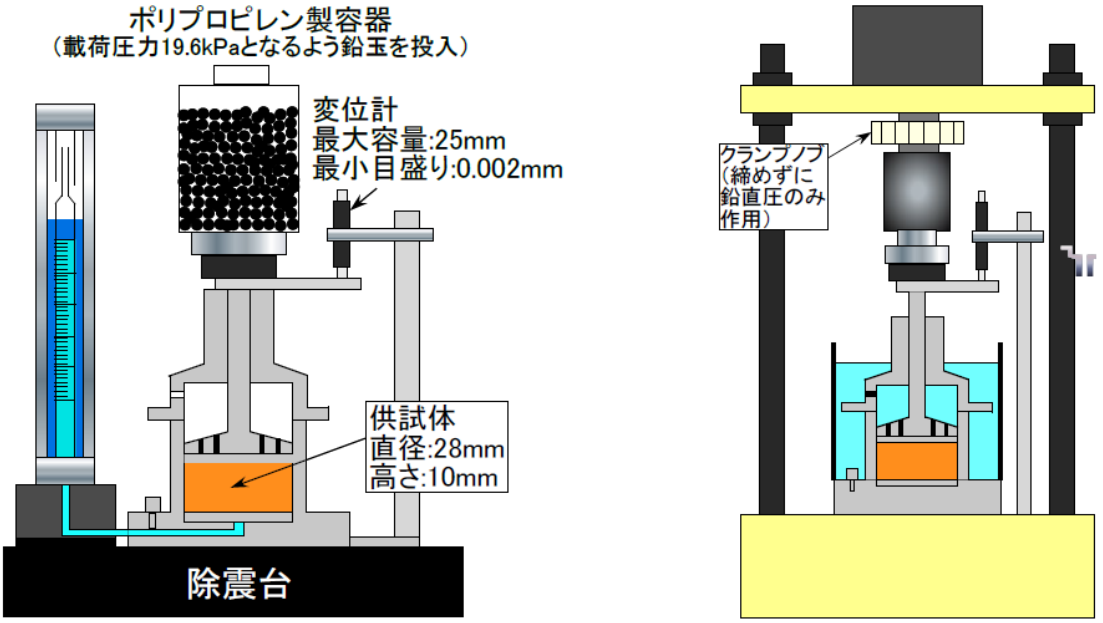


図 4-4　一次元膨潤変形試験装置（左：拘束圧 19.6kPa の場合、右：拘束圧 100・500 kPa の場合）

4.1.5 エコーチップ試験の概要

エコーチップ試験はもともと鉄など金属材料の硬さの評価に用いられてきた、反発硬度試験の 1 種である。我が国では 2000 年前後より、コンクリート [19]や岩石 [20),21),22),23)]など土木で取り扱う材料に対する適用性の検討が始まり、主に一軸圧縮強さの非破壊での推定に向けた活用が行われてきた。エコーチップ試験では、インパクトボディと呼ばれる部位を供試体正面に自由落下で衝突させ、その打撃速度と反発速度を測定する。**図** 4-5 にエコーチップ試験の概念図を示す。本試験で得られる結果の整理・評価においては、エコーチップ硬さ L 値と呼ばれる物理量を用い、その求め方は式(5)の通りである。本研究では、膠結作用に伴い土粒子もしくは鉱物骨格が膠結物質により強化され、その影響を硬さ値として評価できると想定し、月布産・Ten Sleep 産・劉房子産原鉱石の不攪乱試料と再構成試料に対しエコーチップ試験を行った。本試験に用いたのは、PROCEQ 社製 EQUOCHIP PICCOLO である。なお、試験に際しては試料をステージ上に置いて実施した。**図** 4-6 に本試験装置を用いたエコーチップ試験の様子を示す。

$$L = \frac{V}{V_0} \times 1000 \tag{5}$$

ここに、L : エコーチップ硬さ値、V : 反発速度(m/s)、V_0 : 打撃速度(m/s)である。

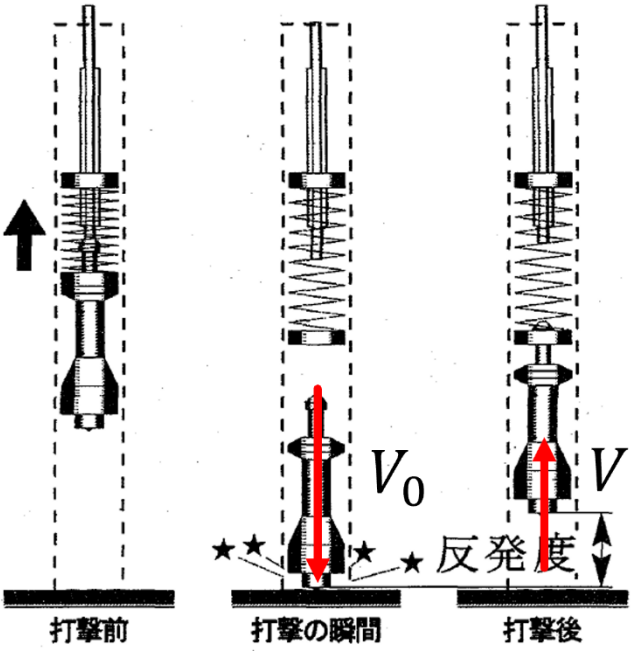


図 4-5　エコーチップ試験の概念図（参考文献 24 に加筆）

図 4-6　エコーチップ試験の様子

本試験に用いたのは、目標の寸法として直径 60 mm、高さ 30 mm もしくは 40 mm（月布産：40 mm、Ten Sleep 産・劉房子産：30 mm）とした円柱形試料である。不攪乱試料については、トリマーやストレートエッジ等を用いて、原鉱石から直接成形し作製した。再構成試料については、粒径 0.425 mm 以下に調整した破砕試料を用い、静的荷重を加えて所定の乾燥密度になるよう締固めて作製した。なお、月布産原鉱石については 1.7 Mg/m^3、Ten Sleep 産原鉱石については 1.4 Mg/m^3、劉房子産原鉱石については 1.85 Mg/m^3 を目標値とした。

エコーチップ試験の実施の際は、底面の中心部に対し連続で 10 回ほど打撃を加えることで行った。これらの測定により得られた L 値を統計的に処理し、値のバラつきや平均値によりサンプル間の結果を比較した。

4.1.6 弾性波試験の概要

弾性波探査は、土木分野において地層の強度や厚さを調査するために広く用いられる探査方法である。屈折法探査の他、反射法や表面波探査、弾性波トモグラフィなどがあるが、屈折法以外の探査方法で得られる弾性波速度分布および値については、地質の差異やそれに伴う N 値、一軸圧縮強さなどの諸量との相関性が良いため、施工前の予備調査や地滑りの検査、耐震設計の根拠などとして数多く用いられている [25]。このような背景を受けて、本研究では原鉱石の固結の程度や地質年代に代わる代替指標として活用可能性を見出し、原鉱石の不攪乱試料と再構成試料を用いて弾性波試験を実施した。

本試験で使用した試料は、エコーチップ試験と同様、直径 60 mm、高さ 30 mm もしくは 40 mm の円柱形を目標として作製した。不攪乱試料と再構成試料の作製方法も、エコーチップ試験と同様である。

本試験で使用したのは、応用地質製のソニックビュア 2i である。**図** 4-7 に弾性波試験装置の様子を、**図** 4-8 に弾性波試験実施の様子を示す。

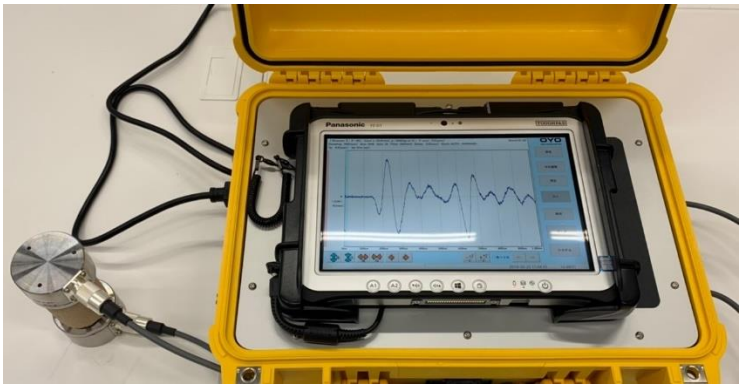


図 4-7　**弾性波試験装置の様子**

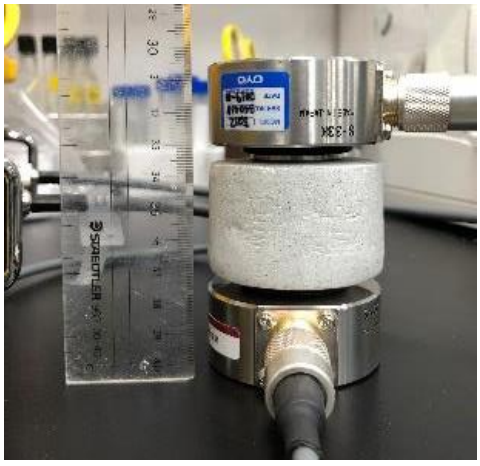


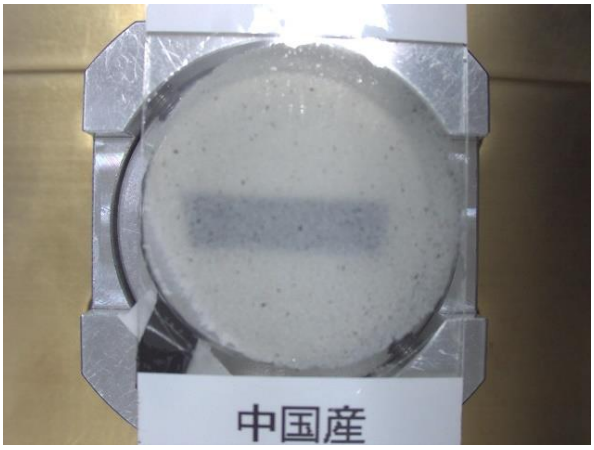
図 4-8　**弾性波試験実施の様子**

4.1.7 薄片試料の SEM 観察および EDS 分析の概要

岩石中の含有鉱物の同定や、鉱物組織の評価において、薄片試料を作製し偏光顕微鏡を用いて観察する手法が一般的に用いられる。薄片試料とは、観察対象の岩石をガラス板に貼付した後、厚さ 30 μm 程度まで薄く削るとともに磨いたものである [26]。本研究では、原鉱石における膠結作用に寄与する鉱物を同定するため、地質年代の最も若い月布産・Ten Sleep 産、および最も古い劉房子産原鉱石の不攪乱試料・再構成試料から薄片試料を作製し、偏光顕微鏡と SEM を用いて観察した。なお、薄片試料の作製は早稲田大学教育・総合科学学術院薄片室のテキスト [27]に基づいて行った。薄片試料の外観を**図** 4-9 に示す。また、使用した SEM 装置は JEOL 製 IT-100LA である。**図** 4-10 に使用した SEM 装置を示す。

月布産不攪乱試料

劉房子産不攪乱試料



劉房子産再構成試料

図 4-9　薄片試料の外観

図 4-10　使用した SEM 装置

4.2 2022 年度の成果内容

4.2.1 膨潤圧実験結果

本節では、白崎産・細越産・黒石産原鉱石において膨潤圧実験を実施した結果について述べる。なお、2022 年度においては、不攪乱供試体を数ケース追加で実施した。

・白崎産原鉱石

図 4-11 に、白崎産原鉱石の膨潤圧の経時変化を示す。不攪乱供試体において、2 ケースともに実験開始直後に膨潤圧が上昇した後、一定値に収束している挙動が確認できた。一方、再構成供試体では膨潤圧の上昇→一時的な下降→再上昇という不飽和ベントナイトの膨潤圧変化でよく観測されている挙動[28]がみられた。

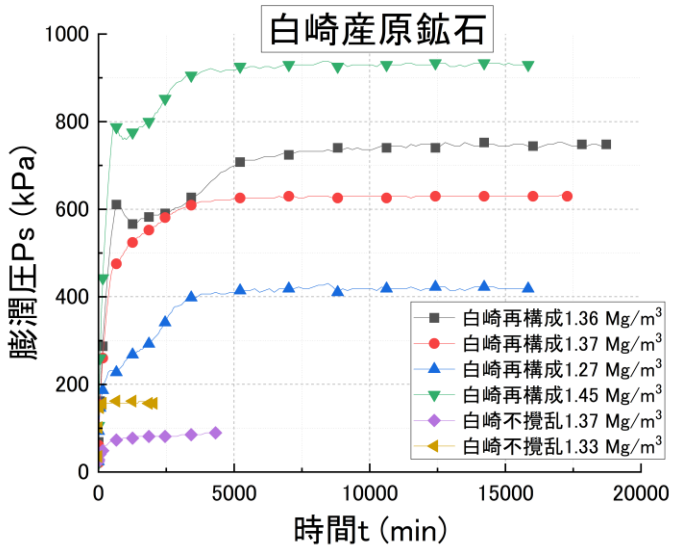


図 4-11　白崎産原鉱石の膨潤圧の経時変化曲線

図 4-12 に最大膨潤圧と試験終了時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に応じて最大膨潤圧が線形的に増加することが分かる。不攪乱供試体においては、同程度の乾燥密度の再構成供試体に比べて 1/2 以下にとどまっていることが分かる。

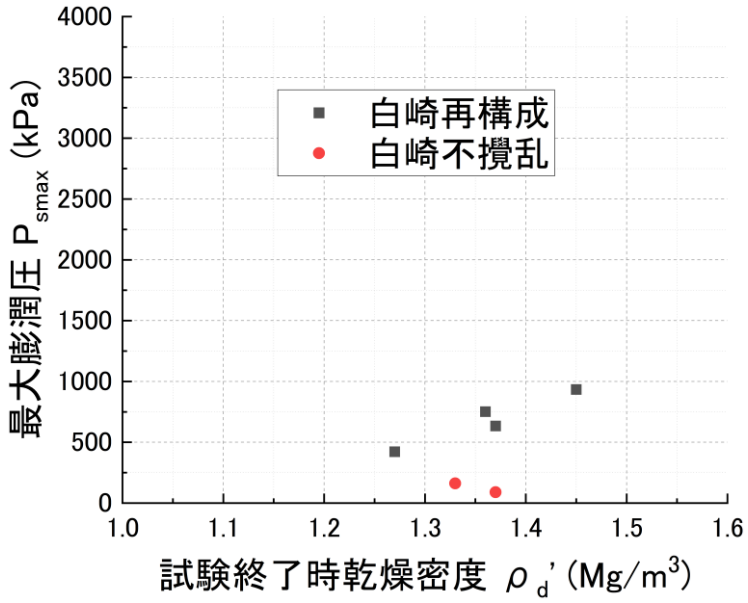


図 4-12　最大膨潤圧－試験終了時乾燥密度関係（白崎産原鉱石）

・細越産原鉱石

図 4-13 に細越産原鉱石の膨潤圧の経時変化を示す。不撹乱供試体において、膨潤圧は試験期間全体を通してほぼ横ばいであり、増加しなかった。一方、再構成供試体では白崎産原鉱石と同様、膨潤圧の上昇→一時下降→再上昇の経時変化がみられた。

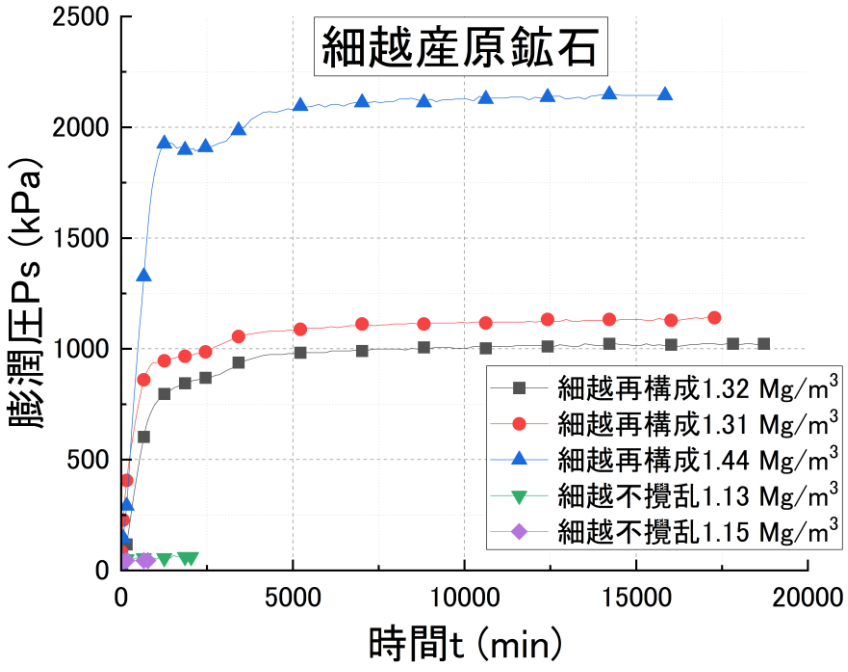


図 4-13　細越産原鉱石の膨潤圧の経時変化曲線

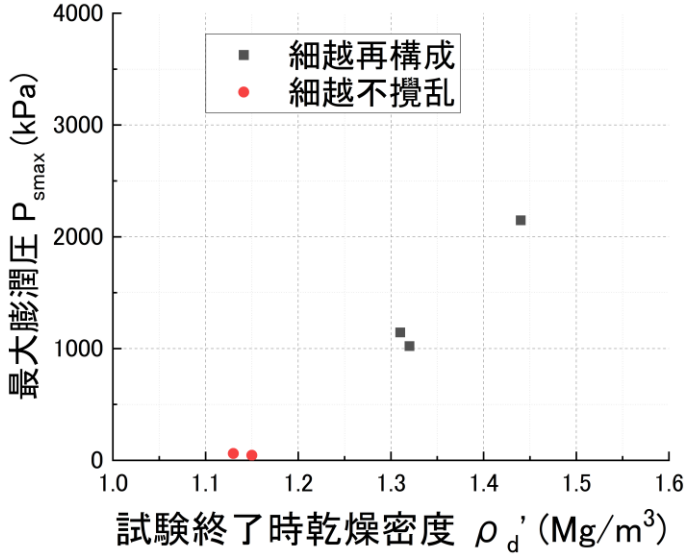


図 4-14　最大膨潤圧－試験終了時乾燥密度関係（細越産原鉱石）

図 4-14 に細越産原鉱石の最大膨潤圧と試験終了時乾燥密度の関係を示す。不攪乱供試体の乾燥密度は再構成供試体に比べて 0.2 Mg/m^3 ほど低いが、再構成供試体に比べ著しく最大膨潤圧が低いことが分かる。

・黒石産原鉱石

図 4-15 に黒石産原鉱石の膨潤圧の経時変化を示す。不攪乱供試体において、細越産原鉱石と同様、試験開始直後から膨潤圧は横ばい状態であった。一方で、再構成供試体については膨潤圧の増加が二段階に分かれて生じていることが分かる。

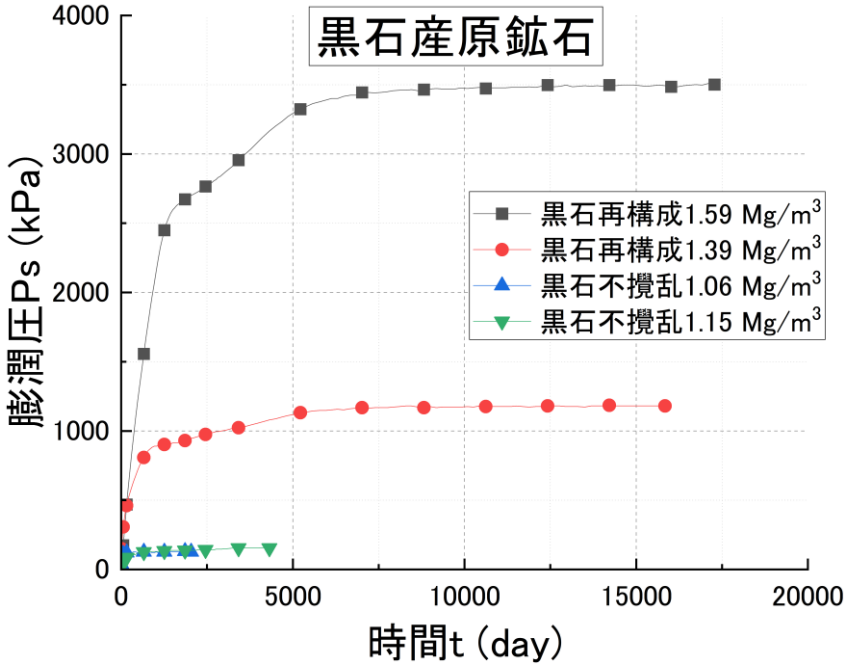


図 4-15　黒石産原鉱石の膨潤圧の経時変化曲線

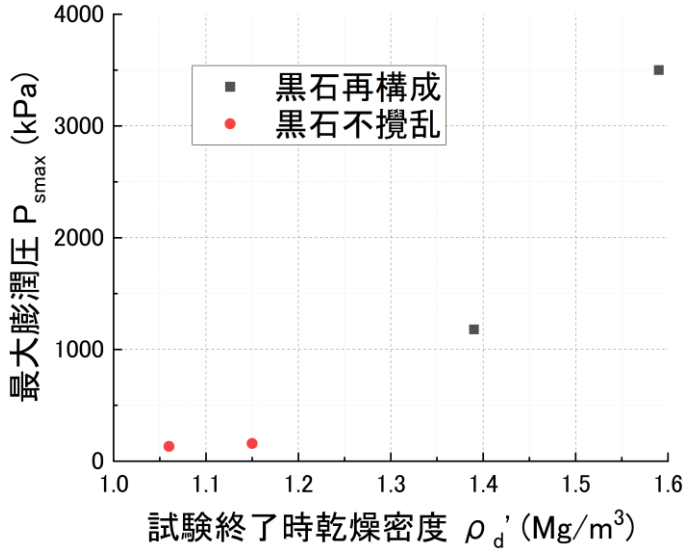


図 4-16　最大膨潤圧－試験終了時乾燥密度関係（黒石産原鉱石）

図 4-16 に黒石産原鉱石の最大膨潤圧と試験終了時乾燥密度の関係を示す。細越産原鉱石と同様、不攪乱供試体の乾燥密度は再構成供試体に比べて 0.4 Mg/m^3 程度低いが、再構成供試体に比べ著しく最大膨潤圧が低いことが分かる。

次に、各原鉱石の結果を統一的に評価するため、モンモリロナイトの乾燥質量をモンモ

リロナイトおよび間隙の合計体積で除した有効モンモリロナイト密度を用いて、最大膨潤圧との関係を整理した。図 4-17 に最大膨潤圧と有効モンモリロナイト密度の関係を示す。

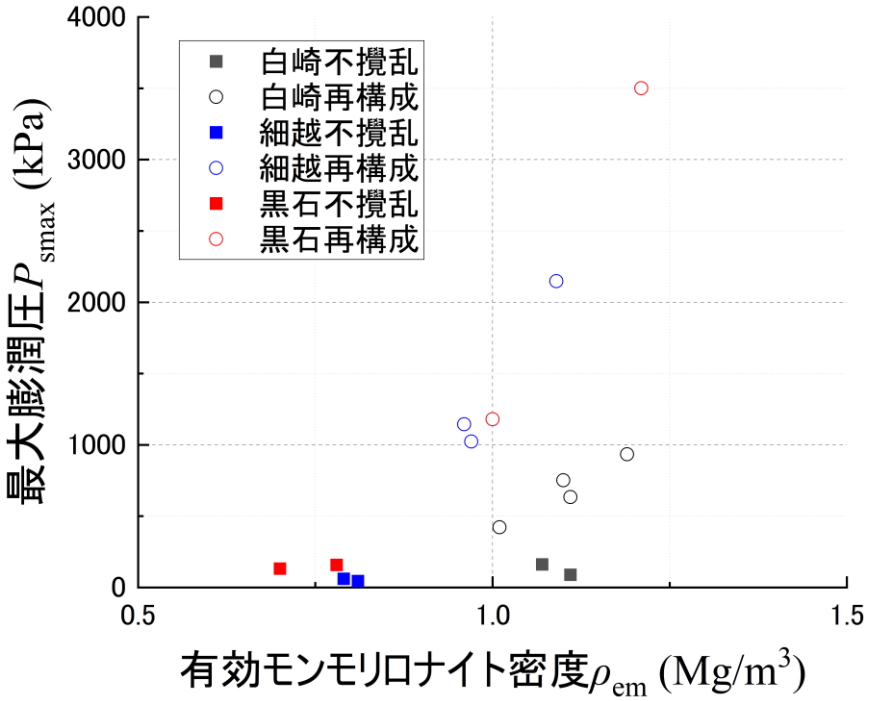


図 4-17　最大膨潤圧－有効モンモリロナイト密度関係

これより、再構成供試体についてはバラつきがあるものの、有効モンモリロナイト密度と最大膨潤圧の間に線形的な関係がみられた。一方、不攪乱供試体では両者の間に明確な相関性がみられなかった。この傾向については、代表者らのグループで以前実施した月布産・Ten Sleep 産・劉房子産原鉱石と同様の関係性である。これより、本研究で用いた 6 種類の原鉱石について共同の傾向がみられたため、ベントナイト系材料の膨潤圧特性に対する膠結作用の影響を考慮した統一的なデータベースを構築できたと考える。

4.2.2 一次元膨潤変形実験結果

本節では、白崎産・細越産・黒石産原鉱石の拘束圧 19.6 kPa 下での膨潤変形実験を実施した結果と、劉房子産原鉱石の拘束圧 100・500 kPa 下での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 4-18 に膨潤変形率の経時変化曲線を示す。これより、不攪乱供試体においては、4 ケースすべてにおいて試験期間中全体にわたって膨潤変形率が横ばいであることが分かる。一方、再構成供試体では試験開始から 10 日程度にわたって急激に上昇した後、収束に向かう挙動がみられた。

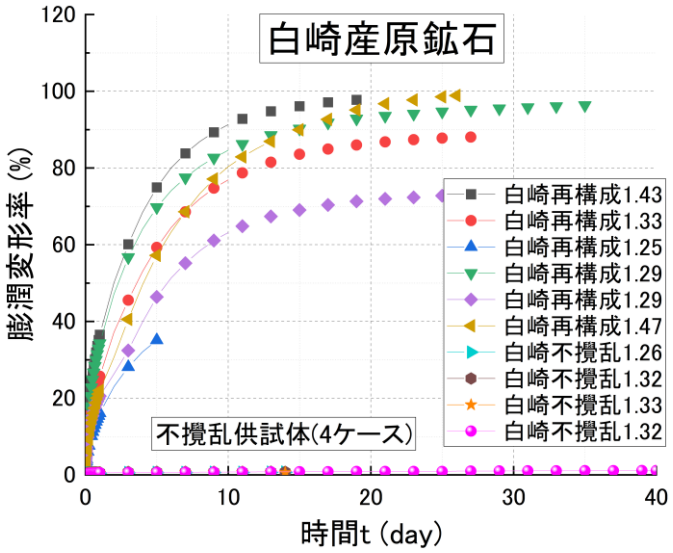


図 4-18　白崎産原鉱石の膨潤変形率の経時変化曲線

図 4-19 に最大膨潤変形率と初期乾燥密度の関係を示す。前図の記述の通り、不攪乱供試体では最大膨潤変形率がほぼ 0 に近かったのに対し、再構成供試体では乾燥密度に応じて線形的に最大膨潤変形率が増加する傾向がみられた。

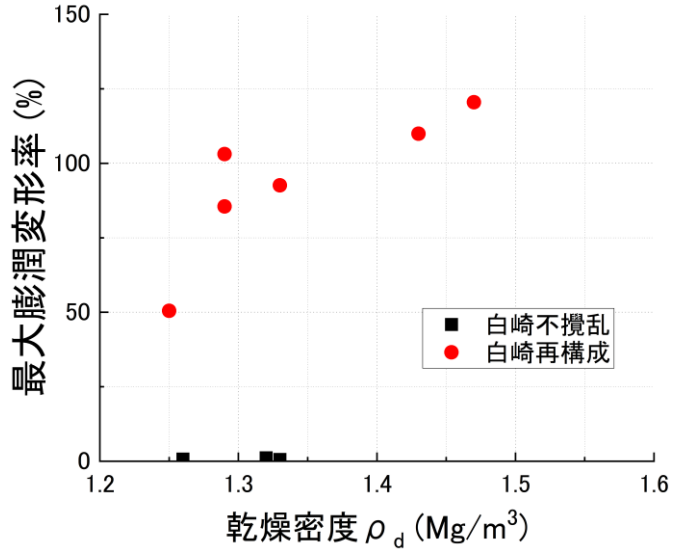


図 4-19　白崎産原鉱石の最大膨潤変形率－初期乾燥密度関係

・細越産原鉱石

図 4-20 に膨潤変形率の経時変化を示す。これより不攪乱供試体では、試験期間 40 日にわたって膨潤変形率がほぼ横ばい状態であった。一方、再構成供試体では試験開始後 5 日程度で急激に上昇した後、収束に向かう挙動がみられた。

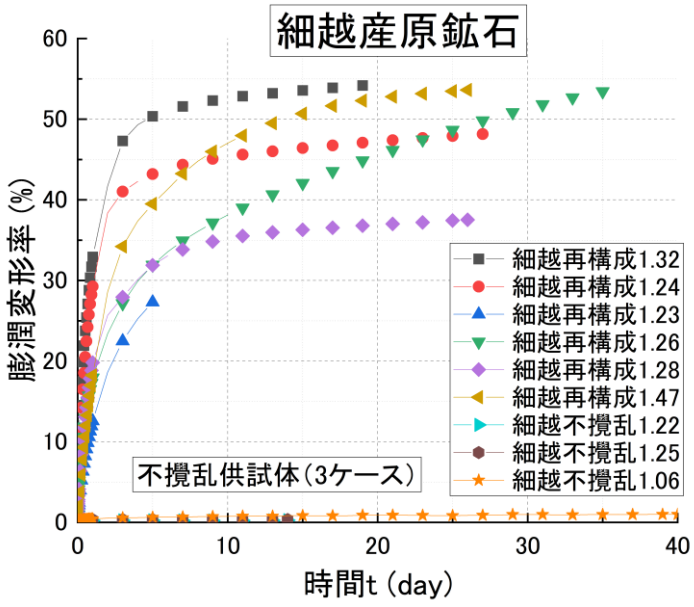


図 4-20　細越産原鉱石の膨潤変形率の経時変化曲線

図 4-21 に最大膨潤変形率と初期乾燥密度の関係を示す。これより、細越産原鉱石においても不攪乱供試体の最大膨潤変形率はほぼ 0 であるのに対し、再構成供試体では白崎産原鉱石より緩やかであるものの、最大膨潤変形率が乾燥密度の増加に応じて線形的に増加する傾向がみられた。

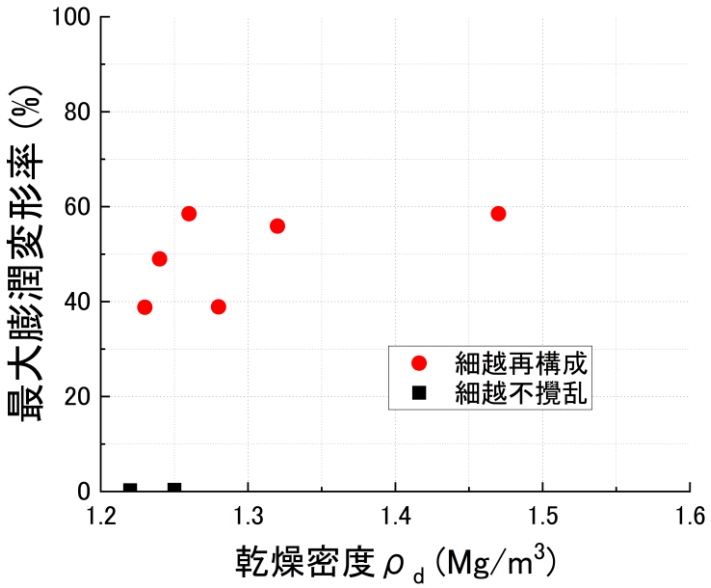


図 4-21　細越産原鉱石の最大膨潤変形率－初期乾燥密度関係

・黒石産原鉱石

図 4-22 に膨潤変形率の経時変化を示す。黒石産原鉱石の不攪乱供試体については、膨潤変形率が緩やかに増加していることが確認された。増加挙動については再構成供試体よりも緩やかで、終始低い値にとどまっていることが分かった。

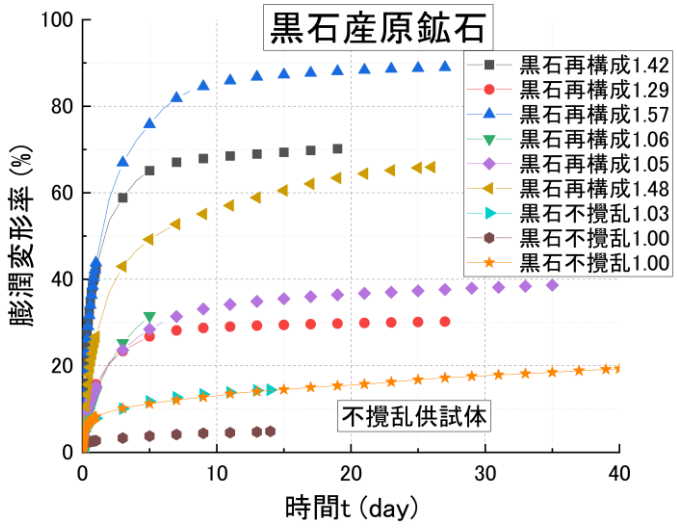


図 4-22　黒石産原鉱石の膨潤変形率の経時変化曲線

図 4-23 に最大膨潤変形率と初期乾燥密度の関係を示す。黒石産原鉱石では他の原鉱石に比べバラつきが大きいものの、不攪乱供試体の最大膨潤変形率は再構成供試体に比べ 1/2 以下にとどまっていることが確認された。

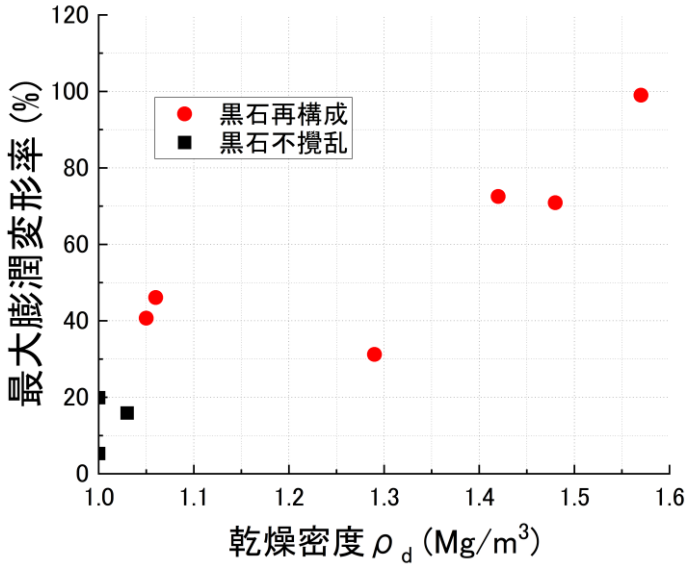


図 4-23　黒石産原鉱石の最大膨潤変形率－初期乾燥密度関係

白崎産・細越産・黒石産原鉱石の最大膨潤変形率についても、統一的に評価するため有効モンモリロナイト密度を用いて整理した。図 4-24 に最大膨潤変形率と有効モンモリロナイト密度の関係を示す。

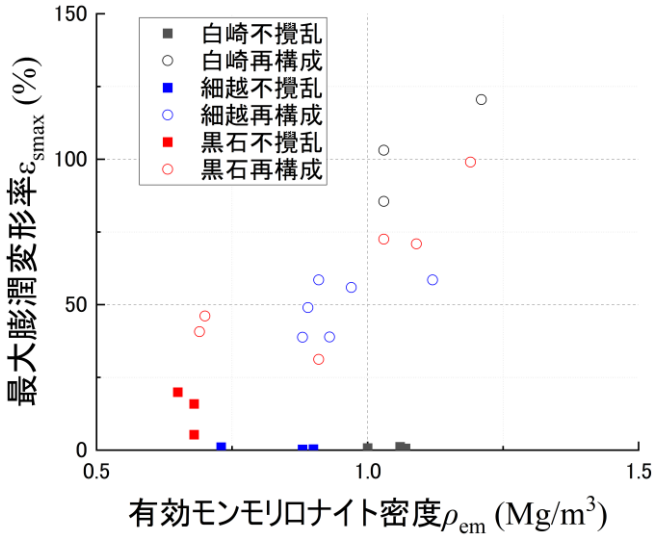


図 4-24　最大膨潤変形率－有効モンモリロナイト密度関係

これより、最大膨潤圧と同様、再構成供試体では最大膨潤変形率と有効モンモリロナイト密度の間に線形的な関係がみられた一方で、不攪乱供試体では相関性がみられなかった。この点についても月布産・Ten Sleep 産・劉房子産原鉱石と同様であり、ベントナイトの膠結作用の影響を考慮した膨潤変形特性データベースを構築できたと考えられる。

・劉房子産原鉱石

図 4-25 に拘束圧 100 kPa における膨潤変形率の経時変化曲線を、**図** 4-26 に拘束圧 500 kPa における膨潤変形率の経時変化曲線をそれぞれ示す。これらから、いずれの拘束圧においても膨潤変形率が経時に伴い緩やかに増加し、収束に向かう挙動がみられた。月布産原鉱石や Ten Sleep 産原鉱石と同様の挙動であった。

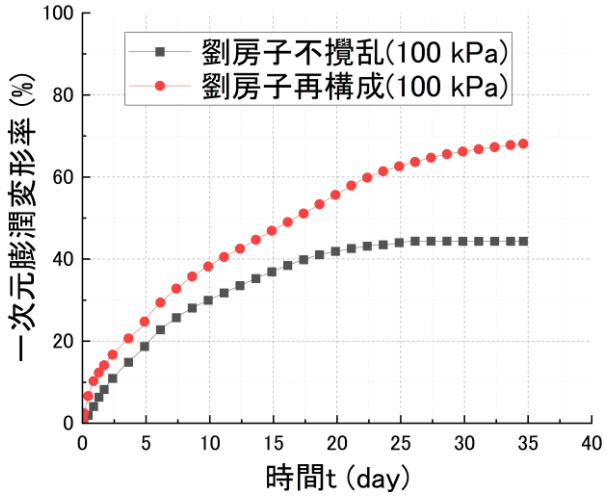


図 4-25　拘束圧 100 kPa における膨潤変形率の経時変化曲線

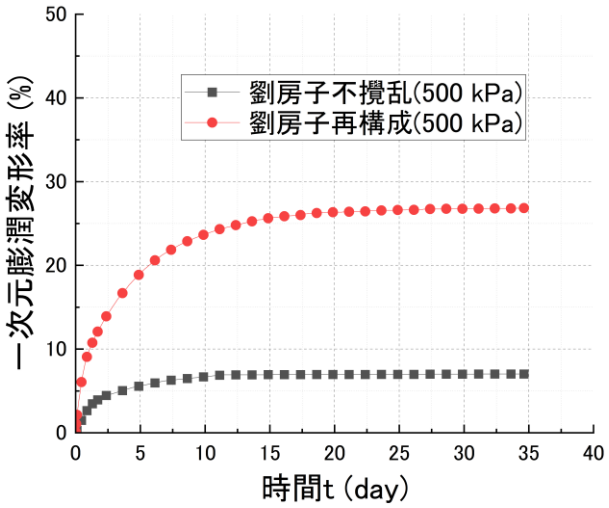


図 4-26　拘束圧 500 kPa における膨潤変形率の経時変化曲線

4.2.3 エコーチップ試験結果

図 4-27 に、月布産・Ten Sleep 産・劉房子産原鉱石の不攪乱試料・再構成試料で得られた L 値を比較して示す。本図においては箱ひげ図を利用して値のバラつきの程度や平均値を示している。これより、平均値で見るといずれの原鉱石においても不攪乱試料の方が再構成供試体に比べて L 値が高く、硬いことが分かる。劉房子産原鉱石の不攪乱試料においては他の試料に比べて値のバラつきが大きいが、これは劉房子産原鉱石の地質年代が古く、層理に伴う微小なひび割れが生じており、それに伴って場所ごとに硬度がバラついたもの推察される。また、3 種類の原鉱石の地質年代については月布産→Ten Sleep 産→劉房子産の順で古いが、L 値については月布産≒劉房子産＞Ten Sleep 産となっていることが分かる。この結果と、本研究で過去に得られている膨潤圧の不攪乱供試体・再構成供試体の値の比率および地質年代の順序については整合せず、エコーチップ試験で得られた硬度 L 値は地質年代の代替指標としての活用に不足があると言える。

また、他の岩石の計測結果として、砂岩：650～800、頁岩：500～800、緑色片岩：300～700、花崗岩：860、ホルンフェルス：600～750 であり [29]、本研究で用いた原鉱石は砂岩や頁岩、緑色片岩およびホルンフェルス等と同様の数値であることが分かる。深成岩である花崗岩では数値が高く、その他の岩は堆積岩や変成岩であり本研究で用いた原鉱石も堆積岩（月布産・Ten Sleep 産）や変成岩（劉房子産）と推察されることから、岩石の性状による硬度への影響がみられることが分かる。

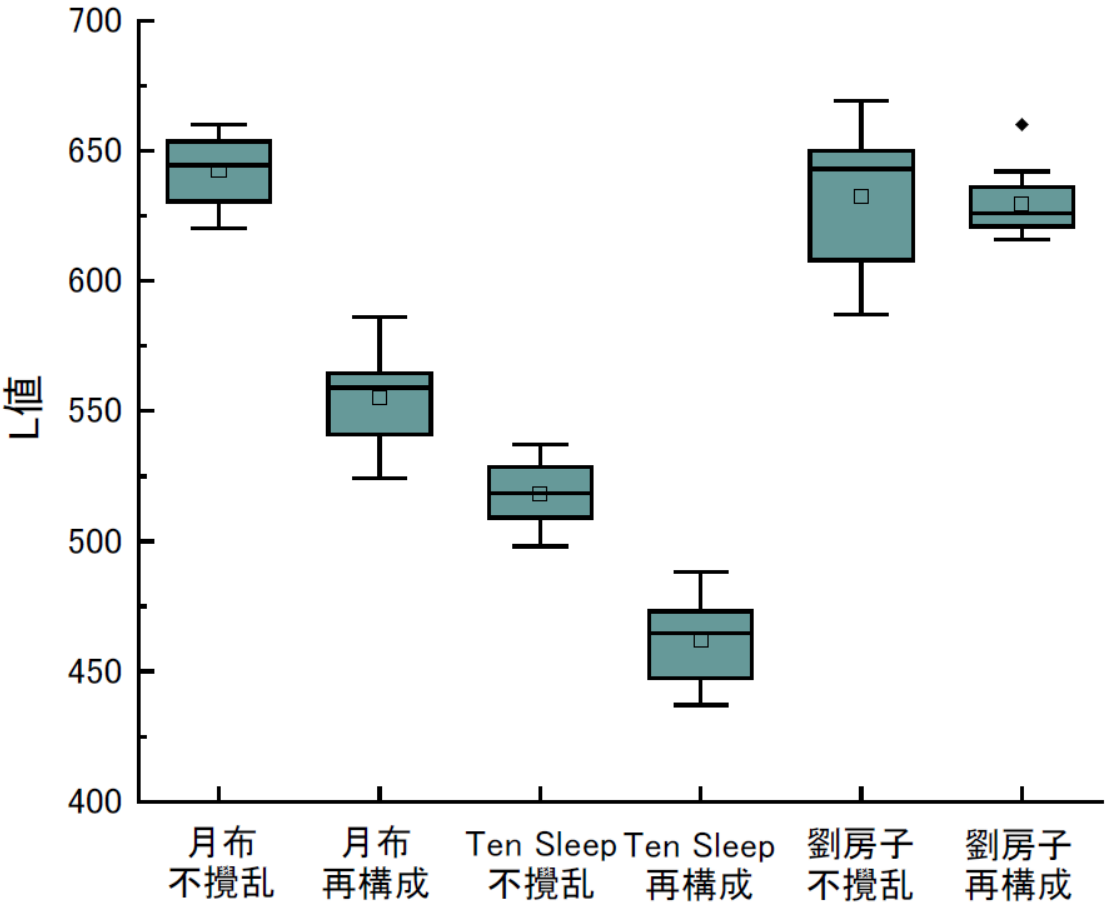


図 4-27　月布・Ten Sleep・劉房子産原鉱石の L 値比較

4.2.4 弾性波試験結果

本項では、月布産原鉱石、Ten Sleep 産原鉱石および劉房子産原鉱石の弾性波試験結果について述べる。

・月布産原鉱石

図 4-28 に不攪乱試料の P 波・S 波計測データを、**図** 4-29 に再構成試料の P 波・S 波計測データを示す。また、表 4-3 に本計測から得られた P 波・S 波速度の計測データを示す。

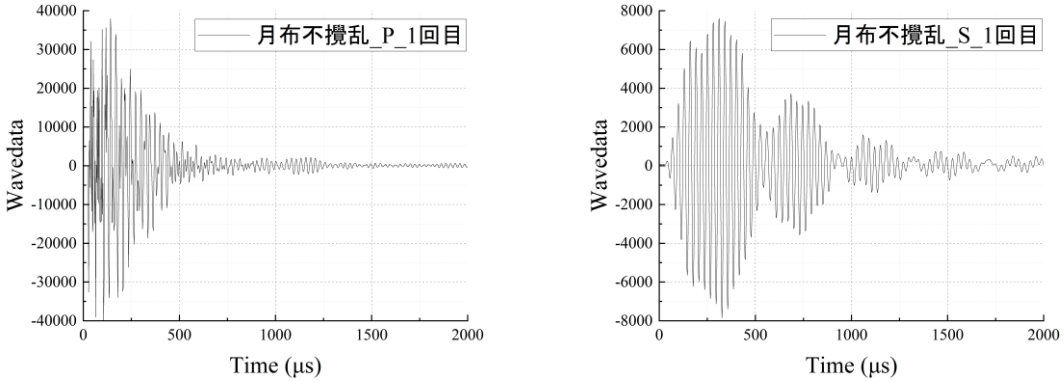


図 4-28　月布産原鉱石不攪乱試料の P 波（左）と S 波（右）計測データ

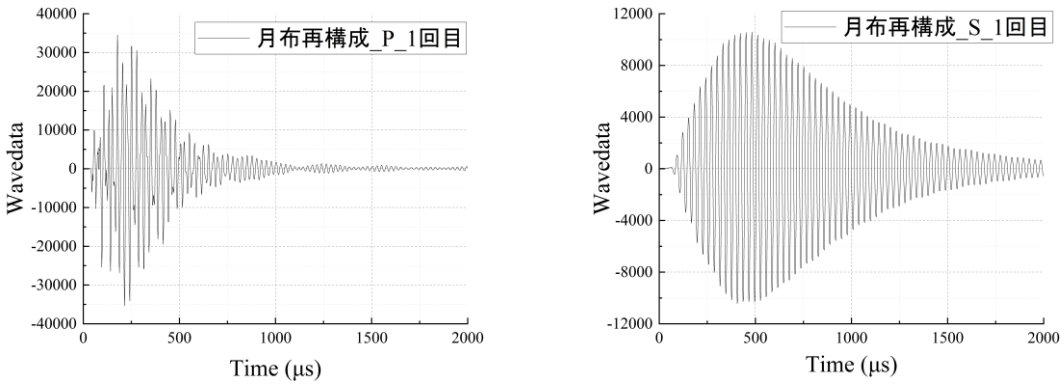


図 4-29　月布産原鉱石再構成試料の P 波（左）と S 波（右）計測データ

表 4-3　弾性波試験結果（月布産原鉱石）

	1 回目	2 回目
不攪乱 V_p (m/s)	1571	1571
不攪乱 V_s (m/s)	785	785
再構成 V_p (m/s)	1060	1060
再構成 V_s (m/s)	624	624

以上の結果から、P 波・S 波速度のいずれも不撹乱試料の方が速いことが分かる。このことから、不撹乱試料は内部の割れ目もなく均質であり、再構成試料に比べてセメンテーション物質等の影響により硬質であることが推察される。

続いて、既往文献における締固めたクニゲル V1 供試体の結果 [30]と比較する形で、乾燥密度・湿潤密度・飽和度の各状態量と P 波速度・S 波速度の関係を図 4-30 に示す。

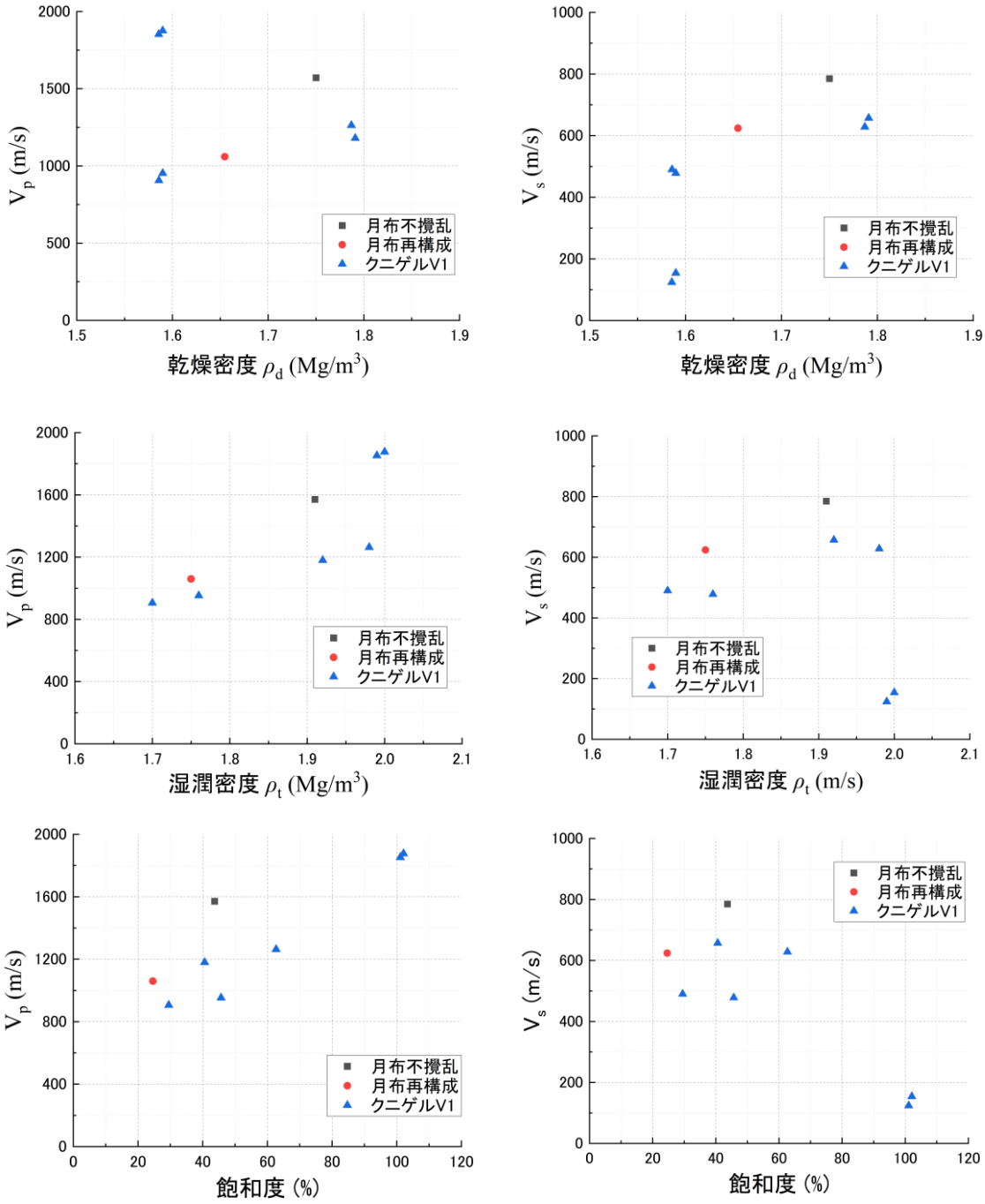


図 4-30　乾燥密度（上段）・湿潤密度（中段）・飽和度（下段）と P 波速度（左段）・S 波速度（右段）の関係（月布産原鉱石・クニゲル V1）

これより、再構成供試体の値は締固めたクニゲル V1 と同様の傾向にあることが分かる。なお、クニゲル V1 のうち飽和度 100%のケースについては乾燥密度・湿潤密度のグラフにおいては外れ値となっており、このことから P 波速度・S 波速度との相関性の高さという点で飽和度が優れていることが分かる。また、不攪乱試料についてはいずれの状態量の整理においても、再構成試料・クニゲル V1 よりも早いことが分かる。

・Ten Sleep 産原鉱石

図 4-31 に Ten Sleep 産原鉱石不攪乱試料の P 波・S 波計測データを、図 4-32 に Ten Sleep 産原鉱石再構成試料の P 波・S 波計測データをそれぞれ示す。また、表 4-4 に不攪乱試料・再構成試料の P 波速度・S 波速度を示す。

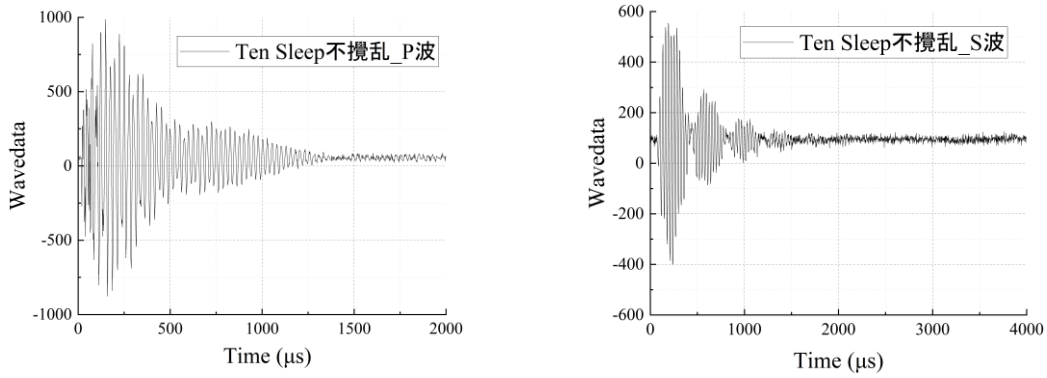


図 4-31　Ten Sleep 産原鉱石不攪乱試料の P 波（左）と S 波（右）計測データ

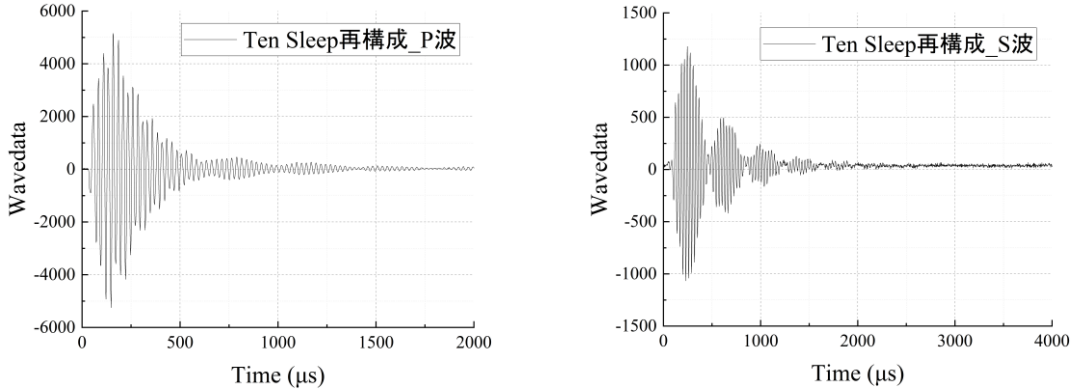


図 4-32　Ten Sleep 産原鉱石再構成試料の P 波（左）と S 波（右）計測データ

表 4-4　弾性波試験結果（Ten Sleep 産原鉱石）

	1 回目	2 回目
不攪乱 V_p (m/s)	1956	1956
不攪乱 V_s (m/s)	423	435
再構成 V_p (m/s)	956	956
再構成 V_s (m/s)	326	326

これより、不攪乱試料の方が P 波速度・S 波速度ともに再構成試料に比べて速く、月布産原鉱石と同様の傾向にあることが分かる。

・劉房子産原鉱石

図 4-33 に劉房子産原鉱石不攪乱試料の P 波・S 波計測データを、**図** 4-34 に劉房子産原鉱石再構成試料の P 波・S 波計測データをそれぞれ示す。また、**表** 4-5 に不攪乱試料・再構成試料の P 波速度・S 波速度を示す。

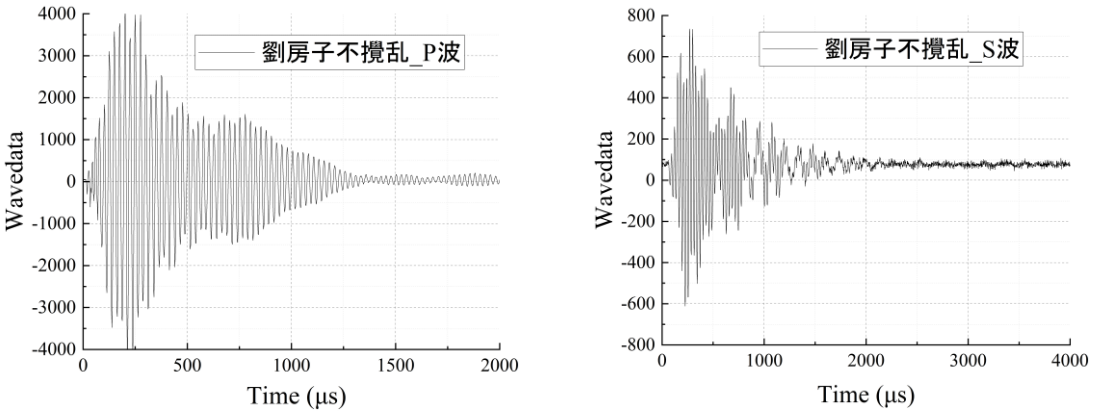


図 4-33　劉房子産原鉱石不攪乱試料の P 波（左）と S 波（右）計測データ

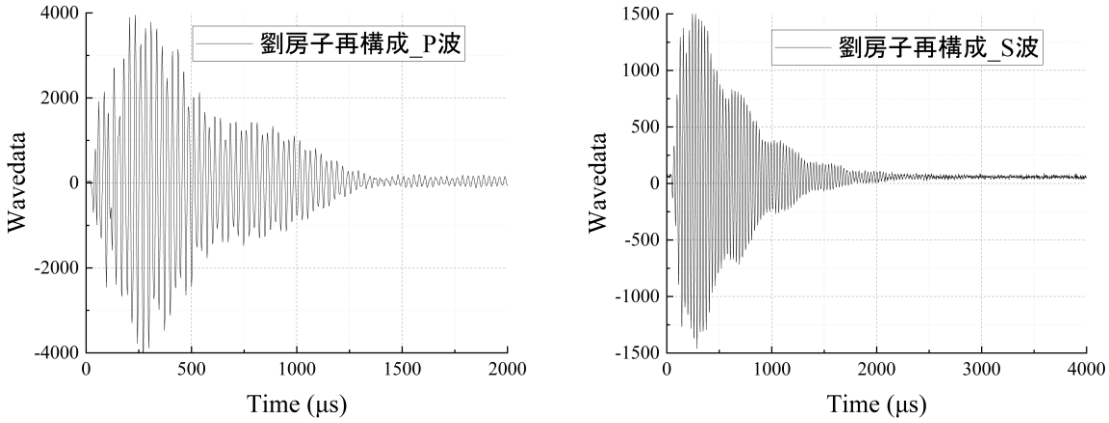


図 4-34　劉房子産原鉱石不攪乱試料の P 波（左）と S 波（右）計測データ

表 4-5　弾性波試験結果（劉房子産原鉱石）

	1 回目	2 回目
不攪乱 V_p (m/s)	2613	2613
不攪乱 V_s (m/s)	663	663
再構成 V_p (m/s)	1271	1386
再構成 V_s (m/s)	558	633

これより、不攪乱試料の方が P 波速度・S 波速度ともに再構成試料に比べて速く、他の原鉱石と同様の傾向にあることが分かる。

図 4-35 に Ten Sleep 産・劉房子産原鉱石の結果と月布産原鉱石およびクニゲル V1 の測定結果を比較した、乾燥密度・湿潤密度・飽和度と P 波速度・S 波速度の関係を示す。これより、乾燥密度については P 波速度との相関性が低いのに対し S 波速度との相関性が高いことが分かる。逆に湿潤密度については P 波速度との相関性が高く、S 波速度との相関性が低いことが確認され、P 波・S 波の特性をよく表した結果となった。飽和度に関しては、多少のバラつきがあるものの、P 波速度・S 波速度の両者とおおむね良好な相関性が確認された。モンモリロナイト含有率や含有鉱物組成の異なる試料を用いても良好な相関性がみられた今回の結果を踏まえると、地層処分において砂・ベントナイト混合土を締め固めて作製する緩衝材ブロックや埋戻し材ブロックの状態量（出来形）を非破壊で確認できる可能性が考えられる。これらのブロックでは、混合材料として砂あるいは現地の岩ズリ（掘削箇所等の違いにより鉱物組成等に差異があると思われる）を用いるが、混合材料の性質のバラつきを無視した評価ができると推察される。

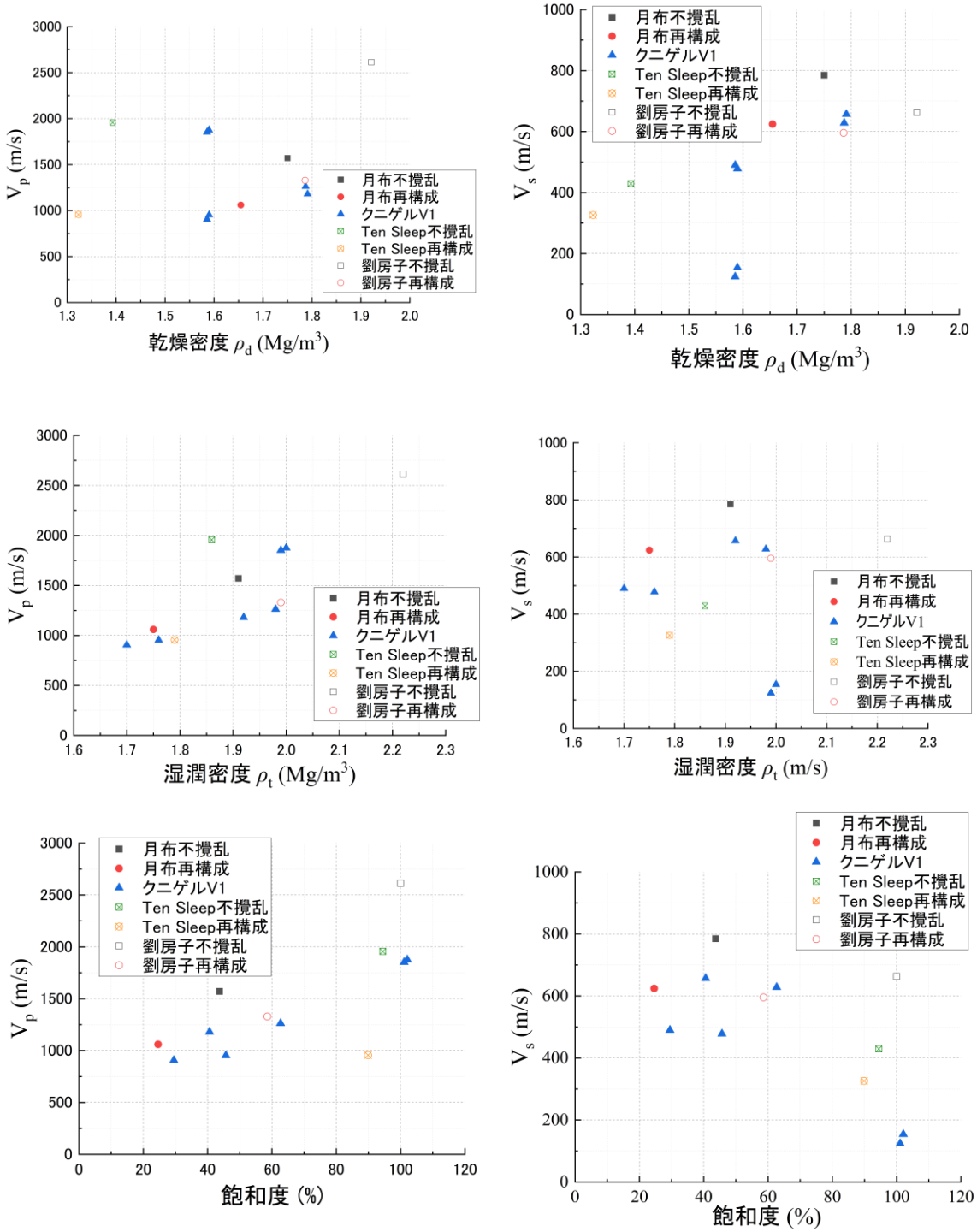


図 4-35　乾燥密度（上段）・湿潤密度（中段）・飽和度（下段）と P 波速度（左段）・S 波速度（右段）の関係（全試料）

4.2.5 薄片試料の偏光顕微鏡・SEM 観察および EDS 分析結果

本項では、月布産原鉱石・Ten Sleep 産および劉房子産原鉱石の偏光顕微鏡観察結果および SEM 観察・EDS 分析結果について述べる。

・月布産原鉱石

図 4-36 に偏光顕微鏡観察結果を示す。これより、不攪乱供試体では基質がモンモリロナイトで構成され、中に不定形な石英や斜長石、方解石や緑泥石等が確認された。再構成供試体においても同様の鉱物が確認されたが、一部の斜長石において表面の粘土化は確認され、斜長石の風化によりモンモリロナイトへの変質が進行したことが推察された。

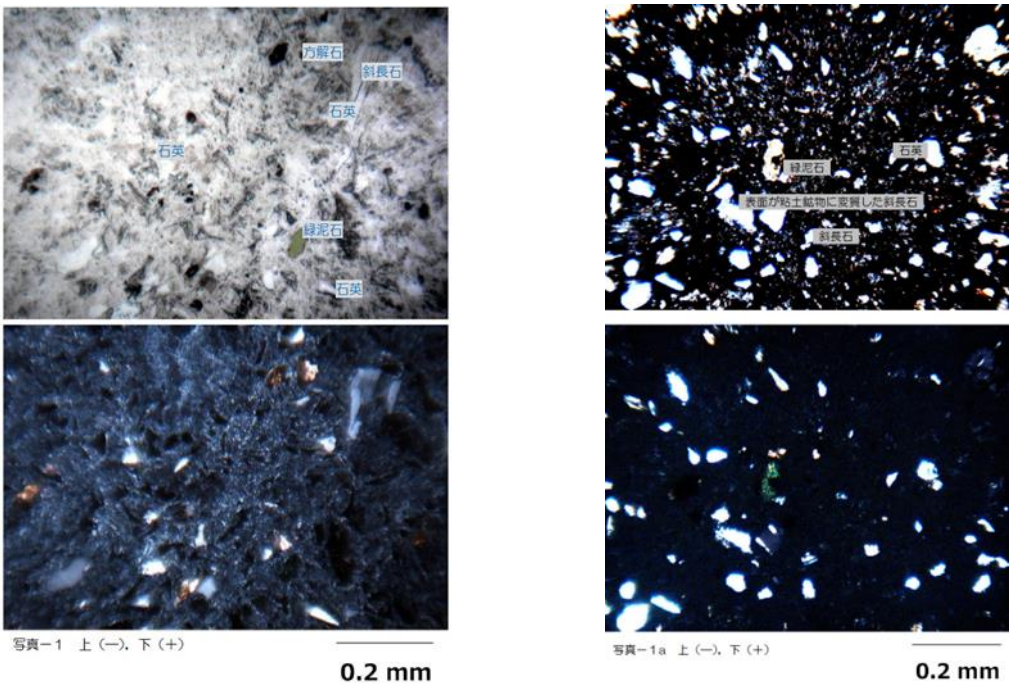
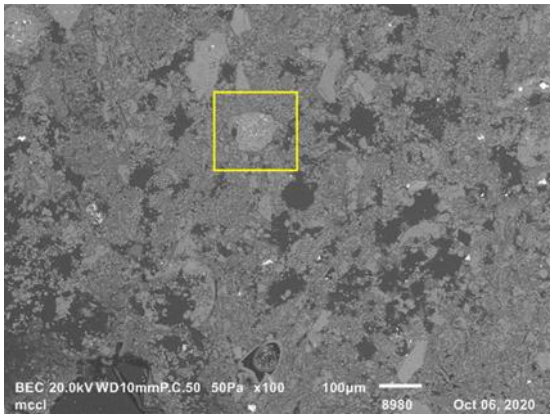
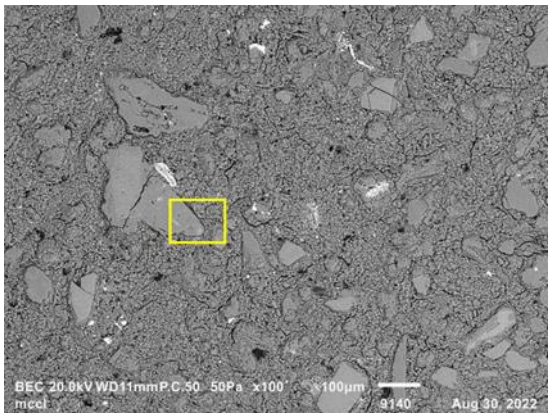


図 4-36　月布産原鉱石の偏光顕微鏡観察結果（左：不攪乱供試体、右：再構成供試体）

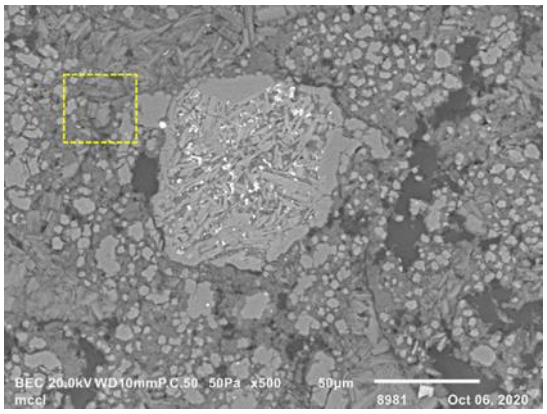
図 4-37 に不攪乱供試体、再構成供試体の SEM 観察結果を示す。なお、撮影倍率は各画像の下部に記載している。



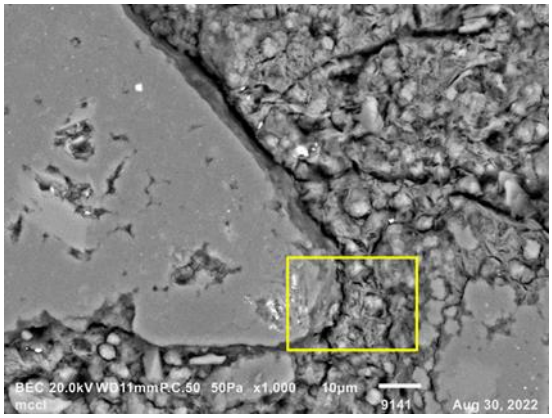
倍率：100 倍



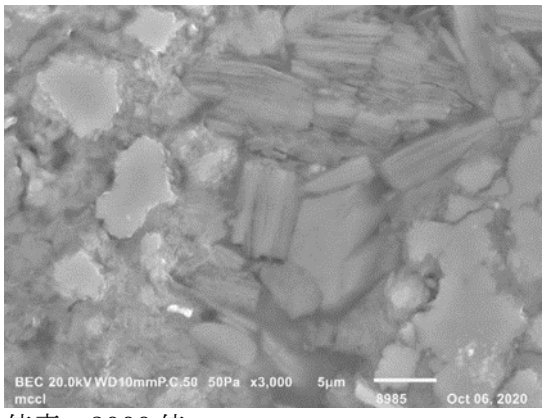
倍率：100 倍



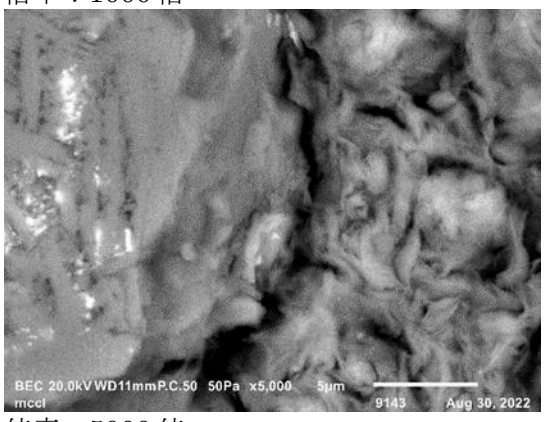
倍率：500 倍



倍率：1000 倍



倍率：3000 倍



倍率：5000 倍

図 4-37　月布産原鉱石の SEM 観察結果（左：不攪乱供試体、右：再構成供試体）

これより、不攪乱供試体の方が粗粒鉱物間の間隙がモンモリロナイト等により充填されていることが分かる。再構成供試体では一度粉砕を経ているため、全体的に空隙が目立っている。また、高倍率の画像を見ると、再構成供試体ではモンモリロナイト粒子間の微細な空隙も視認できるのに対し、不攪乱供試体では靄がかかったように空隙が不明瞭になっている様子が見て取れる。このことから、不攪乱供試体ではマクロ・ミクロ両方の空隙が

セメンテーションにより充填されているため、モンモリロナイトの吸水・膨潤が阻害されたものと推察される。

図 4-38 に不撹乱供試体の倍率 3000 倍の画像領域に対し、EDS 分析による元素マッピングを行った結果を示す。また、**図** 4-39 に再構成供試体の倍率 5000 倍の画像領域を対象として EDS 分析を行い、元素マッピングを行った結果を示す。

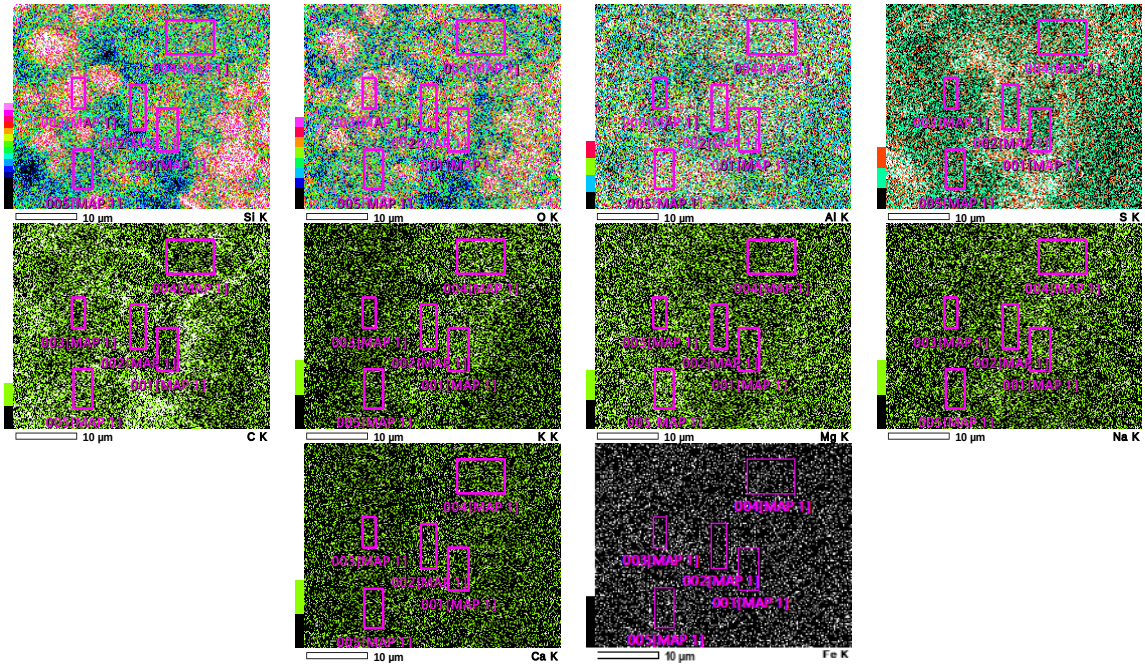


図 4-38　月布産原鉱石不撹乱供試体の EDS による元素マッピング結果

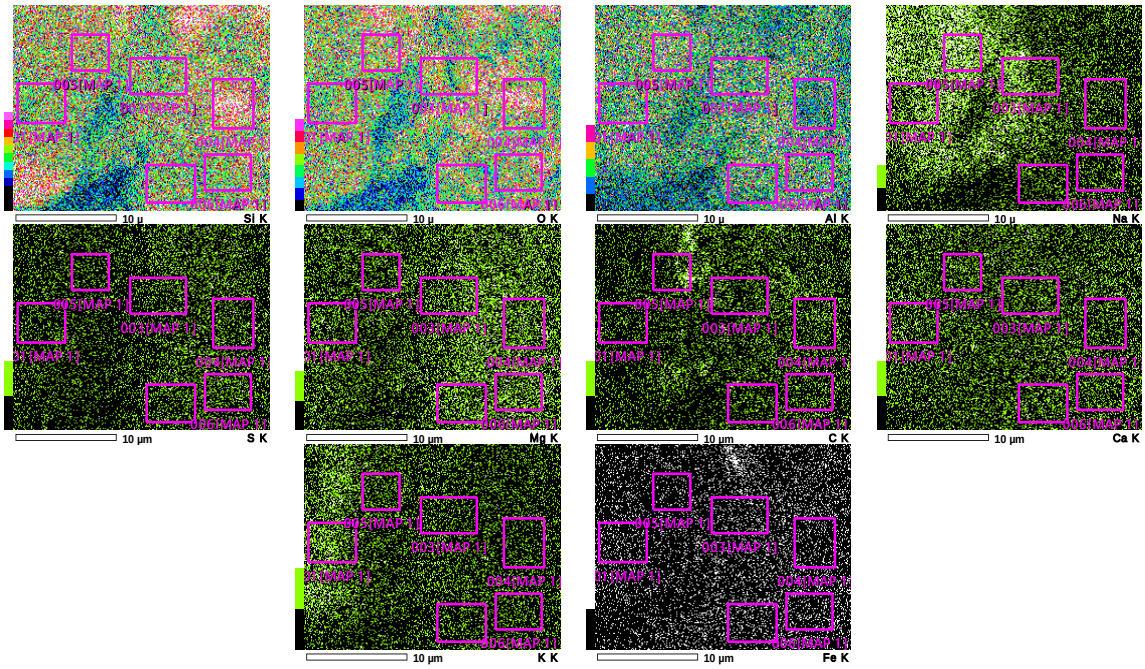


図 4-39　月布産原鉱石再構成供試体の EDS による元素マッピング結果

これらの結果から、画像領域全体において Si と O 元素の存在量が多いことが分かる。このことから、粗粒鉱物近傍などにも存在していることなどを踏まえると、原鉱石中の膠着物質としてシリカ系鉱物が有力であることが推察される。図 4-40 に元素マッピング結果を踏まえた、不攪乱供試体・再構成供試体の各画像領域における鉱物同定結果を示す。

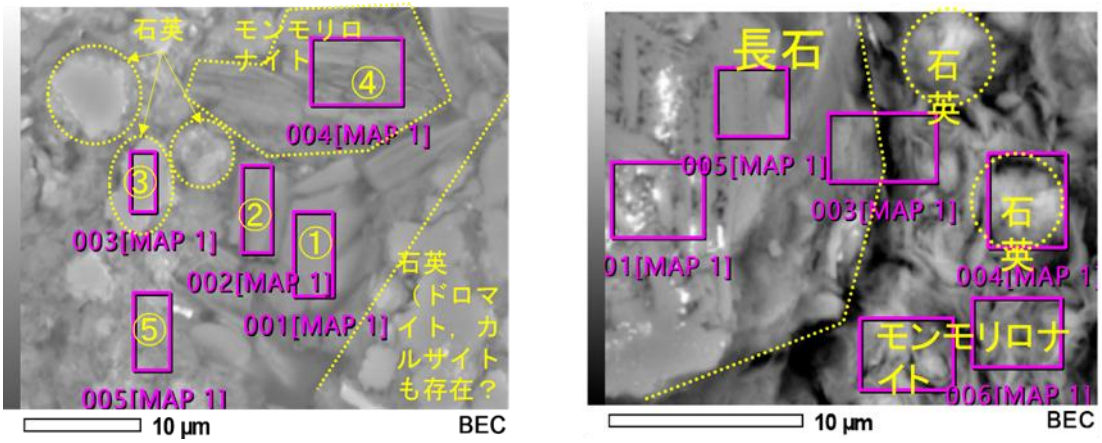


図 4-40　月布産原鉱石の鉱物同定結果（左：不攪乱供試体、右：再構成供試体）

・Ten Sleep 産原鉱石

図 4-41 に偏光顕微鏡観察結果を示す。不攪乱供試体では、基質を構成するモンモリロナイトの他に、不定形な石英や斜長石、炭酸塩鉱物、硫化鉱物およびクリストバライトが確認された。一部の斜長石は風化によりモンモリロナイトへ変質していることも確認された。再構成供試体においても同様の鉱物が確認された。月布産原鉱石や劉房子産原鉱石に比べ、確認できる鉱物のサイズが小さく、変質前岩石の構成鉱物が小さかった可能性や、変質が高温環境あるいは長期にわたって進んだ可能性が推察される。

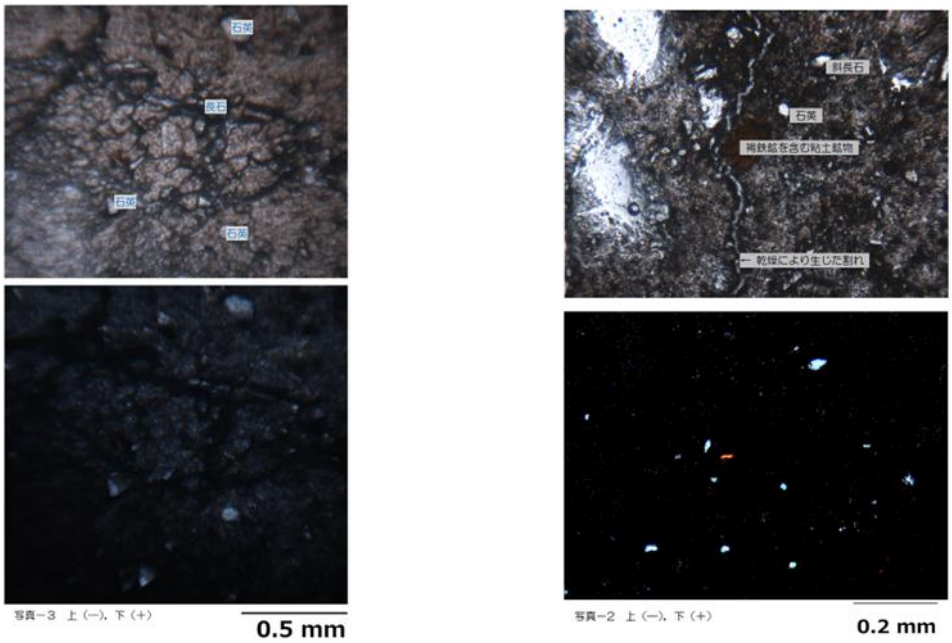
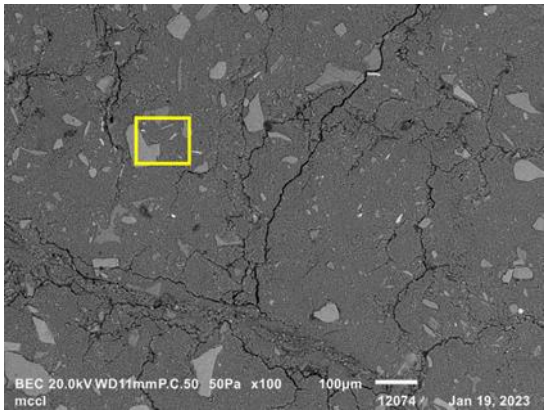
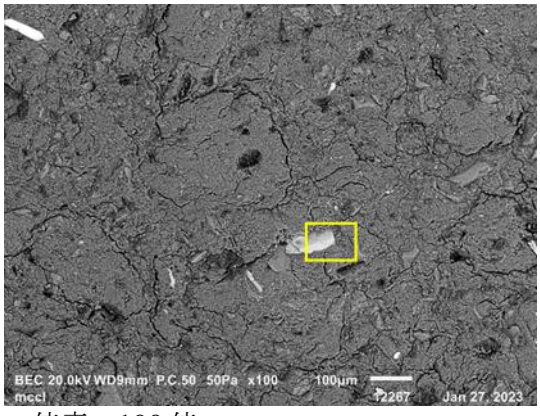


図 4-41　Ten Sleep 産原鉱石の偏光顕微鏡観察結果（左：不撹乱供試体、右：再構成供試体）

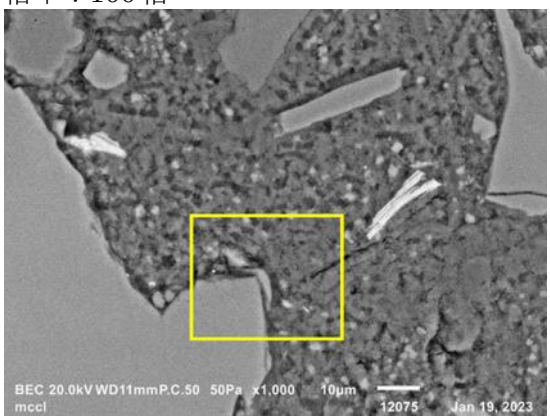
図 4-42 に不撹乱供試体と再構成供試体の SEM 観察結果を示す。各画像の下に撮影倍率を記載している。



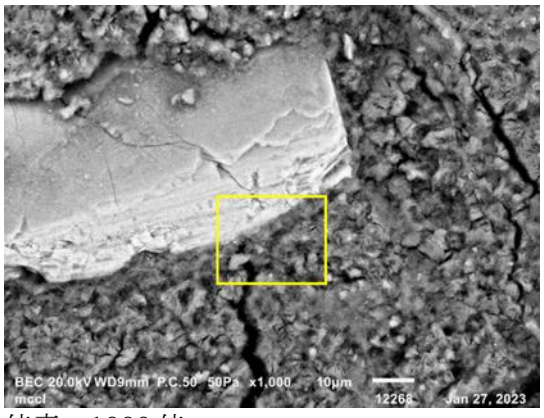
倍率：100 倍



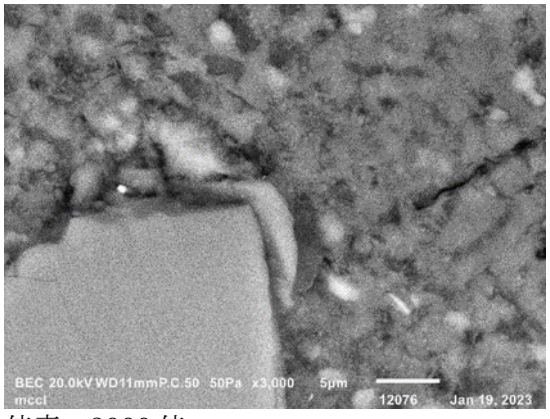
倍率：100 倍



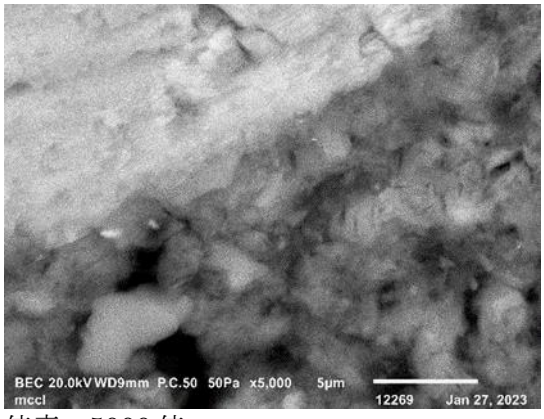
倍率：1000 倍



倍率：1000 倍



倍率：3000 倍



倍率：5000 倍

図 4-42　Ten Sleep 産原鉱石の SEM 観察結果（左：不撹乱供試体、右：再構成供試体）

これより、不撹乱供試体では間隙が小さいとともに、モンモリロナイト等により良く充填されている。再構成供試体では全体的に空隙が目立っている。また高倍率の画像では、月布産原鉱石と同様、再構成供試体ではモンモリロナイト粒子間の微小空隙も目立っており、不撹乱供試体ではマクロ・ミクロ両方の空隙がセメンテーションにより充填されているため、モンモリロナイトの吸水・膨潤が阻害されたものと推察される。

図 4-43 に不攪乱供試体の倍率 3000 倍の画像領域に対し、EDS 分析による元素マッピングを行った結果を示す。また、図 4-44 に再構成供試体の倍率 5000 倍の画像領域を対象として EDS 分析を行い、元素マッピングを行った結果を示す。

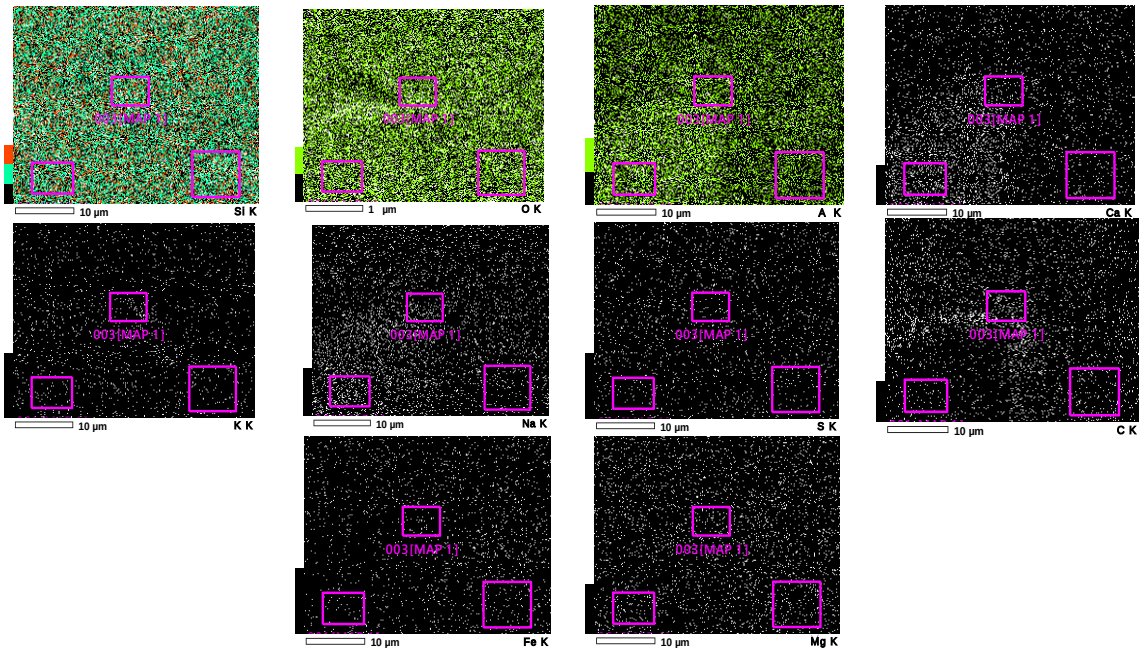


図 4-43　Ten Sleep 産原鉱石不攪乱供試体の EDS による元素マッピング結果

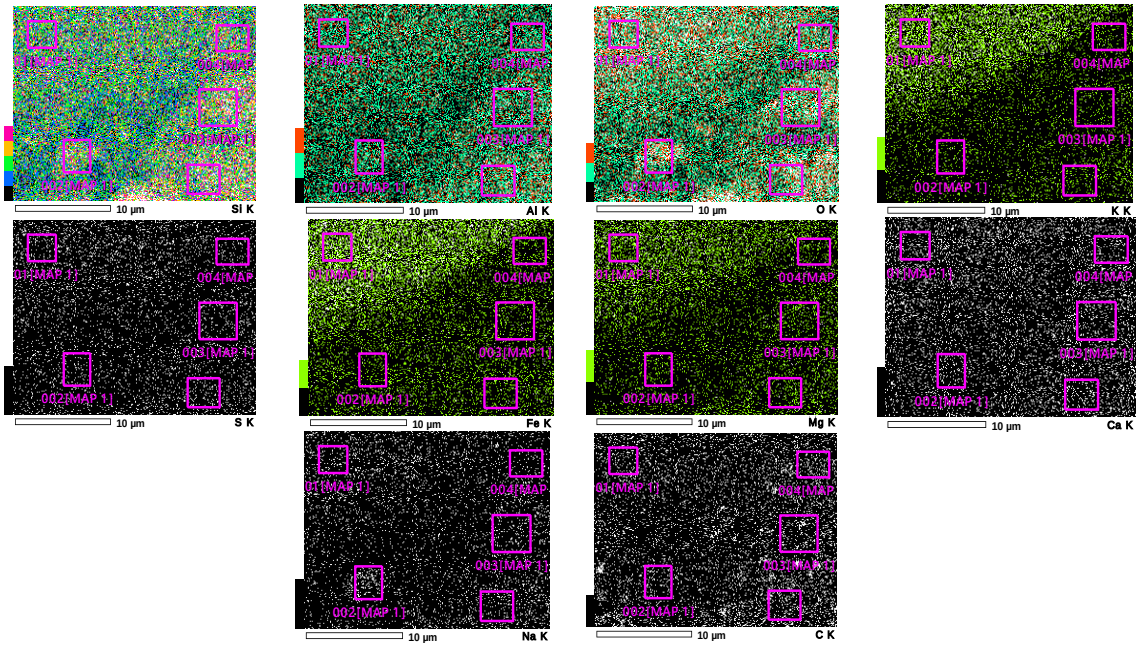


図 4-44　Ten Sleep 産原鉱石再構成供試体の EDS による元素マッピング結果

これらの結果から、画像領域全体において Si と O 元素の存在量が多いことが分かる。このことから、粗粒鉱物近傍などにも存在していることなどを踏まえると、原鉱石中の膠着物質としてシリカ系鉱物が有力であることが推察される。

・劉房子産原鉱石

図 4-45 に偏光顕微鏡観察結果を示す。不攪乱供試体では、基質を構成するモンモリロナイトの他に、不定形な石英や斜長石、炭酸塩鉱物が確認された。一部の斜長石は風化によりモンモリロナイトへ変質していることも確認された。再構成供試体においても同様の鉱物が確認され、斜長石のモンモリロナイトへの変質が確認された。月布産原鉱石に比べ確認できる鉱物のサイズが大きく、月布産原鉱石に比べると深部で生成・変質した火成岩であることが推察される。

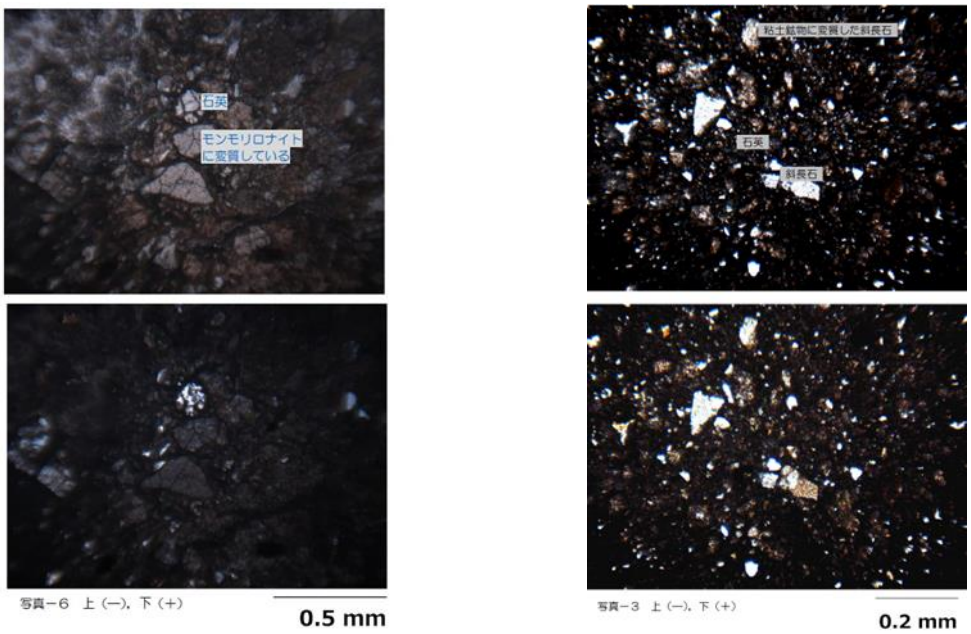
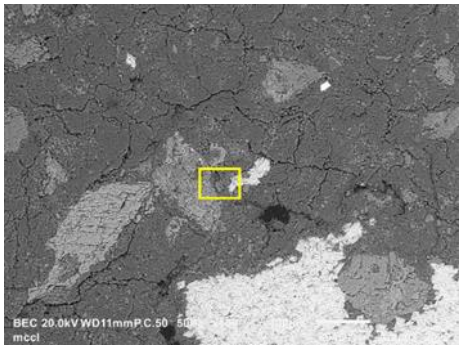
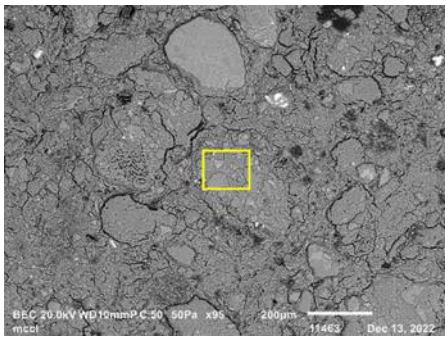
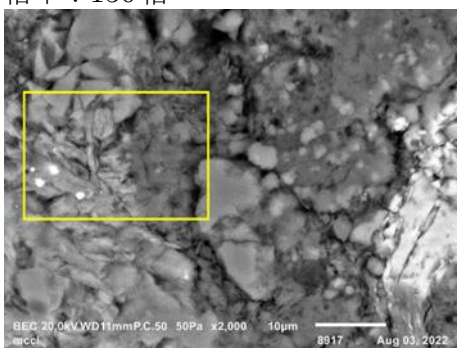


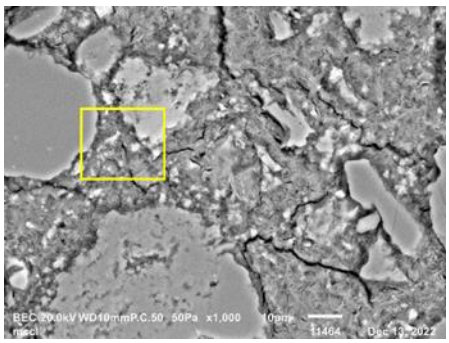
図 4-45　劉房子産原鉱石の偏光顕微鏡観察結果（左：不攪乱供試体、右：再構成供試体）

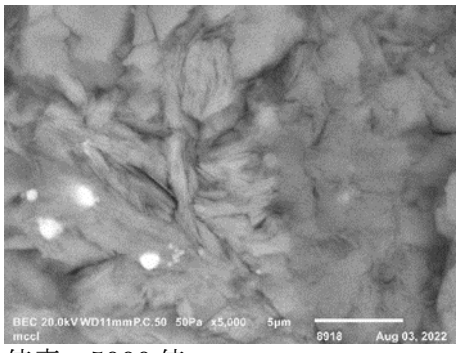
図 4-46 に不攪乱供試体と再構成供試体の SEM 観察結果を示す。各画像の下に撮影倍率を記載している。


倍率：150 倍


倍率：95 倍


倍率：2000 倍


倍率：1000 倍


倍率：5000 倍

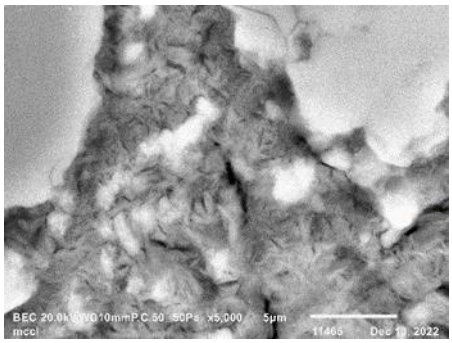

倍率：5000 倍

図 4-46　劉房子産原鉱石の SEM 観察結果（左：不攪乱供試体、右：再構成供試体）

これより、劉房子産原鉱石においても月布産と同様、再構成供試体において粗粒鉱物間の間隙やモンモリロナイト粒子間のミクロな間隙が目立つのに対し、不攪乱供試体では鉱物間の境界が不明瞭になっていることが分かる。

図 4-47 に不攪乱供試体の倍率 5000 倍での撮影範囲の EDS による元素マッピング結果を、**図** 4-48 再構成供試体の倍率 5000 倍での撮影範囲の元素マッピング結果をそれぞれ示す。

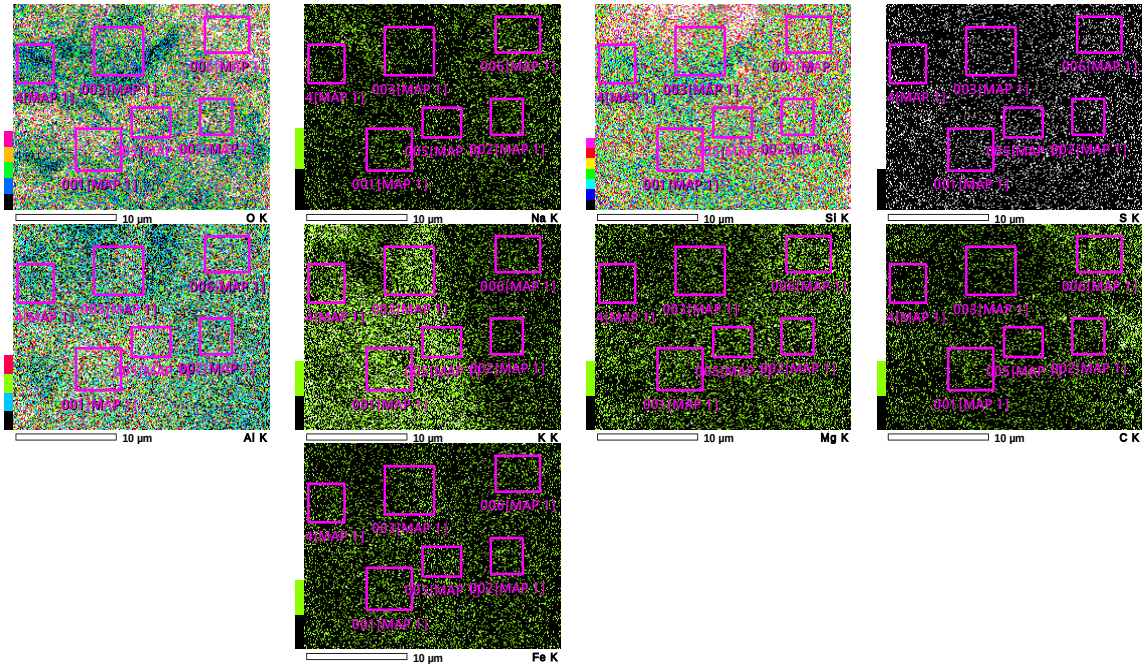


図 4-47　劉房子産原鉱石不撹乱供試体の EDS による元素マッピング結果

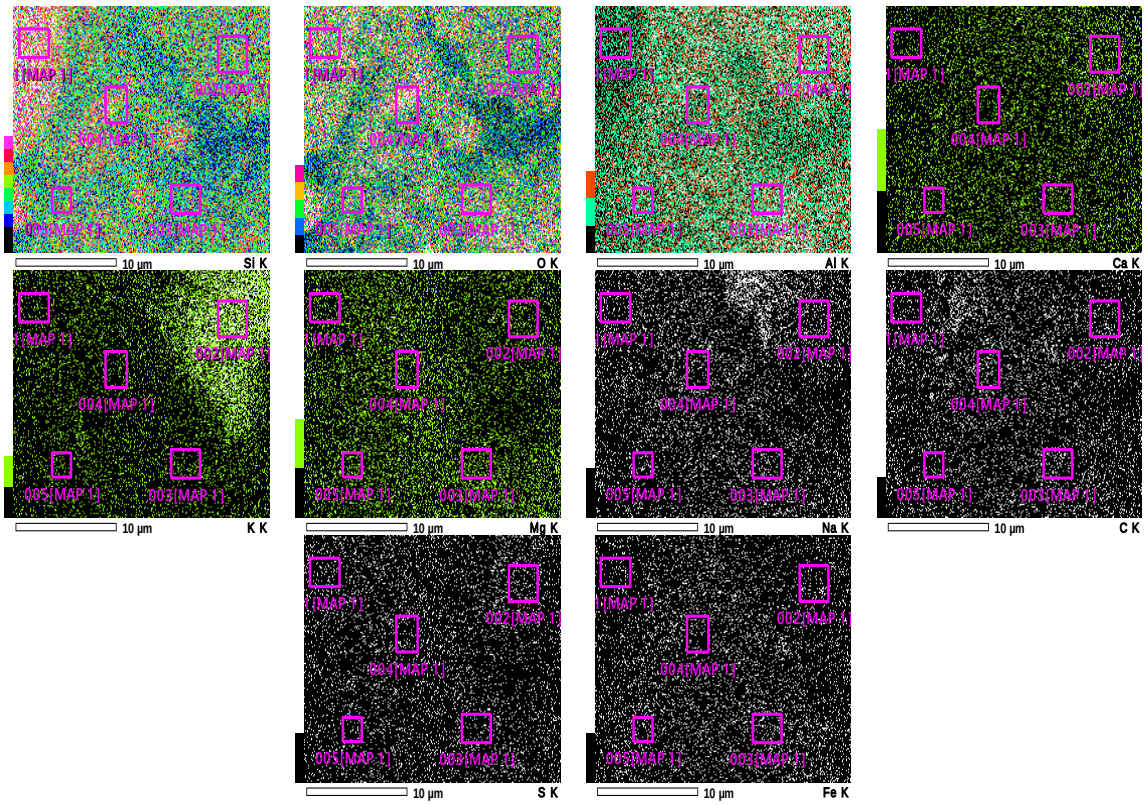


図 4-48　劉房子産原鉱石再構成供試体の EDS による元素マッピング結果

これらから、月布産原鉱石と同様、劉房子産原鉱石においても Si と O 元素が全体的に多く存在していることが分かる。このことから、劉房子産原鉱石においても、膠着物質としてシリカ系鉱物が有力であると推察される。

4.2.6 膠結作用に伴う特性低下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

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** 4-49 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) [31)]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 11 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。

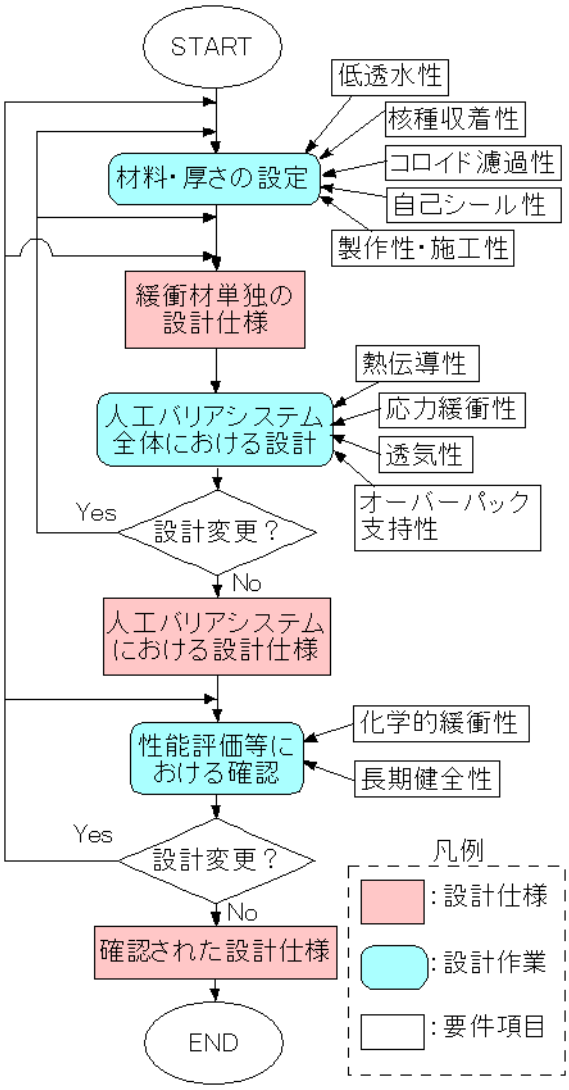


図 4-49　緩衝材の設計フローの一例 [3)]

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 [32)]。**図 4-50** 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 [33)]。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。

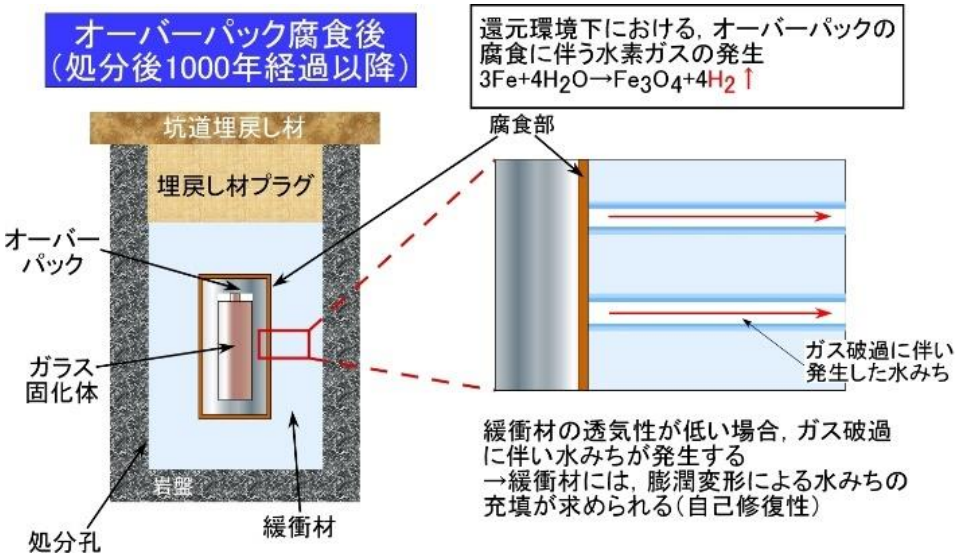


図 4-50　オーバーパックの腐食に伴う水素ガスの発生・破過に関する概念図

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 4-51～図 4-53** 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。

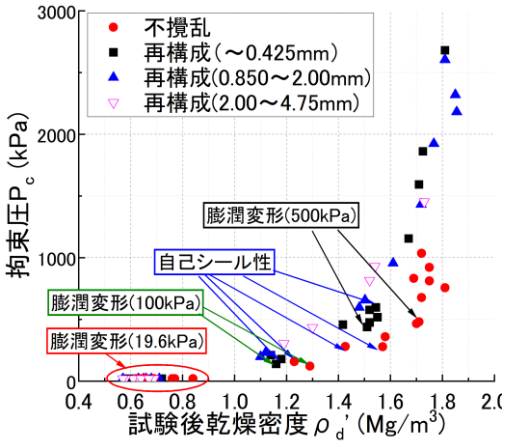


図 4-51　月布産原鉱石の拘束圧－試験終了時乾燥密度関係

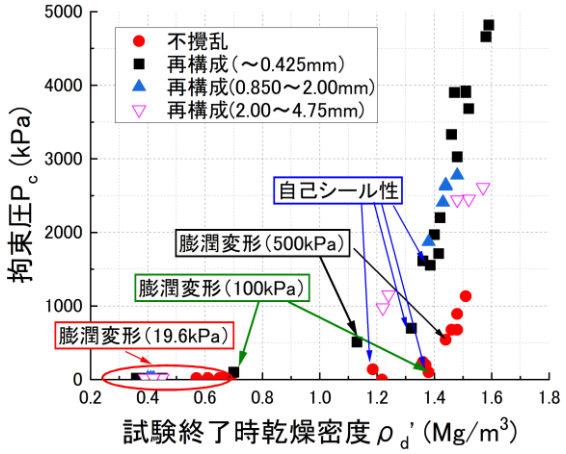


図 4-52　Ten Sleep 産原鉱石の拘束圧－試験終了時乾燥密度関係

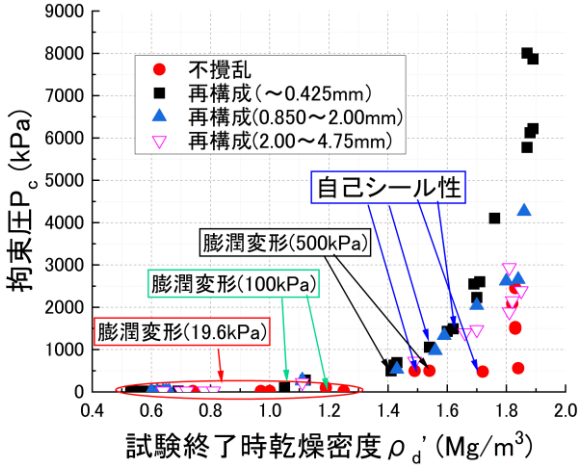


図 4-53　劉房子産原鉱石の拘束圧－試験終了時乾燥密度関係

また、図 4-54～図 4-56 に、図 4-51～図 4-53 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[34]において明らかにされているためである。

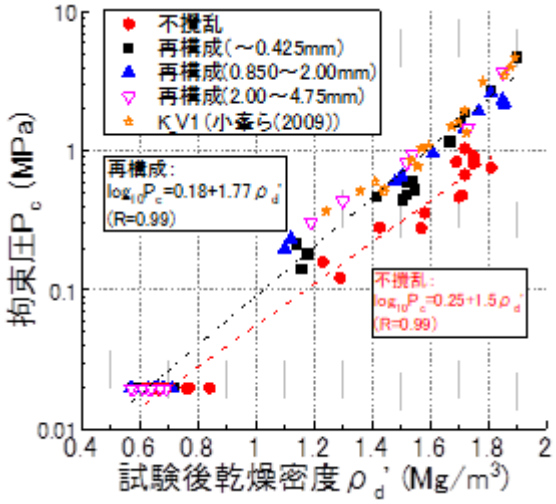


図 4-54　月布産原鉱石の拘束圧（対数軸）と試験後乾燥密度の関係

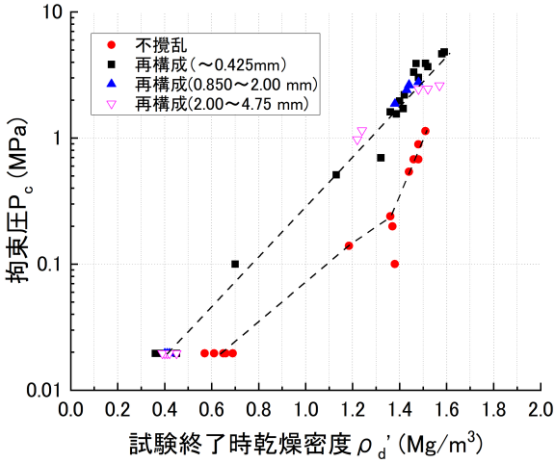


図 4-55　Ten Sleep 産原鉱石の拘束圧（対数軸）と試験後乾燥密度の関係

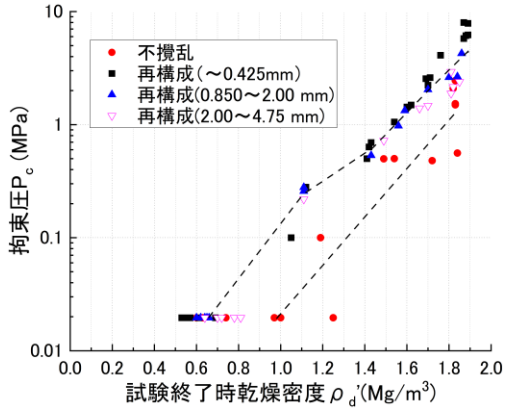


図 4-56　劉房子産原鉱石の拘束圧（対数軸）と試験後乾燥密度の関係

図 4-54 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[35]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、および不攪乱供試体における、P_c 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** 4-54～**図** 4-56 中に示している、再構成供試体と不攪乱供試体のプロットに関する近似折れ線を見ると、月布産原鉱石に比べて、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、原鉱石中の膨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、緩衝材が膨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、緩衝材中の膨結作用の進行に伴う膨潤特性の低下の一連の経時変化を、図を用いながら説明する。一例として、緩衝材が**図** 4-57 のような経時に伴う状態変化をたどると想定した場合に、緩衝材の乾燥密度―拘束圧の関係に基づいた自己修復性の設計に関して、月布産原鉱石の試験終了時乾燥密度－拘束圧関係（図 4-54）を用いた概念図を**図** 4-58 として示す。

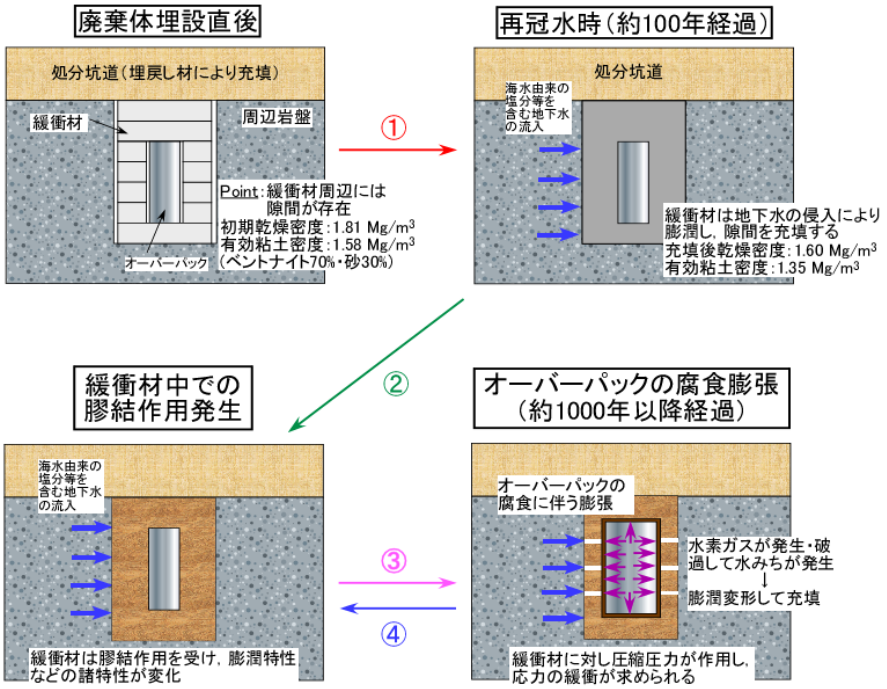


図 4-57　想定される緩衝材の経時的な状態変化

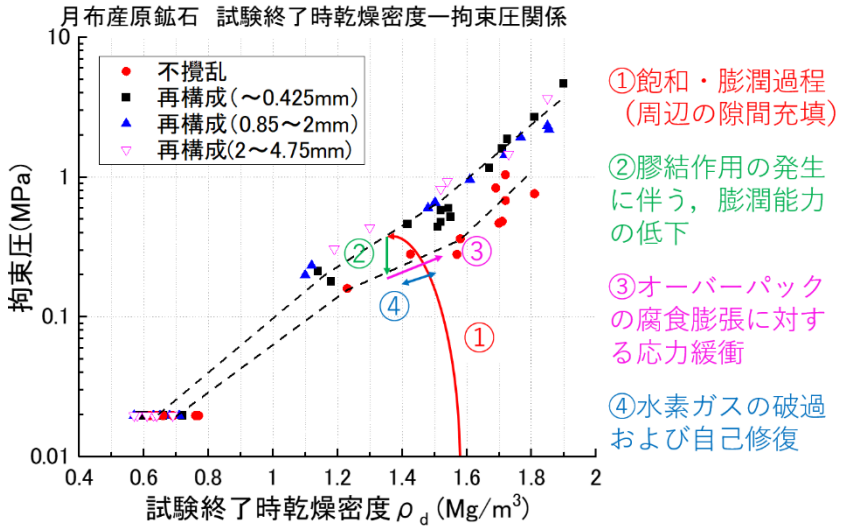


図 4-58　緩衝材の経時的な状態変化に伴う乾燥密度 - 拘束圧関係の変化概念図

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 32)に依れば、初期乾燥密度は 1.81 Mg/m³ 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/m³ 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),32)]（図 4-58 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。

5. まとめ

本研究で得られた成果について、以下に示す。

1) 2021 年度より導入した白崎産・細越産・黒石産の 3 種類の原鉱石について、不攪乱供試体と再構成供試体を作製し膨潤圧・膨潤変形特性を評価した。その結果、3 種類の原鉱石において、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。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。

2) 原鉱石の固結の程度を表す指標として、地質年代に代わる代替指標を探索するため、月布産・Ten Sleep 産・劉房子産原鉱石を対象として、エコーチップ試験、弾性波試験といった非破壊力学試験を実施した。エコーチップ試験においては不攪乱供試体の硬度が高いことを示す結果が得られ、膠結作用による粒子・鉱物構造の強化を表していることが分かった。一方で、原鉱石間の値や不攪乱・再構成試料間の差異を比較すると、地質年代との相関性は見られなかった。弾性波試験についても、P 波・S 波速度のいずれも不攪乱供試体の方が速く、不攪乱供試体の内部構造が緻密であることを示す結果が得られた。供試体の状態量と弾性波速度の関係を模索したところ、飽和度に高い相関性を示すことが示唆された。

3) 原鉱石の膠結作用メカニズムを解明するため、月布産・Ten Sleep 産・劉房子産原鉱石の不攪乱供試体・再構成供試体から薄片試料を作製し、SEM 観察と EDS 分析を実施した。その結果、粒子・鉱物構造として不攪乱供試体の方がミクロ・マクロの両方の視点で見て緻密であることが示された。また、EDS 分析による元素マッピングを行ったところ、膠着物質としてシリカ系鉱物が有力であることが示唆された。

4) 月布産・Ten Sleep 産・劉房子産原鉱石について、様々な拘束条件で実施した膨潤特性実験結果に基づき拘束圧－乾燥密度関係を整理し、緩衝材の状態変化シナリオと組み合わせることで、膠結作用に伴う特性低下を考慮した緩衝材の自己修復性評価手法を提案した。

参考文献

1) 社団法人土木学会、エネルギー土木委員会、新エネルギー技術小委員会：土木技術者のための高レベル放射性廃棄物地層処分の現状と技術的課題 pp.26-27、1990.

2) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性、－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－、分冊 2　地層処分の工学技術、JNC TN1400 99-022、p.Ⅳ-69、1999.

3) 緒方信英、小崎明郎、植田浩義、朝野英一、高尾肇：高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術、－その 4　人工バリアの設計と製作－、原子力バックエンド研究、Vol.5、No.2、pp.103-121、1999.

4) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構：日本原子力研究開発機構（JAEA）における地層処分技術に関する研究開発の現状について、地層処分研究開発調整会議（第 1 回会合）資料 2-2（平成 29 年 5 月 31 日）、https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/chisou_shobun_chousei/pdf/001_02_02.pdf、p.29、2017.（2019 年 5 月 25 日アクセス）

5) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性、－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－、分冊 3 地層処分システムの安全評価、JNC TN1400 99-023、p.Ⅳ-44、1999.

6) 例えば、核燃料サイクル開発機構東海事業所：アルカリ性水溶液中で変質させたベントナイトの膨潤試験（試験報告）、JNC TN8430、2005-003、pp.1-47、2005.

7) 例えば、三好悟、木村志照、森上慎也、甚野智子、山本修一： 放射性廃棄物処分におけるベントナイト層の長期性能に関する研究、大林組技術研究所報 No.77、pp.1-10、2013.

8) 西本壮志、岡田哲実、澤田昌孝：高レベル放射性廃棄物処分場ニアフィールド模型を用いた遠心力載荷装置による長期挙動評価試験、第 41 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、公益社団法人土木学会、pp.173-178、2012.

9) 鹿園直建：放射性廃棄物の地層処分に対するシミュレーション研究とナチュラルアナログ研究の意義、地質ニュース 499 号、pp.13-22、1996.

10) Alezander, R., W., Reijonen, H., M., McKinley, I., G.: Natural analogues: studies of geological processes relevant to radioactive waste disposal in deep geological

repositories，Swiss Journal of Geosciences, 108，pp.75-100，2015.

11) 寺田賢二、関根一郎、雨宮清、伊藤雅和：中国産ベントナイトの利用可能性調査報告書、原環センター技術報告書 RWMC-TRJ-10002、pp.57-62、2011.

12) 伊藤雅和、石井卓、中島均、平田征弥：ベントナイトの成因・生成環境に関する一考察、粘土科学第 38 巻第 3 号、pp.181-187、1999.

13) 関根一郎、伊藤雅和、山本卓也、雨宮清、佐藤泰、寺田賢二：海外産ベントナイトの特徴と放射性廃棄物処分への適用可能性調査、土木学会第 63 回年次学術講演会、CS05-23、pp.213-214、2008.

14) 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) 野中英、湯浅昇、三谷和裕、金森誠治：エコーチップを用いたコンクリートの圧縮強度推定試験方法の提案、日本建築学会技術報告集、第 23 巻、第 54 号、pp.397-402、2017.6.

20) 村宮諒哉、吉田秀典、巽隆有：エコーチップ硬度試験による岩質材料の力学的特性の簡易評価に関する研究、土木学会論文集 A2(応用力学)、Vol.67、No.2、pp. I _405- I _416、2011.

21) 佐藤昌人、八反地剛、若狭幸：塩類風化に関する一実験―風化による強度低下と岩石物性―、筑波大学陸域環境研究センター報告、No.12、pp.21-29、2011.

22) 川﨑了、吉田昌登、谷本親伯、舛屋直：簡易反発硬度試験による岩質材料の物性評価手法の開発―試験条件の影響と基本特性に関する調査―、応用地質、第 41 巻、第 4

号、pp.230-241、2000.

23) 青木久、松倉公憲：エコーチップ硬さ試験機の紹介とその反発値と一軸圧縮強度との関係に関する一考察、地形、第 25 巻、第 3 号、pp.267-276、2004.

24) 阿南修司：反発硬度試験の岩石材料への適用、 日本応用地質学会中国四国支部研究発表会発表論文集、pp.15-18、1997.

25) 日本物理探鑛株式会社：弾性波探査の概説、1996.

26) 山下浩之：岩石薄片を簡単につくり観察する、自然科学のとびら、第 25 巻 1 号、2019.

27) 早稲田大学教育・総合科学学術院薄片室：薄片製作のテキスト、2019.

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

29) 川崎了、谷本親伯、小泉和広、石川正基：エコーチップ硬さ試験機による岩石の力学特性推定の試み、応用地質、43(4)、244-248、2002.

30) 核燃料サイクル開発機構東海事業所：緩衝材の動的力学特性、JNC TN8400 99-042、p.48、1999.

31) 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.

32) 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.

33) 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.

34) 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.

35) 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.

2022 年度　外部発表

【学術論文】

1. 伊藤大知、王海龍、小峯秀雄：地層処分におけるベントナイト系緩衝材の膠結作用に伴う超長期的劣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、pp.6-11、2022.4. (査読付)
2. Daichi Ito, Hailong Wang, Hideo Komine: Evaluation proposal of self-healing capability of bentonite buffer material altered by long-term cementation, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE) (論文準備中)
3. Hailong Wang, Yuka Yamamoto, Hiroyuki Kyokawa, Daichi Ito, Hideo Komine: Water and solid movements in unsaturated bentonite with constrained, limited and free swelling conditions, Soils and Foundations (論文準備中)

【口頭発表】

1. Daichi Ito and Hideo Komine: Experimental study to elucidate cementation effect on swelling pressure and montmorillonite basal spacing of bentonite ore, Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol.2, pp.3803-3808, 2022.5. (査読付国際会議、日本代表論文)
2. Daichi Ito, Hailong Wang, Hideo Komine: Experimental study of aging-induced cementation effect on permeability property of bentonites, EUROCK2022 (Rock and Fracture Mechanics in Rock Engineering and Mining), 2022.9. (査読付国際会議)
3. Daichi Ito and Hideo Komine: Cementation effect on swelling and permeability properties of bentonite considering microscopic structural evaluation, Proceedings of the 17th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023.8. (査読付国際会議、日本代表論文、採択済み)

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） 4
3. 2021 年度の成果概要 6
4. 2022 年度研究実施内容 9
4.1 2022 年度の計画、実施方法 9
4.1.1 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 9
4.1.2 ベントナイト試料の岩石亀裂充填性のモデル化の改良 12
4.1.3 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 17
4.2 2022 年度の成果内容 21
4.2.1 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 21
4.2.2 ベントナイト試料の岩石亀裂充填性のモデル化の改良 29
4.2.3 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 35
5. まとめ 40

参考文献

2022 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 1-1 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)-33)]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。

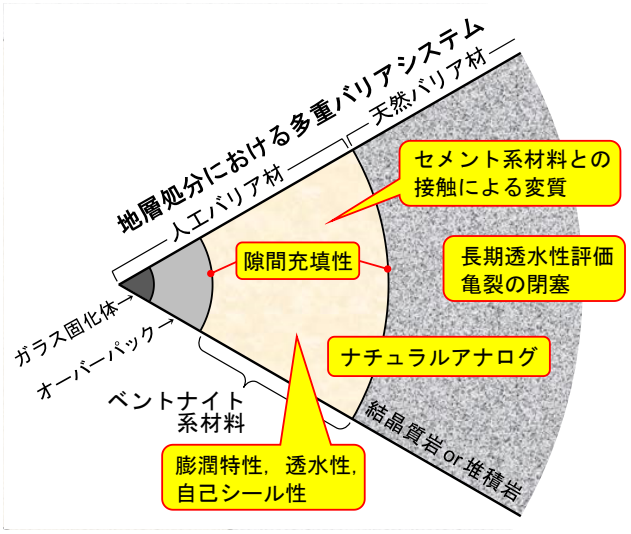


図 1-1　地層処分における人工バリア材および天然バリア材に関する研究動向

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 [34)-36)]、微細鉱物で充填された亀裂を含む岩石の透水性評価 [37)]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、掘削影響領域（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),33)]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 1-2）。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 [35),36)]。

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。

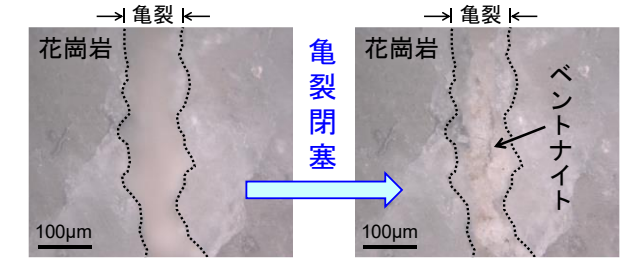


図 1-2　花崗岩中の亀裂のベントナイトによる閉塞の様子（予備実験）

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評価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 年度の成果概要

2021 年度は、まず、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った。そして、設定した条件下において、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通りである。

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）の設定のための検討では、本研究と特に関連深い文献（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）[38)-46)]と地層処分研究開発第 2 次取りまとめ [47)]、さらに、NUMO 包括的技術報告 [48)]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（= 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）供試体の締固め密度（= 1.8 Mg/m^3 or 1.5 Mg/m^3）、初期含水比（= 0%）等を設定した。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、処分場閉鎖後に地下水として懸念される次の 4 種の溶液（KOH 水溶液、$Ca(OH)_2$ 水溶液、NaOH 水溶液、$MgCl_2$ 水溶液）について重点的の検討することとした。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。

ベントナイト試料の膨潤・充填性同時試験では、まず、透明の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と亀裂への侵入距離を同時に計測することが可能で、かつ、ベントナイトの侵入距離の観察が可能なオリジナル装置を製作した。本装置は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。試験は 180 日間（7 月 31 日～1 月 26 日）連続で実施し、上方からの写真撮影により、亀裂に充填されるベントナイトの侵入距離を約 1 週間間隔で測定し、同時に鉛直方向に発生する荷重を 1 分間隔で測定した。試験結果から、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みなして解析モデルに組み込むことを考えた。すなわち、閉口亀裂中のベントナイトの膨潤を亀裂へ侵入したベントナイトが水分を含む封入流体を吸収および封入流体がベントナイト内に拡散することにより生じるベントナイトの体積膨張であると定義した。さらに、ベントナイトの封入流体の吸収・拡散を考慮した閉口流路内の流体侵入に関する簡易的な支配方程式を構築し、支配方程式の解を近似する数値解を導出した。導出した数値解を適用した解析の結果より、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の把握、亀裂中のベントナイトの侵入特性に関する考察を行った。外部膨潤圧が大きい条件では、侵入流体の侵入速度が上昇することを確認した。これは、外部膨潤圧が大きい程、流路内の流体侵入に関する駆動力が大きくなるため、侵入流体の侵入速度が上昇したと考えられる。流路幅が小さい条件では、侵入流体の侵入速度が低下することを確認した。これは、流路幅が小さい程、侵入流体に作用する粘性摩擦抵抗が大きくなるため、侵入速度が低下したと考えられる。封入流体の拡散係数が大きい条件では、侵入流体が早期に流路を満たすことを確認した。これは、封入流体の拡散係数が大きい程、侵入流体の見かけの体積膨張に起因する流体侵入における侵入速度が上昇するため、侵入流体が早期に流路を満たしたと考えられる。流体侵入初期における流体侵入は外部膨潤圧と粘性抵抗力に依存し、時間が十分に経過した後は侵入流体の封入流体吸収・拡散に起因する流体侵入が支配的になることを示した。以上より、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。

4. 2022 年度研究実施内容

4.1 2022 年度の計画、実施方法

2 章で述べたように、2022 年度は表 4-1 の工程で(5)～(7)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(6)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 4-1　2022 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
(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	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→		
(6) ベントナイト試料の岩石き裂充填性のモデル化の改良						→	→	→	→	→	→	
(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	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	
2022年度報告書（総括）作成									→	→	→	→

4.1.1 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継続して実施し、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 4-1 に示す。本試験は恒温室（22±1°C）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 d_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（1.5 mm）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 d_e は、図 4-2 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（2022 年度は 1 mol/L の NaCl 水溶液、0.6 mol/L の NaCl 水溶液、幌延地下水）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。2021 年度と同様に、計測期間は 180 日間（7 月 14 日～1 月 10 日）とした。

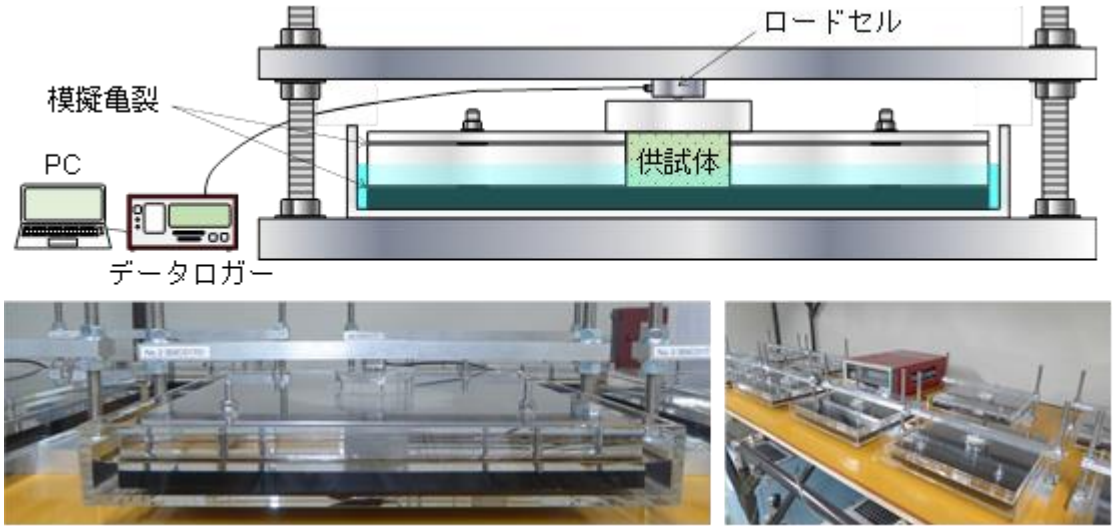


図 4-1　ベントナイトの膨潤・充填性同時試験装置の概略図および写真

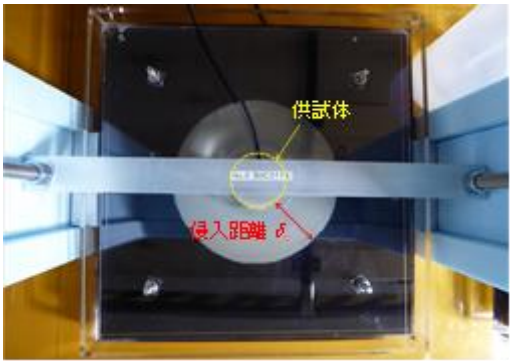


図 4-2　ベントナイトの亀裂への侵入距離 de

供試体は、直径 50 mm、高さ 27 mm の円柱で、所定の乾燥密度（1.5 Mg/m^3）になるように静的に締固めて作製した（図 4-3）。

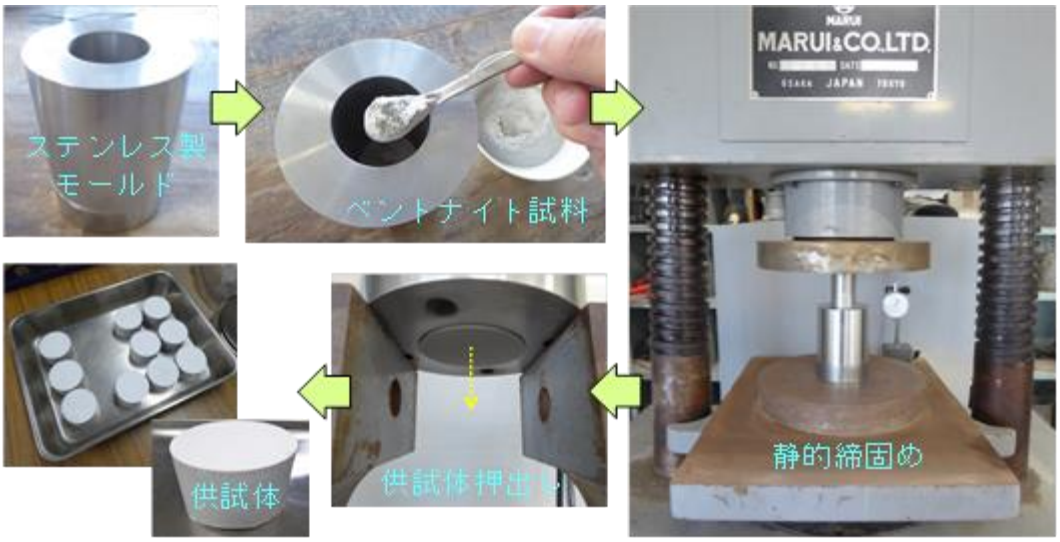


図 4-3　ベントナイト供試体の作成方法

(2) 透水試験

透水試験は、2021 年度と同様に、定水位型透水試験法で実施した。さらに、2022 年度は変水位型透水試験法を併用した。なお、いずれの試験法でもほぼ同じ透水係数が得られることを事前に確認している。

ベントナイト試料の定水位型透水試験法 試験装置の概略図を図 4-4 に示す。本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、本試験装置は既報 [34-36] 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）[34]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。

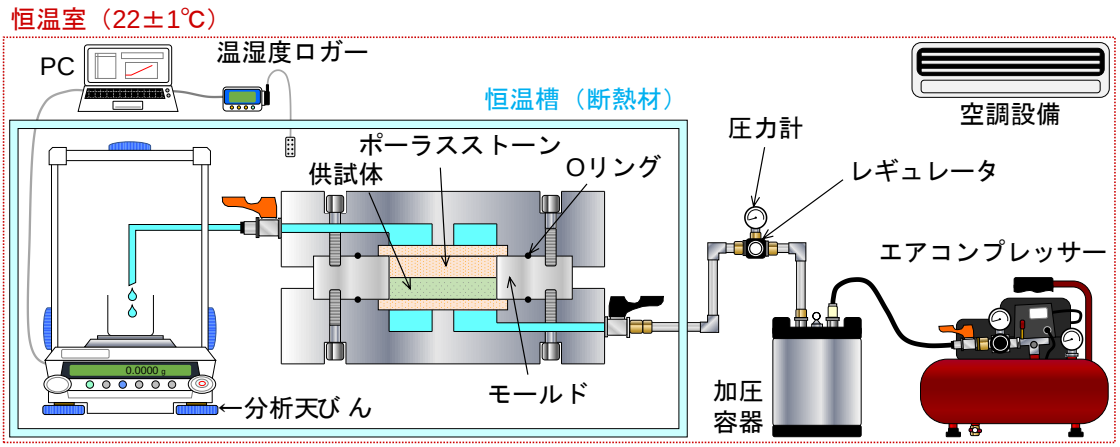


図 4-4　ベントナイトの透水試験の概略図

変水位型透水試験法 装置は JIS A 1218 に準ずる（ビュレット管、透水円筒、越流水槽から構成）ものであるが、透水円筒にはアクリル部材を用いた。また、ビュレット管内の水位と越流水槽の水位差が 3 m 程度になるように製作した。供試体は、直径 50 mm、高さ 5 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）内にて実施した。透水係数 k は Darcy 則が成立すると仮定して式(3)を用いて算出した。

$$k = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} \tag{3}$$

ここで、a はビュレット管断面積、L は供試体高さ、t_2 □ t_1：測定時間、h_1：時刻 t_1 における水位差、h_2：時刻 t_2 における水位差である。

4.1.2 ベントナイト試料の岩石亀裂充填性のモデル化の改良

変動外部膨潤圧作用下における変動粘性特性を有する緩衝材（ベントナイト系材料）の亀裂への侵入量を予測する解析モデル（以下、改良解析モデル）の構築を行う。改良解析モデルの構築には、2021 年度に提案した一定外部膨潤圧作用下における一定粘性特性を有する緩衝材の亀裂への侵入量予測に関する支配方程式を適用する。さらに、膨潤・充填性同時試験の結果を考慮し、経時変化する外部膨潤圧（変動外部膨潤圧）と緩衝材の粘度（変動粘度）を定式化して、これらのパラメータを侵入量予測に関する支配方程式に組み込む

ことを試みる。

(1) 一定外部膨潤圧作用下における一定粘性特性を有する緩衝材の亀裂への侵入量予測

2021 年度の検討では、ベントナイトを高粘度の粘性流体と仮定し（以下、侵入流体）、先端が閉口した亀裂（以下、閉口流路）へ侵入する流体の挙動を対象とした簡易的な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、この環境帯の流体（以下、封入流体）により亀裂へ侵入したベントナイトが膨潤すると仮定した。さらに、閉口亀裂中のベントナイトの膨潤を、亀裂へ侵入したベントナイトが水分を含む封入流体を吸収、および封入流体がベントナイト内に拡散することにより生じるベントナイトの体積膨張であると定義した。次に 2021 年度の検討で構築した支配方程式について、2022 年度に関連する内容について概説する。

閉口流路内の流体侵入に関する概要を図 4-5 に示す。ここに、d_n は侵入流体の侵入長さ、a は流路幅（亀裂幅）、B は流路奥行き、L は流路長さである。また、解析対象範囲は、流路入口部から亀裂先端までの範囲である。閉口流路内を侵入する流体には、図 4-5 に示すように主に 3 つの力が作用すると考えられる。閉口流路へ侵入する流体には、駆動力として流路入口部に作用する流路外部のベントナイトの膨潤圧により引き起こされる力 F_s が作用する。また、ベントナイトを高粘度の粘性流体と仮定しているため、流路内壁面において侵入流体に摩擦抵抗が生じ、粘性抵抗力 F_v が作用する。さらに、封入流体中の水分によるベントナイトの体積膨張により引き起こされる力 F_p が侵入流体に作用する。

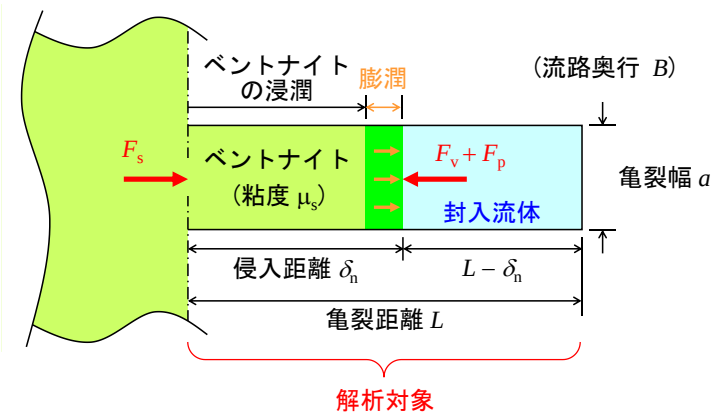


図 4-5　閉口流路（亀裂）内のベントナイト侵入に関する概略図

侵入流体に作用する力のつり合いは次式となる。

$$F_s = F_v + F_p \tag{4}$$

ここで、外部膨潤圧 P_s により引き起こされる力 F_s は次式となる。

$$F_s = P_s \cdot aB \tag{5}$$

また、流路内の粘性流れは 2 次元流であると見なし、平面 Poiseuille 流[49]における侵入流体に作用する粘性抵抗力 F_v は次式となる。

$$F_v = \frac{12\mu_s B}{a} \cdot \delta_n \frac{d\delta_n}{dt} \tag{6}$$

ここに、m_s は侵入流体の粘度、t は侵入時間である。さらに、ベントナイトへの封入流体分子（水分子）の吸収は Henry の法則に従い、ベントナイト内の封入流体分子の拡散は Fick の法則に従うと仮定し、封入流体中の水分によるベントナイトの体積膨張により引き起こされる力 F_p は次式となる。

$$F_p = \frac{RT}{M} \cdot \left(\frac{m}{L - \delta_n} - \frac{m_0}{L} \right) \tag{7}$$

ここに、R はガス定数、T は絶対温度、m は封入流体の質量、m_0 は封入流体の初期質量、M は封入流体のモル質量である。また、ベントナイト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）F_m は、Fick の法則より次式で与えられる。

$$\Phi_m = \frac{1}{aB} \cdot \frac{dm}{dt} = -\frac{D_d M \left(C - C_0 \right)}{\delta} \tag{8}$$

ここに、D_d はベントナイト内の封入流体分子の拡散係数、C は固気界面における封入流体分子の濃度、C_0 はベントナイトの亀裂侵入直前の封入流体分子の濃度である。本検討におけるベントナイトの封入流体の吸収・拡散理論は、Phan et al.[50]が提案した封入気体が侵入液体へ溶解・拡散する現象を考慮した閉口流路内の液体侵入に関する解析モデルを応用している。また、亀裂内が水で満たされている場合は、固相－液相の関係となるため、本検討で提案したベントナイトの封入流体（気体）の吸収・拡散理論は適用できない、あるいは適用できるように理論を修正する必要があると考えられる。この場合、亀裂内に封入されている水は非圧縮性の流体であるため、亀裂へのベントナイトの侵入が生じない、あるいは水の吸収に起因するベントナイトの膨潤により緩やかに亀裂へベントナイトが侵入すると考えられる。

式(5)、(6)、(7)を式(4)へ代入すると、侵入流体の侵入長さに関する支配方程式は次式とな

る。

$$\frac{d\delta_{\mathrm{n}}}{dt}=\frac{a^2}{12\mu_{\mathrm{s}}\delta_{\mathrm{n}}}\left\{P_{\mathrm{s}}-\frac{RT}{MaB}\left(\frac{m}{L-\delta_{\mathrm{n}}}-\frac{m_0}{L}\right)\right\} \tag{9}$$

また、式(8)より封入流体の質量変化率に関する支配方程式は次式となる。

$$\frac{dm}{dt}=-\frac{D_{\mathrm{d}}RT}{K_{\mathrm{H}}}\cdot\frac{mL-m_0\left(L-\delta_{\mathrm{n}}\right)}{\delta_{\mathrm{n}}L\left(L-\delta_{\mathrm{n}}\right)} \tag{10}$$

ここに、K_{H} は Henry 定数であり、ベントナイトへの封入流体分子の吸収率を表す。ここで、侵入流体の侵入長さと封入流体の質量を正規化し、それぞれの物理量を d_{n}^{*}（$=d_{\mathrm{n}}/L$）と m^{*}（$=m/m_0$）で表す。正規化した物理量（d_{n}^{*}および m^{*}）を適用し、式(9)と式(10)を正規化すると、それぞれ次式となる。

$$\frac{d\delta_{\mathrm{n}}^{*}}{dt}=\frac{\varepsilon}{\delta_{\mathrm{n}}^{*}}\left\{1-\alpha\cdot\left(\frac{m^{*}}{1-\delta_{\mathrm{n}}^{*}}-1\right)\right\} \tag{11}$$

$$\frac{dm^{*}}{dt}=\beta\cdot\frac{1-m^{*}-\delta_{\mathrm{n}}^{*}}{\delta_{\mathrm{n}}^{*}\left(1-\delta_{\mathrm{n}}^{*}\right)} \tag{12}$$

ここに、a は大気圧と外部膨潤圧の比、b は封入流体の吸収率・拡散率と侵入流体の侵入率の比、e は流体侵入に関する物理定数であり、それぞれ次式で表される。

$$\alpha=\frac{P_{\mathrm{a}}}{P_{\mathrm{s}}} \tag{13}$$

$$\beta=\frac{D_{\mathrm{d}}RT}{K_{\mathrm{H}}L^2} \tag{14}$$

$$\varepsilon=\frac{P_{\mathrm{s}}}{12\mu_{\mathrm{s}}}\cdot\left(\frac{a}{L}\right)^2 \tag{15}$$

本検討で構築した支配方程式（式(11)、(12)）を数値積分して導出した数値解を適用し、亀裂中のベントナイトの侵入長さの時間変化に関して解析的検討を行った。

閉口流路へ侵入するベントナイトの侵入長さの時間変化に関する解析結果の一例を図 4-6（膨潤圧一定）および図 4-7（粘度一定）に示す。いずれの図も、左図の縦軸は正規化した侵入長さ d_{n}^{*}、横軸は侵入時間の平方根 $t^{1/2}$ であり、$d_{\mathrm{n}}^{*}=1$ の場合、侵入流体は閉口流路を完全に満たすことを意味する。

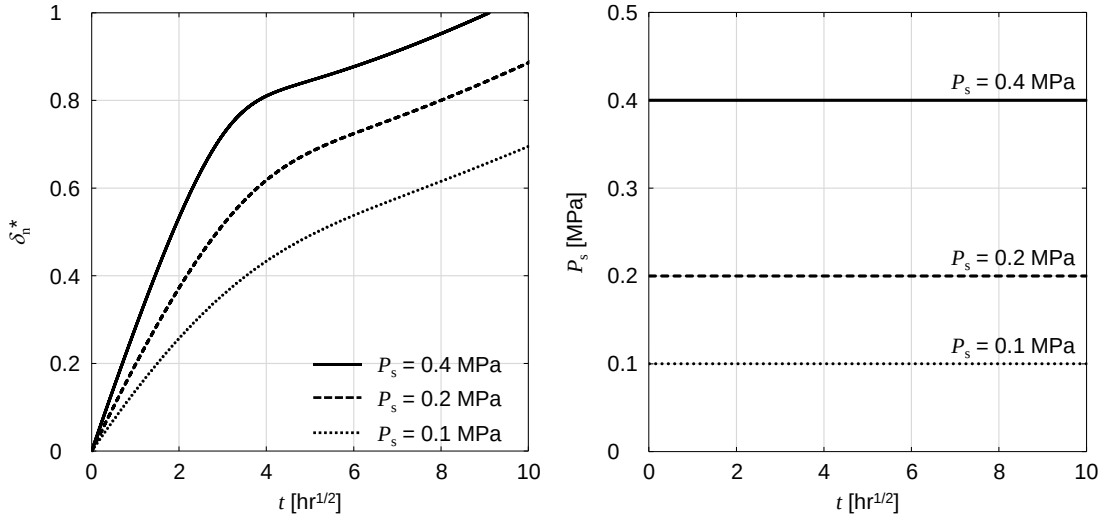


図 4-6　一定外部膨潤圧作用下におけるベントナイトの亀裂侵入長さの時間変化

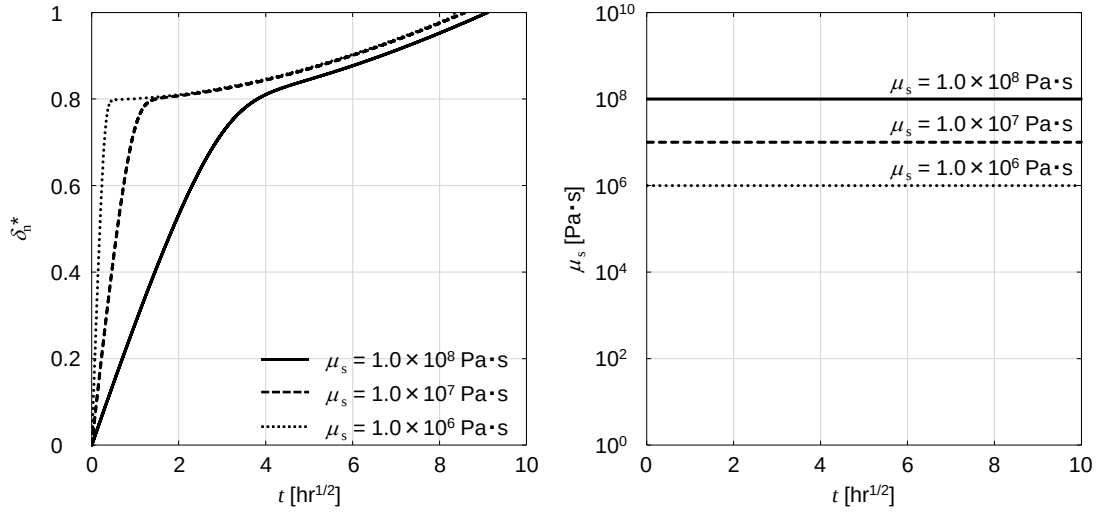


図 4-7　一定粘度特性を有するベントナイトの亀裂侵入長さの時間変化

図 4-6 より、外部膨潤圧が大きい条件では、侵入流体の侵入速度が上昇することを確認した。これは、外部膨潤圧が大きい程、流路内の流体侵入に関する駆動力が大きくなるため、侵入流体の侵入速度が上昇したと考えられる。また、図 4-7 より、侵入流体の粘度が大きい条件では、侵入流体の侵入速度が低下することを確認した。これは、侵入流体の粘度が大きい程、侵入流体に作用する粘性摩擦抵抗が大きくなるため、侵入流体の侵入速度が低下したと考えられる。

(2) 変動外部膨潤圧と変動粘度の導入

2021 年度の検討における支配方程式（式(11)、式(12)）の導出では、外部膨潤圧および侵入流体の粘度を時間に依らず一定値と仮定した。しかし、膨潤・充填性同時試験により得られたベントナイトの膨潤圧と経過時間の関係より、膨潤圧は時間に依存し、時間の経過とともに膨潤圧は上昇または低下することを確認した。また、膨潤・充填性同時試験より、亀裂中のベントナイトと溶液の界面近傍において、溶液によるベントナイトの浸食により、見かけ上ベントナイトの密度が低下することを確認した。ここで、流体の密度 r と粘度 m の関係（$m = rn$, n は動粘度）を適用すると、亀裂中のベントナイトと溶液の界面近傍において、見かけ上ベントナイトの粘度が低下すると考えられる。このベントナイトの浸食範囲は時間の経過とともに増大すると考えられるため、ベントナイトの粘度は時間に依存し、時間の経過とともに粘度は低下すると考えられる。

以上より、外部膨潤圧および侵入流体の粘度は時間に依存すると考えられる。そこで、2022 年度の検討では、経時変化する外部膨潤圧および侵入流体の粘度を、それぞれ変動外部膨潤圧および変動粘度と定義する。変動外部膨潤圧は、時間の経過とともに指数関数的に上昇または低下すること（図 4-8A）を考え、定式化する。また、変動粘度は、時間の経過とともに指数関数的に低下すること（図 4-8B）を考え、定式化する。さらに、変動外部膨潤圧および変動粘度を侵入量予測に関する支配方程式に組み込むことを試みる。

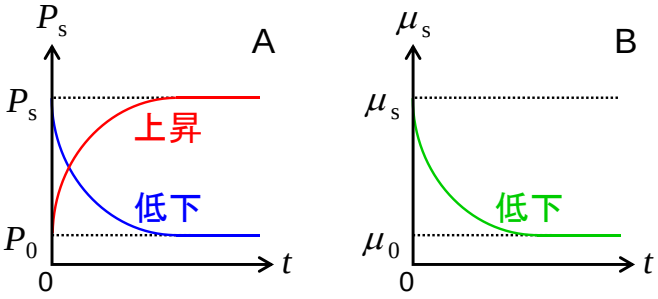


図 4-8　変動外部膨潤圧および変動粘度のモデル化

4.1.3 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

2021 年度に製作した定水位型透水試験装置および変水位型透水試験装置を用いて、岩石供試体（結晶質岩と堆積岩）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し、化学的作用を受け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。なお、いずれの試験法でもほぼ同じ透水係数が得られることを事前に確認している。

(1) 透水試験

定水位型透水試験 試験装置の概略図を図 4-9 に示す。本試験は恒温室（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。

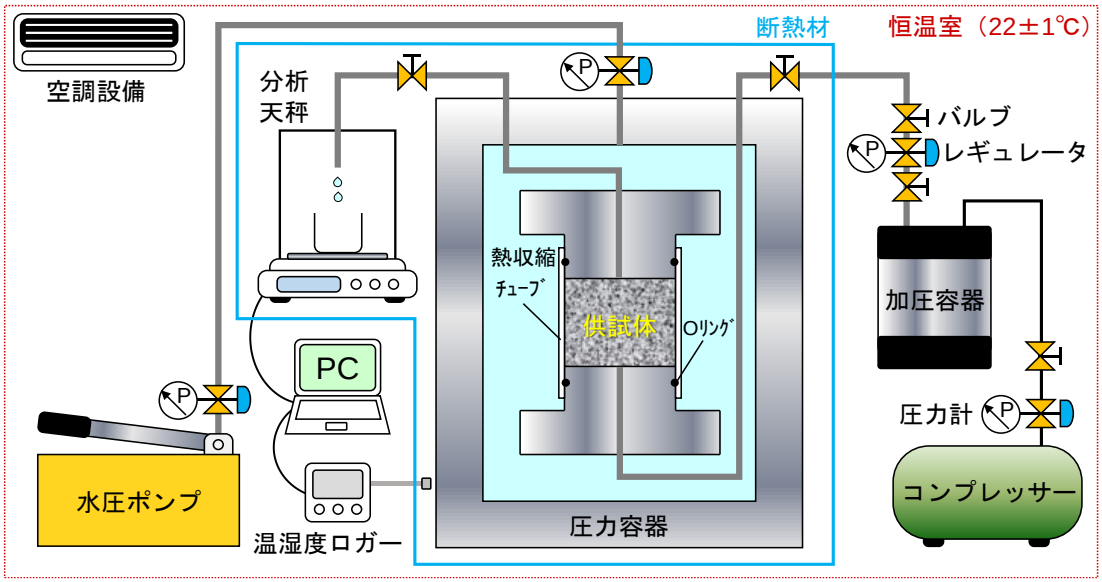


図 4-9　定水位型透水試験装置の概略図

本試験は、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。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。計測された透水量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。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。

変水位型透水試験 装置は JIS A 1218 に準ずる（ビュレット管、透水円筒、越流水槽から構成）ものであり、ビュレット管内の水位と越流水槽の水位差が 3 m 程度になるように製作した。供試体は、定水位型透水試験と同様に、直径 50 mm、高さ 40 mm の円柱である。試験は恒温室（22±1°C）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(3)を用いて算出した。

(2) 岩石試料および充填ベントナイト試料

本研究で用いた岩石試料は、幌延泥岩（日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター地下施設坑道内より掘削されたボーリングコア）および万成花崗岩（岡山県岡山市万成産角閃石黒雲母花崗岩“万成石”）である。岩石試料の供試体（直径 50 mm）端面の写真と基本物性値をそれぞれ図 4-10 と表 4-2 に示す。

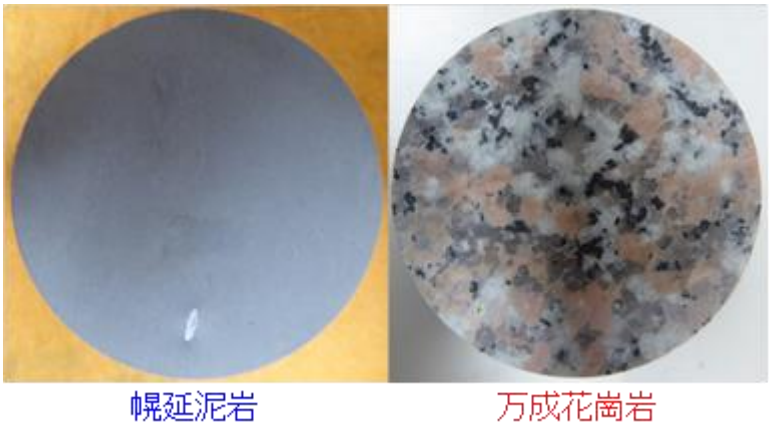


図 4-10　透水試験に用いた岩石供試体（直径 50 mm）の端面の写真

表 4-2　岩石供試体の基本物性値

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]
幌延泥岩	1.47	24.22	35.67	2.95
万成花崗岩	2.64	0.23	0.60	5.11

岩石供試体の巨視亀裂の導入方法（図 4-11）について、幌延泥岩を例に記述する。幌延深地層研究センター地下施設坑道内より掘削された直径約 60 mm のボーリングコアをダイヤモンドカッターで切断後、コアリング機で直径 50 mm の円柱に整形した。端面仕上げは

端面整形機を用いたが、弱面での破壊やエッジが欠けるなどの問題が生じたため、研磨板および研磨粉を用いて端面仕上げを行った。端面仕上げ後、圧裂引張試験によって巨視亀裂の導入を試みたが、大部分の供試体において、図 4-11 に示すように、複数の亀裂を伴って破壊したため、本研究では、ダイヤモンドカッターを用いて、幅 1 mm の亀裂を導入することとした。ベントナイト試料の充填の様子、ベントナイトで充填された亀裂を含む岩石供試体の一例を図 4-12 に示す。

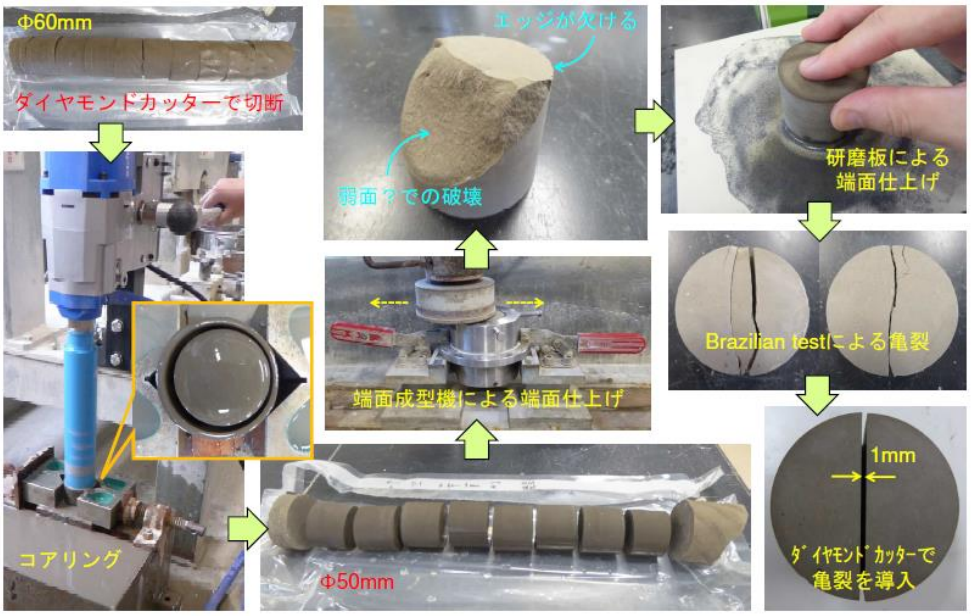


図 4-11　岩石供試体の巨視亀裂の導入方法（幌延泥岩の例）

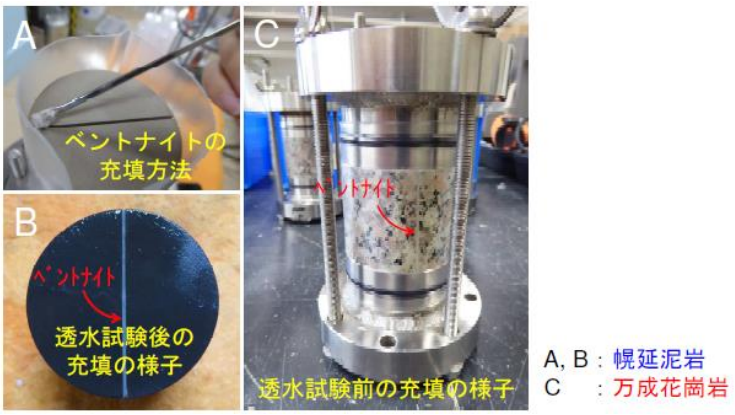


図 4-12　ベントナイト試料で充填された亀裂を含む岩石供試体の一例

4.2 2022 年度の成果内容

2022 年度に実施した(5)～(7)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(6)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。

4.2.1 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

同一条件下（乾燥密度 1.5 Mg/m^3、亀裂幅 1.5 mm）における膨潤・充填性同時試験から得られた膨潤圧の時間変化を図 4-13 に、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の時間変化を、それぞれ、図 4-14 と図 4-15 示す。ここでは、2022 年度に実施した 3 つの条件（NaCl 水溶液、NaCl 水溶液（0.6 mol/L）および幌延地下水に浸漬させたベントナイト供試体）の結果を中心に記述する。

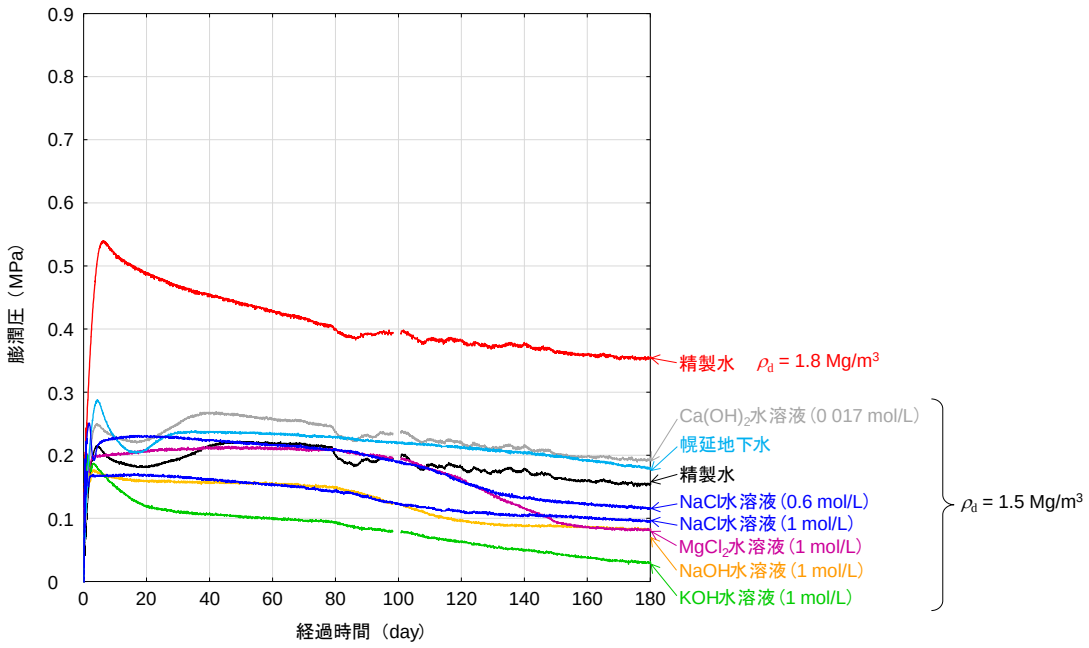


図 4-13　膨潤・充填性同時試験におけるベントナイトの膨潤圧

3 つの条件下における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、NaCl 水溶液および NaCl 水溶液（0.6 mol/L）に浸漬させたベントナイトで試験開始からおよそ 1 日程度、幌延地下水に浸漬させたベントナイトでおよそ 4 日程度であった。試験開始 180 日後の膨潤圧は、NaCl 水溶液と NaCl 水溶液（0.6 mol/L）に浸漬させたベントナイトでは、それぞれ、0.09 MPa と 0.12 MPa であり NaOH 水溶液と $MgCl_2$ 水溶液に浸漬させたベントナイトの膨潤

圧と同程度であった。なお、NaCl 水溶液の塩分濃度の違いによる膨潤圧の違いは見られなかった。幌延地下水に浸漬させたベントナイトの膨潤圧は 0.18 MPa であり、これは $Ca(OH)_2$ 水溶液に浸漬させたベントナイトの膨潤圧と同程度であった。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 2022 年度の実験条件下でも言える。

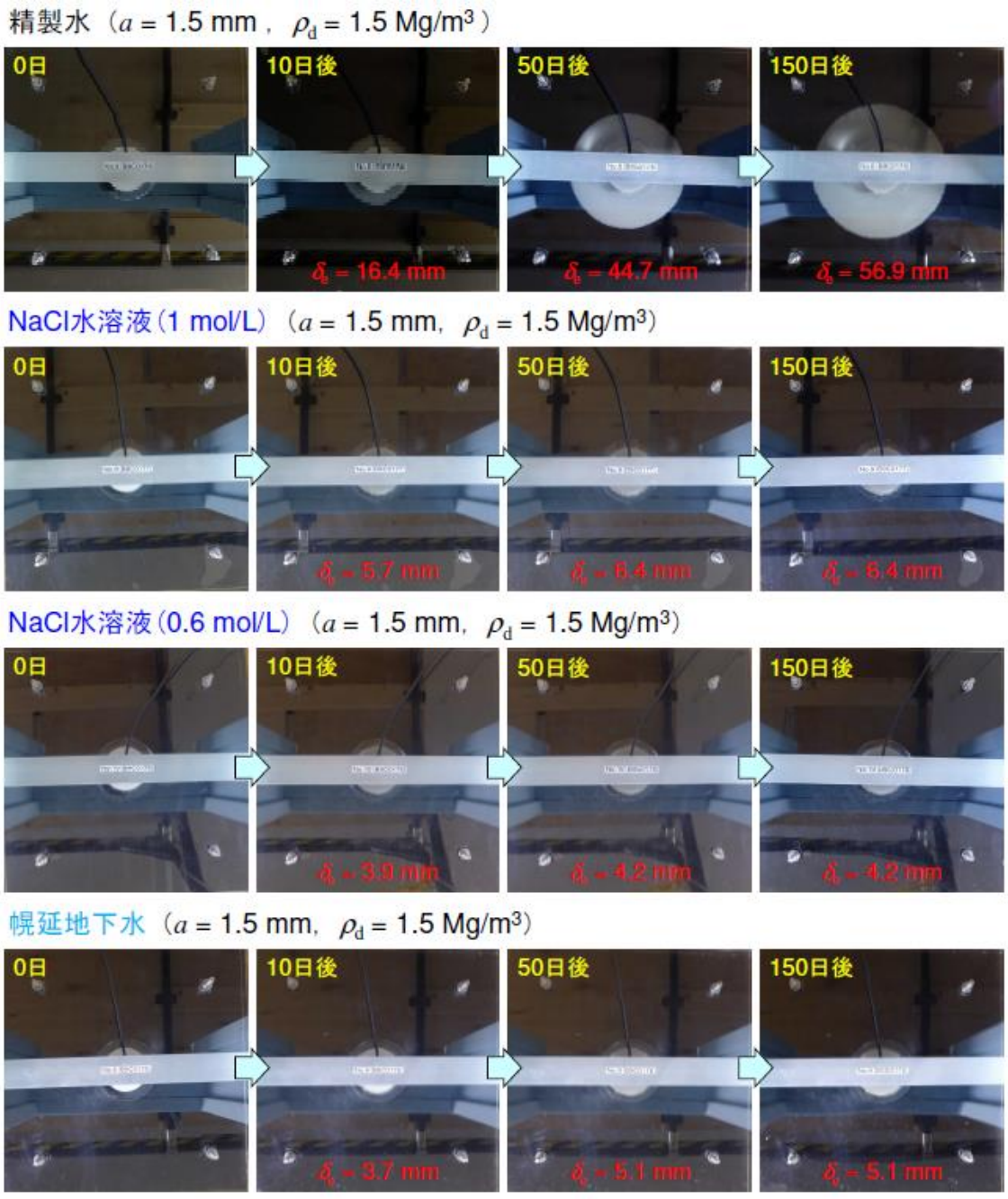


図 4-14　膨潤・充填性同時試験におけるベントナイトの侵入の様子の一例

図 4-14 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。3 つの条件下におけるベントナイトの侵入距離は精製水環境下におけるベントナイトと比較して非常に小さいことがわかる。

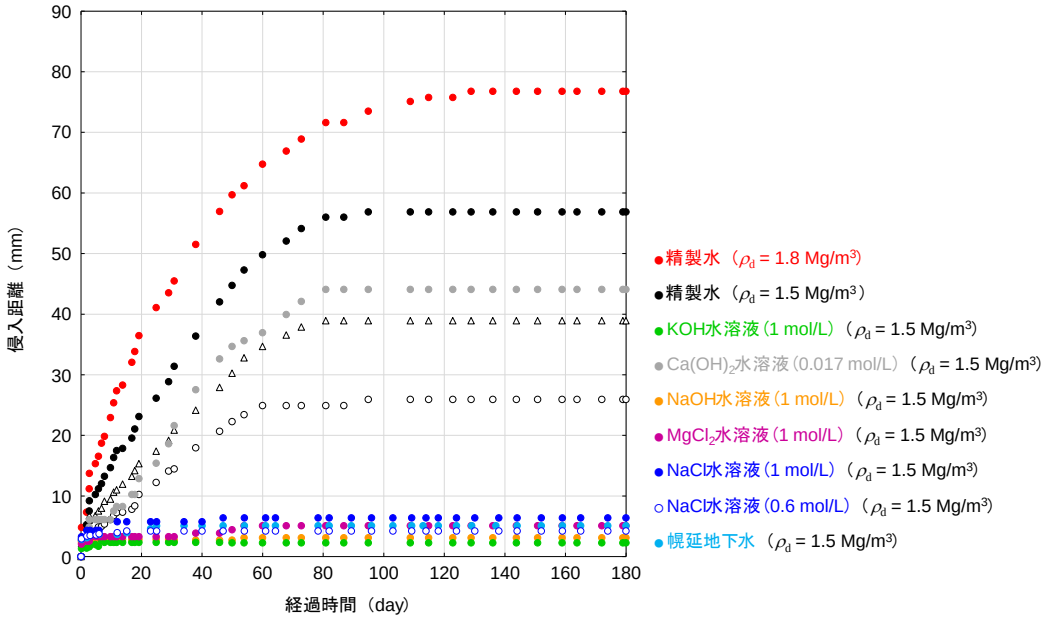


図 4-15　膨潤・充填性同時試験における経過日数と侵入距離との関係

図 4-15 は、図 4-14 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。2022 年度実施の 3 つの条件下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、NaCl 水溶液に浸漬させたベントナイトで 40 日程度、NaCl 水溶液（0.6 mol/L）に浸漬させたベントナイトで 20 日程度、幌延地下水に浸漬させたベントナイトで 30 日程度であり、いずれも精製水環境下におけるベントナイトに比べて早い日数で平衡状態に達している。3 つの条件下における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。いずれの供試体も、KOH 水溶液、NaOH 水溶液および $MgCl_2$ 水溶液と同様、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。前述の通り、幌延地下水に浸漬させたベントナイトの膨潤圧は $Ca(OH)_2$ 水溶液に浸漬させたベントナイトの膨潤圧と同程度であったにもかかわらず、$Ca(OH)_2$ 水溶液条件下に比べて、侵入距離が小さいことがわかる。

次に、既往の報告 [38),39),49)]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 d_e を整理し（$d_e = At^{1/2}$）、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 4-16、表 4-3）。2022 年度実施の 3 つの条件下の試料の比例定数は、0.23～0.25 であり、これは、KOH 水溶液、NaOH 水溶液および $MgCl_2$ 水溶液条件下の試料と同程度の値であった。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 [38),39),49)]とも整合的であった。

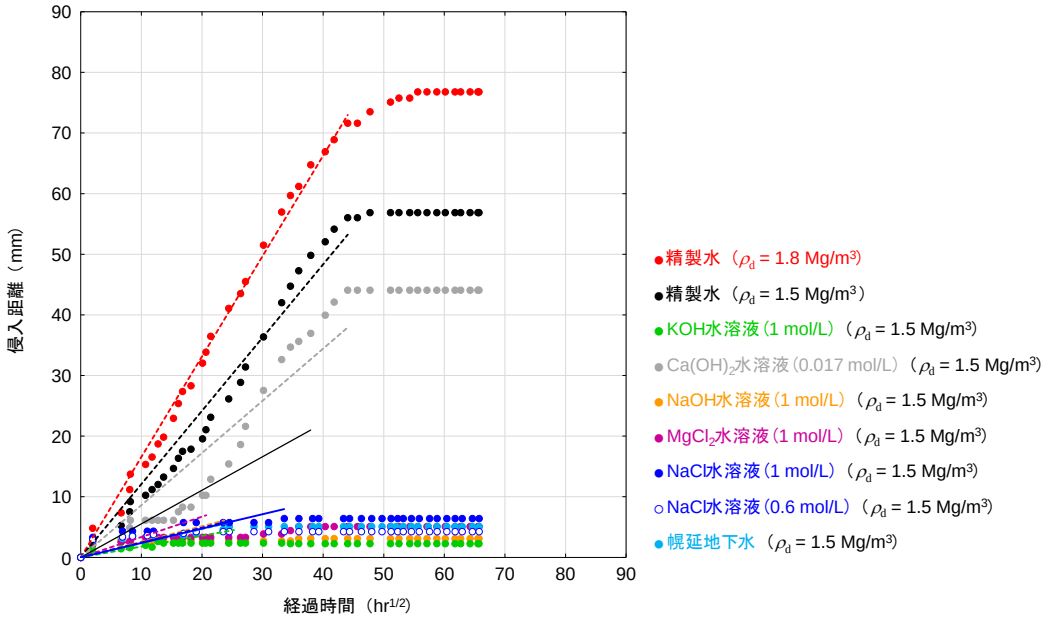


図 4-16　膨潤・充填性同時試験における経過時間の平方根によるベントナイトの侵入距離

表 4-3　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/m³]	亀裂幅 [mm]	使用液体	比例定数 A [mm/hr$^{1/2}$]	相関係数
1.5	1.5	精製水	1.21	0.99
1.5	1.5	NaCl 水溶液（1 mol/L）	0.24	0.94
1.5	1.5	NaCl 水溶液（0.6 mol/L）	0.25	0.93
1.5	1.5	幌延地下水	0.23	0.95

膨潤・充填性同時試験より得られた結果から、相関性の強い関係の一例を図 4-17 に示す。平衡膨潤圧 P_s、侵入距離 d_e、比例定数 A の間には、非常に高い相関関係（相関係数 0.92～0.99）があることがわかった。

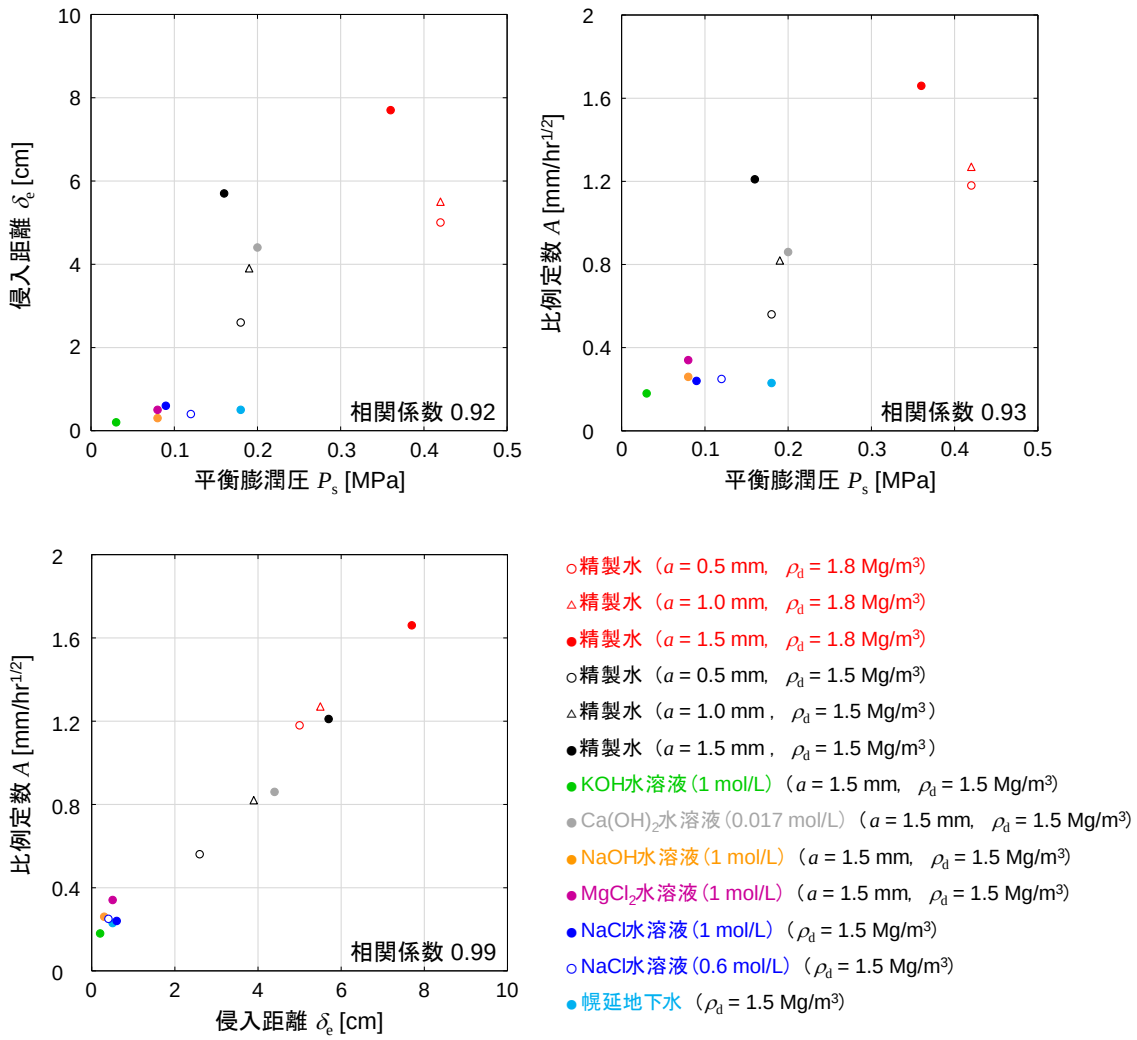


図 4-17　膨潤・充填性同時試験による計測値の関連性の例

2022 年度は、亀裂に侵入したベントナイトの密度の測定を試みた（図 4-18）。侵入したベントナイトの乾燥密度は侵入距離に応じて低下することが既往の研究 [42]で報告されている。本研究でも侵入距離に応じたベントナイトの乾燥密度分布の測定を試みたが、湿潤状態では侵入物の治具への癒着、乾燥状態では乾燥収縮によるひび割れの発生により、計測することが困難であった。そのため、図 4-18 に示す侵入距離と侵入物の乾燥密度との関係は、侵入物の平均的な乾燥密度を表している。侵入物の乾燥密度は、0.24～0.53 Mg/m^3 であった。精製水に浸漬させたベントナイトに着目すると、亀裂幅が大きくなるほど（すなわち、侵入距離が大きいほど）、乾燥密度は小さい傾向を示していることがわかる。ただし、溶液種の違いによる乾燥密度の違いについては確認できない。なお、侵入距離が非常に小さかった KOH 水溶液および NaOH 水溶液については、侵入物の質量測定が不可能であっ

たため、これらの溶液条件下の試料については**図** 4-18 には示していない。

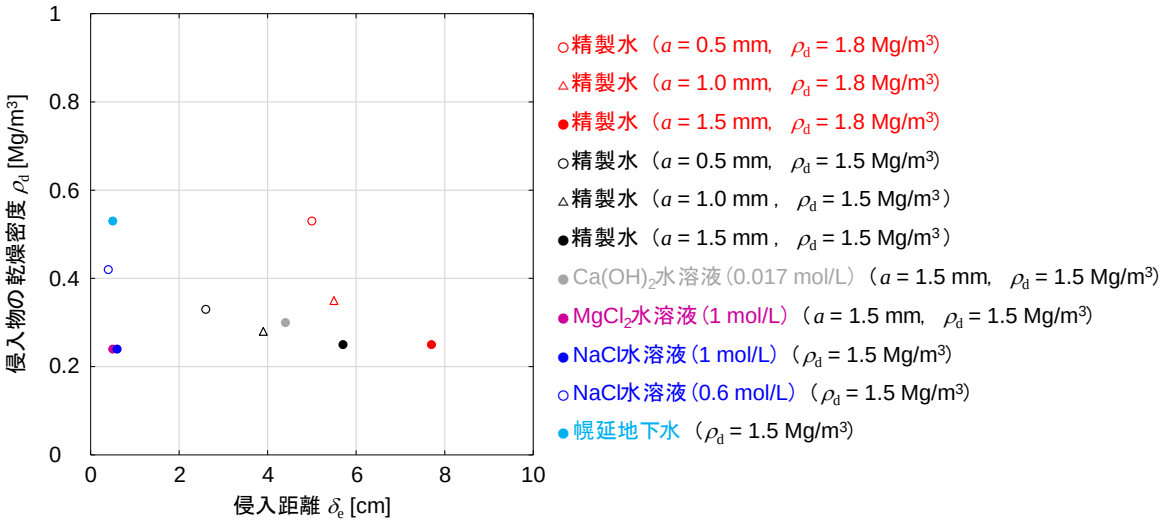


図 4-18　**膨潤・充填性同時試験におけるベントナイトの侵入距離と乾燥密度との関係**

ここで、膨潤・充填性同時試験から得られた諸量（$P_{s,init}$：膨潤圧の初期ピークの大きさ、t_{init}：膨潤圧の初期ピーク発生の経過時間、$P_{s,max}$：最大膨潤圧、P_s：平衡膨潤圧、 d_e：侵入距離、r_d：侵入物の乾燥密度、A：比例定数）を**表** 4 にまとめておく。

表 4-4　**膨潤・充填性同時試験から得られた諸量**

使用液体	ρ_d [Mg/m³]	a [mm]	$P_{s,init}$ [MPa]	t_{init} [day]	$P_{s,max}$ [MPa]	P_s [MPa]	δ_e [cm]	ρ_δ [Mg/m³]	A [mm/hr$^{1/2}$]
精製水	1.8	0.5	0.51	8.2	0.51	0.42	5.0	0.53	1.18
精製水	1.8	1.0	0.56	6.5	0.56	0.42	5.5	0.35	1.27
精製水	1.8	1.5	0.54	6.0	0.54	0.36	7.7	0.25	1.66
精製水	1.5	0.5	0.24	4.1	0.28	0.18	2.6	0.33	0.56
精製水	1.5	1.0	0.25	4.2	0.27	0.19	3.9	0.28	0.82
精製水	1.5	1.5	0.21	3.9	0.22	0.16	5.7	0.25	1.21
KOH 水溶液	1.5	1.5	0.20	1.3	0.20	0.03	0.2	-	0.18
Ca(OH)$_2$ 水溶液*1	1.5	1.5	0.25	4.0	0.27	0.20	4.4	0.30	0.86
NaOH 水溶液	1.5	1.5	0.19	1.1	0.19	0.08	0.3	-	0.26
MgCl$_2$ 水溶液	1.5	1.5	0.20	1.1	0.21	0.08	0.5	0.24	0.34
NaCl 水溶液	1.5	1.5	0.17	1.1	0.17	0.09	0.6	0.24	0.24
NaCl 水溶液*2	1.5	1.5	0.25	1.7	0.25	0.12	0.4	0.42	0.25
幌延地下水	1.5	1.5	0.29	4.2	0.29	0.18	0.5	0.53	0.23

*1 0.017 mol/L,　*2 0.6 mol/L

次に、ベントナイト試料の透水係数を図 4-19 および表 4-5 に示す。ここでの試料はすべて膨潤・充填性同時試験後のベントナイト供試体を乾燥・粉末化したものを所定の密度に締め固めたものである。ここでの締固め密度は、図 4-18 の範囲内になるように 0.5 Mg/m^3 に設定した。なお、図 4-19 に示すデータは、5 回の計測値の平均値と最大値・最小値をプロットしている。

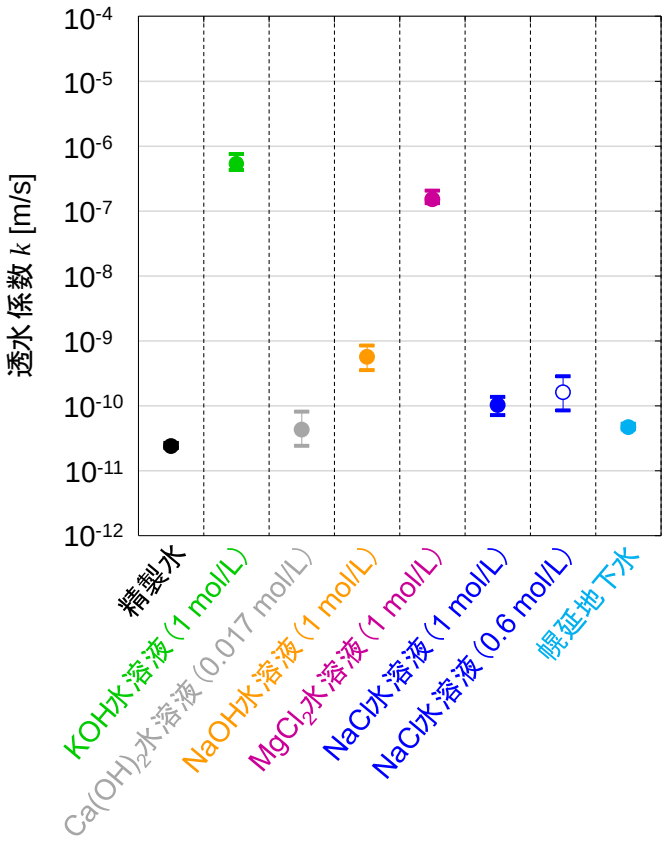


図 4-19　各種溶液に浸漬させたベントナイトの透水試験結果

表 4-5　各種溶液に浸漬させたベントナイトの透水係数

使用液体	透水係数 k [m/s]
精製水	2.4×10^{-11}（2.7×10^{-11}～2.3×10^{-11}）
KOH 水溶液（1 mol/L）	5.4×10^{-7}（7.6×10^{-7} ～4.3×10^{-7} ）
$Ca(OH)_2$ 水溶液（0.017 mol/L）	4.3×10^{-11}（8.2×10^{-11}～2.4×10^{-11}）
NaOH 水溶液（1 mol/L）	5.7×10^{-10}（8.5×10^{-10}～3.6×10^{-10}）
$MgCl_2$ 水溶液（1 mol/L）	1.5×10^{-7}（2.1×10^{-7} ～1.3×10^{-7} ）
NaCl 水溶液（1 mol/L）	1.0×10^{-10}（1.4×10^{-10}～7.2×10^{-11}）
NaCl 水溶液（0.6 mol/L）	1.6×10^{-10}（2.9×10^{-10}～8.6×10^{-11}）
幌延地下水	4.7×10^{-11}（5.3×10^{-11}～4.4×10^{-11}）

ベントナイトの透水係数は、精製水に浸漬させた場合が最も小さく、各種溶液に浸漬させたベントナイトは、いずれも精製水浸漬ベントナイトに比べて透水係数は上昇した。特に、KOH 水溶液および $MgCl_2$ 水溶液浸漬ベントナイトは、精製水浸漬ベントナイトに比べて透水係数が 4 オーダーも大きい。$Ca(OH)_2$ 水溶液および幌延地下水浸漬ベントナイトは、精製水浸漬ベントナイトの透水係数と同じオーダーであった。したがって、ベントナイトは浸漬させる溶液種によってその透水性が大きく異なることがわかる。以上の実験結果は、地層処分におけるベントナイト系材料が地下水の化学的作用の影響により、透水性能が劣化するとともに、接触する地下水の水質によってその劣化度合いが異なることを示唆するものである。

ここで、各種溶液に浸漬させたベントナイトのコンシステンシー特性と透水係数との関係を図 4-20 および表 4-6 に示す。塑性図（図 4-20A）より、精製水および $Ca(OH)_2$ 水溶液浸漬ベントナイトのマーカーは A 線よりも上方に位置しており、透水性が低くことがわかり、透水試験結果とも整合的である。一方、それ以外の試料の液性限界は w_L = 71.73～150.20%、塑性指数は I_p = 24.33～109.30 の範囲であり、非常に小さい。水和エネルギー（水分保持力）の逆数[51]と透水係数の間には高い相関も見られた（図 4-20B）。今後、膨潤圧・隙間充填性、侵入物の密度等のデータも合わせて総合的に考察する必要がある。

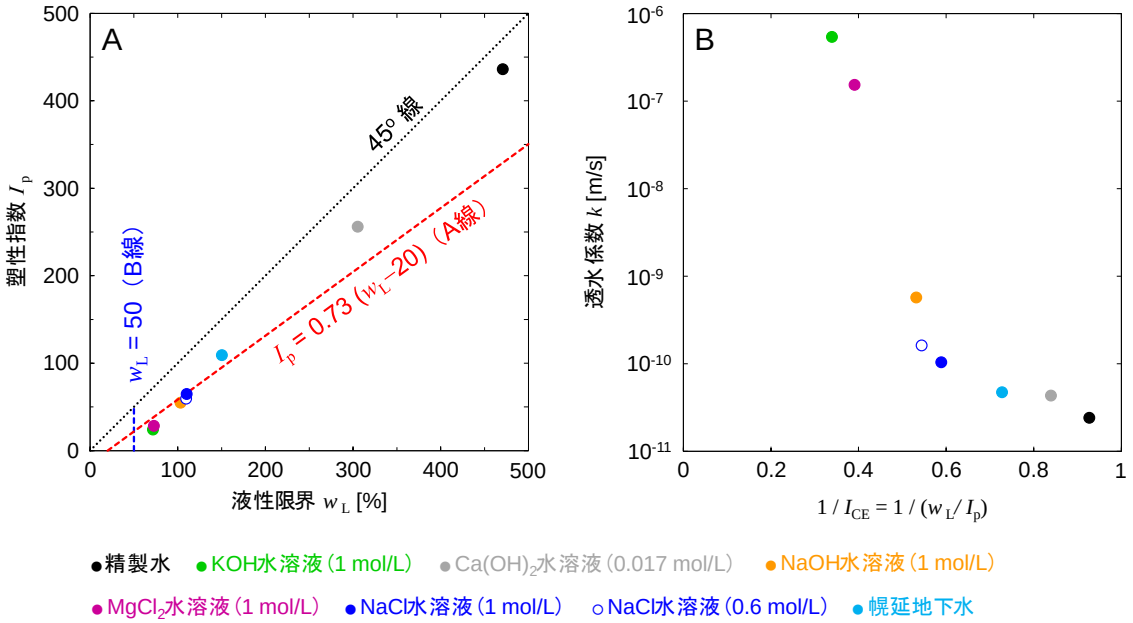


図 4-20　塑性図による各種溶液に浸漬させたベントナイトの特性と透水係数との関係

表 4-6　各種溶液に浸漬させたベントナイトの液性限界・塑性限界試験結果

使用液体	液性限界 w_L [%]	塑性限界 w_p [%]	塑性指数 I_p	$1/(w_L/I_p)$
精製水	470.71	34.40	436.31	0.93
KOH 水溶液	71.73	47.40	24.33	0.34
$Ca(OH)_2$ 水溶液(0.017 mol/L)	305.19	48.97	256.22	0.84
NaOH 水溶液	103.21	48.30	54.91	0.53
$MgCl_2$ 水溶液	72.76	44.30	28.45	0.39
NaCl 水溶液	110.20	45.30	64.90	0.59
NaCl 水溶液(0.6 mol/L)	109.50	49.90	59.60	0.54
幌延地下水	150.20	40.90	109.30	0.73

4.2.2 ベントナイト試料の岩石亀裂充填性のモデル化の改良

経時変化する外部膨潤圧および侵入流体（ベントナイト）の粘度を、それぞれ、時間の経過とともに指数関数的に上昇または低下（変動外部膨潤圧および変動粘度、図 4-8）することを考え、定式化することで、侵入量予測に関する支配方程式に組み込むことを試みた。

(1) 変動外部膨潤圧、変動粘度の定式化

変動外部膨潤圧 $P(t)$および変動粘度 $m(t)$を、時間に依存する無次元関数 $X(t)$および $Y(t)$を適用して、それぞれ次式で表す。

$$P(t) = P_s \cdot X(t) \tag{16}$$

$$\mu(t) = \mu_s \cdot Y(t) \tag{17}$$

ここで、外部膨潤圧が時間の経過とともに指数関数的に上昇し、上限膨潤圧 P_sに収束する場合、変動外部膨潤圧に関する無次元関数 $X(t)$は次式となる。

$$X(t) = 1 - \left(1 - \frac{P_0}{P_s}\right) \cdot e^{-\gamma t} \tag{18}$$

ここに、P_0は下限膨潤圧、gは膨潤速度に関する定数である。一方、外部膨潤圧が時間の経過とともに指数関数的に低下し、下限膨潤圧 P_0に収束する場合、変動外部膨潤圧に関する無次元関数 $X(t)$は次式となる。

$$X(t) = \frac{P_0}{P_s} + \left(1 - \frac{P_0}{P_s}\right) \cdot e^{-\lambda t} \tag{19}$$

ここに、lは膨潤速度に関する定数である。また、侵入流体の粘度が時間の経過とともに指数関数的に低下し、侵入流体の下限粘度 m_0に収束する場合、変動粘度に関する無次元関数 $Y(t)$は次式となる。

$$Y(t)=\frac{\mu_0}{\mu_s}+\left(1-\frac{\mu_0}{\mu_s}\right)\cdot e^{-\eta t} \tag{20}$$

ここに、m_sは侵入流体の上限粘度、hは粘度低下速度に関する定数である。

(2) 変動外部膨潤圧作用下における変動粘性特性を有する緩衝材の亀裂への侵入量予測

外部膨潤圧と侵入流体の粘度が時間に依存するため、外部膨潤圧により引き起こされる力 F_sと侵入流体に作用する粘性抵抗力 F_vは時間に依存する。したがって、式(16)より、外部膨潤圧により引き起こされる力 F_sは次式となる。

$$F_s=P_s\cdot X(t)\cdot aB \tag{21}$$

また、式(17)より、侵入流体に作用する粘性抵抗力 F_vは次式となる。

$$F_v=\frac{12\mu_s\cdot Y(t)B}{a}\cdot\delta\frac{d\delta_n}{dt} \tag{22}$$

式(7)、(21)、(22)を式(1)へ代入すると、侵入流体の侵入長さに関する支配方程式は次式となる。

$$\frac{d\delta_n}{dt}=\frac{a^2}{12\mu_s\delta_n\cdot Y(t)}\left\{P_s\cdot X(t)-\frac{RT}{MaB}\left(\frac{m}{L-\delta_n}-\frac{m_0}{L}\right)\right\} \tag{23}$$

また、式(8)より封入流体の質量変化率に関する支配方程式は次式となる。

$$\frac{dm}{dt}=-\frac{D_d RT}{K_H}\cdot\frac{mL-m_0(L-\delta_n)}{\delta_n L(L-\delta_n)} \tag{再掲(10)}$$

ここで、侵入流体の侵入長さと封入流体の質量を正規化し、それぞれの物理量を d_n^* (= d_n/L) と m^* (= m/m_0) で表す。正規化した物理量 (d_n^*および m^*) を適用し、式(23)と式(10)を正規化すると、それぞれ次式（再掲）となる。

$$\frac{d\delta_n^*}{dt}=\frac{\varepsilon}{\delta_n^*\cdot Y(t)}\left\{X(t)-\alpha\cdot\left(\frac{m^*}{1-\delta_n^*}-1\right)\right\} \tag{24}$$

$$\frac{dm^*}{dt}=\beta\cdot\frac{1-m^*-\delta_n^*}{\delta_n^*(1-\delta_n^*)} \tag{再掲(12)}$$

ここに、aは大気圧と外部膨潤圧の比、bは封入流体の吸収率・拡散率と侵入流体の侵入率の比、e は流体侵入に関する物理定数であり、それぞれ式(13)、式(14)、式(15)に示す。また、ベントナイトの亀裂侵入直前（$t=0$）では、侵入長さは 0（$d_n=0$）かつ封入流体の質量は初期質量と等しくなる（$m=m_0$）ため、初期条件は次式となる。

$$\delta_n^* = 0 \text{ and } m^* = 1 \quad \text{at } t = 0 \tag{25}$$

式(24)と式(12)の連立常微分方程式は閉口流路へ侵入する流体に関する運動方程式である。初期条件（式(25)）を適用し、この連立常微分方程式を数値積分すると、数値解（d_n^*およびm^*）が導出される。ここで導出された数値解d_n^*が、高湿度環境における閉口亀裂へ侵入するベントナイトの侵入長さである。ここで、$X(t) = 1$および$Y(t) = 1$とした場合、式(24)は一定外部膨潤圧および一定粘度を考慮した侵入流体の侵入長さに関する支配方程式である式(11)と一致する。

本検討で構築した支配方程式（式(24)、式(12)）を数値積分して導出した数値解を適用し、亀裂中のベントナイトの侵入長さの時間変化に関して解析的検討を行う。ベントナイトが侵入する亀裂は、流路長さLが0.5 m、流路奥行きBが単位奥行き（B= 1.0 m）、流路幅aが1.0 mmの長方形断面の閉口流路とする。また、亀裂へ侵入するベントナイトは、粘度が変動する（上限粘度m_sが1.0×10^8 Pa･s、下限粘度m_0が0.1×10^8 Pa･s）粘性流体とし、流路入口部の侵入流体には変動外部膨潤圧（上昇の場合：下限膨潤圧P_0が 0 MPa、上限膨潤圧P_sが 0.4 MPa、低下の場合：上限膨潤圧P_sが 0.4 MPa、下限膨潤圧P_0が 0.04 MPa）が作用することを考える。閉口亀裂中の封入流体は、ガス定数Rが8.3145 N･m/(mol･K)、絶対温度Tが298.15 K (25°C)、モル質量Mが18.02×10^{-3} kg/molの水蒸気とする。また、大気圧P_aは1.01×10^5 Paとする。ベントナイトへの水蒸気の吸収率（Henry定数）K_Hは1.0×10^4 Pa･m³/molとし、ベントナイト内の水分子の拡散係数D_dは1.0×10^{-10} m²/sと設定した。ここに、Henry定数のオーダーは、気体の水に対するHenry定数[52]を参考に設定し、拡散係数のオーダーは、既往の研究[40), 41)]により得られた固相拡散係数の推定値を参考に設定した。

本検討で導出した閉口流路内の流体侵入に関する数値解を適用した解析の結果より、亀裂中のベントナイトの侵入特性に関して検討した。図 4-21～図 4-25 に、閉口流路へ侵入する流体の侵入長さの時間変化に関する解析結果を示す。図 4-21～図 4-25 中の左図の縦軸は正規化した侵入長さd_n^*、横軸は侵入時間の平方根$t^{1/2}$であり、$d_n^* = 1$の場合、侵入流体は閉口流路を完全に満たすことを示す。

図 4-21～図 4-23 は、一定粘度の条件下（$Y(t) = 1$）で、外部膨潤圧の経時変化を考慮した場合の侵入流体の侵入挙動を示す。

図 4-21 は外部膨潤圧が時間の経過とともに指数関数的に上昇し、上限膨潤圧P_sに収束する場合の侵入流体の侵入挙動を示す。ここに、膨潤速度に関する定数gは、1.0×10^{-3} hour^{-1}、

1.0×10^{-4} hour^{-1}、1.0×10^{-5} hour^{-1} と設定し、g が大きい程、早期に上限膨潤圧 P_s に達する。図 4-21 より、膨潤速度に関する定数 g が小さい条件では、侵入流体の侵入速度が低下することを確認した。これは、g が小さい条件では、上限膨潤圧 P_s に達するまでに時間を要するため、早期に上限膨潤圧に達する条件（g が大きい条件）と比較して侵入流体は緩やかに亀裂を満たしたと考えられる。図 4-22 は外部膨潤圧が時間の経過とともに指数関数的に低下し、下限膨潤圧 P_0 に収束する場合の侵入流体の侵入挙動を示す。ここに、膨潤速度に関する定数 l は、1.0×10^{-2} hour^{-1}、1.0×10^{-3} hour^{-1}、1.0×10^{-4} hour^{-1} と設定し、l が大きい程、早期に下限膨潤圧 P_0 に達する。図 4-22 より、膨潤速度に関する定数 l が小さい条件では、侵入流体の侵入速度が上昇することを確認した。これは、l が小さい条件では、下限膨潤圧 P_0 に達するまでに時間を要するため、早期に下限膨潤圧に達する条件（l が大きい条件）と比較して侵入流体は早期に亀裂を満たしたと考えられる。

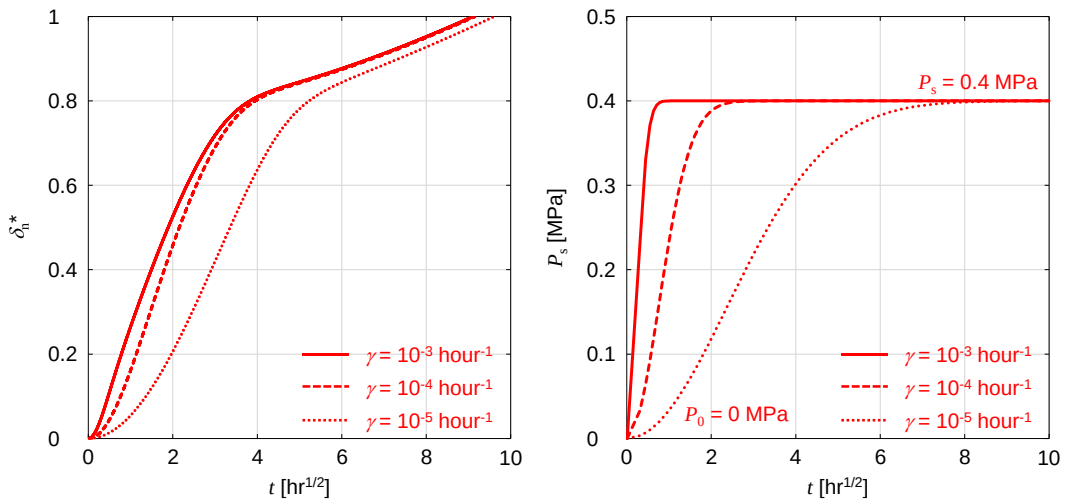


図 4-21　変動外部膨潤圧（上昇）作用下におけるベントナイトの亀裂侵入長さの時間変化

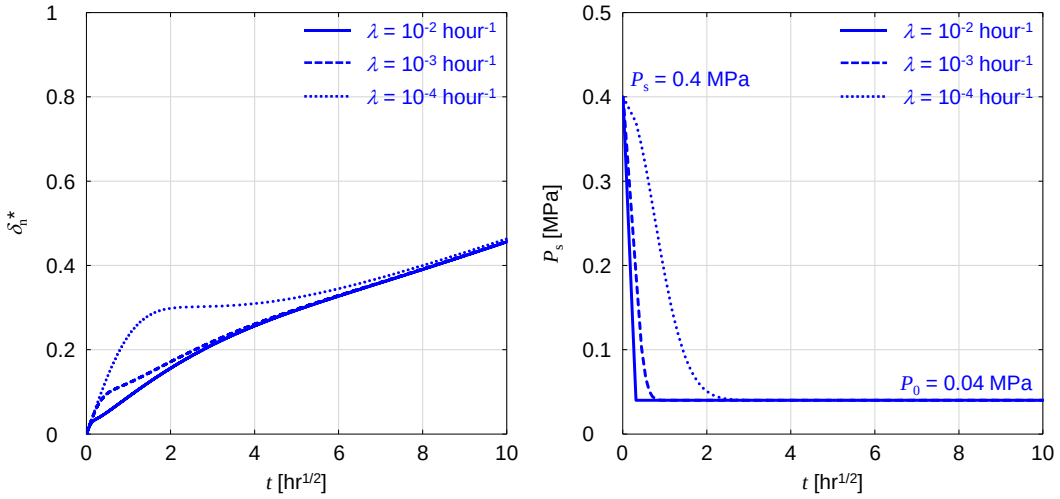


図 4-22　変動外部膨潤圧（低下）作用下におけるベントナイトの亀裂侵入長さの時間変化

図 4-23 は一定外部膨潤圧および変動外部膨潤圧を考慮した場合の侵入流体の侵入挙動を示す。ここに、膨潤速度に関する定数 g および l は、それぞれ 1.0×10^{-5} hour^{-1} および 1.0×10^{-4} hour^{-1} と設定し、一定外部膨潤圧の条件では、式(24)において $X(t)=1$ および $Y(t)=1$ とした。図 4-23 より、外部膨潤圧が時間の経過とともに上昇および低下する条件では、外部膨潤圧が一定である条件と比較して侵入流体は緩やかに亀裂を満たしていくことを確認した。

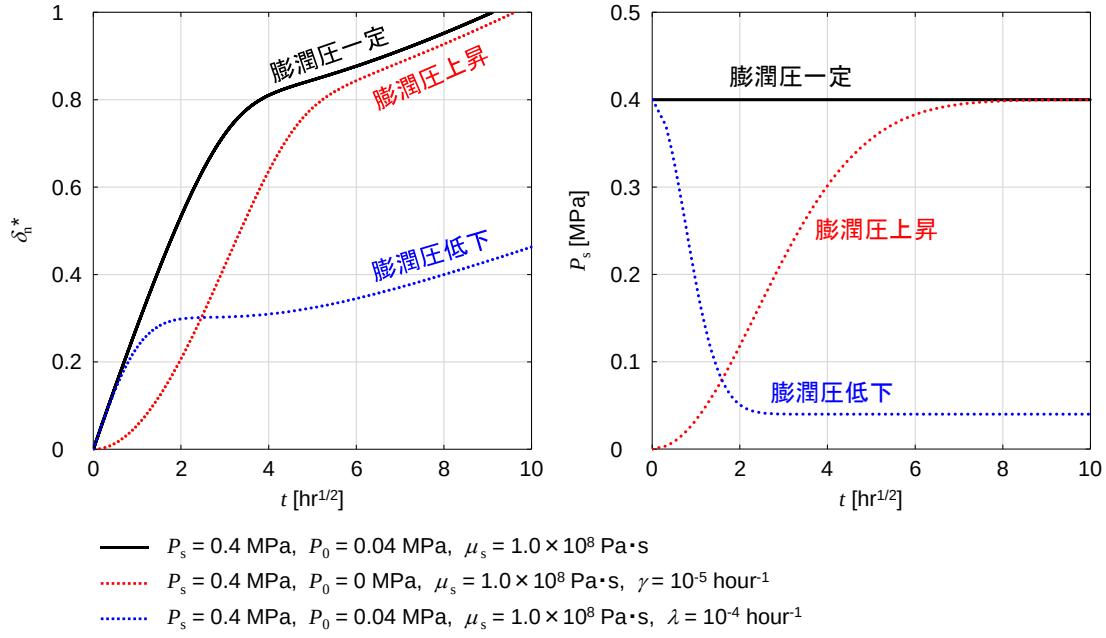


図 4-23　一定または変動外部膨潤圧作用下におけるベントナイトの亀裂侵入長さの時間変化

図 4-24、図 4-25 は、一定外部膨潤圧の条件下（$X(t) = 1$）で、侵入流体の粘度の経時変化を考慮した場合の侵入流体の侵入挙動を示す。

図 4-24 は侵入流体の粘度が時間の経過とともに指数関数的に低下し、侵入流体の下限粘度 m_0 に収束する場合の侵入流体の侵入挙動を示す。ここに、粘度低下速度に関する定数 h は、1.0×10^{-3} hour^{-1}、1.0×10^{-4} hour^{-1}、1.0×10^{-5} hour^{-1} と設定し、h が大きい程、早期に侵入流体の下限粘度 m_0 に達する。図 4-24 より、粘度低下速度に関する定数 h が小さい条件では、侵入流体の侵入速度が低下することを確認した。これは、h が小さい条件では、侵入流体の下限粘度 m_0 に達するまでに時間を要するため、早期に下限粘度に達する条件（h が大きい条件）と比較して侵入流体は緩やかに亀裂を満たしたと考えられる。

図 4-25 は一定粘度および変動粘度を考慮した場合の侵入流体の侵入挙動を示す。ここに、粘度低下速度に関する定数 h は、1.0×10^{-4} hour^{-1} と設定し、一定粘度の条件では、式(24)において $X(t) = 1$ および $Y(t) = 1$ とした。図 4-25 より、侵入流体の粘度が時間の経過とともに低下する条件では、粘度が上限粘度 m_s で一定である条件と比較して侵入流体は早期に亀裂を満たしていくことを確認した。

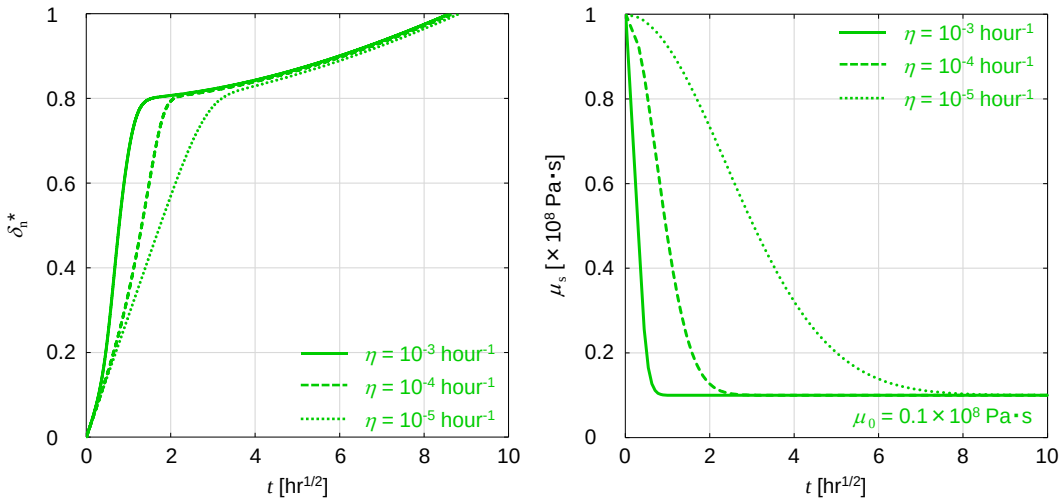


図 4-24　変動粘度（低下）を有するベントナイトの亀裂侵入長さの時間変化

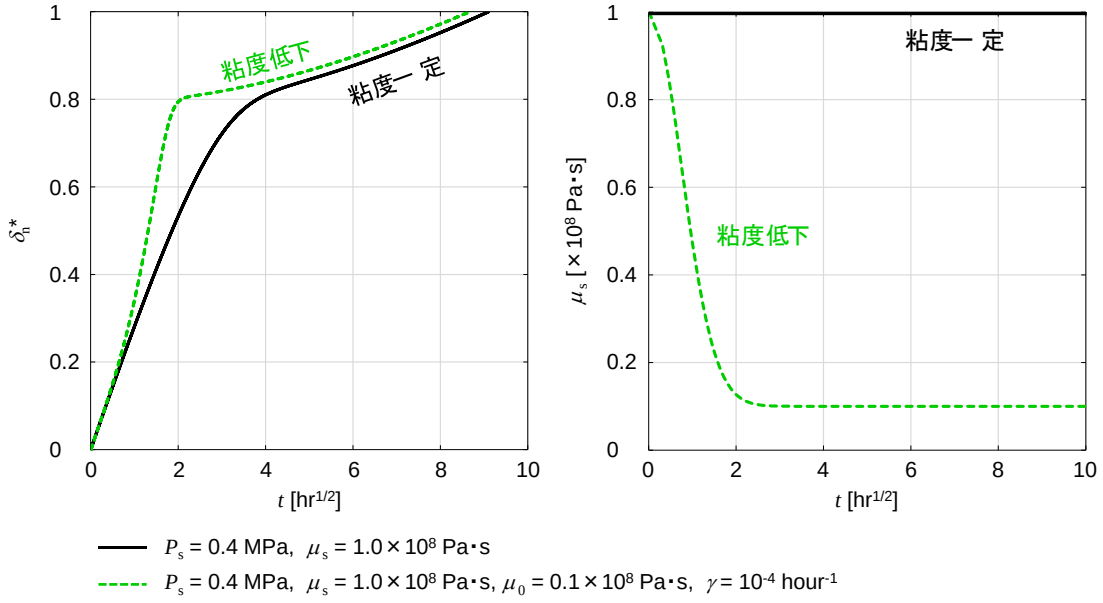


図 4-25　一定または変動粘度を有するベントナイトの亀裂侵入長さの時間変化

以上より、地層処分における超長期的なベントナイトの侵入を、亀裂中のベントナイトの封入流体吸収・拡散に起因する挙動と判断し、構築した閉口流路内の流体侵入に関する支配方程式が、地層処分における亀裂中のベントナイトの超長期的な侵入挙動を表す可能性があることを示唆するものである。今後、実験を再現するような条件設定についての検討を行い、実験値と傾向の比較検証が課題となる。

4.2.3 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

インタクトな幌延泥岩と万成花崗岩の透水試験における計測時間と透水量の関係を図 4-26 に示す。いずれの岩石供試体も透水量の傾きはほぼ直線的であることから、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。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、計量カップに落ちる透水量の間隔時間が長い、すなわち、透水性が低い供試体であること意味する。

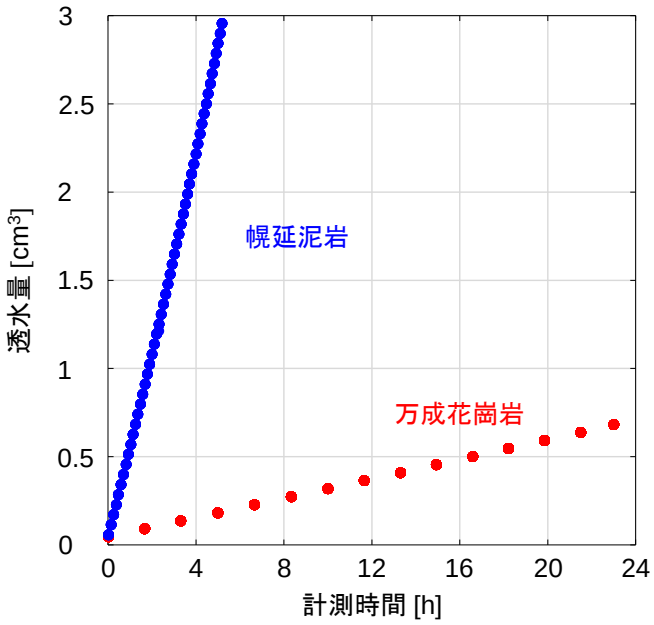


図 4-26　インタクトな幌延泥岩と万成花崗岩の透水試験における計測時間と透水量の関係

各種溶液に浸漬させたベントナイト試料で充填された亀裂を含む幌延泥岩・万成花崗岩の透水試験結果を図 4-27、図 4-28 および表 4-7 に示す。亀裂に充填したベントナイト試料はすべて膨潤・充填性同時試験後のベントナイト供試体を乾燥・粉末化したものである。ここでの充填密度は、図 4-18 の範囲内になるように、かつ、各種溶液に浸漬させたベントナイトの透水試験結果（図 4-19）との比較を容易にするため、0.5 Mg/m^3 に設定した。なお、図 4-27、図 4-28 に示すデータは、5 回の計測値の平均値と最大値・最小値をプロットしている。

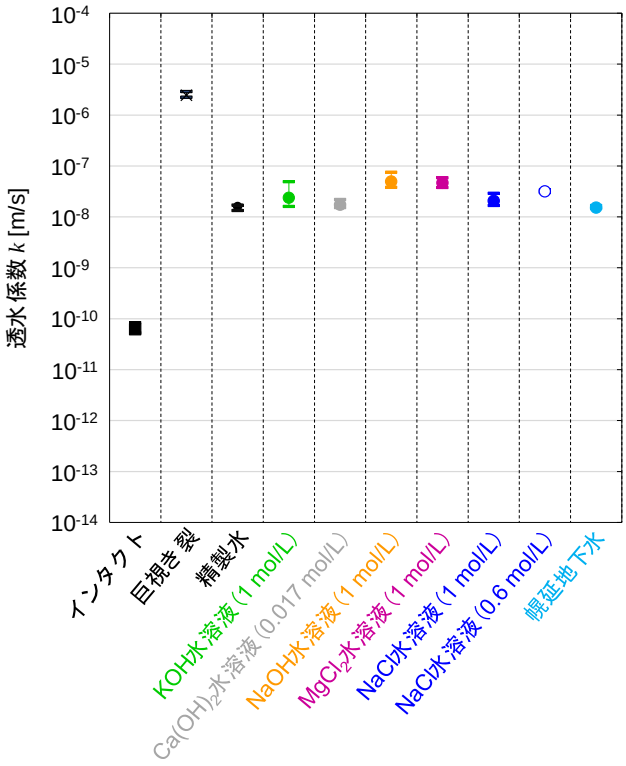


図 4-27　各種溶液浸漬ベントナイトで充填された亀裂を含む幌延泥岩の透水試験結果

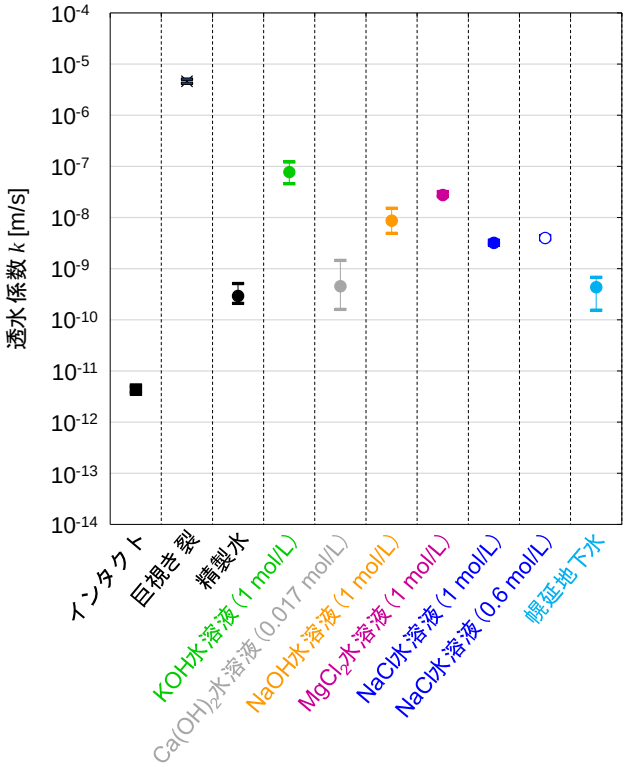


図 4-28　各種溶液浸漬ベントナイトで充填された亀裂を含む万成花崗岩の透水試験結果

表 4-7　各種溶液浸漬ベントナイトで充填された亀裂を含む岩石の透水係数

	幌延泥岩 [m/s]	万成花崗岩 [m/s]
インタクト	6.2×10^{-11}（8.4×10^{-11}～5.3×10^{-11}）	4.4×10^{-12}（4.9×10^{-12}～3.8×10^{-12}）
巨視き裂	2.4×10^{-6}（2.9×10^{-6} ～2.2×10^{-6} ）	4.6×10^{-6}（5.1×10^{-6} ～4.2×10^{-6} ）
ベントナイト充填		
精製水	1.6×10^{-8}（1.7×10^{-8} ～1.3×10^{-8} ）	2.9×10^{-10}（5.1×10^{-10}～2.1×10^{-10}）
KOH 水溶液（1 mol/L）	2.4×10^{-8}（4.9×10^{-8} ～1.6×10^{-8} ）	7.8×10^{-8}（1.2×10^{-7} ～4.6×10^{-8} ）
$Ca(OH)_2$ 水溶液（0.017 mol/L）	1.7×10^{-8}（2.2×10^{-8} ～1.5×10^{-8} ）	5.6×10^{-10}（1.5×10^{-9} ～1.6×10^{-10}）
NaOH 水溶液（1 mol/L）	5.0×10^{-8}（7.6×10^{-8} ～3.8×10^{-8} ）	8.7×10^{-9}（1.5×10^{-8} ～4.9×10^{-9} ）
$MgCl_2$ 水溶液（1 mol/L）	4.7×10^{-8}（5.8×10^{-8} ～3.8×10^{-8} ）	2.8×10^{-8}（3.2×10^{-8} ～2.6×10^{-8} ）
NaCl 水溶液（1 mol/L）	2.1×10^{-8}（2.9×10^{-8} ～1.7×10^{-8} ）	3.2×10^{-9}（3.6×10^{-9} ～2.9×10^{-9} ）
NaCl 水溶液（0.6 mol/L）	3.2×10^{-8}（3.4×10^{-8} ～3.0×10^{-8} ）	4.0×10^{-9}（4.5×10^{-9} ～3.7×10^{-9} ）
幌延地下水	1.5×10^{-8}（1.7×10^{-8} ～1.5×10^{-8} ）	4.4×10^{-10}（6.8×10^{-10}～1.5×10^{-10}）

インタクトな幌延泥岩供試体および巨視き裂を含む幌延泥岩供試体の透水係数の平均値はそれぞれ、6.2×10^{-11} m/s および 2.4×10^{-6} m/s であり、両者には 5 オーダー程度の差が見られた（図 4-27 および表 4-7）。一方、インタクトな万成花崗岩供試体および巨視き裂を含む万成花崗岩供試体の透水係数の平均値はそれぞれ、4.4×10^{-12} m/s および 4.6×10^{-6} m/s であり、両者には 6 オーダー程度の差が見られた（図 4-28 および表 4-7）。インタクトな供試体の透水係数は幌延泥岩および万成花崗岩で 1 オーダー程度の差が見られるが、巨視き裂を含む供試体では両岩石の透水係数に大きな差は見られなかった。いずれの供試体も巨視き裂の存在が岩石の透水性に大きな影響を及ぼすことが確認できた。

各種溶液浸漬ベントナイトで充填された亀裂を含む幌延泥岩の供試体の透水係数の平均値は 1.6×10^{-8} m/s～5.0×10^{-8} m/s であり、いずれも巨視き裂を含む幌延泥岩供試体よりも透水係数は小さい値を示した（図 4-27 および表 4-7）。これは言うまでもなく巨視き裂が微細なベントナイトでシーリングされたことが理由である。ベントナイトが亀裂を埋めることにより、巨視き裂に比べて透水係数が 2 オーダー程度回復することがわかった。ただし、いずれの試料の透水係数も同程度であり、亀裂を充填した各種溶液浸漬ベントナイトの種類の影響は見られない。一方、各種溶液浸漬ベントナイトで充填された亀裂を含む万成花崗岩の供試体の透水係数の平均値は 2.9×10^{-10} m/s～7.8×10^{-8} m/s であり、いずれも巨視き裂を含む万成花崗岩供試体よりも透水係数は小さい値を示し（図 4-28 および表 4-7）、幌延泥岩供試体の結果と同様の傾向であった。ベントナイトが亀裂を埋めることにより、巨視き裂に比べて透水係数が 2～4 オーダー程度回復することがわかった。幌延泥岩供試体の結果との違いは、亀裂を充填した各種溶液浸漬ベントナイトの種類の違いにより透水係数の

大きさに違いが見られたことである。特に、精製水浸漬ベントナイト、$Ca(OH)_2$ 浸漬ベントナイトおよび幌延地下水浸漬ベントナイトを充填した場合では、インタクトな万成花崗岩供試体の透水係数と 2 オーダー程度の差はあるものの、透水係数は 10^{-10} m/s オーダーまで回復することがわかった。これは、き裂閉塞を期待する場面（または望ましい環境）において貴重な知見になると考えられる。また、ベントナイトを充填した巨視き裂を含む万成花崗岩供試体の透水係数の値は、ベントナイト単一試料の透水係数（図 4-19）の大小関係と同様の傾向を示しており、これは、巨視き裂にベントナイトが充填された場合の岩石の透水係数が充填するベントナイトの透水性（すなわち、溶液種）に依存することを示唆するものである。

5. まとめ

2022 年度は、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、さらに、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、2022 年度に実施した 3 つの条件（NaCl 水溶液、NaCl 水溶液（0.6 mol/L）および幌延地下水に浸漬させたベントナイト供試体）における試験結果とも 2021 年度の試験結果と同様に、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、NaCl 水溶液および NaCl 水溶液（0.6 mol/L）浸漬ベントナイトの膨潤圧は、NaOH 水溶液および $MgCl_2$ 水溶液浸漬ベントナイトと同様に、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。膨潤・充填性同時試験より得られた結果から、ベントナイトの平衡膨潤圧、亀裂侵入距離、比例定数の間には、非常に強い相関関係があることがわかった。

ベントナイト試料の透水試験では、各種溶液に浸漬させたベントナイトは、精製水に浸漬させたベントナイトに比べて透水係数が上昇し、ベントナイトは浸漬させる溶液種によってその透水性が大きく異なることがわかった。以上の実験結果は、地層処分におけるベントナイト系材料が地下水の化学的作用の影響により、透水性能が劣化するとともに、接触する地下水の水質によってその劣化度合いが異なることを示唆するもの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の改良では、経時変化する外部膨潤圧および侵入流体（ベントナイト）の粘度を、それぞれ、時間の経過とともに指数関数的に上昇または低下することを考え、定式化することで、侵入量予測に関する支配方程式に組み込むことを試みた。構築した支配方程式を数値積分して導出した数値解を適用し、亀裂中のベントナイトの侵入長さの時間変化に関して数例の解析的検討を行った結果から、地層処分における超長期的なベントナイトの侵入を、亀裂中のベントナイトの封入流体吸収・拡散に起因する挙動と判断した。今後、実験との比較検証が課題となるが、構築した閉口流路内の流体侵入に関する支配方程式が、地層処分における亀裂中のベントナイトの超長期的な侵入挙動を表す可能性があることを示唆するものであると結論付けた。

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では、幌延泥岩および万成花崗岩試料を用いて、それぞれ、インタクトな供試体、巨視き裂を含む供試体、各種溶液に浸漬させたベントナイトを充填した巨視き裂（亀裂幅 1 mm）を含む供試体の透水性を明らかにした。その結果、岩石の種類によらず各種溶液浸漬ベントナイトで充填された亀裂を含む供試体の透水係数は、いずれも巨視き裂を含む供試体よりも小さい値を示した。透水性の低下は、巨視き裂中のベントナイトのシーリングによるものである。ベントナイトで亀裂が充填されることで、その透水係数が 10^{-10} m/s オーダーまで回復すること試料も見られた。これは、き裂閉塞を期待する場面（または望ましい環境）において貴重な知見になると考えられる。また、万成花崗岩供試体では、巨視き裂にベントナイトが充填された場合の岩石の透水係数が充填するベントナイト試料の透水性（すなわち、溶液種）に依存することを示唆する結果も得られた。以上より、岩石の透水性は、割れ目の存在により上昇するものの、割れ目が緩衝材（ベントナイト）でシーリングされることで低下し、さらに、その低下度合いは、地下水の化学的作用の影響によって異なる可能性があると結論付けた。

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地下施設坑道内の地下水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) 奈良禎太、加藤昌治、佐藤　努、河野勝宣、佐藤稔紀：粘土を含む水が流れる条件下での巨視き裂を含む花崗岩の透水係数の変化、*Journal of MMIJ*、**138**、44–50、2022.

34) 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.

35) 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**, 395–401, 2022.

36) M. Kohno, T. Nishimura: Swelling characteristics and permeability of bentonite-based materials immersed in various solutions, *Materials Transactions*, **63**, 1144–1150, 2022.

37) 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.

38) 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.

39) 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.

40) 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.

41) 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.

42) 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.

43) 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.

44) 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.

45) 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.

46) 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.

47) 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.

48) 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.

49) F. M. White: Viscous Fluid Flow, 3rd ed., 110–112, McGraw Hill, 2006.

50) 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.

51) 水野克己、遠藤和人、本郷隆夫、西垣　誠、嘉門雅史：コンシステンシー限界を用いた粘土の難透水性の解明、*第39 回地盤工学研究発表会発表講演集*、303–304、2004.

52) 化学工学協会：改訂四版化学工学便覧、488-490、丸善出版、1978.

2022 年度　外部発表

【学術論文】

1. 金氏裕也、河野勝宣：岩石亀裂へのベントナイトの侵入量予測モデルの構築、*土木学会論文集*（印刷中）.
2. Masanori Kohno, Kotomi Sakata, Masaki Asano, Masahiro Nonami, Yusuke Ono, Tsuyoshi Nishimura: Evaluation of hydraulic conductivity of intact rocks using constant head permeability apparatus, *Materials Transactions*, **63** (8), 1138-1143, August 2022.

【口頭発表】

1. 河野勝宣、金氏裕也：溶液環境下におけるベントナイトの膨潤・亀裂侵入実験、令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会、京都市、2022 年 9 月.
2. 河野勝宣、金氏裕也：ベントナイトの亀裂侵入挙動とその簡易モデル、第 65 回粘土科学討論会、松江市、2022 年 9 月.
3. 金氏裕也、河野勝宣：岩石亀裂へのベントナイトの侵入量予測モデルの構築、土木学会第 25 回応用力学シンポジウム、オンライン、2022 年 5 月.

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　2021 年度の成果概要 5
4　2022 年度の研究実施内容 8
4.1　2022 年度の計画、実施方法 8
4.1.1　調査地域 8
4.1.2　試料 10
4.1.3　分析方法 11
4.2　2022 年度の成果内容 18
4.2.1　各ベントナイト原鉱石の鉱物組の特徴 18
4.2.2　各ベントナイト原鉱石の岩石組織 24
4.2.3　カソードルミネッセンス観察による SiO2 微粒子の起源推定 29
4.2.4　難溶解性元素による母岩の推定 31
4.2.5　酸素同位体比測定 33
4.3　得られた成果と課題、今後の展開 37
5　まとめ 39
参考文献 41
謝辞 45

図表目次

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） 1
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） 2
図 3-1　ベントナイト原鉱石中にみられる微細な SiO_2 粒子とモンモリロナイトの産状 7
図 4-1　月布ベントナイト鉱床周辺地質図 9
図 4-2　地表のベントナイト露頭（採取地点１）の産状 11
図 4-3　29 番層の試料の不定方位 XRD プロファイル 19
図 4-4　29 番層の試料の定方位 XRD プロファイル 20
図 4-5　29 番層の試料の定方位 XRD プロファイル_060 反射 21
図 4-6　29 番層の試料の GK テスト後の定方位 XRD プロファイル 22
図 4-7　地表露頭のベントナイト試料の不定方位 XRD プロファイル 23
図 4-8　地表露頭のベントナイト試料の定方位 XRD プロファイル 24
図 4-9　29 番層ベントナイト原鉱石の偏光顕微鏡像 25
図 4-10　29 番層ベントナイト原鉱石の SEM 反射電子像 26
図 4-11　TKN-29-05 における火山ガラス・シリカ微粒子・方解石の産状 27
図 4-12　地表露頭のベントナイト原鉱石(TKN-0002)の SEM 反射電子像 28
図 4-13　カソードルミネッセンスを用いた観察例 30
図 4-14　29 番層ベントナイト原鉱石の微量元素（HFSE）パターン 32
図 4-15　標準試料とケイ酸塩鉱物のマススペクトルの比較 33
図 4-16　フッ素化合物の種類による石英の反応性の比較 34
図 4-17　フッ素化合物の種類による SWy-1 の反応性の比較 35
図 4-18　SWy-1 とフッ素化合物の混合物の乾燥炉から取り出し後の重量変化 36

表 4-1　2022 年度の追加採取試料 10
表 4-2　29 番層ベントナイト原鉱石の HFSE 濃度 31

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）。

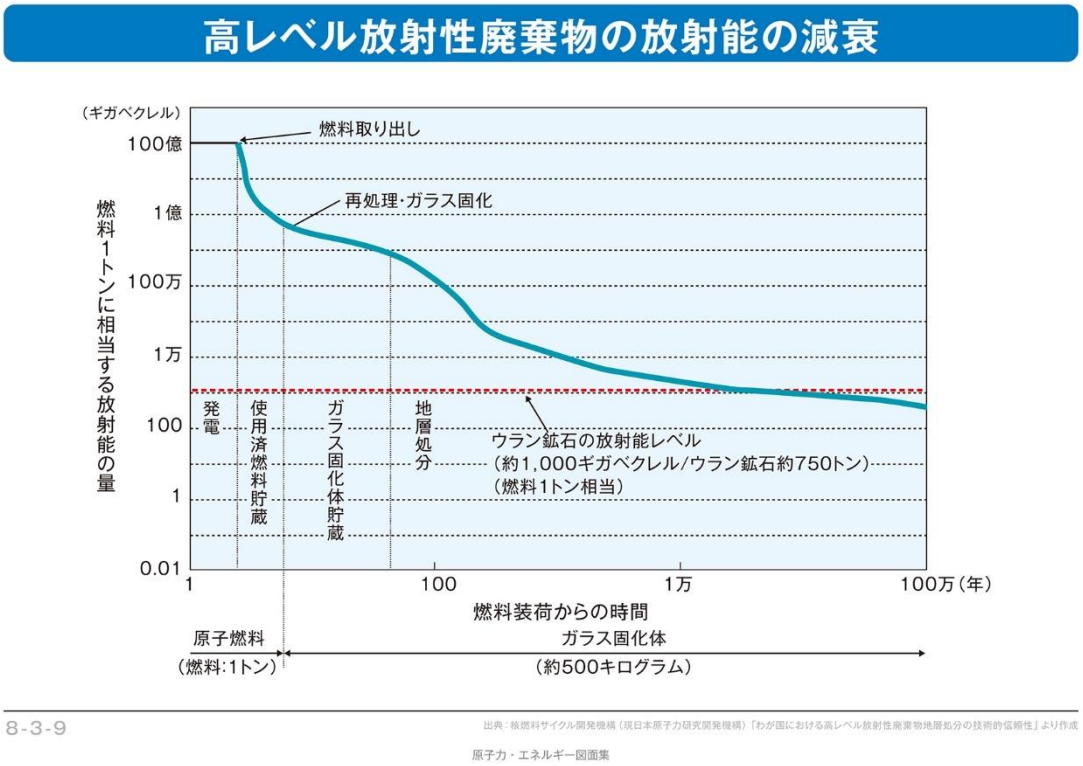


図 1-1　高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の放射能の減衰（日本原子力文化財団、2022）

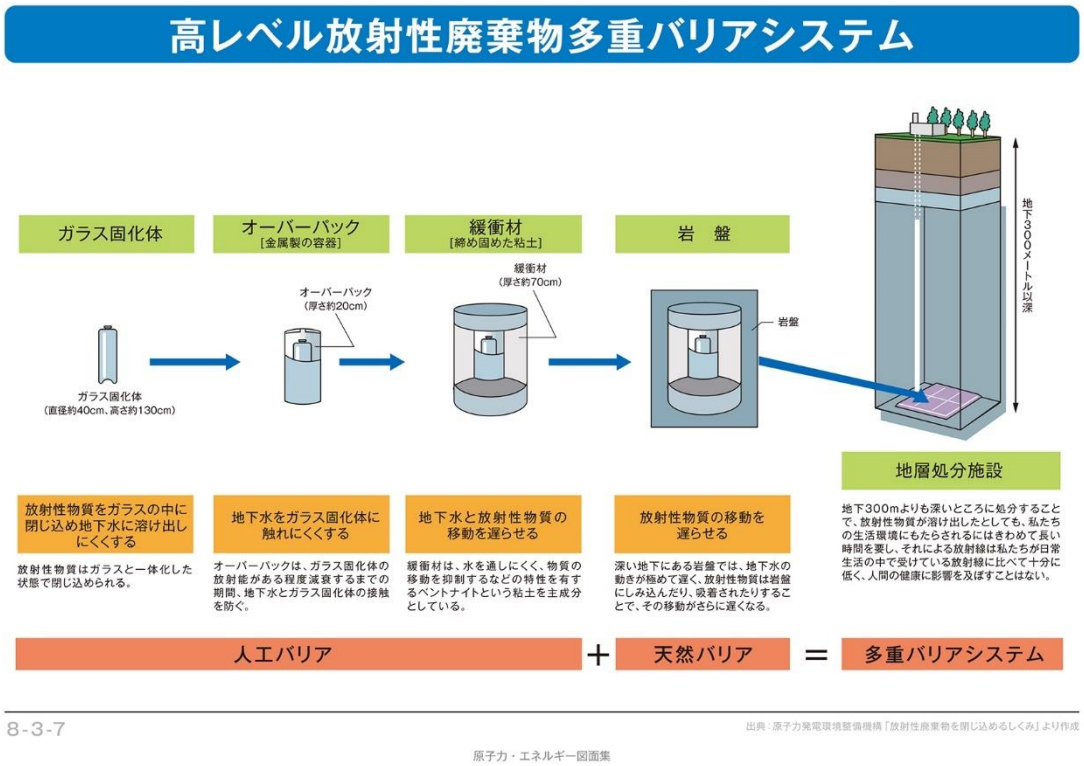


図 1-2　高レベル放射性廃棄物の地層処分における多重バリアシステム

（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 2021 年度から 2022 年度の 2 年間で、各年度の研究計画は以下の通りである。

2021 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。

2022 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 2021 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　2021 年度の成果概要

2021 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。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った。得られた知見は以下の通りにまとめられる。

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（図 3-1)。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はモンモリロナイトがCa型になっており、地下坑内で採掘されているNa型とは異なるものの、主要構成鉱物・組織には類似点が多く見られる。大気に直接接している最表面のベントナイト原鉱石では黄鉄鉱が溶解し、鉄あるいはマンガン水酸化物の析出が認められるが、その分布は均質ではなく、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。

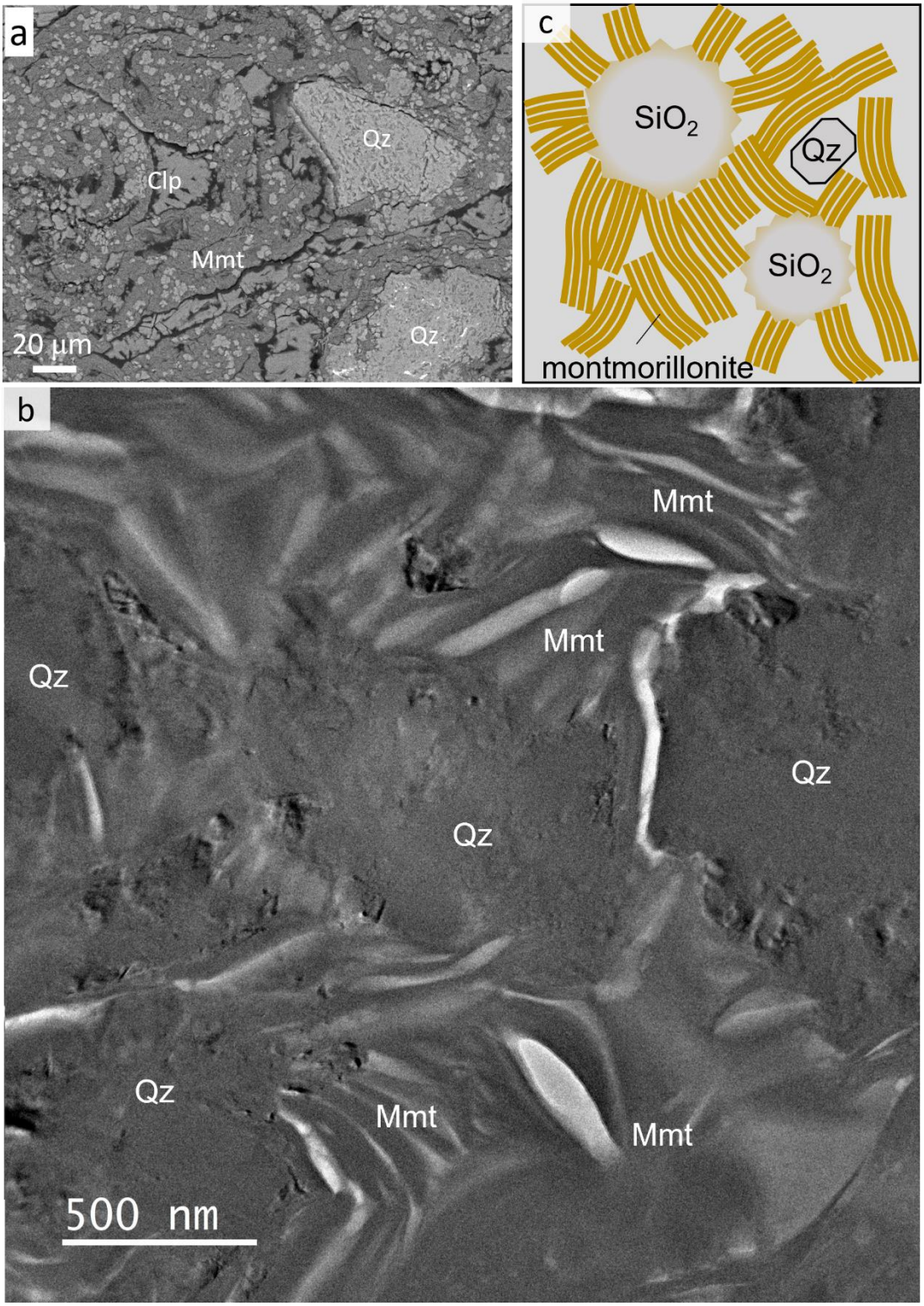


図 3-1　ベントナイト原鉱石中にみられる微細な SiO_2 粒子とモンモリロナイトの産状

(a) 29 番層ベントナイト原鉱石の SEM 反射電子像、(b)透過電子顕微鏡の明視野像および (c)SiO_2（石英もしくはアモルファスシリカ）とモンモリロナイト粒子の模式図

4　2022 年度の研究実施内容

4.1　2022 年度の計画、実施方法

本研究では、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。

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制約をかけるための検証を進めた。

2021 年度の調査では鉱床全体でベントナイト原鉱石の鉱物組成の違いから、下盤側ほどより高温側の沸石相の出現・モンモリロナイトのバイデライト化・セメント物質と考えられるシリカ微粒子の増加などの特徴が観察された。2022 年度の調査では、前年度に検証が十分に進められなかった同一のベントナイト層内での不均質性の評価を行うための追加試料の採取と、セメント物質の成因を推定するための観察・分析を進めた。

4.1.1 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 4-1）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)。

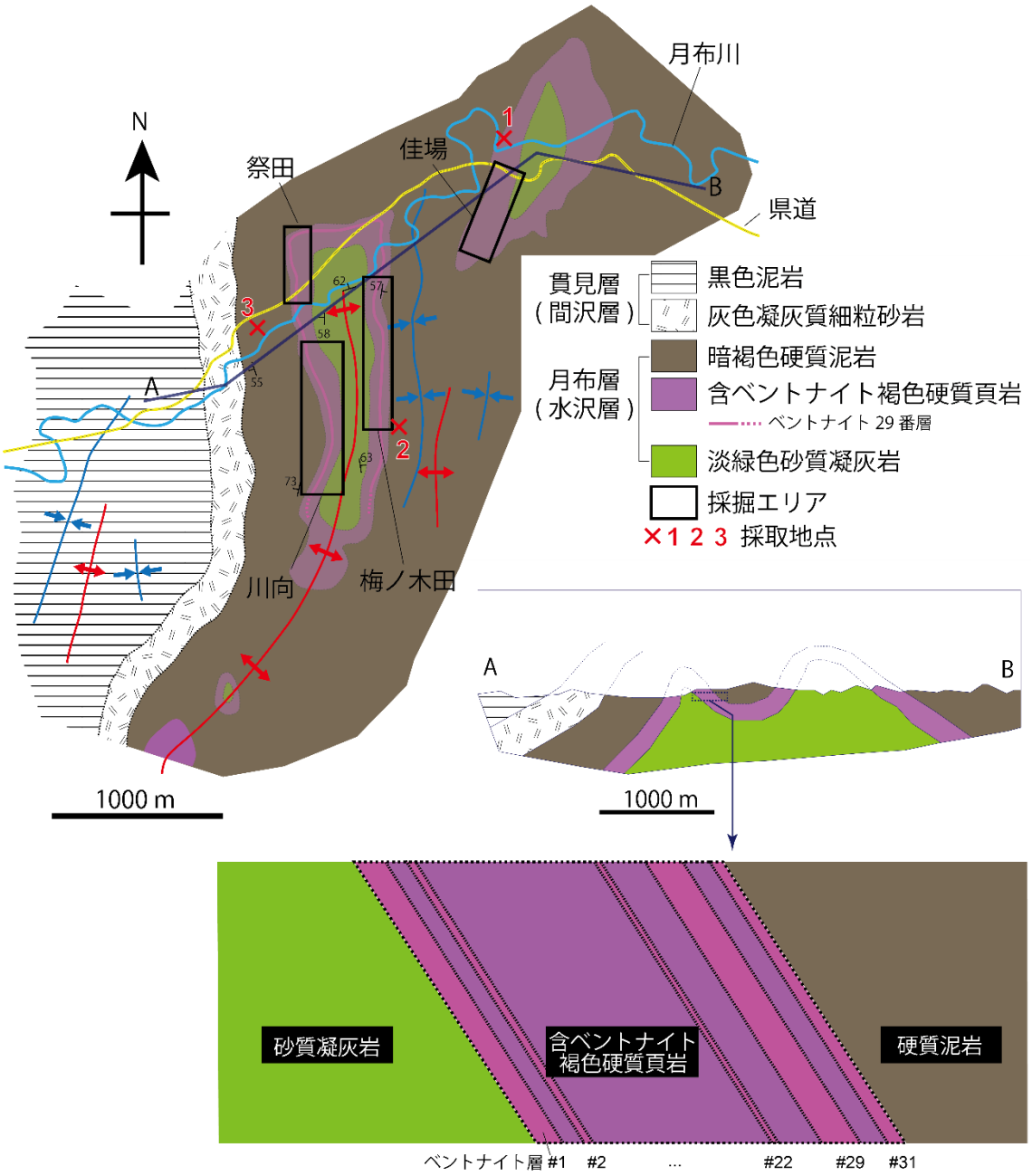


図 4-1　月布ベントナイト鉱床周辺地質図

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）。

4.1.2 試料

本研究では、2020 年 12 月及び 2021 年 11 月、2022 年 7 月（2022 年度追加分）の計 3 回の野外調査を通して採取したものを対象とした。図 4-1 上で×印を付けた 3 地点のうち、（採取地点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（採取地点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（採取地点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。

2021 年度報告書に記載済みの採取試料については省略し、2022 年度追加採取分についてのみ表 4-1 に示す。

表 4-1　2022 年度の追加採取試料

サンプル名	露頭位置	説明
TKN-29-01	月布梅ノ木田坑の新通気坑（採取地点２）29 番層上盤側から約 0.6 m	
TKN-29-02	月布梅ノ木田坑の新通気坑（採取地点２）29 番層上盤側から約 1.8 m	
TKN-29-03	月布梅ノ木田坑の新通気坑（採取地点２）29 番層上盤側から約 3.0 m	
TKN-29-04	月布梅ノ木田坑の新通気坑（採取地点２）29 番層上盤側から約 4.2 m	
TKN-29-05	月布梅ノ木田坑の新通気坑（採取地点２）29 番層上盤側から約 5.8 m	
TKN-29-06	月布梅ノ木田坑の新通気坑（採取地点２）29 番層上盤側から約 7.0m	
TKN-0001	月布川沿い地表露頭（採取地点１）	最表面の褐色部分
TKN-0002	月布川沿い地表露頭（採取地点１）	褐色から青灰色に遷移する部分
TKN-0003	月布川沿い地表露頭（採取地点１）	青灰色を呈する部分

追加試料のうち、29 番層内での鉱物組成の変化を検証するための試料として、29 番層にて、下盤側から上盤側にかけて等間隔に 6 か所から少量の原鉱石を採取した。（坑道壁面に支保工が概ね 1.2m 間隔で据え付けられているので、支保工間の中心付近からそれぞれ採取）上から順に 29-01, 02, … 06 とラベリングした。

月布川沿いの地表露頭では TKN-0001, 0002, 0003 の 3 試料を採取した。2020 年 12 月に事前調査した際と比べて、変色していないベントナイト部分の露出が悪かったため、露頭表面の変色した部分（TKN-0001）を掘り進めて、より深部の漸移部分（TKN-0002）と青灰色の部分（TKN-0003）をそれぞれ採取した（図 4-2）。

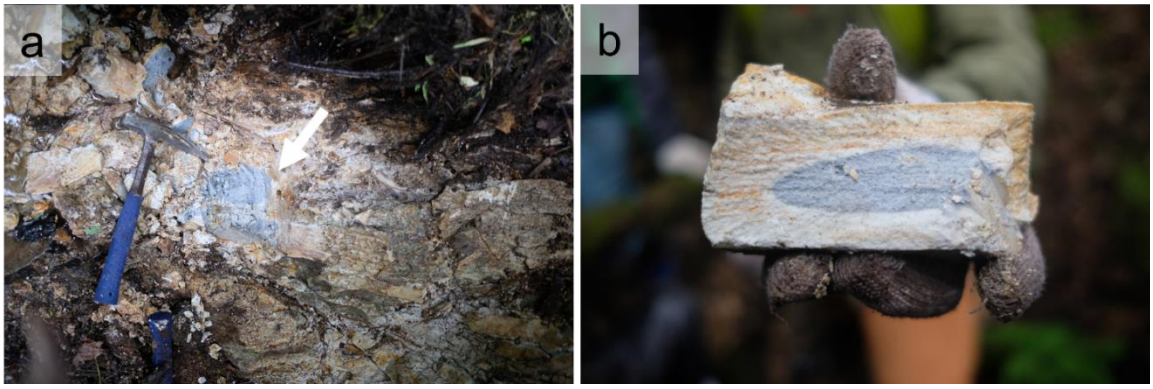


図 4-2　地表のベントナイト露頭（採取地点 1）の産状

(a)採取位置および (b) TKN-0002 の試料外観

4.1.3 分析方法

<u>粉末 X 線回折（XRD）分析</u>

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。粉末 X 線回析分析装置(Rigaku, MiniFlex)を用いて、Co 管球（40 kV、15 mA）、$2\theta = 3 \sim 90°$ 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 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 µl 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と同様に粉末 X 線回析分析装置(Rigaku, MiniFlex)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、Co 管球（40 kV、15 mA） で測定した。

③ GK テスト

ベントナイト層に含まれるスメクタイトのバイデライト化の程度を調べるため、Greene-Kelly test を行った。Greene-Kelly test は、Greene-Kelly (1953)を参考に次のような手順で行った。まず水簸によって粒径 0.2-2 µm の画分を抽出した。続いて抽出した試料を 1M LiCl 水溶液に浸し 1 晩振とうさせ、遠心分離機にかけ固液分離した（Li 飽和処理)。次に過剰な塩を取り除くため、イオン交換水を加えて 15 分程度撹拌させ、再び遠心分離機にかけて固液分離をした（洗浄)。洗浄は 3 回繰り返した。続いて試料約 10 mg を蒸留水 300 µL に懸濁させて石英ガラスに塗り、常温で乾燥させて定方位試料を作製した。その後、スライドガラスをマッフル炉に入れ、250℃で一晩加熱した。続いてスライドガラスをグリセロ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 105℃の恒温炉に一晩静置させて蒸発したグリセロールに晒した（グリセロール処理、Vapor 法)。そして XRD 分析によって底面間隔を調べた。XRD の測定の条件は定方位試料と同様である。

<u>薄片試料の作成および光学顕微鏡による観察</u>

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。

試料に含まれる鉱物の産状と鉱物種を確認するため、偏光顕微鏡（Nikon, ECLIPSE LV100N POL）を用いて観察を行った。

走査型電子顕微鏡（SEM）による観察

ベントナイト原鉱石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。SEM 観察には JEOL 製の JSM-IT200 を用い、加速電圧 15 kV、動作距離 10.8 mm にて二次電子像・反射電子像の撮影およびエネルギー分散型 X 線分光（EDS）による組成分析を実施した。なお、観察に先立ち、鏡面研磨薄片の表面に導電性を確保するために炭素コーティングを施した。

さらに、後述するようにシリカ微粒子の起源を検証するために、カソードルミネッセンス（CL）法による観察を行った。CL 測定には別の走査型電子顕微鏡（JEOL, JSM-7501）を用いた。加速電圧 15 kV、照射電流量 1.0 nA で観察し、CCD 検出器を用いて、波長範囲 550±300 nm、スリット幅 1000 μm、グレーティング 300-500 nm で測定した。露光時間は 1 秒で、スペクトルの質に応じて積算回数を 1 回、または 5 回に設定した。

CL 測定用には昨年度に SEM で観察済みの梅ノ木田側 29 番層上部および 31 番層のベントナイト原鉱石から作成した鏡面研磨薄片を供した。鏡面研磨薄片を 7mm 角に細断し、鏡面研磨時に生じる表面のダメージ層を取り除くため、クロスセクションポリッシャ（JEOL, IB-19520CCP）による仕上げ研磨を行った。加速電圧を 4.0kV から 2.0kV に下げつつ、3.5 時間 Ar ガスを照射した。仕上げ研磨後、カーボンコーターで 3.0nm 程度の導電膜を付与した。

加圧酸分解および ICP-MS による微量元素の測定

試料中に含まれる難溶解性の微量元素の濃度を調べるために、ベントナイト原鉱石の全分解および質量分析計による濃度測定を実施した。

粉末の標準岩石試料 JR-2、JA-1、JG-1 を、PTFE 容器に 30 mg 秤量し、Mg 標準溶液を (Mg+Ca)/Al がモル比で 1 以上になる量添加した（本研究では 2 mL 添加）。続いて、HNO_3 を 1 mL、HF を 1 mL 加えた。この容器をさらに大きい PTFE 容器に入れたものをステンレス容器に入れ密閉したのち、205℃に設定したオーブンで 3 日間放置した。3 日後、容器を開封し、$HClO_4$ を 0.5 mL 添加し、ホットプレートに乗せて乾固させた。温度は、120℃

(12 時間)-140℃(12 時間)-165℃(12 時間)-190℃(12 時間)の順で変化させた。多段階乾固を行ったのは、微量元素の共沈を引き起こすフッ化物を効率的に分解するためである（Yokoyama et al., 1999）。乾固後、HNO_3 を 1 mL、$HClO_4$ を 0.5 mL 順に添加したものを再度ホットプレートに乗せ、同様の温度と時間で乾固させた。2 度目の乾固後、超純水を 1 mL、HNO_3 を 1 mL、HCl を 1 mL、HF を 50 μL 順に添加し、最後に 120℃に設定し 2 時間ホットプレートで乾固させた。

加圧酸分解した試料中の微量元素濃度を測定するために、誘導プラズマ質量分析（ICP-MS）を行った。装置は Thermo Fisher 製 iCAPQc を用いた。今回は溶かした標準岩石試料を測定した値を検量線として使用するため、標準溶液は使用しなかった。測定対象元素によっては数オーダー程の大きく濃度が異なる元素も含まれるため、試料・標準岩石試料共に 10 倍、100 倍の希釈率のものを 3 つずつ調整し、1vol% HNO_3（関東化学製超高純度試薬）原液を加えて酸締めを行い、測定用の溶液を作成した。

<u>酸素水素同位体比の測定</u>

含水鉱物中の酸素・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。

2021 年度には月布産ベントナイト原鉱石に含まれるモンモリロナイトの酸素・水素同位体比の測定を行い、うち水素同位体比については既に結果が得られたが、酸素同位体比の測定に関しては酸素を効率的に CO ガス化するためのフッ素化合物との反応性を向上させる必要性が示された。同時に、助燃材となる Ni/C の添加や封入前に試料とポリテトラフルオロエチレン（PTFE）を均質に混合させる前処理を追加することで反応性・酸素の収率が向上したことから測定試料とフッ素化合物の配合の仕方に改善の余地があることも示された。そこで、更なる反応性の向上を検証するために、2022 年度は様々なフッ素化合物（昨年度用いた PTFE に加え、LiF, NaF, KF, CaF_2, BaF_2, AlF_3 の計 7 種類）との組み合わせによる酸素同位体比測定を行い、反応性や収率、前処理にかかる作業性を比較した。

① 測定用試料の前処理

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。

酸素同位体比測定用の試料のうち Si を含む石英とスメクタイトについては、試料中の O に対して F のモル比が 1 になるように乾燥重量を秤量した試料およびフッ素化合物をメノウ乳鉢中で摩砕・混合した。さらに、PTFE を用いた Menicucci et al. (2013)と異なり、KF（Gehre et al., 2003）や LiF・CaF_2（Kirschner&Sharp, 1997）などの炭素を含まないフッ素化合物を用いる場合は炭素の供給源が別に必要なため、グラファイト粉末を O に対して C のモル比が 1 以上（1.1~1.4）の過剰量になるように混合した。

② 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。酸素同位体の標準試料は、NBS18(calcite, $\delta^{18}O_{VPDB}$ = -23.0‰、換算して $\delta^{18}O_{VSMOW}$ = 7.15‰)、IAEA-601(benzoic acid, $\delta^{18}O_{VSMOW}$ = 23.14‰) 、IAEA-602(benzoic acid, δ

$^{18}O_{VSMOW}$ = 71.28‰)、NBS28(quartz, $\delta^{18}O_{VSMOW}$ = 9.6‰)を用いた。なお、NBS28はフッ素化合物の混合による反応性の検証に用いるため、検量線の作成には用いず、NBS18・IAEA-601・IAEA-602 の 3 点で作成した検量線を採用した。

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測定が主流であったが、PTFE を使う方法はより安全かつ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。

前述の通り吸着水の影響を最小限に抑えるため、試料をるつぼに入れ恒温炉で220℃で 4 時間以上加熱した上で銀カプセルに秤量・封入した（Kanik et al., 2021）。なお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しつつ、酸素重量が 0.1 mg になるように秤量した。封入した試料は、再度 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-601 および 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。

4.2　2022 年度の成果内容

4.2.1 各ベントナイト原鉱石の鉱物組の特徴

2022 年度追加試料のうち、29 番層から得られたベントナイト原鉱石 6 試料の XRD プロファイルを図 4-3 から図 4-6 に示す。これら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（斜プチロル沸石・方沸石）などのピークも確認される。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、下盤側の TKN-29-05 および TKN-29-06 ではスメクタイトが大きく減少している。このことは露頭において、29 番層の下盤側がベントナイトというよりは砂質凝灰岩に近い岩相を呈する観察事実と調和している。また、これら下盤側の 2 試料では方解石の存在も明確に確認できる。沸石相に着目すると、上盤側の TKN-29-01 および TKN-29-02 では低温側の沸石相である斜プチロル沸石が含まれる一方で、TKN-29-03 以降の下盤側ではより高温型の沸石相である方沸石が含まれている。

EG 処理で約 17 Åまで膨潤する挙動（図 4-4）や 2 八面体型を示す 060 反射（図 4-5）と、後述する SEM-EDS での組成分析の結果から、これらのスメクタイトは全てモンモリロナイトである。GK テストでは、6 試料のいずれも 9.7 Å付近にピークがシフトすることからモンモリロナイトのバイデライト化の程度に差がないことが分かる（図 4-6）。一方で、不定方位 XRD の結果では同一の相対湿度下で測定を行ったにも関わらず、モンモリロナイトの 001 反射のピーク形状に違いが認められる。1 層水和状態（～12.3 – 12.7 Å）と 2 層水和状態（～15.0 – 15.8 Å）の比率が異なっているためと考えられる（Ferrage et al., 2005）。したがって、後述する SEM-EDS での分析ではモンモリロナイトの化学組成に明瞭な差は認められなかったものの、上盤側と下盤側で層間陽イオン組成が異なっている可能性が考えられる。

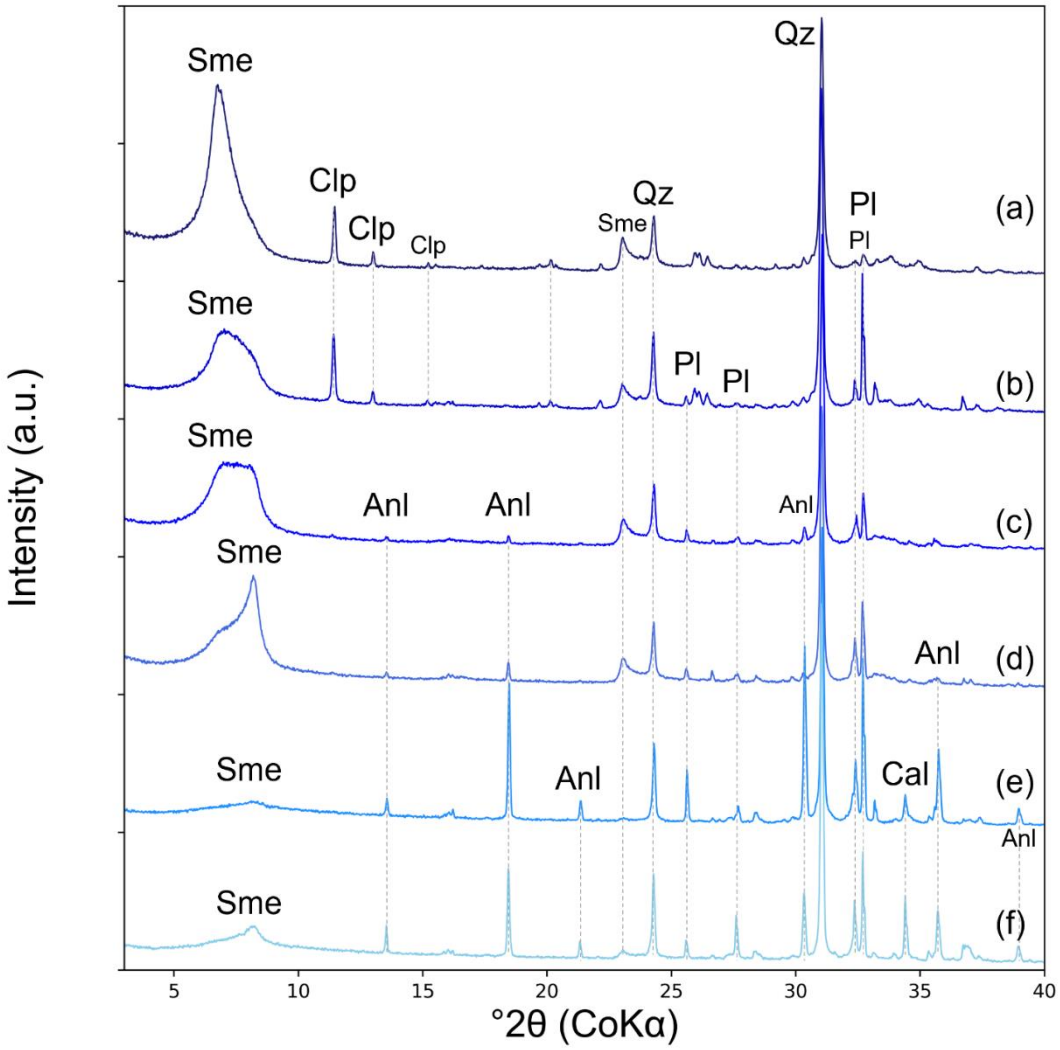


図 4-3　29 番層の試料の不定方位 XRD プロファイル

(a)から(f)にかけて連番で TKN-29-01 から TKN-29-06。Sme：スメクタイト、Qz：石英、Clp：斜プチロル沸石、Anl：方沸石、Cal：方解石

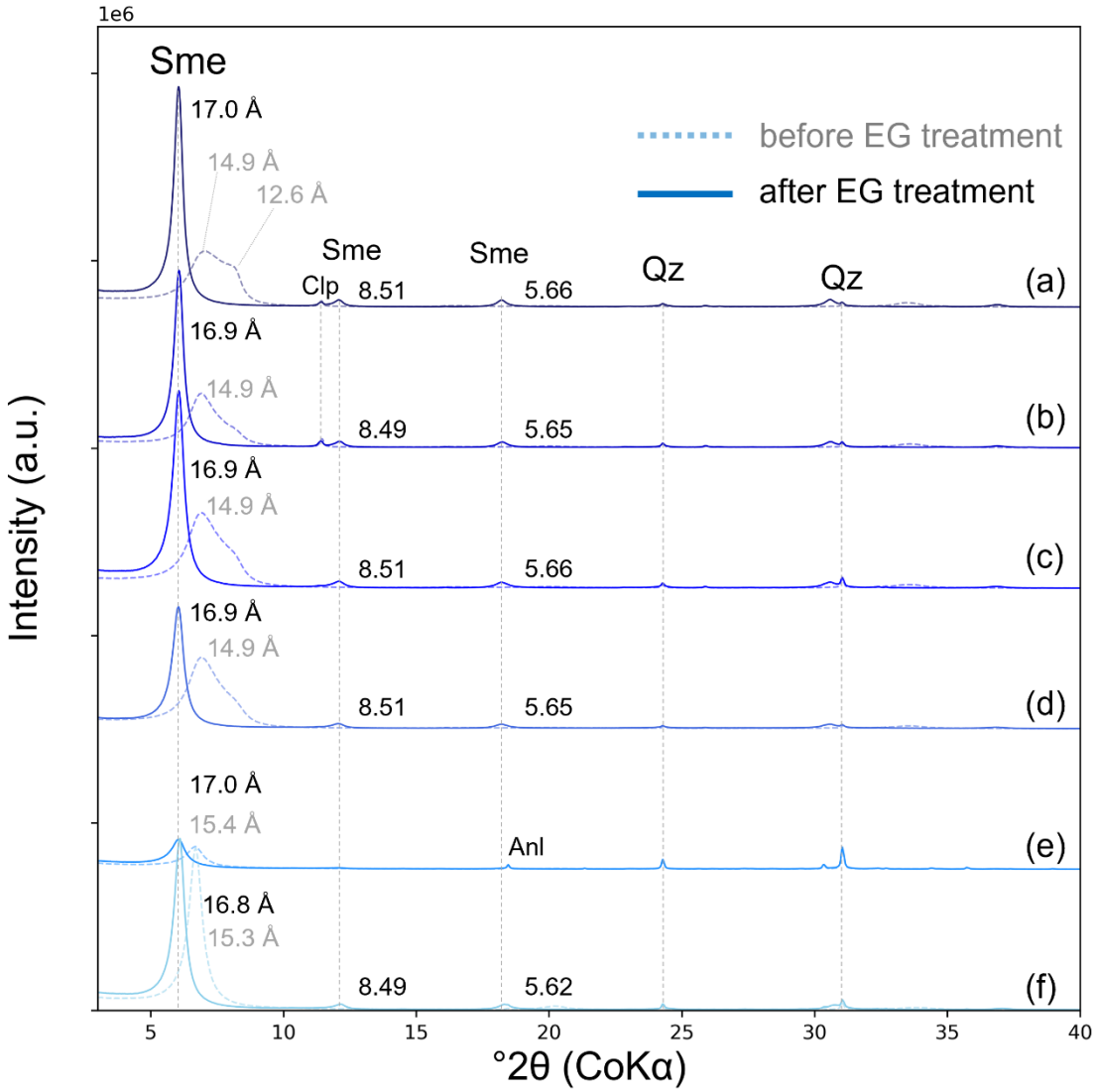


図 4-4　29 番層の試料の定方位 XRD プロファイル

(a)から(f)にかけて連番で TKN-29-01 から TKN-29-06、点線が EG 処理前、実線が EG 処理後を指す。スメクタイト由来の反射ピークについては d 値（単位：Å）を併記。Sme：スメクタイト、Qz：石英、Clp：斜プチロル沸石、Anl：方沸石

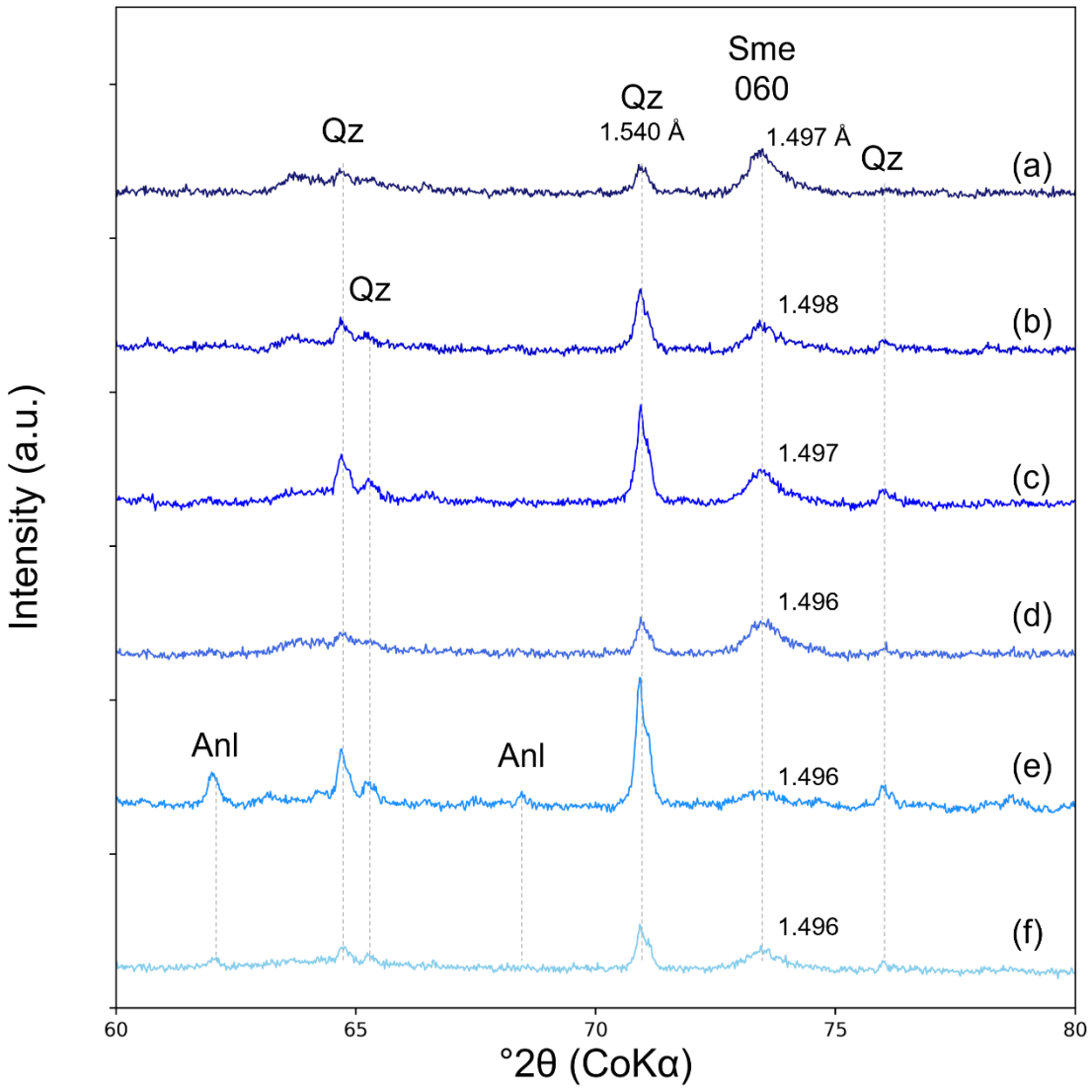


図 4-5　29 番層の試料の定方位 XRD プロファイル_060 反射

(a)から(f)にかけて連番で TKN-29-01 から TKN-29-06、反射ピークについては d 値（単位：Å）を併記。Sme：スメクタイト、Qz：石英、Anl：方沸石

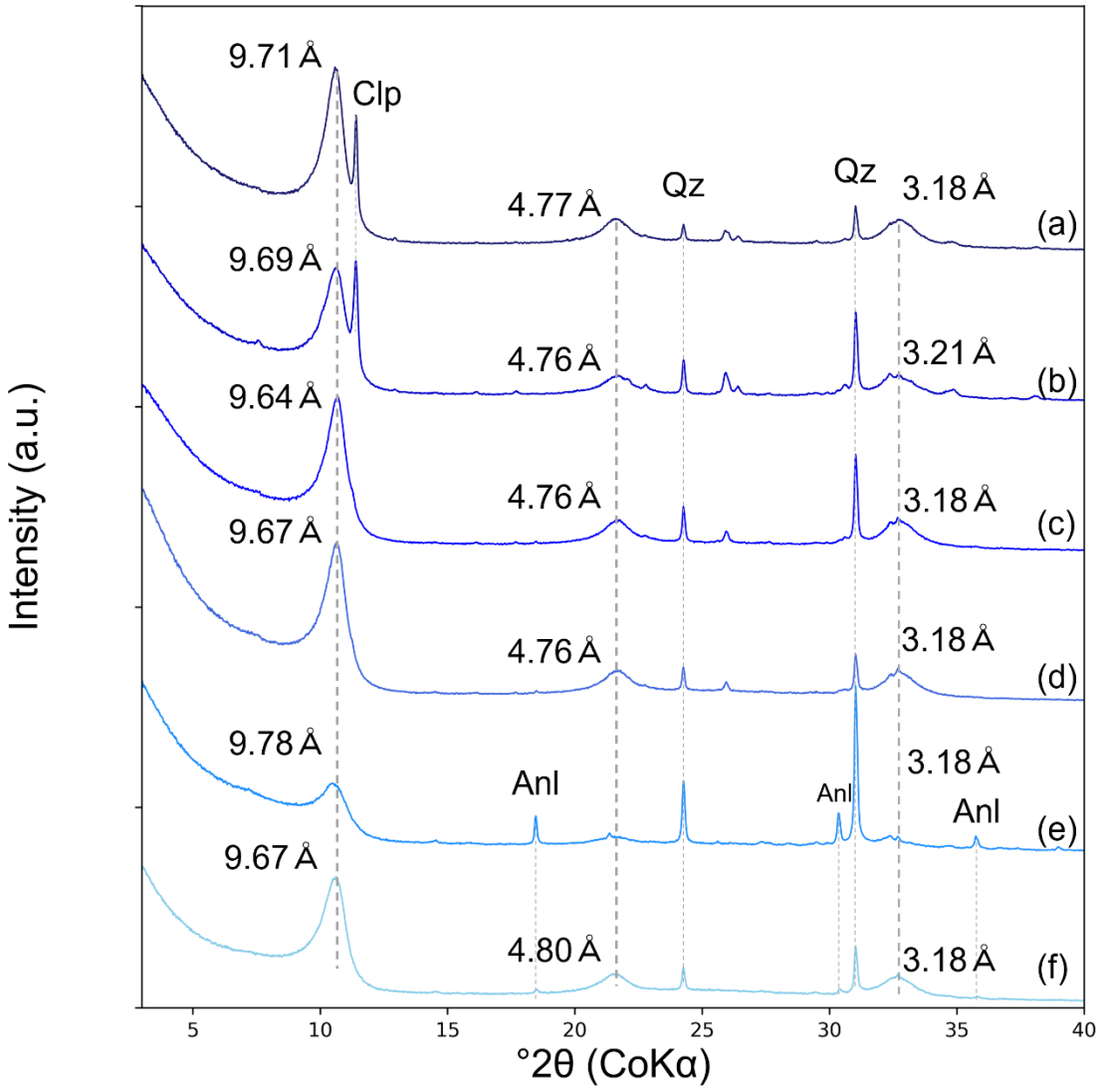


図 4-6　29 番層の試料の GK テスト後の定方位 XRD プロファイル

(a)から(f)にかけて連番で TKN-29-01 から TKN-29-06。スメクタイト由来の反射ピークについては d 値（単位：Å）を併記。Sme：スメクタイト、Qz：石英、Clp：斜プチロル沸石、Anl：方沸石

次に、2022 年度追加試料のうち、地表露頭から得られたベントナイト原鉱石（TKN-0001 および 0003）の XRD プロファイルを図 4-7 と図 4-8 に示す。これらベントナイトの試料はスメクタイトと石英が主体で、若干量の長石が見られる。褐色を呈する TKN-0001 と青灰色を呈する TKN-0003 では酸化鉄あるいは水酸化鉄鉱物の存在量に違いがあると見込まれるが、XRD プロファイル上では明瞭な差は見られなかった。後述する SEM 観察でも確

認される通り、Fe（水）酸化物は微量しか含まれないためだと考えられる。坑内試料と比べると不定方位・定方位 XRD プロファイルのどちらでもモンモリロナイトの 001 反射ピークは左右対称かつ鋭い単独ピークを呈している。これはモンモリロナイトが地表水による影響で Ca 型化しており、相対湿度 35%以上の広い範囲で 2 層水和状態（d_{001} = 14.97 – 15.43 Å）をとる Ca 型モンモリロナイトの性質を反映していると解釈される（Ferrage et al., 2005）。

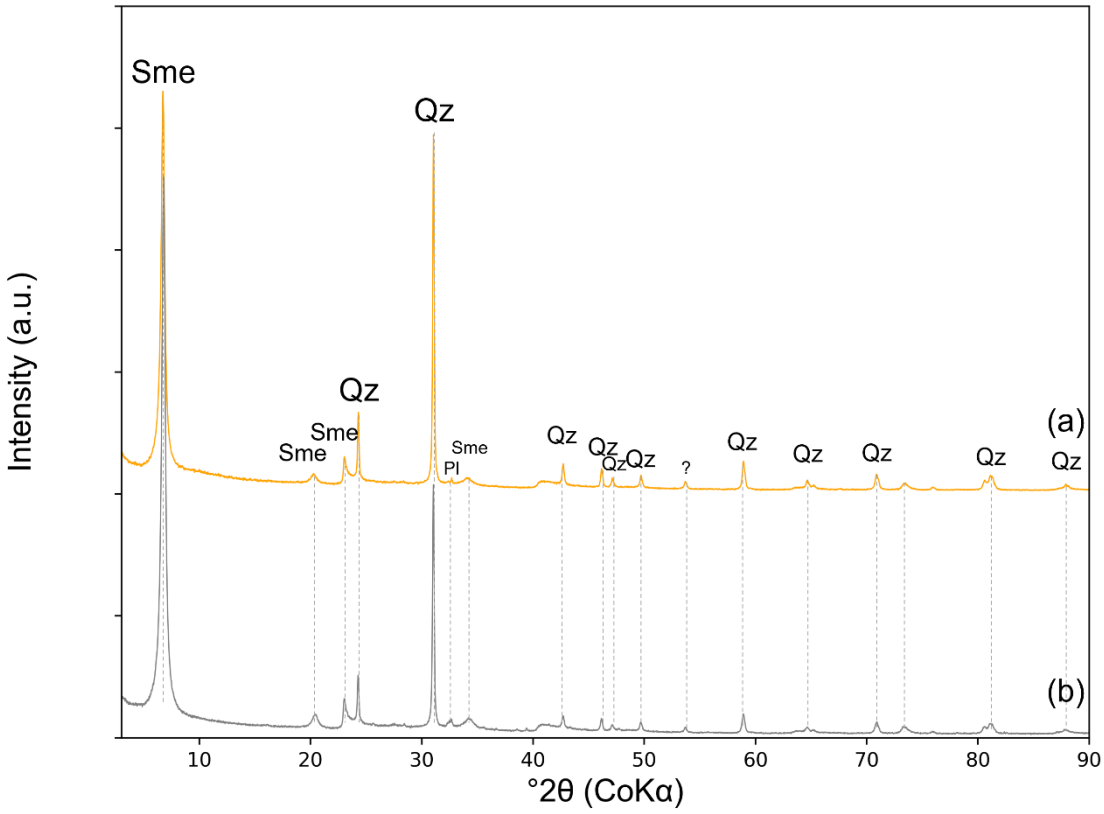


図 4-7　地表露頭のベントナイト試料の不定方位 XRD プロファイル

(a)TKN-0001 および(b)TKN-0003。Sme：スメクタイト、Qz：石英

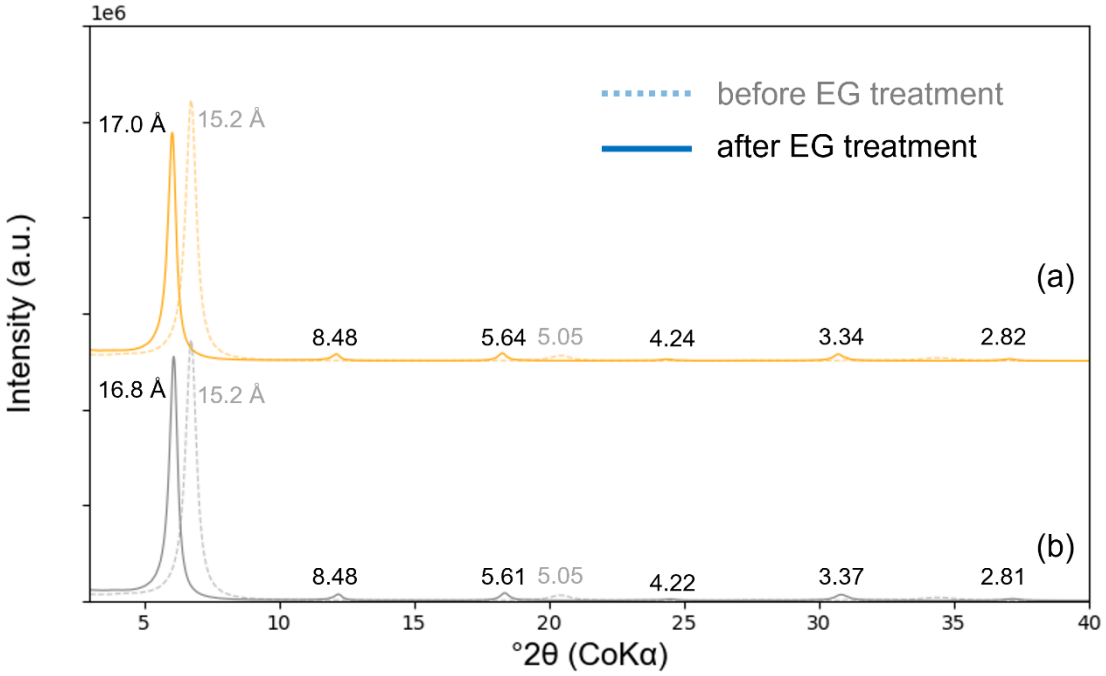


図 4-8　地表露頭のベントナイト試料の定方位 XRD プロファイル

(a)TKN-0001 および(b)TKN-0003。点線が EG 処理前、実線が EG 処理後を指す。スメクタイト由来の反射ピークについては d 値（単位：Å）を併記。

4.2.2 各ベントナイト原鉱石の岩石組織

乾式研磨薄片を光学顕微鏡および SEM で観察することで、ベントナイト層中の主要鉱物の産状を比較した。

偏光顕微鏡下で TKN-29-01、29-03、29-05 の 3 試料の組織を比較すると、下盤側の試料ほど火山砕屑性の石英や長石の粒径が大きく、長石の自形性も高くなる傾向が読み取れる（図 4-9）。また、TKN-29-05 では、間隙を充填するように方解石の析出が見られ、不定方位 XRD の結果と整合している。濃褐色を呈するモンモリロナイトが占める面積も TKN-29-01>03>05 の順に変化していて、これも不定方位 XRD の結果と整合している。

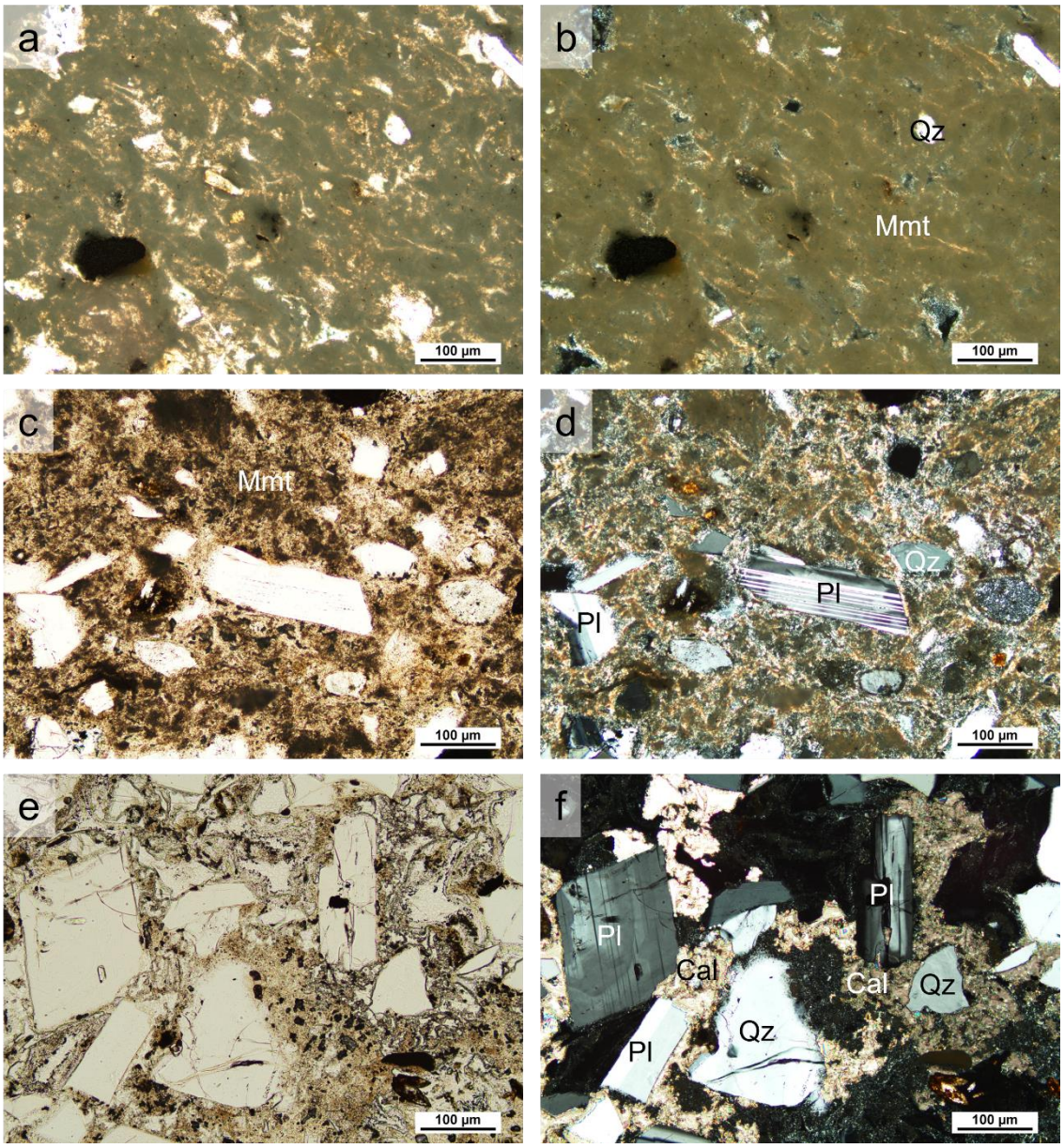


図 4-9　29 番層ベントナイト原鉱石の偏光顕微鏡像

(a, b)TKN-29-01、(c, d) TKN-29-03、(e, f) TKN-29-05 の各試料について左列がオープンニコル、右列がクロスニコルで観察。 Mmt : モンモリロナイト、Qz : 石英、Pl : 斜長石、Cal : 方解石

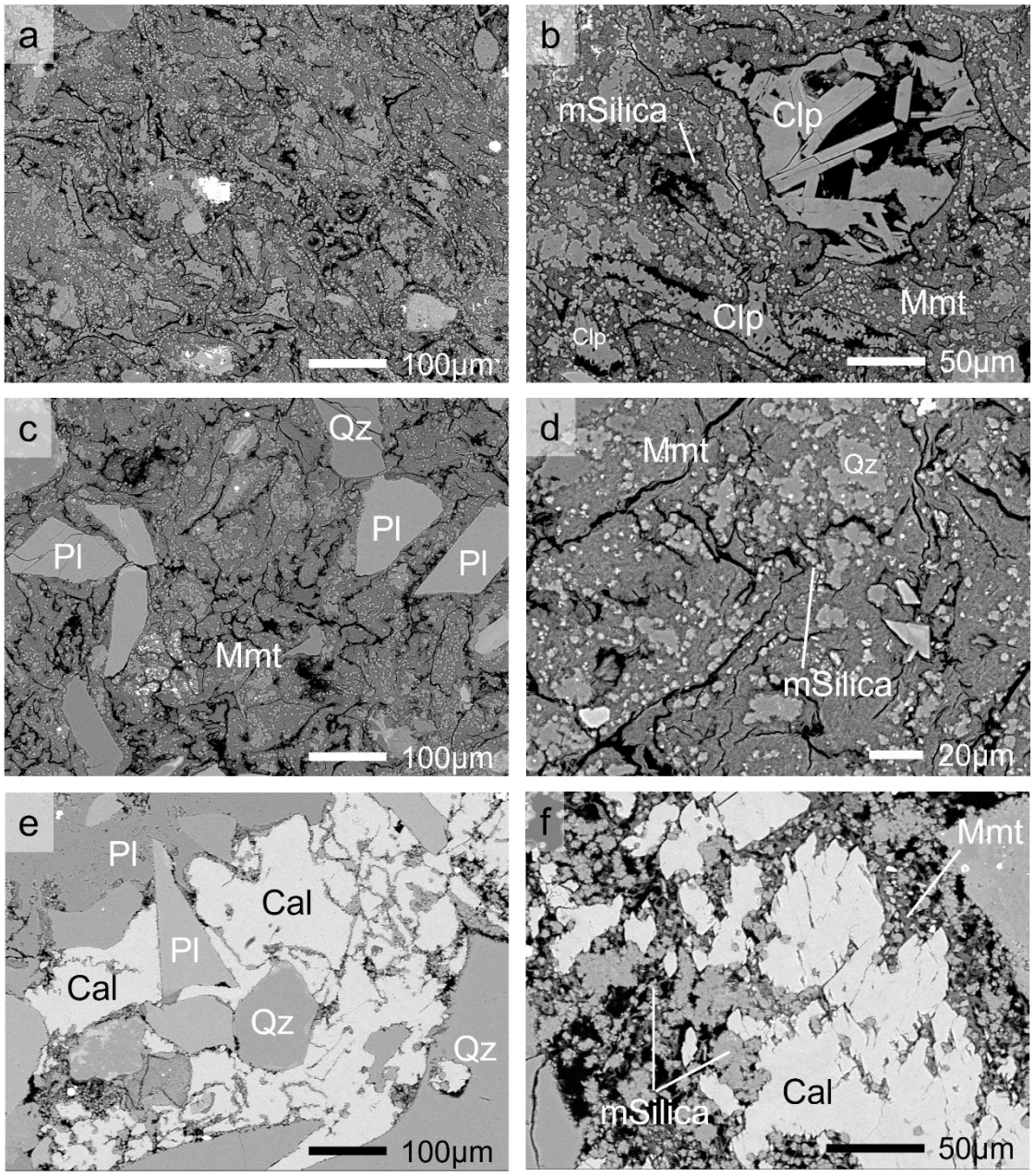


図 4-10　29 番層ベントナイト原鉱石の SEM 反射電子像

(a, b)TKN-29-01、(c, d) TKN-29-03、(e, f) TKN-29-05。 Mmt：モンモリロナイト、Qz：石英、Pl：斜長石、Clp：斜プチロル沸石、Cal：方解石、mSilica：シリカ微粒子

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-29-05 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 4-10 e,f)。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。昨年度観察したベントナイト原鉱石や TKN-29-01 および TKN-29-03 では、このシリカ微粒子の周囲がモンモリロナイトで充填されている組織が普遍的に観察されている。一方、今回観察した TKN-29-05 ではシリカ微粒子の周囲に僅かにモンモリロナイトが付着しているものの、周囲に隙間が広がっているか、もしくは方解石が充填している組織を示す。このことから、TKN-29-05 においてはシリカ微粒子だけではなく、方解石もセメント物質として機能していると考えられる。そこで、これらのセメント物質の生成の前後関係を明らかにするためにシリカ微粒子および方解石の産状を偏光顕微鏡および SEM で観察した（図 4-11）。TKN-29-05 に見られる火山ガラス部分は偏光顕微鏡で観察すると、透明な部分が少なく、特に縁の部分が褐色の点で汚れた産状を呈する。また SEM で観察すると、ガラス中の亀裂に沿ってシリカ微粒子が析出している。偏光顕微鏡で褐色を呈する部分はこのシリカ微粒子の周囲に付着しているモンモリロナイトに相当していると考えられる。また、シリカ微粒子は方解石の亀裂を埋めるようにも分布している。

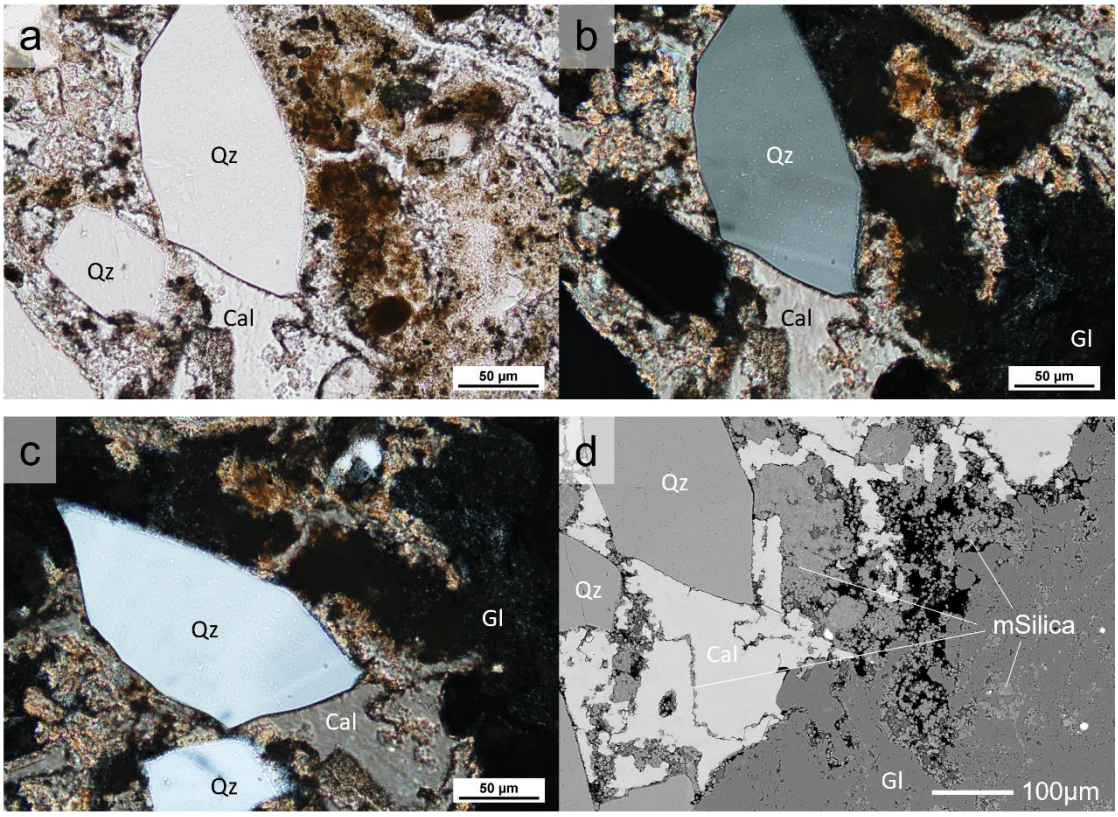


図 4-11　TKN-29-05 における火山ガラス・シリカ微粒子・方解石の産状

(a)偏光顕微鏡のオープンニコル、(b)はクロスニコルでの観察像、(c)は(b)を 45°回転して撮影。(d)は SEM の反射電子像。Gl：火山ガラス、Qz：石英、Cal：方解石、mSilica：シリカ微粒子

地表露頭のベントナイト試料について（TKN-0002）も同様に SEM による観察を行った（図 4-12）。TKN-0002 は、黄鉄鉱が見られないことを除けば、主要鉱物は地下坑内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。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。

2021 年度に観察した地表露頭の試料（TKNS-01 および 02）と同様に、石英・長石ともに 100 μm 前後の比較的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。TKN-0002 は肉眼で淡褐色を呈する部分が確認されており、これは Fe の水酸化物あるいは酸化物を反映している。ただし、その存在量は XRD 分析では確認が取れない僅かな量で、SEM 観察でも粗大石英やシリカ微粒子の周囲の隙間に僅かに点在するのみである。

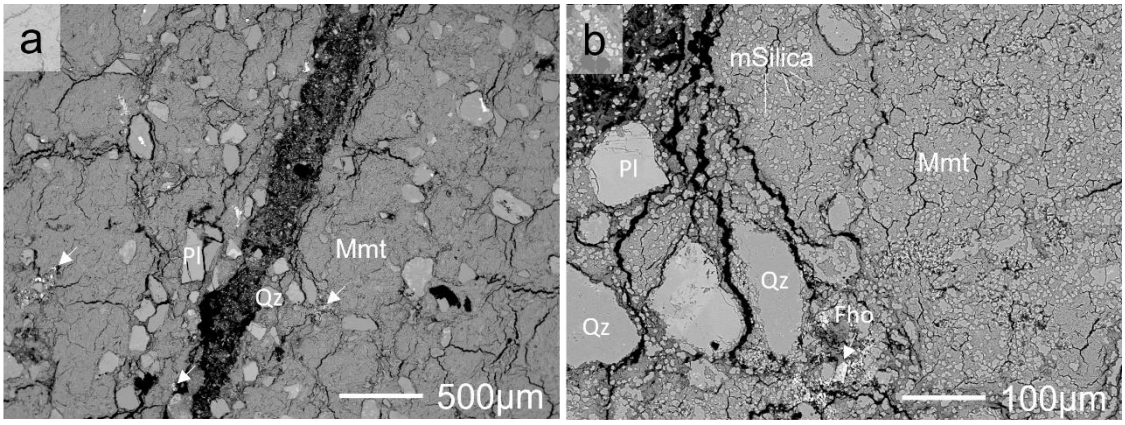


図 4-12　地表露頭のベントナイト原鉱石(TKN-0002)の SEM 反射電子像

(a, b)TKN-29-01、(c, d) TKN-29-03、(e, f) TKN-29-05。 Mmt：モンモリロナイト、Qz：石英、Pl：斜長石、Clp：斜プチロル沸石、Cal：方解石、mSilica：シリカ微粒子、Fho：鉄（水）酸化物。(a)中で僅かに点在している Fho の位置を白矢印で示した。

4.2.3 カソードルミネッセンス観察による SiO2 微粒子の起源推定

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、その粒子の起源や形成メカニズムを明らかにするためには SEM による観察だけでは不十分であると考えられる。そこで、粗大石英およびシリカ微粒子を対象に CL 法による測定を行った。

CL 法では電子線を固体に照射することで励起・発光する可視光領域のスペクトルを得る。粗大石英粒子から得られる CL スペクトルは短波長側の青波長領域に強い 2 つのピークを持つ一方、シリカ微粒子の方ではより緩やかな形状と赤波長領域にピークを持つという明確な違いが観察された（図 4-13)。様々な成因の石英について CL スペクトルの特徴をまとめた先行研究（Boggs & Kinsley, 2006）では、火山岩由来の石英は一般的に青波長領域に強いピークを示し、より低温・低圧環境で形成される石英は赤波長領域にピークを持つ傾向があるとしている。また、シリカ微粒子のスペクトルは現在の海底下の頁岩中で形成されている微細石英の特徴と類似している（Thyberg et al. 2010; Peltonen et al. 2009)。したがって、粗粒の石英は火山岩由来である一方、シリカ微粒子は同じ火山灰にもともと細かい粒径のものとして混在していた訳ではなく、その後の続成過程で形成されたものと解釈される。

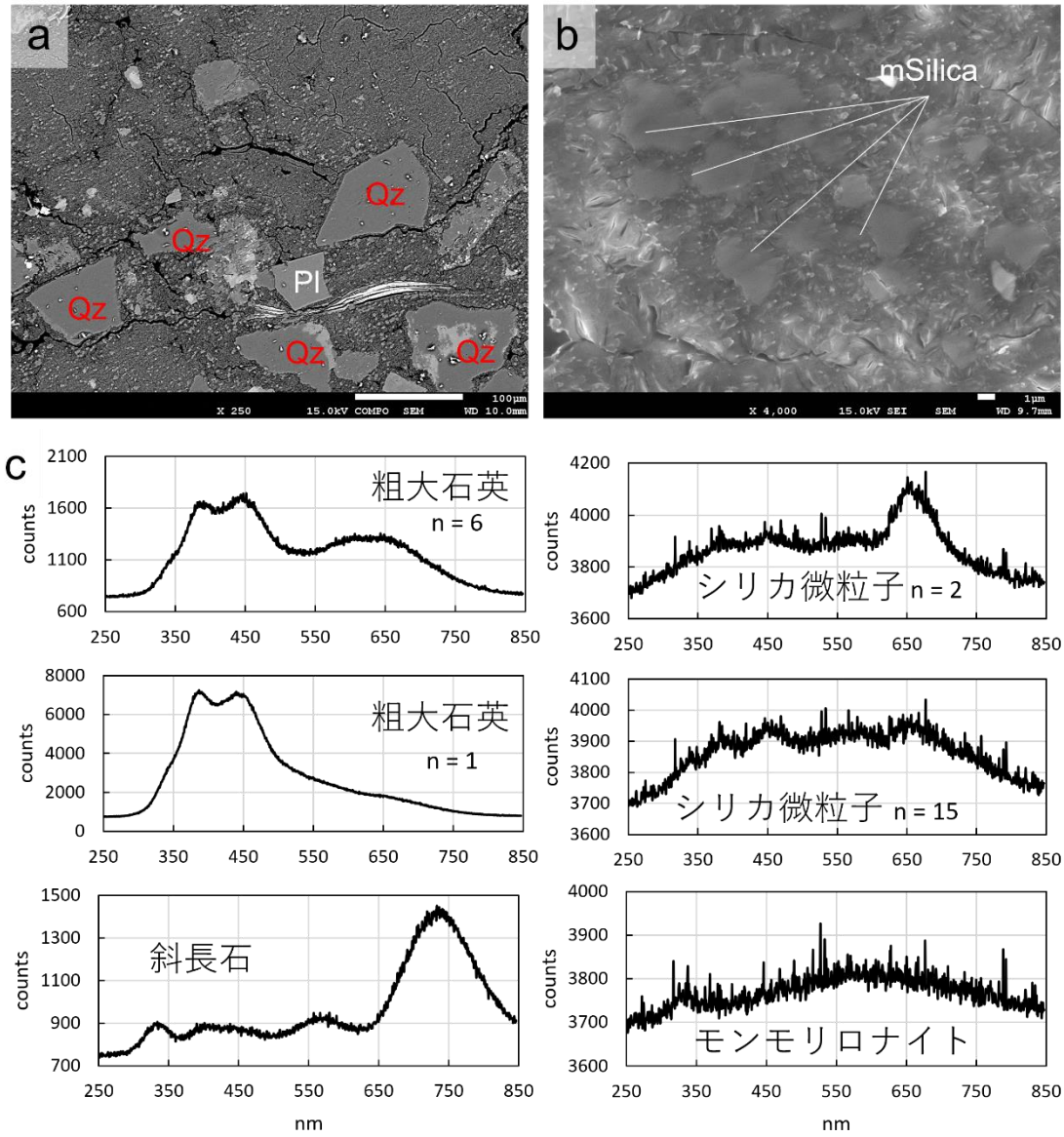


図 4-13　カソードルミネッセンスを用いた観察例

(a,b)は SEM の二次電子像。(c)は各粒子から得られた代表的なスペクトル形状で、左側が上段から粗大石英、粗大石英、斜長石、右側が上段からシリカ微粒子、シリカ微粒子、モンモリロナイトを示す。

4.2.4 難溶解性元素による母岩の推定

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）。2021 年度は、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/TiO_2 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果、8 番層を除くベントナイト原鉱石で流紋岩質からデイサイト質の母岩（火山灰）を由来することが示された。2022 年度は 29 番層の層内で見られる鉱物組成や産状の不均質性が母岩の不均質性によるものであるかを検証するために、難溶解性元素の濃度パターンを比較した（Kidar et al., 2021)。難溶解性元素である High field-strength element（HFSE）の濃度（表 4-2）とパターンを図 4-14 に示す。上部大陸地殻の平均組成（UCC）の値で規格化した場合の元素パターンを確認すると、29 番層の 6 試料は類似したパターンをとり、隣接する頁岩（TKN-US05）や流紋岩の標準岩石試料（JR-2）とは明らかに異なっている。このことから、29 番層内でモンモリロナイトや火山ガラスの量に違いが見られた原因としては、出発物質の火山灰の化学組成によるものではなく、構成粒子の粒径（とそれに伴う空隙率）や堆積後に反応する海水との混合率に左右されているのではないかと考えられる。

表 4-2　29 番層ベントナイト原鉱石の HFSE 濃度

	TKN29-01	TKN29-02	TKN29-03	TKN29-04	TKN29-05	TKN29-06	JR-2*
Ti	0.17	0.22	0.25	0.30	0.24	0.32	0.07
Zr	185.75	196.39	184.18	211.29	122.72	168.20	96.30
Hf	5.17	5.40	5.07	5.89	3.34	4.81	5.14
Nb	8.36	9.15	8.85	8.06	6.03	6.93	18.70
Ta	0.78	0.77	0.73	0.72	0.59	0.69	2.29
Mo	1.12	2.51	1.19	1.61	1.22	2.27	3.35
W	0.15	0.40	0.74	0.71	0.94	1.17	1.80

*産業技術総合研究所地球化学標準物質データベース（https://gbank.gsj.jp/geostandards/igneous.html）

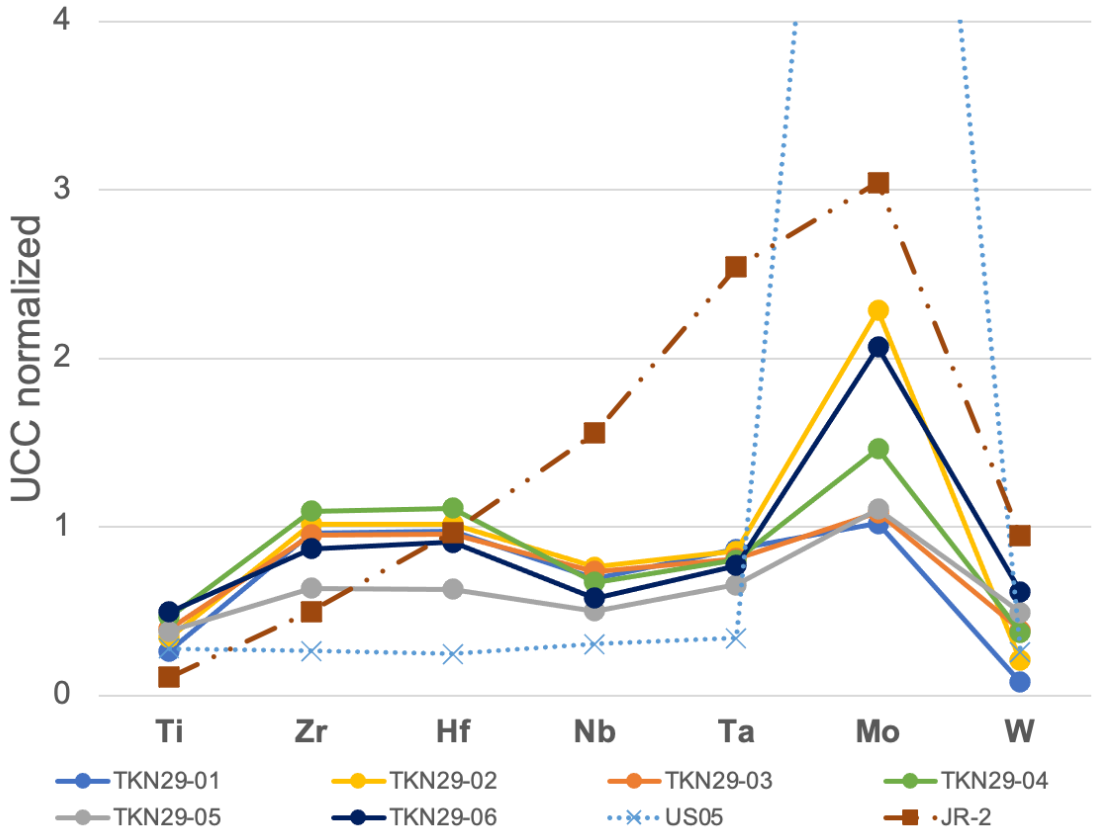


図 4-14　29 番層ベントナイト原鉱石の微量元素（HFSE）パターン

Rudnick and Gao (2014)の上部大陸地殻（UCC）の平均化学組成の値で規格化。比較のために梅ノ木田抗 31 番層上盤側の頁岩（TKN-US05）および流紋岩（JR-2）のパターンもプロットしている。

4.2.5 酸素同位体比測定

酸素同位体については、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（ワイオミングベントナイト中のモンモリロナイト、標準粘土試料）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（図 4-15）。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より効率的に起こすための条件を比較検討することにした。

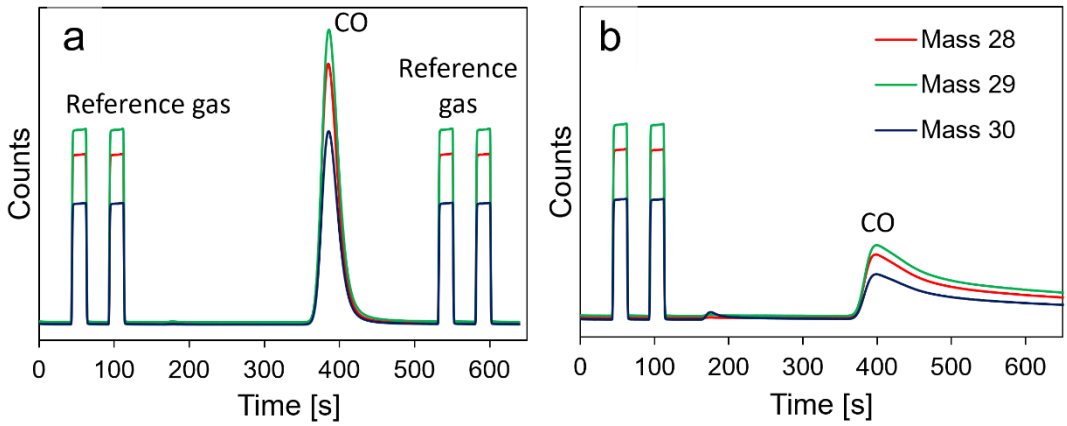


図 4-15　標準試料とケイ酸塩鉱物のマススペクトルの比較

(a) 標準試料（IAEA-602, 安息香酸）と(b) 石英（NBS28）と PTFE の混合試料。図の縦軸の電圧は、ガス発生量の指標となる。

2021 年度の分析で使用した PTFE に加えて、新たに加えた 6 種のフッ素化合物間でマススペクトルの形状を石英および SWy-1 でそれぞれ比較した（図 4-17 および図 4-16 図 4-17）。結果として　NaF と KF が反応性の面で相対的に優れており、次点で PTFE と LiF、そして CaF_2, BaF_2, AlF_3 では著しく低い反応性が確認された。最も反応性が高かった NaF との組み合わせでは、酸素の収率が石英で 58～69%、スメクタイトで 88~98%であった。PTFE を用いた 2021 年度の測定時と比較すると反応性・収率ともに改善が見られたものの、依然として標準試料と比べて CO ガスのピークがバックグラウンドレベルまで復帰するのに時間を要している。石英・SWy-1 のどちらについても CO ガスの積分区間を任意に延長する

ことで酸素収率が 100%近くに収束する傾向を示す。この収率を収束させた状態にて、酸素同位体比の値は SWy-1（繰り返し 5 回測定）で 16～22‰とばらついた値を示した。一方、Bauer et al. (2016)が報告している SWy-1 の酸素同位体比は $\delta^{18}O_{VPDB} = 18.6‰$である。

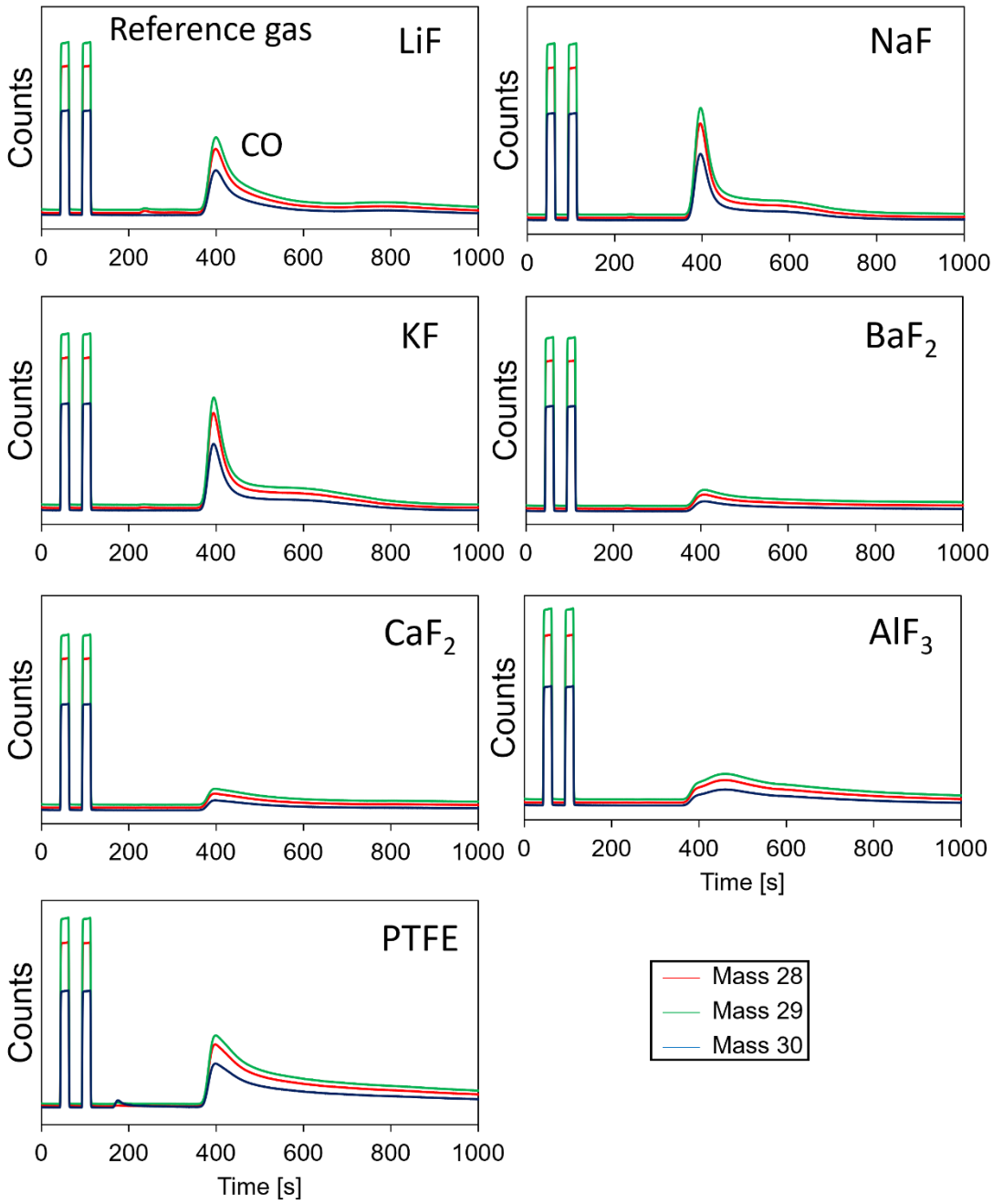


図 4-16　フッ素化合物の種類による石英の反応性の比較

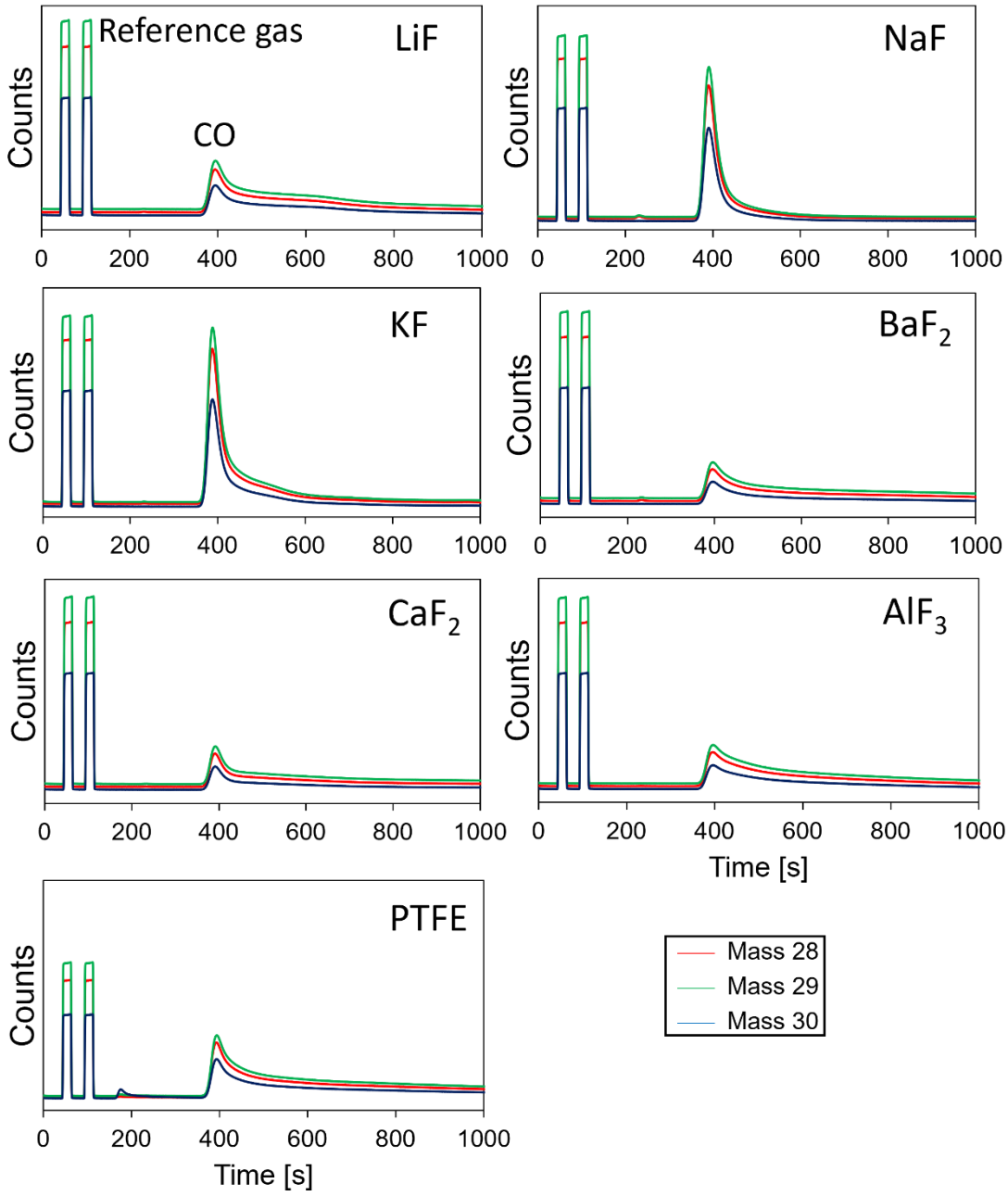


図 4-17　フッ素化合物の種類による SWy-1 の反応性の比較

また酸素同位体比測定の作業性に関わることとして、大気中の水蒸気の吸着が時間経過と共にどのように試料に影響するのかを検証するために、220℃の乾燥炉で 4 時間加熱した後に室温の大気（24.1~24.3℃、相対湿度 49.6%~51.9%）に晒した状態で銀カプセル内に適量秤量し、その後の重量変化を計測した（図 4-18）。KF と SWy-1 の混合物で急速な重量増加が確認された一方で、その他のフッ素化合物では大気中の水蒸気の吸着による影響は無

視できる。したがって、前述の反応性の高さを考慮すると NaF が最も測定に適したフッ素化合物と結論付けられる。

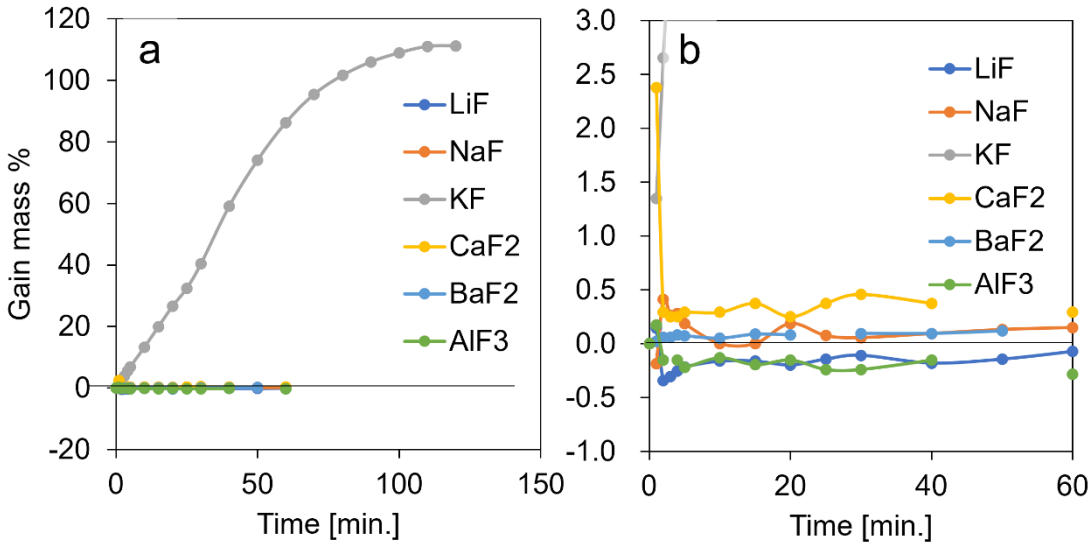


図 4-18　SWy-1 とフッ素化合物の混合物の乾燥炉から取り出し後の重量変化

4.3 得られた成果と課題、今後の展開

2021 年および 2022 年の 2 年間を通して、月布鉱山周辺のベントナイト原鉱石を多数観察・比較した結果、一部の試料において炭酸塩鉱物が確認されているものの、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普遍的なセメント物質はシリカ（SiO_2）の微粒子であろうと結論付けられる。また、カソードルミネッセンス法による結果から、このシリカ微粒子が火山灰にもともと含まれていた火山岩起源の物質ではなく、より低温環境で形成されたものであることが示唆された。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; Peltonen et al. 2009）。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。

2021 年度の分析結果からは、このシリカ微粒子の Si の供給源として、（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、Aoyagi, Kazama, 1980; 水谷ら, 1987）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 の 3 つの可能性を指摘した。2022 年度に 29 番層内でのベントナイト原鉱石の比較を行った結果、同一層内でも沸石相が低温型の斜プチロル沸石から高温型の方沸石に変化している様子が見られた。熱水変質の痕跡が見られない月布ベントナイト鉱床において、層厚が 7m 程度しかない同一層内で急激な地温勾配が発生することは考えにくく、沸石相の変化は堆積後の海水との混合率やそれに伴う間隙水の組成の差が影響していると考えられる。

2022 年度に新規に観察された事項として、29 番層下盤側において火山ガラスが残存している様子やそのガラス周囲や亀裂部分にシリカ微粒子・モンモリロナイトの生成が見られた。したがって、少なくとも鎖状に分布しているシリカ微粒子の一部は、火山ガラスの溶解・再沈殿が起源であると解釈される。同時に、この試料ではモンモリロナイトの量が少なく、多数の空隙があり、その一部が方解石によって充填されている。ここで問題になるのは、シリカ微粒子と方解石の析出順である。（1）火山ガラスの一部が溶解し、モンモリロナイトおよびシリカ微粒子が形成、その後空隙に方解石が析出した、あるいは（2）空隙に方解石が析出した後に、火山ガラスの溶解やシリカ微粒子の形成が起きた、のどちらの可能性も考えられる。なお、（1）の場合では、火山ガラスが溶解した後の空隙が、方解石が析出するまでの間、維持される必要があるが、圧密を常に受ける続成過程において空隙が空いた状態

が維持されるとは考えにくいため、現在方解石が埋めている部分やその周囲の空隙部分はモンモリロナイトが充填されていたと考えられる。

ベントナイト中で普遍的に見られるシリカ微粒子および一部の試料で見られる方解石が地層処分環境でも形成しうるかを結論付けるためには、これら 2 種類のセメント物質の形成条件をより制約する調査が継続して求められる。2021 年度および 2022 年度を通して、酸素同位体比の測定を行ったものの、測定方法の改善に余地が残る結果となった。一方、新たに見つかった方解石については、形成時期や炭素の供給源などを明らかにする必要性が出てきた。月布鉱山の抗内水においては方解石に飽和している水質を示すものがあるため、現在、29 番層下部の砂質な部分を通る地下水によって方解石の析出や、モンモリロナイトの流出による空隙の増加が起きている可能性が考えられる。したがって、今後、29 番層下部において間隙水組成やコロイド体のモンモリロナイトの流出量の測定などを行うことでセメンテーションやケミカルエロージョン現象の検証に繋がることが期待される。

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。

5 まとめ

2022 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追加実施し、採取した試料の鉱物学的分析を進めた。鉱物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、鉱物組み合わせ、カソードルミネッセンス法による分析、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、東側背斜翼の梅ノ木田抗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・微量元素組成・鉱物の産状について調べた。
2. 月布鉱山において最大の層厚を持つ 29 番層のベントナイト原鉱石について、上盤側から下盤側にかけて鉱物組成・鉱物産状を比較すると、同一層内での沸石相の変化やモンモリロナイト量の変化が確認された。特に下部ではモンモリロナイト量が少なく、空隙が目立ち、その一部が方解石によって充填されている組織が見られた。
3. 29 番層内で鉱物組成に差が見られたことに関連して、続成過程における変質時に移動しないと考えられる難溶解性元素のパターンを比較した。結果として、同一層内での元素パターンが似通っていることから、同一層内でモンモリロナイトや火山ガラスの量に違いが見られた原因としては、出発物質の火山灰の化学組成によるものではなく、構成粒子の粒径（とそれに伴う空隙率）や堆積後に反応する海水との混合率に左右されているのではないかと考えられる。
4. 経験温度の推定のために必要な情報である酸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。昨年度用いた PTFE を含めて 7 種類のフッ素化合物による CO ガスの発生効率・収率や作業性を考慮した結果、NaF が最も適していることが分かった。スメクタイトについては収率が 90%前後まで向上したものの、石英の測定や正確な酸素同位体比の測定には、更なる反応性の向上が必要である。
5. ベントナイト原鉱石の鉱物学的分析および微細観察に基づくと、2022 年度の追加試料においても、原鉱石を固結させている主要なセメント物質は微細なシリカだと推定される。カソードルミネッセンス法による観察から、火山岩由来の粗粒石英と異なり、シリカ微粒子はより低温の続成過程において形成されたと示唆される。

6. 地表露頭から得られたベントナイト試料では地表水によるモンモリロナイトの Ca 型化が確認された。褐色を呈する試料の一部では鉄の（水）酸化物の析出が僅かに見られたものの、主要構成鉱物や鉱物産状は地下抗内で見られるベントナイト原鉱石と同じで、セメント物質としてはシリカ微粒子が支配的だと考えられる。

参考文献

1. Aoyagi, K., & Kazama, T. (1980). Transformational changes of clay minerals, zeolites and silica minerals during diagenesis. *Sedimentology*, *27*(2), 179-188.
2. Bauer, K. K., Vennemann, T. W., & Gilg, H. A. (2016). Stable isotope composition of bentonites from the Swiss and Bavarian Freshwater Molasse as a proxy for paleoprecipitation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, *455*, 53-64.
3. Boggs, S., & Krinsley, D. (2006). *Application of cathodoluminescence imaging to the study of sedimentary rocks*. Cambridge University Press.
4. Dunai, T. J. (2010). *Cosmogenic nuclides: principles, concepts and applications in the earth surface sciences*. Cambridge University Press.
5. Ferrage, E., Lanson, B., Sakharov, B. A., & Drits, V. A. (2005). Investigation of smectite hydration properties by modeling experimental X-ray diffraction patterns: Part I. Montmorillonite hydration properties. *American Mineralogist*, *90*(8-9), 1358-1374.
6. 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.
7. Greene-Kelly, R. (1952). A test for montmorillonite. *Nature*, *170*(4339), 1130-1131.
8. Greene-Kelly, R. (1953). The identification of montmorillonites in clays. *Journal of Soil Science*, *4*(2), 232-237.
9. 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.
10. 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.
11. 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*.
12. 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.
13. 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.

14. 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.
15. 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.
16. Kirschner, D. L., & Sharp, Z. D. (1997). Oxygen isotope analyses of fine-grained minerals and rocks using the laser-extraction technique. *Chemical geology*, *137*(1-2), 109-115.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.

25. 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

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. Peltonen, C., Marcussen, Ø., Bjørlykke, K., & Jahren, J. (2009). Clay mineral diagenesis and quartz cementation in mudstones: The effects of smectite to illite reaction on rock properties. *Marine and Petroleum Geology*, *26*(6), 887-898.

30. 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.

31. Rudnick, R.L., Gao, S., (2014). Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochem*. 1–51.

32. 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.

33. Savin, S. M., & Epstein, S. (1970). The oxygen and hydrogen isotope geochemistry of clay minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *34*(1), 25-42.

34. 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地球化学標準物質データベース, https://gbank.gsj.jp/geostandards/igneous.html, 2022 年 11 月 1 日閲覧.

35. Takagi, T. "Bentonite in Japan–geology and industries." *Open file report of Geological Survey of Japan* 425 (2005).

36. 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.

37. Walderhaug, O., Lander, R. H., Bjørkum, P. A., Oelkers, E. H., Bjørlykke, K., Nadeau, P. H., (2000). Modelling quartz cementation and porosity in reservoir sandstones: examples

from the Norwegian continental shelf., In Worden. R. H., Morad, S. (eds), *Quartz cementation in sandstones*, *29*, 39-49.

38. 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.
39. Worden, R. H., Griffiths, J., Wooldridge, L. J., Utley, J. E. P., Lawan, A. Y., Muhammed, D. D., Simon, N., Armitage, P. J. (2020). Chlorite in sandstones. *Earth-Science Reviews*, *204*(January), 103105.
40. 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.
41. 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.
42. 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.

・外部発表リスト

【国際会議発表】

・R. Kikuchi, M. Horiuchi, M. Saito, T. Ishiwata, Y. Nishiki, T. Sato, Y. Takayama, S. Mitsui (oral): Natural evidence for the cementation in bentonite buffer based on transmission electron microscopy observation of bentonite ores, International Clay Conference 2022, Istanbul, Turkey, July 26, 2022.

【国内発表】

・石渡 翔丸, 菊池 亮佑, 佐藤 努, 大竹 翼 (ポスター)：Genesis of Tsukinuno bentonite deposit indicated from the mineralogical and geochemical characteristics. JpGU 2022 (ハイブリッド), 2022 年 5 月 31 日

・菊池 亮佑, 石渡 翔丸（ポスター）：熱分解型元素分析/同位体比質量分析計（TCEA/IRMS）を用いたケイ酸塩鉱物の 水素・酸素安定同位体比の測定方法の確立とその応用、第 12 回同位体環境学シンポジウム（オンライン開催)、2023 年 12 月 23 日

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

東京大学　大学院理学系研究科

高橋　嘉夫

※本研究テーマは 2020 年度当時に筑波大学に所属していた向井広樹氏が提案・応募し、選考を経て採択された。2021 年度から向井氏が研究を実施していたが、2022 年度に向井氏が東京大学へ異動し、諸事情により研究代表者が変更となった。

【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年度の成果概要 3
3.1 実験試料について 3
3.2 Eu吸着・脱離実験 4
3.3 電子プローブマイクロアナライザ（EPMA）による分析 5
3.4 2021年度のまとめと課題 7
4. 2022年度研究実施内容 8
4.1 2022年度の計画、実施方法 8
4.1.1 2022年度の計画 8
4.1.2 実験手法について 8
4.2 2022年度の成果内容 9
4.2.1 実験試料について 9
4.2.2 Eu脱離実験 9
4.2.3 Eu吸着試料についてのEPMAによる元素マッピング 11
4.2.4 Eu吸着試料についてのTEMによる観察・分析 12
4.2.5 Eu-152収着黒雲母についてのIPオートラジオグラフィ 15
4.2.6 各粘土鉱物におけるEuの存在状態について 16
5. まとめ 18

参考文献

2022年度外部発表

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、ガラス固化体中の種々の放射性核種は地下水へ溶出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中での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まだ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ている（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

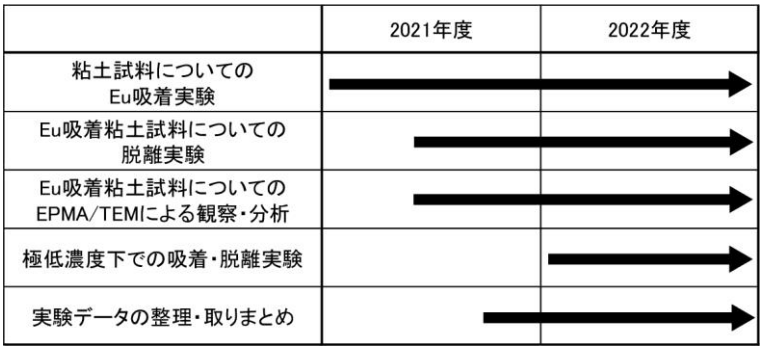
することが必要とされる。

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。本研究を行うことによって、放射性核種の環境中での挙動についての基礎となるデータを得ることができると期待される。

2. 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考えられているユーロピウム（Eu）を用いて吸着・脱離実験を行う。表 2-1 に 2 カ年での研究計画を示す。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 などの各種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。低濃度から高濃度までの幅広い濃度（ppb~ppm オーダー）で 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。また極低濃度下での吸着・脱離についてはイメージングプレート（IP）によるオートラジオグラフィを用いて、その挙動について調べる。

表 2-1　全体研究計画



3. 2021 年度の成果概要

3.1 実験試料について

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した。黒雲母は（株）ニチカから購入したものであり、カオリナイトはアメリカの粘土学会、モンモリロナイトおよびハイドロバイオタイトは日本粘土学会において標準試料となっている。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た。その結果、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）となった（表 3-1)。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 3-1 に示す。

表 3-1　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

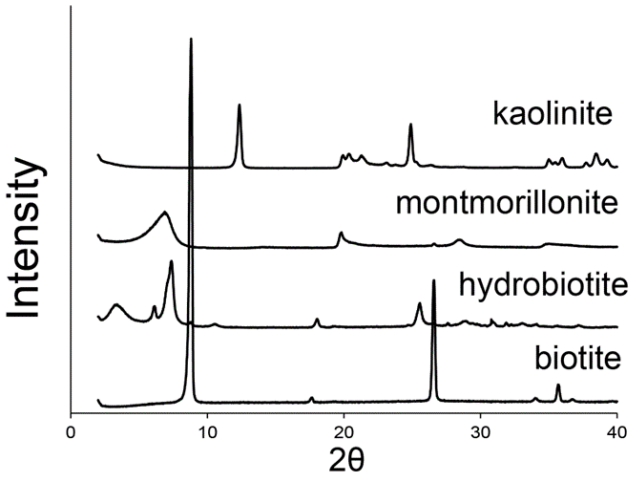


図 3-1　各粘土鉱物試料の粉末 X 線回折パターン

3.2 Eu 吸着・脱離実験

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 3-2 は Eu: 10^{-4}, 10^{-6} mol/L, pH: 3-9 で吸着実験を行った吸着率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} mol/L)の場合、高濃度（10^{-4} mol/L)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。また 0.1 mol/L $NaClO_4$ によって脱離実験を行った結果、他の粘土鉱物と比べてカオリナイトから Eu がよく脱離することが示唆された。

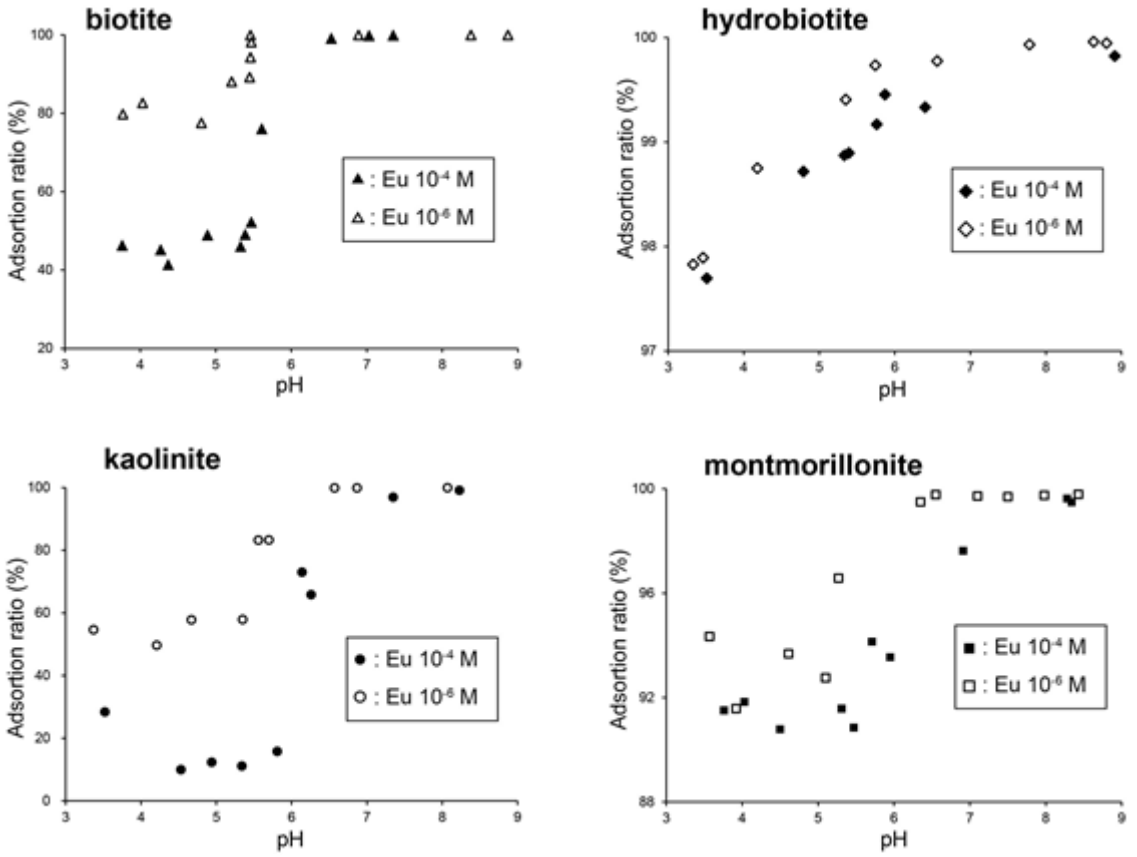


図 3-2　各粘土鉱物試料についての Eu 吸着エッジ（縦軸：吸着率）の測定結果
（Eu: 10^{-4} or 10^{-6} mol/L, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$）

3.3 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} mol/L, 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 3-3）。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。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 3-4）。

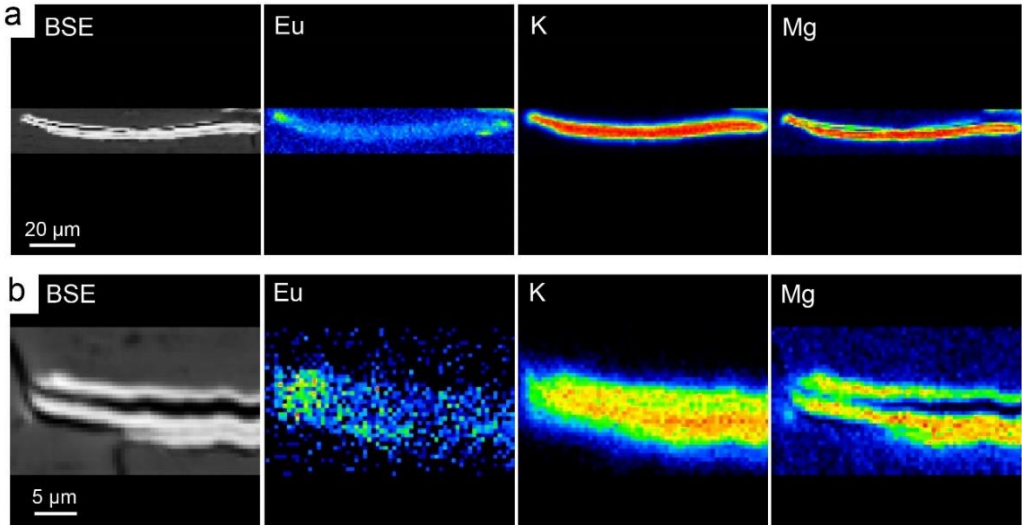


図 3-3　黒雲母断面試料における(a) 粒子全体、(b) 端部付近についての EPMA による元素マッピングの結果
試料は吸着実験（Eu: 10^{-3} mol/L, pH: ~5.2, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$）によって Eu を吸着した試料を用いた

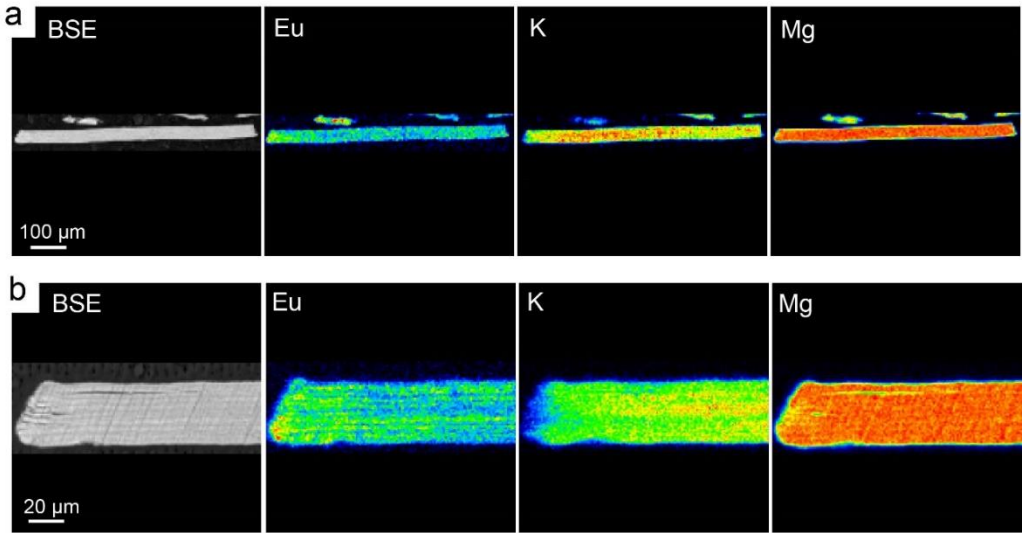


図 3-4　ハイドロバイオタイト断面試料における(a) 粒子全体、(b) 端部付近についての EPMA による元素マッピングの結果
試料は吸着実験（Eu: 10^{-3} mol/L, pH: ~5.2, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$）によって Eu を吸着した試料を用いた

3.4 2021 年度のまとめと課題

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} mol/L, 10^{-6} mol/L）で、pH を 3~9 まで変化させ吸着実験を行った。各粘土では 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 EPMA によって Eu を pH: ~5.2 で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。しかし、EPMA では、より高 pH で Eu を吸着した試料についての観察・分析を行っていない。また脱離実験および透過型電子顕微鏡による観察・分析について十分なデータが得られておらず、これらは次年度の課題となった。またさらに極低濃度においての吸着・脱離実験を、放射性核種（Eu-152）を用いて行う予定とした。

4. 2022 年度研究実施内容

4.1 2022 年度の計画、実施方法

4.1.1 2022 年度の計画

2022 年度は、前年度十分に実施できなかった Eu の脱離実験を多様な電解質溶液を用いて行い、粘土鉱物における Eu の脱離挙動について明らかにする。同時に Eu を吸着した試料について、電子プローブマイクロアナライザ（EPMA）および透過型電子顕微鏡（TEM）を使用して観察・分析を行い、Eu の粘土鉱物における詳細な分布について直接的に明らかにする。さらに放射性核種（Eu-152）を用いて、黒雲母を対象に極低濃度下で Eu の吸着脱離実験を行う。Eu-152 の検出にはイメージングプレート（IP）によるオートラジオグラフィを用いる。

4.1.2 実験手法について

粘土鉱物試料は、前年度と同様に黒雲母、ハイドロバイオタイト、カオリナイト、モンモリロナイトを準備する。そして、吸着実験を行った条件、Eu 濃度: 10^{-4}, 10^{-6} mol/L, イオン強度：$NaClO_4$: 0.1 mol/L、固液比 1:200、反応時間 24 時間で Eu を吸着させた各粘土試料について脱離実験を行った。特に pH: ~5, ~6.5, ~8.5 で Eu を吸着させた試料について、0.1 mol/L $NaClO_4$ を用いて、固液比 1：200、反応時間 24 時間で脱離させた。さらに pH: ~6.5 の試料については引き続き、0.1 mol/L KCl、そして 0.1 mol/L シュウ酸によって逐次脱離実験を行った。Eu 濃度についての測定は、東京大学アイソトープセンターにおいて運用されている ICP-MS (Agilent8800)によって行い、脱離率を導出した。

Eu 吸着試料についての観察・分析は、電子プローブマイクロアナライザ(EPMA: JXA-8530F)および透過型電子顕微鏡（TEM: JEM-2800）を利用した。TEM 試料の作製は集束イオンビーム（FIB: Hitachi FB2100）を使用して、作製した。Eu 吸着試料は、Eu：10^{-3} mol/L, イオン強度：0.1 mol/L $NaClO_4$ の条件で Eu を吸着させた試料を使用した。また TEM での元素分析にはエネルギー分散型 X 線分光（EDS）法を用いた。

放射性核種（Eu-152）を用いて極低濃度下で Eu 吸脱着実験を黒雲母について行い、IP オートラジオグラフィを使用して可視化した。イメージングプレートの空間分解能（~100 μm）を考慮し、粒径約 1 cm 程度の黒雲母粒子を用意した。そして、$EuCl_3$ の濃度：10^{-7} mol/L (Eu-152: ~5Bq/ml)、イオン強度：0.1 mol/L $NaClO_4$ で吸着させたのち、上述の脱離

実験と同様に 0.1 mol/L $NaClO_4$, 0.1 mol/L KCl, 0.1 mol/L シュウ酸によって逐次脱離実験を行った。Eu-152 の黒雲母粒子における吸着状態は IP オートラジグラフィによって反応ごとに調べた。

4.2 2022 年度の成果内容

4.2.1 実験試料について

2022 年度は、前年度と同様の黒雲母（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引き続き使用した。ゼータ電位を ZEECOM ZC-3000（マイクロテック・ニチオン社製）によって測定したところ図 4-1 のような結果が得られた。等電点は黒雲母で 2~2.5、カオリナイトで 2~2.5、モンモリロナイト、ハイドロバイオタイトでは pH2~12 において常に負の電位を示し、等電点に達しなかった。また 4 試料の中ではカオリナイトが全体に高い電位を示していた。

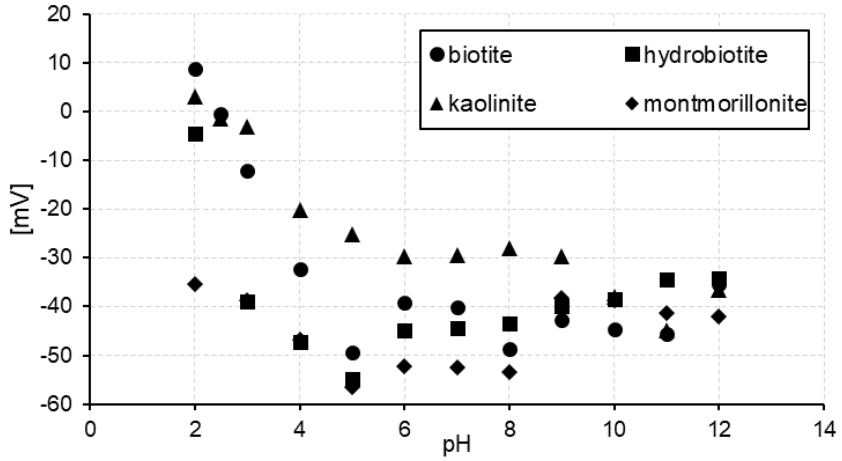


図 4-1　各粘土鉱物についてのゼータ電位測定結果

4.2.2 Eu 脱離実験

Eu の濃度 10^{-4} mol/L, 10^{-6} mol/L、pH: ~5, ~6.5, ~8.5 の条件で吸着した各粘土試料について、0.1 mol/l $NaClO_4$ によって脱離実験を行った（図 4-2)。その結果、カオリナイトが他の粘土鉱物に比べてはるかに高い脱離率を示した。他の 3 種の粘土鉱物では、ハイドロバイオタイトが特に低い脱離率を示していた。カオリナイトは Eu: 10^{-4} mol/L の時に pH: ~6.5 で低い脱離率を示していたが、他の粘土鉱物では、pH: ~6.5 で他の pH の時より高い

脱離率を示した。またほとんどの場合、Eu: 10^{-4} mol/L のときより、Eu: 10^{-6} mol/L の時の方が脱離率は低くなっていた。

次に pH: ~6.5 または~8.5 で Eu を吸着させた試料について、引き続き 0.1 mol/L KCl, 0.1 mol/L シュウ酸によって逐次脱離実験を行った（図 4-3）。0.1 mol/L KCl によって脱離実験を行ったところ、カオリナイトにおいては、吸着時の Eu 濃度が 10^{-6} mol/L の時によく脱離していた。その他の粘土鉱物では、モンモリロナイトから比較的よく脱離し、ハイドロバイオタイトからの脱離率は特に低くなっていた。また吸着時 Eu の濃度が 10^{-6} mol/L よりも 10^{-4} mol/L の時のほうがよく脱離していた。そして 0.1 mol/L シュウ酸では、吸着時 Eu: 10^{-6} mol/L の条件でカオリナイト、モンモリロナイトからほぼすべての Eu が脱離し、黒雲母、ハイドロバイオタイトからも 80~90%程度の Eu が脱離した。Eu: 10^{-4} mol/L の試料からの脱離率は低いように見えるが、シュウ酸との錯体を形成したことにより沈殿したためと考えられる。また pH: ~6.5 と~8.5 を比較したとき、カオリナイトの場合は pH: ~8.5 の時の脱離率がおよそやや上昇し、その他の粘土ではやや減少する傾向が見られているが、全体に大きな違いは見られていない。

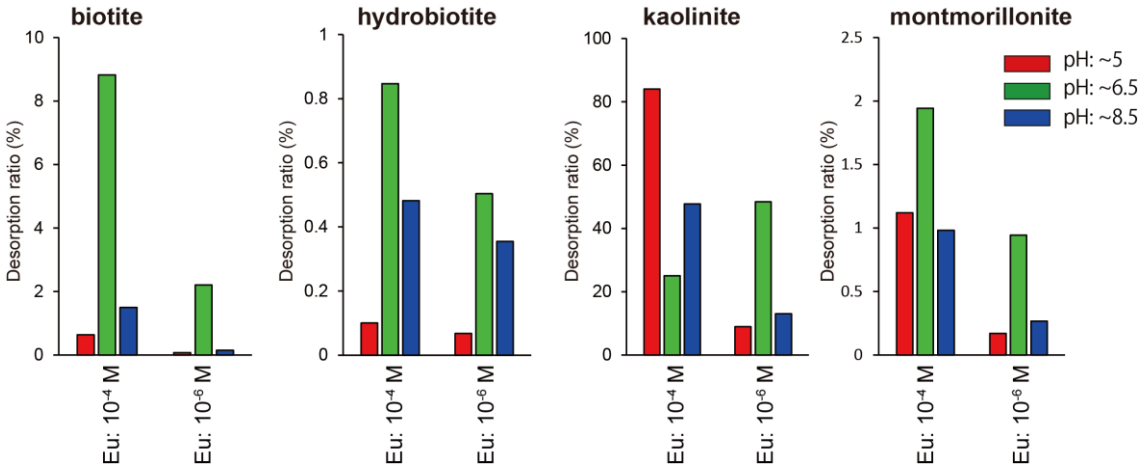


図 4-2　各粘土鉱物試料についての 0.1 mol/L $NaClO_4$ 溶液による Eu 脱離実験の結果
各試料は吸着実験（Eu: 10^{-4} mol/L, 10^{-6} mol/L, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$, pH: ~5, ~6.5, ~8.5）によって Eu を吸着した試料を用いた

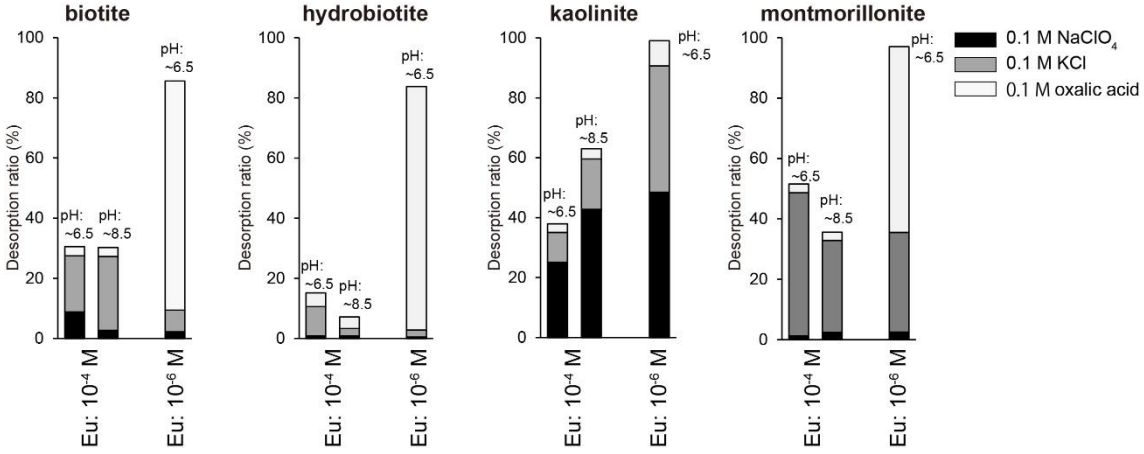


図 4-3　各粘土鉱物試料についての 0.1 mol/L $NaClO_4$, 0.1 mol/L KCl, 0.1 mol/L シュウ酸溶液による Eu 逐次脱離実験の結果
各試料は吸着実験（Eu: 10^{-4} mol/L, 10^{-6} mol/L, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$, pH: ~6.5, ~8.5）によって Eu を吸着した試料を用いた。

4.2.3 Eu 吸着試料についての EPMA による元素マッピング

Eu を吸着（Eu: 10^{-3} mol/L, pH: ~6.5, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$）した黒雲母について EPMA によって元素マッピングを測定した（図 4-4）。pH: ~5.2 の条件で吸着させた時と同様に粒子の端付近に Eu がよく濃集している様子が見られた。また K と比較して観察したとき、K の濃度が低い個所を中心に Eu が存在しており、粒子端部を中心に Eu が一部 K を置換して層間に入ったと考えられる。また表層にも Eu が分布している様子が見られた。

次にハイドロバイオタイトについても元素マッピングを測定した（図 4-5）。Eu 吸着条件は、Eu: 10^{-3} mol/L, pH: ~6.5 および~8.5, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$ であった。pH: ~6.5 の場合、pH: ~5 で観察されたように粒子端部での Eu の濃度が高いが、黒雲母の場合とは異なり、粒子内部まで侵入している様子が見られた。また pH: ~6.5 の黒雲母のように粒子表面付近に所々 Eu が濃集していた。一方で pH: ~8.5 では、Eu は粒子内部に侵入せず表層に濃集していることが明らかとなった。

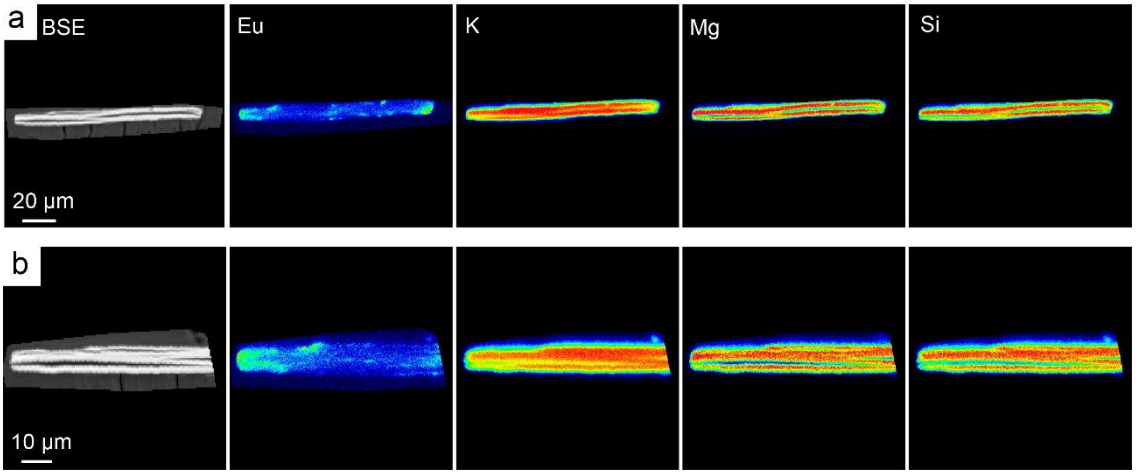


図 4-4　黒雲母断面試料における(a) 粒子全体、(b) 端部付近についての EPMA による元素マッピングの結果
試料は吸着実験（Eu: 10^{-3} mol/L, pH: ~6.5, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$）によって Eu を吸着した試料を用いた。

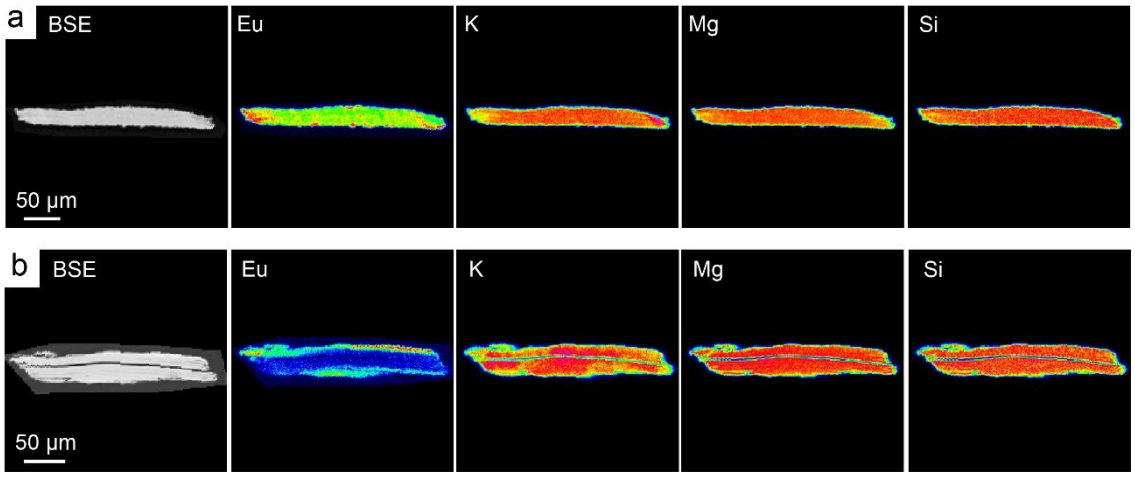


図 4-5　ハイドロバイオタイト断面試料についての EPMA による元素マッピングの結果
試料は吸着実験（Eu: 10^{-3} mol/L, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$）において、Eu を pH: (a) ~6.5, (b) ~8.5 で吸着した粒子を用いた

4.2.4 Eu 吸着試料についての TEM による観察・分析

Eu を吸着した各粘土鉱物について TEM を用いて詳細に観察・分析を行い、粒子における Eu の分布について可視化した。各粘土試料には、Eu: 10^{-3} mol/L、イオン強度：0.1 mol/L $NaClO_4$、pH: ~6.5 で Eu を吸着させた。まず黒雲母について、Eu の濃集が EPMA の測定で見られている粒子端部付近から、FIB を用いて TEM 試料を作製した。図 4-6 は、黒雲母粒子断面についての高角度環状暗視野走査透過型電子顕微鏡（HAADF-STEM）像および STEM-EDS による元素分析の結果である。EPMA より微小領域での STEM-EDS

の分析においても、粒子端部においてはおよそ Eu が均質に検出された。EPMA での元素マッピングの結果において Eu は K と逆相関していたことから、K がやや脱離した粒子端部においては Eu が層間にわずかに侵入したことが考えられる。

またハイドロバイオタイトについて HAADF-STEM, STEM-EDS 法によって観察・分析を行ったところ（図 4-7)、STEM-EDS による元素マッピングの結果から K と Eu が逆相関していることがわかった。ハイドロバイオタイトは、黒雲母とバーミキュライトの規則的混合層を形成するので、Eu は特にバーミキュライト層の層間に選択的に侵入していることが示唆される。このバーミキュライト層に入ることで粒子内部まで Eu が入ることができたと考えられる。

次にカオリナイトについて STEM-EDS によって元素マッピング、スペクトルを測定した（図 4-8)。元素マッピングからは、Eu はハイドロバイオタイトのように粒子の内部に侵入することはなく、粒子表面に濃集していることが観察された。またこのことはスペクトルの測定においても、表面で Eu が検出されたのに対して、内部の測定では検出されなかったことからも確認された。

そしてモンモリロナイトでは、粒子の表層から内部にいたるまでほぼ均質に Eu が検出された（図 4-9)。モンモリロナイトは水溶液中ではより細粒に分散するため、凝集したものを FIB 加工し、TEM で観察している可能性が考えられる。ただ、STEM-EDS の測定からは、モンモリロナイト断面試料に対して、Eu はほぼ均質に検出された。つまり端部や表面に濃集したのではなく、層間に侵入したことが示唆される。

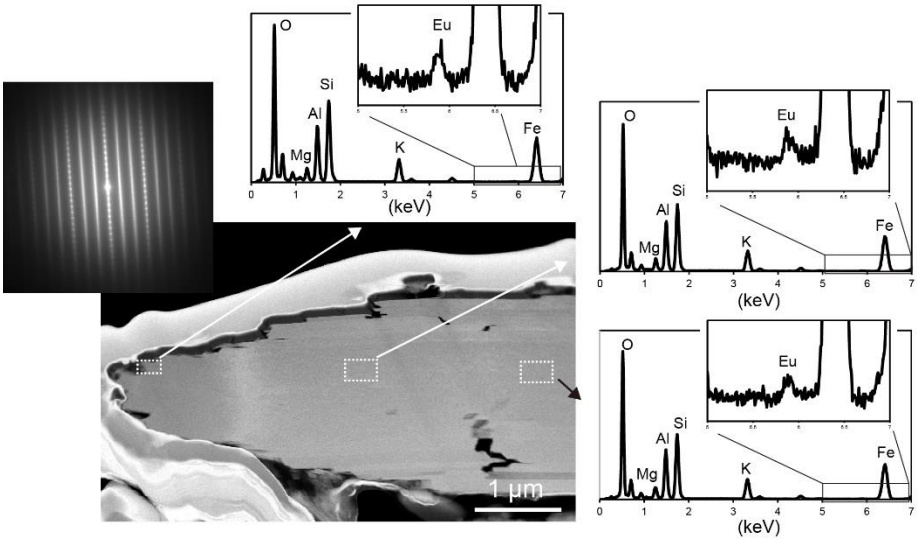


図 4-6　黒雲母断面試料についての TEM による観察・解析
(a) HAADF-STEM 像および制限視野電子回折像、(b) STEM-EDS による粒子端部・内部についての測定結果。試料は吸着実験（Eu: 10^{-3} mol/L, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$, pH: ~6.5）において、Eu を吸着した粒子を用いた

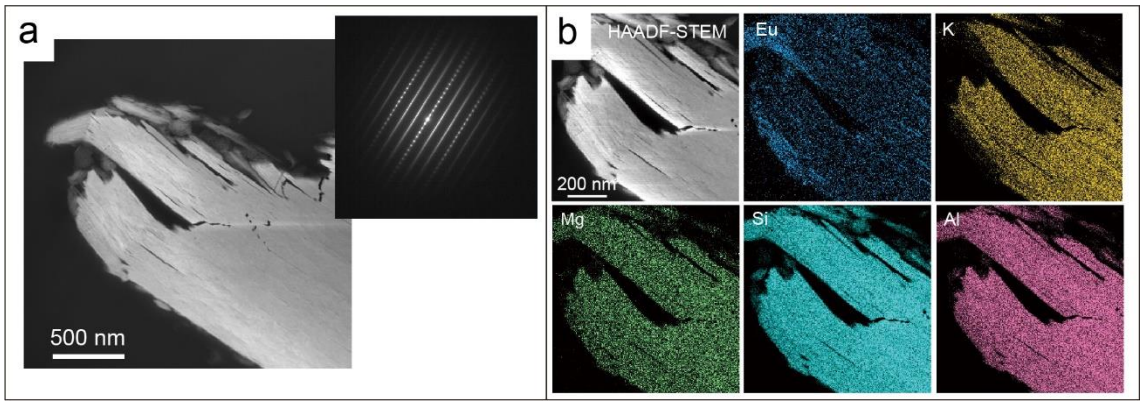


図 4-7　ハイドロバイオタイト断面試料についての TEM による観察・解析
(a) HAADF-STEM 像および制限視野電子回折像、(b) STEM-EDS による元素マッピング。試料は吸着実験（Eu: 10^{-3} mol/L, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$, pH: ~6.5）において、Eu を吸着した粒子を用いた

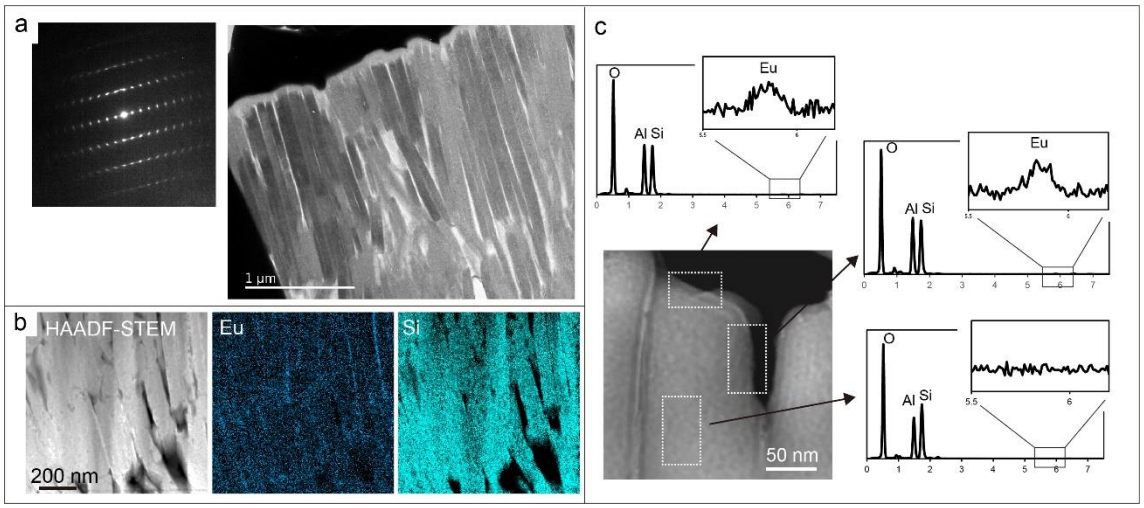


図 4-8　カオリナイト断面試料についての TEM による観察・解析
(a)TEM 像および制限視野電子回折像、(b)STEM-EDS による元素マッピング、(c)STEM-EDS による粒子端部・表面・内部についてのスペクトル測定結果。試料は吸着実験（Eu: 10^{-3} mol/L, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$, pH: ~6.5）において、Eu を吸着した粒子を用いた。

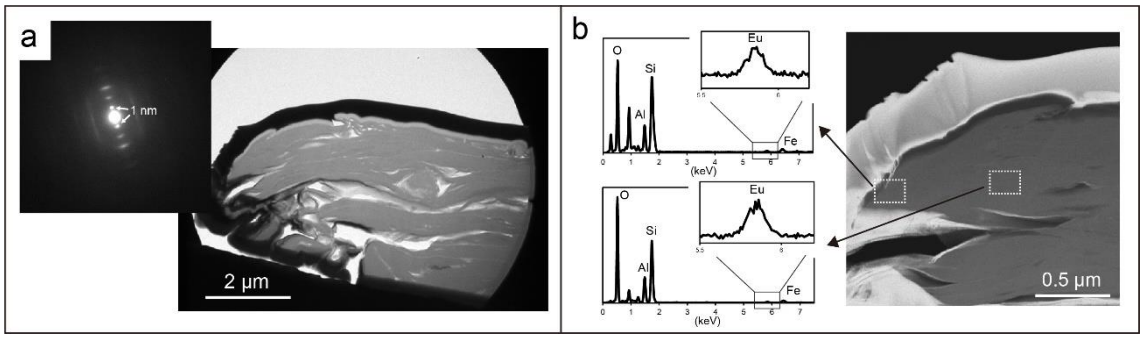


図 4-9　モンモリロナイト断面試料についての TEM による観察・解析
(a) TEM 像および制限視野電子回折像、(b) STEM-EDS による粒子端部・内部についての測定結果。試料は吸着実験（Eu: 10^{-3} mol/L, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$, pH: ~6.5）において、Eu を吸着した粒子を用いた。

4.2.5 Eu-152 収着黒雲母についての IP オートラジオグラフィ

Eu-152 を使用し、極低濃度下（10^{-7} mol/L）での黒雲母における吸着・脱離挙動について IP オートラジグラフィを用いて調べた（図 4-10）。Eu を pH: ~5, ~6.5 で黒雲母に収着させたところ、およそ粒子の端部を中心に Eu-152 がよく濃集していることがわかった。つまり EPMA や STEM-EDS で観察されたより高濃度（10^{-3} mol/L）で Eu を吸着した場合とおよそ収着サイトは変わらないことが示唆されている。さらに 10^{-6} mol/L で Eu を収着した黒雲母試料について行った逐次脱離実験のように 0.1 mol/L $NaClO_4$ および 0.1

mol/L KCl ではほとんど脱離せず、 0.1 mol/L シュウ酸によってほぼすべての Eu-152 が脱離していた。

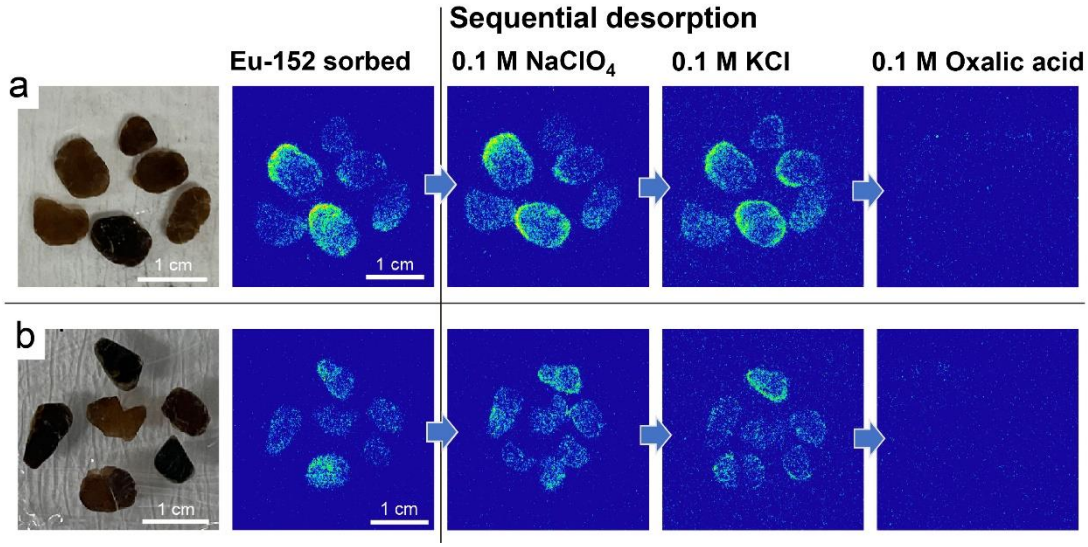


図 4-10　黒雲母についての Eu-152 逐次脱離実験についての IP オートラジオグラフィの結果
(a) Eu-152 収着時の溶液の pH: ~5, (b) pH: ~6.5。Eu-152 収着後、脱離実験は 0.1 mol/L $NaClO_4$, 0.1 mol/L KCl, 0.1 mol/L シュウ酸溶液によって順次行った。

4.2.6 各粘土鉱物における Eu の存在状態について

Eu について吸着・脱離実験を行うことに加えて、EPMA や STEM-EDS によって元素分析を行うことによって、各粘土鉱物における Eu の存在状態について次のように考えられた。黒雲母では、EPMA による元素マッピングの結果、Eu が粒子端部を中心に濃集していることがわかった。さらに EPMA のほか、STEM-EDS の分析結果から Eu は K が部分的に溶脱した層間に侵入したと考えられる。吸着実験の結果では、pH が上昇するにつれて Eu 吸着量が急上昇しており、EPMA による元素マッピングで見られたように粒子表層に濃集が起こると考えられる。また脱離実験での脱離率は低かったことから、こうした収着サイトにおいて強固に Eu は固定されていると考えられる。ただ、より高 pH ではハイドロバイオタイトにおいて見られたように層間には入らず表層に濃集するようになると考えられる。

ハイドロバイオタイトについては、EPMA や STEM-EDS による分析によってバーミキュライト層に特に入っている様子が観察された。このバーミキュライト層の層間に入るこ

とによって粒子内部まで侵入することが可能となったと考えられる。脱離実験において 4 種類の粘土鉱物の中で脱離率がおよそ最も低くなっており、こうしたサイトからは容易に Eu は脱離しないと考えられる。また pH: ~8.5 においては Eu が加水分解するため層間に入ることができず、粒子表層に濃集していた。ただ粒子表層に濃集している場合においても Na や K ではほとんど脱離しなかったことから、かなり強固に共有結合を形成していると考えられる。

カオリナイトについては、STEM-EDS での観察において Eu は表面付近に分布しており、他の 3 種の粘土とは異なり層間に入ることができていない。特に低 pH（~5.2)、高濃度(Eu: 10^{-4} mol/L)の場合に脱離率が非常に高くなっており、この場合粒子表面に主に静電的なイオン結合を形成していると考えられる。高 pH,、低濃度になるとおよそ脱離率は下がっており、表面サイトでの共有結合の割合が増えた可能性が考えられる。

モンモリロナイトに関しては、STEM-EDS の分析において層間におよそ均質に侵入していることが示唆された。脱離実験においては Na ではほとんど脱離しなかったが、K では比較的よく脱離していた。ハイドロバイオタイトとは異なり、層間に入った Eu は K によって置換ができると考えられる。高 pH の条件では、Eu が加水分解されるため層間に入るとは考えにくいが、脱離率が上昇しているわけではないので、表面に強い共有結合を形成していると考えられる。

5. まとめ

本研究において、Am のアナログとして Eu を用いて黒雲母、ハイドロバイオタイト、カオリナイト、モンモリロナイトといった各種の粘土鉱物について吸着・脱離実験を行うとともに EPMA や STEM-EDS といった装置を用いて観察・分析を直接的に行った。特に直接的な観察を行うことによって各粘土における Eu の吸着サイトの違いについて可視化することができた。粘土鉱物は環境中において特に優れた吸着能を示すことから、人工バリアのベントナイトや天然バリア中に放射性核種が溶出した場合にどのように収着されるか予測する上で本研究結果が役立つことが期待される。

本研究での Eu 吸着試料において、pH: ~5, ~6.5 の条件では、黒雲母については主に粒子端部に Eu はよく濃集しており、ハイドロバイオタイトについては粒子端部を中心に内部まで侵入していることが観察された。カオリナイトでは層間に入ることはなく粒子表層に濃集していた。そしてモンモリロナイトでは層間に広く入っていることが示唆された。ただ pH: ~8.5 では、ハイドロバイオタイトにおいて見られたようにカオリナイト以外の粘土においては層間に入ることは難しいと考えられる。また脱離実験の結果、カオリナイトが他の粘土に比べ高い脱離率を示し、粒子表層で比較的弱く吸着していることが示唆された。それに対して黒雲母や特にハイドロバイオタイトが低い脱離率を示しており、ハイドロバイオタイトの層間や表層からは容易に Eu が脱離しないと考えられる。モンモリロナイトは Na によってはほとんど脱離しなかったが K によって比較的よく脱離していた。これらの結果から環境中において、黒雲母やバーミキュライトに吸着された Am-241、243 といったアクチノイド系列放射性核種は容易には脱離しないことが示唆される。

今後の課題として、本研究では Am のアナログとして Eu を用いたが、より正確に挙動を予測するためには実際に Am-241、243 といった放射性核種を用いて Eu との挙動を比較することが求められる。また地層処分が行われる高レベル放射性廃棄物には多様な放射性核種が含まれる。今回 Eu を用いて行った研究手法を他の核種のアナログにも適用し、核種毎に挙動や収着サイトについて明らかにしていくことも重要である。その他、天然バリアを構成する岩石中には粘土鉱物の他にも多様な鉱物や非晶質物質のほか、有機物、微生物なども存在している。放射性核種の移行について予測する上でこうした物質の影響についても研究を行っていく必要がある。また実際の地層処分について考えたとき、収着サイトでの長期的な安定性や地下 300 m 以深での圧力条件等についても考慮することが求められる。

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.

2022 年度　外部発表

【ポスター発表】

1. 向井広樹, 粘土鉱物における Eu(Ⅲ)の吸着脱離挙動 日本地球惑星連合大会 2022 年年会/2022 年 5 月 23 日
2. 向井広樹, 各種の粘土鉱物における Eu 吸着状態について 日本放射化学会第 66 回討論会/2022 年 9 月 15 日

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 年度の成果概要 3
4. 2022 年度研究実施内容 5
4.1 2022 年度の計画、実施方法 5
4.2 2022 年度の成果内容 6
5. まとめ 18

参考文献

2022 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元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、どれほどの効果が見込めるのかについては、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、亀裂部と岩体基質部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) 亀裂部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

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 年度の成果概要

2021 年度は、亀裂部と岩体基質部の水理特性を統合した水理構造モデルの構築を目的として、亀裂モデリング手法である『GEOFRAC』の改良と、実測に使用するプローブ型浸透率測定器の開発、そして対象地域である岐阜県瑞浪地域（図 3-1）の地質データについての整理を実施した。

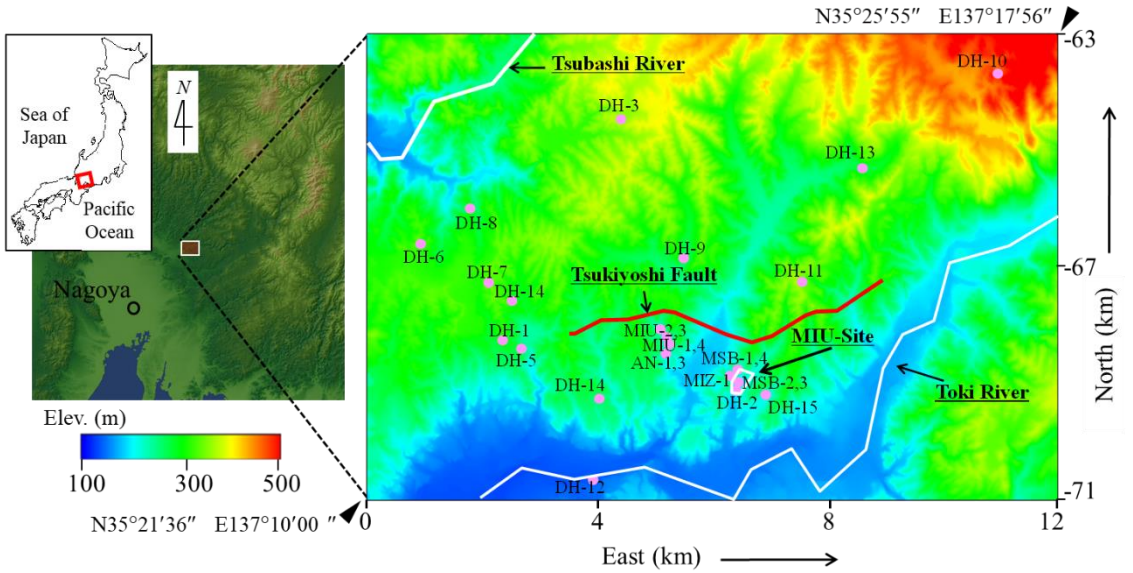


図 3-1　岐阜県東濃地域の地形図と深層ボーリングの分布図（久保ほか、 2013）

(1) 亀裂シミュレーション手法『GEOFRAC』の改良

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の見直しを行い、解析時間の短縮を行った。また、亀裂本数から亀裂密度を用いた計算手法に変更することで、地球統計による空間分布推定を行う際に重要となる正規分布型データとして取り扱うことが可能となった。さらに、仮想モデルを用いた検証によって GEOFRAC の適用可能範囲や計算結果の妥当性について検証し、傾斜ボーリングや水平研究坑道での観察データのある瑞浪地域での有効性を示した（図 3-2）。

(2) プローブ型浸透率測定器の改良

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）の検証試験を実施し、既存の装置の検出限界精度の確認を行った。この結果を受けて、パーミアメーターの圧力センサをより高精度なものへ置き換えることにより、低透水性の花崗岩健

岩部の評価も可能なシステムへと改良を行った。また、測定時にプローブ接触部周辺をエポキシパテによってシーリングすることによってガスリークを防ぐことで、再現性の高い測定を実施できるようになった。

(3) 瑞浪地域の水理試験および亀裂データの再整理

水理構造モデル構築の対象地域である岐阜県瑞浪地域において取得されている大深度ボーリングの亀裂観察・各種検層データの再整理と統計分析を実施し、孔内水理試験値とその区間内の亀裂数・変質程度に弱いながらも相関関係が成り立つことが確かめられた。さらに、現地でボーリングコアのサンプリングを行い、作成した薄片の観察から、亀裂の発達過程にいくつかのパターンが存在することが明らかとなった。これらの違いは実測データと亀裂モデルの統合を図る上で重要な要素となる。

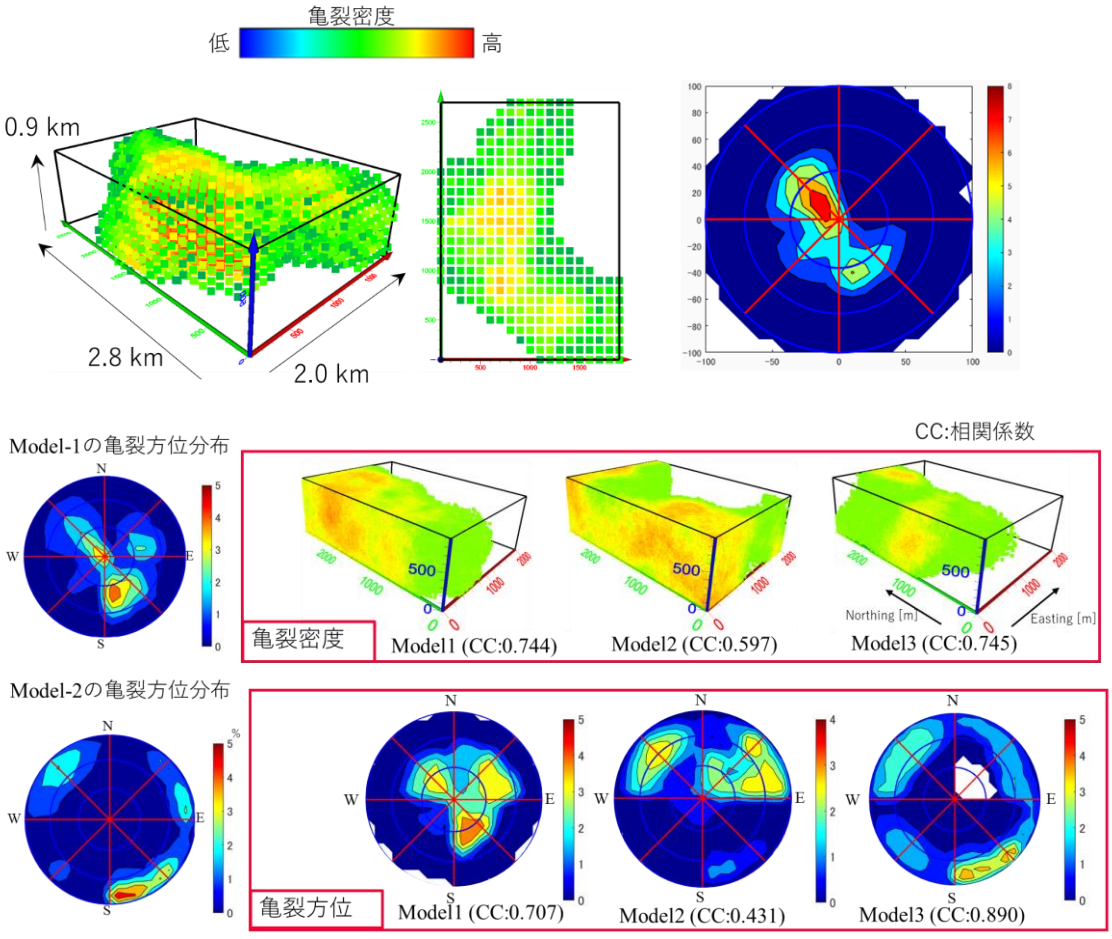


図 3-2 仮想モデルを用いて推定された GEOFRAC モデル亀裂密度と方位の検証結果
方位はシュミットネット下半球投影で、CC.は各グリッドでの設定値と推定値の相関係数を表す

4. 2022 年度研究実施内容

4.1 2022 年度の計画、実施方法

(1) 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

2021 年度に改良を行ったプローブ型浸透率測定器および各種測定装置を用いて、ボーリング試料の透水性と水理特性に影響を及ぼす各種物性（マイクロクラック、風化・変質程度など）を定量評価することにより岩体基質部の水理特性を明らかにする。またこの検討結果に基づき、ボーリング検層で得られている物性から基質部の透水係数を推定する手法を開発する。

(2) 亀裂モデルと水理試験データの統合による水理構造モデルの構築

2021 年度に検討を行った亀裂と水理試験値の統計的性質に基づき、亀裂や基質部の物性に関する情報から広域的な地下水理構造モデルの構築を行う。また、ボーリング試料の計測によって得られた岩体基質部の水理的性質に関する情報を組み合わせ、「亀裂部と岩体基質部の統合的な水理特性」をひとつのセルに与える Stochastic モデルへと発展させる。

(3) 水理構造モデルを用いた地下水流動解析

構築された水理構造モデルをもとに、広域的な地下水流動解析を実施し、対象地域の既知の情報と比較することにより妥当性の検証を行う。これによって得られた信頼性の高い水理構造モデルおよび地下水流動解析結果に基づき、この結果を最終成果として論文化を目指す。

4.2 2022 年度の成果内容

(1) 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

2021 年度に改良を行った浸透率測定装置（以下、パーミアメーター）を使用し、瑞浪地域のボーリングコアの測定を行った。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、微視的な不均質構造を持つ岩石サンプルの局所的な浸透率の変化を把握することに適している（A.P.I., 1998）。本研究では、TEMCO 社製窒素ガス圧入式パーミアメーターMP401C をベースとして、独自にプローブやフローメーターの交換・改良を行った測定システムを使用した。測定値はガス浸透率（permeability）として与えられ、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、これを補正する必要がある。本研究では、Tanikawa and Shimamoto (2006)および Scibek and Annesley (2021)の実験式を参考とし、透水係数への換算を行った。装置の概観と測定の様子を図 4-1 に示す。また、2022 年度までに測定されたボーリングコアサンプル数を表 4-1 に示す。ひとつのサンプルに対しては、図 4-1(右)のように複数点のポイントでの測定を実施している。また、パーミアメーターの精度検証のために、気孔率や透気性が既知である多孔質セラミック（アスザック株式会社）を使用した計測を行った。測定結果を図 4-2 に示す。

図 4-1　パーミアメーターの概観（左）および測定の様子（右）。青丸は測点を示す

表 4-1　パーミアメーターによる浸透率測定サンプル数

ボーリング孔	サンプル数
MIU-2	34
MIU-3	50
MIU-4	19
DH-15	3

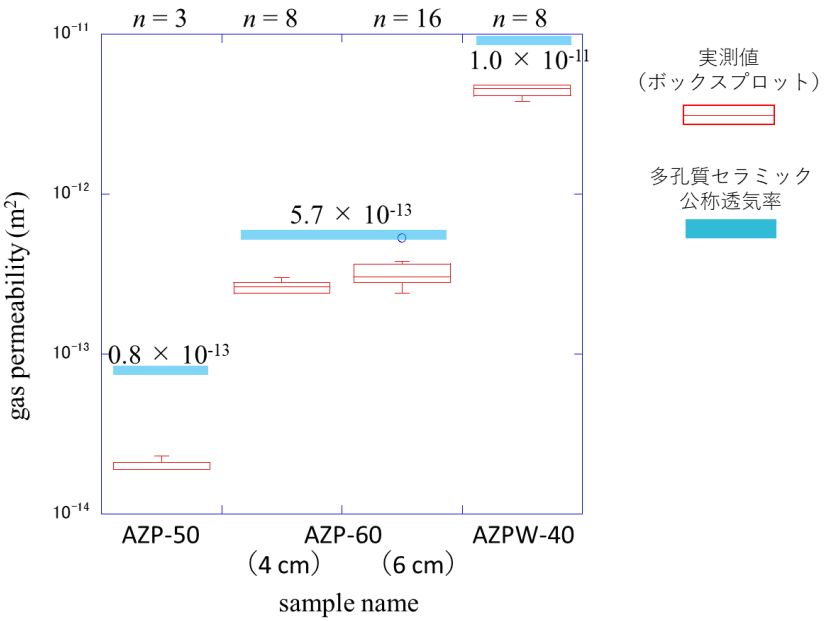


図 4-2　パーミアメーターによる多孔質セラミックの測定結果

図 4-2 に示すとおり、パーミアメーターによる実測値と公称透気率のおおよその大小関係は共通しており、一定の妥当性があることが確かめられた。全体として実測値が 1 オーダーほど低い値を示しているが、これは公称透気率がサンプル全体で計測しているのに対し、パーミアメーターでは微細なひび割れなどを避けて測定を実施したためと考えられる。

図 4-3 に瑞浪地域のボーリングコアのパーミアメーターによる浸透率測定結果と密度の比較を示す。パーミアメーターによる測定値は、ひとつのコアにつき 10～20 点の計測を行い、その平均値を使用している。また、透水係数への変換は Tanikawa & Shimamoto (2006) に示される Klinkenberg 効果を考慮した換算式を用いた。計測密度は 3D スキャナを用いた体積測定と乾燥重量から求めた値である。両者は負の相関を示しており、密度が大きい＝空隙が少なく浸透率が小さいという一般的な解釈と合致する結果が得られた。したがって、パーミアメーターによる浸透率測定は、複数点での計測を実施することにより、ある程度妥当にボーリングコア全体の代表的な浸透率を示すことができると考えられる。有効間隙率を考慮することで、よりばらつきが小さく相関性の高い結果を得られることが期待されるが、今回は測定サンプル数の多い岩石密度を採用した。なお、岩石密度については図 4-4 に示すように 3D スキャナ（Revopoint POP2）を用いた体積計測を実施した。また一部のサンプルで実施した浮力法による有効間隙率の計測結果と密度の比較を図 4-5 に示す。

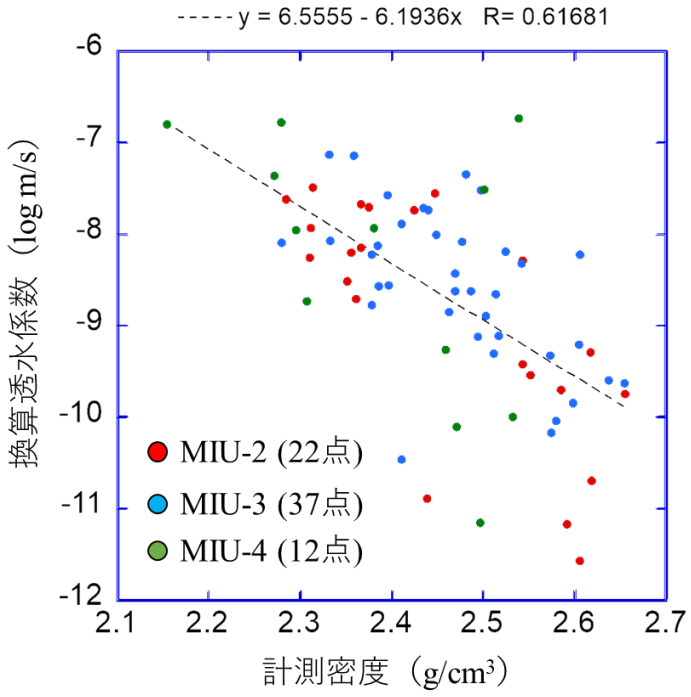


図 4-3　パーミアメーターによるボーリングコア透水係数と密度の比較

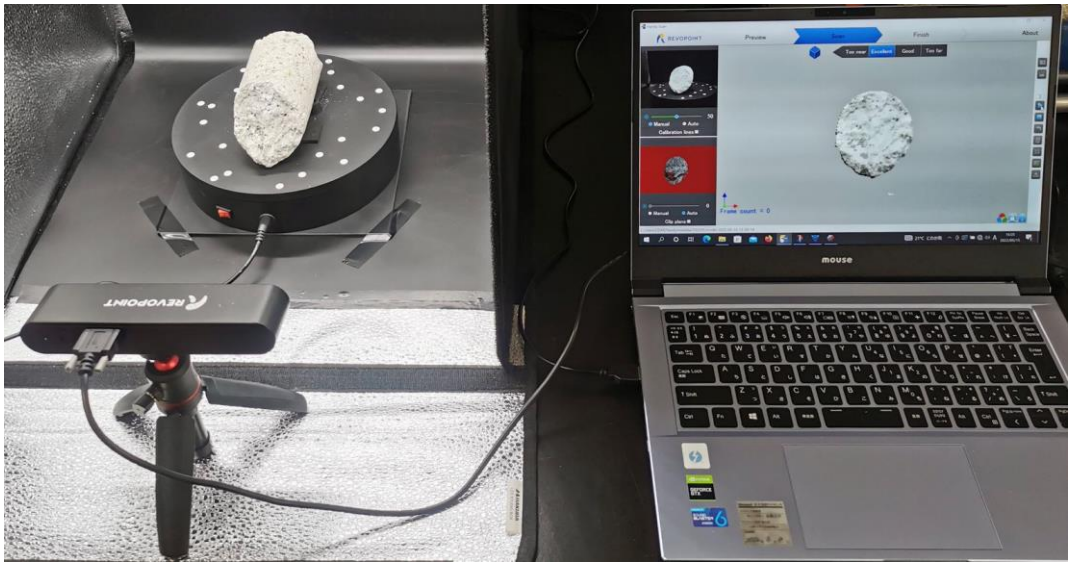


図 4-4　3D スキャナを用いたボーリングコア体積計測の様子

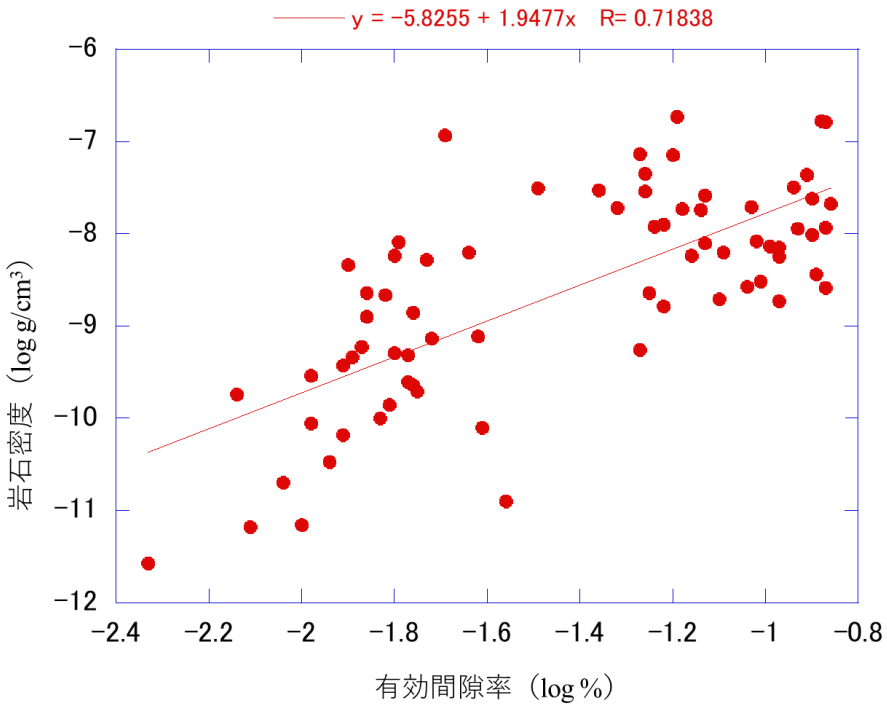


図 4-5　岩石密度と有効間隙率の比較。間隙率は浮力法によって求めた

また、ボーリング試料観察により、図 4-6(左)のような角礫化したコアや、図 4-6(右)のような空隙（晶洞）の形成されたコアが確認された。これらはどちらも断層部周辺から採取されたものであり、その全体や空隙内部にイライトやクロライト（緑泥石）といった熱水変質

作用が示唆される鉱物が認められる。また、サンプル全体に石鹸水を吹きかけた状態でパーミアメーターによる窒素ガスの注入を行う（発泡試験）と、図 4-7 のように周辺から泡が噴き出す様子が観察できる。このことから、コア内部に空隙のネットワークが形成されていることがわかる。また、断層から離れた DH-15 号孔の深部においても図 4-8 のように多数の空隙を持つ試料が確認された。これは熱水変質作用によって形成された構造であり Episyenite 帯と呼ばれる（Nishimoto et al., 2009）。この試料も発泡試験や空隙部の観察により、内部に空隙のネットワークが形成されており、実際に地下水流動経路として機能していたことが推察される。このように、巨視的・微視的な亀裂構造以外にも花崗岩体中の「水みち」として機能する変質帯が偏在していることが示唆される。また、こうした多孔質媒体的な透水構造は、超長期スケールでの地下水流動解析において重要となる比貯留率や水理的異方性といったパラメータに影響を与えることが推察される。

図 4-6　角礫化した MIU-3（深度 609.5 m）コア（左）と、晶洞の形成された MIU-4（深度 923 m）コア（右）
いずれも月吉断層帯近傍に位置する

図 4-7　パーミアメーターを用いた発泡試験の様子。黄色いリングはエポキシパテによるシーリング

図 4-8　DH-15 号孔（深度 935 m）コアと空隙部の拡大写真

(2) ボーリング検層データと水理試験データの統計分析による水理構造モデルの構築

ボーリング試料を集中的に収集した MIU-2、3、4 号孔を対象として、ボーリング検層データと水理試験データの統計分析を実施した。MIU-2 号孔で 40 区間、MIU-3 号孔で 35 区間、MIU-4 号孔で 12 区間の水理試験が実施されており、またボーリング孔全域に渡ってボアホールテレビジョン（BTV）による亀裂の観測と各種物理検層が実施されている。これらは JAEA 東濃地科学センターのウェブサイトにてデータベースとして公開されている（https://www.jaea.go.jp/04/tono/miu/history/）。それらのデータセットより、花崗岩体中の水理試験結果（MIU-2：30 区間、MIU-3：30 区間、MIU-4：10 区間）と、全亀裂・開口亀裂密度、岩石密度（中性子検層）を用いた重回帰分析を行った。常用対数変換した水理試験値を目的変数、試験区間内の亀裂密度と岩石密度平均値を説明変数とし、以下の組み合わせでの検討を行った。

Case-1

目的変数：全水理試験値

説明変数：全亀裂密度、岩石密度平均

Case-2

目的変数：試験区間 10 m 未満の試験値

説明変数：全亀裂密度、岩石密度平均

Case-3

目的変数：試験区間 10 m 未満の試験値

説明変数：開口亀裂密度、岩石密度平均

表 4-2 にそれぞれの偏回帰係数と回帰式の重相関係数を、図 4-9 に実測値と予測値のクロスプロットを示す。重回帰式の P 値はいずれも 0.001 以下であり得られた回帰式は有意であると言える。偏回帰係数から、予測透水係数に対して、岩石密度が負の影響を、亀裂密度が正の影響を示す結果となった。これは一般的な知見であることに加え、図 4-3 の関係とも整合的である。また、10 m 未満の試験値と開口亀裂に注目した Case-3 が最も高い相関係数が得られた。これは長い試験区間を対象とした場合には、亀裂の配向性や間隙のコネクティビティなど、より複雑な地質的要素が影響するためと考えられる。

表 4-2　各 Case での重回帰分析結果の一覧

	岩石密度 (g/cm3)	亀裂密度 (本/試験区間)	定数項	重相関係数
Case-1	-2.00	0.26	-3.83	0.57
Case-2	-13.74	0.20	26.36	0.58
Case-3	-10.88	0.52	18.77	0.66

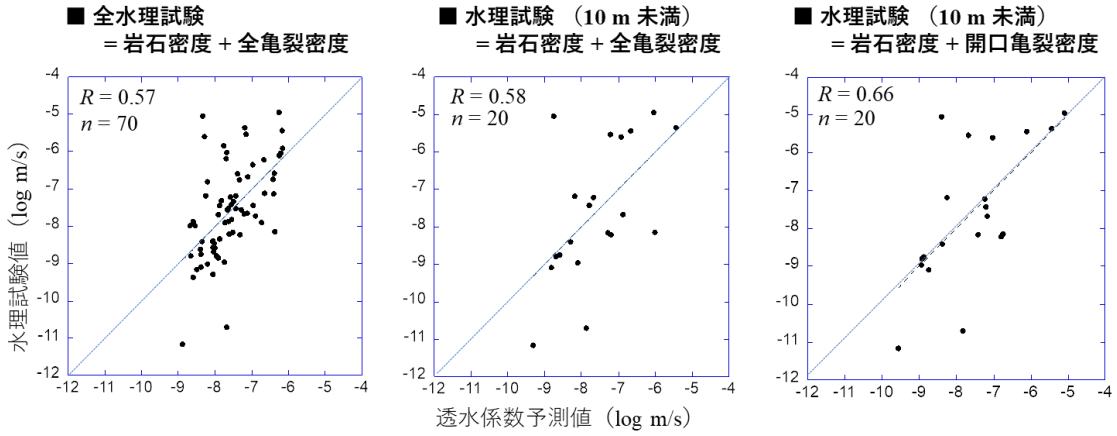


図 4-9　重回帰分析による各 Case の透水係数予測値と実測水理試験値の比較

実測データとの統合として、Case-3 の組み合わせにパーミアメーター測定による換算透水係数と実測密度を加えた上で、重回帰分析を行った（Case-4）。パーミアメーターによる測定値に対しては、亀裂密度は 0 であり、岩石密度のみが与えられる。偏回帰係数は、岩石密度が-6.28、亀裂密度が 0.63、定数項が 6.78 で、重相関係数は 0.68 と Case-3 よりも微増した。この重回帰式に基づく実測値と予測値のクロスプロットを図 4-10 に示す。また、この回帰式に基づき、MIU-2、3、4 号孔の水理試験値の再現を試みた。対象としたのは、全

試験区間（50 区間）と 30 m 未満の試験区間（17 区間）で、いずれも重回帰分析に用いた試験区間を除いている。それぞれの実測値と予測値のクロスプロットを図 4-11 に示す。ばらつきは大きいが、それぞれ 0.54 と 0.62 という相関関係が得られた。

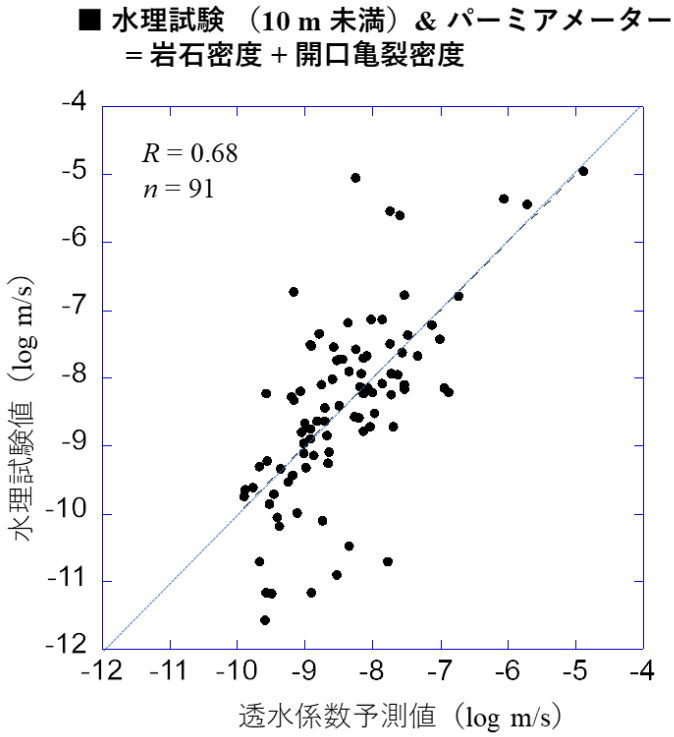


図 4-10　Case-3 にボーリングコア測定結果を加えた Case-4 の重回帰分析結果を用いた透水係数予測値と実測水理試験値の比較

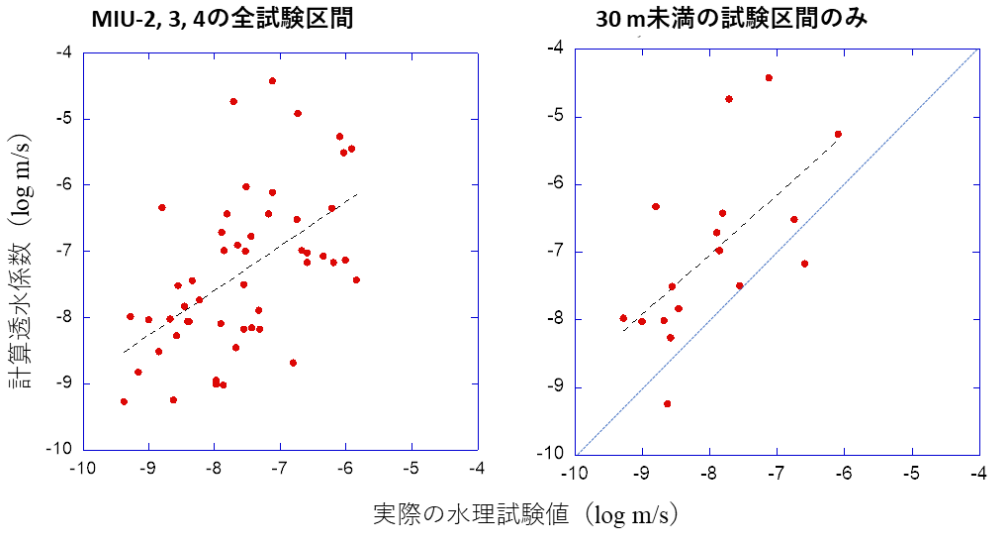


図 4-11　Case-4 の重回帰式を用いて推定された各水理試験区間の推定値と実測値の比較

この回帰式を用いて、瑞浪地域の広域的な透水係数分布モデルの構築を行った。図 3-1 に示す大深度ボーリング 14 孔の検層データを用いて、N-S:8 km、E-W：12 km、鉛直方向: 1.5 km の範囲で作成した岩石密度と開口亀裂密度の空間分布モデルを図 4-12 に示す。グリッドサイズは水平: 200 m、鉛直: 20 m で、逆距離補間による推定を行った。岩石密度分布モデルでは瑞浪層群に該当する浅部の密度が深部に比べて小さい。開口亀裂密度分布モデルでは、領域南西部と東部中央付近に比較的密度の高い領域が集中していることがわかる。この二つの空間分布モデルと先述した Case-4 の回帰式から求めた推定透水係数分布モデルを図 4-13 に示す。透水係数の空間分布は岩石密度の影響を強く受けていることがわかるが、全体のヒストグラムからは水理試験結果などで示される土岐花崗岩の実測透水係数分布と整合的な値となっていることがわかる。

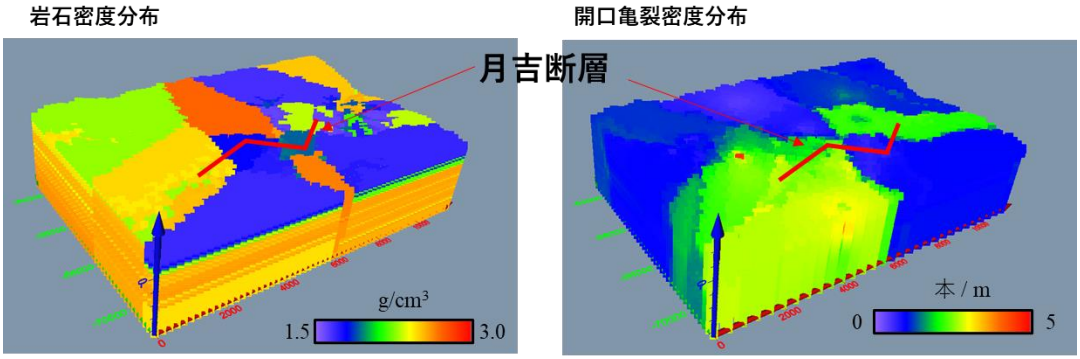


図 4-12　ボーリングデータから逆距離補間で求めた岩石密度と開口亀裂密度の空間分布モデル
赤線は月吉断層の地表トレースを示す

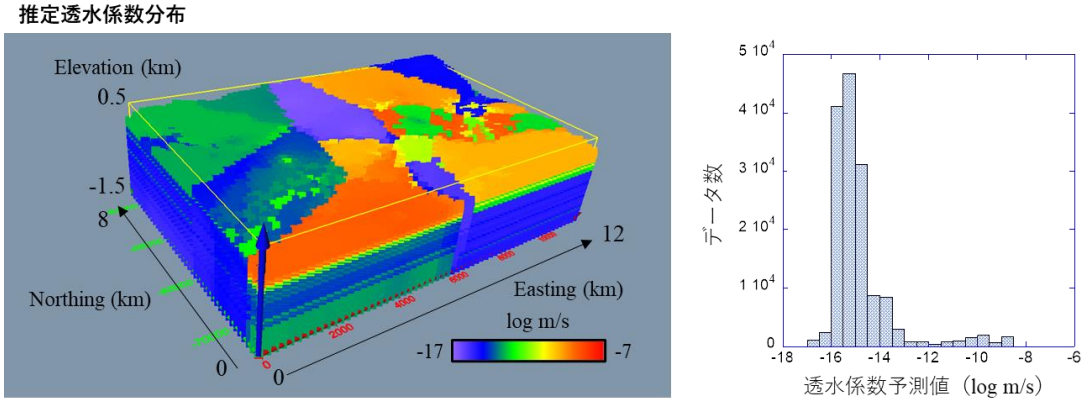


図 4-13　岩石密度と開口亀裂密度分布から推定された透水係数分布モデルと推定値のヒストグラム

(3) 水理構造モデルを用いた地下水流動解析

物理検層データと水理試験値を用いた重回帰式から得られた透水係数分布モデルを用いて地下水流動解析を実施した。数値シミュレーションには AQUAVEO 社の Groundwater Modeling System (GMS)に搭載された MODFLOW（MacDonald and Harbaugh, 1988）を用いた。シミュレーションに用いる解析グリッドモデルの各パラメータは瑞浪地域を対象とした久保ほか（2013）を踏襲し、側方・底部境界を不透水性境界、上部を自由浸出面として第一レイヤーに年間降水量から求めた涵養量を設定した。また領域北西部の津橋川と南東部の土岐川を流出域として固定水頭を与えている。以上のモデルを用いて、初期水頭は標高値として定常解析を実施した。得られた地下水流動解析結果から、北→南方向のセル間流量（cell to cell flow rate）を抽出し表示したモデルを図 4-14 に示す。対象地域の標高分布より、主要な流動方向は北東部から南方向であることと推定されており、図 4-14 に示すセル間流量モデルの分布はこれと整合的である。また月吉断層の東側を境界としてその連続性が遮断されていることから、この断層が遮水性境界として機能していることがわかる。一方、月吉断層西側の深部は比較的大きい南方向の流動が確認できる。この断層深部を通過する流れは久保ほか（2013）のモデルにおいても言及されているが、今回の研究により断層下部側に存在する多数の空隙を持つ領域が流路を形成していることが明らかとなった。

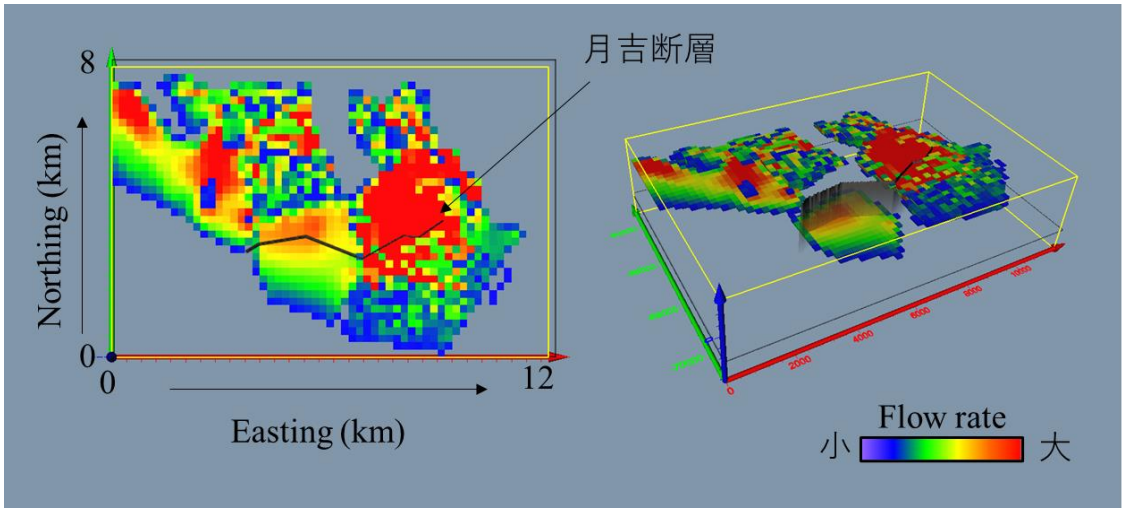


図 4-14　MODFLOW による地下水流動解析結果から北→南方向のセル間流量を表示したモデル

今後の課題として、推定データのスケールについての考慮が挙げられる。現在の空間分布推定モデルは、グリッド中心型の計算を行っており、計算グリッド中心で求められた値をグリッド全体の値として拡張している。したがって、計算グリッドのサイズが大きくなるにつれて、実際の空間に存在する代表値との差異が大きくなる。この問題を解決するためには、block kriging のように各計算グリッドの交点を求め、それぞれの変化量に基づいてグリッドの代表値を決定するような手法への改善が必要であると考えられる（図 4-15）。また、亀裂密度についても、配向性や開口幅およびその性状といった情報を考慮することでより確からしい透水係数の推定が実施できると期待される。図 4-16 の薄片写真に示されるように、極めて近傍のコアにおけるマイクロクラック周辺においても、その構造は大きく異なっており、充填鉱物などの影響によってその透水性は大きく変化すると考えられる。しかしながら、開口幅および性状については観察情報が限定的であり、広域的な推定を可能とする量の観察記録の収集とパラメータ化は困難であると予想される。一方で、配向性については GEOFRAC やその推定に用いられるインジケーター変換による空間分布推定によって求めることが可能である。計算時間の都合などにより、本研究期間中に達成することができなかったが、継続的なプログラムの改良と解析によって実現を目指す。

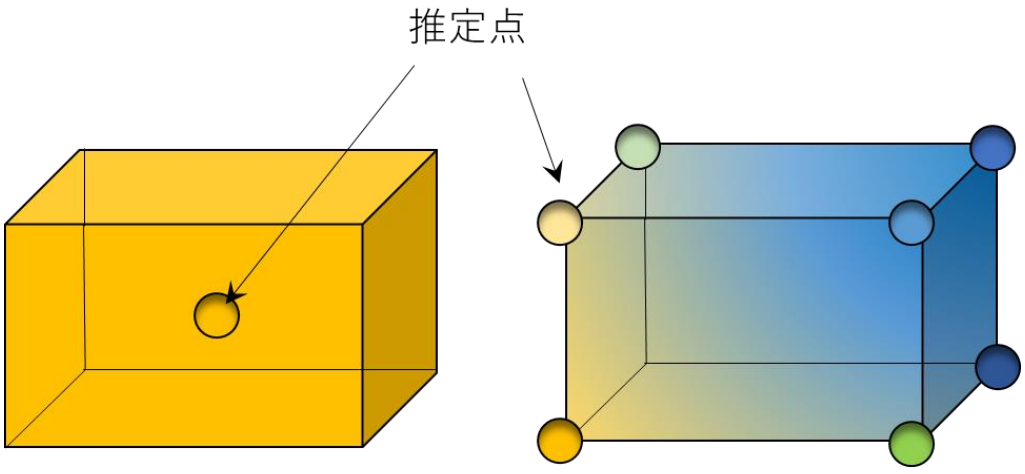


図 4-15　グリッド中心モデル（左）と格子点モデル（右）による推定の概念図

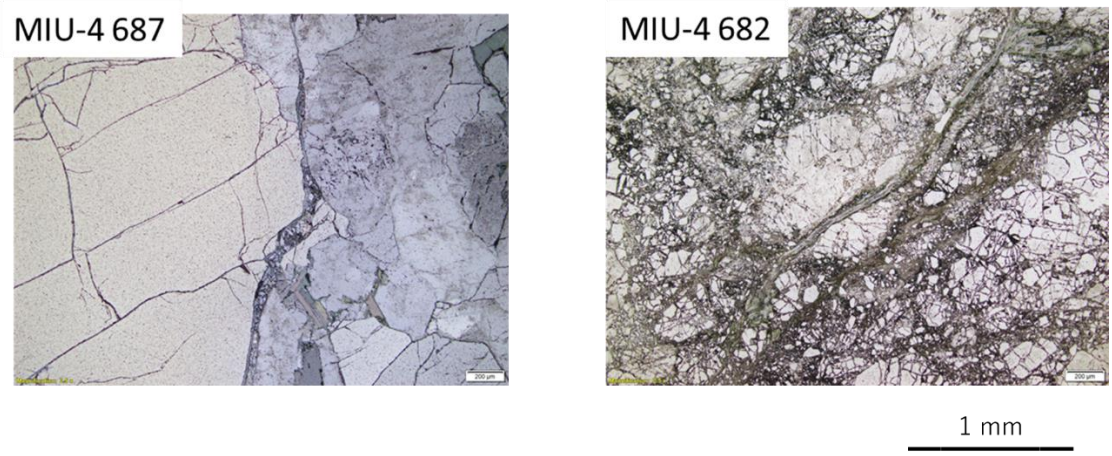


図 4-16　MIU-4 コア薄片の顕微鏡観察写真

また、本研究では簡易的な水理試験装置としてパーミアメーターを利用し、その測定結果を極めて単純化した水理構造モデルの推定へと利用した。本手法は、適用可能な前提条件や最終的な結果の妥当性に課題を残すものの、地層処分計画の周辺調査において大量に取得されるボーリングコアから効率的に情報を収集し、広域水理モデルの改善を図ることができる可能性を示した。これは概要調査から詳細調査に移行する段階において、より効果的な調査ポイントの選定を図り、調査時間や費用の短縮につながるものと期待できる。

5. 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。

2022 年度には、プローブ型浸透率測定器によるボーリングコアサンプルの測定を行い、その結果から岩石密度との相関性が認められた。また、現地でのボーリング調査に基づく水理試験値と物理検層データに実測データを加え重回帰分析を行うことで、岩石密度と開口亀裂密度を説明変数として透水係数を求める回帰式を得た。この回帰式を、岩石密度・開口亀裂密度の空間分布モデルに適用することにより、亀裂・岩体基質部の構造を統合した複合的な広域的な地下水理構造モデルを構築することができた。さらに得られた透水係数分布モデルを用いた地下水流動解析結果により、特に月吉断層周辺での流動形態について新たな知見を得た。

参考文献

1. 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
2. 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.
3. 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
4. McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. Techniques of Water-Resources Investigations. 06-A1, https://doi.org/10.3133/twri06A1
5. Nishimoto, S., Yoshida, H., Asahara, Y., Tsuruta, T., Ishibashi, M., Katsuta, N., 2014. Episyenite formation in the Toki granite, central Japan. *Contrib Mineral Petrol.* **167**, 960. https://doi.org/10.1007/s00410-013-0960-8
6. 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
7. Tanikawa, W., Shimamoto, T., 2006. Klinkenberg effect for gas permeability and its comparison to water permeability for porous sedimentary rocks. *Hydrology and Earth System Sciences*. **3**, 1315-1338. https://doi.org/10.5194/hessd-3-1315-2006
8. Scibek, J., Annesley, I. R., 2021. Permeability Testing of Drill Core from Basement Rocks in the Fault-Hosted Gryphon U Deposit (Eastern Athabasca Basin, Canada): Insights into Fluid–Rock Interactions Related to Deposit Formation and Redistribution. *Natural Resources Research.* ***30***, 2909–2956. https://doi.org/10.1007/s11053-021-09811-x

2022 年度　外部発表

【学術論文】

なし

【口頭発表】

1. 久保大樹 他、ボーリング調査データに基づいた地質統合モデルによる亀裂性岩体の水理構造の推定、一般社団法人資源・素材学会 資源・素材 2022 / 2022 年 9 月 8 日

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 年度の成果概要 6
4. 2022 年度研究実施内容 12
4.1 2022 年度の計画、実施方法 12
4.2 2022 年度の成果内容 12
5. まとめ 19
6. 謝辞 19

参考文献
2022 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、（国研）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、変成岩など幅広い岩石から産出するため、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。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に活用できる。また、同一の岩石に対して、他の低温領域の熱年代法であるフィッション・トラック（FT）法や光ルミネッセンス（OSL）法などと併用することで、より詳細な熱履歴を復元することが可能となる（例えば、末岡・田上、2019）ため、He 年代測定法の高精度化は大きな利点となる可能性が示唆される。このように、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、重要な課題の一つであると考えられる。

全ての年代測定法において、測定値の精確性を保証するために、年代が既知であり広く分野で受け入れられた年代標準試料が設定されており、未知試料と同時に年代標準試料を測定することがルーティン化されている。年代標準試料としての適性は、地質試料の熱履歴が単純かつ解釈が容易であり、異質岩片・粒子の混入や熱擾乱などの二次的な加熱の影響が無視できることが要求されるため、年代が正確に求まっており、層序学・地質学的にも矛盾がないかといった地質年代学的な側面が必要となる。同時に、分析に堪える粒径を要するか、単一試料内で化学組成や年代が均質であるか、アクセスが容易で対象鉱物を十分量確保できるかといった分析学的な側面からも条件が要求される（例えば、 Hurford, 2019）。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。また、年代標準試料として認定されれば、ZHe 年代分析を行う世界中のラボで用いられることに繋がるため、年代測定分野内での影響も大きいと推察される。

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や試料ごとのパラメータ（放射線損傷や粒径、親核種濃度の均質さなど）との相関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性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

本研究に用いる地質試料の候補として、6 試料のジルコンを対象として分析を試みる（表 2-1）。上述の通り、年代標準試料には一般的に複数の条件が要求される。加えて、ZHe 法には年代のずれに作用する要因が多いため、独自の要件として、一定の粒径（75～200 μm）を有すること、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、他の年代測定法に基づく年代値が報告されていること、地質学的研究により制約されていることを選出の条件とした。まずは他の年代測定法の年代標準試料を対象とし、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、λ_{238}、λ_{235}、λ_{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]+0.235[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 2-1　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 年度の成果概要

2021 年度は、年代標準試料の候補として選出した 6 試料の 1 つである、歌長流紋岩の受領および鉱物分離を実施し、ZHe 年代測定に用いるジルコンを抽出した。その後、6 試料のうち 2 試料（歌長流紋岩、Buluk tuff）について、約 30 粒子を目途に ZHe 年代分析を行った。

(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）、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 3-1）。

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 3-2）。

(2) ZHe 年代分析結果と年代学的解釈

2021 年度に実施した歌長流紋岩（TRG04-21、TRG07-21）および Buluk tuff の 2 試料の ZHe 年代分析の結果は以下の通りである。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（図 3-3）。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。

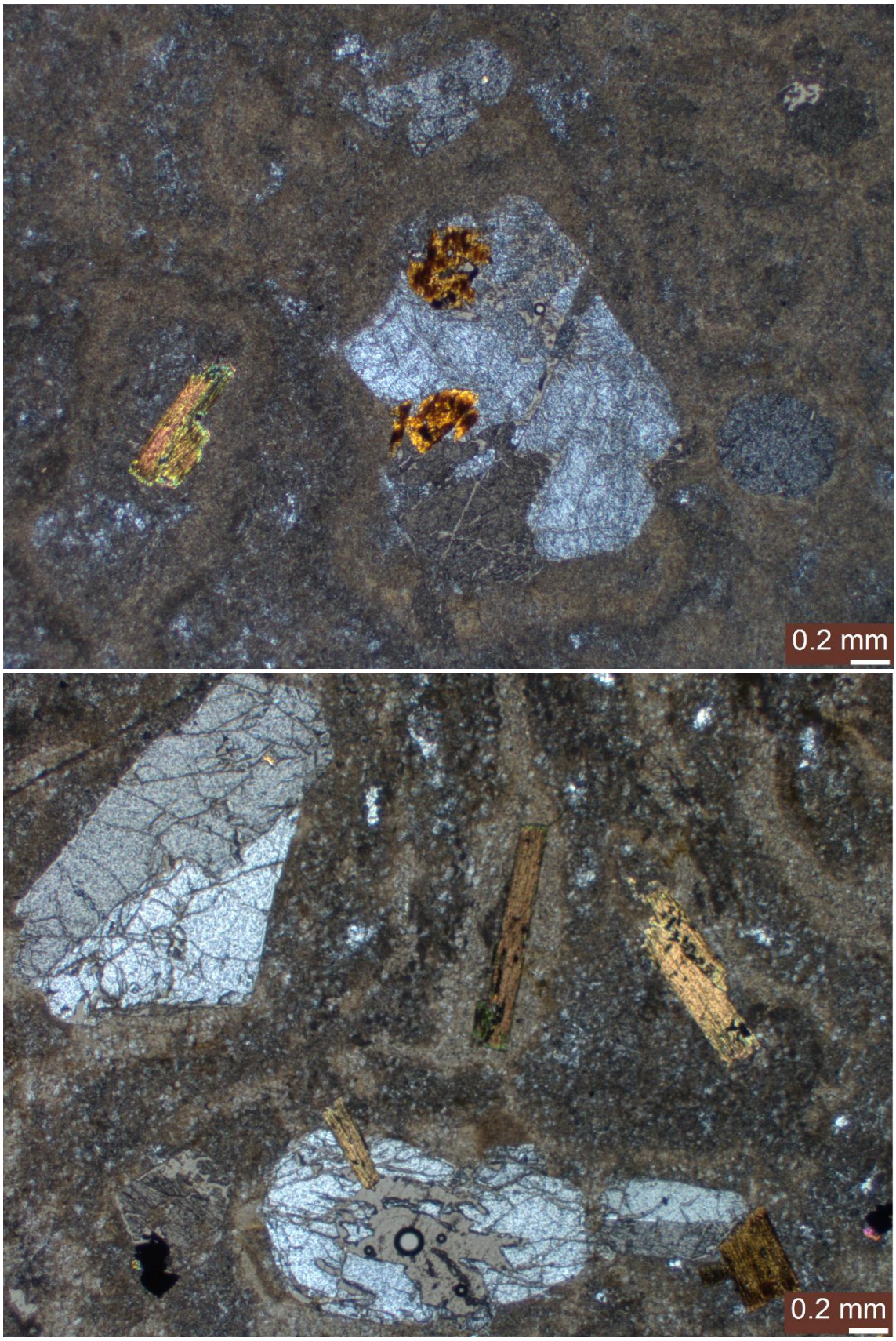


図 3-1　薄片写真（上：TRG04-21、下：TRG07-21）

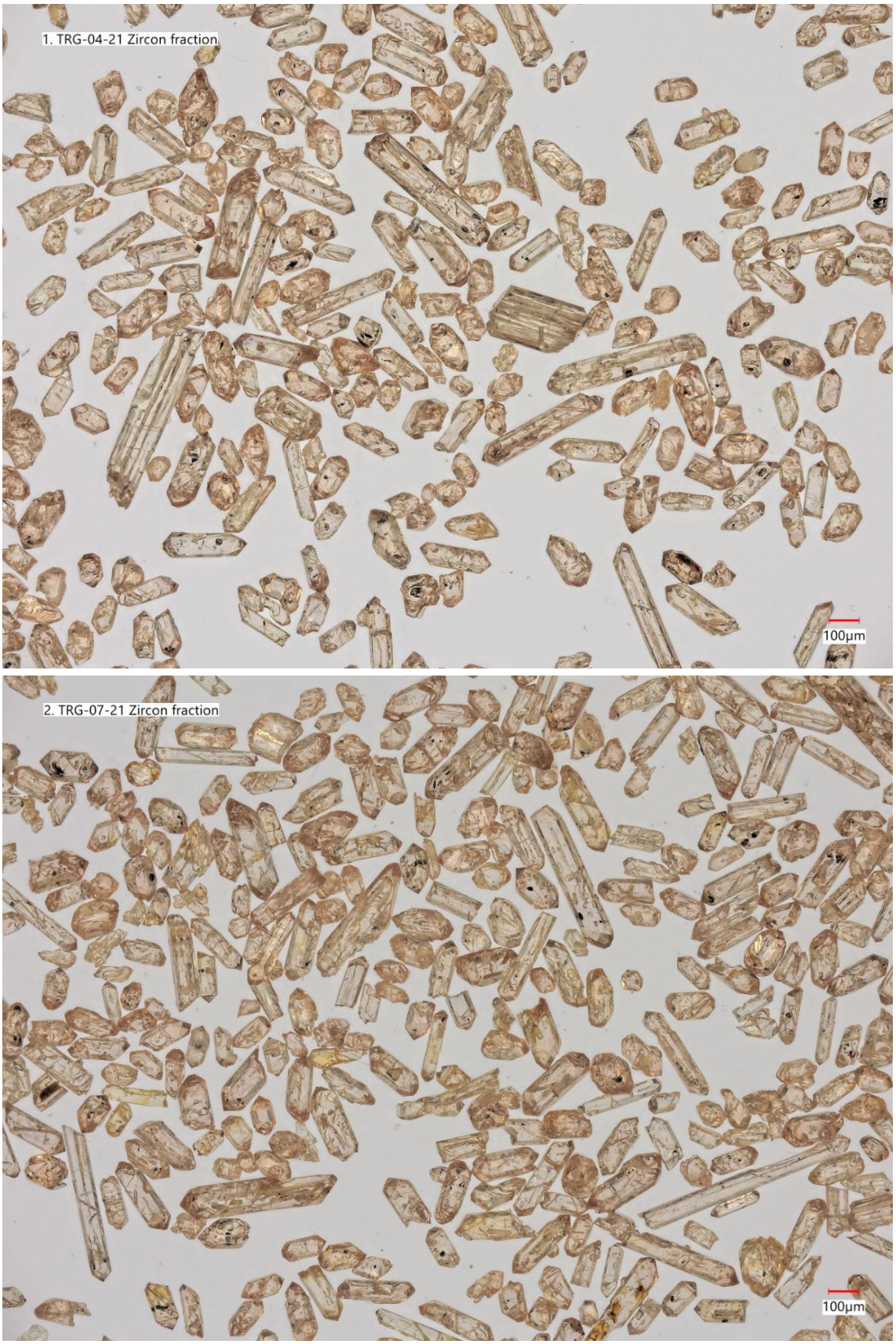


図 3-2　抽出処理後のジルコン試料（上：TRG04-21、下：TRG07-21）

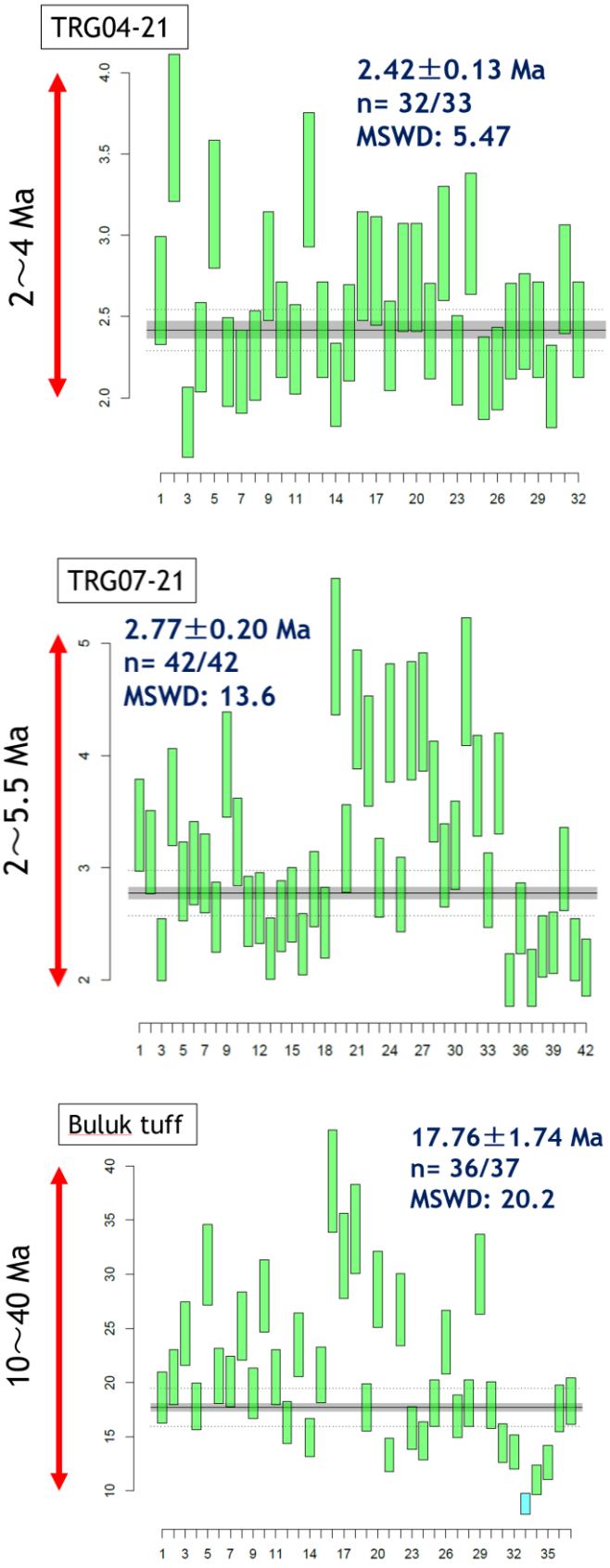


図 3-3　2021 年度における ZHe 年代分析結果

4. 2022 年度研究実施内容

4.1 2022 年度の計画、実施方法

これらの結果を踏まえ、2022 年度には以下の計画および実施方法の下で研究を実施した。

(1) ZHe 年代分析の継続

2022 年度は 6 試料中残り 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、昨年度同様に 1 試料当たり 30 粒子を目安とし、Melbourne 大において ZHe 年代分析を実施する。分析条件や作業手順は 2021 年度と同様のため詳細は省略する。また、得られた年代の整合性や単粒子年代のばらつきを評価し、6 試料のデータ間で比較を行う。

(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、2021 年度時点では歌長流紋岩（TRG04-21）の適性が最も高い結果となった。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、ラウンドロビンテストを実施する。鉱物分離作業は、株式会社京都フィッション・トラックに外注を依頼し、複数の研究機関に配布するための十分量のジルコン試料を確保する。鉱物分離の手順は、2021 年度と同様であるため割愛する。

(3) ZHe 年代のばらつきの要因の究明

全ての試料について、単粒子年代のばらつきに作用している要因を検討する。単粒子年代と、放射線損傷や幾何学パラメータとの相関関係について検討し、ばらつきの要因の特定を試みる。

4.2 2022 年度の成果内容

(1) ZHe 年代分析の継続

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 28.19±1.00 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。ZHe 年代分析の結果、Mt. Dromedary 95.34±2.37 Ma で、OD-3 では 29.76±2.44 Ma、WSF1 は 17.77±1.05 Ma、Site-43 は 50.59±2.93 Ma となり、単粒子年代のばらつきを示す MSWD 値は、それぞれ、1.24、12.1、5.38、5.67 であった（福田ほか、2022；図 4-1、表 4-1)。その内、OD-3 については MSWD 値が 10 を超えており、特に単粒子のばらつきが大きいと考えられる。

次に、本研究で測定した ZHe 年代について、表 4-1 に示す既往熱年代データと併せて各試料の熱履歴について解釈する。

まず Mt. Dromedary については、加重平均年代の値こそ参照値よりも若干小さい値となったが基本的には整合的であり、単粒子年代は非常にまとまりが良かった。年代が若干小さい値となった原因として、今回測定した粒子のサイズが標準的なジルコンよりも小さい（20～40 μm: 図 4-1）ことに起因する可能性が考えられる。したがって、自形で大きい粒子を選別することで年代標準試料として活用できる可能性は十分に予想できる。

次に、OD-3 については、有意に参照値よりも若く、かつ、ばらつきも大きいという結果となった。これは OD-3 が花崗閃緑岩と呼ばれる徐冷の熱史を持った地質試料であることや、粒径が標準的なジルコンよりも大きい（長径が 200～300 μm）こと、大半の粒子は頂点が破断しており、理想的な自形結晶を保っていないことなどが原因であると考えられる。これまでの U-Pb 分析や FT 分析で親核種濃度の均質性は担保されているが（Iwano et al., 2013)、本研究における観察事実から ZHe 法には適当でないという結果となった。

WSF1 については、推奨年代よりも有意に若い年代値が得られており、先行研究でも議論されたように熱水による熱擾乱の影響が示唆される（石田ほか、1998)。特に、ZHe 年代よりも閉鎖温度の高い Rb-Sr 年代が若返るという結果となっているため、無視できない熱影響を被っている可能性は否定できない。このように、二次的な加熱の影響が考えられる試料は、年代標準試料としての活用は考えにくいため、この試料は適当でないと結論付けた。

最後に、Site-43 についてだが、本試料も形成年代に相当する U-Pb 年代より有意に若い ZHe 年代値が得られていることから、加熱の影響は無視できないと考えられる。本試料も WSF1 同様に、年代標準試料には不向きであると解釈される。

以上のように、2022 年度に分析した 4 試料のうち、Mt. Dromedary のみが標準試料としての適性があると評価された。昨年度までの成果と併せると、6 試料のうち、TRG04-21 と Mt. Dromedary の 2 試料が適性を示す結果となった。

(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

配布用の試料を確保するため、外部から譲渡いただいたサンプルの内、21 kg 程度の地質試料について鉱物分離を行った。その結果、1.154g のジルコンを抽出でき、十分量を確保した。その後、ラウンドロビンテストのために、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ったが、分析装置の不具合のため、2022 年度中の ZHe 年代分析は実施できなかった。今後は、国外の研究機関に送付し、分析条件の異なるラボ間での年代の均質性を評価するとともに、装置の復旧後に東濃での ZHe 年代分析を検討したい。

(3) ZHe 年代のばらつきの要因の究明

ZHe 年代分析を終えた全ての試料について、単粒子年代のばらつきに作用している要因を検討した。まずは、放射線損傷と年代について、全ての試料で有意な相関関係は認められなかった（$R^2 < 0.4$: 図 4-2）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。粒径と単粒子年代については、Buluk tuff にのみ 0.45 と弱い正相関を持つことを除き、同様に有意な相関関係は認められなかった（$R^2 < 0.4$）（図 4-3）。本研究で使用した Buluk tuff は、長径が大きい一方で扁平な形状をしており、分析において理想的な粒子である柱状の結晶形ではなかったことが要因である可能性がある。加えて、MSDW 値が 10 を超える OD-3、Buluk tuff、TRG07-21、NST19 については、単粒子年代のばらつきが大きいため、単粒子年代のずれの原因となる粒径や形状、親核種濃度の不均質、外部粒子の混入や試料特有の熱履歴などが年代値に複合的に作用している可能性がある。

一部の試料については、新たに U-Pb 年代測定を実施することで岩石・鉱物の形成年代を制約し、熱履歴について考察した。標準試料として適性が認められつつある TRG04-21 の結果にのみ注目すると、新たに U-Pb 年代を取得した結果、2.65±0.16 Ma の年代値が得られた（長田ほか、2022）。したがって、TRG04-21 については、全ての既報年代と ZHe 年代が整合的なデータとなり、ZHe 年代標準試料としての適性を支持する結果となった。U-Pb 年代分析の結果から、現時点では粒子内のゾーニングの影響は考えにくいが、今後は LA-ICP-MS や EPMA を使用した鉱物内部の包有物の同定や組織観察、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。

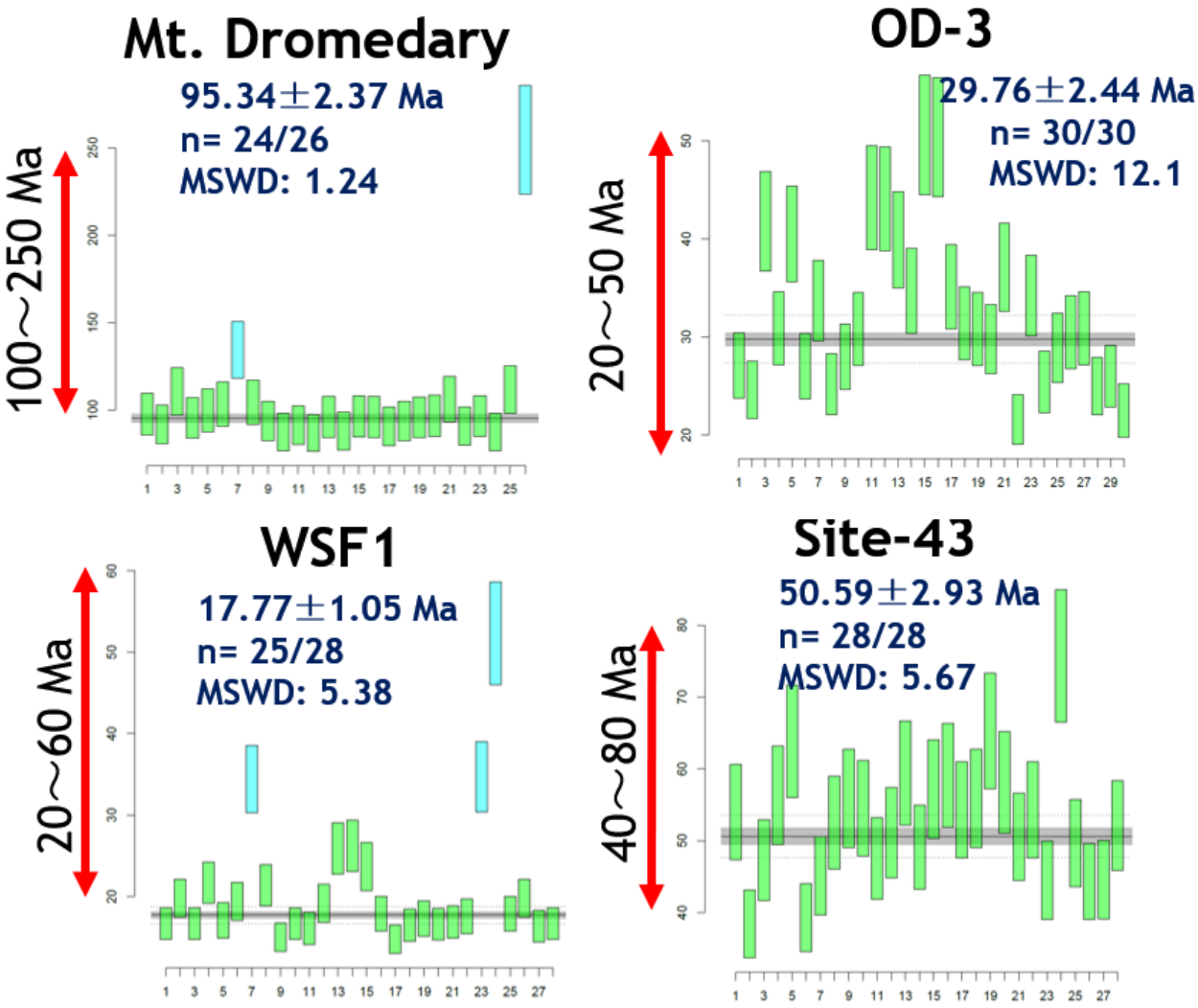


図 4-1　2022 年度における ZHe 年代分析結果

表 4-1　ZHe 年代分析結果の一覧

サンプル	ZHe age ±95%CI (Ma)	MSWD	Refer values ±2σ (Ma)
NST19	21.0 ± 0.30	10.9	22～21 Ma　(ZFT)
TRG04-21	2.42 ± 0.13	5.47	2.61 ± 0.36　(ZHe)
TRG07-21	2.77 ± 0.20	13.6	*2.61 ± 0.36　(ZHe)
Buluk tuff	17.7 ± 1.74	20.2	16.1 ± 1.6　(ZHe)
Mt. Dromedary	95.3 ± 2.37	1.24	99.2 ± 3.6　(ZHe)
OD-3	29.8 ± 2.44	12.1	32.6 ± 0.6　(ZFT)
WSF1	17.8 ± 1.05	5.38	21.6 ± 1.6　(ZFT)
Site-43	50.6 ± 2.93	5.67	72～70 Ma　(U-Pb)

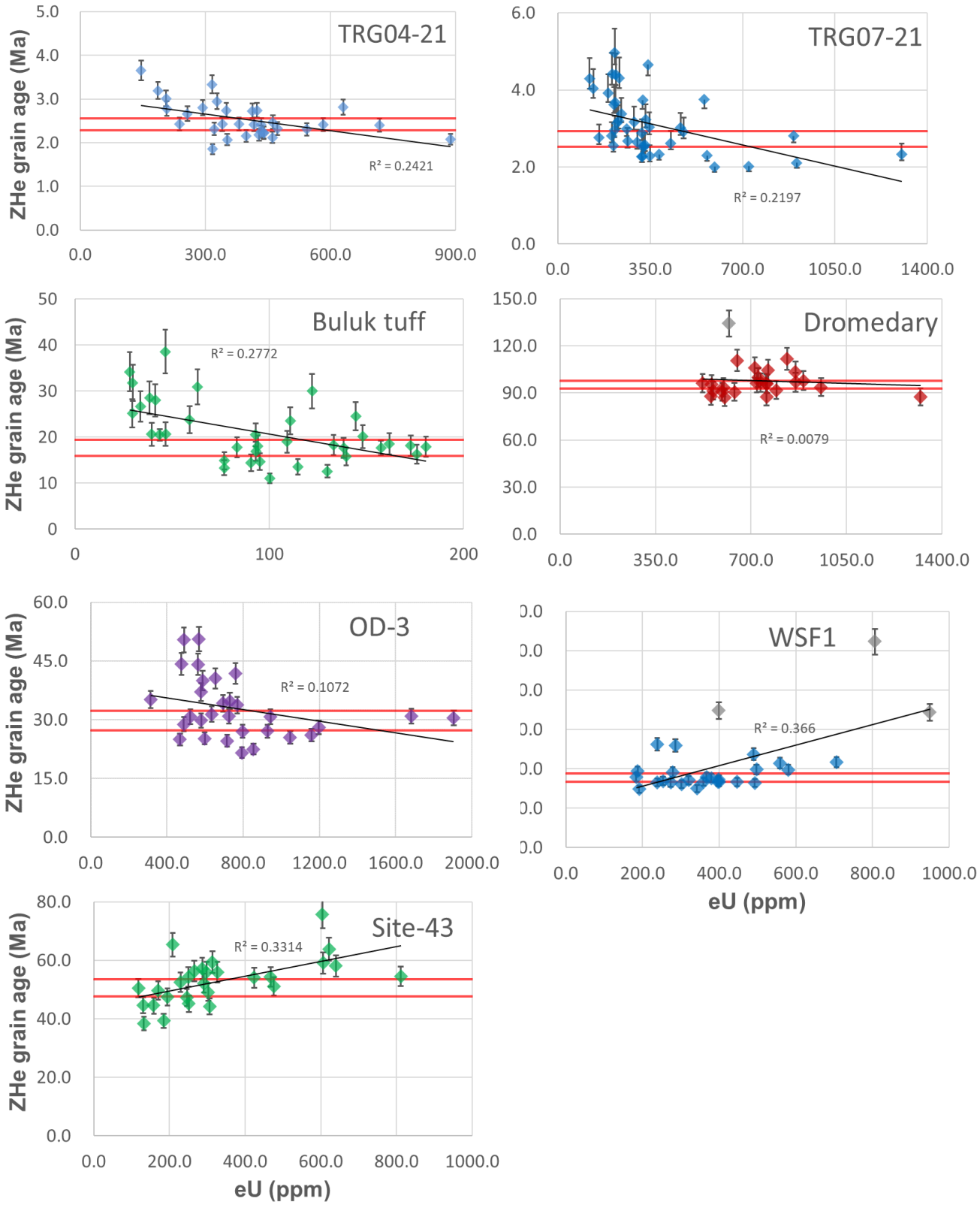


図 4-2　eU vs. 単粒子年代のプロット

各グラフにおける水平方向の 2 本の赤線は、ZHe 年代の加重平均値の 95%信頼区間の上限と下限を表す。
単粒子年代の誤差範囲は 2σ

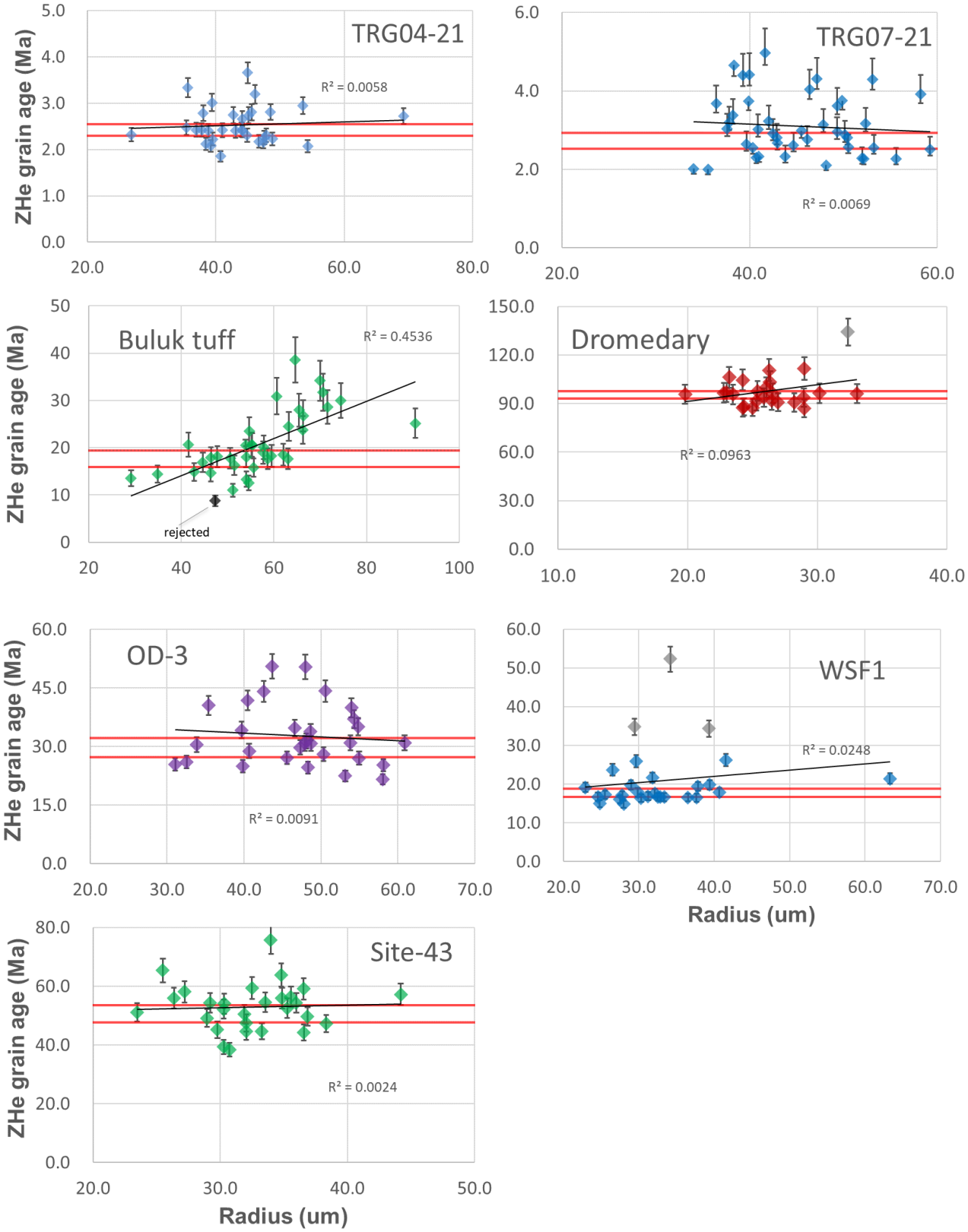


図 4-3　粒径 vs. 単粒子年代のプロット

各グラフにおける水平方向の 2 本の赤線は、ZHe 年代の加重平均値の 95%信頼区間の上限と下限を表す。
単粒子年代の誤差範囲は 2σ

5. まとめ

本研究では、ZHe 法の年代標準試料の確立のため、6 点の地質試料から分離したジルコンについて ZHe 年代測定を実施し、その適格性について評価を行った。その結果、単粒子年代のばらつきと、既報年代との整合性から考えると歌長流紋岩から分離した TRG04-21 が最も年代標準試料として適当であり、次いで Mt. Dromedary についても適性が認められる結果となった。今後は詳細な化学組成分析や包有物の特定などの評価を含めて、標準試料ジルコンとしての適性についても検討を深めていきたい。

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、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、一連の ZHe 年代分析を実施していただいた。

参考文献

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 福田将眞、Barry P. 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、フィッション・トラックニュースレター、35、7-10.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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）.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 石田勇人、石渡 明、加々美寛雄 (1998): 新第三系北陸層群の鷲走ヶ岳月長石流紋岩質溶結凝灰岩、地質学雑誌 104(5)、281-295.

17. 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.

18. 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、フィッション・トラックニュースレター、35、15-18.

19. 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.

20. 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.

21. 末岡 茂、田上高広 (2019): 低温領域の熱年代学の原理と地殻浅部のテクトニクスへの応用、地学雑誌、128(5)、707-730.

22. 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.

23. 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.

2022 年度　外部発表

【学術論文】

1. 福田将眞、Barry P. 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、フィッション・トラックニュースレター、35、7-10.

2. 福田将眞、鏡味沙耶 (2022): (U-Th)/He法のための高温加圧酸分解によるジルコンの完全溶解の試み、フィッション・トラックニュースレター、35、11-14.

3. 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、フィッション・トラックニュースレター、35、15-18.

【口頭発表】

1. 福田将眞、鏡味沙耶 (2022): (U-Th)/He法に係る湿式分析法の検討 : 検量線法による親核種濃度の定量の試み、SR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2022年度合同研究会.

2. 長田充弘、福田将眞、末岡 茂、中嶋 徹 (2022): 熱史からみたジルコンの標準試料への適性評価: 石川県鷲走ヶ岳層の例、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2022年度合同研究会.

別添資料２　総括

（各実施研究の２年間の成果概要）

沿岸部に近接して施工された地下施設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　林久資

要約

本研究では、沿岸部に近接して施工された地下施設の健全性評価を目的として、地下空洞の長期安定性を把握するために有益な情報を収集するために、道路トンネル点検結果の分析を行った。また、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として、鋼製支保工の腐食減耗を模擬した数値解析や、鋼製支保工の腐食減耗を模擬した載荷実験を実施した。さらに、塩水が設備等に及ぼす影響を把握する目的で、レールの腐食実験を行った。

その結果、トンネル周辺環境や施工時の特殊性が維持管理時に及ぼす影響を把握することが出来た。また鋼製支保工が腐食減耗した場合には、支保工の耐荷力が低下することがわかった。さらに、坑道内付帯設備を模擬したレールを用いた実験では、付着塩分量とさび厚、腐食減耗量の関係を明らかにした。

○研究の背景・目的

地層処分施設の地下施設は、立坑、斜坑、連絡坑道、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した。

○実施内容（代表的な結果の図表等を数点示す）

トンネル点検結果の分析

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。

鋼製支保工の腐食減耗を模擬した数値解析

本研究では塩害腐食による鋼製支保工の減耗が坑道安定性に及ぼす影響を把握することを目的とし、軟岩（新第三紀堆積岩）地山内に建設される処分坑道を模擬した坑道の掘削解析を行い、その解析を基に、鋼製支保工の減耗を考慮した解析を実施した。

鋼製支保工の腐食減耗を模擬した載荷実験

二次覆工を施工しないトンネルが塩分を含む地下水によって塩害が引き起こされ、鋼製支保工が腐食減耗した際、支保工の耐荷力についての影響把握を目的とした。本研究では、下フランジ厚さが異なる鋼製支保工とコンクリートの合成構造物を載荷実験し、塩害腐食による減耗が支保工の耐荷力に及ぼす影響を比較・検証した。

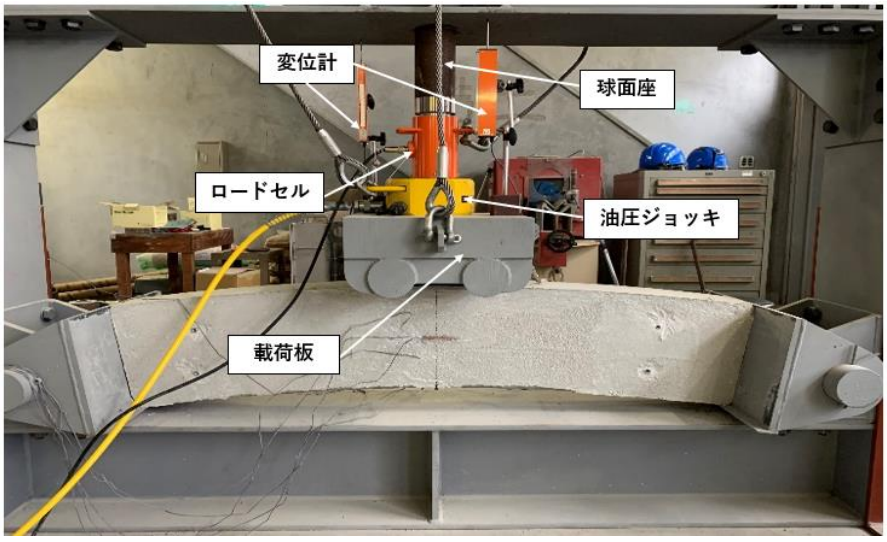


図 1　載荷実験の様子

まず、鋼製支保工と吹付けコンクリートの合成構造の試験体を作成するために、型枠の作成、鋼製支保工の加工、コンクリートの配合設計を行った。型枠内の内空側に鋼製支保工を設置し、吹付けコンクリートの配合と同様のコンクリートを打設し、長さ 1500mm×幅 125mm×厚さ 300mm のトンネル天端部の一部を模擬した試験体を作成した。

載荷実験は、図 1 に示すとおり、載荷枠に試験体、載荷板、油圧ジャッキ、ロードセル、球面座、変位計を設置した。

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した。

○得られた成果と考察

トンネル点検結果の分析

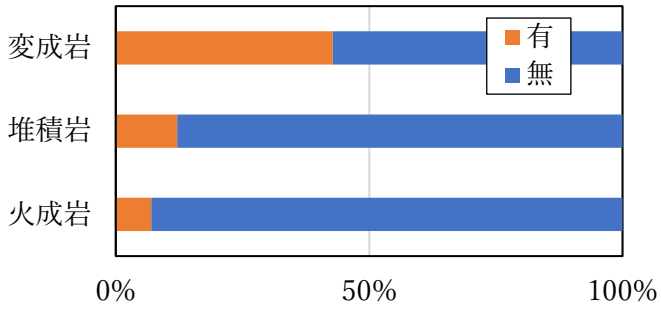


図 2　外力発生の有無とトンネル周辺地質の関係

二車線道路トンネルを無作為に 32 本（1246 スパン）抽出し、外力によって変状が確認されたトンネル 12 本（533 スパン）、漏水による変状が確認されたトンネル 20 本（759 スパン）を変状の程度、土かぶり高さ、地質、工法、経年による詳細分析を行った。一例として、

外力発生有無とトンネル周辺地質の関係の図 2 に示す。このように、トンネル周辺地質と外力性変状の発生確率には相関があることがわかった。その他にも、外力発生有無とトンネル土かぶりの関係や、漏水発生確率とトンネル周辺地質、トンネル経年の関係を明らかにすることが出来た。

これらの結果から、外力や漏水による変状の発生有無はトンネル周辺の地質状況、土かぶり厚さ、経年などと相関があると考えられ、本研究成果は坑道建設および維持管理における有益な知見となった。

鋼製支保工の腐食減耗を模擬した数値解析

坑道が掘削構築された後、支保部材のうち鋼製支保工が減耗した場合の鋼製支保工の外縁側圧縮応力に及ぼす影響を図 3 に示す。この図より、減耗の程度が顕著なほど鋼製支保工に生じる圧縮応力が卓越することがわかる。

また、地山条件が CM-H のケースや、CM-M、CM-H Hr、CM-M Hr における減耗の程度が軽微な条件においては、鋼製支保工の内縁側圧縮応力と外縁側圧縮応力が同様の結果である一方で、それ以外の条件においては外縁側圧縮応力が卓越する結果が得られた。この結果より、地山等級が良好な場合や、鋼製支保工が健全な場合には、鋼製支保工は地山からの荷重を軸力によって受け持つ一方で、地山等級が低下した場合や、鋼製支保工が不健全な場合には、鋼製支保工に軸力に加え、曲げモーメントが発生していることがわかった。

この研究により、地山条件によっては減耗によって支保工のアーチ効果のみで地山からの荷重を受け持つことが出来ず、曲げモーメントの発生による局所的な変状が生じる可能性が示唆された。

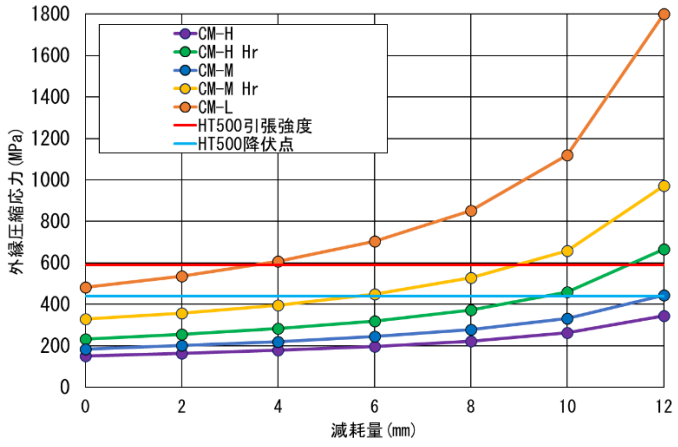


図 3　鋼製支保工の減耗量と外縁圧縮応力の関係

鋼製支保工の腐食減耗を模擬した載荷実験

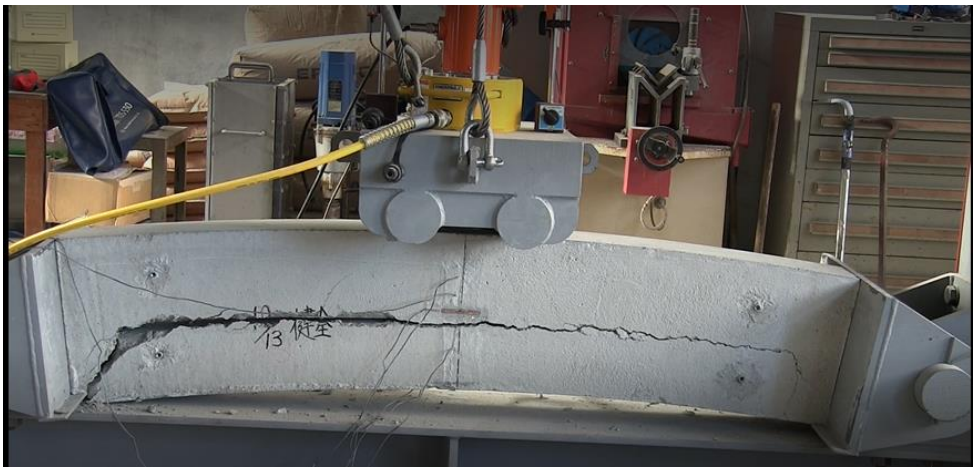


図 4　試験体破壊状況

図 4 に、健全な支保工によって試験体を作成した支保工が載荷によって健全性が失われた時点での状況を示した。荷重を天端背面より載荷すると、鋼製支保工とコンクリートの界面にひび割れが生じた。その後、さらに載荷を続けると鋼製支保工とコンクリートがはく離し、耐荷力が失われた状態となった。この破壊モードは、鋼製支保工とコンクリートの合成構造となっているすべてのケースで見られた。

図 5 に示す図で、終局耐力の比較を行ったが、最も健全な鋼製支保工によって作成された Case1 では最も終局耐力が大きい結果となり、Case2、Case3 と鋼製支保工の健全性が低下するにつれて、終局耐力も低下することがわかる。この結果から、塩害腐食によって下フランジが 1/2 まで減耗した場合、健全な鋼製支保工とくらべ耐荷力が約 6 割に低下することが分かった。

本研究における載荷実験では、載荷時に試験体上部・下部におけるひずみ差が生じていることが分かっていることから、曲げによる影響が発生している可能性がある。つまり、上述した解析結果のうち、地山等級が低下した場合や、鋼製支保工が不健全で支保工に曲げモーメントが卓越した場合には、図 4 のような変状が生じる可能性があると考える。

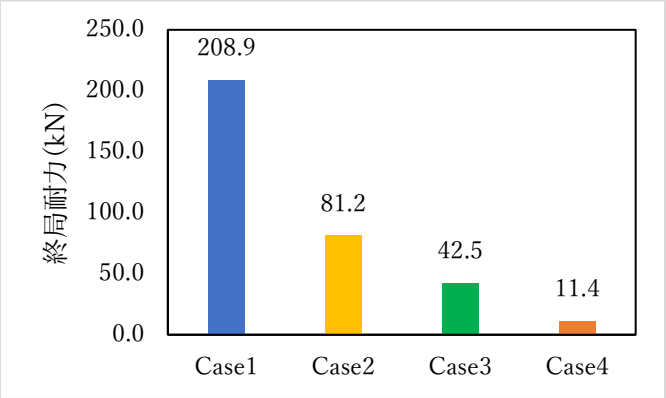


図 5　終局耐力の比較

塩害に関する実験

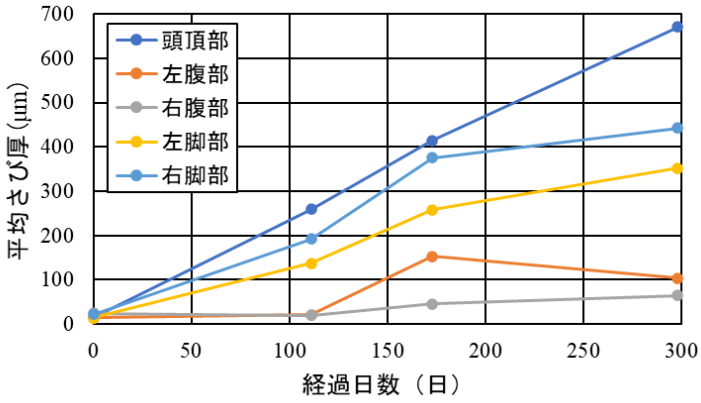


図 6　さび厚の経時変化（塩分あり）

レールの恒温恒湿腐食試験結果を示す。ここでの塩分付着量は、0.2mg/dm²/day（mdd）程度である。図 6 は、供試体 No.1（塩分噴霧ケース）における経過日数 0 日、111 日、173 日、298 日における頭頂部、左腹部、右腹部、左脚部、右脚部のさび厚測定結果を示したものである。さび厚は、各部 10 回ずつ測定した平均値とした。この図より、すべての測定箇所において概ね経時的に平均さび厚が増大していることがわかる。また、すべての測定日において頭頂部、脚部、腹部の順に平均さび厚が大きくなる結果が得られた。これらより、日平均飛来塩分量が 0.2mg/dm²/day（mdd）程度の場合、すくなくとも 300 日間は経時的にレールの腐食が進み、腐食箇所は頭頂部、脚部、腹部の順に顕著であることが分かる。

〇今後の展開（地層処分事業への寄与を含む）

まず、トンネル点検結果の分析に関して、外力や漏水による変状の発生有無はトンネル周辺の地質状況、土かぶり厚さ、経年などと相関があると考えられ、本研究成果は坑道建設および維持管理における有益な知見となった。しかしながら、トンネル周辺の地質状況においては、大まかな岩種による分別での分析にとどまったため、更なる詳細な分析が必要と考えている。また、漏水による影響が生じたトンネルの分析では、漏水の塩分の有無を考慮した分析は行えなかった。支保部材や設備の腐食が坑道健全性におよぼす影響解明のためには、経年したトンネルの分析は大変有益な知見となると考えるため、今後トンネル内漏水の塩分有無を考慮した分析が課題である。

次に、鋼製支保工の腐食減耗を模擬した数値解析に関して、地山条件によっては減耗によって支保工のアーチ効果のみで地山からの荷重を受け持つことが出来ず、曲げモーメントの発生による局所的な変状が生じる可能性が示唆され、地層処分施設の地下施設における設計施工に有益な知見となった。しかしながら、本研究においては鋼製支保工の減耗時に鋼製支保工に生じる応力が明らかになった一方で、鋼製支保工の健全性や、鋼製支保工の健全性低下に伴う地山への影響などについては分析できていない。今後は、更なる解析的検討を重ね、坑道周辺地山に発生する漏水が塩水の場合における地下施設への影響を解明したい。

鋼製支保工の腐食減耗を模擬した載荷実験では、支保工に載荷した際の破壊形態を確認することが出来た。支保工における載荷実験が実施された研究成果は、研究代表者が調査した限りではなく、地層処分施設の地下施設の設計施工に有益な情報となり得る。一方で、トンネル・坑道などにおける施工のすべてのケースで同様の載荷条件となるとは考えにくく、多様な条件による実験が必要と考える。今後は、更なる実験的検討を重ね、坑道周辺地山に発生する漏水が塩水の場合における地下施設への影響の解明が課題である。

最後に、塩害に関する実験であるが本研究によって、地下施設内へ漏水として塩水が流入した際に、鋼材が腐食する可能性があることを知見として得られた。本研究では、鋼製の材料としてレールを用いた実験を行ったが、上述したように鋼製支保工の腐食減耗による影響についても研究を進める必要があると考えている。そのため、鋼製支保工の腐食に関する実験的検討が今後の課題である。

○外部発表リスト

【学術論文】

1. Masanao Yamasaki, Tatsuhiko Otani, Koji Ishiyama, Hisashi Hayashi, Masato Shinji: Suggestion of estimation method of the deterioration degree on lining for Shaft, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2022, 2022.
2. Yoshinobu Kondo, Hisashi Hayashi, Yasuyuki Okazaki, Masato Shinji: A Study of the Conditions for the Occurrence of Icicles in Road Tunnel, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2022, 2022.

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　伊藤大知

要約

本研究は、ベントナイト緩衝材が長期間高温・高圧環境に置かれる際に懸念される、膠結作用の発生とそれに伴う特性低下を定量評価するとともに、数万年の長期経過後においても要求される性能の1つである自己修復性の評価手法を提案することを目的とする。膠結作用を受けた緩衝材の模擬材料として、地質年代や産地の異なるベントナイト原鉱石を 6 種類選定した。これらの原鉱石について、不攪乱試料と再構成試料を作製して、膨潤圧・膨潤変形特性を実験的に調査するとともに、地質年代に代わる膠結作用の程度を表す代替指標を模索するためエコーチップ試験や弾性波試験に代表される非破壊力学試験を実施した。また、膠結作用のメカニズム解明を目的として、薄片試料を作製し SEM 観察と EDS 分析を行った。その結果、いずれの原鉱石においても不攪乱試料の膨潤特性は再構成供試体に比べ 1/2 以下と大幅に低下することが示された。エコーチップ試験および弾性波試験結果から、不攪乱試料は再構成試料に比べ硬度が高く、弾性波速度も速いことが示され、内部構造が膠結作用により緻密化していることが示唆された。薄片試料の SEM 観察および EDS 分析から、不攪乱試料の粒子構造が複雑化・緻密化しており、膠着物質としてシリカ系鉱物が有力であることが示唆された。また、緩衝材の経時変化に関するシナリオを構築し、様々な拘束条件下で行った膨潤特性実験結果と組み合わせて、膠結作用に伴う特性低下を考慮した、ベントナイト系緩衝材の自己修復性評価手法を提案した。本研究成果は、高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価に対し、バリアシステムの中でも重要な役割を果たす緩衝材の自己修復性に関して、長期間経過後において変質・特性変化が生じた場合においても高精度に性能を予測・評価できる知見となり得る。

○研究の背景・目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるベントナイト系緩衝材には、数万年以上の長期間にわたって自己修復性（オーバーパックの腐食に伴う水素ガスの破過により発生する水みちとなり得る損傷部を膨潤変形により充填すること）を発揮することが求められてい

る。しかし、緩衝材は高温・高圧環境下において塩類を含む地下水と接触するため、内部において膠結作用が発生し、この性能の発揮に密接に関わるベントナイトの膨潤特性が低下する可能性が懸念されている。しかし、膠結作用のような長期的な変質現象を室内実験で模擬し、評価することは極めて困難である。

本研究の目的は、地質学的概念であるナチュラルアナログ手法を参考として、膠結作用を受けた緩衝材の模擬材料としてベントナイト原鉱石を用い、不攪乱試料と粉砕により膠結作用の影響を除去した再構成試料を作製して、膨潤特性を定量評価するとともに、非破壊力学試験による膠結作用の程度の評価可能性や、顕微鏡観察による膠結作用メカニズムの解明を行い、緩衝材の膠結作用に伴う自己修復性の年代変化を評価することである。また、緩衝材の状態変化シナリオを作製し、その発揮過程で想定される様々な拘束条件を模擬した膨潤特性実験結果を組み合わせることで、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を構築する。

○実施内容

(1) 白崎産、細越産、黒石産原鉱石（いずれも、地質年代約 1000 万年）の膨潤特性実験を実施した。そのうち、白崎産原鉱石の膨潤圧実験結果を図 1 に示す。この図において示されるように、不攪乱供試体の膨潤圧は再構成供試体に比べ、1/2 以下にとどまっていることが分かった。また、膨潤変形特性についても、同様に著しく低下していることが分かった。

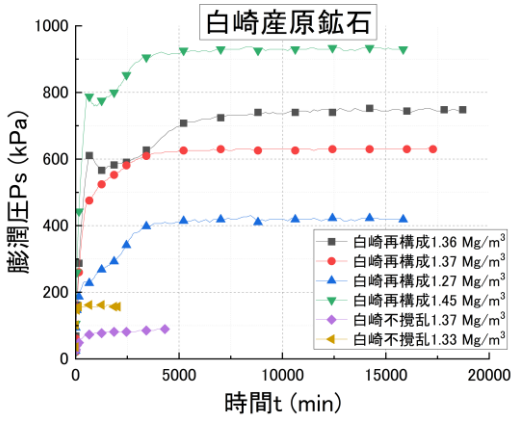


図 1　白崎産原鉱石の膨潤圧の経時変化

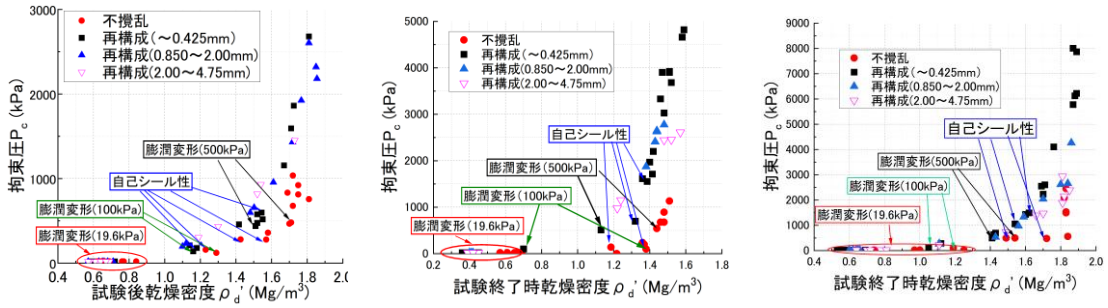


図 2　拘束圧－乾燥密度関係（左：月布産、中：Ten Sleep 産、右：劉房子産）

(2) 月布産（約 1000 万年）、Ten Sleep 産（約 1 億年）、劉房子産（約 1.5 億年）の 3 種類について、高拘束圧（100 kPa・500 kPa）下での膨潤変形特性を取得した。それらの結果と、代表者のグループで取得した膨潤圧・膨潤変形特性（拘束圧 19.6 kPa）実験結果とを総合した拘束圧－乾燥密度関係を図 2 に示す。これより、拘束条件の差異に依らず、拘束圧と乾燥密度の関係の間には、不撹乱供試体・再構成供試体のそれぞれに一意な関係が見出された。

(3) 地質年代に代わる膠結作用の程度の代替指標として、エコーチップ試験による硬度測定を行った。図 3 にエコーチップ試験結果を示す。これより、不撹乱供試体の方が再構成供試体よりも硬さ値（L 値）が高く、膠結作用により粒子構造が強化されて硬度が増していることが示唆された。

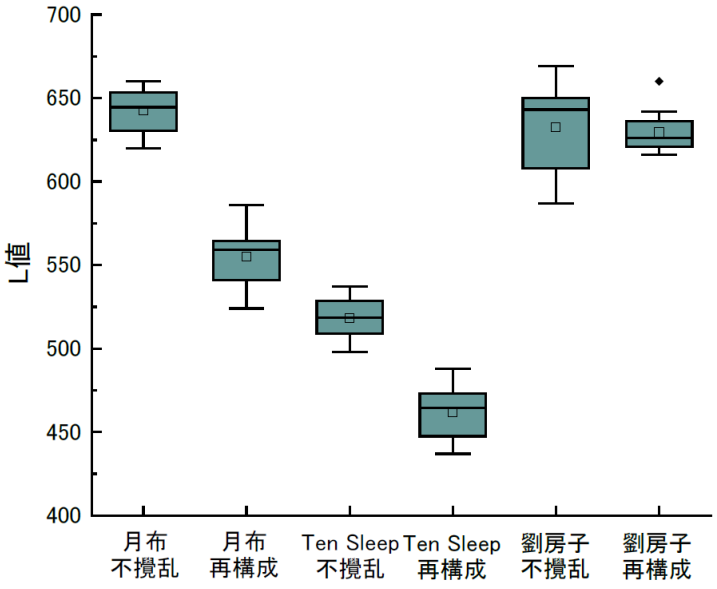


図 3　エコーチップ試験結果

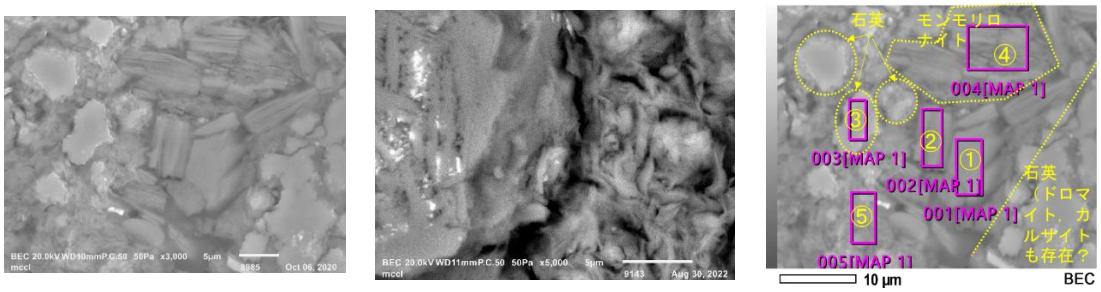


図 4　SEM 観察結果（左：月布産不攪乱試料、中：月布産再構成試料）と元素マッピングによる鉱物同定結果（右）

(4) 不攪乱試料と再構成試料から作製した薄片試料の SEM 観察と EDS 分析を実施した。図 4 に SEM 観察と EDS による元素マッピング結果に基づく含有鉱物同定結果を示す。これより、不攪乱試料では鉱物間の境界が不明瞭であるのに対し、再構成試料では破砕を経ているため粗粒鉱物間やモンモリロナイト粒子間に間隙が目立つことが分かる。

(5) 弾性波試験を行った結果、図 5 に示すように P 波・S 波速度のいずれも不攪乱供試体の方が速く、不攪乱供試体の内部構造が緻密であることを示す結果が得られた。供試体の状態量と弾性波速度の関係を模索したところ、飽和度に高い相関性を示すことが示唆された。

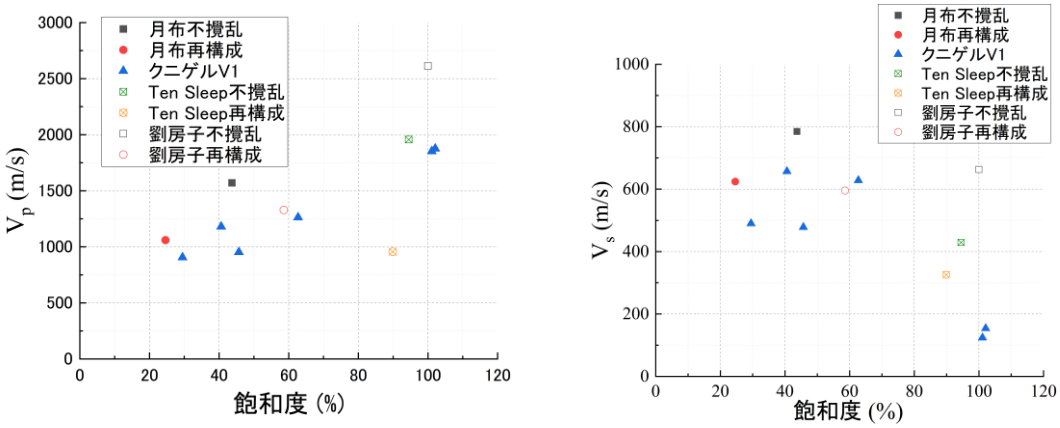


図 5　弾性波速度と飽和度の関係

(6) 図 2 で得られた拘束圧－乾燥密度関係と、緩衝材の状態変化シナリオを想定し、両者を組み合わせることで、膠結作用の影響を考慮した緩衝材の自己修復性評価手法を構築した。図 6 に緩衝材の状態変化シナリオと、シナリオ上の 1 つ 1 つの状態変化を拘束圧－乾燥密度関係上に落とし込んだ図を示す。

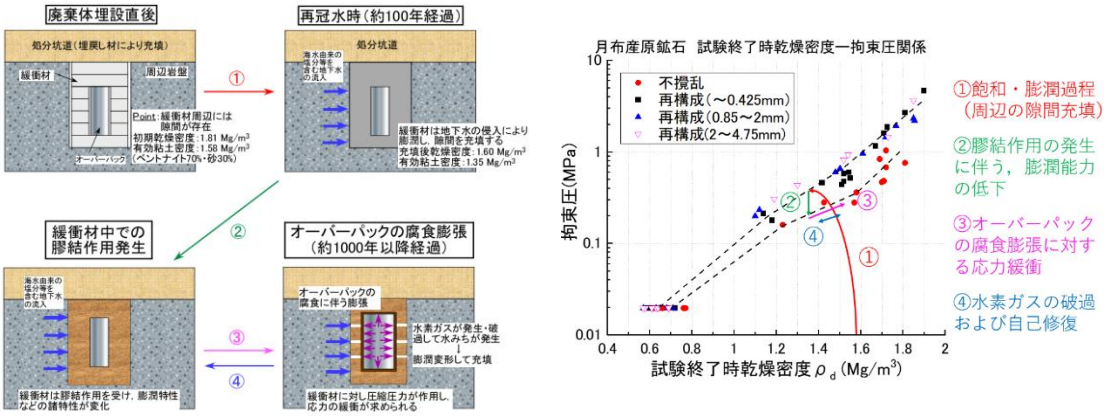


図 6　緩衝材の自己修復性評価手法の概要

○得られた成果と考察

(1) 今回実施した 3 種類の原鉱石と、過去に行った原鉱石の検討結果を総合すると、膠結作用により膨潤特性は 1/2 以下に低下することが共通しており、ベントナイト系緩衝材が膠結作用を受けた場合の膨潤特性の挙動を予測する際、有用なデータが得られた。

(2) 拘束条件に依らず、不攪乱供試体・再構成供試体のそれぞれにおいて拘束圧－乾燥密度の一意な関係を見出すことができたことにより、緩衝材が膠結作用を受けた場合における拘束圧と乾燥密度のそれぞれの応答を予測可能であることが示唆された。

(3) 非破壊力学試験であるエコーチップ試験により硬度から膠結作用を受けていることを確認できることが分かった。ただ、原鉱石の地質年代や膨潤特性の低下度とは相関性がみられず、これらに代わる代替指標は引き続き模索し続ける必要がある。

(4) 月布産・劉房子産原鉱石の 2 つに共通して、不攪乱試料における間隙構造の緻密化や膠着物質としてシリカ系鉱物が有力であることが確認された。このことから、緩衝材において膠結作用が生じる場合、外的要因にもよるがシリカ系鉱物が膠着物質として膠結作用に寄与する可能性が高いことが推察される。

(5) (2)で述べた通り拘束圧と乾燥密度の間に一意な関係があることにより、膠結作用を受けた場合においても、拘束圧あるいは乾燥密度のいずれかの変動を予測することがで

きればもう一方を評価可能であることが分かった。これにより、緩衝材の自己修復性能の長期的な予測に大いに役立つ成果が得られた。

○今後の展開（地層処分事業への寄与を含む）

本研究で得られた成果のうち、地質年代約 1000 万年～1.5 億年の多種類の原鉱石を用いて、膠結作用に伴う膨潤特性の低下度を評価した成果は、緩衝材の自己修復性評価における膠結作用の影響を検討する根拠となるデータである。

原鉱石の膠結作用の程度を非破壊力学試験で評価したデータは、ベントナイト原鉱石をはじめとする岩石の固結度評価において有用な成果である。弾性波試験において、ベントナイト系材料の飽和度と弾性波速度の間に良好な相関性を見出した点は、地層処分の緩衝材や埋戻し材として用いるベントナイトブロックの非破壊飽和度確認方法の 1 つのオプションとなり得る。

緩衝材の膠結作用に伴う特性低下を考慮した自己修復性評価手法の構築については、長期的な変質に伴う特定変化を定量的に考慮した世界でも類を見ない手法であり、緩衝材を含めた地層処分人工バリアシステムの長期安全性の担保に寄与できる。

今後は、緩衝材の膠結作用に伴う年代変化へのアプローチとして、水熱化学に基づき高温・高圧養生容器を用いた膠結作用加速試験を行い、メカニズムや律速因子の解明や膨潤特性・透水特性への影響を明らかにしたいと考えている。本研究で得られた成果と総合して、緩衝材の自己修復性をはじめとする各種性能の長期的な評価方法を構築していく。

○外部発表リスト

【学術論文】

- 伊藤大知、王海龍、小峯秀雄：地層処分におけるベントナイト系緩衝材の膠結作用に伴う超長期的劣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、pp.6-11、2022.4.

【国際会議発表】

- Daichi Ito and Hideo Komine: Experimental study to elucidate cementation effect on swelling pressure and montmorillonite basal spacing of bentonite ore, Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and

Geotechnical Engineering, Vol.2, pp.3803-3808, 2022.5.

・ Daichi Ito, Hailong Wang, Hideo Komine: Experimental study of aging-induced cementation effect on permeability property of bentonites, EUROCK2022 (Rock and Fracture Mechanics in Rock Engineering and Mining), 2022.9.

・ Daichi Ito and Hideo Komine: Cementation effect on swelling and permeability properties of bentonite considering microscopic structural evaluation, Proceedings of the 17th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023.8.

【国内発表】

・ 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.

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　河野勝宣

要約

地層処分における地下施設閉鎖後、地下水の浸潤に伴うベントナイトの膨潤・隙間充填は、EDZ 等の岩盤の損傷部の亀裂を充填・閉塞させる効果も期待されている。ベントナイトに作用する地下水中の化学成分の違いにより、岩盤中の亀裂の閉塞度合いやそれに対応して岩盤の透水性なども大きく異なることが考えらえる。本研究では、岩盤亀裂へのベントナイトの侵入量把握のための実験とベントナイトの劣化に伴う岩盤亀裂への侵入特性のモデル化を行った。さらに、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の一端を実験的に明らかにした。

○研究の背景・目的

地層処分における地下施設閉鎖後、地下水の浸潤に伴う緩衝材（ベントナイト）の膨潤・隙間充填は、EDZ 等の岩盤の損傷部の亀裂を充填・閉塞させる効果も期待されている。一方で、化学的作用によるベントナイト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恐れがあり、この場合、岩盤の亀裂閉塞の効果は期待できないと考えられる。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。

○実施内容

各種溶液環境下におけるベントナイト試料の膨潤・充填性同時実験（図 1）を 180 日間連続で実施した。また、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（図 2）。図中の F_s はベントナイトの膨潤圧により引き起こされる力、F_v は侵入流体の粘性抵抗力、F_p は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である。ベントナイトに作用する慣性力は無視し、系内において質量保存の法則が成り立つと仮定し（$F_s+F_v+F_p=0$）、ベントナイトの侵入長さ δ_n に関する支配方程式と封入流体の質量 m の変化率に関する支配方程式を構築した。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。さらに、経時変化する外部膨潤圧およびベントナイトの粘度を、それぞれ、時間の経過とともに指数関数的に上昇または低下することを考え、定式化することで、侵入量予測に関する支配方程式に組み込むことを試みた。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。さらに、各種溶液に浸漬させたベントナイトの透水実験およびベントナイト試料で充填された亀裂を含む岩石（幌延泥岩、万成花崗岩）の透水実験を実施した。

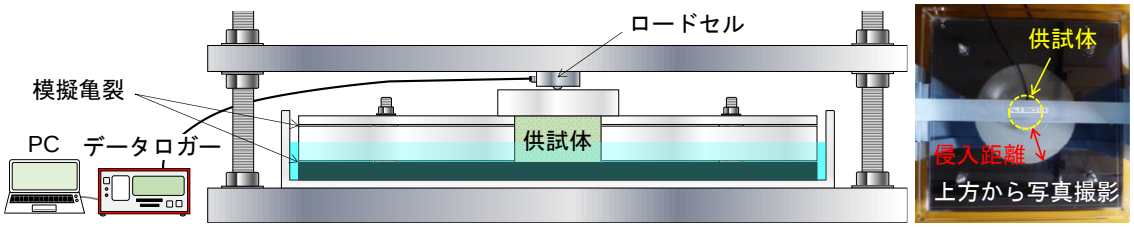


図 1　ベントナイト試料の膨潤・充填性同時実験

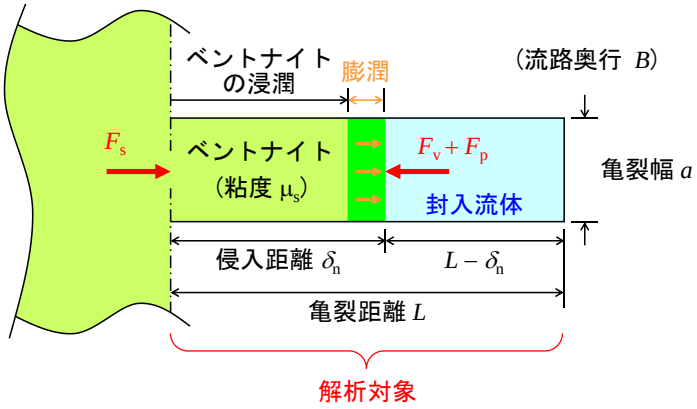


図 2　ベントナイトの亀裂への侵入のモデル化と解析対象

○得られた成果と考察

膨潤・充填性同時実験結果（図 3）から、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、$MgCl_2$ 水溶液および NaCl 水溶液環境下では、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考えられる。

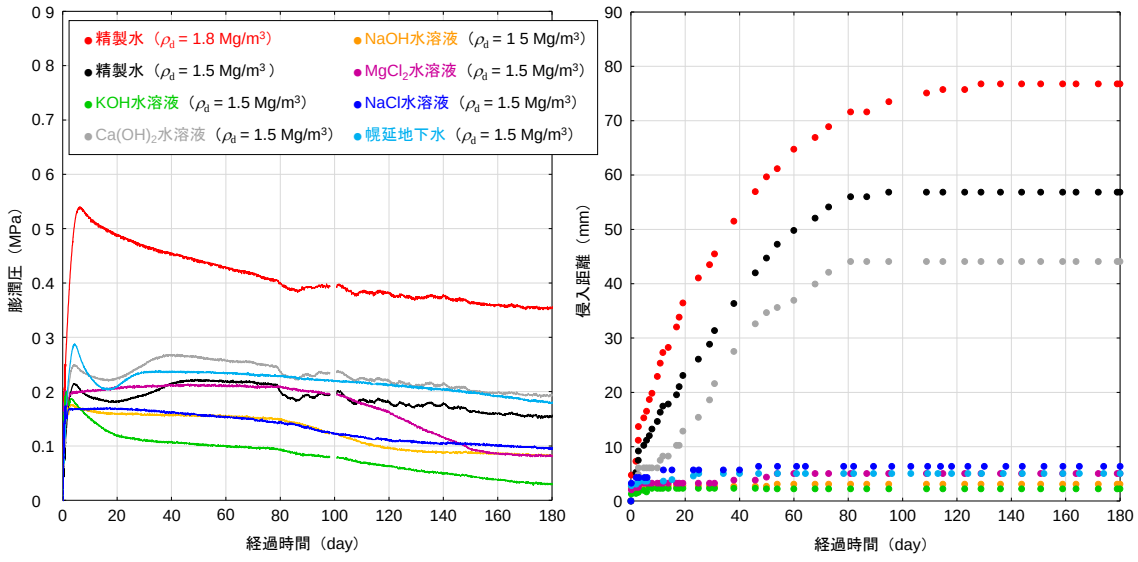


図 3　ベントナイト試料の膨潤・充填性同時実験結果

ベントナイト試料の岩石亀裂充填性のモデル化において構築した支配方程式を数値積分して導出した数値解を適用し、亀裂中のベントナイトの侵入長さの時間変化に関して数例

の解析的検討を行った結果の一例を図 4 に示す。縦軸は正規化した侵入長さ d_n^*、横軸は侵入時間の平方根 $t^{1/2}$ である。解析結果から、地層処分における超長期的なベントナイトの侵入を、亀裂中のベントナイトの封入流体吸収・拡散に起因する挙動と判断し、構築した閉口流路内の流体侵入に関する支配方程式が、地層処分における亀裂中のベントナイトの超長期的な侵入挙動を表す可能性があることを明らかにした。

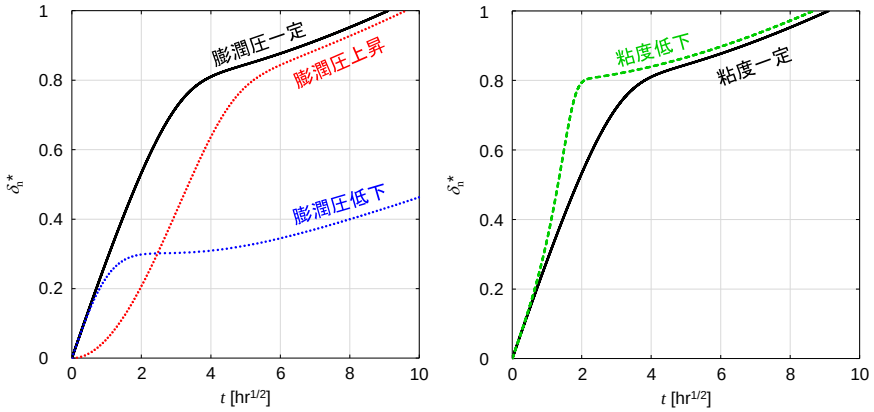


図 4　ベントナイトの亀裂侵入長さの時間変化に関する解析結果の一例

ベントナイト試料の透水実験結果（図 5A）から、各種溶液に浸漬させたベントナイトの透水係数は、精製水に浸漬させたベントナイトに比べて上昇し、ベントナイトは浸漬させる溶液種によってその透水性が大きく異なることがわかった。本結果は、地層処分におけるベントナイト系材料が地下水の化学的作用の影響により、透水性能が劣化するとともに、接触する地下水の水質によってその劣化度合いが異なることを示唆するものである。

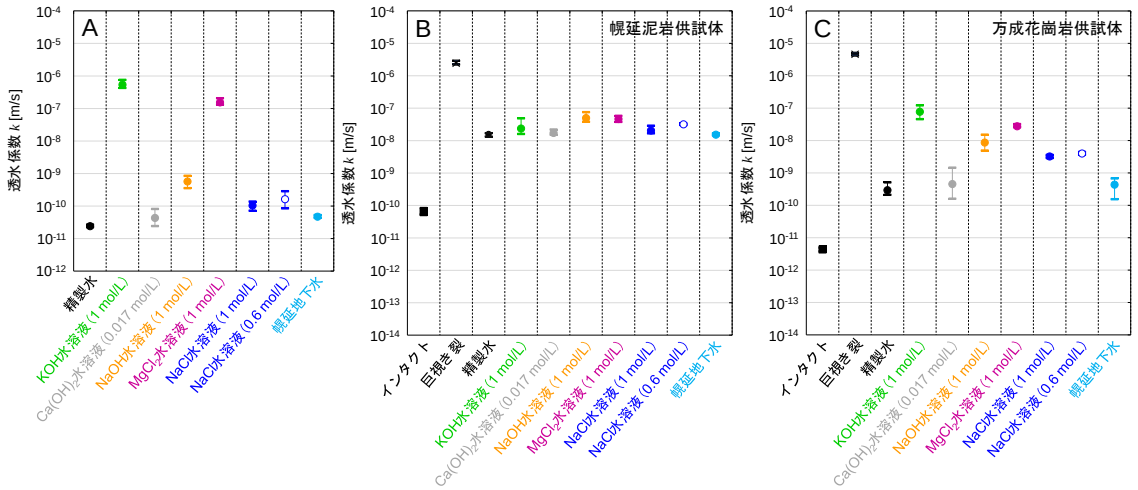


図 5　ベントナイト試料の透水実験結果（A）とベントナイト試料で充填された亀裂を含む岩石の透水実験結果（B、 C）

ベントナイト試料で充填された亀裂を含む岩石の透水実験結果（図 5B、C）から、岩石の種類によらず各種溶液浸漬ベントナイトで充填された亀裂を含む供試体の透水係数は、いずれも巨視き裂を含む供試体よりも小さい値を示した。透水性の低下は、巨視き裂中のベントナイトのシーリングによるものである。ベントナイトで亀裂が充填されることで、その透水係数が 10^{-10} m/s オーダーまで回復すること試料も見られた。これは、き裂閉塞を期待する場面（または望ましい環境）において貴重な知見になると考えられる。また、ベントナイトを充填した巨視き裂を含む万成花崗岩供試体の透水係数の値は、ベントナイト単一試料の透水係数（図 5A）の大小関係と同様の傾向を示しており、これは、巨視き裂にベントナイトが充填された場合の岩石の透水係数が充填するベントナイトの透水性（すなわち、溶液種）に依存することを示唆するものである。以上より、岩石の透水性は、割れ目の存在により上昇するものの、割れ目が緩衝材（ベントナイト）でシーリングされることで低下し、さらに、その低下度合いは、地下水の化学的作用の影響によって異なる可能性があると考えられる。

○今後の展開

本検討では、ベントナイトの侵入量に及ぼす化学的作用の影響を実験的に示すとともに、そのモデル化を行い、実験値の傾向の把握や、ベントナイトの侵入挙動に対して、支配的要因について考察した。また、化学的作用によるベントナイトの性能劣化（主に膨潤特性、透水性、亀裂侵入特性）を実験的に明らかにするとともに、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の一端を明らかにした。今後、亀裂に侵入したベントナイトの密度分布等の詳細な物性評価の検討、実際の岩石亀裂の凸凹（壁面摩擦による粘性抵抗）、局所流速変化（亀裂幅の空間的変化）を考慮した亀裂侵入挙動予測モデルを構築、亀裂の密度分布や空間不均質性を考慮した透水性評価を検討することで、ベントナイトのコロイド膨出・エロージョンとの関連性の有無についての議論展開も可能になると考える。これらの検討結果から、緩衝材の特性変化による天然バリアの透水性変化に関する情報や亀裂のベントナイト充填による透水性変化に関する情報を取得することができ、地層処分シナリオ（特に EDZ 領域）への反映、さらに、数値解析に基づく長期変遷の予測シミュレーションの精度向上に貢献することが可能になると考える。

○外部発表リスト

【学術論文】

1. 金氏裕也、河野勝宣：岩石亀裂へのベントナイトの侵入量予測モデルの構築、*土木学会論文集*（印刷中）.
2. Masanori Kohno, Kotomi Sakata, Masaki Asano, Masahiro Nonami, Yusuke Ono, Tsuyoshi Nishimura: Evaluation of hydraulic conductivity of intact rocks using constant head permeability apparatus, *Materials Transactions*, **63** (8), 1138-1143, August 2022.
3. 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)、 221-227、 March 2022.
4. 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.

【口頭発表】

1. 河野勝宣、金氏裕也：溶液環境下におけるベントナイトの膨潤・亀裂侵入実験、令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会、京都市、2022 年 9 月.
2. 河野勝宣、金氏裕也：ベントナイトの亀裂侵入挙動とその簡易モデル、第 65 回粘土科学討論会、松江市、2022 年 9 月.
3. 金氏裕也、河野勝宣：岩石亀裂へのベントナイトの侵入量予測モデルの構築、土木学会第 25 回応用力学シンポジウム、オンライン、2022 年 5 月.

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　菊池亮佑

要約

山形県月布鉱山から産する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、セメント物質の同定とその多様性・成因について調査した。鉱床全体においてベントナイト中に普遍的に見られたセメント物質は微細なシリカの粒子であり、その産状とカソードルミネッセンスによる分光的性質から低温の続成過程において形成されたものだと考えられる。この微粒子はモンモリロナイト端面を被覆するように産しており、これがモンモリロナイトの膨潤を妨げることによって、粉砕前の原鉱石が粉砕後と比べて低い膨潤圧を示す要因となっていることが示唆された。

○研究の背景・目的

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、地層処分の環境において、間隙中に析出する二次鉱物によ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、膨潤性能や透水性といった緩衝材に期待される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ト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ことを目的とする。

○実施内容

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、分析の対象とした。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と、予察的観察において一部のベントナイト間で岩石組織の多様性が確認されている点を考慮した。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。

月布鉱山周辺の地表および坑内で採掘されている多数のベントナイト原鉱石を対象に、野外調査および試料採取を行い、その鉱物組成・化学組成や岩石組織の特徴を鉱床の下盤側から上盤側にかけて網羅的に調べた。次に、微細組織の観察によってベントナイトの空隙に存在するセメント物質を同定した。さらに、セメント物質の成因やその形成量が何に影響されているかを調べるために、カソードルミネッセンス（CL）法による分光分析や微量元素組成、酸素・水素同位体比の測定も実施した。

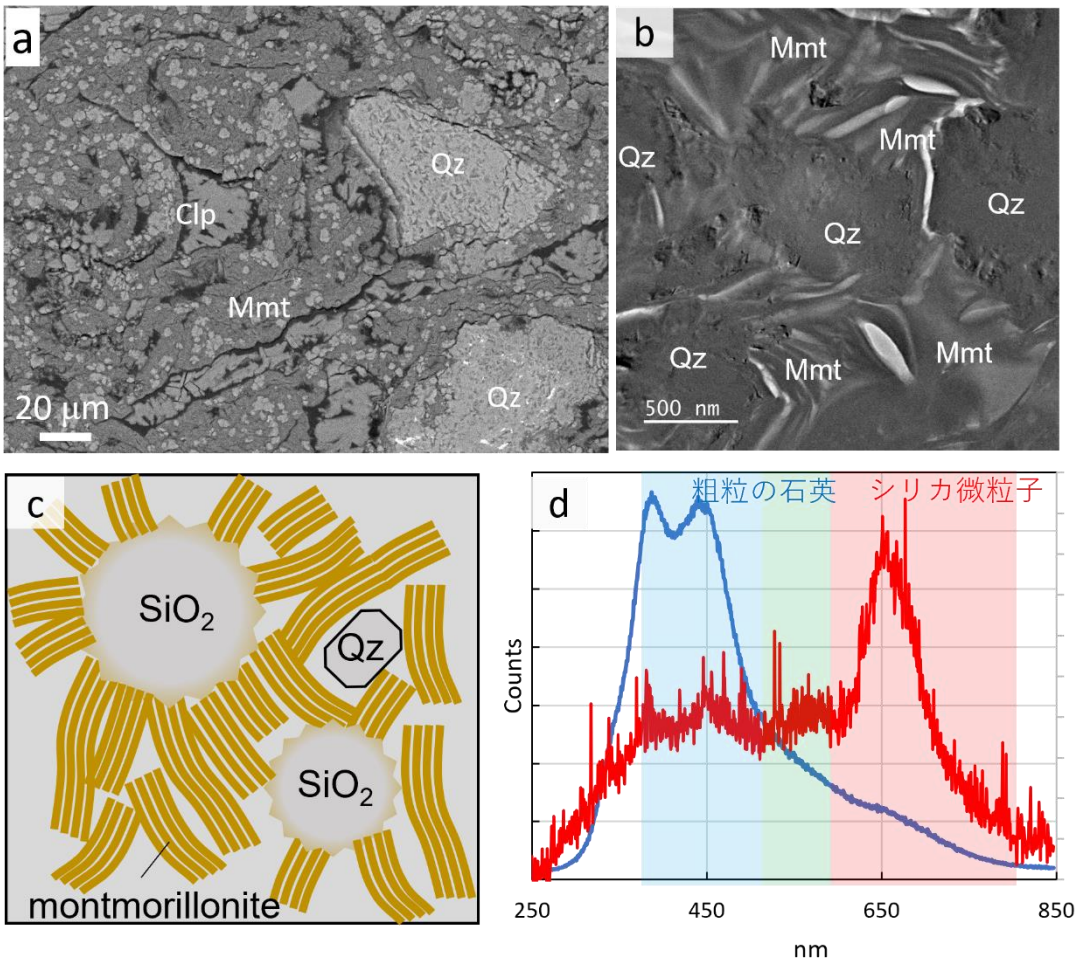


図 1　シリカ微粒子の産状・組織とカソードルミネッセンスによるスペクトル

Mmt：モンモリロナイト、Qz：石英、Clp：斜プチロル沸石

○得られた成果と考察

走査型電子顕微鏡あるいは透過型電子顕微鏡による観察から、原鉱石を固結させている普遍的なセメント物質は、モンモリロナイト中に短鎖状あるいはクラスター状に産する数 μm サイズの微細なシリカ粒子であることが示唆された（図 1a）。微粒子状のシリカは、石英が主体なものの、一部アモルファスシリカも確認されている。このシリカ微粒子はモンモリロナイト端面を一部被覆する組織を呈しており（図 1b,c）、モンモリロナイトの膨潤性を低下させる要因になっていると考えられる。CL 法による分析では、粗粒の石英がベントナイトの原料となった火山岩由来である一方で、シリカ微粒子はより低温の続成過程において形成されたものだと示唆された（図 1d）。このようなシリカ微粒子が全ての原鉱石で広く分布していることが確認された一方で、一部の試料では間隙が方解石で充填している様子も散見された。

○今後の展開（地層処分事業への寄与を含む）

本研究ではセメント物質の量比が大きく異なるベントナイト原鉱石や、シリカ微粒子に加えて方解石が一部析出しているものが観察されたため、今後の物性試験の対象として、これらの原鉱石を用いることで、セメント物質の量比や種類の違いによる緩衝材に期待される諸性能（膨潤圧・透水性など）に与える影響が定量的に評価できると期待される。

また、一部のベントナイトでは現在流れる間隙水によって $CaCO_3$ が析出やモンモリロナイトの流出が起きている可能性のあるものが観察され、緩衝材のセメンテーション・流出特性の評価のための天然事例となりうることから、2023 年度から始まる International Bentonite Longevity プロジェクト（月布鉱山における国際共同研究）などにおいても継続して調査が進められることが期待される。

○外部発表リスト

【国際会議発表】

・R. Kikuchi, M. Horiuchi, M. Saito, T. Ishiwata, Y. Nishiki, T. Sato, Y. Takayama, S. Mitsui (oral): Natural evidence for the cementation in bentonite buffer based on transmission electron microscopy observation of bentonite ores, International Clay Conference 2022, Istanbul, Turkey, July 26, 2022.

【国内発表】

・石渡 翔丸, 菊池 亮佑, 佐藤 努, 大竹 翼 (ポスター)：Genesis of Tsukinuno bentonite deposit indicated from the mineralogical and geochemical characteristics. JpGU 2022 (ハイブリッド), 2022 年 5 月 31 日

・菊池 亮佑, 石渡 翔丸 (ポスター) : 熱分解型元素分析/同位体比質量分析計 (TCEA/IRMS) を用いたケイ酸塩鉱物の 水素・酸素安定同位体比の測定方法の確立とその応用、第 12 回同位体環境学シンポジウム（オンライン開催)、2023 年 12 月 23 日

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に関する研究[1]

研究代表者　東京大学　高橋嘉夫

要約

本研究では Am のアナログとして Eu を使用し、黒雲母、ハイドロバイオタイト、カオリナイト、モンモリロナイトといった各種の粘土鉱物について吸着・脱離実験を行うとともに EPMA, TEM、IP オートラジオグラフィを用いて直接的に観察・分析を行った。脱離実験では、カオリナイトからは Eu が比較的容易に脱離したのに対して、黒雲母やハイドロバイオタイトからはあまり脱離しなかった。また pH: ~5, ~6.5 で Eu を収着した試料の観察において、黒雲母ではそれぞれ粒子の端部付近によく Eu が濃集しており、さらにハイドロバイオタイトでは粒子の内部にも Eu が侵入している様子が見られた。環境中において、こうした粒子の収着サイトにおいて Am-241, 243 といったアクチノイド系列放射性核種は安定に固定されることが考えられる。

○研究の背景・目的

放射性廃棄物処分事業を合理的に推進するためには、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、ガラス固化体中の種々の放射性核種は地下水へ溶出することが懸念される。こうしたことを考慮すると天然バリア中での放射性核種、特に半減期の長いアクチノイド系列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。また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。環境中には多様な粘土鉱物が存在するが、それぞれの粘土におけるアクチノイドについての研究は十分に進んでいない。そこで本研究では、アクチノイド系列放射性核種の環境

[1]本研究テーマは 2020 年度当時に筑波大学に所属していた向井広樹氏が提案・応募し、選考を経て採択された。2021 年度から向井氏が研究を実施していたが、2022 年度に向井氏が東京大学へ異動し、諸事情により研究代表者が変更となった。

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した。

○実施内容（代表的な結果の図表等を数点示す）

黒雲母、ハイドロバイオタイト、カオリナイト、モンモリロナイトといった粘土鉱物について、pH や濃度を変化させて Eu を吸着させ、さらに電解質溶液によって脱離実験を行った。特に pH: ~6.5 で Eu を吸着させた試料については 0.1 mol/L $NaClO_4$, 0.1 mol/L KCl, 0.1 mol/L シュウ酸によって逐次脱離実験を行った（図 1）。これらの脱離実験の結果、カオリナイトからは Eu が比較的よく脱離しており、それ以外の粘土鉱物の中では特にハイドロバイオタイトからの脱離率が低くなっていた。またモンモリロナイトについては、Na によって Eu はほとんど脱離しなかったが K によってよく脱離していた。

そして Eu を収着した各粘土試料について EPMA や STEM-EDS、IP オートラジグラフィによって直接的に観察・分析を行った。pH: ~5, ~6.5 で Eu（10^{-3} mol/L）を収着した試料の観察において、黒雲母については EPMA の結果から主に粒子端部に Eu が濃集している様子が見られた。そしてハイドロバイオタイトについては EPMA のほか、STEM-EDS による元素マッピングの結果（図 2）から、バーミキュライト層の水和した Mg 層に入ることによって粒子内部まで Eu が侵入したと考えられた。一方カオリナイトでは STEM-EDS の分析による結果、粒子内部に Eu が入ることはなく表面付近に濃集していることがわかった。そしてモンモリロナイトに関しては、Eu はほとんど均質に層間に入っていると考えられた。また pH: ~8.5 においては、Eu が加水分解することによって、カオリナイト以外の粘土鉱物においても Eu が層間に入らず粒子表層に濃集することが示唆された。

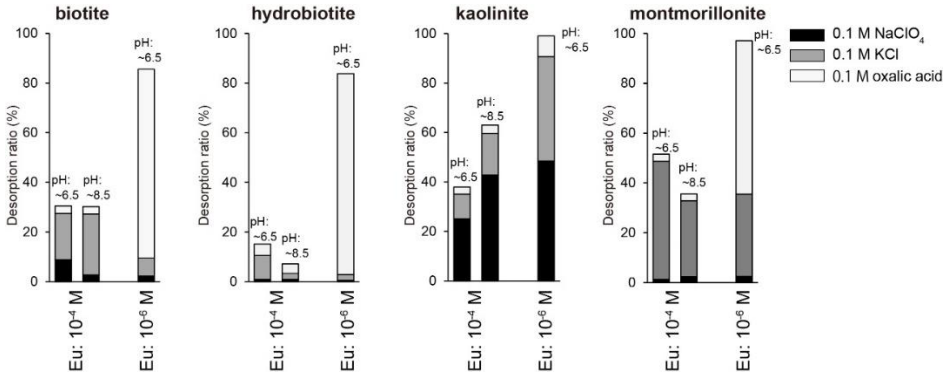


図 1　各粘土鉱物試料についての 0.1 mol/L $NaClO_4$, 0.1 mol/L KCl, 0.1 mol/L シュウ酸溶液による Eu 逐次脱離実験の結果。各試料は吸着実験（Eu: 10^{-4} mol/L, 10^{-6} mol/L, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$, pH: ~6.5, ~8.5）によって Eu を吸着した試料を用いた。

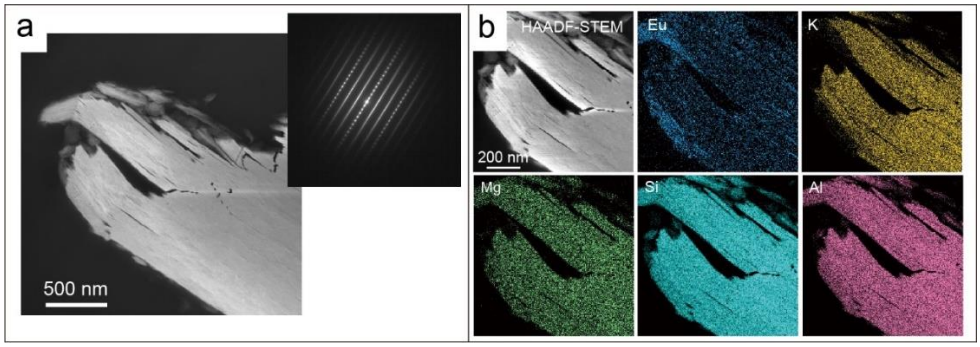


図 2　ハイドロバイオタイト断面試料についての TEM による観察・解析。(a) TEM 像および制限視野電子回折像、(b) STEM-EDS による元素マッピング。試料は吸着実験（Eu: 10^{-3} mol/L, I = 0.1 mol/L $NaClO_4$, pH: ~6.5）において、Eu を吸着した粒子を用いた。

○得られた成果と考察

本研究を行うことによって、各種の粘土鉱物における Eu の存在状態について多くの知見を得ることができた。Eu についての吸着脱離実験のほか、特に EPMA や STEM-EDS といった手法を用いて直接的な観察を行うことによって各粘土における Eu の吸着サイトの違いについて可視化することができた。pH: ~5, ~6.5 で Eu を収着した試料において、黒雲母では Eu が粒子端部を中心に濃集しており、ハイドロバイオタイトではさらにバーミキュライト層の層間を通じて粒子内部に侵入していた。脱離実験ではこれらの粘土試料から Eu はあまり脱離しなかったことから、こうした収着サイトから容易に Eu は脱離しないことが考えられる。カオリナイトにおいては粒子表層に Eu は分布しており、脱離実験において他

の粘土と比べて Eu は非常によく脱離していた。そのため粒子表面で静電的なイオン結合を主に形成していると考えられる。そしてモンモリロナイトでは層間に広く侵入したが、ハイドロバイオタイトとは異なり、K によってよく脱離していた。また pH: ~8.5 において Eu を収着した試料では、Eu が加水分解する影響で、カオリナイト以外の粘土においても層間に入らず粒子表面に Eu は濃集していることが示唆された。ただ脱離率は他の pH の条件の場合と比べて大きく上昇しているわけでなく、表面で強固な共有結合を主に形成していると考えられる。各粘土鉱物を比較したとき、カオリナイトからは脱離しやすく、黒雲母そして特にハイドロバイオタイトから Eu はあまり脱離しなかった。環境中において、これらの粘土鉱物に収着された Am-241, 243 といったアクチノイド系列放射性核種は容易には脱離しないことが示唆される。

〇今後の展開（地層処分事業への寄与を含む）

本研究によって、各種粘土鉱物における Eu の存在状態について多くの知見を得ることができた。粘土鉱物は環境中において特に優れた吸着能を示すことから、人工バリアのベントナイトや天然バリア中に放射性核種が溶出した場合にどのように収着されるか予測する上で役立つことが期待される。ただより正確な予測を行うためには、実際に Am-241, 243 といった放射性核種を用いて Eu との挙動を比較することが求められる。また地層処分される高レベル放射性廃棄物には多様な放射性核種が含まれるが、今回 Eu に対して用いた研究手法を他の核種のアナログにも適用することができる。そして天然バリアを構成する岩石中には粘土鉱物だけでなく、他にも多様な鉱物や非晶質物質のほか、有機物、微生物なども存在している。放射性核種の移行について予測する上でこうした物質の影響についても研究を行っていく必要があると考えられる。また実際の地層処分について考えたとき、収着サイトでの長期的な安定性や地下 300 m 以深での水圧等についても考慮する必要がある。

〇外部発表リスト

【国内発表】

1. 向井広樹、粘土鉱物における Eu(Ⅲ)の吸着脱離挙動　日本地球惑星連合大会 2022 年年会/2022 年 5 月 23 日

2. 向井広樹、各種の粘土鉱物における Eu 吸着状態について　日本放射化学会第 66 回討論会/2022 年 9 月 15 日

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　久保 大樹

要約

高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全評価で重要となる地下水流動形態の詳細な把握のため、亀裂部と岩体基質部の水理特性を統合した水理構造モデルを目的とした研究を実施した。岐阜県瑞浪地域の土岐花崗岩体を対象とし、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研究を実施した。本研究の成果は、簡便で迅速なボーリングコア試料の透水性の計測手法を提供し、局所的な水理構造の把握だけでなく広域モデルへのアップスケーリングにつながる技術を提案した。これらは地層処分計画におけるモデルの高密度化や妥当性の向上、また調査ボーリングの本数削減によるコスト低下につながるものである。

○研究の背景・目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設の建造においては、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に関するラボスケールでの検証は進められているものの、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。

そこで本研究では、亀裂部と岩体基質部の水理特性を統合した水理構造モデルを構築する。特に結晶質岩体を対象とし、亀裂モデリング手法と、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行う。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・岩体での水－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。

○実施内容（代表的な結果の図表等を数点示す）

独自に開発したプローブ型浸透率測定器（パーミアメーター）を用いて、岐阜県瑞浪地域から採取した土岐花崗岩のボーリングコア測定を実施した。得られた測定データは図 1（左）のように岩石密度と負の相関を示した。得られた実測値を対象地域で実施されているボーリング調査データを統合し、岩石密度と開口亀裂密度を説明変数とした重回帰分析により、図 1（右）のように水理試験値を再現する回帰式を得た。さらに、瑞浪地域の 14 孔の深層ボーリングデータから作成された岩石密度・開口亀裂密度の広域空間分布モデルと前述の回帰式を用いて、推定透水係数分布モデルを構築した。この透水係数分布モデルに基づいた地下水流動解析を実施し、対象地域全域や主要断層周辺の流動形態について明らかにした。また、採取したボーリングコアや作成した薄片の観察による、亀裂構造以外の水みちを形成する可能性のある空隙構造の特定や、広域亀裂モデリング手法の検討についても実施した。

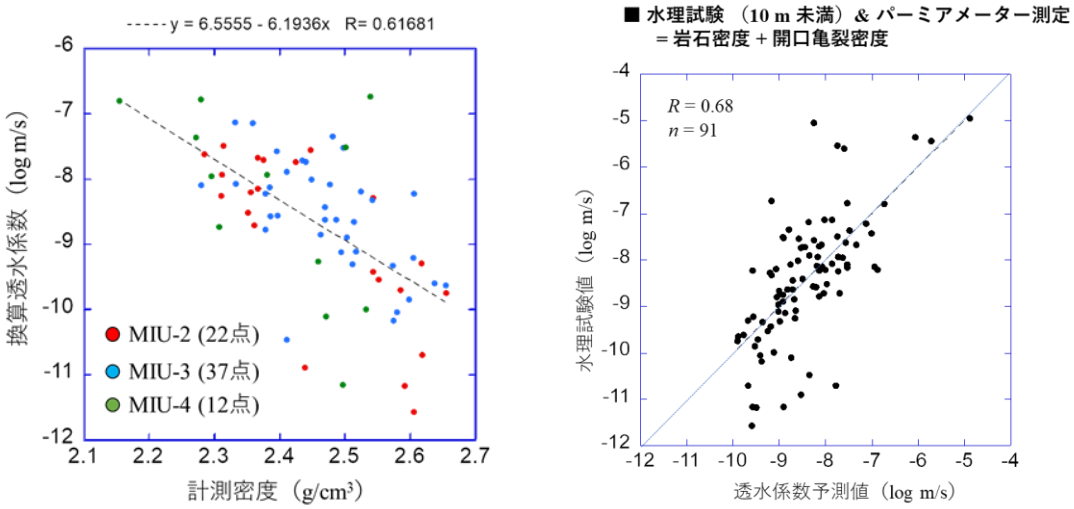


図 1　パーミアメーターによるボーリングコアの測定結果（左）、実測値と検層データから推定した透水係数と実際の水理試験値の比較（右）

○得られた成果と考察

パーミアメーターによる浸透率測定結果は、図 1（左）に示されるようにコアの実測密度と負の相関を持ち、これは内部に空隙を多く持つ試料ほど透水性が高いという一般的な知見と整合的である。この結果は、測定箇所周辺のシーリングを適切に行い、ひとつの試料に対し複数点の測定を行うことで、ある程度の大きさを持つ試料の代表値をパーミアメーターで得ることができることを示す。図 1（右）に示す重回帰分析結果は、岩石密度と開口亀

裂密度で表される空隙構造から透水係数の推定が可能であることを示す。しかしながら、水理試験区間が長くなるにつれて推定精度が低下することから、空隙のコネクティビティや亀裂の配向性など、さらに考慮すべきパラメーターが存在することが示唆される。重回帰分析結果に基づいて推定された透水係数分布モデルと地下水流動解析からは、既存のモデルと整合的な断層の遮水性構造が示された。また、熱水変質によって生じた空隙帯が断層深部に流動経路を形成していることがシミュレーションとコア観察によって明らかにされた。

〇今後の展開（地層処分事業への寄与を含む）

本研究では比較的取り扱いの用意なプローブ型浸透率測定器の有効性を示し、かつ取得が容易な岩石密度との組み合わせによってより大きなスケールの透水係数水手に活用できる可能性を示した。これらの手法は概要調査段階で取得できる水理地質情報の高密度化に寄与することができ、特にコストや用地確保の課題の大きい詳細ボーリング調査本数の削減につながることが期待される。

〇外部発表リスト

【国内発表】

・ 久保 大樹、Scibek Jacek、池本 龍平、小池 克明. ボーリング調査データに基づいた地質統合モデルによる亀裂性岩体の水理構造の推定、 一般社団法人資源・素材学会 資源・素材 2022、 2022 年 9 月 8 日

隆起・侵食の評価技術の高度化：ジルコン(U-Th)/He 年代測定法における年代標準試料の探求

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 研究員 福田 将眞

要約

隆起・侵食の評価技術の一つでもある、熱年代学的手法のうち、(U-Th)/He 法における年代標準試料となるジルコンを探求することを目的として研究を実施した。本研究では、他の年代測定法の年代標準試料および国内の年代標準試料候補を合計で 6 試料選出し、ジルコン(U-Th)/He 年代分析を実施し、既報年代データとの整合性と単粒子年代のばらつきから評価することで、標準試料としての適格性を検討した。結果として、フィッション・トラック法の年代標準試料である Mt. Dromedary と、国内の年代標準試料候補である歌長流紋岩(TRG04-21)の 2 試料について、標準試料としての潜在性が認められた。今後は、国外の研究機関に一部の試料を送付し、ラウンドロビンテストを行うことで、分野でも認められる年代標準試料の確立を目指したい。

○研究の背景・目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、地質環境の長期安定性の評価は重要な課題の一つであり、10 万年スケール隆起・侵食を伴う地殻変動や、火山活動、断層運動などが主たる評価対象である。これらの現象の評価技術の一つである熱年代学的手法は、様々な地質体から産するウラン含有鉱物について、放射年代測定を行うことで岩石・鉱物の熱履歴を復元することが可能である。この手法は温度変化を伴う現象に応用可能なため、上述のような幅広い地球科学的現象の推定や評価に活用できる。

閉鎖温度が低い（<200℃）熱年代法の一つである(U-Th)/He 法（以降、He 法）は、その高い熱感度を利用して、世界中の地殻浅部の熱履歴やテクトニクスの復元に応用されてきたが、年代標準試料が確立していないという問題が存在する。本研究では、He 法の対象鉱物であるジルコンの標準試料を探求する目的で、候補となる複数のサンプルについて実際にジルコン He（ZHe）年代測定を適用し、各試料の適性について検討を行った。

○実施内容

本研究で用いた試料はフィッション・トラック法や U-Pb 法など、他の年代測定法における年代標準試料から 3 点（Buluk Tuff, Mt. Dromedary, OD-3）、国内の年代標準試料の候補となりうる地質試料から 3 点（歌長流紋岩（TRG04-21, TRG07-21）、鷲走ヶ岳層（WSF1）、濃飛流紋岩（Site-43）6 種類で計 7 点の地質試料を選出し、それぞれ 30 粒子程度のジルコンについて ZHe 年代分析を実施した。その結果、表 1 のような年代値が得られた。

表 1　ZHe 年代分析結果の一覧

サンプル	ZHe age ±95%CI (Ma)	MSWD	Refer values ±2σ (Ma)
TRG04-21	**2.42 ± 0.13**	5.47	2.61 ± 0.36（ZHe）
TRG07-21	**2.77 ± 0.20**	13.6	*2.61 ± 0.36（ZHe）
Buluk tuff	**17.7 ± 1.74**	20.2	16.1 ± 1.6（ZHe）
Mt. Dromedary	**95.3 ± 2.37**	1.24	99.2 ± 3.6（ZHe）
OD-3	**29.8 ± 2.44**	12.1	32.6 ± 0.6（ZFT）
WSF1	**17.8 ± 1.05**	5.38	21.6 ± 1.6（ZFT）
Site-43	**50.6 ± 2.93**	5.67	72～70 Ma（U-Pb）

○得られた成果と考察

本研究で得られた 7 サンプルの ZHe 年代について考察する。得られた ZHe 年代のうち、TRG04-21 および Mt. Dromedary については先行研究の参照値と誤差範囲 2σ で調和的な値となった。また、単粒子年代のばらつきを示す MSWD（Mean Square of Weighted Deviates）の値（値が 1 からオーダーを超えるほど大きくなると、ばらつきが大きいと評価される）も 10 を下回る値であり、比較的まとまりのある年代であることが示された。これらの 2 試料については、年代標準試料の潜在性が認められる結果となった。一方、そのほかのサンプルについては、参照年代より有意に若いか、ばらつきが 10 を超える大きい値となっており、年代標準試料には不向きであることが示唆された。

○今後の展開（地層処分事業への寄与を含む）

今後は、ZHe 年代のばらつきに作用する要因の追及や、潜在性が認められた 2 試料についてのラウンドロビンテストを行い、ZHe 法の年代標準試料の確立を目指したい。これにより、年代値の信頼性や手法の高度化が期待でき、He 法を含む複数手法の熱年代法を同時に適用することで、より詳細な熱履歴の復元が可能となるため、長期安定性の評価手法としての有用性が向上すると予想される。

○外部発表リスト

【学術論文】

福田 将眞、Barry P. 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、フィッション・トラックニュースレター、35、7-10.

福田 将眞、鏡味 沙耶 (2022): (U-Th)/He法のための高温加圧酸分解によるジルコンの完全溶解の試み、フィッション・トラックニュースレター、35、11-14.

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、フィッション・トラックニュースレター、35、15-18.

【国際会議発表】

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).

【国内発表】

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.

福田 将眞、鏡味 沙耶 (2022): (U-Th)/He法に係る湿式分析法の検討 : 検量線法による親核種濃度の定量の試み、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2022年度合同研究会.

長田 充弘、福田 将眞、末岡 茂、中嶋 徹、(2022): 熱史からみたジルコンの標準試料への適性評価: 石川県鷲走ヶ岳層の例、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2022年度合同研究会.

別添資料３

地層処分に関するポータル教材の構成

（学習指導要領）

地層処分に関するポータル教材の構成（学習指導要領）

ジャンル	ねらい（教材の指導要綱）	目標到達レベル	学習項目	学習項目の具体的な内容	知識のソース
1. 地層処分の対象となる放射性廃棄物の特徴	わが国で地層処分の対象となる高レベル放射性廃棄物（HLW）に分類されるガラス固化体及び地層処分される低レベル放射性廃棄物（TRU）の特徴とインベントリ（含有核種と濃度）について理解する。	ガラス固化体、使用済燃料、TRU 廃棄物の特徴とインベントリについて処分の異なる専門家に説明ができる。	・ 高レベル放射性廃棄物の特徴	・ 高レベル放射性廃棄物（HLW）の特徴とインベントリ	・ 第２次取りまとめ
			・ 地層処分される低レベル放射性廃棄物（TRU 廃棄物）の特徴	・ TRU 廃棄物の特徴とインベントリ（なぜ TRU 廃棄物と呼ばれるようになったかの背景も含めて）	・ TRU 第２次レポート
2. 地層処分固有の学際的アプローチ	地層処分固有の特徴として、多方面の専門分野を集約する学際的アプローチを必要とする点がある。この認識に立ち、4.以降の地層処分特有の専門分野の内容と相互の関係を体系的に理解する。	地層処分に係る学際的なアプローチについて専門家に体系的に説明できる。	・ 地層処分の実現に係る学際的アプローチの体系	・ 地層処分の実現に必要となる専門分野について、4.以降に教材を総括して説明	・ 独自に教材を作成
3. 地層処分に係る法律、関係規制基準	地層処分事業が準拠すべき法律（最終処分法、改正基本方針、原子炉等規制法）それぞれの関係と遵守すべき事項について理解をしておく。また、改正基本方針で示された処分地選定で国の関与、理解を得るための可逆性・回収可能性（R&R）の導入の背景を理解する。	処分事業に係る法律、原子炉等規制法などの等安全規制の在り方、2016 年の基本方針の改正の内容について背景を含めて説明できる。	・ 最終処分法	・ 最終処分法（2000）の設定の背景、概要	・ 処分懇談会の資料等
			・ 原子炉等規制法	・ 地層処分事業の許認可と原子炉等規制法との関係	・ 法律
			・ 改正基本方針	・ 最終処分法改正基本方針で示された新たな取り組み（国の関与、可逆性・回収可能性などの制度）の具体的な展開	・ 閣議決定された改正基本法
4. 地層処分の処分地選定と選定基準	地層処分の処分地選定に係る歴史的変遷、公募方式と申し入れ方式、国の関与の在り方、国が公表した科学特性マップの背景、NUMO の処分地選定考慮事項など、一連の流れについて時系列的にまとめて理解する。	わが国における処分地選定の方法とその設定の背景、選定の基準（考慮事項）、科学特性マップと設定の背景について説明ができる。	・ 最終処分法に示された段階的な処分地選定と調査項目	・ 法律で規定された段階的処分地選定における要求事項（公募と申入れ方式）	・ 最終処分法、NUMO の公募資料、改正基本方針
			・ 処分地選定における考慮事項	・ NUMO が初期に設定した選定の考慮事項とその背景	・ NUMO の公募資料、技術報告書
			・ 科学特性マップ作成の背景	・ 科学特性マップ作成の背景と内容および専門家の議論	・ エネ庁委員会資料
5. 地層処分固有のサイト特性評価技術	地層処分の安全性を評価するには、立地点の地質環境（地質・地質構造、地質水理構造、地化学特性、力学特性）の現状の把握と将来的な変遷について理解する必要がある。調査と評価を結び付ける手法、Geo-synthesis の考え方、地質環境モデル（SDM:: Site Description Model）の作成方法、気候変動と隆起侵食を考慮した SDM 作成方法について理解する。	段階的に進められるサイト特性調査の実施概要および各段階で作成される SDM の特徴、長期変遷モデル構築の方法と具体例が説明できる。	・ 地質環境調査技術	・ 立地点の地質環境を把握する調査・分析技術の現状	・ JAEA、CRIEPI 資料
			・ SDM の作成技術	・ 調査システムフロー、Geo-synthesis の考え方と SDM の作成方法と作成例（ＮＵＭＯ包括的技術報告書）	・ 原環センター資料、Geo-synthesis は NAGRA、SDM は SKB の概念
			・ 長期変遷モデル作成技術	・ 地質環境の長期変遷モデル作成の考え方と作成例	・ NUMO 包括的技術報告書
6. 地層処分における天然事象の影響評価	地層処分の長期安全性に影響を及ぼすとされる天然事象の二つの評価手法（確定論的評価手法、確率論的評価）について説明し、現状での火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食作用に対する影響評価事例を理解することで、地層処分における天然事象の取り扱い方について説明できるようにする。	テクトニクスに起因する火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食作用及び気候変動による海水準変動が地層処分システムに与える影響を評価する手法と具体例が説明できる。	・ 評価の期間と評価手法	・ 外挿法と様式化を用いた確率論的評価手法とロジックツリー・専門家の意見集約を用いた確率論的手法の相違点	・ NUMO 包括的技術報告書
			・ 火山・火成活動	・ 火山・火成活動の影響評価事例	・ 同上
			・ 地震・断層活動	・ 地震・断層活動の影響評価事例	・ 同上
			・ 隆起・侵食作用	・ 隆起・侵食作用の影響評価事例	・ 同上
7. 地層処分の長期安全評価手法	地層処分の安全性は直接確認できないことから、安全評価という手法が整備されてきた。一方システムとして性能を評価する研究も多く進められてきている。ここでは、安全評価と性能評価の違い、安全評価に用いられるシナリオ設定方法と FEP の活用方法、セーフティケースの具体的な論拠構築の方法、評価基準の種類と適用事例について説明できる知識を準備する。	長期安全評価におけるシナリオ構築手法、核種移行モデル、パラメータ設定と安全評価の結果及びセーフティケースの論拠としての安全評価の在り方、評価の基準の種類についてその設定の背景を含めて説明ができる。	・ 安全評価と性能評価手法	・ 安全評価と性能評価の相違点	・ IAEA, NEA, 原子力委員会資料
			・ シナリオ設定と FEP との関係	・ シナリオ設定手法（ボトムアップとトップダウン）におけるストーリボードの活用と FEP の役割	・ NUMO 技術報告書
			・ セーフティケースの論拠構築方法	・ セーフティケースの論拠となる評価結果、エビデンス、ナチュラルアナログ、専門家の判断など Multiple Lines of Evidence	・ JAEA 研究報告書、NUMO 技術報告書
			・ 評価基準の種類	・ 被ばく線量基準、リスク基準、天然バックグランド、フラックスなどの異なる指標の考え方と照査基準としての用い方	・ IAEA, ICRP 資料 ・ 原子力規制庁での最新の議論
8. 地層処分事業に適用される工学技術	地層処分事業を実施するために必要となる設計・施工技術について、これまでの技術報告書等で記述されている事項を簡潔に説明し、設計因子、安全機能と設計要件との関係、建設・操業・閉鎖・回収・環境影響評価に必要となる現状レベルの技術と今後開発すべき課題について理解する。地層処分ではこのほか調査・評価技術を含めて BAT（Best Available Technology）を適用するとの考え方もあることから、将来的な技術（ロボットの活用など）についても言及する。また、処分場の閉鎖までに遭遇する事故や災害の種類、それらへの工学的な対応策について現状で考えられていることを理解する。	地層処分の実現に向けての必要となる様々な工学技術について、処分場の設計・建設・操業・閉鎖及び管理技術に関する最先端の技術とその用い方の説明ができ、事業期間中に遭遇が予測される事故や災害への対応策・予防策・緩和策も含め、環境評価と保全に係る技術と対策が説明できる。	・ 人工バリアシステムの設計・製作技術	・ 人工バリアシステムの設計に係る安全機能と設計要件の考え方	・ 第２次取りまとめ、NUMO 資料
			・ 処分場のレイアウト設計技術	・ 処分場レイアウト設計をする場合の考慮事項と実施例	・ NUMO 資料
			・ 処分場の建設技術	・ 地下施設を建設する場合に適用が考えられる施工技術の現状	・ 第２次取りまとめ、NUMO 資料
			・ 処分場の操業技術	・ 操業技術として開発されてきた技術の特徴	・ 第２次取りまとめ、NUMO 資料
			・ 処分場の閉鎖技術	・ 埋戻し、プラグの設計、施工技術の特徴	・ NUMO,JAEA 資料、HRL での実証試験
			・ 廃棄体の回収技術	・ 廃棄物容器の回収に係る技術開発の現状	・ 各国の取組み、NEA：R&R
			・ 処分場の環境影響評価技術	・ 処分場建設が及ぼす周辺への環境影響の種類と対応策	・ NUMO 資料
			・ 処分場閉鎖までの安全対策	・ 閉鎖までに遭遇する災害、事故の種類とその対策例	・ NUMO 資料
9. 地層処分の閉鎖措置に向けてのモニタリングとサーベイランス技術	地層処分の安全原則では、制度的な管理に依存しないパッシブセーフティを基本としているが、処分の安心感を得るために状態変遷を把握するモニタリングやサーベイランスの導入についても国際的に議論されている。実務における制度的管理の在り方、管理の手法について理解する。また、スイス、フランス、カナダの処分計画にみられるパイロット施設の位置づけ、役割を理解する。	改正原子炉等規制法に定められた「閉鎖措置」に対する具体的なアプローチ、モニタリングの種類と方法について具体例とともに説明ができる。	・ 地層処分と制度的管理の仕組み	・ 制度的管理の種類と期間（処分事業の廃止措置との関係）	・ IAEA 資料
			・ モニタリングの種類と役割	・ モニタリングの種類と方法	・ EU Modern プロジェクト
			・ サーベイランスの種類と役割	・ サーベイランスの種類と方法	・ IAEA TEC DOC
			・ 地層処分場の閉鎖措置とパイロット施設	・ 閉鎖措置の意思決定に向けての「パイロット施設」の位置づけと役割	・ スイス EKRA 概念、フランス ANDRA 資料、カナダ NWMO 資料
10. 地層処分の研究開発と地下研究施設の役割	地層処分事業の展開にとって地下研究施設は大きな役割を果たしていることを世界各国の処分計画を通じて理解する。地下研究施設は、地層処分の実現に向けてのコンフィデンス・ビルディングを醸成する場であること、処分固有の研究開発や技術の実証の場として活用されていることを実例で示す。	地層処分実現に向けての研究開発の歴史、研究開発における地下研究施設の役割、処分地での実証試験などについて具体的に説明ができる。	・ 世界の地下研究施設	・ 世界の地下研究施設の位置と特徴	・ NEA 資料
			・ 地下研究施設の役割	・ 地下研究施設の位置づけと役割	・ 米国 NRC、NEA 資料、JAEA 資料
			・ 地下研究施設での研究開発	・ 地下研究施設で実施されている研究開発	・ NEA 資料、JAEA 資料
			・ 処分候補地での処分技術の実証	・ 精密調査段階における地下調査施設での実証試験の種類と役割	・ 電事連報告書
11. 地層処分と社会科学なアプローチ	地層処分の長期安全性は、潜在リスクであることの説明の仕方、パッシブセーフティなど一般常識との乖離する概念に関する説明の方法、処分事業をパートナーとして実現する仕組みの重要性について説明できる知識を準備する。	社会学的な側面と倫理学的な側面から地層処分への取組み、リスク共有の考え方、パートナーシップの導入などの方策について説明できる。	・ リスクコミュニケーションの役割	・ 地層処分の長期リスクは潜在的なリスクであることを伝える手法	・ 米国 DOE 資料、NEA 資料
			・ 安心感の醸成	・ 安全と安心に関する議論、リスク共有の考え方	・ 原子力学会
			・ パートナーシップ育成	・ Public Private Partnership の仕組みと役割	・ 米国の実例

別添資料 4

地層処分に関するリテラシー育成教材（試作版）

地層処分に関する
リテラシー育成教材

（試作版）

2023年3月

本教材は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「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）」の一環として、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが作成したものです。

はじめに

現在、日本における高レベル放射性廃棄物等を対象とした地層処分事業では、北海道の二つの地域を対象に、実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）によって文献調査が進められている。

地層処分の特徴の一つとして、処分事業が段階的に進められる点がある。日本では処分施設建設地の選定までに、文献調査による概要調査地区の選定、概要調査による精密調査地区の選定、精密調査があり、各段階で地元の意見を聞き、次に進めることを基本としている。そして、処分の事業許可が発給された後、処分場の建設、操業となり、最終的に処分場が閉鎖されるまで約100年にわたる事業になることも特徴の一つである。

このような地層処分事業が成功するためには地層処分が社会的に受け入れられる必要があり、公衆や地元を含むステークホルダーとのコミュニケーション活動などの観点も重要となってくる。

公衆とのコミュニケーションにおいては、地層処分がなぜ必要なのか?地層処分がどうして適切な方策なのか?など、地層処分の基本的な考え方について説明できる能力が必要となる。そのためには、三段階の調査などのサイト選定のプロセスや制度について、過去の経緯や議論を知り、理解を深めることが重要だと考える。

また、地層処分の技術面における特徴としては、高レベル放射性廃棄物に含まれる放射能が時間の経過とともに徐々に減衰するものの、放射能が燃料の原料となるウラン鉱石と同じ水準になるには数万年以上の時間が必要で、そのような長期にわたる安全性の確保が求められている点がある。

この長期に付随する不確実性への対応のために、地質環境、工学技術、安全評価分野の各分野の知識・技術を統合し、地層処分の安全性を確認するセーフティケースが作成される。

日本の地層処分に係る研究・技術開発は、1976年以降、組織的な研究が開始され、これまで約40年間継続して進められてきた。その結果として、地質環境、工学技術、安全評価分野において多くの専門家（スペシャリスト）が育成されてきた。しかしながら各専門分野の研究開発についての知見が深められても、セーフティケースのような技術を統合する報告書の作成に関与しない限りは、地層処分技術全体を俯瞰できる機会がなく、それを学習する教材も限られていた。

本リテラシー育成教材は、このような地層処分の技術のみならず、法制度・倫理的側面・信頼感醸成などの社会的側面も含めた広範な知識の獲得を支援するものとして、地層処分に係る基礎知識を包括的かつ体系的に取りまとめ、主にこれから地層処分分野で活躍する人を対象に作成している。各章の最後には、学習内容の理解度を確認するためのテストも準備しているので役立ててほしい。

本書が地層処分全体を学習したい人の一助になれば幸いである。

CONTENTS

はじめに …… 001

序章:学習を始める前に …… 006

第1章

日本における放射性廃棄物の種類と特徴 …… 009

1.1 ● 核燃料サイクルと放射性廃棄物 …… 010

1.2 ● 放射性廃棄物の発生源と区分 …… 012

1.3 ● 放射性廃棄物の種類別発生量 …… 014

（参考）福島第一原子力発電所の事故からの放射性廃棄物推定量 …… 016

（参考）放射性廃棄物管理と実施主体 …… 017

1.4 ● 地層処分の対象となる放射性廃棄物 …… 018

1.5 ● 日本における最終処分（地層処分）の実施体制 …… 020

これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート …… 022

参考文献 …… 026

第2章

放射性廃棄物対策：地層処分選択の背景 …… 027

2.1 ● 放射能の減衰特性が示唆すること …… 028

2.2 ● 高レベル放射性廃棄物管理の倫理的な側面 …… 030

（参考）地層処分選択の基盤となった歴史的報告書 …… 032

2.3 ● 地層処分の選択 …… 034

（参考）処分オプションの検討事例と比較評価 …… 036

2.4 ● 日本における地層処分選択の経緯 …… 038

2.5 ● 地層処分の進め方に関する提言 …… 040

これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート …… 042

参考文献 …… 046

第3章

日本における放射性廃棄物の処分形態 …… 047

3.1 ● 放射性廃棄物の処分形態 …… 048

3.2 ● 放射性廃棄物処分と関連施設 …… 050

3.3 ● 浅地中トレンチ処分:L3廃棄物 …… 052

3.4 ● 浅地中ピット処分:L2廃棄物 …… 053

3.5 ● 中深度処分:L1廃棄物 …… 054

3.6 ● 地層処分:HLW、TRU廃棄物 …… 055

これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート …… 056

参考文献 …… 060

第4章

地層処分の安全原則と規制・基準類 …… 061

4.1 ● 地層処分の安全原則 …… 062
4.2 ● 原子力全般の基本安全原則 …… 064
4.3 ● 放射性廃棄物処分に係る安全要件 …… 066
（参考）IAEA:放射性廃棄物の地下処分—基本指針（1981） …… 068
（参考）IAEA:放射性廃棄物マネジメントの原則（1995） …… 069
4.4 ● 放射性廃棄物処分へのICRP勧告 …… 070
4.5 ● 日本の地層処分の安全規制 …… 074
（参考）安全規制の基本的考え方 …… 076
（参考）地層処分の安全規制について …… 077
これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート …… 078
参考文献 …… 082

第5章

地層処分の安全確保策と安全評価 …… 083

5.1 ● 地層処分の長期安全確保原則 …… 084
5.2 ● 多重バリア概念 …… 086
5.3 ● 安全評価の考え方と評価手法 …… 088
5.4 ● リスク論的考え方による安全評価と評価基準 …… 090
5.5 ● 最新の安全評価の流れ …… 092
（参考）地層処分を対象としたストーリーボードの作成例 …… 095
5.6 ● 安全評価とセーフティケース …… 096
（参考）OECD/NEAが提唱したセーフティケース（2004） …… 098
（参考）IAEAが提唱したセーフティケース（2012） …… 099
5.7 ● 地層処分に影響を及ぼす自然現象への対応 …… 100
これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート …… 102
参考文献 …… 106

第6章

地層処分の実現性に関する報告書 …… 107

6.1 ● 地層処分の実現性を示した初期の報告書 …… 108
6.2 ● 二つの代表的な処分概念 …… 110
6.3 ● 日本における地層処分の技術的実現性 …… 112
6.4 ● 日本における地層処分のセーフティケース …… 114
これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート …… 116
参考文献 …… 120

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− …… 121

7.1 ● 包括的技術報告書で示されたセーフティケースとその役割 …… 122
7.2 ● 地層処分に適した地質環境の選定とモデル化 …… 124
7.3 ● 地層処分場の設計 …… 128
7.4 ● 処分場の閉鎖前の安全性 …… 134
7.5 ● 処分場閉鎖後の長期安全性 …… 136
これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート …… 140
参考文献 …… 144

第8章

地層処分の段階的な進め方 …… 145

8.1 ● 段階的な進め方の必要性 …… 146
8.2 ● 段階的な進め方の種類と特徴 …… 148
（参考）OECD/NEAが提唱したステップワイズの進め方 …… 150
8.3 ● 段階的な進め方の導入 …… 152
8.4 ● 三段階の処分地選定プロセス …… 154
8.5 ● 新たな取り組みと科学的特性マップ …… 156
8.6 ● 段階的な処分地選定の経緯 …… 159
これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート …… 160
参考文献 …… 164

第9章

地層処分固有の取り組み …… 165

9.1 ● 長期評価に伴う不確実性 …… 166
9.2 ● 長期の時間枠への対応 …… 168
9.3 ● 放射線防護原則の地層処分への適用 …… 170
9.4 ● 閉鎖後の受動的安全性の仕組み …… 172
9.5 ● 地層処分におけるモニタリング …… 174
（参考）モニタリングに関する国際共同研究 …… 176
9.6 ● 地層処分と環境アセスメント …… 178
これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート …… 180
参考文献 …… 184

第10章

地層処分に対する信頼 …… 185

10.1 ● 信頼感の醸成 …… 186
10.2 ● 可逆性と回収可能性 …… 188
10.3 ● 地下研究施設の役割 …… 190
（参考）世界の地下研究施設での主要な試験 …… 192
（参考）地下研究施設の役割 …… 194
10.4 ● ナチュラルアナログの役割 …… 196
10.5 ● 地域とのパートナーシップ …… 198
これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート …… 200
参考文献 …… 204

第11章

諸外国における地層処分事業の経緯 …… 205

11.1 ● 各国の地層処分計画 …… 206
11.2 ● フィンランド:初期のマイルストーン通りの展開 …… 208
11.3 ● スウェーデン:公募方式から申し入れ方式への変更 …… 210
11.4 ● フランス:議会の主導による計画の見直し …… 212
11.5 ● スイス:住民投票での否決から国の積極的関与 …… 214
11.6 ● 英国:地元の主体的参加を尊重 …… 216
11.7 ● カナダ:廃棄物処分政策と公衆関与 …… 218
11.8 ● 米国:政治的なサイト選定が生んだ混沌と頓挫 …… 220
これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート …… 222
参考文献 …… 206

略語集 …… 227
索引 …… 228

序章:学習を始める前に

これまで地層処分の研究開発などに少しでも携わってきた皆さんが、本教材を用いて放射性廃棄物の地層処分に関する幅広い知識を得るための学習を始める前に、なぜ今、地層処分が必要とされるのか、その背景について紹介しよう。

放射性廃棄物は、初期には1940年代に核兵器の製造に伴うプルトニウムを生産する過程で大量に発生した。その多くは、放射能レベルが比較的低い廃棄物であったが、例えば下の写真に示すように、米国アイダホ州の原子炉試験場（現在のアイダホ国立研究所）では、初期には敷地内の埋立地にドラム缶のまま放射性廃棄物を処分していた（図1）。また、ワシントン州ハンフォードでは、再処理から発生した高レベル放射性廃液を鋼製タンク内に長く貯蔵していた（図2）。これらの地域では、その後、地下環境の放射性核種による汚染が発覚し、大きな社会的問題に発展した。アイダホ州のサイトやハンフォードサイトでは汚染状況把握の調査がなされ、廃棄物の回収とともにクリーンアップの作業が莫大な費用をかけて実施されている。

図1　米国アイダホ州の原子炉試験場の敷地内に処分された放射性廃棄物（1960年代頃）。

出典：米国エネルギー省（DOE）Webサイト

図2　米国ハンフォードサイトの放射性廃液を貯蔵する半地下のタンク。後にタンクから放射性廃液が漏洩していることが確認された。

出典：米国エネルギー省（DOE）Hanford Webサイト

このような軍事利用での放射性廃棄物の発生とともに、1960年代には原子力発電所が世界各国で操業を開始したことで、使用済燃料や再処理によるガラス固化体などの放射能が高く、半減期が長い放射性廃棄物や放射能の低い運転廃棄物などが大量に発生した。そのためそれらの廃棄物への適切な対応策の選択が原子力発電の継続条件と密接に係ることになった。

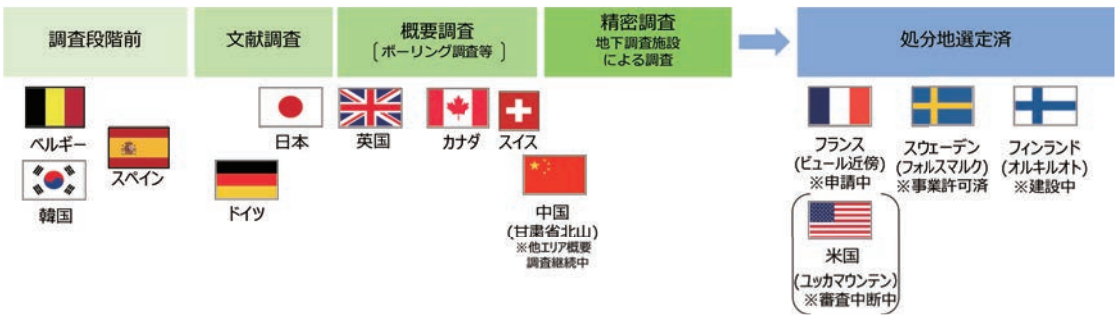
核物質の軍事利用や原子力の平和利用からは、当然ながら放射性廃棄物が発生することは早くから認識されていた。この放射性廃棄物にどのように対応するかについて、特に放射能レベルが高い使用済燃料の管理方法やガラス固化を含む高レベル放射性廃液の固化方法の検討については、1940年代から米国で検討が進められ、1957年に全米科学アカデミーから最初の報告書が公表された。そこでは、放射性廃棄物が有する長期にわたる毒性を、人間とその生活環境から確実に隔離する方策として、地下深部に処分する方策（地層処分）が最も有効であることが提唱された。

その後、原子力の平和利用を進める各国や国際機関での議論が本格的に開始され、1977年に国際原子力機関（IAEA）より公表された報告書では、放射能の高い長寿命核種を含む放射性廃棄物への対策について、原子力を利用した現世代の責任により、将来世代への負担を最小限とする現状技術で安全に実現できる唯一の方策として「地層処分が最も有効な手段である」と結論づけられた。この地層処分の選択は、その後、世界共通の理解となった。

日本においても1976年の原子力委員会決定に基づき、核燃料サイクルの再処理から発生するガラス固化体を対象として、地層処分するための研究開発が進められ、2000年の特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律により地層処分することが決定された。

現在、諸外国の高レベル放射性廃棄物の地層処分事業は、下図に示すように様々な段階で進められている。最も進んでいるフィンランドでは、オルキルオトで使用済燃料処分場の建設が許可され現在建設中であり、2020年代には世界で最初の高レベル放射性廃棄物の地層処分が開始される予定である。

図3　各国の地層処分プログラムの状況（2022年末時点）



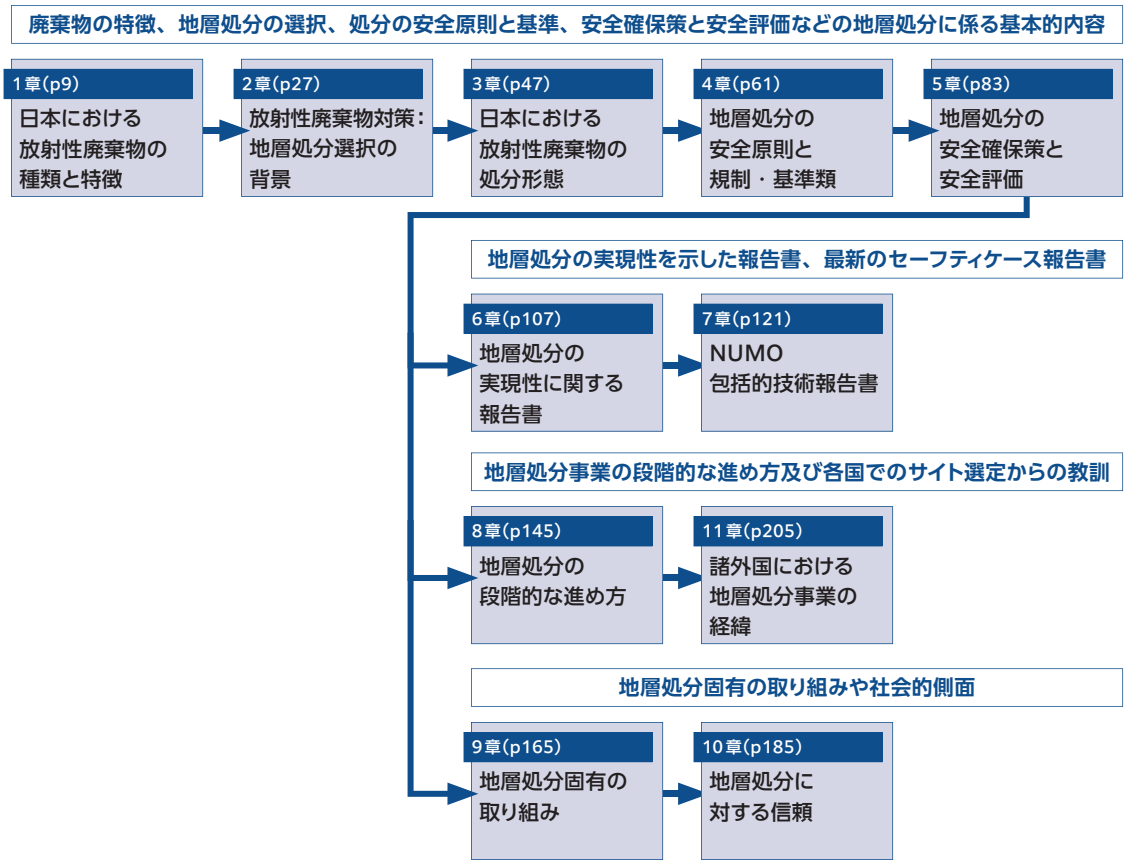
出典：経済産業省資源エネルギー庁 Webサイトの図を一部修正
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/hlw/hlw01.html

本教材は、11章からなり、放射性廃棄物の種類や特性、放射能濃度区分を考慮した処分方法、地層処分の選択の背景、安全確保策とその評価方法、長期評価に伴う不確実性への対応、地層処分の段階的な進め方、地層処分に対する信頼感の醸成、地層処分を進める各国が経験した挫折と成功事例からの教訓を学習する。

本書の構成

本教材では1章から5章において、廃棄物の特徴、地層処分の選択、処分の安全原則と基準、安全確保策と安全評価などの、地層処分に係る基本的内容を学習する。その後、各自の興味に応じて以下の3つの系統に沿って学習されたい。

- 地層処分の技術を統合したセーフティケース等を学ぶ系統(6、7章)
- 各国のサイト選定の経緯等の地層処分の段階的な進め方を学ぶ系統(8、11章)
- 長期にわたる安全確保の特徴がある故の地層処分固有の取り組みや社会の信頼などの社会的側面を学ぶ系統(9、10章)



第1章

日本における放射性廃棄物の種類と特徴

本章では、日本の原子力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。

本節では以下の項目について学習する。

1.1 ● 核燃料サイクルと放射性廃棄物
1.2 ● 放射性廃棄物の発生源と区分
1.3 ● 放射性廃棄物の種類別発生量
（参考）福島第一原子力発電所の事故からの放射性廃棄物推定量
（参考）放射性廃棄物管理と実施主体
1.4 ● 地層処分の対象となる放射性廃棄物
1.5 ● 日本における最終処分（地層処分）の実施体制

1-1

核燃料サイクルと放射性廃棄物

日本の原子力政策の基盤となる核燃料サイクルの仕組みとは。
核燃料サイクルからどのような廃棄物が発生するのか。

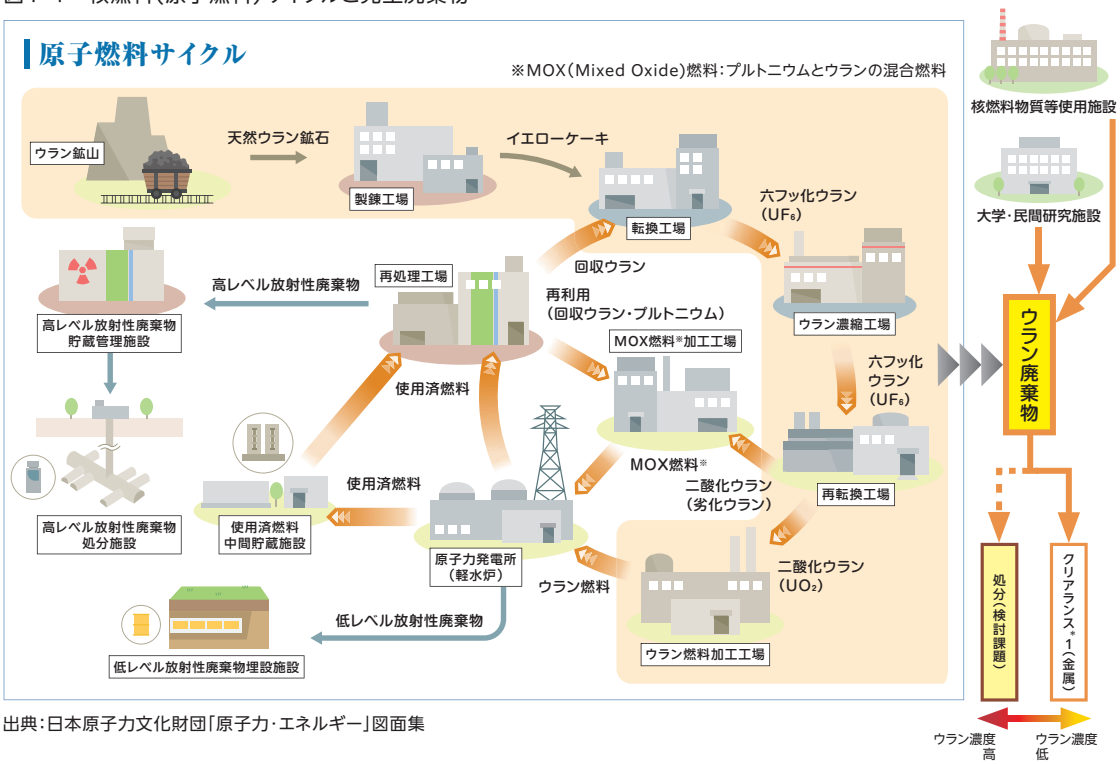
原子力政策で最も重要かつ基盤となるのが図1-1に示す「核燃料サイクル」である。原子力発電後の使用済燃料の中にはウラン・プルトニウムが含まれており、これらを再処理して取り出し、燃料として再利用する。主な核燃料サイクルの工程は、ウラン濃縮、再処理、MOX燃料加工で、重要な事項は、再処理から発生するウランとプルトニウムに対するセキュリティと保障措置(※)であることに留意が必要である。

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：再処理及びMOX燃料加工施設から発生する超ウラン元素を含む廃棄物
- ■ 低レベル放射性廃棄物：再処理及び原子力発電所等の運転から発生する廃棄物（ウラン廃棄物も含む）

(※：保障措置：核物質が平和目的だけに利用され、核兵器等に転用されないことを担保するために行われる検認活動)

図1-1　核燃料(原子燃料)サイクルと発生廃棄物



出典：日本原子力文化財団「原子力・エネルギー」図面集

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。

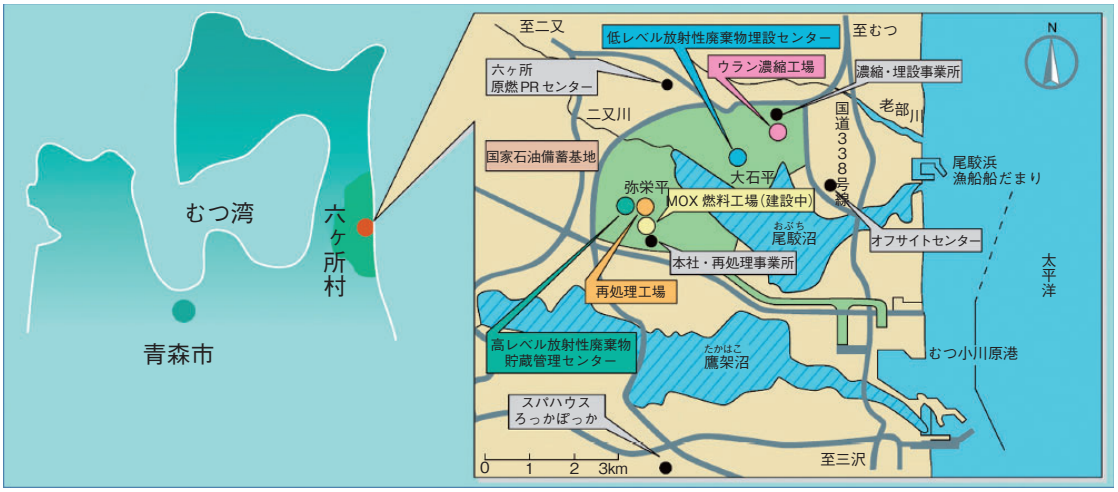
出典：日本原子力学会「東京電力福島第一原子力発電所事故以降の低レベル放射性廃棄物処理処分の在り方」特別専門委員会：平成26年度報告書

■ 日本の核燃料サイクル施設

日本では、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）方策を進めることを決定し、日本原燃株式会社（JNFL）が青森県六ヶ所村に関連する施設を建設している。2020年、再処理施設の安全審査基準への適合性審査に合格し、設工認（設計及び工事計画の認可）申請の対応が進められている。

電力各社は、JNFLの再処理施設が稼働するまでの経過措置として、海外に使用済燃料の再処理を依頼（英国、フランス）し、その結果として再処理から発生するガラス固化体が返還されてきており、核燃料サイクル施設敷地内で保管されている。また、低レベル放射性廃棄物（TRU廃棄物）の返還も計画されている。

図1-2　日本原燃（株）の核燃料サイクル施設



出典：日本原燃（株）

現在の核燃料サイクルは、軽水炉の利用による「軽水炉サイクル」と呼ばれているものである。一方、発電しながら消費した以上の燃料（プルトニウム）を生成できる高速増殖炉を利用する核燃料サイクルを「高速炉サイクル」と呼んでいる。この高速増殖炉の原型炉である「もんじゅ」の廃止措置が決定したことから、現在は「軽水炉サイクル」が進められているが、日本のエネルギー政策においては、放射性廃棄物の量を減らしたり、放射能レベルを低減させることなどができる「高速炉サイクル」を含めた核燃料サイクルを推進していくとしている。

ポイント

- **核燃料サイクルの主要な工程：ウラン濃縮、再処理、MOX燃料加工**
- **核燃料サイクルから発生する放射性廃棄物の種類：ガラス固化体、TRU廃棄物、低レベル廃棄物、ウラン廃棄物**

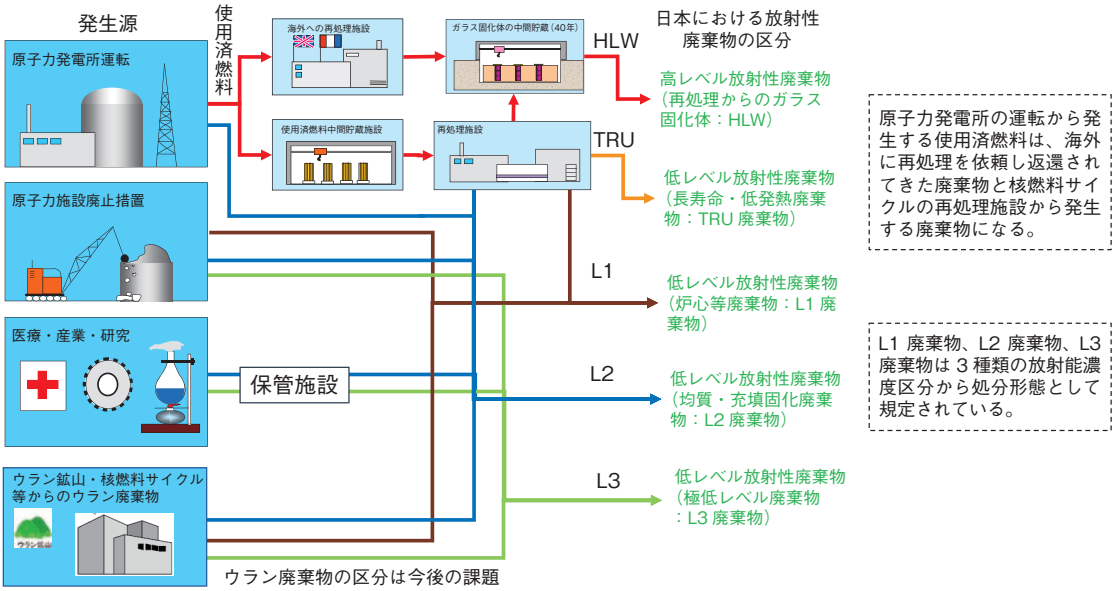
1-2

放射性廃棄物の発生源と区分

日本で発生する放射性廃棄物の主要な発生源は何か。
放射性廃棄物の区分の考え方はどのようになっているか。

日本で発生している放射性廃棄物の主たる発生源の種類及び区分は図1-3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。この他には、東京電力福島第一原子力発電所（以下、「福島第一」）の廃炉作業から発生するデブリ等の放射性廃棄物や敷地外の除染廃棄物がある。

図1-3　放射性廃棄物の発生源と廃棄物の種類



日本における放射性廃棄物の発生源としては、下記に示す４つに分類されるが、法律上の区分（核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律：原子炉等規制法）では第一種埋設事業の廃棄物と第二種埋設事業の廃棄物の２種類が規定されている。

①原子力施設（発電所と核燃料サイクル）の運転
②原子力施設の廃止措置から発生する廃棄物
③医療、産業、研究行為から発生する廃棄物（MIR廃棄物とも呼ばれる）*
④核燃料サイクル等から発生するウラン廃棄物

この発生源の区分には、福島第一の廃炉作業などからの廃棄物は含まれていない。

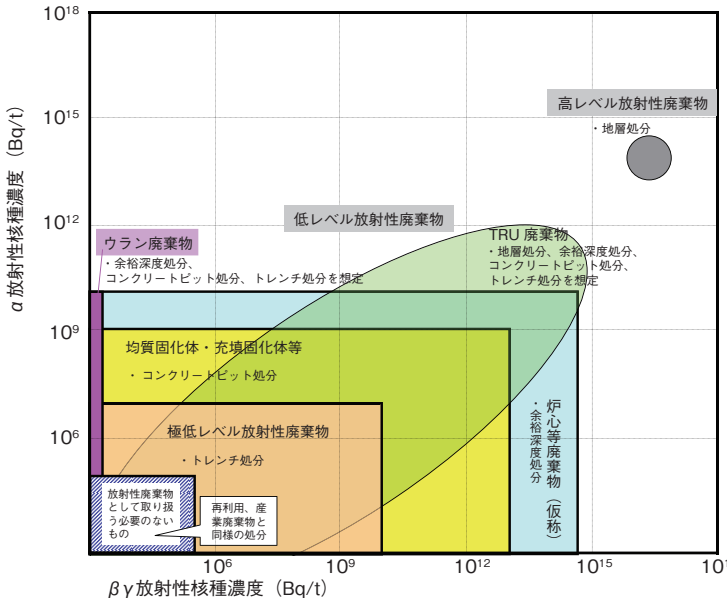
一方、放射性廃棄物の区分は、図1-4にある、αとβ・γの放射性核種濃度(Bq/t)で区分されて

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。この他、比較的α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)

*放射性同位元素等の規制に関する法律(RI規制法)の下で発生し、原子炉等規制法の廃棄事業者へ廃棄を委託された放射性廃棄物は、原子炉等規制法下の廃棄物とみなせる合理化が図られている。

図1-4　放射性廃棄物の濃度区分と処分方法



出典：総合資源エネルギー調査会 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）」

このうち、低レベル放射性廃棄物は、以下に分類されている。

■ TRU 廃棄物
■ 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（α核種の濃度は、10^{10} Bq/t オーダーから10^{6} Bq/t以下まで幅広く分布）

また、どのように使用(廃棄)されたとしても人が受ける被ばく線量が0.01 mSv/y以下となる放射能濃度（核種毎に異なる）の廃棄物をクリアランスレベル以下の廃棄物と呼び、再利用等が可能である。

ポイント

▶放射性廃棄物の濃度区分と処分方法
▶放射性廃棄物の区分（第一種廃棄物埋設事業対象、第二種廃棄物埋設事業対象）

1-3

放射性廃棄物の種類別発生量

日本で既に発生している放射性廃棄物及び今後発生する可能性のある廃棄物の種類と量の推定は、どのようになっているか。

公表されている放射性廃棄物の発生量（National Inventory）について、現状と今後40年間の予測を下表に示す。このうち、原子力発電所からの運転廃棄物量について、福島第一の事故による影響は考慮されていない。

表1-1　日本で発生が予測されている放射性廃棄物の量

発生源	現状	今後40年間の発生量予測				
		HLWとSF	TRU	L1	L2	L3
①原子力発電所の運転	SF 18,450tU 返還HLW 1820本 返還TRU 3,500トン L2 400,000本（200ℓドラム缶）	SF 40,000tU 返還HLW･TRU?	—	—	600,000本（200ℓドラム缶）	—
原子力発電所の廃止措置	福島第一以外のプラントの廃止措置推定			8,000トン	63,000トン	380,000トン
②再処理施設の運転	—	ガラス固化体:40,000本	51,000m^3（地層処分19,000m^3を含む）	解体廃棄物:38,000m^3と推定		
③JAEAの施設運転と解体	再処理ガラス固化体:630本		20,000m^3	原子力施設の解体･ふげん、もんじゅの解体から発生量は公表されていない（ふげん5万トンの報告あり）		
④医療･産業･研究廃棄物	L2:210,000本（200ℓ） L3:300,000本（200ℓドラム缶）				40,000m^3	73,000m^3
⑤ウラン廃棄物	平成15年度末の量 加工事業者:40,900本 JAEA:47,000本 日本原燃:3,947本		2030年までに200ℓドラム缶換算で約27万本と推定 放射能濃度は10^{10} Bq/t～10^{6}Bq/tまで幅広く分布			
（参考）福島第一の事故由来廃棄物	敷地外:予定範囲の除染が終了⇒除去物は中間貯蔵（約1,400万m^3） 福島第一の廃炉作業は準備中	●中間貯蔵は30年間後、県外に移動し処分する予定 ●8,000Bq/kg以下の除去物は再生資材化で活用を計画 ●福島第一の廃炉と環境修復から発生する廃棄物量は約580万m^3と推定				

出典：河村　(2018), 日本における放射性廃棄物インベントリと廃棄物ストリーム、日本原子力学会2019年春の年会

■ 発生量推定の根拠

① 原子力発電所の運転廃棄物

● 発電所の運転から発生した使用済燃料
海外に依頼した再処理からの返還廃棄物
発電所の運転からのL2廃棄物
L3相当廃棄物は敷地内で保管

出典:電気事業連合会ホームページ

原子力発電所解体廃棄物

● 電気事業連合会が2017年に公表した全原子力発電プラントの廃止措置からの廃棄物量

出典:電気事業連合会ホームページ

② JNFL再処理施設からの廃棄物

● 再処理施設は運転前であるので、発生量は施設の処理能力からの推定発生量（試験的に製造されたガラス固化体は少数存在）

出典:電気事業連合会ホームページ

③JAEA再処理施設等からの廃棄物

● 再処理施設等からのガラス固化体、TRU等の廃棄物
● 再処理施設等の解体(今後発生)廃棄物
● ふげん、もんじゅの発電所解体廃棄物

出典:JAEAホームページ

④ 医療・産業・研究活動からの廃棄物

● RI(ラジオアイソトープ）を含む廃棄物でL2、L3相当、RI協会、RANDECが集荷・集積・保管している量

出典:文部科学省ホームページ

⑤ ウラン廃棄物

● ウラン燃料の製造過程で発生
● 民間のウラン燃料加工施設、日本原燃のウラン濃縮施設、JAEAのウラン濃縮施設から発生

出典:原子力委員会(2000)資料

表1-2　商業用原子力発電所の廃止措置から発生する廃棄物の種類と発生量

区分	商業用原子力発電所（57プラント）の合計	
L1	約8,000	LLW合計: 約450,000 ➡約2％
L2	約63,000	
L3	約380,000	
CL	約890,000	CL:約5％
NR	約18,500,000	NR:約93％
合計	約20,000,000	合計100％

単位:トン

CL:クリアランスレベル以下の放射性廃棄物
NR:放射性廃棄物でない廃棄物

出典:電気事業連合会HP

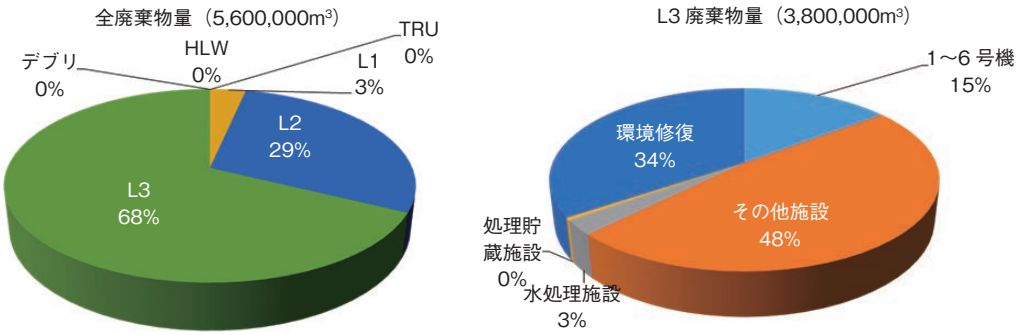
ポイント

▶ナショナル・インベントリは廃棄物処分対策にとって重要な情報
▶発生予測での大きな不確実性要因は福島第一原子力発電所の事故の影響
▶現状で地層処分の対象となるインベントリとして把握しておく数量
▪ガラス固化体:4万本以上　▪ TRU廃棄物:19,000m³以上

参考　福島第一原子力発電所の事故からの放射性廃棄物推定量

● 福島第一原子力発電所の事故に由来する廃棄物は、発電所敷地内に存在する廃棄物と敷地外に放出された放射性物質で汚染された廃棄物に区分

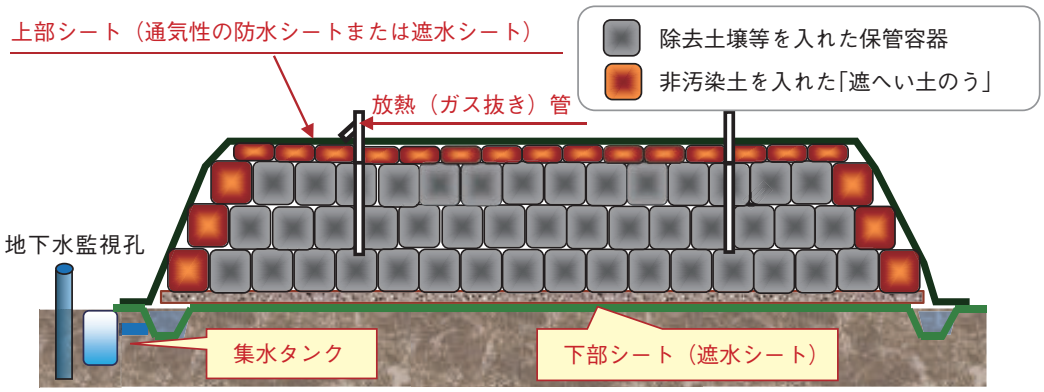
図1-5　福島第一原子力発電所の廃炉と環境修復からの放射性廃棄物発生量予測



出典：Kawamura　et al.,(2007), Decommissioning and Environmental Remediation Scenario Development for Fukushima Daiichi、IAEA TopSafe

図1-6　除染廃棄物の量と仮置き場のイメージ

○仮置場の基本構造と、日常における管理・点検（直轄除染の仮置場の例）



○仮置場の箇所数と、除去土壌等の数量

	仮置場箇所数	現場保管箇所数	除去土壌等の数量
直轄除染	262 ヵ所	—	7,522,666 袋
市町村除染	856 ヵ所	146,819 ヵ所	6,062,593m³

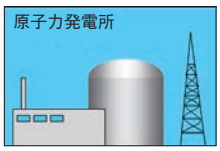
出典：復興庁原子力災害からの福島復興再生協議会：第15回 資料

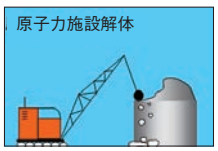
参考 放射性廃棄物管理と実施主体

日本の放射性廃棄物の廃棄物ストリーム（発生源、保管、処理、貯蔵、処分、輸送）における責任主体は、大きく以下にまとめることができる。

①原子力発電所の運転と廃止措置から発生する廃棄物

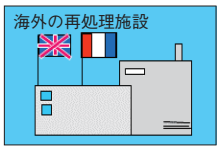
- 発生者：原子力発電所を所有する電力各社
- 保管：発生者
- 処理：使用済燃料は燃料サイクル施設に依頼、運転等廃棄物は発生者が処理
- 処分：運転等廃棄物は日本原燃株式会社(JNFL)

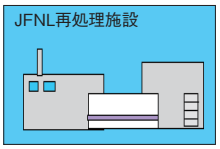




②再処理施設等核燃料サイクル施設の操業と廃止措置から発生する廃棄物

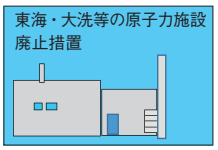
- 発生者：日本の場合はJNFL（施設操業実施主体)、海外再処理事業者
- 保管：JNFL
- 処理：JNFL
- 低レベル放射性廃棄物処分：JNFL
- 高レベル放射性廃棄物処分（ガラス固化体、TRU廃棄物）：原子力発電環境整備機構(NUMO)





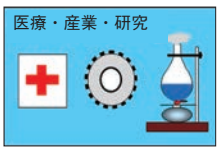
③原子力研究開発機構（JAEA）の核燃料サイクル施設等原子力施設の操業と廃止措置から発生する廃棄物

- 発生者：JAEA
- 保管：JAEA
- 処理：JAEA
- 低レベル放射性廃棄物処分：JAEA
- 高レベル放射性廃棄物等処分：NUMO



④医療・産業・研究活動と施設の廃止措置から発生する廃棄物

- 発生者：医療機関、大学の研究施設、一般会社
- 集荷・処理・貯蔵：日本アイソトープ協会（RI協会）／原子力バックエンド推進センター（RANDEC）
- 処分地選定：JAEA、処分の実施主体JAEA



⑤ウラン探鉱、精錬等の操業と施設廃止措置から発生する廃棄

- 発生者：JNFL（核燃料サイクル施設の操業)、JAEA（ウラン鉱山等）
- 保管：発生者
- 処理・処分の実施主体は未定

1-4

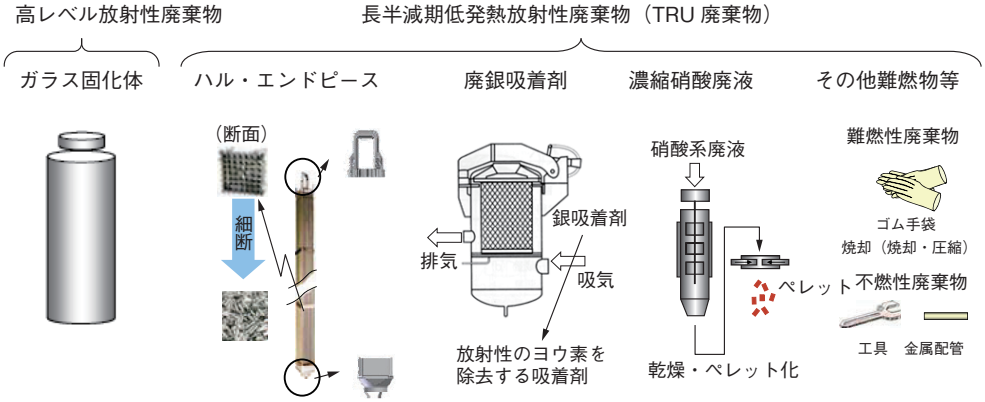
地層処分の対象となる放射性廃棄物

日本で地層処分の対象となる高レベル放射性廃棄物とTRU廃棄物の発生量と種類、廃棄物の特徴は何か。

地層処分の対象となる廃棄物は、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（以下、「最終処分法」という）において、図1-7に示す高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）及び長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU廃棄物）と規定されている。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、第一種廃棄物埋設事業の対象となる廃棄物である。

ガラス固化体とTRU廃棄物は、核燃料サイクルにおける使用済燃料の再処理プロセスから発生する。現時点では、JNFL、JAEA東海再処理施設から発生したものと、フランスと英国に処理を依頼して返還されてきたもの（JNFLの施設で貯蔵）がある。

図1-7　地層処分の対象となる放射性廃棄物の種類



出典：総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会：報告書「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について」

表1-3
地層処分の対象となるガラス固化体の標準的な諸元と貯蔵本数

製造者	日本原燃	JAEA	Orano（旧AREVA NC）	Sellafield Ltd
放射能量*（製造時）	β,γ:2.17×1016Bq以下 α:1.29×1014Bq以下	β,γ:1.5×1016Bq以下 α:2.6×1014Bq以下	（代表値） β,γ:2.8×1016Bq α:1.4×1014Bq	（代表値） β,γ:4.5×1016Bq α:3.5×1014Bq
発熱量	2.3kW 以下（製造時）	1.4kW 以下（製造時）	<2.0kW（輸送時）	<2.5kW（輸送時）
ガラス固化体寸法	高さ:約1,340 mm 外径:約430 mm キャニスター肉厚:約6 mm	高さ:約1,040 mm 外径:約430 mm キャニスター肉厚:約6 mm	高さ:約1,340 mm 外径:約430 mm キャニスター肉厚:約5 mm	高さ:約1,340 mm 外径:約430 mm キャニスター肉厚:約5 mm
ガラス固化体重量	約500kg	約380kg	約492kg	約550kg
貯蔵本数（2020年12月現在）	346本	316本	1,310本	520本

*α,β,γは，それぞれアルファ線，ベータ線，ガンマ線の放射能量

出典：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－（第2章）

ガラス固化体とTRU廃棄物の発生量と特徴

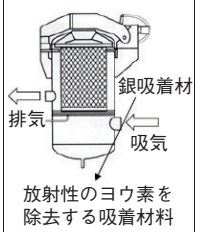
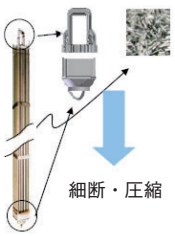
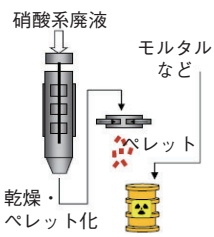
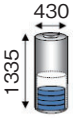
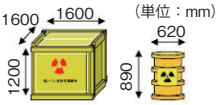
地層処分の対象となるガラス固化体について、地層処分の実施主体であるNUMOは、2021年に公表した「包括的技術報告書」の中で、ガラス固化体の製造者別の仕様と2020年12月現在での発生量を表1-3のように整理している。電力会社が使用済燃料の再処理を依頼したのは、フランスOrano及び英国Sellafield Ltd.である。

地層処分施設の設計や操業計画では、JNFLの再処理工場が運転を開始することを前提に、ガラス固化体発生量を4万本以上とし、年あたり1,000本を地層処分することとしている。

地層処分の対象となるTRU廃棄物については、表1-4にあるように含まれる放射性核種とその特性から4つのグループに分類し、それぞれの廃棄体の仕様を設定している。このようにTRU廃棄物も使用済燃料の再処理から発生することを見込んでおり、核燃料サイクルが計画通り操業を開始することを前提に発生予測量は、19,000m^{3}以上としている。

ガラス固化体とTRU廃棄物の地層処分について、NUMOは同一サイトでの併置処分を基本として処分場レイアウトを設計している。処分場の設計の概要については、7章の7-3節で学習する。

表1-4　地層処分の対象となるTRU等廃棄物のグループ分類と特徴

廃棄体グループ	1	2	3	4	
				低発熱性 L	発熱性 H
概要	廃銀吸着材  	エンドピース　ハル  	濃縮廃液など  	難燃性廃棄物 ゴム手袋 （焼却・圧縮） 不燃性廃棄物 工具　金属配管	
主な廃棄体の形態	（単位：mm） 200L ドラム缶	430（単位：mm）  キャニスタ	（単位：mm） 200L ドラム缶	（単位：mm）  角型容器　200L ドラム缶 その他（ハル缶，インナーバレル）	
特徴	・放射性ヨウ素（I-129）を含む ・セメント固化体	・発熱量が比較的大 ・放射性炭素（C-14）を含む	・硝酸塩を含む ・モルタル，アスファルトによる固化体など	・焼却灰，不燃物 ・セメント固化体など	
見込み発生量	319 [m^3]	5,792 [m^3]	5,228 [m^3]	5,436 [m^3]	1,309 [m^3]
最大発熱量（発生時点）	1 [W/ 本] 未満	90 [W/ 本] 未満	1 [W/ 本]	16 [W/ 本]	210 [W/本]

出典：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－（第2章）

ポイント

- **地層処分の対象としているガラス固化体とTRU廃棄物の種類**
- **発生量予測は処分場の設計のための前提条件として設定**

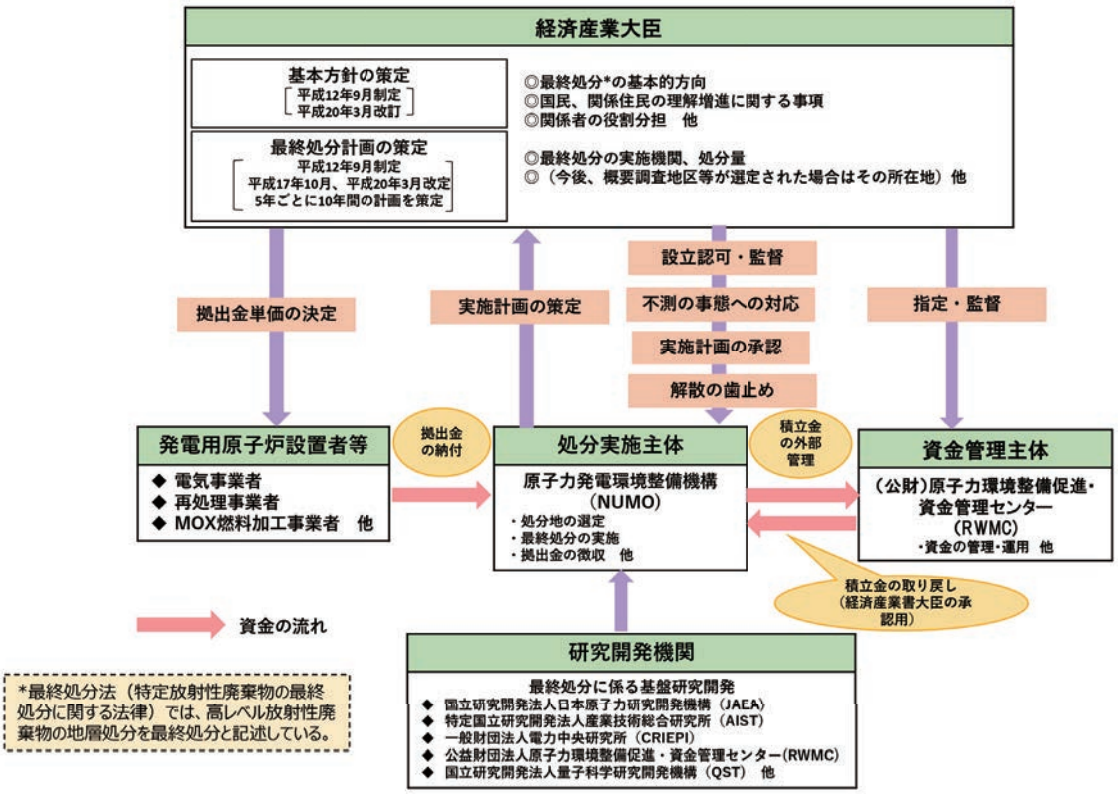
1-5

日本における最終処分(地層処分)の実施体制

日本の高レベル放射性廃棄物を対象とした最終処分(地層処分)の実施体制はどのようになっているか。

「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」(最終処分法)に規定された高レベル放射性廃棄物の最終処分(地層処分)の実施に向けての体制は図1-8のようになっている。

図1-8　日本における最終処分(地層処分)の実施体制



出典:日本原子力文化財団:原子力・エネルギー図面集【8-3-10】高レベル放射性廃棄物の処理・処分の取組み体制に一部追記

■ 最終処分実施に係る各機関等の役割

2000年5月に制定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（最終処分法）」により、高レベル放射性廃棄物処分の基本方針、計画、費用の拠出制度、処分実施主体（原子力発電環境整備機構：NUMO）の設立等、最終処分事業の体制が定められた。

この体制に含まれる処分事業を支える主要な機関等の役割について紹介する。

◆ 経済産業大臣：政策担当部門（資源エネルギー庁電力・ガス事業部放射性廃棄物対策課）

経済産業大臣は、最終処分法に従い、高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る基本方針を策定（最新では2015年5月22日の閣議決定）するとともに最終処分に向けて、5年ごとに10年計画を策定する。

◆ 処分実施主体：原子力発電環境整備機構（NUMO）

NUMOは、最終処分法に基づき2000年に設立された日本における最終処分の実施主体であり、最終処分地の選定に係る調査・評価、処分場の建設・操業・閉鎖、閉鎖後の事業廃止までの責任を負う。現在は3段階の処分地選定段階のうち文献調査を実施中である。

◆ 発電用原子炉等設置者：電気事業者、再処理事業者、MOX燃料加工事業者他

原子力発電所を所有し、使用済燃料を発生する電気事業者、使用済燃料の再処理事業者（JNFL、JAEA）、MOX燃料加工事業者（JNFL、JAEA）などは、最終処分法により規定された最終処分費用をNUMOに拠出している。

◆ 資金管理主体：（公財）原子力環境整備促進・資金管理センター（RWMC）

RWMCは、最終処分法で決められた最終処分拠出金を、NUMOとの契約のもとで積立て、運用・管理する責任主体である。また、NUMOの最終処分積立金の取り戻しに関し、NUMOが取り戻し金を最終処分事業の実施に必要な費用として支出されているかを確認する役割も有している。

◆ 研究開発機関：最終処分に係る基盤研究開発

最終処分に係る基盤研究開発については、国、NUMO、JAEA等の関係機関が、全体を俯瞰して、総合的、計画的かつ効率的に進められるよう連携・協力している。実施に当たっては、国及び関係機関による「地層処分研究開発調整会議」が設置され、「地層処分研究開発に関する全体計画（令和5年度～令和9年度）」を作成し、これに沿って研究開発を実施している。

ポイント

- **最終処分（地層処分）の実施体制における国と主要な機関名と相互の関係**
- **NUMOの処分事業を支援する基盤研究機関名**

これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート

第1章 日本における放射性廃棄物の種類と特徴

問1 次の空欄を埋めなさい。

1	日本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サイクルで、その主要な工程は　①　、　②　、　③　である。
2	核燃料サイクルの目的は、使用済燃料の再処理から　①　と　②　を取り出して、それらを燃料として　③　することである。
3	核燃料サイクルから発生する主要な放射性廃棄物として、地層処分の対象となる　①　と　②　が発生するとともに、　③　と　④　が発生する。
4	日本おける現状での放射性廃棄物の発生源は、核燃料サイクル施設の運転と廃止措置、　①　の運転と廃止措置、日本原子力研究開発機構の　②　の運転と廃止措置、　③　活動がある。
5	日本における放射性廃棄物の処分事業は、　①　法により、　②　と　③　に区分されている。
6	放射性廃棄物は、　①　により処分形態が　②　、　③　、　④　、　⑤　の4種類に区分される。
7	どのように使用（廃棄）されたとしても人が受ける被ばく線量が　①　mSv/y以下となる放射能濃度の廃棄物を　②　レベル以下の廃棄物と呼び、再利用等が可能である。
8	地層処分の対象となる　①　の発生量は　②　本以上、　③　は、　④　m^3以上と推定されている。
9	地層処分の対象となる放射性廃棄物は、　①　法により、　②　と　③　となり、それらの処分の実施主体として　④　が設立された。
10	地層処分の対象となる　①　には、4つの発生源あり、それらは、核燃料サイクル施設での再処理、日本原子力研究開発機構での再処理、海外の　②　と　③　に再処理を委託して返還されてくるものがある。海外から返還された　①　は、現在JNFLの　④　にて貯蔵されている。

11 地層処分の対象となる　①　は、再処理プロセスにより4種類に分類されている。一つは放射性のヨウ素除去に用いた　②　、C-14を含む燃料棒の　③　、硝酸塩を含む　④　、及び　⑤　である。

12 　①　法により最終処分（地層処分）の実施体制が構築されている。原子力発電環境整備機構（NUMO）は、法律に基づき　②　の選定、　①　の実施、　③　の徴収などを実施する。

問2 次の問で、正しいものには○、間違っているものには×をつけなさい。

1 □ 日本において、最終処分法で規定された地層処分の対象となるのは、原子力発電所から発生した使用済燃料、及び核燃料サイクルから発生したガラス固化体とTRU廃棄物である。

2 □ 日本における放射性廃棄物の主要な発生源は、原子力発電所の運転と廃止措置、核燃料サイクルにおける燃料製造と再処理施設の運転と廃止措置、原子力利用のための研究施設の操業と廃止措置、研究・医療・産業活動からである。

3 □ 日本で発生する放射性廃棄物はすべて、処分形態を考慮して放射性核種と放射能濃度により区分されている。

問3 日本で発生している（今後発生する）放射性廃棄物の種類と特徴を、300字程度で述べよ。

答え合わせ

第1章 日本における放射性廃棄物の種類と特徴

問1	1	①ウラン濃縮　②再処理　③MOX燃料加工
	2	①プルトニウム　②ウラン　③再利用
	3	①ガラス固化体　②TRU廃棄物　③ウラン廃棄物　④低レベル放射性廃棄物
	4	①原子力発電所　②研究開発施設　③医療・産業・研究
	5	①原子炉等規制（法）（核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律） ②第一種廃棄物埋設　③第二種廃棄物埋設
	6	①放射能濃度　②地層処分　③中深度処分　④浅地中ピット処分　⑤浅地中トレンチ処分
	7	①0.01　②クリアランス
	8	①ガラス固化体　②4万　③TRU廃棄物　④19,000
	9	①最終処分（法）（特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律）　②ガラス固化体 ③TRU廃棄物　④原子力発電環境整備機構（NUMO）
	10	①ガラス固化体　②英国　③フランス　④高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター
	11	①TRU廃棄物　②廃銀吸着材　③ハル・エンドピース　④濃縮廃液　⑤難燃性廃棄物
	12	①最終処分（法）（特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律）　②処分地　③拠出金

問2

1 ×　最終処分法（特定放射性廃棄物の処分に関する法律）で規定された対象放射性廃棄物は、2000年の制定時では「ガラス固化体」とされたが、2007年の最終処分法の改正で［TRU廃棄物］が追加された。日本では原子力発電所から発生する使用済燃料は再処理することを国の政策としている。地層処分を進める各国では、再処理をせず使用済燃料を直接処分する方策を選択している国も存在する。

2 ○　現時点での放射性廃棄物の主要な発生源は、問題文にある4つである。この他に、福島第一原子力発電所の廃止措置から発生するデブリ等の放射性廃棄物や敷地外の汚染廃棄物があるが、その区分や処分方法については今後規定されると考えられる。

3 ×　日本における放射性廃棄物は、含まれる放射性核種の（α核種、β核種とγ核種）の放射能濃度により、処分形態が区分されており、その区分の名称がまた放射性廃棄物の区分にも用いられているが、ウラン廃棄物については、その処分形態が決まっていない。

問3

【解答例】

日本の原子力利用から発生する廃棄物は、大きく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。高レベル放射性廃棄物は、原子力発電所からの使用済燃料を再処理することで発生するガラス固化体が相当する。核燃料サイクル施設からは、この他に長寿命低発熱放射性廃棄物（TRU廃棄物）、低レベル放射性廃棄物、ウラン廃棄物が発生する。低レベル放射性廃棄物は、濃度により、炉心等廃棄物、均質・充填固化体、極低レベル廃棄物に分類されている。これらは原子力施設の運転・廃止措置、医療・産業・研究から発生する。このほか、福島第一原子力発電所の事故由来廃棄物が存在するが、その種類や区分等取り扱いについては未定である（306文字）。

【解答に用いられるキーワードの例】

核燃料サイクル、高レベル放射性廃棄物、低レベル放射性廃棄物、使用済燃料の再処理、ガラス固化体、TRU廃棄物、ウラン廃棄物、医療・産業・研究廃棄物、事故由来廃棄物、原子力施設の廃止措置、原子力施設の運転、放射能濃度区分

参考文献 第1章 日本における放射性廃棄物の種類と特徴

- 原子力委員会（1967）、原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画
- 日本原子力文化財団、「原子力・エネルギー」図面集
- 原子力学会特別専門委員会報告書（2015）、低レベル放射性廃棄物処分におけるウランの扱いについて－浅地中トレンチ処分に係る規制への提言－平成26年度報告書
  http://www.aesj.or.jp/special/report/2014/s_1fteilevel_report2014.pdf
- 日本原燃（株）Webサイト、原子燃料サイクル施設の概要
- 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（原子炉等規制法）
- 経済産業資源エネルギー庁Webサイト、放射性廃棄物について
- U.S. NRC Web site, Definition of High-Level Waste
- 総合資源エネルギー調査会 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
- 河村秀紀(2018), 日本における放射性廃棄物インベントリと廃棄物ストリーム、日本原子力学会2019年春の年会
- 原子力規制委員会（2015）、廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合（第2回）資料2-1、原子力発電所等の廃止措置及び運転に伴い発生する放射性廃棄物の処分について（電気事業連合会作成）
- 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（最終処分法）（2000）
  https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=412AC0000000117
- 原子力規制委員会Webサイト、クリアランス制度の概要
- 坂井章浩（2022）、研究施設等廃棄物処分の基本的な考え方と処分技術の開発状況、放射性廃棄物処分技術の最新動向に関する総合シンポジウム
- 文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会、原子力分野の研究開発に関する委員会（2006）、RI・研究所等廃棄物(浅地中処分相当)処分の実現に向けた取り組みについて
- H. Kawamura, S. Yashio, I. McKinley (2007), Decommissioning and Environmental Remediation Scenario Development for Fukushima Daiichi、IAEA TopSafe
- 復興庁（2017）、原子力災害からの福島復興再生協議会（第15回）資料5　（環境省、除染・中間貯蔵施設等の現状について）　https://www.reconstruction.go.jp/topics/main-cat1/sub-cat1-4/20170806_kyougikai_07shiryo5.pdf
- 総合資源エネルギー調査会原子力安全保安部会廃棄物安全小委員会報告書（2008）、高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について（平成20年1月18日）https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/1246938/www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g80118b01j.pdf
- 原子力発電環境整備機構（NUMO）（2021）、処分場設計と閉鎖前の安全性の評価、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）処分場設計、2021年5月26日

第2章

放射性廃棄物対策:地層処分選択の背景

高レベル放射性廃棄物*（ガラス固化体と使用済燃料）の処分対策として、多くの国で「地層処分」が選択されている。本節では、地層処分選択の背景や理由とそれに歩調を合わせた日本での地層処分選択の歴史を知識として学ぶ。

*日本では高レベル放射性廃棄物はガラス固化体としているが、原子力発電所の使用済燃料を直接処分する国においては、使用済燃料も含めて高レベル放射性廃棄物と定義している国もある（例えば米国のNRCの定義）。国際機関では、高レベル放射性廃棄物は放射能レベルの高い廃棄物と定義しており、ガラス固化体、使用済燃料の区別には言及していない。

本節では以下の項目について学習する。

2.1 ● 放射能の減衰特性が示唆すること

2.2 ● 高レベル放射性廃棄物管理の倫理的な側面

（参考）地層処分選択の基盤となった歴史的報告書

2.3 ● 地層処分の選択

（参考）処分オプションの検討事例と比較評価

2.4 ● 日本における地層処分選択の経緯

2.5 ● 地層処分の進め方に関する提言

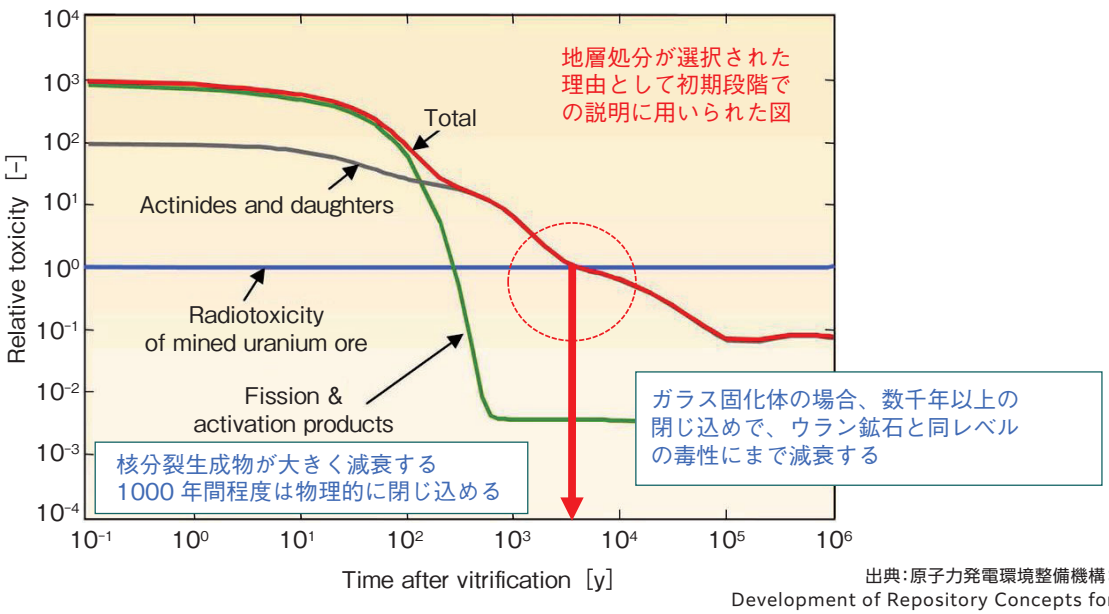
2-1

放射能の減衰特性が示唆すること

高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性物質の濃度は時間とともに減衰するが、人間や環境への影響の対策は必要となる。

放射性廃棄物が人間とその環境に及ぼす潜在的な影響は、放射性物質の減衰により時間の経過とともに減少していく特性を有している。高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）では、数千年以上の閉じ込めでウラン鉱石と同レベルの毒性まで減衰することから、科学技術的には、この期間を含め、高レベル放射性廃棄物を人間とその環境から物理的に隔離し、閉じ込める方策が選択できれば長期の安全性が確保できる見通しが得られるとしている。このことは地層処分が選択された主要な理由の一つとなっている。

図2-1　ウラン鉱床との類似性からのHLWの毒性の変化



出典：原子力発電環境整備機構：
Development of Repository Concepts for
Volunteer Siting Environmentsに一部加筆

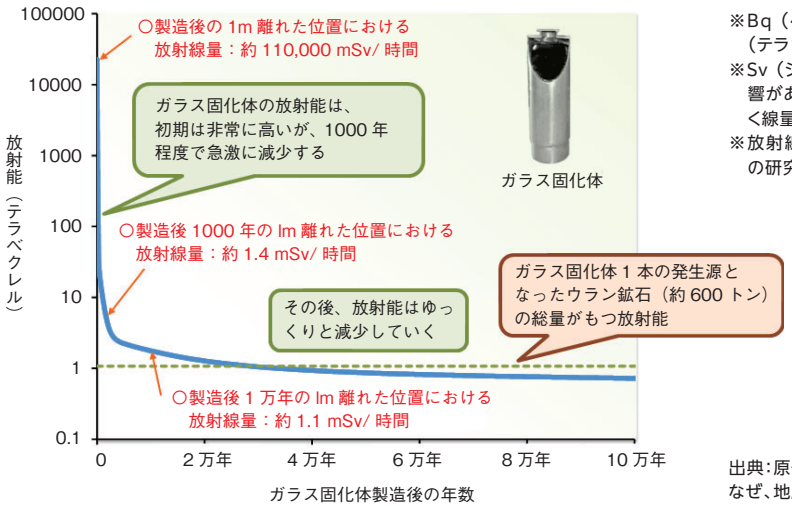
■ ガラス固化体の毒性と放射能の減衰

図2-1は、ガラス固化体の潜在的毒性の変遷をウラン鉱石のそれと比較したものである。約8,000年で同レベルとなることが示されている。このような潜在的毒性については、丁寧に説明しないと誤解を招きやすい。最も多い誤解は、例えば、8,000年後にウラン鉱石と同じレベルとなり安全であるという解釈である。この段階でのガラス固化体の放射能量は、まだ極めて高いレベルにあり、被ばく線量的に安全レベルにはない。なお、毒性指数は経口摂取を前提に計算されている。

高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）は時間の経過とともに放射性物質の半減期によりその潜在的な毒性が低下していくという特性があり、その期間を一つの目標として確実に人間とその環境から隔離できる方策が必要とされた。またそのような方策が長期にわたることから将来世代への負担を小さくするという倫理的な側面について議論された（OECD/NEA 1977 Polvani Reportより）。

図2-2は、ガラス固化体1本が有する放射能の時間的な変化を示している。ガラス固化体1本の原料となった約600トンのウラン鉱石の放射能と比較したものである。ガラス固化体の放射能は数万年以上高いレベルにあることから、人間とその環境から物理的に隔離するとともに廃棄物を長期に閉じ込めておく必要性を示唆している。

図2-2　ガラス固化体放射能の時系列的な変遷



※Bq（ベクレル）とは、放射能の強さを表す単位（テラ10^{12}倍）
※Sv（シーベルト）とは、放射線によってどれだけ影響があるかを表す単位（ミリ 1/1000倍）。被ばく線量の単位となる。
※放射線量の計算値は、核燃料サイクル開発機構の研究報告（2003）を参照して設定されている。

出典：原子力発電環境整備機構：
なぜ、地層処分なのか

ポイント

▶ガラス固化体の放射能減衰特性と人間への影響の時間スケール：数万年以上継続

▶長期にわたるガラス固化体からの影響を防護する方策：長期の隔離と閉じ込め

2-2

高レベル放射性廃棄物管理の倫理的な側面

高レベル放射性廃棄物管理に係る「倫理的な側面」とはどのようなものか。

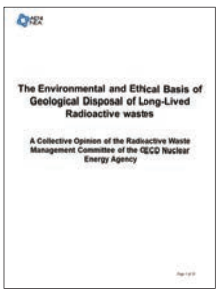
極めて長期にわたり人間とその環境に影響を及ぼす可能性のある高レベル放射性廃棄物の管理をどのようにするかの議論の中で、科学技術的な側面だけでなく人間として守り行うべき道として「倫理的な側面」からの議論がある。「倫理的」な議論は多くは医学分野などでなされているが、長期にわたり高い放射能が継続する廃棄物から人間の健康と環境を守るために、人間はどのように対応すべきかについて、多くの議論がなされてきた。

本節では、倫理的な側面に対する多くの論点が取りまとめられた経済協力開発機構/原子力機関（OECD/NEA）の放射性廃棄物管理委員会（RWMC）が1995年に公表した長寿命放射性廃棄物の地層処分に関する意見を集約したレポート[*1]を紹介する。

*1 OECD/NEA (1995), The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Waste、A Collective Opinions of the Radioactive Waste Management Committee,

【高レベル放射性廃棄物の管理に関する倫理的側面】

◆ 世代間の公平性から、廃棄物を発生させた現世代がその管理について責任を持つこと、将来世代の放射線による影響を少なくとも現在許容している範囲以下とすること、廃棄物の管理にあたっては、将来世代への負担を最小とすること、将来世代への選択肢を残しておくことなどが倫理的な規範となる。



出典：OECD/NEA：The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Waste、A Collective Opinions of the Radioactive Waste Management Committee

◆ 世代内の公平性から、廃棄物の管理の目的は人間とその環境を防護するためであり、他の活動とのバランスを考慮して資源（負担費用など）を配分すること、関連する社会が公正で公開された意思決定プロセスに参画することを倫理的な規範とする。

◆ 長期貯蔵は、次世代の選択肢を残す観点から倫理的であると見えるが、将来世代への経済的な負担を残すことになり、現世代が責任をもって対処するとする倫理的な規範にそぐわない。

◆ 将来世代に選択肢を残す観点から、埋設した廃棄物を回収することが可能であることが倫理的に則しているオプションであるといえる。

◆ 廃棄物管理は、世代間にわたって継続されていくことから、世代を超えての意思決定に参画することで世代内の公平性と世代間の公平性をともに正当化できる。

◆ 高レベル放射性廃棄物の管理の原則は、隔離と閉じ込めであり、万が一漏出したとしても将来世代の人間とその環境に与える影響は現世代が受け入れているレベル以下であるということが、地層処分を選択した背景にある倫理観に対して正当化される。

■ 高レベル放射性廃棄物に対する世代間と世代内の公平性

OECD/NEAの報告書（1995）は、付属文書を含めて18ページにまとめられている。前出の世代間と世代内の公平さ等については、専門家の意見の集約として取りまとめられており、その倫理と環境の背景については、「世代間の公平性」と「世代内の公平性」に対する懸念として以下に記述されている。

一つ目は、廃棄物を生み出している現世代から将来世代が受け継ぐ廃棄物とそのリスクを最小限とする技術と戦略を選択することによる「世代間公平性」の達成である。それは各世代が後世に負の財産を残し、負担と利益の組み合わせを伴うという事実、そして今日決定することは、処分というオプションをやめるか、あるいは将来の新しい展望を開くかになる。このことは避けられないが、適切なレベルの公平あるいは正当性が期待できるのであれば、我々の行動と決定はより受け入れられることになろう。そこでは、我々世代が将来世代の意思決定の自由を妨げることはできない。将来への潜在的な影響を倫理性と安全性の観点から受け入れられるレベルに保つことが廃棄物管理の目的となる。

二つ目は、「世代内の公平性」の達成に関する、特に倫理的アプローチの取り扱いになる。現世代の中では、意思決定プロセスへの資源配分と公衆の関与の問題の対処がそれにあたる。この意思決定プロセスの形は、国の制度や政治的要因によってある程度形作られているが、公衆の関与は、地層処分の重要な決定を行う場合に必要性が高まることは明らかである。意思決定においての資源配分を検討する際には、人間の健康と環境に与えるリスクに関して、放射性廃棄物と他のプロジェクトを比較する必要がある。このような認識から、高レベル放射性廃棄物の地層処分などの施設の建設と操業による影響が公衆に対して平等と公平さが維持されているかも懸念する事項となる。

結論は以下のように取りまとめられている。

- ◆ 新しいプロジェクトに着手する際には、廃棄物管理に係る責任を明確にする必要がある。
- ◆ 廃棄物発生者は、将来の世代に過度の負担をかけない方法で廃棄物を管理する責任を負い、そのための資源を提供しなければならない。
- ◆ 廃棄物は人間の健康と環境防護の許容レベルを確保する方法で管理する必要があり、そして将来の世代に少なくとも現在許容できるレベルの安全性を提供しなければならない。そこには、将来の健康と環境へのダメージのリスクを割り引くための倫理的根拠はない。
- ◆ 廃棄物管理戦略は、安定した社会構造が無期限に継続するといった仮定や技術の進歩に基づくべきではなく、能動的な制度的管理に依存しない受動的に安全な状況を後世に残すことを目的とすべきである。

ポイント

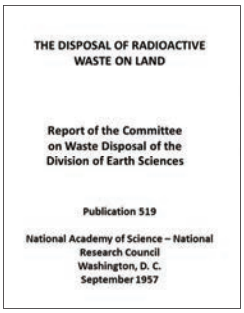
▶地層処分選択の倫理的側面と呼ばれている事項：

将来世代への負担を最小とし、選択肢を残す、現世代の責任で対処、公正で公開された意思決定プロセスへの参画、将来世代の人間の健康に対する潜在的なリスクが現世代の許容しているレベル以下、世代を超えての意思決定への参画

参考　地層処分選択の基盤となった歴史的報告書

国際機関等での多くの議論を通じて地層処分が選択されてきた背景について、下記に示す３つのレポートからその経緯を知ることができる。この３冊の報告書は、地層処分を学ぶ時に基盤となる書物である。

全米科学アカデミー（1957）：放射性廃棄物の陸地処分



出典：National Academy of Science- National Research Council：The Disposal of Radioactive Waste on Land, Report of the Committee on Waste Disposal of the Division of Earth Science

放射性廃棄物の処分方策について、米国原子力委員会（AEC）からの諮問を受け、全米科学アカデミーが世界で初めて公表した報告書である。

様々な処分方策を検討した結果、陸地処分の内、岩塩への処分を推奨した（この方向は、その後岩塩層へのTRU廃棄物地層処分に繋がっている）。

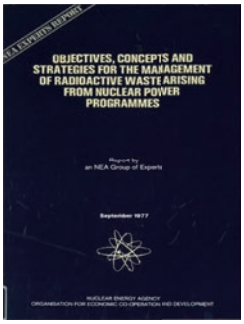
米国の原子力委員会（Atomic Energy Commission：AEC）は、1955年に全米科学アカデミー（National Academy of Science：NAS）に核エネルギー利用から発生する放射性廃棄物の取り扱いについて諮問した。

NASは、委員会を設置し、1957年に処分方策に関する報告書を作成し、以下の内容を委員会に勧告した。

- 最も可能性の高い方策は、岩塩内処分である。
- 固化による溶出抑制を施し、乾燥した地域の保管施設あるいは、岩塩採掘後の坑内に永久保管する。
- 不透水岩盤に挟まれた多孔質岩盤内に充填する。
- 放射性毒性の高いCs-137, Sr-90を分離し、前記の方法で処分する。
- 地下水の流れが存在する岩盤内への処分は、放射性核種の移行形態の予測が難しく、水理地質に関わる知見が十分でない。

日本の原子力委員会では、この報告書の内容を受け、1962年に、日本では岩塩層が存在しないことから地層処分は困難であり、低中レベルの放射性廃棄物の海域への処分（海洋投棄）を当面の目標として検討を進めることを決定した。高レベルの放射性廃棄物の処分については、方向性を示さず今後の検討課題とした。

OECD/NEA(1977)：Polvani Report



出典：OECD/NEA: Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes

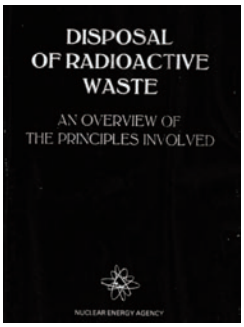
世界各国の専門家が集まり、高レベル放射性廃棄物（HLW）の処分ついて、Polvani博士を中心にOECD/NEAが初めて取りまとめた報告書。地層処分が最も有効な手段であることを勧告した最初のレポート。高レベル放射性廃棄物は時間の経過とともにその毒性が減衰する特徴を活かした処分方式を選定することも提案されている。

経済協力開発機構/原子力機関（Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency：OECD/NEA）は、Polvani博士を委員長として、レベルの高い放射性廃棄物（以下高レベル放射性廃棄物あるいはHLW: High Level Radioactive Waste）の処分に対する方策について専門家の意見を1977年に取りまとめた。その中で、地層処分が最も有効な手段であることが勧告された。そこでの論点の一つとして、高レベル放射性廃棄物は時間の経過とともにその毒性が減衰する特徴を活かした処分方式を選定することも提案されている。本報告で検討された処分オプションは以下の通り。それぞれの特質（長所・短所）とともに実現に向けての課題を比較している。その中でなぜ地層処分が有効であるかを結論づける事項が示唆された。

▶陸域での処分
－地層処分(岩塩、結晶質岩、堆積岩)　－深海洋底地層への処分
－海底床への処分　－氷床下への処分
▶宇宙処分　▶核変換

様々なオプションの中で、長寿命廃棄物を極めて長期にわたり人間とその環境から確実に隔離する方策として、現存する技術の延長線で実現可能なオプションは深部地下への地層処分であると結論づけた。しかし、地層処分に適した地層が存在するかまたどのような方式で処分するかについては、安全性、技術的実現性、経済性及び社会の受け入れをバランスよく考慮する必要があり、それには今後10年以上の研究開発が必要であることを示唆した。

OECD/NEA(1982)：Coady Report



出典：OECD/NEA：Disposal of Radioactive Waste, An Overview of the Principles Involved

Coady博士を委員長として放射性廃棄物の処分の目標とする原則を取りまとめた最初の報告書。以下の事項に言及している。

■ 人間の健康と環境防護
■ 将来世代への責任
■ 処分オプション
■ 受動的(パッシブ)システム
■ 回収可能性

1982年にOECD/NEAの専門家グループは、“Coady Report”と呼ばれる報告書（Disposal of Radioactive Waste：An Overview of the Principles Involved）を公表した。この中で、放射性廃棄物処分が目指すゴールとして以下の事項を提唱した。

● 人間の健康の防護：放射線被ばくによる影響を評価することで判断
● 環境の防護：放射線影響に敏感である人間を防護することで実現、生態系への影響はモニタリング等の結果で判断
● 将来世代への責任：将来世代への負担をできるだけ小さくするために、原子力エネルギーの恩恵を受けた世代が責任をもって廃棄物対策を講じ、処分することで将来世代が受ける可能性のあるリスクを現世代が受け入れているレベル以下とすること

これらのゴールとして示された事項は、その後、IAEA（国際原子力機関）が1989年に公表した「高レベル放射性廃棄物処分に関する安全原則 Safety series No.99」に引き継がれている。

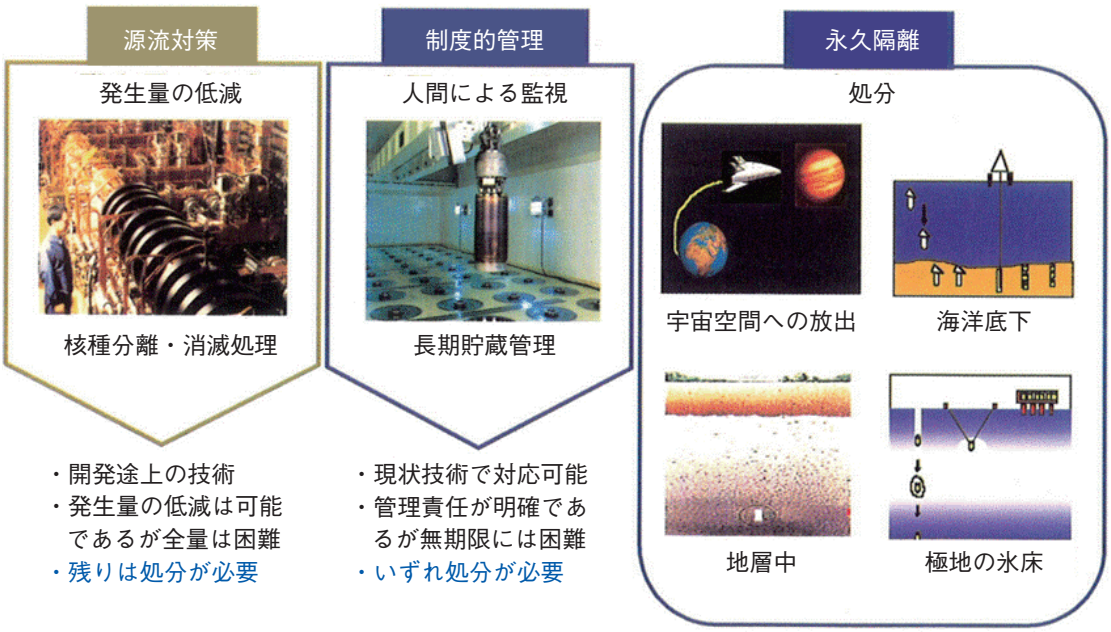
2-3

地層処分の選択

高レベル放射性廃棄物対策の必要性とその方策とは。

高レベル放射性廃棄物の対策として、源流対策、制度的管理、永久隔離という手段が考えられる。このうち、源流対策となる分離・変換（かつては、「核種分離・消滅処理」と呼ばれていた）は、まだ開発要素が極めて多く、そのプロセスでは被ばくリスクが高くなり、最終的には処分が必要となる。人間の関与に依存する制度的管理としての長期貯蔵管理は、高レベル放射性廃棄物の数万年に及ぶ隔離の必要性を考慮すると物理的に極めて難しい。人間とその環境から永久に隔離する場所として、宇宙空間への放出、海洋底下、地下深部、地層中、極地の氷床が候補として考えられた。

図2-3　高レベル放射性廃棄物対策のオプション



出典：原子力委員会：臨時会議（第70回）資料

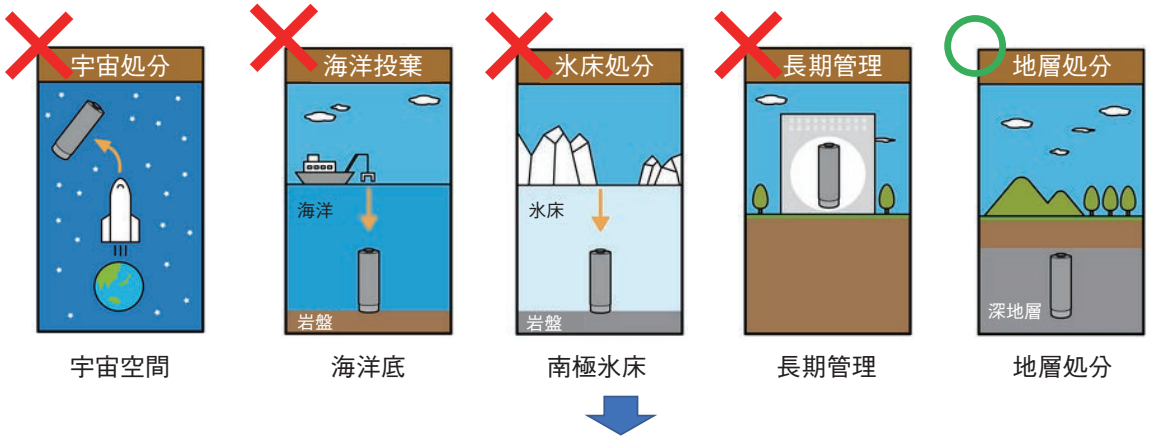
なぜ地層処分が選択されたか

高レベル放射性廃棄物の対策として選択された物理的に隔離するという方策は、OECD/NEAが公表した1977年のPolvani Reportの中で比較検討がなされており、その後1980年に米国DOEが詳細に比較検討を実施した（次ページ「参考」を参照）。

結論として、宇宙への打ち上げ時のリスクの大きさ、人類共通の財産である南極というロケーション、アクセスが困難でかつ人類共通の財産である海洋の環境保全の観点などにより、現状技術での実現レベル（技術的実現可能性、長期安全確保の見通し）と社会的な受容性のバランスを考慮して深い地下の地層中に処分する地層処分が望ましいとされた。

重要なことは、消去法的な考え方で地層処分が選択されたのではなく、科学・技術的な観点と社会的な受容性を考慮した結論であった点である。その後、各国でも同様な議論があり、1980年代初頭では多くの国が「地層処分」を選択し、研究開発や候補地選定活動を本格的に開始した。

図2-4　高レベル放射性廃棄物の人間とその環境からの隔離方策の比較



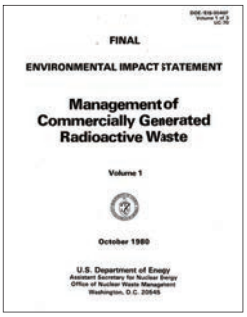
出典：原子力発電環境整備機構：Webサイト「なぜ、地層処分なのですか？」に一部加筆

コラム　地層処分が選択されてきた背景として重要なことは、消去法ではなく、現状の科学技術に基づき最も確実に対応ができると判断されたことである。また、地層処分方式は、世代間の公平さ、将来世代への負担の低減、回収可能性など倫理的な側面からの規範とも整合する。

ポイント

- **高レベル放射性廃棄物対策：源流対策、制度的管理、永久隔離**
- **永久に隔離する方策の代表的な例：宇宙空間への放出、南極氷床、海洋底下、地層処分**
- **地層処分が選択された理由：現状での技術的実現性、倫理的な規範との整合性**

参考　処分オプションの検討事例と比較評価

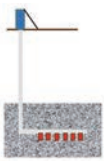


1980年に公表され、地層処分選択の背景となった米国における研究成果についてその概要を紹介する。この報告書（以下、EISと呼ぶ）で提示された処分方法の概念図が、国際機関や日本を含め各国での隔離対策の概念図の原点となった。以下に示す処分概念図と説明は、EISで提示されている図に、Chapman氏、Mckinley氏の資料から引用した名称と説明文を和訳し追記した。

出典：米国Department of Energy DOE (1980): Management for Commercially Generated Radioactive Waste,Volume 1

図2-5　EISで評価の対象となった9つの処分概念

①地層処分（Mined repository）



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

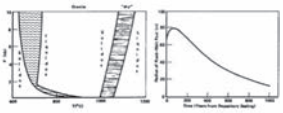
②超深孔処分（Very deep hole disposal）

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

③海洋底下処分（Sub-seabed disposal）

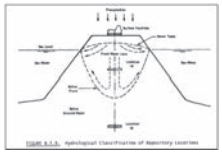
深海および大陸棚等の海洋底下に堆積する層の中に廃棄体を埋設処分
・ロンドン条約への対応
・各国での大陸棚利用への制約
・埋設状態の確認の困難さ
・海を汚すというイメージへの対応

④岩盤溶融（Rock melting disposal）



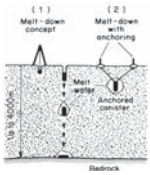
花崗岩の割れ目中に溶融した高レベルガラスを注入する方法で、周辺岩盤の結晶と一体化して固化される

⑤島嶼地層処分（Island geologic disposal）



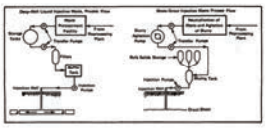
島嶼地下の淡水あるいは塩水領域に処分

⑥氷床処分（Ice sheet disposal）

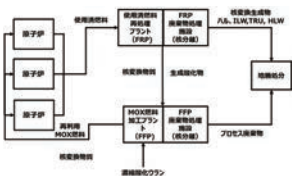


廃棄物自身の放熱を利用して氷床を貫通し、大陸上部に定置
・氷床の長期安定性の保証
・南極を利用する場合、国際条約に違反
・埋設状態の確認が困難

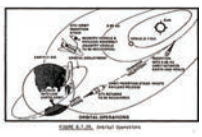
⑦井戸注入処分（Well Injection Disposal）



⑧核分離・核変換（Partitioning-transmutation）



⑨宇宙処分（Space disposal）



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

出典：U.S. Department of Energy：Management for Commercially Generated Radioactive Waste, Volume1

EISでは、前述した9つの処分方法について、11項目の性能目標に対し比較評価した結果、地層処分、島嶼処分と海洋底下処分がすべての項目で適合した。また、総合評価として望ましい処分方策について優先度が設定され、地層処分が最も優先度が高いと評価された。地層処分のみが“Repository”と記述され、使用済燃料の回収が可能であることも言及されている。

これを受け、1980年2月、米国大統領は、「高レベル放射性廃棄物とTRU廃棄物をmined geologic disposal（地層処分）とする」とする政策決定を行い、1982年に「Nuclear Waste Policy Act（核廃棄物政策法）」が制定された。

表2-1　11項目の性能目標に対する処分方法の適合性評価

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

○：適合性あり　No：適合性なし　ー：指標は関係しない

出典：U.S. Department of Energy：Management for Commercially Generated Radioactive Waste, Volume1を元に作成

コラム 地層処分が選択されてきた背景には、米国のように様々な処分方法について、多くの研究者が科学技術の観点から厳格な比較評価を実施してきたという実績がある。日本をはじめ諸外国や国際機関は、この成果を取り入れ、地層処分の技術的実現性についての評価を実施してきた。

2-4

日本における地層処分選択の経緯

高レベル放射性廃棄物の地層処分について、日本ではどのように決定したのか。

日本ではどのような経緯で「地層処分」が選択されてきたか、大きな流れを示す。地層処分を基本としたのは1976年の原子力委員会であり、高レベル放射性廃棄物としてガラス固化体を対象としたのは、1967年に核燃料サイクルを日本の基本政策とする決定がなされたことによる。

1962年　原子力委員会廃棄物処理専門部会：中間報告

- 高レベル放射性廃棄物の処分方法は、原則、自国での管理を必要としない閉じ込め方式とする
- 国土が狭あいで、地震のあるわが国では最も可能性のある最終処分方法としては深海投棄
- 当面、深海投棄は低レベル・中レベル放射性廃棄物とし、高レベル放射性廃棄物は安全が確認されるまで行なうべきではない

1967年　核燃料サイクルの政策決定

1972年　海洋投棄の禁止のためのロンドン条約の採択

1973年　原子力委員会環境・安全専門部会放射性固体廃棄物分科会報告

- 高レベルの放射性廃棄物は、人工施設で保管する
- 海洋投棄は中止し、国際的な動き（陸地内処分等）に注目し、研究開発を進める

1976年　原子力委員会決定

- 再処理から発生する高レベル放射性廃棄物は一時貯蔵したのち処分することを基本とする
- 処分については、当面地層処分に重点を置き、調査・研究開発を推進する

1980年　原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会報告

報告書「高レベル放射性廃棄物処理処分に関する研究開発の推進について」

- 日本における地層処分の概念（どのように処分するかの概念）の提示
- 多重バリアの考え方の提示
- 段階的（5段階）な研究開発と責任分担の提示
- 処分研究は動力炉・核燃料開発事業団（PNC）、安全研究は日本原子力研究所（JAERI）が担うものとする

ポイント

▶1976年の原子力委員会での決定事項

- **半永久的に生活圏から隔離し、安全に管理したのち処分**
- **処分については当面、地層処分に重点をおいた研究開発を行う**

■ 地層処分を採択した原子力委員会決定

日本で地層処分が選択された経緯について、原子力委員会等の主な決定事項の抜粋を示す。

(3)最終処分方式

高レベルの放射性廃棄物の処分方式としては現状では閉じ込め方式を原則とすべきであることは前述のとおりであるが、現在各国が行なっているタンク貯蔵等の閉じ込め方式（注：これは高レベル廃液の保管を意味している）は常に監視を必要とするので最終的な処分とはいえない。したがって処分を行なった後は管理を要しない段階の処分方式すなわち最終処分方式を確立する必要がある。この最終処分方式としては次の2方式があげられる。

(i)容器に入れて深海に投棄すること。

(ii)放射性廃棄物を人の立ち入ることの不可能なかつ漏洩の恐れのない土中に埋没したり、天然の堅牢な洞窟あるいは岩石層に入れること。

これらの方式については放射性廃棄物の最終処分の問題の重要性にかんがみ、経済性、安全性について最も望ましい方式を確立するため、大きな努力を払って研究を進めなければならないが、国土が狭あいで、地震のあるわが国では最も可能性のある最終処分方式としては深海投棄であろう。

このため、海洋投棄を目標として処理方式および容器等についての総合的な研究開発を強力に行なう必要がある。

なお、現状では容器に入れ海洋に投棄する場合でも、廃棄物は低および中レベルのものに止めるべきで、高レベルのものについてはその研究の進展により、安全性が確認されるまでは行なうべきでないと考える。

現行の放射線障害防止法では、放射性廃棄物の土中埋没は認められていない。わが国における地下水の分布とその利用状況、人口の分布状況などからみて、放射性廃棄物の土中埋没による処分は好ましい方法ではなく、今後も現行法通り禁止すべきであると考える。

しかし、人の立ち入ることの不可能でありかつ漏洩のない土中、天然の堅牢な洞窟あるいは岩石層無人島など放射性廃棄物の処分の可能な場所の調査発見には努力すべきであろう。

出典：原子力委員会廃棄物処理専門部会（1962）：中間報告（昭和37年）

---

(1)基本的考え方

再処理施設から発生する高レベル放射性廃棄物は、量的には極めて少ないが、半減期が長くかつ高い放射能を有しているので、環境汚染を防止する見地から、半永久的に生活圏から隔離し、安全に管理することが必要である。このため、高レベル放射性廃棄物は安全な形態に固化し、一時貯蔵したのち、処分するものとする。

処分については、各国とも各種の調査研究を進めているが、わが国としても今後早期にその見通しを得ることを目途として、これに必要な調査及び研究開発を推進するものとする。（略）

(2)高レベル放射性廃棄物対策の目標及び推進方策

（略）また、処分については、当面地層処分に重点をおき、わが国の社会的、地理的条件に見合った処分方策の調査研究を早急に進め、今後３～５年のうちに処分方策の方向付けを行うものとし、さらに昭和60年代から実証試験を行うことを目標とする。

出典：原子力委員会（1976）：放射性廃棄物対策について（昭和51年）

2-5

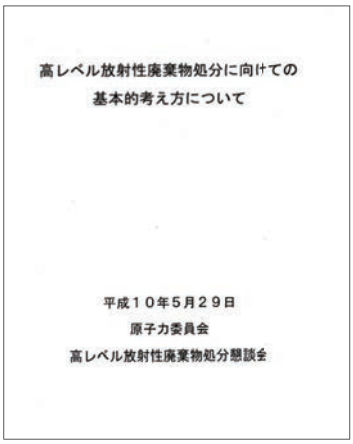
地層処分の進め方に関する提言

高レベル放射性廃棄物の地層処分の諸制度はどのようにして決められていったのか。

原子力委員会は、1995年7月、「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画（原子力長計）」（1994年6月に公表）に沿って、国民各界、各層から英知を集め、来るべき21世紀を迎えるに際し、高レベル放射性廃棄物処分の円滑な実施への具体的取り組みに向けた国民の理解と納得が得られるよう、社会的・経済的側面を含め幅広い検討を進めるために、原子力委員会の下に「高レベル放射性廃棄物処分懇談会」を設立することを決定した。

処分懇談会では、高レベル放射性廃棄物の地層処分が地元に受け入れられることの難しさの認識のもと、どのようにして受容してもらうのか、その仕組みを法制度として整備するための重要な事項など、社会制度的な観点から議論された。処分懇談会は、15回の会合を開催し、その間、一般公衆との意見交換会を経て、1998年5月29日に「高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について（基本的考え方）」を取りまとめ公表した。

基本的考え方は次の議論項目で構成されている。


高レベル放射性廃棄物処分に向けての
基本的考え方について

平成１０年５月２９日
原子力委員会
高レベル放射性廃棄物処分懇談会

出典：原子力委員会　高レベル放射性廃棄物処分懇談会：報告書「高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について」

第一部　総論

Ⅰ．なぜ、いま、高レベル放射性廃棄物問題を議論するのか

Ⅱ．高レベル放射性廃棄物処分とは

第二部　各論

第一章　廃棄物処分について社会的な理解を得るために

第二章　処分技術と制度について

第三章　立地地域との共生

第四章　処分地選定プロセス

さいごに　ーいま、何をしなければならないかー

処分懇談会が取りまとめた「基本的考え方について」で議論された事項は、2000年に公布された高レベル放射性廃棄物の地層処分事業に係る「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（最終処分法）」等に反映された。

■ 基本的考え方の作成背景と概要

処分懇談会の「基本的な進め方」における「第一部総論　なぜ、いま、高レベル放射性廃棄物処分問題を議論するのか」では、これまでの科学技術の研究開発に主眼をおいた進め方では、高レベル放射性廃棄物地層処分への取り組みに対する国民の理解を得ることが困難であるとの認識にたち、議論が展開されている。

原子力発電の継続により高レベル放射性廃棄物の処分をどうするかの議論を進めていく中で、この問題は、将来世代に負担をかけないように現世代の責任で実施するという原則、処分する側の責任と処分地となる地域との相互の理解が不可欠であるという点に着目し、科学技術的な側面とともに社会制度的な側面での議論を早急に始めることの必要性が強調された。

第二部各論では、総論での議論を受け、地層処分を進めるうえで重要となる社会・制度的な課題について、以下の議論がなされている。

- ◆ 第一章では、社会的な理解を得るために必要なこととして透明性確保と情報公開について言及され、その中で処分地選定や事業活動に対する外部者による確認による処分の受容性について述べられている。
- ◆ 第二章では、処分技術への理解と信頼性を得るための仕組みや地下研究施設の役割、技術的要件の設定とともに事業資金の確保、実施主体の役割と具備すべき要件、処分事業の進め方における諸制度の整備、長期性への対応について記述されている。
- ◆ 第三章では、立地地域との共生と題して、地域共生の在り方、立地地域と電力消費地及びその他の地域との連携の必要性、地域の意向を反映した地域共生の仕組みと持続可能な地域共生の取り組みについての意見が述べられている。
- ◆ 第四章では、処分地選定プロセスとして、関係機関の役割、関係自治体や住民の意見の反映の在り方、処分地選定プロセスにおける公募方式と申し入れ方式について言及し、処分地選定までの三段階の進め方を提言している。

処分懇談会の役割、議論されたことの概要については、坪谷隆夫編「オーラル・ヒストリー－地層処分研究開発を語る－」の第７章で詳しく述べられている。この図書では、処分懇談会での議論を含め、2000年前後の日本における高レベル放射性廃棄物処分の技術的な進歩、最終処分法を含む法制度の整備、実施主体の設立の背景についても言及されている。

ポイント

▶処分懇の「基本的な進め方」で示唆された事項

- **透明性と情報公開**
- **実施主体の役割、資金調達**
- **地域共生のあり方**
- **公募方式と申し入れ方式、三段階の進め方**

これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート

第2章 放射性廃棄物対策:地層処分選択の背景

問1 次の空欄を埋めなさい。

1 高レベル放射性廃棄物が人間とその環境に与える放射線学的な影響は、廃棄物に含まれる様々な放射性元素の　①　により　②　が時間の経過とともに減衰することで小さくなっていく。

2 高レベル放射性廃棄物の管理については、放射性物質の安全性に対する　①　な側面だけでなく、その影響が長期に及ぶことから　②　な側面からの議論がなされている。

3 高レベル放射性廃棄物に係る長期の安全確保の原則には、　①　を最小化するため、　②　の責任で解決するとともに　③　の選択肢を残すという　④　の公平性が取り入れられている。

4 高レベル放射性廃棄物の影響が長期に及ぶことから、安全原則では　①　に依存することなく　②　が確保できることが求められている。

5 将来世代の放射線防護に関する原則として、　①　が受容している　②　限度をこえてはならないという安全原則が適用されている。

6 高レベル放射性廃棄物の長期の安全対策として、　①　、　②　及び永久隔離という手段が考えられてきた。

7 このうち、永久隔離については、　①　、　②　、　③　及び地層処分がその対策として考えられ、現状技術での実現性と安全確保の観点から地層処分が選択された。

8 日本では、1976年の原子力委員会の報告書で、再処理から発生する　①　は、一時貯蔵した後処分することとし、処分については、当面　②　に重点を置いて調査・研究開発を推進するとされた。

9 このような背景から、日本では、　①　を対象とした地層処分の　②　を示すための研究開発が着手され、その成果は1999年に核燃料サイクル開発機構による　③　として公表された。

10 国は、　①　で示された技術的な信頼性と原子力委員会が設置した　②　が1998年に公表した高レベル放射性廃棄物処分に向けた基本的考え方の報告書による　③　な提言を受け、地層処分事業に係る　④　法を2000年6月に制定した。

11 ①　が報告書で提言した内容として、社会的な理解獲得、処分技術と制度、立地地域との②　、③　プロセスがある。これらは、 いずれも地層処分に関する法律に反映されている。

問2 次の問で、正しいものには○、間違っているものには×をつけなさい。

1 □ 高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）では、 8000年以上の閉じ込めでガラス固化体の原料となったウラン鉱石と同レベルの毒性まで減衰することから、この期間に人間とその環境から廃棄物を確実に隔離すれば、安全性が担保できることになる。

2 □ 高レベル放射性廃棄物管理対策として、地層処分の選択以外に安全な場所で制度的な管理下で長期に貯蔵するという選択肢もあり得る。

3 □ 高レベル放射性廃棄物管理の原則には、現世代の責任として将来世代への負担を最小限とする方策を選択し実施することが要件となっているが、最終処分に至るまでの意思決定には将来世代も参画できる「世代間の公平性」という倫理的な側面も考慮すべきである。

問3 地層処分選択の背景にある倫理的側面について300字程度で述べよ。

答え合わせ

第2章 放射性廃棄物対策:地層処分選択の背景

問1	1	①崩壊　②放射能濃度
	2	①科学技術的　②(社会)倫理的
	3	①将来世代への負担　②現世代　③将来世代　④世代間
	4	①制度的管理　②将来世代の安全性
	5	①現世代　②被ばく線量
	6	①源流対策　②制度的管理
	7	①宇宙処分　②氷床下処分　③海洋底処分
	8	①ガラス固化体　②地層処分
	9	①ガラス固化体　②技術的実現性　③第2次取りまとめ
	10	①第2次取りまとめ　②処分懇談会　③社会制度的 ③最終処分(法)(特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律)
	11	①処分懇談会　②共生　③処分地選定

問2

1 ×

ガラス固化体に含まれる放射性核種の減衰による放射能毒性レベルの低減に関するグラフは、毒性レベルが8000年でガラス固化体一本分に相当するウラン鉱石との毒性比較を示しているだけで、安全性については言及していない。この段階でのガラス固化体の放射能量は、まだ高いレベルにあり、被ばく線量的には安全なレベルではない。

2 ×

ガラス固化体の放射能は時間の経過とともに減衰していくが、放射線による被ばくの危険性は数万年以上にわたり持続するため、安定な社会構造が無期限に継続するといった仮定や技術の進歩に基づいた対策に依らないこと、また将来世代に負担を残さないで現世代の責任で対処することとされている。そのため、人間の監視下で安全な場所に長期に貯蔵することは、倫理的な規範にそぐわない。

3 ○

原子力の利用により恩恵を受けた現世代の責任で、高レベル放射性廃棄物問題を解決する策を選択し、実現することで将来世代の負担を最小限とするという倫理的な原則の中には、処分という事業の特徴を考慮して、現世代ですべてを決定するのではなく、段階的に進める中で将来世代が意思決定に関与できる制度的な仕組み（世代間の公平性）も含まれるべきであることを認めている。

問3

【解答例】

高レベル放射性廃棄物管理としての倫理的な側面は以下がある。

- 世代間の公平さから、放射性廃棄物を発生した現世代がその管理について責任を持つこと、将来世代の放射線による影響を少なくとも現在許容しているレベル以下とすること、放射性廃棄物の管理にあたっては、将来世代への負担を最小とすること、将来世代への選択肢を残しておくこと
- 世代内の公平さから、放射性廃棄物の管理の目的は人間とその環境を防護するためであり、他の活動とのバランスを考慮して資源（負担費用など）を配分することと関連する社会が公正で公開された意思決定プロセスに参画すること
- 廃棄物管理は、世代間にわたって継続されていくことから、世代を超えての意思決定に参画できること（310字）

【解答に用いられるキーワードの例】

世代間の公平さ、現世代の責任、将来世代の放射線影響、将来世代の負担の最小、将来世代の選択肢、世代内の公平さ、資源配分、社会内での意思決定プロセスへの参画、世代を超えての意思決定への参画

参考文献 第2章 放射性廃棄物対策:地層処分選択の背景

- IAEA (2009), Classification of Radioactive Waste, Safety Standards for protecting people and the environment, general Safety Guide No. GSG-1
- U.S. NRC Web site, Definition of High-Level Waste
- 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律(最終処分法)(2000)
- 原子力発電環境整備機構(NUMO)(2004), Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments、NUMO-TR-04-03
- NAGRA (2002), Project Opalinus Clay Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Technical Report 02-05
- 核燃料サイクル開発機構(JNC)(1999)、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性−地層処分研究開発第2次取りまとめ− 総論レポート
- 原子力発電環境整備機構(NUMO)(2021)、なぜ、地層処分なのか、NUMO-TR-20-04
- OECD/NEA (1995), The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Waste、A Collective Opinions of the Radioactive Waste Management Committee
- National Academy of Science National Research Council (1957), The disposal of Radioactive Waste on Land, Report of the Committee on Waste Disposal of the Division of Earth Science, Pub. 519
- OECD/NEA (1977), OBJECTIVES, CONCEPTS AND STRATEGIES FOR THE MANAGEMENT OF RADIOACTIVE WASTE ARISING FROM NUCLEAR POWER PROGRAMMES, Report by an NEA Group of Experts, September 1977
- OECD/NEA (1982), Disposal of Radioactive Waste, An Overview of the Principles Involved, Coady Report
- 核燃料サイクル開発機構(JNC)(1999)、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性−地層処分研究開発第2次とりまとめ−概要、第70回原子力委員会臨時会議、資料1-7 http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo99/siryo70/siryo17.htm
- DOE (1980), Management for Commercially Generated Radioactive Waste, Volume 1
- 原子力委員会廃棄物処理専門部会(1962)、放射性廃棄物の処理ならびに処分の基本方針の検討 中間報告
- 原子力委員会(2003)、核燃料サイクルについて
- 外務省 Webサイト、ロンドン条約、廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約(通称:ロンドン条約)(Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter(London Convention: LC)
- 原子力委員会環境・安全専門部会(1973)、環境・安全専門部会中間報告書
- 原子力委員会(1976)、放射性廃棄物対策について
- 原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会(1980)、高レベル放射性廃棄物処理に関する研究開発の推進について
- 原子力委員会高レベル放射性廃棄物処分懇談会(1998)、高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について
- 坪谷隆夫編(2019)、オーラル・ヒストリー〜地層処分研究開発〜

第3章

日本における放射性廃棄物の処分形態

日本では、廃棄物に含まれる放射性物質の放射能濃度区分に対応した処分形態が法律等で規定されている。本節では、代表的な低レベル放射性廃棄物処分と高レベル放射性廃棄物処分の歴史的な変遷及び発生源から処分に至るまでの廃棄物ストリームの最終形態となる様々な処分形態の特徴について以下の項目を学習する。

本節では以下の項目について学習する。

3.1 ● 放射性廃棄物の処分形態
3.2 ● 放射性廃棄物処分と関連施設
3.3 ● 浅地中トレンチ処分:L3廃棄物
3.4 ● 浅地中ピット処分:L2廃棄物
3.5 ● 中深度処分:L1廃棄物
3.6 ● 地層処分:HLW、TRU廃棄物

3-1

放射性廃棄物の処分形態

法律等に基づく放射性廃棄物の処分形態の種類とは。
低レベル放射性廃棄物の処分形態の分類とは。

【放射性廃棄物の濃度区分と処分形態】

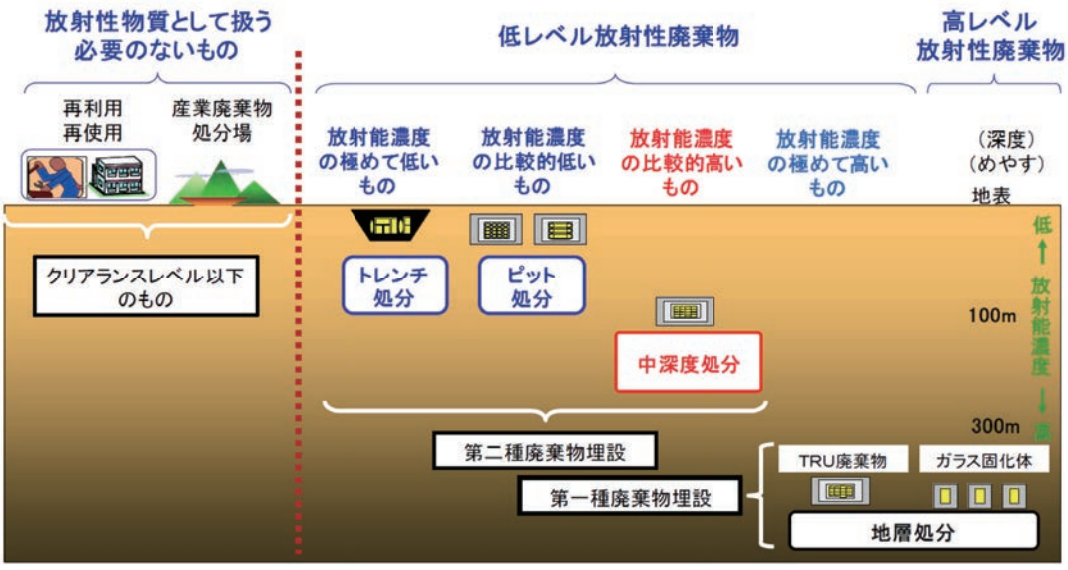
日本で発生する放射性廃棄物は、図 3-1 に示すように大きく高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物及び放射性物質として扱う必要のない廃棄物に分類されている。これらの廃棄物の処分は、原子炉等規制法（核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律）において、それぞれの廃棄物に含まれる放射性核種の濃度（α核種、β・γ核種）から、第一種廃棄物埋設と第二種廃棄物埋設の事業に区分されている。

第一種廃棄物埋設事業は、高レベル放射性廃棄物であるガラス固化体、及び低レベル放射性廃棄物のうち核燃料サイクルの再処理から発生する放射能濃度が極めて高いTRU廃棄物を対象とする「地層処分」である。

第二種廃棄物埋設事業の対象となる低レベル放射性廃棄物は、その放射能濃度の大きさにより、濃度が極めて低いものは「(浅地中)トレンチ処分」に、濃度が比較的低いものは「(浅地中)ピット処分」に、濃度が比較的高いものは「中深度処分」に区分されている。

放射性物質として扱う必要のないものは、別途規定されたクリアランスレベル以下の濃度となる廃棄物として一般生活での再利用が可能となり、または産業廃棄物として処分することができる。

図3-1　放射性廃棄物の放射能濃度による処分形態の種類



出典：原子力規制委員会　委員会決定「炉内廃棄物の規制の考え方について」(平成28年8月31日)

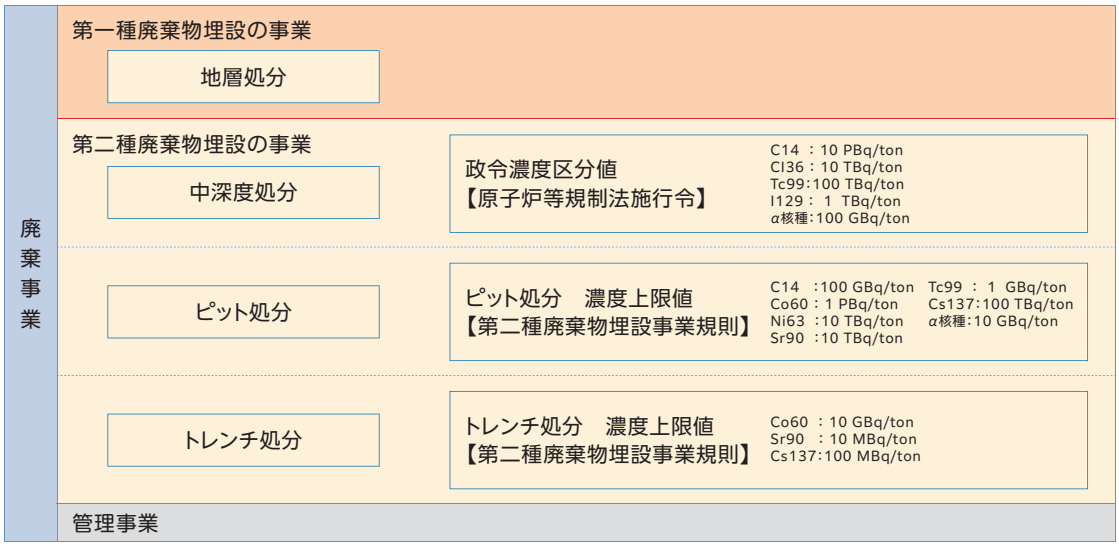
【第二種廃棄物埋設事業区分と濃度上限値】

第二種廃棄物埋設事業は、原子炉等規制法により図3-2に示すそれぞれの濃度上限値が放射性核種ごとに法律で定められている。処分サイトの放射能濃度は、放射性廃棄物が処分されるサイトと人工バリアの閉じ込め機能により設定されることから、処分サイトが決定されてから、それをもとに受け入れ基準として最大放射能濃度が定められることになる。

濃度上限値の算定方法については、原子力安全委員会報告書「低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について(2007)」を参照されたい。

最大放射能濃度は、埋設事業を申請するにあたって考慮しなければならない要件の一つであり、埋設による処分方法を計画する際に、対象とする廃棄物の放射能濃度はその最大放射能濃度を超えてはならないものと定められている。実際の埋設事業の安全審査では、その条件を満たした廃棄物について、具体的な事業計画に関し詳細な評価が行われ、実際の廃棄物に含まれる放射能濃度は濃度上限値より低い濃度に抑えられるとともに、ここで重要核種として選定されている核種以外の核種についても評価される。

図3-2　第二種廃棄物埋設の事業に係る濃度上限値



出典：原子力規制庁：廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合（第1回）資料を一部編集

ポイント

▶原子炉等規制法での放射能濃度と処分形態の区分

▪第一種廃棄物埋設:地層処分　▪第二種廃棄物埋設:トレンチ処分、ピット処分、中深度処分

▶第二種廃棄物埋設事業毎に濃度上限値が設定

3-2

放射性廃棄物処分と関連施設

低レベル放射性廃棄物処分と高レベル放射性廃棄物処分の計画はどのように進められてきたのか。

【低レベル放射性廃棄物処分の流れ】

日本における低レベル放射性廃棄物処分、特に原子力発電所の運転から発生する低レベル放射性廃棄物（L2廃棄物）の陸地での埋設処分に至る経緯は以下にまとめることができる。

- ◆ 1962年に「海洋投棄」を基本としてその実現性を確認するための研究が開始された。
- ◆ 1972年ロンドン条約により「放射性物質の海洋投棄」が禁止された。日本では、1976年の原子力委員会決定により、海洋処分と陸域での処分の両方を対象として検討を進めるとされたが、海洋処分のオプションは1993年に廃止された。
- ◆ 低レベル放射性廃棄物処分の候補地について、全国を対象に選定した結果、1984年に青森県六ヶ所村に申し入れを行い、1985年に村議会が受け入れを表明。同年、低レベル放射性廃棄物埋設事業実施主体となる日本原燃産業（株）が設立され、埋設処分場の建設が開始された。
- ◆ 1990年に1号埋設処分に対する認可がおり、1992年に200ℓドラム缶に固化された原子力発電所運転廃棄物（L2）の浅地中ピット処分が開始された。1992年に日本原燃産業(株)は日本原燃サービス(株)と合併し、日本原燃株式会社(JNFL)となった。
- ◆ 2020年現在、1号埋設は既に完了し、2号埋設の操業もほぼ完了する予定である。JNFLは1号埋設の覆土工事の準備、3号埋設の計画に着手している。

【高レベル放射性廃棄物処分の流れ】

高レベル放射性廃棄物の処分に係る研究開発と処分に向けての活動経緯は以下にまとめることができる。

- ◆ 1976年に原子力委員会は、当面地層処分に重点をおいた研究開発を進めることを決定し、動力炉・核燃料開発事業団（PNC）と日本原子力研究所（JAERI）が研究開発の中核機関となった。
- ◆ 1993年、PNCは日本における高レベル放射性廃棄物の地層処分の実現性を明示する研究開発報告書(第1次取りまとめ)を公表した。第1次取りまとめのレビュー段階で堆積岩と結晶質岩を対象とした地下研究施設（URL）の重要性が示唆された。
- ◆ 1999年、核燃料サイクル開発機構（PNCが組織改編、現日本原子力研究開発機構：JAEA）は、「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（第2次取りまとめ）」を公表し、2000年に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（最終処分

法)」が制定され、高レベル放射性廃棄物地層処分の実施主体として原子力発電環境整備機構（NUMO)が設立されるとともに、処分に係る費用が電気料金から拠出され地層処分費用として管理されることになった。

◆ NUMOは2002年から全国を対象に処分候補地の公募を開始した。2007年に高知県東洋町が応募したが、町長選挙の結果を受け応募を取り下げた。

◆ 2008年の最終処分法の改正により、再処理から発生するTRU廃棄物も地層処分の対象となった。

◆ 2020年11月に北海道神恵内村と寿都町が文献調査を受け入れ、現在調査が行われている。

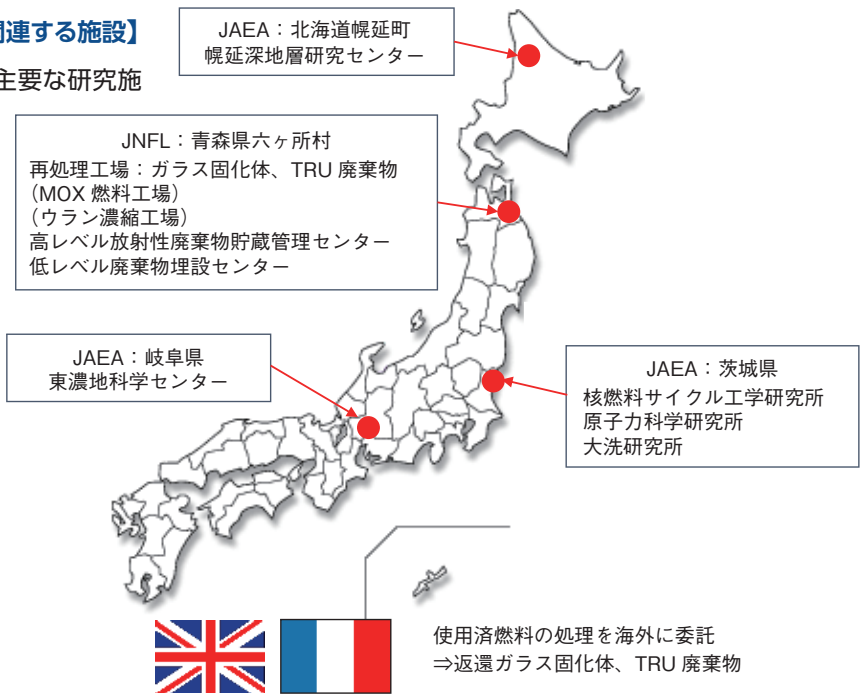
地球年代学研究所がある。その他、花崗岩を対象とした瑞浪超深地層研究所において研究開発を実施していたが、2022年に埋め戻しが完了した。

◆ JAEA幌延深地層研究センター：北海道幌延町にある第三紀堆積岩に建設された地下330ｍまでの研究施設で、今後500ｍまでの掘削が予定されている。

◆ JAEA東海核燃料サイクル研究所と原子力科学研究所：処理・処分に係る研究開発施設

◆ JAEA大洗研究所：処理に係る研究開発施設

図3-3　日本における放射性廃棄物関連施設



【放射性廃棄物処分に関連する施設】

地層処分に関連する主要な研究施設は、いずれも研究開発の中核機関であるJAEAが運営している。

◆ JAEA東濃地科学センター：地下深部の地質環境特性や長期安定性等の地層科学研究を実施。関連施設として土岐

ポイント

▶低レベル放射性廃棄物のうち発電所からの運転廃棄物はJNFLですでに埋設処分が開始

▶高レベル放射性廃棄物の地層処分は文献調査段階

▶放射性廃棄物処分に係る主要な研究施設は3地点

3-3

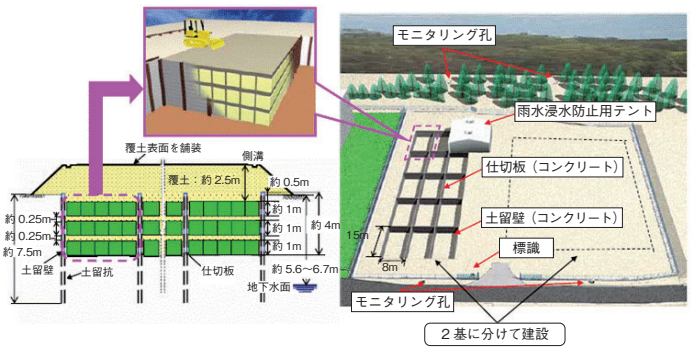
浅地中トレンチ処分:L3廃棄物

浅地中トレンチ処分とはどのような処分方法なのか。

トレンチ処分の対象となるのは、コンクリートや金属など、化学的、物理的に安定な性質の廃棄物のうち放射能レベルの極めて低いもの（L3廃棄物）となる。トレンチ処分は、コンクリートピットなどの人工構造物を設置せず、地下水面より上の浅地中に埋設処分する方法で、50年程度の管理期間を経た後は、一般的な土地利用が可能となる。

トレンチ処分は、図3-4に示すように日本原子力研究開発機構（JAEA）の動力試験炉（JPDR）の解体に伴って発生した廃棄物を対象に、同研究所敷地内で試験的に実施されている例がある。この実証試験で埋設されたのは原子力施設の廃止措置により発生する解体廃棄物（コンクリートなど）で主要な核種は比較的短寿命のCo-60（半減期5.27年）であることから、50年間管理することで規制除外になるとされている。解体廃棄物の埋設処分の方法は決められており、日本原子力発電（株）の東海発電所では、廃止措置等で発生するL3廃棄物を発電所の社有地内で埋設・管理する計画となっている。

図3-4　浅地中トレンチ処分の概要



（＊）廃プラスチック類、ゴムくず、金属くず、ガラス・コンクリート・陶磁器くず、がれき類　　出典：電気事業連合会作成

出典：原子力委員会：新大綱策定会議（第5回）資料

図3-5　JAEA 廃棄物埋設実地試験施設

出典：経済産業省資源エネルギー庁Webサイト
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html

ポイント

- ▶浅地中トレンチ処分は極低レベルに区分されるL3廃棄物を処分
- ▶埋設施設は地下水面より上に設置
- ▶50年程度の管理期間

3-4

浅地中ピット処分:L2廃棄物

浅地中ピット処分とはどのような処分方法なのか。

浅地中ピット処分は、液体廃棄物を濃縮した廃液や放射能レベルの低い使用済樹脂、可燃物を焼却した焼却灰などをセメントなどでドラム缶に固形化したものや、配管やフィルターなど固体状の廃棄物で放射能レベルの比較的低いものを浅地中にコンクリートピットなどの人工構築物を設置して埋設する方法である。

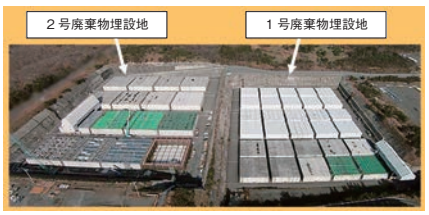
放射性物質濃度の減衰に応じて段階的な管理を行うことになっており、放射性物質の漏出を防止するために人工構築物の積極的な補修を行う段階から、漏出状況を監視する段階を経て、最終的には放射性物質の濃度が十分低くなるまで埋設地の掘削を制限するなどの管理を行う。管理が必要な期間として、300 ~ 400年が一つの目安とされている。管理期間終了後は、一般的な土地利用が可能となる。

原子力発電所の運転から発生したL2廃棄物は、ドラム缶に収納されてJNFL低レベル放射性廃棄物埋設センターに輸送され、ピット処分されている。

図3-6　低レベル放射性廃棄物埋設センター　1, 2号埋設地の全景(2014)

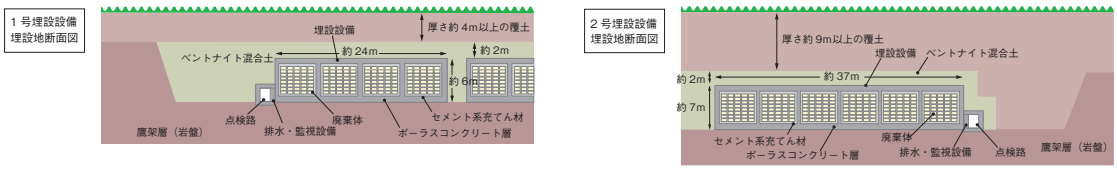
➢ 埋設量（200ℓドラム缶相当）
(2021 年 11 月現在)
・1 号埋設理
累　　計：149,435 本
処分能力：200,000 本相当
・2 号埋設地
累 計：187,712 本
処分能力：200,000 本相当
・3 号埋設地・・・原子力規制委員会に申請中

埋設センターには、最終的に 60 万 m^3（200ℓドラム缶 300 万本相当）の規模の埋設が計画されている。



出典:日本原燃(株)

図3-7　浅地中ピット処分1号埋設、2号埋設の断面



出典:日本原燃(株)

ポイント

- ▶ L2に区分される低レベル放射性廃棄物を処分
- ▶ コンクリートピットに廃棄体(ドラム缶)を設置
- ▶ 300年から400年程度の管理期間

3-5

中深度処分:L1廃棄物

中深度処分とはどのような処分方法なのか。

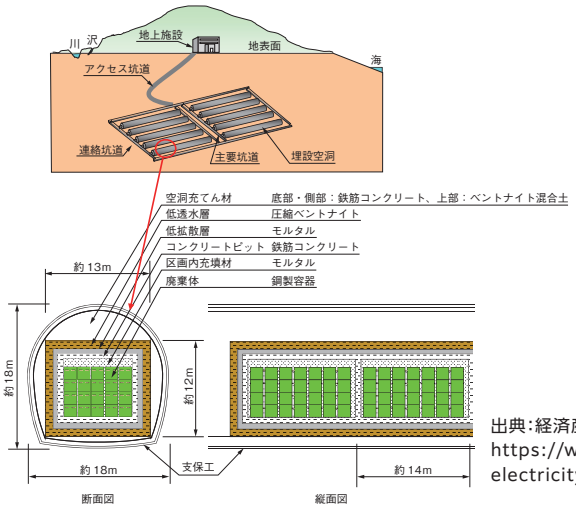
中深度処分は、制御棒や炉内構造物など、炉心から生ずる「低レベル放射性廃棄物」のうち「放射能レベルの比較的高い廃棄物」（L1廃棄物）を地表から深さ70m以深の地下（建造物の基礎や地下鉄、共同溝などの一般的な地下利用に対して十分に余裕をもった深度）に、コンクリートでトンネル型やサイロ型の建造物をつくり、廃棄物を埋設処分する方法である。

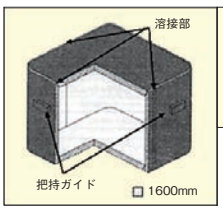
長期の安全確保策は、地層処分と同様に多重バリアシステムによる隔離と閉じ込めを基本としている。中深度処分事業に対する要件と審査ガイドは2021年に原子力規制委員会より規定された。

実施主体と場所は未定である。今後サイトを決定した後、実施主体によって許可申請の準備が開始される。

JNFLの低レベル放射性廃棄物埋設センター敷地内では、JNFLが中深度処分を想定した大規模空洞を建設し、地下での地質環境調査等を実施している。大規模空洞には、国のプロジェクトとして、下図にある処分坑道の人工バリア等の定置技術開発の実規模試験や定置後のモニタリングが（公財）原子力環境整備促進・資金管理センターにより実施されている。

図3-8　中深度処分の処分場レイアウトと廃棄体の概念





廃棄体の設計（仕様例）
- 材料 JIS G 3106：2004「溶接構造用圧延鋼材」：SM400
- 重量：最大約32トン
- 外寸：1.6m×1.6m×1.6m（最小肉厚：5cm）

出典：日本原子力学会：
原子力バックエンド研究V0l13, No1

出典：経済産業省資源エネルギー庁Webサイト
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html

ポイント

- ▶L1に区分される低レベル放射性廃棄物を処分
- ▶地下70m以深の処分空洞に鋼製容器に格納された廃棄体を設置
- ▶多重バリアシステムによる安全確保

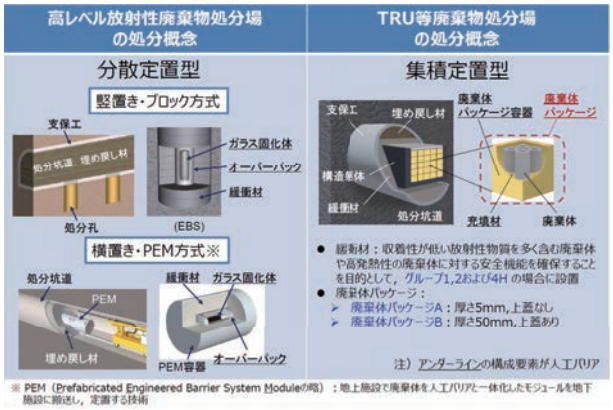
3-6

地層処分:HLW、TRU廃棄物

地層処分とはどのような処分方法なのか。

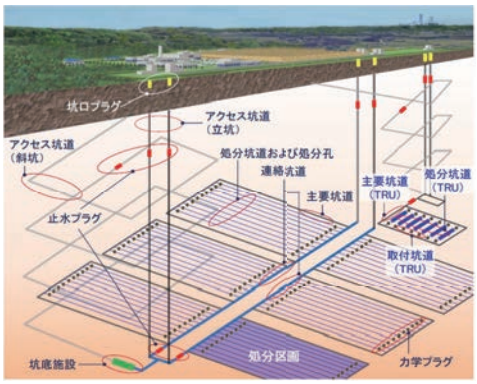
地層処分は、地下300m以深の安定な地層中に高レベル放射性廃棄物（HLW）あるいはTRU廃棄物を埋設し、人間の管理に依存しない仕組みを安全確保の原則とする処分方法である。地層を介して高レベル放射性廃棄物を生活圏から隔離し、地層で構成される天然バリアと固化体、容器、緩衝材等を工学的に構築する人工バリアを組み合わせた多重バリアによって放射性物質の閉じ込めを図る。地層処分の実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）は、全国を対象に処分地の選定のための活動を進めており、文献調査地区として応募と申し入れに応じた北海道の２地区で文献調査を進めている。

図3-9　HLWとTRU廃棄物の定置概念と人工バリアシステム



出典：原子力発電環境整備機構（NUMO）、処分場設計と閉鎖前の安全性の評価、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）処分場設計、2021年5月26日

図3-10　HLWとTRU廃棄物の併置処分概念（パネル配置例）



出典：原子力発電環境整備機構（NUMO）包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－（第4章）

ポイント

- ▶ガラス固化体とTRU廃棄物を処分
- ▶地下300m以深に処分坑道を設置
- ▶多重バリアシステムによる安全確保

これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート

第3章 日本における放射性廃棄物の処分形態

問1 次の空欄を埋めなさい。

1 日本における放射性廃棄物処分は、　①　法により、　②　の事業と　③　の事業に区分され、それぞれ含まれる放射性核種の　④　により処分形態が分類されている。

2 　①　事業（地層処分）の対象になるのは、　②　と放射能濃度の極めて高い　③　である。

3 　①　事業に属する低レベル放射性廃棄物は、含有される放射性廃棄物の濃度により、　②　、　③　、　④　の3種類に区分される。

4 放射能濃度が　①　レベル以下となる廃棄物は、確認を受けた後は　②　することが可能となり、または　③　として処分することが可能である。

5 処分形態のうち、　①　は、原子力発電所の廃止措置等から発生する放射能濃度の極めて低い廃棄物を埋設処分する処分形態で、人工構造物を設けず　②　より上に設置される。処分地は、約　③　年程度の管理期間の後一般的な土地利用が可能となる。

6 処分形態のうち、　①　は、原子力発電所の運転から発生する放射能濃度の比較的低い廃棄物を埋設処分する形態で、　②　株式会社の　③　にて処分が実施されている。規制除外値となる　④　年以内が管理期間の目安とされている。

7 処分形態のうち、　①　は、原子力発電所の廃止措置等から発生する　②　や　③　などの放射能濃度の比較的高い廃棄物を地下　④　m以深にコンクリートでトンネル型やサイロ型の構造物を構築し、埋設処分する形態である。

8 処分形態のうち、　①　は、地下　②　m以深に、　③　と　④　を処分する形態であり、現在、処分実施主体である　⑤　が最終処分地選定のための文献調査を進めている。

問2 次の問で、正しいものには〇、間違っているものには×をつけなさい。

1 ☐ 日本における放射性廃棄物の処分形態は、廃棄物に含まれる放射性核種の放射能濃度レベルによりすべて区分されている。

2 ☐ 原子力発電所の運転と廃止措置等から発生する低レベル放射性廃棄物は、そのレベルに応じて浅地中トレンチ処分、浅地中ピット処分、あるいは中深度処分のどれかの形態で処分される。

3 ☐ 中深度処分場の70m以深への立地は、一般的な地下利用に対して十分な余裕を持った深度として設定され、地層処分場の300m以深への立地は、10万年程度にわたる隆起と侵食により埋設された廃棄物が地表に接近しない深さとして設定されている。

問3 日本における放射性廃棄物の処分形態について、300字程度で述べよ。

答え合わせ

第3章 日本における放射性廃棄物の処分形態

問1	1	①原子炉等規制(法)　②第一種廃棄物埋設　③第二種廃棄物埋設　④放射能濃度
	2	①第一種廃棄物埋設　②高レベル放射性廃棄物　③TRU廃棄物
	3	①第二種廃棄物埋設　②L1　③L2　④L3
	4	①クリアランス　②再利用　③産業廃棄物
	5	①浅地中トレンチ処分　②地下水面　③50
	6	①浅地中ピット処分　②日本原燃　③低レベル廃棄物埋設センター　④300～400
	7	①中深度処分　②制御棒　③炉内構造物　④70
	8	①地層処分　②300　③ガラス固化体　④TRU廃棄物　⑤NUMO

問2

1 ×

放射性廃棄物のうち、原子力発電所の運転と廃止措置から発生する廃棄物、核燃料サイクルから発生するガラス固化体やTRU廃棄物及び低レベル放射性廃棄物、研究機関や医療・産業活動から発生する廃棄物については処分形態が区分されているが、核燃料加工過程等で発生するウラン廃棄物や福島第一原子力発電所の事故から発生する廃棄物については、その処分形態が未定である。

2 ×

原子力発電所の運転や廃止措置から発生する廃棄物の大部分は、クリアランス以下の廃棄物であり、トレンチ処分、ピット処分、中深度処分されるのは、発生重量の約2%である。クリアランスレベル以下の廃棄物は98%となり、規制を受けることなく再利用や産業廃棄物としての処分が可能である。

3 ○

処分場の深度については、日本の産業等の活動状況や長期にわたる地質環境の変動及び隆起・沈降などの自然現象と気候変動による海進・海退と侵食作用による埋設した廃棄物の地表への接近の可能性などについて議論されてきた。中深度処分では、これまでの地下空間利用の状況を調査し、70mあれば十分余裕があると判断された。また、管理期間終了の10万年後もこの70m以深が確保される場所であることが求められている。

地層処分の300m以深という設定は、1999年の第2次取りまとめにおいて、日本における隆起・侵食速度の分布を考慮しても、10万年で300m以深であれば、埋設物が地表に接近しない場所が存在するとされている。

問3

【解答例】

日本における放射性廃棄物の処分形態は、原子炉等規制法により廃棄物に含まれる放射性核種の放射能濃度で以下の4つの形態に区分されている。

- 浅地中トレンチ処分:原子力施設の廃止措置等から発生するL3廃棄物を地下水面より上部に人工構造物を設けずに埋設し覆土する
- 浅地中ピット処分:原子力発電所の運転や廃止措置から発生するL2廃棄物をコンクリートピットに埋設し遮水性の覆土をする
- 中深度処分:原子力発電所の廃止措置から発生するL1廃棄物を地下70m以深の処分空洞やサイロに埋設処分する
- 地層処分:使用済燃料の再処理から発生するガラス固化体とTRU廃棄物のうち放射能レベルの高いものを対象に地下300m以深に人工バリアの設置とともに埋設処分する(316文字)

【解答に用いられるべきキーワードの例】

原子炉等規制法、放射性核種、放射能濃度、浅地中トレンチ処分、浅地中ピット処分、中深度処分、地層処分

参考文献 第3章 日本における放射性廃棄物の処分形態

- 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（原子炉等規制法）
- 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（最終処分法）（2000）
- 原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会（2007）、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）
- 原子力安全委員会放射性廃棄物・廃止措置専門部会（2007）、低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について
- 原子力規制庁（2015）、第二種廃棄物埋設に係る規制制度の概要
- 内閣府（2011）、放射性廃棄物の処理・処分を巡る取組の現状について、新大綱策定会議（第5回）資料 http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/sakutei/siryo/sakutei5/siryo3-1.pdf
- 経済産業省資源エネルギー庁Webサイト、放射性廃棄物について
- 日本原燃（株）Webサイト、埋設事業の概要
- 原子力発電環境整備機構（NUMO）（2021）、処分場設計と閉鎖前の安全性の評価、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）処分場設計、2021年5月26日
- 原子力発電環境整備機構（NUMO）（2021）、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−

第4章

地層処分の安全原則と規制・基準類

本章では、高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る国際原子力機関（IAEA）がこれまでに公表した安全原則と安全要件、国際放射線防護委員会（ICRP）が公表した放射線防護に関する勧告及び日本の原子力安全委員会による地層処分の安全規制に関する考え方について時代の経過により更新・修正されてきた背景を含めて学習する。

本節では以下の項目について学習する。

4.1 ● 地層処分の安全原則

4.2 ● 原子力全般の基本安全原則

4.3 ● 放射性廃棄物処分に係る安全要件

（参考）IAEA:放射性廃棄物の地下処分—基本指針（1981）

（参考）IAEA:放射性廃棄物マネジメントの原則（1995）

4.4 ● 放射性廃棄物処分へのICRP勧告

4.5 ● 日本の地層処分の安全規制

（参考）安全規制の基本的考え方

（参考）地層処分の安全規制について

4 - 1

地層処分の安全原則

IAEAによって取りまとめられた地層処分の安全原則とはどのようなものか。

【背景】

IAEAが1989年に公表した報告書「高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する安全原則と技術基準」は、国際的に合意された高レベル放射性廃棄物の地層処分のための処分場設計に対する一連の指針及び基準を立案することを目的としている。その狙いは、処分場閉鎖後も廃棄物が危険である長期にわたって、人及び環境を防護することであり、そのための将来世代を防護する原則を確立し、その防護レベルの定量化を行っている。

出典:IAEA:Safety series No. 99, Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Wastes(1989)

この安全原則の基本的な内容は、2006年の安全原則SF-1（4-2節参照）や2011年のSSR-5（4-3節参照)等にも引き継がれている。

【概要】

高レベル放射性廃棄物の地層処分の目的は、以下の２つに集約される。

◆（将来世代に対する責任）：高レベル放射性廃棄物を長期にわたって、処分システムを将来世代に頼ることなくそのままの状態で維持し、あるいは処分場が存在することで将来世代に過大な制約を課すことなく、人間環境から隔離すること。

◆（放射線学的な安全性）：国際的に合意されている放射線防護の諸原則に従って、人及び環境を放射線から長期にわたって防護することを保証すること。

この目的に従って、将来世代の責任と放射線学的な安全性に関する７つの安全原則が立案された。

将来世代に対する責任

原則1:将来世代の負担

高レベル放射性廃棄物を適切な時期に、技術･社会･経済的な要因を考慮して安全な処分を行い、将来世代の負担は最小限にとどめなければならない。

原則2:制度的管理に頼らない

高レベル廃棄物処分場の閉鎖後の安全性は、放射線の積極的なモニタリング、調査や、処分場の管理終了後に行うその他の制度的管理、あるいは措置等に頼ってはならない。

原則3:将来の影響

高レベル放射性廃棄物の隔離の度合は、人間の健康に対する将来の予測リスクがないか、または今日許容できないような影響が環境に対して生じないものでなければならない。

原則4:国境を越えた配慮

基本原則から言って、放射性物質の放出国の国境を越えた住民の放射線防護に対する方針及び基準が、放出国内の住民に対するものよりゆるやかであってはならない。

放射線学的な安全性

原則5:線量上限

緩慢なプロセスによる処分場からの放出の場合、決定グループの個人に対する年間予測線量は、現在長期被ばくを年間平均線量値1mSvに対応する

個人線量限度から国家当局が比例配分した線量上限より少なくなければならない（※線量上限は過去の概念で後に線量拘束値として再定義された）。

原則6:上限リスク

高レベル放射性廃棄物処分場の安全性レベルは、原則5でカバーしていない破壊的事象から決定グループの個人に対して、処分場から1年間に健康に影響を与える予測リスクが、健康に影響を与えるリスクの個人限度（年当たり100,000分の1）から国家当局が割り出した上限リスクより小さくなければならない。

原則7:追加的な放射線学的安全性

高レベル放射性廃棄物処分から発生するすべての放射線被ばくは、経済的及び社会的諸要因を考慮して、合理的に達成しうる限り低くしなければならない。原則5及び6で定義した線量限度及び上限リスクは最優先すべき事項でなければならない。

また、上記安全原則が満たされるための、処分場設計に関する技術基準が規定された。全体システムアプローチ、廃棄物、処分場、処分場サイト、安全目標の遵守の保証の5つの分野で10項目の基準が示された。

基準1:全体システムアプローチ

高レベル放射性廃棄物処分の長期安全性は多重バリアの概念に基づくものとし、処分システム全体としての性能を基に評価すべきである。

廃棄物

基準2:放射性核種インベントリ

廃棄物の受入基準は、処分場の設計において行った仮定と同一の放射性核種のインベントリに対して設定されなければならない。

基準3:廃棄物形態

処分場に定置する高レベル放射性廃棄物は、放射性核種の保持に向いた化学的、物理的特性を持ち、処分システムに適した固体の形態をしたものでなければならない。

処分場

基準4:初期の（完全）隔離

高レベル放射性廃棄物の処分システムは、初期の期間放射性核種が完全に隔離できるような方法で設計されなければならない。

基準5:処分場の設計と建設

高レベル放射性廃棄物の処分場は、閉鎖後、母岩とその周辺の安全機能が保存されるような方法で設計、建設、操業、閉鎖されなければならない。

基準6:臨界

高レベル放射性廃棄物処分場は、すべての核分裂性物質が臨界未満の配列でいるように設計し廃棄物を定置しなければならない。

処分場サイト

基準7:サイトの地質

定置した廃棄物を外部の事象及びプロセスから適切に保護するために、処分場は、放射性核種が処分場から環境に出るのを適切に抑える特性を持つ母岩のある、十分深い場所に設置されなければならない。

基準8:天然資源への配慮

処分場サイトは、できるかぎり、貴重な天然資源、またはすぐには有用ではない物質に接近することを避けて選定しなければならない。

安全目標の遵守の保証

基準9:安全評価

処分システム全体が放射線安全性の目標を遵守していることは、できる限り長い期間有効であるモデルに基づく安全評価によって立証されるべきである。

基準10:品質保証

処分システムの構成要素、及びサイト選定から処分施設の建設・操業・閉鎖に至る一切の活動に対する品質保証プログラムは、関連規格及び基準と整合性を持つように設定しなければならない。

ポイント

▶将来世代の責任と放射線学的な安全性に由来する7項目の安全原則

▶安全原則を満たすための処分場設計に関する10項目の技術基準

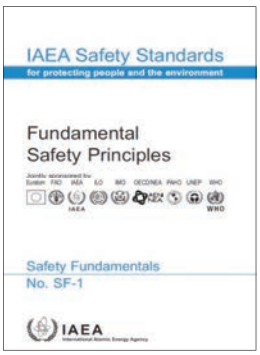
4-2

原子力全般の基本安全原則

IAEA基本安全原則における放射性廃棄物の処分はどのように規定されているのか。

【背景】

IAEAは、原子力利用全般を包括する安全基準を体系的に取りまとめており、2006年に、放射性廃棄物の管理、処分を含む安全基準の基礎を提供する基本安全目的と安全原則を定めた「基本安全原則(SF-1)」を公表した。



出典:IAEA:Fundamental Safety Principles, No.SF-1 (2006)

【概要】

「基本安全目的」は、放射線が及ぼす人と環境への有害な影響を防護することであるとし、関連するすべての施設と活動、また、計画立案、立地、設計、製造、建設、試運転、及び運転、さらに廃止措置と閉鎖を含む施設または線源の存続期間すべての段階に適用されるとしている。そのための手段が以下のように示されている。

(a)人の放射性被ばく及び環境への放射性物質の放出を管理すること

(b)原子炉の炉心、核連鎖反応、放射線源またはその他のすべての放射線源に関する制御の喪失に至ると思われる事象の可能性を制限すること

(c)そのような事象が発生した場合、その影響を緩和すること

「安全原則」は、放射線リスクに対する人と環境の防護のため、並びに、特に原子力施設及び放射線と放射線源の利用、放射性物質の輸送及び放射性廃棄物の管理を含む、放射線リスクをもたらす施設と活動の安全のための要件と対策の基盤を提供するとしている。

「安全原則」は「基本安全目的」を達成するために適用するものであり、以下10項目が示されている。

原則1:安全に対する責任
原則2:政府の役割
原則3:安全に対するリーダーシップとマネジメント
原則4:施設と活動の正当化
原則5:防護の最適化
原則6:個人のリスクの制限
原則7:現在および将来の世代の防護
原則8:事故の防止
原則9:緊急時の準備と対応
原則10:現存または規制されていない放射線リスクの低減のための防護措置

放射性廃棄物については、廃棄物を生み出す世代がその管理のための安全で実際的に許容できる解決策を探求し、適用しなければならないとして、将来世代に過度の負担を強いることを避けるような方法で管理されなければならないとしている。

■ IAEAの安全基準の体系と放射性廃棄物処分

IAEAは、放射線が活用されている幅広い分野において、人及び環境が受けると思われる放射線リスクは、評価され、必要に応じて管理されなければならないとしており、以下を念頭においたリスクを対象としている。

■ 放射線被ばくの健康への有害な影響

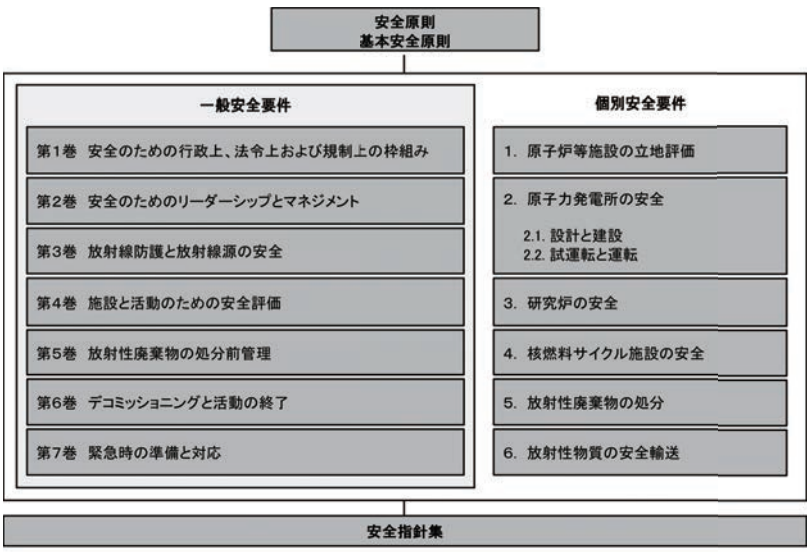
■ 直接的な影響として安全関連リスク

- ●放射線被ばく
- ●放射性廃棄物を含む放射性物質の存在または環境への放出
- ●原子炉の炉心、連鎖核反応、放射性線源またはその他の放射性線源に関する制御の喪失

安全基準は、図4-1に示すように3つのカテゴリーからなるIAEA安全基準シリーズとなっている。「安全要件」は、基本安全原則の目的、原則に基づく人及び環境の防護を保証するために満たされなければならない要件を定めたものである。「一般安全要件」と「個別安全要件」に区分され、放射性廃棄物の処分に関しては、「個別安全要件」に含まれる。「安全指針」は、安全要件に従う方法に関する勧告やガイダンスを提供している。

また、IAEAが安全基準を作成する際には、原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）の知見、及び国際放射線防護委員会(ICRP)の勧告が考慮されている。

図4-1　IAEAの安全基準シリーズ



出典:IAEA:Disposal of Radioactive Waste, SSR-5(2011)

ポイント

▶放射性物質が及ぼす人とその環境への影響防護の観点からの安全原則

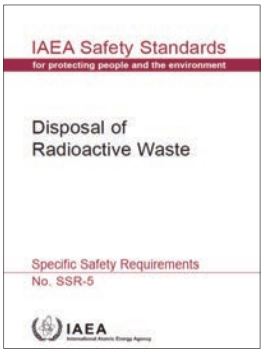
- **被ばくと放射性物質の放出の管理**
- **放射線源の制御喪失事象の可能性制限**
- **上記の事象発生時の影響の緩和**

4-3

放射性廃棄物処分に係る安全要件

IAEA安全基準における放射性廃棄物処分の安全目的と基準とは。

【背景】



出典：IAEA：Disposal of Radioactive Waste, SSR-5 (2011)

IAEAは、すべての種類の放射性廃棄物の処分に関する安全目的と安全基準を設定するとともに、SF-1に規定された原則に基づき、放射性廃棄物の処分で満足しなければならない要件を確立することを目的として、個別安全要件「放射性廃棄物の処分」（SSR-5）を取りまとめている。

【概要】

SSR-5は、6章から構成されており、第1章、第2章は、処分の概念と安全目的を示しており、第3章から第6章では、処分施設のための26項目の安全要件を定めている。

第3章:放射性廃棄物処分の計画立案に係わる安全要件

● 行政上及び規制上の枠組み

要件1:政府の責任

要件2:規制機関の責任

要件3:操業者の責任

● 安全アプローチ

要件4:処分施設の開発と操業過程における安全の重要性

要件5:処分施設の安全のための受動的手法

要件6:処分施設の理解と安全性についての信頼性

● 安全のための設計概念

要件7:多重安全機能

要件8:放射性廃棄物の閉じ込め

要件9:放射性廃棄物の隔離

要件10:受動的安全特性のサーベイランスと管理

第4章:処分施設の開発、操業及び閉鎖に係わる要件

● 放射性廃棄物の処分のための枠組み

要件11:処分施設の段階的開発と評価

● セーフティケースと安全評価

要件12:処分施設のセーフティケースと安全評価の準備、承認及び活用

要件13:セーフティケースと安全評価の範囲

要件14:セーフティケースと安全評価の文書化

● 処分施設の開発、操業及び閉鎖での段階

要件15:処分施設のサイト特性調査

要件16:処分施設の設計

要件17:処分施設の建設

要件18:処分施設の操業

要件19:処分施設の閉鎖

第5章:安全性の保証

要件20:処分施設における廃棄物受入れ

要件21:処分施設でのモニタリング計画

要件22:閉鎖後期間と制度的管理

要件23:国内核物質計量管理システムの考慮

要件24:原子力セキュリティ措置に関する要件

要件25:マネジメントシステム

第6章:既存の処分施設

要件26:既存の処分施設

「第２章：人間と環境の防護」では、処分施設の操業及び閉鎖後における放射線学的リスクに対する防護に関して定めており、操業期間においては、基本的に原子力施設と同様の考え方である。一方、閉鎖後期間では、「安全目的」と「基準」を以下のように定めている。

安全目的

安全目的は、社会的及び経済的因子を考慮に入れ、処分施設の閉鎖後の防護が、最適化されるように、処分施設を立地、設計、建設、操業及び閉鎖することである。長期的に公衆の構成員に対する線量とリスクが、設計上の基準として用いられる線量拘束値または、リスク拘束値を超えないという合理的保証も、達成されなければならない。

基準

a 公衆の構成員に対する全ての計画被ばく状況からの線量限度は、実効線量で年間1mSvである。この値、及びこれと同等のリスク当量は、将来超えない基準として考えられる。

b この線量限度に従うために、処分施設（単一の線源とみなされる）は、処分施設に影響する可能性のある自然過程の結果として、将来被ばくするかも知れない代表的個人への計算された線量またはリスクが年間0.3mSvの線量拘束値を超えないか、年間10^{-5}オーダーのリスク拘束値を超えないように設計される。

c 閉鎖後の偶発的な人間侵入の影響に関係して、侵入がサイトの周辺住民に年間1mSv未満の線量をもたらすと予想される場合には、人間侵入の確率を減らすことも、その影響を限定するための取り組み必要とされない。

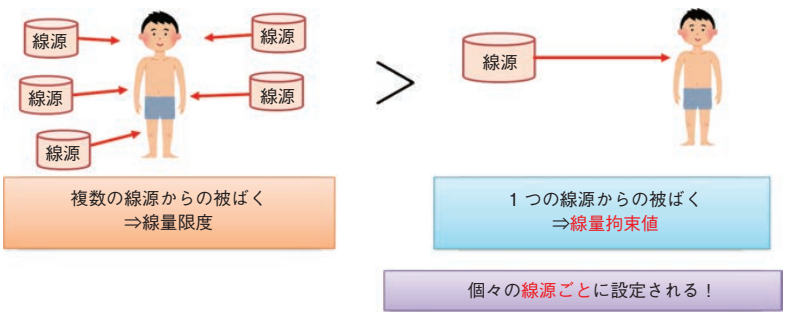
d 人間侵入がサイトの周辺住民に20mSvを上回る可能性のある年線量を導くと予想される場合には、例えば、地表下への廃棄物の処分または、より高い線量を与える放射性核種の内容（content）を分離するといった、代替となる処分のオプションが考慮されるべきである。

e 1～20mSvの範囲の年線量が示される場合には、施設の開発段階で侵入確率を低減するまたは、施設設計の最適化によって、その影響を限定する合理的取り組みが正当化される（warranted）。

f 臓器への決定論的影響の当該しきい値を超過する可能性がある場合、同様の考察が適用される。

放射線防護の基準は、ICRPが規定した防護基準（Pub81 1998）を踏襲した内容となっている。線量限度（リスク限度）と線量拘束値（リスク拘束値）との関係は図4-2のようになる。上記の基準で拘束値を用いているのは、一つの処分場の線源からの被ばく線量を意味している。

図4-2　線量限度と線量拘束値の違い



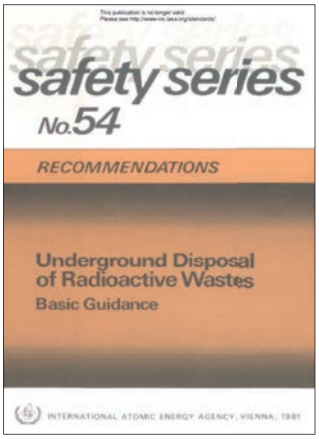
出典：日本医学物理学会放射線防護委員会Webサイト

ポイント

▶安全要件としての基準

- **線量限度：1mSv/年**
- **線量拘束値：0.3mSv/年**
- **リスク拘束値：10^{-5}オーダー/年**

参考 IAEA：放射性廃棄物の地下処分ー基本指針（1981）



出典：IAEA（1981），Recommendation, Underground Disposal of Radioactive, Wastes Basic Guidance, Safety series No.54

IAEAは放射性廃棄物の地下への処分に関し、1981年に“Underground Disposal of Radioactive Wastes Basic Guidance”を公表した。この勧告が地下への処分に関する国際機関の最初の図書となる。

【背景】

IAEAは、各国において放射性廃棄物の地下への埋設処分の計画が途につき、様々な方策が検討されている状況であることを認識し、基本指針（Basic Guidance）の必要性から、1977年に地層内に廃棄物を処分するジェネリックな指針のドラフト版を作成した。この指針は、1978年に理事会で承認され1981年に公表。IAEAが地層処分に言及した最初の基本指針である。

【概要】

本指針は、一般的なものであり、すべての放射性廃棄物の地中への処分を対象としているが、特に深部地層内への処分に着目して、以下の事項を取りまとめている。

- ■ 一般的な規制行為と安全評価
- ■ 処分地の調査と選定
- ■ 廃棄物受入れ基準
- ■ 処分場の設計、操業、閉鎖と監視

* 「処分」という用語は、回収を考慮しない特定廃棄物の埋設をいう。

* 「地下処分」という用語は、陸域の様々な深さの浅層から岩盤坑道、深部地層への処分までを含む。

本指針では、地層処分の安全性を確保するバリアとして以下が定義されている。

a) Natural barriers（天然バリア）

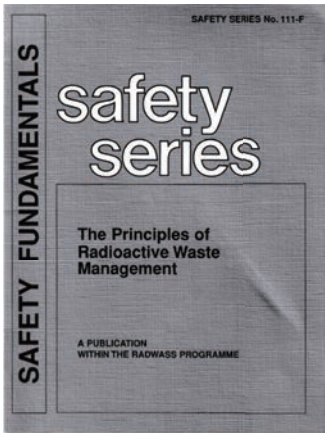
- ● 処分場が立地する地質構造と周辺の地質環境
- ● 処分場から生物圏に至る経路に沿った地質環境特性による放射性核種の遅延をもたらすバリア

b) Man-made barriers（人工バリア）

- ● 廃棄物の物理化学的な形態（低滲出性、低拡散性）と容器及び処分場における地科学バリアを含む付加的なバリア

本書には、現在我々が用いている専門的な用語が多く記述されている。

参考 IAEA：放射性廃棄物マネジメントの原則（1995）



出典：IAEA Safety Fundamentals (1995), The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111-F https://www.iaea.org/publications/5192/principles-of-radioactive-waste-management-safety-fundamentals

IAEAが1995年に公表した“The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No.111-F”は、”Safety Fundamentals：安全基本”として位置づけられた。

このFundamentalsは、2000年代に入り、IAEA内で再度検討され、最終的には、2006年に” Fundamental Safety Principles SF-1, Safety Standard No. SF-1”として、放射性廃棄物のマネジメントだけでなく、原子力エネルギー活用も含めての安全原則として更新されている。

【背景】

1995年にIAEAが公表した安全基準書“The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111-F”は、IAEAが作成する一連の安全シリーズの基本（Fundamentals）としてIAEAが作成するRADWAS（Radioactive Waste Safety Standard）安全シリーズの最上位に位置する文書で、これまでの国際機関での議論や知見を反映し、様々な活動から発生する放射性廃棄物のマネジメントに係る原則を取りまとめた報告書である。

【概要】

本報告書では、第１章の序論のあと、第２章に放射性廃棄物マネジメントの安全基本について言及し、第３章では、放射性廃棄物のマネジメントに関する基本原則を記述している。この基本原則は９項目からなり、以下の事項に言及している。

- 人間の健康の防護
- 環境の防護
- 国境を越えての防護
- 将来世代と実施手順への責任

【放射性廃棄物マネジメントの目的】

放射性廃棄物マネジメントの目的は、将来世代に負担をかけることなしに、現在と将来の人の健康と環境を防護するために放射性廃棄物を取り扱うことである。そのために、基本となる９項目の原則を規定している。

これらの原則は、拘束力があるものではなく、各国の放射性廃棄物を取り扱う専門家間で合意が得られた項目が記述されている。

4-4

放射性廃棄物処分へのICRP勧告

放射性廃棄物とその処分に対する放射線防護の考え方とは。

放射性廃棄物の処分に関する国際放射線防護員会（ICRP）の勧告は、1985年に公表されたPub 46からPub 77、Pub 81を経て2013年のPub122に更新されている。この中で、地層処分の観点から最も重要な勧告となったのは1997年のPub77と1998年のPub81である。また、それぞれの勧告の間には、適切な放射線防護の基礎となる指針を提供する委員会勧告(Pub60とPub103)が公表されている。

図4-3　放射性廃棄物に関するICRPの出版物

Pub 46 (1985)：
Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste

Pub　77 (1997)：
Radiation Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste

Pub 81 (1998)：
Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of long-lived Solid Radioactive Waste

Pub 122 (2013)：
Radiation Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste

Pub 60 (1990)

1990 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection

Pub 103 (2007)

2007 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection

出典：International Commission on Radiological Protection(ICRP)

■ ICRP勧告の概要

ICRP Publication 46（放射性固体廃棄物処分に関する放射線防護の諸原則）

ICRPが推奨する線量制限システムを放射性固体廃棄物の処分に適用するには、将来の被ばくの確率的な性質と長いタイムスケールという2つの特殊な要因を考慮する必要がある。本報告書では、線量制限システムからリスク制限システムへと一般化することで、変動する確率を考慮し、これをどのように適用できるかを示している。放射性固体廃棄物の処分に伴う長いタイムスケールについては、集団線量当量の計算の切り捨て、将来の不利益への重み付け、発生確率の低い被ばくの重要性を定量化するための効用値の使用などの観点から議論している。また、ある廃棄物の流れを管理対象とするかどうかを決定する際に用いられる規制免除値や、放射性固体廃棄物の処分に関する運用面での議論も含まれている。本報告書は基本的な資料であり、Pub 77及び81によって補足及び修正されている。

ICRP Publication 77（放射性廃棄物の処分に対する放射線防護の方策）

ICRPの放射線防護に関する現行の方針、特に公衆の被ばくに関する方針を再確認し、放射性廃棄物の処分に対するこの方針の実際の適用を明確にすることを目的としている。本報告書では、行為の正当性、防護の最適化、長距離・長時間にわたる集団線量評価の使用、潜在的な被ばくの意味、行為と介入の区別について述べている。特に、個々の線量が小さいからといって、集団線量を無視してはならない理由を説明している。しかし、集団線量は、線量と時間の限られた範囲のブロックに分けて提示する必要があるかもしれないこと、また、長い時間にわたる集団線量の予測には、その不確実性についての批判的な検討が必要であることも強調している。本報告書は、放射線防護政策に携わる者にとって重要なものであり、廃棄物処理に関連するものであることは言うまでもないが、集団線量に関するICRPの方針が説明されていることからも、一般的なものと考えられる。

ICRP Publication 81（長寿命放射性固体廃棄物の処分に適用する放射線防護勧告）

長寿命の放射性固体廃棄物を「濃縮して保持する」という方法で処分した場合の公衆の放射線防護を扱っており、処分としては、浅地中への埋設や深部地層処分を含む選択肢を網羅している。本報告書の勧告は、1985 年に発行されたICRP Pub 46 の内容を補足、更新、明確化したものであり、ICRP の当時最新の一般勧告であるPub 60 と、Pub 77 に記載されている「あらゆる種類の放射性廃棄物の処分に関するICRP の一般的な方針」を配慮している。本報告書では、遠い将来に起こるかもしれない、あるいは起こらないかもしれない被ばく（潜在被ばく）という主要な防護問題を取り上げ、廃棄物処分システムの放射線学的受容性を評価するための中心的なアプローチとして、制約付き最適化を取り上げている。最適化は判断に依存し、本質的に定性的なプロセスであるとしている。被ばく状況は、自然現象と人間の侵入という2つのカテゴリーに分けて考えることを提唱している。

ICRP Publication 122（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）

地層処分施設のライフタイムにおける様々な段階について説明し、遭遇しうる様々な被ばく状況に応じて、各段階に関連する放射線防護原則の適用を取り上げている。また、環境への放射線影響についても取り上げている。特に、地層処分施設の異なる時間枠での防護システムの適用に影響を与える重要な要因は、存在する監視または「注意深いケア」のレベルである。監視（Oversight）のレベルは、発生源、すなわち廃棄物と処分場を管理し、潜在的な被ばくを回避または低減する能力に影響を与える。

監視については、三つの時間枠を考慮：

①直接的な監視：処分場の操業時で能動的な監督が行われている段階

②間接的な監視：処分場が閉鎖され、社会に代わって追加的な保証を提供するために規制当局や特別な行政機関、あるいは社会全体によって監視が行われている段階

③無監視の段階：処分場の記憶が失われ監視が行われなくなる段階

ICRP Publication 103（国際放射線防護委員会の2007年勧告）

本勧告では、前勧告（Pub 60, 1990）に基づく放射線防護体系の問題点の是正、約30 に達した線量制限勧告値によって複雑化した体系の単純化を目的として見直しが行われた。線量制限値を3 段階の枠で示し、その適用を解説、例示した。防護行動過程（procedures）に基づいて行為と介入に分類した従来の体系から、計画／現存／緊急時という3 つの被ばく状況（situations）に基づく体系に変更した。物理・生物学上の知見の進歩を取り入れて放射線加重係数と組織加重係数の一部が改訂された。

column

ICRPとPub.81

ICRPとは?

国際放射線防護委員会(International Commission on Radiological Protection: ICRP)は、専門家の立場から人及び環境の放射線防護に関する勧告を行う非営利の国際学術組織である。

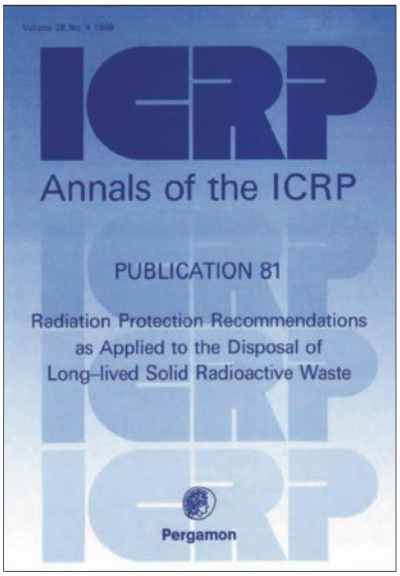
1928年に、国際放射線医学会議において国際X線ラジウム防護委員会(IXRPC)として設立され、1950年に改組し、現在のICRPとして独立した。

ICRPが放射性廃棄物処分の放射線防護の考え方を示したのは、Pub.46が最初で、その後Pub.77、Pub.81において体系的に示されてきている。特にPub.81「長寿命放射性固体廃棄物の処分に適用する放射線防護勧告」は、放射性廃棄物処分における最近の国際的な進展に照らして1985年に出版されたPub.46で示されている勧告を補完、改訂し、さらにより明確にすることを目的として1998年に出版された。

Pub.81の勧告

Pub.81で勧告された事項は、世界各国での地層処分に係る規制基準を策定する上で大きな影響を与えている。地層処分という長期の放射線影響の可能性を考慮して以下の勧告がなされている。

- 地層処分特有の潜在被ばくへの対応
- 長期間の影響から拘束値を組み込んだ最適化
- 自然過程と人間侵入への放射線防護基準
- 自然過程には0.3mSv/年の線量拘束値あるいは10^{-5}/年程度のリスク拘束値
- 人間侵入には線量・リスク拘束値ではなく約10mSvの現存年線量、100mSvを超える場合は介入
- 自然過程の評価方法として統合アプローチと線量/確率分解アプローチの適用



ICRP, Pub. 81, Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of long-lived Solid Radioactive Waste

Pub 81は、地層処分の放射線防護に係る最も詳細な勧告書である。小佐古他「地層処分を念頭においたICRP Publication 81の解説」(日本原子力学会バックエンド部会誌「原子力バックエンド研究」Vol.9 No.2)において、勧告に対する解釈が詳細に記述されているので参照されたい。

4-5

日本の地層処分の安全規制

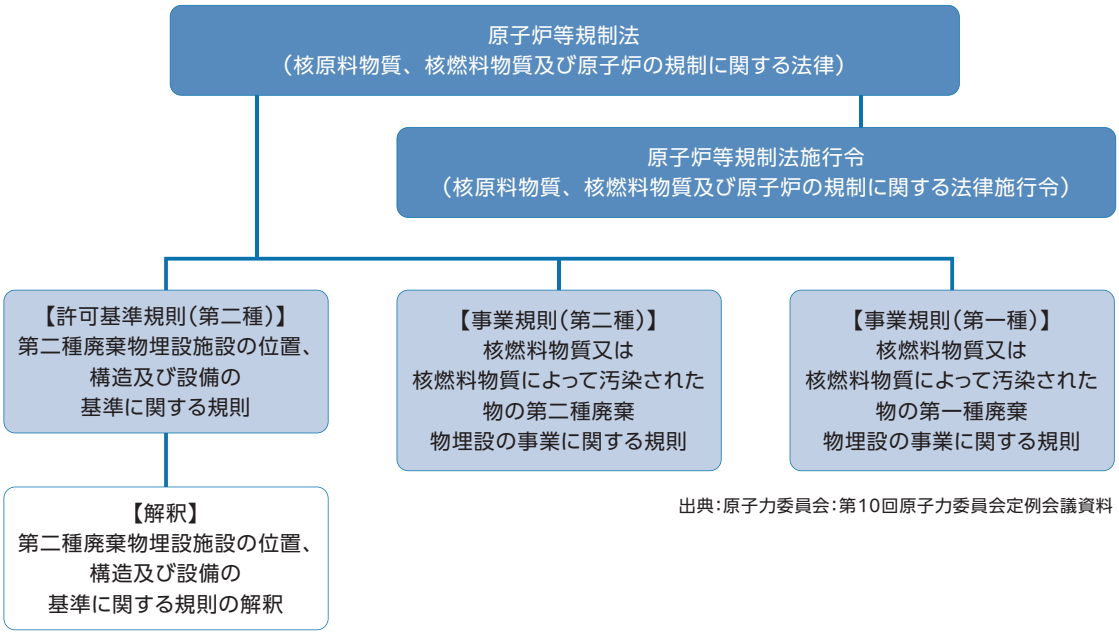
日本における放射性廃棄物処分に係る安全規制の法体系と地層処分の安全基準等はどのようになっているのか？

【放射性廃棄物処分に係る安全規制の枠組み】

日本における原子炉等やその他の核物質全般の取扱いを規制する法律は、1957年に制定された放射性廃棄物処分事業を含む「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（原子炉等規制法）」がある。

2007年の原子炉等規制法改正により、核燃料物質または核燃料物質によって汚染された廃棄物の埋設に関して、事業規則として第一種廃棄物埋設事業と第二種廃棄物埋設事業に区分されるとともに、第二種廃棄物埋設の許可基準規則が規定されている。

図4-4　原子炉等規制法における廃棄物埋設に係る現行の規制体系

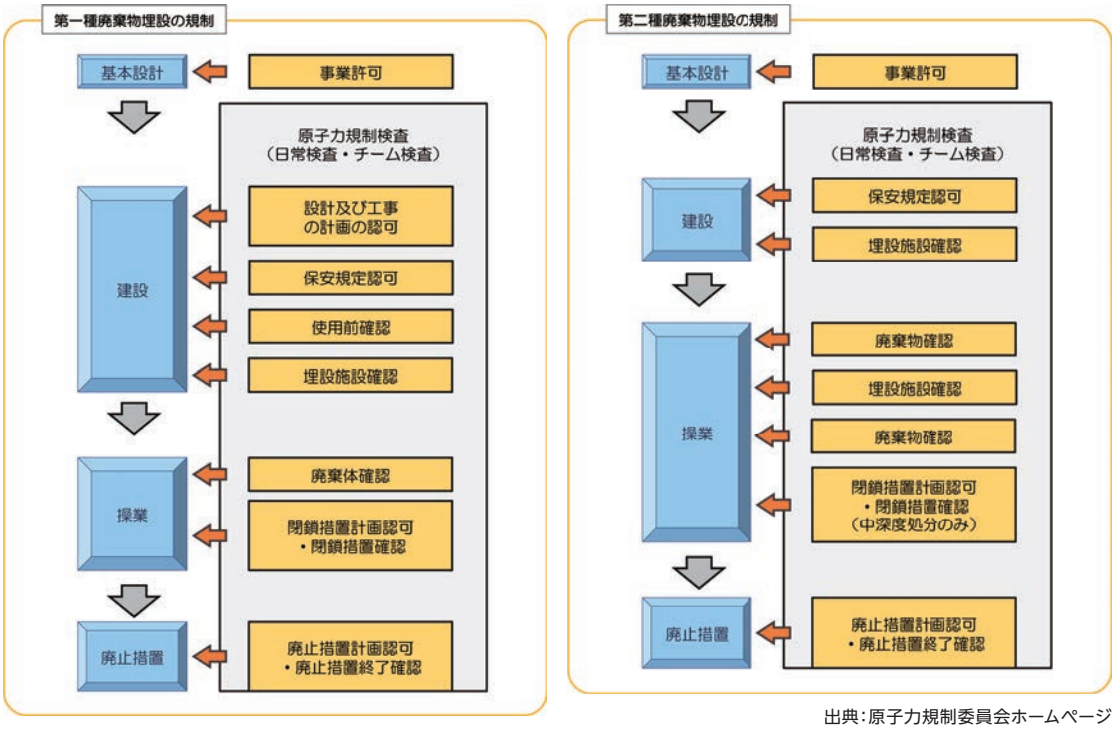


出典：原子力委員会：第10回原子力委員会定例会議資料

【原子炉等規制法における安全規制の流れ】

原子炉等規制法では、第一種廃棄物埋設事業と第二種廃棄物埋設事業について、図4-5に示す安全規制の流れが規定されている。地層処分場と中深度処分場については、処分場の操業が終了した段階で、坑道が適切に埋戻されることの確認をより確実に行うため、坑道の埋戻しや坑口の閉塞などの措置に関する計画（閉鎖措置計画）を申請し、その認可を受けることが規定された。

図4-5　原子炉等規制法で示された安全規制の流れ



出典：原子力規制委員会ホームページ
https://www.nra.go.jp/activity/regulation/nuclearfuel/haiki/haiki2.html

【第二種廃棄物埋設に係る規制基準】

原子力規制委員会は、委員会規則等を制定または改正し、ウラン廃棄物を含むすべての原子力施設から発生する廃棄物を対象とした中深度処分を含む第二種廃棄物埋設及びクリアランスの規制基準を整備している。原子力発電所の廃止措置から発生する炉心廃棄物等を対象とする中深度処分への要求事項と審査ガイドは2020年に公表された。

【第一種廃棄物埋設に係る安全規制】

第一種廃棄物埋設（地層処分）に係る規制基準は今後整備される。なお、現行の原子力規制委員会が発足する前に、高レベル放射性廃棄物の安全規制に関する考え方に関する報告書が2000年と2008年に公表されていた（参考として後述）。

また、原子力規制委員会は、2015年5月に閣議決定された「最終処分法に関する基本方針」における「原子力規制委員の役割」に基づき、2022年に「特定放射性廃棄物の最終処分における概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮されるべき事項」を公表した。

ポイント

▶日本における放射性廃棄物処分に係る安全規制の枠組み

- **最終処分施設建設地の選定後、第一種廃棄物埋設（地層処分）の事業許可申請から開始され廃止措置終了確認まで**

参考　安全規制の基本的考え方

【背景】

原子力安全委員会は、2000年の地層処分の実施に向けた最終処分法の制定に伴い、日本における地層処分の安全規制についての最初の考え方を公表した。

出典：原子力安全委員会：高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第一次報告）

【概要】

第２章には、前述した「安全確保原則」が記述され、この原則に沿って、事業認可申請における安全評価の考え方、地層処分の異なる段階における安全確認の方策について記述されている。

第３章の地層処分に係る「安全確保の考え方」では、地層処分の長期の安全性の確保への要件として、実施主体による地層処分に適した処分地の選定に続いて、事業認可申請以降、廃止措置に至るまで、各段階に対応した安全評価による安全確認と安全基準・指針等に沿って事業が進められていることの安全確認の必要性に言及している。

第４章には、処分地に要求される「環境要件」として、「処分地は、放射性核種の閉じ込めに好ましく、廃棄物を物理的に生活環境から隔離でき、自然環境の変化に伴う著しい影響を受けない地質環境を有していること」が必要と記述されている。この要件を考慮し、原子力安全委員会は2002年に「高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件」を公表した。

第５章は、高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制のあり方として、以下の事項を記述している。

第１節：事業認可申請時における安全評価の基本的考え方：実施主体は選定した処分地に応じて適切な工学的対策を施した処分場を設計し、国は、安全審査においてその妥当性を安全評価により確認するとし、安全評価に関して、1. 安全評価のための指標及び基準値、2. 評価モデル及びパラメータ、3. 評価シナリオについてそれぞれの要件を記述している。

第２節：建設・操業段階等における安全確認の考え方：処分事業においては、安全評価の結果が確実に担保されるように建設、操業等の各段階において「安全確認」を行うことが重要である。処分場閉鎖後の「安全確認」も重要である。安全確認の時期：

1. 建設段階の安全確認
2. 操業段階の安全確認
3. 閉鎖段階の安全確認
4. 管理段階～事業廃止時

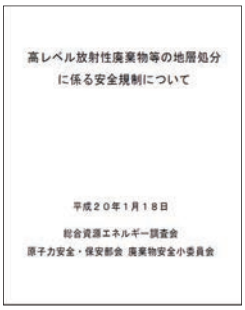
第３節：今後策定する具体的な安全基準・指針類に関するスケジュールでは、処分事業の各段階に合わせて以下の指針・基準類を策定していくとしている。

1. 安全審査基本指針と安全審査指針
2. 処分場の技術基準

参考 地層処分の安全規制について

【背景】

原子力安全・保安院（2012年に廃止、現在は原子力規制委員会）は、2007年の原子炉等規制法の改正に伴い、2008年に「高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制について」を公表した。


高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について

平成２０年１月１８日

総合資源エネルギー調査会
原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会

出典：経済産業省総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物小委員会：高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について

【概要】

第２章には、目的及び以下の基本方針が記述されている。

① 処分技術に関する新たな知見を設計や工事に反映できるように留意する（Best Available Technology :BATの考え方の導入）。

② 今後の処分技術の進展に係わらず必要と考えられる要件を検討し、現時点で規定できるものについては反映し、詳細に規定することが必ずしも合理的でない部分については、事業の進展に応じて適切な時期までに整備する。

第３章には、改正原子炉等規制法で規定された事項の概要が紹介されている。

第４章には、安全確保の基本的考え方（隔離と閉じ込め）について記述されている。

第５章には、安全規制制度について原子炉等規制法の改正で規定された事項に対応し新たに検討した以下が記述されている。

5.1 廃棄物埋設施設について：廃棄物埋設地への要件、施設設計や工事等に求められる技術基準等

5.2 廃棄体について：廃棄体の要件、廃棄体の回収可能性の維持

5.3 保安のために必要な措置について：保安規定の内容、モニタリング対象

5.4 安全レビューについて：事業の進展に伴う安全確保策（安全評価、安全確認）のレビュー

5.5 閉鎖措置について：安全レビュー結果、段階的な安全確認結果などを集約して対応

5.6 記録の保存について：2003年にわが国が加入した国際条約からの要件

5.7 閉鎖後の制度的管理について：社会的な受容性を高めるために土地利用管理、用地利用制限、モニタリング及びマーカーの設置の必要性など

【2007年改正原子炉等規制法で規定された項目】

第一種廃棄物埋設事業を対象に以下の安全規制事項が規定された。

(1)事業認可と許可の基準について
(2)廃棄物埋設施設について
(3)廃棄体について
(4)保安のために講ずべき措置について
(5)閉鎖措置について
(6)記録の保存について
(7)事業の廃止について

これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート

第4章 地層処分の安全原則と規制・基準類

問1 次の空欄を埋めなさい。

1. 高レベル放射性廃棄物を適切な時期に、技術・社会・経済的な要因を考慮して安全な処分を行い、［①］の負担は［②］にとどめなければならない。

2. 高レベル廃棄物処分場の［①］の安全性は、モニタリングや、処分場の管理終了後に行うその他の［②］や措置等に頼ってはならない。

3. 2011年に公表されたIAEAの個別安全要件SSR-5「放射性廃棄物の処分」では、処分場閉鎖後のすべての計画被ばく状況での公衆の被ばく線量限度は年間［①］を超えないこと、また、処分施設の設計により年間あたり［②］の線量拘束値、あるいは年間あたり［③］のリスク拘束値を超えないことを定めている。

4. 偶発的な人間侵入により、サイト周辺の住民に年間［①］を上回る可能性のある被ばくが発生されると予想される場合は、より高い線量を与える放射性核種を分離するなどの［②］となる処分オプションが考慮されるべきである。

5. ICRP（国際放射線防護委員会）の放射線防護の基本三原則は、Pub 60に提唱された［①］、［②］、［③］である。

6. 原子炉等規制法により、第一種廃棄物埋設事業に係る安全規制は、事業者による処分施設の基本設計に対する［①］の審査から開始され、埋設終了後の廃止措置に係る［②］によって終了する。

7. 原子炉等規制法において、地層処分と［①］については、処分場の操業が終了した段階で、坑道が適切に埋戻されることの確認をより確実に行うために、［②］を申請し、その認可を受けることが定められている。

問2 次の問で、正しいものには○、間違っているものには×をつけなさい。

1 □ IAEA（国際原子力機関）で提唱された地層処分の安全原則は、長期の安全性を確保するために将来世代への負担をできるだけ小さくすること、制度的管理に依存せずに長期の安全性が確保できること、現世代が受け入れている被ばく線量限度は将来世代も超えることがないことを求めている。

2 □ ICRP（国際放射線防護委員会）は、一般的な線源に対する放射線防護に対する考え方、基準等について勧告しており、その中で放射線防護の基本原則として（行為の正当性、防護の最適化、線量限度の適用）を提唱している。

3 □ 日本の地層処分に係る安全規制の考え方では、2000年の最終処分法の制定、2007年の原子炉等規制法の改正により、安全確認の方法、規制要件や規制の流れが明確にされてきており、特に第一種廃棄物埋設事業の安全規制体系では、閉鎖措置計画の認可・確認が新規に追加された。

問3 日本における放射性廃棄物の地層処分に対する安全規制の考え方、枠組みについて300字程度で述べよ。

答え合わせ

第4章 地層処分の安全原則と規制・基準類

問1	1	①将来世代　②最小限
	2	①閉鎖後　②制度的管理
	3	①1mSv　②0.3mSv　③$10^{-5}$オーダー
	4	①20mSv　②代替
	5	①行為の正当化　②防護の最適化　③線量限度の適用
	6	①事業許可　②(廃止措置)終了確認
	7	①中深度処分　②閉鎖措置計画

問2

1 ○ 1989年のIAEAの安全原則では、処分場閉鎖後も廃棄物が危険である長期にわたって、人間及び環境を防護することを目的として、そのための将来世代を防護する原則として、将来世代の責任と放射線学的な安全性に関する7つの安全原則が示されている。

2 ○ ICRPの地層処分に対する放射線防護に関する勧告は、Pub 60(1990)4.2 放射線防護体系の中で、「行為の正当化」、「防護の最適化」、「個人線量限度及び個人リスク限度」が提唱されている。Pub 77(1997), Pub 81(1998)では、Pub 60の放射線防護の基本原則を放射性廃棄物処分に適用した場合の考え方について言及している。

3 × 2000年に制定された最終処分法は、「特定放射性廃棄物の最終処分を計画的かつ確実に実施させるために必要な措置等を講ずることにより、発電に関する原子力に係る環境の整備を図り、もって国民経済の健全な発展と国民生活の安定に寄与することを目的」としており、最終処分に関する基本方針の作成と公表、精密調査地区及び最終処分施設建設地の選定、最終処分の実施、原子力発電環境整備機構について規定している。原子炉等規制法の埋設事業の安全規制において「閉鎖措置計画の承認と確認」の対象となっているものは、第一種廃棄物埋設事業(地層処分)と第二種廃棄物埋設事業の内、中深度処分である。

問3

【解答例】

日本における地層処分に対する安全規制は、2000年の最終処分法に対応し、同年に基本的考え方が公表され、そこでは、長期の安全確認は安全評価で行うこと、地層処分の建設・操業・閉鎖の各段階で安全確認を行うことなどが規定された。2007年の原子炉等規制法の改正に伴い、安全規制の枠組みと実施事項について、段階的に進められる事業へのBATの導入、繰り返し行う安全レビューの結果を反映した閉鎖措置計画の立案、認可の申請を行い、閉鎖措置での安全確認を実施した後、事業閉鎖に至るまでの規制の流れが示された。中深度処分の安全審査ガイドでは、立地選定や設計プロセスにおいて、複数の選択肢から優れた概念や場所を選択することを要件としている(301字)。

【解答に用いられるキーワードの例】

最終処分法、地層処分、安全規制の基本的考え方、原子炉等規制法、安全評価、安全確認、BAT、安全レビュー、閉鎖措置計画、中深度処分、設計プロセス

参考文献 第4章 地層処分の安全原則と規制・基準類

- IAEA (1989), Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High-Level Radioactive Wastes, Safety series No. 99
- IAEA (2006), Fundamental Safety Principles, No.SF-1
- IAEA (2011), Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Requirements SSR-5
- 日本医学物理学会放射線防護委員会Webサイト、線量拘束値
- IAEA（1981）, Recommendation, Underground Disposal of Radioactive, Wastes Basic Guidance , Safety series No.54,
- IAEA (1995), Safety Fundamentals, The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111-F
- ICRP Pub 46 (1985), Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste
- ICRP Pub 60 (1990), 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection
- ICRP Pub 77 (1997), Radiation Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste
- ICRP Pub 81 (1998), Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of long-lived Solid Radioactive Waste
- ICRP Pub 103 (2007), 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection
- ICRP Pub 122 (2013), Radiation Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste
- 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（原子炉等規制法）
- 原子力規制庁(2022)、原子力規制に係る最近の取組、第10回原子力委員会定例会議
- 原子力安全委員会（2000）、高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第一次報告）、平成12年11月6日
- 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会（2012）、高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について、平成20年1月18日
- 原子力規制委員会Webサイト、廃棄物埋設施設の概要
- 小佐古他（2003）、地層処分を念頭においたICRP Publication 81の解説、原子力バックエンド研究 Vol.9 No.2

第5章

地層処分の安全確保策と安全評価

本章では、高レベル放射性廃棄物の地層処分の長期安全確保の原則となる「隔離と閉じ込め」、その原則を具現化した「多重バリアシステム」の方策、そしてこれらの安全確保策を評価する安全評価の手法、安全評価からセーフティケースへの展開、及び日本固有の安全確保策について、以下の項目で学習する。

本節では以下の項目について学習する。

5.1 ● 地層処分の長期安全確保原則

5.2 ● 多重バリア概念

5.3 ● 安全評価の考え方と評価手法

5.4 ● リスク論的考え方による安全評価と評価基準

5.5 ● 最新の安全評価の流れ

（参考）地層処分を対象としたストーリーボードの作成例

5.6 ● 安全評価とセーフティケース

（参考）OECD/NEAが提唱したセーフティケース（2004）

（参考）IAEAが提唱したセーフティケース（2012）

5.7 ● 地層処分に影響を及ぼす自然現象への対応

5-1

地層処分の長期安全確保原則

地層処分の長期安全確保の原則である「隔離」と「閉じ込め」を具現化した「多重バリアシステム」とは。

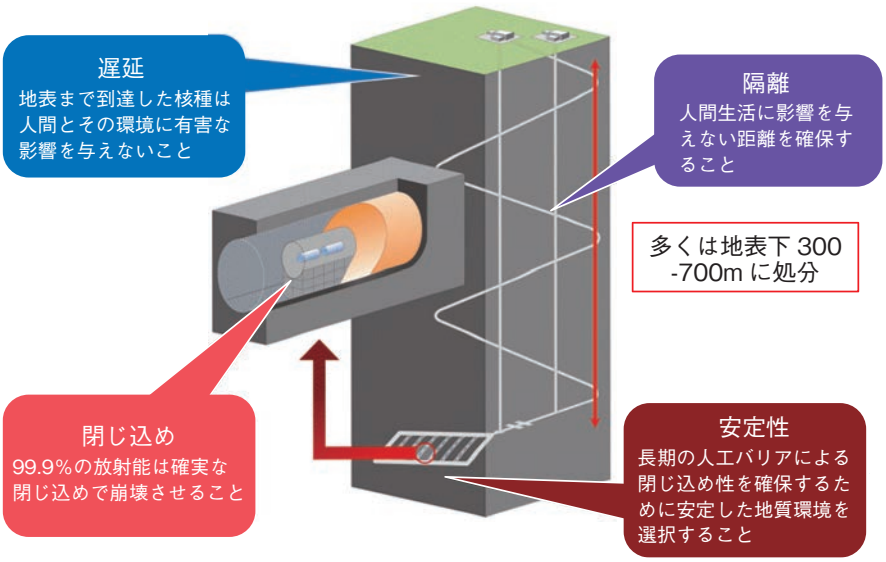
地層処分の長期安全確保の原則は、前述したIAEAの報告書にも記述された「隔離」と「閉じ込め」である。この原則を具現化したものが「多重バリアシステム」となる。Chapman（2004）は、下図に示すスイスの処分概念をベースに以下のように説明している。

「多重バリアシステムの基軸となる安全機能は、「安定した環境」における「閉じ込め」と「隔離」であり、極少量の放射性核種が地下水に溶出し、移行したとしても天然バリアが本来的に有する物質を閉じ込める「遅延」機能により地表に達するまでに核種が減衰し、多重バリアシステムが有する相互に補完できる多重安全機能（Multiple Safety Function）により、人間とその環境への放射線学的な影響が十分小さくなる仕組みとなる」。

この多重安全機能には、処分場周辺の地質環境の安定性も重要な要素となっている。日本は変動帯に位置することもあり、安全機能のうち、地下深部の安定性が重要な要素となっている。

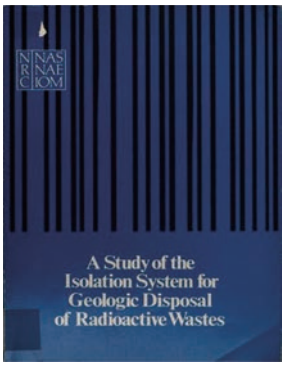
安全機能の役割の１つである放射能を閉じ込める機能、及び放射性廃棄物に含まれる放射性核種の半減期で、99.9%減衰させることが期待されている。

図5-1　地層処分における多重安全機能



出典：Neil Chapman氏が作成した図を和訳

■ 多重バリアシステムと安全機能



出典：U.S. National Academy of Science：A Study for the Isolation System for Geologic Disposal of Radioactive Waste (1983)

地層処分の安全確保策として多くの国で採用されているのが「多重バリアシステム」である。多重バリアシステムの概念は、1983年に全米科学アカデミーが公表した報告書"A Study for the Isolation System for Geologic Disposal of Radioactive Waste"の中で初めて定義された。

本報告書は、廃棄物から溶出した放射性核種が地下水で移行することを前提とし、多重バリアシステムの性能を定量的に評価した最初の安全評価書で、安全評価で考慮すべきポイントを具体的に提示している。

また、この報告書の中では、現在我々が地層処分の安全評価で用いている多くの専門用語が提唱されている。例えばEngineering Barrier「人工バリア」やNatural Barrier「天然バリア」、Performance Assessment「性能評価」等の用語が記載されている。

特に放射性核種の人間環境への放出を削減するメカニズムについて記載された下記の事項は、現在でも安全評価で各バリアのSafety Function「安全機能」として認識されている。

- 地下水浸入の抑制
- 放射性核種の溶解速度の抑制
- 廃棄物容器からの放出の抑制
- 地下水流動距離の長さ
- 地層内での核種の収着による移行抑制
- 分散／拡散、希釈

同じ時期に、OECD/NEAは、地層処分を選択する理由として、最も不確実性が高い人間の活動と生活環境の変動から長期にわたり隔離すること、地層が本来有する物質を閉じ込める能力（性能）を活用することとし、この閉じ込める性能を評価する方法について言及した。ここで取り上げられた地質環境が本来的に有する機能は以下の3つである。

- 放射性核種の閉じ込め機能
- 放射性核種の移行を遅延させる機能
- 放射性核種濃度を希釈する機能

その後、核種を閉じ込める機能として人工バリアの機能が追加され、現在では、「隔離」と「核種を閉じ込める機能」（遅延や希釈を含む）の二つとなり、その前提として地質環境の安定性確保（地質環境変遷や自然現象の予測性）が重要な評価項目となった。

ポイント

▶地層処分における長期安全確保の原則は「隔離」と「閉じ込め」

▶多重バリアシステムが有する安全機能：地下水浸入量の抑制、核種放出抑制、移行距離、移流中の収着・拡散・分散、希釈

5-2

多重バリア概念

閉じ込めと隔離を具現化した地層処分の多重バリアシステムの概念はどのようなものか？

多重バリアの概念とは、廃棄物を隔離し、生物圏への潜在的な放射性核種の放出を防止、遅延、減衰するために協調して機能する複数のバリアから構成される概念である。安全性に寄与する様々な物理的・化学的構成要素またはプロセスで構成されるバリアは補完性を有し、一つまたは複数の構成要素またはプロセスの性能に関する不確実性は、他の要素の性能によって補完される。通常、多重バリアシステムは、人工バリア及び処分場の母岩と地質環境が提供する天然バリアから構成される（OECD/NEA, 2004）。

日本では核燃料サイクル開発機構が第２次取りまとめ（1999）で多重バリアシステムの概念を提示している。図5-2では異なる機能を有する「人工バリア」と「天然バリア」が組み合わさって「多重バリアシステム」を構成していることを示している。

人工バリアの要素としては、高レベル放射性物質をガラス固化することで地下水への溶出を抑制し、金属製のオーバーパックは放射性物質を物理的に閉じ込め、締め固めた粘土の緩衝材には、その低透水性から周辺の地下水の流入量の抑制と放射性物質の移動速度を遅延させる役割を期待している。天然バリアとしての周辺の地質環境は、長期の安定性（大きな変動がない）を確保し、還元環境の維持を含め、地下水に溶け込んだ放射性物資の地表までの移行を遅延させる閉じ込めと隔離の役割を担っている。

図5-2　地層処分の多重バリアシステムの概念と構成要素

出典：　原子力委員会臨時会議（第14回）資料

■ 多重バリアシステムと多重安全機能

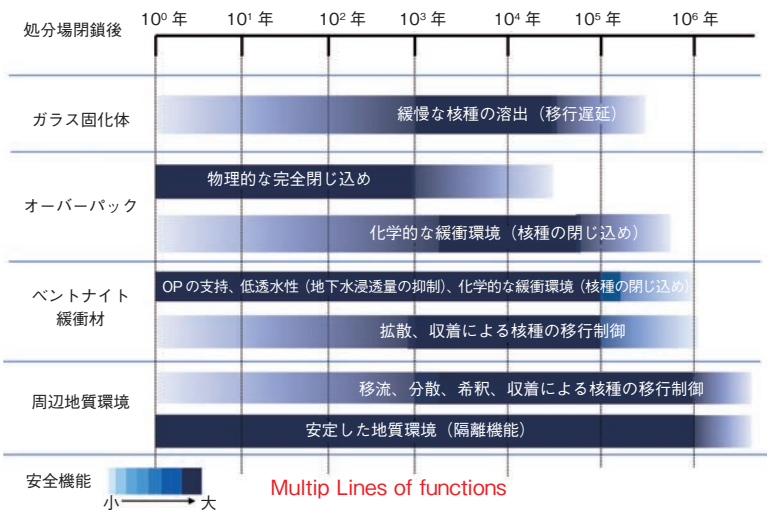
「多重バリアシステム」の説明の多くは、ガラス固化体に閉じ込められた放射性物質が地表までの移行を抑制するバリア要素が多重に組み合わさったイメージが示されている。その中で放射性物質の移行を一定の期間物理的に遮断するのは鋼製オーバーパックであり、他のバリアは移行を抑制する閉じ込めの役割をそれぞれ担っていると説明されている。

図５-3で、「多重安全機能」という仕組みを示す。この図は多重バリアシステムの閉じ込めと隔離機能を図化したNUMOの安全確保方策（2010年度版）において提示された多重安全機能を基に作成したものである。この図の特徴は、それぞれのバリアの安全機能が果たす役割が経過時間とともに変化する状況が記述されており、色の濃さにより主要な安全機能を発揮する時間枠を示している。例えば、周辺地質環境の安定した機能は、処分場が閉鎖された段階から長期にわたり期待されている。

このような安全機能が多重に重なった表示の仕方は、OECD/NEAの処分場閉鎖後のセーフティケースに関する文献（2004）及びICRP Pub 81の中にも見ることができる。

この仕組みで重要なことは、それぞれの時間枠で異なる安全機能の重ね合わせが存在することで、放射性物質の閉じ込めに対して一つの安全機能に依存していないという多重バリアシステムの本来の特徴を示している点である。この仕組みは、Multiple Safety Function（多重安全機能）と呼ばれ、人工バリアの設計への要件や天然バリアの性能評価への要件として用いられている。

図5-3　多重安全機能の仕組み



ポイント

▶多重バリアシステムの構成要素:ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、地質環境

▶多重バリアシステムによる相互の機能が重なりあった多重安全機能

5-3

安全評価の考え方と評価手法

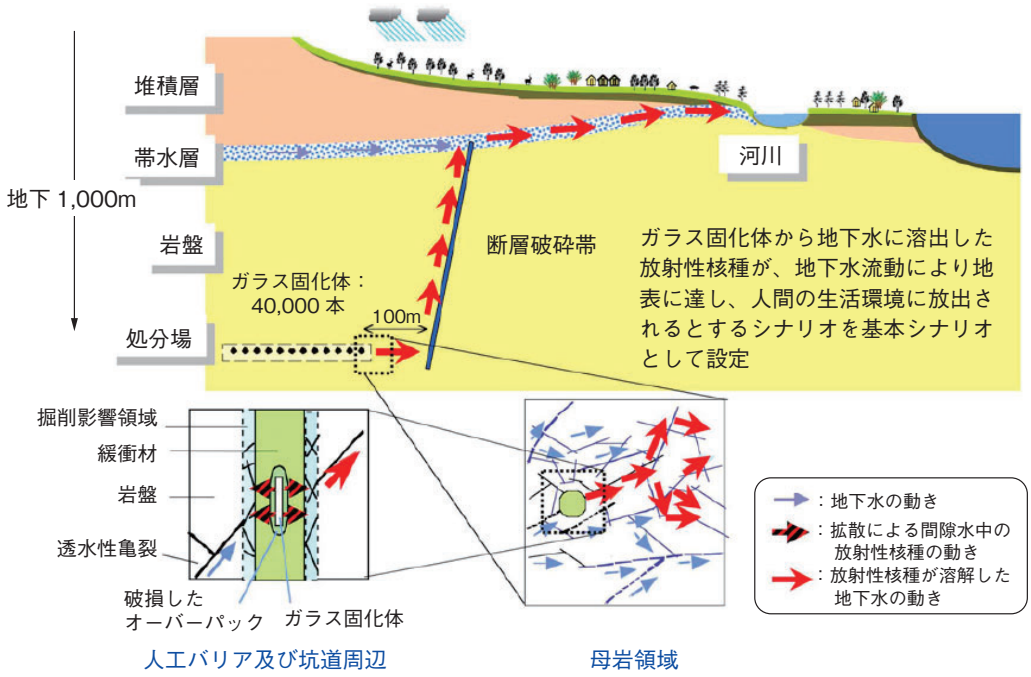
安全評価とは何か。安全評価はどのような流れで実施されるのか。

地層処分された放射性廃棄物に含まれる放射性核種は、極めて長期にわたり放射線被ばくの潜在的なリスクとなる可能性がある。このような潜在的な被ばく影響は、時間の経過とともに不確実性が増大する一方で、潜在被ばく量の確からしさを直接的に確認することはできない。そのため、放射性物質の生活圏までの移行プロセスに係る現象等を単純化して保守的に挙動をとらえて評価する「安全評価」という手法が開発されてきた(OECD/NEA 1982)。

【安全評価の目的】

安全評価の目的は、複雑な処分システム(多重バリアシステムあるいは多重安全機能)を保守的な観点から簡略化し、人間への潜在的な被ばく線量を定量的に求め、基準等との比較により安全性を確認する(IAEA Safety Standards No. 99)ことにある。または、安全評価は、処分施設に伴う危険性を体系的に解析し、施設のサイトと設計が安全機能の達成をもたらし、技術的な要件を満たす能力を評価するプロセス、と定義されている(例えばIAEA　SSR-5, 2011)。

図5-4　JAEA第2次取りまとめの安全評価モデルと評価結果



出典：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－(1999)
※現・日本原子力研究開発機構

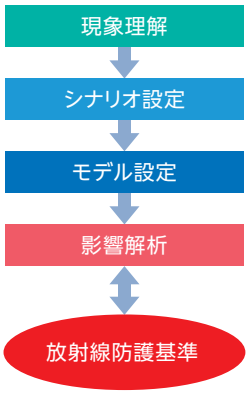
【安全評価の流れ】

地層処分の安全性を評価する手法として「安全評価（あるいは性能評価）」が提案されてきた。安全評価の手法については、IAEAが1981年に“Safety Series No. 56, Safety Assessment for the Underground Disposal of Radioactive Wastes”の中で推奨した手法がベースとなっている。その後、手法の開発とともに実プロジェクトでの安全評価が実施された。初期の代表的な例として、1980年代にスウェーデンとスイスにおいて実施されたものがある(第6章参照)。

安全評価の流れは、現象の理解に始まり、評価シナリオの設定、評価モデルとパラメータの設定後、影響解析（被ばく線量解析）を実施し、その結果を基準（被ばく線量基準など）と比較する作業からなる。

1. 現象理解：評価対象の期間中における地層処分システムを構成する要素（廃棄体、人工バリア、処分場母岩の地質環境、生物圏）の時系列的変遷とその環境での放射性核種の移行現象を分析・理解し、安全評価で重要となる特性、事象、プロセス(FEPという)を抽出する。最近の手法として、現象理解にストーリーボードを用いる方法が提案されている
2. シナリオ選定：現象理解から得られた安全評価上重要なFEPに着目して、廃棄体から放射性核種が地表の生物圏に移行し、人間の被ばくに至るプロセスをシナリオとして設定する。シナリオには基本シナリオ、変動シナリオ、稀頻度シナリオの分類がよく用いられる。基本シナリオとして、日本では、地下水による放射性核種の移行シナリオが選定されている。
3. モデル・パラメータの設定：地下水移行シナリオに対応した単純な解析モデルを作成し、移行媒体の特質と核種の移行に係るパラメータを現地調査結果や室内試験結果を用いて設定する。地下水の移行量（フラックス）、多重バリアシステムでの核種の遅延効果（収着、分散など）がパラメータとして用いられる。地下水移行の場は、時間の経過ともに変化していく。
4. 影響評価：モデル・パラメータを用いて特定したグループを対象に、被ばく線量を定量的に求める。この場合の生物圏は現在の環境が変化しないと仮定したモデル（レファレンス生物圏)と換算係数を用いる。
5. 基準との照査：被ばく線量などの指標と解析結果との比較を実施する。

図5-5　安全評価の流れ



ポイント

- **安全評価の考え方:処分システムからの潜在的な被ばく線量が安全基準を遵守することを確認**
- **安全評価の手法:現象理解、シナリオ設定、モデル･パラメータの設定、影響評価、基準との照査**

5-4

リスク論的考え方による安全評価と評価基準

リスク論的考え方に基づく安全評価や評価基準の設定とはどのようなアプローチなのか？

【リスク論的な考え方に基づく安全評価】

長期評価の時間枠のなかで異なる頻度で発生する自然現象が地層処分システムに与える潜在的な危険性をハザードと呼び、その結果として人間や環境への潜在的な危害をリスクとしている。安全評価では、このような発生頻度（確率）の異なるハザードをシナリオ（放射性核種が生活圏に達するまでのストーリー）として複数作成し、単純化したモデルを用いて、例えば被ばく線量を求めている。このようなアプローチを「リスク論的な考え方に基づく安全評価」と呼び、国際的に広く用いられている。

安全評価では将来的な不確実性や複数の線源を考慮して線量拘束値やリスク拘束値を評価指標として用いていることから、二つの安全評価のアプローチが国際放射線防護委員会（ICRP）のPub 81（1998）で提唱され、原子力安全委員会の報告書「放射性廃棄物の安全規制における共通的な重要事項について」（2004）で以下が紹介されている。

◆ 統合アプローチ：シナリオの発生確率をすべて確率として定量化し、確率と影響の程度との積の総和を取る方法、統合アプローチはすべての過程からの全リスクがリスク拘束値と比較される。

◆ 線量 / 確率分解アプローチ：シナリオの発生の可能性に応じてシナリオ解析を行い、その結果を個別に評価する方法、起こりそうなあるいは代表的なシナリオが同定され、このシナリオから計算された線量は線量拘束値と比較される。自然界の突発事象など、その規模によっては発生確率が極めて低いと想定される事象については、その発生確率の正確な定量化を要求せず、推定される確率の大きさに見合った放射線学影響を要求することになる。

【NUMOが採用した線量/確率分解アプローチ】

NUMOが2021年に公表した包括的技術報告書では、評価シナリオの発生可能性をすべて定量的に検討することが難しいことから、線量/確率分解アプローチを採用している。このアプローチでは、リスク論的な考え方に基づき、区分した評価シナリオが仮に発生したとして被ばく線量値を求める方法である。

一方、事象によっては、評価シナリオの発生確率を専門家の意見集約等で設定する手法（ITM-TOPAZ手法）を整備しつつあり、また、米国のように、リスクを規制基準とする場合もあることから、定量的な確率を算出できるシナリオについてはその発生確率と被ばく線量値を用いて求めたリスク評価を併用している。

【シナリオ区分と評価のめやす線量の設定】

NUMOが採用した線量/確率分解アプローチでは、リスク論的な考え方に基づき自然過程に属するシナリオをその発生可能性から「基本シナリオ」、「変動シナリオ」、「稀頻度事象シナリオ」の三つに区分した。また、偶発的な人間侵入については、その発生可能性が極めて小さいシナリオとして位置付け、ICRPがPub 81で提唱した線量拘束値や現存被ばく状況（事象発生後2年以降）と緊急被ばく状況（事象発生直後1年）での基準値をめやす線量としている。

また、基本シナリオについては、めやす線量300μSv/年の他に設計した処分システムの性能を評価するため、事業者としての努力目標として10μSv/年を設定している。

表5-1　安全評価のシナリオの定義とめやす線量（NUMO 2021）

シナリオ区分	各シナリオの定義	めやす
基本シナリオ	●適切なサイト選定とそのサイトの地質環境条件を考慮した処分場の設計によって期待する安全機能を発揮できるように構築された地層処分システムに対して発生する可能性が最も高いと想定されるシナリオ→（もしも被ばくが起きるとすれば，そのようなことをもたらす発生の可能性が高いとみなすべきもの）	安全性の確認：300μSv/y（安全性を確認するめやす線量として線量拘束値を設定） 基本シナリオに対する事業者としての努力目標：10μSv/y（諸外国の安全規制に適用されている基準の最小値を設定）
変動シナリオ	●基本シナリオに対して，科学的知見に基づいて合理的に設定できる不確実性を考慮したシナリオ	

シナリオ区分	各シナリオの定義とめやす基準の考え方	めやす
稀頻度事象シナリオ	●適切なサイト選定とそのサイトの地質環境条件を考慮した処分場の設計によって期待する安全機能を発揮できるように構築された地層処分システムに対しては発生可能性が極めて小さいと考えられる自然事象にかかわるシナリオ ●このようなシナリオを想定したとしても，著しい放射線学的影響がないことを示すためのシナリオであり，ICRP が示している同様のシナリオに対する被ばく状況の参考レベルの幅を適用	20～100mSv（事象発生直後の1 年間） 1～20mSv/y（事象発生から2 年目以降）
人間侵入シナリオ	●地層処分システムは本来的に人間侵入が生じる可能性を最小限とするようにサイトを選定し処分場を設計することによって構築されていることから，人間侵入シナリオが生ずる可能性は極めて小さい ●その発生を想定したとしても，著しい放射線学的影響がないことを確認するためのシナリオであり，ICRP が示している同様のシナリオに対する被ばく状況の参考レベルの幅を適用	20～100mSv（事象発生直後の1 年間） 1～20mSv/y（2 年目以降）

出典：原子力発電環境整備機構：処分場設計と閉鎖前の安全性の評価、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）長期安全評価、2021年6月30日

ポイント

▶リスク論的考え方による安全評価の方法:統合化アプローチと線量/確率分解アプローチ

▶リスク論的考え方によるシナリオ区分とめやす線量

- **基本シナリオ・変動シナリオ:300μSv/年**
- **稀頻度事象シナリオ:20～100mSv（発生直後の1年間）、1～20mSv（2年目以降）**
- **人間侵入シナリオ:稀頻度事象と同じ**

5-5

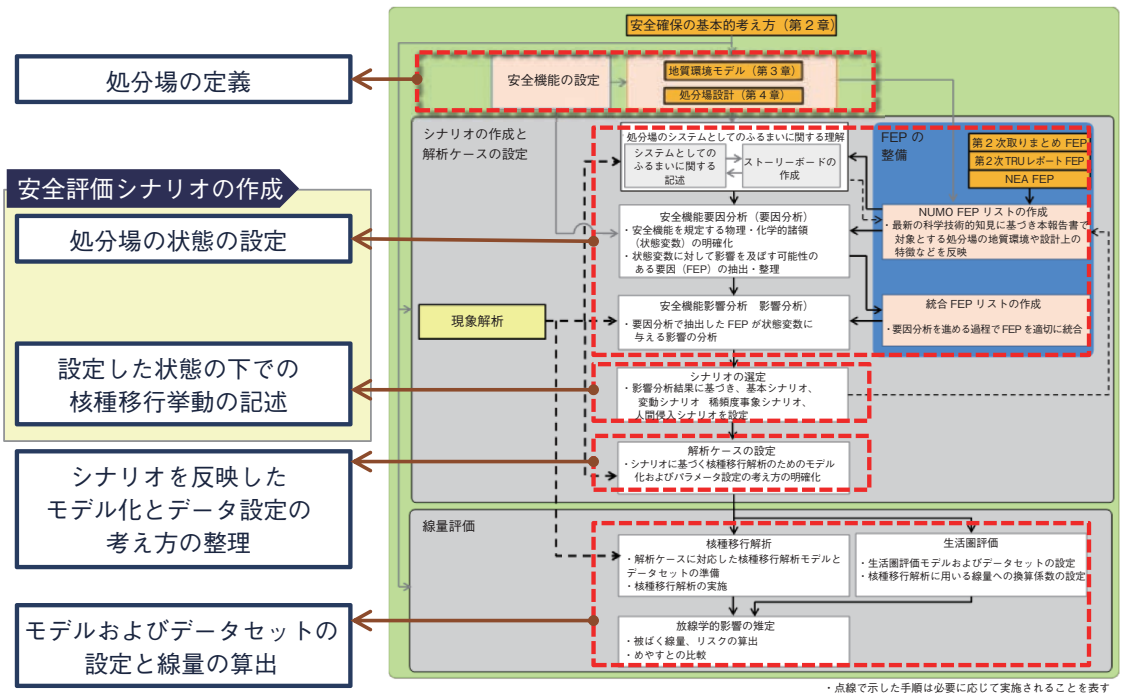
最新の安全評価の流れ

NUMOの包括的技術報告書におけるストーリーボードを用いた閉鎖後長期の安全性の評価。

NUMOが2021年に公表した「包括的技術報告書」の本編、第6章では「閉鎖後長期の安全性の評価」について言及している。その中で、最新の手法を取り入れた「安全評価の基本的手順−安全評価のフロー」として図5-6が提示されている。セーフティケースの論拠構築の最も重要な作業として「安全評価シナリオの作成」が位置づけられている。

シナリオ作成は、ストーリーボードを用いた「処分システムとしてのふるまいの理解」から開始され、このシナリオ作成に用いる前提や知見が安全評価結果の信頼性に直接反映されることになる。特に不確実性に関する考察と吟味は、次段階のセーフティケースに関する報告書作成で重要な役割を果たす。

図5-6　NUMO包括的技術報告書での安全評価の流れ



出典：原子力発電環境整備機構：閉鎖後長期の安全性の評価、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）長期安全評価、2021年6月30日

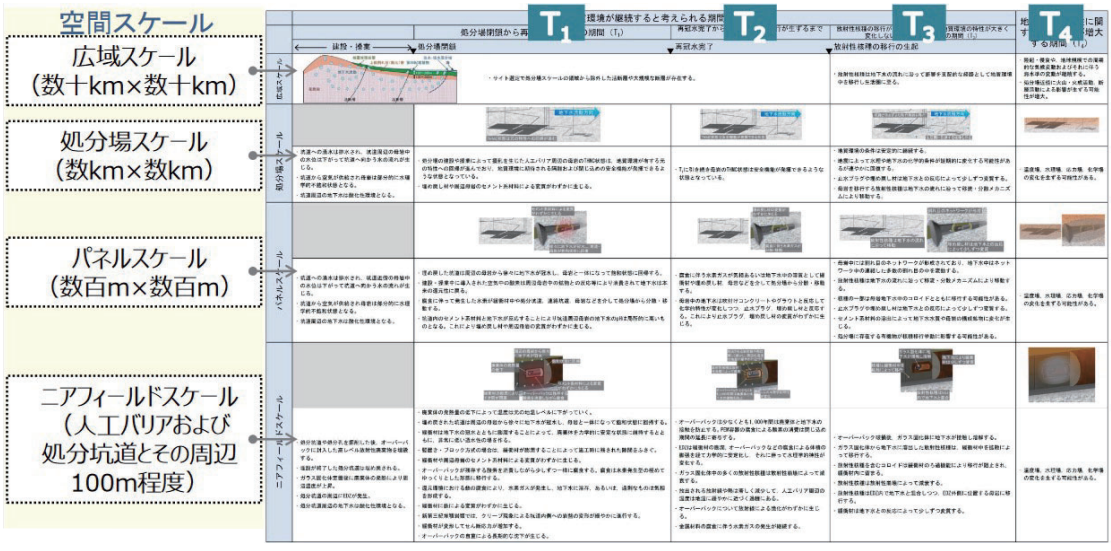
■ 安全評価シナリオの設定手順

NUMOの「包括的技術報告書」の本編、第6章の「閉鎖後長期の安全性の評価」に提示された安全評価の流れは、諸外国での安全評価手法や国際機関での安全評価への提唱などが多く導入されている。特に、NUMOが2008年以降に開発してきた「ストーリーボードを用いたトップダウンによる評価シナリオ設定手法*」が、セーフティケースのエビデンスと論拠構築に資する要素として全面的に採用されていることに特徴がある。

*「トップダウンによる評価シナリオ設定手法」は、従来の地層処分システムのFEP（特性、事象、プロセス）をベースにシナリオを構築していく「ボトムアップ手法」対して、処分システムの将来的な挙動のうち、安全確保に係る重要な挙動の理解を、ストーリーボードを用いてトップダウン的に評価シナリオとして設定する手法である。重要な挙動に見落としがないか、FEPを用いて照査するプロセスも導入する場合があり、このような手法はハイブリッドアプローチとも呼ばれている。

◆ 処分場のシステムとしての振る舞いに関する理解：図5-7に示すストーリーボードを用いて処分システムの空間スケールと経過の時間枠（T1, T2, T3, T4）に沿ってシステムの構成要素の状態変遷を記述する。この場合、状態変遷の理解に関する課題や不確実な事項についても記述する。

図5-7　状態変遷を把握するストーリーボード作成例



出典：原子力発電環境整備機構：閉鎖後長期の安全性の評価、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）長期安全評価、2021年6月30日

◆ 処分システムの安全機能（閉じ込め、隔離機能）の状態変遷と機能に影響を及ぼす要因（特性、事象、プロセス：FEP）の抽出：この時にFEPリストと照合し、落ちがないことを確認する。

◆ 安全機能への影響分析：例えば、時間の経過とともに発生するベントナイトの変質劣化の状態変遷が核種の閉じ込め機能に与える影響を解析し、その程度を把握する。ここでの解析に用いるモデルはプロセスモデルと呼ばれる。

◆ シナリオの設定：影響分析結果に基づき、基本シナリオ（地下水により放射性核種が人間の生活圏に移行する場合）、変動シナリオ、稀頻度事象シナリオ、人間侵入シナリオなどを設定。このシナリオ設定では、ストーリーボードにおける安全機能に与える影響が大きいFEPの組み合わせ（統合FEPと呼ぶ）を放射性核種の移行に沿ったストーリーとして構築することになる。この場合、シナリオに起因する不確実性とFEPが有する不確実性についても記述しておく必要がある。

◆ 各シナリオに対する解析ケースの設定：シナリオに基づく核種移行解析のためのモデル（プロセスモデルに対してアセスメントモデルと呼ばれる）化とパラメータを設定する考え方を記述。状態変遷の理解とシナリオ設定における不確実性をモデル設定とパラメータ設定でどのように扱うかに言及する必要がある。アセスメントモデルは、核種移行に重点をおき、保守性を導入した単純化されたモデルを設定し、パラメータ設定においても分布やバラツキを考慮して保守的に設定することになる（モデルやパラメータが本質的に有する不確実性も存在する）。

◆ 核種移行解析：評価モデルとパラメータ設定の考え方に基づき、作成したモデルを用いて核種移行解析を実施。同時に生活圏での核種移行を評価するモデルとパラメータも設定することで、定量的な被ばく線量とリスクを求める。生物圏の不確実性は、レファレンス生物圏という考え方を導入することで解析上は対応している。

◆ 放射線学的影響の推定：地層処分場からの放射線被ばくを求めているので、比較する対象は線量拘束値あるいはリスク拘束値となる。

ポイント

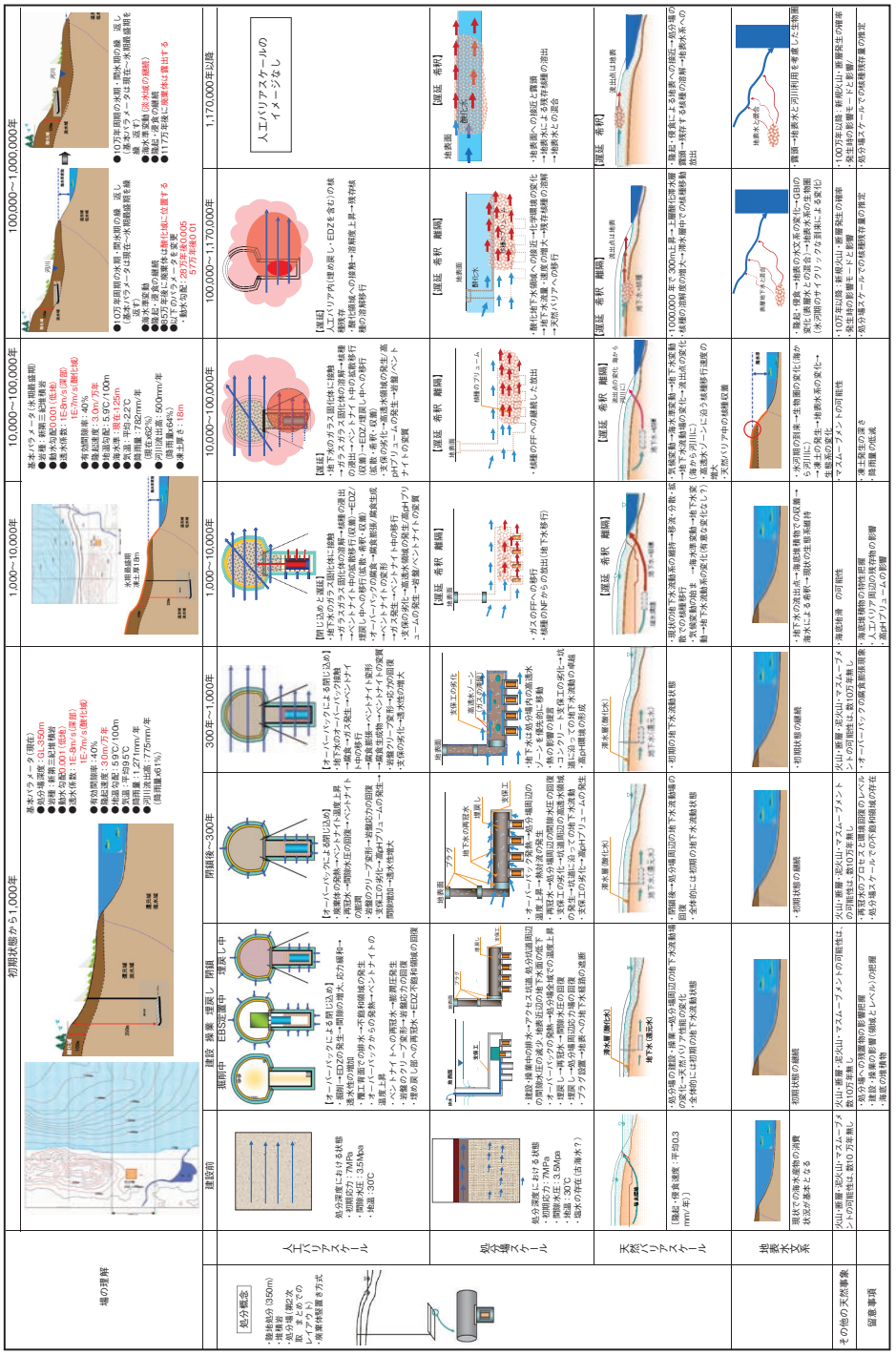
▶ NUMOの最新の安全評価の特徴

- **ストーリーボードを用いたトップダウンのシナリオ設定**
- **安全機能への影響分析（プロセスモデルの作成）**

参考 地層処分を対象としたストーリーボードの作成例

時間スケール（建設前～100万年）

ストーリーボード基本案



5 - 6

安全評価とセーフティケース

安全評価とセーフティケースとの関係はどのようになっているのか?

安全評価での最も大きな課題は、モデルを用いて計算した結果が直接的に実証（あるいは確認）できないことである。特に極めて長い期間に対する計算を行うために簡略化したモデルや保守性を考慮したパラメータの設定など、不確実性が増大する時間枠での対応への信頼感は大きくはならない。このため、安全評価の結果だけでは、地層処分の安全性に対する多くのステークホルダーの理解を得ることは難しい。

OECD/NEAが2004年に公表した報告書Post-Closure Safety Case for Geological Repositories, Nature and Purposeでは、安全評価とセーフティケースとの関係を「安全評価は、処分場の計画、建設、操業、閉鎖前まで、定期的に実施され、セーフティケースの作成と更新に使用される。」としている。

この文脈から、安全評価は、セーフティケースの定量的な論拠の一つとして活用されることになる。この報告書では、安全評価とセーフティケースの定義を以下のように引用している。

Box 1: 安全評価とセーフティケースの定義

出典：IAEA/NEA 地層処分に係る安全要件（ドラフト）DS154,2004

「安全評価」とは、安全機能を提供する施設やサイトの能力と施設に係る危険性（ハザード）について、技術的な要求への適合性を系統的に解析するプロセスである。

「セーフティケース」とは、地層処分施設の安全性及び安全性に対する信頼のレベルを説明するための定量化と実証に係る証拠と論拠を統合したものである。

出典：OECD/NEA: Post-Closure Safety Case for Geological Repositories, Nature and Purpose (2004)

2000年代に入り、地層処分の実施に向けて処分地選定業務を開始した国々では、上記の課題への対応として、「安全評価」だけではステークホルダーへの回答を準備することが困難であるとして（OECD/NEA RWMCでの議論：専門家の意見集約）、多面的なアプローチによる解決策が求められた。

当時、放射性廃棄物処分の分野以外で用いられてきていた「セーフティケース」という概念について議論され、地層処分の分野にも導入することが勧告された（OECD/NEA 2004年）。多くの課題に対し、事業申請を認可する規制側の理解が不可欠となることから、規制側の立場にあるIAEAは2012年に安全評価を基軸とするセーフティケースの枠組みを提示した。

■ セーフティケースとは

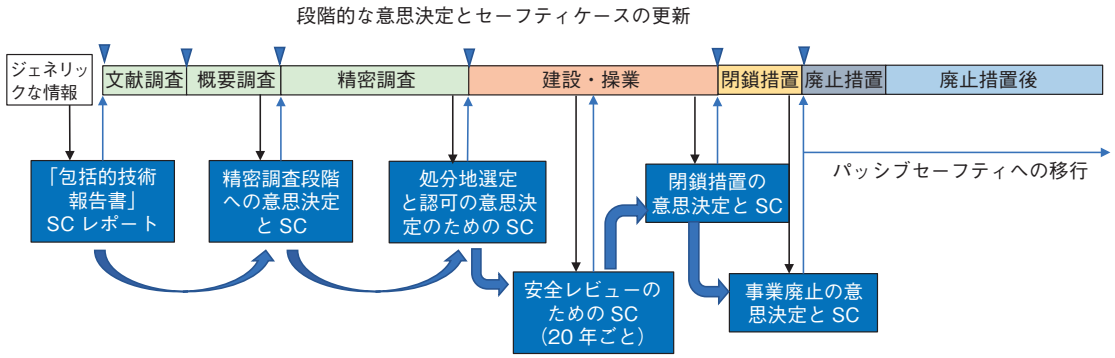
地層処分の分野で、「セーフティケース」という概念が紹介されたころ、「セーフティケース」を日本語でどのように訳するのかが議論となった。原子力学会では、OECD/NEAの定義から「安全を論じた文書」という主旨であるとの判断から、「安全文書」と訳することが提案された（日本原子力学会2014,「セーフティケース」の適切な日本語

は何か)。現在は、セーフティケースをあえて日本語訳とせず、そのまま使用している（例えば、NUMOの包括的技術報告書2021)。その背景には国際的にセーフティケースの概念が浸透してきたことも挙げられ、今では、「安全文書」の意訳は用いられることはない。

英語のセーフティケースという言葉の発祥は英国であるといわれているが、その語源は定かでない。英国では、鉄道の民営化が始まったときに、一つの線路を複数の鉄道会社が共同使用するといった状況が発生し、トラブルが多く発生した。ある鉄道会社が経営する鉄道が安全で便利であることを社会にPRするために「セーフティケース」という用語を用いて説明したことが始まりであるともいわれている。この鉄道会社は、セーフティケースとして運転手の教育、運行管理、車両整備、安全プログラムの整備などの具体的な手段を示すことで安全性を強調した。もともと、セーフティケースの「ケース」の意味は、Oxford Dictionary of Englishによると「討論や論争あるいは訴訟事件の一方の当事者を支援する一連の事実や論拠」とあり、いわゆる裁判を意味している。この意味からセーフティケースは"Multiple lines of evidence"とも呼ばれている。

地層処分におけるセーフティケースの最大の特徴は、処分事業の進展（あるいは段階）に伴い、繰り返し更新・改良されていく点にある。初期のセーフティケースには、知識や技術の不十分性から「不確実性」が多く含まれるが、調査や実証試験等により新たな知見が蓄積されることで不確実性が払しょくされていくことになる。最終的には処分場の閉鎖措置計画申請段階で、受動的安全性に移行するための判断根拠として更新されたセーフティケースが準備されることになる。

図5-8　処分事業の進展とセーフティケース(SC)の更新



ポイント

- **セーフティケースが必要となった背景:長期の安全性に関する理解と受容**
- **"Multiple lines of evidence"はセーフティケースの重要な要素**

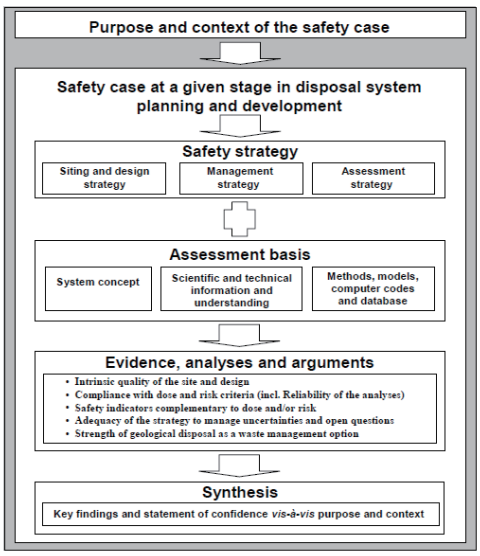
参考　OECD/NEAが提唱したセーフティケース（2004）

OECD/NEAは2004 年にセーフティケースに関する報告書 " Post-Closure Safety Case for Geological Repositories, Nature and Purpose"を公表した。

【背景】

OECD/NEA加盟国の間では、1990年代後半から本格化した地層処分候補地選定の活動に伴い、地層処分の安全性を公衆や地元住民に理解してもらうために、科学技術的な視点だけでなく、社会・制度的、環境倫理的な視点も含めた安全に関する論拠を準備することの重要性の議論が開始され、「セーフティケース」という概念が構築されてきた。本報告書は、セーフティケースの定義など議論されてきた事項を取りまとめている。後述するNUMOの包括的技術報告書は、図5-9に示す構造を採用している。

Figure 1. An overview of the relationship between the different elements of a safety case



【セーフティケースを構成する要素】

セーフティケースは、処分事業の各段階で繰り返し構築される。

- ◆ 安全方策（Safety strategy）：サイト選定方策、処分対策方策、評価方策
- ◆ 評価基盤（Assessment basis）：システム概念、科学・技術情報と理解、手法、モデル、解析コード、データベース
- ◆ エビデンス、解析、論拠（Evidence, analyses and arguments）：
  - ●サイトと設計に係る本質的な特質
  - ●線量やリスク基準の遵守（解析の信頼感）
  - ●線量やリスク基準を補完する安全指標
  - ●不確実性と未解決課題に対するメッセージ作成方策の適切性
  - ●廃棄物対策オプションにおける地層処分の強み
- ◆ 統合化（Synthesis）：目的や背景に対応した信頼感に係る主要な事実とメッセージ

図5-9　OECD/NEAにおけるセーフティケースの要素

出典：OECD/NEA：Post-closure Safety Case for Geological Repositories, Nature and Purpose (2004)

参考 IAEAが提唱したセーフティケース（2012）

IAEA は2012年に規制の観点からセーフティケースに関する報告書 “The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Guide No. SSG-23” を公表した。

【背景】

IAEAは、OECD/NEA加盟国を中心に議論され、整備されつつあるセーフティケースについて、規制基準の枠組みから「セーフティケースに関する特別な安全ガイド」を取りまとめた。

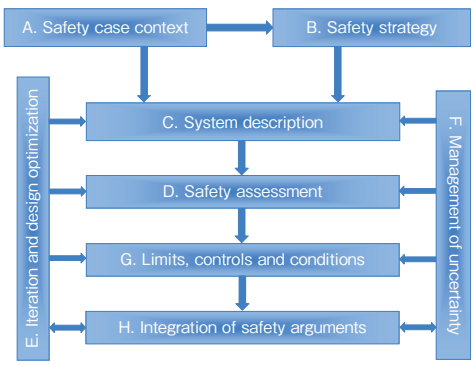
【セーフティケースに求められる役割】

- ◆ 閉鎖後における処分システムの性能とその挙動を理解していることを示すために、追跡性と透明性を確保しつつ構造的に関連する情報を統合化する。
- ◆ 処分システムの性能と挙動に係る不確実性を明らかにし、その不確実性の重要性を分析し、重要な不確実性への対応策を明示する。
- ◆ 処分施設は、人の健康と環境を保護する能力を確実に備えていることを合理的な範囲で示すことで長期の安全性を立証すること。
- ◆ 処分施設の開発における段階的な進め方での意思決定をサポートする。
- ◆ 対象となるコミュニティとの間で、処分施設に関係する課題について対話を促す。

【セーフティケースは事業の進展に伴い更新されていく】

— 概念構築段階
— サイト調査、サイト選定段階
— 設計・建設段階
— 操業・閉鎖段階
— 閉鎖後の段階

図5-10 IAEAが提唱したセーフティケースの構成要素



出典：IAEA：The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Guide No. SSG-23 (2012)

A. セーフティケースの背景
B. 安全戦略
C. システムの記述
D. 安全評価
E. 繰り返しと設計の最適化
F. 不確実性に対するマネジメント
G. 限界、制御と条件
H. 安全議論の統合化

5-7

地層処分に影響を及ぼす自然現象への対応

変動帯に位置する日本で、地層処分における地質環境の長期の安定性と自然現象の影響への対処方策はどのようなものか。

日本において地層処分を進める上で、一般公衆や専門家が最も関心を寄せるのが「自然現象の地層処分に与える影響」である。特に、火山・火成活動と地震・断層活動は、身近に発生する事象で、これまで多くの災害をもたらしてきたこともあり、地層処分ではどのように対応するのかが関心の対象となる。また、遠い将来ではあるが、確実に発生する隆起・侵食による廃棄物の地表面への接近についての扱いについて、隔離性の観点から注視される事象となる。

このような自然事象に関して、NUMOが2021年に公表した「包括的技術報告書」では、以下の方針で、安全機能が長期にわたって維持される地質環境を処分場サイトとして適切に選定することを示している。

①火山・火成活動，火山性熱水・深部流体の移動・流入，地震・断層活動，著しい隆起・侵食，第四紀未固結堆積物の分布，鉱物資源の存在により，明らかに適格性が劣ると判断される範囲をサイト選定段階で調査結果から除外
②自然現象の著しい影響を回避したサイトにおいては，閉じ込めの観点から地質環境特性を評価して明らかに適格性が劣る範囲を除外
③緩慢かつ累積的なプロセスが地質環境特性に及ぼす影響を考慮する必要があるため，過去から現在までの地質環境特性の時間的・空間的変遷を把握して，将来10万年程度を超えるような長期にわたって閉じ込めの観点から好ましい地質環境特性が安定に維持されることを確認
④将来10万年程度を超える期間においては，その発生可能性が極めて小さい場合であっても，処分場の安全機能に著しい影響を及ぼす可能性がある事象が想定される場合は，当該事象の発生とその地質環境への影響について，外挿や確率論による方法を組み合わせて評価したうえで，その不確実性の程度を把握

基本的には、自然現象が地層処分の安全確保策に著しい影響を与える範囲（第四紀火山や活断層の存在など）については、サイト選定段階で除外されることになり、閉じ込め性に影響を及ぼす自然現象については、その影響を評価したうえで範囲を特定することとなっている。

また、10万年を超える期間については、自然現象の発生する確率を求め、その影響をリスク論的（発生確率に対応した被ばく線量限度を考慮する）に評価するとともに、発生と影響に関する不確実性の程度を確率論的に評価する手法（ITM-TOPAZ手法）が整備されつつある。これらの手法の詳細については、包括的技術報告書を参照すること。

図5-11　自然現象が安全機能に与える影響

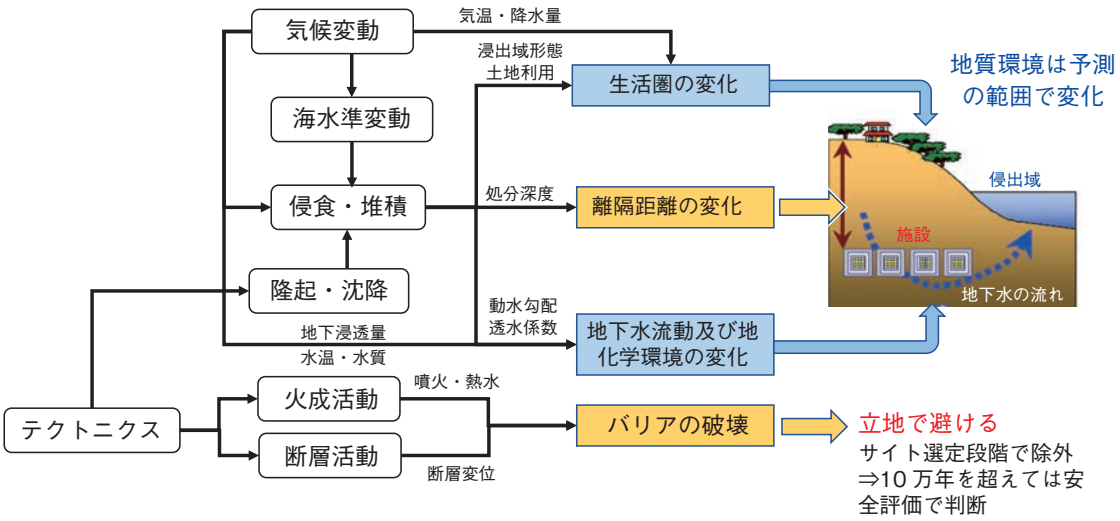


図5-12　隆起･侵食による処分場が地表に接近した場合の影響（サイトによっては基本シナリオとして対応）

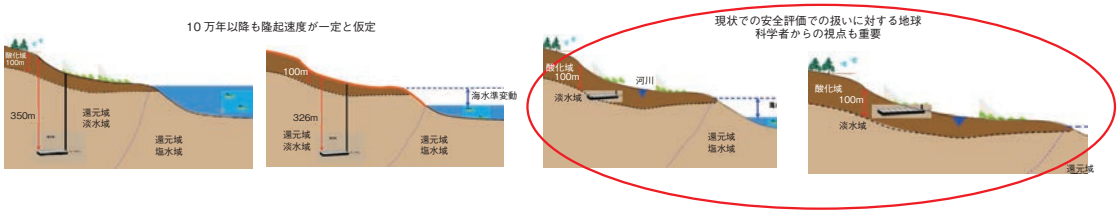


図5-13　火山活動による処分場直下での噴火の影響は稀頻度シナリオとして対応

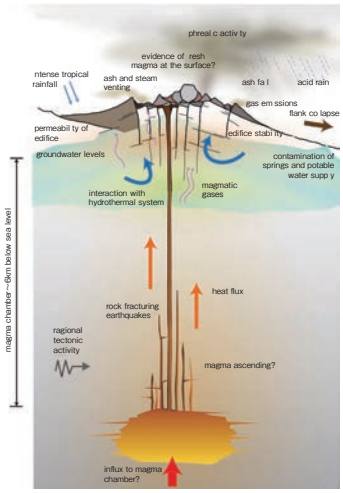
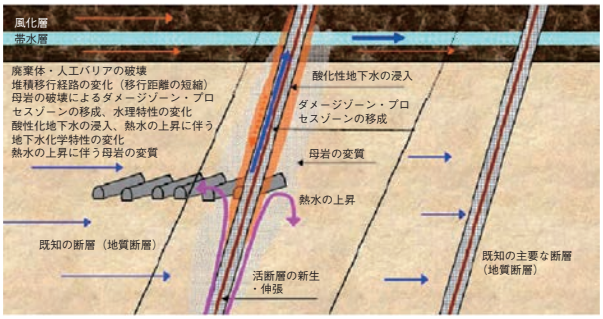


図5-14　処分場に新たな断層が発生した場合の影響は稀頻度シナリオとして対応



出典：河村他、原子力学会2016 秋の大会

ポイント

▶自然現象が地層処分に与える影響

▪ 火山･火成活動　▪ 地震･断層活動　▪ 隆起･侵食作用

これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート

第5章 地層処分の安全確保策と安全評価

問1 次の空欄を埋めなさい。

1	高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全確保策の基本は、　①　と　②　である。
2	多重バリアシステムは通常　①　と処分場の母岩と地質環境が提供する　②　から構成される。
3	処分システムの全体としての性能は、単一の安全機能に過度に依存せずに　①　によって安全を確保することが求められる。
4	地層処分における閉鎖後の　①　については、直接確認することができないことから、多くの前提と科学的な現象把握に基づく安全評価という手法が整備されてきた。この手法は、将来の人間への　②　な被ばく線量を求め、基準等との比較により安全性を判断する。
5	安全評価では、先ず廃棄体を含む　①　の状態変遷を分析し、安全評価上重要となる　②　を抽出し、その組み合わせから人間が受ける被ばくのプロセスを　③　として設定する。
6	OECD/NEAによる定義では、　①　とは、地層処分施設の安全性及び安全に対する信頼感のレベルについて記述し、定量化及び立証する　②　と　③　を統合したものである。
7	①　は、処分事業の展開に伴い得られる新たな情報と技術の進歩に伴い作成・　②　される。
8	NUMOは地層処分システムへの著しい影響を与えると判断される自然事象について、サイト選定時にその範囲を　①　すること、発生可能性が極めて小さい場合でも、処分場の安全機能に影響を及ぼす可能性がある事象については、　②　や確率論による方法で評価し、　③　の程度を把握することとしている。

問2 次の問で、正しいものには〇、間違っているものには×をつけなさい。

1 ☐ 高レベル放射性廃棄物の地層処分における長期の安全確保は、処分システムの単一の安全機能に依存することで達成できる。

2 ☐ 地層処分の長期的な安全性は直接確認することができないが、安全評価手法を導入することにより、将来世代の潜在的な被ばく線量を定量的に求め、基準値と比較することで将来世代の安全性を明示することができる。

3 ☐ セーフティケースとは、安全機能を提供する施設やサイトの能力と、施設に係る危険性について、技術的な要求への適合性を系統的に解析するプロセスである。

問3 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の構成要素と役割を300字程度で述べよ。

答え合わせ

第5章 地層処分の安全確保策と安全評価

問1	1	①隔離　②閉じ込め
	2	①人工バリア　②天然バリア
	3	①多重安全機能
	4	①長期安全性　②潜在的
	5	①処分システム　②特性・事象・プロセス（FEP）　③シナリオ
	6	①セーフティケース　②論拠　③証拠
	7	①セーフティケース　②更新
	8	①除外　②外挿　③不確実性

問2

1 ✕ 地層処分における安全確保は、人工バリアと天然バリアによる多重バリアシステムを採用し、単一のバリアの安全機能に過渡に依存せず、相互に補完しながら隔離と閉じ込め機能を維持する多重安全機能の考え方が採用されている。

2 ✕ 地層処分で用いる安全評価は、長期評価における不確実性を含む多重バリアシステムの状態変遷を推定し、放射性核種の人間の生活圏への移行量を単純化したモデルで定量的に求めるもので、その評価結果は、基準値との比較を行うものの将来世代の安全性について言及しているのではなく、多重バリアシステムの性能を評価したものである。

3 ✕ 問題文はIAEAによる「安全評価」の定義である。IAEAによればセーフティケースは、地層処分施設の安全性及び安全性に対する信頼のレベルを説明するための定量化と実証に係る証拠と論拠を統合したものと定義されている。

問3

【解答例】

高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全確保策は、ガラス固化体、ベントナイト緩衝材、鋼製オーバーパックからなる「人工バリア」と処分場周辺の母岩の地質環境特性からなる「天然バリア」を組み合わせた「多重バリアシステム」による隔離と閉じ込めを基本としている。

それぞれのバリアは、以下の特性を有する。

- ガラス固化体は安定して放射性核種を閉じ込める低溶出性を有する。
- ベントナイト緩衝材は、低透水性による拡散場を維持するとともに外力に対する応力緩衝性を有する。
- 鋼製オーバーパックは、初期の放射性核種の物理的な閉じ込め性を有する。
- 天然バリアは、長期的に安定した地質環境と本来的な物質を閉じ込める能力を有する（301文字）。

【解答に用いられるキーワードの例】

安全確保策、ガラス固化体、鋼製オーバーパック、ベントナイト緩衝材、人工バリアシステム、天然バリア、安全機能、隔離と閉じ込め、処分環境の長期安全性

参考文献 第5章 地層処分の安全確保策と安全評価

- Neil Chapman (2004), Safety Assessment and Safety Case, ITC lecture in Tokyo
- U.S. National Academies of Science (NAS) (1983), A Study for the Isolation System for Geologic Disposal of Radioactive Waste
- OECD/NEA 1985, Long-term Safety of Geological Disposal
- 核燃料サイクル開発機構※(1999)、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究会発第2次取りまとめ－　総論レポート(※現･日本原子力研究開発機構(JAEA))
- OECD/NEA (2004), POST-CLOSURE SAFETY CASE FOR GEOLOGICAL REPOSITORIES, NATURE AND PURPOSE
- 原子力発電環境整備機構(NUMO)(2011)、地層処分事業の安全確保(2010年度版)－確かな技術による安全な地層処分の実現のために、NUMO-TR-11-01
- 原子力安全委員会(2004)、放射性廃棄物の安全規制における共通的な重要事項について
- ICRP Pub 81 (1998), Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of long-lived Solid Radioactive Waste
- OECD/NEA (1991), Review of Safety Assessment Methods Disposal of Radioactive Waste
- IAEA (1989), Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High-Level Radioactive Wastes, Safety series No. 99
- IAEA (1981), Safety Assessment for the Underground Disposal of Radioactive Wastes, Safety Series No. 56
- IAEA (2011), Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Requirements SSR-5
- 原子力委員会バックエンド対策専門部会報告書(1997)、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について、平成9年4月15日
- 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律(最終処分法)(2000)
- 原子力発電環境整備機構(NUMO)(2021)、閉鎖後長期の安全性の評価、地層処分技術オンライン説明会(改訂した包括的技術報告書)長期安全評価、2021年6月30日
- U.S. NRC Web site, Risk and Performance Concepts in the NRC's Approach to Regulation
- 河村秀紀 (2009)、放射性廃棄物処分のセーフティケース構築におけるストーリーボードの適用性研究、京都大学博士論文
- IAEA (2012), The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Guide No. SSG-23
- 河村秀紀(2016)、放射性廃棄物地層処分における天然事象の確率論的影響評価手法の研究、原子力学会2016秋の大会
- 原子力発電環境整備機構(NUMO)(2021)、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－

第6章

地層処分の実現性に関する報告書

本章では、地層処分の実現可能性について示した海外の初期の報告書、及び日本における高レベル放射性廃棄物の地層処分の実現性を最初に示した「第2次取りまとめ」報告書、さらに最新のNUMOの包括的技術報告書の概要を学ぶ。

本節では以下の項目について学習する。

6.1 ● 地層処分の実現性を示した初期の報告書
6.2 ● 二つの代表的な処分概念
6.3 ● 日本における地層処分の技術的実現性
6.4 ● 日本における地層処分のセーフティケース

6-1

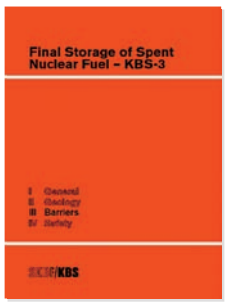
地層処分の実現性を示した初期の報告書

海外で1980年代に公表された地層処分の実現性を示した報告書はどのようなものだったか。

高レベル放射性廃棄物の地層処分の実現性に関して取りまとめられた報告書として、スウェーデンの処分実施主体であるSKB社が1983年に公表した「KBS-3 Report」とスイスの処分実施主体であるNAGRAが1985年に公表した「Project Gewähr（ゲベール）1985 Report」がある（※Gewährは「保証」を意味する）。この二つの報告書は、使用済燃料とガラス固化体の自国内での処分実現性について、1980年代に公表された技術報告書であり、黎明期にあった日本の地層処分研究に大きな影響を与えた。

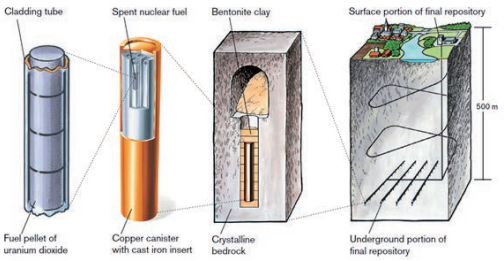
図6-1　スウェーデンSKB社が公表したKBS-3レポート

スウェーデン：SKB が 1983 年に公表した “KBS-3 Report”



4分冊からなるレポート（英語版）
Ⅰ：概要
Ⅱ：地質
Ⅲ：バリア
Ⅳ：安全

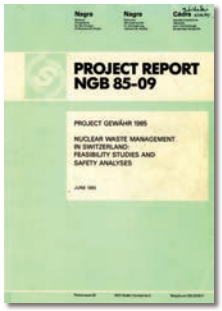
KBS-3は、KBS-1, KBS-2に引き続きSKBが作成した英文の報告書で、スウェーデンにおける地層処分概念の具現化、地層処分の進め方に大きな影響を及ぼした。



出典：SKB：Final Storage of Spent Nuclear Fuel-KBS-3 （1983）

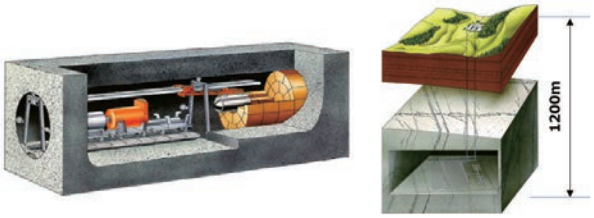
図6-2　スイスNAGRAが公表したProject Gewähr 1985の概要

スイス：NAGRA が 1985 年に公表した “Project Gewähr 1985”
“Gewähr”=「保証」



9分冊からなるレポート
85-01：スイスの廃棄物対策
85-02：放射性廃棄物の特徴
85-03～05：低レベル放射性廃棄物処分
85-06～08：高レベル放射性廃棄物処分
85-09：英語の要約版

Project Gewähr 1985は、NAGRAが作成した包括的技術報告書で、スイスでの地層処分概念を構築。第9分冊は、その内、閉鎖後の安全評価に焦点を当て言及している。



出典：NAGRA：Nuclear waste Management in Switzerland, Feasibility Studies and Safety Analysis (1985)

スウェーデン　KBS-3 Report

【背景】

スウェーデン議会は、スウェーデンの電力会社の原子力発電所の運転認可更新に当たり、原子力発電所の運転から発生する使用済燃料をスウェーデン国内で安全に処分できる方策を1983年までに示すことを求めた。電力会社から依頼を受けたSKB社（スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社）は、要求への回答として1983年にKBS-3 Reportを政府に提出した。

【概要】

スウェーデンに広く分布する結晶質岩を対象に、サイトを特定せずジェネリックな地質環境条件を用い、使用済燃料の特徴、長期に放射性物質を閉じ込める容器の概念、多重バリアによる安全確保の仕組みと処分場概念を構築し、核種移行による安全評価結果を提示することで、スウェーデン国内で使用済燃料の地層処分が実現できることを明示した。

【議会の承認】

スウェーデン議会は、1985年、KBS-3 ReportをOECD/NEAの専門家にレビューを依頼し、その結果を受け、原子力発電所の認可更新と国内での地層処分を推進することを決定した。

スイス Project Gewähr 1985 Report

【背景】

スイス連邦政府は、スイスの電力会社の原子力発電所の運転認可更新に当たり、原子力発電等から発生する放射性廃棄物を、スイス国内で安全に処分できる方策を1985年までに示すことを求めた。電力会社と国が出資して設立したNAGRA（放射性廃棄物管理共同組合）は、1985 年 12 月　に Project Gewähr 1985 Reportを政府に提出した。

【概要】

高レベル放射性廃棄物と低中レベルの放射性廃棄物をそれぞれ処分することとし、高レベル放射性廃棄物については、スイス北部に分布すると推定された結晶質岩を母岩とし、多重バリアシステムによるジェネリックな地層処分概念を構築した。

【議会の承認】

本レポートは外部専門家のレビュー、規制当局のレビューを受け、1988年に連邦議会の付加的条件付きで承認された。要求された付加的条件は、母岩として結晶質岩が国内に存在することであった。これに対し、NAGRAはスイス北部でのボーリング調査結果を用い、1991年にKristalion-1 Reportとして結晶質岩の存在を提示した。

ポイント

- 二つの評価書:KBS-3とGewähr 1985の特徴
- 二つの報告書作成の背景:原子力発電所の運転認可更新、政府と議会からの要求

6-2

二つの代表的な処分概念

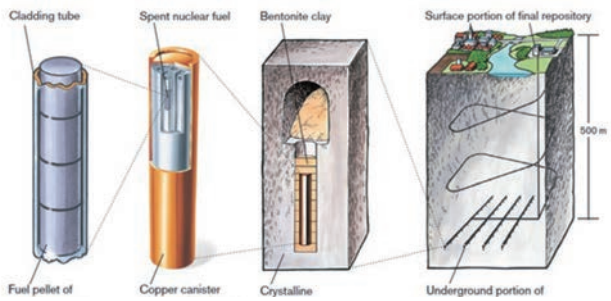
1980年代に海外で示された処分概念の特徴と相違。

スウェーデンとスイスが初期に開発した処分概念は、サイトを特定していないものの、両者とも結晶質岩を母岩としていた。

スウェーデンとスイスは、1980年代の初期に共同で廃棄物に関する研究を行っていた。当初は、ともに使用済燃料の再処理から発生するガラス固化体を処分の対象としていたが、スウェーデンは1980年初頭に使用済燃料を直接処分する方針に変更した。スイスは日本と同様、使用済燃料の再処理を海外（フランスと英国）に委託しており、返還ガラス固化体とTRU廃棄物を処分の対象としていたが、現在では、再処理の海外委託を停止し、返還ガラス固化体と使用済燃料の両方の地層処分概念を構築している。

スウェーデンのKBS-3 Reportとスイスの Project Gewähr 1985 Reportで示された処分概念は、結晶質岩を母岩とした天然バリアと人工バリアの多重バリアシステムを安全確保の基本としているが、それぞれの国の規制当局からの要件により人工バリアの設計性能は異なっている。

図6-3　スウェーデンKBS-3 Report の処分概念



上部坑道の掘削影響領域を避けて建設された処分孔（ピット）に高圧縮ベントナイトブロックを緩衝材とし、銅製キャニスタに格納された使用済燃料を竪置きに定置する概念

出典：SKB：Final Storage of Spent Nuclear Fuel-KBS-3　(1983)

図6-4　スイス Project Gewähr 1985 Reportの処分概念

処分坑道に高圧縮ベントナイトブロックと鋳鉄製オーバーパックに格納されたガラス固化体を横置きに定置する概念

パネル型処分場レイアウト

1200m

処分深度は、人工バリアシステムの熱解析（ベントナイトの100℃の制約）と推定地下水流量で設定

出典：NAGRA：Nuclear waste Management in Switzerland, Feasibility Studies and Safety Analysis (1985)

【KBS-3 Report】

銅製キャニスタに使用済燃料を収納し、処分坑道に設置された処分孔（ピット）に高圧縮ベントナイトブロックとともに竪置きする定置方式を採用した。耐腐食性の高い銅製キャニスタを採用した理由は、使用済燃料処分におけるヨウ素の瞬時放出に対して、規制当局から技術的に可能な限り長く容器に閉じ込めることが要求されたためであった（10万年程度の閉じ込め性）。キャニスタを竪置きとしたのは、処分ピットを機械掘削（シャフト・ボーリング・マシン）することにより、発破で建設された処分坑道の掘削影響領域を避け、母岩となる結晶質岩の大きな亀裂を避けるためであった。SKB社はこのKBS-3概念を現在も継続して用いている。

【Gewähr1985 Report】

機械掘削（トンネル・ボーリング・マシン）で建設することで掘削影響領域発生を抑制した処分坑道に、鋳鉄製のオーバーパックに格納されたガラス固化体を高圧縮ベントナイトとともに横置きに定置する概念を採用した。この概念は、グリムゼル試験サイトの建設におけるトンネル・ボーリング・マシンの建設実績をベースとし、掘削・埋戻し量の削減や定置の容易さから横置きを選択している。スイスの規制当局は、安全評価を通じての個人の被ばく線量防護基準（100μSv/年）を満足することを要求したことから、NAGRAは、ガラス固化体の低溶出性に着目し、鋳鉄製のオーバーパックで核分裂生成物の放射能が高い1000年間は完全に閉じ込め、その後多重バリアシステムでの閉じ込め（核種移行遅延）を行う仕組みを採用した。この処分坑道横置き概念は、施工方法は変更されたが現在も踏襲されている。

二つの処分概念は、金属製の容器への収納とその周辺へのベントナイト緩衝材の設置という人工バリアの構成は共通しているが、それぞれのバリアの設計要件が異なっている。スウェーデンでは、使用済燃料の瞬時放出を防ぐため、耐食性の高い銅製容器で長期の物理的な閉じ込めを確保し、スイスではガラス固化体の溶解度が律速となる放出を基本として天然バリアの核種移行を遅延させる効果を期待している。

1983年と1985年に二つの報告書が公表された後、二つの概念は、多くの国の地層処分概念構築に影響を与えた。日本では、1992年に動力炉･核燃料開発事業団（PNC、現JAEA）が、二つの概念を取り入れた「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書」（通称：第1次取りまとめ）で地層処分の技術的可能性を提示、1999年に、核燃料サイクル開発機構（JNC、現JAEA）が、日本における研究開発成果を「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－」として公表した。処分実施主体のNUMOは、この第2次取りまとめの処分概念も踏襲している。

ポイント

▶二つの報告書で示された処分概念

- **処分孔竪置き方式**
- **処分坑道横置き方式**

6-3

日本における地層処分の技術的実現性

日本における地層処分の技術的実現性を示した報告書はどのようなものか。

JNCが1999年に公表した「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－」は、以下に示す５分冊から構成されている。

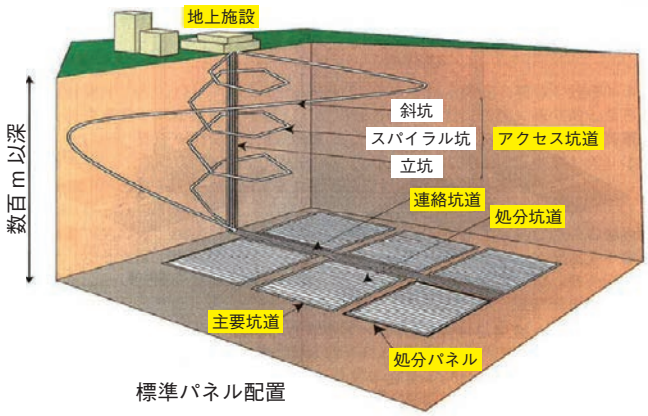
■ 総論レポート

■ 第１分冊：わが国の地質環境（花崗岩と第三紀堆積岩を代表岩種として設定）

■ 第２分冊：地層処分の工学技術（下図の二つの定置概念、40年でガラス固化体４万本を定置）

■ 第３分冊：地層処分システムの安全評価（地下水移行シナリオと接近シナリオ、評価の期間を設定しない被ばく線量評価）

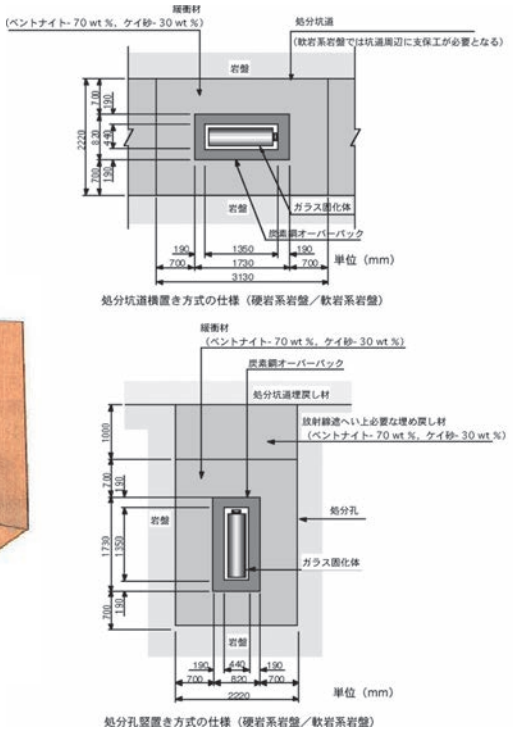
■ 第４分冊：地層処分の背景（なぜ地層処分が選択されたか等の背景情報）



標準パネル配置

図6-5　第2次取りまとめでの処分場概念

出典：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－(1999)
※現・日本原子力研究開発機構(JAEA)



人工バリア仕様：ベントナイト厚さは横置き、竪置きとも 70cm に設定

原子力委員会は、1994年に「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」を策定し、高レベル放射性廃棄物の処理処分について、「30年間から50年間冷却のための貯蔵を行い、その後、地下の深い地層中に処分することを基本的な方針とする」こととした。具体的には、2000年を目安に実施主体を設立するとし、地層処分の研究開発は、JNCを中核機関として関連機関が協力し進め、JNCはその成果を2000年前までに取りまとめ公表すること、国はその報告を受け、日本における地層処分の技術的信頼性を評価する、とした。

【概要】

第２次取りまとめは、JNCが1992年に公表した第１次取りまとめ（地層処分の技術的可能性を示した）を踏まえ、地層処分の技術的信頼性、及び処分候補地の選定と安全基準の策定に資する技術的拠り所を示すことを目標として取りまとめられた。報告書は、日本に広く分布する地層（結晶質岩と堆積岩）を対象に、多重バリアシステムによる安全確保を基本とした「ガラス固化体」４万本を処分する地層処分概念を構築し、地質環境の特性、人工バリアを含む処分場の設計、建設、操業、閉鎖の実現性、長期の安全評価手法とその結果を提示した上で、「地層処分が行える地質は我が国に広く存在する」「処分を行うことができるかどうかを評価する方法が開発された」「人工バリアや処分施設を設計・施工する技術が開発された」「長期間の安全性を予測的に評価する方法が開発された」とし、処分に向けて技術基盤が整ったと結論付けている。

【国の評価】

国は、国内外の専門家によるレビューを行い、報告書「我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価」を取りまとめ、「第２次取りまとめには、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が示されているとともに、処分候補地の選定と安全基準の策定に資する技術的拠り所となることが示されていると評価する。このことから、第２次取りまとめは地層処分の事業化に向けての技術的拠り所となると判断する」とした。これを受け、2000年に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（最終処分法）」が制定され、地層処分の実施主体となる原子力発電環境整備機構（NUMO）が設立された。

高レベル放射性廃棄物の発生に関連する原子力発電所を有する電気事業者は、その役割を果たすための研究開発として、地層処分の技術的信頼性を示すためのものだけでなく、事業として実際に行うための研究にも重点が置かれており、1999年に、2000年を目安とされた実施主体による一連の「処分事業」を机上で検討した結果を報告書「高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術」に取りまとめた。

ポイント

- **第２次取りまとめ作成の背景と結論：原子力委員会からの要求、日本での地層処分の実現性を関係する技術の存在を示すことで明示**
- **第２次取りまとめでの処分概念の特徴：結晶質岩と堆積岩を対象、ジェネリックなアプローチ**

6-4

日本における地層処分のセーフティケース

NUMOが2021年に公表した包括的技術報告書とはどのようなものか。

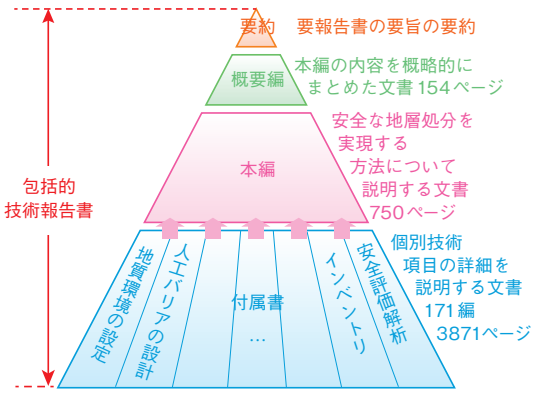
出典：原子力発電環境整備機構（NUMO）資料より作成

日本の処分実施主体であるNUMOは、2021年2月に「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－（以下「包括的技術報告書」）」を公表した。

この報告書は、1999年のJNCによる「第2次取りまとめ」以降の地層処分に関わる科学的知見や技術開発成果が蓄積されたことや、NUMOが安全な地層処分をどのように実現するかを社会に提示し信任を得ることの重要性を背景に、NUMOが地層処分の実施主体として、日本の地質環境において安全な地層処分を実現するための方法を説明し、技術的な取り組みの最新状況を取りまとめたものである。報告書は、安全な地層処分の実現に向けた技術や、それを支える科学的知見を「セーフティケース」として包括的に示している。

包括的技術報告書の構成

包括的技術報告書は、要約版（NUMO-TR-20-01）、概要編（NUMO-TR-20-02）、本編（NUMO-TR-20-03）及びその付属書から構成されている。また、包括的技術報告書を理解するための基本情報として、地層処分の安全性を説明するための考え方や、それが国際的に確立されてきた経緯、地層処分事業を進めていくなかでの包括的技術報告書の役割などについての解説「なぜ地層処分なのか」（NUMO-TR-20-04）が公表されている。



出典：原子力発電環境整備機構：包括的技術報告書の全体概要、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）総論、2021年5月13日

包括的技術報告書の概要

【1章】

本編の中核となる「セーフティケース」について、セーフティケース構築に至った背景及びセーフティケース作成の目的を説明。

【2章】

地層処分の安全確保のための基本的対策として以下を記載。

- 段階的な調査による好ましい地質環境を有するサイトの選定方針
- 十分な安全裕度を持たせた処分場設計
- 様々な不確実性を考慮した安全評価によって算出される影響が、許容できる範囲に収まるかどうかで安全性を判断し、収まらない場合には設計・サイト変更を実施する方針。

また、地層処分事業におけるマネジメントを紹介。

【3章】

日本の多様な地質環境を対象に、安全機能が長期にわたって維持される「地層処分に適した地質環境」を選定するための基本的な考え方や調査・評価技術を体系的に整理。また、日本の地質環境を考慮した、３種類の検討対象母岩（深成岩類、新第三紀堆積岩類及び先新第三紀堆積岩類）について、地下深部の地質環境の特徴を考慮した地質環境モデルを構築。

【4章】

日本に広く分布する三種類の検討対象母岩の地質環境モデルを対象として、人工バリアや処分場レイアウト等の処分場の設計を試行し、設計の考え方を実際のサイトにどのように適用するのかを提示。

【5章】

廃棄体の地上での輸送から地下施設での廃棄体の定置までの操業工程を対象として、閉鎖前の安全性の評価を実施。平常状態シナリオでは廃棄体受入・検査・封入施設からの公衆の被ばく線量を評価。異常状態シナリオでは、施設で事故や火災等の異常状態の発生を想定し、影響伝搬を考慮したイベントツリーを用いて廃棄体からの放射性核種の放出可能性を評価。

【6章】

三つの検討候補母岩である深成岩類、新第三紀堆積岩類及び先新第三紀堆積岩類を対象として、第４ 章において設計した処分場に対し、処分場閉鎖後の長期的な安全性の評価を実施。発生する可能性が極めて小さい安全評価シナリオを想定した解析を含めて、国際機関の勧告に基づいて設定しためやすの線量を下回る結果。また、稀頻度事象シナリオと人間侵入シナリオに対する被ばく線量評価も実施し、国際的指針に基づいて設定しためやすとなる線量の幅の中に入ることを確認。

【7章】

サイト選定の各段階でセーフティケースとして統合化する方法と残された不確実性への対応についての考え方について記述するとともに、信頼感醸成に向けての品質保証等のマネジメント活動についての現状を紹介。

ポイント

▶包括的技術報告:サイトを特定しない一般的なセーフティケース

▪ サイト調査の進め方　▪ 安全な処分場の設計･建設･操業･閉鎖　▪ 閉鎖後の長期間にわたる安全性確保

これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート

第6章 地層処分の実現性に関する報告書

問1 次の空欄を埋めなさい。

1 スウェーデンの実施主体であるSKB社は、1983年に　①　の処分を対象とした安全評価書　②　を公表し、またスイスの実施主体であるNAGRAは1985年に　③　の処分を対象とした安全評価書　④　を公表した。

2 これらの安全評価書作成の背景には、ともに　①　の操業認可更新の条件として、自国内での高レベル放射性廃棄物の地層処分の　②　の明示が求められていた。

3 これらの安全評価書は、サイトを特定せずに、自国内に分布する地質環境を対象として、　①　による安全確保の仕組みと処分場概念を構築し、核種移行による安全評価結果を提示することで、地層処分に適した　②　の存在、及び現状技術での処分の実現性を示した。

4 SKB社のKBS-3 Reportの処分場概念は、スウェーデン国内に広く分布する　①　を対象として　②　を銅製の　③　と呼ばれる容器に格納した廃棄体を処分孔に1本ずつ竪置きし、その周辺に　④　を緩衝材として設置する方式である。

5 NAGRAのProject Gewährの処分概念は、スイス北部の堆積岩の下部に分布する　①　を対象に、再処理から発生した　②　を　③　製の　④　に格納した廃棄体を処分坑道に横置きし、周辺に　⑤　を設置する方式である。

6 核燃料サイクル開発機構（JNC、現日本原子力研究開発機構JAEA）が1999年に公表した　①　は、高レベル放射性廃棄物の地層処分を進めるとした国の方策に基づき、約30年間の研究成果を取りまとめ、日本の　②　な地質環境を対象に地層処分の　③　を明示した最初の安全評価書である。

7 日本の地層処分の実施主体であるNUMOは、1999年の　①　の報告書以降の20年間の科学的知見・技術開発成果の蓄積や、安全な地層処分の実現を社会に提示し信任を得ることの重要性を背景として、日本の地質環境において安全な地層処分を実現するための方法を説明し、技術的な取り組みの最新状況を取りまとめた　②　を2021年に公表した。

問2 次の問で、正しいものには〇、間違っているものには×をつけなさい。

1 □ 原子力発電所の操業認可更新の条件として、スウェーデンSKB社が作成したKBS-3 Reportは使用済燃料を対象に自国内に分布する結晶質岩での地層処分の技術的実現性を明示したもので、国内外のレビューを受けたのちに、母岩としての結晶質岩の存在を提示することを条件として議会承認された。

2 □ KBS-3では、使用済燃料を銅製のキャニスタに格納した廃棄体を処分孔に竪置きする処分概念を選択し、Project Gewähr1985ではガラス固化体を鋳鉄製オーバーパックに格納して処分坑道に横置きする概念を採用している。

3 □ 2021年に公表されたNUMOの包括的技術報告書では、日本の地質環境を考慮した、2種類の検討対象母岩（結晶質岩、堆積岩）について、地下深部の地質環境の特徴を考慮した地質環境モデルを構築している。

問3 核燃料サイクル開発機構が1999年に公表した「第2次取りまとめ」報告書の位置づけと概要について300字程度で述べよ。

答え合わせ

第6章 地層処分の実現性に関する報告書

問1	1	①使用済燃料　②KBS-3　③ガラス固化体　④Project　Gewähr1985
	2	①原子力発電所　②技術的実現性（処分に適した母岩の存在、処分場概念の実現性）
	3	①多重バリアシステム　②母岩
	4	①結晶質岩　②使用済燃料　③キャニスタ　④ベントナイト緩衝材
	5	①結晶質岩　②ガラス固化体　③鋳鉄　④オーバーパック　⑤ベントナイト緩衝材
	6	①第2次取りまとめ　②ジェネリック　③技術的信頼性
	7	①第2次取りまとめ　②包括的技術報告書

問2

1 ×

SKB社が提出したKBS-3レポートは、自国内での地層処分の実現性が明示されたとして議会の承認を得ることができた。一方、NAGRAのProject Gewährでは、低中レベルの地層処分に関しては技術的実現性があると評価され承認されたが、ガラス固化体の地層処分については、対象としたスイス北部の堆積岩の下部に花崗岩が存在するという証拠が十分でないと判断され、議会では、存在することを明確に示すことを条件に承認された。結晶質岩の存在は、その後のボーリング調査で確認され、1991年にKristaline-1という安全評価で提示された。この調査を通じて、堆積層に処分に適していると推定される地層（OPA:オパリナス粘土）が発見され、その後の検討はOPAにシフトしていった。

2 ○

スウェーデンの実施主体であるSKB社は使用済燃料の容器として銅製キャニスタを、スイスの実施主体であるNAGRAがガラス固化体の容器として鋳鉄製のオーバーパックを選択している。なお、スウェーデンで銅製キャニスタを選択した理由は、使用済燃料に含まれるヨウ素の瞬時放出をできる限り長く物理的に防ぐべきとする規制要件に適合するためであり、一方、スイスの実施主体であるNAGRAがガラス固化体の容器として鋳鉄製のオーバーパックを選択した理由は、システム全体で放射性核種移行量を基準内とする規制要件であったことによる。NAGRAによれば、実際の寿命は10,000年と予想されるとしたうえで、キャニスタの最短設計寿命を1000年としている。

3 ×

NUMOの包括的技術報告書では、3種類の（深成岩類、新第三紀堆積岩類及び先新第三紀堆積岩類）検討対象母岩を対象として地質環境モデルを構築している。1999年の核燃料サイクル開発機構による第2次取りまとめでは結晶質岩と堆積岩の2種類の母岩を対象とした処分概念を検討していた。

問3

【解答例】

1999年にJNCが公表した第2次取りまとめは、1994年の原子力長期計画で示された高レベル放射性廃棄物地層処分の基本的な方針に従い、技術的な信頼性、処分予定地の選定と安全基準策定の拠り所を示すことを目的に作成された。第2次取りまとめでは、日本に広く分布する結晶質岩と堆積岩を対象に、多重バリアシステムを安全確保の基本とした人工バリアや処分場概念構築に係る技術的実現性を明示し、安全評価による長期安全性確保の見通しが示された。国内外専門家によるレビュー結果を受け、国は地層処分の実現に向けての技術的基盤が整備されたと判断し、2000年に最終処分法を制定し、地層処分の実施主体であるNUMOを設立した（300文字）。

【解答に用いられるキーワードの例】

原子力長期計画（1994）、技術的信頼性、結晶質岩と堆積岩、多重バリアシステムによる安全確保、人工バリア、地層処分場、安全評価、専門家レビュー、最終処分法

参考文献 第6章 地層処分の実現性に関する報告書

- SKB (1983), Final Storage of Spent Nuclear Fuel-KBS-3
- NAGRA (1985), Nuclear Waste Management in Switzerland, Feasibility Studies and Safety Analysis, Project Gewähr 1985
- NAGRA (1994), Conclusions from the regional investigation programme for siting a HLW repository in the crystalline basement of Northern Switzerland, Kristallin-1 Report, Nagra NTB 93-09E / 93-09 (1994)
- 核燃料サイクル開発機構※(1999)、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究会発第2次取りまとめ－総論レポート－(※現･日本原子力研究開発機構(JAEA))
- 原子力委員会(1996)、原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画
- 電気事業連合会、電力中央研究所(1999)、高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化検討、事業化電共研レポート
- 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律(最終処分法)(2000)
- 原子力発電環境整備機構(NUMO)(2021)、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－
- 原子力発電環境整備機構(NUMO)(2021)、包括的技術報告書の全体概要、地層処分技術オンライン説明会(改訂した包括的技術報告書)総論、2021年5月13日

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－

前章までの地層処分の安全原則や安全確保策に関する日本を含む世界各国の取り組み状況の学習を踏まえ、本章ではNUMOが2021年2月に公表した包括的技術報告書を取り上げ、現時点における日本における地層処分の安全確保策に関する最新となる取り組みについて学習する。

本節では以下の項目について学習する。

7.1 ● 包括的技術報告書で示されたセーフティケースとその役割
7.2 ● 地層処分に適した地質環境の選定とモデル化
7.3 ● 地層処分場の設計
7.4 ● 処分場の閉鎖前の安全性
7.5 ● 処分場閉鎖後の長期安全性

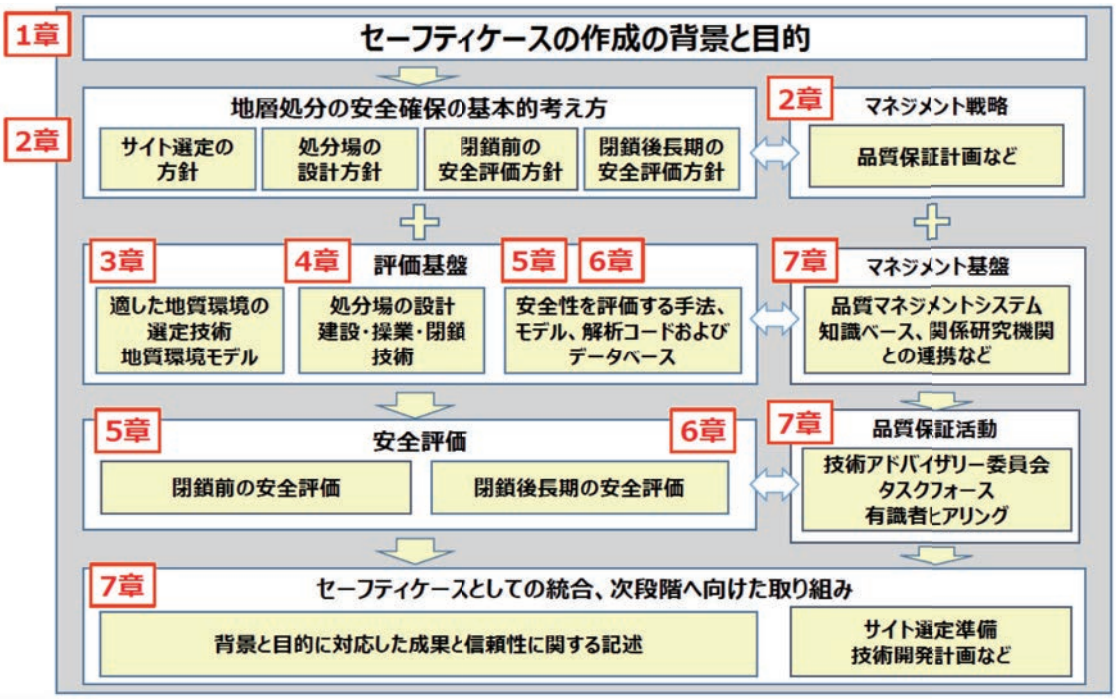
7-1

包括的技術報告書で示されたセーフティケースとその役割

NUMOの包括的技術報告書のセーフティケースとしての役割とは何か?

NUMOが公表した「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－（以下「包括的技術報告書」という）」は、OECD/NEAの報告書に示されているセーフティケースの構造を参照して図 7-1のように構成されている。最初にセーフティケースの背景と目的を示した上で、地層処分の安全性をどのように確保するのかの基本的考え方を、サイト選定、処分場設計、処分場の閉鎖前・閉鎖後の安全評価、及びマネジメントの考え方の観点から示している。次に、安全確保の基本的考え方に対応して、サイト選定、処分場設計、安全評価のそれぞれについての方法論、技術、解析モデルやデータなどの「評価基盤」が示される。評価基盤を用いて処分場の閉鎖前と閉鎖後の安全評価が実施され、最後に評価基盤と安全評価によって得られた結果を総括し、セーフティケースとしての信頼性確保が論じられる。

図7-1　包括的技術報告書のセーフティケースの構造にそった構成



出典：原子力発電環境整備機構：包括的技術報告書の全体概要、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）総論、2021年5月13日

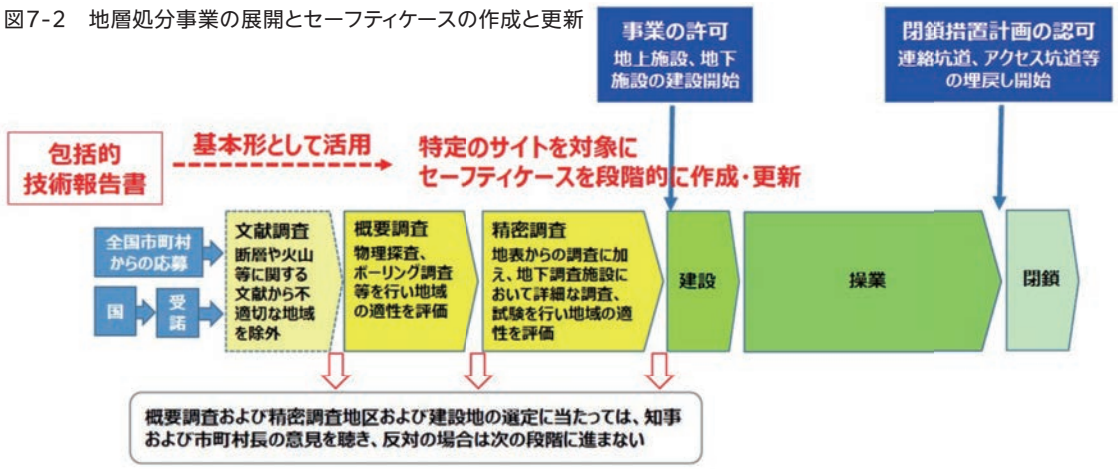
【包括的技術報告書の役割と作成の目的】

NUMOは、処分事業の進展に伴い、その時点の最新の科学技術的知見に基づいて「なぜ安全な処分場を構築できるといえるか」を社会に対して説明するものとしてセーフティケースを作成・更新していくとしている。図 7-2に示す事業の各段階において、セーフティケースは様々なステークホルダーと対話を行う際の材料として用いられる。包括的技術報告書は、サイトが特定されていない段階のセーフティケースであるが、今後、サイトが特定された後のセーフティケースの基本形としての枠組み・技術的基盤が示されている。

【セーフティケースのマネジメント】

段階的にサイトの地質環境の調査・評価、処分場設計、安全評価を繰り返し、セーフティケースを作成することで、地層処分の信頼性が向上し地層処分の安全性が確保される。地質環境の調査・評価、処分場設計、安全評価の一連の作業は、相互に密接に連携することが必要である。NUMOは事業期間を通じてこれらを適切に行うために、政策・社会制度・安全規制などに係わる要件のマネジメント、セーフティケースに係わる知識・情報・データの保存と伝承、最新の知識の適用を可能とする知識マネジメント、技術的信頼性を確保するための品質マネジメント、世代を超えて人材を確保・育成するための人的資源のマネジメント、継続的な課題解決のための技術開発のマネジメントといった総合的なマネジメントシステムを構築していく。

図7-2　地層処分事業の展開とセーフティケースの作成と更新



出典：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－（第7章）

ポイント

- **セーフティケースはその時点の最新の科学技術的知見に基づいて「なぜ安全な処分場を構築できるといえるか」を社会に対して説明し、対話をする土台**
- **包括的技術報告書は、「サイトが特定されていない段階におけるセーフティケース」として作成。特定のサイトにおいて調査が進めば、包括的技術報告書を基本形にした、そのサイトを対象としたセーフティケースを作成**

7-2

地層処分に適した地質環境の選定とモデル化

地層処分に適した地質環境をどのように選定し、モデル化するのか？

【サイト選定の基本的考え方】

放射性廃棄物を岩盤により隔離し、人工バリアと天然バリアからなる多重バリアシステムによって閉じ込めることができるようにするとともに、自然現象などの影響を回避して処分場の建設や操業が安全に実施できるよう、「地層処分に適した地質環境」を適切に選定することが重要である。

NUMOは国の審議会である地層処分技術WGのとりまとめ等を踏まえて、以下のように処分場閉鎖前と閉鎖後の地質環境の要件を整理している。

- ■ 処分場の選定から建設・操業・閉鎖に至る一連の作業の安全確保の観点
- ■ 処分場閉鎖後の、隔離・閉じ込めの基本概念を達成するための安全機能の長期的な維持の観点

表7-1　閉鎖前の地質環境に求められる要件及び影響要因

地質環境に求められる要件	影響要因※1
母岩が第四紀の未固結堆積物ではないこと	深度300m以上の深さにおける第四紀の未固結堆積物の分布…①
地下施設の安全性や施工性に影響を及ぼす事象が発生する可能性が小さいこと	地熱・温泉※2、膨張性地山、山はね、泥火山、湧水、有毒ガス、地震などの発生…②
地上施設の安全性を損なう事象が発生する可能性が十分に小さいこと	火砕物密度流、溶岩流、岩屑なだれなどの発生…③
地上施設の安全性に影響を及ぼす事象が発生する可能性が小さいこと	軟弱地盤の分布、地盤の変形・変位、地震、津波、地すべり、土石流、洪水などの発生…④

※1 ①～④のそれぞれの影響要因に対するサイト選定上の対応方針は3.1.2項に示す。
※2 地中から湧出する温・熱水を指す。

出典：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－（第3章）

表7-2　閉鎖後長期の地質環境に求められる要件

基本概念	安全機能	地質環境に求められる条件
隔離	自然現象の著しい影響からの防護	廃棄体を人間の生活環境に接近あるいは露出させるような著しい影響を及ぼす自然現象が生じないこと
	人間接近の抑制	現在認められている経済的価値の高い鉱物資源が存在しないこと
閉じ込め	放射性物質の溶出抑制 および 放射性物質の移行抑制	熱環境：地温が100℃を大きく超える期間が長期にわたって継続し、緩衝材の熱変質（イライト化）による機能喪失を招かないようにするため、「地温が低い」こと
		水理場：地下水流動に伴う放射性物質の移行時間を増大させ、その間の放射性崩壊により以降率を低減させるため、動水勾配が小さいまたは岩盤の透水性が低いことにより「地下水流動が緩慢である」こと
		力学場：オーバーパックの破損を招かないようにするため、圧縮強さや弾性率が大きく、クリープ変形などが小さいことにより「岩盤の変形が小さい」こと
		化学場：ガラスの溶解、炭素鋼オーバーパックの局部腐食および不動態化、緩衝材の変質、緩衝材および岩盤の収着能の低下、放射性物質の溶解度の増加を抑制するため、地下水は「高pHあるいは低pHではない」、「酸化性雰囲気ではない」、「炭酸化学種濃度※が0.5mol/L以上とならない」こと

※ 溶液中に溶存している無機炭素（炭酸塩、炭酸水素塩、炭酸、二酸化炭素）の合計の濃度を指す。

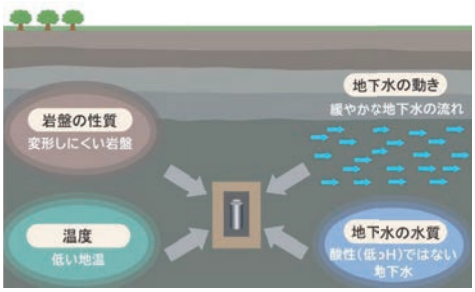
出典：原子力発電環境整備機構：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現
－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－（第3章）

【サイト選定の進め方】

地層処分にとって好ましいとされる地質環境については、低い地温、緩やかな地下水の流れ、変形しにくい岩盤、酸性でない地下水などの、熱環境、水理場、力学場、化学場の条件として整理される（図7-3）。

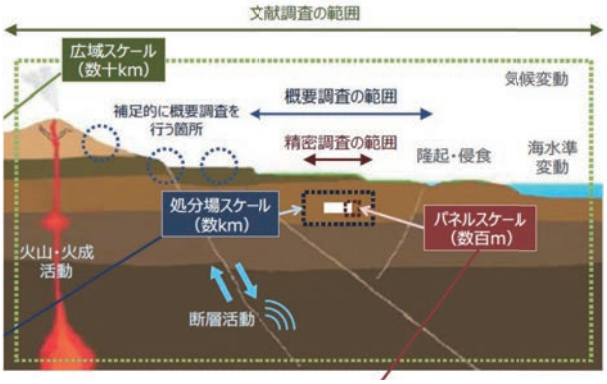
サイト選定においては、地質環境特性とその長期変遷を調査により把握し、それを将来の擾乱の可能性も含めた処分場の設計や安全評価を行うための情報として用いる。このため、調査によって得られた情報やデータを統合して、処分場の設計や安全評価に適合するよう階層化した空間的スケール（図7-4）で地質環境モデルが作成される。

図7-3　地層処分にとって好ましい地質環境



出典：原子力発電環境整備機構：地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）地質環境、2021年6月16日

図7-4　サイト調査の範囲と地質環境モデルのスケールとの関係



出典：原子力発電環境整備機構：地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）地質環境、2021年6月16日

◆ 広域スケール：処分場スケールの地質環境特性に影響を与える自然現象を考慮する範囲
◆ 処分場スケール：地下深部における閉じ込めの観点から好ましい地質環境特性とその長期的な安定性を確認する範囲
◆ パネルスケール：処分場スケールの領域において実際に処分区画を設置し母岩の核種移行・遅延特性や人工バリアの形状に影響を及ぼす地質環境特性を詳細に調査する範囲

文献調査、概要調査、精密調査の各段階では次のような調査・評価の進め方が示されている。

◆ 文献調査の段階：応募等区域及びその周辺地域を対象に、自然現象の著しい影響の回避などの観点から、概要調査地区としての適格性が明らかに劣る範囲を除外するとともに、広域スケールの地質環境モデルを構築し、その結果を踏まえて概要調査地区を選定
◆ 概要調査の段階：概要調査地区及びその周辺の地域において、一連の調査・評価を通じて概要調査地区としての適格性の評価結果の妥当性を確認するとともに、広域・処分場スケールの地質環境モデルを更新・構築し、地質環境特性とその長期変遷の評価に加え、環境影響や経済性の観点も考慮して精密調査地区を選定
◆ 精密調査の段階：精密調査地区において、地表からの調査や地下調査施設での試験を通じて、候補母岩の特性に係る不確実性の低減とともに、処分場・パネルスケールの地質環境モデルの詳細化を図り、閉鎖後長期の安全評価の結果を踏まえて候補母岩の地層処分への適性を確認

【検討対象母岩のモデル化】

サイト選定のそれぞれの段階では、地質環境調査を通じて取得した様々な地質環境情報を処分場の設計や安全評価に利用可能な形で整理し、地質環境の理解や不確実性の種類や程度などの認識を共有することが重要であり、そのための地質環境特性の現状を可視化した地質環境モデルを構築し地質環境特性の長期変遷をモデル化する。NUMOは、特定のサイトを対象としていない今回の報告書において、今後のサイト選定で対象となる可能性のある地質環境を類型化し「検討対象母岩」を設定してその地質環境モデルを提示した。

検討対象の母岩は、日本に分布する岩種を分類し、候補として可能性が低い第四紀の岩盤を除外、処分場設計や安全評価の観点から重要な特性を整理するなどして、以下に示す３種類を母岩として選定している。

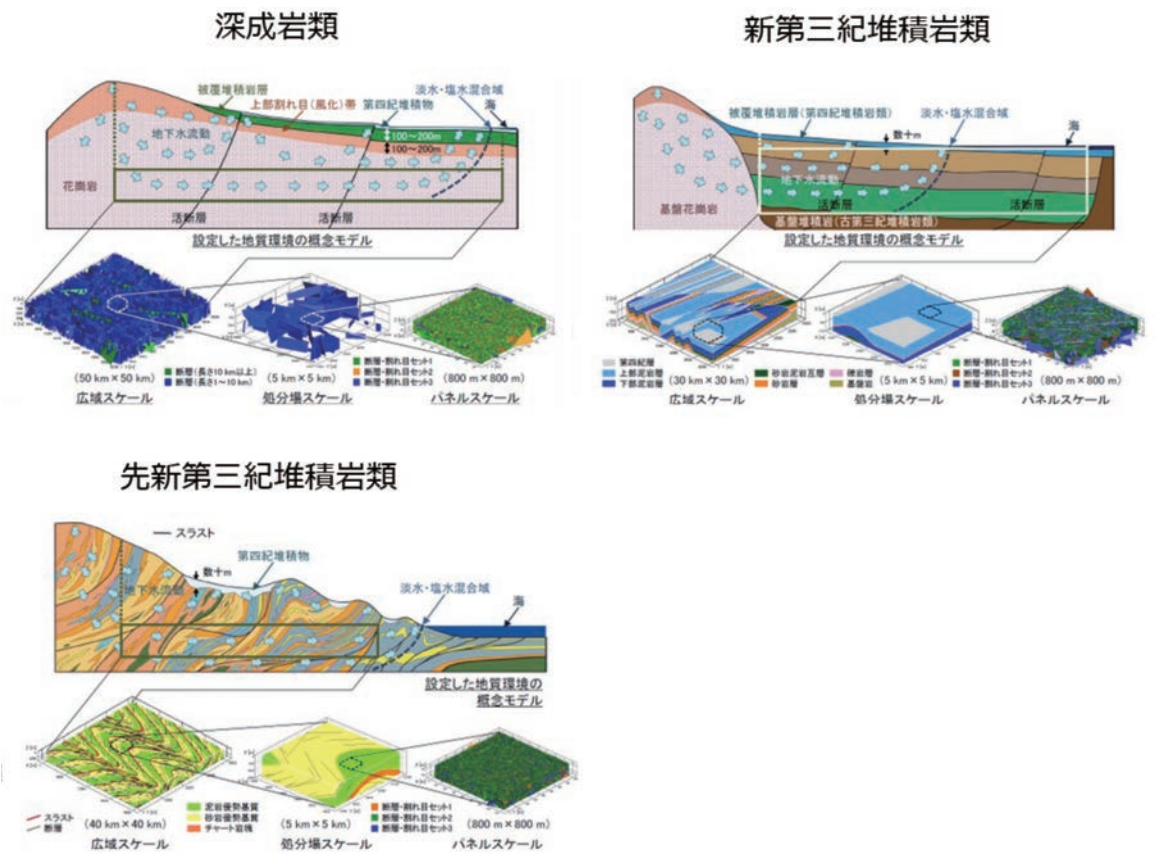
■ 深成岩類(主に花崗岩類)
■ 新第三紀堆積岩類
■ 先新第三期堆積岩類(付加体)

深成岩類と新第三紀堆積岩類は第２次取りまとめなどでも閉じ込めの観点で好ましい地質環境を有すると評価されている。また、先新第三紀堆積岩類も日本列島の基盤岩として重要であり、地下深部の地質環境の半分程度を占めていると推定される。固結度が高く硬質であり、水みちの構造や力学強度などの特性は深成岩類と類似した特徴を有するなど、同じ堆積岩でも新第三紀堆積岩類とは異なる地質学的特徴を有する。

地質環境のモデル化では、岩体や地層の規模、地下深部における断層・割れ目の卓越方位、長さ、分布密度に加え、岩盤基質及び断層・割れ目の透水係数などを考慮して、空間スケールに

応じた地質構造モデル及び水理地質構造モデルを構築している（図7-5）。併せて、放射性物質の移行・遅延を支配する微細透水構造を概念モデル化するとともに、地下水水質及び岩盤の熱的・力学的特性のモデル化も行われている。包括的技術報告書では、作成した３種類の母岩の地質環境モデルを用いて、処分場設計と安全評価を実施している。

図7-5　地質環境モデル（地質構造モデルの例）



出典：原子力発電環境整備機構：地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）地質環境、2021年6月16日

ポイント

- **地層処分に適した地質環境：地温、地下水の動き、岩盤の力学特性、地下水の化学特性**
- **評価の三つのスケール：広域スケール、処分場スケール、パネルスケール**
- **地質環境モデルの対象母岩：深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類**

7-3

地層処分場の設計

ガラス固化体とTRU廃棄物の地層処分場はどのような考え方で設計されているのか?その具体例は?

NUMOは包括的技術報告書において、3種類の検討対象母岩の地質環境モデルを対象とした処分場の設計を行い、多様な地質環境に対して、地下深部に放射性廃棄物を隔離・閉じ込める安全機能を確保した処分場の仕様例を示している。

【処分場設計の考え方】

NUMOは、設計によって処分場に持たせようとする性質と能力を「設計因子」として設定することで、異なるサイト・事業段階においても汎用的に適用可能となるように、設計因子を基軸とした処分場の設計の考え方を適用している。

【処分場の設計フロー】

最初に5つの設計因子（閉鎖後長期の安全性、閉鎖前の安全性、工学的実現性、回収可能性、経済的合理性）に対して処分場に必要な要求事項を設定する。次に処分概念と処分場の構成要素を設定し、構成要素ごとに要求事項を満たすために必要な性能が確保されるように設計要件が設定される。そのうえで、設計要件を満たすように人工バリア、地下施設及び地上施設の設計を実施している。これらの一連の検討に基づき設計された処分場に対し、処分場の閉鎖前及び閉鎖後長期の安全評価を実施し、所要の安全性の確保が困難と判断されれば設計の見直しが行われる。地質環境特性に関する情報・データに係る不確実性を考慮して、設計では安全性に対して裕度をもたせている。

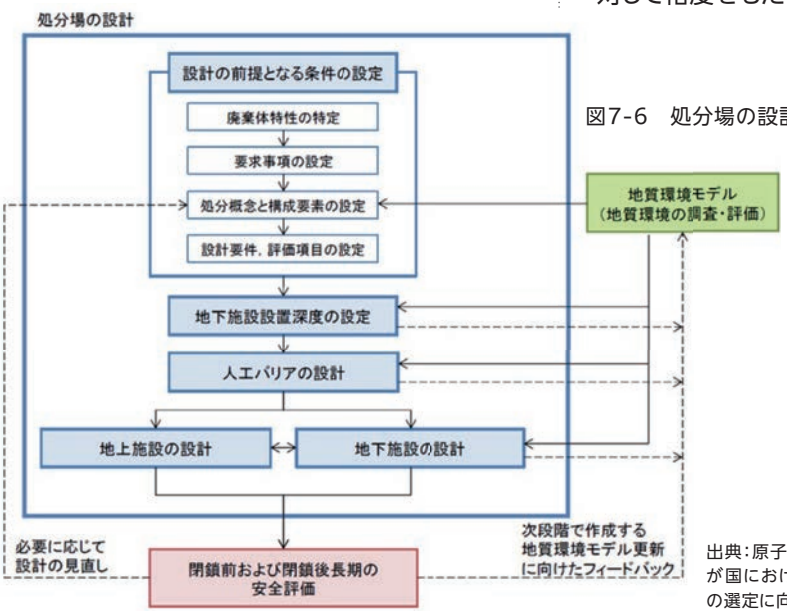


図7-6　処分場の設計フロー

出典：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（第4章）

処分場の設計仕様の検討

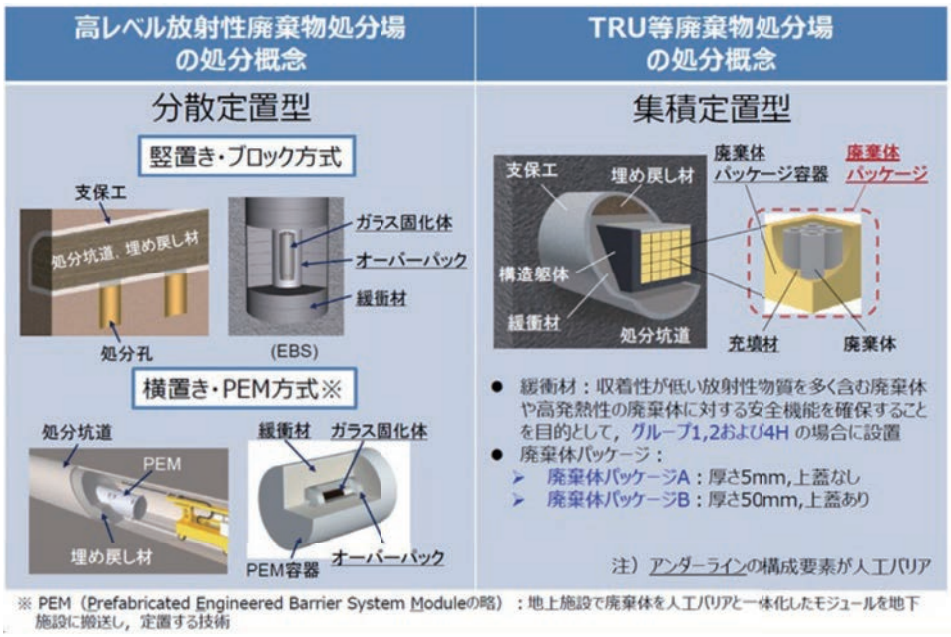
NUMOは、地質環境の多様性や社会的条件、科学技術の進展などの変化に対して柔軟に対応できるように、処分施設を構成する要素について様々な設計オプションを整理している。包括的技術報告書では、高レベル放射性廃棄物処分場については、竪置き・ブロック方式と横置き・PEM方式を対象に検討し、TRU等廃棄物処分場については、2つの廃棄体パッケージによる方法を検討している(図7-7)。

処分場の設計は、地下施設設置深度の設定、人工バリア、地下施設、地上施設の順番に実施されている。

【1：地下施設設置深度の設定】

地下施設設置深度は、最終処分法で定められた300m以深で、かつ隆起・侵食を考慮した上限深度と、地圧や地温の影響により設置が制限される下限深度の範囲内となるが、包括的技術報告書では、下限深度に設定している。深成岩類と先新第三紀堆積岩類の場合は坑内の制限温度(37℃)の設計要件から1000m、新第三紀堆積岩類については坑道の力学的安定性の観点から500mに設定された。

図7-7　高レベル放射性廃棄物とTRU等廃棄物の処分場概念



出典：原子力発電環境整備機構：処分場設計と閉鎖前の安全性の評価、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）処分場設計、2021年5月26日

【2：人工バリアの設計】

人工バリアの内、オーバーパックについては，ガラス固化体の高い放射能と発熱が大きく減衰するまでの埋設後少なくとも1,000 年間は、ガラス固化体と地下水の接触による放射性物質の地下水への溶出を防ぐという閉じ込め機能を持たせるように設計される。候補材料である炭素鋼について、最新の知見に基づき1,000 年間の放射性物質の閉じ込めに必要なオーバーパックの厚さを再評価した結果、最も大きな値となる深成岩類の竪置き・ブロック方式の場合でも121 mmであった。第2次とりまとめで示された仕様の厚さ190 mmは十分な余裕を有しており、少なくとも1万7,000 年程度の期間はガラス固化体と地下水の接触を防ぐという閉じ込め機能を維持できる可能性がある。包括的技術報告書でも余裕を見てオーバーパックの厚さは第2次取りまとめと同じ190mmと設定している。

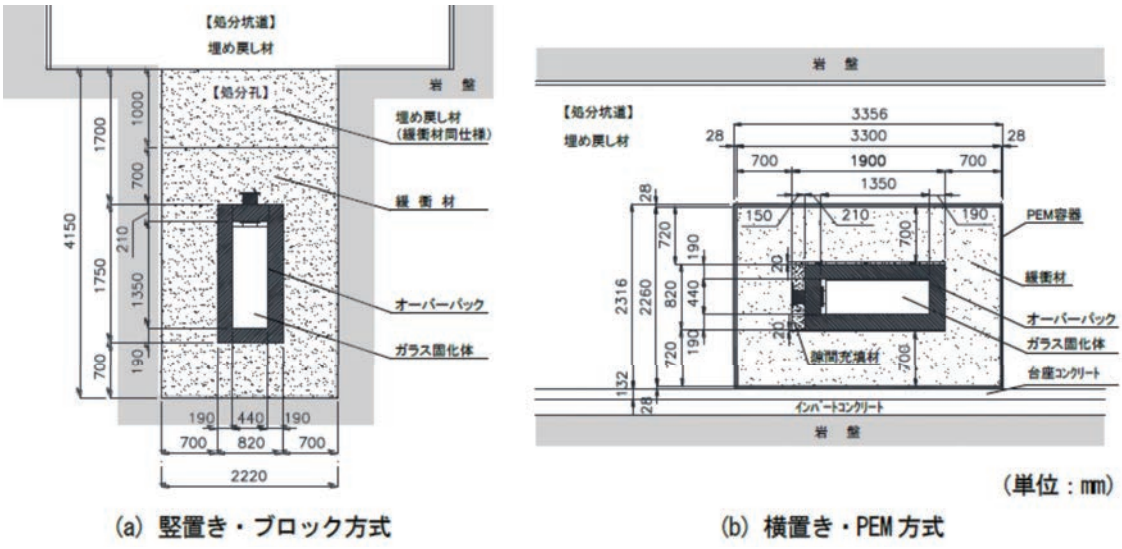
緩衝材は放射性物質の移流による移行の抑制、コロイドによる移行の抑制、放射性物質の収着という三つの安全機能を有するように設計される。検討の結果、第2次取りまとめで示された緩衝材の仕様（ベントナイト70%とケイ砂30%を混合、飽和膨潤後の乾燥密度1.6 Mg/m^3、有効粘土密度 1.4 Mg/m^3、厚さ700 mm）は各検討対象母岩でモデル化した地下水水質に対し、上記三つの安全機能に対する設計要件を満足することが示された。そのためここでも第２次取りまとめと同じ仕様を設定している。

TRU等廃棄物については、４つの廃棄体グループに分類し、それぞれ廃棄体パッケージのオプションを考慮した人工バリアの仕様を検討した。その結果、これらの仕様が三つの地質環境モデルに対して成立することを示している。

【3：地下施設の設計】

地下施設の設計は、坑道、埋め戻し材･プラグ、地下施設レイアウトの順に行われている。坑道の種類は、廃棄体を埋設する処分坑道、処分坑道をつなぐ主要坑道、処分区画をつなぐ連絡坑

図7-8　高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリアの仕様



(a) 竪置き・ブロック方式　　(b) 横置き・PEM 方式

出典：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－（第4章）

道、地上から地下へのアクセス坑道(斜坑･立坑)がある。それぞれの役割に基づいて、建設・操業に必要な設備や換気・排水設備、これらの設備と作業従事者との接触を避けるための安全通路などを収容可能としたうえで力学的安定性が確保されるように坑道断面が設計されている。

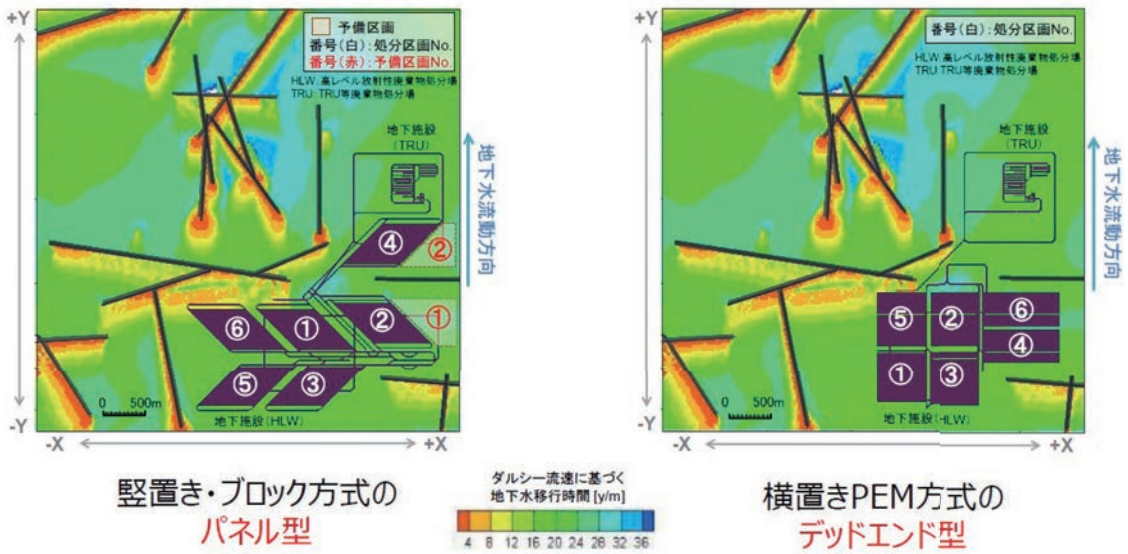
また、坑道の埋め戻し後の廃棄体の発熱により緩衝材の温度が制限温度（100℃）を超えないように、処分坑道間の距離とガラス固化体を封入したオーバーパックの定置間隔または廃棄体パッケージの集積度が調整される。

坑道が処分場閉鎖後に放射性物質の移行経路となることを防ぐため、アクセス坑道と地下施設の接続部または主要坑道に止水プラグが設置される。また、処分坑道の埋め戻し材が膨出しないように坑道端部に鉄筋コンクリート製の力学プラグが設置される。

地下施設レイアウトの設計では、処分場スケールの地質環境モデルを対象として、閉鎖後長期の安全確保の観点から相対的に長い地下水移行時間を確保でき、かつ建設・操業時に支障となる大量湧水などの発生可能性が高いと考えられる規模の大きな断層（めやすとして長さ１～10 km の断層）などが含まれない領域に処分区画が設置される。

図7-9は、深成岩類の処分場スケールの地質環境モデルを対象として、竪置き・ブロック方式及び横置き・PEM方式それぞれの高レベル放射性廃棄物処分場とTRU等廃棄物処分場を併せて設計した地下施設レイアウト例となっている。TRU等廃棄物処分場の処分区画については、硝酸塩が地下水に溶出して高レベル放射性廃棄物処分場の緩衝材や母岩の収着性能などに悪影響を与える可能性を避けるために、高レベル放射性廃棄物処分場に対して地下水の下流側になるように配置されている。

図7-9　深成岩類の地質環境モデルに対する地下施設レイアウトの検討結果(平面図)



出典：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－(第4章)

坑道が処分場閉鎖後に放射性物質の移行経路となることを防ぐため、アクセス坑道と地下施設の接続部または主要坑道に止水プラグが設置される。また、処分坑道の埋め戻し材が膨出しないように坑道端部に鉄筋コンクリート製の力学プラグが設置される。

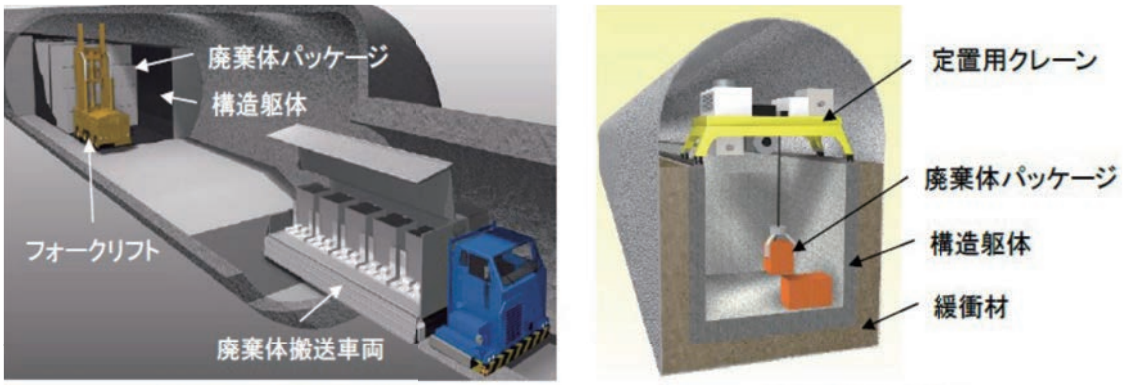
地下施設レイアウトの設計では、処分場スケールの地質環境モデルを対象として、閉鎖後長期の安全確保の観点から相対的に長い地下水移行時間を確保でき、かつ建設・操業時に支障となる大量湧水などの発生可能性が高いと考えられている。

建設･操業･閉鎖技術の適用性

NUMOは包括的技術報告書において、地上・地下施設の建設、及び地上施設における廃棄体の検査・保管などに係る操業については既存の原子力施設や土木構造物で実績がある技術、また、すでに国内外において地下研究所を活用した実規模スケールでの装置開発と実証試験などが進んでいる地下施設での廃棄体や人工バリア定置などの操業技術やプラグ構築技術など、建設・操業・閉鎖に適用可能な技術が存在することを示した。

図７-10にTRU廃棄体容器の搬送・定置イメージ、図7-11に高レベル放射性廃棄物の操業工程イメージを示す。

図7-10　TRU廃棄体容器の搬送･定置イメージ



(a) フォークリフト方式　　(b) クレーン方式

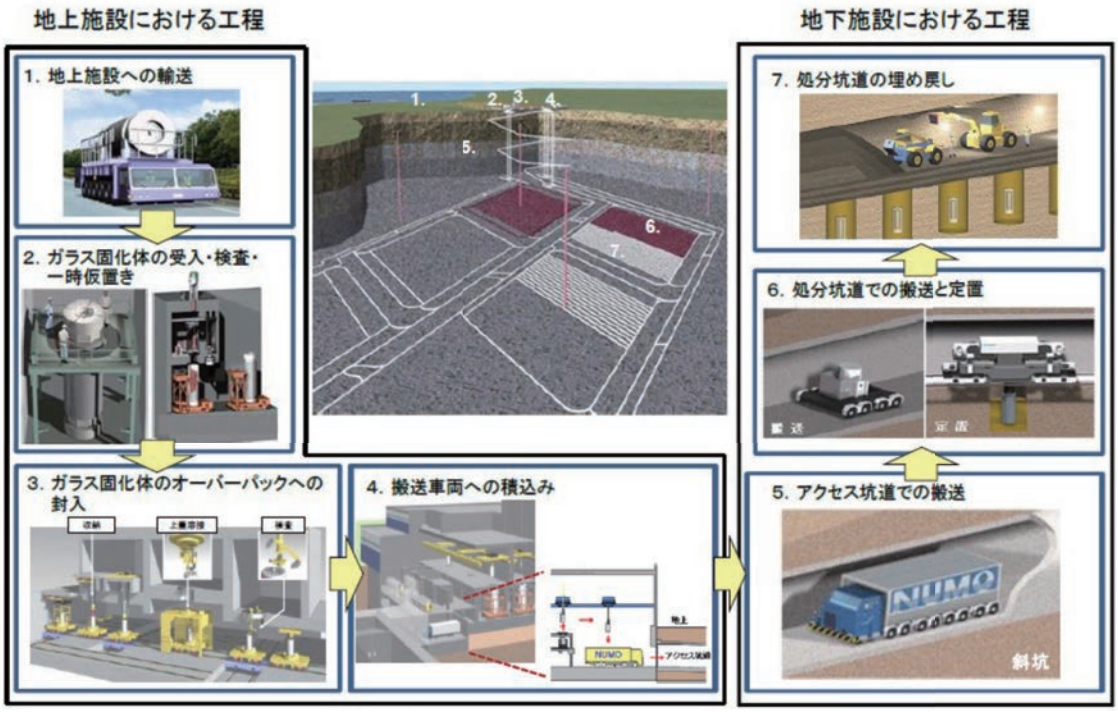
出典：原子力発電環境整備機構：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現
－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－（第4章）

回収可能性の確保に関する取り組み

特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針において、今後より良い処分方法が実用化された場合などに将来世代が最良の処分方法を選択できるようにするため、政策や事業の可逆性を担保することとし、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、閉鎖までの間、廃棄物の回収可能性を確保することが求められている。

NUMOは包括的技術報告書において、処分施設を閉鎖するまで回収可能性を維持する場合、これによって人工バリアの閉鎖後長期の安全性に与える影響が許容できる範囲を超えないようにするという観点から、換気などに伴い地下坑道に流入する酸素によるオーバーパックの腐食や湧水による緩衝材の流出をできるだけ抑えるようにするため、廃棄体の埋設後は処分坑道を速やかに埋め戻し、端部に力学プラグを設置した状態で回収可能性を維持することを示した。併せて、竪置き・ブロック方式に対する緩衝材の除去技術，横置き・PEM 方式については埋め戻し材を除去しPEM容器ごと回収する技術について、現在進められている実証試験などに基づき技術的に対応可能であることの見通しを示している。

図7-11　操業工程のイメージ図（高レベル放射性廃棄物の例）



出典：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－（第4章）

ポイント

▶汎用的に適用可能な、設計因子を基軸とした処分場設計
▶地質環境や科学技術の進歩などに柔軟に対応するための設計オプションを整備

7-4

処分場の閉鎖前の安全性

処分場閉鎖前の安全性はどのように評価されているか。

NUMOは包括的技術報告書において、設計した処分施設の仕様に対して、閉鎖前までの放射性廃棄物の輸送、受入・検査・封入、地下施設への搬送・定置といった操業時の、作業員と周辺公衆に対する放射線学的な影響を評価している。評価は処分施設が計画通りに運転され放射線の遮蔽や閉じ込め機能が正常に機能している場合（平常状態シナリオ）と、廃棄体の落下、火災、爆発、外部電源喪失及びその他の装置故障が発生した場合（異常状態シナリオ）に分けて実施されている。

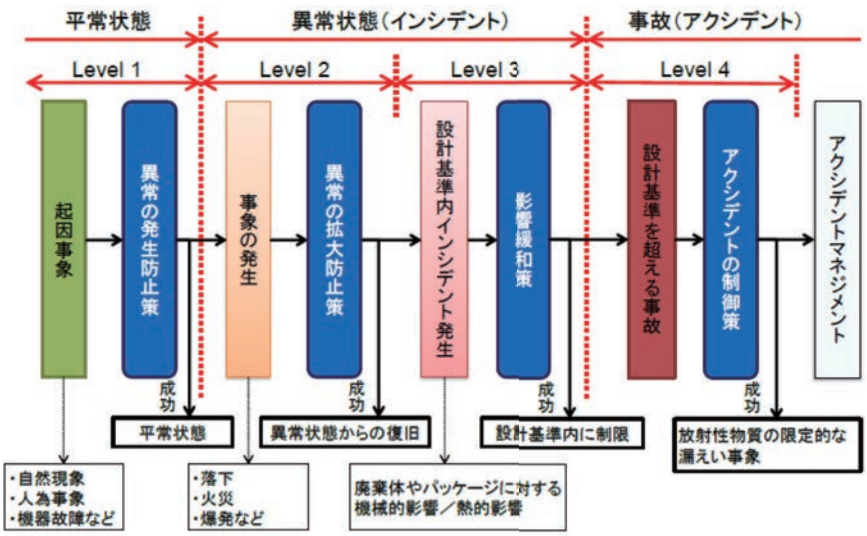
【平常状態シナリオの評価】

平常状態シナリオでは、ガラス固化体及びTRU等廃棄物の受入・検査・封入施設からの、それぞれの施設の遮蔽壁の設計に基づいた直接線及びスカイシャイン線による影響を合算して評価している。その結果、施設から200 m程度離れていれば、公衆の年間実効線量は、事業許可基準規則などにおいて示されている線量目標である50 μSv/yを下回ることが確認されている。

【異常状態シナリオの評価】

NUMOは自然現象、人為事象、機器故障あるいは人為ミスなどを起因とした、地下施設あるいは地上施設の設計で想定する異常状態について、異常発生防止策、異常拡大防止策などの対策を多重化して行うとしているが、それでも対策の対応可能範囲を超えた異常状態が発生することを想定して、異常状態シナリオの評価を行っている。

図7-12　処分施設における異常状態の推移と安全対策の関係



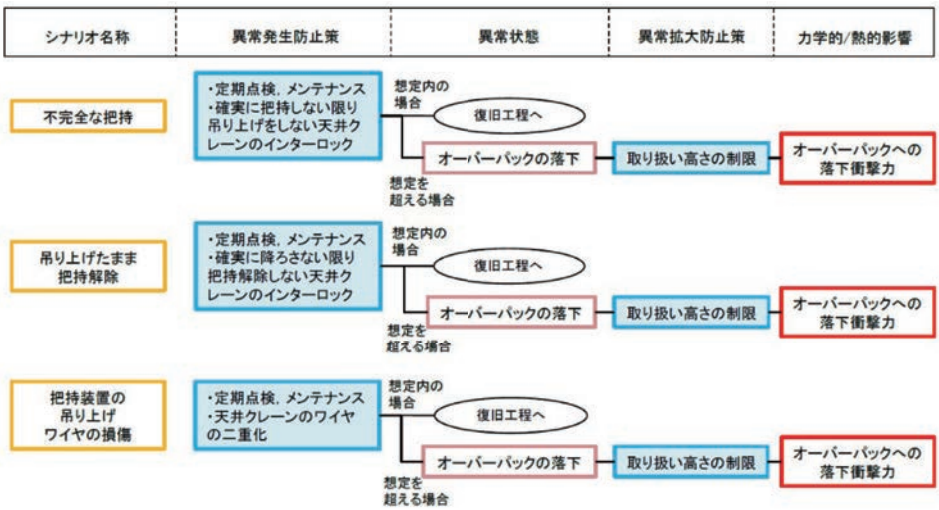
出典：原子力発電環境整備機構：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－（第4章）

異常状態シナリオでは、施設で異常状態が発生した場合に、放射性物質が廃棄体から漏出する可能性を評価している。評価では最初に、廃棄体の受け入れから定置までの操業工程ごとにイベントツリーを用いて、異常事象発生防止策、拡大防止策という一連の安全対策が正常に動作するか否かを分岐点とする異常状態の過渡的な推移を検討して異常状態シナリオを作成している。 その上で、落下衝撃力や火災の延焼による温度上昇などの異常状態におけるガラス固化体やガラス固化体を封入したオーバーパックあるいは TRU等廃棄物及び廃棄体パッケージの堅牢性について評価している。

異常状態の例として、ガラス固化体を封入したオーバーパックの落下に関するイベントツリーを図 7-13 に示す。地上施設の設計上、想定している吊り上げ高さは約 5 ～ 9 m であることから、最大高さである 9 m の高さからコンクリート製の床にガラス固化体封入後のオーバーパックが落下したことを想定しオーバーパックに発生するひずみを評価している。その結果、ひずみが限界値を超える範囲は衝突したオーバーパックの外面の付近に集中するが、内面まではその範囲が広がっていないことから 貫通亀裂は発生していないとしている。

異常状態シナリオの評価の結果、施設の設計において異常発生防止策や異常拡大防止策などの基本的な安全対策を考慮していること、及び吊り上げ高さ制限などの影響緩和策を考慮していることにより、何らかの要因により廃棄体の落下や火災などの異常状態が発生しても、これらを想定した評価結果に基づけば、放射性物質の漏出が生じる可能性は低いと結論付けている。

図7-13　ガラス固化体を封入したオーバーパックの落下に関するイベントツリー



出典：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－（第5章）

ポイント

平常状態シナリオ：処分施設が計画通りに運転されている場合の放射線学的影響を評価
異常状態シナリオ：施設で異常状態が発生した場合の、放射性物質が放射性廃棄物から漏出する可能性を評価

7-5

処分場閉鎖後の長期安全性

セーフティケースの中核となる処分場閉鎖後の長期安全性は、包括的技術報告書でどのように提示されているのか？

【安全評価の目的と評価のアプローチ】

NUMOは、安全評価の目的を包括的技術報告書において『わが国の多様な地質環境に対して、処分場の閉鎖後長期にわたる安全性を評価するための技術基盤が整っていること、及び閉鎖後長期の安全性を確保できる見通しを有することを提示する』としている。

この目的を達成するために導入されたアプローチは以下の３点である。

◆ 国際的な指針などを参考に、様々な不確実性を適切に取り扱うためのリスク論的な考え方を導入し、安全性を判断するめやす値を仮設定したうえで、線量/確率分解アプローチによる定量的な評価を実施

◆地質環境条件の違いや処分場の仕様の違いを反映し、異なる処分場が有するそれぞれの長期的な安全性を合理的に比較・評価できる核種移行解析手法の導入

◆検討対象母岩の地質環境モデル及び処分場の設計結果を対象に、発生可能性に応じた安全評価シナリオを設定したうえで、核種移行解析による被ばく線量値と仮設定した基準との比較による安全性の照査

【安全評価の流れ】

安全評価では、多重安全機能を有する処分システムの放射性核種の閉じ込め性能について、線量を指標として評価している。線量を算出する流れは、安全評価シナリオの構築、核種移行解析モデルの構築、データセットの設定からなる。シナリオの構築では、その発生の頻度や不確実性から基本シナリオ、変動シナリオ、稀頻度事象シナリオに分類している。

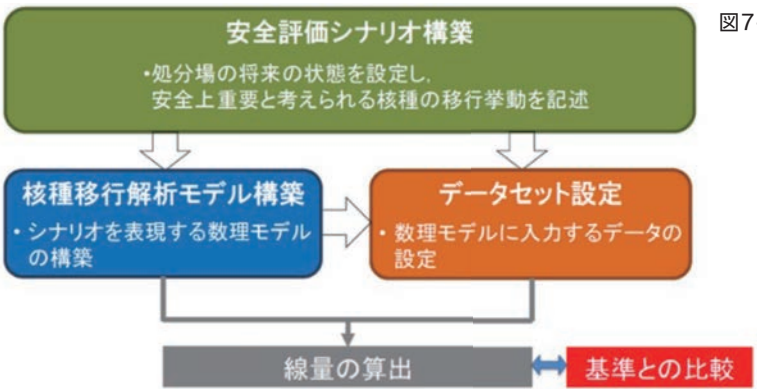


図7-14　安全評価の基本的枠組み

出典：原子力発電環境整備機構：閉鎖後長期の安全性の評価、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）長期安全評価、2021年6月30日

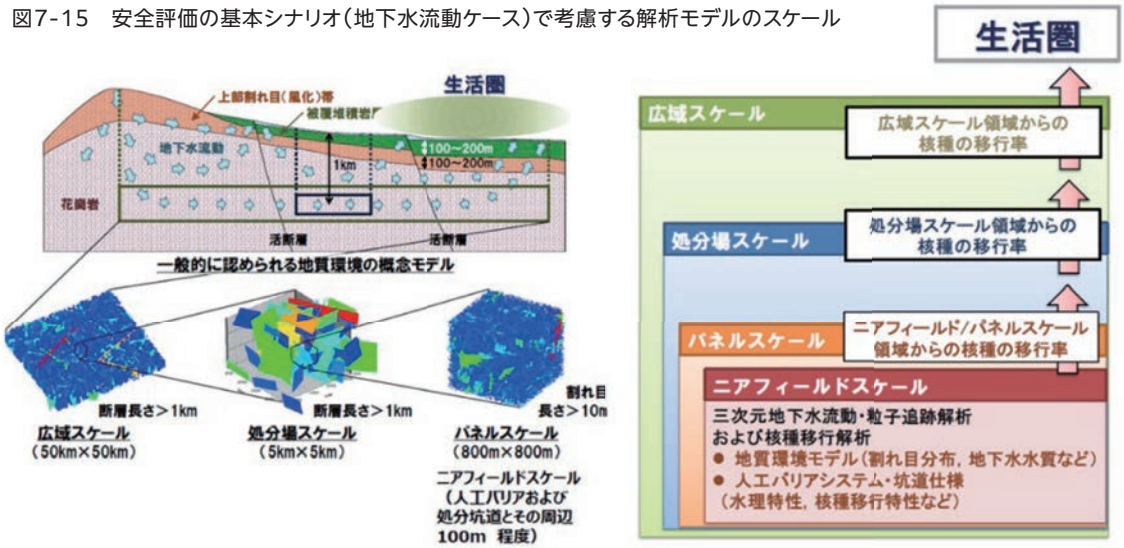
(1) 安全評価のシナリオ構築

シナリオ構築では、処分システムの最も起こりやすい状態変遷を、ストーリーボードを用いて把握する作業から開始し、その後安全機能に影響を与える要因分析を行い、FEPを用いて影響分析を行うことで、シナリオ上の取り扱い（基本ケース、変動ケース）を決定する。

(2) 解析ケースの設定

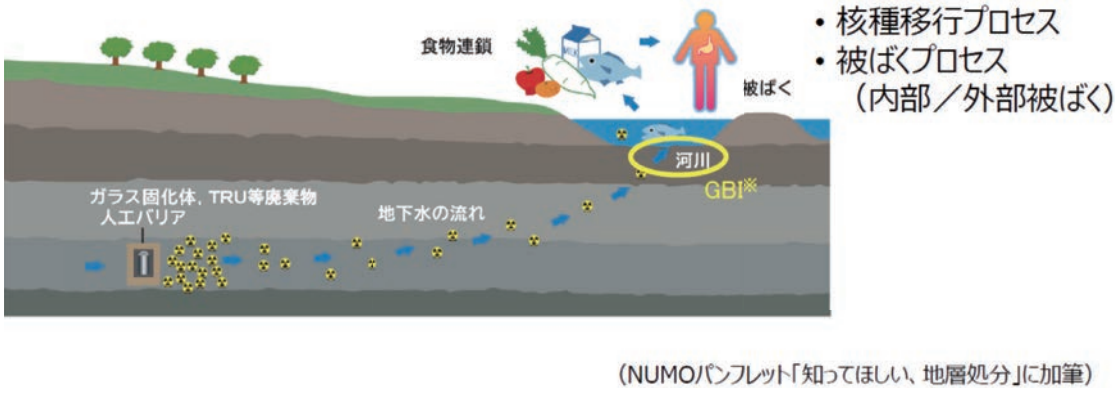
設定したシナリオに対応し、核種移行解析での取り扱い方を考慮する（解析ケースの設定：例えば、オーバーパックの1000年以降の移行抵抗は無視など）。

図7-15　安全評価の基本シナリオ（地下水流動ケース）で考慮する解析モデルのスケール



出典：原子力発電環境整備機構、閉鎖後長期の安全性の評価、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）長期安全評価、2021年6月30日

図7-16　様式化された生活圏モデルの例



出典：原子力発電環境整備機構：閉鎖後長期の安全性の評価、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）長期安全評価、2021年6月30日

(3) 核種移行モデルの構築

解析ケースに従って、地下水流動解析をベースとした図 7-15に示す核種移行解析のスケールの異なるモデルを作成する。

(4) 生活圏評価のモデル化

核種移行解析で被ばく線量を算定する場合、人間の生活圏評価のモデルが重要となる。遠い将来の人間の生活様式を予測することは極めて困難であることから、安全評価では現在の生活様式に基づいて様式化された生活圏モデル（将来も変化しない）を導入している。そこでは、生活圏に放出された放射性核種ごとに換算係数を用いて被ばく線量を算定することになる。

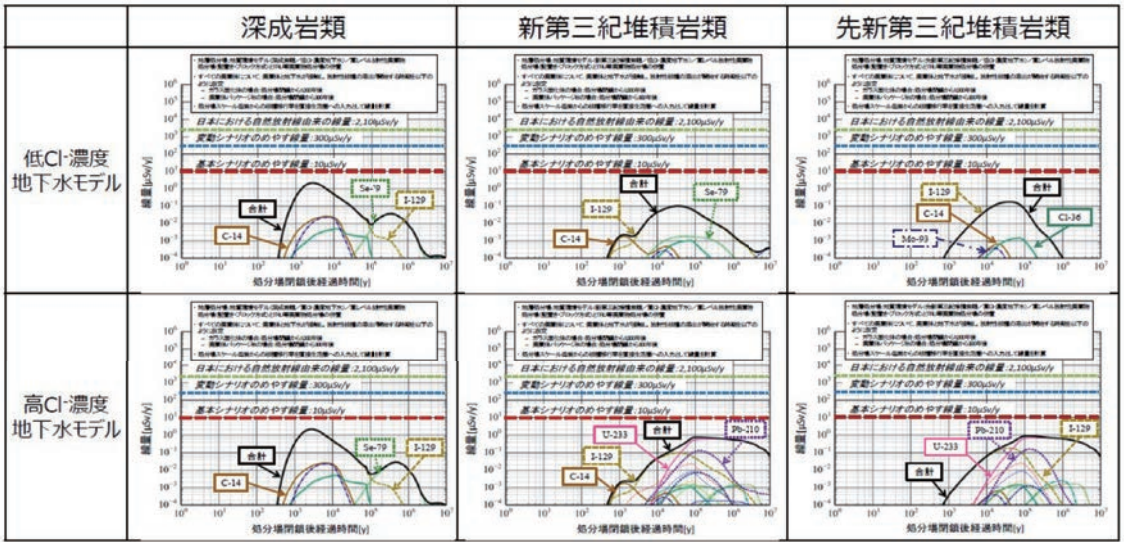
(5) 核種移行解析に用いるパラメータの設定

核種移行解析では、これまでの研究成果から評価の対象となるガラス固化体、TRU廃棄物のインベントリにおける被ばく線量評価上重要となる核種を選定している。また、緩衝材と母岩の間隙水の化学特性から決定される核種の溶解度、収着分配係数、実効拡散係数も重要なパラメータとして設定している。生活圏のパラメータのうち、河川流量、地下水流量については日本の統計データより、土壌の分配係数はIAEAデータベースを参照して設定している。

基本ケースの解析結果（ガラス固化体＋TRU）

ガラス固化体とTRU廃棄物の併置処分概念を対象として、３種類の母岩を対象とした地質環境モデルにおける地下水移行シナリオを基本ケース（塩素イオン濃度が低い場合と高い場合）とした被ばく線量の解析結果を下図に示す。いずれの岩種においても、めやすとして仮設定した目標値（10μSv/年）を下回っている。

図7-17　3種類の母岩を対象とした基本ケースの被ばく線量値



出典：原子力発電環境整備機構：閉鎖後長期の安全性の評価、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）長期安全評価、2021年6月30日

【変動シナリオの評価】

変動シナリオは、影響分析により抽出した安全機能を有する処分場の状態に関する不確実性を考慮して以下の４つを設定している。

(1) ガラス固化体の状態の不確実性
(2) 金属廃棄物の状態の不確実性
(3) 硝酸塩プルームの広がりに関する不確実性
(4) 溶解度への温度影響の不確実性

変動シナリオに対して11種類の変動ケースを設定し、線量を求めて基本ケースと比較した結果、いずれも変動シナリオのめやす線量（300μSv/y）を下回っている。

【稀頻度事象シナリオの評価】

想定する必要がないほど発生可能性が極めて小さいと考えられるものの、サイト選定による完全な回避や、発生の可能性を科学的に完全に否定することが現状では困難であるが、発生した場合に処分システムの隔離機能あるいは閉じ込め機能に重大な影響を与える可能性のある事象に対して、稀頻度事象シナリオとして、以下の評価を実施している。

(1) 火山・火成活動により処分場への直接的な影響を想定した新規火山発生シナリオ
(2) 断層が地下深部から伸展し処分場に直接的に影響を及ぼす断層伸展シナリオ(※)

これらの稀頻度事象シナリオの評価では、線量/確率分解アプローチを基本とし、事象が影響を及ぼす状態のうち、影響が最も大きくなると想定される状態をモデル化して核種移行評価を行っている。新規火山発生シナリオ、断層連結シナリオ、断層伸展シナリオともめやす線量（事象発生１年目:20 ～ 100mSv、２年目以降:1 ～ 20mSv/y）の範囲内であった。

（※:他に処分場スケール内とその周辺の比較的小規模の断層が連結し処分場に直接的な影響を及ぼす断層連結シナリオが設定されているが、解析ケースでは断層伸長シナリオに包含されている）

【人間侵入シナリオの評価】

人間侵入シナリオとして、偶発的なボーリングによる掘削活動を選定し、処分場からボーリング孔を通じて作業従事者が被ばくする場合、滞水層に放出された核種により一般公衆が被ばくするケースを評価している。いずれのケースもめやす線量（事象発生１年目：20 ～ 100mSv、２年目以降：1 ～ 20mSv/y）の範囲内であった。

ポイント

- **安全評価では3つのシナリオ（基本、変動、稀頻度事象）を対象にモデル化、パラメータ設定、核種移行解析を実施**
- **リスク論的考え方によるめやす線量を仮設定し、線量/確率分解アプローチによる線量評価結果と比較することで処分システムの閉じ込め性能を確認**

これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート

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－

問1 次の空欄を埋めなさい。

1 包括的技術報告書は、　①　が特定されていない段階の　②　であるが、今後、サイトが特定された後の　②　の基本形としての枠組み・技術的基盤が示されている。

2 サイト選定において、調査によって得られた情報やデータを統合し、処分場の設計や安全評価に適合するように、包括的技術報告書では以下の3つの階層化した空間的スケールでの　①　が作成されている。

●パネルスケール　（数百m）

●　②　（　③　）

●広域スケール　（　④　）

3 包括的技術報告書における処分場設計に関して、NUMOは設計によって処分場に持たせようとする性質と能力を　①　として設定することで、異なる　②　・　③　においても汎用的に適用可能となるように、　①　を基軸とした処分場の設計の考え方を適用している。

4 包括的技術報告書では、処分場閉鎖前の操業中に係る安全性について、処分施設が計画通りに運転されている場合（　①　シナリオ）の放射線学的影響と、施設で　②　が発生した場合（　②　シナリオ）での廃棄体から放射性物質が漏洩する可能性を評価している。

5 処分場閉鎖後の長期安全評価に関して、NUMOは様々な不確実性を適切に取り扱うための　①　を導入し、安全性を判断するめやす値を仮設定したうえで、　②　による定量的な評価を実施している。

6 包括的技術報告書では、想定する必要がないほどに発生可能性が極めて小さいが、発生した場合に処分システムに重大な影響を及ぼす可能性がある　①　シナリオとして、　②　と　③　の評価を実施している。

問2 次の問で、正しいものには〇、間違っているものには×をつけなさい。

1 ☐ NUMOが公表した「包括的技術報告書」は、OECD/NEAが提唱したセーフティケースの構成要素に沿って作成されており、その目的は候補サイトの地質環境に基づく日本における地層処分の安全性の提示である。

2 ☐ 包括的技術報告書で作成された3種類の地質環境概念と概念モデル（SDM: Site Description Model）は、日本に存在する地質環境の情報を相互の関連性を考慮し、サイトを特定せず代表的なモデルとして作成されている。

3 ☐ 包括的技術報告書における処分場閉鎖後の長期安全性評価では、様々な不確実性を適切に取り扱うためのリスク論的な考え方を導入し、安全性を判断するめやす値を仮設定したうえで、シナリオの発生可能性をすべて確率として定量化し、各シナリオを想定した場合の放射線学的影響の程度との積から導かれるリスクの総和をリスク拘束値と比較している。

問3 NUMOが2021年に公表した包括的技術書の特徴とセーフティケースの構成要素について、300字程度で述べよ。

答え合わせ

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－

問1	1	①サイト　②セーフティケース
	2	①地質環境モデル　②処分場スケール　③数km　④数十km
	3	①設計因子　②サイト　③事業段階
	4	①平常状態　②異常状態
	5	①リスク論的考え方　②線量/ 確率分解アプローチ
	6	①稀頻度事象　②新規火山発生シナリオ　③断層伸長シナリオ

問2

1 ×

2021年に公表された包括的技術報告書は、サイトを特定せずジェネリックな地質環境を対象に、OECD/NEAが提唱した枠組みと構成要素に沿ったセーフティケースとして作成されている。その目的は、その時点の最新の科学技術的知見に基づいて「なぜ安全な処分場を構築できるといえるか」を社会に対して説明し、対話をする土台とすることである。今後、サイトが特定された後に更新されるセーフティケースの基本形としての枠組み・技術的基盤が示されている。

2 ○

地質環境モデルは、通常、特定サイトの調査・評価結果を反映し、地質構造モデルをベースに特性相互の整合性を考慮（Geo-synthesis）して作成される（SKB, NAGRAの例）。今回の包括的技術報告書では、まだ候補サイトの情報がないため、サイト固有ではなく、ジェネリックな地質環境モデルを作成することを基本として、日本全体の地質環境（地質・地質構造、水理地質特性、地化学特性、力学特性、熱特性）に関する情報を収集・整理し、情報相互の整合性を考慮して代表的な地質環境概念と概念モデルを作成している。

3 ×

NUMOは定性的な判断も許容してシナリオの発生可能性を検討し、そのシナリオが発生した場合の放射線学的影響について評価する線量/確率分解アプローチによる定量的な評価を実施している。シナリオの発生可能性をすべて確率として定量化し、放射線学的影響の程度との積から導かれるリスクの総和をリスク拘束値と比較する手法は統合アプローチと呼ばれる。なお、NUMOは定量的な確率を算出できる一部のシナリオについてはリスク基準との比較を用いた評価も併用している。

問3

【解答例】

2021年に改訂版として公表されたNUMOの包括的技術報告書は、4つの階層構造から構成され、その内本編には、1999年の第2次取りまとめ以降、20年間で蓄積された地層処分の知見がサイト選定に向けてのセーフティケースとして取りまとめられている。

本論は、以下の項目から構成されている。

- 地層処分の安全確保の基本的考え方とマネジメント戦略
- 地層処分に適した地質環境の選定技術と地質環境概念と概念モデル
- 処分場の設計・建設・操業・閉鎖技術
- 施設設計に対応した処分場の閉鎖前の安全評価
- 地質環境概念モデルと処分場の設計に対応した閉鎖後の安全評価
- セーフティケースとしての統合と次段階に向けた取り組み、処分事業マネジメント基盤（307文字）

【解答に用いられるキーワードの例】

包括的技術報告書、4つの階層構造、1999年第2次取りまとめ、20年間の知見の集約、サイト選定に向けてのセーフティケース、サイト選定の調査・評価技術、地質環境概念と概念モデル、処分場の設計・建設・閉鎖、閉鎖技術、閉鎖前の安全性、閉鎖後の長期安全性、処分事業マネジメント

参考文献 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－

- 原子力発電環境整備機構（NUMO）（2021）、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－
- 原子力発電環境整備機構（NUMO）(2021)、包括的技術報告書の全体概要、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）総論、2021年5月13日
- 原子力発電環境整備機構（NUMO）（2021）、地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）地質環境、2021年6月16日
- 原子力発電環境整備機構（NUMO）（2021）、処分場設計と閉鎖前の安全性の評価、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）処分場設計、2021年5月26日
- 原子力発電環境整備機構（NUMO）（2021）、閉鎖後長期の安全性の評価、地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）長期安全評価、2021年6月30日

第8章

地層処分の段階的な進め方

日本を含めて、高レベル放射性廃棄物の地層処分を進める各国では、処分地の選定を含め処分事業を段階的に進める方策を採用している。その背景には、国際的な機関等からの提言もあり、各段階の意思決定において実施側だけでなく、多くのステークホルダーが参画し、次段階に進むことを納得することが長い処分事業の持続的な受容を醸成できると考えられていることがある。本章では、そのような段階的な進め方に至った背景及び日本での処分地選定の動向、規制当局の関わり方について学ぶ。

本節では以下の項目について学習する。

8.1 ● 段階的な進め方の必要性

8.2 ● 段階的な進め方の種類と特徴

（参考）OECD/NEAが提唱したステップワイズの進め方

8.3 ● 段階的な進め方の導入

8.4 ● 三段階の処分地選定プロセス

8.5 ● 新たな取り組みと科学的特性マップ

8.6 ● 段階的な処分地選定の経緯

8-1

段階的な進め方の必要性

地層処分プログラムはなぜ段階的に進める必要があるのか?

日本を含む地層処分を進める各国では、処分地選定段階から処分場を閉鎖するまで、段階的な意思決定を処分プログラムの中に取り入れてきている。段階的な進め方について、OECD/NEAでは、「ステップワイズ」、北米では「アダプティブ・ステージング」という表現が用いられている。ステップワイズは、階段を一歩ずつ上がり目標に向かっていくことを意味し、アダプティブ・ステージングは局面の状況に応じて変化できる能力を有することを意味しており、2つの表現は、多少ニュアンスは異なるが、段階的に進めるということでは、どちらも同じ考え方である。

【公共事業等における段階的な進め方】

段階的な進め方は、地層処分のみならず多くの公共事業でも取り入れられている。特にダム建設、空港建設、一般廃棄物処理・処分施設など周辺環境への影響が懸念される事業については、建設予定地が決定された段階から地元住民の公聴会開催や対話活動を通じて施設受け入れを促す活動が継続して進められている。

事業について理解が得られない場合、計画を断念することもあるが、日本では、かつて公共性が高いと政治判断された事業については強制執行という手段も用いられてきた歴史がある。これらの地域住民の声が反映されない政治的な決着は、長く事業への不信感を招くことになった。

建設が一度開始されると事業を段階的に拡張する、あるいは縮小する場合があるが、事業そのものを停止あるいは中止するという意思決定がなされた例は少ない。

公共事業と地層処分事業と大きく異なる点は、計画段階で建設候補地が決定されているかどうかにある。公共事業でも複数の候補地から絞りこまれる例はあるが、多くの場合、候補地が決定される段階までは候補地域の住民の賛否を問うことはない。

【地層処分にとって段階的な進め方が不可欠である理由】

地層処分の進め方では三つの大きな意思決定の段階がある。一つは前述した処分地選定までの段階、二つ目は処分地が決定し、建設、操業の段階、三つ目は処分場が閉鎖される段階である。

(1) 処分地選定までの段階

高い放射能レベルの廃棄物を取り扱う地層処分の特徴として、意思決定の公開性と透明性が要求されている。各国の地層処分事業の実施主体は、処分候補地選定から、決定に至るまで段階的に進める計画を公表している。選定の最終段階では、処分に適しているかどうかを判断するプロセスも取り入れている。各段階において、地域住民の意思を確認し次の段階に進めることを制度化している国もある。

その背景には、地層処分事業は、処分地が決定した後も施設の建設から閉鎖まで長期にわたって継続することから、その間、地域住民を含む多くのステークホルダーの理解と支援が継続される

ことが不可欠であると認識されているからである。

(2) 処分場の建設・操業・段階

処分場の立地が地域住民等に受け入れられたことも条件の一つとして、処分事業に関する許認可の申請が行われ、審査で承認されることにより処分場の建設が開始される。事業認可以降の進め方では、安全規制の流れに従って、規制機関による継続したレビューの仕組みも地域住民の信頼性を得るために重要となる。

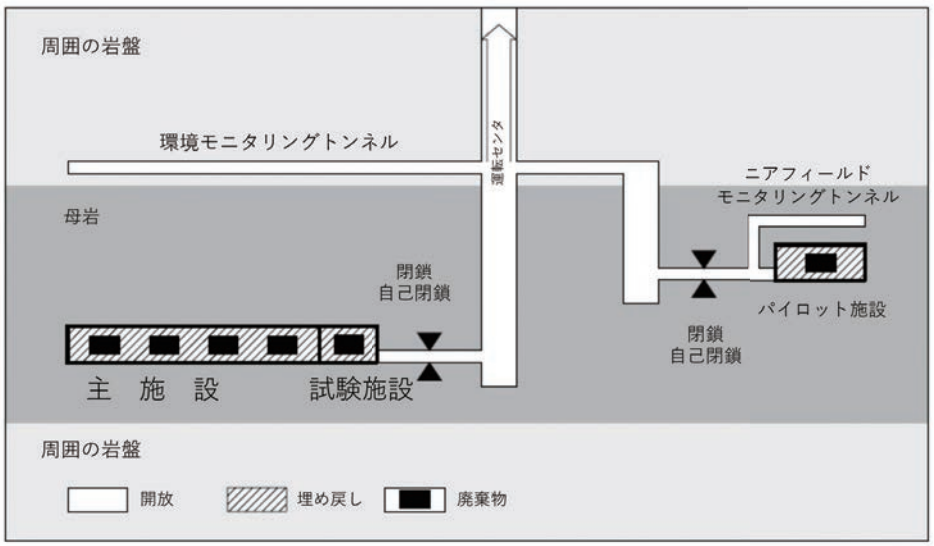
地層処分事業は、建設・操業段階を経て、最終的に処分場の閉鎖を決定するが、これは人間の関与を必要としない「受動的な安全性」に移行するための重要な意思決定の段階と認識されている。この意思決定では、規制機関の判断を含め、地域住民や社会の同意も必要となると考えられる。

(3) 閉鎖段階の意思決定に向けての対応策

処分場の閉鎖の意思決定に反映させることができるよう、定置した廃棄物を回収する可能性を確保するために定置作業と並行して処分場と別の区画で廃棄物を含むバリア性能の状態変遷をモニタリングで確認する仕組みを取り入れている国もある。

図8-1に示す例は、スイスでの処分地選定プロセスが停滞した時期に、連邦政府の諮問機関である専門家委員会(EKRA)が提唱した「監視付き長期地層処分」概念で、処分プログラムの最終段階における意思決定に反映するため、パイロット施設を設置し、定置開始から閉鎖まで監視を続ける役目を課している。

図8-1　スイスの専門家グループ(EKRA)が提示した「監視付き長期地層処分」概念



処分操業は試験施設とパイロット施設で開始され、処分の安全性が確認された後に主施設での処分が行われる。

パイロット施設ではアクセス坑道は開放された状態で人工バリアとニアフィールドのモニタリングが行われるが、主施設は廃棄物定置後に直ちにアクセス坑道が埋戻される。

出典:EKRA:Disposal concepts for radioactive waste (2000)を一部和訳

ポイント

▶地層処分プログラムの段階的な進め方における二つの意思決定の局面:

①処分地選定までの段階的な意思決定

②建設･操業段階を経て処分場閉鎖に向けての意思決定

8-2

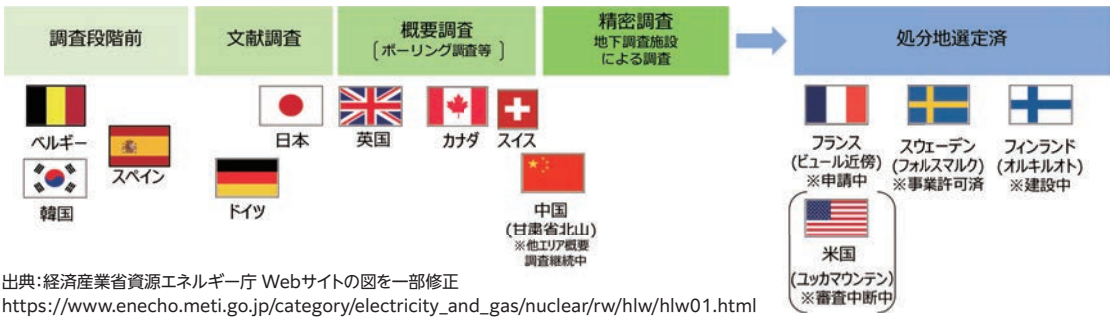
段階的な進め方の種類と特徴

地層処分の段階的な進め方にはどのような種類があるのか？

【ステップワイズの進め方の種類】

各国の地層処分プログラムは、下図に示すようにいずれも段階的（ステップワイズ）に進められている。このような進め方にはリニア・ステージングとアダプティブ・ステージングと呼ばれる方法があり、地層処分にとっては後者が不可欠であるとされている。

図8-2　各国の地層処分プログラムの現状



出典：経済産業省資源エネルギー庁 Webサイトの図を一部修正
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/hlw/hlw01.html

【全米科学研究評議会が勧告した進め方】

米国のユッカマウンテンにおける高レベル放射性廃棄物処分プログラムの停滞を背景に、実施主体であるエネルギー省（DOE）は、地層処分計画を段階的に進めていくことが有効であると考え、全米研究評議会（NRC）に処分を進める方法についてアドバイスを求めた。

NRCは各国の専門家の意見を集約し、"One Step at a Time, The Staged Development of Geologic Repositories for High-Leve Radioactive Waste"を2003年に公表した。

NRCが提示した進め方には以下の二つがあり、それぞれ以下の特徴を有している。

① リニア・ステージング：前もって次段階の選択肢やゴールが「マイルストーン」として設定されており、ゴールに向かって直線的に進める方策で、多くの重要プロジェクトで採用されている。

② アダプティブ・ステージング：各段階の局面での意思決定において、考慮する事項や決定方法が準備され、新しい情報も取り入れて、要件等に対する適合性を評価することにより次段階の選択肢を決定する仕組みである。選択肢には可逆性も含まれる。

NRCはこれらの二つの進め方を検討したうえで、地層処分プログラムでは、②のアダプティブ・ステージングを選択すべきであるとし、以下の事項を勧告として取りまとめた。

- ◆ 地層処分計画では、処分全体に係る安全性について、繰り返しレビューする構造的意思決定プロセスを導入すべきである。
- ◆ 適合性を判断する局面は、安全性に影響を及ぼすものであってはならない。
- ◆ セーフティケースの繰り返しは、地層処分の適合性を判断する局面における中核的役割を

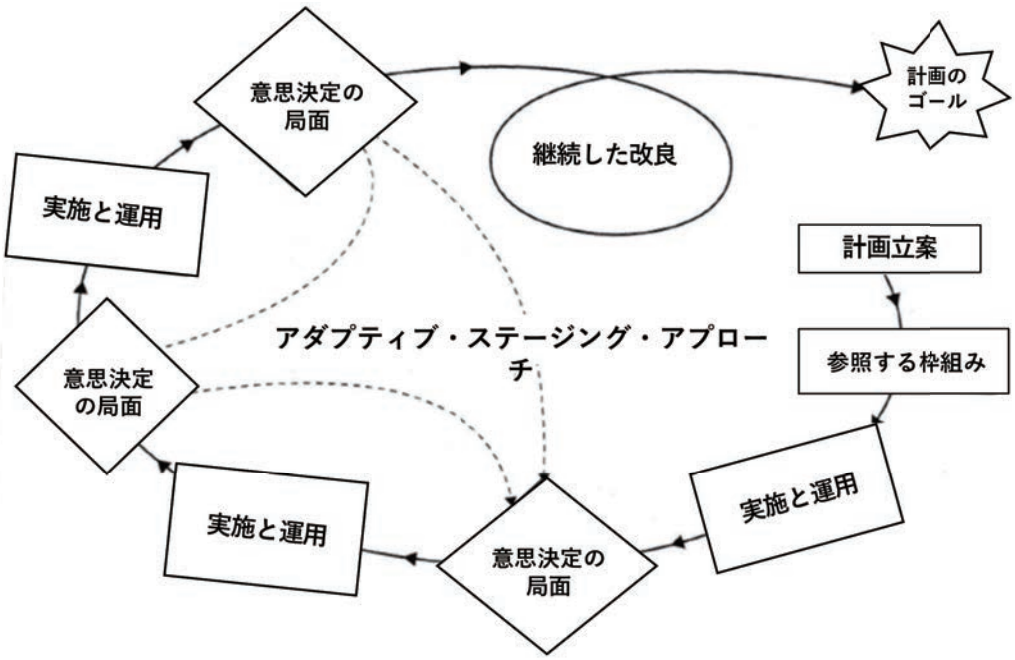
果たす。

- ◆ 適合性を判断する局面では、技術と社会的側面での活発で持続的な学習が要求される。
- ◆ 適合性を判断する局面は、ステークホルダーと公衆との対話の機会を促進する。
- ◆ 適合性を判断する局面は、現在の規制の枠組みと両立する。

“One Step at a Time”に示されたアダプティブ・ステージングの概念では、段階的に事業を進める中で、意思決定の局面で求められる様々な要件への適合性を判断し、その結果、前段階に戻る可能性もあることを示している。この進め方は、現在は、”Reversible（可逆的）”なアプローチとして認識されている。

図8-3の中で、実線は段階的な事業の進め方を示し、ひし形は一つの段階を進める時の意思決定の局面を、点線は意思決定の結果として前の局面に戻ることの可能性を示している。アダプティブ・ステージングのアプローチは、各局面において多面的な角度からの意思決定ができ、柔軟な判断が可能であるという利点がある一方で、一つの局面での意思決定に時間がかかり、ゴールに行きつくまでに紆余曲折を経験する可能性があることも示唆している。

図8-3　NRCが勧告した地層処分におけるアダプティブ･ステージングのアプローチ



出典：National Research Council. 2003. One Step at a Time: The Staged Development of Geologic Repositories for High-Level Radioactive Waste. Reproduced with permission from the National Academy of Sciences、Courtesy of the National Academies Press、Washington、D.C.を一部和訳

ポイント

▶ 全米研究評議会の勧告：段階的な進め方として二つのアプローチがあるが、地層処分プログラムでは、各段階の意思決定の局面に可逆性を含めた柔軟な対応ができるアダプティブ･ステージングが相応しい

参考 OECD/NEAが提唱したステップワイズの進め方

OECN/NEAは、2004年に長期に及ぶ放射性廃棄物マネジメントにおける段階的な意思決定に関しする報告書"Stepwise Approach to Decision Making for Long-term Radioactive Waste Management"を公表した。この報告書には、アダプティブ・ステージングの考え方が導入されている。

【背景】

OECD/NEAの参加各国では、「処分計画の実現に向けての進め方は?」「公衆や地元住民との関係をどのように築くか?」が共通の課題であった。1990年代後半からは、段階的な進め方とともに意思決定の場面での住民参加のあり方、処分計画の可逆性などについて議論が進められ、2004年に本報告書が取りまとめられた。

【概要】

長期にわたる放射性廃棄物マネジメントにおいて考慮すべきことは、"段階的な意思決定（Stepwise decision making）"と"適合性を判断する局面設定（Adaptive staging）"の仕組み導入を促進することで、公衆、特に地元住民が、処分計画の立案やレビュー時に、実質的な参画ができることを促すことにある。これらの仕組みの主要な特質は、段階あるいは局面において、実現性のある制約内で、計画が可逆できる(Reversible)ことである。

可逆性を含めた適合性評価を行う段階的な意思決定のアプローチを導入することで、社会に受け入れられやすくなるという利点を加味し、長期の放射性廃棄物対策を推し進めることができる。報告書の中では以下の項目が結論として取りまとめられている。

- ◆ 段階的な一般参加型の決定様式は既に実施されていることから、処分計画の段階的な意思決定の場面に公衆参加の機会を増やすことが求められる。
- ◆ 段階的な意思決定では、可逆性のある決定を下すことができる。
- ◆ 技術的安全性と社会統制の対立がある場合は、長期の廃棄物対策の中で調和されていく。
- ◆ 公衆の参画と社会的学習は、段階的な進め方の中で促進されていく。
- ◆ 社会的価値観の違いが意思決定を複雑にする。
- ◆ 公衆参加、社会的学習そして適合性を判断する場の設定に関する包括的な原則は、実践的経験と社会科学的な研究から生み出される。
- ◆ 放射性廃棄物対策においては、特別な活動目標がターゲットとなる。
- ◆ 段階的プロセスの実施においては、多くの方法論的な課題が発生する。

column

ヨーロッパ諸国における地層処分場選定の状況

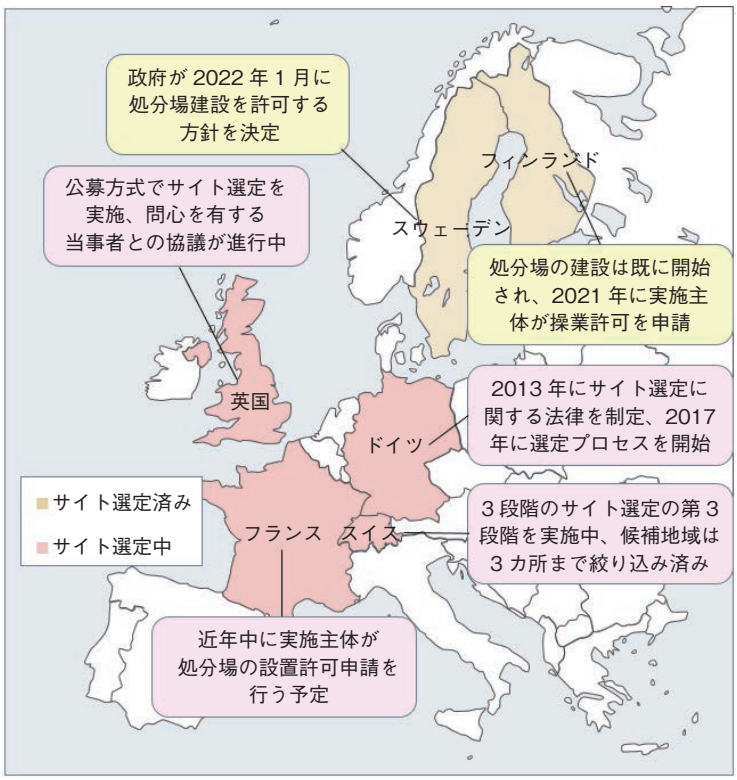
初期段階で難行

地層処分場の選定に係るヨーロッパでの現状について、電気事業連合会はホームページ（2022年4月5日)に下図のように紹介している。

- フィンランドは、2015年に処分場建設の許可が発給され、翌2016年に処分場の建設を開始、2021年には操業許可申請書を提出している。
- スウェーデンは、2022年1月に処分場建設許可の政府方針が示された。
- ドイツ、スイス、フランス、英国は、それぞれ選定段階にあり、サイト特性調査が進められている。

これらの国では、当初の計画通りサイト選定が進んだフィンランドを除き、サイト選定の初期段階で地元の了解が得られず、法律の改正やサイト選定プロセスの見直しがされた歴史を有している。

図 8-4　欧州の主要国における地層処分場のサイト選定や建設に向けた動き



出典：電気事業連合会Webサイト
（各種資料を下に三菱総合研究所にて作成）

8-3

段階的な進め方の導入

日本の地層処分プログラムではどのような経緯で段階的な進め方が導入されてきたのか?

日本において、地層処分事業を段階的に進めることを規定しているのは、法律（最終処分法）であるが、その制定の背景となった原子力長計と高レベル放射性廃棄物処分懇談会報告書を紹介する。

【原子力長計】

原子力委員会は、1994年に策定した「原子力長計（原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画）」において、「7. バックエンド対策（1）放射性廃棄物の処理処分」として、高レベル放射性廃棄物の処分方針や、国の責任、実施主体の設立、役割について言及した（下線、太字は加筆）。

（イ）高レベル放射性廃棄物の処理処分

高レベル放射性廃棄物は、安定な形態に固化した後、30年間から50年間程度冷却のための貯蔵を行い、その後、地下の深い地層中に処分すること（以下「**地層処分**」といいます。）**を基本的な方針**とします。高レベル放射性廃棄物の処分方策を進めていくに当たっては、**国は、処分が適切かつ確実に行われることに対して責任を負うとともに**、処分の円滑な推進のために必要な施策を策定します。（中略）　地層処分については概ね以下の手順で進めることとします。

1）**実施主体**は、地層処分の候補地として適切と思われる地点について予備的に調査を行い、処分予定地を選定し、国は、立地の円滑化を図る観点から必要な措置を講ずるため、その選定の結果を確認します。ただし,その地点を処分予定地とするに当たって、実施主体は地元にその趣旨を十分に説明し、その了承を得ておくものとします。

2）**次に実施主体**は、実際の処分地としての適性を判断するため、処分予定地において地下施設による所要のサイト特性調査と処分技術の実証を行います。

3）**実施主体**は処分地として適当と判断すれば、処分場の設計を行い、処分に係る事業の申請を行いますが、国は、処分に係る事業を許可するに当たり、必要な法制度等の整備を図るとともに安全審査を行います。

処分場の建設･操業の計画は、処分場建設に至るまでに要する期間や再処理計画の進展などの今後の原子力開発利用の状況等を総合的に判断して、2030年代から遅くとも2040年代半ばまでの操業開始を目途とします。

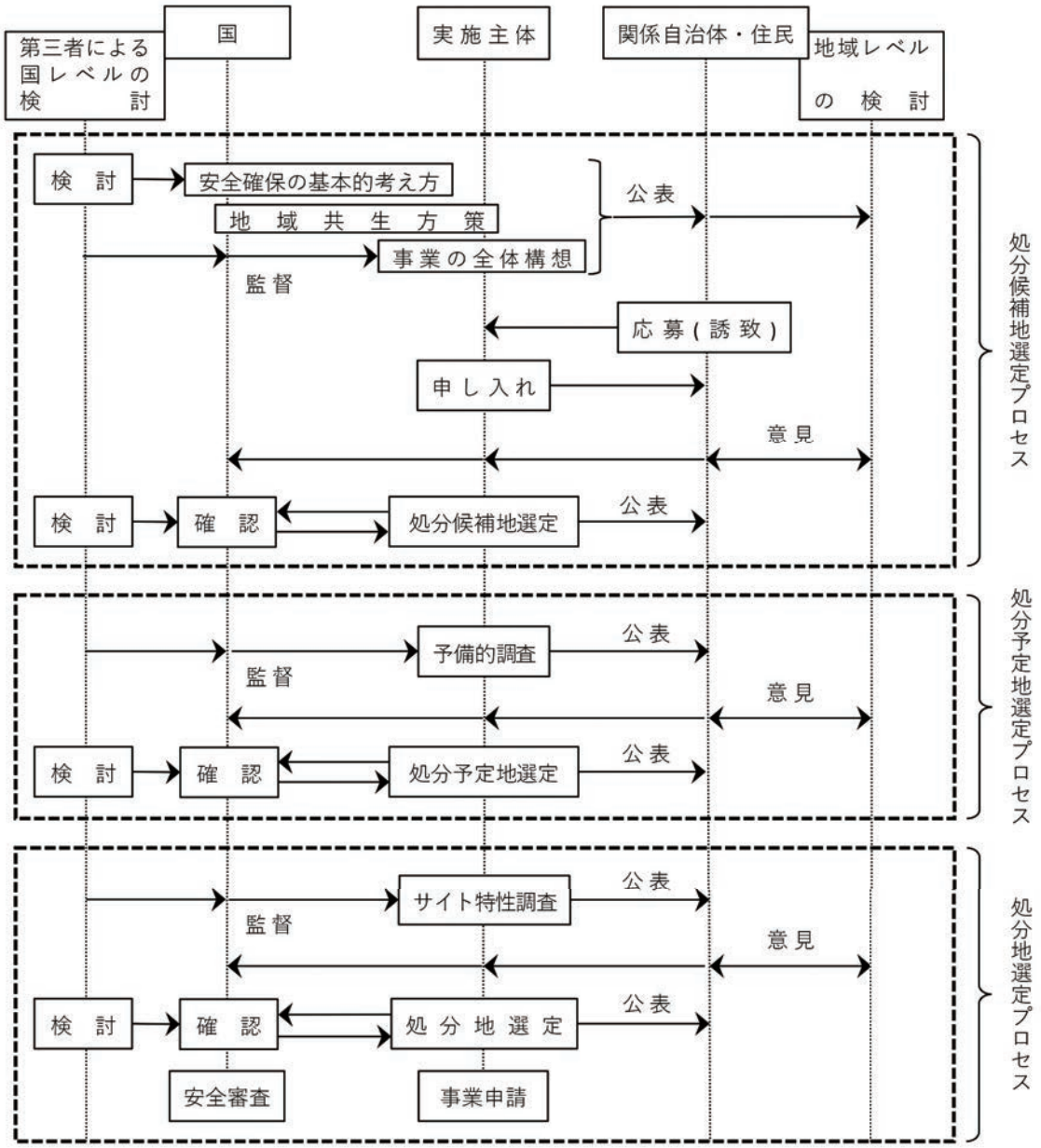
【高レベル放射性廃棄物処分懇談会報告書】

原子力委員会のもとで設立された高レベル放射性廃棄物処分懇談会（処分懇談会）は、1998年5月29日に「高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について」を公表した。この基本的考え方では、処分地選定プロセスの一案として、以下の三段階が提示された。

① 処分候補地の選定プロセス
② 処分予定地の選定プロセス
③ 処分地の選定プロセス

また、各段階の進め方及び国、実施主体、関係自治体・地域住民の関係が右図のように提案された。図8-5の三段階の選定の名称は、この後制定された特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律での名称とは異なるが、ほぼ同じプロセスとなっている。

図8-5　処分懇談会の基本的間上げ方で示された処分地選定プロセスの一案



出典：高レベル放射性廃棄物処分懇談会：高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について（1998）

ポイント

▶ 1994年原子力長期計画で言及された地層処分の処分地選定の手順（段階的な進め方）

▶ 1998年の処分懇談会の基本的考え方での三段階の選定プロセス

8-4

三段階の処分地選定プロセス

最終処分法で規定された三段階の処分地選定プロセスと要件とは?

2000年に制定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（最終処分法）」には、概要調査地区等選定における調査での確認事項、選定の要件、実施計画の変更承認に関することが規定されている。下記に選定の要件を抜粋して示す。

第三章　概要調査地区等の選定

（概要調査地区の選定）

第六条

2　機構は、前項の規定により文献調査を行ったときは、その結果に基づき、経済産業省令で定めるところにより、当該文献調査の対象となった地区（以下この項において「文献調査対象地区」という。）のうち次の各号のいずれにも適合していると認めるものの中から概要調査地区を選定しなければならない。

一　当該文献調査対象地区において、地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がないこと。

二　当該文献調査対象地区において、将来にわたって、地震等の自然現象による地層の著しい変動が生ずるおそれが少ないと見込まれること。

三　その他経済産業省令で定める事項（第四紀未固結岩の存在、鉱物資源の存在）。

（精密調査地区の選定）

第七条

2　機構は、前項の規定により概要調査を行ったときは、その結果に基づき、経済産業省令で定めるところにより、当該概要調査の対象となった概要調査地区のうち次の各号のいずれにも適合していると認めるものの中から精密調査地区を選定しなければならない。

一　当該対象地層等において、地震等の自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないこと。

二　当該対象地層等が坑道の掘削に支障のないものであること。

三　当該対象地層等内に活断層、破砕帯又は地下水の水流があるときは、これらが坑道その他の地下の施設（次条第二項各号において「地下施設」という。）に悪影響を及ぼすおそれが少ないと見込まれること。

四　その他経済産業省令で定める事項（第四紀未固結岩、掘採が経済的に価値が高い鉱物資源の存在に関する記録がないこと）。

（最終処分施設建設地の選定）

第八条

2　機構は、前項の規定により精密調査を行ったときは、その結果に基づき、経済産業省令で定めるところにより、当該精密調査の対象となった精密調査地区のうち次の各号のいずれにも適合していると認めるものの中から最終処分施設建設地を選定しなければならない。

一　地下施設が当該対象地層内において異常な圧力を受けるおそれがないと見込まれることその他当該対象地層の物理的性質が最終処分施設の設置に適していると見込まれること。

二　地下施設が当該対象地層内において異常な腐食作用を受けるおそれがないと見込まれることその他当該対象地層の化学的性質が最終処分施設の設置に適していると見込まれること。

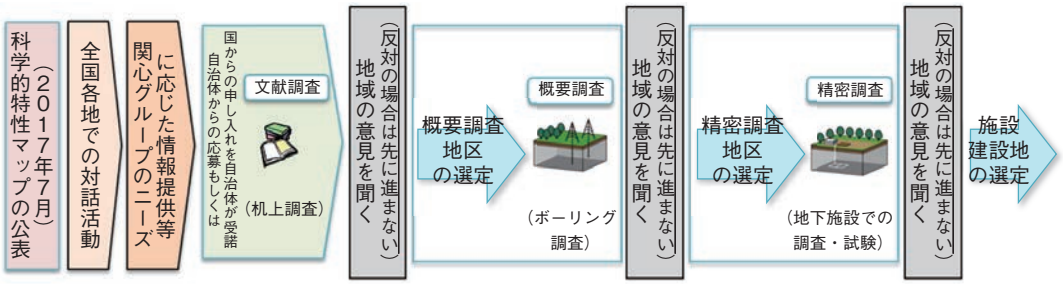
三　当該対象地層内にある地下水又はその水流が地下施設の機能に障害を及ぼすおそれがないと見込まれること。

四　その他経済産業省令で定める事項。

【処分施設建設地選定までの流れ】

法律で規定されている段階的な事業の進め方は、図8-6に示す「施設建設地の選定」までの「文献調査」、「概要調査」、「精密調査」の三段階の調査による意思決定の流れである。それぞれの段階において地質環境が地層処分に適しているかなどを確認し、概要調査地区選定、精密調査地区選定、施設建設地選定が行われることになる。また、各段階の調査地区選定においては、都道府県知事及び市町村長の意見を聴き、これを十分に尊重しなければならないことが法律上必要とされている。

図 8-6　処分施設建設地選定までの三段階の意思決定の流れ



出典：原子力発電環境整備機構（NUMO）資料より作成

最終処分法では、文献調査で評価する要件を定めており、調査を行った地層について著しい変動（例えば、火山・火成活動、断層活動、隆起・侵食などによるもの）がなく、将来も同様な変動が生ずるおそれが少ないと見込まれること、とされている。次段階の概要調査、精密調査では、さらに具体的な要件が定められている。また、調査において、処分を行おうとする地層が第四紀の未固結堆積物でないこと、経済的に価値が高い鉱物資源がないことも法律上求められている。

図 8-7　文献調査地区に求められる要件の調査による概要調査地区の選定プロセス例

出典：原子力発電環境整備機構（NUMO）資料より作成

ポイント

- **最終処分法で規定された三段階の選定プロセス：概要調査地区選定、精密調査地区選定、処分施設建設地選定**
- **選定プロセスに対応した三段階の調査段階：文献調査、概要調査、精密調査**

8-5

新たな取り組みと科学的特性マップ

日本の処分地選定の新たな取り組みと科学的特性マップの果たした役割とは？

高レベル放射性廃棄物の最終処分問題について、関係行政機関の緊密な連携の下、総合的に検討するために設置された「最終処分関係閣僚会議」の第1回会合（2013年12月17日）において、経済産業省が「高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けた新たなプロセス」として提示した以下の課題と見直しの方向性、新たなプロセス（図8-8）について検討され、地層処分プログラムの促進に向けた取り組みの方向性が示された。この結果は、2014年のエネルギー基本計画において閣議決定された。

（課題1）世代の責任として、地層処分に向けた取組を進めることが国際的共通認識である一方、地層処分の安全性に対する信頼が不十分である。

⇒地層処分を前提に取組みを進めることとし、将来世代が最良の処分方法を常に再選択できるよう、可逆性・回収可能性を担保し、地層処分の技術的信頼性を定期的に評価していくと共に、代替処分オプションの調査・研究を並行的に進める。

（課題2）広く全国を対象とした調査地域の公募では、調査受入れの科学的妥当性「なぜここか」の説明が困難であり、受入れを表明する自治体の説明責任・負担が重くなっている状況にある。

⇒国が、科学的根拠に基づき、より適性が高いと考えられる地域（科学的有望地）を提示する。その上で、国が前面に立って重点的な理解活動を行った上で、複数地域に対し申入れを実施する。あわせて、地域の合意形成の仕組みや支援策等について、今後検討の上、適切な措置を講じる。

地層処分の実現に向け、エネルギー基本計画で示された方向性に沿って、国の審議会（総合エネルギー調査会）において個別の検討が行われ、2015年に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」が改定された。改定のポイントは以下のとおりで、これにより政府方針を明確化し、全国的な理解活動等に繋げていくとした。

① 現世代の責任と将来世代の選択可能性
- 可逆性と回収可能性の担保
- 代替オプションを含めた技術開発

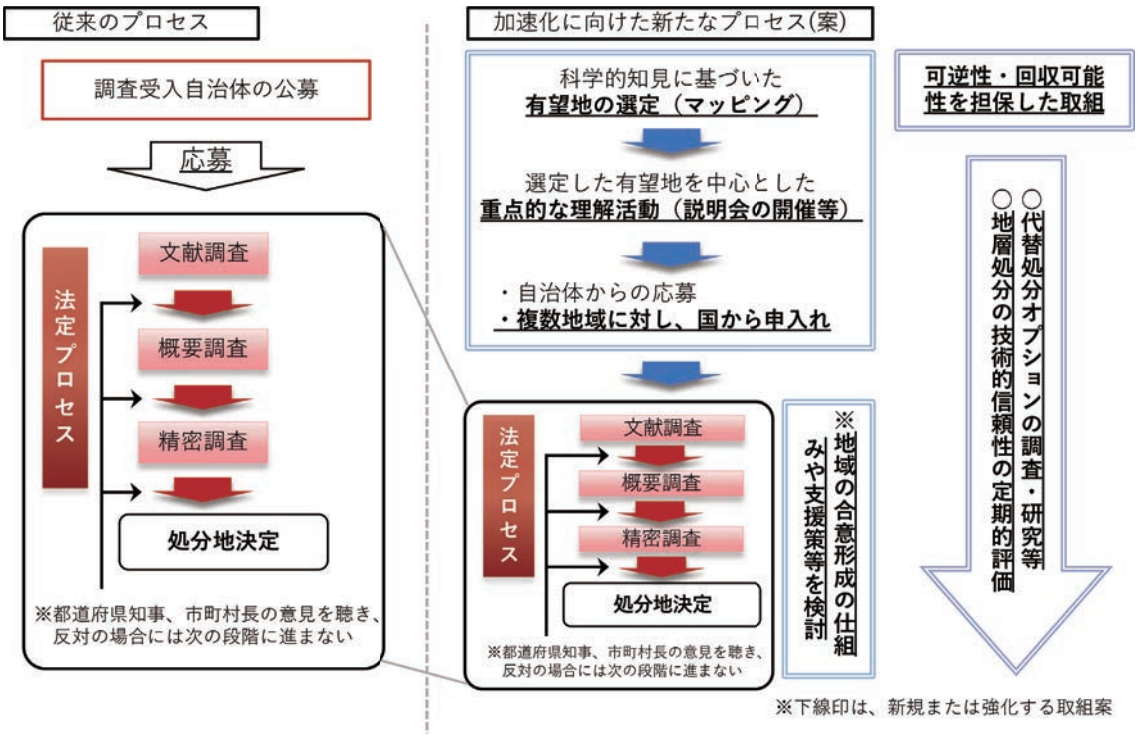
② 全国的な国民理解、地域理解の醸成
- 地方自治体への緊密な情報提供

③ 国が前面に立った取組
- 科学的知見に基づくマップの提示
- 調査等への理解・協力について国から地方自治体への申入れ

④ 事業に貢献する地域に対する支援
- 地域の持続的発展に資する支援措置

⑤ 推進体制の改善等

図 8-8　地層処分プログラムの促進を図るための新たな取り組み



出典：最終処分関係閣僚会議（第1回）資料

【科学的特性マップ】

前述の特定放射性廃棄物に関する基本方針に、科学的知見に基づくマップを提示することが示されたことを受けて、総合資源エネルギー調査会のワーキンググループにおいて議論がなされ、2017年に「科学的特性マップ」が公表された。

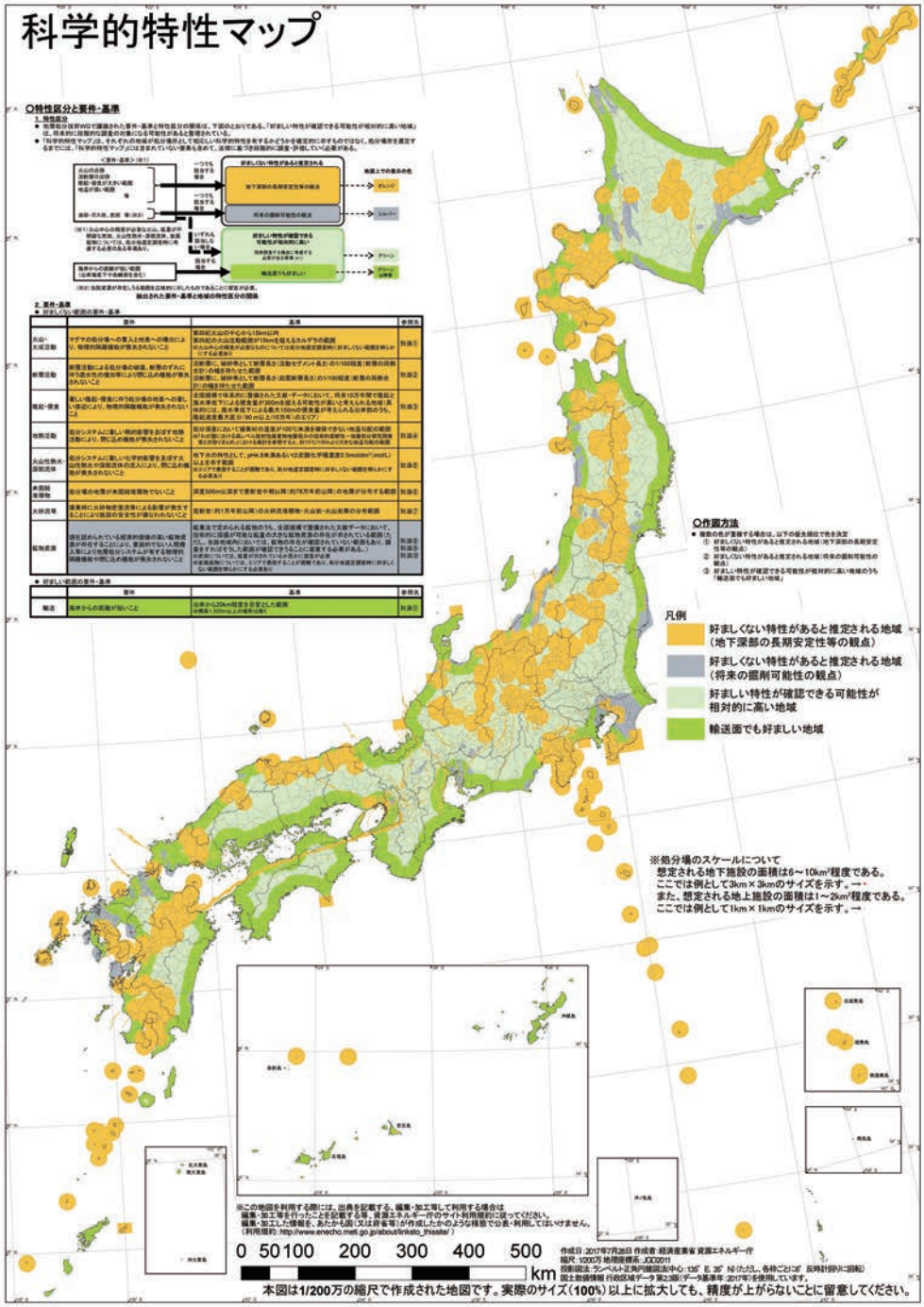
科学的特性マップの目的と役割は以下の通りである。

1. 地層処分についての国民理解促進が目的
2. 科学的・客観的に関連データを整理
3. 国の新方針の下、専門家の検討を重ねて要件基準を確定
4. 長い道のりの最初の一歩

マップは４色で区分され、グリーンは好ましい特性が確認できる可能性が相対的に高いとされ（濃いグリーンは輸送面でも好ましい）、オレンジは地下深部の長期安定性等、シルバーは将来の掘削可能性の観点から好ましくない特性があると推定されるとしている。

科学的特性マップの提示を契機として、国とNUMOは、全国各地できめ細かな対話活動を開始。幅広い国民理解を得た上で、将来的にいくつかの地域で調査を受け入れていただくことを目指すとしており、マップは最初の第一歩の役割を有する。2017 年以降、科学的特性マップを説明する機会を設け、地層処分に関する理解促進の一助となるよう対話活動を継続している。

図 8-9　科学的特性マップ



出典：経済産業省資源エネルギー庁Webサイト
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/maps/kagakutekitokuseimap.pdf

ポイント

▶地層処分プログラムを加速する新たな取り組み：国の積極的関与、公募と申し入れ、科学的特性マップの提示、可逆性・回収可能性の担保、代替処分オプション

8-6

段階的な処分地選定の経緯

日本において段階的に進めている処分地選定は今どのような状況にあるのか、またこれまでの経緯はどのようになっているのか？

NUMOは現在、最終処分法で規定された三段階の処分地選定プロセスのうち、最初の段階に位置する文献調査を行っている。文献調査等を通じて候補地区の適性を評価し、概要調査地区の選定作業を開始することになっている。

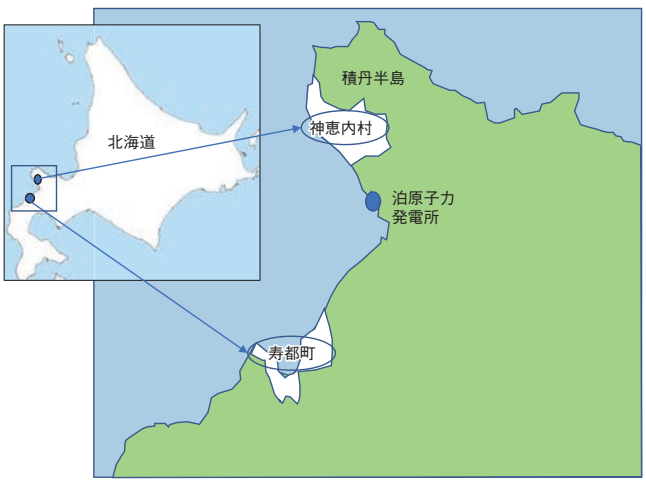
【文献調査の段階に至るまで】

NUMOは、2002年に全国の自治体を対象として文献調査を行う区域の公募を開始した。その結果、複数か所の地区が興味を示し、NUMOとの接触があったが、正式に応募したのは2007年の高知県東洋町だけであった。その東洋町も町長選挙の結果を受け、同年４月には応募を取り下げたため、2020年になるまで文献調査が開始されることはなかった。

2015年の「特定放射性廃棄物に関する基本方針」の改定に伴う国の積極的な関与、2017年の科学的特性マップの提示、また、国とNUMOが連携した全国各地で対話集会の実施により、2020年の10月9日に北海道寿都町（すっつちょう）から応募があり、また同日、国から北海道神恵内村（かもえないむら）に申し入れた結果、受託された。

二つの自治体からの応募と申入れ受託を受け、NUMOは最終処分法に従い、2020年11月2日に、2020事業年度事業計画の変更認可申請を経済産業大臣に行い、同年11月17日に変更認可申請の認可を受け、文献調査を開始した。

図 8-10　文献調査が進められている寿都町と神恵内村の位置



これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート

第8章 地層処分の段階的な進め方

問1 次の空欄を埋めなさい。

1 地層処分を進める各国では、処分地選定段階から処分場を閉鎖するまで、　①　な意思決定を処分プログラムの中に取り入れてきている。

2 各段階において、地域住民の　①　を確認し次の段階に進めることを制度化している国もある。地層処分事業は、処分地が決定した後も施設の建設から閉鎖まで長期にわたって継続することから、その間、地域住民を含む多くの　②　の理解と支援が継続されることが不可欠であると認識されていることが背景にある。

3 米国の全米研究評議会（NRC）の2003年の勧告では、前もって次段階の選択肢やゴールをマイルストーンとして設定し進める　①　のアプローチよりも、各段階の　②　の場面で次段階の選択肢を決定する　③　のアプローチを地層処分プログラムで取り入れることを提唱している。

4 原子力委員会のもとで設立された　①　は、1998年に「高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について」を公表し、　②　の処分地選定プロセス案を提示した。

5 最終処分法において、以下のいずれにも適合していると認められる文献調査対象地区の中から概要調査地区を選定することが定められている。

- 地震等の自然現象による地層の著しい変動の　①　がないこと
- 将来にわたって、地震等の自然現象による地層の著しい変動が　②　が少ないと見込まれること
- その他経済産業省令で定める事項（　③　の存在、鉱物資源の存在）

6 2015年に特定放射性廃棄物の最終処分に関する　①　が改定され、　②　の責任として将来世代に負担を先送りしないよう、地層処分に向けた対策を確実に進めることや、　③　を担保し、将来世代が最良の処分方法を選択可能にする方針などが示された。

7 科学的特性マップは　①　で区分され、グリーンは好ましい特性が確認できる可能性が相対的に高いとされる。濃いグリーンは　②　でも好ましいとされる。

8 NUMOは2002年に全国の自治体を対象として　①　を行う区域の公募を開始した。2020年に北海道の二つの自治体からの応募と　②　の受諾を受けて、NUMOは最終処分事業計画の変更申請の認可を受けた後に　①　を開始している。

問2 次の問で、正しいものには〇、間違っているものには×をつけなさい。

1 ☐ 国際機関等が段階的なサイト選定プロセスを推奨した背景には、広範な地域から処分場スケールへの段階的に調査・評価を進めていくことで、処分地としての科学技術的な適性判断の信頼性を高めていくという認識があった。

2 ☐ 概要調査地区選定、精密調査地区選定、施設建設地選定の各段階では、所在地を管轄する市町村長の意見を聴き、これを十分に尊重しなければならない。

3 ☐ 科学的特性マップの目的は、地層処分についての国民理解を促進すること、科学的・客観的に関連データを整理すること、専門家の検討を重ねて要件基準を確定することであり、いくつかの地域で調査を受け入れていただくことを目指すための第一歩としての役割を有している。

問3 日本における地層処分地選定の経緯・特徴について、300字程度で述べよ。

答え合わせ

第8章 地層処分の段階的な進め方

問1	1	①段階的
	2	①意思　②ステークホルダー
	3	①リニア・ステージング　②意思決定　③アダプティブ・ステージング
	4	①処分懇談会（高レベル放射性廃棄物処分懇談会）　②三段階
	5	①記録　②生ずるおそれ　③第四紀未固結岩
	6	①基本方針　②現世代　③可逆性・回収可能性
	7	①4色　②輸送面
	8	①文献調査　②申入れ

問2

1 ×　地層処分場のサイト選定では、調査・評価による科学技術的な適地の判断だけでなく、地域や社会の合意形成が不可欠であるという認識のもと、各段階で地域住民の意思を確認してから次段階に進めることを制度化している国もある。この背景には、処分地が決定した後も施設の建設から閉鎖まで地域住民を含むステークホルダーの理解と支援が不可欠であると認識されていることがある。

2 ×　最終処分法では概要調査地区選定、精密調査地区選定、施設建設地選定の各段階では、所在地を管轄する都道府県知事及び市町村長の意見を聴き、これを十分に尊重しなければならないとしている。

3 ○　科学的特性マップの作成の背景としては、広く全国を対象とした調査地域の公募において、調査受け入れの科学的妥当性「なぜここか」の説明が困難であり、受け入れを表明する自治体の説明責任・負担が重くなっている状況があった。

問3

【解答例】

2000年に制定された最終処分法では、文献調査、概要調査、精密調査の三段階の調査によって最終処分の施設建設地を選定することが規定された。2015年の最終処分に関する基本方針改定では、可逆性・回収可能性が担保され、科学的知見に基づくマップを提示することなどの方針が示された。国とNUMOは、2017年の科学的特性マップ公表後、マップを説明する機会を設け、全国的な対話活動を継続しており、その結果、現在北海道の2つの自治体で文献調査が実施されている。

三段階の調査における意思決定では、所在地を管轄する都道府県知事及び市町村長の意見を聴き、これを十分に尊重することが定められており、NUMOは各段階において地域の意見を聴き、反対の場合は次の段階に進まないこととしている（317文字）。

【解答に用いられるキーワードの例】

最終処分法、文献調査、概要調査、精密調査、三段階での建設地選定プロセス、科学的特性マップ、基本方針の改定、可逆性・回収可能性

参考文献 第8章 地層処分の段階的な進め方

- OECD/NEA (2004), Stepwise Approach to Decision Making for Long-term Radioactive Waste Management
- National Research Council of National Academies (2003), One Step at a Time, The Staged Development of Geologic Repositories for High-Leve　Radioactive Waste
- EKRA(2000)、Disposal concepts for radioactive waste
- 電事連 Webサイト、世界の地層処分場選定に向けた動向
- 原子力委員会（1994）、原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画
- 原子力委員会高レベル放射性廃棄物処分懇談会（1998）、高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について
- 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（最終処分法）
- 原子力発電環境整備機構（NUMO）、地層処分に関する文献調査について
- 経済産業省（2013）、高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けた新たなプロセス、第1回最終処分関係閣僚会議
- 経済産業省資源エネルギー庁Webサイト、科学的特性マップ
- 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（2017）、地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果（地層処分技術WGとりまとめ）

第9章

地層処分固有の取り組み

極めて長期に放射能が持続する廃棄物から人の健康を防護することを基本原則とした地層処分の特徴から、地層処分には固有の課題がある。本章では、それらに関する様々な取り組みが行われていることについて学ぶ。

本節では以下の項目について学習する。

9.1 ● 長期評価に伴う不確実性
9.2 ● 長期の時間枠への対応
9.3 ● 放射線防護原則の地層処分への適用
9.4 ● 閉鎖後の受動的安全性の仕組み
9.5 ● 地層処分におけるモニタリング
（参考）モニタリングに関する国際共同研究
9.6 ● 地層処分と環境アセスメント

9-1

長期評価に伴う不確実性

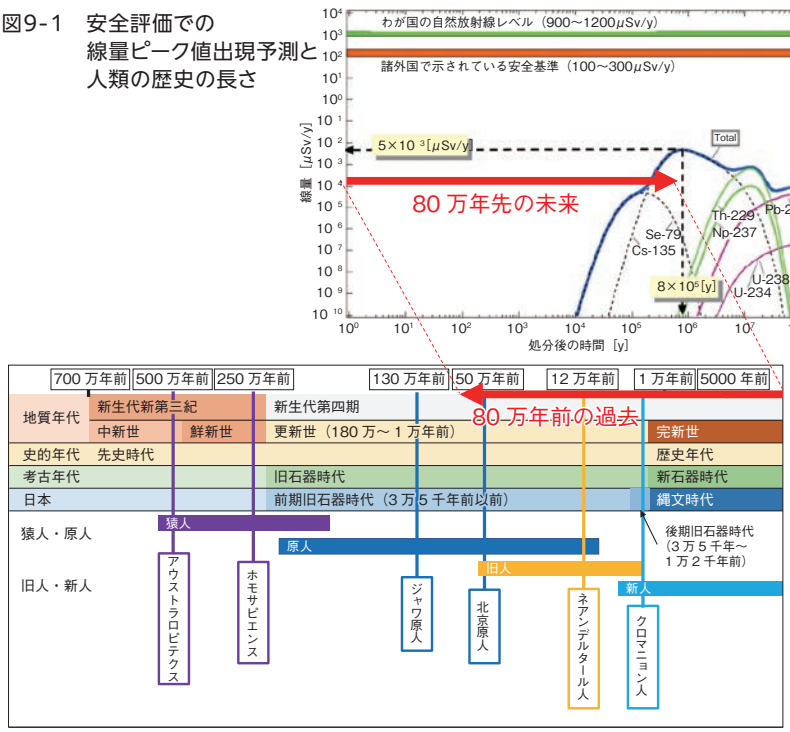
10万年を超える地層処分の長期安全評価に伴う不確実性にどのように対処していくか。

地層処分の安全評価では、廃棄物の有する毒性が長期にわたり持続するため、極めて長期間の安全性を示すことが求められている。例えば、安全評価で計算される被ばく線量のピーク値が現われる時間として、第２次取りまとめでは、80万年後という結果が示された（図9-1参照）。この安全評価は未来を予測して実施されたものではなく、地下水の流れは10万年を超えて変化しない、地表での人間の生活様式は変化しないなどの仮定を前提とした値である。

遡って80万年前はどのようであったかを振り返ると、原人の時代であり、12万年前になってネアンデルタール人が出現し、そのころの気候（氷河期）や生活は現在社会とは大きく異なっている。気候変動等の将来予測はある程度可能であるが、人間の生活や社会環境の予測は、不確実性が大きく、科学的に示すことは非常に難しい。

地層処分の安全確保策は、地下深部に埋設する「隔離」と多重バリアシステムによる「閉じ込め」を基本としている。10万年を超えてのこれらの確保策の有効性を示すためには、安全評価だけでなくその前提となる仮定に伴う不確実性を含めた論拠を集約した「セーフティケース」を準備することが求められる。

図9-1　安全評価での線量ピーク値出現予測と人類の歴史の長さ



出典：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－（1999）
※現·日本原子力研究開発機構

■ 不確実性の種類と安全評価での対応

地層処分の長期安全評価で対象としている10万年を超える時間枠で不確実性が増大することは、地層処分の専門家間で共有された課題である。またスイス、スウェーデン等の規制当局もこの課題の存在を認めており、実施主体が評価する時間枠を決定している。

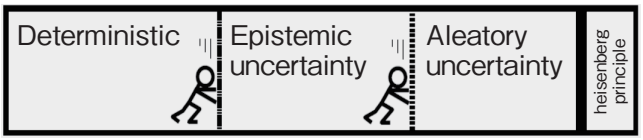
一般に不確実性はAleatory UncertaintyとEpistemic Uncertainty の二つの種類がある(図9-2)。予測の限界として後者は小さくすることができるが、前者は小さくすることが困難であることが知られている。地層処分の長期評価では、このような不確実性に対する取り組みが各国で進められている。その一つの事例研究が次節で述べるOECD/NEA (2004)の報告書である。

地層処分の定量的な安全評価では、不確実性を図9-3にあるような要素にて対応する手法がある。

図9-2　不確実性の種類:AleatoryとEpistemic Uncertainty

Aleatory Uncertainty：自然界が本質的に有するバラツキ
Epistemic Uncertainty：知識の不足からの不確実性

Epistemic な不確実性は、観察、実験等による知識を積重ねることで真に近づくことができるが、Aleatory な不確実性は、本来自然界が有する特質であり常に存在し、小さくすることは困難である。自然界の調査結果はバラツキがあり、それは調査手法の開発により小さくすることは可能かもしれないが、本質的な特質でもある。



予測の限界もある→
科学的根拠に基づかない評価手法 ...
What if シナリオなど

図9-3　安全評価での不確実性への対応

シナリオの不確実性	安全性に係る特性、事象、プロセス（FEP）に着目し、時系列的に発生する蓋然性の高い状態変遷をシナリオとして組み立てる。不確実性は現象の発生頻度を考慮し、リスク論的な分解アプローチによるシナリオの区分で対応する。場合によっては What if シナリオも導入する。
モデルの不確実性	シナリオに従い、核種移行に係わるモデルを作成する。不確実性を排除することも含め、保守的で単純なモデルとしている（実証することは困難）。
パラメータの不確実性	核種移行モデルの解析に用いるパラメータは、調査、実験、統計処理、専門的な判断で設定される。不確実性は保守的な観点での設定および感度解析などで重要性の判断がなされる。

出典:OECD/NEA:The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety(2004)を参照し作成

ポイント

- **長期の評価に伴う不確実性への対応:セーフティケースの構築**
- **不確実性の種類:Epistemic(認識的)とAleatory(偶然的)不確実性**

9-2

長期の時間枠への対応

高レベル放射性廃棄物の長期に持続する毒性に対して、どのように対処するのか。

OECD/NEAは、地層処分が抱える長期の時間枠について、2002年にワークショップを開催しその結果を" The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety, Lessons learnt from the April 2002 Workshop in Paris, France"として公表した。

【背景】

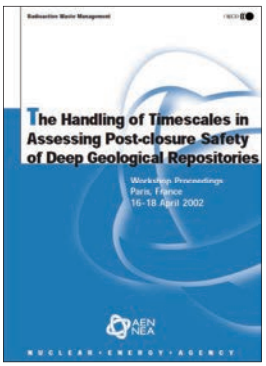
本報告書は、地層処分を進める各国が、処分の安全性を評価する際に直面している「評価の時間スケール」について討議した結果を「何が問題となるのか」に着目して整理し、各国で対応している事例も含め、時間スケールとセーフティケースとの関係について「教訓：lessons learnt」として取りまとめている。

【概要】

地層処分を目指す安全確保策は、放射性物質を長期にわたり人間とその環境から隔離し閉じ込め、漏洩したとしても、人間の生活環境に至るまでに、その放射能レベルは十分小さくなる（規制側が求める値を下回る）ことを前提とした概念である。

どれぐらいの期間これらの安全性を担保する（示す）必要があるのか?この疑問に関して、ワークショップでは次に示す問題が提起され、それぞれについて、2000年当時の状況を踏まえた議論がなされた。

1. 100万年あるいはそれ以上の時間枠でのセーフティケースの議論が本当に必要とされるのか?
2. 必要とされるのであれば、この時間枠での処分場とその環境の変遷はどのようにして予測するのか?
3. 長期の時間枠で発生する避けられない変化について、その変化に伴う不確実性も含めてどのような議論ができるのか?
4. 公衆の懸念事項は、異なる時間に係る異なる種類の議論にどのような影響を及ぼすのか?



出典：OECD/NEA：The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety of Deep Geological Repositories(2004)

結論として、評価の時間枠については、以下の提言がなされている。

「処分場の閉鎖後評価の時間スケールを、複数の時間枠に区分し、その時間枠で着目する現象と不確実性を分析し、その時間枠に適する安全指標と論拠を構築する」。

■ 評価の時間フレームの扱いに対するメッセージ

“The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety”では、地層処分の安全評価で取り扱う”Time Scale”とスケールに対応した”Time Frames”について明確に言及している。

主要なメッセージは以下のとおりである。

a セーフティケース作成の必要性を超えての時間枠について、不確実性が増大することが明らかであるが、安全倫理からは無制限（no time cut-off）の安全評価を実施することになる。この場合の評価結果をどのような指標で照査するか、あるいは、評価結果は参考であり、この結果を裏付ける論拠やエビデンスがなくても、地層処分を否定するものではないことを規制当局も含めて認識しておくべきである。

b 処分場とその環境の予測限界について、変遷に関する予測には限界があることを知らせることは、サイエンスコミュニティのみならずステークホルダー（特に規制当局）にとって重要な事項となる。放射性廃棄物は時間の経過とともに毒性が低減していくことも予測限界の正当性を裏付けるエビデンスとなる。

c 異なる時間枠での安全性に関する議論について、廃棄物の状態や周辺環境の変遷を含めて、異なる時間枠での安全性を様々な安全指標を用いて議論することが重要となる。

d 様式化したアプローチについて、遠い将来の線量やリスクを指標とした安全評価では、人間の生活様式の予測に伴う不確実性に対処するために、現状の生活様式が継続されているとする「様式化アプローチ」を用いることで、際限のない議論を避けることができる。

e 補完的な安全と性能指標について、線量やリスクに代わる指標を用いることで、地表の生活環境の変化や地質環境の変遷予測に伴う不確実性の議論から逃れることができる。このような指標（自然界での地下水等に含まれる放射性物質の流れ（フラックス）やバックグランド放射線量など）を安全評価に取り入れる場合、その特徴や適用する時間枠について十分議論する必要がある。

f 公衆の懸念事項への対応について、公衆は、異なる時間枠での評価結果について懸念しているのではなく、数100年程度の期間、放射性物質が確実に閉じ込められ、漏えいしないということを求めている。

ポイント

▶ 長期の時間フレームでの対応:処分場の閉鎖後評価の時間スケールを、複数の時間枠に区分し、その時間枠で着目する現象と不確実性を分析し、その時間枠に適する安全指標と論拠を構築（ストーリーボードの活用）

9-3

放射線防護原則の地層処分への適用

放射線防護原則は地層処分にどのように適用されるのか。

放射線被ばくによるがんや遺伝性影響の発生は確率的であり、現在の放射線防護では、低線量域でも直線しきい値なしモデルが適用されている。どんなに小さくとも有限のリスクがあるものとして、被ばくを受ける行為に関して「行為の正当化」「防護の最適化」「線量限度の適用」の三原則による放射線防護体系がICRPによって示されている。

- 行為の正当化：放射線を使う行為は、もたらされる便益が放射線のリスクを上回る場合のみ認められる
- 防護の最適化：正当化された行為であっても、社会・経済的なバランスも考慮しつつ合理的に達成可能な限り被ばく量を減らさなければならない(ALARAの原則)
- 線量限度の適用：いろいろな線源から個人が受ける線量については、超えてはならない線量限度を設ける

放射性廃棄物処分へのこれらの防護の三原則の適用については、ICRP Pub77（1997）で検討されている。

行為の正当化に関しては、廃棄物の管理と処分の事業は、廃棄物を発生する行為の正当化の評価に含まれるべきである、としている。

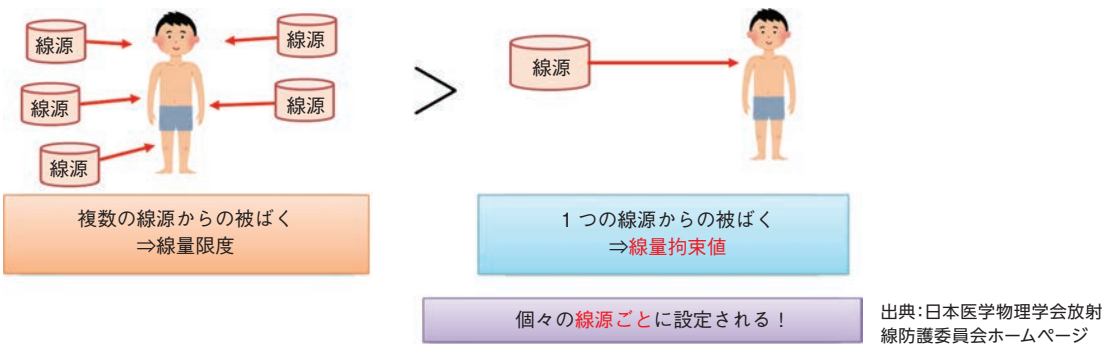
防護の最適化については、 廃棄物処分の管理の根底をなすシステムとして、以下のように勧告されている。

「廃棄物処分からの公衆被ばくの管理は、拘束値(※)を組み込んだ防護の最適化を用いることにより行われるべきである。複数の線源による被ばくを見込んでおくため、単一の線源についての防護の最適化に用いられる拘束値の最大値は、年あたり1mSv以下とすべきである。年あたり約0.3mSvを超えない値が適切であろう。」

また、これにより廃棄物処分の管理に公衆被ばくの線量限度を直接使用することは不要となるだろうとしている。

(※)ある線源からの被ばく線量をできる限り低く(最適化)するための目標となる制限値。経済的、社会的な判断の結果のみでは、生じそうな不公平を制限するため、最適化の手順は、個人線量についての線量拘束値(潜在被ばくではリスク拘束値)で拘束される。

図9-4　線量限度と線量拘束値の違い



出典：日本医学物理学会放射線防護委員会ホームページ

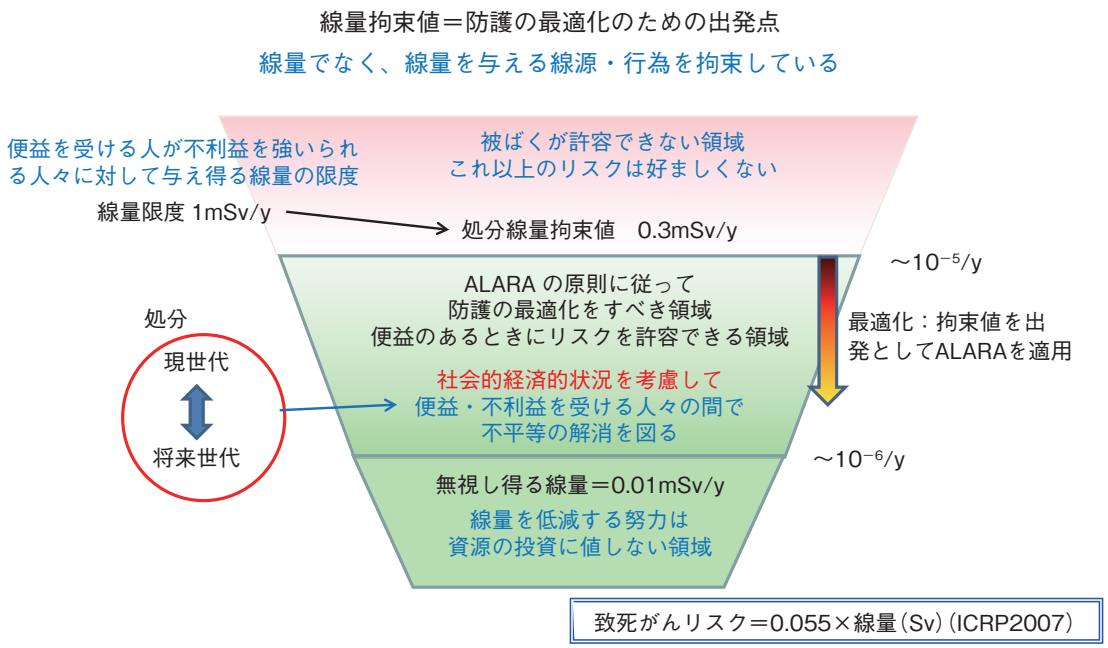
ALARA原則の地層処分への適用について

地層処分に安全防護の最適化（ALARAの原則）を適用する場合、正当化の原則とともに最適化をどのように考えるべきかについて、朽山は、セーフティケースに関する講演で下図を示した（地層処分コロキウム2014年11月25日資料）。

地層処分の長期安全評価のターゲットとしている例えば0.01mSv/y（10μSv/y）は、既に十分小さい線量であり、線量をさらに低減する努力は資源の投資に値しない（正当化できない）領域での議論であるとしている。最適化は線量拘束値（0.3mSv/y）を出発点としてALARAによる最適化を図る。

原子力規制庁は、中深度処分に係る技術基準の検討のなかで、ALARAによる防護の最適化は、処分オプションの比較のために必要としており、線量拘束値に対し設計等を通じて合理的に下げる努力を求めている。

図9-5　地層処分における放射線防護の最適化が目指すところ



●行為の正当化：放射線による損害＜便益
●防護の最適化：被ばくは合理的にできる限り低く
●線量限度：ある個人が受ける被ばく線量の制限

出典：朽山：JAEA第9回地層処分コロキウム講演資料（2014）

ポイント

▶放射線防護の三原則の地層処分への適用：ALARAによる防護の最適化は、処分オプションの比較のために必要であり、線量拘束値に対し設計等を通じて合理的に下げる努力をすることが正当化される

9-4

閉鎖後の受動的安全性の仕組み

地層処分ではなぜ受動的な仕組みが必要なのか。

工学的分野の専門家が工作物の安全確保を図る仕組みは、下図にあるように内外の力に対する設計上での対応（安全率や安全裕度の導入）、定期的なメンテナンスによる修復や更新、モニタリング等による異常発生の事前認知と対応措置の準備、事故等発生時の速やかな対応など、人間がその仕組みを理解でき、確実に制御できる能動的（アクティブ）な安全確保策を導入している。また、このような仕組みを幾重も重ね合わせる（深層防護）ことでより信頼性の高い仕組みとすることができ、さらに地震など多くの自然災害を経験することで、より高度で信頼性の高い工作物を製作することができてきている。

一方、高レベル放射性廃棄物等の地層処分の閉鎖後長期の安全性の確保は、人間が関与（メンテナンスやモニタリングなどの制度的な管理）することなく、自然環境や材料が本来有する物質を閉じ込める能力を活用し、安定した地下深部に放射性廃棄物を人間の生活環境から隔離する形態が、現状の技術で人類が選択した最も実現性が高く信頼性の高い方策であると判断されてきている。

その背景には、10万年以上放射性物質を閉じ込める必要があり、その仕組みを人間や社会に依存することは、これまでの歴史から信頼性が乏しく、不確実性が大きいためである。このように人間が関与しなくても安全を確保する仕組みを受動的安全性（パッシブ・セーフティ）と呼んでいる。

図9-6　従来の安全確保の考え方と地層処分の閉鎖後安全確保の考え方の違い

従来の安全確保の考え方

①設計上の耐用年数と安全率の導入（破壊や使用限界に対する裕度）
②定期的なメンテナンスによる事前不具合防止への対応
③モニタリング等による異常発生の把握と修復方法の準備
④事故等が発生した場合の対応策の準備（深層防護概念と実装）

地層処分における閉鎖後の安全確保策の考え方

➢長期の性能を維持するために閉鎖後は、制度的管理（維持管理、モニタリング、修復などの対応）を必要としないシステムを構築⇒人間の関与からの脱却
➢長期にわたる隔離（10 万年以上）と閉じ込め機能を有する人間が関与しないパッシブ（受動的）でロバスト（頑健性）な多重バリアシステムの導入

処分場の建設・操業・閉鎖段階
能動的な安全性（アクティブ・セーフティ）

➡

処分場を閉鎖した後の長期の期間
受動的な安全性（パッシブ・セーフティ）

受動的安全性の考え方

受動的安全性とは、例えば自動車業界では、シートベルト、ヘッドレストあるいはエアーバックなど、事故時に自動的に運転者の安全を守るように設計された方策のことである。一方、運転者のスキル、ブレーキングなどは、能動的な安全方策として事故を防ぐために、運転者の意思により作動する。

地層処分では、安全評価のシナリオとして放射性核種がガラス固化体から放出され、地下水に溶出し人間環境にまで移行するプロセスを扱っており、この放出量を低減させたり、閉じ込めたり、地表までの核種の移行速度を遅くするといった機能を期待している。このような隔離や閉じ込めの機能は、本来有するあるいは設計で確保された性能で担保されるもので、核種の移行というプロセスを受け入れ、移行を抑制する受動的な仕組み(パッシブ・セーフティ)である。

制度的な管理から独立した安全性：高レベル放射性廃棄物の処分場が閉鎖されたのちの安全性は、処分場の管理が廃止された時点で、能動的なモニタリング、監視、あるいはいかなる制度的管理や緩和策にも依存すべきではない。(IAEA1989, Safety Principle No.3)

地層処分の大きな特徴は、その安全評価のシナリオにあり、地下水に溶出した放射性物質がいずれ地表に到達し、人間が被ばくする潜在的なリスクの評価が前提となっている点で、計算上のピークは数10万年先の未来である。

原子力発電所では安全な運転のために監視や保守といった人間が関与する能動的な対応を行っている。地層処分においても、処分操業中は、放射線モニタリング等の対応が行われ、あるいは埋設終了後の保全期間は土地利用を制限する等の人間が関与する制度的管理が行われることが考えられる。

一方、閉鎖後の長期の安全は、人間が関与するモニタリングや制度的管理に依存しないことが基本となっている。地下深部に埋設した廃棄物は、天然バリアと人工バリアの多重バリアシステムにより人の手を加えなくとも自然本来が有する能力で廃棄物の閉じ込めと隔離する状態が維持される。

ポイント

- **地層処分のパッシブ･セーフティとは、人間が関与しなくても物質や環境が本来有する機能を発揮する仕組み**
- **能動的(アクティブ･セーフティ)との違いとは、人間が関与することで影響を抑制したり緩和する仕組み**

9-5

地層処分におけるモニタリング

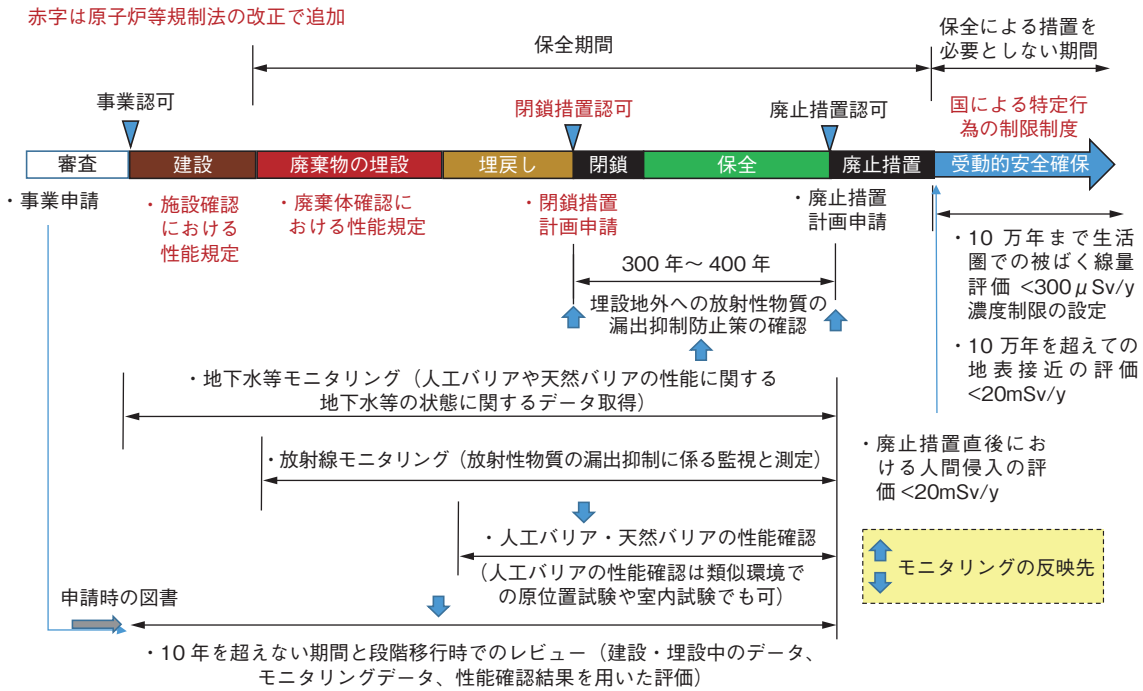
地層処分におけるモニタリングの重要性とは。

地層処分の安全原則として、「将来世代への負担の最小化」、「制度的管理から独立した安全性確保」、「将来世代の被ばく線量低減」があり、これらを満足させるために、処分場閉鎖後は、人間の関与を必要としない受動的安全性に移行することを基本としている。

原子炉等規制法では、第一種廃棄物埋設（地層処分）、第二種廃棄物埋設（中深度処分）における安全規制として、閉鎖措置計画と事業廃止措計画認可が必須となっており、原子力規制庁では、第二種廃棄物埋設となる中深度処分を対象に、これらの申請に向けて準備する事項について、図9-7のような段階的な安全規制の枠組みを検討中である。この中で、青の矢印で示すようにモニタリングの結果には大きな役割が期待されている。

中深度処分において、坑道の閉鎖終了から廃止措置の開始までの段階においても、事業者が、廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏えいの監視や地下水等の状況を確認するためのモニタリングを実施するとともに定期的な評価も実施することを要求している。

図9-7　中深度処分における制度的管理とモニタリングの役割



出典：原子力規制庁（2017）：第二種廃棄物埋設に係る規制基準等の骨子案（平成29年7月）をもとに作成

■ モニタリングの役割

地層処分施設の実際の性能または施設の性能に影響を及ぼす可能性のあるプロセスもしくはパラメータの変化について評価するためにはモニタリングが必要である。IAEA(2014)は、モニタリング・プログラムを処分施設の建設・操業の前及び建設・操業中に実施するものとし、閉鎖がセーフティケースの一部となっている場合にはその閉鎖後にも実施しなければならないとしている。また、処分システムの性能確認と公衆と環境の防護に係るモニタリング等の目的として以下があるとしている。

① 規制要件と許認可条件の遵守の立証
② 処分システムが予測どおりの性能を示していることの検証
③ 安全評価のための仮定及び用いられたモデルが、実際の条件と整合していることの検証
④ 処分施設、サイト及びその周囲環境に関する情報のデータベースの確立（将来の意思決定を支援）
⑤ 公衆への情報提供

2000年に原子力安全委員会が公表した「安全規制の基本的考え方」では、安全確保のための対策（サイト選定、工学的対策）及び安全評価などによる安全確認を講じた上で、事業許可申請時の安全評価に対して段階的に安全確認を行い、最終的な処分場閉鎖の確認によって受動的システムへの移行を行うプロセスを導入することが妥当であるとしている。

また、法規制の観点からは，2004年の原子力安全委員会が公表した「放射性廃棄物処分の安全規制における共通した重要事項」の中では、定期的な評価（安全レビュー）や閉鎖措置計画の認可，閉鎖措置の確認，廃止措置計画の認可などが安全確認を行うための重要なマイルストーンとし、安全確認の根拠のひとつとしてモニタリングは重要な役割を担うと考えられた。

NUMOはサイト選定段階から閉鎖確認までの期間、安全確保や環境保全などの観点からモニタリングを実施する考えを示している（操上他、2010）。閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリングについては、対象とする時間が非常に長いため、安全評価で仮定されるシナリオ全体の確からしさを直接的にモニタリングで確認することができないことから、仮定された個別の現象のいくつか（例えば緩衝材の飽和現象）について確認するとしている。具体的に、地質環境モデルに含まれる特定の現象(例えば地下水位の遷移状況）の予測の妥当性を確認することなどによって、補完的に安全評価の妥当性を示すとしている。

なお、NUMOは上記の閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリング以外にも、放射線安全の確保に関するモニタリング、一般労働安全の確保に関するモニタリング、周辺環境の保全に関するモニタリングについても実施する考えである(操上他、2010)。

ポイント

▶ 地層処分におけるモニタリングの役割

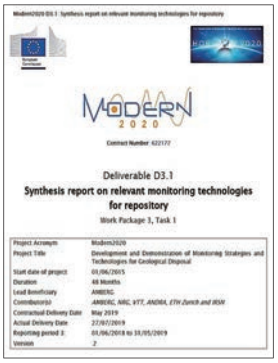
- **受動的安全に移行する過程での意思決定の根拠となる情報を提供**
- **処分システムの性能確認**　- **公衆への情報提供**　**等**

参考　モニタリングに関する国際共同研究

欧州では、地層処分事業の進展に伴い、処分事業に適用するモニタリング技術の開発の重要性から、共同で技術開発を進める機運が高まり、2013年に"EU MoDeRn Project"が形成された。このプロジェクト（第1世代プロジェクトと呼ぶ）は、欧州各国を中心に、地下研究施設の展開とともに継続して実施された。以下は、第2世代のプロジェクトMoDeRn2020におけるモニタリング技術の取りまとめレポート"MoDeRn2020 D3.1: Synthesis report on relevant monitoring technologies for repository"について紹介する。

第1世代のMoDeRnプロジェクト(2013-2016)においてモニタリングは、放射性廃棄物管理プログラムのための多くの目的と活動を含む多目的ツールとして認識されていた。さらに、このプロジェクトでは、改善すべき利用可能な技術にいくつかの限界があることが示唆された。

MoDeRn2020 (2016-2019) では、30社のうち21社のパートナーが、このような限界を克服するためのいくつかの研究開発活動に参加している（ワークパッケージWP3）。このプロジェクトでは、異なる周波数と距離の人工バリアを介した無線データ伝送、無線センサーユニットに焦点を当てた電源供給、様々なタイプの光ファイバー(FO)ソリューションを含む地層処分に適した新しい原位置センサの開発、地球物理学的手法に基づく非破壊モニタリングの改善、モニタリングシステムのコンポーネントを適格化するための方法論の開発など、非常に優れた成果が得られた。本報告書では、EUプロジェクトMoDeRn2020のWP3で実施された研究の概要と、将来の放射性廃棄物処分場のモニタリングを実現するために残された課題について記述している。結果のより詳細な説明は、MoDeRn2020の成果物D3.2、D3.3、D3.4、D3.5、D3.6に記載されている。



出典：MoDeRn2020 D3.1 (2020), Synthesis report on relevant monitoring technologies for repository

ワークパッケージで検討されたモニタリング技術を以下に示す。

- 人工バリア等を対象とし、異なる周波数や通信距離を持つ地中無線データ送信技術
- 地中無線装置を対象とした、現在の一次電池に代わる無線電源供給技術
- 様々な光ファイバー（FO）センサを含む新たなセンサ技術
- 電磁波など地球物理学的手法に基づく非破壊モニタリング（センサやケーブルがEBSの性能を低下させない）技術の改善
- モニタリングシステムの構成要素の適格性を認定する方法論の開発

これらの検討事項に対する現状での対応状況が以下にまとめられている。

- 一般的に重要なテーマはエネルギー効率で、特に長距離データ伝送システムでは、エネルギー効率が伝送できるデータ量の制限要因となる。さらに、短距離無線ソリューションは、他のデータ伝送システム（例：光ファイバー）と競合しており、エネルギーニーズの一般的な理解は、全体的なモニタリング戦略の戦略的選択に役立つ可能性がある。
- 長距離無線通信に関する今後の課題としては、長期的な電源供給の研究、送信アンテナと処分場内の透磁率の高い材料（坑道の支保に使用されている鋼鉄など）との相互作用の可能性、上部岩盤の電界伝搬に対する不均質性の影響などが挙げられる。さらに、一般的な処分場の深さは500m以上であるため、275mを超える距離でのデータ伝送の実証や、日々のノイズや干渉の変動による全体的なパフォーマンスを大幅に向上させるための、より洗練されたデータ処理方法の開発も行っている。
- 短距離無線ソリューションに関連するトピックとしては、より成熟した状態で開発することが挙げられる。125kHzの場合、処分場に埋設されたアンテナの周囲の材料や金属部品が、アンテナコイルの微妙なチューニングを変えてしまうため、アンテナの自動チューニングの開発が必要となる。さらに、容器格納の改善や自動化の推進なども開発課題となっている。
- MoDeRn2020以降の活動では、エネルギー源となる部品を、センサ・ペイロード、無線通信、カプセル化、必要な処分場の外付け部品などを含む、より完全なシステムの構成要素として統合し、検証する必要がある。さらに、この作業は、複数の無線センサノードを用いたシステムの全体的な設計や、処分場でのモニタリング戦略にもつながると考えられる。
- 最終的な処分場モニタリングの実装に向けた無線エネルギー伝送のさらなる精緻化は、近傍の水分や導電性、誘電率、透磁率を持つ他の材料とのアンテナ共振を維持するために必要となる。双方向のデータ転送を統合するための最も重要な開発課題は、高度な変調技術やRFパワーレベルの増加などにより、外部ノイズに対するデータアップリンクの耐性を向上させることと、電力供給、データアップリンク、データダウンリンクのためのTDMベースのプロトコルを設計することである。
- センサの動作に適したエネルギーと出力容量を持ち、長寿命で自己放電率の低い効率的な中間エネルギーストレージが必要となる。

9-6

地層処分と環境アセスメント

地層処分の環境アセスメントはなぜ必要とされるのか、また環境アセスメントが果たす役割とは？

地層処分の分野における環境アセスメント（環境影響評価）の役割については、国によりその要求事項が異なっている。日本では、1993年に制定された「環境基本法」を受け1997年に制定された「環境影響評価法（環境アセスメント法とも呼ばれる）」により適用する事業が定められている（地方自治体独自に適用事業や評価項目を定めている場合もある）。

現段階では地層処分事業はその対象になっていないが、その背景として、事業として処分地が決まっていないことがある。

【中央環境審議会から答申】

環境省の中央環境審議会は、2010年に環境アセスメントの在り方を議論し、「今後の環境影響評価制度の在り方について（答申）」を公表した。その中で、地層処分事業は、今後の実用化の状況を見たうえで、法律の対象に追加するかを判断するとしている。

地層処分の実施主体であるNUMOでは、設立当初から将来的に問われる周辺環境保全についての環境影響評価手法の開発を進めている（NUMO「安全確保方策2010年度版」）。

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。**

【海外での環境影響評価】

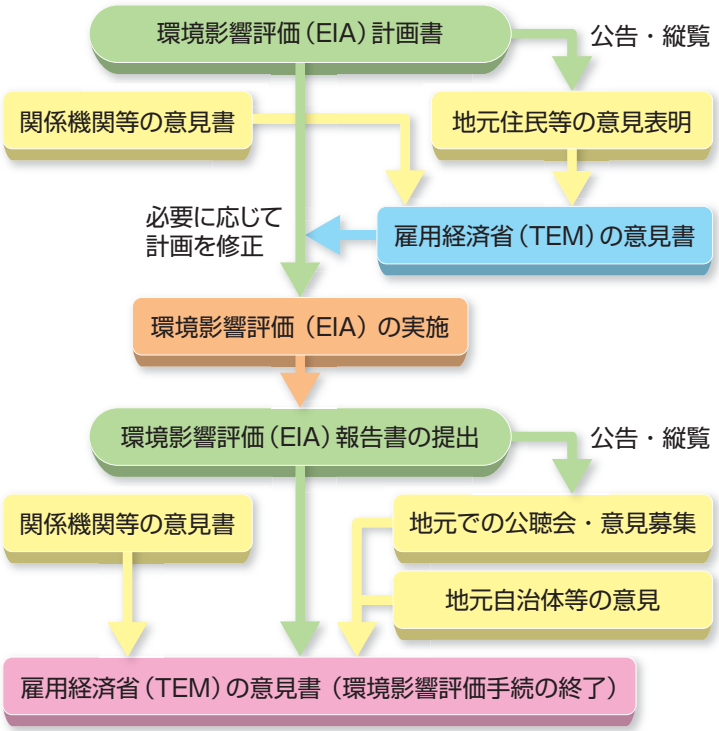
地層処分を進めるフィンランドでは、実施主体であるポシヴァ社が候補地選定の段階で環境影響評価報告書（EIA報告書）を公表した。この報告書には、地層処分の科学技術的な評価（安全評価が中心）とともに、候補地域の自然環境への影響（処分場の閉鎖前と閉鎖後）、社会経済への影響（景観、地域の雇用、地域経済への影響など）が取りまとめられている。

フィンランドでは法律により環境影響評価のプロセスが明確に規定され、処分場の候補サイトがある自治体において、評価を始める前にEIA計画書を公表し、関係省庁や地元住民の意見を反映してから評価を実施し、EIA報告書が取り

まとめらる。その後、評価結果に対する関係省庁や地元住民との意見を反映して国が意見書としてとりまとめる。環境影響評価報告書は、ポシヴァ社が1999年にオルキルオトに処分場を建設する事業計画の申請書を政府に提出した際に添付され、政府による決定の判断材料の一つとなった。

フィンランドの事例では、自然環境保全と住民の生活環境保全に着目した環境影響評価以外に、自治体の税収や雇用などの社会経済的な評価や処分施設受け入れに関する世論調査が含まれていることが特徴である。

図9-8　環境影響評価(EIS)手続きの概要



出典：経済産業省資源エネルギー庁：諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について（2022）

【EIAは事業への地元住民の参画を促す】

EIAが果たす重要な役割について、OECD/NEAは、EIAはステークホルダーが処分事業に参画するツールとなると言明している。

事例として前述したフィンランドの例が記述され、EIA報告書の作成段階から候補地の地元住民の意見を聴くための機会と場を設定し、処分場が自然や社会に与える影響を丁寧に説明するとともに地元住民の意見を反映したことが記述されている。その中で、地元で処分場を受け入れることによる作物や水産物への風評被害のリスクについての懸念が示されたが、EIA報告書ではその影響の評価も取りまとめられている。

このような環境影響に関する地元住民との対話の場で、地層処分の専門家が考えるリスクと地元住民が心配するリスクとでは、乖離があることが認識された。また、環境影響は極めて局地的な評価とならざるを得ないが対話の場では、放射性廃棄物対策全般に関する意見が出されることも多く（例えば、原子力エネルギーの利用と放射性廃棄物の対策の可否など）、その意味でEIAを実施する前に、放射性廃棄物管理に関する国家戦略を策定し、国民との広範な協議を行っておく必要があると提言している。

ポイント

- **地層処分における環境アセスメントは地元住民の処分事業への参画を促すツールとなる**
- **その意味で地層処分を対象とした環境アセスメントには、法律の枠組みを超えた地元住民が心配する社会環境への影響も考慮する必要がある**

これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート

第9章 地層処分固有の取り組み

問1 次の空欄を埋めなさい。

1 地層処分の安全評価では、長期の変動予測において不確実性が増大することが専門家間での共通認識となっている。このような不確実性は、　①　から生じる「Epistemic Uncertainty」と自然界等が　②　「Aleatory Uncertainty」の二種類に区分される。

2 安全評価では、このような不確実性に対しては、　①　の不確実性、　②　の不確実性、　③　不確実性のような分類にて対応する方法もある。

3 処分場閉鎖後の長期安全性に関わる　①　では、時間スケールが相当に異なる現象や不確実性を考慮しなければならない。処分場の閉鎖後評価を複数の時間枠に区分し、それぞれで着目する　②　と不確実性を分析したうえで、その時間枠に適する判断の　③　と論拠を構築することが提言されている。

4 ICRP Pub77(1997)によれば、廃棄物処分からの公衆被ばくの管理は、　①　を組み込んだ防護の　②　を用いることにより行われるべきとしている。

5 一般的に専門家が　①　を得られるのは、対象が確実に　②　でき、その　③　が理解できること（OECD/NEA 2013)といわれている。これに反して、地層処分の安全確保策は、極めて長期にわたることもあり、制度的管理に依存しなくても安全が確保できる　④　を基本としている。

6 処分場閉鎖後の安全確保策である　①　に移行する段階、例えば、日本では、　②　段階にあたるが、そこでの判断では処分場の建設前から継続して実施される様々な　③　から得られる情報が大きな役割を果たす。

7 放射性廃棄物処分における　①　と　②　は、段階的な意思決定や　③　の作成・更新に利用され、また、現象理解の強化及びそれらの挙動に対する　④　にもつながる（IAEA 2009）。

8 現段階では日本の地層処分事業は、　①　の対象となっていないが、NUMOは事業者として自主的に周辺環境保全についての　②　について取り組んでいくとしている。地層処分事業が進んでいるフィンランドでも実施主体が　②　を実施していた。

問2 次の問で、正しいものには○、間違っているものには×をつけなさい。

1 □ 地層処分固有の取り組みとして最も重要な課題は、長期の評価に係る時空間の変遷予測に係る不確実性への対応であり、これらの不確実性は、研究開発や調査が進めば減少していく。

2 □ 地層処分の長期安全確保の原則から、処分場が閉鎖されたのちは、モニタリングなどの制度的な管理に依存することなく安全性が担保できる受動的な安全性となる仕組みを取り入れている。

3 □ 環境アセスメント（環境影響評価）は、大規模な開発事業等の実施による環境への影響を評価し、環境の保全に十分に配慮して事業が実施されることを目的としており、その一環として住民や専門家等の幅広いステークホルダーの意見を取り入れることが求められている。現段階では日本における地層処分事業は環境アセスメントの対象事業となっていない。

問3 時間の経過とともに不確実性が増大していく長期安全評価への対応方法の例について300字程度で述べよ。

答え合わせ

第9章 地層処分固有の取り組み

問1	1	①知識の不足　②本来有するばらつき
	2	①シナリオ　②モデル　③パラメータ
	3	①セーフティケース　②現象　③指標
	4	①拘束値（線量拘束値）　②最適化
	5	①安心感　②制御　③仕組み　④受動的安全性
	6	①受動的安全性　②閉鎖措置　③モニタリング
	7	①モニタリング　②サーベイランス　③セーフティケース　④信頼感の醸成
	8	①環境影響評価法（環境アセスメント法）　②環境影響評価

問2

1 ×

地層処分で対応する不確実性には、知識や情報の不足に起因するEpistemicな不確実性と自然界などに本質的に存在するAleatory な不確実性が存在する。後者の不確実性については、研究開発等の進歩や調査が詳細に進んでも常に存在する不確実性となり、評価の中では保守的な考え方や確率論的な考え方の導入で対応している。

2 ○

地層処分の安全確保策の大きな特徴として、将来世代の負担を最小化し、人間が関与しなくても安全性が担保できる安全原則に基づいており、処分場の閉鎖後は受動的に安全性が確保できる仕組みを取り入れている。この仕組みは従来のアクティブな安全確保策と大きく異なる点であり、公衆にとっては理解が難しいといわれている。

3 ○

日本の環境アセスメントでは、これから行う環境影響評価の項目及び手法を、公衆や地方公共団体などの意見を聴きながら決めることが図られている。フィンランドの処分場選定プロセスの事例でも、1990年代後半に実施された環境影響評価において、最初に事業者による環境影響評価計画書に対して住民等のステークホルダーの意見が広く集められ、その結果を踏まえて環境影響評価が実施された。さらに、フィンランドの環境影響評価の目的の一つとして、サイト選定プロセスへの住民参加の促進があり、環境影響評価を通じて事業者と住民等のステークホルダーの間でのコミュニケーション活動が精力的に行われた。

問3

【解答例】

地質学的に安定した適切な地層処分場サイトを選定したとしても、処分場閉鎖後の数万年以上という時間スケールでは不確実性が高くなるため、例えば安全評価において線量やリスクを詳細に計算することが適当な時間枠と、有効性が低下する別の時間枠を設定し、線量やリスクに代わる補完的な指標も含めて議論する方法が考えられる。また、人間の習慣や地表環境といった特性はより短い時間スケールでの変化が想定されるため、現状の生活様式が継続されているという様式化アプローチを設定し、それから得られる線量・リスクを仮想的な決定グループに適用して分析する方法がある。これにより不確実性が大きい将来の人間の習慣などの問題についての際限のない推測を回避できる（311文字）。

【解答に用いられるキーワードの例】

安全評価、時間枠、補完的指標、異なる時間枠での議論、様式化アプローチ、不確実性の回避

参考文献 第9章 地層処分固有の取り組み

- 核燃料サイクル開発機構※(1999)わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 −地層処分研究開発第2次取りまとめ− 総論レポート (※現・日本原子力研究開発機構(JAEA))
- OECD/NEA(2004), The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety, Lessons learnt from the April 2002 Workshop in Paris, France
- ICRP Pub 26 (1977), 1977 Recommendations of the ICRP
- ICRP Pub 77 (1997), Radiological Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste
- 日本医学物理学会放射線防護委員会Webサイト、線量拘束値
- 杤山(2014)、コミュニケーションツールとしてのセーフティケース、地層処分コロキウム講演資料
- OECD/NEA (2013), The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories
- IAEA (1989), Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High-Level Radioactive Wastes, Safety series No. 99
- OECD/NEA (2004), POST-CLOSURE SAFETY CASE FOR GEOLOGICAL REPOSITORIES, NATURE AND PURPOSE
- 原子力規制庁(2017)、第二種廃棄物埋設に係る規制基準等の骨子案
- MoDeRn2020 D3.1 (2020), Synthesis report on relevant monitoring technologies for repository
- 原子力発電環境整備機構(NUNO)(2010)、放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングと初期サーベイランスに関する検討、NUMO-TR-10-01
- 原子力安全委員会(2000)、高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第一次報告)
- 原子力安全委員会(2004), 放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について
- IAEA (2014), Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities No. SSG-31
- 操上他(2010)、放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングと初期ベースラインに関する検討、NUMO-TR-10-01
- MoDeRn 2020 Web site、MoDeR2020 International Conferences, Modern2020 organised the 2nd international conference on Monitoring in Geological Disposal of Radioactive Waste, 9-11 April 2019, Paris, France
- 環境影響評価法
- 中央環境審議会 (2010), 今後の環境影響評価制度の在り方について (答申)
- POSIVA(1999)、The Final Disposal Facility for Spent Nuclear Fuel - Environmental Impact Assessment Report
- 経済産業省資源エネルギー庁(2022)、諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について

第10章

地層処分に対する信頼

地層処分事業を進めるには、技術的な課題だけではなく、社会的な視点での取り組みが必要である。地層処分事業への信頼をどのように高めていくのか、国際機関での議論や、地下研究施設、自然現象などの理解促進にも資する技術的アプローチについて学習する。

本節では以下の項目について学習する。

10.1 ● 信頼感の醸成

10.2 ● 可逆性と回収可能性

10.3 ● 地下研究施設の役割

（参考）世界の地下研究施設での主要な試験

（参考）地下研究施設の役割

10.4 ● ナチュラルアナログの役割

10.5 ● 地域とのパートナーシップ

10-1

信頼感の醸成

地層処分事業を進めるために必要となる信頼をどのように得ていくのか？

OECD/NEAは、2000年に、放射性廃棄物管理に関する社会的側面の取り組みについて国際的な経験を共有するための組織として、ステークホルダーの信頼に関するフォーラム（FSC）を設置した。

【背景】

各国の放射性廃棄物管理計画は、処分場の建設に向け様々な段階にあり、廃棄物の種類や特徴を考慮して様々な技術的アプローチが適用されている。いずれの場合においても、処分の実施側と受け入れる可能性のある地域との実効的な関係の構築が必要である。

FSCは、「放射性廃棄物管理に関する様々な意思決定プロセスに対して興味あるいは役割を有するすべての組織、グループや個人」であるステークホルダー間の対話を確かなものとし、意思決定プロセスに対する信頼を強化する手法などを検討するための活動を行っている。

【FSCの活動】

- 国別ワークショップ：開催国のステークホルダー（実施主体、安全規制当局、NGO、地方自治体などの代表や一般市民）とFSCメンバーが参加し、開催国が選定したテーマに基づいた議論を通じて得られた情報や経験を共有し、それぞれの活動にフィードバックするとしている。
- 年次総会：各国の計画の進捗状況や取り組みを共有し自国の計画に反映するとともに、特定のトピックに関する討議を行っている。また、調査などを企画し実施を決定するとしており、実施した調査結果は、報告書として取りまとめステークホルダーの情報源としている。

FSCは、社会的価値観と要望に沿った形での放射性廃棄物の安全で確実な管理に対するステークホルダーの信頼には、多くの要因があることを学んだとして以下を**信頼の要因**として整理している。

- 意思決定プロセス：技術的及び社会的な側面を組み合わせた段階的なアプローチが求められる。あらゆるステークホルダーの相互学習を促進すべきであり、ボトムアップな方法によって公衆が専門家と並行して早期に取り組みを開始できる。
- マネジメントの枠組み：関係者の役割と責任について明確な枠組み（財政、サイト選定後の事業計画を含む問題解決策、情報提供、教育など）の整備が必要となる。
- ステークホルダーの義務：すべてのステークホルダーがそれぞれの責任を負い、地域と中央の関係者が合意できる解決策を目指し協力するとともに、地域を超えた対話が規制機関や実施主体への信頼のために必要となる。
- 透明性：関係者すべてがプロセスに関する情報へのアクセスと意見を提供できる場が必要である。

【公衆の信頼を高めるための教訓と原則】

欧州委員会の共同研究センターは、2015年に、放射性廃棄物管理分野の公衆参加についての取り組みとして、FSCが展開している活動のレビューを行った。FSCが公表している報告書や小冊子を解析し、公衆の信頼を高めるための、従うべき原則、信頼要因、アプローチの統合について以下のように整理している。

◆ 従うべき原則：公衆の信頼と信用を確立するには、技術的要因に加えて放射性廃棄物管理に伴うリスクと安全性に対する社会的懸念を把握し対処する必要がある。FSCは、以下の原則を提案したとしている。

最重要原則

「意思決定は、適格かつ公正な対話に十分な時間を与える段階別アプローチの実施など、状況の変化に適応するために柔軟性を提供する反復プロセスを通じて行うべきである」

「社会的学習は、さまざまなステークホルダーと専門家の相互交流を奨励することで促進すべきである」

「意思決定プロセスへの公衆の関与は、さまざまな知識、信念、関心、価値、世界観をもつ個人の間で建設的かつ質の高いコミュニケーションを奨励することで促進すべきである」

◆ 信頼要因：ステークホルダーの信頼、信用、同意を得るために「開放性、透明性、技術的適格性、手続きの公平性」といった信頼要因が重要であり、これらが日常的に行われることが必要である。FSCは、以下が公衆の信頼のために重要な要因であるとしている。

信頼要因	レベル	重要な推進要因
開放性 透明性 技術的適格性 手続きの公平性	役割と構造	・国家の関与 ・RWMの政策枠組み ・関与する推進役としてのRWM組織 ・市民の参加と権限付与
	意思決定プロセス	・バランスのとれたプロセス ・（社会的）学習の促進 ・受入れ地域への付加価値の付与
	RWM機関	・信頼要因の実証
	RWM施設	・設計 ・地域社会の監視と監督

◆ アプローチの統合：段階的アプローチとパートナーシップアプローチを組み合わせた統合的なアプローチにより公衆の信頼と信用を醸成することができる。FSCは、段階的アプローチは、意思決定プロセスの各段階で、問題の定義と解析、政策の策定、実施、モニタリングが周期的に実行されるものであり、パートナーシップアプローチとは、実施主体と地域の間で技術的・社会経済的問題の評価のために協力する公式または非公式の取り決めを行うものであるとしている。

ポイント

▶ FSCが提言する信頼感醸成

- **段階的アプローチによる意思決定プロセス**
- **関係者の役割と責任の明確な枠組み**
- **規制当局や実施主体への信頼**
- **情報公開などの透明性の確保**

10-2

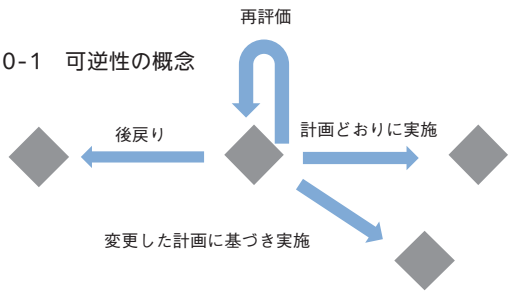
可逆性と回収可能性

なぜ「可逆性と回収可能性（R&R）」が必要とされるのか？

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、処分事業の可逆性と埋設した廃棄物の回収可能性については長年にわたり検討されてきた概念である。

OECD/NEAは、2007～2011年にR&Rプロジェクトを設置し検討を行い2012年に最終報告書を公表した。可逆性と回収可能性は、将来世代に一定レベルの選択の自由を残す基本理念に対応するものであるとし、以下のように定義している。

図10-1　可逆性の概念



決定の可逆性：オプションを評価した結果として考えられる道筋（後戻りを含む）

出典：OECD/NEA：高レベル放射性廃棄物および使用済燃料の深地層処分のための可逆性と回収可能性（Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High –level Radioactive waste and Spent Fuel）（2011）

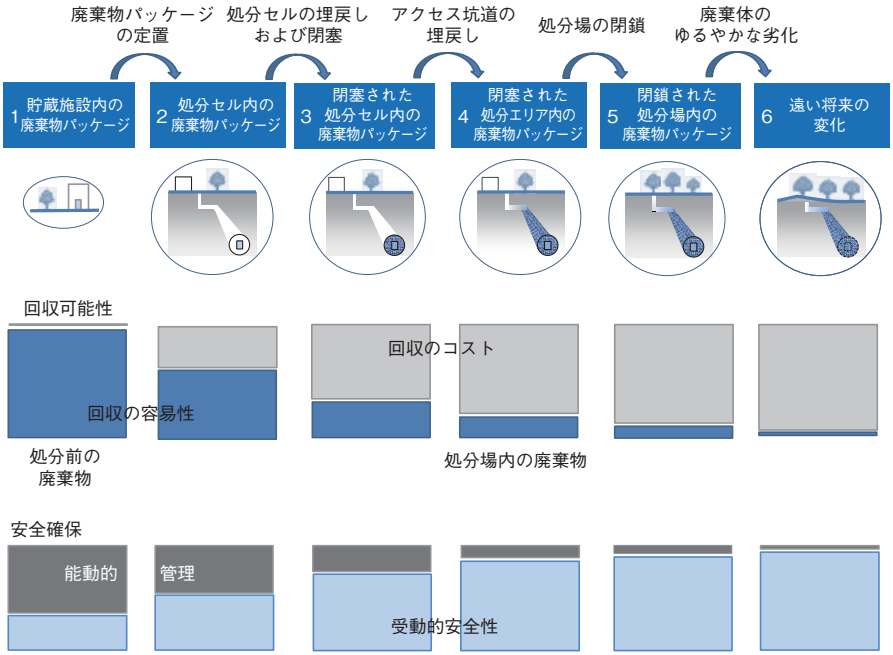
- ◆ 可逆性（Reversibility）とは、処分システムを実現していく間に行われる決定を元に戻す、あるいは検討し直すことができることを意味する。後戻り（reversal）とは、決定を覆し、以前の状態に戻す行為である。
- ◆ 回収可能性（Retrievability）とは、処分場に定置された廃棄物あるいは廃棄物容器全体を取り出すことができることを意味する。回収（retrieval）とは、廃棄物を取り出す行為である。回収可能性があるということは、回収が必要となった場合に回収ができるようにするための対策を講じることを意味している。

可逆性は、事業の実施期間における意思決定であり、処分事業及び技術に関する柔軟性を確保するものであるとして、事業プロセスが継続可能であるか可逆性を選択すべきかの評価と捉えることができるとしている（図10-1）。

回収可能性に関しては、ステークホルダーの懸念する問題の1つに、処分場から廃棄物を容易に回収できるかという点があり、処分事業の各段階における回収に必要な作業の程度や種類を提示（図10-2）している。

可逆性及び回収可能性は、処分場の責任ある開発に貢献できる手段であり、また、よく検討され調整されたプロセスをとることによって、最終的な安全目標を達成するのに役立てることができる手段である。工学的なレベルでは、これらは、処分する廃棄物の最終配置を達成するのに役立てることができるが、長期安全性は回収が可能なことに左右されるわけではない。プロジェクトレベルでは、回収可能性は、特定の設計内容を検証して、それらが万一の場合のオプションを不必要に阻害したり、妨げたりしないようにする慎重なアプローチに関連付けられる可能性がある、としている。

図10-2　廃棄物のライフサイクルにおける回収可能性



出典：OECD/NEA：高レベル放射性廃棄物および使用済燃料の深地層処分のための可逆性と回収可能性（Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High –level Radioactive waste and Spent Fuel)（2011）

【日本では】

日本では、地層処分事業の推進に向けた国の取り組みとして、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」を制定しており、国や実施主体、また、発生者として事業者の役割などを示している。この方針において、「可逆性の担保」と「回収可能性の確保」が明記されている。

第4 特定放射性廃棄物の最終処分の実施に関する事項（基本方針からの抜粋）

最終処分事業は長期にわたる事業であることを踏まえ、最終処分を計画的かつ確実に実施させるとの目的の下で、今後の技術その他の変化の可能性に柔軟かつ適切に対応する観点から、基本的に最終処分に関する政策や最終処分事業の可逆性を担保することとし、今後より良い処分方法が実用化された場合等に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする。このため、機構は、特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性（回収可能性）を確保するものとする。

ポイント

▶日本にも制度として導入された地層処分における可逆性と回収可能性の確保

- **段階的な意思決定に付随する要件の一つ**
- **可逆性と回収可能性は社会の要請で発生**
- **R-Scale：処分場閉鎖後の回収は技術的に可能であるが技術的な困難さと費用が増大**

10-3

地下研究施設の役割

地下研究施設（URL）での研究や技術開発は、地層処分事業においてどのような役割を果たしているのか？

地層処分の実施に向け、研究開発を展開する場として、日本をはじめ各国では地下研究施設（Underground Research Laboratory：URL）が建設されている。

OECD/NEAは、2013年に、放射性廃棄物処分計画におけるURLの役割などを取りまとめた報告書を公表した。

【URL利用の目的】

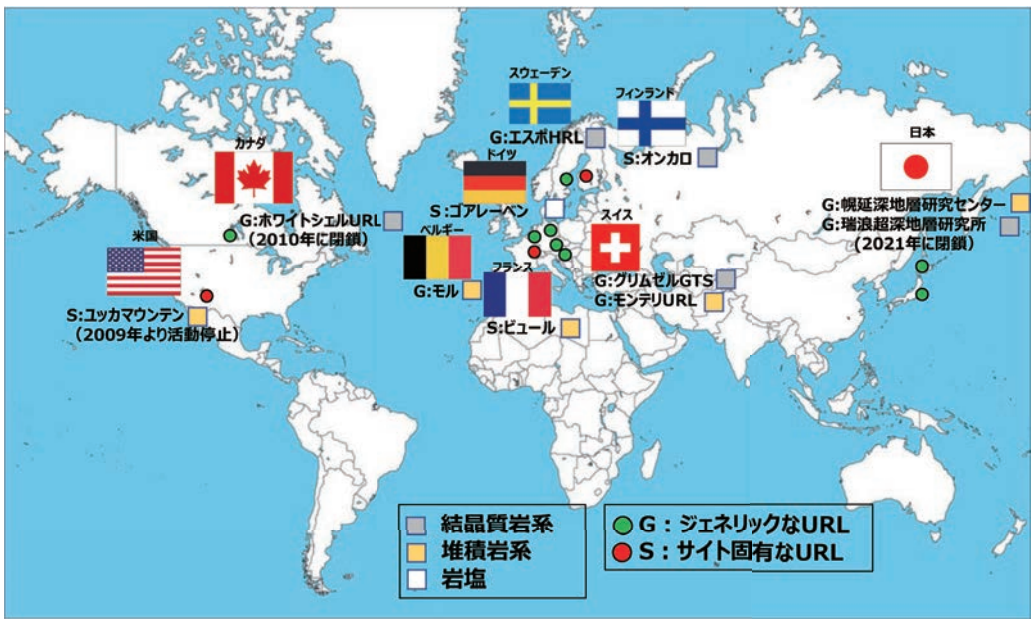
- 地下試験に必要な技術と方法論の開発
- 処分場システムの理解、その性能の評価及び評価のためのデータの提供
- 設計のロバスト性の実証
- 将来の処分場の安全操業に向けた人員の訓練
- 処分場の性能の理解を促すためのステークホルダーとの信頼の構築

【URLの種類】

- 処分候補地で展開されるサイト固有のURL
- 処分地とはならないサイトでのジェネリックなURL

地下研究施設の開発は、地層処分計画の開発に向けた有用で必要な手段あり、技術面での支援や信頼性を高めることができるとしている。また、長期的、総合的な研究の実施が可能であり、これは公衆の信頼性の向上に重要な役割を果たすとしている。

図10-3　世界各国における2種類の地下研究施設（URL）の位置



■ 日本の地下研究施設

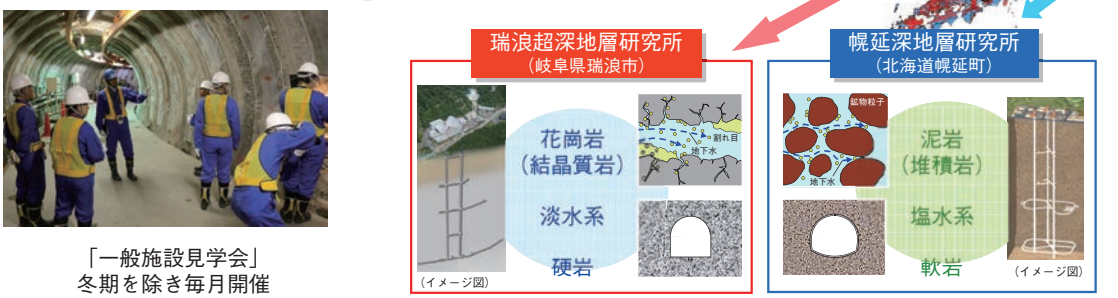
日本で展開されている二つのURLは、JAEAが運営する地層処分候補地ではないジェネリックなURLで、二つの岩種を対象に、地質環境特性（力学特性、水理特性、化学特性、熱特性）の把握、処分に関連する調査・建設・評価技術等の研究開発が進められている。

◆ 瑞浪超深地層研究所は、結晶質岩（花崗岩）を対象に、2002年から建設が開始され、地表から約500mの深度まで100mごとに調査坑道が建設されていた。約20年間の研究計画が終了し、2022年に坑道の埋め戻し及び地上施設の撤去が完了した。

◆ 幌延深地層研究センターは、堆積岩（泥岩）を対象に、2003年から建設が開始され、現在は地表から約380mの深度まで140m、250m、350mに調査坑道が建設されている。現在は、250mと350mの坑道を中心に調査研究を実施している。

それぞれのURLでは、三段階での調査試験計画が実施され、処分深度の類似環境での特性データ、調査・試験結果、経験が蓄積されている。

図10-4　日本におけるジェネリックな地下研究施設の特徴と位置



「一般施設見学会」
冬期を除き毎月開催

出典・写真提供：日本原子力研究開発機構

ポイント

- **地下研究施設の種類：ジェネリックなURL、サイト固有（スペシフィック）なURL**
- **日本での地下研究施設：瑞浪深超深地層研究所、幌延深地層研究センター**
- **地下研究施設の役割：科学技術的（地下深部の地質環境の理解など）な信頼性と社会学的（処分環境を体感できる）な信頼感の醸成**

参考 世界の地下研究施設での主要な試験

地下研究施設(URL)は、ジェネリックな施設(G)とサイト固有の施設(S)があり、それぞれの役割に応じ様々な試験が実施されている。ジェネリックURLでは、岩盤の特性を確認するための調査機器の開発と検証試験、実規模模擬廃棄体を実際に定置・回収する装置の確認試験、熱・水・応力相互作用挙動を確認する試験、坑道を掘削した場合の応力緩和などの岩盤の特性に対応した掘削影響試験等が実施されている。サイト固有の試験施設では、処分場建設認可を得るために必要となる地質環境データの取得、実規模での定置・回収技術の実証などが実施されている。これらは、国際共同研究として実施されている試験が多い。

表10-1　世界の地下研究施設の特徴と実施された主要な試験

地下研究施設名称	種類	岩種、場所、深さ	管理者、稼働期間	主要な試験
スウェーデン: ストリーパ	G	花崗岩、ストリーパ鉱山、360-410m	SKB社, 1976-1992	バッファーマス試験、坑道内地下水浸透予測モデル比較試験、ボアフォール・シーリング試験
米国: クライマックス	G	花崗岩、ネバダ州テストサイト内、420m	DOE, 1978-1987	熱と放射線による花崗岩の変形特性試験
スイス: グリムゼル	G	花崗岩、水力発電所坑道内、450m	NAGRA, 1983-	FEBEX(実規模人工バリア熱・水・応力相互作用)、EP(実核種を用いたトレーサー試験)、GMT(ガス移行挙動試験)
スイス: モンテリ	G	オパリナス・クレイ、道路トンネル内、250-320m	Swisstopo, 1995-	実規模人工バリア定置挙動確認試験、掘削影響試験、熱影響試験
スウェーデン: HRL	G	花崗岩、オスカーシャム、200-450m	SKB社, 1995-	実規模スーパーコンテナー横置き定置試験、キャニスター縦置き定置試験、掘削影響比較試験
ベルギー: モル	G	ブームクレイ、モル、230m	EIG EURIDCE 1980-	PRACLAY試験(熱影響、シール挙動、掘削影響)
カナダ: URL	G	花崗岩、マニトバ州、500m	AECL, 1984-2006	掘削影響試験、坑道シール試験
米国: WIPP	S	岩塩、ニューメキシコ州、655m	DOE, 1982-	熱影響試験
米国: ユッカマウンテン	S	凝灰岩、ネバダ州、300m	DOE, 1996-2009	熱・水・応力相互作用試験
フランス: ビュール	S	頁岩、ムーズ、450-500m	ANDRA 2004-	各種モニタリング装置挙動確認試験、坑道シール・プラグ性能確認試験
フィンランド: ONKALO	S	花崗岩、エウラヨキ、500m	ポシヴァ社, 2004-	実規模容器定置試験、熱・水・応力相互作用試験

代表的な試験

【スイスGrimsel試験サイトで実施された大規模な試験例】

■ FEBEX：実規模使用済燃料容器の定置試験、定置中の熱・水・応力相互作用確認試験、容器回収試験

■ GMT：1/5規模のコンクリートサイロとベントナイトバリアシステムのガス挙動確認試験

図10-5　FEBEX試験の概要

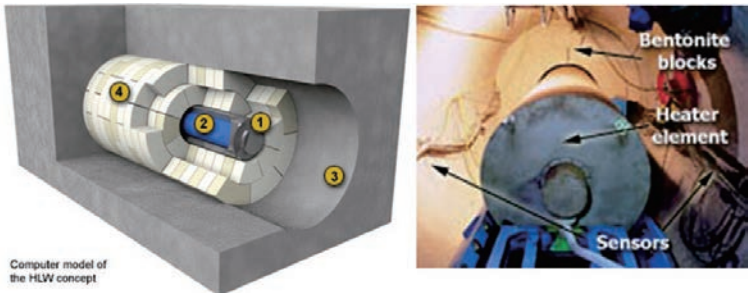


図10-6　GMT試験の概要

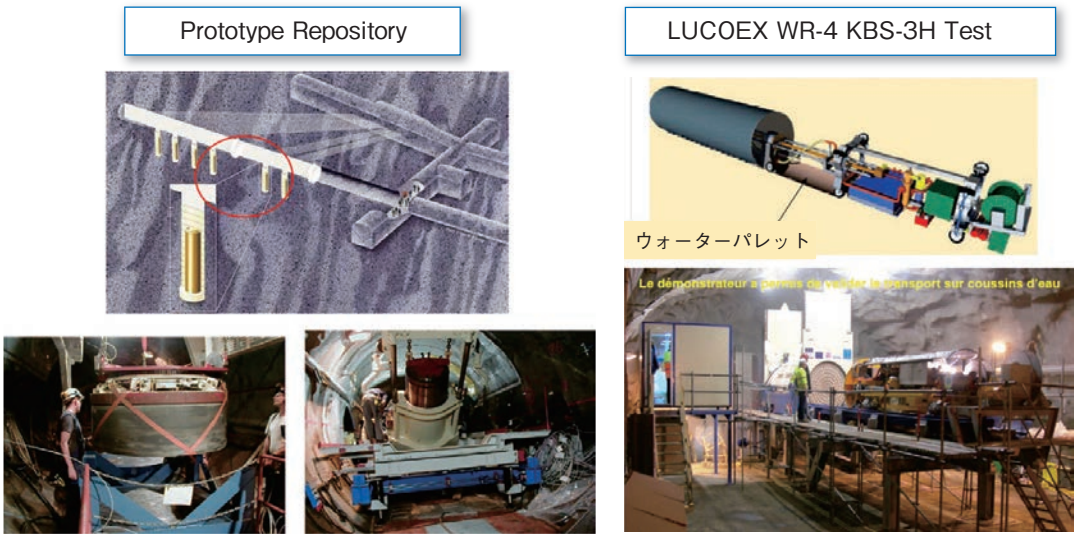
出典：Nagra Web サイト

【スウェーデンHRL研究施設で実施されたKBS-3Vと3H概念の実規模試験】

■ プロトタイプ試験：KBS-3Vに相当する処分孔竪置き概念の定置・回収試験

■ LUCOEX WR-4の試験では、KBS-3Hに相当するスーパーコンテナーの横置き定置試験

図10-7　スウェーデンHRLで実施されたKBS-3VとKBS-3Hの定置試験の概要



出典：SKB Web サイト

参考 地下研究施設の役割

地層処分計画を進める各国が展開している地下研究施設（URL）について、2013年に、当時の状況と経緯を、OECD/NEAが取りまとめた報告書が公表された。本報告書では、URLの役割を下記のようにまとめている。

■ 地下の特性評価とモニタリング技術のための方法、設備、経験の開発

URL内から地下環境の特性を明らかにするには、地表からの調査や従来の掘削で一般的に使用されているものとは異なる装置や手順が必要となる。また、各処分場プログラムには独自の課題があり、ある程度の発明や技術革新が求められる。

URLは、処分場の特性評価に必要なツールを開発・テストする機会を提供するとともに、同様に重要なこととして、調査・研究員がそれらのツールに習熟し、効果的なチームを構築することにある。URLは、また、処分場周辺や中で必要になるかもしれないモニタリングシステムを開発・テストする場ともなる。

地下の特性評価の能力と経験を開発するためのもう一つの重要な側面は、同時に開発・試験される品質管理（QM）システムである。テストされた効果的なQM手順は、処分場の許認可申請の重要な基盤となる。

■ 地表からのサイト特性調査手法の信頼性を判断

URLの建設を開始する前に、地表で実施されるサイト特性調査・評価は、サイトの概念モデルと数値モデルの開発に使用されるデータを提供する。その後、URLを掘削することで、破砕帯の出現など、これらのモデルに基づいた予測を検証することができる。また、地表から測定された特性パラメータ（ボーリングや地表の物理探査など）と、URL内で測定された特性パラメータとの間に関連性を持たせることもできる。このようにして、地下の状態を予測するのに成功した（あるいは有用な）地表ベースの手法やモデルは、そうでないものと区別され、処分場の設置や特性評価プログラムに引き継がれる。地下の状態を正確に予測する能力は、受け入れ可能な処分場サイトを見つけるための実行可能性を示す一つの鍵となる。

■ 処分場の設計や性能評価のためのデータの提供

ジェネリックあるいはサイト固有のものであれ、URLは、地表からの調査や実験で得られたデータを補完する特性データの収集を可能にする。これらのデータはアクセス坑道や立坑に沿ってどの深さでも収集でき、処分場候補地での平面だけの特性評価よりもはるかに多くの情報が取得できる。これには、実験室での作業のために、他の方法ではサンプリングできないような（乱されていない）サンプルを集めることも含まれる。

これらのデータは、処分場や地圏の性能モデルを開発・テストするために使用すること ができ、特性評価パラメータの測定値の変化に対する様々な性能指標の感度を把握すること

ができる。URLで取得された データは、ボーリングによるデータよりも実際の処分場（すなわちニアフィールド）の条件を反映しているという付加価値がある。また、ボーリング孔内よりも URLの方が大量の地質環境で実験を行うことができ、アップスケーリング・ルールの開発が可能であり、不均質性の特性評価と残留物の低減に焦点を当てることができる。いくつかの地層では、間隙水のサンプリングをURL内からのみ効果的に行うことができる。

■ 概念モデル及び数値モデルのテストとさらなる開発

URLは、様々なレベルのモデルを試験で確証し、さらに開発するための環境を提供できる。これには、テクトニクスや熱応答のモデル、水理地質環境モデルなど、処分場の設計やレイアウトの最適化に使用するモデル及び岩石中の溶質や放射性核種の移行モデルなど、安全性評価に使用するモデルが含まれる。

■ 処分場の建設、操業、閉鎖、廃棄物回収に関する方法、装置、経験の開発

URLでは、現実的な条件下での処分場建設、処分場操業、廃棄物の定置、人工バリア設置、埋戻し、シールに関する技術の開発、実証、品質管理が可能である。例えば、どのような処分場の設計・建設であっても、サイトで遭遇する特定の不均一性に適応しなければならない。URLを建設することで、適応のために提案された方法の実現可能性を判断することができる。また、SKB社やポシヴァ社などが提案している”design-as-you-go”概念の検証も可能である。この概念では、最適な場所を選ぶために十分な岩盤が露出するまで、坑道や廃棄物容器の正確な定置位置を決定しないことになる。処分の意思決定において、可逆性が全体的な処分計画の要素である場合、URLは廃棄物の回収と撤去のための装置と手法を開発、テスト、実証する機会も提供する。

URLでは、処分場の建設や廃棄物の封入に使われる可能性のある材料と人工バリアや地質環境との相互作用を、様々な可能性のある熱レジームを含む代表的な原位置条件で試験をし、技術的な実証を行うこともできる。異なる掘削方法の岩盤力学的な影響もURL内で評価することができ、これらの評価や実証を行うのと同時に、処分場の開発・操業時に必要となる QM 手続きを開発・試験することが可能となる。関係する職員もこれらの作業を通じて、貴重な経験と自信を醸成することができる。

10-4

ナチュラルアナログの役割

ナチュラルアナログとは何か。地層処分においてどのように用いられるのか。

セーフティケースでは、処分場システムとその変遷を詳細に分析し、処分場閉鎖後の安全評価が実施される。数千～数万年、あるいはそれ以上の長期にわたる安全性が定量的に評価されるが、これらの結果を短期間の実験室レベルで確認することはできない。セーフティケースの一つの特徴は、安全性の説明とその信頼性を複数の論拠により高めることができることである。長期にわたる安全性の論拠の一つとなりうるものとして、ナチュラルアナログがある。

ナチュラルアナログ研究は、放射性廃棄物処分場とその周辺環境の１つまたは複数の構成要素と類似性を持つ、天然現象、人為起源、考古学的遺跡あるいは産業システムを調査することである。「ナチュラルアナログ」という用語は、通常、環境中で観察できる天然と人工の両方のシステムを含む（NEA, 2017）。ナチュラルアナログ研究のみで、処分場の安全性を「証明」することはできないが、セーフティケースとして長期の安全性の説明をサポートできる。処分場の状況と類似性が高い場合は、そのナチュラルアナログの事例は現象論的理論及びそのモデルをサポートする論拠として直接的に使用できる可能性があるが、類似性の程度が低くても、長期安全性の一般的な実現可能性の説明には利用できる。

【カナダ：シガーレイクの例】

カナダ・サスカチュワン州にあるシガーレイクウラン鉱床は、約13億年前に鉱床が生成されたが、その後、長期間にわたりウラン及びウランの壊変によって生成した放射性物質が当初の場所から移動しなかったことが明らかとなっている。これは濃集したウラン鉱床の周囲の岩盤で熱水変質反応が起こり、鉱床の周囲に粘土層が形成され、その結果ウランが地下水と接触して溶出し外部に流れ出ることが抑制されたと考えられている。

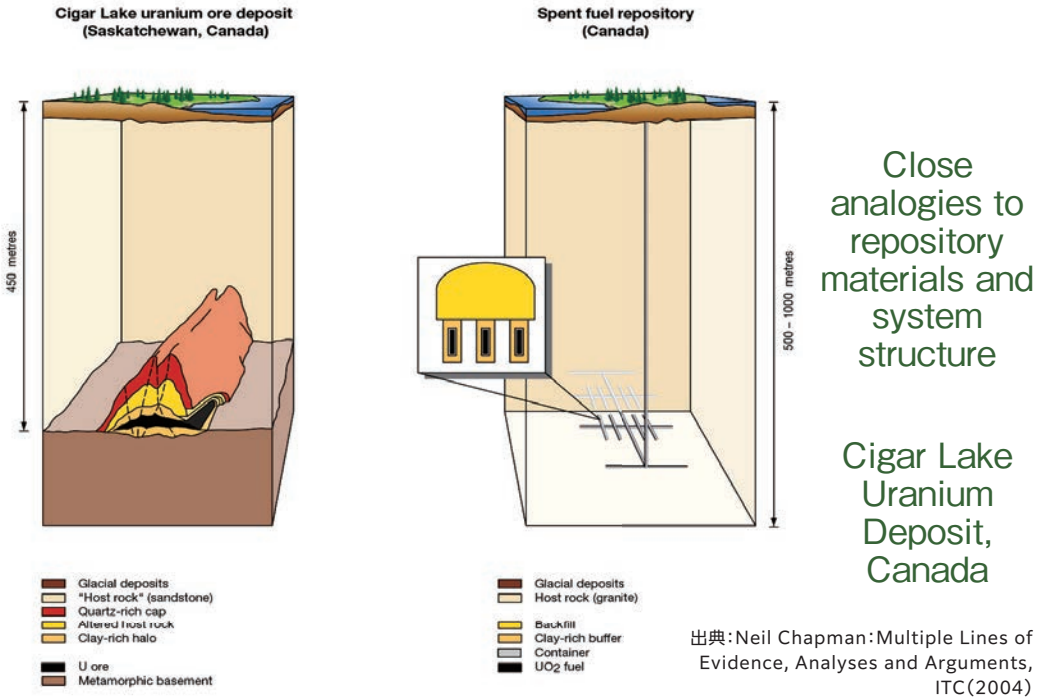
カナダの商業原子炉はカナダ型重水炉（CANDU炉）を導入しており、これはウランを濃縮していない天然ウランを燃料としていることが特徴である。カナダでは天然ウランを燃料として利用し、その使用済燃料を（耐食性のある処分容器に封入した上で）ベントナイト緩衝材で周囲を取り囲むようにして処分する概念であるが、シガーレイク鉱床はカナダの使用済燃料の処分概念に適したアナログとしてとらえられている。

【ナチュラルアナログとコミュニケーション】

ナチュラルアナログは環境中で観察可能であることや、考古学的なアナログは馴染みやすさがあることなどから、専門家でない公衆とのコミュニケーションの促進と信頼感醸成において有用である可能性が指摘されている。ただし、公衆の理解を容易にするために、ナチュラルアナログを過渡に単純化することは情報の重要性の誇張につながる懸念があることから、アナログの条件と限界に言及するなど、アナログが適切に使用されることが重要であり、それによって信頼構築につながることが指摘されている（NEA, 2017）。また、ナチュラルアナログの受容性は、

処分事業の実施主体などと公衆との間に構築された信用の程度に依存するとも言及されており、そもそものコミュニケーションの在り方、例えば一方的ではない双方向コミュニケーションでのナチュラルアナログの使用などが推奨されている（NEA, 2017）。

図10-8　シガーレイクのウラン鉱床と使用済燃料の地層処分のシステムのアナロジー



出典：Neil Chapman：Multiple Lines of Evidence, Analyses and Arguments, ITC(2004)

図10-9　考古学的なアナログの例

古代エジプトにおいて作成されたガラス製品。土壌層から発見された魚型容器は約3350年前に作成されたと考えられている。カラフルな色が残されており、製造時の状態が保存されている。

出典：Neil Chapman：Multiple Lines of Evidence, Analyses and Arguments, ITC(2004)

ポイント

▶ナチュラルアナログ

- **処分場やその周辺環境の構成要素などの類似性を有する天然システムを調査することによって、セーフティケースの長期の安全性を説明する論拠の一つとして用いられる**
- **公衆とのコミュニケーションと信頼構築に資する可能性**

10-5

地域とのパートナーシップ

地層処分事業における地域とのパートナーシップとはどのようなものか。

放射性廃棄物処分場のサイト選定は、一般に、意見の対立、合意の不達成や遅延に見舞われる傾向がある。このため、従来の「決定し、発表し、防御する」モデル（DADモデルと呼ばれる）から、「関与し、相互に交流し、共同運営する」モデルへの転換が起こっている。こうした新しい姿勢の特徴となっているのが、実施主体と影響を受ける自治体間での共同運営またはパートナーシップのアプローチであり、この中には専門家と公衆の対話、相互学習、意思決定プロセスへの公衆の関与が含まれる。

OECD/NEAによれば、「パートナーシップ・アプローチ」の主な特徴としては、以下の４つがある（NEA, 2010）。

主体的参加：例えば処分場のサイト選定プロセスへの参加など、地域の関心の表明、申し出に応じて行われる場合もある。

拒否権：影響を受ける自治体に拒否権を担保することが継続的な地元の支持につながる。

自治体との協働：従来は住民への情報伝達、地元の関心事項のくみあげなど、地元の参加はやや受け身的であったが、次第に地元が専門性を高めて処分施設の設計や社会経済的な開発、あるいは福祉のパッケージの設計に積極的に関与するようになってきている。

自治体の利益：自治体が意思決定プロセスに参加し、プロセスの結果に影響力を行使できるように権限を付与することや、税制・雇用・財政面の優遇や地元サービスや公共投資の支援などの社会経済的利益など。

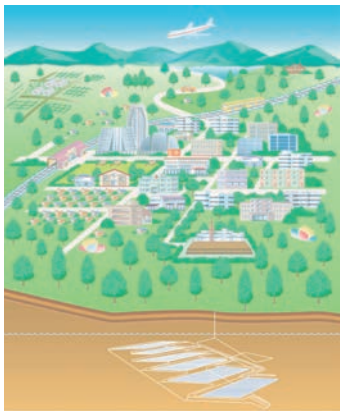
OECD/NEAのFSC（10-1節参照）は、処分場などの施設設計や地域社会の福利厚生パッケージの設計に地元の関係者を関与させることで、受け入れ地域に付加価値をもたらす解決策が得られる可能性があるとしている。また、地域住民が専門性を高め、自らの興味や理想に関する知識を増やすにつれて、社会資本が増強されるとしている。パートナーシップは信頼の継続に資する可能性があり、また、実施主体は地域社会の福祉に関心を持つ責任ある隣人として、自らを向上させる効果が期待される（FSC Flyer, 2010）。

地層処分施設に係るパートナーシップの事例として、例えば英国では地層処分施設の受け入れに関心のある地域と実施主体がワーキンググループを発足させ、その後パートナーシップを設置することができるという、地域が主体的にサイト選定に参加できる仕組みを整えている。その中ではサイト選定に関する調査エリアを特定するなどの協働、また地域の便益に関する対話や理解活動などが行われる。

カナダでは、施設を受け入れる地域における「自治体の福祉」を重視しており、実施主体は、サイト選定後、自治体と技術的安全性や地域社会の福祉面などに関して評価を行うことを目的として「地域専門技術センター」を設置する計画で、センターの在り方などについて、地元とのパートナーシップを通じて具体化するとしている。

【NUMOの地域共生アプローチ】

日本の地層処分事業において、実施主体であるNUMOは地域共生という環境構築を提案している。基本的にNUMOが進める地層処分事業の一環として共に地域のまちづくりを進めていくという姿勢である。NUMOはホームページで「地域との共生に向けて」として、以下のメッセージを記述している。



出典:原子力発電環境整備機構(NUMO)資料

地層処分事業は100年以上の長期にわたる事業となります。地域の発展を支えとしてこそ、事業を安定的に運営することができます。このためNUMOは、処分施設の建設までに本拠を現地に移転し、地域のみなさまの一員として地域の発展に貢献していきます。NUMOは、地域のみなさまとコミュニケーションを重ね、地域との共生を具体化してまいります。

■ **環境の構築** 地域のみなさまに受入れていただける関係の実現に向けて
- NUMOは、地域のみなさまとのコミュニケーションを大切に、事業による地域の発展を実現し、地域のみなさまに「受入れて良かった」とお考えいただけるような関係の実現を目指します。

■ **プラス影響の最大化とマイナス影響の防止**
- NUMOは、地域の雇用や経済などへのプラスの影響ができるだけ大きくなるように努めるとともに、風評被害などのマイナス影響を防ぐ措置を検討、実施します。

■ **安心して暮らせるまちづくり** NUMOのふるさとのまちとして
- 安心して子供を産み、育てられるまちになるよう医療インフラの充実を図ります。
- 子供もお年寄りも一緒に暮らせるコミュニティをつなぐ、交通・情報インフラの充実を図ります。

■ **事業にともなうインフラ整備など** 地域の利便性などの向上
- 道路・港湾の改修・拡張、情報通信システムの向上、地下研究所、技能訓練センターの整備を行います。

■ **活気のあるまちづくり** 活き活き地域社会の実現に向けて
- 地元経済の活性化に貢献(資材の地元調達、地域特産品の販売支援など)します。
- 若者が定着できる雇用の創出と雇用につながる教育投資を図ります。
- 魅力的なまちづくりのためのコミュニケーションの場の構築と健康・環境・文化的活動の支援を行います。

ポイント

▶主体的な地元自治体の関与による実施主体とのサイト選定や社会･経済･福祉に関する協働等を通じた信頼感の醸成･継続

▶NUMOが提示する地域共生は実施主体が地域活性に係る事項を提案

これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート

第10章 地層処分に対する信頼

問1 次の空欄を埋めなさい。

1 OECD/NEAのFSC（ステークホルダーの信頼感に関するフォーラム）は、放射性廃棄物管理に係るステークホルダーに対する信頼の要因として、　①　プロセス、マネジメントの枠組み、ステークホルダーの義務、　②　を挙げている。

2 　①　とは、処分システムを実現していく間に行われる　②　を元に戻す、あるいは検討し直すことができることをいう。　③　は処分場に定置された廃棄物あるいは廃棄物容器を取り出すことができることを意味する。　①　と　③　は　④　に一定レベルの選択の自由を残す基本理念に対応するものである。

3 日本では特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針において、今後の技術その他の変化の可能性に柔軟かつ適切に対応する観点から　①　を　②　すること、及び　③　は安全な管理が合理的に継続される範囲内で　④　を　⑤　することを明記している。

4 地質環境の理解、地層処分技術の適用性確認、あるいは地層処分に対する信頼感の醸成の場として、　①　（URL）の存在がある。URLには　②　なURLと　③　なURLとがある。　③　なURLでは、最終処分候補地の適性を確認するための調査・評価、処分技術の実証などが展開されている。

5 URLは、公衆などのステークホルダーに公開されており、地下深部を直接的に　①　し、研究や技術開発に携わる専門家との対話の場と機会を提供することで地層処分に対する　②　促進や信頼感の醸成に寄与する。

6 地層処分場閉鎖後の長期安全性を説明する　①　の一つとして　②　が用いられることがある。　②　研究は処分場とその周辺環境の構成要素との　③　を持つ天然現象などを調査することである。

7 地層処分場のサイト選定では、実施主体と影響を受ける自治体間での従来の「決定し、発表し、防御する（　①　）」モデルから、「　②　し、相互に交流し、共同運営する」モデルへの転換が起こっている。

8 OECD/NEAによれば、処分実施主体と影響を受ける自治体間でのパートナーシップ・アプローチには、主体的参加、　①　、自治体との　②　、自治体の利益といった特徴があるとされる。

問2 次の問で、正しいものには○、間違っているものには×をつけなさい。

1 ☐ 処分事業の進展に伴い作成・更新されるセーフティケース構築は、科学技術的な観点からの地層処分の信頼感の醸成に向けて大きな役割を担っているが、社会学的な観点からは、対話の場や機会の設定、意思決定への参画、可逆性などの制度的な仕組みが重要となる。

2 ☐ 地下研究施設は主として、地層処分の評価に用いられているモデルの確証（Validation）、処分技術の実証（Demonstration）を実環境や類似環境で展開することで、科学技術的な信頼性を高める役割を担っている。

3 ☐ 地層処分システムの安全確保の仕組み（隔離と閉じ込め）に対して、例えば、自然界におけるウラン鉱床の成因を観察し、長期にわたり放射性物質を安定して閉じ込めている仕組みを調査することは、地層処分の長期安全性に関するセーフティケースの論拠の一つとして適用することができる。

問3 科学技術的な視点と社会学的な視点からの地層処分の信頼感醸成の方策について、300字程度で述べよ。

答え合わせ

第10章 地層処分に対する信頼

問1	1	①意思決定　②透明性
	2	①可逆性　②決定　③回収可能性　③将来世代
	3	①可逆性　②担保　③機構（NUMO）　④回収可能性　⑤確保
	4	①地下研究施設　②ジェネリック　③サイトスペシフィック
	5	①体感　②理解
	6	①論拠　②ナチュラルアナログ　③類似性
	7	①DAD　②関与
	8	①拒否権　②協働

問2

1 ○

地層処分の実現に向けて地域住民を含むステークホルダーの信頼感を醸成するには、科学技術的な根拠に基づき作成・更新されるセーフティケースが重要な役割を担っており、社会的な視点では、以下の活動が重要であるとされている。

- 有用で公平な対話が十分できる時間を提供できるような段階的進め方により、意思決定は様々な背景の変化に対応できる柔軟性を有しつつ繰り返し実施できるようにすべきである。
- 様々なステークホルダーと専門家間の相互関係を築くために社会的な学習の機会を増やすべきである。
- 価値観の違う、知識レベルの異なる、信じることが異なる、興味が異なる、世界観が異なる個人同士のコミュニケーションの質を高めたり、機会を設けることで、公衆の意思決定プロセスの参画を促進するべきである。

可逆性の維持は、社会的な視点での信頼感を醸成するための目的ではなく手段となる。

2 ×

地下研究施設の役割は、科学技術的な視点からの信頼感の醸成だけでなく、公衆やステークホルダーに開放し、地下の環境を直接体感してもらい、そこでの専門家との対話の場と機会を設けることで地層処分への理解を図る重要な役割を果たしている。

3 ○

長期の安全評価の結果は直接確認することはできないことから、様々な角度からの複数の論拠を集める必要がある。その中で有効となりうる論拠としては、「自然界における類似性（ナチュラルアナログ）」がある。

問3

【解答例】

地層処分事業を進めるには、科学技術的な信頼感と社会的な信頼感の醸成が不可欠となる。科学技術的な信頼感は、段階的に得られる知見に基づき作成・更新されるセーフティケースを用いた地層処分システムが有する頑健性の説明と、評価に含まれる不確実性や課題への取り組みも含めた情報公開で得ることができる。

社会的な信頼感は、情報公開に基づく十分な対話の場と機会の設定、内容を学習できる機会の提供を通じて、処分事業の段階的な意思決定への地域住民参画の機会を図るとともに、サイト選定や地域の社会経済・福祉に関する協働などの取り組みが重要となる。

ナチュラルアナログの情報は、地層処分の安全性の理解促進やコミュニケーションの促進や信頼感の醸成に役立つ可能性が考えられている（324文字）。

【解答に用いられるキーワードの例】

セーフティケースの作成と更新、不確実性や課題、処分システムの頑健性、意思決定への地域住民の参画、対話の場と機会、社会的な学習機会、協働、ナチュラルアナログ

参考文献 第10章 地層処分に対する信頼

- OECD/NEA (2017), How the Forum on Stakeholder Confidence serves as a platform to build and share knowledge about stakeholder confidence in radioactive waste management, FSC identity flyer
- Marleen Brans et al. (2015), The OECD Nuclear Energy Agency's Forum on Stakeholder Confidence, radioactive waste management and public participation: A synthesis of its learnings and guiding principles
- OECD/NEA (2012), Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel
- 特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針(2015)
- OECD/NEA (2013), Underground Research Laboratories (URL)
- 日本原子力研究開発機構(2019)、幌延深地層研究計画の概要
- OECD/NEA (2017), Communication on the Safety Case for a Deep Geological Repository
- Neil Chapman (2004), Multiple Lines of Evidence, Analyses and Arguments, ITC 2004 Tokyo
- OECD/NEA (2010), Partnering for Long-Term Management of Radioactive Waste: Evolution and Current Practice in Thirteen Countries
- OECD/NEA (2010), The partnership approach to siting and developing radioactive waste management facilities, FSC flyer
- 原子力発電環境整備機構(NUMO)Webサイト、地域との共生に向けて

第11章

諸外国における地層処分事業の経緯

地層処分を進める諸外国でも、処分候補地の選定段階において紆余曲折があった。現時点で処分地が決定された国はフィンランドのオルキルオトとスウェーデンのフォルスマルクであるが、この章では様々な国における処分地選定のアプローチのポイントについて失敗例も含めて学習する。

本節では以下の項目について学習する。

11.1 ● 各国の地層処分計画
11.2 ● フィンランド:初期のマイルストーン通りの展開
11.3 ● スウェーデン:公募方式から申し入れ方式への変更
11.4 ● フランス:議会の主導による計画の見直し
11.5 ● スイス:住民投票での否決から国の積極的関与
11.6 ● 英国:地元の主体的参加を尊重
11.7 ● カナダ:廃棄物処分政策と公衆関与
11.8 ● 米国:政治的なサイト選定が生んだ混沌と頓挫

11-1

各国の地層処分計画

各国の地層処分計画の歴史を振り返り、その経緯を学ぶことはこれからの日本の地層処分を考えるうえで非常に重要である。

地層処分の安全確保策は1970年代に米国で提唱され、その後各国で候補母岩に対応した具体的な処分場概念が開発されてきた。その過程で、地層処分の技術的実現性（現状の技術を用いて実現できる見通しがあること）については、立地の可能性、工学的技術の存在、安全評価により明示され、1990年代から処分候補地の選定作業が本格的に始まった。現在、フィンランドでは処分場が建設中で、操業許可に係る審査が行われている。また、スウェーデンでも2022年1月に処分場の建設計画が承認されるなど、北欧では事業が進んでいる(※)。

(※)なお、米国では国防活動により発生したTRU廃棄物を対象とした地層処分場（ニューメキシコ州カールスバッドの岩塩層に建設されたWIPP(Waste Isolation Pilot Plant)）が操業中である。

各国のこれまでの地層処分計画の歴史を振り返ると、サイト選定が順調に進んだ事例は、フィンランドだけであり、その他の国は様々な要因による挫折や中断を経験している。

例えば、スイスでは1985年にプロジェクトGewähr（ゲベール：保証）を公表し、1990年に入り低中レベル放射性廃棄物の処分地選定を開始したが、1995年と2002年の2回の州の住民投票で否決された。科学技術的に最良と考える地層処分の選択は、必ずしも地域の住民にとって最良な選択とならなかった事例である。

米国では法律で高レベル放射性廃棄物処分場候補地の段階的な選定が決定されていたにも係わらず、連邦議会がユッカマウンテンを候補地として決定し、その後現在に至るまで具体的な進展はみられず、選定を白紙に戻すことも議論されている。

フランスや英国の初期段階での処分候補地選定では、その選定のプロセスが不明確で地域住民の意見が反映されていないということで白紙に戻された。

フランスでは、首相の判断で候補地選定作業が中断され、その後、廃棄物管理方法の比較検討が行われた。

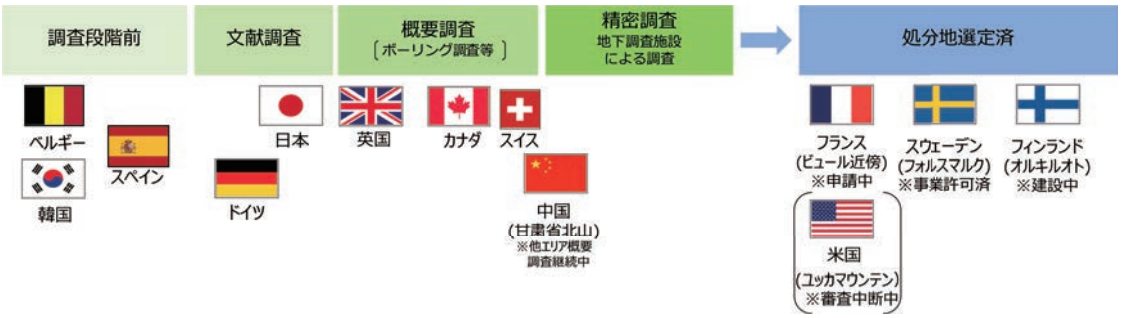
英国では、高レベル放射性廃棄物の地層処分を含めての処分計画推進のための実施主体と制度が新たに導入され、地域住民参加の進め方に変更された。

カナダでは、地層処分の科学技術的な実現性は示されたものの、地層処分に対し国民の十分な理解と合意が得られていないと判断され、新たな実施主体(NWMO)を設立し、地層処分への合意形成を段階的に進めて行くアプローチが採用された。

このように各国が経験した挫折と成功から学ぶことは極めて有用なことから、本節では、以下の国を対象に、処分地選定過程での紆余曲折と学ぶべき点を紹介していく。各国の状況についての詳細は、経済産業省資源エネルギー庁「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について(2022年版)」を参照されたい。

各国で異なる地層処分計画の進捗度を単純に比較するのは難しいが、日本の法制度における3段階調査をベースにした各国の現状を図11-1に示す。

図11-1　各国の地層処分プログラムの現状



出典：経済産業省資源エネルギー庁 Webサイトの図を一部修正
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/hlw/hlw01.html

本章では、以下の国を対象とした挫折と成功例を紹介する。

11.2 フィンランド：初期のマイルストーン通りの展開

11.3 スウェーデン：公募方式から申し入れ方式への変更

11.4 フランス：議会の主導による計画の見直し

11.5 スイス：住民投票の否決から国の積極的な関与

11.6 英国：不透明な選定プロセスから地域住民参加の選定へ

11.7 カナダ：研究主体から実施主体への移行

11.8 米国：政治的なサイト選定が生んだ混沌と頓挫

ポイント

- **多くの国では、日本でいう文献調査段階に至るまで20年近くの年数を要している**
- **米国に代表される政治的な判断による候補地選定プログラムは挫折している**
- **処分候補地選定の作業と並行して地域住民との対話の場を設けるなど社会制度的なアプローチが採用されている**
- **科学技術的な観点から処分の適地を選択する作業が最初になされている（日本における科学的特性マップに相当）**
- **多くの国が段階的な意思決定方式を採用するとともに各段階での可逆性の確保がなされている**

11-2

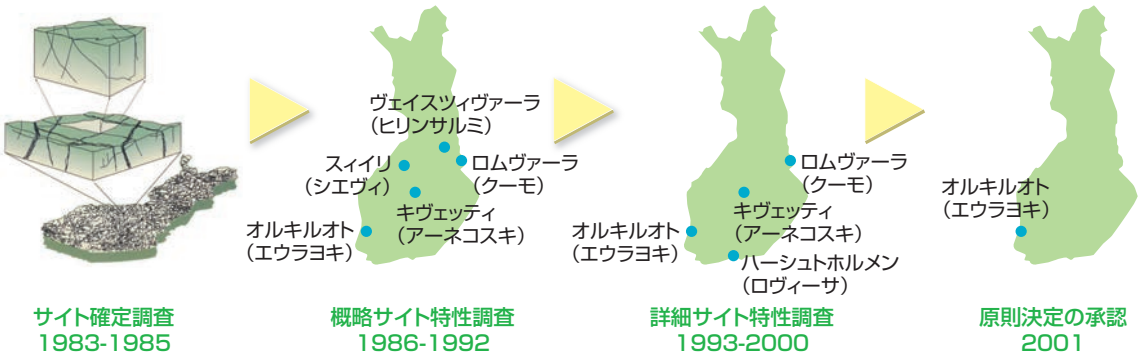
フィンランド:
初期のマイルストーン通りの展開

【処分地選定の経緯】

フィンランド政府は1983年に「原則決定」と呼ばれる政策として、処分地の選定段階と目標時期を設定した。その背景には、使用済燃料の再処理を廃棄物の返還がない条件で外国に委託する交渉が難しくなったことがある。後のEU加盟に際して、1994年に使用済燃料の輸出入を禁止するとともに、自国内での処分が法制化された。1995年に実施主体となるポシヴァ社(POSIVA)が設立され、それまで処分地選定をすすめていたTVO社から業務を引き継いだ。ポシヴァ社は1999年に、4カ所を対象とした安全評価書と環境影響評価報告書(EIA)を公表した。この環境影響評価報告書には、処分概念の説明のほかに、処分場が立地することによる地域への社会的・経済的影響について具体的に示されているのが特徴である。

ポシヴァ社は1999年に、地層処分候補地としてオルキルオト原子力発電所のあるエウラヨキ自治体オルキルオトを選定し、政府に処分場建設計画を申請した。規制当局であるSTUKの肯定的な評価の結果、自治体の議会投票で受け入れに賛成したことを受けて、フィンランド政府は2000年12月にオルキルオトを処分地として決定した(翌2001年に国会で承認)。フィンランドの処分プログラムの特徴は、スウェーデンのSKB社が開発したKBS-3処分概念を採用したこともあり、2カ国で共同研究を実施し、ノウハウの移転、知識共有など処分技術の開発や実証業務を効率よく展開してきた点にある。

図11-2　フィンランドのサイト選定の経緯



出典:経済産業省資源エネルギー庁:諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について(2022)

【オルキルオト：地下調査施設から処分場に】

ポシヴァ社は、規制機関であるSTUKの規制監督に従い、2004年からオルキルオトに地下特性調査施設（ONKALO）の建設を開始した。この施設は、将来的に処分施設のアクセス坑道等に利用される。ONKALOでは、処分場が建設される深さの地下調査によるデータ取得、実物大の処分孔の掘削などの様々な調査、試験が展開されている。

2012年にポシヴァ社は、ONKALO等での実績を踏まえ、使用済燃料の地層処分に係るセーフティケース報告書をSTUKに提出するとともに、政府に処分場建設の許可を申請した。

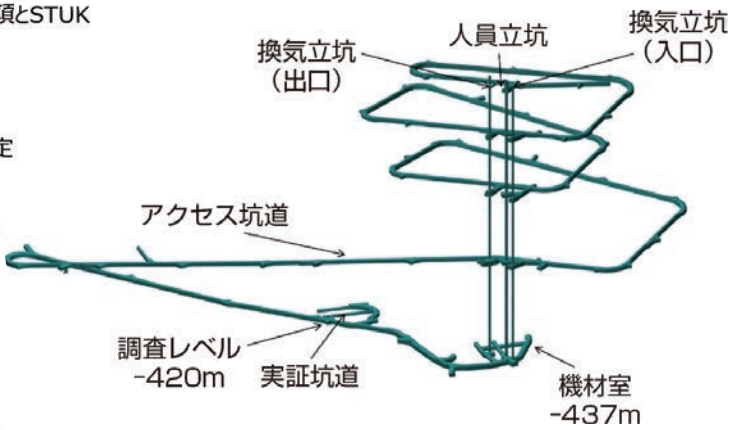
フィンランド政府が2015年11月に最終処分施設の建設を許可したことにより、翌2016年12月には、ポシヴァ社が処分場の建設を開始、2020年代には操業を開始する予定である。

図11-3　地下特性調査施設（ONKALO）のレイアウトと実証坑道

- ONKALOの建設は2004年に開始
- 建設作業は、原子力施設への要求事項とSTUK（規制主体）の監督にもとに実施
- 基盤岩の詳細な研究
- 岩盤掘削工法の開発
- 複数の試験を実施
- アクセス坑道は処分場の一部を担う予定

実証坑道の試験処分孔

出典：ポシヴァ社Webサイト（Source: POSIVA）



出典：経済産業省資源エネルギー庁：諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について（2022）

■透明性のあるコミュニケーションで信頼を獲得

一見スムーズに進んだように見えるフィンランドにおける最終処分ですが、処分地選定の初期の段階から国民に広く受け入れられていたわけではありません。フィンランドにおける成功は、

①長期にわたる原子力産業の健全な事業活動、

②独立性と信頼性のある規制当局の存在、および

③地域グループなどとの透明性のあるコミュニケーションによる信頼獲得が、大きな役割を果たしたといいます。

（引用：経済産業省ウェブサイト：〈北欧の「最終処分」の取り組みから、日本が学ぶべきもの①〉，2020-05-22）

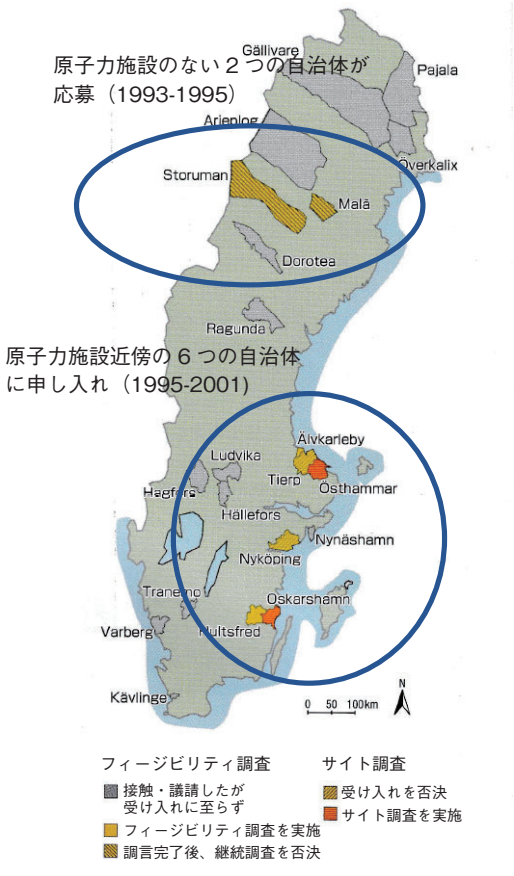
11-3

スウェーデン:公募方式から申し入れ方式への変更

【処分地選定の経緯】

SKB社は、1992年10月に使用済燃料処分場立地計画とフィージビリティ調査（日本の文献調査に相当）を説明する書簡を全国自治体に送るとともにラジオ放送を通じて、公募方式によるサイト選定をスタートさせた。SKB社は、調査の実施計画と形式に関して自治体議会で事前合意を得ることを確約していた。

図11-4　スウェーデンにおけるサイト選定の変遷



フィージビリティ調査とサイト調査の受け入れ状況

出典:SKB社:Environmental Impact Statement (2011)(仮訳)

フィージビリティ調査では、地質学的観点から好ましい場所が自治体のどこにあるか、建設工事や輸送を実現する見通し、環境や社会経済への「プラス」と「マイナス」の影響を推定する。SKB社では、複数の自治体から立地計画に関する問い合わせを受けたものの、処分場に適した場所を見い出せる可能性があると考え、かつ自治体議会で調査受け入れを決めた北部の山岳・丘陵地帯に位置する2自治体で最初の調査に着手することにした。スウェーデン北部には水力発電所や鉱山開発の歴史と人材があり、調査を継続する価値がある場所が存在した。

しかし、処分場への地元企業や住民の見方は分かれた。一つは国益に資する重要な環境施設であって、先進技術を扱う雇用の創出、国内外の好ましい注目を集めて地域の発展に繋がるという見方があった。一方で環境と将来、手つかずの自然と共生する地元イメージと観光の魅力を損ね、地域経済の凋落を招くという見方があった。意見の対立が住民投票に至り、結果として北部2自治体での調査は打ち切られた。

【公募方式から申し入れ方式へ】

こうした経験を受けて、SKB社は予め全国約20の県域を単位とした文献ベースの立地調査を行い、技術的条件や安全性に関わる要件を満たす可能性が高い岩盤の分布、工業用地や輸送インフラの利用可能性などから有利なエリアを暫定的に特定した上で、自治体に調査を申し入れ

る方式に改めた。そして、1995年からは技術的・社会的に一定の立地可能性があると考えられた原子力施設立地自治体で調査の受け入れ交渉が始められた。原子力施設立地自治体から3つ、それらの周辺自治体を加えた計6自治体でフィージビリティ調査が実施された。サイト選定プロセスに次のような改善が図られた。

- すべてのフィージビリティ調査の結果が出揃った後、次段階のサイト調査（ボーリング調査）に進む候補エリアをSKB社が絞り込んで提案し、当該地を含む自治体が調査継続の是非を判断する。これを可能とするために、SKB社は全国で5から10の自治体でフィージビリティ調査を行う。
- フィージビリティ調査の計画策定は、後の候補比較が可能となるようにSKB社の責任で行う。調査を受け入れる自治体は、調査の計画と結果をレビューする。

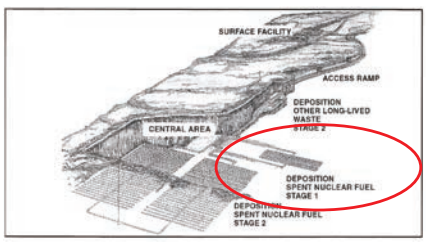
2000年12月にSKB社はサイト調査を行いたい3エリアを選定した。スウェーデン政府は、法定の環境影響評価の協議開始を条件として調査計画を承認した。各自治体は選定結果を検討し、原子力発電所があるエストハンマルとオスカーシャムの2自治体が調査受け入れを議決した。

サイト調査の開始から約7年後の2009年にSKB社は、地質条件の優位性が判明したエストハンマル自治体のフォルスマルクを選定した。SKB社は、オスカーシャムで使用済燃料をキャニスタに封入し、それを海上輸送してフォルスマルクで処分する最終処分事業計画を2011年3月に申請、2021年1月にスウェーデン政府が計画を承認した。

【最終処分システム〈実証〉の意味合いの変遷】

1990年代初期にSKB社は、研究開発計画を審査する当時の政府当局の提案を受け、最終処分に対する信頼を確かにする狙いで、第1段階として約10%規模の実証処分場を建設する計画を導入した（左下図赤線部分）。これに対する意見は大きく二つに分かれた。一方は実証処分場に賛成だが、残りの使用済燃料の管理方法は当面定めるべきでないというもの。他方は、技術的な要件や許認可手続きはフルスケール処分場と差がなく、閉鎖後長期の安全性は実証処分場では実証できず、むしろ統合的かつ包括的な安全評価を重視すべきというものであった。2000年代になって政府は、サイト調査の計画策定の前提としてSKB社の処分方法を承認した。これにより安全評価手法の確立が重要目標となり、実証処分場に代わって「試験操業」の評価後に「本格操業」に進む計画に変更されている。

図11-5
スウェーデンにおける処分場概念の変遷



SKB（1992），RD&D Programme 92 Supplement

SKB が 1992 年に公表した「実証のための処分」の概念。この概念は段階的な事業の進め方として、安全に対する信頼感醸成を目指して構築された。

出典：SKB社：RD&D Programme 92 Supplement（1992）

SKB（2010），RD&D Programme 10

2010 年に提示された「処分場概念」では、第 1 段階の処分の概念が省略された。この背景には、安全性を短期間で実証することはできないとする規制側の意見が取り入れられている。

出典：SKB社：RD&D Programme（2010）

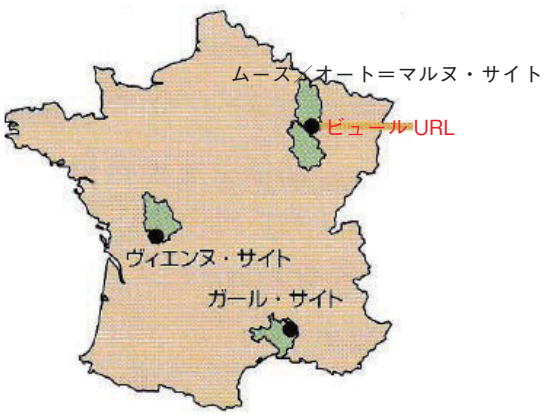
11-4

フランス:
議会の主導による計画の見直し

【処分地選定の経緯】

1987年、フランスの処分実施主体ANDRA（当時はCEA（現 原子力・代替エネルギー庁）に属する組織）は、地層処分場建設のための地下調査施設建設予定地として、異なる岩盤（岩塩、頁岩、粘土、花崗岩）の候補地4地点を選定し調査を開始した。しかし、各候補地の反対運動により、地層処分場立地選定作業は中断された。政府は、議会科学技術選択評価委員会に調査を依頼し、同委員会はメンバーのバタイユ議員の調査をもとに、1990年に報告書（バタイユ報告書）を公表した。議会はこの報告書に基づき「放射性廃棄物管理研究法」を1991年に制定した。この法律でCEA（ANDRA）に提示された主要な要件は次の通り。

図11-6　ANDRAが選定した地下調査施設建設候補地



出典：経済産業省資源エネルギー庁：諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について（2022）

- 下記の3つの管理方策の比較を2005年までに実施すること
  - ①長寿命の放射性核種の分離と短寿命の核種への変換
  - ②可逆性のあるまたは可逆性のない地層処分
  - ③長期貯蔵
- ANDRAをCEAから独立した組織とすること、など

バタイユ議員率いる調停団は、予備的な地質調査を行なう受け入れに好意的と判断された県として、1993年に4県を選定し、ANDRAはこの中から予備的な地質調査により1996年に3地点（ムーズ／オート＝マルヌ（ビュール）、ガール、ヴェエンヌ）を選定し、地下研究施設の建設を政府に提案した。

政府は、粘土質岩と花崗岩が分布する2サイトに地下調査施設を建設する必要性を認め、1999年、地元の了解が得られた粘土質岩が分布するビュールに地下研究施設建設を認可し、花崗岩サイトについては新たに候補サイトを探すというデクレ（政令）を制定した。

【ビュール（Bure）地下研究施設とDossier 2005 Report】

CEAから独立して処分実施主体となったANDRAは、ビュールでの地表調査、地下研究施設の建設を2000年から開始するとともに、

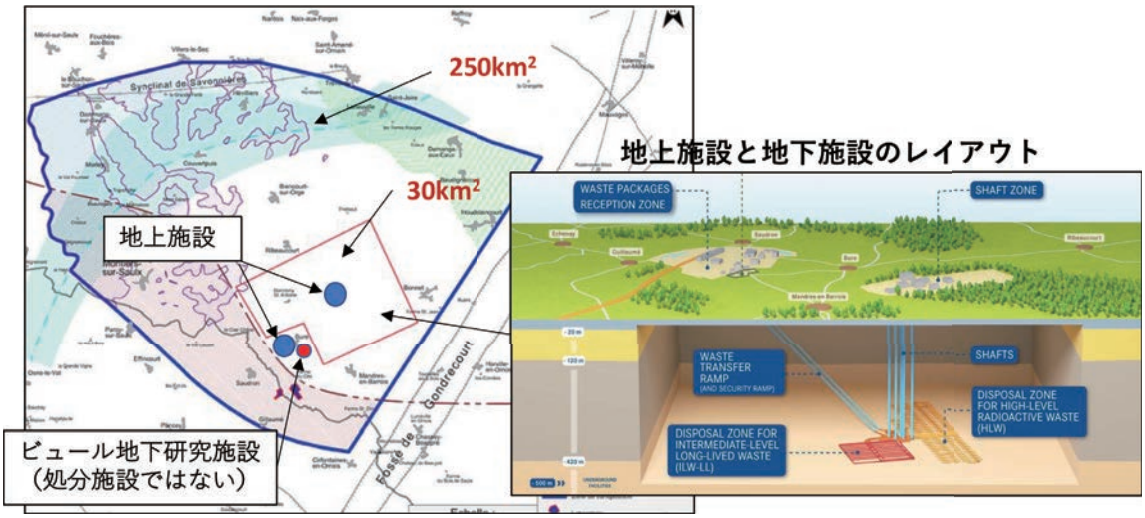
2005年に議会から要求された3つの方策に関する報告書(Dossier 2005)を公表した。

政府は、Dossier 2005やCEA（原子力・代替エネルギー庁)の報告をもとに、可逆性のある地層処分を基本原則とする「放射性廃棄物等管理計画法」を2006年に制定した。この法律には、2015年までに地層処分場の設置許可申請を提出、2025年までに操業を開始するマイルストーンが示されたほか、下記の方針が示された。

- 高レベル放射性廃棄物の長期管理方策は地層処分を基本とする
- 可逆性を考慮した処分概念とする
- 処分量を削減するための研究を継続して実施する

ANDRAは、ビュールの地下研究施設での処分技術の開発と実証を進めるとともに、2013年までに可逆性のある地層処分施設の概略設計を終えた。2016年～2018年に規制機関による予備的なレビューが行われ、それを受けてANDRAは2023年1月に処分場設置許可申請を政府に提出した。処分場建設予定地の選定については、ビュール地下研究施設周辺の調査から、約250km^{2}のエリアを選定し、そのなかから周辺住民との協議の結果も踏まえて地下施設の立地候補エリアを30km^{2}に絞り込み、地上施設の立地候補エリアを設定した(図11-7参照)。

図11-7　ビュール地下研究施設周辺調査による候補エリアの選択(約250km^2)から処分場建設候補地区(30km^2)に絞りこみ



出典:フランス放射性廃棄物管理機関(ANDRA)Webサイトを基に作成

フランスの原子力産業が国営で進められていることを受け、政府主導でのサイト選定を進めたが、地元の反対で計画は頓挫した。議会の主導の下、サイト選定はビュールの地下研究施設の展開のもとに処分場建設予定地が順調に選定され、設置許可申請が行われた。その背景には、地層処分の選択について、地層処分がベストとしつつ他の研究も並行して進めること、段階的な手続きと可逆性という制度設計が取り入れられたことによる。

11-5

スイス:住民投票での否決から国の積極的関与

【処分地選定の経緯】

電力会社と地方自治体の共同出資によって設立されたヴェレンベルグ放射性廃棄物管理共同組合(GNW)は、1994年にスイス中部のニドヴァルデン準州ヴェレンベルグにおける低中レベル放射性廃棄物処分場の建設計画を発表し，概要承認手続を開始した。しかし、1995年の州民投票で、探査坑の掘削と処分場の建設を目的とした地下空間利用の許可及び連邦による概要承認に対する州の意見・勧告が否決されたことから、処分概念の見直しを行った。

【放射性廃棄物の処分概念に関する専門家グループ(EKRA)の設置とEKRAの勧告】

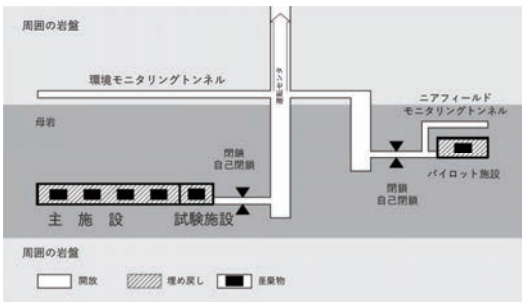
1995年の第1回目の州民投票の後となる1999年に、環境・運輸・エネルギー・通信省(UVEK)は、地質や土木分野の7名の専門家から構成される「放射性廃棄物の処分概念に関する専門家グループ」(EKRA)を設置した。EKRAは2000年に「放射性廃棄物の処分概念　最終報告書」を公表した。

2000年のEKRAの報告書の主な勧告は以下の通りである。

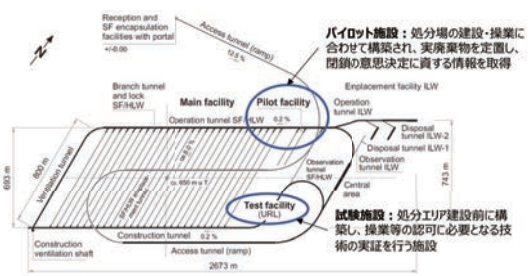
- 放射性廃棄物の対策に関する公衆を含めた議論を進めるべきである。
- 放射性廃棄物の処分方策として、地層処分を原子力法で規定すべきで、処分事業の実施者は「監視付き長期地層処分」の概念を具体化しなければならない。
- オパリナス・クレイ(OPA)*は、地層処分に適している。
- 処分プログラムのスケジュールを設定し、定期的に照査すべきである。

*OPA:太古に形成された泥岩、透水性が極めて低い。

図11-8　EKRAの処分概念とEKRAの勧告を受けてNAGRAが作成した地層処分場のレイアウト



出典:EKRA:Disposal concepts for radioactive waste (2000)を一部和訳



出典:NAGRA:Project Opalinus Clay Safety Report (2002)

EKRAは報告書で、地層処分にモニタリングの概念を積極的に組み込んだ「監視付き長期地層処分」の概念を提案した。

監視付き長期地層処分概念では、処分場が主施設の他に、パイロット施設、試験施設から構成される。試験施設とパイロット施設は主施設に

先立って建設する。最初に建設が始められる試験施設は、操業許可に必要な安全性の実証を目的とした地下特性調査施設の役割を担う。パイロット施設は人工バリアとニアフィールドの挙動監視を目的としており、実際の廃棄物を定置する。パイロット施設と主施設は、相互に完全に水理的に隔離する。パイロット施設でのモニタリング結果により、廃棄物を主施設から回収するか閉鎖をするかの決定を行う。主施設については回収が技術的に容易となるように建設する。

【2002年以降の動き】

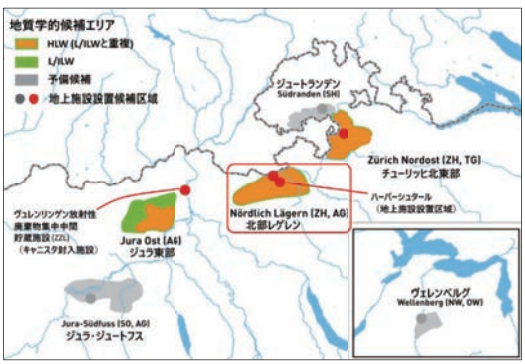
2002年9月に探査抗掘削のみを目的とした地下空間利用の許可申請を問う州民投票がニドヴァルデン準州で行われたが、再度否決され、低中レベル放射性廃棄物処分場のプロジェクトは中止となり、GNWは解散した。この後、放射性廃棄物管理共同組合（NAGRA）*と国は方針を変更し、原子力法を改定することで住民投票をせずにサイト選定が実施できるようにし、以下の手順で放射性廃棄物処分地を選定する作業を開始した。

*NAGRA：1972年に電力会社と連邦政府が設立。高レベル放射性廃棄物処分を含む処分プロジェクトを担う。

- 2002年：EKRAの提案を受けて、NAGRAは「監視付き長期地層処分」の概念を、2002年12月の「オパリナス・クレイプロジェクト安全報告書」の中で図11-8のように具体化した。
- 2005年：新原子力法が施行され、「監視付き長期地層処分」の方針が法律で明確化された。また、国が主導的にサイト選定を進めることとした。
- 2008年：国は地層処分サイトの選定計画（特別計画 "Sectoral Plan"）を策定するとともに、候補地決定時に州の住民投票を必要としない制度を設定した。
- 2008年の特別計画策定後、NAGRAは候補地の選定作業を開始し、同年高レベル放射性廃棄物処分場の地質学的候補エリアを3カ所、低中レベル放射性廃棄物処分場の地質学的候補エリアを6カ所提案した。
- 2019年：国はサイト選定第3段階で検討対象となる、3つの地質学的候補エリアを選定した。
- 2022年：NAGRAはチューリッヒの約20km北にある北部レゲレンを高レベル放射性廃棄物と低中レベル放射性廃棄物を処分する処分場サイトとして提案し、合わせて、地上施設の設置区域も提案した。他方、キャニスタ封入施設は、既存の中間貯蔵施設を拡張して運用することを提案した。

NAGRAは、2024年には、地層処分場プロジェクトに関する最初の許認可手続きとなる「概要承認」申請書を提出し、2029年には日本の内閣に相当する連邦評議会が概要承認を発給する。低中レベル放射性廃棄物処分場は2050年、高レベル放射性廃棄物処分場は2060年の操業開始が見込まれている。

図11-9　処分場候補エリア「北部レゲレン」



出典：NAGRA Webサイトの図を一部加工

11- 6

英国:地元の主体的参加を尊重

【セラフィールドでの失敗】

英国では1970年代に入り、英国地質調査所が高レベル放射性廃棄物処分場選定のための英国全土を対象とした、地質調査を文献レベルで開始した。1970年後半に英国政府は、高レベル放射性廃棄物の処分研究のため、スコットランドでボーリング調査を開始したが、原子力産業への信頼の低下や欠如などの理由から地元住民の反対を受けて調査は中止となった。以降、英国政府は、高レベル放射性廃棄物の処分地選定を凍結し、主にセラフィールド再処理施設や廃止措置から発生する中レベル及び低レベル放射性廃棄物に限定して、処分地選定に主力を注ぐ決定をした。

このサイト選定の役割を担ったのがNirex（当時、英国政府が所有していた公社）である。Nirexは、1980年代から1990年代にかけて、中レベル及び低レベル放射性廃棄物の処分地としてセラフィールドを選定したが、環境影響や計画への懸念に加え、科学的な不確実性や技術的な欠陥、さらにセラフィールドを選定した根拠が明白ではないとの理由で、地元から反対され、処分地選定は頓挫した。

図11-10　英国の原子力施設の所在地

出典：経済産業省資源エネルギー庁:
諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について（2022）

【CoRWMの勧告】

1999年に英国議会は、放射性廃棄物管理に関する政策の抜本的な見直しが必要であると認識し、英国政府に対して、すべての放射性廃棄物を対象とした管理政策を策定するよう勧告した。

英国政府は、2003年に諮問機関として放射性廃棄物管理委員会（CoRWM）を設置し、放射性廃棄物の長期管理に関する勧告を行うよう要請した。CoRWMはステークホルダーが参画する検討会を開催し、検討を重ねた結果、2006年に英国政府に対して、以下のような勧告を行った。

- 高レベル放射性廃棄物等の管理方針を地層処分とする。公衆と利害関係者の信頼を醸成し、及び維持しつつ、可能な限り早期の実施を目指す。
- サイト選定では、柔軟かつ段階的な意思決定プロセスを採用する。
- 処分対象となるインベントリを明確にする。
- サイト選定における地域の関与は、主体的な参加原理に基づくものとする。
- コミュニティと実施主体の開かれた平等な関係に基づく、パートナーシップアプローチを開発する。
- コミュニティは撤退権を保持する。

【カンブリア州での失敗】

英国政府は、CoRWMの勧告を受け入れ、2008年に自発的な参加原理とパートナーシップアプローチに基づいた、サイト選定プロセスを策定し、地層処分施設の受け入れに関心のある自治体の募集を開始した。2009年までにカンブリア州と同州2市が関心表明を行っていたが、机上調査の参加の是非の際に、カンブリア州議会が地質学的な適性に対する懸念やサイト選定プロセスにおける撤退権に法的な担保がないことを理由に否決した。机上調査に進むには、1州2市の合意が必要との覚書を締結していたため、1州2市はサイト選定プロセスから撤退した。

【教訓を取り入れたプロセスの導入】

英国政府は、サイト選定プロセスの見直しを図るため、撤退した地元関係者や公衆から意見聴取などを行い、2014年に新たなサイト選定プロセスの枠組みを示した白書を公表した。白書では、意見聴取で得られた懸念事項に対する次のような改善策が組み込まれた。

- サイト選定プロセスの透明性を確保するため、制度化された意思決定プロセスを導入する。
- 撤退権の法的担保がないことへの不安を取り除くため、住民支持のテストが行われるまで撤退権を有すると明記する。
- 地層処分事業や地域社会がすべきことに関する情報不足を解消するため、全国的な地質学的スクリーニングにより地質情報を提供し、地域社会との協働プロセスを策定する。

英国政府は2018年に地域社会との協働プロセスを策定し、新たなサイト選定プロセスを開始した。このサイト選定プロセスでは、最初に調査エリアの特定、地域社会全体での協議に発展させていくための準備組織として「ワーキンググループ」を設置し、次に調査エリアでの地層処分施設の立地可能性を検討する組織として「コミュニティパートナーシップ」を設立し、地域社会の特定を進めていくこととしている。

図11-11　地域社会との協働プロセス

出典：経済産業省資源エネルギー庁：諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について（2022）

11-7

カナダ:廃棄物処分政策と公衆関与

【技術的には可能だが、社会的受容性が不十分】

カナダにおける放射性廃棄物管理に関する取り組みは、カナダの原子力開発の中心的役割を果たす組織として1952年に設立されたカナダ原子力公社(AECL)が主体となって開始された。

AECLは、1963年マニトバ州にホワイトシェル研究所を開設し放射性廃棄物処分に関する研究開発を進めた。1978年、カナダ政府が使用済燃料を高レベル放射性廃棄物として地層処分する核燃料廃棄物管理計画を策定し、AECL主導の研究開発を開始するとした。AECLは基礎研究のための地下研究施設(URL)をホワイトシェル研究所に併設した。1994年、AECLは、その研究成果を取りまとめ、カナダ楯状地の火成岩へ使用済燃料を定置する地層処分概念に基づく環境影響評価書(EIS)を公表した。

EISをレビューする組織として1989年に政府が設置した核燃料廃棄物管理・処分概念の評価パネル(環境評価パネル、いわゆるシーボーン委員会)は、1998年に、レビュー結果として「技術的には可能だが、社会的受容性が不十分である」との勧告を政府に提出した。

【核燃料廃棄物の長期管理政策の確立】

政府は、勧告を受け、処分事業の実施主体の設立や使用済燃料の長期管理アプローチの策定などを定めるための法整備を進め、2002年に「核燃料廃棄物法」が成立した。この法律に基づき、カナダの原子力発電事業者を中心とした核燃料廃棄物管理機関(NWMO)が設立された。

NWMOは、使用済燃料の長期管理アプローチを提案するために、2003年から国内各地での対話活動や専門家との議論の場などを通じた意見聴取を行い、2005年に、これらの意見を反映した報告書「進むべき道の選択:カナダの使用済燃料の管理」を取りまとめた。NWMOは、この中で、最終的には地層処分を行うが、当面はサイト貯蔵、集中貯蔵を実施するという「適応性のある段階的管理(APM:Adaptive Phased Management)」を示した。APMは、2007年にカナダの国家方針として決定した。

APMは、最終的には地層処分を行うが、その達成までの期間(約300年)を3フェーズに分けて取り組むもので、その進め方を図11-12に示す。第1期は、集中管理の準備と処分場のサイト選定(約30年)、第2期は、集中貯蔵とサイトでの技術実証(約30年)、第3期から処分を開始するというものだ。

図11-12　適応性がある段階的管理(APM)の概念

出典:カナダ核燃料廃棄物管理機関(NWMO):Choosing a Way Forward the Future Management of Canada's Used Nuclear Fuel (2005)(仮訳)

【公募方式のサイト選定プロセス】

NWMOは、APMがカナダにおける使用済燃料の長期管理アプローチとして決定した後、処分場のサイト選定プロセスを具体的に検討し、2010年に、9段階からなるサイト選定計画「連携して進む：カナダの使用済燃料の地層処分場選定プロセス」を公表し、プロセスの第1段階を開始した。

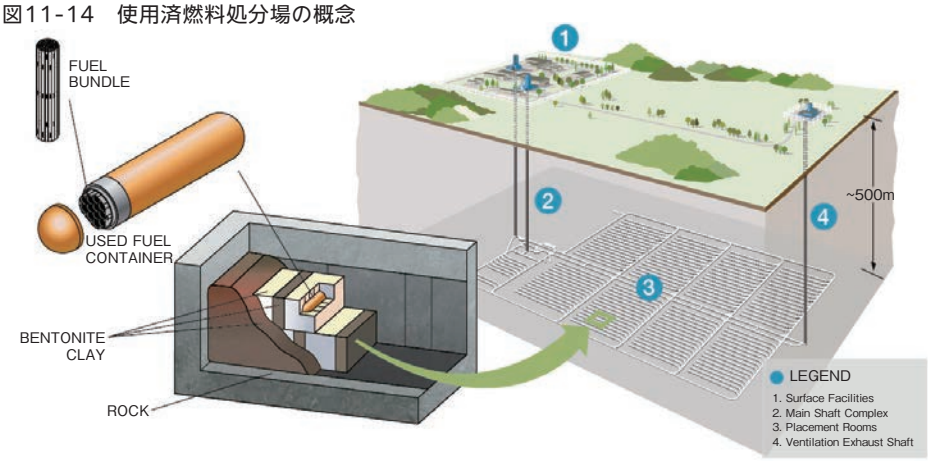
サイト選定プロセスの検討過程においてNWMOは、サイト選定の手続き、計画などを公表し、意見募集を行うとともに、公衆との様々な関与の場を設け、幅広い意見を取り入れることに注力した。NWMOは、これらの意見を取り入れ、安全性の重視、地元自治体の尊重、原子力立地州に焦点をあてるなどの行動原則を示したサイト選定プロセスを策定した。

2012年9月までに22の自治体が第2段階である関心表明を行い、初期スクリーニングの結果1自治体が除外となったが、21の自治体が第3段階（潜在的適合の予備的評価の実施）に進んだ。第3段階は、関心表明自治体において、机上調査と現地調査が実施され、2つの自治体に絞り込まれ現在も調査が継続されている（2022年10月現在）。

図11-13　22の応募地区から2地点の絞り込み調査を実施中

出典：カナダ核燃料廃棄物管理機関（NWMO）：Technical Program for Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel – Annual Report 2020

図11-14　使用済燃料処分場の概念



出典：カナダ核燃料廃棄物管理機関（NWMO），Technical Program for Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel – Annual Report 2020

11-8

米国:政治的なサイト選定が生んだ混沌と頓挫

【処分地選定の経緯】

米国は、1950年代から放射性廃棄物管理の在り方について検討を実施し、1982 年の放射性廃棄物政策法で、陸域での地層処分を選択し、段階的な処分候補地の設定段階に入った。候補地は、9サイト⇒5サイト⇒3サイト⇒1サイトと段階的な絞り込みを予定していた。

処分実施主体であるエネルギー省（DOE）は、1986年に3サイト=ネバダ州:ユッカマウンテン（凝灰岩）、ワシントン州ハンフォード（玄武岩）、テキサス州デフスミス（岩塩）=を大統領に推薦し、大統領の了解を得た。

連邦議会は、1987年、商業炉からの使用済燃料と再処理からの高レベル放射性廃棄物の第一処分場候補地としてユッカマウンテンを選定した。この背景には、ユッカマウンテンは不飽和帯（環境が不飽和であるため地下水によって放射性物質が移行する可能性が少ない）であること、周辺が軍事施設で住民がほとんど住んでいないことなどがあげられている。その後の調査結果を反映し、地下施設が不飽和帯に存在しているとの特徴、火山の発生確率などを考慮して、ユッカマウンテン処分場のトータルシステム性能評価（TSPA）が実施されている。

連邦議会は、1992年にエネルギー政策法を通じて環境保護庁（EPA）にユッカマウンテン環境放射線防護基準の策定を命じた。エネルギー長官は2002 年に大統領にユッカマウンテンが適地であるとして推薦し、大統領から連邦議会への推薦を受け、連邦議会は処分地とすることを承認した。

DOEは、2008年に、原子力規制委員会（NRC）に処分場建設の認可に係る許認可申請書を提出した。2009年、オバマ大統領は、ネバダ州選出のリード上院議員の意向を受け、ユッカマウンテン計画を凍結する決定を行うとともに、2010年に「米国の原子力の将来に関するブルーリボン委員会」を立ち上げ、米国における使用済燃料と高レベル放射性廃棄物対策の今後の進め方を諮問した。

図11-15　ユッカマウンテンの位置（オレンジ色のエリア）と空中からの全景

出典：
米国エネルギー省（DOE）
Webサイトより作成

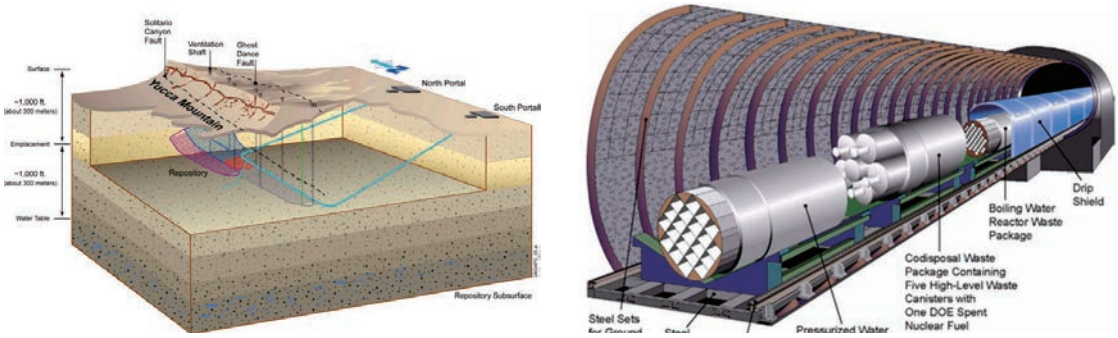
2010年に連邦政府によって設置されたブルーリボン委員会は、2012年1月26日に、米国の使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の管理・処分に係る安全かつ長期的な解決策のための包括的な勧告を示した最終報告書をエネルギー長官に提出した。ブルーリボン委員会は2011年7月にドラフト報告書を公表しており、最終報告書は、その後の意見募集を経て、委員会設置から2年以内という期限に合わせ、最終報告・提言が取りまとめられた。

ブルーリボン委員会のプレスリリースでは、最終報告で示した戦略における極めて重要な要素として、以下の3点の勧告が挙げられている。

1. 州などの地元の意に反して強要する試みは成功しておらず、将来の使用済燃料の貯蔵施設及び処分場の立地選定は、同意に基づくアプローチとすること。
2. 米国での高レベル放射性廃棄物管理プログラムの責任は、DOEから独立した安全な貯蔵及び処分の確保に専念する新しい組織へ移すこと。
3. 毎年約7.5億ドルの放射性廃棄物基金への拠出金の連邦予算上の取り扱いを変更し、連邦議会の当初の意図通りに使用できるよう確保すること。

オバマ大統領の8 年間、トランプ大統領の4年間は、ユッカマウンテンプロジェクトは予算がつかない状態であった。現在のバイデン政権においてもユッカマウンテンプロジェクトに関する予算は計上されておらず、連邦政府による処分方針は示されていないが、使用済燃料の中間貯蔵施設については、オバマ政権当時のブルーリボン委員会の勧告に基づいた、中間貯蔵サイト選定のための「同意に基づくサイト選定計画」が2021年に再始動している。

図11-16　ユッカマウンテンの処分場レイアウトと廃棄体定置イメージ



出典：米国エネルギー省（US DOE）：Yucca Mountain Science and Engineering Report, Technical information Supporting Site Recommendation Consideration(2002)

このような処分地選定の膠着状況は、1990年に全米科学アカデミーが 公表した“Rethinking High Level Radioactive Disposal”という報告書の中で予言されていた。この報告書では、地層処分が国家の政策となってきており、不測の事態に備えて、他のサイトやオプションの研究も進めるべきと勧告している。

これだけは憶えておこう！振りかえりチェックシート

第11章 諸外国における地層処分事業の経緯

問1 次の空欄を埋めなさい。

1

フィンランドでは1983年の政府原則決定に沿って使用済燃料処分場のサイト選定が進められ、1999年に処分実施主体である　①　がエウラヨキ自治体の　②　を処分候補地として決定した。フィンランドのサイト選定における成功の背景には、長期にわたる原子力産業の健全な活動、独立性と信頼感のある　③　の存在、候補地域の地域住民との透明性のある継続した　④　などがある。

2

スウェーデンの処分実施主体である　①　は、当初、　②　方式によるサイト選定を開始し、2つの自治体で調査を実施していたが、住民投票の結果調査が打ち切られた。その後　①　は、技術的・社会的に一定の立地可能性があると考えられた　③　立地自治体やその周辺に対しての　④　方式に変更した。　①　は2009年にエストハンマル自治体の　⑤　を選定した。

3

フランスでは、当初、異なる岩盤の候補地4箇所が選定され調査を開始したが、地元の強い反対を受け調査が中断された。　①　議員の報告書に基づき1991年に法律が制定され、　①　議員率いる調停団が調査受け入れに好意的と判断した4県の候補サイトを選定し、処分実施主体の　②　はその中から3地点を選定。その後1999年に地元の了解が得られた　③　への地下研究施設建設が認可され、　②　による調査を経て、処分場設置許可申請が提出された。

4

スイスでは1990年代に低中レベル放射性廃棄物処分場の建設計画が進められたが、　①　によって中止となった。国が設置した　②　の勧告を受けて、処分実施主体の　③　は「　④　付き長期地層処分」の概念を開発し、2005年原子力法で方針が明確化された。2008年に地層処分サイト選定計画（　⑤　）が策定され、　③　がサイト選定を開始、2022年に　⑥　を処分場サイトとして提案した。

5

英国では、当時の実施主体　①　により低中レベル放射性廃棄物処分場のサイトとしてセラフィールドを選定したが、地元の反対などにより頓挫した。英国政府は設置した諮問機関　②　による勧告を受けて、2008年に自発的な参加原理と　③　アプローチに基づいたサイト選定プロセスを策定し、2009年までに関心表明のあった　④　州とその中の2市で検討が進められていたが、その後サイト選定から撤退した。英国政府は2018年に地域社会との協働プロセスを策定し、新たなサイト選定を開始している。

6 カナダでは、1994年に　①　が地層処分概念に基づく　②　を公表した。しかし国の委員会は、技術的には可能だが　③　が不十分と勧告し、それを受けてカナダ政府は2002年に法律を制定し、実施主体　④　が設立された。　④　は2005年の報告書で「適応性のある　⑤　」によるアプローチを採り入れ、2010年にサイト選定を開始した。2012年までに関心表明のあった22の自治体から、2022年現在で2自治体まで絞り込まれている。

7 米国では処分実施主体の　①　が1986年に高レベル放射性廃棄物処分場の3つの候補サイトを提案し、1987年にその中からネバダ州の　②　が候補地として選定され、2002年に処分地とすることが決定された。しかし、2009年に　②　計画は凍結され、2010年に設立された　③　は2012年に米国の処分に係る安全かつ長期的な解決策のための包括的な提案を示した報告書を公表した。現状では2009年の計画凍結以降、　②　プロジェクトに関する　④　が計上されておらず、連邦政府による処分方針が示されていない。

問2 次の問で、正しいものには○、間違っているものには×をつけなさい。

1 □ 地層処分計画において、処分場のサイトが決定しているのはフィンランドだけである。

2 □ スウェーデン、フィンランドの北欧2カ国における使用済燃料を対象とした地層処分場のサイト選定プロセスが他の国よりも比較的問題なく進めることができた背景には、原子力施設が存在する地域との良好な関係が長年にわたり構築されてきている点、地域住民との対話の場と機会の設定、対話活動にも積極的に参画した国や規制主体の存在などがあると分析されている。

3 □ 処分場のサイト選定プロセスに、国が積極的に関与した事例では、フランスの新たな法律の制定、スイスでの原子力法の改正、米国での法律の改正などがある。

問3 地層処分計画を進める各国が処分地選定の失敗から得られた教訓を、300字程度で述べよ。

答え合わせ

第11章 諸外国における地層処分事業の経緯

問1	1	①ポシヴァ社　②オルキルオト　③規制当局（STUK）　④コミュニケーション
	2	①SKB社　②公募　③原子力施設　④申し入れ　⑤フォルスマルク
	3	①バタイユ　②ANDRA　③ビュール
	4	①住民投票　②放射性廃棄物の処分概念に関する専門家グループ（EKRA）　③NAGRA ④監視　⑤Sector Plan（特別計画）　⑥北部レゲレン
	5	①NIREX　②放射性廃棄物管理委員会（CoRWM）　③パートナーシップ　④カンブリア
	6	①カナダ原子力公社（AECL）　②環境影響評価書　③社会的受容性 ④核燃料廃棄物管理機関（NWMO）　⑤段階的管理
	7	①米国エネルギー省（DOE）　②ユッカマウンテン ③米国の原子力の将来に関するブルーリボン委員会（ブルーリボン委員会）　④予算

問2

1 ×

地層処分の処分地が決まっているのはフィンランドのエウラヨキ自治体オルキルオトとスウェーデンエストハンマル自治体フォルスマルクである。その他、フランスではビュール地域、スイスは北部レゲレン地方まで絞られている。処分場建設まで到達しているのは、フィンランドのみであるが、その他、米国のWIPP（Waste isolation Pilot Plant）で国防活動起源のTRU廃棄物の処分が実施されている。

2 ○

スウェーデン、フィンランドともに原子力発電所の運転や、地下に建設された低中レベル処分場をともに長期にわたり安全に操業しているという実績がある。処分する母岩の種類、処分概念も同じであり、SKB社が運営する地下研究施設（HRL）で、研究開発や技術開発を共同で実施してきている点などの実績もある。

3 ○

フランスでは、地下研究施設の建設地選定時に地元の反対を受け、処分計画が停滞する中、政府は反対の理由の調査をバタイユ議員に依頼した、報告では、地層処分とそれ以外の選択との比較、段階的アプローチ、自国での処分、実施主体の独立性、可逆性の確保などについての提言が記載され、これに沿った法律が定められた。

米国では、1987年議会における核廃棄物政策法の改正による、段階的サイト選定プロセスを中断した。ユッカマウンテンが候補地と決定された背景には、上院議会での議員の提案が契機になっているが、現時点においても地層処分計画は10年以上停止された状態にある。

その他英国では、放射性廃棄物管理委員会（CoRWM）による勧告に基づいて、政府は自発的な参加原理とパートナーシップ・アプローチに基づいたサイト選定プロセスを策定している。

問3

【解答例】

地層処分計画を進める各国では、フィンランドを除き、処分候補地の選定段階における様々な失敗から計画の停滞や中断を経験してきている。これら失敗例から学ぶことは以下にまとめることができる。

- 受け入れへの対応の一つとして、処分場を受入れる地域への誇りと補償の準備
- 段階的な進め方における意思決定に地域住民が参画できる仕組みと事業を後戻りできる仕組みの導入
- 公募方式、申し入れ方式、政策決定、いずれの場合も、地域の意見を反映できる進め方
- 地層処分の安全確保の仕組みを理解するための十分な学習の機会と対話の機会の設定
- 信頼できる処分の実施主体、規制当局の存在（273文字）

【解答に用いられるキーワードの例】

地層処分計画、公募と申し入れ方式、住民投票、段階的な意思決定、住民参加、コミュニケーション、協働、信頼できる実施主体・規制当局

参考文献 第11章 諸外国における地層処分事業の経緯

- 経済産業省資源エネルギー庁(2022)、諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について
- POSIVA (1999), TILA 99: Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara, POSIVA 99-07
- POSIVA (1999), The Final Disposal Facility for Spent Nuclear Fuel, Environmental Impact Assessment Report
- 経済産業省資源エネルギー庁Webサイト、北欧の「最終処分」の取り組みから、日本が学ぶべきもの
- POSIVA (2012), Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkilouto, Synthesis 2012, POSIVA 2012-1
- SKB (2011), Environmental Impact Statement, Interim storage, encapsulation and final disposal of spent nuclear fuel
- SKB(1992), RD&D Programme 92, Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste
- SKB(2010), RD&D Programme 2010, Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste
- ANDRA (2005), Dossier 2005 Argile, Synthesis Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation Meuse/Haute-Marne site
- ANDRA Webサイト、Project siting and facilities overview
- EKRA (2000), Disposal Concepts for Radioactive Waste, Final Report
- NAGRA (2002), Project Opalinus Clay Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Technical Report 02-05
- Swiss Federal Government (2003), Nuclear Energy Act
- Swiss Federal Office of Energy (2008), Deep Geological Repositories Sectoral Plan
- NAGRA Webサイト、Further Information -Site selection process
- CoRWM(2006), Managing our Radioactive Waste Safely: CoRWM's Recommendations to Government
- AECL (1994), Environment Impact Statement on the concept of Canada's nuclear fuel waste, AECL-10711. COG-93-1
- CANADA Seaborn Panel Report (1998), Environmental Assessment Report on AECL's Geologic Disposal Concept for High Level Radioactive Waste
- Government of Canada, (2002), Nuclear Fuel Waste Act
- NWMO (2005), Choosing a Way Forward the Future Management of Canada's Used Nuclear Fuel
- NWMO (2020), Technical Program for Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel – Annual Report 2020
- U.S. Congress, Nuclear Waste Policy Act of 1982
- Blue Ribbon Commission on Nuclear Waste Disposal Report (2012)
- U.S. DOE (2002), Yucca Mountain Science and Engineering Report, Technical information Supporting Site Recommendation Consideration

略語集

略語	正式名称	日本語名称
AECL	Atomic Energy of Canada Limited	カナダ原子力公社
ANDRA	L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs	(フランス)放射性廃棄物管理機関
CoRWM	Committee on Radioactive Waste Management	(英国)放射性廃棄物管理委員会
DOE	Department of Energy	(米国)エネルギー省
EKRA	Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle	(スイス)放射性廃棄物処分概念専門家グループ
FEP	Feature, Event and Process	特性、事象及びプロセス
IAEA	International Atomic Energy Agency	国際原子力機関
ICRP	International Commission on Radiological Protection	国際放射線防護委員会
JAEA	Japan Atomic Energy Agency	国立研究開発法人　日本原子力研究開発機構
JNFL	Japan Nuclear Fuel Limited	日本原燃株式会社
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle	(スイス)放射性廃棄物管理共同組合
NRC	Nuclear Regulatory Commission	(米国)原子力規制委員会
NUMO	Nuclear Waste Management Organization of Japan	原子力発電環境整備機構
NWMO	Nuclear Waste Management Organization	(カナダ)核燃料廃棄物管理機関
OECD/NEA	Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency	経済協力開発機構/原子力機関
RANDEC	Radwaste and Decommissioning Center	公益財団法人原子力バックエンド推進センター
SKB	Svensk Kärnbränslehantering Aktiebolag	(スウェーデン)核燃料・廃棄物管理会社
URL	Underground Research Laboratory	地下研究施設
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant	(米国)廃棄物隔離パイロットプラント

索引

	用語	ページ数
あ行	安全評価	63.66.68.76.77.85.**88**.89.90.91.92.93.94.96.99.109.111.112.113.115.122.123.125.126.127.128.136.137.138.139.166.167.169.171.173.175.178.196.206.208.211
	ウラン濃縮	**10**.11.15.51
か行	回収可能性	33.35.77.128.133.156.158.**188**.189
	可逆性	133.148.149.150.156.158.**188**.189.195.207.212.213
	核燃料サイクル	**10**.11.12.17.18.19.29.38.48.50.51.86.111
	原子力委員会	11.32.38.39.40.50.113.152
	原子力規制委員会	54.**75**.77.220
	原子炉等規制法	12.13.18.48.49.**74**.75.77.174
さ行	最終処分法	18.20.21.40.41.51.75.76.113.129.152.**154**.155.159
	再処理	**10**.11.12.14.15.17.18.19.21.38.39.48.51.110.152.208.216.220
	サイト選定	63.91.98.99.100.101.115.122.124.125.126.139.151.175.186.198.199.**206**.207.208.210.211.213.215.216.217.218.219.220.221
	シナリオ	76.88.**89**.90.91.92.93.94.101.112.115.134.135.136.137.138.139.167.173.175
	人工バリア	49.54.55.68.85.**86**.87.89.95.101.110.111.112.113.115.124.126.128.129.130.132.133.147.173.174.176.192.195.215
	セーフティケース	66.87.92.93.**96**.97.98.99.114.115.122.123.136.148.166.167.168.169.171.175.196.197.209
た行	第一種廃棄物埋設事業	13.48.74.77
	第二種廃棄物埋設事業	13.48.49.74
	第２次取りまとめ	50.86.88.92.95.111.**112**.113.114.126.130.166
	多重バリア	38.54.55.63.84.85.**86**.87.88.89.109.110.111.113.124.166.172.173
	直接処分	110
	天然バリア	55.68.84.85.**86**.87.95.110.111.124.173.174
は行	廃止措置	11.**12**.14.15.17.52.64.75.76.97.174.175.216
	不確実性	15.71.85.86.88.90.91.92.94.95.96.97.98.99.100.115.126.128.136.139.**166**.167.168.169.172.216
	FEP（特性、事象、プロセス）	**89**.92.93.94.137.167
	包括的技術報告書	19.92.93.97.98.100.114.**122**.123.127.128.129.130.132.133.134.136
	放射線被ばく	33.63.65.88.94.**170**
	放射線防護	62.65.67.70.71.72.73.89.90.132.**170**.171.220
ま行	MOX燃料加工	**10**.21
	モニタリング	33.52.54.62.66.77.147.172.173.**174**.175.176.177.187.192.194.214.215

地層処分に関するリテラシー育成教材（試作版）

2023年3月

制作：公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

別添資料 5

2022 年度人材育成プログラム

モニターアンケート

2022 年度人材育成セミナー

ソースタームで学ぶ！
～地質･設計･安全評価～
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、今後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 2～4 の 5 段階評価の部分は 3 日目のセミナー全体ふりかえり（10 月 5 日　10：00～）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１７日（月）期限厳守！**

※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： 座学 0 及び座学 1 について

座学 0「地層処分対象の廃棄物について」及び座学 1「安全評価の基礎」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 地層処分対象の廃棄物の発生源と種類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		
1.2 地層処分場の構成要素とそれぞれの役割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処分場の安全評価に関わったことがありますか。	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 安全評価の基本的な進め方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		
1.5 核種移行に関連したパラメータや処分場の安全機能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		
1.6 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：包括的技術報告書の閉鎖後長期安全評価（座学 2～復習・学びを深める～座学 3）について

1 日目には、包括的技術報告書の安全評価を題材として線量寄与が高い核種とその理由について座学と演習を交えて考えました。

	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 NUMO の包括的技術報告書の閉鎖後長期安全評価に関連する章を読んだことがありますか。	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 核種ごとの移行特性の違いと関連する処分場の安全機能により、線量評価結果に差が出ることの理解が深まりましたか。	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		
2.3 処分場の安全評価のためには、地質環境、設計の情報が重要であることが理解できましたか。	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		
2.4 座学（復習・学びを深める）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		
2.5 座学 3 において、TRU 廃棄物のための廃棄体開発に関する講義を行いましたが、今回紹介した線量評価結果から、影響の大きな核種の線量を下げるためにはどのような研究開発が必要と思いますか。			

3：JAEA 幌延深地層研究センター視察

2 日目の**幌延深地層研究センター及びボーリングサイトの見学**に関してお尋ねします

	5 段階評価	**回答**	**ご意見記載欄（なぜそう思いましたか）**
3.1 これまでに幌延深地層研究センターの地下に入ったことはありますか。	2：ない 1：ある		
3.2 実際に研究開発が行われている地下の坑道を見学した感想はいかがですか。	5：興味深い 4：やや興味深い 3：どちらでもない 2：さほど興味を引かれない 1：興味を引かなかった		
3.3 ボーリング調査の現場の見学を行いましたが、その目的やサイト選定における地上からの調査への理解が深まりましたか。	5：理解が深まった 4：やや理解が深まった 3：どちらでもない 2：あまり理解が深まらなかった 1：理解が深まらなかった		
3.4 地層処分事業に関わっている人に幌延深地層研究センター地下の視察を勧めたいですか。	5：必須だとして勧めたい 4：ぜひ勧めたい 3：前向きに勧めたい 2：見ておいた方が良い程度 1：見なくてもよい		
3.5 今回地下施設を見学して、実際に地下を自分の目で見ることについて、どのような意義があると思いますか。			

4：直接処分研究開発

2 日目の**わが国の使用済燃料の直接処分研究開発及び海外事例を用いたグループワーク**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 直接処分の研究開発がわが国で行われていることを知っていましたか。	2：知らなかった 1：知っていた		
4.2 わが国では、使用済燃料を再処理しガラス固化体を地層処分する方針ですが、使用済燃料を直接処分するための研究が必要だと思いますか。	2：思わない 1：思う		
4.3 廃棄物として処分する際の使用済燃料の特徴を理解できましたか。	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		
4.4 自身が行っている研究開発と、使用済燃料直接処分の研究開発との接点にはどのようなものがありましたか。			
4.5 処分場の母岩の違いにより、キャニスタや緩衝材に期待される役割が変わることが理解できましたか。	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		

5：セミナー全般に関して

5.0 これまでに当センター主催の人材育成セミナーに参加したことがありますか。	どちらかを選択して（残して）ください	
	はい　いいえ	2019 人材育成セミナー（サブタイトルなし）〔千葉県成田市〕
	はい　いいえ	2020 地質環境モデル（SDM）の構築に向けて～地下水データをみる・よむ・とく～〔静岡県富士市〕
	はい　いいえ	2021 地下研から学ぶ！～データの準備・解釈・伝え方～〔オンライン開催〕
	はい	2022 ソースタームソースタームで学ぶ！～地質・設計・安全評価～〔北海道 稚内市/幌延町〕

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）

5.2：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ガラス固化体、TRU 廃棄物や使用済燃料の安全評価を取り上げ、講義や復習、見学やグループでの議論など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）
5.2-1 全体として		
5.2-2 資料や講師のお話		
5.2-3 現場見学		
5.2-4 開始前の参加者自己紹介		
5.2-5 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		
5.2-6 セミナー進行		
5.2-7 セミナーで扱うテーマ		
5.2.8 5.0 で以前開催のセミナーに参加された方のみ。 以前に参加したセミナーと比べ、今回のセミナーの良かった点と悪かった点を教えてください。	（良かった点） （悪かった点）	

6：地層処分に関わる学びの機会･手段

日常の業務を通じた情報収集や知識獲得（いわゆる OJT）での地層処分に関する学びの機会や手段についておたずねします。

6.1 地層処分事業の性質から必然的にさまざまな分野の人がかかわり、（好むと好まないによらず）協力する必要があります。あなたの業務では、他の組織や異なる専門分野の人とどの程度かかわりがあると感じていますか。 4：日常的にある　3：ある程度ある　2：あまりない　1：全くない また、かかわりがある場合（4．または3.）、どのようなかかわりがありますか。	（数字で回答） （　　） （　　）
6.1-1　前問で「4．または3.」と回答した方におたずねします。 他の組織や異なる専門分野の人と一緒に仕事をする際にどのような点が難しいと感じますか。	自由記入
6.1-2　前問で「2．または1.」と回答した方におたずねします。 今後、自身の業務で他の組織や異なる専門分野の人と一緒に仕事をしていくことがあった場合、どのような点が難しいと思いますか。	自由記入
6.2 今後のご自身の業務において、他の組織や異なる専門分野の人との協力や協働が重要になってくると思いますか。 「はい」と答えた方、どのような面で重要になると思いますか。	どちらかを選択して（残して）ください （　はい　　いいえ　） （　　）

OJT 以外での、自主的・自発的な独学の対象と推定される「地層処分に関する周の手段や機会についておたずねします。

6.3 地層処分事業に関する技術的課題の解決に貢献するには、自身の専門分野の知識と教養に加えて、異なる分野に関する知識にも精通することが大事です。その一方で、その技術課題のメタ知識（課題が課題である理由、背景と経緯、R&D 関係者やサイト候補地や一般の人々での課題の捉え方の差異など）に関する知識も大事です。そうしたメタ知識は、自身の見方や考え方の偏りを正すバランス感覚を養い、入り組んだ課題の見通しを良くして『自分らしい』向き合い方を見つける手立てとなり、ひいては自身の「課題を解決する能力」につながると事務局では考えています。 以下の設問では、そうしたメタ知識の一つとして「地層処分が成立しうる」と認められるようになった数十年にわたる経緯や先人の考え方を「地層処分の教養」と呼びます。	
6.3.1 研究開発や実施に関わる人々には専門分野だけでなく、実務経験にも差があります。そうした多様なコミュニティメンバー間で、課題の解決に向けた関係者間の意思疎通を良くしたり、対話的思考を展開する際に、何らかの「地層処分の教養」は役立つと思いますか。	どちらかを選択して（残して）ください （ はい　　いいえ ）
6.3.2 あなた自身の「地層処分の教養」の理解度はどの程度だと思いますか。	100 点満点で点数を記入ください
6.3.3 「地層処分の教養」につながる情報源についての印象をお聞かせください。 1.（どちらかと言えば）分散していて良いものを探しにくい 2.（どちらかと言えば）必要なものがコンパクトにまとまっている	どちらかを選択して（残して）ください （ 1　　2 ）
6.3.4 「地層処分の教養」を蓄えるために利用した機会や教科書を教えてください。	有ればオススメ理由、無ければ、こんなものが有ったら便利と思うものを

7：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。

7.1 年代	歳代（20,30 などを記入）
7.2 最終学歴（学士、修士、博士）	
7.3 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
7.4 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
7.5 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）
7.6 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）
7.7 自組織への帰属意識と対外関係 7.7.1　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
7.7.2　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）
7.7.3　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。

（様式２）

二次利用未承諾リスト

平成31年度放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務）（国庫債務負担行為に係るもの）報告書（2022年度分）

平成31年度放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務）（国庫債務負担行為に係るもの）

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

頁	図表番号	タイトル
92	図 3.3-18	安全評価への関与経験の有無（分野別）
93	図 3.3-19	NUMO包括的技術報告書の閉鎖後安全評価の章の読書経験の有無
94	図 3.3-20	NUMO包括的技術報告書の閉鎖後安全評価の章の読書経験の有無（専門分野別）
95	図 3.3-21	他組織・分野とのかかわりの有無
95	図 3.3-22	他組織・分野とのかかわりの有無（分野別）
96	図 3.3-23	放射性廃棄物の発生源と種類に関する知識の有無
97	図 3.3-24	放射性廃棄物の発生源と種類に関する知識の有無（分野別）
99	図 3.3-25	質問A)と回答のまとめ、自由記入意見の抜粋
99	図 3.3-26	質問B)と回答のまとめ、自由記入意見の抜粋
101	表 3.3-7	地下研究施設関学経験の有無別の回答（5点満点の平均値）
101	表 3.3-8	地下研究施設見学に対する受講者の意見と見学の意義
104	図 3.3-28	「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。」という質問への回答
（別添1）研究報告1-4	図3-1	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）
（別添1）研究報告1-5	表3-1	健全性の判定区分（国土交通省道路局（2019）より引用）
（別添1）研究報告1-5	図3-2	道路トンネルの判定区分（国土交通省道路局（2019）より引用）
（別添1）研究報告1-6	図3-3	抽出した道路トンネルの判定区分
（別添1）研究報告1-7	表3-2	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）
（別添1）研究報告1-7	図3-4	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
（別添1）研究報告1-8	表3-3	抽出したトンネルの漏水発生有無と周辺地質の関係
（別添1）研究報告1-9	表3-4	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）
（別添1）研究報告1-10	図3-5	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
（別添1）研究報告1-10	図3-6	数値解析モデル
（別添1）研究報告1-11	表3-5	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）
（別添1）研究報告1-11	表3-6	解析入力物性値（支保工）
（別添1）研究報告1-12	図3-7	切羽進行に伴う天端沈下
（別添1）研究報告1-13	図3-8	切羽進行に伴う内空変位
（別添1）研究報告1-14	図3-9	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）
（別添1）研究報告1-14	表3-7	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）
（別添1）研究報告1-15	表3-8	使用した霧吹きの噴霧量
（別添1）研究報告1-15	表3-9	レールへの塩分付着量の推定

（様式２）

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告1-16	表3-10	レールの初期質量およびさび厚の測定結果
（別添1）研究報告1-17	図3-10	さび厚の測定箇所
（別添1）研究報告1-19	図4-1	試験体作成用型枠
（別添1）研究報告1-19	表4-1	鋼製支保工の寸法（単位：mm）
（別添1）研究報告1-20	表4-2	コンクリートの諸元および配合
（別添1）研究報告1-21	図4-2	コンクリート打設の様子
（別添1）研究報告1-22	図4-3	載荷実験の様子
（別添1）研究報告1-23	図4-4	解析領域と境界条件
（別添1）研究報告1-23	図4-5	解析モデル
（別添1）研究報告1-24	表4-3	解析岩盤物性値
（別添1）研究報告1-24	表4-4	解析支保物性値
（別添1）研究報告1-26	図4-6	Case1における破壊状況
（別添1）研究報告1-26	図4-7	Case4における破壊状況
（別添1）研究報告1-27	図4-8	終局耐力の比較
（別添1）研究報告1-28	図4-9	鋼製支保工の減耗量と内縁圧縮応力の関係
（別添1）研究報告1-29	図4-10	鋼製支保工の減耗量と外縁圧縮応力の関係
（別添1）研究報告1-30	表4-5	さび厚の測定結果（塩分あり，単位μm）
（別添1）研究報告1-30	図4-11	さび厚の経時変化（塩分あり）
（別添1）研究報告1-31	表4-6	さび厚の測定結果（塩分なし，単位μm）
（別添1）研究報告1-31	図4-12	さび厚の経時変化（塩分あり）
（別添1）研究報告1-32	表4-7	減耗量の測定結果（塩分あり）
（別添1）研究報告1-32	表4-8	減耗量の測定結果（塩分なし）
（別添1）研究報告1-32	図4-13	減耗量の経時変化
（別添1）研究報告2-1	図1-1	地層処分システム概念図（JAEA，2017）4）
（別添1）研究報告2-5	表2-1	本研究の実施内容およびスケジュール
（別添1）研究報告2-7	図3-1	白崎産・細越産・黒石産原鉱石の膨潤圧の経時変化曲線
（別添1）研究報告2-7	図3-2	Ten Sleep産原鉱石の高拘束圧下の膨潤変形率の経時変化曲線（左：100 kPa，右：500 kPa）
（別添1）研究報告2-8	表4-1	2022年度の検討項目と実施スケジュール
（別添1）研究報告2-9	図4-1	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）
（別添1）研究報告2-11	図4-2	不攪乱供試体（左）と再構成供試体（右）の作製概念図
（別添1）研究報告2-13	図4-3	膨潤圧実験装置の概略図
（別添1）研究報告2-15	図4-4	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）
（別添1）研究報告2-16	図4-5	エコーチップ試験の概念図（参考文献24に加筆）
（別添1）研究報告2-17	図4-6	エコーチップ試験の様子
（別添1）研究報告2-18	図4-7	弾性波試験装置の様子
（別添1）研究報告2-18	図4-8	弾性波試験実施の様子
（別添1）研究報告2-19	図4-9	薄片試料の外観
（別添1）研究報告2-20	図4-10	使用したSEM装置
（別添1）研究報告2-21	図4-11	白崎産原鉱石の膨潤圧の経時変化曲線
（別添1）研究報告2-22	図4-12	最大膨潤圧－試験終了時乾燥密度関係（白崎産原鉱石）
（別添1）研究報告2-22	図4-13	細越産原鉱石の膨潤圧の経時変化曲線
（別添1）研究報告2-23	図4-14	最大膨潤圧－試験終了時乾燥密度関係（細越産原鉱石）
（別添1）研究報告2-24	図4-15	黒石産原鉱石の膨潤圧の経時変化曲線
（別添1）研究報告2-24	図4-16	最大膨潤圧－試験終了時乾燥密度関係（黒石産原鉱石）

（様式２）

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告2-25	図4-17	最大膨潤圧－有効モンモリロナイト密度関係
（別添1）研究報告2-26	図4-18	白崎産原鉱石の膨潤変形率の経時変化曲線
（別添1）研究報告2-27	図4-19	白崎産原鉱石の最大膨潤変形率－初期乾燥密度関係
（別添1）研究報告2-27	図4-20	細越産原鉱石の膨潤変形率の経時変化曲線
（別添1）研究報告2-28	図4-21	細越産原鉱石の最大膨潤変形率－初期乾燥密度関係
（別添1）研究報告2-28	図4-22	黒石産原鉱石の膨潤変形率の経時変化曲線
（別添1）研究報告2-29	図4-23	黒石産原鉱石の最大膨潤変形率－初期乾燥密度関係
（別添1）研究報告2-29	図4-24	最大膨潤変形率－有効モンモリロナイト密度関係
（別添1）研究報告2-30	図4-25	拘束圧100 kPaにおける膨潤変形率の経時変化曲線
（別添1）研究報告2-30	図4-26	拘束圧500 kPaにおける膨潤変形率の経時変化曲線
（別添1）研究報告2-32	図4-27	月布・Ten Sleep・劉房子産原鉱石のL値比較
（別添1）研究報告2-33	図4-28	月布産原鉱石不撹乱試料のP波（左）とS波（右）計測データ
（別添1）研究報告2-33	図4-29	月布産原鉱石再構成試料のP波（左）とS波（右）計測データ
（別添1）研究報告2-34	図4-30	乾燥密度（上段）・湿潤密度（中段）・飽和度（下段）とP波速度（左段）・S波速度（右段）の関係（月布産原鉱石・クニゲルV1）
（別添1）研究報告2-35	図4-31	Ten Sleep産原鉱石不撹乱試料のP波（左）とS波（右）計測データ
（別添1）研究報告2-35	図4-32	Ten Sleep産原鉱石再構成試料のP波（左）とS波（右）計測データ
（別添1）研究報告2-36	図4-33	劉房子産原鉱石不撹乱試料のP波（左）とS波（右）計測データ
（別添1）研究報告2-37	図4-34	劉房子産原鉱石不撹乱試料のP波（左）とS波（右）計測データ
（別添1）研究報告2-38	図4-35	乾燥密度（上段）・湿潤密度（中段）・飽和度（下段）とP波速度（左段）・S波速度（右段）の関係（全試料）
（別添1）研究報告2-39	図4-36	月布産原鉱石の偏光顕微鏡観察結果（左：不撹乱供試体，右：再構成供試体）
（別添1）研究報告2-40	図4-37	月布産原鉱石のSEM観察結果（左：不撹乱供試体，右：再構成供試体）
（別添1）研究報告2-41	図4-38	月布産原鉱石不撹乱供試体のEDSによる元素マッピング結果
（別添1）研究報告2-41	図4-39	月布産原鉱石再構成供試体のEDSによる元素マッピング結果
（別添1）研究報告2-42	図4-40	月布産原鉱石の鉱物同定結果（左：不撹乱供試体，右：再構成供試体）
（別添1）研究報告2-43	図4-41	Ten Sleep産原鉱石の偏光顕微鏡観察結果（左：不撹乱供試体，右：再構成供試体）
（別添1）研究報告2-44	図4-42	Ten Sleep産原鉱石のSEM観察結果（左：不撹乱供試体，右：再構成供試体）
（別添1）研究報告2-45	図4-43	Ten Sleep産原鉱石不撹乱供試体のEDSによる元素マッピング結果
（別添1）研究報告2-45	図4-44	Ten Sleep産原鉱石再構成供試体のEDSによる元素マッピング結果
（別添1）研究報告2-46	図4-45	劉房子産原鉱石の偏光顕微鏡観察結果（左：不撹乱供試体，右：再構成供試体）
（別添1）研究報告2-47	図4-46	劉房子産原鉱石のSEM観察結果（左：不撹乱供試体，右：再構成供試体）
（別添1）研究報告2-48	図4-47	劉房子産原鉱石不撹乱供試体のEDSによる元素マッピング結果
（別添1）研究報告2-48	図4-48	劉房子産原鉱石再構成供試体のEDSによる元素マッピング結果
（別添1）研究報告2-50	図4-49	緩衝材の設計フローの一例3）
（別添1）研究報告2-51	図4-50	オーバーパックの腐食に伴う水素ガスの発生・破過に関する概念図
（別添1）研究報告2-52	図4-51	月布産原鉱石の拘束圧－試験終了時乾燥密度関係
（別添1）研究報告2-52	図4-52	Ten Sleep産原鉱石の拘束圧－試験終了時乾燥密度関係
（別添1）研究報告2-52	図4-53	劉房子産原鉱石の拘束圧－試験終了時乾燥密度関係
（別添1）研究報告2-53	図4-54	月布産原鉱石の拘束圧（対数軸）と試験後乾燥密度の関係
（別添1）研究報告2-53	図4-55	Ten Sleep産原鉱石の拘束圧（対数軸）と試験後乾燥密度の関係
（別添1）研究報告2-53	図4-56	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

（様式２）

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告2-55	図4-57	想定される緩衝材の経時的な状態変化
（別添1）研究報告2-55	図4-58	緩衝材の経時的な状態変化に伴う乾燥密度 - 拘束圧関係の変化概念図
（別添1）研究報告2-5	表2-1	本研究の実施内容およびスケジュール
（別添1）研究報告2-8	表4-1	2022年度の検討項目と実施スケジュール
（別添1）研究報告2-10	表4-2	原鉱石の基本的性質
（別添1）研究報告2-33	表4-3	弾性波試験結果（月布産原鉱石）
（別添1）研究報告2-36	表4-4	弾性波試験結果（Ten Sleep産原鉱石）
（別添1）研究報告2-37	表4-5	弾性波試験結果（劉房子産原鉱石）
（別添1）研究報告3-1	図1-1	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
（別添1）研究報告3-2	図1-2	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）
（別添1）研究報告3-9	表4-1	2022年度の研究工程
（別添1）研究報告3-10	図4-1	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
（別添1）研究報告3-10	図4-2	ベントナイトの亀裂への侵入距離δe
（別添1）研究報告3-11	図4-3	ベントナイト供試体の作成方法
（別添1）研究報告3-12	図4-4	ベントナイトの透水試験の概略図
（別添1）研究報告3-13	図4-5	閉口流路（亀裂）内のベントナイト侵入に関する概略図
（別添1）研究報告3-16	図4-6	一定外部膨潤圧作用下におけるベントナイトの亀裂侵入長さの時間変化
（別添1）研究報告3-16	図4-7	一定粘度特性を有するベントナイトの亀裂侵入長さの時間変化
（別添1）研究報告3-17	図4-8	変動外部膨潤圧および変動粘度のモデル化
（別添1）研究報告3-18	図4-9	定水位型透水試験装置の概略図
（別添1）研究報告3-19	図4-10	透水試験に用いた岩石供試体（直径50 mm）の端面の写真
（別添1）研究報告3-19	表4-2	岩石供試体の基本物性値
（別添1）研究報告3-20	図4-11	岩石供試体の巨視亀裂の導入方法（幌延泥岩の例）
（別添1）研究報告3-20	図4-12	ベントナイト試料で充填された亀裂を含む岩石供試体の一例
（別添1）研究報告3-21	図4-13	膨潤・充填性同時試験におけるベントナイトの膨潤圧
（別添1）研究報告3-22	図4-14	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
（別添1）研究報告3-23	図4-15	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
（別添1）研究報告3-24	図4-16	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
（別添1）研究報告3-24	表4-3	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
（別添1）研究報告3-25	図4-17	膨潤・充填性同時試験による計測値の関連性の例
（別添1）研究報告3-26	図4-18	膨潤・充填性同時試験におけるベントナイトの侵入距離と乾燥密度との関係
（別添1）研究報告3-26	表4-4	膨潤・充填性同時試験から得られた諸量
（別添1）研究報告3-27	図4-19	各種溶液に浸漬させたベントナイトの透水試験結果
（別添1）研究報告3-27	表4-5	各種溶液に浸漬させたベントナイトの透水係数
（別添1）研究報告3-28	図4-20	塑性図による各種溶液に浸漬させたベントナイトの特性と透水係数との関係
（別添1）研究報告3-29	表4-6	各種溶液に浸漬させたベントナイトの液性限界・塑性限界試験結果
（別添1）研究報告3-32	図4-21	変動外部膨潤圧（上昇）作用下におけるベントナイトの亀裂侵入長さの時間変化
（別添1）研究報告3-33	図4-22	変動外部膨潤圧（低下）作用下におけるベントナイトの亀裂侵入長さの時間変化
（別添1）研究報告3-33	図4-23	一定または変動外部膨潤圧作用下におけるベントナイトの亀裂侵入長さの時間変化
（別添1）研究報告3-34	図4-24	変動粘度（低下）を有するベントナイトの亀裂侵入長さの時間変化

（様式２）

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告3-35	図4-25	一定または変動粘度を有するベントナイトの亀裂侵入長さの時間変化
（別添1）研究報告3-36	図4-26	インタクトな幌延泥岩と万成花崗岩の透水試験における計測時間と透水量の関係
（別添1）研究報告3-37	図4-27	各種溶液浸漬ベントナイトで充填された亀裂を含む幌延泥岩の透水試験結果
（別添1）研究報告3-37	図4-28	各種溶液浸漬ベントナイトで充填された亀裂を含む万成花崗岩の透水試験結果
（別添1）研究報告3-38	表4-7	各種溶液浸漬ベントナイトで充填された亀裂を含む岩石の透水係数
（別添1）研究報告4-7	図3-1	ベントナイト原鉱石中にみられる微細なSiO2粒子とモンモリロナイトの産状
（別添1）研究報告4-9	図4-1	月布ベントナイト鉱床周辺地質図
（別添1）研究報告4-11	図4-2	地表のベントナイト露頭（採取地点１）の産状
（別添1）研究報告4-19	図4-3	29番層の試料の不定方位XRDプロファイル
（別添1）研究報告4-20	図4-4	29番層の試料の定方位XRDプロファイル
（別添1）研究報告4-21	図4-5	29番層の試料の定方位XRDプロファイル_060反射
（別添1）研究報告4-22	図4-6	29番層の試料のGKテスト後の定方位XRDプロファイル
（別添1）研究報告4-23	図4-7	地表露頭のベントナイト試料の不定方位XRDプロファイル
（別添1）研究報告4-24	図4-8	地表露頭のベントナイト試料の定方位XRDプロファイル
（別添1）研究報告4-25	図4-9	29番層ベントナイト原鉱石の偏光顕微鏡像
（別添1）研究報告4-26	図4-10	29番層ベントナイト原鉱石のSEM反射電子像
（別添1）研究報告4-27	図4-11	TKN-29-05における火山ガラス・シリカ微粒子・方解石の産状
（別添1）研究報告4-28	図4-12	地表露頭のベントナイト原鉱石(TKN-0002)のSEM反射電子像
（別添1）研究報告4-30	図4-13	カソードルミネッセンスを用いた観察例
（別添1）研究報告4-32	図4-14	29番層ベントナイト原鉱石の微量元素（HFSE）パターン
（別添1）研究報告4-33	図4-15	標準試料とケイ酸塩鉱物のマススペクトルの比較
（別添1）研究報告4-34	図4-16	フッ素化合物の種類による石英の反応性の比較
（別添1）研究報告4-35	図4-17	フッ素化合物の種類によるSWy-1の反応性の比較
（別添1）研究報告4-36	図4-18	SWy-1とフッ素化合物の混合物の乾燥炉から取り出し後の重量変化
（別添1）研究報告4-10	表4-1	2022年度の追加採取試料
（別添1）研究報告4-31	表4-2	29番層ベントナイト原鉱石のHFSE濃度
（別添1）研究報告5-3	表2-1	全体研究計画
（別添1）研究報告5-3	表3-1	粒度分別した各粘土鉱物試料のBET比表面積測定結果
（別添1）研究報告5-4	図3-1	各粘土鉱物試料の粉末X線回折パターン
（別添1）研究報告5-5	図3-2	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
（別添1）研究報告5-6	図3-3	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
（別添1）研究報告5-6	図3-4	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
（別添1）研究報告5-9	図4-1	各粘土鉱物についてのゼータ電位測定結果
（別添1）研究報告5-10	図4-2	各粘土鉱物試料についての0.1 mol/L NaClO4溶液によるEu脱離実験の結果
（別添1）研究報告5-11	図4-3	各粘土鉱物試料についての0.1 mol/L NaClO4, 0.1 mol/L KCl, 0.1 mol/L シュウ酸溶液によるEu逐次脱離実験の結果
（別添1）研究報告5-12	図4-4	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
（別添1）研究報告5-12	図4-5	ハイドロバイオタイト断面試料における子全体についてのEPMAによる元素マッピングの結果

（様式２）

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告5-14	図4-6	黒雲母断面試料についてのTEMによる観察・解析。(a) HAADF-STEM像および制限視野電子回折像、(b) STEM-EDSによる粒子端部・内部についての測定結果
（別添1）研究報告5-14	図4-7	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) HAADF-STEM像および制限視野電子回折像、(b) STEM-EDSによる元素マッピング
（別添1）研究報告5-15	図4-8	カオリナ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) STEM-EDSによる元素マッピング、(c) STEM-EDSによる粒子端部・表面・内部についてのスペクトル測定結果
（別添1）研究報告5-15	図4-9	モンモリロナ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) STEM-EDSによる粒子端部・内部についての測定結果
（別添1）研究報告5-16	図4-10	黒雲母についてのEu-152逐次脱離実験についてのIPオートラジオグラフィの結果
（別添1）研究報告6-3	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）
（別添1）研究報告6-4	図3-2	仮想モデルを用いて推定されたGEOFRACモデル亀裂密度と方位の検証結果 方位はシュミットネット下半球投影で，CC.は各グリッドでの設定値と推定値の相関係数を表す
（別添1）研究報告6-7	図4-1	パーミアメーターの概観（右）および測定の様子（左）。青丸は測点を示す
（別添1）研究報告6-7	図4-2	パーミアメーターによる多孔質セラミックの測定結果
（別添1）研究報告6-8	図4-3	パーミアメーターによるボーリングコア透水係数と密度の比較
（別添1）研究報告6-9	図4-4	3Dスキャナを用いたボーリングコア体積計測の様子
（別添1）研究報告6-9	図4-5	岩石密度と有効間隙率の比較。間隙率は浮力法によって求めた
（別添1）研究報告6-10	図4-6	角礫化したMIU-3（深度609.5 m）コア（左）と，晶洞の形成されたMIU-4（深度923 m）コア（右） いずれも月吉断層帯近傍に位置する
（別添1）研究報告6-10	図4-7	パーミアメーターを用いた発泡試験の様子。黄色いリングはエポキシパテによるシーリング
（別添1）研究報告6-11	図4-8	DH-15号孔（深度935 m）コアと空隙部の拡大写真
（別添1）研究報告6-12	図4-9	重回帰分析による各Caseの透水係数予測値と実測水理試験値の比較
（別添1）研究報告6-13	図4-10	Case-3にボーリングコア測定結果を加えたCase-4の重回帰分析結果を用いた透水係数予測値と実測水理試験値の比較
（別添1）研究報告6-13	図4-11	Case-4の重回帰式を用いて推定された各水理試験区間の推定値と実測値の比較
（別添1）研究報告6-14	図4-12	ボーリングデータから逆距離補間で求めた岩石密度と開口亀裂密度の空間分布モデル 赤線は月吉断層の地表トレースを示す
（別添1）研究報告6-14	図4-13	岩石密度と開口亀裂密度分布から推定された透水係数分布モデルと推定値のヒストグラム
（別添1）研究報告6-15	図4-14	ＭＯＤＦＬＯＷによる地下水流動解析結果から北→南方向のセル間流量を表示したモデル
（別添1）研究報告6-16	図4-15	グリッド中心モデル（左）と格子点モデル（右）による推定の概念図
（別添1）研究報告6-17	図4-16	図4.16 MIU-4コア薄片の顕微鏡観察写真

（様式２）

頁	図表番号	タイトル
（別添1）研究報告7-5	表2-1	本研究に使用するジルコン試料の一覧
（別添1）研究報告7-9	図3-1	薄片写真
（別添1）研究報告7-10	図3-2	抽出処理後のジルコン試料
（別添1）研究報告7-11	図3-3	2021年度におけるZHe年代分析結果
（別添1）研究報告7-15	図4-1	2022年度におけるZHe年代分析結果
（別添1）研究報告7-16	表4-1	ZHe年代分析結果の一覧
（別添1）研究報告7-17	図4-2	eU vs. 単粒子年代のプロット
（別添1）研究報告7-18	図4-3	粒径 vs. 単粒子年代のプロット
別添資料2		総括（各実施研究の2年間の成果概要）
別添資料3		地層処分に関するポータル教材の構成（学習指導要領）
別添資料4		地層処分に関するリテラシー育成教材（試作版）
別添資料5		2022年度人材育成プログラム モニターアンケート