

令和 6 年度

放射性廃棄物共通技術調査等事業

放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に
関する研究調査の支援等に関する業務

報 告 書

2025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「令和6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）」の成果を取りまとめたものです。

【目次】

1. はじめに	3
1.1 調査目的と調査内容	3
1.1.1 調査目的	3
1.1.2 調査内容	3
1.2 調査の計画立案と実施方針	4
1.2.1 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の選定・進捗管理等に関する作業計画	5
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	6
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	7
2.1 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発テーマの 2024 年度の成果概要	8
2.1.1 実施研究 1 研究者：東北大学 関 亜美	8
2.1.2 実施研究 2 研究者：早稲田大学 阮 坤林	10
2.1.3 実施研究 3 研究者：京都大学 吉光 奈奈	12
2.1.4 実施研究 4 研究者：京都大学 澤山 和貴	14
2.1.5 実施研究 5 研究者：岡山理科大学 牧 涼介	16
2.1.6 実施研究 6 研究者：東京科学大学 岡村 知拓	18
2.1.7 実施研究 7 研究者：日本原子力研究開発機構（JAEA） 安邊 啓明	20
2.2 評価委員会による 2024 年度の研究成果に対する評価	22
2.2.1 第 1 回評価委員会（中間報告）	22
2.2.2 第 2 回評価委員会（最終報告）	23
2.3 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まとめ	32
3. 人材育成プログラムの実施・作成	33
3.1 実施方針	33
3.1.1 前提・背景及び今年度の実施概要	33
3.1.2 実施体制	35
3.1.3 本事業における人材育成セミナーの位置づけ	36
3.2 実施方針	39
3.2.1 これまでのセミナー開催実績のまとめ	39

3.2.2 2024 年度のセミナーの開催方針	41
3.2.3 人材育成セミナーの内容の検討	43
3.2.4 人材育成セミナーの開催に向けての準備等	55
3.2.5 人材育成セミナーの開催	60
3.2.6 アンケート結果の整理及び考察	70
3.3 オンライン学習教材の検討	96
3.3.1 昨年度の実施内容と今年度の実施計画	96
3.3.2 海外調査の実施	96
3.3.3 動画コンテンツの追加作成	102
3.3.4 ユーザーレビューの実施	105
3.3.5 E ラーニング教材の更新版の作成	110
3.4 人材育成プログラムの実施・作成のまとめ	112

別添資料 1 実施研究報告

別添資料 2 2024 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

我が国では、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、地層処分実施主体（原子力発電環境整備機構）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。また、地層処分事業は、100 年以上にわたって継続されるものであるため、長期にわたる人材の確保・育成が重要となる。

このような背景を踏まえて、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・先進的かつ重要な研究開発及び人材育成プログラムの作成を行い、長期的な視点で地層処分事業の推進に貢献できる人材を育成することを目的とする。

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
 - ・ 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の育成のためのプログラムの検討を行う。プログラムの検討においては、人材育成セミナーを開催し、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。
 - ・ 地層処分に関するオンライン教材について 2023 年度に作成した試作版を更新する。

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選定・進捗管理 等

令和5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（実施期間は令和5年度下期から令和8年度上期までの3年とする）に対して、研究開発資金の配賦、進捗管理、成果の取りまとめを実施する。

具体的には、令和6年度の研究テーマ1件当たりの金額は、400万円を上限とする。また、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、最低限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（第1四半期中の実施を目的）、事業の成果（第4四半期中に実施）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、受託事業者は、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、受託事業者は、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、年度末に受託事業者が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。

(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が必要不可欠である。そこで、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、受託事業者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。

ア. 人材育成セミナーの開催

- 地層処分研究開発の俯瞰的な理解を深めるためのセミナーを年間3～4日程度実施する（受講者数としては、20～40名を想定）。令和4年度までに実施してきた講義、演習、見学、グループワークを組み合わせた形式を基本とし、資源エネルギー庁と相談・調整の上、受講者の理解を深めるための形式や内容を検討する。
- セミナーの参加者を募集するとともに、3.①に示す研究テーマ実施者等も含めることを検討する。
- セミナーの開催形式は、対面での実施を基本とする。

イ. オンライン学習教材の検討

- 令和5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）で作成した動画教材（Eラーニング）の試作版の活用先や方法を検討し、更新版を作成する。その際、地層処分事業が進んでいるスウェーデン等の海外教材の内容も参考にする。

その他、上記に記載されていない詳細な部分については、資源エネルギー庁と相談・調整の上、検討し措置する。

(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年度末までに作成し、提出する(CD-ROM等各1枚)。

次節で、2024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選定・進捗管理等に関する作業計画

前述の作業内容を踏まえて、2023年度に選定した萌芽的・先進的かつ重要な研究開発に関する進捗管理・取りまとめについて以下を実施することを計画した。

- ① 評価委員会において年度の中頃及び年度末に進捗状況についての報告を行い、各研究に委員から意見をもらうことにより進捗管理を実施。
- 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実施。
- ③ 各研究者から提出された研究報告書の概要の取りまとめを実施。

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、この評価委員会において、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、電子メールや各大学等への訪問により意見交換を実施し、研究の進捗について管理する。

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

1.2.2 人材育成プログラムの実施・作成に関する作業計画

2024 年度の人材育成プログラムの実施・作成では、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）。

- 地層処分技術全体を俯瞰し、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の開催と開催結果に基づくフィードバックの実施。
- スウェーデンの事例を参考に入れたうえで、2023 年度に試作した繰り返し学習可能な動画教材（E ラーニング）の更新。

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

2023 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。

以下の 2.1 節において、以下に示す 7 件の研究テーマの 2024 年度の成果概要を、2.2 節では評価委員会における 2024 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 2024 年度報告書については別添資料 1 に掲載する。

- ① 「フライアッシュ混合セメントの利用における環境影響物質の溶出と不溶化に関する基礎的研究」

関 亜美（東北大学）

- ② 「地層処分の地下水質・温度履歴を模擬した環境におけるベントナイト系緩衝材の水分移動特性および膨潤特性の実験的評価」

阮 坤林（早稲田大学）

- ③ 「透過波による岩盤モニタリングを目指した弾性波と地盤の不均質性の関係評価」

吉光 奈奈（京都大学）

- ④ 「地下環境の透水性イメージング・モニタリングに資する岩石物理モデルの構築」

澤山 和貴（京都大学）

- ⑤ 「放射性核種の超長期安定固化に向けた次世代型シンロック固化技術の開発」

牧 涼介（岡山理科大学）

⑥ 「分散型台帳技術と機械学習を用いた先進的地層処分場設計スキームの構築」

岡村 知拓（東京科学大学）

⑦ 「広域応力場を考慮した流体供給源周辺の応力場のモデル化」

安邊 啓明（(国研) 日本原子力研究開発機構）

2.1 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発テーマの 2024 年度の成果概要

2.1.1 実施研究 1 研究者：東北大学 関 亜美

研究テーマ：フライアッシュ混合セメントの利用における環境影響物質の溶出と不溶化に関する基礎的研究

（背景・目的）

地層処分場の構築に使用されるセメント系材料の一つとして、フライアッシュ（以下、FA と呼称）を混合した FA セメントや低アルカリ性セメントの適用が検討されている。一方、石炭火力発電所よりの副産物である FA は、石炭由来の第二種特定有害物質（重金属等）を含有しており、土壤汚染対策法の基準値を超過して第二種特定有害物質が溶出する可能性が指摘されている。本研究では、FA が含有する環境影響物質 Cr(VI), As, Se, F, B（有害 5 成分）に着目し、FA 単体、及び FA にポルトランドセメント（OPC）や高炉セメントを混合した FA 混合セメント（FAC）からの溶出特性を評価するとともに、基準値に対して有意な溶出が認められた成分の不溶化方策を検討する。また、地層処分システムの性能評価において重要核種とされている Se 及び I を対象として、FA 混合セメントとの相互作用を検討する。これらの検討により、産業副産物である FA を建設材料として有効利用した場合においても、法令基準に対して処分場由来の環境影響物質の溶出が十分に抑制され、かつ、地層処分システムの性能向上に寄与することを目的とする。

（2024 年度の実施計画）

2024 年度は、FA の変質挙動に大きく影響すると予想される浸漬溶液組成及び温度をパラメータとした浸漬試験を実施する。また、FA と陰イオン核種との相互作用に関する検討

として、2023 年度に実施した I^- 及び SeO_3^{2-} を用いた収着実験に続き、地層処分場周辺における岩盤中の硫酸塩鉱物や水の放射線分解等による局所的な酸化性雰囲気を想定し、 IO_3^- および SeO_4^{2-} を用いた収着実験を実施する。

さらに、FA を混合したフライアッシュ混合セメント (FAC) の供試体を作成し、FAC に対して有害成分の溶出特性を評価するための浸漬試験を行う。

(2024 年度の成果概要)

地層処分場周辺の高アルカリ環境や塩水環境を想定し、 NaOH 、 KOH 、 Ca(OH)_2 及び NaCl 溶液を用いて FA 単体の浸漬試験を行ったところ、 NaCl 及び Ca(OH)_2 溶液の場合では、有害成分の溶出量が顕著に増大するような挙動はほぼ見られなかった一方で、100 mM の NaOH または KOH を用いた場合は土壤汚染対策法に基づく溶出量基準値をも上回る溶出量となった。これは NaOH や KOH の場合はより高アルカリ条件となるため、FA の主要構成鉱物であるシリカやアルミノケイ酸の溶解度増加に伴い FA 表面に存在している有害成分も溶出するためであると考えられる。

FA と陰イオン IO_3^- 及び SeO_4^{2-} の相互作用に関しては、FA への IO_3^- または SeO_4^{2-} の収着試験を実施した。収着試験系として FA のみの場合と、処分場でのセメント混合を想定して FA に CaO を添加させた場合について検討したところ、 IO_3^- については CaO を添加した系で溶液中のヨウ素濃度が検出限界以下となり、また SeO_4^{2-} の場合でも CaO を添加した系において有意に濃度が減少した。このことから、ヨウ素やセレンといった陰イオン核種が、 Ca が供給される環境において FA 利用により固定化される可能性が示唆された。

FAC の浸漬試験については、FA と高炉セメントを混合して FAC を作成し、粒径 2mm 以下の粉末試料を最大 28 日間、超純水に浸漬した。前年度実施した FA 単体の浸漬試験の結果と比較して、FAC からの有害成分の溶出濃度は低くなった。一方で、溶出量基準と比較した場合、As 以外の B、F、Se、Cr (VI) は浸漬時間が経過するにつれて一部が基準値を僅かに超過する結果となった。このことから、地層処分システムにおいて FA を含むセメント系材料が地下水と接触することにより有害成分の溶出濃度が基準を超える可能性が考えられることから、今後は混合するセメント材料の種類や配合、養生期間をパラメータとする試験を行うことによって、適切な不溶化条件を確立することが課題となる。

2.1.2 実施研究2 研究者：早稲田大学 阮 坤林

研究テーマ：地層処分の地下水質・温度履歴を模擬した環境におけるベントナイト系緩衝材の水分移動特性および膨潤特性の実験的評価

(背景・目的)

高レベル放射性廃棄物処分において、緩衝材に求められる特性としては、自己シール性、止水性、核種吸着性、応力緩衝性などがあり、これにより、閉じ込め・隔離・遅延といった長期安全性に寄与することが期待されている。ガラス固化体の処分後、再冠水の段階では、地下水の浸入により緩衝材が不飽和状態から飽和状態へ遷移し、緩衝材の膨潤や緩衝材中の水分の移動が発生するが、再冠水の過程において高レベル放射性廃棄物の崩壊熱が緩衝材の水分移動特性に及ぼす影響については明らかとなっていない。また、沿岸域で処分された場合の海水系地下水が緩衝材特性に及ぼす影響についても重要な検討課題となる。本研究では、締固めたベントナイト供試体に温度履歴を与え、淡水及び海水環境を模擬した蒸留水及び人工海水を用いて供試体を飽和させ、供試体の膨潤特性を示す膨潤圧及び水分移動特性を示す水分拡散係数を検討する。その結果をもとに、温度履歴・水質が緩衝材の膨潤特性および水分移動特性に及ぼす影響を確認し、緩衝材の合理的な設計に寄与することを目標とする。

(2024 年度の実施計画)

2024 年度は、2023 年度より開始している、締固めたクニゲル V1 ベントナイトに異なる温度履歴 (60、80、100 及び 150℃) を与えることを継続し、150 及び 300 日間の養生時間となった試料を得る。その後、養生した供試体を蒸留水と人工海水で飽和させ、膨潤圧試験と水分拡散試験を実施する。ベントナイトに温度履歴を与えた供試体に対して、膨潤圧試験や水分拡散試験の結果についてのメカニズムを探ることを目的として、メチレンブルー吸着、X 線回折分析 (XRD)、蛍光 X 線分析 (XRF) 試験を行い、モンモリロナイト含有量、モンモリロナイトの底面間隔の変化及び Si, K, Al の含有量の変化、走査型電子顕微鏡による観察を行い、温度履歴が及ぼす影響を調べる。これに加えて、2023 年度より開始している、異なる温度 (25、60 及び 80℃) での異なる飽和溶液 (蒸留水及び人工海水) を用いた長期膨潤圧のモニタリングを継続実施する。

(2024 年度の成果概要)

異なる温度履歴（養生温度：60、80、100 及び 150℃）を 150 日および 300 日間与えたベントナイト供試体に対して、膨潤圧試験を実施したところ、およそ 50 時間以降に達した平衡膨潤圧（飽和状態での膨潤圧）は、温度履歴を与えていない試料の値とほぼ同じであり、さらに 60～150℃の様々な温度履歴の試料でも膨潤圧はほぼ同じであった。一方で、蒸留水を用いた膨潤試験で得られた膨潤圧は、人工海水を用いた膨潤試験の結果より高くなった。同様に、異なる温度履歴を与えたベントナイト供試体に対して水分拡散試験を実施した結果、得られた水分拡散係数は温度履歴を与えていない試料とほぼ同じ結果となった。また、人工海水を用いた場合は、蒸留水を使用した実験系の結果より、水分拡散が大きくなる傾向を示した。

また温度履歴を与えたベントナイトに対して、メチレンブルー吸着量測定、XRD、XRF 分析を行ったところ、メチレンブルー吸着量、モンモリロナイトの底面間隔、K、Al、Si といった元素濃度は、温度履歴を与えていない試料からほとんど変化がない結果となった。さらに SEM によりベントナイト試料を観察したところ、人工海水に飽和させた場合、蒸留水を使用した場合と比較して、モンモリロナイトの集合体の形状が変化し、集合体間の距離が短くなっていることが分かった。

これらの結果は、300 日間程度、例え 150℃の温度履歴をベントナイトに与えたとしても、例えばベントナイトに含まれるモンモリロナイトのイライト化といった変質はほとんど生じていないため、膨潤圧、水分拡散係数にほとんど影響しないことが示唆された。また、人工海水を用いた系では、モンモリロナイトの集合体間の距離が短くなることから、蒸留水を用いた試験と比較して膨潤圧が小さく、水の拡散係数が大きくなることが示唆された。

異なる温度（25、60 及び 80℃）での蒸留水および人工海水で飽和させた場合の膨潤圧のモニタリングについては、モニタリングを 1 年継続した結果、蒸留水の場合、膨潤圧は初期に安定した後、そのまま一定の値が継続したが、人工海水の場合は、膨潤圧は初期に安定した後、減少し続ける傾向を示した。この膨潤圧挙動の違いについてのメカニズムの解明は今後の課題である。

2.1.3 実施研究3 研究者：京都大学 吉光 奈奈

研究テーマ：透過波による岩盤モニタリングを目指した弾性波と地盤の不均質性の関係
評価

(背景・目的)

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、処分場のサイトは安定した地盤の場所が選定される必要がある。地盤の安定性は岩盤に含まれる亀裂や弱面、地質境界などと強く関連するため、地殻にかかる応力の変化による亀裂の増加や、地下水流路の変化など、自然事象により地盤の構造変化が起こる可能性があり、サイト調査段階から建設・操業段階などで地層処分場周辺の地盤を弾性波観測等などにより監視し続ける必要がある。本研究では、薄片観察や CT スキャン等で試料内部の様子を視覚的に把握することができる岩石実験や、処分場に近いスケールの現場計測における広帯域計測を通して、透過波と亀裂の関係を吟味し、どのような岩盤の変化が検出可能か評価する。能動的弾性波モニタリングから岩盤情報やその変化を検出することができる場合、透過波の速度・振幅・周波数・形状変化等と岩盤の変化がどのように関連するのか関係性を調べ、変化や亀裂が検出できる場合はそれらを定量的に描像することを目指す。

(2024 年度の実施計画)

2024 年度は、異なる岩石が貫入した試料など、不均質な岩石試料のマイクロスケール空隙の流体浸透挙動を調べるために、蛍光剤を用いた流体浸透試験を実施する。また、空隙が存在する不均質な岩石試料を対象として得られた弾性波試験結果について、数値計算による評価を行う。さらに、実際の地下の不均質状態について評価することを目的として、フィールドにおける弾性波観測試験設備を整備する。

(2024 年度の成果概要)

蛍光剤を用いた流体浸透試験については、片麻岩に花崗岩質の貫入がある花崗岩質片麻岩試料を用いて、円柱形試料を蛍光液に浸け、液体の浸透過程を観察した。その結果、花崗岩質片麻岩の浸透過程において、片麻岩部分よりも花崗岩部分が先に浸透していることが明らかとなった。顕微鏡観察により、一部の鉱物内に液体が浸透したものの、蛍光剤は大部分が粒子境界に浸透していることが示された。今後はより詳細に微細構造への浸透過

程を明らかにすることが課題である。

弾性波の数値シミュレーションについては、空隙のある多孔質安山岩の円柱供試体を対象として得られている弾性波透過試験の結果を、3次元差分法による波動伝播シミュレーションを実施した。その結果、空隙がない場合は震源から入射した波が、試料の反対の面で反射・変換した実態波が震源方向に戻っていったが、空隙を含むモデルでは、震源の対面に到達する前に波面の広がりによがみが生じる様子が観察された。これらの結果から、複数観点で得られた波形から不均質の位置やサイズが推定できる可能性が示唆された。

フィールドにおける弾性波観測試験については、京都大学別府キャンパスで過去に掘削されたボアホールを対象として弾性波モニタリングを実施することとし、3本のボアホールの水位測定や、地震観測網の整備作業を進め、地震観測を開始した。今後、フィールド観測を本格化させ、地下の亀裂と弾性波の関係の理解をすすめることが課題である。

2.1.4 実施研究 4 研究者：京都大学 澤山 和貴

研究テーマ：地下環境の透水性イメージング・モニタリングに資する岩石物理モデルの構築

(背景・目的)

地層処分事業において、候補地の事前評価ならびに閉鎖後の長期安定性を評価するために、地下の流体流動挙動の評価が重要な検討項目の一つとなる。原位置での浸透率測定は容易ではなく、その時間変化の推定は数値モデリングに頼らざるを得ないが、実際の天然環境の透水性を実験室から予測することは非常に困難である。本研究では、地球物理学的探査手法（弾性波探査や電気比抵抗探査）を活用して、岩石物性値と流体流動挙動の直接的な対比を様々なスケールで行うことで、実際の地下環境で得られる観測物性値から目に視えない地下の流体流動挙動の時空間変化を予測可能なモデル（以下、岩石物理モデル）を構築する。また、これらの検討によって事前評価ならびに地上モニタリングの双方への還元を目指す。

(2024 年度の実施計画)

2024 年度は、高拘束圧高間隙水圧下で浸透率・弾性波速度・電気比抵抗を計測可能な実験システムを整備・改良する。また、整備した試験装置を用いて、岩石サンプルを対象として浸透率・空隙率・密度・電気比抵抗・弾性波速度を測定する。

(2024 年度の成果概要)

高拘束圧高間隙水圧下での浸透率・弾性波速度・電気比抵抗を計測可能な実験システムの整備については、一時的に 150MPa の圧力での試験が可能となったが、試験システムの不具合が発生したため、今後も不具合を解消するための実験システムの整備・改良をすることが課題である。

そのため、今年度は一軸圧縮試験機を拡張し、浸透率・電気比抵抗・弾性波速度の同時測定が行える実験システムを構築し、粗い一枚亀裂試料を一軸圧縮試験機で変形させながら、応力変化に伴う浸透率・電気抵抗比・弾性波速度の同時測定を行った。試験には花崗岩、斑レイ岩、及び亀裂面粗さや等方性が制御可能等のメリットを有する紫外線硬化型アクリル樹脂による 3D プリンタ試料を用いた。試験の結果、浸透率は応力の増加に伴って

低下することが確認できた。粗さの異なる 3D プリント試料の比較により、浸透率は亀裂面が粗いほど高くなることも分かった。また、岩石試料については、花崗岩試料と斑レイ岩試料の浸透率は変化の挙動が異なることが確認された。この理由として、母岩の特性（構成鉱物等）の違いに起因する可能性が考えられる。電気比抵抗については、応力の増加に伴って 3 つの試料とも比抵抗が上昇した。粗さの異なる 3D プリント試料の比較により、電気比抵抗は亀裂面が粗いほど大きくなることが分かった。P 波速度については、応力の増加に伴って 3 つの試料とも速度が上昇した。また、P 波速度は亀裂面が粗いほど上昇することが分かり、先行研究の報告と整合的であった。感圧紙を用いた 3D プリント試料の接触面積の実測定を行い、接触面積と弾性波速度の相関を調べたところ、弾性波速度の変化は接触率の上昇に感度が高いことが明らかとなった。

これらの結果から、電気比抵抗・弾性波速度の同時測定により浸透率を定量的に評価できる可能性が示唆された。ただし、本研究では一枚亀裂を考慮したが、実際の地下構造は複雑な亀裂を有していると考えられるため、今後は、亀裂と物性に関するより詳細な実験的・数値的研究が進めることで、地下の浸透率の定量的な評価を実現することが課題である。

2.1.5 実施研究 5 研究者：岡山理科大学 牧 涼介

研究テーマ：放射性核種の超長期安定固化に向けた次世代型シンロック固化技術の開発

(背景・目的)

地層処分は長期に渡る事業であるため、固化体の長期的な腐食・劣化挙動評価に基づいて安全性を担保するとともに、将来的に変化していく可能性がある多様な燃料及び処理・処分形態に対応できる新たな固化技術基盤を構築していく必要がある。長期的な固化体の健全性については、地質学的年代での損傷や環境変化による影響を類似した自然現象から把握しようとする取り組み（ナチュラルアナログ）が行われており、シンロックが地質学的年代で安定であることはこれまで知られている。

本研究では、使用済燃料の再処理施設から発生する高レベル放射性廃液を含め、特に潜在的有害度が高く長期的な発熱源かつ α 核種であるマイナーアクチノイド（MA）を含めたアクチノイド（An）に注目し、多様な放射性核種の超長期安定固化に向けた次世代型シンロック固化技術の開発を目的とする。最新の材料科学的観点から、シンロック母材を選定し、放電プラズマ焼結（SPS）や誘導加熱法などの焼成技術を駆使した廃棄物の迅速固化技術を新たに提案する。さらには、シンロックと天然鉱物について、結晶構造解析及び第一原理計算などの計算科学を併用して結晶安定性評価を実施することで、何十万年後の廃棄物の状態や安全性を予測できる新しい評価技術の創出を図る。

(2024 年度の実施計画)

2024 年度は、技術的妥当性が高く、試薬からのシンロック合成及び既往の廃棄物を想定した固化プロセスを確立することを目的として、様々な方法によるシンロック合成を行う。合成したシンロックについては粉末 X 線回折や顕微鏡的手法を用いて微細構造評価を行い、得られたデータを基に合成実験にフィードバックする。さらに合成したシンロックの浸出試験を行い、耐浸出性について評価する。

(2024 年度の成果概要)

シンロックの合成については、最初にアクチノイド（ U^{4+} など）の模擬元素としてセリウム（ Ce^{4+} ）を用いたムラタイト基シンロックを合成した。構造解析の結果、得られたシンロックは M3 ムラタイト単相であり、6 配位の多面体と稜を共有する 8 配位サイトに Ce

が存在することが分かった。また、浸出試験を行った結果、極めて優れた耐浸出性を示すことが分かった。次に、ウランを含有するムラタイト基シンロックを合成し、構造解析を行ったところ、1350℃で合成した場合のムラタイト基シンロックは主に M3 ムラタイトが主要な構成相であったが、1300℃で合成した場合は M3 ムラタイト相の他に中間生成物も多く含まれることが分かった。U が配位する占有サイトについては Ce のケースと同様であったことから、Ce⁴⁺がおおむね U⁴⁺の模擬をしていることが示された。1300℃で合成したシンロックを対象として浸出試験を行ったところ、溶液中のウラン濃度は検出下限以下であったことから、中間生成物を含むシンロックでも優れた耐浸出性を示すことが明らかとなった。

次に放電プラズマ焼結 (SPS) 法を用いて、簡便かつ迅速なパイロクロア基及びジルコナイト基シンロックの合成を行い、従来の方法で合成したシンロックと密度の比較を行った。その結果、SPS を用いて合成したシンロックの密度は、従来の電気炉を用いて作製した試料の密度を大きく上回っており、SPS を用いることで短時間での緻密化が可能であることが明らかになった。

さらに、高レベル放射性廃棄物中に含まれる揮発性核種が揮発しない低温条件でのシンロック低温合成技術について検討した。市販の硝酸塩試薬を用いて、Self-propagating room temperature (SPRT) 法と呼ばれる反応技術を用いてシンロックを合成した結果、600℃で焼成することで単相のパイロクロアが得られた。この技術を用いることで硝酸塩から直接シンロックを合成することができ、乾燥・酸化といった前処理が不要となるほか、600℃という低温で核種を固溶できる可能性が示された。本年度はシンプルな化学組成を有するパイロクロアについて検討したが、今後は様々な結晶相を対象として SPRT 法によるシンロックの合成の検討をすすめることが課題となる。

2.1.6 実施研究 6 研究者：東京科学大学 岡村 知拓

研究テーマ：分散型台帳技術と機械学習を用いた先進的地層処分場設計スキームの構築

(背景・目的)

我が国では中長期にわたり原子力発電の利用が継続される見通しであり、プルサーマル発電や次世代革新炉の運用により、従来とは異なるインベントリの高レベル放射性廃棄物の発生が予測されている。そのため、核燃料サイクル上流の条件が変化し、ガラス固化体の発生シナリオが多様化したとしても、柔軟に対応可能な地層処分システムを検討する必要がある。多様な核燃料サイクルの条件が複雑に絡み合った高レベル放射性廃棄物発生シナリオをより精緻かつ、迅速に地層処分システムに反映させるためにはデジタル技術を用いた問題解決が必要不可欠である。そこで、本研究では、処分場設計の中でも専有面積に大きく影響を与える処分場の熱解析を対象として、シナリオ研究とデジタル技術を起点にした先進的な設計スキームの構築を行う。

(2024 年度の実施計画)

2024 年度は、高レベル放射性廃棄物発生シナリオの解析として、昨年度設定した六ヶ所再処理工場からの廃棄物発生シナリオについて評価を実施する。また、高速炉が実用化された際の原子力発電シナリオを調査し、廃棄物発生シナリオを設定する。また、廃棄物データベースの設計の構築に係る取り組みとして、昨年度選定したブロックチェーン基盤を用いて、廃棄物データベース構築の為のブロックチェーンネットワークの設計を行う。さらに、処分場の熱解析モデルの構築に係る取り組みについて、昨年度作成した処分場の大規模過渡伝熱解析モデルを用いて、複数の発熱特性の異なる廃棄体埋設を仮定した際の熱解析を実施する。

(2024 年度の成果概要)

高レベル放射性廃棄物発生シナリオを解析については、六ヶ所再処理工場運転シナリオにおいて、再処理される使用済燃料の冷却期間が長期化（約 58%が 40 年以上冷却）していることを確認した。この結果、ガラス固化体中の核種組成は従来想定と異なり、Am-241 の増加及び Sr-90、Cs-137 の減少が見られた。また、インベントリを考慮したガラス固化体と処分場面積についての評価を行ったところ、廃棄体専有面積と廃棄物含有率の最

適化により、従来設定と比較して最大 18%の処分場面積削減の可能性を示した。次に、高速炉導入シナリオのインプットデータを整備した。さらに、諸量評価の不確かさの考え方と妥当性確認について検討し、その一環として諸量評価コード NMB4 の検証・妥当性確認を実施した。実際の原子炉サイトにおける使用済燃料貯蔵量と Pu 保有量を解析により算出し、公開されている実績値と比較した結果、NMB4 の妥当性が確認できた。

廃棄物データベースの設計の構築については、セキュリティ性、長期サポート、データ管理の柔軟性等を考慮し、コンソーシアム型ブロックチェーン Hyperledger Fabric を基盤とした廃棄物データベースのシステム要件を整理した。地層処分事業の超長期性を踏まえ、透明性確保、事業遂行の効率向上、廃棄体回収可能性の担保を重視したデータ構造を設計した。NMB4 との連携を視野に入れたクラス設計により、廃棄物の物理的形狀、核種インベントリ、保管場所等を体系的に管理可能なデータベース基盤を構築した。

処分場の熱解析モデルの構築については、処分坑道 20 本、1 坑道あたり 60 体の廃棄体を埋設できる大規模過渡伝熱解析モデルを構築した。坑道あたりの廃棄体数をパラメータとした最適化検討用モデルの開発や、各廃棄体に個別発熱量を割り当てる処理の自動化機能を実装し、異なる発熱特性を持つ廃棄体の最適配置に向けた解析基盤を整備した。計算リソースの制約が課題として浮上したため、今後はスーパーコンピュータ等の高性能計算環境を活用して伝熱計算の計算負荷に対応することが課題である。

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

研究テーマ：広域応力場を考慮した流体供給源周辺の応力場のモデル化

（背景・目的）

火山・火成活動の影響範囲の把握に係る調査・評価技術の高度化は、地層処分のサイト選定調査において重要な課題である。流体供給源周辺の応力場に関する有効なモデルが構築できれば、流体の供給位置や流体圧を仮定することで、火成岩脈の貫入する範囲を評価できるが、既存の流体供給源周辺の応力場モデルは、異方的な火山活動に対しては影響範囲を説明することができなかった。本研究では、広域応力の影響を仮定した新たな流体供給源周辺の応力場モデルを提案し、火成岩脈の貫入方向や火山活動の影響範囲を予測するための理論的枠組みを構築する。また、岩脈群の貫入方位が貫入時の応力場に従うことを利用し、岩脈群の方位分布から貫入時の応力場を推定する逆解析手法を開発することにより、局所応力と広域応力を峻別しながら過去の応力場を推定する手法の開発を目指す。

（2024 年度の実施計画）

2024 年度は、紀伊半島南西部に分布する中新統田辺層群に貫入した砕屑岩脈を対象に、砕屑岩脈の方位データの収集を行い、流体供給源周辺の応力場の推定を行う。また、推定した区画ごとの応力状態及び区画の位置を基に、この地域の応力場に影響を与えた流体供給源に関するパラメータ及び広域応力に関するパラメータを求めるための、応力場逆解析手法について解析ソフトウェアを用いて実装・適用する。さらに、新たな流体供給源周辺の応力場モデルの検証のための事例を選定するために、文献の洗い出しや他研究者からの情報収集、予察的な野外調査を行う。

（2024 年度の成果概要）

流体供給源周辺の応力場の推定については、調査を行う和歌山県田辺市の鳥の巣地域において先行研究で得られている砕屑岩脈の方位データがあることから、応力場の把握に必要な周辺地域の岩脈方位データを収集した。収集した方位データは、数 10～数 100 m 規模の区画ごとに応力逆解析手法を適用し、各区画に働いた応力を推定した。その結果、調査地域の砕屑岩脈の方位分布は、調査地域南部に存在した流体供給源（泥ダイアピル）に伴う局所応力と、北北東-南南西方向の水平面内最大圧縮軸を持つ広域応力の合成による応

力場を反映していることが示唆された。

応力場逆解析手法の実装と適用については、区画ごとに検出された応力状態と区画の位置情報を解析データとして用い、各区画で検出された応力とモデル応力の違いがフィッシャー分布に従うと仮定し、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて逆解析した。その結果、広域応力は、西北西-東南東引張で応力比が中程度の正断層型応力を表すパラメータによくまとまった分布が得られ、広域応力についてよく制約することができた。流体供給源の位置については、応力場の推定の検討結果と同様に、調査地域南部に存在することを示唆するパラメータ分布が得られた。しかしながら流体供給源の位置や深さについては不確実性が大きいと、精度を向上させることが課題である。

応力場モデル検証のための事例の選定については、モデルの応力を変位に読み替え、現世の火山周辺の水準データとの比較を行う調査対象地域として、鹿児島県桜島火山周辺を選定し、同地域の水準データを入手した。また、火山・火成活動を対象とし、岩脈の位置情報を直接入力とする応力場逆解析手法を開発・適用する調査対象地域として潮岬地域と飛騨金山地域を選定し、それぞれの現地において予察的な調査を行なった。今後はこれらの地域で引き続きデータを収集し、本研究で開発したモデルの検証を進めることが課題である。

2.2 評価委員会による 2024 年度の研究成果に対する評価

2023 年度に選定した 7 件の研究テーマについて、2024 年度は評価委員会（主査：新堀雄一（東北大学）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）

2024 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。

2024 年度 第 1 回評価委員会
日時：2024 年 10 月 2 日（水） 14：00～18：30
場所：オンライン会議（事務局：当センター会議室）

中間報告では、各研究者から 2024 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。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、2024 年度計画
- ・ 2023 年度の実施内容
- ・ 2024 年度のこれまでの進捗
- ・ 2024 年度後半の計画

なお、委員会はオンライン会議形式で実施した。

研究者による発表に対して、各委員には 2024 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、2024 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）

2024 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。

2024 年度 第2回評価委員会
日時：2024 年 3 月 3 日（火） 14：30～19：00
場所：オンライン会議（事務局：当センター会議室）

最終報告では、各研究者から 2024 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 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。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・目的
- ・ 全体計画、2024 年度計画
- ・ 2024 年度の成果
- ・ 2025 年度の研究計画

評価では、2024 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。また、評価結果は、今後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。

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。

2024 年度第 2 回評価委員会 評価結果（その 1）

研究テーマ	フライアッシュ混合セメントの利用における環境影響物質の溶出と不溶化に関する基礎的研究 関 亜美（東北大学）
2024 年度の研究成果に対する評価／ 当該研究に関する次年度の実施に向けたご意見等（自由意見）	
・ 是非とも、陰イオンに関するメカニズムの推論・現象の模式図化を期待しています。 ・ 研究全体の位置づけとして、脱炭素・脱石炭の動向を考えると、地層処分開始時には、フライアッシュの入手は困難になる可能性があります。それに関連して、貴殿の研究成果の普遍性から、新しい展開も考えておくの良いと思います。アドバイスです。 ・ フライアッシュの種類が変わったときに、データベース化を図るという観点で、測定・実験手順を他者が模倣できるように模式図化や手順書を、最終の段階で明示すると良いように思います。 ・ 炭酸カルシウムの被膜生成なども考えられると思うのですが、その場合、XRD では検出が難しく、TG-DTA-MS など調べてみるのもあるのではないのでしょうか。 ・ FA 試料の選定について、生成日が異なることで pH が異なるとなると、入り口の段階で FA の不均一性がネックとなって、活用性が疑問視されると現在行っている実験や結果が受け入れなくなってももったいないので、その辺のロジックをもう少し整理されるといいのではないかと思います。検討ください。 ・ 研究はおおむね計画通り進んでいると思います。 ・ 有害成分を不溶化する手法として、エージング処理と CaO 添加を提案していますが、それらのコスト分析も実施していただきたい。あまりコストが高くなるようでしたら、FA を使用すること自体の実現可能性も低くなると思います。 ・ 収着された陰イオン核種は、ずっと収着されたままでしょうか。その後、再度溶解することはないのでしょうか？収着のメカニズムおよび長期挙動についても検討していただきたい。 ・ 当該年度の研究計画にしたがって、着実に実施されていることを確認しました。 ・ 計画通りの進捗が見られる。 ・ ぜひ、固定化メカニズムのモデル化や FA の化学組成に基づいた整理など、機構論的な理解に努めてほしい。また、長期的な挙動についても言及してほしい。	

2024 年度第 2 回評価委員会 評価結果（その 2）

研究テーマ	地層処分の地下水質・温度履歴を模擬した環境におけるベントナイト系緩衝材の水分移動特性および膨潤特性の実験的評価 阮 坤林（早稲田大学）
2024 年度の研究成果に対する評価／ 当該研究に関する次年度の実施に向けたご意見等（自由意見）	
・ 良い成果が確実に得られていると思います。以下の点についてご参考になればと思い、記載させていただきます。 ・ 飽和過程のベントナイト特性の変遷の図面と今回の検討のどこを進めているかも分かり易くご説明いただけると幸いです。 ・ 水分拡散特性試験の含水比と底面からの距離との関係において、240 h の場合、距離が大きくなると含水比は大きくなる理由は分かるでしょうか？ ・ イライト化はベントナイトへのカリウムイオンの供給に依存しますが、これまでの研究および今後の研究の結果をどのように活かしていくかも整理して頂ければ幸いです。 ・ 数値解析の方法などは、もっと丁寧に説明して下さい。 ・ 人工海水との反応について取り上げていますが、実際の処分環境では議論されたかもしれませんが（もしされていたらご容赦ください）淡水から塩水へと徐々に変化することが想定されます。その際のベントナイトへの影響は、今回の実験結果から何か議論できることはありますでしょうか。 ・ 研究はおおむね計画通り進んでいると思います。 ・ 実験室の状態と現場の状態は異なると思います。密度のばらつきなど。ベントナイトの実際の施工時の状態を模擬した膨潤圧のばらつきなどを評価できないでしょうか？ ・ 当該年度の研究計画にしたがって、着実に実施されていることを確認しました。 ・ 計画どおりに研究が遂行されていると判断します。特に、長期の試験を実施されている点は、ポイントだと思います。 ・ スメクタイトのイライト化は、温度に加えて、K 濃度にも依存します。人工海水系での実験をされていますが、K 濃度を変化させた実験をやられてもいいかもしれません。	

2024 年度第 2 回評価委員会 評価結果（その 3）

研究テーマ	透過波による岩盤モニタリングを目指した弾性波と地盤の不均質性の関係評価 吉光 奈奈（京都大学）
2024 年度の研究成果に対する評価／ 当該研究に関する次年度の実施に向けたご意見等（自由意見）	
・ スパコンが旨く使えないという環境の中、着実に成果が得られていると思います。以下の点についてご参考になればと思い、記載させていただきます。 ・ 毛管力による微細亀裂の存在などが分かりますが、それをどうマトリックス拡散（飽和環境）に活かすのかも明確にして頂ければと思います。たとえば、マトリックス拡散の深さ（飽和環境）について、岩石内の鉱物のモード比等と関連付けて、今回の結果が活かせるといいかと存じます。 ・ 本研究では弾性波を用いて、処分場周辺のモニタリングが可能かどうかと言及しておりますので、そのことと蛍光の検討についての繋がりについても整理して頂ければと存じます。 ・ フィールド観測のノイズ除去について、様々な検討項目があるとのことで、解明は難しくても、検討の内容を整理することも一つの成果と存じます。 ・ 構成鉱物の浸透率の傾向を調べている点は、興味深い。 ・ 粘土鉱物化していると考ええると、浸潤液の化学的な影響が考えられる。 ・ 不飽和状態での浸潤を調べているので、Fick の法則に則っているのであろう。是非、物理定数化してほしい。 ・ 浸透試験の結果を、適切な物理量で表示してください。 ・ 研究は、いろいろな状況で変わっていくものですが、HLW 事業にどのように貢献できる成果なのかを、明確にすることは忘れないように報告をお願いします。 ・ 他の研究者の研究内容との違いを明確にして欲しいです。 ・ 基本的に口頭でコメントさせて頂きましたが、引用している既往研究の岩石はそれなりに変質が進んでいるので、比較する場合にはその辺の岩石の状態の違いも念頭に検討いただけるといいのではと思います。あと今後の実際の現場への反映について、自然の亀裂の状態との比較（特に亀裂充填鉱物の影響や整合性について）は今後重要になると思いますので、その辺のロジックを整理しておく、より地層処分とのリンクが明瞭になると考えます。 ・ 2024 年度実施予定だった注水試験および弾性波の時空間変化のモニタリングができていないようですので、少し計画よりも遅れているように感じました。 ・ 京大別府キャンパス以外の現場で地震波測定・分析は実施されないのでしょうか。 ・ 当該年度の研究計画にしたがって、着実に実施されていることを確認しました。 ・ 計算機のトラブルはあったようだが、概ね計画にそった進捗となっている。 ・ 毛細管での浸透と注水では、得られる情報も異なるので、できれば、後者も検討して頂きたい。	

2024 年度第 2 回評価委員会 評価結果（その 4）

研究テーマ	地下環境の透水性イメージング・モニタリングに資する岩石物理モデルの構築 澤山 和貴（京都大学）
2024 年度の研究成果に対する評価／ 当該研究に関する次年度の実施に向けたご意見等（自由意見）	
- 多くの困難を乗り越えながら研究を着実に進められていると存じます。地球物理的観測値（比抵抗・地震波速度）を利用して、地下構造・そして地下の浸透率が推定できないかという挑戦的な試みで、地層処分においても有用な研究と存じます。以下について参考になればとコメントをさせていただきます。 - 比抵抗と浸透率との関係は二つの直線ではなく、一つの曲線で表すことはできるようにも見えます。直線で表す既往の概念、理論背景を踏まえつつも、見直しや考察を進めていただければと存じます。 - 前回も指摘をさせていただきましたが、マクロの解釈（フィールド（地熱貯留層）は複数の亀裂により構成されていることを想定した解釈）とラボスケールの単一亀裂の結果とをどう繋いでいくのか、さらには、センサーの配置を含め、本手法を実際にどのように使っていくかをも報告書では言及されるといいかと思います。 - 研究のポイントは、よく理解しています。頑張ってください。 - 母岩の主要成分物質（固相）の電気伝導率の違いの影響はないでしょうか。これからのデータ整理で、念頭においておくのもよいでしょう。 - 浸透率－各弾性波速度－電気比抵抗－骨格構造を、物理的にしっかり説明・解釈することを、ぜひ、努力し続けてください。是非、測定値の傾向とメカニズムを説明する際、模式図を描いて説明してみてください。 - 実際の広域な物理探査の結果に、この成果を活用すると思うのですが、その場合、どのように活用できる可能性があるのか、手順も提案してください。 - 目的として、目に見えない地下水の流れをどう推定するか、という目的については重要なポイント妥当は思います。一方で、今回の実験からどのようにそれをフィールドにどう展開するのか部分をもう少し明確に示す方が、現状としてどこまで目的に対して課題やデータが揃いつつあり、次年度以降の課題としてどう展開するのかが判断しやすいかと思いましたので、検討いただければと思います。あと精度についてで、最終的なモデルの表現がどの程度のスケールまで表現できると考えているのかが気になりました。要は地下の構造は断層や亀裂など様々な構造は不均一に分布していますが、どの構造の何をターゲットにしているのかが今ひとつ見えないので、そこを明確にすることは重要かと思った次第です。そのスケールによって、処分でのこういった部分に貢献できるのかが見えやすくなるので、その辺も示されるといいかと思います。もう1つですが、実際の亀裂は充填鉱物が介在しているので、それらの影響も今後検討していただければ、と思います。 - 実験については予定より遅れているようであるが、それ以外はおおむね計画通り進んでいると思います。 - 岩石の鉱物組成が時系列で変化した場合、比抵抗や弾性波速度が変化すると思いますが、亀裂開口幅（浸透率）の変化のみを抽出することは可能でしょうか？ - 実際の地層処分施設にはどのように（どのくらいの空間分布）センサを設置す	

べきでしょうか？

- 当該年度の研究計画にしたがって、着実に実施されていることを確認しました。
- 実験室で把握した現象の関係を、そのままフィールドに適用してよいかについては更なる検討が必要であるように思いました。とはいえ、良い方法は見つからないので、実験室とフィールドを行ったり来たりといった繰り返しの中で、模索していくしかないのかもしれません。
- 実験上の問題はあるが、シミュレーションを先行するなど工夫がみられる。
- 今後サイトの絞り込みの段階で、ボーリング調査が限られる中、重要な研究といえる。ぜひ、フィールドスケールに適応できるように、研究を続けてほしい。

2024 年度第 2 回評価委員会 評価結果（その 5）

研究テーマ	放射性核種の超長期安定固化に向けた次世代型シンロック固化技術の開発 牧 涼介（岡山理科大学）
2024 年度の研究成果に対する評価／ 当該研究に関する次年度の実施に向けたご意見等（自由意見）	
・ 着実に成果が得られつつあると存じます。以下について参考のためにコメントをさせていただきます。 ・ SPRT 法の段階では、揮発性核種の固定化は可能となりますが、後段の SPS の段階では 1200℃の加熱の工程があり、揮発性元素の固定化は維持されるのかという疑問がございます。SPS も 600℃での保持でできればよりいいかと思えます。 ・ 最初に述べられている「多様な放射性核種」については、地層処分の分野ではアニオン形態を取る核種をも指すようにも思います。ご発表では難しいとのことでしたが、固溶ではなくとも、浸出特性としては締め固めの方法によって、メリットもあるかと存じますがいかがでしょうか？ ・ SPS・・・興味深い。 ・ きっと、製作方法がとても重要と思うので、正確に読者が理解し、模倣できるようにプレゼン資料や報告書を作成してください。 ・ 微妙に温度などが異なっているのですが、その設定の違いのこだわりは、何かあるのでしょうか？ ・ 背景・目的の部分で、ナチュラルアナログ研究をベースとした、とあるが、ここでいうナチュラルアナログ研究とは何を指しているのか、また、それをどうベースとしているのかをもう少し具体的に示す方がいいと思います。シンロックについては、実際の規模での施工性などを検討した場合のネックなども併せて提示できるといいのではないかと考える。 ・ 研究はおおむね計画通り進んでいると思います。 ・ 放電プラズマを用いるので、大型化するためにはコストがかさむと思います。実用化に向けてどの段階にあるのかについても記載していただきたいです。 ・ 当該年度の研究計画にしたがって、着実に実施されていることを確認しました。 ・ An 含有シンロックの合成もできており、順調。 ・ シンロックの場合、常に問わせるのは、工学規模での製造ラインの成立性やコスト。ぜひ、そのような検討もして頂きたい。 ・ SPRT 法製造時の Cs の揮発による減少を検討して頂きたい。	

2024 年度第 2 回評価委員会 評価結果（その 6）

研究テーマ	分散型台帳技術と機械学習を用いた先進的地層処分場設計スキームの構築 岡村 知拓（東京科学大学）
2024 年度の研究成果に対する評価／ 当該研究に関する次年度の実施に向けたご意見等（自由意見）	
・ 諸量評価の V&V (Verification & Validation) を含め、順調に成果がでていと存じます。今後の発展を期待しております。下記については、ご参考までに記載させていただきます。 ・ ご発表でもお話があったように、論文として成果を出していくことも重要ですので、是非とも論文として成果公表をお願いいたします。 ・ 伝熱解析を効率化（計算時間の短縮化）するために、インベントリを考慮したより簡便なモデルにより初期値を決める、あるいはその前に計算した結果を初期値として、インベントリをずらしピークを算出するなどもあろうかと存じます。その中で時間変遷を得たい場合をいくつか抽出して、詳細計算をすることも考えられるかと思います。 ・ 専門ではないので、的外れかもしれませんが、これから小型 SMR や次世代型原子炉の稼働が入ってきたとき、発生する廃棄物の性状や発生量も予測できるのでしょうか？ ・ 伝熱解析では、PEM や横置きなども考えていく必要はないのでしょうか。最近の動向などもサーチして、研究の展開を考えてみてください。 ・ アウトカムについてですが、将来的にこのモデルによって得られた結果を、地下処分場の施設設計などに反映することが可能でしょうか。例えばですが、岩盤の種類によっても地下水の流動量、フラックスも異なると思いますが、そのような地質環境のバリエーションにどの程度の感度で、どの程度適用性が示されるかなど（分野が異なるので、的外れの質問かも知ですが）が見えてくると、廃棄体の影響と地質環境の持つ不確実性の相関についても何か具体的なイメージが示せないかなと思った次第です。 ・ 研究はおおむね計画通り進んでいると思います。 ・ 大規模伝熱解析のスキームですが、高速化させる手法の見込みはどうか？スパコンを使用して想定するぐらいの高速化は可能でしょうか？結構大変そうだと思います。 ・ 当該年度の研究計画にしたがって、着実に実施されていることを確認しました。 ・ 伝熱計算については、抜本的な対応が必要（計算機の性能をあげるのではなく）だと思いますが、目的に向けて進められていると思います。 ・ 返還ガラスを入れてもいいかなと思います。	

2024 年度第 2 回評価委員会 評価結果（その 7）

研究テーマ	広域応力場を考慮した流体供給源周辺の応力場のモデル化 安邊 啓明（日本原子力研究開発機構）
2024 年度の研究成果に対する評価／ 当該研究に関する次年度の実施に向けたご意見等（自由意見）	
・ 良い成果が確実に得られていると思います。以下の点についてご参考になればと思い、記載させていただきます。 ・ 田辺層群の応力状態分布で、北部では南北方向が卓越している一方、南部ではばらつきが大きいことから南部における水の供給が解釈できるということです。これは、地形など別の情報による確認は可能でしょうか？また、そのような確認の必要性についてのご見解はいかがでしょうか？ ・ 流体供給源の位置について、地層処分に活用するためにはより精度を高める必要かと存じます。この精度と必要となるデータ量との関係についても最終的な報告書において記載して頂ければ幸いです。 ・ だんだん、研究のポイントがわかってきたように思います。 ・ 科学的特性マップへの貢献などに言及がありましたが、より明確に、どのように貢献するのかを、わかりやすく説明いただきたい。 ・ 何度か成果の妥当性・信頼性の確認を意見させていただきましたが、結果として、それができる事例の箇所を発見できたのでしょうか？ ・ 検証したサイトは結構、3 次元的な変化の大きい場所のように思ったのですが、2 次元的な解析でも、そこそこあったというのは興味深い。これは、うまく変数を設定した結果ではないのか？ ・ コメントでも述べましたが、科学的特性マップでの半径 15 キロの中身を議論することは、今後地層処分の観点では結構難しいと思いますが、一方で、その隣接する外側のもし岩脈があった場合の評価をどうするか、というのは次のステップで問われる可能性があるので、そのための手法として準備するというロジックはそれなりに納得されるのではないかと思いますので、その辺の検討もされたらどうかと思います。 ・ 研究はおおむね計画通り進んでいると思います。 ・ 当該年度の研究計画にしたがって、着実に実施されていることを確認しました。 ・ 概ね計画どおりの成果が得られていると思います。 ・ 事例を重ねることで、どの程度の精度向上が見込めるのか、示して頂けるのかなと思います。	

2.3 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まとめ

2023 年度下期～2026 年度上期の 3 ヶ年の期間の予定で実施している地層処分に関する萌芽的・先進的かつ重要な 7 件の研究開発テーマについて、2024 年度において進捗管理・取りまとめや所定の研究開発資金の配賦を実施した。具体的には、大学等の有識者で構成される評価委員会を設置し、2024 年度の研究開発内容・進捗状況に関するチェックアンドレビューを 10 月と翌年 3 月に 2 回、オンライン会議形式にて実施した。また、研究実施者との間で電子メールや訪問打合せによる意見交換等を行うことによる進捗管理も実施した。

7 件の研究は 2024 年度末で当初予定している 3 年の実施期間の前半を終了したことになり各研究が本格的な展開をしつつある中、研究期間の後半でそれぞれの研究が着実に成果を上げるためには、事務局において各研究者とのコミュニケーションをより一層密にし、委員会での意見等が研究に反映されるように事務局でもフォローして研究者を支援していくことなどが今後の課題となると考えられる。

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」）[1]として、平成 30 年 3 月に取りまとめられた。この全体計画では、主要な 3 つの技術分野に関する 5 ヶ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。なお、令和 5 年 3 月に策定された令和 5 年度からを対象とする「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）」[2]においても「分野間で緊密に連携を図りつつ、研究開発成果の移転・継承や人材育成等にも配慮しながら研究開発に取り組むことが重要である」とされ、引き続き人材育成の重要性が示されている。

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、「平成 31 年度事業」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。この平成 31 年度事業は、2019～2022 年の 4 ヶ年で、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た。

2019年度は、2019年度人材育成セミナーとして、約60名の参加者（モニター）を集め、平成30年度に行ったセミナーと同様に3日間の日程で地層処分の主要3分野を含む19の講義を行った。また、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、人材育成プログラムの開発の一環として、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。4年間の最終年度にあたる2022年度には、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、他の教材の利用可能性なども考慮に入れ、2種の教材のうち、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とした「地層処分のリテラシー育成教材の作成」の作成に重点を置くこととし作業を進め、全体で11章からなる教材を試作した。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。

2023年度は新たに単年度の事業としての実施となった。人材育成セミナーについては、2019～2022年度まで実施してきたグループワーク・グループディスカッションを含むセミナーが地層処分の専門家育成に効果のあるプログラムであり、継続して取り組む必要があると考え、また、資源エネルギー庁委託の地層処分に関する基盤研究開発に関する報告会とジョイントし、地層処分研究開発の全体像を把握したうえで、10年後の地層処分研究開発と自身の関わりを議論するセミナーを開催した。

また、2023年度までに試作版を作成した「地層処分に係る知識」を身に着けるための教材である「地層処分に関するリテラシー育成教材」に関しては、内容等の精査に基づき改訂し完成版を作成した。さらに2023年度には、上記の「地層処分に関するリテラシー育成教材」に基づき、繰り返し学習可能なオンライン教材の検討及び試作を行った。

今年度(2024年度)は、以下を実施した。

- ① 人材育成セミナーの実施
- ② オンライン学習教材の検討

本章では、今年度の人材育成プログラムの実施・作成に関する実施内容、及び成果・まとめを示す。

3.1.2 実施体制

人材育成プログラムの作成を実現するために、これまでセミナーを開催し、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った。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る講師による講義・実習を行うことが必要であり、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いる。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、若手の研究者・技術者に対して、幅広い地層処分技術の視野を広げることにより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った。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った。この点については、2024 年度に関しても同様であり、今年度に関してもこれまでの本事業の実施体制を踏襲した。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、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）で構成される「地層処分スキルアップ研究会」を設置した。この地層処分スキルアップ研究会は、セミナーへの講師・参加者（モニター）の派遣に関する協力のほか、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提供する役割を有している。

地層処分スキルアップ研究会の構成機関を以下に示す。

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3度開催した。

表 3.1-2 2024 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	2024 年 6 月 14 日（金） （対面開催）	2024 年度の本事業における人材育成プログラムの実施・作成に関する実施計画の共有・意見交換、昨年度までの本事業での人材育成の実施内容の共有などを実施
第2回	2024 年 7 月 11 日（木） （オンライン開催）	第1回研究会に引き続き、人材育成セミナーの考え方や今年度の実施内容、各機関からの講師派遣について説明や講師推薦依頼等を実施。
第3回	2024 年 10 月 11 日（金） （オンライン開催）	2024 年度の人材育成セミナーの実施内容の共有・意見交換、受講者派遣の依頼等を実施

また、繰り返し学習可能なオンライン教材（E ラーニング教材）の検討では、動画教材の作成のためには、撮影のための機材、スタジオ、編集機器など専門的な機材や知識が必須であるため、E ラーニング作成会社に外注し実施した。

3.1.3 本事業における人材育成セミナーの位置づけ

2023 年度までに検討してきた人材育成プログラムの対象について、以下に再整理する。
地層処分分野におけるキャリアパスを図 3.1-1 のように整理した。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）では、若手研究者は地質環境、工学技術、安全評価などのいずれかの特定分野で研究開発等を行ってきた、あるいはこれから始める人であることが想定される。事業実施主体の場合は、地層処分全般についての知識・技術を有するジェネラリストとして成長することが考えられる。そのような人物は業務経験を通じてジェネラリストとしてのキャリアをアップさせることが考えられる（その他、実施主体では広報関係で一般公衆とコミュニケーションする人材も必要となる）。研究機関や企業などでは入社した若手社員は各自が特定分野のスペシャリストとして専門性を深めていくと考えられる。また、研究機関や企業から実施主体に異動してジェネラリストとなることも考えられる。このようにそれぞれの組織で若手研究者・技術者がキャリアを積むことが考えられるが、将来、それぞれの立場で幅広い専門分野を俯瞰して、連携して協働できるようになることが地層処分事業においても重要となってくると考えられる。

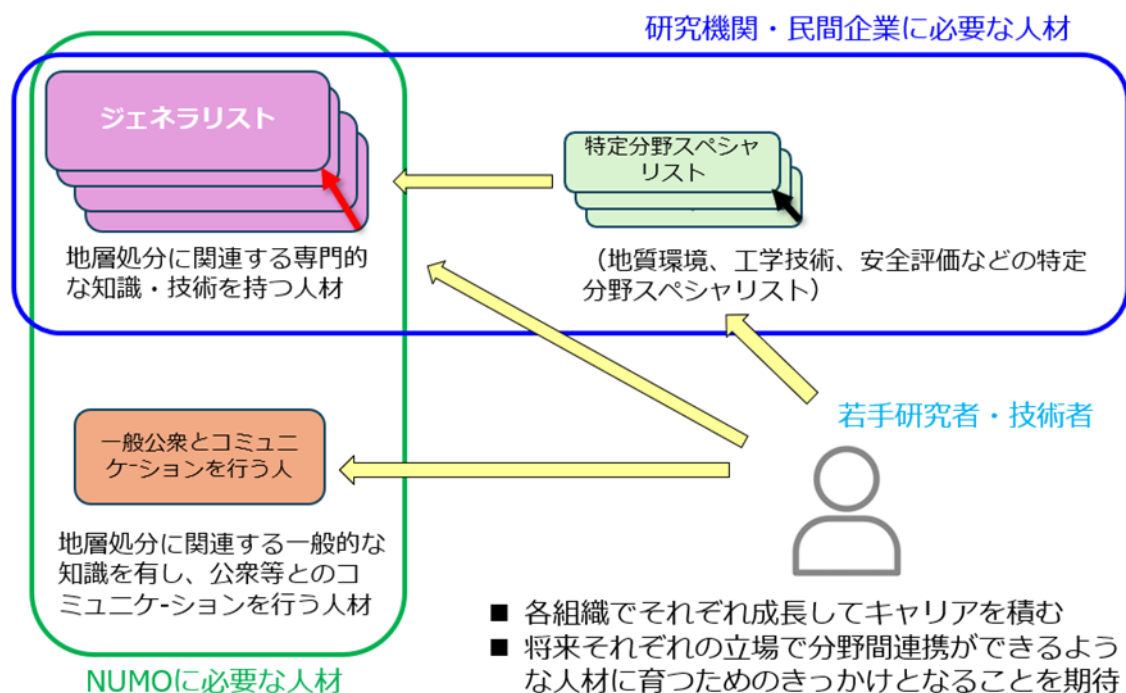


図 3.1-1 地層処分事業におけるキャリアパスの整理

また、図 3.1-2 は地層処分のジェネラリストとして必要な能力を整理したものである。ここでは地層処分のジェネラリストとしては地層処分に係る知識を有している必要があること、また地層処分技術全体を俯瞰し、他分野の専門家とも協働できること、さらに地層処分事業等について進めるための組織の統率、関係者との交渉・調整能力、公衆とのリスクコミュニケーションをとれるような地層処分に関するマネジメント能力を有することが

必要であると定義した（ただし、地層処分実施主体、関係研究開発機関、メーカーなどの各組織において求められるジェネラリストには必要な要素において相違がある可能性があることについても留意されたい）。

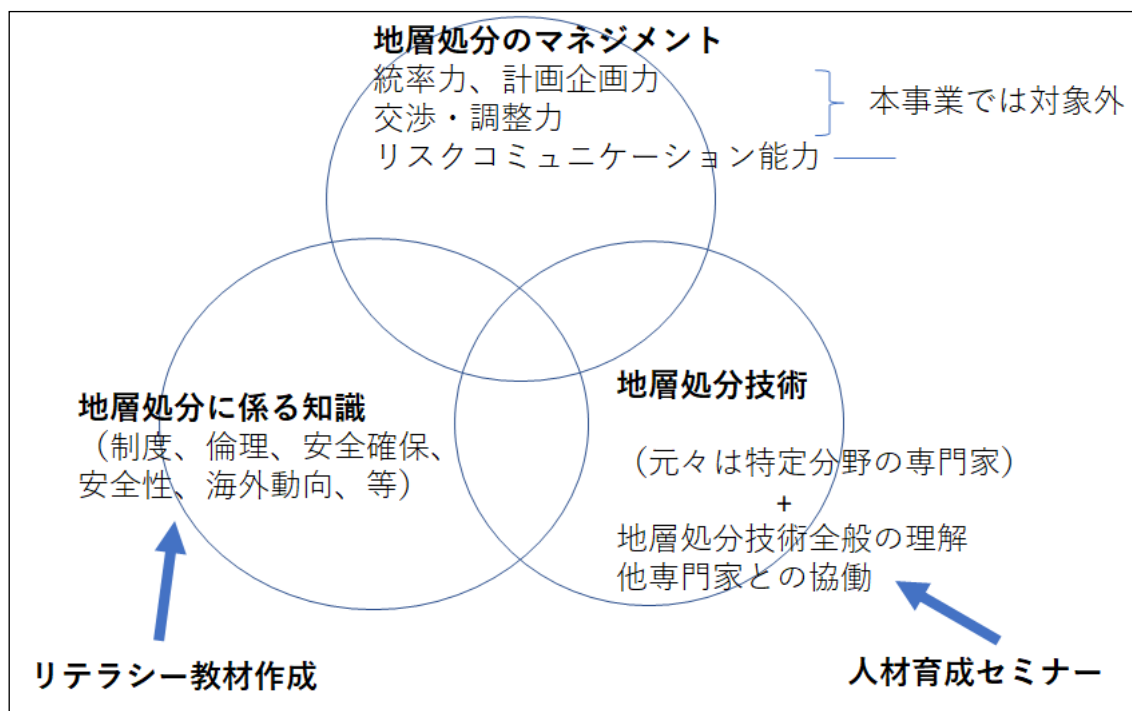


図 3.1-2 地層処分のジェネラリストとして必要な能力

本事業では、「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：「地層処分技術」に関して、地層処分技術全体を俯瞰できる、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）
- 実施内容 2：「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

2024 年度に関しては、上記の実施内容 1 に関連し、地層処分技術の視野を広げ、他分野

の専門家と協働する重要性について気づきを得るための人材育成セミナーを開催した。また、2023年度に作成した「地層処分に係る知識」を身に着けるための教材である、繰り返し学習可能なオンライン教材の試作版に基づき、オンライン学習教材の更新を行った。

以下に、これら2つの実施内容について、今年度実施事項及び成果等を整理する。

3.2 実施方針

3.2.1 これまでのセミナー開催実績のまとめ

2019年度～2023年度に実施した人材育成セミナーの概要について表3.2-1に示す。

表 3.2-1 2019年度～2023年度に実施した人材育成セミナーの概要

	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度
テーマ	地層処分全般	地下水 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	地下研究施設 地下研から学ぶ！～データの準備・解釈・伝え方	安全評価 ソーススタームで学ぶ！～地質・設計・安全評価～	「地層処分研究開発を知る！～10年後のあなたをイメージする～」
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。	テーマを「地下水」に絞り、講義や現場見学、実習を通じて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(※)	【アクティブラーニング形式にて実施】 テーマを「地下研究施設」とし、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などを学習し、ジェネリックな地下研究所の役割を理解する。(※)	【アクティブラーニング形式にて実施】 テーマを「安全評価」とし、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た場合の処分場の設計や地質環境との関わりを多面的に考える。(※)	エネ庁委託事業の成果報告会とのジョイントセッション。過去、現在の研究開発課題などを整理し、10年後の研究開発課題と自分自身の関わりを議論

(※) アクティブラーニング形式にて実施

最初の 2019 年度、および資源エネルギー庁事業報告会とのジョイントセッションの形式となった 2023 年度のセミナーを除いた 2020～2022 年度の人材育成セミナーでは、地質環境・工学技術・安全評価のテーマを題材として取り上げて、知識の習得だけでなく、グループワークを通じて、地層処分技術全体を俯瞰すること、異分野の専門家との協働の重要性に関する気づきを与えることを目的としたセミナーを実施してきた。今年度の人材育成セミナーを検討するにあたり、2020～2022 年度のセミナー受講者のアンケート結果を再整理した。以下に主な意見を示す。

表 3.2-2 2020～2022 年度の人材育成セミナーアンケートにおける意見（抜粋）

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ・ セミナーを通じて、専門分野がばらついているメンバーで集まって一つのトピックについて議論することで、新たな知識の獲得や意思疎通の技術向上が見込めると感じた。 ・ 地層処分事業における水門地質学の立ち位置などをメンバーで共有できていればより良いプログラムになっていたと思う。 ・ 専門や地層処分事業に携わってきた年数も全く異なる人たちが協力するのであれば、ディスカッションのテーマは、浅く広い方が良いのではと感じた。 ・ 「地下水」は多くの人にとって身近な存在なので、問題意識を共有しやすかった。 ・ SDM（地質環境モデル）に主軸を置けば、地質構造や水理・力学パラメータの設定を加えて応用することも可能ではないか。さらに進めて将来の変遷を考慮した 4D-SDM 構築の考え方とか。 ・ 各トピックの資料や解説はわかりやすかったが、数多くの内容を取り扱う上で話が発散している気がした。概要紹介の後、一つの内容に着目して詳細に解説を行ってもらえると異分野同士でも理解しやすいのかと思う。（※2021 年度のアンケート意見） ・ 講座内容は大変勉強になるものであったが、2 日目の幌延の視察と安全評価の結び付けの説明がほしい（※原環センター補足：幌延は多くの研究者に体験して欲しいというニーズがあった） ・ 現場見学、机上でのグループワークと幅広く情報を得る機会がありとても有意義でした。せっかく対面で集まっているので、座学の時間よりも参加者同士でグループワークを行う時間を増やした方が、普段聞けないことも聞けてな一層よくなると思いました。 ・ 以前参加した時よりも、時間的にコンパクトに凝縮されているように感じてよかった。（※2022 年度のアンケート意見） ・ イントロとして、地層処分全体の講義が欲しい。 |
|--|

上記の意見から、2020～2022 年度に実施した人材育成セミナーについては以下のよう
にまとめられる。

- 1 つのテーマに着目したグループワーク・ディスカッションを他の分野の専門家と実施することで、処分技術に対する理解や処分技術全体を俯瞰する重要性を意識づける

ことができおり、これまでのセミナープログラムは概ね目的に沿ったものであった。

- グループワーク・グループディスカッションは他の分野の人でも議論に参加しやすくする工夫が必要と考えられる（e.g. 講義で基礎知識を提供、ファシリテーターとしてテーマに精通した専門家が参加）。
- 1つのテーマを中心として、講義、演習、見学、グループワーク・ディスカッションのそれぞれで関連性を持たせ、セミナー全体としてプログラムを考えることがより効果的と考えられる。
- 地層処分事業との関連性の理解向上のため、地層処分そのものに関する情報を提供することも有効と考えられる。
- 1日のスケジュールが長時間となるセミナー構成の場合は、詰め込み過ぎて受講者が消化不良となる可能性があることから、十分に時間を確保するセッション（グループワーク等）と、必要に応じてコンパクトにして効率的に実施するセッションなどの工夫をすることが有効と考えられる。

したがって、これまでのセミナーは処分技術全体を俯瞰する重要性を受講者に意識づけるという点で効果があったと考えられるが、表 3.2-2 に示した意見等をセミナープログラムに導入することで、より効果的なプログラムとすることができると考えられる。

3.2.2 2024 年度のセミナーの開催方針

2024 年度の本事業の仕様書では、人材育成セミナーの開催に関して、次のように記されている。

ア．人材育成セミナーの開催

- 地層処分研究開発の俯瞰的な理解を深めるためのセミナーを年間 3～4 日程度実施する（受講者数としては、20～40 名を想定）。令和 4 年度までに実施してきた講義、演習、見学、グループワークを組み合わせた形式を基本とし、資源エネルギー庁と相談・調整の上、受講者の理解を深めるための形式や内容を検討する。
- セミナーの参加者を募集するとともに、3.①に示す研究テーマ実施者（※）等も含めることを検討する。（※2 章に示す萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の実施者）
- セミナーの開催形式は、対面での実施を基本とする。

仕様書の内容及び前節での検討の結果、2024 年度の人材育成セミナーに関しては、以下の実施方針として実施することとした。

- これまでと同様に、一つのテーマを取り上げて、アクティブラーニング、特にグループワーク・グループディスカッションなどを通して、処分技術全体を俯瞰する重要性への気づきを得ることを目的とする
- グループワーク・グループディスカッションは他の分野の人でも議論に参加しやすくなるように設計
- 地層処分技術の最もベースとなる安全確保・セーフティケース等の概要について座学・グループワーク等をセミナーの最初に設ける（1～2 時間程度）
⇒その後一つのテーマに基づいた座学・グループワーク等のセミナーを実施するが、セーフティケースなどの処分技術全体を俯瞰することにつながっていることへの気づきを得られるような内容とする（そのテーマで閉じるようにはしない）
- セミナーのスケジュールを詰め込み過ぎないようにする

また、原子力発電環境整備機構（NUMO）が 2024 年度において、NUMO 講演会「地層処分事業の推進と安全コミュニケーションにおける世代を超えた挑戦」（2024 年 11 月 22 日（金）開催）とする、地層処分に関する技術的な知識やステークホルダーとのコミュニケーション方法をどのように継承するかをテーマとした、海外の研究者等によるオンライン講演とパネルディスカッションを内容とする講演会を企画していたことから、海外の研究者との協働の重要性にも気づきを得ることも目的の一つとして追加し、そのため上記講演会を人材育成セミナーのプログラムの一部とすることにした。

以上のことから 2024 年度の人材育成セミナーのねらいについて、以下とすることとした。

2024 年度人材育成セミナーのねらい

今後の地層処分分野を担う若手の研究者・技術者が、地層処分技術開発におけるその後のキャリアに役立つと考えられるように、技術継承などの世代間の課題、海外の技術開発の経験、異分野の専門家との協働の重要性などを早い段階から経験・理解することにより、地層処分に関する視野を広げることを目標とする。

また、セミナーの日程については、NUMO 講演会については日時が決まっており別日に動かすことができなかったことから、2024 年 11 月 22 日を含めた 2～3 日間の日程でセミナーを開催することとした。

今年度のセミナーの受講者（モニター）に関しては、地層処分研究のキャリア初期から地層処分研究開発の全体像や自身の研究開発結果等の反映先を意識してもらうことができるよう、地層処分事業への従事年数の比較的短い若手の技術者・研究者を対象とすることとした。具体的には、従事年数 2～3 年程度を対象と設定した。

3.2.3 人材育成セミナーの内容の検討

(1) 人材育成セミナー全体の構成

前節までの人材育成セミナーの開催方針に基づき、2024 年度の人材育成セミナーは一つの題材を基にしたグループワークを実施すること、地層処分技術の最もベースとなる安全確保・セーフティケース等の概要について座学・グループワーク等をセミナーの最初に設けること、NUMO 講演会を含めることとした。題材としては地質環境分野のうち、「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件」を取り上げてグループワークを実施、またグループワーク前に「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件」に関する基礎的な知識の提供の位置づけとなる座学を実施することとした。また、地層処分技術の最もベースとなる安全確保・セーフティケース等の概要について、2023 年度に作成したオンライン教材用動画を活用することとし、またそのテーマに係るグループディスカッションを行うこととした。

2024 年度 人材育成セミナーの実施内容の概要

- グループワークのための基礎的な知識の提供
 - A 地層処分の基本的事項：何故地層処分なのか、どのように安全性を示すか
 - B 地質学の基礎、地質環境と安全確保との関係
- グループワーク
 - －地質環境に係る要件等を題材としたグループワーク
 - －各要件に係る座学
- NUMO 講演会
 - －世代間の知識移転、専門家と公衆のコミュニケーションなどの、地層処分事業の持続可能なアプローチに関して、海外の経験等を踏まえた若い世代へのメッセージ

また、開催日程は、2024 年 11 月 22 日（金）、25 日（月）、26 日（火）の 3 日間で『地層処分技術の視野を広げよう!』～国際協力と分野間連携～』と題し、東京都内の貸会議室を使って開催することとした。なお、11 月 22 日の NUMO 講演会がオンライン会議のみの開催であることや、諸事情により 3 日間のセミナー日程で土曜日と日曜日を挟むこととな

ったため、11月22日（金）のみはオンライン形式とし、25日、26日のみ東京都内での対面で開催することとした。

（2）各実施内容の検討

a. NUMO 講演会

11月22日（金）午後に実施するNUMO講演会は、諸外国の専門家から、大学生を中心とする若い世代に地層処分事業に興味を持ってもらうための取り組み、世代を超えた知識の共有と人材育成を進めるための仕組みづくり、さらに地層処分事業における情報公開と対話活動の重要性などについて、紹介される内容となっていた。

そのため同日午前中に日本と海外の最新の地層処分動向の講義を加え、諸外国も住民等の理解を得るための努力をしつつ、数十年の時間をかけて事業を進めていることや、我が国の処分事業も今後まだ長い道のりであることを理解できるようにした。その上でNUMO講演会を聴講¹することにより、諸外国との協力の重要性や次世代への技術・知見の継承の重要性を受講者が理解できるようにすることを目標とした。

講演会はオンライン形式であったため、受講者が受動的な態度での学習となってしまう可能性があったことから、上記の目標に資するために講演会を聴講した上で、以下をテーマとして翌週の11月25日（月）にディスカッションを実施することとし、グループディスカッションのために各自考えをまとめるように課した。

- 「地層処分事業の持続可能性について何が重要か」
- 「地層処分を進めるために、将来自分ができることは何か」

そして、25日に上記テーマに基づきグループディスカッションを行い、各グループでまとめた意見を発表し、それに対してNUMOから講評する流れとした。

b. グループワークのための基礎的な知識の提供

前述したように、今年度の人材育成セミナーでは「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件」を題材としたグループワークを実施することとしたが、その前にグループワークの

¹ NUMO 講演会の詳細については以下を参照されたい。
<https://www.numo.or.jp/technology/techpublicity/lecture/241122.html>

ための基礎的な知識の提供をすることとした。

まず、地層処分技術の最もベースとなる安全確保・セーフティケース等の概要について学習するために、なぜ地層処分なのか、どのように安全性を示すか、に関する座学を実施することとした。具体的には2023年度に作成したオンライン動画教材の試作版を用いて、以下の2つの座学について視聴し、それぞれに対してグループディスカッションを行うこととした。

- 座学（動画）：放射性廃棄物対策：地層処分選択の背景
(グループディスカッション:長期貯蔵の主張に対してどうやって説明するか)
- 座学（動画）：放射性廃棄物対策：地層処分の安全確保とセーフティケース
(グループディスカッション:地層処分の安全性をどう伝えるか)

次に、「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件」のグループワークに入る前に、地質学になじみの少ない受講者が参加することも想定されるため、地質学の基礎及び地質環境が安全確保に及ぼす役割についての座学をそれぞれ設けることとした。

- 座学「地質学の基礎」
- 座学「地質環境が安全確保に果たす役割」

c. グループワーク

「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件」を題材とし、グループワークを検討した。人材育成セミナーの3日程度のスケジュールを踏まえて、閉鎖後長期の地質環境に求められる要件として、隆起・侵食、熱環境、水理場、力学場、化学場の5つの要件に絞り、地震活動や鉱物資源等の要件については割愛することとした。

グループワークを行う前に各要件についての基礎的な知識を提供するための座学を設け、座学の後にグループワークを実施することとした（図 3.2-1）。ただし、5つの要件それぞれを交互に行うには時間的な制約もあるため、2～3の要件について座学を実施し、その後グループワークを行うこととした。

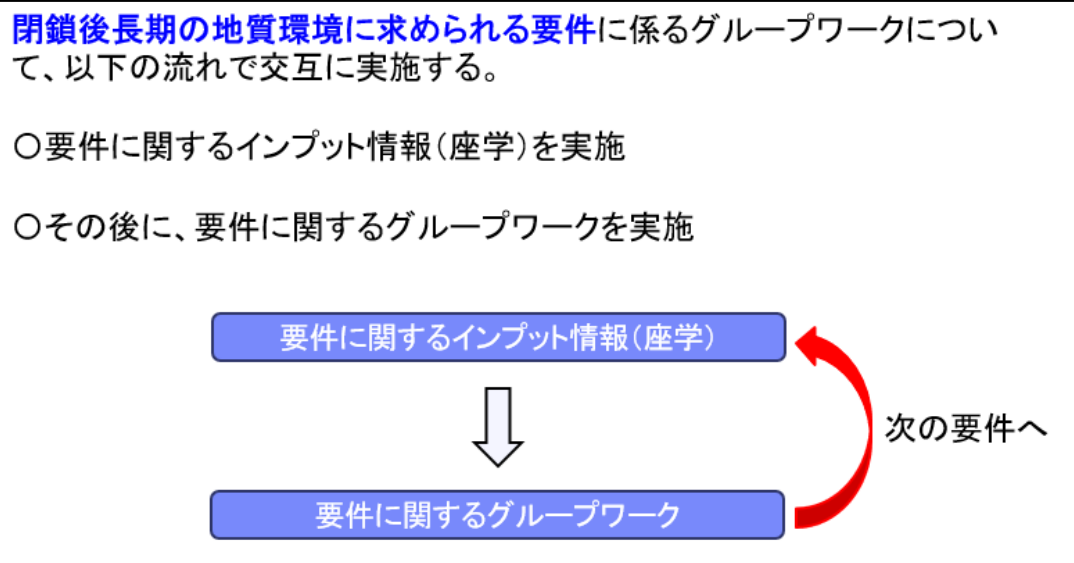


図 3.2-1 グループワークの進め方

各要件、及び前述の地質学の基礎及び地質環境が安全確保に及ぼす役割についての座学では地層処分スキルアップ研究会を通じて、各研究開発機関から講師を派遣してもらうとともに（表 3.2-3）、後述するグループワークの設計についても座学講師から助言いただくこととし、座学とグループワークに係る打ち合わせを以下のように 3 回実施した（表 3.2-4）。

表 3.2-3 座学講義と講師（所属）

座学講義	講師（所属）
地質学の基礎	AIST
地質環境が安全確保に果たす役割	NUMO
閉鎖後長期の地質環境に求められる要件（隆起・侵食）	JAEA
閉鎖後長期の地質環境に求められる要件（熱環境）	JAEA
閉鎖後長期の地質環境に求められる要件（水理場）	NUMO
閉鎖後長期の地質環境に求められる要件（力学場）	JAEA
閉鎖後長期の地質環境に求められる要件（化学場）	CRIEPI

AIST：産業技術総合研究所、NUMO：原子力発電環境整備機構、JAEA：原子力研究開発機構、
CRIEPI：電力中央研究所

表 3.2-4 座学とグループワークに関する打合せ

	日時	概要
第 1 回	2024 年 8 月 8 日（木） （オンライン開催）	2024 年度人材育成セミナーのグループワークに関して、事務局より座学担当の講師に対してセミナーの趣旨や内容について説明し、それに基づき意見交換を実施。
第 2 回	2024 年 9 月 19 日（木） （オンライン開催）	グループワークに関して、事務局よりグループワークの案、及び各講師の座学骨子資料について説明し、それらに基づき意見交換を実施。
第 3 回	2024 年 10 月 29 日（火） （オンライン開催）	2024 年度人材育成セミナーのグループワークに関して、事務局よりグループワークの案、及び各講師より座学資料について説明し、それらに基づき意見交換を実施。

グループワークについては、前述したように 2～3 の要件に係る座学を実施した後に、それぞれ 2 つあるいは 3 つの要件のみに係るワークを行うこととし、最後に 5 つの要件全てを含む総合学習とすることとした。具体的には、「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件」を題材として、サイトの比較、処分場の設置深度、処分場の設置場所について検討する内容とした。サイトの比較、処分場の設置深度、処分場の設置場所について検討するには、例えば閉じ込め、隔離、遅延、不確実性の低減など、地層処分 of 長期安全性を考える上で何に重きを置くか複数の評価軸があると考えられるが、その点についてもグループ内で議論して検討させることとした。このような議論を行うことで、地質環境、工学技術、安全評価のそれぞれの分野を専門としている若手研究者・技術者が、議論を通じて異なる見方・考え方に触れることにより、地層処分技術の視野を広げることに資するようにした。

要件については最初に隆起・侵食と熱環境について取り上げ、次に水理場、力学場、化学場を取り上げることとした。

隆起・侵食と熱環境の要件に関するグループワーク I として、図 3.2-2 のように深成岩類が広く分布する 2 つのサイトから、隆起・侵食と熱環境の要件の特性のみを 2 つのサイトそれぞれに対して与え、処分場の設置に適したサイトと深さを選択させ、また、選択した理由について整理させることとした。要件として隆起速度および地温勾配の特性値をそれぞれ与えた。隆起速度と地温勾配の特性値の設定においては、A のサイトでは隆起速度が 0.9mm/年、B のサイトは 0.3mm/年とし、B のサイトがより好ましい条件としているが、一方で地温勾配に関しては A のサイトでは 3℃/100m、B のサイトでは 5℃/100m とし、こ

の点では A のサイトがより好ましい条件とすることで、2 つの要件の特性値がトレードオフの関係になるようにした。これは前述のサイト比較を行う際の、地層処分の長期安全性を考える上で何に重きを置くか複数の評価軸を受講者に活発に議論させることを意図したことによる。

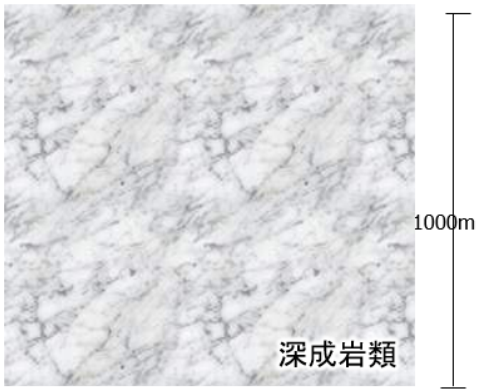
なお、特性値については座学の講師との打合せ等で意見を頂きながら、仮想的な地質環境ではあるもののあまりにも現実離れた値は用いないよう、各種報告書を参考にして事務局で検討し与えた。



グループワークI(問1)(熱環境、隆起侵食)

題目: 深成岩類が広く分布する2つのサイトから処分場の設置に適したサイトと深さを選べ。また、選択した理由を述べよ。 ・隆起速度と地温勾配の要件のみで考えること ・隆起した分だけ侵食されるものと仮定すること ・廃棄体の熱が最大で35℃加味されると仮定すること	理由:
--	-------------------

A

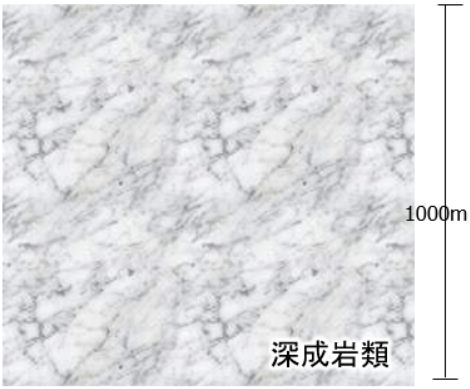


1000m

深成岩類

- ・隆起速度: 0.9mm/年
- ・地温勾配: 3℃/100m

B



1000m

深成岩類

- ・隆起速度: 0.3mm/年
- ・地温勾配: 5℃/100m

(地表温度は15℃)

図 3.2-2 グループワーク I の設定等

次に、水理場、力学場、化学場の要件に係るグループワーク II については、深成岩類と堆積岩類の 2 つの地質を対象としてそれぞれワークを設け（図 3.2-3、図 3.2-4）、それぞれ同じ岩種の 2 つのサイトに対して動水勾配、透水係数、一軸圧縮強度、地盤単位体積重量、pH の特性値を与え、深成岩類、または堆積岩類が広く分布する 2 つのサイトから処分場の設置に適したサイトと深さを選択させ、また、選択した理由を整理させた。各特性値の設定については、グループワーク I と同様に例えば水理場と化学場でトレードオフの関係になるようにした。

グループワークII(水理場、力学場、化学場)

題目: 深成岩類が広く分布する2つのサイトから処分場の設置に適したサイトと深さを選べ。また、選択した理由を述べよ。
(水理場、力学場、化学場の要件のみで考えること)

理由:



- ・動水勾配: 0.05
 - ・透水係数: 1×10^{-7} m/s
 - ・一軸圧縮強度: 100 MPa
 - ・地盤単位体積重量: 27 kN/m³
 - ・地下水のpH: 7
- (参考: 1MPa = 1000 kN/m²)



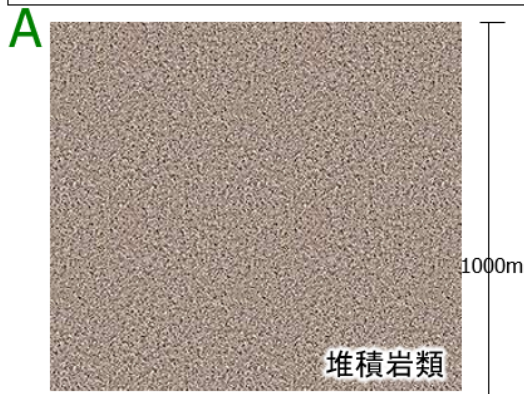
- ・動水勾配: 0.005
- ・透水係数: 1×10^{-8} m/s
- ・一軸圧縮強度: 150 MPa
- ・地盤単位体積重量: 27 kN/m³
- ・地下水のpH: 10

図 3.2-3 グループワーク II (深成岩類) の設定等

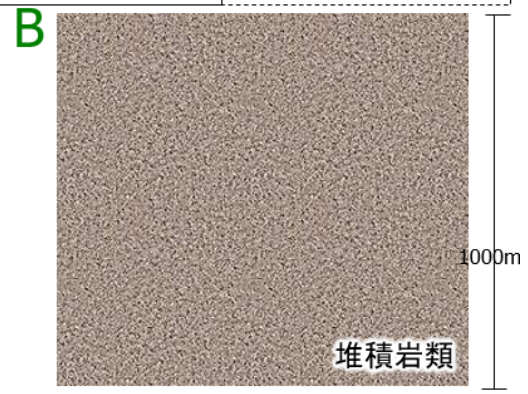
グループワークII(水理場、力学場、化学場)

題目: 堆積岩類が広く分布する2つのサイトから処分場の設置に適したサイトと深さを選べ。また、選択した理由を述べよ。
(水理場、力学場、化学場の要件のみで考えること)

理由:



- ・動水勾配: 0.03
 - ・透水係数: 1×10^{-8} m/s
 - ・一軸圧縮強度: 20 MPa
 - ・地盤単位体積重量: 20 kN/m³
 - ・地下水のpH: 5
- (参考: 1MPa = 1000 kN/m²)



- ・動水勾配: 0.003
- ・透水係数: 1×10^{-8} m/s
- ・一軸圧縮強度: 15 MPa
- ・地盤単位体積重量: 20 kN/m³
- ・地下水のpH: 7

図 3.2-4 グループワーク II (堆積岩類) の設定等

2 つのグループワークを実施した後に、総合学習として 5 つの要件全てを含めたグループワーク III を検討した。グループワーク III では、原子力発電環境整備機構（NUMO）の包括的技術報告書[3]における地質環境の概念モデル図（深成岩類（図 3.2-5）と新第三紀堆積岩類（図 3.2-6））を用いて、5 つの要件に関する特性の条件を与えて処分場を設置する深度、位置を決定し、地質環境、工学技術、安全評価の観点で選んだ理由を整理させることとした。

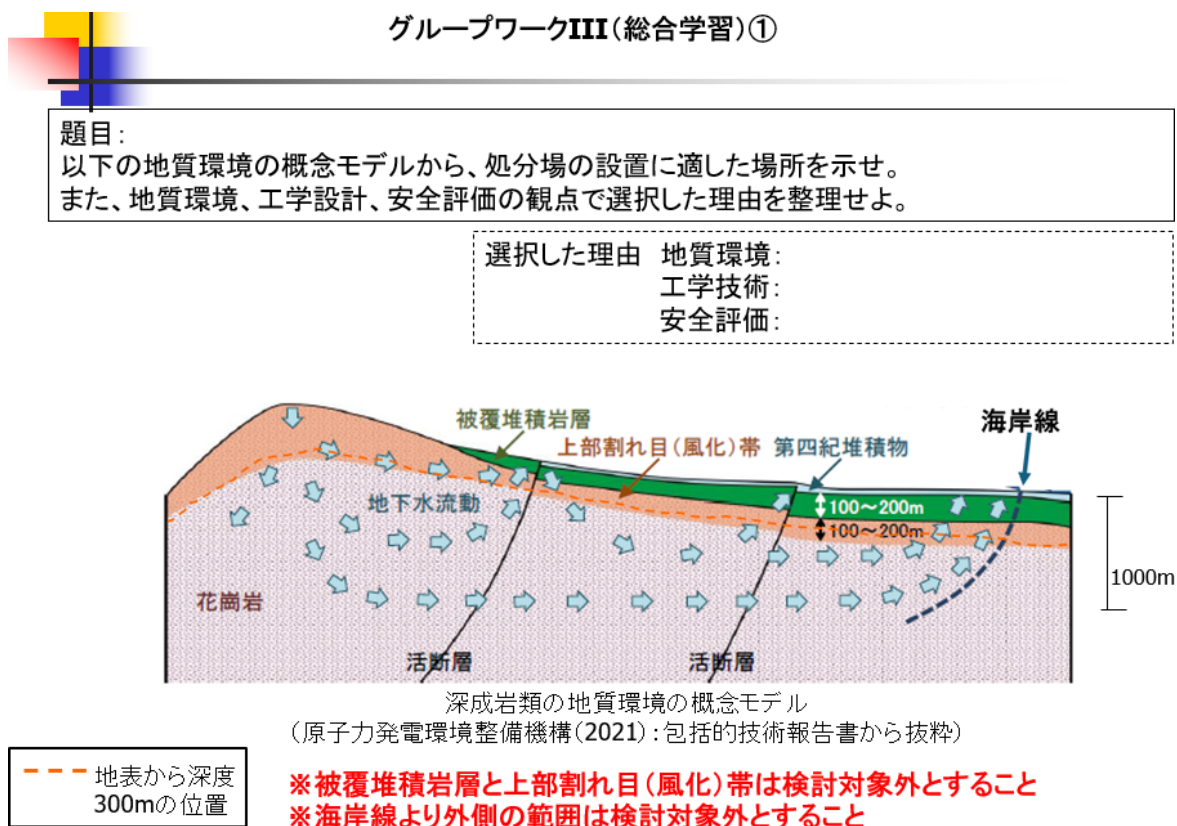


図 3.2-5 グループワーク III（深成岩類）の設定等

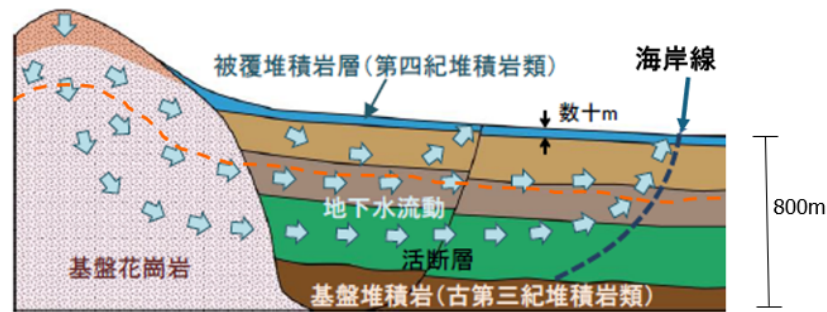


グループワークIII(総合学習)②

題目:

以下の地質環境の概念モデルから、処分場の設置に適した場所を示せ。
また、地質環境、工学設計、安全評価の観点で選択した理由を整理せよ。

選択した理由 地質環境:
工学技術:
安全評価:



--- 地表から深度
300mの位置

新第三紀堆積岩類の地質環境の概念モデル
(原子力発電環境整備機構(2021):包括的技術報告書から抜粋)

※基盤花崗岩は検討対象外とすること
※海岸線より外側は検討対象外とすること

図 3.2-6 グループワーク III (新第三紀堆積岩類) の設定等

グループワーク III ではさらに、選択した場所の安全性について、公衆に主張するためにはどのような取り組みが必要かを、グループディスカッションを行うこととし、地層処分における安全性をどのように主張するかというセーフティケースの一端を考えるように設計した。

グループワーク III③

選択した場所が安全であると公衆に主張するためにどのような取り組みをすればよいか述べて

d. 全体ふりかえり

3 日目のグループ討議終了後に「全体ふりかえり」を行う計画とした。この全体ふりかえりは、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効果がある。また、受講者に後日記入及び提出

を依頼するアンケートの回答をまとめることに役立つと考えている。

全体ふりかえりでは、図 3.2-7 に示したスライドを用いることで、各受講者がセミナーで気づいたことをまとめる支援となることを期待した。

・〇〇は、自分の仕事とすごく関係性があるなあ ・〇〇については、もっと知りたかったなあ	・やっぱりそういうことだったのか ・そういうこともあるのか ・〇〇は、知らなかったけど面白かった(興味を持った)	・〇〇については、自分のこれから役立ちそう/役立つかもしれない ・〇〇は、もっと詳しく知りたい	・これからも〇〇について、知りたい/関わりたい ・こんな〇〇をやりたい
	・〇〇は興味を持てなかった	・なぜ興味を持てなかったのか ・どうすれば興味がもてるのか	

図 3.2-7 全体ふりかえりで用いたスライド

e. その他

2 日目と 3 日目は対面によるセミナー開催としたため、2 日目の 11 月 25 日（月）の最初にグループ内自己紹介のセッションを設け、その後のグループディスカッション、グループワークでのコミュニケーションが円滑となるように設計した。また、3 日目に地層処分スキルアップ研究会委員から長年の経験に基づいた、我が国の原子力発電の歴史や地層処分の必要性とその認識や技術発達の歴史、科学的特性マップを作製した時の経緯などを紹介し、セミナー受講者に自身の考えを深堀するための講演会「地層処分事業の発展と求められる課題」のセッション（ランチョンセミナー形式）を設けた。

f. 3 日間のスケジュール

3 日間の日程に以上のプログラムをあてはめ、3 日間のプログラムを確定した（表 3.2-5、表 3.2-6、表 3.2-7）。

表 3.2-5 人材育成セミナー1 日目のプログラム

時間	演目	内容	担当
10:00～10:10	前振り	セミナーの目的と意義、セミナープログラムの仕立てと学習到達目標について説明し、受講者に対して、セミナーの位置づけを明確にする。	RWMC
10:10～10:40	座学： 「日本の地層処分に関する動向」	日本の地層処分に関する最新の動向等について紹介。	METI
10:40～11:40	座学： 「海外の地層処分に関する動向」	海外の地層処分に関する最新の動向等について紹介。	RWMC
11:40-13:00	休憩		
13:00-16:30	NUMO 講演会 「地層処分事業の推進と安全コミュニケーションにおける世代を超えた挑戦」	地層処分に関する技術的な知識やステークホルダーとのコミュニケーション方法をどのように継承するかをテーマとしたオンライン講演とパネルディスカッション	NUMO

（※1 日目はオンライン形式で開催）

表 3.2-6 人材育成セミナー2 日目のプログラム

時間	演目	内容	担当
9:45～10:15	グループ内自己紹介		RWMC
10:15～11:00	NUMO 講演会ふりかえり	講演会をふりかえり感想を共有	RWMC
		グループ毎に発表後に NUMO から講評	NUMO
11:00～11:10	休憩		
11:10～11:40	座学（動画）：放射性廃棄物対策：地層処分選択の背景		RWMC
11:40～12:10	グループディスカッション：長期貯蔵の主張に対してどうやって説明するか		RWMC
12:10～13:00	昼食		
13:00～13:30	座学（動画）：放射性廃棄物対策：地層処分の安全確保とセーフティケース		RWMC
13:30～14:00	グループディスカッション：地層処分の安全性をどう伝えるか		RWMC
14:00～15:00	座学 「地質学の基礎」	地層処分にかかる全ての関係者に、将来的に分野間の連携や成果の受け渡しを意識した議論をしてもらうために、基礎となる地質学に関する知識を提供	AIST
15:00～15:10	休憩		
15:10～16:10	座学 「地質環境が安全確保に果たす役割」	地層処分に関する安全機能と安全確保の考え方、地質環境に求められる要件および影響要因、影響要因に対するサイト選定上の対応方針、わが国における地層処分に適した地質環境の選定の可能性 等	NUMO
16:10～16:50	座学 「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件（隆起・侵食）」	隆起・侵食になじみがない人に隆起・侵食の概要、および地層処分と関連する点を中心に紹介	JAEA
16:50～17:30	座学 「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件（熱環境）」	科学的特性マップや包括的技術報告書における熱環境に関する要件の記述（科学的特性マップ）、設計要件（緩衝材）、事例検討の紹介 等	JAEA
17:30～17:40	休憩		
17:40～18:10	グループワークⅠ	隆起・侵食、熱環境の要件に関連した処分サイト比較 グループ毎に検討結果を発表	RWMC

表 3.2-7 人材育成セミナー3 日目のプログラム

時間	演目	内容	担当
10:00~10:40	座学 「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件（水理場）」	地下水学になじみがない人に、地下水やその流れに関する基本的な知識、および地層処分における地下水の流れの評価方法について紹介	NUMO
10:40~11:20	座学 「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件（力学場）」	地層処分の閉鎖後長期の安全性の確保において、特に岩盤の閉じ込め性能を発揮させるために、力学的な視点で重要な点を論じる	JAEA
11:20~12:00	座学 「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件（化学場）」	処分場周辺の化学的特性が、処分場の安全評価にどのような影響を与えるかを知る（ための <u>きっかけ</u> となる）	CRIEPI
12:00~13:30	講演	地層処分事業の発展と求められる課題	AIST
13:30~14:00	グループワークⅡ	水理場、力学場、化学場の要件に関連した処分サイト比較 グループ毎に検討結果を発表	RWMC
14:00~15:30	グループワークⅢ（総合学習）	5つの要件に関連した処分場設置場所の検討 選択した場所が安全であると公衆に主張するための取り組みに関するグループディスカッション グループ毎に検討結果や議論した結果を発表	RWMC
15:30~16:10	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。	RWMC

3.2.4 人材育成セミナーの開催に向けての準備等

(1) 開催日程の決定

人材育成セミナーの開催日程については、前述したように、NUMO 講演会の日程が 11 月 22 日（金）に決まっていたため、その日を含めた 3 日間とすることとし、11 月 22 日（金）、11 月 25 日（月）、11 月 26 日（火）に決定した。

(2) 会場の手配

会場に関しては、当センターの会議室では十分な広さがなく、また他の部署も利用するため、3日間人材育成セミナーのためのみに利用することは難しいことから外部の会議室を利用することとした。

外部の会議室の選定にあたっては、以下の観点で絞込を行った。

- ✓ 決定したセミナーの開催日程で利用可能であること
- ✓ 都内（23区内）で比較的アクセスが容易であること
- ✓ 遠方からの受講者のため宿泊施設が併設されている、または近隣で利用可能であること
- ✓ 最大40名の受講者、グループ数として7～8のグループ用の円卓形式での開催が可能なキャパシティが確保できること

これらの条件を満たす複数の会場をリストアップし、概算予算についてインターネット等で確認した結果、墨田区両国の KFC Hall & Rooms で開催することとした。

(3) 受講者（モニター）募集

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）に地層処分スキルアップ研究会を通じて派遣を依頼した。また、本事業において別途実施している、萌芽的・先進的かつ重要な基礎的研究開発の実施研究者に対して、セミナーへの参加を要請した。さらに、地層処分の研究開発に携わっている民間企業にもセミナーの酸化について案内を行った。

結果として、22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、以下のとおりである。

表 3.2-8 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、工学系等)	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	安全評価技術	5年未満 (2年)	30歳未満
JAEA	地質環境調査評価技術	5年未満 (1年)	30歳以上
JAEA	安全評価技術	5年未満 (2年)	30歳未満
NUMO	安全評価技術	5年未満 (3年)	30歳未満
NUMO	工学技術	5年未満 (4年)	30歳以上
NUMO	地質環境調査評価技術	5年未満 (1年)	30歳未満
NUMO	地質環境調査評価技術	5年未満 (2年)	30歳未満
NUMO	地質環境調査評価技術	5年未満 (1年)	30歳以上
NUMO	工学技術	5年未満 (4年)	30歳未満
NUMO	地質環境調査評価技術	5年未満 (1年)	30歳以上
RWMC	その他 (コンクリート工学)	5年未満 (2年)	30歳以上
AIST	地質環境調査評価技術	5年未満 (2年)	30歳未満
AIST	その他 (環境生態学)	5年未満 (2年)	30歳以上
CRIEPI	地質環境調査評価技術	5年未満 (1年)	30歳以上
大学	その他 (廃棄物インベントリ)	5年以上 (7年)	30歳以上
民間	工学技術	5年未満 (3年)	30歳未満
民間	安全評価技術	5年未満 (3年)	30歳未満
民間	地質環境調査評価技術	5年未満 (1年)	30歳未満
民間	地質環境調査評価技術	5年未満 (1年)	30歳以上
民間	工学技術	10年以上 (12年)	30歳以上
民間	地質環境調査評価技術	5年未満 (3年)	30歳以上
民間	地質環境調査評価技術	5年未満 (1年)	30歳以上

※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、RWMC：(公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター、CRIEPI：(一財) 電力中央研究所、AIST：(国研) 産業技術総合研究所、民間：民間企業

受講者については、地層処分事業への従事年数が2から3年程度を対象として各機関に派遣を要請したが、22名中11名がこの基準に該当し、また、9名が±1年であり、ほとんどの受講者が今回のセミナーがターゲットとした従事年数であった。

一方で、専門分野に関しては、地質環境調査技術が11名、工学技術が4名、安全評価が4名、その他が3名となった。地質環境調査技術を題材としたセミナーであったことから

この分野からの受講者が他の分野と比較して多くなったと考えられるが、比較的多様なバックグラウンドを有す受講者（モニター）が集まる結果となったと考えられる。

（4）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、異なる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。このため、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、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、バックグラウンド（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、22 名を 4 つのグループに分けることとした。

以下が設置した 4 つのグループのメンバー構成である。

●グループ A

所属	専門分野	従事年数	年齢
JAEA	安全評価技術	5 年未満（2 年）	30 歳未満
NUMO	地質環境調査評価技術	5 年未満（1 年）	30 歳未満
民間	地質環境調査評価技術	5 年未満（1 年）	30 歳未満
大学	その他（廃棄物インベントリ）	5 年以上（7 年）	30 歳以上
CRIEPI	地質環境調査評価技術	5 年未満（1 年）	30 歳以上
民間	工学技術	10 年以上（12 年）	30 歳以上

●グループ B

所属	専門分野	従事年数	年齢
JAEA	地質環境調査評価技術	5 年未満（1 年）	30 歳以上
NUMO	地質環境調査評価技術	5 年未満（2 年）	30 歳未満
NUMO	工学技術	5 年未満（4 年）	30 歳未満
RWMC	その他（コンクリート工学）	5 年未満（2 年）	30 歳以上
民間	安全評価技術	5 年未満（3 年）	30 歳未満
民間	地質環境調査評価技術	5 年未満（1 年）	30 歳以上

●グループ C

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

●グループ D

所属	専門分野	従事年数	年齢
NUMO	安全評価技術	5 年未満（3 年）	30 歳未満
NUMO	地質環境調査評価技術	5 年未満（1 年）	30 歳以上
民間	工学技術	5 年未満（3 年）	30 歳未満
AIST	その他（環境生態学）	5 年未満（2 年）	30 歳以上
民間	地質環境調査評価技術	5 年未満（1 年）	30 歳以上

(5) アンケートの作成・設計

人材育成セミナーにおいては、受講者（モニター）からのフィードバックを得て、今後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、人材育成セミナーでは受講者からアンケート形式による意見聴取を行うこととした。アンケートの設問は以下のような 6 つの項目を用意した（別添資料 2 参照）。アンケートで

は、海外での経験や異分野の専門家との協働の重要性などに触れることで、受講者の地層処分に関する視野を広げる、というセミナーの目標の達成度が確認できるような設問とした。

- ✓ 国内外の地層処分の状況、NUMO 講演会
- ✓ 動画教材
- ✓ グループワークと座学
- ✓ グループでの作業
- ✓ セミナー全体
- ✓ ランチョンセミナー

アンケートは電子ファイルで受講者に配布し、2024 年 12 月 6 日（金）を期限として提出するようセミナー実施中に依頼した。

3.2.5 人材育成セミナーの開催

(1) 2024 年度人材育成セミナーの開催概要

2024 年度人材育成セミナーは、“『地層処分技術の視野を広げよう!』～国際協力と分野間連携～”と題し、以下の日程・参加者で東京都内において開催した。

- ① 開催日時：2024 年 11 月 22 日（金）、11 月 25 日（月）、26 日（火）
- ② 講師・講評者：7 名
- ③ 受講者（モニター）：22 名

内訳：原子力発電環境整備機構（NUMO）：7 名

（国研）日本原子力研究開発機構（JAEA）：3 名

（公財）原子力環境整備促進・資金管理センター（RWMC）：1 名

（一財）電力中央研究所（CRIEPI）：1 名

（国研）産業技術総合研究所（AIST）：2 名

大学：1 名

民間企業：7 名

以降に 3 日間の開催概要を示す。

(2) 1日目(11月22日(金))の開催概要

セミナーの初日はオンライン会議形式にて開催した。まずは、「前振り」として、セミナー実施の背景やねらいなどの説明を行った。午後に開催される NUMO 講演会に関しては、25 日(月)に振り返りを行うことを説明し、「地層処分事業の持続可能性について何が重要か」および「地層処分を進めるために、将来自分ができることは何か」について聴講後に各自考えておくことを案内した(事前にも電子メールでも連絡していた)。その後、資源エネルギー庁より、「日本の地層処分に関する動向」について講義を行い、また原環センターより「海外の地層処分に関する動向」に関する講義を行った。

NUMO 講演会「地層処分事業の推進と安全コミュニケーションにおける世代を超えた挑戦」については、受講者各自でオンラインにて聴講した。

(3) 2日目(11月25日(月))の開催概要

2日目と3日目は対面でのセミナー開催となるため、2日目最初にグループでの自己紹介を行った。

自己紹介の後、NUMO 講演会ふりかえりを行い、与えていた議題「地層処分事業の持続可能性について何が重要か」及び「地層処分を進めるために、将来自分ができることは何か」について、4つのグループでそれぞれグループディスカッションを行い、グループとしてのまとめについて発表を行った。一例として、地層処分事業の持続可能性において重要なこととしては、知識の継承や、地層処分分野に参加する若い人を増やす取り組みなどの意見が挙げられた。また、地層処分を進めるために将来自分ができることは何かという点については、一般の人へ地層処分について伝えること、若手のリクルートにおいて役割を果たすなどの意見が出た(図 3.2-8)。最後に、発表に対しては NUMO より講評を頂いた。

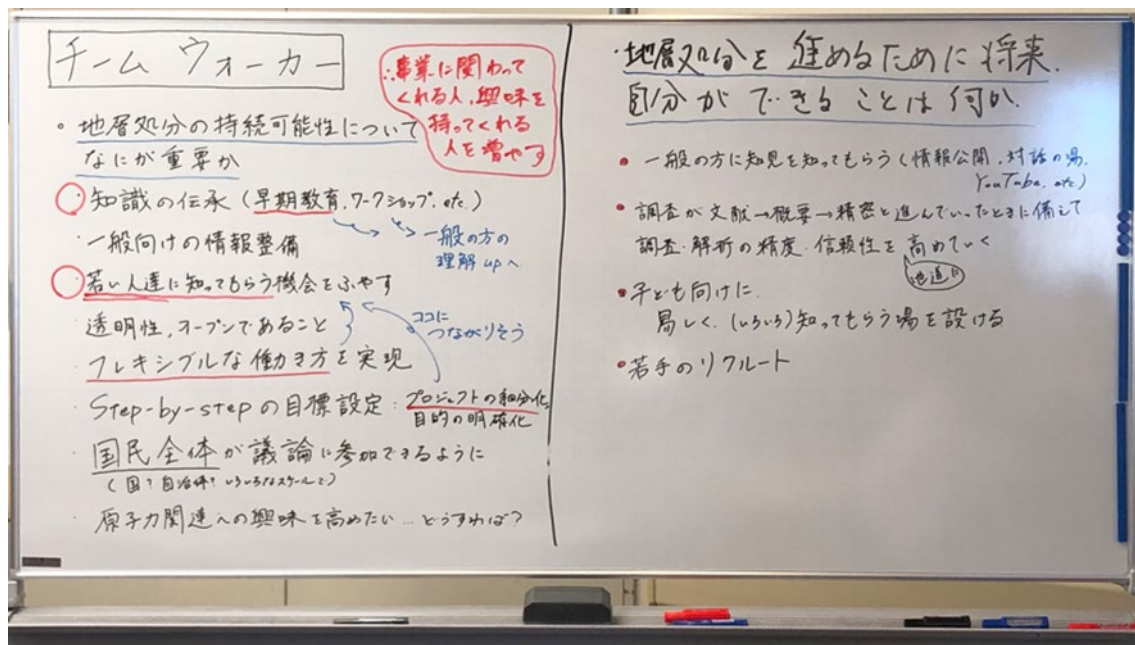


図 3.2-8 NUMO 講演会ふりかえりでのグループまとめ例

続いて、グループワークのための基礎的な知識の提供として、なぜ地層処分なのか、どのように安全性を示すかについて、という地層処分の基本的事項について動画教材を視聴しそれらの内容についてグループディスカッションを行った。2023 年度に作成した解説動画「放射性廃棄物対策：地層処分選択の背景」及び「地層処分の安全確保策と安全評価」を視聴し、それぞれについて「長期貯蔵の主張に対してどうやって説明するかを考える。またはどのような説明が必要か考える」というテーマ及び「公衆に対して地層処分の安全性をどう伝えるか。どのような説明が有効か」というテーマにてグループディスカッションを行い、グループとしてのまとめを発表した (図 3.2-9)。

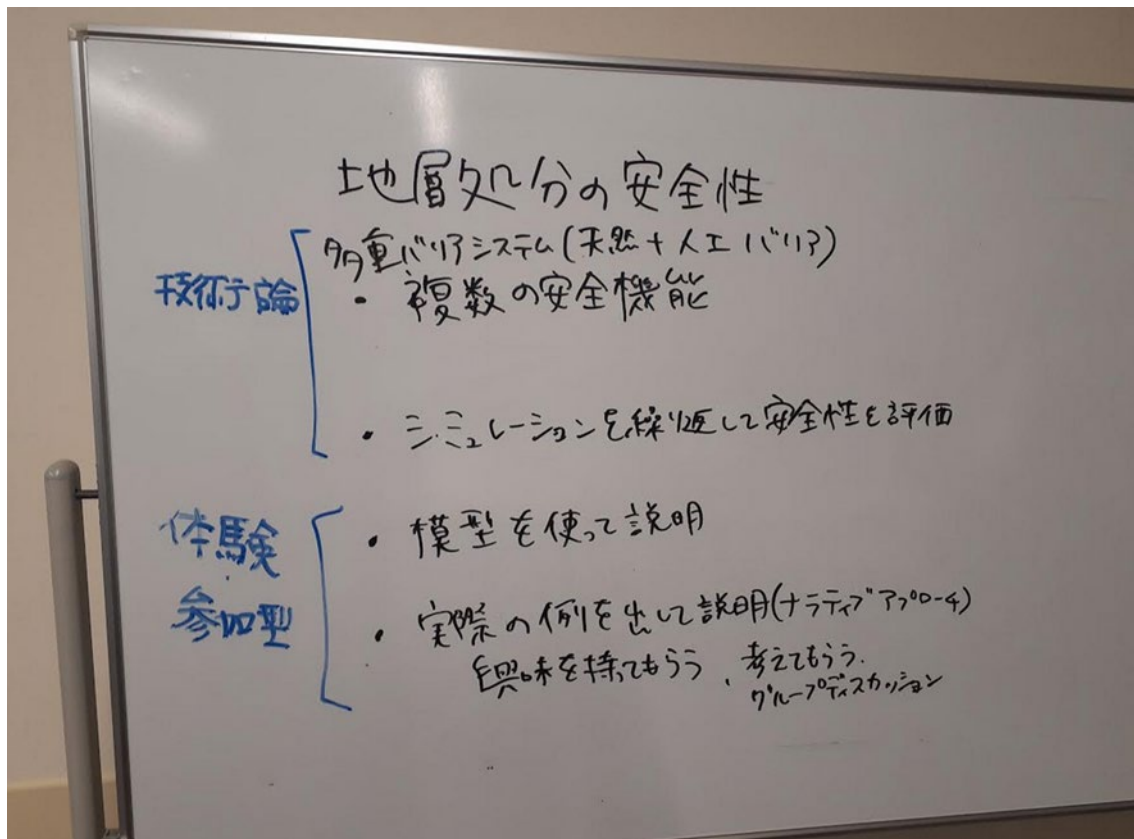


図 3.2-9 グループディスカッションのまとめの例

次に、グループワークのための基礎的な知識の提供として、「地質学の基礎」、及び「地質環境が安全確保に果たす役割」の講義を行った（図 3.2-10）。



図 3.2-10 講義の様子

その後、「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件」のうち、隆起・侵食と熱環境に係る座学講義を行った（図 3.2-11）。



図 3.2-11 「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件」に関する座学の様子

これらの座学講義の後に、グループワーク I として、図 3.2-2 に示すような、2つの深成岩類のサイトにおいて、与えられた隆起速度と地温勾配の特性値から、どちらがより地層処分に適しているサイトであるかを選び、また処分場の設置深度についても決めさせるワークを実施した。グループワークの最後には、各グループで選んだサイトと処分場深度について発表を行った（図 3.2-12）。

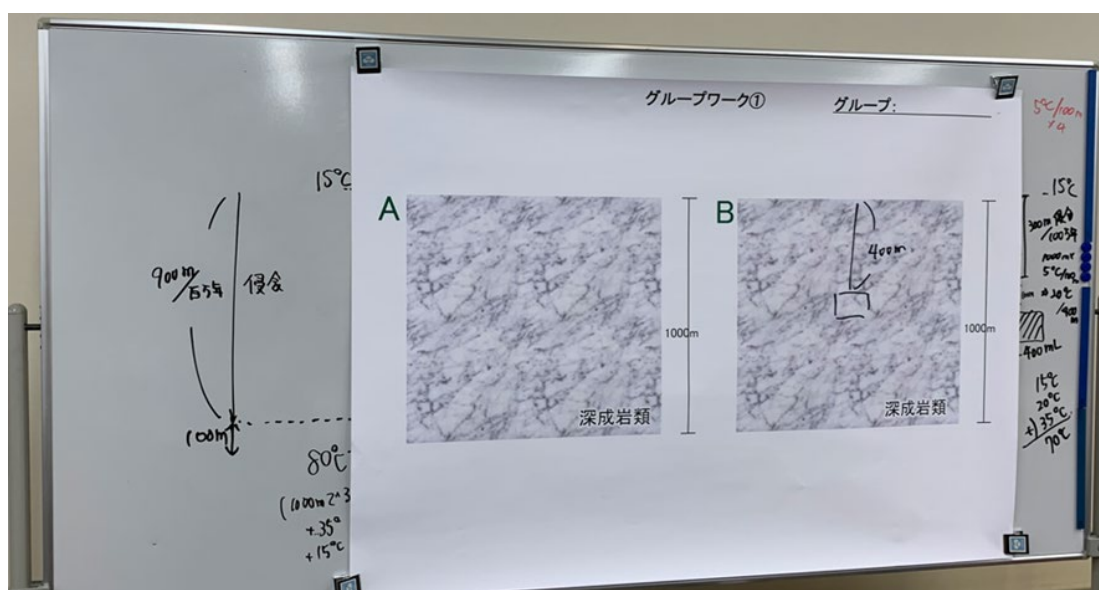


図 3.2-12 グループワーク I の検討例

(4) 3日目(11月26日(火))の開催概要

3日目は最初に「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件」のうち、水理場、力学場、化学場に関する座学3つを行った(図3.2-13)。



図 3.2-13 「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件」に関する座学の様子(その2)

続いて、3.2.3節で前述したように、講演会「地層処分事業の発展と求められる課題」を開催した。地層処分分野において経験豊富な専門家より、我が国の原子力発電の歴史や地層処分の必要性和その認識や技術発達の歴史、科学的特性マップを作製した時の経緯などが紹介された(図3.2-14)。



図 3.2-14 講演会の様子

講演会の後、グループワーク II を実施し、深成岩類および堆積岩類それぞれの岩種を取りあげ、水理場、力学場、化学場の要件に関する特性をそれぞれ与え、地層処分により適したサイトを 2 つのサイトから選ばせ、処分場設置深度についても検討を行わせた（図 3.2-15）。なお、グループワーク II はグループによっては検討に時間がかかったため、表 3.2-7 に示すセミナースケジュールの時間割から大幅に時間が延長する結果となった。

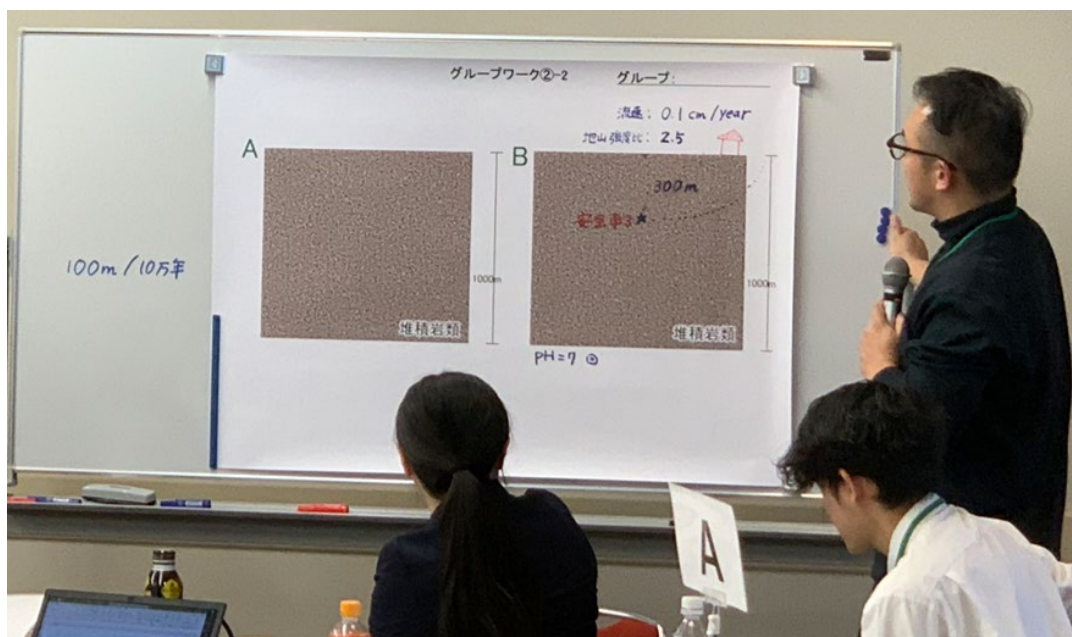


図 3.2-15 グループワーク II の様子

グループワーク II の後にグループワーク III として、「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件」に関して、隆起・侵食、熱環境、水理場、力学場、化学場の 5 つの要件を全て含めたワークを実施した。前述したように、NUMO の包括的技術報告書における地質環境の概念モデル図（深成岩類）に対して、与えた要件の特性に基づいて、処分場を設置する位置を検討させ、その理由を整理させた（図 3.2-16）。グループワーク II で時間が予定より超過したこと、また、グループワーク III の最初の深成岩類のワークでも時間が超過したことから、グループワーク III で予定していたその他の新第三紀堆積岩類を用いた検討、及びグループディスカッションは実施できない結果となった。

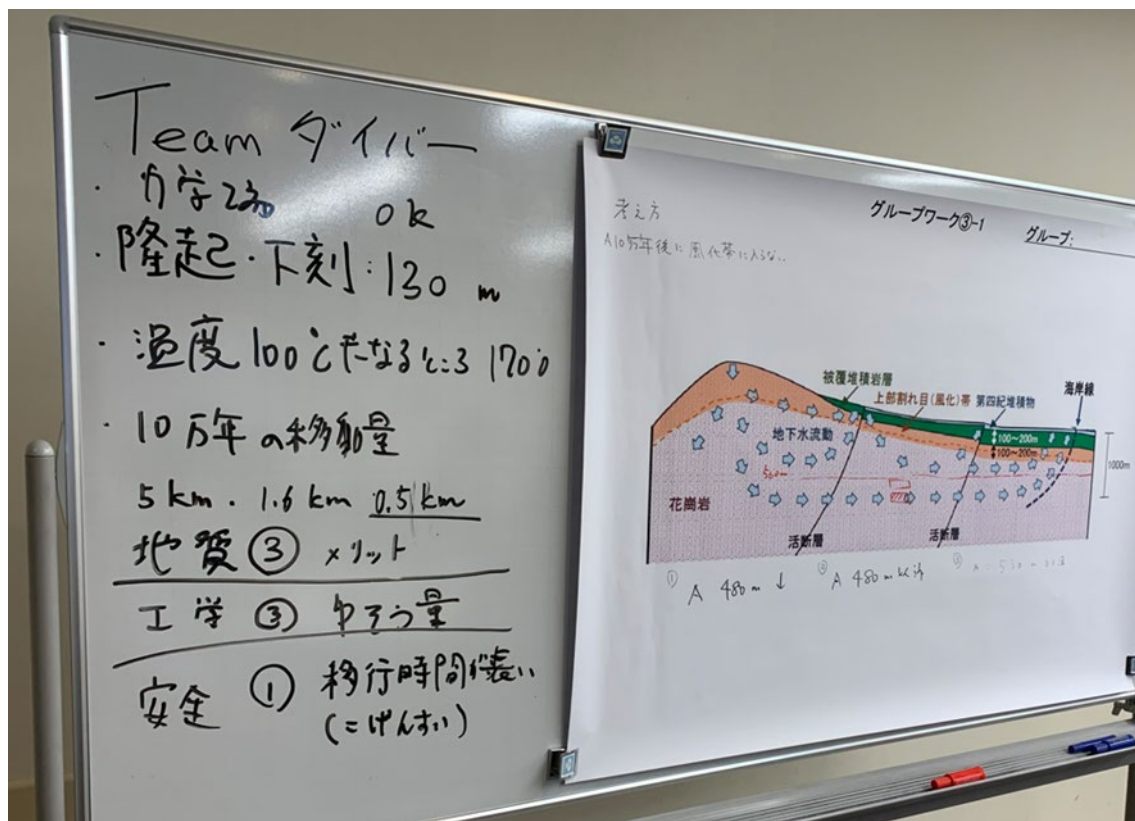


図 3.2-16 グループワーク III の検討例

最後に 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 3.2-7 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

セミナーは自分にとってどんなものだったか？

●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

自分にとって、知識として、またはスキルとして、役立つと思ったり、もっと知りたいと思ったことは？

●ステップ4

これからも継続したり、新しく始めてみてはどうかと考えるテーマは？

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。

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 3.2-9 ふりかえりでの主な意見（抜粋）

STEP1	STEP2	STEP3	STEP4
セミナーの感想 ・自分の仕事と関係があること ・もっと知りたかったこと	興味・関心 ・興味を持ったこと ・興味を持てなかったこと	役立つこと ・もっと詳しく知りたいこと ・これから役立つこと	これらかのテーマ ・関わりたいこと ・やってみたいこと
✓オンラインセミナーは海外実施主体の事業の変遷、取組みについて知ることができる良い機会だった。 ✓地層処分に携わる他分野の方と交流し、それぞれの業務、つながりを感じることができる良い機会であった。 ✓異なる分野を専門とする方々と議論する機会を持つことができて良い刺激になった。 ✓基礎的な知識をしっかり受けることができてありがたかった。自分のバックグラウンドとの関係を考えながら、地層処分に科学的なかつ基本的な知識を得ることができた。 ✓地質環境・化学場については、学びなおし・基本の確認に役立った。日々なんとなくで理解していたTHMCのより正確な理解に結びついた。自分の手で計算できたのは理解につながった。 ✓地層処分におけるTHMCと隆起、侵食など、少し専門的なことを学ぶことができる機会。地層処分における地質環境についてモデル化する上で、必要な事項を学ぶことができた。 ✓地層処分に携わる人	✓グループワークで、お題の内容のそのまた一歩先まで考えようという意識「イノベーション」 ✓地層処分の将来を担う人材にどうやってこの業界に足を踏み入れてもらうか。 ✓最も興味深かった講義はランチョンセミナーです。世代を超えて科学技術を継承していく事、若い世代に対して先輩が理解を示す事には心から共感しました。 ✓グループワークにおいて、その人の専門により考え方が異なること。 ✓水理場が思ったより面白そうだった ✓化学場は、隆起侵食等は、自分にとっては新しい分野です。今後学びたいと思う。 ✓サイト選定の考え方については、安全評価に携わるものとして、目安を知りやすくなり、作業に実感を持って取り組めるようになるだろうと感じ、興味があった。 ✓どの分野・業界も人材不足であると思っていたが、この地層処分に携わ	✓THMCについて、それぞれの項目を1つひとつ学ぶことのできる良い機会であり、自身の業務に直接関係がないことでも分野間協力の観点でよかった。 ✓すべての講義が自分にとってスキルアップにつながるものでした。地震について、活断層などの話も勉強したいと思いました。 ✓各座学の内容は「導入」であっても、知ろうとするきっかけにはなった ✓化学場は、長期安全評価についてもっと知りたい。 ✓自分の専門以外の知識についても、広く浅くでもカバーできるとよい。 ✓地質環境（力学・水の流。熱環境・化学場）の考え方 ✓基礎的な話をたくさん、いろいろな分野を一気に学ぶことができ、非常に勉強になった。 ✓隆起量、侵食量の算出方法。地下における力学	✓グループワークはこれからも継続してやってほしい。普段関わらない分野に関わるのが良かった。次は1つ1つの条件を増やして、さらに深掘して、実際のサイト選定に合ったものにしたい。 ✓業界外の方、一般の方に対して地層処分に興味を持ってもらうための草の根運動 ✓安全評価などの理解してみたい。 ✓グループワークで、①他国の取り組みを比較、今後の日本の方針について議論する。②処分方法。③若手に業界に入ってきてもらうためには？（20年で世代が変わる）。 ✓実際に自分で演習を解くと考えないといけない点がいろいろ見つかって、新鮮だった。 ✓自分の分野を伝えていく。 ✓地震、活断層の講義を受けたかった。 ✓各分野のつながり、影響の大きさの考え方。 ✓地質学については、より正確に理解して周囲の他分野の方の一助になれるようになりたいと思った。 ✓関わりの方を学ぶ機会になり、今後の自分の方向性を決める機会になると思う。 ✓他のNIMBY施設についての事例の紹介。 ✓（今回のような）グループワークで、バックグラウンドを持つ人の考えの違いと、専門の異なる人達が集まって、何か価値のあることができそうだという雰囲気を感じ、若手向けに設ける。 ✓安全評価の考え方についても、関係者の次世代に携わる人々に伝え、コメントなどをもらえる機会があると良いのではない

たちのバックグラウンドの違いを体感した。 ✓地質技術者として知識を深める説明方法、分野間連携、どのように協力しているか。 ✓全体像の把握ができた。 ✓地層処分に関連する各分野で求められる事項、目指すことを知ることができた。	ては、期間が非常に長いことから、かなり重要な問題だと感じた。 ✓力学場など計算は辛いグループワークで、同じ情報を与えられても各グループで考え方や結論に違いが出た。安全評価のムズカシさ。	場の考え方、水理地質 ✓しきい値、基準値を瞬発的に言えること。様々な知識を組み合わせることで二岩種以外の物性、特殊な条件の例についても、もっと知りたいと感じた。	か。最終的な安全の根拠ともなる、安全評価について理解を深めたい。 ✓グループワークなどを通じて話し合い、コミュニケーションを取ることの重要性や必要性。他の人にいかに分かりやすく伝えるかを今後意識してやっていきたい。一般人向けの講演のための練習会、勉強会 ✓地質環境以外にも工学技術安全評価についてのセミナー ✓地質学、・海水などの処分場周辺科学環境条件別の核種移行など
---	--	--	--

3.2.6 アンケート結果の整理及び考察

(1) 人材育成セミナー受講者（モニター）のアンケート結果

人材育成セミナーの受講者に実施したアンケートの結果を以下に示す。

a. 人材育成セミナーに期待すること

受講者にはセミナー申込書に、人材育成セミナーに期待することを記載してもらった。今回のセミナーに期待することとしては、セミナーでは地層処分分野における包括的な知識の習得、異なる分野や他の組織の受講者とのグループワークなどでの交流に期待する受講者が多かった。その他、人材育成セミナーの1日目の題材である海外機関や海外事例からの学びに対して関心を示していた。以下に、受講者申込書に記載されたセミナーに期待することへの意見の抜粋を示す（なお、以降のアンケート意見は内容に基づきグループ分けを行ったもの）。

人材育成セミナーに期待すること
包括的な知識の習得 - 学生時代は地学を専攻しており、現状では従事する業務への理解が不足していると感じていることから、工学技術や安全評価に関する体系的な知識を得られることを期待する。 - 安全評価で進められている研究等の紹介 - 地層処分に関わる機関とそれぞれの役割を理解すること。地層処分事業における地下環境の評価とモデル化の手法を、他分野（工学・安全評価）との関係も含めて学ぶこと。 - 地層処分において必要とされている地質評価技術の理解だけでなく、全体を俯瞰した総合的な評価技術の理解

基礎知識の習得

- 地層処分事業に携わり一年もたっていないため、基本的な考え方を勉強したい。
- 各分野で最低限押さえておく必要がある知識を習得できること
- 関連知識が乏しいため、地質学の基礎から学べるのはありがたいです。

異なる分野や関係者との交流

- グループワーク・グループディスカッションを通して、他機関の職員との交流を深めつつ、地層処分事業についての知識の習得および現段階での課題に関する理解を深めること。
- 様々な分野・企業における地層処分に関係する方たちとグループディスカッションを通して多方面から気づきを得たいと考えています。
- 人脈形成
- 異なるバックグラウンドを持つ研究者や技術者の方々が、地層処分事業の中で各々どのような視点でどのような取り組みをされているのかについて、幅広く理解できればと思っております。

地層処分事業に関する理解

- 地層処分における新しい技術について学び、若手研究者から放射性廃棄物処分のさまざまな解決策を聞きたいです。
- 地層処分に関わるそれぞれの機関が実施している事業の把握、地層処分における現在の問題点の理解
- 地層処分の安全性について、専門分野でない人にどのように発信していくかの理解

海外事例からの学び

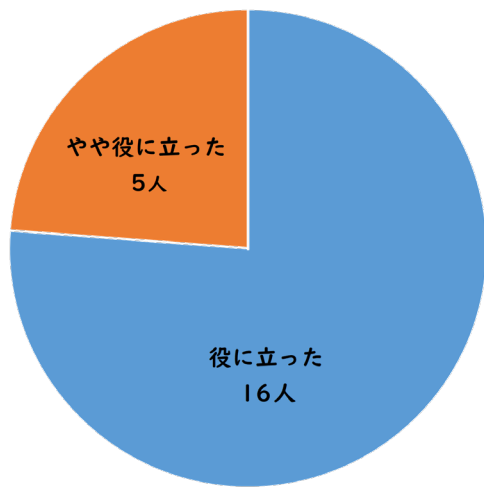
- 地層処分に関して、海外の事例について詳しく学びたい。特に長期環境変動と地層の安定性について、海外ではどのように評価、検討しているのかについて興味があります。
- 海外の地層処分（坑道、人工バリア、天然バリアなど）の設計の考え方
- 海外における地層処分に関する地質調査のアプローチ事例などがありましたら、紹介いただきたい。

b. 国内外の地層処分の動向、NUMO 講演会

人材育成セミナーの 1 日目では、午前中に我が国と諸外国の地層処分に関する動向についての座学、午後からは NUMO 講演会を聴講し、2 日目の午前中に NUMO 講演会のふりかえりとパネルディスカッションを行った。アンケートでは以下のような設問を用意し、受講者が NUMO 講演会を聞いた後の有用性の確認を行った。

設問①から国内外の地層処分の状況を知ることが、日本の地層処分事業を考えていくうえで有用であることが確認できた。また設問②から、受講者が諸外国の地層処分の事例や地層処分事業への取り組みに対して興味と関心を持っており、学習する機会を求めていることが伺える。

設問①：NUMO の講演会での諸外国の講師の話を理解したり、パネルディスカッションでのテーマについてご自身で考えるうえで、我が国と諸外国の地層処分の状況を知っておいたことが役に立ちましたか。



回答：

- ・役に立った：16 人
- ・やや役に立った：5 人
- ・どちらでもない：0 人
- ・あまり役に立たなかった：0 人
- ・役に立たなかった：0 人
- ・未回答：1 人

設問②：我が国や諸外国の状況に関連して、さらに聞きたい、知りたいと思った内容がありましたら、お聞かせください（自由記述）。

自由記述の抜粋

諸外国に関する意見

- ・ 海外のサイト選定の方針や、安全の基準の考え方を学べる機会は少ないので、次回は、もう少し具体的に歴史の講義のような形で時系列で振り返りを行いたい。
- ・ 諸外国の状況については進捗がそれぞれ異なるので、それなりの頻度で見聞できたらと思います。
- ・ 処分場の建設中であるフィンランドはこれまでどのような苦労や問題があったのか、それを乗り越えるためにどのように取り組んだのかを聞きたい。
- ・ サイト選定が完了している地域について、精密調査～処分場建設による社会的な影響など
- ・ 諸外国の処分サイトにおける認可要件の詳細
- ・ バックエンド先進国の方々の意見も知りたいが、文化の近い韓国等の人達の取り組みをもう少し詳細に聞きたいと感じた。普段、あまり知る機会がないので。
- ・ 諸外国の長期管理の方法について日本との違い等

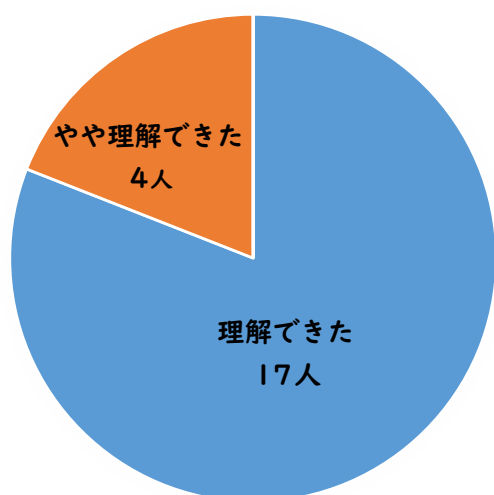
その他の意見

- ・ 長期的事業における情報公開に関する考え方や原子力発電事業との関わり方をどのように地層処分の事業計画に落とし込んでいるのか、さらに伺いたいと思っています。
- ・ 研究者と公衆を結ぶ人材（サイエンスコミュニケーターなど）の育成について、またその考え方について知りたい
- ・ 安全評価について、どのように一般市民の方に説明しているのか。またどのような情報を公開しているのか知りたいです
- ・ 次世代につなげていくということについて、その難しさや課題は各国共通している部分が多いと感じたが、そこに対する解決策に苦労しているという点でも共通していることを理解しました。技術レベル・知的レベルの高い分野であることの魅力を若い人たちに認識してもらうことが必要と思いました。

c. 動画教材①「放射性廃棄物対策：地層処分選択の背景」

今回のセミナーでは動画教材を利用した座学を行い、その学習効果の確認を行った。設問①の結果からほぼすべての受講者が動画教材①の内容を理解できたと回答している。設問②の回答から動画教材①の内容が基礎的なものであったこと、専門用語が少なかったことから理解が進んだものと考えられる。また、動画教材①に対しては視覚的な改善に関する意見が上がった。

設問①：動画教材①の内容を理解できましたか。



回答：

- ・理解できた：17人
- ・やや理解できた：4人
- ・どちらでもない：0人
- ・あまり理解できなかった：0人
- ・理解できなかった：0人
- ・未回答：1人

設問②：動画教材で分かりやすかった点やわかりにくかった点を教えてください（自由記述）。

自由記述の抜粋

わかりやすかった点

- ・動画だけでなく、説明した動画の資料もあったので、分かりやすいです。
- ・基礎的な内容が動画教材の中で簡潔に整理されており、全体的に内容が分かりやすかったと感じました。
- ・国際的な視点を中心にすごくまとまっていて、非常に勉強になった。
- ・膨大な内容がある中で要点がまとまっていた点が有難かったです。
- ・背景は知っていることも多いので復習しながら聞くことができた点で有益あると考えます。
- ・専門用語がなく、わかりやすかった。
- ・倫理的観点をひとつの軸として説明されていた点が、納得感があり分かりやすかった。
- ・倫理的観点からの検討は初めて聞いたので勉強になった

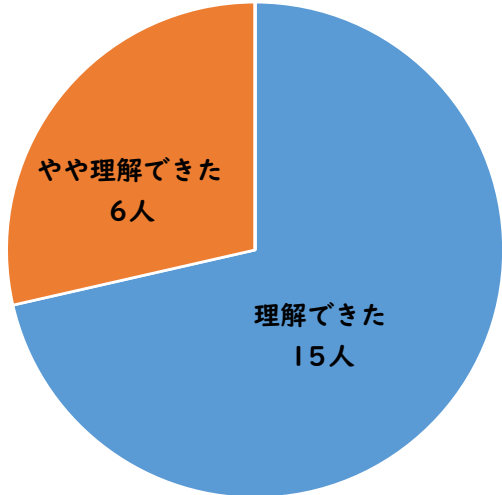
改善点、その他の意見

- ・国内検討が海外のものと比較してどのような違いがあるのか、前提条件となる考

え方の違いなどを知れるとさらによかった。また、DeepIsoration 社に代表される Deep Bore hole 等の処分方式も具体化している部分もあるので、その辺りの説明が入るとさらにいいと思う。 • 基本的には音声付のパワーポイントですので、ナレーターよりもスライドを大きく映していただく方が良いのではないかと感じました。また、スライドは動画のサイズに合わせて 16:9 で作成されている方が、文字・図表を大きく表示できるため効率出来ではないかと感じました。 • もう少し、スライドを大きくしてほしい。 • 動画では、どこを説明したかを、ポインターも併せて示していただければ、もっとわかりやすくなると思います。 • 原子炉稼働当時から現在までの世論の変化など知りたい。 • 安全評価の解説がわかりにくい点があった。 • 分かりやすかったが、やや単調に感じた

d. 動画教材②「地層処分の安全確保とセーフティケース」

動画教材①と同様に、設問①の結果からほぼすべての受講者が動画教材②の内容を理解できたと回答している。設問②の回答では、動画教材②で取扱っている内容は膨大であるにも関わらず、要点が絞られていたことが受講者の理解につながったものとみられる。

設問①：動画教材②の内容を理解できましたか（自由記述）。	
 やや理解できた 6人 理解できた 15人	回答： ・理解できた：15 人 ・やや理解できた：6 人 ・どちらでもない：0 人 ・あまり理解できなかった：0 人 ・理解できなかった：0 人 ・未回答：1 人

設問②：動画教材で分かりやすかった点やわかりにくかった点を教えてください（自由記述）。
自由記述の抜粋 わかりやすかった点 ・ 地層処分における安全確保の考え方が分かりやすくまとめられていた。 ・ 膨大な内容がある中で要点がまとまっていた点が有難かったです。

- とても分かりやすく、ありがたかったです。動画教材のほうがあらかじめきちんと作りこまれているため、よいと思います。
- 知っていることも多いので復習しながら聞くことができた点で有益あると考えます。
- 難しい言葉が少なかった。
- 基礎的な内容が動画教材の中で簡潔に整理されており、全体的に内容が分かりやすかったと感じました。比較的詳細な内容を説明する箇所もありましたが、手元の資料を参照することで理解できました。
- 地層処分事業での「安全とは」等、基本が学べるのが良かった、
- 地層処分の安全機能と安全評価の流れというようなコンセプトを簡単に説明されましたので、この場合でも分かりにくい点特にありませんでした。
- 安全評価やセーフティケースのベースとなる文献を、資料と説明の中で明確に示していた点が、説得力があって分かりやすかった。
- OECD/NEA の報告書などの国際的な背景にも触れてくれた点はわかりやすかったと思う。
- 多重バリアシステムについて、改めて理解を深めることができた。

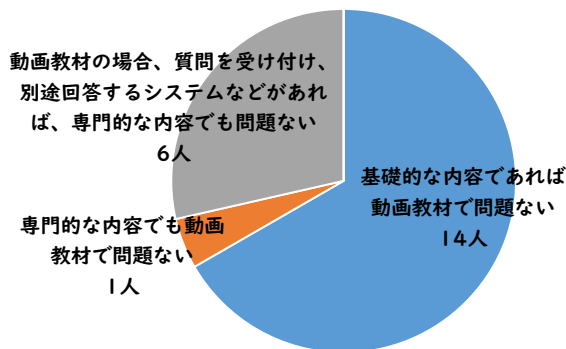
改善点、その他の意見

- 地下水の流れが遅い等、現象と結果しか学べなかったのも、そう考えられている根拠等があると、さらに、理解が進むと思う。
- 動画では、どこを説明したかを、ポインターも併せて示していただければ、もっとわかりやすくなると思います。
- セーフティケースの解説が分かりにくかった。
- 分かりやすかったが、やや単調に感じた

e. 動画教材全般

動画教材の可能性についての質問を行った。設問①では、講師による対面での座学・講義の代わりに動画教材で学習することについて、「基礎的な内容であれば動画教材でも問題ない」という意見が半数以上を占めた。このことは、基礎的な内容は動画教材でも十分だが、専門的な内容の場合、受講者は専門家から直接説明を聞きたい傾向にあると考えられる。設問②と③では、グループワークのための基礎知識を動画教材で学ぶことについて質問したところ、回答者全員が役に立ったと回答している。このことは受講者に共通の動画教材で基礎的な情報を提供することで、異なる分野や背景を持つ受講者がグループワークで円滑な議論ができるようになったと考えられる。

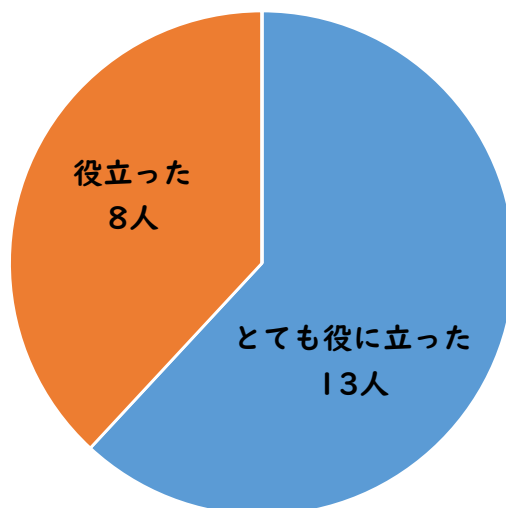
設問①：講師による対面での座学・講義に代わり、動画教材を学習することについてどのように思いますか。ご自身の考えに最も近いものをお選びください。



回答：

- ・基礎的な内容であれば動画教材で問題ない：15人
- ・専門的な内容でも動画教材で問題ない：6人
- ・動画教材の場合、質問を受け付け、別途回答するシステムなどあれば、専門的な内容でも問題ない：0人
- ・どのような内容・システムでも対面での座学・講義でないと十分な学習はできない：0人
- ・その他：0人
- ・未回答：1人

設問②：動画教材視聴後に行ったグループワークは、動画教材の内容の理解を深めることや考えを発展させることに役立ちましたか。



回答：

- ・とても役に立った：13人
- ・役に立った：8人
- ・あまり役に立たなかった：0人
- ・役に立たなかった：0人
- ・未回答：1人

設問③：動画視聴後のグループワークにおいて具体的にどのような点が役立ったか、または役立たなかったか教えてください（自由記述）。

自由記述の抜粋

動画教材の有用性

- ・議論するにあたってベースとなる情報共有を円滑にできることはメリットである。役に立たないとは言わないが、ちょっと先生の高い内容がもう少しあると、グループワークで深い内容の議論ができたのではないかと考える。
- ・動画のトピックスを簡単に紹介されましたので、地層処分分野に活躍していない人も得た基礎知識でグループワークの時に話し合うことが可能でした。
- ・考えを整理できるという点で視聴後のグループワークは有用に感じた。ただし、この動画で初めて地層処分の概要を知るような相手がいる場合には、グループワ

- ークに地層処分のスタンスを理解した人間が必要であると感じた
- 地層処分の基礎的な解説がとても良い
 - ただ知識としてインプットするだけでなく、実際に試行することで学んだことが定着したと思う。

異分野での交流

- 異なる分野の人々がどのように協力し合っているかを知ることは有益でした
- 多様なバックグラウンド・考え方の参加者とともに、教材の内容を解釈できた点。自分にはない考え方に触れられたことが良かった。
- バックグラウンドや知識レベルの異なる方々が、どれほどの解像度で同じ情報に対して知っていて、何を、どのように考えているのかが分かった点
- 自分の考えの整理、および人の意見を聞くことで得られる新しい気づきがあった
- 今までの観点でない部分でしることができたので、良かったです
- わからなかった部分を話し合い確認することで理解を深めることができた。
- 地層処分の施工の観点や安全評価の観点等、多くの視点の意見が飛んできたので、地層処分事業を進める際に、施工側、管理側の考えが意識できるようになった。
- 同じ教材を使用して学習しても、専門分野等の違いにより理解の仕方や考え方が異なり、それを互いに共有し尊重し合いながら理解を深めることができました。いかにして公衆（意見や思想が異なる方）とのコミュニケーションを円滑に進めるかを考えるきっかけになりました。
- 公衆への地層処分安全性を説明することの難しさを再認識できた。 また、様々な視点からの意見を聞くことができた。

その他の意見

- 自分の言葉で話すことが重要だと思いました。
- 人に話すことで、自分の考えをまとめることができた
- グループワークでは、皆が資料を確認しながら議論しているので、手元に資料がありよかったです。

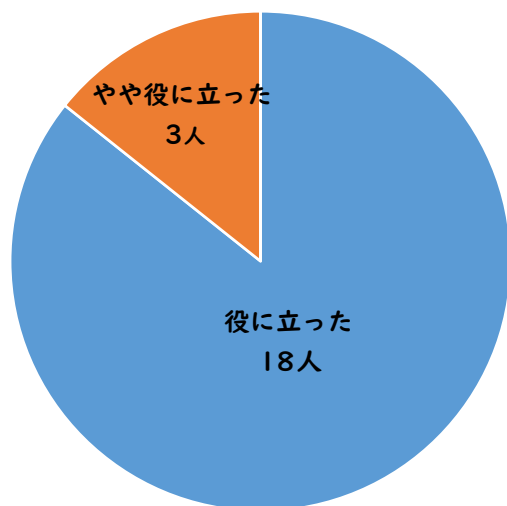
f. グループワーク I と座学（隆起侵食及び熱環境）

グループワーク I のために行った座学「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件（隆起・侵食）及び（熱環境）」の有用性の確認を行った。回答者の全員が、座学はグループワーク I での作業に役立ったと回答している（設問①）。このことについては回答者の意見（設問②、③）から、座学で得た知識をグループワークの際に活用することで、受講者は得た知識の深さと実践的なスキルの向上を感じられたことが要因と考えられる。

グループワーク I の課題設定（設問④、⑤）について、回答者のほとんどが適切であると回答している。課題の設定において、条件を絞ってシンプルな課題としたことで意見が出しやすくなることで、活発な議論につながったものと考えられる。またグループ内で質問しやすい雰囲気、互いに意見を出すことができ、協力して課題に取り組むことにつな

がったものと考えられる。

設問①：「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件（隆起・侵食）及び（熱環境）」で学習したことは、グループワークⅠでの作業に役立ちましたか。



回答：

- ・役に立った：18人
- ・やや役に立った：3人
- ・どちらでもない：0人
- ・あまり役に立たなかった：0人
- ・役に立たなかった：
- ・未回答：1人

設問②：この座学は具体的にどのようなことが役に立ちましたか、役に立ちませんでしたか（自由記述）。

自由記述の抜粋

知識の習得

- ・ 本件はこれまであまりしっかりと学んだことがなかったので、非常に役に立った。例えば、地質年代とそのスケールのスライドは全く私の知見では出てこないもので、すごく興味深く聞くことができた。
- ・ 隆起侵食、熱環境の基本的な考え方、地層処分サイトとして求められる要件を知ることができた。
- ・ バックエンドにおける重要な地質環境がどのようなものかを知ることができた。

グループワークでの活用

- ・ 具体的な数値・条件とその理論について学習することができたため、グループワークの作業もスムーズにはいることができた。
- ・ 演習における考慮する条件を絞ったことで、知識を直接役立たせる有意義な演習となったと感じる
- ・ 隆起侵食については内容を理解するのも難しいので座学で学んだことをストレートに生かしてグループワークに取り組みました。また、熱環境の中心間距離と人工バリアのピッチで温度状況が変化するという点はグループワークを考えるうえで役に立ったと考えます。

その他の意見

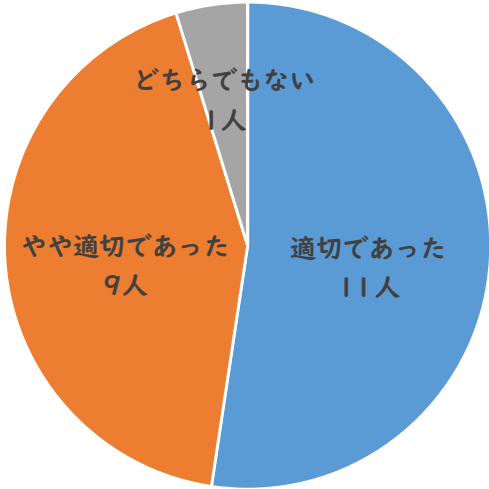
- ・ なかなか触れない分野のため考慮すべき点を知ることができたのがよかった。
- ・ 唯一の絶対的な正解が存在しない問題に対して、所属や専門分野が異なるメンバーで協働して妥当と考えられる着地点を模索する活動は、通常業務では経験でき

ないため、この経験を今後に役立てていきたいと思います。 ・ 隆起・侵食は、処分場周辺の水理や化学、熱、応力等に大きく関係するのに対し、解析条件等で大きく結果が変化する。そのため、解析結果の検証と妥当性等の観点を学べて今後も役に立つと考えた。

設問③：この座学に関連して、さらに聞きたい、知りたいと思った内容がありましたら、お聞かせください（自由記述）。

自由記述の抜粋 ・ 地震学や活断層について。特に活断層に関しては分野によって考え方が異なるように見える。その定義づけ等について知りたい ・ 正解は無いというグループワークでしたが、その中でもどのように決めていくのかという考え方のイメージを持ちたかったです。 ・ 線量の減衰と処分場深度の2つの観点から、どのように安全マージンを取っているのか ・ 熱環境について熱の伝わり方についても学びたいと思う。

設問④：グループワークⅠの課題設定は、地質分野が専門でないメンバーを含むグループで議論を行ううえで適切なものでしたか（専門でない人が置き去りになったりしていなかったか、活発に議論ができたかなど）。

 適切であった 11人 やや適切であった 9人 どちらでもない 1人	回答： ・ 適切であった：11人 ・ やや適切であった：9人 ・ どちらでもない：1人 ・ あまり適切ではなかった：0人 ・ 適切でなかった：0人 ・ 未回答：1人
--	--

設問⑤：そのように回答した理由をお書きください（自由記述）。

自由記述の抜粋 課題の難易度 ・ 議論を進めるうえで特に問題を感じませんでした。皆さん活発に能動的に議論をしていたと思います。 ・ 課題がシンプルであったため、地質の専門知識がなくても講義内容だけで対応可能であったと思います。一方、専門知識を持っている方には物足りなかったかもしれません。 ・ 使用できる条件が限られており、技術的観点のみから考えると明記されていたの

で、考えなくてはいけないことは明白であったため。

- 計算は平易であった。条件を固定しないことで議論が活発になった。

グループ内での協力体制

- 専門でないの方が積極的に意見を出していて、自分では考えない施設設計や安全評価の面でお話をされていて非常に有意義な時間だった。
- 習得の段階が異なる人と協力するのがグループワークなので特に気にならなかった。
- グループ内でサポートしあいながら、座学の内容もお互いに確認しつつ、着実に進められたと感じたため。
- 皆と一緒に議論して、分からなかったら、よりよく知っている人から解説してもらうので、よかったです。
- 専門でないメンバーについても、グループワークの中で質問できる雰囲気でしたので、置き去りにはなっていないと感じました。ただグループワークの時間に、お互い質問する時間を含め、もう少し余裕があるといいと思いました。

その他の意見

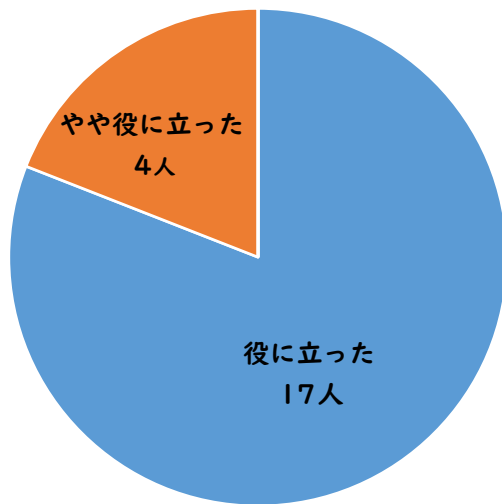
- 自身は地質分野が専門でないため、非常に役に立ちました。専門家でも幅広い知識を持っている人は少ないので、皆さんにとって有益だったと思います。
- 地質について全く知らないという人がグループにいなかったため、何とも言えない。問題設定自体は講義を聞いていれば理解できるのではと思った。
- 地質についての理解が進んでいたかは、専門外の方からは難しいという声も上がっていた。しかし演習の内容について「避けるべき条件」があることなどについてはよく伝わっており、議論を進めやすく感じた。

g. グループワークⅡと座学（水理場、力学場及び化学場）

グループワークⅡのために行った座学「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件（水理場）、（力学場）及び（化学場）」の有用性の確認を行った。回答者の全員が、座学はグループワークⅡでの作業に役立ったと回答している（設問①）。グループワークⅠの傾向と同じとなるが、回答者の意見（設問②、③）から、座学で得た知識をグループワークの際に活用することで、受講者は得た知識の深さと実践的なスキルの向上を感じられたことが、座学がグループワークに役立った要因と考えられる。特に、水理場、力学場及び化学場でのパラメータ設定や計算手法の理解が深まった印象を受けた。

グループワークⅡの課題設定（設問④、⑤）については、回答者のほとんどが適切であると回答している。グループワークⅠの傾向と同じとなるが、課題設定の難易度が適切であったため、受講者が積極的に意見を出し合うことができ、かつ協力的な雰囲気が作られたと考えられる。

設問①：「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件（水理場）、（力学場）及び（化学場）」で学習したことは、グループワークⅡでの作業に役立ちましたか。



回答：

- ・役に立った：17人
- ・やや役に立った：4人
- ・どちらでもない：0人
- ・あまり役に立たなかった：0人
- ・役に立たなかった：0人
- ・未回答：1人

設問②：具体的にどのようなことが役に立ちましたか、役に立ちませんでしたか（自由記述）。

自由記述の抜粋 知識の習得

- ・力学場、化学場については、これまで勉強不足で初めて聞く内容だったので、基礎的な事柄と思いますが勉強になりました。
- ・水理場・力学場・化学場に関する基本的な項目。特に水理場・力学場を考える上での簡単な計算手法。
- ・基礎的な内容をしっかり復習しながらも、それが地層処分に対してどうかかわっているのかを知ることができた。地学及び化学の知識はある程度持っていると思自負していますが、それが地層処分の考え方にどう適応されているかについては知らなかったし、知る機会もありませんでした。非常に役立ちました。

グループワークでの実践

- ・グループワークⅡのため動水、透水、圧縮強度、地下水のPH、などのパラメータの理解が必要でしたので、分かりやすい説明を聴くことで、直接にこの知識の適用が可能でした。
- ・すべてを関連づけながら議論することがあまりなかったので、自分の専門外のことも学ぶ機会となって楽しかった
- ・問題を実際に解くことで非常に理解度が進んだ

その他の意見

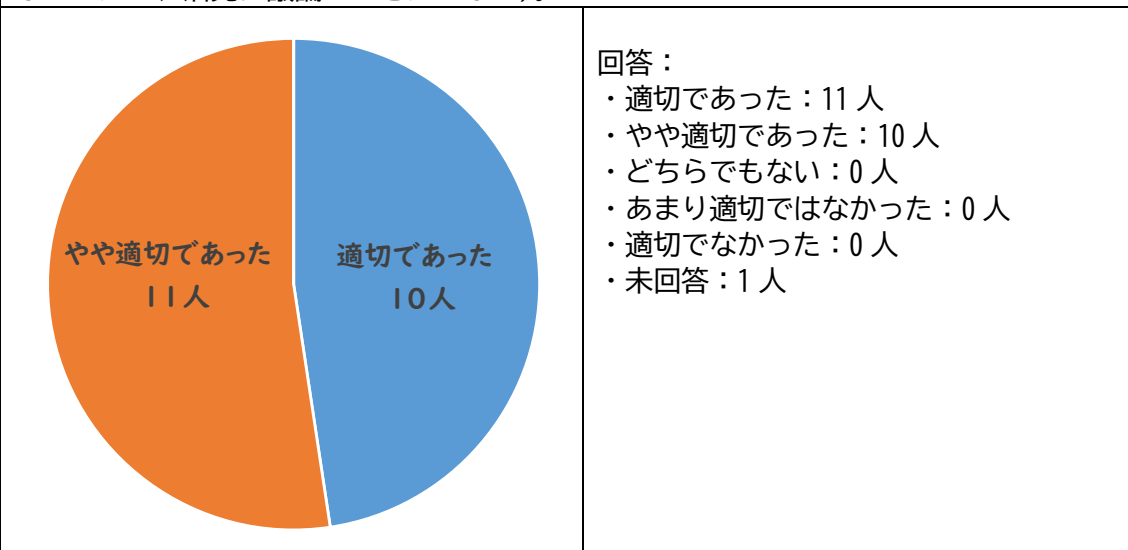
- ・各要件の主要なポイントを網羅的に理解することができた。
- ・複合的な要因を考慮して処分場として好ましい場所を選定するというプロセスの難しさと曖昧さを創造できた点が、今後の業務にも役立つと思いました。

設問③：さらに聞きたい、知りたいと思った内容がありましたら、お聞かせください（自由記述）。

自由記述の抜粋

- ・ 講師の先生もおっしゃっていたように化学場の取り扱いは複雑系になるため、地層処分にてきおうするとなると非常に難しくなるとおもいます。そのうえで地層処分の地点選定において、それぞれの条件のプライオリティの差についてより詳しく知りたいと思いました。
- ・ NATM の設計や施工において、通常 mountain tunnel よりも大深度での構築が必要となるなかで、地層処分特有の設計や施工のポイントがあるのか？特に課題となっていることはあるのか？が知りたかった。（これは自分の専門分野に近いので、個人的に知りたいという意味です）
- ・ 水理場に関して、断層や地下の不均質性がどのように影響を及ぼしうるか。化学場に関して、どの程度不均質性があるのか。
- ・ 力学場、水理場及び化学場を、それぞれ深掘することもできたらよいなと思っています。

設問④：グループワークⅡの課題設定は、地質分野が専門でないメンバーを含むグループで議論を行ううえで適切なものでしたか（専門でない人が置き去りになったりしていなかったか、活発に議論ができたかなど）。



設問⑤：そのように回答した理由をお書きください（自由記述）。

自由記述の抜粋

グループワークでの積極性

- ・ 専門外の方も積極的に意見し議論することができたため。
- ・ 地質分野を全く知らない人というのはいなかったため、議論を活発に行うことができた。ただ、地質をちゃんと専門にしている人がいないと、議論が深まりにくいのではという印象もあった。
- ・ 分野の専門の人が答えることで考える余地が少し狭まっているような気がした。そういう点では活発な議論ではなかったと考える。

グループワークでの協力

- いろんな分野のひとがいるからこそ、非常に有意義な時間になったと思う
- より専門的になったことで少し戸惑いがあったことも事実だが、グループ内で助け合えた。
- グループ内でサポートしあいながら、座学の内容もお互いに確認しつつ、着実に進められたと感じたため。
- 専門家でも幅広い知識を持っている人は少ないので、皆さんにとって有益だったと思います。
- 地質を専攻としているメンバーが適切に発言を振ったため。
- 専門でない方もグループワークを通して質問できたので、グループ全員で議論することができた。
- 慣れていないと考え方がすぐにわからなかったりするが、グループの中でお互いに説明しあって考え方を理解・考察できた

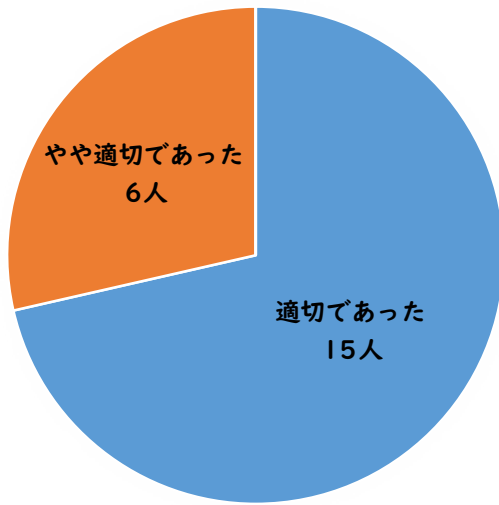
その他の意見

- 課題自体の難易度が高すぎなかったため。グループ内での知識レベルはほぼ差がなかったため。
- 計算が入ってきたことで、計算が早い人と遅い人で議論における理解度が大きく違っていた。ファシリテーターがうまく議論を回せるようにしておいたがよかったと感じている。
- 今回のグループワークでもっと専門的な知識を適用することが必要でも、内容が簡単に説明されましたので、皆で議論出来ました。
- 私は化学の人間なので難しさを感じなかったが、そうでない方にとってはその複雑さについての理解が難しかったのではないかと思います。

h. グループワークⅢ

グループワークⅢの課題設定（設問①、②）については、回答者のほとんどが適切であると回答している。グループワークⅠやⅡの傾向と同じとなるが、課題設定の難易度が適切であったため、受講者が積極的に意見を出し合うことができ、かつ協力的な雰囲気が作られたと考えられる。一方で、グループワークⅢについては、時間が短かったことから十分な議論ができなかったという意見もあった。

設問①：グループワークⅢの課題設定は、地質分野が専門でないメンバーを含むグループで議論を行ううえで適切なものでしたか（専門でない人が置き去りになったりしていなかったか、活発に議論ができたかなど）。



回答：

- ・適切であった：15 人
- ・やや適切であった：6 人
- ・どちらでもない：0 人
- ・あまり適切ではなかった：0 人
- ・適切でなかった：0 人
- ・未回答：1 人

設問②：そのように回答した理由をお書きください（自由記述）。

自由記述の抜粋

グループワークでの積極性

- ・座学で THMC それぞれについて学んだため、グループ全体で意見を出し合いながらグループワークを進めることができた。
- ・条件設定の背景まで思考を広げて、グループで議論して工学的ジャッジができたことは非常に良かった。
- ・各自が自分の得意分野についての考えを明らかにし、それを共有しながら考えることができたと思う
- ・具体的な数値計算ではなく、どこの場所が適切であるという正解がないグループ課題でもあるので、皆と一緒に議論して良かったです。
- ・専門の方が 1 人いたが、その人の発言が正解とせず皆が発言したため
- ・他のグループワークに引き続き、実際にサイトを選ぶということを通して、求められる条件に注目するよい機会になったと思われる。

グループワークでの協力

- ・セミナーで学んだ事柄に加えて、それぞれの自分の専門の立場からも議論することができた。
- ・2 日間で学んだことを活かしたグループワークなので、分野問わず議論できたと考える。
- ・検討時間がもう少しあれば、理解をより深められたと感じた。
- ・様々な要素を考慮した上で総合的に判断していく訓練になったと思う。

その他の意見

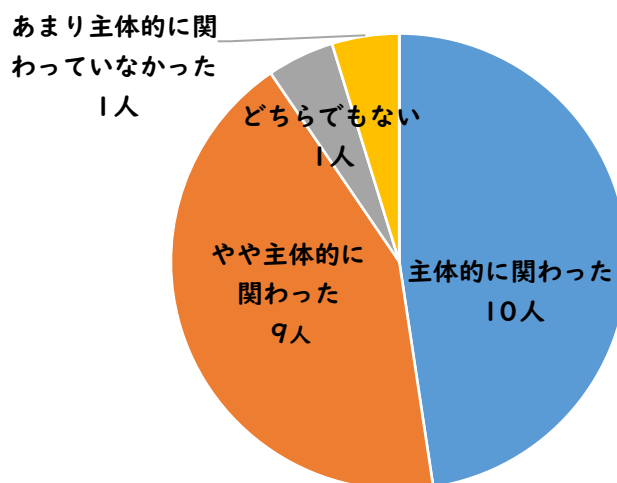
- ・講義内容だけで対応可能な課題だったと思います
- ・時間制限と情報量が多すぎるため、検討すべき情報を省略することもありました。

- 安全評価について、あまり触れていなかったなので、唐突感があった。
- 専門家でも幅広い知識を持っている人は少ないので、皆さんにとって有益だったと思います。正解がないというワークですが、それでも正解を決めていく上での考え方が知りたかったです。
- 地下の物性値がほぼ均一であるという条件設定や図上の横の縮尺といった要素が解釈するうえでの混乱を招く部分があるかもしれない。

i. グループでの作業

受講者がグループでの作業において、主体的に関われたかどうかについて確認したところ、ほとんどの受講者が主体的に関わっていたと回答した（設問①）。理由としては、座学で学んだ内容や自身の知識から積極的に発言し、他の人の意見も尊重しながら話し合いを進めることができたという点をあげている。またグループでの役割を率先して行うことができたことも理由として挙げている（設問②）。グループでの作業が活発に行われたかについては、ほとんどの回答者が「活発だった」もしくは「やや活発だった」と回答した（設問③）。グループでの作業から新たな気づきや発想があったかについては、ほとんどの回答者が肯定的な意見であった（設問④）。

設問①：セミナーを通じて、ご自身は「主体的」にグループでの作業に関われたと思いますか。



回答：

- ・ 主体的に関わった：11 人
- ・ やや主体的に関わった：9 人
- ・ どちらでもない：1 人
- ・ あまり主体的に関わっていなかった：0 人
- ・ 主体的に関われなかった：0 人
- ・ 未回答：1 人

設問②：そのように感じた理由をお書きください（自由記述）。

自由記述の抜粋

グループでの作業における積極性

- セミナー中の座学で学んだ内容や自身の知識を基に積極的に発言することができたため。
- グループワークの中で課題に対する意見と他の専門分野の人にも質問しながら理解を深めることができた。
- 自分が学んできた分野であったこともあり、意見を出すこと、出た意見に否定はせずもっとブラッシュアップしていくことができたと考えるため。
- 積極的に関わりつつ、他の方の意見を尊重するよう心掛けました。
- グループ内で自身の考えを元に議論が進んだという実感があるから。
- 自分が、地層処分に係る仕事もしているので、自分が知っている範囲で皆さまと一緒に議論しながら進めたから。
- グループ発表を一生懸命頑張ったため。
- ホワイトボードへのメモなどを積極的に行うとともに、様々な意見を提供することができたと思う。ただ、何を答えればいいのかわからない質問がいくつかあり（セミナー最後の振り返りなど）、そういう時はあまり主体的にかかわることができなかったと思う。

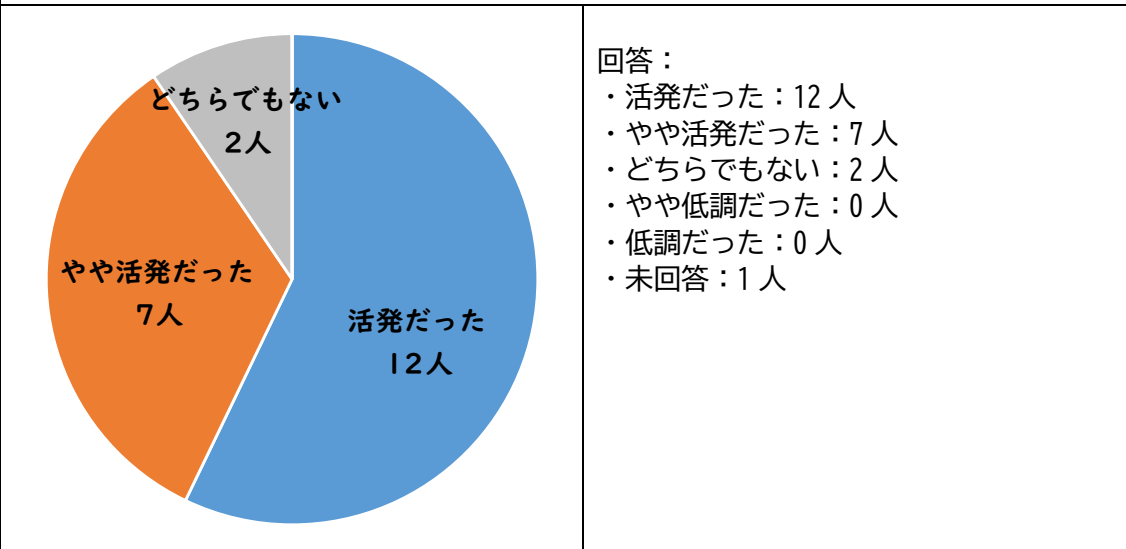
グループでの作業における協力

- 専門でないため考察するのが最初は難しかったが、私の他にも理解しきれていない方がいたため、理解している人に説明をお願いし、会話の輪に入れていない方に話を振ることでその方の意見を取り入れることができた。
- グループワークにおけるファシリテーターの役割をやることが多く議論を中心に回すことができたため。
- （おそらく）最年長者であったため、議論が停滞したり偏り過ぎたりするようにファシリテートするように心がけました
- 時々難しい日本語が理解できず、議論についていくのが難しかったです

その他の意見

- 受け身側に回ってしまったので、次はもっと意見を述べたいと思う

設問③：セミナーを通じて、グループでの作業は活発だったと思いましたか。



設問④：グループでの作業が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（自由記述）。

自由記述の抜粋

議論の活性化

- ・リードする方がグループにいたので、非常に活発に回りました。
- ・第一声を誰かが発するとそこから議論がサクサク進むが、それまでは少し内向的になってしまった。
- ・誰かが議論を主導してくれると議論が活発になる。タイムキーパーや議論の方向がずれたときに戻してくれる人がいるとグループディスカッションとしてよい議論ができると感じた。
- ・皆さんの意欲が高かったおかげで活発に議論ができたと思います。結局は一人一人のやる気が重要なのだと思います。
- ・ホワイトボードをみんなで囲んで話すと言論が活発になった。
- ・グループのメンバーが総じて積極的だったことと、常にイノベティブな思考を発信してくれるメンバーがいたため非常に活発に議論できたと思います
- ・アイスブレイクや自己紹介も工夫されていたため
- ・セミナーの雰囲気も柔らかく、講師も笑顔で話を掛けているので、話しやすい雰囲気のため、議論が活発でした。

グループでの作業における協力

- ・バックグラウンドや知識レベルの異なる技術者・研究者らが、お互いの知識をリスペクトしつつ、歩み寄りながら建設的に議論できたと感じた。
- ・地質・評価・安全評価とそれぞれの分野の方がいたので、自分にはない視点から議論することができたから。
- ・自分も含め地層処分にあまり関わったことがない参加者が多かったため、忌憚なく討論できた。
- ・地層処分事業の経験年数が、グループ内ではほぼ同程度であったため、だれか1人

がリードする形にならなかったのが要因と思います。 ・ 課題の内容だけでなく、その一歩先の議論まで実施できたことが良かった。 その他の意見 ・ メンバー全員はそれぞれに専門性を持っていたこと ・ メンバー全員が恥ずかしがらずに発言を積極的にできていたこと ・ 講義において適切な情報を得ることができたから。

設問⑤：異なる専門家とのグループでの作業を経験したことで、処分技術やご自身の今後の地層処分事業へのかかわりなどについて新たな気付き・発想はありましたか。											
<table border="1"> <caption>設問⑤の回答割合</caption> <thead> <tr> <th>回答内容</th> <th>人数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>あった</td> <td>11人</td> </tr> <tr> <td>少しあった</td> <td>7人</td> </tr> <tr> <td>どちらでもない</td> <td>2人</td> </tr> <tr> <td>あまりなかった</td> <td>1人</td> </tr> </tbody> </table>	回答内容	人数	あった	11人	少しあった	7人	どちらでもない	2人	あまりなかった	1人	回答： ・ あった：11 人 ・ 少しあった：7 人 ・ どちらでもない：2 人 ・ あまりなかった：1 人 ・ なかった：0 人 ・ 未回答：1 人
回答内容	人数										
あった	11人										
少しあった	7人										
どちらでもない	2人										
あまりなかった	1人										

設問⑥：新たな気付き・発想がある場合、具体的にどのようなものかお書きください（自由記述）。
自由記述の抜粋 ・ 地層処分に関わる違う組織の方と話し合うことで、新たな視点で地層処分について考え直すことができると感じたので今回のようなセミナーに積極的に参加していきたいと感じた。 ・ 地層処分はたくさんの分野の方がかかわっている壮大な事業なのだと気づきました。自分の研究成果がどのようにかかわるのかについてもアウトリーチやプレス発表だけでなく、実際の処分事業に係っているものなのだと気づくことができました。 ・ 異なる専門分野の技術をいかに有効に活かしていけるかが重要と思われる。そのためゼネラリストの育成が必要。 ・ 学際的な分野である地層処分の分野において、専門性を磨くことも重要であるが、広く浅くでもよいので全般的に知識を得てアウトプットすることだと気づいた。 ・ まずは地層処分全体に関わる教科書的な知識を広く浅く得て、広範なトピックについて議論できる下地を整えることが重要な要素の一つだと感じた。 ・ 他の機関が行っていることを少しだけでも知ることができたのはよかった。 ・ 地層処分は様々な技術を組み合わせなければ達成できず、複数の難しい課題を持つ事業であることを再認識することができ、成功させるためには、他分野の専門家と

の協力が不可欠であることを実感できた。

- グループ内には、地質環境に近い専門の方がいて、pH によって収着の性質がかなり敏感になっていることを教えていただきました。それを意識して今回の問題を解いてきました。
- グループワークの発表で、各グループともに結果が異なっていたのを見て、選定基準があったとしても、どこに着眼するかどの点を優先するかで、答えが同じにならないかと思いました。
- 最近取り組んでいる安全評価のデジタル化にに関連する研究構想を想いついた。
- なんとなくだったものがより具体的になった（安心と安全のちがいなど）

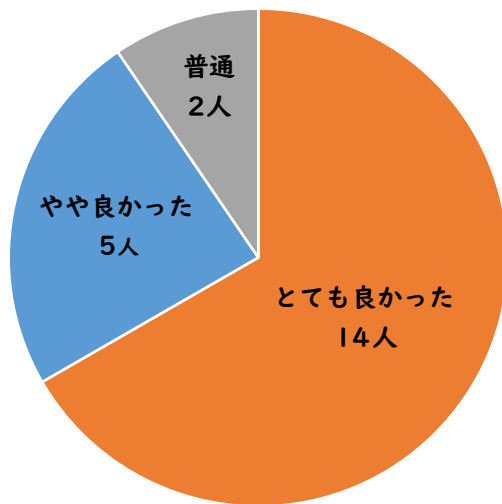
j. セミナー全体

セミナープログラムの構成について質問したところ、ほとんどの受講者から肯定的な回答を得た（設問①）。その理由としては、講義とグループワークのバランスが良かったことや他分野の専門家との実践的なグループワークにより学びが深まったことがあげられる（設問②）。一方で、講義とグループワークのバランスが良いものの、全体的に余裕のないプログラム構成であったため、他のグループの人と話す機会が持てなかったという意見があった。

セミナーの進行についてもほとんどの受講者から肯定的な回答を得た（設問③）。その理由としては、スムーズな進行であったことがあげられる。一方で、休憩時間や座学での質問時間が短かったという意見があった（設問④）。

今回のセミナーのテーマについて質問したところ、回答者の全員から肯定的な意見が得られた（設問⑤）。その理由として、受講者は THMC などに関する知識を深めること、地層処分場の設計や閉鎖後長期について考える機会があったことが有効であったと捉えている。またグループワークでは多様な視点から地層処分について考え、よりよい事業の進め方を模索するきっかけになったとしている（設問⑥）。

設問①：セミナーのプログラム構成はいかがでしたか。



回答：

- ・とても良かった：14人
- ・やや良かった：5人
- ・普通：2人
- ・あまり良いとは言えない：0人
- ・良いとは言えない：0人
- ・未回答：1人

設問②：なぜそう思いましたか（自由記述）。

自由記述の抜粋

講義内容に関する意見度

- ・このセミナーで地層処分の重要性についてより深く理解することができました。
- ・バランスよく学ばせていただいたと感じたため。
- ・基礎知識が不足している自分にとっては、非常にありがたいプログラムでした。
- ・海外の事例をはじめ、各専門の話等を聞けたため。
- ・1日目の内容が唐突であった。

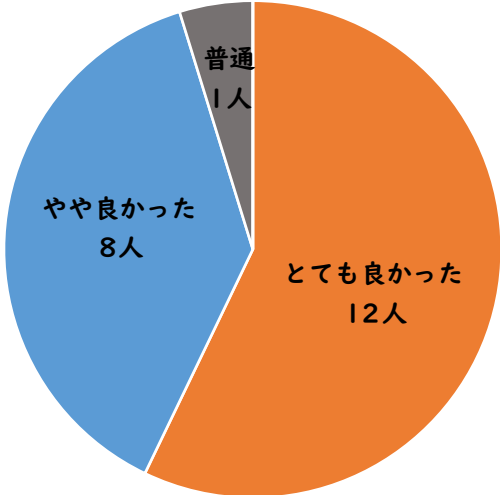
プログラムに関する意見

- ・講義とグループワークのバランスがよかったため。また、通常では出会うことがない他機関、他分野の方と出会い、ネットワーキングができたから。
- ・グループワークで直前に学習した分野を着実に実践として学ばせ、最後に総合的に評価する構成は明快であると感じる
- ・グループワークが多く密なスケジュールだと感じたが、その分達成感もあり、座学からのグループワークで理解を深めることができるプログラムであった。
- ・地層処分に関わる技術の基礎を知ることができ、他分野の専門家とのグループワークも良い刺激となった。一方、人材不足や技術継承などの問題を再認識することができ、解決するためには自分はどうすべきかを考え、行動する良い機会になったと思う。
- ・休憩時間が少なく、他のグループの方と話す機会が懇親会以外に持てなかった。グループ以外の人との親交を持つ時間が足りないと感じた
- ・3日以上開催することは業務上参加が難しくなるが、時間的にあまり余裕のない工程感であったため。座学の順にグループワークを行うのはとても良いが最後のグループワークについては考える量に対して時間が短いと感じた。

グループワークに関する意見

- ・グループワークが多くて、飽きない構成だったため
- ・グループディスカッションなどを通じて異なる所属の人がどのようなをしてい

て、何を思っているのかを多少知ることができた。 グループワークの時間をもう少し欲しかった

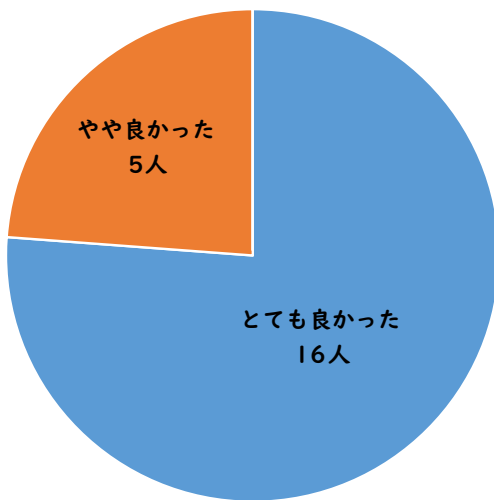
設問③：セミナーの進行はいかがでしたか。															
 <table border="1"> <caption>設問③の回答データ</caption> <thead> <tr> <th>回答内容</th> <th>人数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>とても良かった</td> <td>12人</td> </tr> <tr> <td>やや良かった</td> <td>8人</td> </tr> <tr> <td>普通</td> <td>1人</td> </tr> <tr> <td>あまり良いとは言えない</td> <td>0人</td> </tr> <tr> <td>良いとは言えない</td> <td>0人</td> </tr> <tr> <td>未回答</td> <td>1人</td> </tr> </tbody> </table>	回答内容	人数	とても良かった	12人	やや良かった	8人	普通	1人	あまり良いとは言えない	0人	良いとは言えない	0人	未回答	1人	回答： ・とても良かった：12 人 ・やや良かった：8 人 ・普通：1 人 ・あまり良いとは言えない：0 人 ・良いとは言えない：0 人 ・未回答：1 人
回答内容	人数														
とても良かった	12人														
やや良かった	8人														
普通	1人														
あまり良いとは言えない	0人														
良いとは言えない	0人														
未回答	1人														

設問④：なぜそう思いましたか（自由記述）。
自由記述の抜粋 進行に関する意見 ・滞りなく進行していただいたため。 ・それぞれの内容をちょうど長い時間で説明されましたので、知識を得ました。 ・大幅な遅延等もなく、意見の出せないグループなどが出なかったことから。 ・項目が多かったにも関わらずそれほど時間の変更なく進んだのはグループワークなどで周りで助言していただいたり、ハキハキとした進行があったからだと感じた。 時間配分に関する意見 ・さまざまな分野の人々が議論を交わすのがよかった。でも休憩時間はかなり短かった。 ・進行は全て滞りなく、素晴らしかったです。一方で、各講義の質問時間についてはそれぞれ確保してもらえたら、さらによかったと思います。質問が何個か聞けなかったため。 ・時間に余裕がない。 ・質疑の時間が少なかったと感じました。 ・最後の課題をすべてやるのは難しいため。 ・時間配分がしっかりしていたため。 ・グループディスカッションをもう少し多めでもよかった。また、設問も講義内容の復讐だけでなく、お互いの業務内容を知れるような内容だと面白くなると感じた。 ・もう少し、グループワークに時間をかけられるとよいと思う（2 日目のプログラムを1 時間程度延長するなど）。

その他の意見

- 地質環境の流れの全体をだいたい把握することができて、グループワークが多いからこそグループ内のメンバーとかなり仲良く議論できました。
- 隆起侵食・熱環境→水理場・力学場・化学場→全要件、と要件を加えながらのグループワークは、いきなり全要件で取り組むよりも、頭を整理しながら取り組むことができ、非常によかったと思いました。
- 2日目はグループワークより、講義を中心にしてほしかった。

設問⑤：2日目及び3日目のセミナーでは、閉鎖後長期の地質環境に求められる要件をテーマとしていました。このテーマ設定はご自身の地層処分に関する知識獲得、グループでの作業という観点でどう思いましたか。



回答：

- とても良かった：16人
- やや良かった：5人
- どちらとも言えない：0人
- あまり良いとは言えない：0人
- 良いとは言えない：0人
- 未回答：1人

設問④：なぜそう思いましたか（自由記述）。

自由記述の抜粋

自己研鑽に関する意見

- これまでに概要のみでしかなかった THMC などに関する知識をそれぞれ個別に深めることができた。地質環境を考慮するうえで知識習得・整理を行う貴重な機会であったと感じたため。
- 地層処分場の設計に関連する事項を網羅的に学ぶことができたため。
- それぞれの分野から閉鎖後長期について考える機会はありませんので有効であると考えます。
- 最低限押さえておくべきことを学ぶことができた。
- THMC や隆起侵食に関して、基礎的な内容をまとめた形で学ぶことができた。
- これまで携わったことのない分野のセミナーで、地層処分に関する知見を広げることができたと思います。
- 異なる分野の方と密に話す機会があまりなかったので、1つ1つのワークが勉強になった。
- 専門外の分野の基礎的な知識を得ることができた。
- 業務に直結する内容であったため。

- ・ 今後の業務に活かせると思います

その他の意見

- ・ 自身の関わっている部分だけでなく地層処分全体として必要な知識というものを少しでも獲得することができたように思う。地層処分は様々な方とのコミュニケーションが非常に重要になってくることから、その訓練の 1 つとしてグループ作業は良かったと思う。
- ・ 基礎知識が不足している自分にとっては、非常にありがたいプログラムでした。グループワークは必要と思いますが、ワークの時間は減らしてもよいと思いました。
- ・ 自分の研究分野に係ることなので、研究成果がどのように使われていくのかについて具体的なイメージを持つことができた
- ・ 同じ情報が与えられてもグループごとに結論が違うことに驚いた。全員が納得する地層処分事業の在り方は存在しないということを実感した。しかしそれと同時に、そこで諦めずに、よりよい事業の進め方を模索していくことの重要性を考えるきっかけになった。
- ・ 限られた時間で知識を記憶するのは難しい

k. 講演会「地層処分事業の発展と求められる課題」（ランチョンセミナー）

アンケートから、講演者の地層処分分野での長年の経験についての話を聴講することにより、受講者が地層処分分野で今後各自が貢献することの意識づけに寄与したことが窺える。

設問：ランチョンセミナーについての感想をお聞かせください（自由記述）。

自由記述の抜粋

- ・ 科学的特性マップ作成時の経緯など普段聞くことのできない話を聴くことができ、地層処分事業への理解を深める良い機会だった。
- ・ お話しは自分の意識向上に繋がった。
- ・ 長年地層処分分野に貢献してきた講師の想いが詰まった話を聞いたことは非常に面白かった。一方で、もう少し聴講者側から発言があって、幅広い議論ができればなおよかった。
- ・ 今までおぼろげに疑問に思っていたこと（原子力の歴史に対する人々の思い・業界内の雰囲気の変化など）が自分の中で腑に落ちることができた。
- ・ 座学の講義とは違う切り口でご講演いただき大変興味深く拝聴いたしました
- ・ ご講演にとっても感銘を受けました。言いづらいこともあえて口に出し、議論を沸かせ若い方への意識を高める語り口に、そのお人柄をうかがうことができました。私自身、それなりのキャリアを持ちながらも突然この業界に入ったため中堅の年齢ながらも、まだまだ勉強が必要である身と思っていた中、大先輩からのメッセージを受けることができてとても光栄でした。ありがとうございました。
- ・ 実際に対応してきた方のお話しを聞くことのできる機会はなかなかないのでとても有意義な時間であった。ランチョンセミナーでなくても 1 つの演目として時間を設けても良いと考える。
- ・ 先人の話は文字に残らなく、勉強しようと思っても手に入らない情報であるため、

最も有意義であった

- とてもわかりやすく含蓄に富む内容であり、興味深く聞かせていただいた。自分たちの世代でなかなか成果が上げにくいなかで、次世代への教育をモチベーションにしていくというのは、人によっては受け入れるのが難しいと思いました。
- 「20代の世代に求められていること」等、私たちの世代がやるべきことを話してくれる人は少ないのでとても良い機会になった。
- 原子力発電の開始からこれまでの考え方の背景について説明をいただき、大変参考になりました。特に最後の言葉、「子供が将来自分の部下になる可能性を想像し、未来を見据えて教育していく」というお話が、非常に印象深く心に響きました。
- 地層処分に関わる人の本音の話を聞いたのは面白かったと思う。
- 文献には載らない様々な知識を得ることができ、興味深く聞かせていただきました。
- 地層処分事業が、自分を含め現役世代だけでなく、次世代までかかる息の長い事業であり、自身の技術力向上以外に、次世代の育成も重要な事項であるということが理解できた。
- こうしたセミナーでは少し聞きづらい話題があったことも含め、休憩時間を活かしたランチョンセミナーという形が活きていたように感じる
- これまでの復習も踏まえて聞くことができたため内容が頭に入ってきてやすく、課題について丁寧に説明いただいてわかりやすかった
- 地層処分にかかわる技術者として、あるべき姿を考える良い機会になったと思う。

(2) まとめ・考察

受講者のアンケートから、講義とグループワークのバランスが良く、実践的な学びあり、今後の業務に活かせるものとなったとの意見や、閉鎖後長期の地質環境に求められる要件に関する知識を学ぶことができつつ、地層処分の他の分野の専門家と議論することにより分野間連携の重要性などについて学ぶことができたとする意見があり、受講者に対して、セミナーを通じて新たな視点の提供、多くの専門分野に関わる地層処分分野での協働についての重要性などを学ぶ機会を提供できたものと考えられる。

海外専門家による講演会については、アンケートから受講者が諸外国の状況について学ぶことができ、また例えば安全評価について一般市民にどのように説明しているのか等、社会的な側面についても学びたい意向が示されたことから、セミナーのプログラムに海外事例を取り入れることは今後も有効である可能性が考えられる。一方で、1日目のプログラムは唐突感があったとする意見もあり、セミナーの主要題材とどのように関連付けができるかを検討することが今後の課題である。

地層処分の基礎的な知識に関する動画教材を取り入れたことについては特に否定的な意見はなかったことから（一部、動画が単調という意見はあった）、今後も動画などの教材をセミナーの構成に取り入れることにより、講師の手配や、講師の座学資料の作成などの

負担軽減に資する可能性が考えられる。

閉鎖後長期の地質環境に求められる要件に関するグループワーク、及びグループワークの基礎となる座学については受講者のアンケート結果において好意的な意見が多かったことから、今後もグループワークの前に基礎的な内容の座学を取り入れ、受講者の飽きがないように座学とグループワークを交互に実施するような構成をとることが有効であると考えられる。

一方で、座学やグループワークについては時間が足りないという意見、受講者間でコミュニケーションをとる時間が足りないという意見もあり、セミナーの構成を継続してブラッシュアップすることが今後の課題である。

3.3 オンライン学習教材の検討

3.3.1 昨年度の実施内容と今年度の実施計画

2019 年度以降、2023 年度までの事業期間において、次の 2 種類の教材作成を進めてきた。

- ・「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
- ・「繰り返し学習が可能な動画教材（E ラーニング）」
解説動画によりより深掘した内容を解説し、図表等についても口頭での補足説明や視覚的に理解できるような工夫をすることにより、リテラシー教材と組み合わせることにより学習効果を高めることを目的

リテラシー教材については、2023 年度に完成し、また繰り返し学習が可能な動画教材（E ラーニング教材）は 2023 年度に試作版を作成していた。2024 年度は繰り返し学習が可能な動画教材（E ラーニング教材）について更新版を作成することを目的として、海外での E ラーニング教材の活用についての調査、動画教材の追加作成、ユーザーレビューによるユーザー目線での見直しを実施し、必要な修正等を行い、更新版を作成することとした。

3.3.2 海外調査の実施

繰り返し学習が可能な動画教材（E ラーニング）の作成においては、海外の事例として、スウェーデンの放射性廃棄物処分の実施主体であるスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB 社）の子会社である SKB インターナショナル社（以下、SKBI 社という）が世界各国の地層処分関係者に対して提供しているオンラインコースである School of Geological Disposal を対象として調査を実施した。

2023 年度の調査では、繰り返し学習が可能な動画教材の検討に資するため、SKBI 社の School of Geological Disposal（以下、SGD という）のコンセプト、内容、テーマ構成などの調査を行い、以下の点などが特に今後の動画教材開発において反映や検討を行っている

くべきと考えられる点であった。

●コースの構成

SKBI 社の SGD は、受講者レベルに応じレベル 1～3 の 3 段階からなるコース構成となっている。レベル 1 は地層処分に関する包括的・基本的な内容で地層処分事業に関わる全ての人が知っておくべき内容となっている。レベル 2 は、さまざまな学問分野の人々が、最も重要性の高い分野のいくつかをより詳細に学ぶことができるような内容で各分野の担当者等向けとなっている。レベル 3 は、特定の分野に焦点を当て各分野について詳細かつ広範な内容となっている。

このように、対象者に応じ異なるレベル・内容の教材を用意することが、ニーズに合わせて必要な人材を確保していくためには必要である。

●柔軟な内容・構成

SKBI 社は、SGD の特にレベル 3 の内容に関しては、ニーズに応じて作成するとしており、顧客からのニーズに応じてオーダーメイドするとしている。特に、レベル 3 の内容のように、専門性の高い領域では、受講する人・組織が必要とする知識やノウハウが、その組織が置かれた状況などにより異なる可能性があるため、このようなニーズに合わせたテーマ・内容とすることが有効と考えられる。

●教育・トレーニングの専門機関との共同開発

SKBI 社は、スウェーデンの原子力発電所の運転・保守要員に様々なトレーニングを提供している原子力トレーニング・安全センター（KSU）と共同で SGD を開発している。このような教育やトレーニングに豊富な経験や教訓などを有す機関の協力を得て教材を作成することは、学習効果の高い教材開発に有効な点であると考えられる。

●教材のインタラクティブ性の向上

動画教材の場合、インタラクティブ性が低い場合には、集中力の維持が難しく、また学習が継続しづらいと考えられる。SGD では、講義の中で問題を出し受講者が答える、講義等に対する質問のライブセッションを行うなどのインタラクティブ性を高める工夫を行っている。

●学習のしやすさ、簡潔性

動画教材が簡潔で理解しやすく、よく整理されている場合に受講者の学習意欲や回数が向上する可能性があると考えられる。簡潔な内容・長さの場合には、他の業務などで時間を確保しにくい受講者でもスケジュールの合間に受講できる、また、簡潔な内容で学習を終えることで達成感を得つつ学習を進めることができる。

SGD では、プレゼンテーションをブロックに分け簡潔にまとめている。また、イラスト、図表を多用することで受講者の集中力を維持できるよう配慮している。

●受講者の進捗管理等

SGD では、各受講者の教材へのアクセス状況等を把握できるよう、最新のログイン日時の把握が可能な仕様となっている。このシステムを利用することで、学習が進んでいない受講者に対してメールでリマインドを行うなどが可能となっている。

●汎用性のあるポータル利用

SGD の教育ポータルは、技術プラットフォームの Moodle (<https://www.e-learning.co.jp/service/moodle/>) を採用している。Moodle は、無料のオープンソースソフトウェアで、わが国をはじめ世界中の多くの学校や企業で利用されており、100 万人を超えるユーザーが存在している。E ラーニング教材制作会社のプラットフォームを使った場合には、その会社との契約期間中のみアクセスが可能で、契約が切れた場合にはアクセスすることができない。また、動画教材の修正やコースなどの設定の変更なども教材制作会社を介してのみ実施可能である。Moodle のようなオープンなプラットフォームを用いた場合には、契約に関わらず常に利用が可能であり、コース設定などの自由度も増すことになる。そのため、ある程度教材の開発が進み、コンテンツがそろった後には、Moodle のようなプラットフォームを利用することで、継続的にオンライン学習コンテンツを提供可能となるなどの利点があると考えられる。

これらの点のうち、2023 年度の動画教材の試作版においては、主に学習のしやすさ、受講者の進捗管理機能の追加などの点の反映を実施した。

(1) 2024 年度の海外調査

今年度の調査においては、SGD の実際の運用の詳細、運用開始後に行った改善点などについて SGD を開発・運用している SKBI 社から情報収集を行った。また、2025 年 1 月 29 日に SKBI 社による SGD のデモ及び内容説明の機会を設けた。以下に同社からの調査報告書の内容及びデモから得た情報のうち、我が国において動画教材を活用する際に参考になると考えられる得られる点をまとめる。

●コース準備段階に作成プロセスの各工程に関する指示書の作成

SKBI 社で作成している指示書には以下が含まれる。指示書（マニュアル）を作成して各作業のやり方をマニュアル化しておくことで、一定のクオリティを持つとともに、効率的に作業を実施可能となると考えられる。また、マニュアルとして残すことでノウハウの伝承にもつながると考えられる。

- ・ パワーポイント（PowerPoint）でスピーチを録音する方法
- ・ パワーポイントから MP4 を取り出す方法
- ・ MP4 動画の編集
- ・ アプリケーションの操作デモをパワーポイントで記録
- ・ PDF ファイルの作成及び結合
- ・ 講座ポータルサイトの設定
- ・ OneTouch※の使用方法
- ・ 講座ポータルサイトの使用方法

※SKBI 社のオンライン講座を受講するためには、受講者全員がそれぞれの電子メールアドレス及び携帯電話番号を記入し、SKBI 社の講座ポータルサイトに登録しておく必要がある。ログイン・プロセスでは、「OneTouch」と呼ばれるすべてのモバイル OS で利用可能な安全なモバイル・アプリケーション（アプリ）を利用している。

●講座受講者にとって一つの講座に必要な時間

講座受講者は通常、自身の仕事をしつつオンライン講座を受講する。受講のためにどの程度の時間が必要とされるのか、既存コースでの情報を把握しておくことは、同様のコースを作成・実施をする際に、受講者にとって過剰な負担とならずに受講可能なタイム

フレームの把握につながると考えられる。

- 講座開始の約 1 週間前からポータルサイトの利用方法やサイト自身を事前に確認できるよう、アクセスを提供（ただし、視聴できるのは講座の導入部分のみ）
- 講座の継続期間は全体で 6～8 週間
- 講座には最大 10～15 時間分の講義コンテンツが含まれる
- 講座を受講した後で、質問をしたり、ウェビナーに参加したりする時間が必要となるため、1 件の講座で最大 40 時間の受講時間が必要
- 講座では 2 回の質疑応答（Q&A）ウェビナーが設定
- 講座のポータルサイトは講座の終了後 2 週間アクセス可能

●ライブ・ストリーミングによる質問セッション

オンラインでの講座の場合には、受講内容に疑問を持った場合でもすぐに回答が得られないといった欠点があるが、ライブ・ストリーミングによる質問セッションを設定することで、疑問をすぐに解消することができる。また、受講者が時間のある時に受講するタイプの講座の場合には、他の受講者との交流や意見交換などができない。しかし、この点に関してもライブ・ストリーミングのセッションを設けることである程度解消可能であると考えられる。

また、知識がないこと、理解してないと思われたくないなどの理由から積極的にライブセッションには参加できない場合も考えられる。このような場合に備え、SKB インターナショナル社では、対話のきっかけとなるよう、ウェビナーでの意見交換を促す一定数の質問や特別なトピックを独自に用意している。これに関連し、SKB インターナショナル社の講座には「得られた教訓」を示すスライドが含まれ、これらのスライドは対話の開始のためのきっかけとなることがこれまでの経験から判明している。さらに、ライブ・ストリーミングは録画され、ポータルサイト上にアップロードされるため、リアルタイムで参加できなかった受講者が後日内容を確認できるようになっている。これは当日参加した受講者も後日再度確認することが可能である。このように受講者に対して多様な学習機会を提供することに貢献している。

●汎用性の高い技術の活用

SKBI 社の講座では、オンラインでの受講や動画の視聴等に際してのトラブルを可能な限

り回避するため、一般的に良く使われているアプリケーションや技術を利用している。
例としては以下が挙げられる。

- 使用される講座のポータルサイトはウェブベースのものとされており、したがっていくつかの最も広範に使用されているウェブブラウザが利用可能としている
- より高度な機能に存在する可能性の高いバグが問題を引き起こすリスクを回避するために、ポータルの全機能のうち、試験済みの限定的な機能のみを使用している
- 使用するファイル形式として、すでに十分に確立されている MP4 と PDF を採用している
- ウェビナーには世界的に広範に使用されている「TEAMS」を採用している。

●改善の取り組み

SKBI 社では、一つの講座が終了した後に評価会合を開き、次に挙げるトピックについて検討している。

- 以下の面での講座の改善方法
 - ✓ 講座内容
 - ✓ 講座ポータルサイト
 - ✓ ポータルサイトへのアクセス
 - ✓ ウェビナー
 - ✓ 講座またはポータルサイトの利用方法の説明
 - ✓ 講座の開講時間及び期間
- 適切な対象グループに提供される講座の内容について

さらにこの会合では、次に示すように、提供された情報に関する話し合いも行われる。

- 講座管理者による考察
- バックオフィス・スタッフによる考察
- KSU から示された見解
- プレゼンター／講師がから示された考察
- 受講者から示されたフィードバック
- 講座の評価フォーム。
- 講座の終了セッションにおけるフィードバック質問への口頭での回答

- 講座終了後に受講者からの電子メールその他を受けて行われたコミュニケーションの内容

このように、講座終了後に講座全体について、受講者だけでなく、運営側の様々な関係者からの意見を聴取し、改善点を洗い出し反映していくことは繰り返し改善を行い、よりよい講座・教材とするために重要な手続きであり、参考とすべき点と考えられる。

●学習管理システム（LMS）：Moodle について（SKBI 社のデモから）

SKBI 社では、SGD の運用のため、Moodle と呼ばれる無料のシステムを利用している。SKBI 社は、SGD を SKB 社のこれまでに得てきた知見の移転を目的としたものであるため、受講者の理解度の確認のためのテストは実施していないとのことであった。しかし、Moodle には、Grades という機能が含まれており、ここでは、理解度の確認テストを追加すること、また、受講者のテスト結果などを管理することができるとのことであった。本事業では、効果的な人材育成プログラムを作成することが目的となっており、プログラムの効果の検証は不可欠と考えられる。このため、Moodle のこの機能を活用することが有効であると考えられる。

また、受講終了後の受講者へのアンケートもこのシステム上で実施することができるようになっている。本事業における人材育成セミナーでは、受講者に対して別途ファイルを送付、または、アンケートの URL 及び QR コードを送付しアンケートを実施してきた。同じシステム上で多くのことを実施し、管理が可能であることは、煩雑になりがちなセミナーの作業を効率化し不要な間違いやミスを減らすことが可能になると考えられる。

3.3.3 動画コンテンツの追加作成

E ラーニング教材用の動画教材については、2023 年度に「地層処分に関するリテラシー育成教材」と組み合わせて学習効果を高めることを目的として、特にリテラシー教材の中で基礎的・基盤的な内容を取り上げて以下の 3 本を作成していた。

- ・日本における放射性廃棄物の種類と特徴
- ・放射性廃棄物対策：地層処分選択の背景
- ・地層処分の安全確保策と安全評価

2024 年度は同様にリテラシー教材の中で基礎的・基盤的となる内容について追加で動画教材を作成することとし、新たに以下の 2 本の動画を作成した。

- ・放射性廃棄物管理の原則と規制
- ・地層処分に対する信頼

(1) 解説動画コンテンツ作成

前述の 2 つの解説動画に関してのコンテンツ内容を検討した。2023 年度に作成した動画と同様に、解説動画は解説者が画面でスライドを説明する形とし、紹介する内容のスライドを作成した。各解説動画の内容項目については以下とすることとした。

放射性廃棄物管理の原則と規制

- ・放射性廃棄物管理の原則と規制
- ・放射性廃棄物管理の原則
- ・放射性廃棄物処分に係る放射線防護
- ・放射性廃棄物処分の安全要件
- ・日本の地層処分の安全規制

地層処分に対する信頼

- ・何故信頼が重要か
- ・段階的意思決定プロセス
- ・可逆性・回収可能性
- ・パートナーシップ・アプローチ
- ・地下研究施設の役割

作成したスライドについては、E ラーニングで解説動画の作成も手掛けている民間会社により、動画用スライドとして見やすさやアニメーション効果などの調整が行われた。

(2) 解説動画撮影

作成した解説用スライドを用いて、ナレーションを専門としている講師（二人）による解説動画の撮影を行った（図 3.3-1）。講師は地層処分を専門としている人物ではないため、専門的な用語でもセリフ等について自然に話せるように、現場でチェックしながら撮影を行った。作成した動画はそれぞれ動画の長さが 20～30 分程度となった。

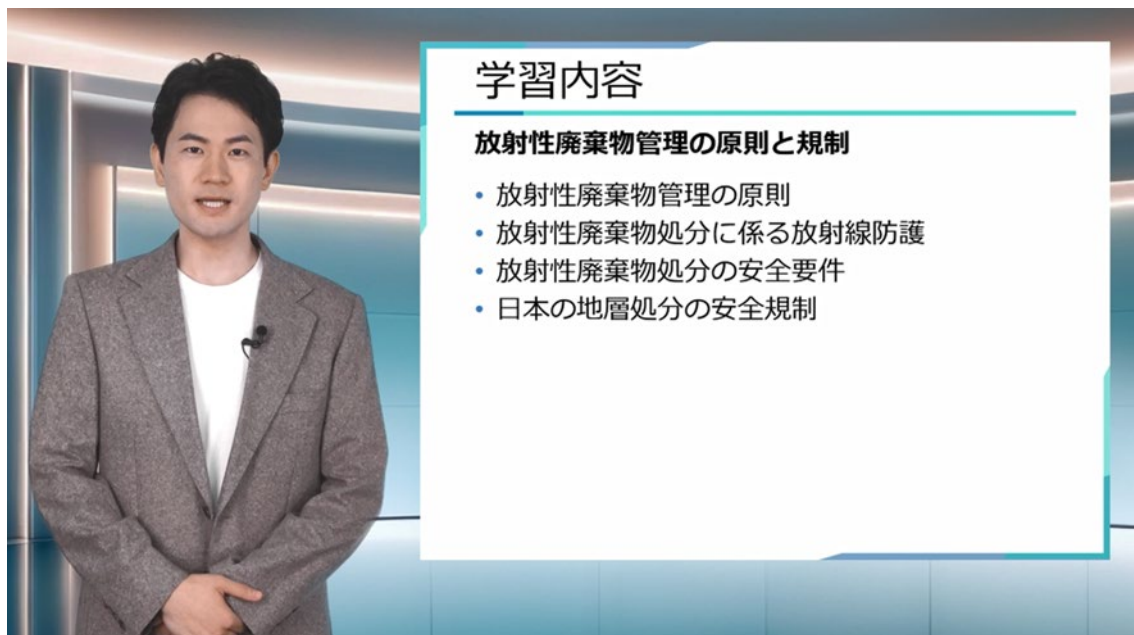


図 3.3-1 解説動画の一場面

(3) 確認テストの作成

2023 年度と同様に、新たに作成した動画 2 本に対して、動画を視聴した後に知識を得られたかどうかを確認するための確認テストを作成した。確認テストは解説動画一つにつき、選択式テスト 5 問、○×式テスト 3 問の合計 8 問を作成した。確認テストの例を以下に示す。

【選択式テスト】

次の文章中の(1)～(3)に該当する解答の組み合わせはどれか。A～C の中から 1 つ選べ。
IAEA の基本安全原則(1)において、放射性廃棄物管理に関する原則として「人と環境の防護」、「(2)」、発生者責任の原則、「(3)の役割」、などを示している。

- | A. | B. | C. |
|----------------|-----------------|----------------|
| (1) SF-1 | (1) SSR-5 | (1) SF-1 |
| (2) 将来世代に対する負担 | (2) 放射性廃棄物の発生管理 | (2) 将来世代に対する負担 |
| (3) 規制機関 | (3) 実施主体 | (3) 政府 |

【○×式テスト】

次の文章について正しい場合は○、誤っている場合は×を選べ。

地下研究施設は、処分場システムの理解や処分施設の設計のロバスト性の実証など科学技術的な信頼に役立つことのみが期待されている。

図 3.3-2 確認テストの例

3.3.4 ユーザーレビューの実施

前述したように地層処分に関する解説動画については、2023 年度に 3 本及び今年度 2 本の合計 5 本を作成した。教材としての学びやすさや使いやすさなど、学習者の声を集めて動画を改訂し、オンライン教材の更新版を作成するために、ユーザーレビューを実施した。

●参加者募集

ユーザーレビューの対象者は、動画教材の対象者を考慮に入れ、以下のように設定した。

対象者：若手研究者・技術者（地層処分に関する業務経験 1～2 年目程度）

レビュー参加者の募集は、地層処分スキルアップ研究会を通じて参加の呼びかけをしてもらうとともに、当センターから地層処分関連業務を実施している民間企業宛てに参加呼びかけを行った。その結果、19 名の参加者が得られた。

●実施方法

ユーザーレビューの実施は、参加者の負担や時間を考慮し、動画教材のすべてを学習してもらうのではなく、5 本の動画の内 2 本の動画「放射性廃棄物対策：地層処分選択の背景」、「地層処分の安全確保策と安全評価」は必須としてすべての参加者が学習することとし、残り 3 本の動画については、参加者 1 名につき当センターが割り当てた 1 本の動画を学習対象としてもらうこととした。

また、実施方法は教材の学習前後で各章毎に 8 問からなる確認テストを受けてもらい、その結果を送付することで学習効果を確認することとした。さらに、学習後にアンケートに回答してもらい、教材に対する意見をもらい、改善点、修正点などを洗い出すこととした。

ユーザーレビューの実施においては、学習前のテスト結果提出日と学習後のテスト結果提出日の期限を決めて行った。

(1) ユーザーレビューの結果の分析

ユーザーレビューを実施し、解説動画の学習前と学習後に参加者が受けた確認テストの結果を図 3.3-3 に示す。なお、5 本の解説動画は以下のように第 1 章～第 5 章と位置付けて

いる。

第 1 章：日本における放射性廃棄物の種類と特徴

第 2 章：放射性廃棄物対策：地層処分選択の背景

第 3 章：放射性廃棄物管理の原則と規制

第 4 章：地層処分の安全確保策と安全評価

第 5 章：地層処分に対する信頼

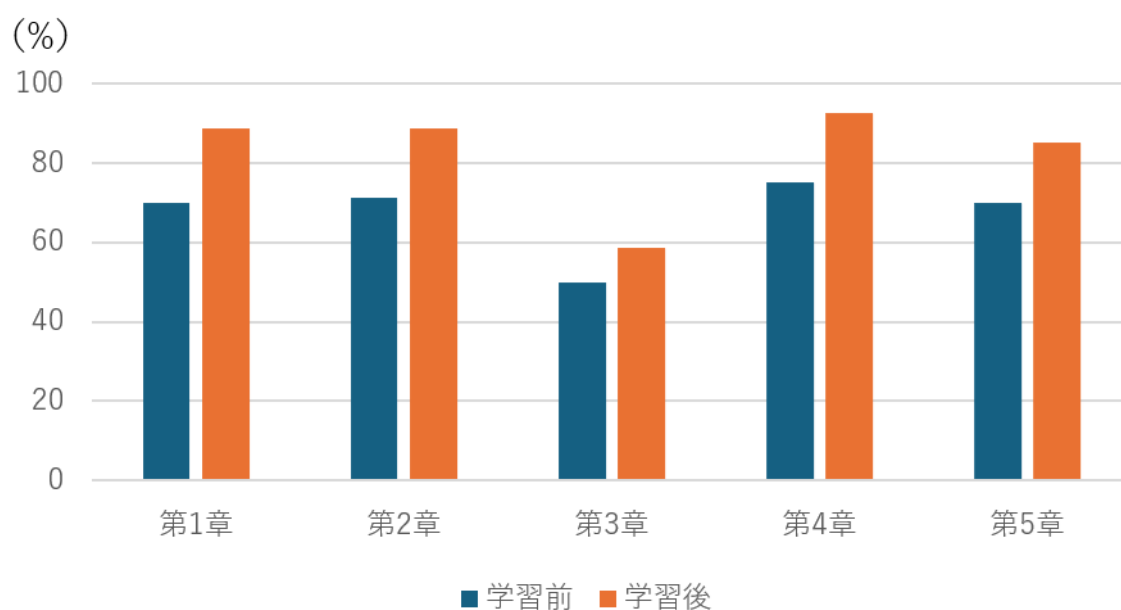


図 3.3-3 動画教材の確認テストの正答率比較

また、動画を学習することによる理解度についてのアンケート結果を図 3.3-4 に示す。さらに、確認テストの難易度に対するアンケート結果を図 3.3-5 に示す。

図 3.3-3 から、5 本の解説動画を学習することにより、いずれも学習前と比較して学習後の確認テストの正答率（％）が上昇した。このことから解説動画を学習することにより知識を取得できることが示唆された。なお、第 3 章については他の章より正答率が低い傾向があった。しかしながら、図 3.3-4 の動画学習による理解度の回答割合の結果から、第 3 章のみが特に理解が難しいという結果ではないことが示唆される。図 3.3-5 に示されるように、テストの難易度に関するアンケート結果からは、問題についてやや難しいと回答し

た割合は、第 3 章が最も高かったことから、第 3 章のテストの正答率が低い結果となったことが示唆される。一方で、やや易しいと回答した割合も第 3 章が最も多くなっていたため、特に初学者が学習する内容としては取っ付き難い可能性であることも考えられ、今後教材またはテストの改訂などの対応が必要かどうかの検討をすることが課題である。

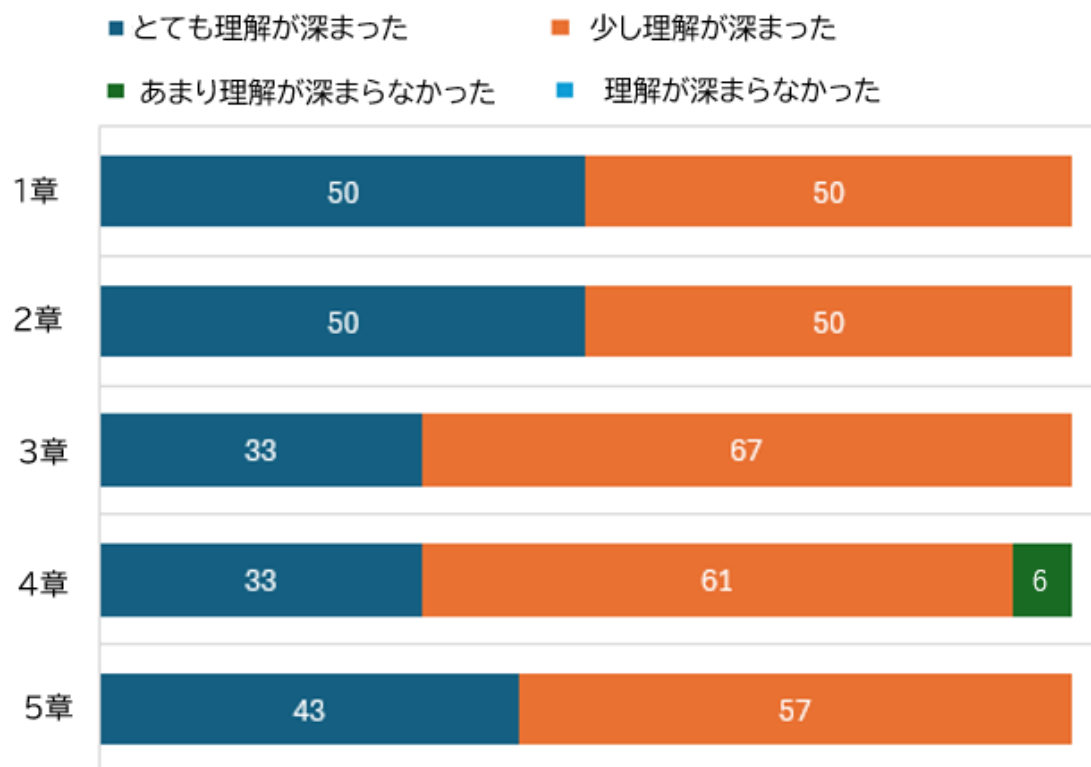


図 3.3-4 動画学習による理解度の回答割合 (%)

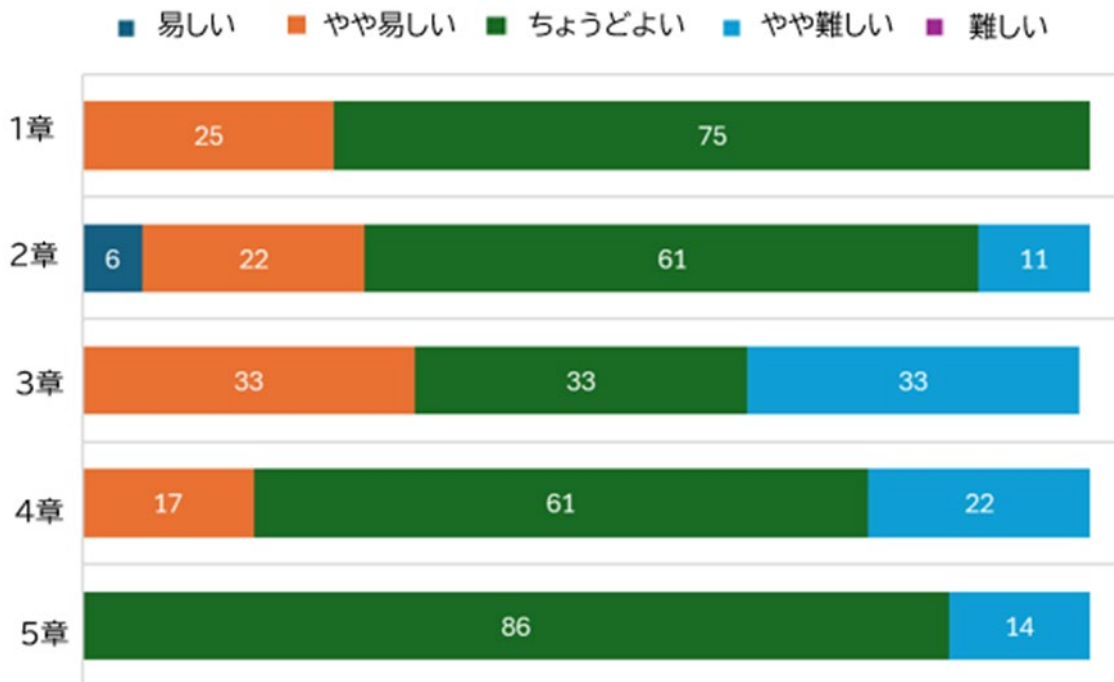


図 3.3-5 テスト難易度に関する回答割合（％）

また、アンケートにおいて回答があった、ユーザーレビューに対しての意見を以下に示す。

- ・ 第 1,2,4 章のユーザーテストを受けた者です。全体として、動画教材は大変有益なものと感じており、今回拝見することで勉強になることが多々ありました。一方で、効果測定のためのテストについて、以下のような事を感じました。①穴埋めの 3 択問題について、穴埋めの箇所が 1 個乃至 2 個理解できていれば回答出来る設問が多いです。②正誤問題について、教材を視聴した後であれば得た知識と照合することで回答出来るが、地層処分に関する理解度より言語的なリテラシーを求められるような設問になっていると感じます。③設問数の都合上、出題を変えられないのは仕方がないが、出題順をランダムにするだけでも事前テストを受けた記憶による点数への影響を抑えられると感じます。
- ・ レビュー期間が短い上にテストと動画が段階的に配布されるので、スケジュールがタイトに感じました。レビュー期間はもう少し長めにとった方が良いかと思います。
- ・ 動画教材ユーザーレビュー全体を通して、地層処分に関して理解を深めることができました。
- ・ 1 本の動画が長いので内容を分けて 5 ～ 10 分ぐらいの動画にしてもらえると助かります。
- ・ 動画教材であることを活用する映像やアニメーションなどを用いると、より理解・学習しやすい教材になるのでは。地層処分について、安全評価や規制基準など分野を横断する形での動画教材はあまりないので、このような取り組みは続けてほしい。
- ・ レビューについてのお願いに記載されている「紙面では伝えきれない内容を深掘りしたり、図表等について口頭での補足説明や視覚的に理解できるよう工夫する」に対応できているのか疑問に感じています。コンテンツの中身自体は第 2 次取りまとめや NUMO のパンフレットに掲載されているような図を貼って、それを読み上げ

ているだけだという印象を受けたためです。ハラスメントや個人情報などの研修でよく見かける動画教材とは、違う志向を目指して作られたのだと思うのですが、動画だからこそ伝えたい・伝わるという中身に向けて改善が必要だと思います。Netflix や Amazon prime にあるような海外のドキュメンタリー風の動画だと、多くの人に見て欲しいと伝えたいのですが、このような教材だとそれも難しいです。こうすれば良いという正解は持ち合わせていないのですが、視覚的な教材になっていないので、アニメーションや図などを新規に作成されて、それを説明する形はいかがでしょうか。

- ・ 1 回目テスト時には、選択肢で迷う回答がありましたが、本育成動画にて分かりやすい説明を見ることで、理解と知識が深まりました。不定期でも内容を思い出し確認できればと思います。
- ・ 全体として非常によい教材とを感じるが、強いて言えば以下の点で改善ができると思った。○動画が 1 本あたりの長さがやや長く感じる。ゆっくりな話し方は聞き取りやすく、理解しやすい一方、眠気が誘われる。○動画視聴の対象者にもよるが、初心者向けとしてはやや専門用語が多い印象。文字数も多い。図や写真をもう少し活用できないか。
- ・ 第 2 章、第 4 章、第 5 章を視聴し、経緯や概念については映像の方が学習しやすいと感じました。映像の記載やナレーションについて、地層処分の分野外の方は分からない用語が多用されているように思います。「例えば・・・」があると理解できると思います。
- ・ 1 本の動画が 20 分～30 分程度でまとめられおり、休み時間や空き時間に手軽に学べる点が良いと感じた。地層処分の歴史的背景などを学ぶことは少ないため、有用な教材であると感じた。

アンケートの結果から、動画教材として有用であるとの意見がいくつかあった。一方でスライドをナレーターが解説するだけとなっていることから、アニメーションなど動画という媒体を生かした視覚的演出などがあった方が良いとする意見もあった。昨年度と今年度作成した解説動画は主に歴史的経緯やどのように放射性廃棄物管理をしていくかの考え方など、概念的な内容が多かったため、ナレーターがスライドを解説する形式となったが、例えば地質環境や工学技術の内容を動画とする場合は現場や試験などの取材撮影を含めた動画を作成するような工夫をすることが考えられる。動画の長さについては 20～30 分でまとめられており手軽に学ぶことができるといった意見がある一方、5～10 分に分けた方が良いとする意見もあった。

また、テストについてはオンライン教材という特性上、記述式テストを取り入れることが難しいため、選択式・正誤式の問題のみとなっているが、キーワードを知っているかどうかという側面で回答ができる場合も多くなることから、オンライン教材でより内容を考えることができるテストの方法について検討することが今後の課題である。

(2) 動画教材の修正

ユーザーレビューの結果を踏まえ、必要に応じて動画の修正を行った。諸事情により、すでに撮影した動画のナレーション部分を修正することは難しかったため、基本的に動画中で用いているスライドを修正した。ナレーション部分で修正が望ましいと考えられる部分については、今後動画を公開するウェブページにおいて、補足説明を行うこととした。

3.3.5 E ラーニング教材の更新版の作成

ユーザーレビューの結果に基づいた動画修正後に、繰り返し学習が可能な動画教材を E ラーニングのコースとするために必要な作業を実施した。昨年度の E ラーニング教材試作版の検討において、E ラーニング教材として、解説動画を視聴し、その後に内容について確認テストを実施する構成としたが、その構成を踏襲し、今年度追加で作成した動画とその確認テストを追加する形で更新した。

まず、E ラーニング教材の背景等を説明するために、「はじめに」として受講者に示すページの作成を行った。この「はじめに」では、背景・目標、対象者（地層処分にに関する研究開発等の業務を行っている、若手の研究者・技術者、あるいはこれから地層処分の業務に携わっていく初心者の方を主な対象）を説明した。

次に受講者に対して、コースの全体像などを示すために、「コース概要」のページを作成した。「コース概要」では、学習する所要時間、前提知識、学習目標、修了条件を説明するようにした。また、確認テストについては 8 問中 5 問の正答で合格とすることとし、すべてのテストに合格することをコースの修了条件とした。

- | | |
|----------|--|
| ✓ 平均所要時間 | 3～4 時間 |
| ✓ 前提知識 | 大学の理工系学部卒業程度 |
| ✓ 学習目標 | 地層処分の基礎知識を身につける |
| ✓ 修了条件 | ・すべての動画を最後まで視聴する
・すべてのテストに 5 問以上正解し合格する |

上記のような内容、コース設定の E ラーニング教材の更新版を作成した（図 3.3-6）。今後は E ラーニング教材の活用先や方法を検討することが課題である。

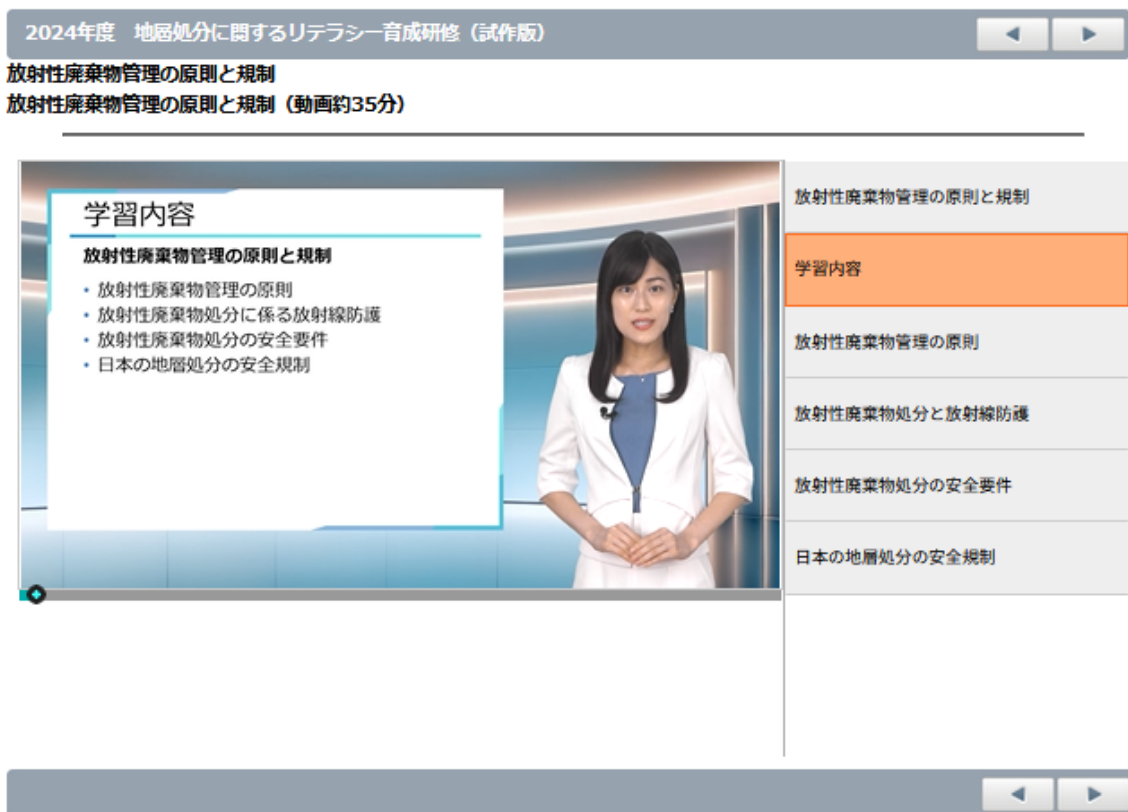


図 3.3-6 E ラーニング教材コースの画面イメージ

3.4 人材育成プログラムの実施・作成のまとめ

令和 6 年度の人材育成プログラムの実施・作成に関しては、主に以下の 2 つの内容を実施した。

- ① 人材育成セミナーの開催
- ② 繰り返し学習可能な動画教材（E ラーニング）の更新版の作成

今年度の人材育成セミナーに関しては、今後の地層処分分野を担う若手の研究者・技術者が、地層処分技術開発におけるその後のキャリア形成に役立つように、技術継承などの世代間の課題、海外の技術開発の経験、異分野の専門家との協働の重要性などを早い段階から経験・理解し、地層処分に関する視野を広げることを目標として企画した。具体的には「『地層処分技術の視野を広げよう!』～国際協力と分野間連携～」と題して、主に「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件」を題材としたグループワークや、海外の専門家による講演会などで構成されるセミナーを 3 日間の日程で開催した。セミナーには、22 名の専門分野が多岐にわたる受講者（モニター）が参加した。セミナーでは、閉鎖後長期の地質環境に求められる要件として、隆起・侵食、熱環境、水理場、力学場、化学場の 5 つの要件を取り上げ、処分場のサイトの比較、処分場の設置深度、処分場の設置場所について検討する内容のグループワークを実施した。また、グループワークを行う前に各要件についての基礎的な知識を提供するための座学を設けた。また、海外の地層処分の専門家による講演会では、若い世代に地層処分事業に興味を持ってもらうための取り組み、世代を超えた知識の共有と人材育成を進めるための仕組みづくり、さらに地層処分事業における情報公開と対話活動の重要性などについて聴講し、それに基づきグループディスカッションを行った。さらに、グループワークのための基礎的な知識の提供の一環として、地層処分技術の最もベースとなる安全確保・セーフティケース等の概要について学習するために、何故地層処分なのか、どのように安全性を示すか、に関する座学を実施した。この座学については昨年度作成した動画教材を活用し、教材の学習効果を検証する目的でも行った。

セミナーのアンケート結果からは、異分野の専門家、外部組織の研究者・技術者と議論することで受講者からは視野が広がった、機会があればまた参加したいという意見があり、今回の人材育成セミナーの企画の狙いについて概ね期待通りの成果が得られたと考えられる。一方で、アンケートではグループワークの時間を多くして欲しいという受講者の意見

や、スキルアップ研究会の委員からはセーフティケース等の基礎的な知識について個別テーマを取り上げる前にインプットする必要があるとの意見もあるため、セミナー構成のブラッシュアップを今後も継続することが課題である。また、2019年度から実施している人材育成セミナーにおいて、工学技術の内容を題材としたセミナーは十分には実施できていないため、工学技術の内容を題材としたセミナーの開発が課題である。

繰り返し学習可能な動画教材（E ラーニング）の更新版の作成に関しては、地層処分に関する広範な知識を獲得するために昨年度作成した地層処分に関する 3 本の解説動画に加えて新たに 2 本の解説動画を作成した。また、作成した合計 5 本の解説動画とそれぞれの動画を対象とした確認テストについて、関係機関等の若手研究者・技術者 19 名を対象として、動画教材の学びやすさや使いやすさなど、学習者の声を集めるためのユーザーレビューを実施した。レビューに対するアンケート結果や教材の学習前後での確認テストの結果を分析した結果、解説動画を学習することにより地層処分に関する基礎知識が高まったことが確認できた。また、レビューにおける意見等を踏まえて解説動画の修正を行い、E ラーニング教材の更新版を作成した。

今後は、昨年度と今年度において作成した E ラーニング教材の活用方法の検討などを行っていくことが課題である。

参考資料

- [1] 地層処分研究開発調整会議、「地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～平成 34 年度）」（平成 30 年 3 月）
- [2] 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（令和 5 年度～平成 9 年度）」（令和 5 年 3 月）
- [3] NUMO（原子力発電環境整備機構）（2021）：包括的技術報告書：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－，NUMO-TR-20-03.

別添資料 1

(各実施研究の 2024 年度報告)

研究報告 1 フライアッシュ混合セメントの利用における環境影響物質の溶出と不溶化
に関する基礎的研究 [研究者：東北大学 関 亜美]

研究報告 2 地層処分の地下水質・温度履歴を模擬した環境におけるベントナイト系緩衝
材の水分移動特性および膨潤特性の実験的評価 [研究者：早稲田大学 阮
坤林]

研究報告 3 透過波による岩盤モニタリングを目指した弾性波と地盤の不均質性の関係
評価 [研究者：京都大学 吉光 奈奈]

研究報告 4 地下環境の透水性イメージング・モニタリングに資する岩石物理モデルの構
築 [研究者：京都大学 澤山 和貴]

研究報告 5 放射性核種の超長期安定固化に向けた次世代型シンロック固化技術の開発
[研究者：岡山理科大学 牧 涼介]

研究報告 6 分散型台帳技術と機械学習を用いた先進的地層処分場設計スキームの構築
[研究者：東京科学大学 岡村 知拓]

研究報告 7 広域応力場を考慮した流体供給源周辺の応力場のモデル化 [研究者：日本
原子力研究開発機構 安邊 啓明]

研究報告 1

フライアッシュ混合セメントの利用における環境 影響物質の溶出と不溶化に関する基礎的研究

東北大学 大学院工学研究科

関 亜美

【目次】

1. 背景・目的	1
2. 全体研究計画（3 ヶ年における全体計画）	2
2.1 課題設定	2
2.2 各年度の計画	3
3. 2023 年度の成果概要	6
4. 2024 年度研究実施内容	8
4.1 2024 年度の計画，実施方法	8
4.1.1 FA の浸漬試験	8
4.1.2 FA への IO_3^- または SeO_4^{2-} の収着実験	9
4.1.3 セメント混合試料の浸漬試験	9
4.2 2024 年度の成果内容	10
4.2.1 FA の浸漬試験における液相の pH および有害成分濃度	10
4.2.2 FA と陰イオン核種（ IO_3^- , SeO_4^{2-} ）との相互作用	14
4.2.3 セメント混合試料における浸漬試験結果	16
5. まとめ	24

参考文献

2024 年度外部発表

1. 背景・目的

地層処分場の構築に使用されるセメント系材料の一つとして、石炭火力発電における副産物であるフライアッシュ（以下、FA）を混合した FA セメントや低アルカリ性セメントの適用が検討されている。これらの FA 混合セメント（以下、FAC）は、一般的な構造物に多用される普通ポルトランドセメント（OPC）に比べて周辺地下水の pH 上昇を 8~11 程度に抑制できるほか、長期的強度の増大、施工性の向上、セメント製造時の CO₂ 排出量の削減などの利点を有する。一方、FA は石炭由来の第二種特定有害物質（重金属等）を含有しており、これらが土壌汚染対策法の基準値を超過して溶出する可能性が指摘されている。地層処分システムの性能評価において、FA などの建設材料に起因する環境影響物質を対象とした安全性の評価は、処分場の環境調和および社会的受容の観点から非常に重要である。そこで本研究では、FA が含有する環境影響物質の中でも、土壌汚染対策法の基準値を超過して溶出することが報告されている六価クロム(Cr(VI))、砒素(As)、セレン(Se)、ふっ素(F)、ほう素(B)の 5 成分（以下、有害成分と呼称）に着目し、FA 単体、および FA に OPC や高炉セメントを混合した FAC からの溶出特性を評価するとともに、基準値に対して有意な溶出が認められた成分の不溶化方策を検討する。また、FA および FAC の環境影響評価には、従来、法令や JIS 規格に基づき純水へ 6 時間浸漬する試験が用いられている。本研究では従来の試験方法を基本とし、浸漬溶液として地層処分場の高アルカリ環境や塩水環境を考慮したセメント成分や NaCl を含む溶液を用いるとともに、浸漬期間を従来試験と比べて長く設定することにより、各条件における有害成分の溶出、ならびに、FA および FAC の変質挙動を検討する。これにより、FA を混合したセメント系材料を建設材料として用いた場合においても、地層処分システムの環境安全性を示すことを目指す。

他方、地層処分システムの性能評価においては、セメント系材料には核種収着によるバリア材としての機能が期待される。本研究では、岩盤に収着されにくく被ばく線量評価への寄与が大きいヨウ素 (I-129, 半減期 1.6×10^7 年) およびセレン (Se-79, 半減期 3.0×10^5 年) を対象として、FA および FAC との相互作用を検討する。セメント系材料とこれら陰イオン核種との相互作用としては、これまで I についてはセメント中の主成分である C-S-H に着目した研究[1]や FAC 中の拡散係数の評価[2]があるが、FA の変質過程を考慮した相互作用に関する詳細な検討例は見当たらない。FAC と陰イオン核種との相互作用が確認できれば、FA をセメント代替材料として用いる際の更なる付加価値となり、本研究で得られる知

見は、FA 由来の環境影響物質対策のみならず地層処分システムの性能向上にも資すると言える。

以上、本研究では、産業副産物である FA が含有する有害成分の溶出挙動や不溶化メカニズム、また FA による核種収着効果を明らかにし、地層処分システムへの FA 適用に際し課題となる環境安全性を担保しつつ、さらなるバリア性能の向上を示すことを目的とする。

2. 全体研究計画（3 カ年における全体計画）

2.1 課題設定

上記の目的を達成するため、本研究では以下の 4 つの研究課題を設定した。各研究課題の実施内容を以下に示す。

課題 1：FA からの有害成分の溶出特性、および、FA 変質挙動の評価

FA を所定溶液に浸漬する試験により有害成分の溶出特性を評価するとともに、FA の変質挙動を追跡する。浸漬試験は一般的な環境省告示 18 号（粒径 2 mm 以下、液固比 10, 6 時間往復振盪）を準用し、pH ならびに各成分の溶出量を評価するとともに、浸漬期間、浸漬溶液、浸漬温度をパラメータとする。

課題 2：FAC からの有害成分の溶出特性、および、FAC 変質挙動の評価

FA に混合するセメント系材料の種類（高炉セメント、OPC）および配合比をパラメータとして供試体を作製し、浸漬試験により有害成分の溶出特性、および、これらの材料の変質挙動を評価する。浸漬試験は、FAC の環境影響評価として提示されている環境省告示 18 号を準用し、課題 1 と同様に浸漬期間、浸漬溶液、浸漬温度をパラメータとする。

課題 3：溶出しやすい有害成分に対する不溶化方策の検討

課題 2 により溶出量基準を超過して溶出する可能性が認められた成分については、処分環境やセメント配合等を考慮した適切な不溶化方策を検討する。本研究における溶出量基準は、土壤汚染対策法の溶出量基準を準用し、Cr(VI) 0.02 mg/L, As 0.01 mg/L, Se 0.01 mg/L, F 0.8 mg/L, B 1 mg/L とする。なお、Cr(VI)の溶出基準については、現行の土壤汚

染対策法に基づく溶出量基準は 0.05 mg/L であるが、2020 年 4 月に水道水質基準、2022 年 4 月に水質環境基準および地下水環境基準が 0.02 mg/L に見直されたことを受け、いずれも土壌汚染対策法の溶出量基準も見直されることを考慮し、0.02 mg/L を基準とする。

課題 4：FAC と陰イオン核種との相互作用の検討

地層処分システムの性能評価において重要核種とされている I および Se について、FAC との相互作用を検討する。本研究で着目する FA 中の有害成分はいずれも陰イオン形態での溶出が想定され、課題 3 により FAC 中の有害成分の不溶化が達成できれば、添加する陰イオン核種についても相互作用が見込めると考えている。

2.2 各年度の計画

(1) 2023 年度（2023 年 9 月頃～2024 年 3 月）実施計画

2023 年度は FA 単体（セメントを混合しない試料）を用い、課題 1、課題 3、および課題 4 に着手する。

課題 1 について、Seki ら[3]はこれまで、製造施設や製造日などによって FA の化学組成などが異なることを報告しており、本研究では入手した FA の基本特性を評価した上で、化学的性質のばらつきを考慮した 3 試料を選定する。浸漬試験では、従来の環境省告示 18 号による純水に浸漬し 6 時間振盪する条件に加え、浸漬期間をパラメータとし、1 時間から最長 1 ヶ月程度に設定する。浸漬試験時の温度は 25℃とする。これにより、FA 粒子の溶解や有害成分の溶出のみならず、有害成分を含む二次化合物の生成による濃度変化など経時的な変化を観察する。液相中の各成分濃度の測定は、全量 Cr（以下、T-Cr）、As、Se は ICP-MS、Cr(VI)はジフェニルカルバジド吸光光度法、F はイオンクロマトグラフィー（以下、IC）、B および主要成分は ICP-OES を用いる。浸漬試験前後の固相については、真空デシケータにて乾燥後、X 線回折装置による含有鉱物の同定や SEM-EDS による表面観察を行う。

課題 3 について、Ogawa ら[4, 5]は、FA に対して少量の水を添加して 1 週間静置し養生する操作（以下、エージング）により FA 中の有害成分の溶出が一部抑制され、その溶出抑制の程度は FA が含有する CaO の寄与が大きいことを報告している。さらに Seki ら[6]は、FA にセメントを混合することで Ca が豊富な環境となり、As および Se の溶出が顕著に抑制されることを報告している。本研究ではこれらの既報を参考に、エージングや CaO 添加

による有害成分の溶出抑制の程度を評価する。

課題 4 について、地層処分場の構築におけるセメント利用により、処分場周辺は高アルカリ環境となること、および地下は還元雰囲気であることを考慮し、当該年度は I と Se の形態として想定される I および SeO_3^{2-} と FA との相互作用を検討する。また、実際の処分環境において FA はセメントと混合して使用されることを想定し、FA に CaO を添加した条件についても検討する。

(2) 2024 年度（2024 年 4 月頃～2025 年 3 月）実施計画

当該年度は、前半（4 月～9 月）は 2023 年度の継続として FA を用いた課題 1 および課題 4 を実施し、後半（10 月～3 月）は FA とセメントを混合した FAC を用いた課題 2 および課題 4 に着手する。

課題 1 について、当該年度は FA の変質挙動に大きく影響すると予想される浸漬溶液および温度をパラメータとした浸漬試験を実施する。浸漬溶液は、地層処分における高アルカリ環境や塩水環境を想定し、NaOH 溶液および NaCl 溶液を用いる。温度については、地層処分における廃棄体の発熱の影響や地下の地温勾配を考慮し、2023 年度の 25℃に加えて 50℃に設定する。

課題 4 については、硫酸塩鉱物や水の放射線分解等による局所的な酸化雰囲気を考慮し、 IO_3^- および SeO_4^{2-} と FA との相互作用を検討する。

10 月以降に着手する課題 2 については、Seki らの報告[6]を参考に、FA に対して 15 wt% の高炉セメント B 種（高炉スラグ置換率 30～60%）、および、加水量約 30 wt%（水が滲み、泥ねい化しない程度）となるように水を添加し、練り混ぜた後に突き固めることで FAC の供試体を作製する。供試体はラップで包みポリ袋にて密閉することで空気との接触を避け、28 日間静置養生する。浸漬試験は、より保守的な試験方法として環境省告示 18 号（2 mm 以下に粉碎）を採用し、さらに当該年度は浸漬期間をパラメータとして最長 1 ヶ月程度に設定し経時的な変化を追跡する。浸漬試験における液相中の溶存成分濃度の測定や固相分析については、課題 1（2023 年度計画）と同様に実施する。

(3) 2025 年度（2025 年 4 月～2026 年 3 月）実施計画

当該年度は、課題 2 および課題 4 について 2024 年度から継続実施するとともに、課題 3 に着手する。

課題 2 については、2024 年度に続き FAC の供試体に対して浸漬溶液および温度をパラメータとして浸漬試験を実施する。課題 1 と同様に、浸漬溶液は地層処分における高アルカリ環境や塩水環境を想定し、NaOH 溶液および NaCl 溶液を用いる。温度については、地層処分における廃棄体の発熱の影響や地下の地温勾配を考慮し、50℃に設定する。また、混合するセメントには、2024 年度に用いる高炉セメント B 種に加えて、高炉セメント C 種（高炉スラグ置換率 60～70%）および OPC を用い、セメントの種類や配合比をパラメータとした試験を実施する。

課題 3 では、課題 2 にて扱う FAC に対して、土壤汚染対策法の溶出量基準を準用し不溶化対応の必要性を検討する。有害成分の不溶化の方針として、As と Se については FA に高炉セメント B 種を 15 wt%混合する条件において Ca 化合物や Ca を含む二次鉱物の生成によって不溶化されることを確認しており[6]、既往知見以外の種々のセメント混合条件においても不溶化が可能であると見込んでいる。B と F についても Ca 化合物の生成が知られており、セメント混合による不溶化が期待できる。一方、Cr(VI)は OPC にも微量に含有するため、FAC ではより高濃度に溶出する可能性が考えられる。この Cr(VI)については、モノサルフェート相による固定化が報告されている[7]ほか、本研究に先立ち実施した予備試験より、FA に還元剤として硫酸鉄または硫酸ナトリウム 0.12 wt%を添加し、純水 40 wt%を混合してエージングすることで Cr(VI)が Cr(III)に還元され安定化することを確認しており、処分環境の還元雰囲気かつセメント成分が共存する条件においても安定化することが見込まれる。これらにより、本研究で着目する有害成分の不溶化方策を確立するとともにそのメカニズムを解明し、適切なセメント配合条件を検討する。

(4) 2026 年度（2026 年 4 月～2026 年 9 月）実施計画

最終年度である 2026 年度は、2025 年度実施計画に記載の事項を継続するとともに、得られた結果を系統的に整理する。これらに基づき、FA が含有する有害成分の溶出対策としての最適条件を提示するとともに、建設材料として FAC を適用した場合における地層処分システムの環境安全性や核種移行抑制効果を示すことを目指す。

3. 2023 年度の成果概要

2023 年度は予察的な検討として、セメントを混合しない FA 単体を対象として試験を実施した。入手した FA 試料 10 種類の粒径分布、化学組成、6 時間浸漬試験による溶出液の pH および各成分の溶出量を評価し、基礎的な化学特性を取得するとともに、以降の実験に用いる試料として、性質のばらつきを考慮した 3 試料を選定した。最大 28 日間の浸漬試験により、液相中の pH, Eh, および溶存成分濃度の経時変化を追跡するとともに、既報[6]を参考にエージングおよび CaO 添加による有害成分の不溶化試験を実施した。加えて、FA と陰イオン核種との相互作用の検討として、I⁻および SeO₃²⁻を用いて、FA に CaO を添加する条件において NaI 1 mM または Na₂SeO₃ 1 μM, 1 mM 溶液を浸漬溶液として用いて振盪養生することで、収着実験を実施した。

FA 試料 10 種類の粒径および化学組成分析では、本研究の FA 試料が一般的な FA[8]と同様の粒径および化学特性であることを確認した。また、全量 Cr(T-Cr), As, Se の含有量は、土壤汚染対策法の含有量基準値 (Cr(VI) 250 mg/kg, As 150 mg/kg, Se 150 mg/kg) を下回っていることを確認した。6 時間浸漬試験では、溶出液の pH は試料によって異なり、6.50~11.87 と幅が見られた。有害成分の溶出量は、溶出量基準 (Cr(VI) 0.02 mg/L, As 0.01 mg/L, Se 0.01 mg/L, F 0.80 mg/L, B 1.0 mg/L) と比較すると、いずれの成分においても半数以上の試料で基準値を超過した溶出が見られた。これらの結果から、FA の性質のばらつきを考慮し、以降の実験では pH 6, 9, 12 (順に FA 3, FA 8, FA 10) を示す 3 試料を用いることとした。表 1 にこれら 3 試料の化学組成を示す。

表 1 FA3, FA8, FA10 試料の化学組成

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	Ig. loss	T-Cr	As	Se*
	(%)										mg/kg		
FA3	70.1	19.2	0.4	0.4	0.1	1.2	0.8	0.1	3.1	3.6	48.1	9.7	0.04
FA8	64.9	19.3	1.3	0.7	0.2	0.9	1.0	0.2	4.2	4.0	99.7	22.4	0.46
FA10	55.9	21.9	2.6	1.5	0.3	1.3	1.0	0.2	4.7	7.3	104.9	9.8	0.17

*Se の分析結果は参考値として掲載している。

続いて、28 日間の浸漬試験における経時変化より、液相の pH は環境省告示 18 号試験で定められる溶出時間である 6 時間以降ほぼ変化しないのに対して、液相中の有害成分の濃度は一部 6 時間以降も変化し続け、その挙動についても FA 試料や成分毎に異なっていた。

FA を構成する主要成分濃度の経時変化も踏まえると、本研究における Cr(VI), As, Se, B の濃度変化は主に、FA 粒子を構成する Si, Al, Fe 酸化物への吸着および脱着に加え、pH 11 以上で生成する ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) への取り込みが寄与していることが示唆された。

エージングおよび CaO 添加による有害成分不溶化の検討では、成分によってその効果の程度は異なるものの、不溶化効果は CaO 添加およびエージング（1 週間静置養生）の条件で最も大きく、続いて CaO 添加後 1 週間振盪養生、エージング（CaO 不添加）の順となる傾向が見られた（結果の一例として図 1(a)に溶出 Se 濃度を示す）。CaO 添加によって有害成分の不溶化効果が増大したことは、pH が 11 以上となったことや、液相中の Al および SO_4^{2-} の濃度が低下したこと、および、図 1(b)に示す SEM 像からも、前述の溶出メカニズムと同様に ettringite の生成が寄与している可能性が示された。

陰イオン核種の収着実験では、I-に関しては FA や CaO との有意な相互作用は認められず、FA による I-収着は期待できないことが示された。一方で SeO_3^{2-} については、1 mM の条件では FA のみの条件においても液相中の濃度が低下し、さらに CaO を添加することで顕著な濃度低下が見られており、 CaSeO_3 の溶解度積 ($\text{p}K_{\text{sp}}=7.27[9]$) を考慮すれば、 CaSeO_3 の沈殿生成によるものと考えられる。 CaSeO_3 の溶解度積を下回る $1 \mu\text{M}$ の条件では、FA と CaO 混合により液相中の SeO_3^{2-} 濃度が顕著に低減し、その相互作用の可能性が示された。

以上のことから、2023 年度に実施した予察的検討により、地層処分場における FA のセメント利用は、セメントにより供給される Ca によって FA 中の有害成分の溶出が抑制されることに加え、重要核種である Se の収着にも寄与する可能性が示された。

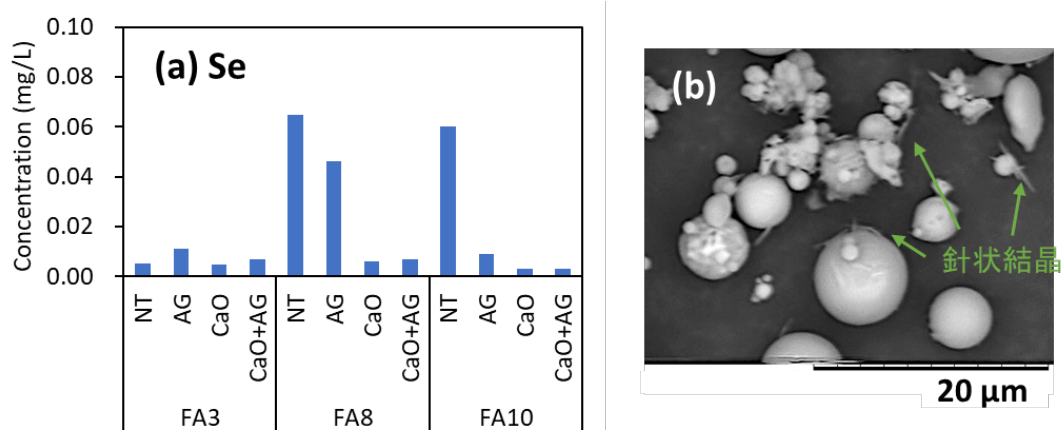


図 1 (a) 未処理(NT), エージング(AG), および CaO 添加条件における液相中の Se 濃度,

(b) CaO 添加後の FA10 の SEM 写真

4. 2024 年度研究実施内容

4.1 2024 年度の計画, 実施方法

本年度は, 2023 年度に実施した FA 単体を用いた浸漬試験に続き, FA の変質挙動に大きく影響すると予想される浸漬溶液および温度をパラメータとした浸漬試験(課題 1 に該当)を実施した. また, 課題 4 の陰イオン核種との相互作用について, 2023 年度に実施した I^- および SeO_3^{2-} を対象とした収着実験に続き, 地層処分場周辺における岩盤中の硫酸塩鉱物や水の放射線分解等により局所的に酸化性雰囲気となることを想定し, IO_3^- および SeO_4^{2-} を用いた収着実験を実施した.

また, 課題 2 のセメント混合試料による評価は, Seki らの報告[6]を参考に, 本年度は FA に対して高炉セメント B 種を 15 wt%, 含水比 約 30 wt% となるように水を混合して突き固め, 28 日間養生した供試体を用いて浸漬試験を行った. 以下にこれらの試験手順を記す.

4.1.1 FA の浸漬試験

FA 単体を用いた浸漬試験は, 浸漬溶液に超純水を用いた 2023 年度実施の試験(環境省告示第 18 号)を基本として, 浸漬溶液および温度をパラメータとした. 浸漬溶液には, 地層処分場周辺の高アルカリ環境や塩水環境を想定し, NaOH , KOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液および NaCl 溶液を用いた. 濃度はそれぞれ, NaOH および KOH については pH 12 および 13 となるよう 10 mM および 100 mM とし, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は pH 12 となる 5 mM とした. NaCl については, 海水を参考に NaCl 濃度 600 mM とした. 温度については, 地層処分における廃棄体発熱や地下の地温勾配を考慮し, 50°C に設定した.

浸漬試験試料は, FA 3.00 g と前述の浸漬溶液または比較として超純水 30 mL (液固比 10 mL/g) を 42 mL の PC 製梨型沈澱管 (Nalgene オークリッジ) に入れた. 浸漬期間中は, 恒温振盪器 (FMC-1000, MULTI SHAKER MMS, EYELA) に水平方向に設置し, 温度 50°C, 振盪幅 40 mm, 振盪速度 200 回/分の条件で 1 週間振盪した. 浸漬期間経過後, 遠心分離機 (H-201F, 株式会社コクサン) を用いて 3300 rpm で 20 分間遠心分離し, 上澄み液を 0.45 μm の親水性ナイロンシリンジフィルター (SLNY0445N, 日本ジェネティクス株式会社) で濾過して各分析に供した. 液相の pH は, ガラス電極式水素イオン濃度指標計 (MM-60R, 東亜 DKK) を用いて測定した. 液相中の各成分の濃度は, 液相を 10 倍希釈および 3%硝酸酸性とし, ICP-OES (Avio 550, PerkinElmer) により B, Si, Al, Ca, Na, K,

S, Fe, Ti を, ICP-MS (Agilent 8800, Agilent Technologies) により Cr, As, Se (参考として Cu, Zn, Cd, Pb, Hg) の測定を行った. ここで, ICP-MS による Cr, As, Se の分析は, Ar や試料マトリクスによる質量干渉を防ぐため, ^{52}Cr は He ガスを用いたコリジョンモード, ^{75}As および ^{78}Se は H_2 ガスを用いたリアクションモードを用いた. Cr(VI)の濃度は, JIS K0102 65.2.1 に定める「ジフェニルカルバジド吸光光度法」に準じて測定した. 試料溶液 8 mL と 1.0 M の H_2SO_4 溶液 1 mL を 10 mL メスフラスコに入れ, さらにジフェニルカルバジド溶液 (ジフェニルカルバジド 0.1 g をアセトン 5 mL に溶解し, 超純水で 10 mL に定容, 測定当日に調製) 200 μL を加え直ちに振り混ぜた後, 超純水で 10 mL に定容して 5 分間静置し, 吸光度測定用のマイクロプレートに 200 μL ずつ移した. 吸光度は, マルチモードマイクロプレートリーダー (Varioskan LUX, Thermo Fisher Scientific) を用いて波長 540 nm で測定した. F の濃度は, 液相を超純水で 10 倍希釈し, 陰イオン測定用カラム (Metrosep A Supp 7-250/4.0) を搭載した IC (930 Compact IC Flex, Metrohm) を用いて測定した. IC では, 参考として PO_4^{3-} および SO_4^{2-} の濃度も測定した.

4.1.2 FA への IO_3^- または SeO_4^{2-} の収着実験

陰イオン核種の収着実験は, 安定同位体の NaIO_3 溶液および Na_2SeO_4 溶液を用いた. FA 3.00 g を 42 mL の梨型沈澱管に入れ, 0.5 mM の NaIO_3 溶液または 1 mM の Na_2SeO_4 30 mL を加え, 恒温振盪器に水平方向に設置して 25°C , 200 回/分にて 1 週間連続振盪した. また, セメント混合を想定した CaO を添加する条件では, FA 3.00 g と CaO 0.15 g (FA に対して 5 wt%) を 42 mL の梨型沈澱管に入れ, 同様に NaIO_3 溶液または Na_2SeO_4 溶液 30 mL を添加して 1 週間振盪した. 振盪後は「4.1.1 FA の浸漬試験」と同様に, 遠心分離とフィルター濾過を行い, 液相の pH 測定を行うとともに, ICP-OES および IC を用いて溶存成分濃度を測定した. なお, IO_3^- については, イオンクロマトグラムにおいて F のピーク干渉が見られたため, IC により形態を確認しつつ, ICP-OES を用いて定量した.

4.1.3 セメント混合試料の浸漬試験

セメント混合試料は, FA 300 g と高炉セメント B 種 45 g (FA に対して 15 wt%), 後述の予備試験により決定した約 30 wt% 程度の超純水を, アルミビーターを取り付けた卓上ミキサー (愛工舎製作所) で混合した. 加水量は, 「JIS K 1210:2020 突固めによる土の締固め試験方法」に準じた予備試験により決定した最適含水比より, 水が滲んで泥ねい化しない

程度 (FA 3: 32 wt%, FA 8: 34 wt%, FA 10: 27 wt%) とした。卓上ミキサーによる混合は、30 秒、30 秒、2 分、2 分の計 5 分間とし、各回の間はヘラを用いて手動で試料を均一化した。その後、 $\phi 50 \times 100$ mm のカラー付モールド (株式会社マルイ) と 1.5 kg、落下高 20 cm のセメント系固化材締固め用ランマー (株式会社マルイ) を用いて、突固めエネルギー (E) 550 kJ/m³ および 3 層の条件で突固め、得られた供試体をラップおよびチャック付きポリ袋に封入して 25°C で 28 日間静置養生した。養生後は、供試体をハンマーで粉砕して 24 時間風乾し、粒径 2 mm 以下に篩分けした試料を浸漬試験に用いた。

浸漬試験は、本年度は浸漬期間をパラメータとし、最長 28 日間に亘り経時変化を追跡した。FA 3.00 g と超純水 30 mL を 42 mL の梨型沈澱管に入れた試料を各 8 本用意し、恒温振盪器に水平方向に設置して 25°C、振盪幅 40 mm、振盪速度 200 回/分の条件で 1, 3, 6, 24 時間、3, 7, 14, 28 日間浸漬した。浸漬後は「4.1.1 FA の浸漬試験」と同様に、遠心分離とフィルター濾過を行い、液相の pH 測定を行うとともに、ICP-MS, ICP-OES, IC, および吸光光度計を用いて溶存成分濃度を測定した。固相については、シリカゲルを入れた真空デシケータで乾燥後、めのう乳鉢を用いて粉砕し、X 線回折装置 (Miniflex, Rigaku) を用いて X 線回折パターンを取得し、相同定ソフト Match! (Crystal Impact) を用いて含有鉱物を同定した。

4.2 2024 年度の成果内容

4.2.1 FA の浸漬試験における液相の pH および有害成分濃度

各浸漬試験における液相の pH を図 2 に示す。pH は、超純水 25°C の条件に比べて、温度および NaCl 溶液による変化はほぼ見られなかった。Ca(OH)₂, NaOH 10 mM, および KOH 10 mM 溶液の条件では、超純水の場合と比較すると FA 試料によってその変化の程度が異なり、特に超純水では pH 12 を示した FA10 ではいずれも変化が見られなかった。表 1 に示した試料の組成より、FA10 はアルカリ成分の中でも特に CaO 含有量が FA3 および FA8 に比べて大きい試料であるため、Ca(OH)₂ 5 mM, NaOH 10 mM, および KOH 10 mM 溶液のような pH 12 程度を示すアルカリ溶液による pH 変化が起こりにくかったと考えられる。一方で NaOH 100 mM および KOH 100 mM 溶液では、いずれの FA 試料においても pH 13 を示した。

次に、液相中に溶出した有害成分濃度を図 3 に、主要成分として Si, Mg, Al, Ca の濃度を図 4 に示す。図 3 より、有害成分の濃度は、いずれの FA 試料および成分においても温度に

よる影響はほぼ見られず、また NaCl および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液条件においても有害成分の溶出が顕著に促進されるような挙動は見られなかった。一方で pH 13 を示した NaOH 100 mM および KOH 100 mM 溶液ではいずれも有害成分の溶出量が増大する挙動が見られ、溶出量基準値 (B : 1 mg/L, F : 0.8 mg/L, As : 0.01 mg/L, Se : 0.01 mg/L, Cr(VI) : 0.02 mg/L) と比較してもほとんどの成分が基準値を超過する結果となった。これは、図 4 より NaOH 100 mM および KOH 100 mM 溶液では液相中の Si および Al 濃度が高くなっていたことから、pH 13 の高アルカリ条件では FA 粒子を構成するシリカやアルミノケイ酸塩の溶解が促進され、粒子表面に存在していた有害成分の溶出量も大きくなったことが考えられる。他方、図 4 の Ca 濃度より、NaOH 100 mM および KOH 100 mM では Ca は概ね固相側に存在しており、これは pH 12.5 以上で生成するポルトランドイト ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) の沈殿生成が示唆される。また、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 5 mM を用いた浸漬試験では、液相の pH は超純水の場合と比較して FA3 のみ pH 6 から pH 10 まで上昇した。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 5 mM の条件において FA3 は液相に残存した Ca 量が最も少なく、表 1 から CaO 含有量が最も少ない試料であるため、より多くの Ca が固相に取り込まれたことを示している。一方で 2023 年度に実施した FA に CaO を添加した条件における有害成分の溶出量[10]と比較すると FA3 からの溶出量はいずれも大きく、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 5 mM では有害成分の固定化が顕著に認められるほどの Ca 量ではなかったと言える。

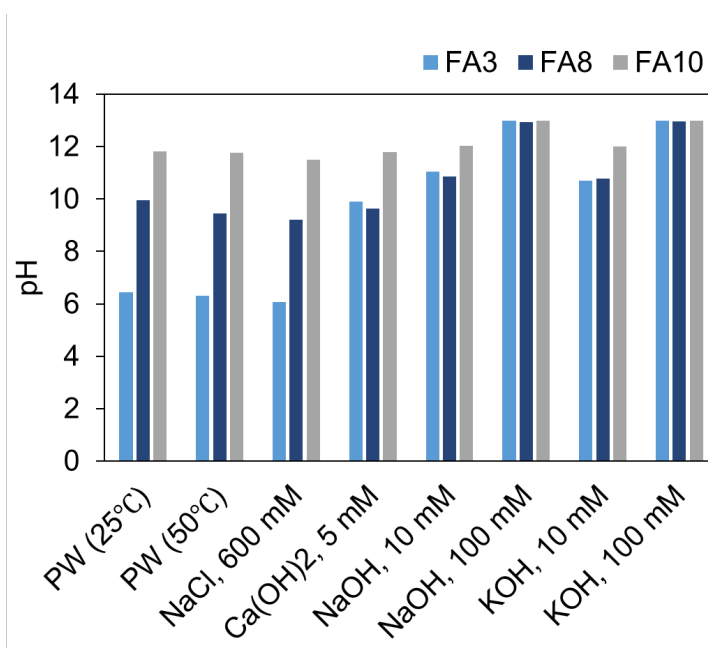


図 2 FA の浸漬試験における液相の pH (図中の PW は超純水を意味する.)

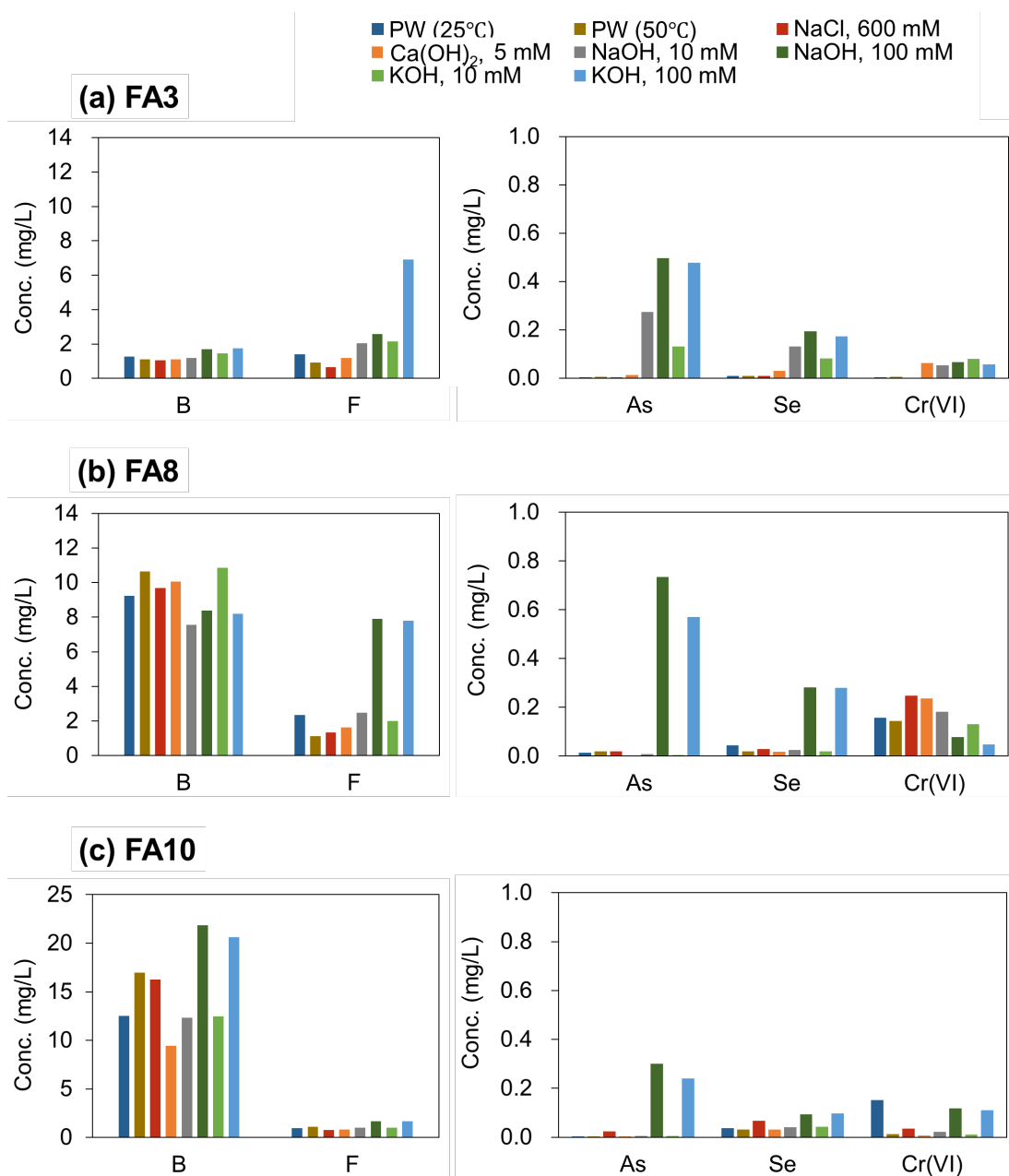


図 3 浸漬試験における液相中の有害成分 (B, F, As, Se, Cr(VI)) 濃度

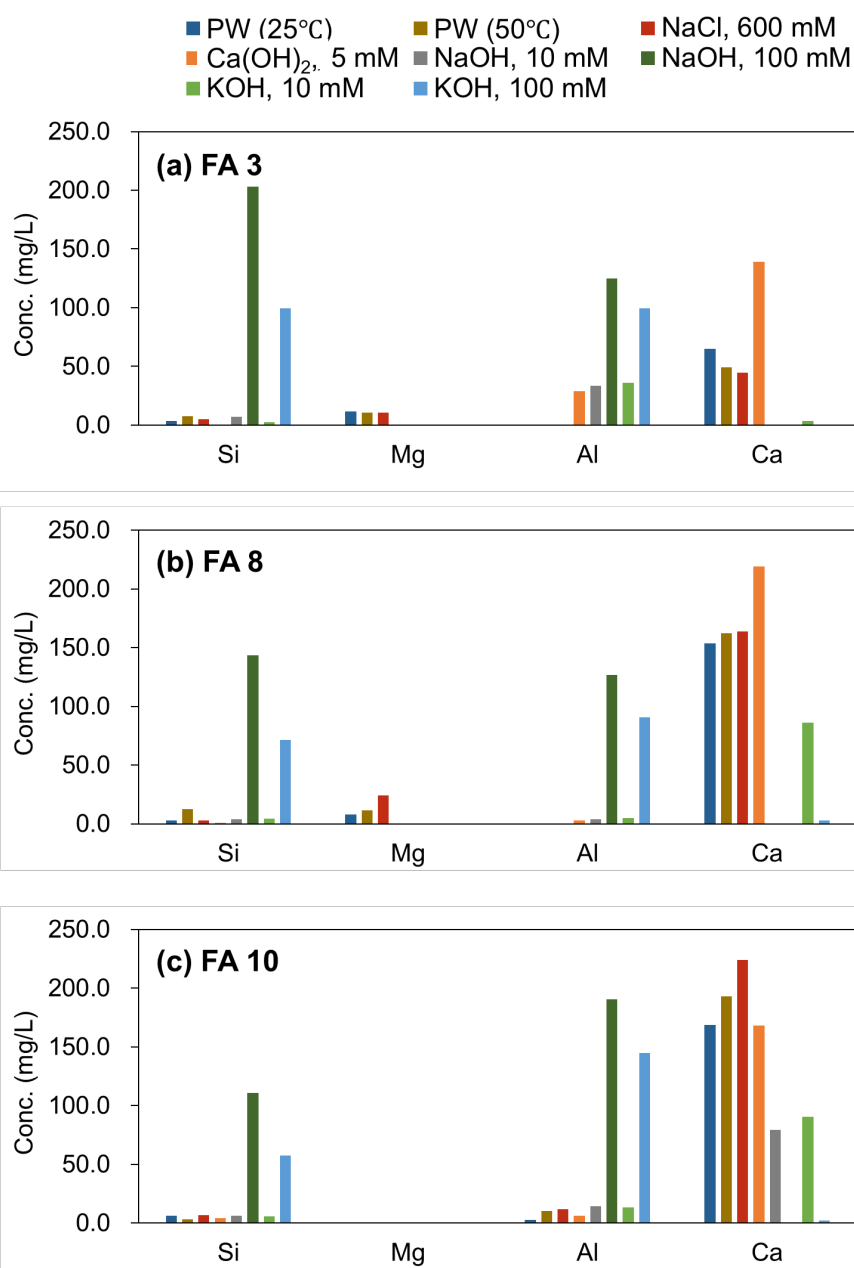


図 4 浸漬試験における液相中の主要成分 (Si, Mg, Al, Ca) 濃度

4.2.2 FA と陰イオン核種 (IO_3^- , SeO_4^{2-}) との相互作用

陰イオン核種 (IO_3^- , SeO_4^{2-}) の収着実験結果について、実験後の液相の pH を図 5 に、I と Se 濃度をそれぞれ図 6 および図 7 に示す。比較として、前年度実施した I および SeO_3^{2-} の収着実験における液相中の I と Se 濃度を図 8 示す。図 6～図 8 では、固相を添加しないブランク試料における I と Se の濃度を初期値として点線で示している。

図 5 より、pH は CaO を添加しない FA のみの条件では各 FA 試料が示す pH に依存し、CaO 添加によりいずれの FA 試料も pH 13 程度を示した。 IO_3^- の収着実験結果は、図 6 より、いずれの FA 試料においても FA と CaO を混合することで液相中の I 濃度は検出下限 (0.10 mg/L) 以下 (図中の N.D.) まで低下し、固相への有意な収着が認められた。なお、FA 3 および FA 8 では FA のみ (CaO 添加なし) の条件において I 濃度が初期濃度よりも高くなった。これについては、IC および ICP-OES により I 濃度のクロスチェックを行ったところ同様の測定値が得られたことから、測定上のスペクトル干渉等による影響は考えにくく、実験操作に何らかのミスがあったと考えられる。 SeO_4^{2-} の収着実験結果は、図 7 より、 IO_3^- と同様に FA と CaO を混合することで液相中の Se 濃度は顕著に低減し、固相への有意な収着が認められた。

ここで、I と Se の収着実験結果について、2023 年度に取得した I および SeO_3^{2-} の結果を踏まえ、形態による収着挙動の違いを考察する。I については、I ではいずれの FA 試料、条件においても初期濃度からほぼ変化せず、固相への収着は認められなかったのに対して、 IO_3^- では Ca 添加によって顕著な収着が認められた。これは、I と IO_3^- では、 IO_3^- の方が電荷密度が小さいため水和状態において周囲の水分子を外しやすく、固相中の Ca などの陽イオンと相互作用しやすいのに対して、I は周囲の水分子を引き付け安定しているため、陽イオンと相互作用しにくいことが考えられる。Se については、 SeO_3^{2-} と SeO_4^{2-} の収着実験結果を比較すると、 SeO_3^{2-} 1 mM では FA のみでも固相への収着が認められ、CaO 添加により収着量がより大きくなる結果となった。これは、 SeO_3^{2-} は三角錐形の分子構造を取るのに対して、 SeO_4^{2-} は正四面体構造を取り、電荷の偏りは SeO_3^{2-} の方が大きいため、Ca などの陽イオンとの静電的な相互作用が大きいことによると考えられる。

以上の収着実験結果より、FA のセメント利用は、セメントからの Ca 供給により放射性核種である I および Se の固定化にも寄与する可能性が示された。2025 年度以降は、実際に FA にセメントを混合した条件における I および Se の収着挙動の評価を予定している。

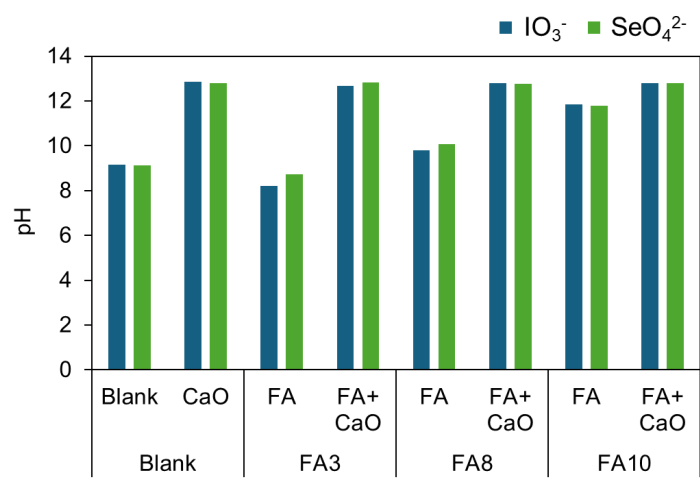


図 5 IO₃⁻および SeO₄²⁻収着実験後の液相の pH

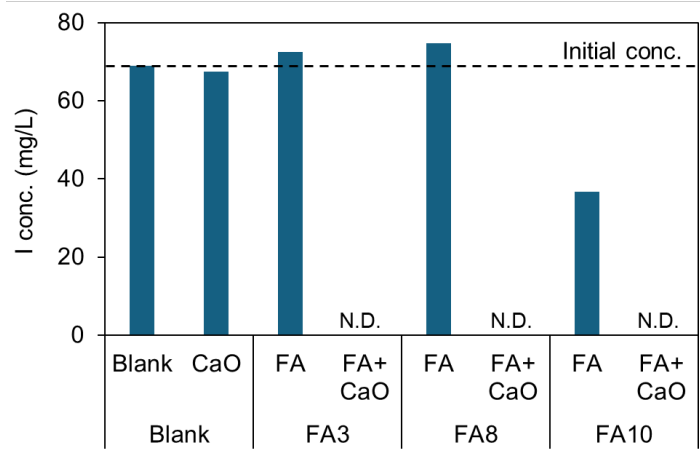


図 6 IO₃⁻収着実験における液相中の I 濃度

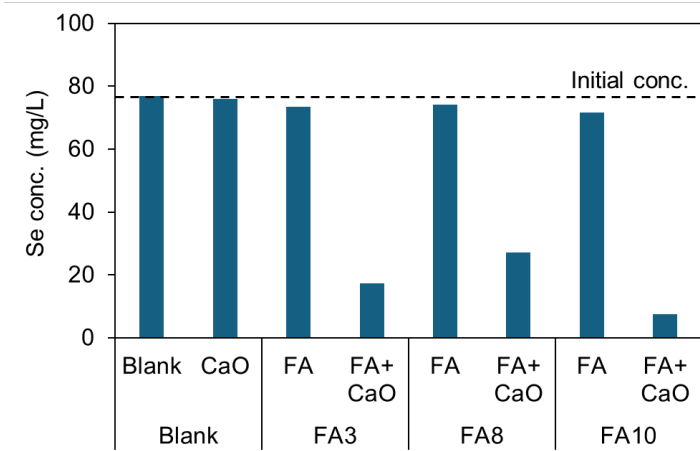


図 7 SeO₄²⁻収着実験における液相中の Se 濃度

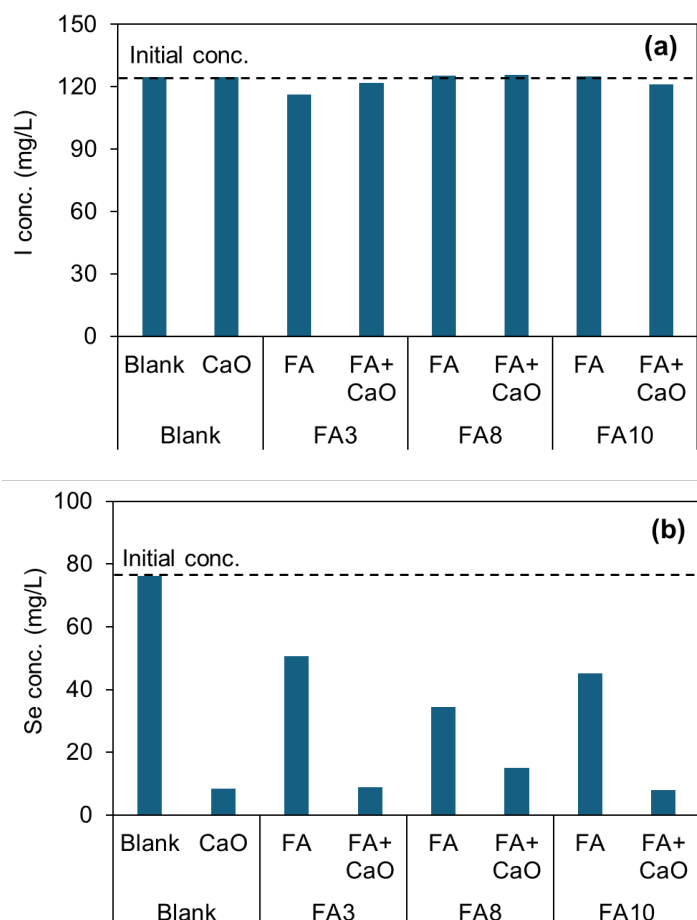


図 8 (a) I 1 mM, (b) SeO_3^{2-} 1 mM を用いた収着実験後の液相中の I および Se 濃度[10]

4.2.3 セメント混合試料における浸漬試験結果

FA に高炉セメント B 種を混合した条件における浸漬実験に先立ち、作製したセメント混合試料 (FA3 と高炉セメント B 種を混合したものを FAC3, 他にも同様に FAC8, FAC10 とする) の XRD 分析結果を図 9 に示す. ここでは、いずれの試料でも quartz および mullite のみが同定され、FA 単体および FA に CaO を添加した試料と比較しても差異は見られなかった. 続いて、液相中の pH, 有害成分 (B, F, As, Se, Cr(VI)) 濃度, および主要成分 (Si, Al, Na, K, Ca, SO_4^{2-}) 濃度の経時変化を図 10～図 12 にそれぞれ示す. なお, Mg, Fe, および Ti はいずれも検出下限以下であった. また比較として、前年度実施した FA 単体を浸漬した場合の pH, 有害成分濃度, および主要成分濃度の経時変化を図 13～図 15 にそれぞれ示す[10]. pH は、FA 単体と比較してセメント混合によっていずれも pH 12 程度に収束していた. これは、混合したセメント材料に含有するアルカリ成分によって pH が支配され

たためと考えられる。有害成分の溶出濃度は、FA 単体と比較するといずれも初期から溶出濃度が顕著に小さくなり、またその経時変化の程度も FA 単体と比較して小さくなった。今回用いた高炉セメント B 種は CaO を 50%程度含有するため、2023 年度の成果で得られたように Ca が豊富になったことでこれら有害成分の不溶化が達成されたと考えられる。一方で B, Se, Cr(VI)は経時的に僅かに濃度が高くなる傾向が見られた。これは、図 11 に示す主要成分の経時変化より、一部の主要成分は経時的な濃度上昇が認められたことから、固相の変質に伴う濃度上昇であると推測される。一方、主要成分濃度の経時変化は、FA 単体の場合と比較するとその変化の程度は小さくなり、これはセメント供試体作製時に 28 日養生の過程を経ているため、この期間において FA とセメントの反応がある程度進行したことが考えられる。他方、溶出量基準 (B : 1 mg/L, F : 0.8 mg/L, As : 0.01 mg/L, Se : 0.01 mg/L, Cr(VI) : 0.02 mg/L) と比較すると、As は概ね基準値を下回ったものの、B, F, Se, および Cr(VI)は一部基準値を超過していた。特に F は初期から基準値を僅かに上回っており、B, Se, Cr(VI)は時間経過に伴い僅かに基準値を上回る挙動が見られた。これは実環境を想定すると地層処分システムにおいても FA を含むセメント系材料が地下水と接触することでこれら有害成分の溶出濃度が基準値を超過する可能性や、更には時間経過に伴い溶出量が増加する可能性を示している。今後、混合するセメント材料の種類や配合、養生期間をパラメータとした試験を行うことで、より詳細にこれらの挙動を追跡していくとともに、適切な不溶化条件を確立していきたいと考えている。

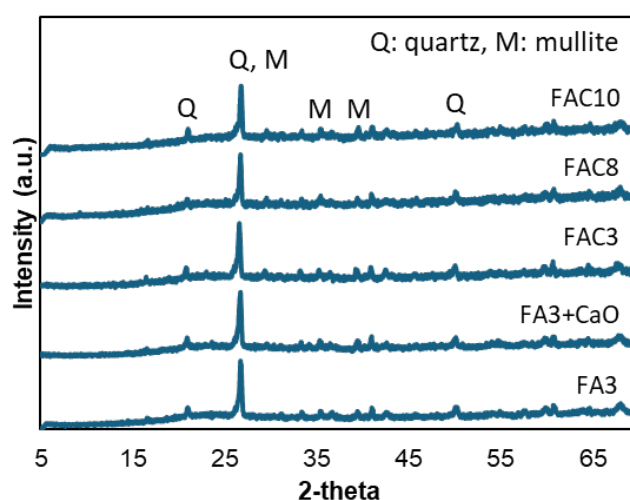


図 9 セメント混合試料における XRD 分析結果（比較として、FA3, および FA3 に CaO を添加した試料の XRD パターンも掲載している。）

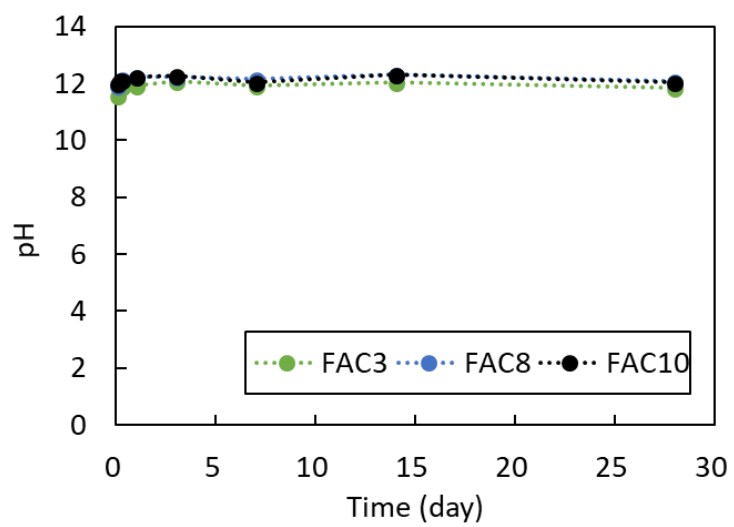


図 10 セメント混合試料の浸漬試験における液相の pH の経時変化

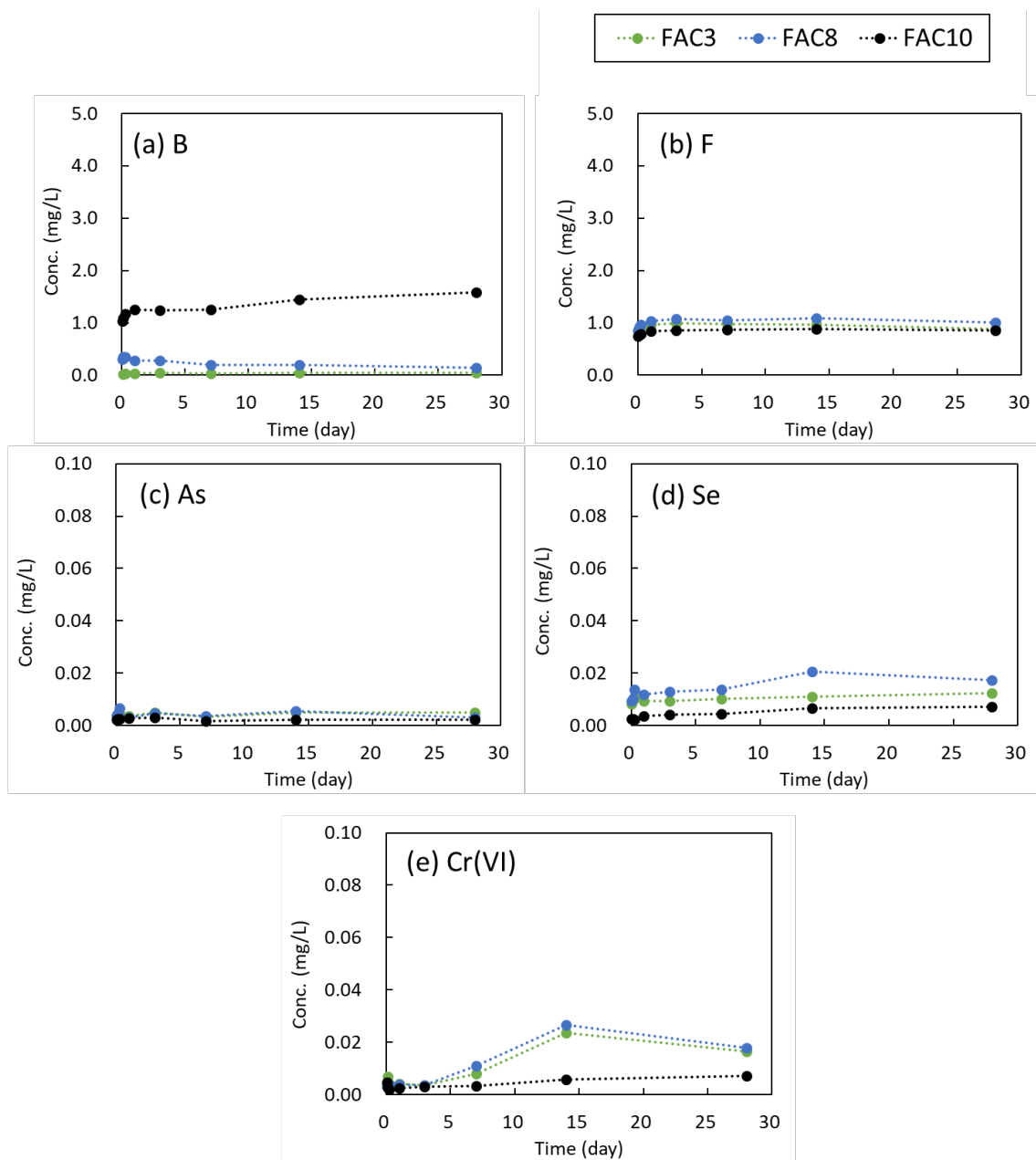


図 11 セメント混合試料の浸漬試験における液相中の有害成分 (B, F, As, Se, Cr(VI)) 濃度の経時変化

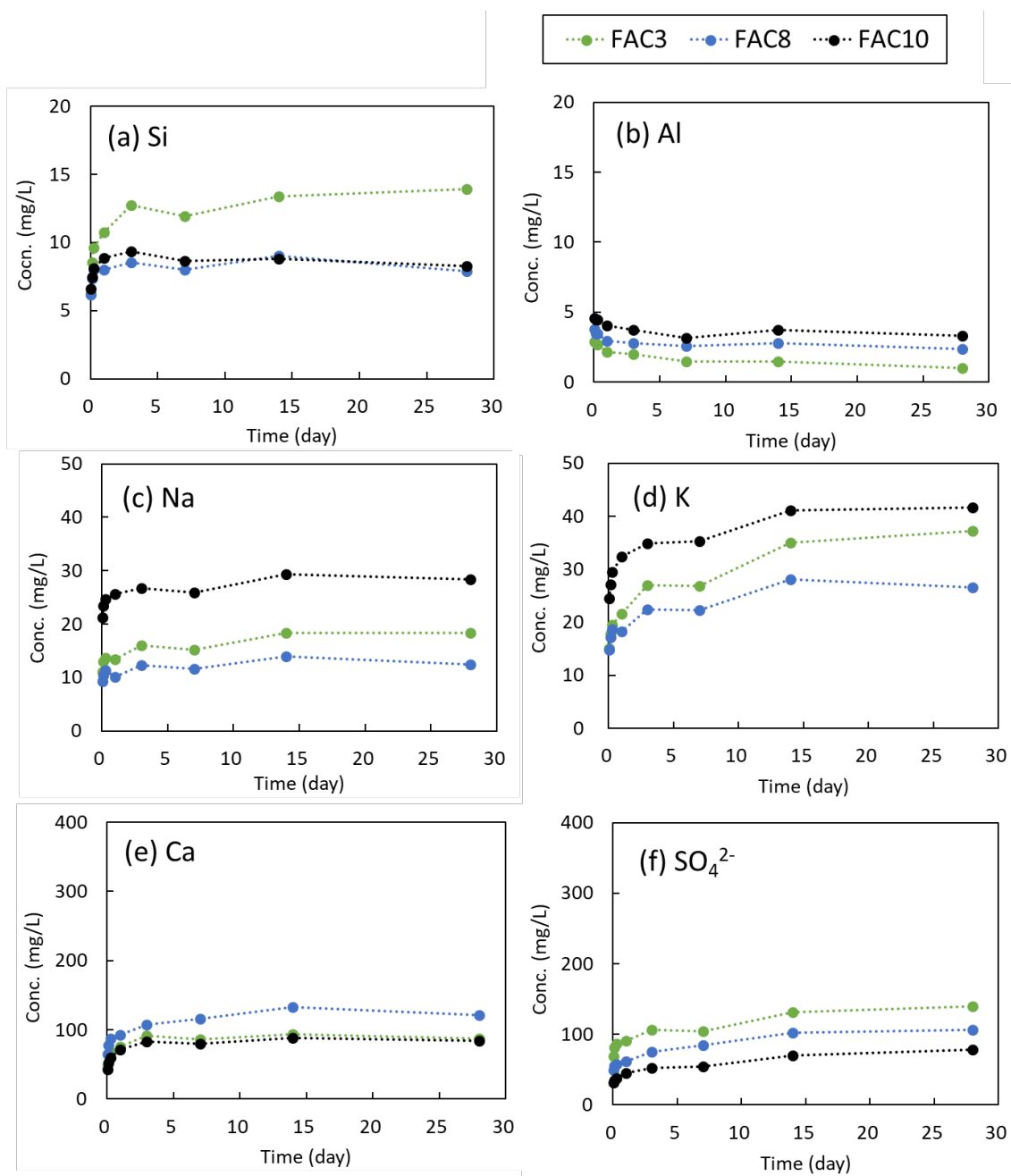


図 12 セメント混合試料の浸漬試験における液相中の主要成分 (Si, Al, Na, K, Ca, SO_4^{2-}) 濃度の経時変化

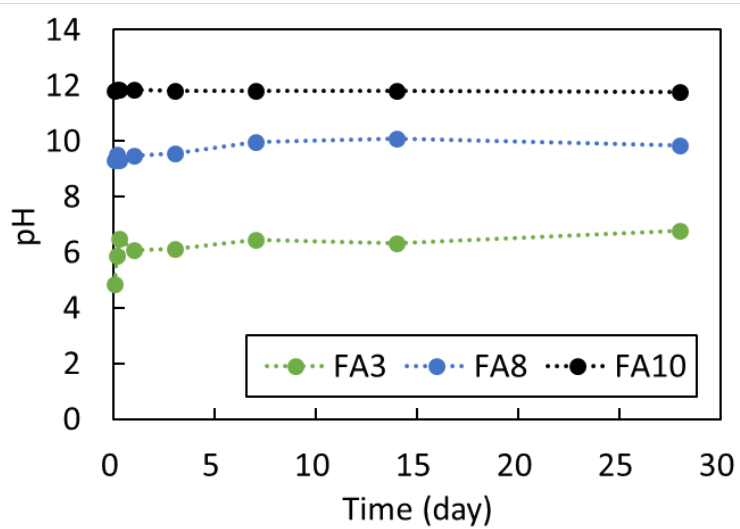


図 13 FA の浸漬試験における液相の pH の経時変化[10]

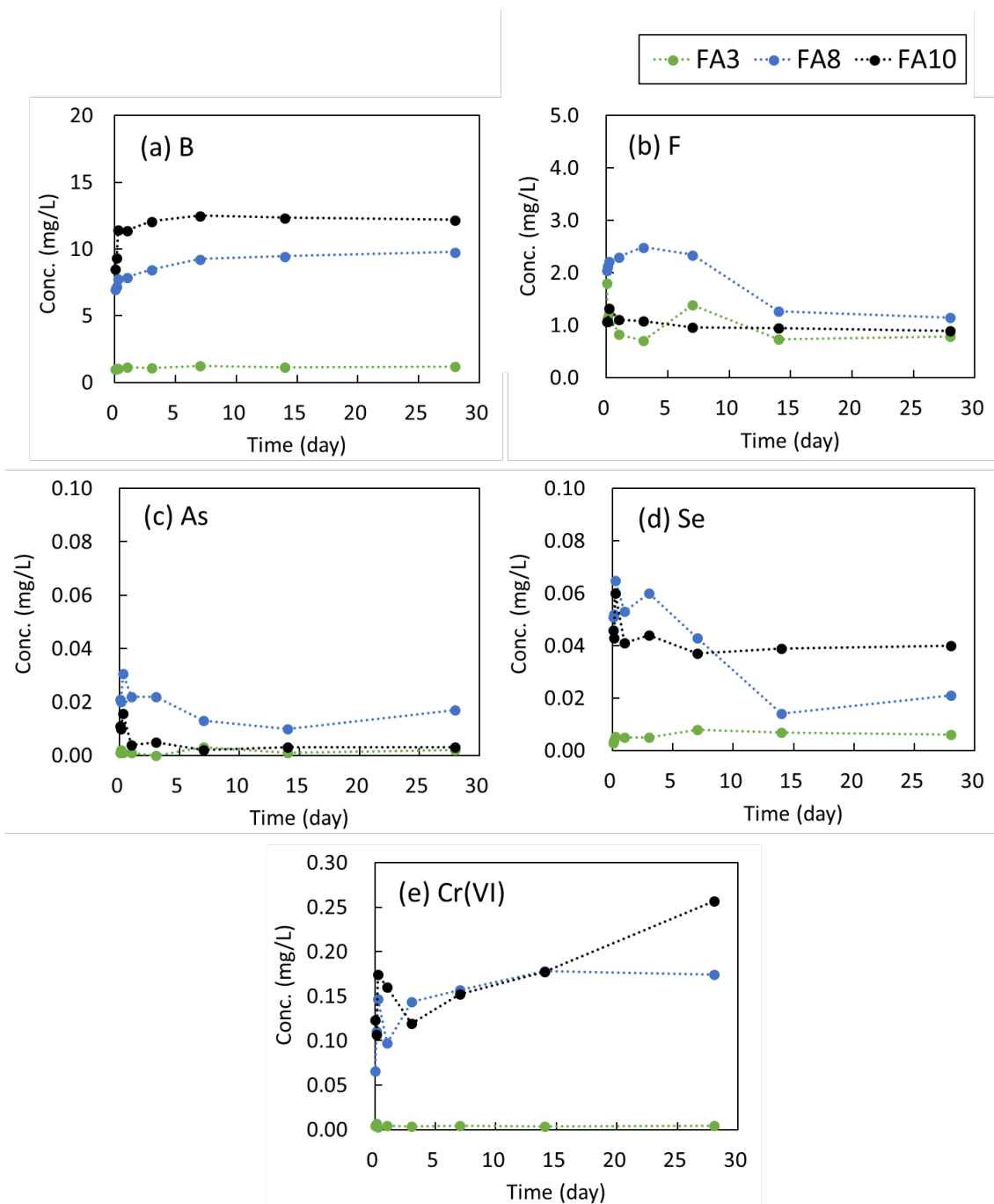


図 14 FA の浸漬試験における液相中の有害成分 (B, F, As, Se, Cr(VI)) 濃度の経時変化

[10]

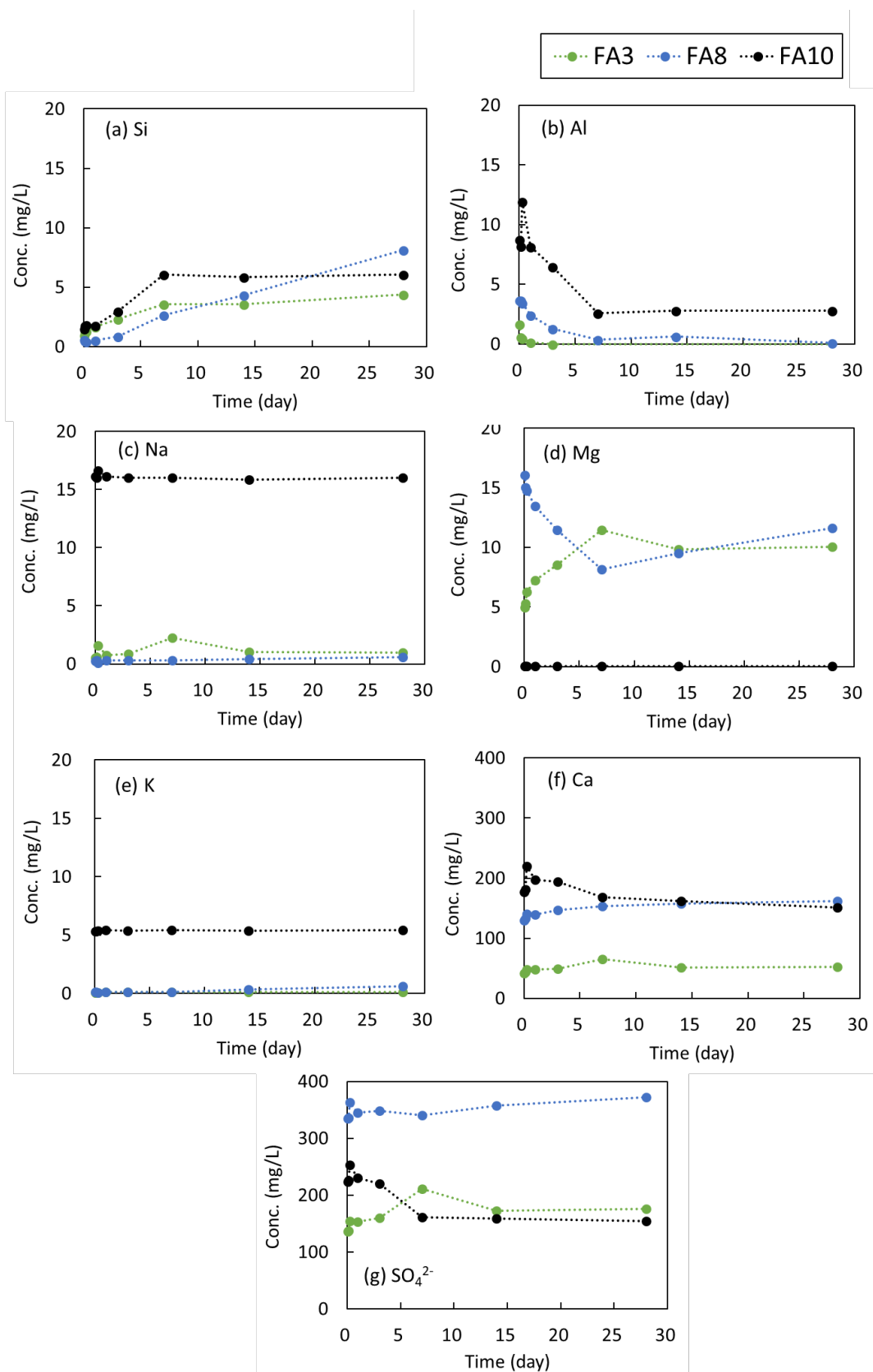


図 15 FA の浸漬試験における液相中の主要成分 (Si, Al, Na, Mg, K, Ca, SO_4^{2-}) 濃度の経時変化[10]

5. まとめ

本研究では、FA が含有する環境影響物質である B, F, As, Se, Cr(VI)を対象とし、FA 単体、および、FA にセメントを混合した FAC からの溶出特性を評価するとともに、地層処分システムの性能評価において重要核種とされている I および Se を対象としてその収着挙動を検討する。これにより、産業副産物である FA を地層処分場の建設材料として有効利用した場合においても、材料由来の環境影響物質の溶出が十分に抑制され、かつ、地層処分システムの核種移行抑制効果が向上することを示すことを本研究の目的としている。

本年度は、前年度に実施した FA 単体を用いた浸漬試験に続き、FA の変質挙動に大きく影響すると予想される浸漬溶液や温度をパラメータとした試験を実施した。また、陰イオン核種との相互作用として、前年度に実施した I および SeO_3^{2-} の収着実験に続き、地層処分場周辺における岩盤中の硫酸塩鉱物や水の放射線分解等による局所的な酸性化性雰囲気を想定し、 IO_3^- および SeO_4^{2-} を用いた収着実験を実施した。さらに、セメント混合試料を用いた試験として、FA に高炉セメント B 種を 15 wt% 混合した供試体を用いた浸漬試験により、有害成分の溶出挙動を検討した。

FA 単体を用いた浸漬溶液および温度をパラメータとした浸漬試験では、超純水、NaOH 10 mM, 100 mM, KOH 10 mM, 100 mM, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 5 mM, および NaCl 600 mM 溶液を用いて、50°C, 1 週間の連続振盪により試験を実施した。結果は、いずれの FA 試料および有害成分においても温度による影響は見られず、また NaCl および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液による顕著な溶出促進の挙動はほとんど見られなかった。一方で pH 13 を示す NaOH 100 mM および KOH 100 mM 溶液では有害成分の溶出量が高くなる傾向が見られ、溶出量基準と比較してもほとんどの成分が基準値を超過する結果となった。

陰イオン核種との相互作用については、 NaIO_3 0.5 mM または Na_2SeO_4 1 mM 溶液を用いて収着実験を行った。 IO_3^- および SeO_4^{2-} はいずれも FA と CaO を混合することで固相への有意な収着が認められ、実環境においてはセメントからの Ca 供給を考慮すると、地層処分場への FA のセメント利用は、局所的な酸性化性雰囲気においても放射性 I および Se の固定化に寄与する可能性が示された。

セメント混合試料を用いた浸漬試験では、FA に対して高炉セメント B 種を 15 wt%, 含水比 約 30 wt% となるように水を混合して突き固め、28 日間養生した供試体を用いて、浸漬試験における経時変化を追跡した。液相の pH は、FA 単体における FA 試料毎の pH の

ばらつきは見られなくなり、いずれも初期から pH 12 程度となった。有害成分の溶出濃度は、FA 単体に比べ初期から溶出濃度が顕著に小さくなり、またその経時変化の程度も小さくなった。一方で溶出量基準と比較すると、As はいずれの試料も基準値を満たしたものの、B, F, Se, および Cr(VI)は一部基準値を僅かに上回り、また B, Se, および Cr(VI)は経時的に溶出量が僅かに増加する傾向が見られた。今後、混合するセメント材料の種類や配合比、養生期間をパラメータとした試験を行うことで、より詳細にこれらの挙動を追跡していくとともに、適切な不溶化方策を検討する予定である。

参考文献

- [1] Onodera H, Chida T, Niibori Y. Sorption Behavior of Iodate Ions on Calcium Silicate Hydrate under a High Saline Condition. Phoenix, Arizona, USA;2018.
- [2] Chida T, Sugiyama D. Diffusion Behavior of Organic Carbon and Iodine in Low-Heat Portland Cement Containing Fly Ash. Materials Research Society Symposium Proceedings. 2009;1124:Q10-15.
- [3] Seki T, Nakamura K, Ogawa Y, et al. Leaching of As and Se from coal fly ash: fundamental study for coal fly ash recycling. Environmental Monitoring and Assessment. 2021;193(4):225.
- [4] Ogawa Y, Sakakibara K, Wang L, et al. Immobilization of B, F, Cr, and As in alkaline coal fly ash through an aging process with water. Environmental Monitoring and Assessment. 2014;186(10):6757-6770.
- [5] Ogawa Y, Sakakibara K, Seki T, et al. Immobilization of Boron and Arsenic in Alkaline Coal Fly Ash through an Aging Process with Water and Elucidation of the Immobilization Mechanism. Water, Air, & Soil Pollution. 2018;229(11).
- [6] Seki T, Ogawa Y, Ibi K, et al. Leaching behavior of arsenic and selenium in coal fly ash by aging treatment and cement mixing. Journal of Nuclear Science and Technology. 2023;60(10):1169-1181.
- [7] 大宅淳一, 山本賢司, 三五弘之ら. 六価クロムの AFm 相への固定化と溶出挙動. セメント・コンクリート論文集. 2010;64(1):35-41.
- [8] 石炭灰ハンドブック (第3版), 日本フライアッシュ協会, 2000年5月
- [9] Baur I, Johnson CA. Sorption of selenite and selenate to cement minerals. Environmental Science & Technology. 2003;37(15):3442-3447.
- [10] 関亜美, 令和5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) 2023年度研究成果報告書, 2024年3月

2024 年度 外部発表

1. 荒谷慎人，関亜美，千田太詩，新堀雄一，有害化学物質および陰イオン核種の固定化に着目したフライアッシュ混合セメントの利用に関する予察的検討，日本原子力学会東北支部第48回研究交流会，2024 年 12 月 2 日
2. 荒谷慎人，関 亜美，千田太詩，新堀雄一，処分環境におけるフライアッシュ混合セメントによる亜セレン酸イオン固定化の予察検討，第 10 回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス（NDEC-10），2025 年 2 月 26-27 日
3. 荒谷慎人，関 亜美，千田太詩，新堀雄一，フライアッシュのセメント利用に向けた有害化学物質の溶出挙動およびヨウ素との相互作用の検討，日本原子力学会 2025 年春の年会，2025 年 3 月 12-14 日

研究報告 2

地層処分の地下水質・温度履歴を模擬した環境に
おけるベントナイト系緩衝材の水分移動特性およ
び膨潤特性の実験的評価

早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科

阮 坤林

【目次】

1. 背景・目的	1
2. 全体研究計画（3 ヶ年における全体計画）	3
3. 2023 年度の成果概要	5
4. 2024 年度研究実施内容	8
4.1 2024 年度の計画、実施方法.....	8
4.2 2024 年度の成果内容.....	16
5. まとめ	32

参考文献

2024 年度外部発表

1. 背景・目的

1.1 背景

2011 年以前は、原子力発電が日本の主要な発電源であり、発電量の約 30% を占めていた¹⁾。原子力発電は発電効率が非常に高く、天然ガス、石油、石炭に比べると 5 倍~10 倍の発電効率を有する²⁾。特に日本のような化学燃料資源に乏しく、燃料を輸入に頼る国にとっては発電効率の高い発電方法をとる必要がある。再生エネルギーと比較すると、再生エネルギーでは広大な敷地を必要とするのに対し、原子力発電は小さな敷地で多量の発電が可能となる。一方、再生エネルギーおよび原子力発電ともに、地球温暖化の原因となる CO₂ 排出がなく温暖化対策にも貢献する。これらの利点から、日本では原子力発電による電気の安定供給を目指している。しかし、原子力発電所から発生する高レベル放射性廃棄物 (HLW) の問題解決は、社会的に重要な課題である。高レベル放射性廃棄物の処理方法として、地下深くに閉じ込め・隔離する地層処分は、多くの国で採用されている。日本の地層処分では、ガラス固化体、ステンレス製オーバーパック容器、緩衝材、母岩を含む多重バリアシステムを地下 300m 以深に構築し (図 1-1)、高レベル放射性廃棄物の漏出をできるだけ遅延する。このうち緩衝材に求められる特性は、自己シール性、止水性、核種吸着性、応力緩衝材など 11 項目である³⁾。緩衝材の候補として、低透水性と自己修復能力粘土系材料である、ベントナイトが極めて有力である⁴⁾。

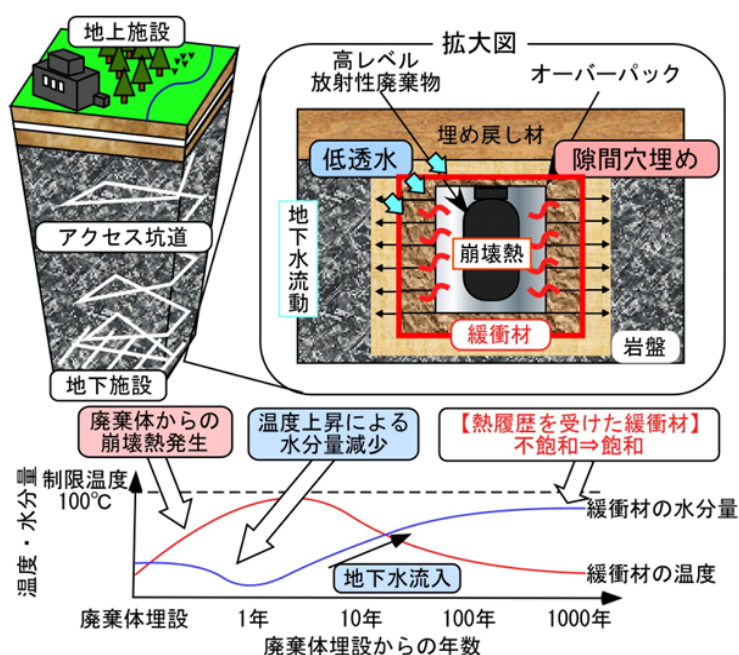


図 1-1 地層処分システム概念図及ぼす崩壊熱の影響⁵⁾

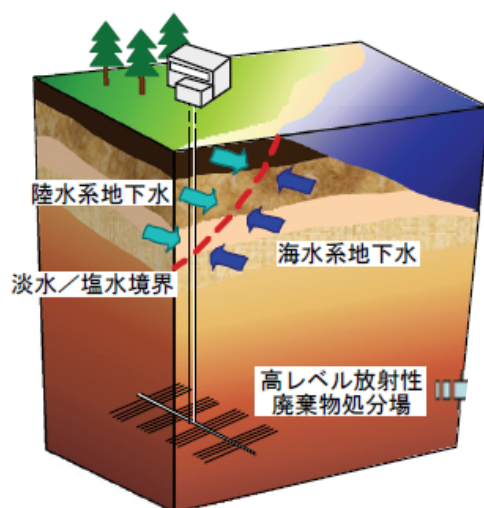
図 1-2 地下水侵入の概念図⁶⁾

図 1-1, 1-2 からわかるように、緩衝材には再冠水段階がある。この段階では、地下水の浸入により緩衝材が不飽和状態から飽和状態へ遷移し、緩衝材の膨潤や緩衝材中の水分の移動が発生する。

地層処分の地下環境は非常に複雑である。高レベル放射性廃棄物の地層処分技術開発において、沿岸部の環境を考慮した技術開発も求められており、沿岸部処分システム高度化開発等の国の基盤研究開発などが進められている。沿岸部処分の地下水（図 1-2）は、海水環境であり、これまでに多く研究された淡水環境と異なり、地下水の浸入により緩衝材が不飽和状態から飽和状態へ遷移する再冠水段階については不明な点が多く、緊急性の高い検討項目となる。また、再冠水段階に発生する高レベル放射性廃棄物の崩壊熱（図 1-1）の影響を考慮することも重要である。

1.2 目的

本研究では、高レベル放射性廃棄物地層処分の技術開発で緩衝材として多数の使用実績があるクニゲル V1 を用いて、締固めたベントナイト供試体に、核燃料サイクル開発機構が第 2 次取りまとめで検討した温度履歴を与える。そして、淡水および海水環境を模擬した蒸留水および人工海水を用いて、供試体を飽和させ、供試体の膨潤特性を示す膨潤圧および水分移動特性を示す水分拡散係数を検討する。

その結果をもとに、本研究は、温度履歴・水質が緩衝材の膨潤特性および水分移動特性に及ぼす影響を確認し、緩衝材の合理的な設計に直接寄与することを目標とする。これにより、21 世紀の我が国における重大な課題である、HLW の地層処分事業の実現に寄与することができる。

2. 全体研究計画（3 カ年における全体計画）

2.1 全体研究計画

表 2-1 模擬条件の計画まとめ表

地下 水質	目的 項目	模擬温度 (°C)	温度履歴日数 (日)	供試 体数	試験温度 (°C)	試験 溶液
淡水 環境	①	60, 80, 100, 150	30, 60, 150, 300, 600, 1000	24	常温	蒸留 水
	②	60, 80, 100, 150	30, 60, 150, 300, 600, 1000	120		
	③	60, 80, 100	1000	3	60, 80, ~100*	
海水 環境	①	60, 80, 100, 150	30, 60, 150, 300, 600, 1000	24	常温	人工 海水
	②	60, 80, 100, 150	30, 60, 150, 300, 600, 1000	120		
	③	60, 80, ~100	1000	3	60, 80, ~100*	

*：100°Cの環境において，試験溶液が気体化される可能性があるので，その場合は，100°Cに近い温度に設置する．

本研究は，想定された地下水が淡水環境および海水環境の 2 条件で，具体的に以下 3 項目の目的で，表 2-1 の内容を計画する．

項目①：想定された地下水質・温度履歴においてベントナイト系緩衝材の膨潤特性の変化を確認する

核燃料サイクル開発機構が数値解析により予測した緩衝材の温度履歴環境（50～100°C程度）⁷⁾に基づき選定した 3 条件に加えガラス固化体の予測最大温度履歴（140°C程度）を参考に，模擬温度環境は，60, 80, 100, および 150°Cを選定した．3 年間の研究期間において，乾燥密度 1.55 Mg/m³の締固めたベントナイトを最大 1000 日までの温度履歴を受けさせ，その膨潤圧を確認する．淡水および海水条件を考慮し，48 供試体を対象に実験を行う．

項目②：想定された地下水質・温度履歴におけるベントナイト系緩衝材の水分拡散特性の変化を確認する

過去の研究では，検討条件毎に 1～2 供試体を用いて水分移動特性を示す拡散係数が検討され，結果のバラツキが大きいことが課題であった．本研究は，1 検討条件毎に 5 供試体程度を用いて，著者が提案した新たな方法より，水分拡散係数を詳細に検討する．淡水および海水条件を合わせて，乾燥密度 1.55 Mg/m³の締固めた 240 供試体を対象に 3 年間実施する．

項目③：想定された地下水環境・温度履歴におけるベントナイト系緩衝材の膨潤特性をモニタリングする

25, 60 および 80℃の温度環境における締固めたベントナイト供試体に、蒸留水または人工海水を供給し、膨潤圧を 3 年近く（1000 日程度）モニタリングする。この試験は、想定した地下環境を最大限に模擬し、水質や温度履歴が締固めたベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響を明確にする。乾燥密度 1.55 Mg/m³ の締固めた 6 供試体を対象に 3 年間実施する。

2.2 各年度の実施内容

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) 2023 年 10 月頃～2024 年 3 月実施内容：使用を予定しているベントナイト（クニゲル V1）の基本的性質データは、既に取得している。なお、15 日、30 日、300 日、600 日と 1000 日の履歴時間の試料の一部は、既に準備を開始している。本年度は、温度履歴 30 日と 60 日を受けた締固めたベントナイトを対象に、蒸留水および人工海水を用いて、膨潤特性および水分移動特性の検討を開始する。また、膨潤特性の長期モニタリングについて、2024 年初めに設置し、計測を開始する。

(2) 2024 年 4 月頃～2025 年 3 月実施内容：温度履歴が 150 日と 300 日の試料を対象に、膨潤圧および拡散係数の測定を実施すると共に、膨潤特性の長期モニタリングを継続する。そして、X 線回折分析により、ベントナイトの間隙水を分類・定量化し、膨潤特性および水分移動特性のメカニズムを検討する。ナノレベルの水分子移動の観点から、海水環境・温度履歴に耐性のあるベントナイトの特徴を明らかにする。

(3) 2025 年 4 月頃～2026 年 3 月実施内容：温度履歴が 300 日と 600 日の試料を対象に、膨潤圧および拡散係数の測定を実施すると共に、膨潤特性の長期モニタリングを継続する。そして、X 線回折分析により、ベントナイトの間隙水を分類・定量化し、膨潤特性および水分移動特性のメカニズムを検討する。ナノレベルの水分子移動の観点から、海水環境・温度履歴に耐性のあるベントナイトの特徴を明らかにする。

(4) 2026 年 4 月頃～2026 年 9 月実施内容：温度履歴が 1000 日の試料を対象に、膨潤圧および拡散係数の測定を実施すると共に、膨潤特性の長期モニタリングを終了する。イオン交換の観点から膨潤力を評価するため、陽イオン交換実験を行う。すべてのデータをまとめ、比較し、実用的なエンジニアリングに役立つ提案をする。

3. 2023 年度の成果概要

2023 年度は、乾燥密度 1.55 Mg/m^3 の締固めたクニゲル V1 ベントナイトを 60, 80, 100 および 150°C で 30 および 60 日間養生させ、温度履歴を得た。その後、養生した供試体を蒸留水と人工海水で飽和させ、膨潤圧試験と水分拡散試験を実施した。同時に、モンモリロナイト含有量に及ぼす温度履歴の影響を調べるため、温度履歴を与えた試料はメチレンブルー吸着量試験を行った。

30 日間および 60 日間の温度履歴を与えた供試体を用いて蒸留水または人工海水で飽和させて膨潤圧試験を行った結果、ベントナイトの平衡膨潤圧は温度履歴を与えていない試験結果と同程度となり、温度履歴を与えた影響は限定的であった（図 3-1）。また、図 3-1 から明らかなように、蒸留水で飽和させた場合の平衡膨潤圧は人工海水で飽和させた平衡膨潤圧より大きい結果となった。

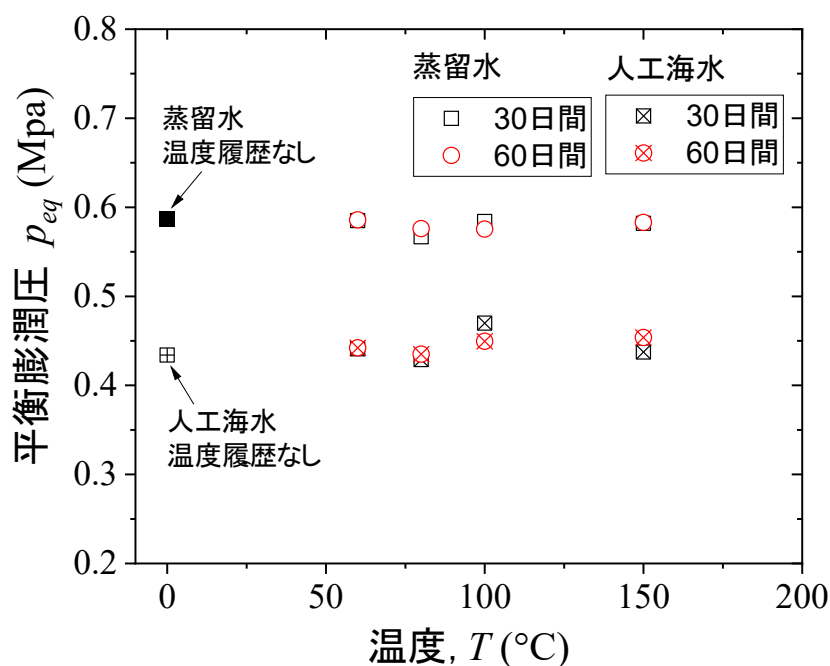


図 3-1 蒸留水および人工海水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの平衡膨潤圧
(2023 年度, 養生温度 : 60, 80, 100 および 150°C , 養生時間 : 30 および 60 日間)

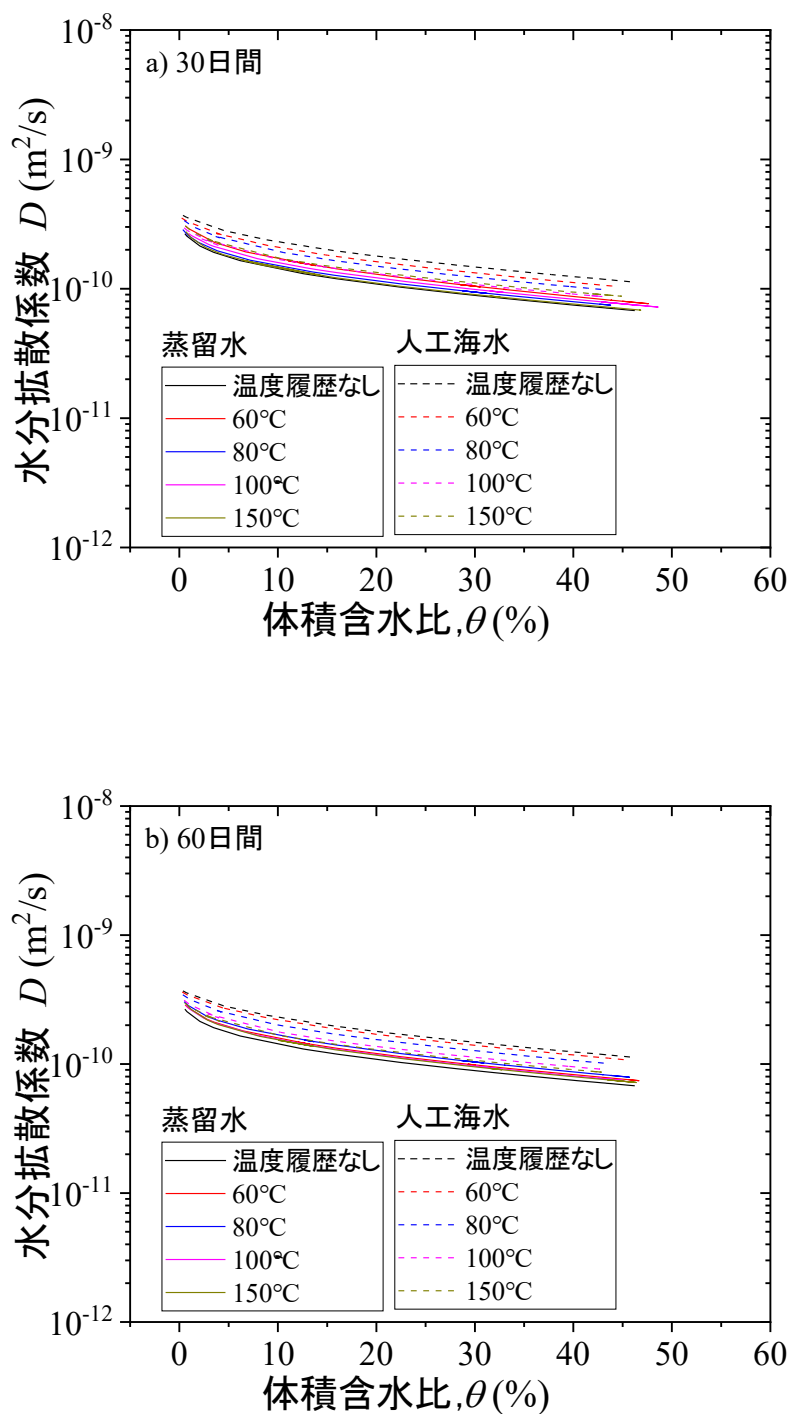


図 3-2 蒸留水および人工海水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの水分拡散係数: a) 30 日間, b) 60 日間 (2023 年度, 養生温度: 60, 80, 100 および 150°C, 養生時間: 30 および 60 日間)

水分拡散係数について、人工海水を用いた試験における水分拡散係数が蒸留水を用いた系より大きい結果となった（図 3-2）。一方で、図 3-2 から明らかなように、様々な温度履歴を与えたベントナイトの水分拡散係数は、温度履歴を与えないベントナイトと同程度であったことから、60 日間程度の温度履歴では、ベントナイトの水分拡散に及ぼす影響は限定的であることが示唆された。

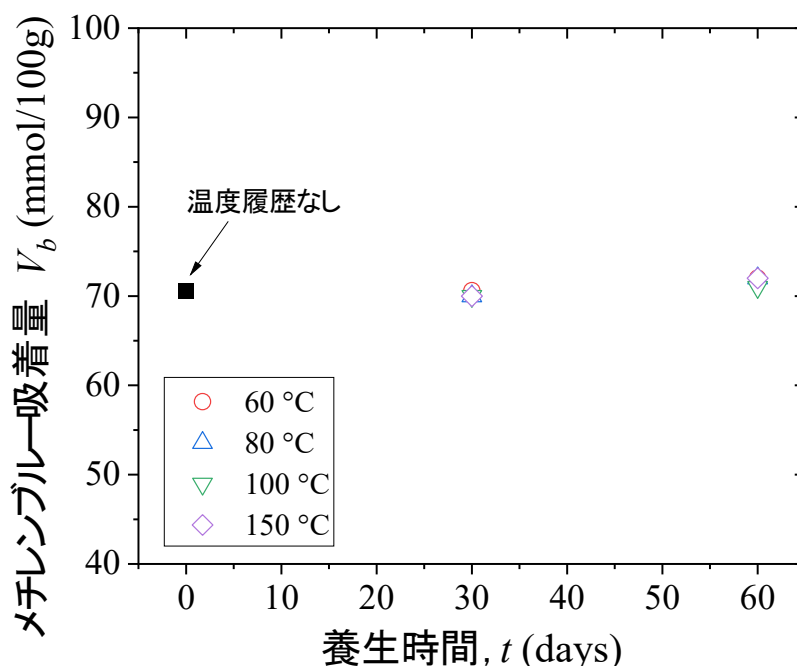


図 3-3 温度履歴の異なるベントナイトのメチレンブルー吸着量（2023 年度，養生温度：60，80，100 および 150°C，養生時間：30 および 60 日間）

ベントナイトのモンモリロナイト量を評価するパラメータとしてメチレンブルー吸着量が採用されている⁸⁾⁹⁾。図 3-3 は、温度履歴の異なるベントナイトのメチレンブルー吸着量を示す。図 3-3 から明らかなように、温度履歴はベントナイトのメチレンブルー吸着量への影響が限定的であったことから、温度履歴が 60 日間程度ではベントナイトの変質も限定的であった可能性が示唆された。

異なる温度での膨潤圧の長期モニタリング用に設計した膨潤圧装置を新たに整備した。整備した装置を用いて予備試験を行ったところ、異なる温度で膨潤圧を良好に継続して測定できることがわかった。本装置を用いて 2024 年 2 月より膨潤圧の長期モニタリングを開始した。膨潤圧の長期モニタリングの結果については、2024 年度の結果について後のセクションで紹介する。

4. 2024 年度研究実施内容

4.1 2024 年度の計画、実施方法

2024 年度は、蒸留水と人工海水を用いて、150 と 300 日間の温度履歴の締固めたベントナイトの膨潤圧と水分移動特性実験を実施する。モンモリロナイト含有量に及ぼす温度履歴の影響を調べるため、150 と 300 日間の温度履歴を与えた試料はメチレンブルー吸着量試験を行う。また、ベントナイト中の元素含有量の変化に及ぼす温度履歴の影響を調べるために、蛍光 X 線分析(XRF)実験を行う。X 線回折(XRD)実験も行い、微細構造に及ぼす温度履歴と飽和溶液の影響を調べる。膨潤特性の長期モニタリングも試験装置を設定し、2024 年 2 月から測定を開始する。表 4-1 に 2024 年度の検討項目と実施スケジュールを示す。

表 4-1 2024 年度の検討項目と実施スケジュール

項 目	2024/4	5	6	7	8	9	10	11	12	2025/1	2	3
150 と 300 日間の温度履歴の供試体の膨潤圧, 水分拡散係数とモンモリロナイト含有量の評価												→
30, 60, 150 と 300 日間の温度履歴の供試体の XRF と XRD 実験									→			
膨潤特性の長期モニタリ												→
2024 年度報告書作成										→		→

4.1.1 使用した試料の概要

本研究では、山形県月布鉱山で採取・生産されたクニゲル V1 ベントナイト（図 4-1）を用いた。クニゲル V1 は日本の地層処分研究開発で使用実績があり、その膨潤特性と水分拡散係数は、多くの実験によって広く研究されている^{10) 11) 12) 13)}。



図 4-1 クニゲル V1 ベントナイトの様子

本研究では、クニゲル V1 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。土粒子の密度および液性限界の測定は、小峯らの研究¹⁴⁾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)¹⁵⁾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 (日本工業標準調査会 JIS Z 2451 : 2019) を参考として行った¹⁶⁾。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 $140 \text{ mmol}/100 \text{ g}$ ¹⁷⁾として算出した。また、陽イオン交換容量と交換性各イオン量は、白河部らの研究¹⁸⁾に則って行った。表 4-2 に以上の各試験から得られた、使用したクニゲル V1 の基本的性質を示す。

表 4-2 クニゲル V1 の基本的性質

主な交換性陽イオン	Na
土粒子の密度(Mg/m^3)	2.79
液性限界(%)	458.1
塑性限界(%)	23.7
塑性指数	434.4
モンモリロナイト含有率(%)	50
粒度 0.075mm 以上通過率(%)	92
陽イオン交換容量 (meq/g)	0.775
交換性 Na イオン量 (meq/g)	0.570
交換性 Ca イオン量 (meq/g)	0.114
交換性 Mg イオン量 (meq/g)	0.07
交換性 K イオン量 (meq/g)	0.02

本研究では、陸水系地下水を模擬するために蒸留水を、海水系地下水を模擬するために人工海水を使用した。人工海水は安田製薬から入手した。その組成を表 4-3 に示す。

表 4-3 人工海水の主な組成 (25L 当たり、メーカー仕様書による)

NaCl	MgCl ₂	CaCl ₂	Na ₂ SO ₄	KCl
22.1g	9.9g	1.5g	3.9g	0.61g
NaHCO ₃	KBr	Na ₂ B ₄ O ₇	SrCl ₂	NaF
0.19g	96mg	78mg	13mg	3mg

4.1.2 温度履歴の条件および方法

既往研究のほとんどは粉末ベントナイトを使用していたが、本研究では締固めたベントナイトを使用し、異なる温度履歴を与えた。乾燥炉を用いて乾燥したクニゲル V1 ベントナイトを高さ 10mm、内径 28mm のリングに入れ、静的締固め装置（図 4-2）を使用して、目標乾燥密度 1.55 g/cm^3 の供試体を得た。その後、供試体（リングを含む）の体積を 2 枚のステンレスプレートとボルトで固定した。一定の体積で締固めた状態のベントナイトを温度 60, 80, 100 および 150°C の乾燥炉に所定期間（150 と 300 日間）静置し（図 4-3）、温度履歴を与えた。

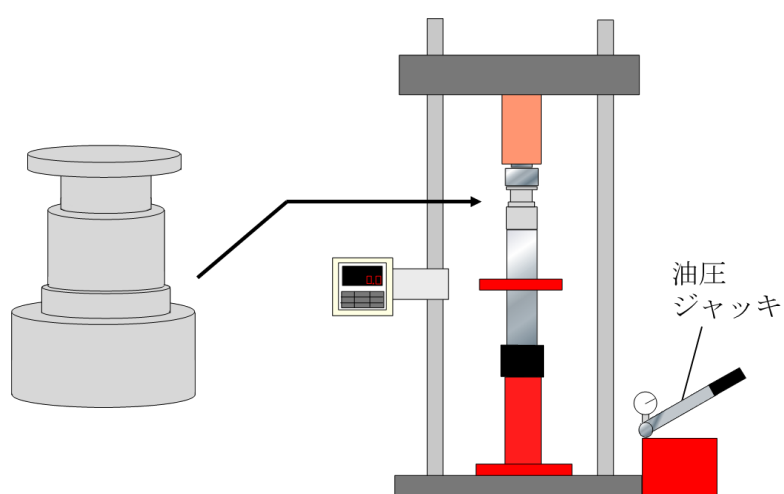


図 4-2 供試体作成の概念図

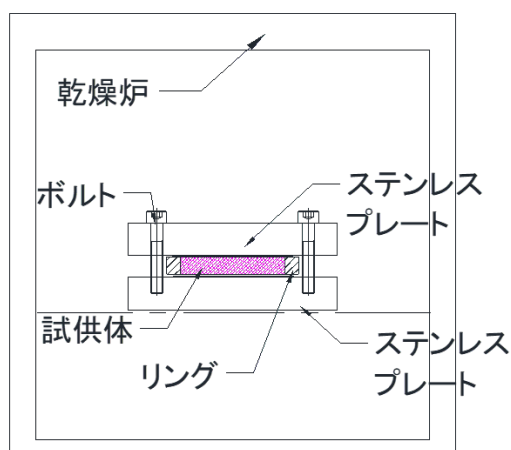


図 4-3 温度履歴実験の概念図

本研究では、乾燥炉内の測定温度をベントナイトの加熱温度とした。加熱温度を上記に設定した理由は、高レベル放射性廃棄物からの崩壊熱の影響によって、緩衝材内部の最高

温度が 65～165℃の範囲になるという解析結果³⁾と、130℃以下の条件では著しいモンモリロナイトのイライト化は進行しないことが明らかとなっているからである³⁾¹⁹⁾。すなわち、温度 130℃以下の条件では、ベントナイトの鉱物学的な変質を考慮しない設計が可能であると考えたためである。また、日本では緩衝材の制限温度は 100℃であるが³⁾¹⁹⁾、100℃～200℃とする国も多い（表 4-4）。本研究では、100℃と 200℃の間の代表的な温度として 150℃を選び、試験を行った。

表 4-4 一部の国で採用されている緩衝材の制限温度

国	温度(℃)	国	温度(℃)
カナダ	100	フィンランド	100
日本	100	ベルギー	100
スイス	160	ドイツ	200

4.1.3 膨潤圧と XRD 実験の概要

様々な養生時間の後、供試体（リングを含む）を体積制限装置から外し、膨潤圧装置（図 4-4）に取り付けた。蒸留水と人工海水はビュレットを通して膨張力装置に供給する。膨潤圧試験の期間は、膨潤圧が平衡に達するまでおよそ 10 日間とした²⁰⁾。さらに、既往の研究によると、通常のろ紙は、膨潤圧試験中に厚さ約 0.2mm から約 0.1mm まで部分的に圧縮されることがあり、それによって結果が不正確になる²⁰⁾。本研究では、ろ紙の圧縮性の影響を軽減するため、通常のろ紙の代わりに孔径 0.45 μm のメンブレンフィルター（厚さ 0.14mm）²⁰⁾ を使用する。

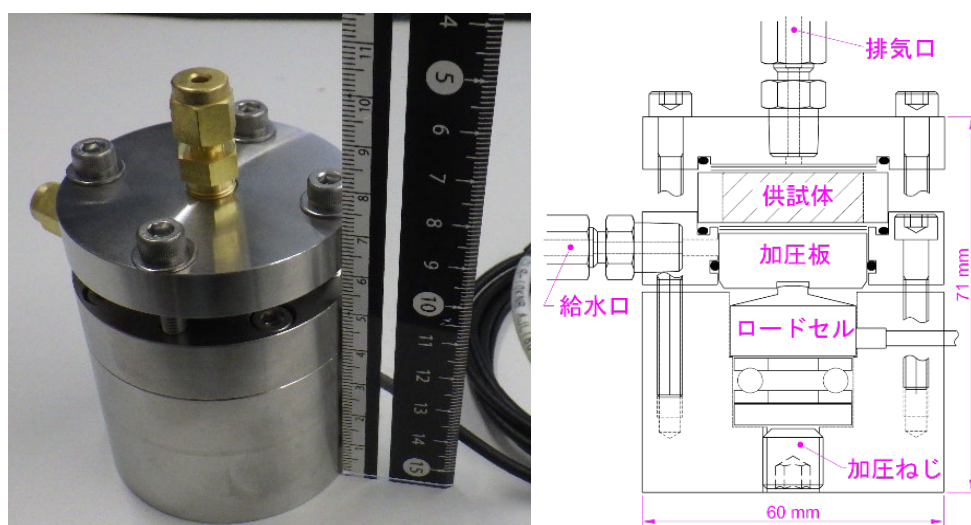


図 4-4 膨潤圧実験の様子

膨潤圧実験後、供試体を押し出し、XRD 試験に供す。XRD 試験では、X 線スキャン範囲 $2.7^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 、スキャン速度 $20^{\circ} / \text{分}$ で実験を行う。ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトは、アルミナ八面体シート(alumina octahedral sheet)をシリカ四面体シート(silica tetrahedral sheet)で挟んだ 2 : 1 構造（四面体-八面体-四面体、図 4-5）である。ベントナイトが吸水すると、モンモリロナイトの結晶層が水和反応を起こし、c 方向（001）に膨潤する。吸着水の増加に伴い、モンモリロナイトの膨潤は進行し、モンモリロナイト結晶層間の距離（底面間隔, basal spacing）は増加する。この距離は XRD 試験によって検出できる。XRD 曲線上のピーク位置から締固めたベントナイトの底面間隔(d_{001})はブラッグの法則で計算できる²⁰⁾：

$$d_{001} = n\lambda / 2\sin\theta_{\text{peak}} \quad \text{式 4-1}$$

ここで、 λ は入射波の波長($=1.5418 \text{ \AA}$)、 n は位置の整数($=1$)、 θ_{peak} は XRD 曲線上のピークにおけるの角度($^{\circ}$)である。

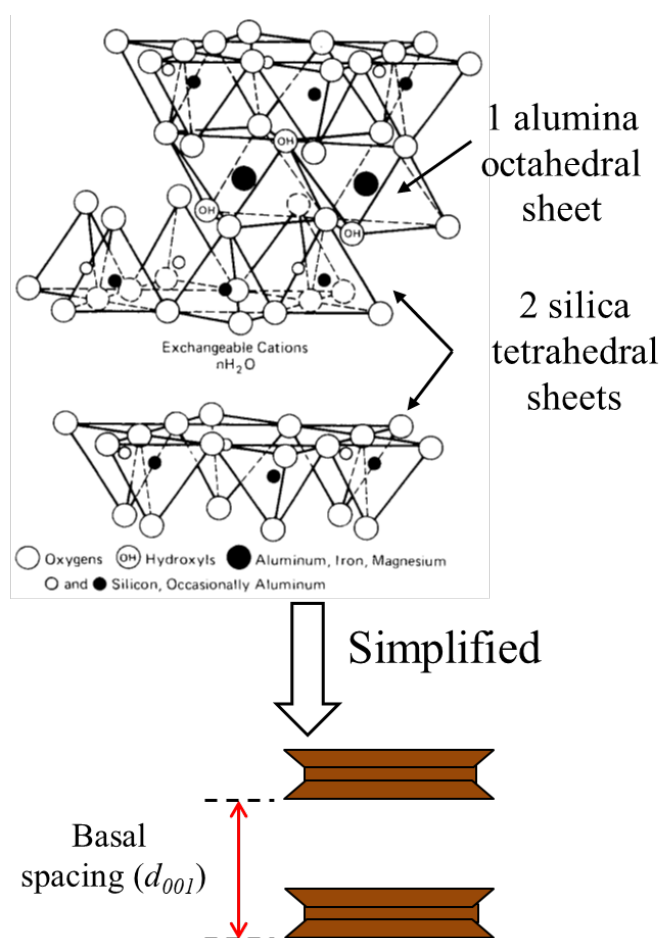


図 4-5 モンモリロナイト 2 : 1 構造と底面間隔

4.1.4 水分拡散係数実験の概要

水分拡散係数は，ベントナイト中の水の移動を評価するために多くの研究によって採用されてきた^{21) 22)}．本研究では，浸潤試験を行い土中の水分勾配を測定し，水分拡散係数を算出する．本試験は，図 4-6 のように底板，モールド，上板，ポーラスメタルおよび吸水口からなる浸潤試験装置を使用した．様々な養生時間の後，供試体（リングを含む）を体積制限装置から外し，浸潤試験（図 4-6）に取り付けた．蒸留水と人工海水はビュレットを通して浸潤試験装置に供給する．表 4-5 に示した浸潤時間ごとに試験を終了し，供試体内部の水分分布を測定するために供試体を薄片に 4 分割し，薄片の体積，含水比を測る．

供試体分割方法の詳細について示すため，供試体の分割に用いた装置を図 4-7 に示す．この装置は，供試体上部方向に取り付けたねじを回すことにより，試験後のモールドから供試体のみを少しずつ押し出して，供試体を下部方向に出すものである．モールドからはみ出した供試体の高さをノギス（最小目盛り：0.01 mm）で測定した後，カッターによってモールドからはみ出した供試体をモールド表面まで成型し，はみ出した分の試料をすべて蒸発皿に入れて，質量，含水比の測定を行う．

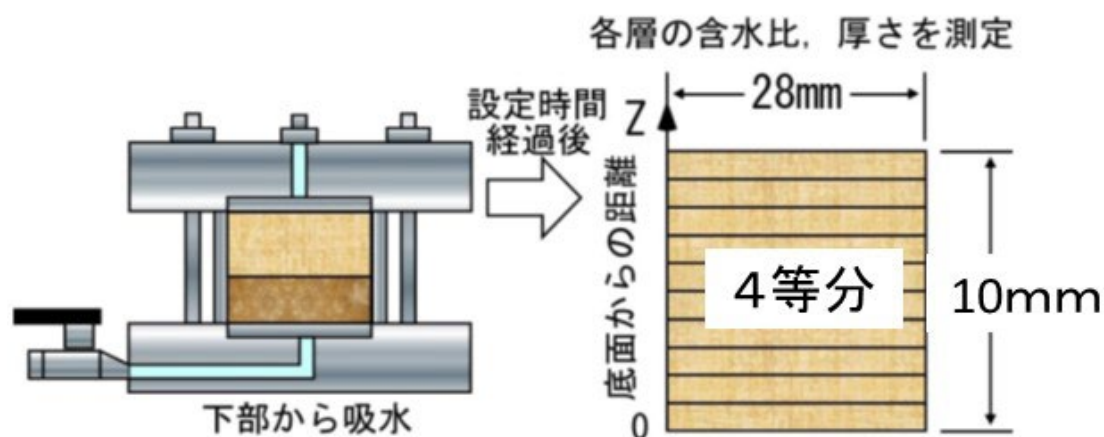


図 4-6 水分拡散実験の概念図

表 4-5 浸潤試験の試験条件

目標乾燥密度 (Mg/m^3)	1.55
供試体寸法 (mm)	直径 28×高さ 10
供試体分割数	4
浸潤時間 (hour)	4, 8, 20, 48, 240

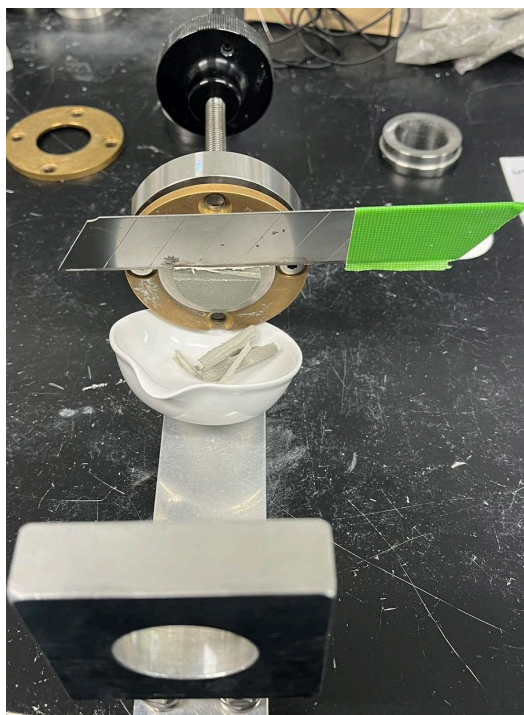


図 4-7 供試体の分割方法

ここに、浸潤試験による水分拡散係数の算出方法を示す。不飽和土の土中水の移動に関する支配方程式はダルシー則であるが、バッキンガムやリチャーズによって拡張された式 4-2 で示される^{23) 24)}。結果を分析する際、水の流れに対する重力 ($\partial k / \partial z$) の影響は無視されることが多かった²¹⁾。したがって、式 4-2 は式 4-3 のように近似できる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial k}{\partial z} \quad \text{式 4-2}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad \text{式 4-3}$$

ここで、 t : 飽和期間、 θ : 土の体積含水率; $k(\theta)$: 不飽和透水係数、 z : 供試体底部を基準とし上向きを正としたときの位置; $D(\theta)$: 水分拡散係数である。

参考文献²⁵⁾は、式 4-3 にパラメータ $\chi (=z/\sqrt{t})$ を導入し、ボルツマン変換を用いて偏微分方程式を常微分方程式に変更した:

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \left(\frac{d\chi(\theta)}{d\theta} \right) \int_{\theta_0}^{\theta_s} \chi(\theta) d\theta \quad \text{式 4-4}$$

ここで、 θ_0 : は初期体積含水率; θ_s : は飽和体積含水率である。

この研究では、薄片に分割して水分拡散係数を求めた。参考文献¹²⁾²¹⁾は、 χ と θ の関係を数学的手法であてはめた。参考文献¹²⁾²¹⁾が報告しているように、 χ と θ の関係は次のように

フィッティングできる：

$$\chi(\theta) = A - B \ln(\theta - C) \quad \text{式 4-5}$$

ここで、 θ_0 ：は初期体積含水率； θ_s ：は飽和体積含水率である．

式 4-5 に式 4-4 を持ち込むことで、水分拡散係数を簡単に計算する式を提案することができる：

$$D(\theta) = \frac{AB}{2} - \frac{B^2}{2} (\ln(\theta - C) - 1) \quad \text{式 4-6}$$

4.1.5 膨潤圧モニタリング実験の概要

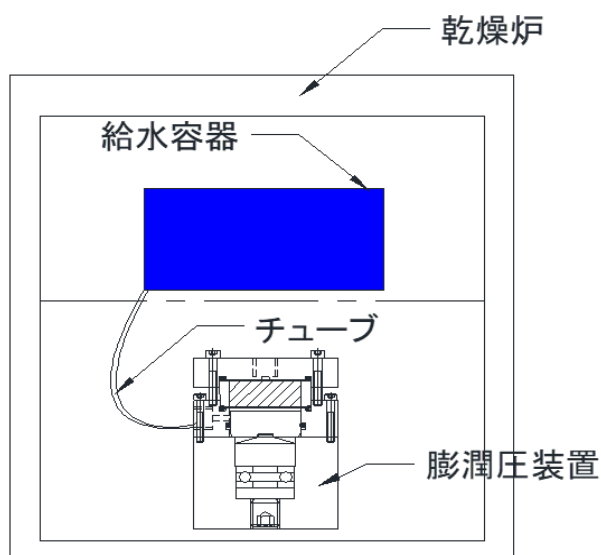


図 4-8 膨潤圧のモニタリング実験の概念図

炉乾燥したクニゲル V1 ベントナイトを高さ 10mm、内径 28mm のリングに入れ、静的締め装置（図 4-2）を使用して、目標乾燥密度 1.55 Mg/m^3 の供試体を得る．その後、供試体を膨潤圧試験装置に設置した（図 4-4）．試験温度（25、60 と 80°C ）を制御するため、給水容器と供試体を取り付けた膨潤圧試験装置を含む試験システム全体を、設定温度の乾燥炉に入れた（図 4-8）．蒸留水と人工海水を供給する前に、試料と蒸留水を設定温度に到達させるため、試験システム全体を約 4 時間乾燥炉に入れた．モニタリングには、東京測器研究所製の高温用センサー（CLS=10KNHS003）を使用した．このセンサーは 160°C の使用環境までの膨潤圧を測定することが可能である．本実験では、人工海水と蒸留水を飽和液体として使用し、異なる温度での膨潤圧を 1000 日程度モニタリングする．

4.2 2024 年度の成果内容

4.2.1 膨潤圧実験の成果

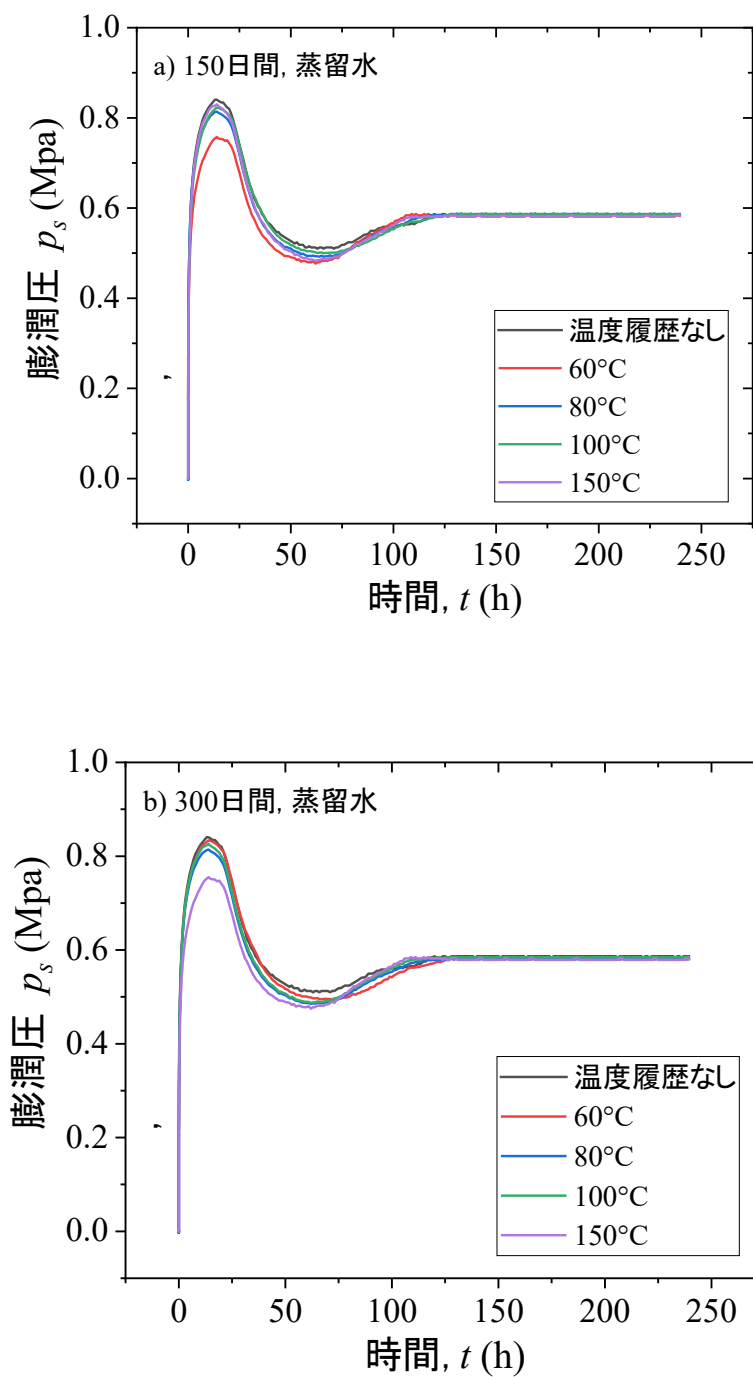


図 4-9 蒸留水で飽和させたベントナイトの膨潤圧曲線: a) 150 日間, b) 300 日間.

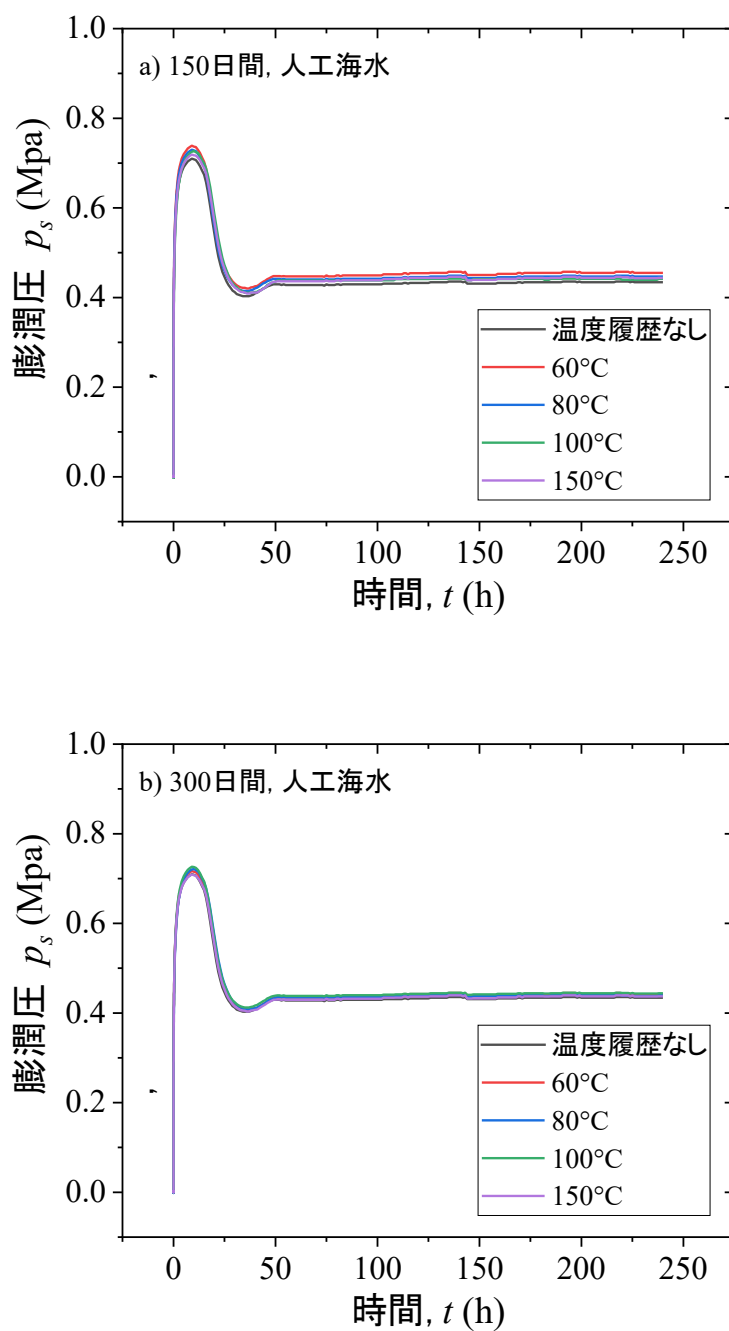


図 4-10 人工海水で飽和させたベントナイトの膨潤圧曲線: a) 150 日間, b) 300 日間.

図 4-9 と図 4-10 は、温度履歴（養生温度：60, 80, 100 および 150°C，養生時間：150 および 300 日間）を与えた供試体の飽和時間に対する膨潤圧の変化を示す．参考文献^{12) 20)}は、締め固めたベントナイトの膨潤圧の変化を時系列的に 4 つの領域に分割することを報告している：1) 初期急上昇域，2) 下降域，3) 再上昇域，4) 長期安定域である．2023 年度（養生温度：60, 80, 100 および 150°C，養生時間：30 および 60 日間）と同様に，図 4-9 と図

4-10 から明らかなように、膨潤圧曲線は、温度履歴に関係なく、同じ液体飽和 KV1 ベントナイトを使用した場合、参考文献^{12) 20)}に記載されているものと同じ形状の曲線である。また、膨潤圧曲線の形状は、人工海水と蒸留水のいずれを用いても、参考文献^{12) 20)}に記載されている形状と類似している。

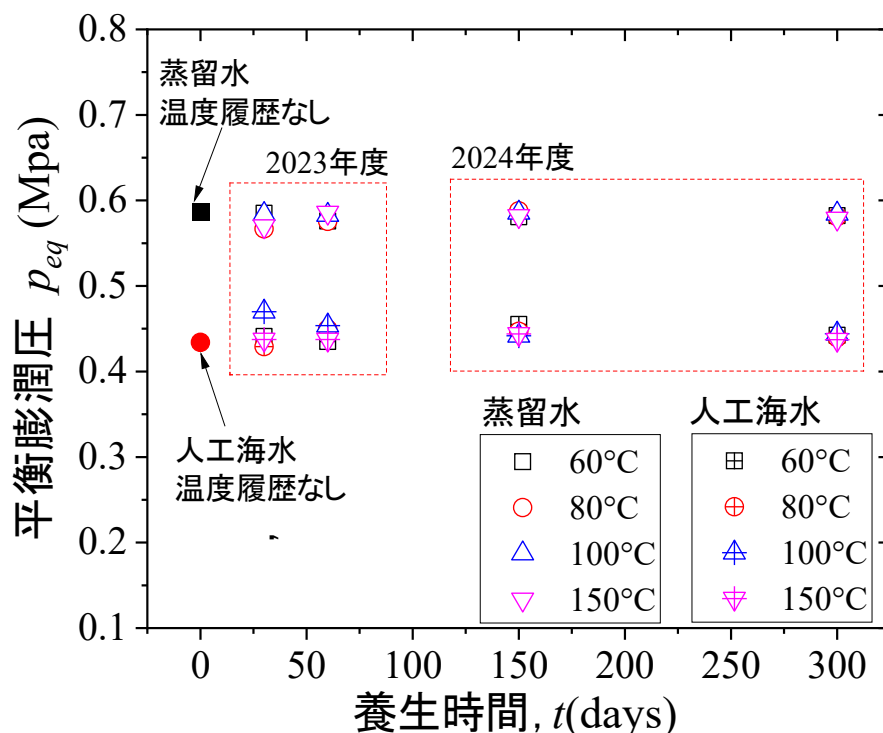


図 4-11 蒸留水および人工海水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの平衡膨潤圧。

図 4-11 は、蒸留水および人工海水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの平衡膨潤圧を示す。ベントナイトの平衡膨潤圧（飽和状態での膨潤圧）は、ベントナイトの自己修復能力を評価するための重要なパラメータとして採用された¹²⁾。2023 年と 2024 年の結果を組み合わせると、図 4-11 からわかるように、蒸留水や人工海水で飽和させた場合でも、温度履歴（養生温度：60, 80, 100 および 150°C、養生時間：30, 60, 150 および 300 日間）が平衡膨潤に及ぼす影響は限定的である。同じ養生温度では、平衡膨潤圧は養生時間が長くなっても大きく変化しなかった。平衡膨潤圧は、同養生時間であれば、養生温度によって大きく変化することはなかった。また、図 4-11 から、蒸留水で飽和させた平衡膨潤圧は、人工海水で飽和させた平衡膨潤圧よりも大きいことがわかる。

4.2.2 水分拡散係数実験の成果

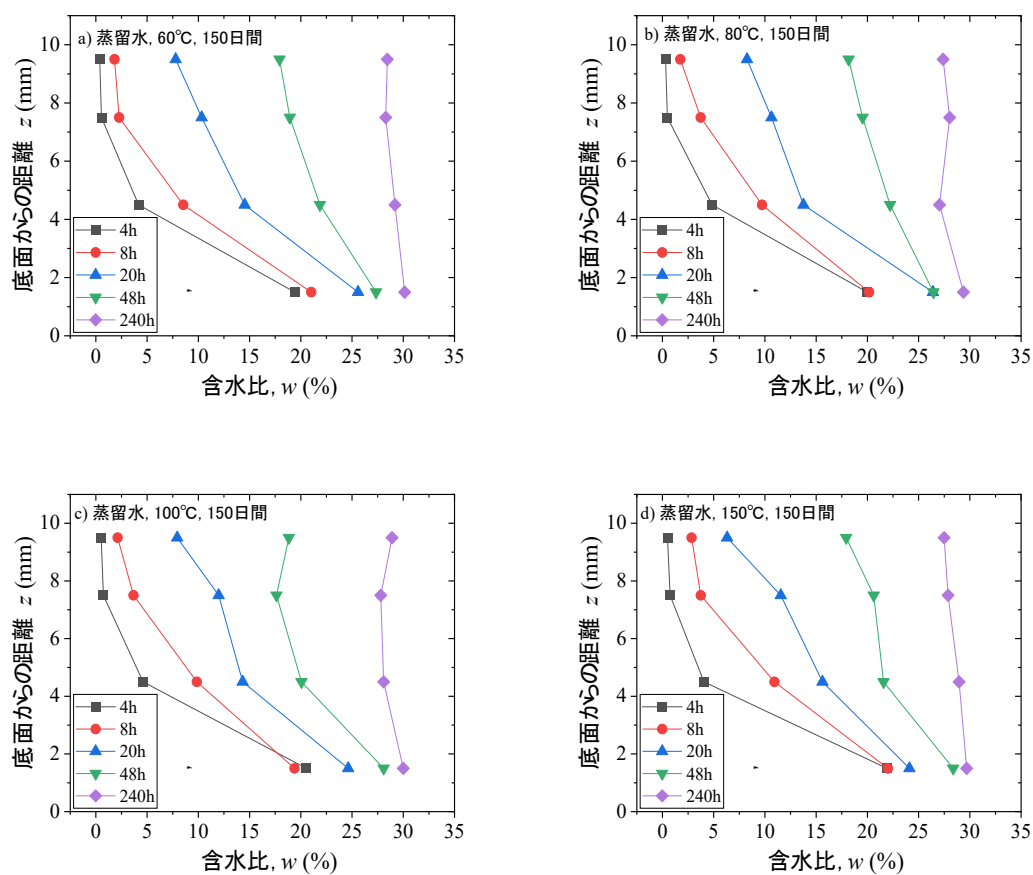
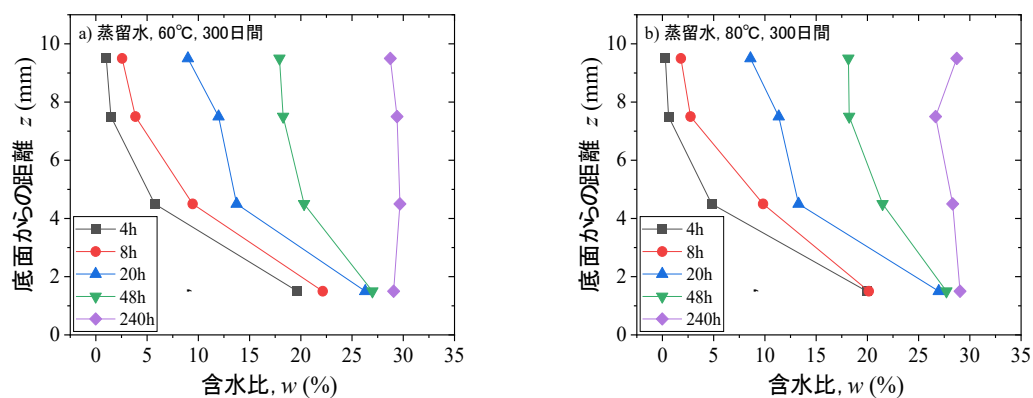


図 4-12 蒸留水で飽和させた温度履歴 150 日間のベントナイトの水分分布: a) 60°C 150 日間, b) 80°C 150 日間, c) 100°C 150 日間, d) 150°C 150 日間



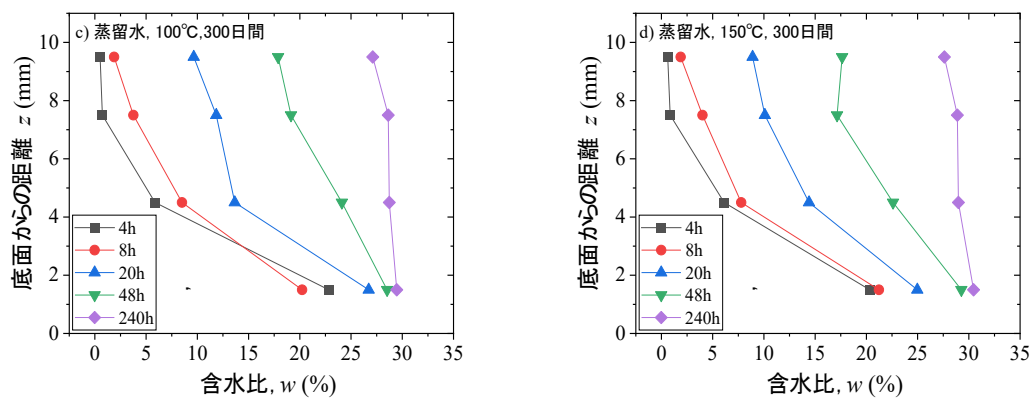


図 4-13 蒸留水で飽和させた温度履歴 300 日間のベントナイトの水分分布: a) 60°C 300 日間, b) 80°C 300 日間, c) 100°C 300 日間, d) 150°C 300 日間.

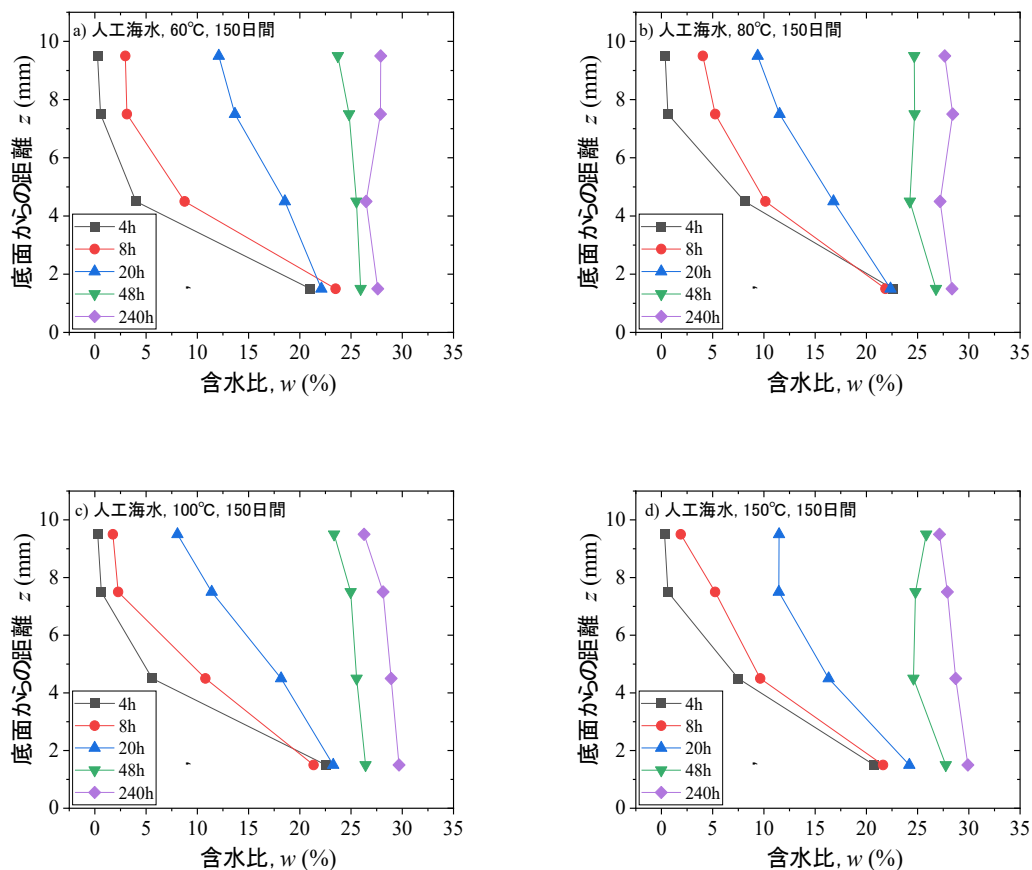


図 4-14 人工海水で飽和させた温度履歴 150 日間のベントナイトの水分分布: a) 60°C 150 日間, b) 80°C 150 日間, c) 100°C 150 日間, d) 150°C 150 日間

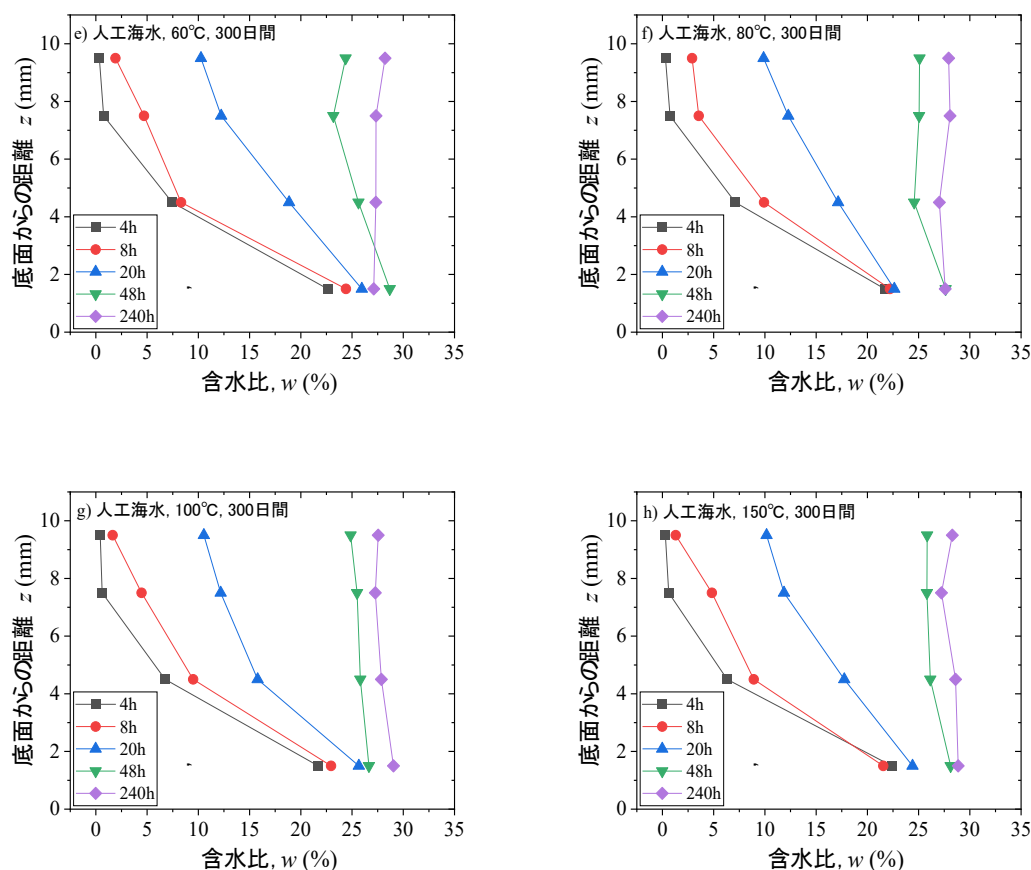


図 4-15 人工海水で飽和させた温度履歴 300 日間のベントナイトの水分分布:a) 60°C 300 日間, b) 80°C 300 日間, c) 100°C 300 日間, d) 150°C 300 日間.

図 4-12, 4-13, 4-14, 4-15 は, それぞれ蒸留水と人工海水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの吸水時間を変化させた後の薄片の含水比を示す. 図 4-12, 4-13, 4-14, 4-15 から, 薄片の含水比は, 湿潤時間が短い (蒸留水: 2h, 8h, 20h, 48h; 人工海水: 2h, 8h, 20h) 場合, 同じ湿潤時間でも試料の底からの距離が長くなるにつれて, 薄片の含水量が減少することを示している. より長い湿潤時間 (蒸留水: 240h; 人工海水: 48h, 240h) では, 薄片の含水比は比較的安定した値を保つようである. さらに, 人工海水の場合は蒸留水に比べて安定した値に達するまでの時間が短いことが示唆された. 一方, 同じ位置 (底面から同じ距離) にある薄片の含水比は, 湿潤時間が長くなるにつれて増加する. この現象は 2023 年度の結果と一致している.

図 4-16, 4-17 は、蒸留水と人工海水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの θ (体積含水比) と χ (パラメータ) の関係を示している。図 4-16, 4-17 からわかるように、実験データベースは式 4-5 に従っている。したがって、本研究における水分拡散係数の計算は、式 4-6 を用いて計算することができる。

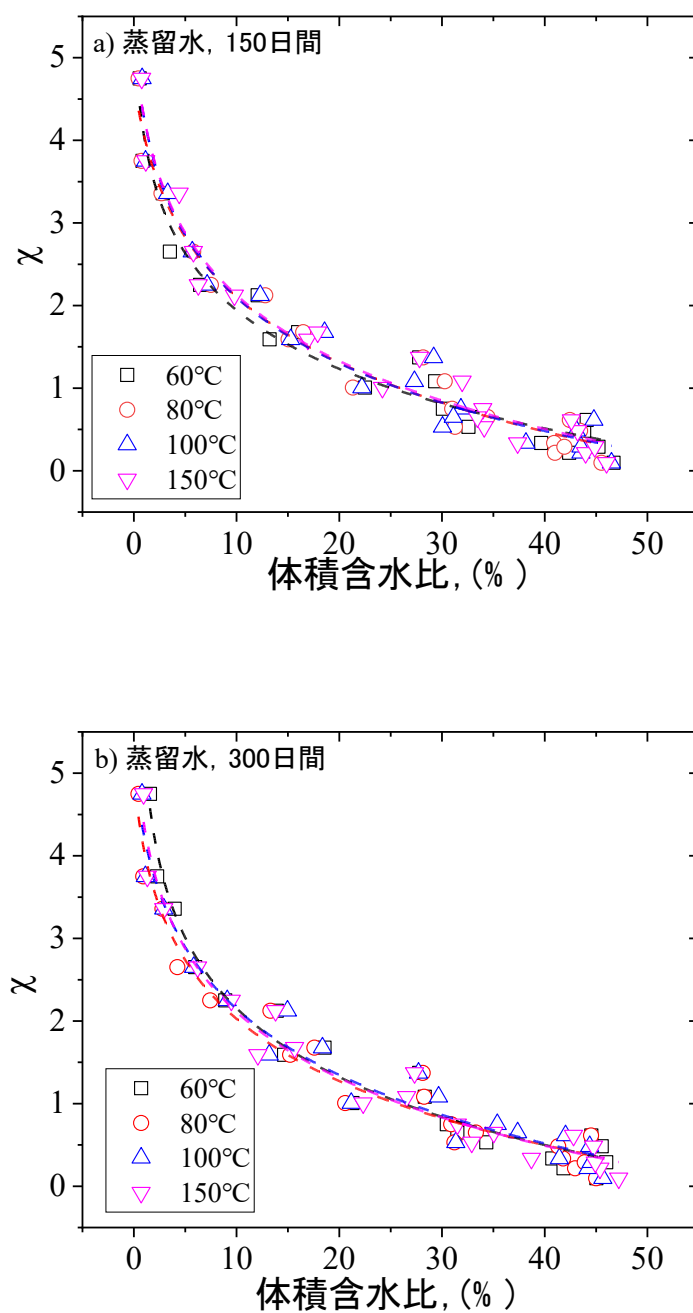


図 4-16 蒸留水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの θ と χ の関係: a) 150 日間, b) 300 日間.

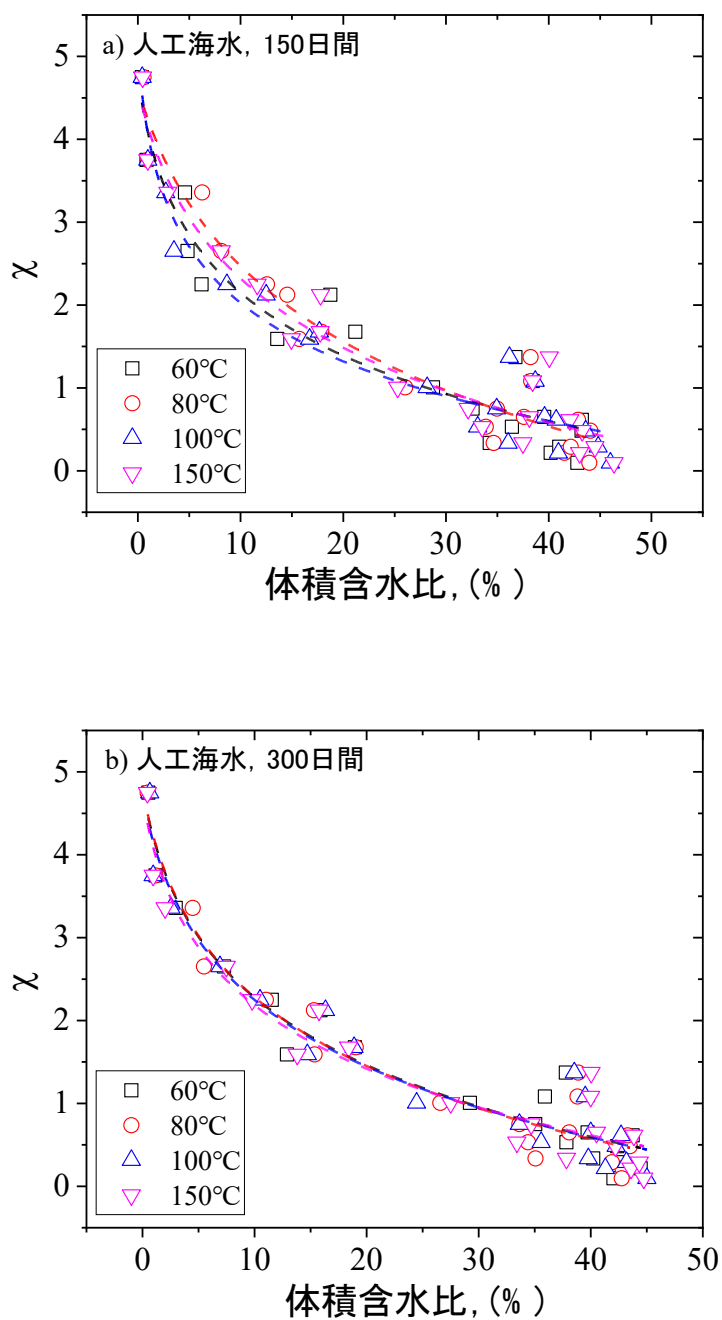


図 4-17 人工海水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの θ と χ の関係: a) 150 日間, b) 300 日間.

図 4-18, 4-19 は, 蒸留水と人工海水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの水分拡散係数を示す. 図 4-18, 4-19 から明らかなように, 水分拡散係数は体積含水率の増加とともに減少する. この現象は, 2023 年度で報告されているものと同じである. 図 4-18, 4-19 から, 2023 年度 (養生温度: 60, 80, 100 および 150°C, 養生時間: 30 および 60 日間)

と同様の現象，ベントナイトが蒸留水で飽和していても人工海水で飽和していても，温度履歴が異なる場合の水分拡散曲線は，温度履歴を経験していない場合の曲線に非常に近いことがわかる．このことは，温度履歴が水分拡散に及ぼす影響は限定的であることを示す．

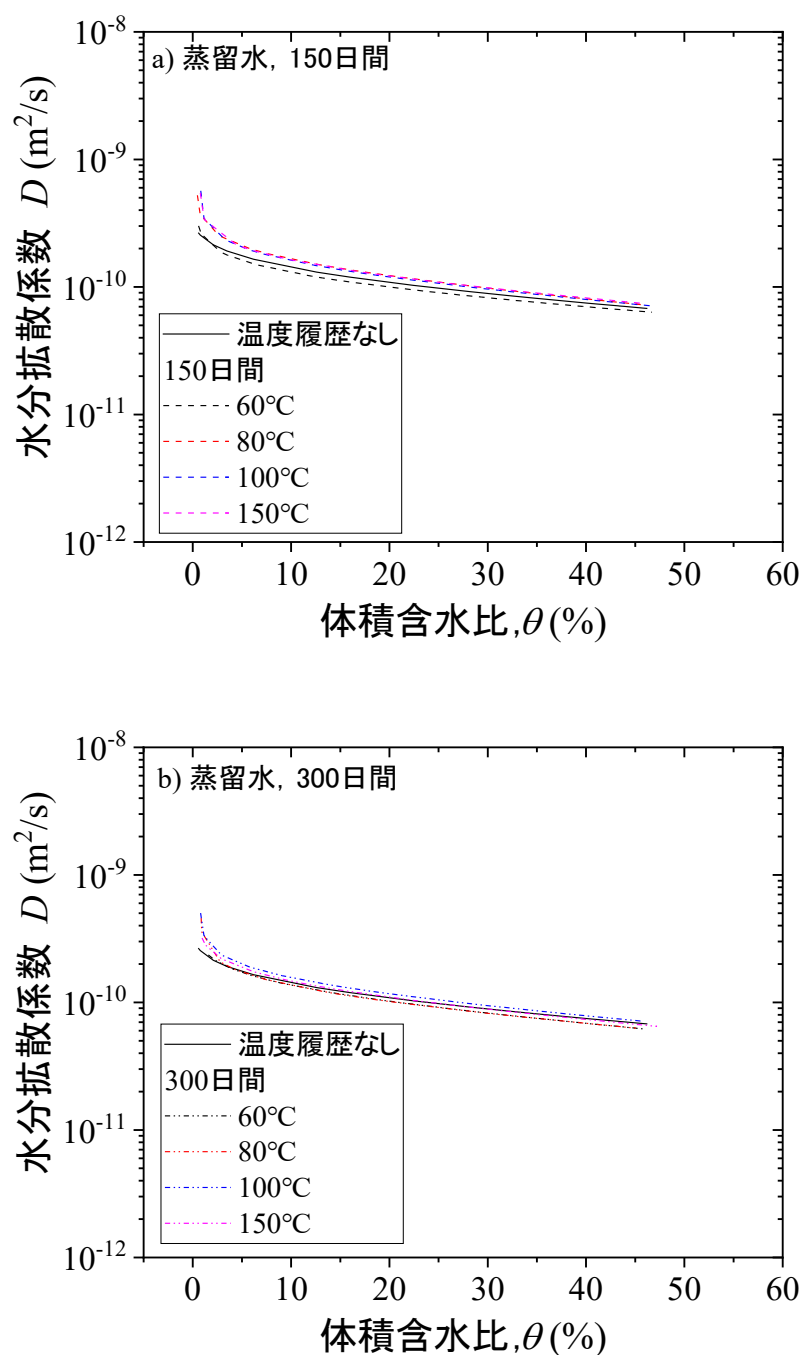


図 4-18 蒸留水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの水分拡散係数: a) 150 日間,
b) 300 日間.

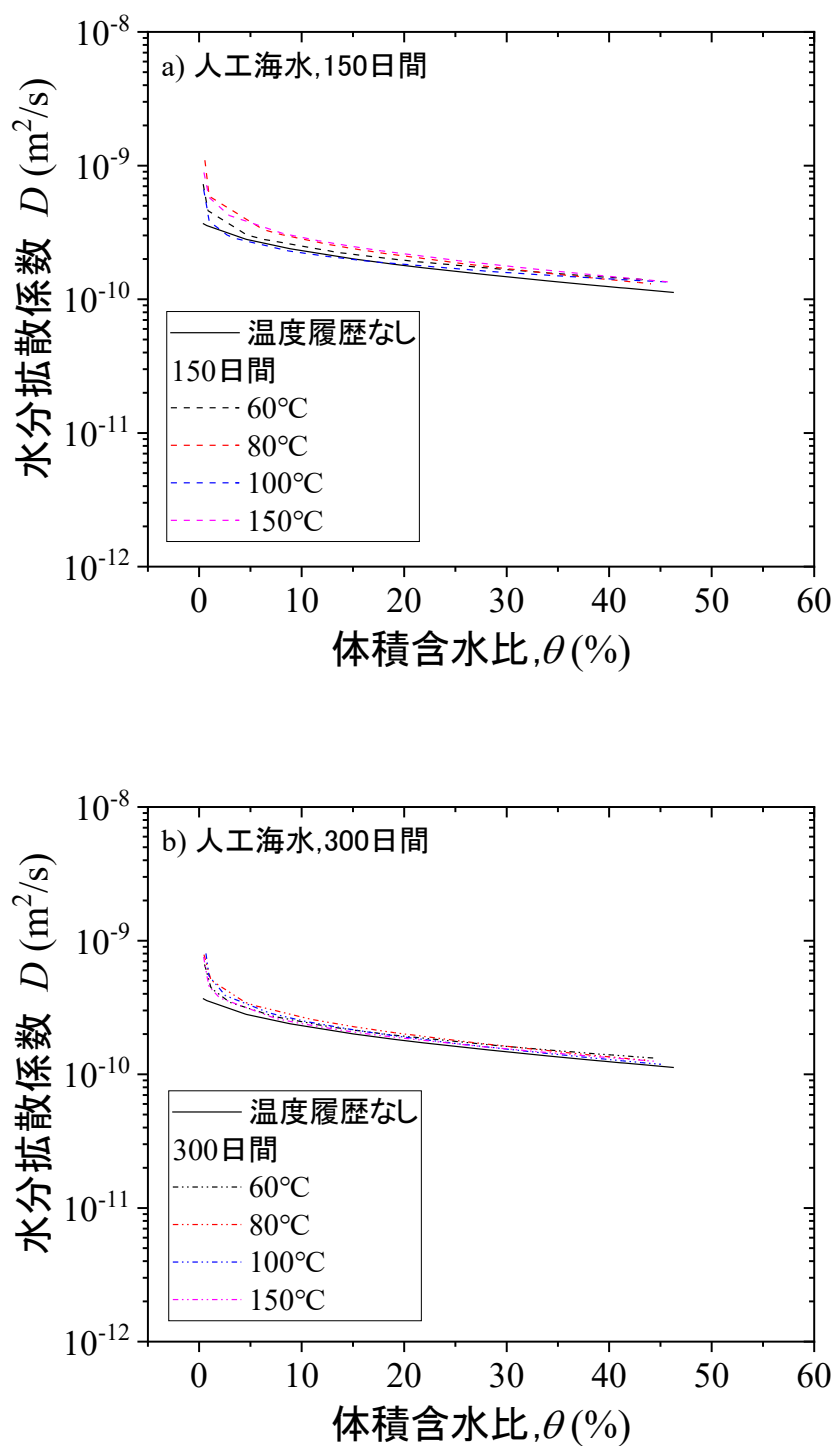


図 4-19 人工海水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの水分拡散係数: a) 150 日間, b) 300 日間.

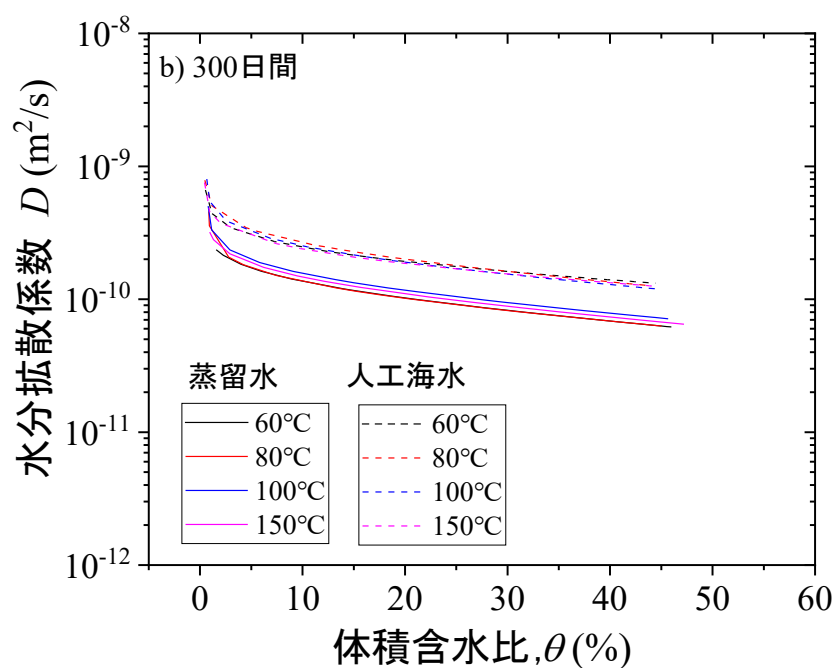
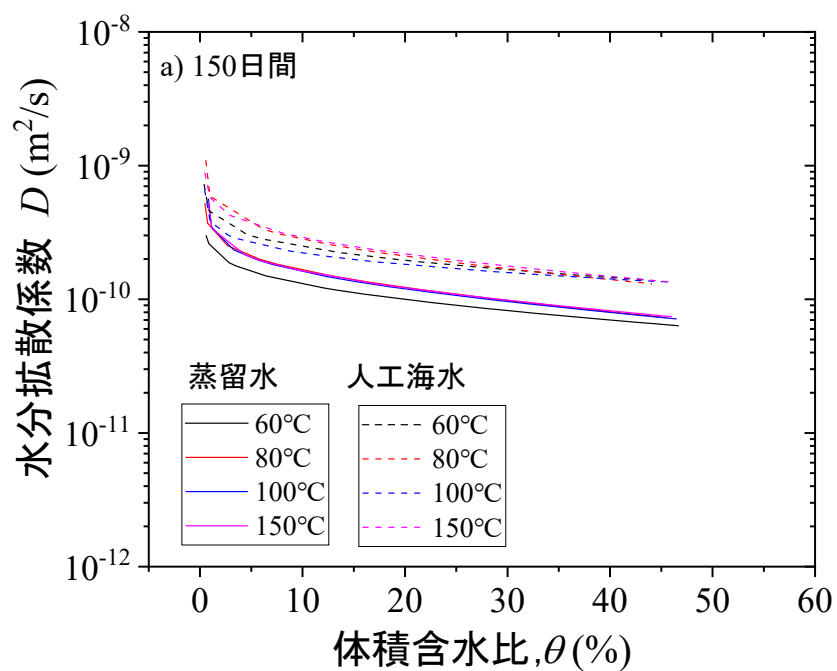


図 4-20 飽和溶液が水分拡散係数に及ぼす影響: a) 150 日間, c) 300 日間.

図 4-20 は、飽和溶液が水分拡散係数に及ぼす影響を示す。図 4-20 から、ベントナイトが同じ温度履歴を経た場合、海水飽和の方が蒸留水飽和よりも水拡散率が大きいことがわかる。この現象は 2023 年度の結果と一致している。

4.2.3 メチレンブルー（MB）吸着量の成果

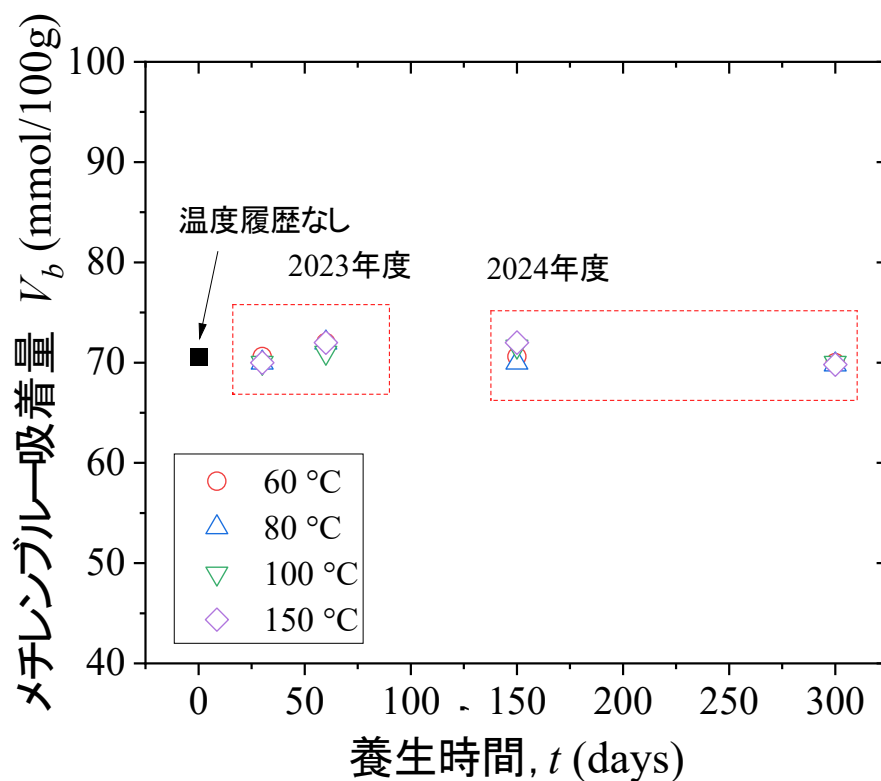


図 4-21 温度履歴の異なるベントナイトのメチレンブルー吸着量

ベントナイトのモンモリロナイト量を評価するパラメータとしてメチレンブルー吸着量が採用されている⁸⁾⁹⁾。図 4-21 は、温度履歴の異なるベントナイトのメチレンブルー吸着量を示す。2023 年と 2024 年の結果を組み合わせると、図 4-21 からわかるように、温度履歴（養生温度：60, 80, 100 および 150℃、養生時間：30, 60, 150 および 300 日間）がメチレンブルー吸着量に及ぼす影響は限定的であることから、2023 年度と 2024 年度に用いた温度履歴は、クニゲル V1 ベントナイトのモンモリロナイト含有量にほとんど影響を及ぼさなかったと考えられる。モンモリロナイトの含有量に変化がないことが、膨潤圧と水分拡散係数に温度履歴の影響がない理由のひとつと考えられる。

4.2.4 X線回折の成果

図 4-22 は、蒸留水飽和後の異なる温度履歴ベントナイトの底面間隔を示す。図 4-22 からわかるように、温度履歴は底面間隔に及ぼす影響は限定的である。これも、温度履歴が Kunigel-V1 ベントナイトの平衡膨潤圧と水分拡散係数にほとんど影響を及ぼさなかったためと考えられる。しかし、人工海水飽和後の異なる温度履歴ベントナイトの底面間隔は測

定されておらず，2025 年度に測定する予定である．

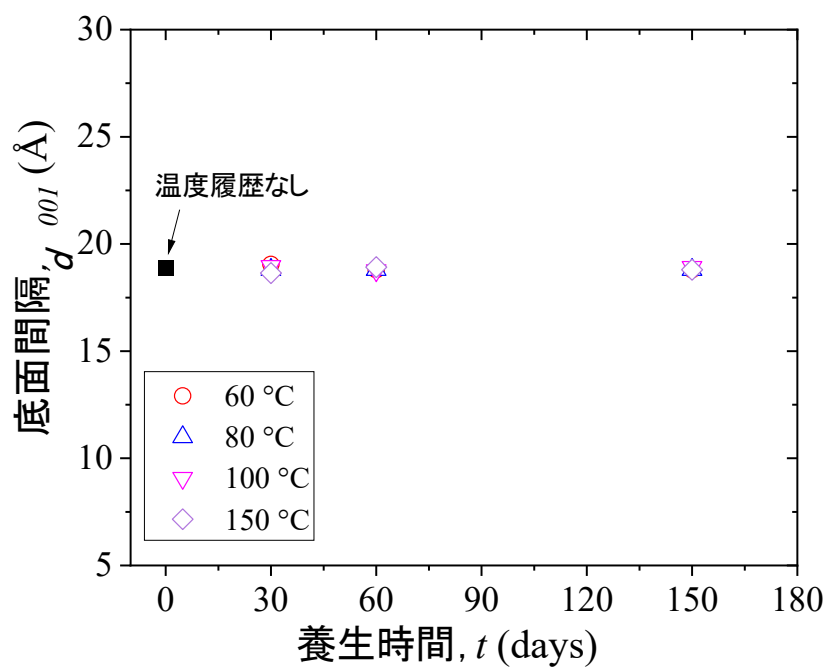
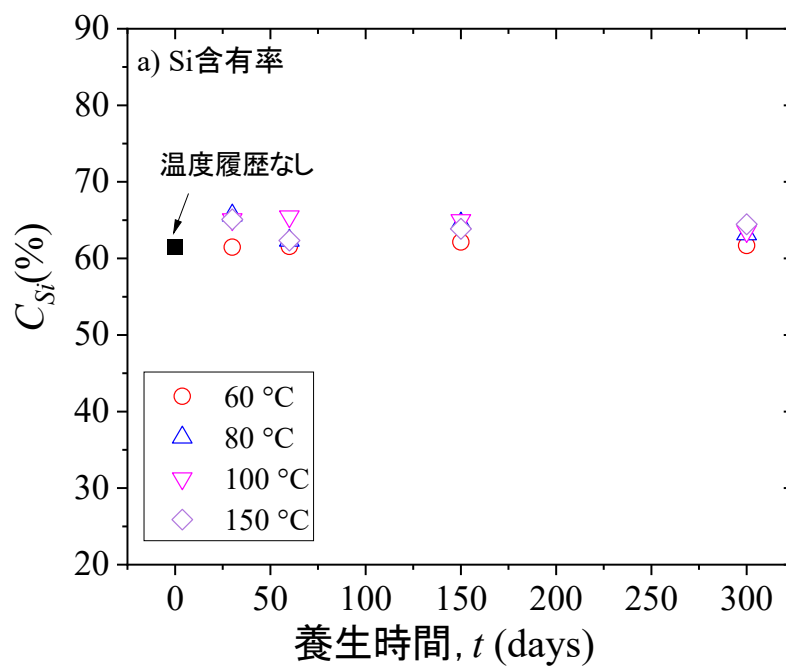


図 4-22 蒸留水飽和後の異なる温度履歴ベントナイトの底面間隔

4.2.5 蛍光 X 線分析の成果



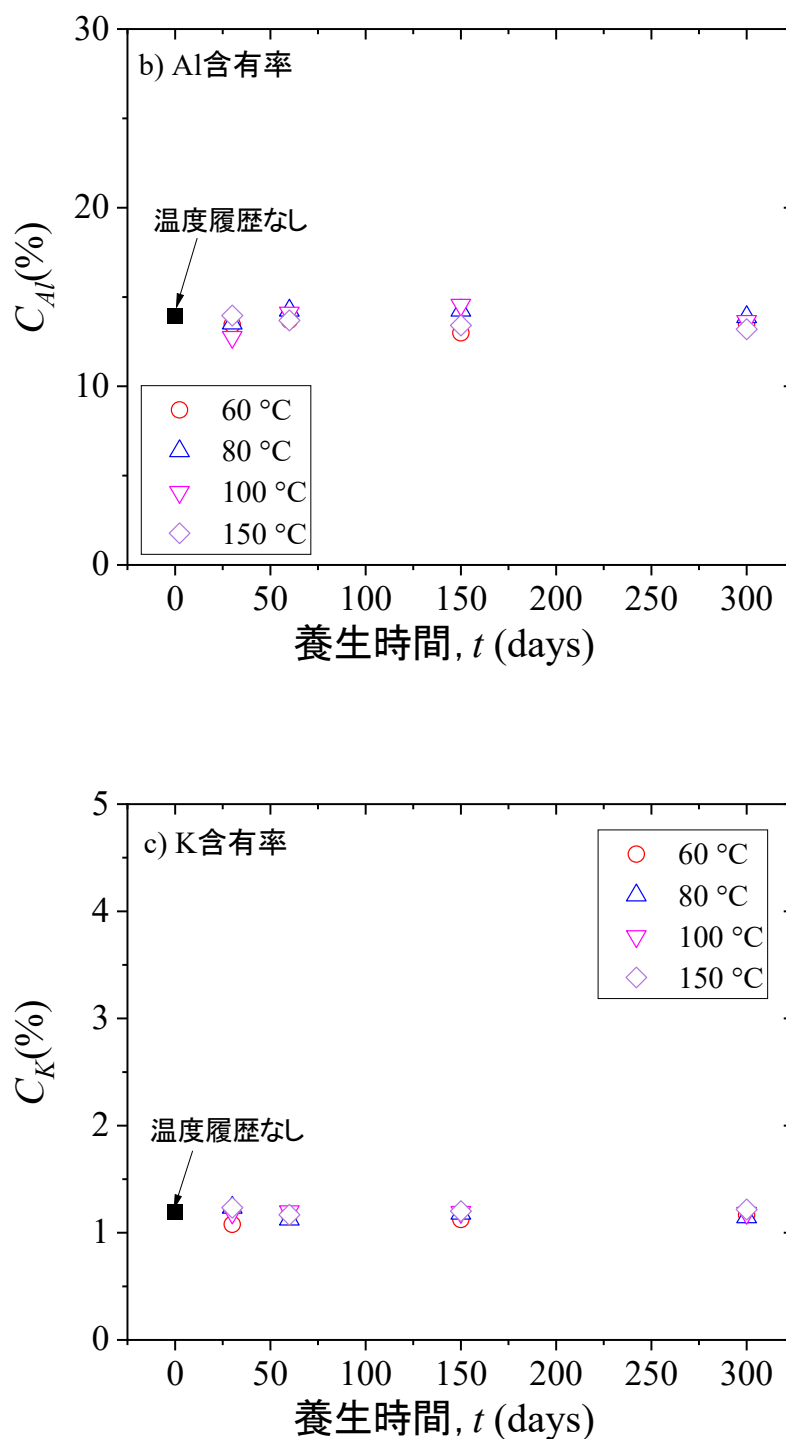
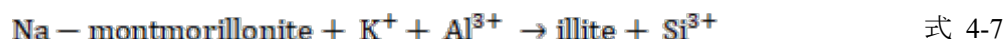


図 4-23 温度履歴の異なるベントナイトの Si, Al, K 含有率: a) Si 含有率, b) Al 含有率, c) K 含有率.

イライト化（モンモリロナイトがイライトに変化する）は、高温下におけるモンモリロナイトの最も代表的な変質であり、広く報告されている^{26) 27)}。イライト化プロセスは、次

のような反応によって模式的に記述することができる²⁶⁾²⁷⁾：



ナトリウムモンモリロナイトは、高温で K および Al と反応して、イライトおよび Si を生成する。K, Al, Si の含有量を測定するために、XRF 実験を実施した。図 4-23 は、温度履歴の異なるベントナイトの Si, Al, K 含有率を示す。図 4-23 の実験結果は、これらの元素の含有量が温度履歴によって大きく変化しないことを示しており、これはイライト化が起きなかったことを示していると考えられる。

4.2.6 SEM の成果

2024 年度は、SEM 実験により、蒸留水と人工海水でのマイクロ構造を観察した。図 4-24 は、蒸留水および人工海水で飽和させた温度履歴なしのベントナイトの SEM 写真図を示す。図 4-24 から、人工海水を使用した場合、蒸留水を使用した場合と比較して、モンモリロナイトの集合体の形状が変化し、集合体間の距離が短くなっていることがわかった。これは、人工海水の方は膨潤圧が小さく、水分拡散係数が大きくなった原因と考えられる。

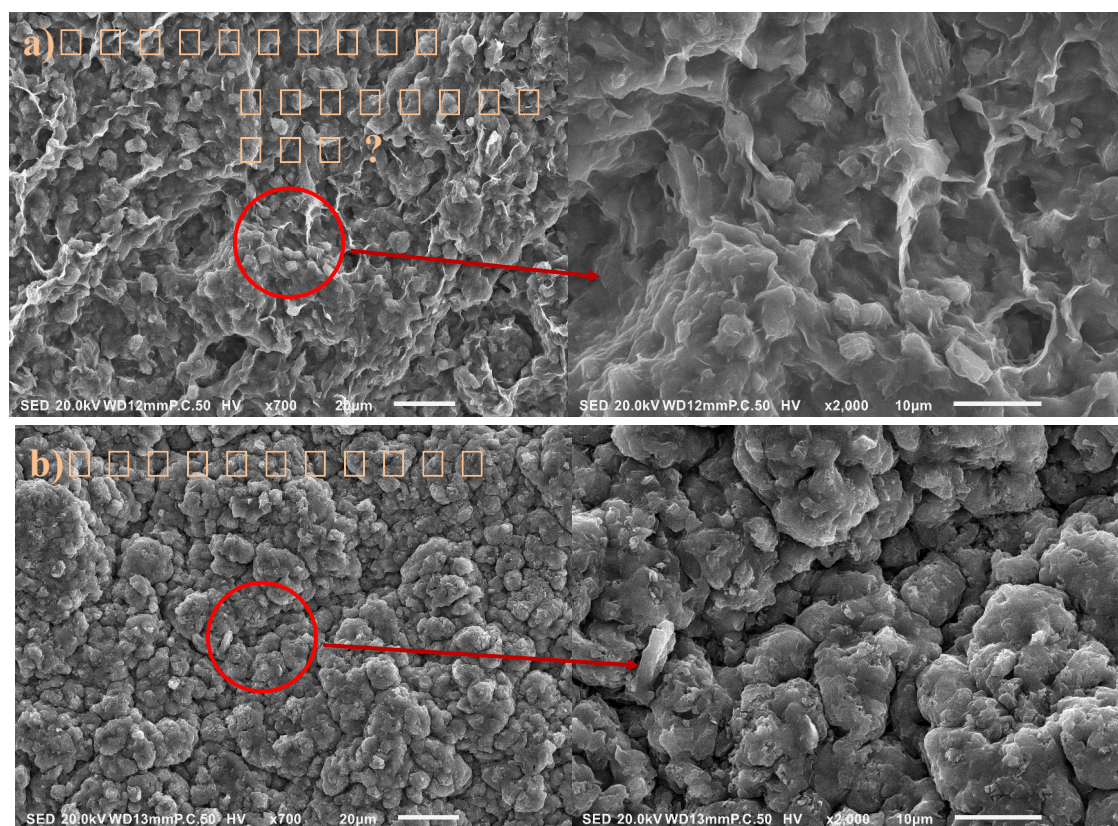


図 4-24 蒸留水および人工海水で飽和させた温度履歴なしのベントナイトの SEM 写真: a) 蒸留水, 温度履歴なし ; b)人工海水, 温度履歴なし。

4.2.7 膨潤特性の長期モニタリング

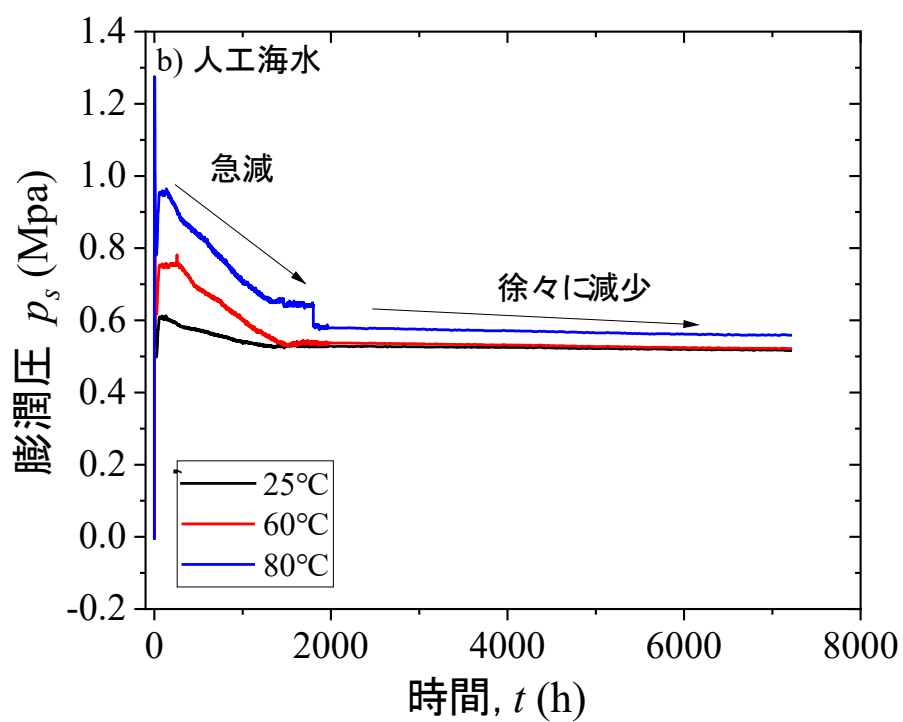
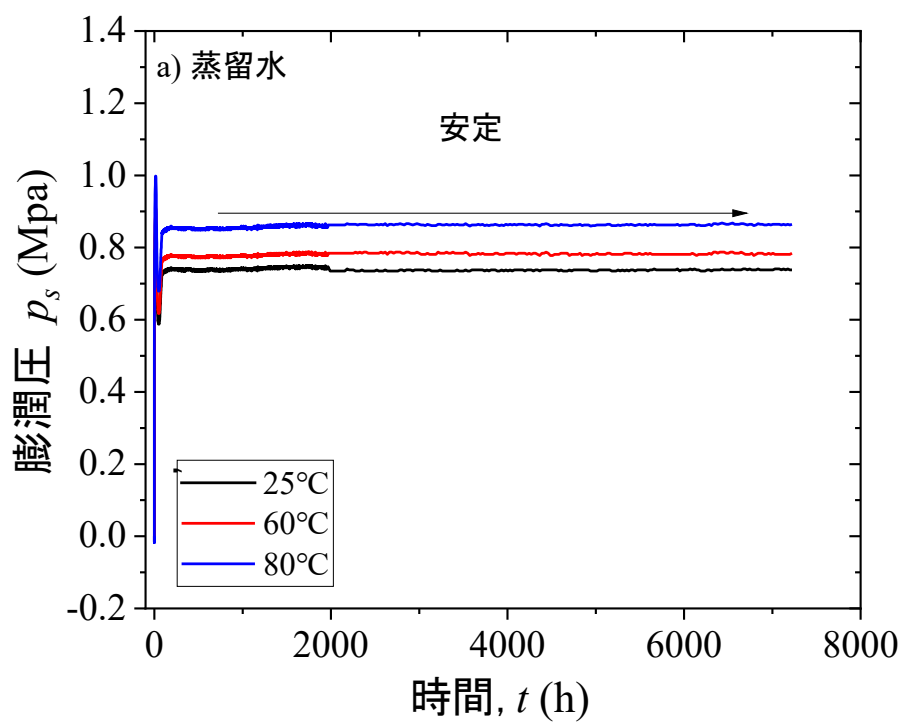


図 4-25 膨潤圧の長期モニタリング: a) 蒸留水, b) 人工海水.

図 4-25 は、約 1 年間の蒸留水および人工海水で飽和させた膨潤圧の長期モニタリングを示す。蒸留水の結果は、図 4-25 a) からより、膨潤圧は 4.2.1 セクションに説明したピーク、谷、リピーク、平衡点の後、長期的に安定した状態に維持されている。しかし、人工海水を使用する場合 (図 4-25 b)), 膨潤圧はピーク、谷、リピーク、平衡点を経験後、減少し続ける。データを収集した時点の膨潤圧は、温度とともに増加していることがわかる。また、データを収集した時点の膨潤圧は、人工海水飽和の方が蒸留水飽和より、小さいことがわかる。

5. まとめ

締固めたクニゲル V1 ベントナイトを異なる温度 (60, 80, 100 および 150°C) で異なる時間 (150 および 300 日間) 養生させ、温度履歴を得た。その後、養生した供試体を蒸留水と人工海水で飽和させ、膨潤圧試験と水分拡散試験を実施した。異なる温度履歴の供試体をメチレンブルー吸着、X 線回折、蛍光 X 線分析試験を行い、メチレンブルー吸着量、モンモリロナイトの底面間隔および Si, K, Al の含有量に及ぼす温度履歴の影響を調べた。また、ベントナイトのミクロ構造に対する飽和溶液の影響を理解するために、SEM 試験を実施した。これに加えて、2024 年 2 月に開始された異なる温度 (25, 60 および 80°C) での異なる飽和溶液 (蒸留水および人工海水) の長期膨潤圧のモニタリングが、約 1 年間実施された。

本研究で得られた成果について、以下に示す。

- 1) 2023 年度と 2024 年度の結果を組み合わせると、平衡膨潤圧と水分拡散係数に対する、本研究でここまで採用した温度履歴 (養生温度 : 60, 80, 100 および 150°C, 養生時間 : 30, 60, 150 および 300 日間) の大きな影響はないことがわかった。また、メチレンブルー吸着量や Si, K, Al 含有量に顕著な変化が見られないことから、温度履歴によってベントナイト中のモンモリロナイトが他の鉱物に変化していないことがある程度示唆された。さらに、温度履歴がモンモリロナイトの底面間隔に与える影響は限定的であった。これらは、温度履歴が平衡膨潤圧や水分拡散係数に及ぼす影響が限定的であるためと考えられる。
- 2) 人工海水による飽和させたクニゲル V1 ベントナイトの平衡膨潤圧は、蒸留水による飽和させたクニゲル V1 ベントナイトの平衡膨潤圧よりも小さい。一方で、人工海水で飽

和させた供試体は蒸留水で飽和させた供試体に比べて水分拡散係数が大きい傾向を示した。SEM 実験を行ったところ、人工海水を使用すると、モンモリロナイトの集合体間の距離が短くなることがわかった。これは、人工海水条件下で膨潤圧が小さく、水の拡散係数が大きいためと考えられる。

- 3) 約 1 年間の膨潤圧をモニタリングした結果、蒸留水の場合、膨潤圧は初期に安定した後、安定したままであることがわかった。しかし、人工海水の場合、膨潤圧は初期に安定した後、減少し続けた。

2025 年度の展望：

- 1) 膨潤圧、水分拡散係数、X 線回折、蛍光 X 線分析およびメチレンブルー吸着量試験は、600 日間の温度履歴に対して行われる予定である。
- 2) 膨潤圧と水分拡散係数に及ぼす飽和溶液の影響を調べるため、陽イオン交換を観察する陽イオン交換容量または浸出陽イオン量試験を予定である。
- 3) ベントナイトを蒸留水と人工海水で飽和させ、異なる温度で長期膨潤圧のモニタリングを続ける。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁：電力調査統計表 過去のデータ
http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/results_archive.html#h28 (2024.1.05
 アクセス)
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁：原発のコストを考える
<http://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/nuclear/nuclearcost.html> (2024.1.05 アクセス)
- 3) 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，
 一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.
- 4) 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.
- 5) 白河部匠，王海龍，後藤茂山本修一，小峯秀雄：不飽和ベントナイトの水分移動特性に及ぼす
 温度履歴の影響評価，土木学会論文集 C Vol. 77, No. 2, pp. 103-117, 2021.
- 6) 小峯秀雄，安原一哉，村上 哲：人工海水環境下における各種ベントナイトの透水係数，土木
 学会論文集 C Vol. 67, No. 2, pp276-287, 2011.
- 7) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性，
 一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.
- 8) 日本工業標準調査会：ベントナイトなどのメチレンブルー吸着量の測定方法，JIS Z 2451，
 2019.
- 9) 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.
- 10) Komine, H., and Ogata, N: Prediction swelling characteristics of bentonites, Journal of Geotechnical
 and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 8, pp. 818–829, 2004.
- 11) Sun, D.A., Cui, H.B., and Sun, W.J.: Swelling of compacted sand-bentonite mixture, Applied Clay
 Science, Vol. 43, pp. 485–492, 2009.
- 12) Wang, H.L., Shirakawabe, T., Komine, H., Ito, D., Gotoh, T., Ichikawa, Y., and Chen, Q.: Movement
 of water in compacted bentonite and its relationship with swelling pressure, Canadian Geotechnical
 Journal, Vol. 57, pp. 921–932, 2020.
- 13) 小峯秀雄，大橋良哉，安原一哉，村上哲：ベントナイトの膨潤圧・膨潤変形特性に及ぼす

- 温度履歴の影響とその要因, 土木学会論文集 C, Vol. 63, No. 3, pp. 731-741, 2007.
- 14) 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.
 - 15) 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.
 - 16) 日本工業標準調査会: ベントナイトなどのメチレンブルー吸着量の測定方法, JIS Z 2451, 2019.
 - 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) 白河部匠, 王海龍, 諸留章二, 小峯秀雄: ベントナイトに適用した陽イオン交換容量および浸出陽イオン量の各種測定方法の検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.17, No.1, 61-71, 2022.
 - 19) 原子力安全研究協会: 人工バリアの長期安定性, 長期耐食性に関する調査研究, pp. II 13- II 15, 2005.
 - 20) Ruan, K.L., Komine, H., Wang, H.L., and Ito, D: Experimental study of initial water content and specimen preparation method effects on Kunigel-V1 bentonite swelling pressures, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 60, No.5, pp. 731–748, 2023.
 - 21) Ruan, K.L., Komine, H., Ito, D., Gotoh, T., and Miyoshi, K.: Hydraulic conductivity and X-ray diffraction tests of unsaturated bentonites with a multi-ring and their predictions by pores distributions, Engineering Geology, Vol. 306, No.5, 106738, 2022.
 - 22) 竹内真司, 原啓二, 中野政詩: 圧縮ベントナイトの水分特性曲線および水分拡散係数と水の移動形態, 地盤工学会論文報告集, Vol.35, No.3, pp. 129-137, 1995.
 - 23) Bruce, R., and Klute, A.: The movement of soil moisture diffusivity, Soil Science Society of America Proceedings, Vol.20, pp. 458–462, 1956.
 - 24) Corey, T.: Mechanics of immiscible fluids in porous media. Water Resources Publication, LLC, Colorado, USA, 2003.
 - 25) Clothier, B., Scotter, D., and Green, A.: Diffusivity and one-dimensional absorption experiments, Soil Science Society of America Journal, Vol.47, pp. 641–644, 1983.
 - 26) Wersin, P., Johnson, L.H., and McKinley, I.G.: Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100 °C: A critical review, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Vol 32, pp. 780-788, 2007.
 - 27) Kale, R. C., and Ravi, K.: A review on the impact of thermal history on compacted

bentonite in the context of nuclear waste management. Environmental Technology & Innovation, Vol. 23, 101728, 2021.

2024 年度 外部発表

【学術論文】

1. **Kunlin Ruan**, Hideo Komine, Daichi Ito, Hailong Wang (2025) Why do swelling strain and swelling pressure exhibit different phenomena under a high-temperature history? *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* (Under Review).
2. Sota Murase, Te Ma, **Kunlin Ruan**, Daichi Ito, Hailong Wang, Hideo Komine (2025) Estimation of water content of compacted Kunigel-V1 bentonite using near-infrared spectra. *Soils and Foundations*, 65(1), 101545.
3. Hao Wang, Hailong Wang, Hideo Komine, Daichi Ito, **Kunlin Ruan** (2025) Sand displacement and nonuniform swellings in sand-bentonite mixture by image processing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* (Accepted, under publishment).
4. Danxi Sun, Hailing Wang, Hideo Komine, Hiroshi Tsunai, Daichi Ito, Gaofeng Pan, **Kunlin Ruan** (2024) Improved SfM-MVS approach using artificial backgrounds. *Soils and Foundations*, 64(5), 101495.
5. Guodong Cai, Hailong Wang, **Kunlin Ruan**, Daichi Ito, Hideo Komine. (2024) Investigation on ion concentration of pore water in compacted bentonite after infiltrated by salt solutions. *Soils and Foundations*. 64(4), 101467.
6. **Kunlin Ruan**, Hideo Komine, Hailong Wang, Daichi Ito. (2024) Experimental study for temperature history effects on swelling pressure, free swelling ratio, and methylene blue adsorption volume of bentonites. *GeoenviromMeet2024*. Portland, USA.

【口頭発表】

1. **Kunlin Ruan** et al. Temperature history effect on swelling pressure of Kunigel-V1 bentonite cured in confined condition Clay Conference 2024. Hannover, Germany. 2024, 11.26.
2. **Kunlin Ruan**. The temperature and temperature history effect on swelling characteristics of bentonites. Shanghai University. 2024, 9.30. (招待有り)
3. **Kunlin Ruan** et al. High-temperature history effect on swelling characteristics and physical properties of Kunigel-V1 bentonite. The 10th joint seminar on Geoenvironmental Engineering and Recycling. 2024, 9.28. (招待有り)
4. 阮 坤林 他, 締めたクニゲル-V1 ベントナイトの膨潤圧に及ぼす温度履歴効果に関する実

験的研究, 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会 2024 年 9 月 2 日

5. 阮 坤林 他, クニゲル-V1 ベントナイトの膨潤圧に及ぼす高温履歴効果, 第 58 回地盤工
学研究発表会 2024 年 7 月 25 日

研究報告 3

透過波による岩盤モニタリングを目指した弾性波 と地盤の不均質性の関係評価

京都大学 大学院工学研究科

吉光 奈奈

【目次】

1. 背景・目的	1
2. 全体研究計画（3 ヶ年における全体計画）	2
3. 2023 年度の成果概要	3
4. 2024 年度研究実施内容	4
4.1 2024 年度の計画、実施方法	4
4.2 2024 年度の成果内容	4
4.2.1 蛍光剤を用いた岩石試料中の液体の浸透過程について	4
4.2.2 岩石試料の準備	6
4.2.3 蛍光観察手法	6
4.2.4 結果	6
4.2.5 議論	8
4.2.6 不均質岩石試料における弾性波の透過特性	9
4.2.7 差分法による弾性波数値シミュレーション	10
4.2.8 数値計算の結果	11
4.2.9 フィールドにおける弾性波観測の準備	11
4.2.10 フィールド水位計測	12
4.2.11 地震観測の開始	12
5. まとめ	13

参考文献

2024 年度外部発表

1. 背景・目的

放射性廃棄物の地層処分においては、入念な調査のもと安定した地盤が選定されるが、安定した地下環境もミクロな目線で眺めると完全には均質ではなく、様々な構造特性を持つ。また、近年は想定を超えた降雨や地震の振動が地盤に加わることもしばしばある。地盤の安定性は岩盤に含まれる亀裂や弱面、地質境界などと強く関連するため、これらの自然災害の影響から、地殻にかかる応力の変化による亀裂の増加や、地下水流路の変化など、事前に予想されていなかった地盤の構造変化が起こる可能性がある。現在はほとんど構造の安定性に影響を及ぼさないような小さな不均質でも、将来的にそれが地震動や流体の影響を受けて拡大等の変化をおこす可能性もある。したがって、サイト調査段階や処分場の建設・操業段階では地層処分場周辺の地盤は監視し続けることが必要である。

CCS（二酸化炭素回収・貯留）候補地の監視においては光ファイバを用いて変形を検知する案などが検討されているが、光ファイバで得られる波形はどこの情報を反映したものなのか物理的に評価しにくい、コストがかかる、ノイズに弱いといった弱点を持つ。したがって、能動的に弾性波を透過させ地震計で観測をおこなうことで、よりフレキシブルに物理的意味のはっきりした波形を取得し、地盤の監視をおこなうことができる。弾性波を用いた地盤の探査は処分場の選定時にもおこなわれるが、亀裂等の不均質情報はアレイを用いた構造探査的な手法ではなく、波の特性を調べる地震学的解析からも多くの情報が得られる。Aki and Richards (1980)や西澤(2005)には、センサが捉える弾性波の波長と不均質媒質の大きさの関係についてのイメージ図が示されている。亀裂等の不均質と弾性波形状の関係を評価する既往研究では、伝播経路の構造が正確にわからないことから、統計的取り扱いによる理論研究が先行してきた。どのような波長をもった弾性波を、どのような感度帯域のセンサで収録すれば、どのようなスケールの亀裂や不均質を検出できるかという具体的な関係は、地盤の安定性を評価するうえで重要となるが、まだ明らかになっていない点もまだ多い。そこで本研究では、薄片観察やCT スキャン等で試料内部の様子を視覚的に把握することができる岩石実験や、処分場に近いスケールの現場計測における広帯域計測を通して、透過波と亀裂の関係を吟味し、どのような岩盤の変化が検出可能か、評価する。

これまでに地層処分分野において岩盤の弾性波モニタリングの適用性について検討されてきたが、信頼性の向上のためにはさらに高度化する必要がある。そのうえで、能動的弾

性波モニタリングから岩盤情報やその変化を検出することができる場合、透過波の速度・振幅・周波数・形状変化等と岩盤の変化がどのように関連するのか関係性を調べ、変化や亀裂が検出できる場合はそれらを定量的に描像することを目指す。どのような感度帯域や分解能を持つ観測機器で、どのような構造が見え、何が見えないのかという点を明瞭にし、実際のモニタリングに役立つ情報を得るのが本研究の最終目標である。

2. 全体研究計画（3 カ年における全体計画）

研究では、まず安定した環境に置いて不均質構造と波形変化の関係を把握するために、実験室における岩石試料を用いた透過波試験等を実施する。実験室では CT スキャン等により試料内の不均質特性がある程度推測可能であることから、不均質特性と波形の関係を評価する。次に、実際の現場と同スケールのフィールド計測を通して、波形のモニタリングを実施する。その際には実験室で得られた知見も活用しながら、どのような感度帯域や分解能を持つ観測機器を使えばどのような構造が見えるかを評価する。

(1) 2023 年度

弾性波透過実験の準備・実施
岩石試料の選定
CT 画像撮影
大気圧下における岩石透過波試験の実施
波形解析の開始

(2) 2024 年度（2024 年 4 月頃～2025 年 3 月）

岩石試料に対する透過波試験の実施（継続）
注水を伴う透過波試験の実施
波形解析の実施（継続）
現場計測候補地の選定
観測網の立案
現場におけるデータ収録装置の設計
センサの発注・埋設

(3) 実施内容（2025 年度（2025 年 4 月～2026 年 3 月））

実験室の岩石試料に対する注水と透過波試験の実施

実験室の波形解析の実施

現場観測におけるテスト収録の実施

現場観測における本収録，データ回収

現場データの解析

(4) 実施内容 (2026 年度 (2026 年 4 月～2026 年 9 月))

現場観測データの追加回収

現場観測データの波形解析の実施

研究総括

3. 2023 年度の成果概要

2023 年度は主に実験室における岩石試料を用いた弾性波計測を目指し，試料や機器の準備と一部計測の開始を目標とした．また次年度以降の透水過程観察に向けた準備をした．

不均質岩石試料における弾性波の透過特性

不均質媒質や空隙を含んだ岩石試料を 2 点選定して円柱形に加工した．

試料 AO1 は，全体にランダムに直径 1 mm から 30 mm 程度の空隙が含まれている．また，白い長石のようなものが均質に含まれている．試料 AO2 は，母岩が AO1 よりも暗く，手に持った際にも重量感があつた大きな空隙は見られず，試料全体に 2 mm 程度の空隙が均質に分布し，緑色の鉱物粒子がその中を埋めている様子が見られた．最後に BRS と名付けたベレア砂岩試料は，粒径 1 mm 以下の細かい粒子で構成されていた．試料表面にコアリング時に擦れたような痕が見られた．試料の重量と形状から簡易的に密度を推定した結果，AO1 の密度は 2.23 g/cm³，AO2 は 2.56 g/cm³，そして BRS は 2.18 g/cm³であった．

試料内に弾性波を透過させ，不均質状態の違いが波形にどのように表れるかを調べた．試料表面中央に中心周波数 1 MHz の P 波タイプの PZT を貼付し，ファンクションジェネレータ(FG)から±5 V のステップ関数を，バイポーラ増幅器により振幅 20 倍に増幅して入力した．試料中を透過した波を，送振子が置かれている面（面番号 1）とは異なる 5 つの面（面番号 3, 4, 5, 6, 7）で，高さ 5 mm ごとに LDV(レーザードップラー振動計)と呼ばれる機械で収録した．

BRS では初動，S 波，その後の表面波と反射波がはっきりと見えていたのに対して，AO1 や AO2 では後続相の乱れが大きかった．特に，AO2 では反射波が見えたが，AO1 では表

面波・反射波ともに見えにくかった。また、AO1 や AO2 の後続相には、上下の非対称性が見られた。

全観測点において初動の立ち上がり時間を目視で読み取った。振動を入力した点から各観測点までの波の伝播経路を直線で近似し、伝播速度を推定した。その結果、AO1 の平均速度は 4.22 ± 0.39 [km/s]、AO2 の平均速度は 4.22 ± 0.39 [km/s]、BRS の平均速度は 2.66 ± 0.12 [km/s] と推定された。全観測点における速度の擾乱を観察した結果、BRS では各観測点における速度擾乱はほとんどなく、透過経路による速度の違いは小さかった。いっぽう、AO1 の経路ごとの速度擾乱は大きく、AO1 と BRS の試料内部の不均質状態の違いが影響していると考えられる。比較的均質な BRS に対して、AO1 にはサイズも位置もランダムに空隙が分布しており、その影響を受けていると推測された。

これらの観察結果を得て、実験室場における不均質試料内部での波動場の弾性波透過程を理解するために、差分法を用いた数値シミュレーションコードを構築開始した。

フィールドにおける弾性波観測

フィールド観測について、2023 年度には機器の選定を実施した。フィールド観測経験のある研究者らへのインタビューを行い、近計システム社製の速度型地震センサ (KVS-300/100) の利用を検討した。収録装置に関しては、GPS の同期、透過波制御、地震計データの収録を同時に担う必要があり、比較的高度な制御能力が必要とされる。したがって、過去のフィールド観測や実験室における観測に利用した経験のある、日本ナショナルインスツルメンツ社のモジュールの利用を検討した。

4. 2024 年度研究実施内容

4.1 2024 年度の計画、実施方法

2024 年度は、以下の 3 テーマについて研究を進めた。

1. 蛍光剤を用いた岩石試料中の液体の浸透過程
2. 不均質岩石試料における弾性波の透過特性
3. フィールドにおける弾性波観測

4.2 2024 年度の成果内容

4.2.1 蛍光剤を用いた岩石試料中の液体の浸透過程について

地下水等の流体が廃棄物に接触することのないように地層処分場の設計をするにあたり、

地下環境における流体の移動過程を研究することは重要である。放射性廃棄物の地層処分場周辺の岩石は、特定の種類に限定されず、地質条件に応じて適切な人工バリアと組み合わせることで安全性が確保される。その中でも特に、花崗岩などの結晶質岩や堆積岩が母岩となる可能性がこれまでも議論されてきた。

結晶質岩には、断層運動などの強い応力の影響によるマクロな破碎と、鉱物サイズの微細な空隙が存在する。ミクロスケールにおける流体の挙動を、実際の現場において調べることは難しい。そのため、実験室において流体と鉱物の関係を把握することが重要になる。過去の研究に置いて、空隙から岩石の基質方向に物質が拡散するマトリクス拡散と呼ばれる現象が確認されている。マトリクス拡散では、空隙や亀裂に沿った物質の移動に対して

直交方向に物質が移動することになるため、物質の移動を遅延させる効果として注目されている（吉田・他，2002）。

石橋(2016)はマクロな亀裂を含まない花崗岩サンプルを用いて流体の拡散試験を実施した。その結果、健岩部でもマトリクス拡散が起こる様子が観察され、斜長石の内部に物質が入り込んでいる様子が確認された。本研究では、時間変化の様子を観察して浸透の過程を調べることを目指すとともに、マクロな亀裂を含まないもののなめらかに岩種が変化している、現実の地下空間に存在しうる岩石を試料として利用する。

表 1. 実験に利用した岩石名と産地

岩石	産地
眼球片麻岩	淡路津名町産
砂岩	熊本県下浦産
花崗岩	茨城県稲田産
凝灰岩	福島県荻野産

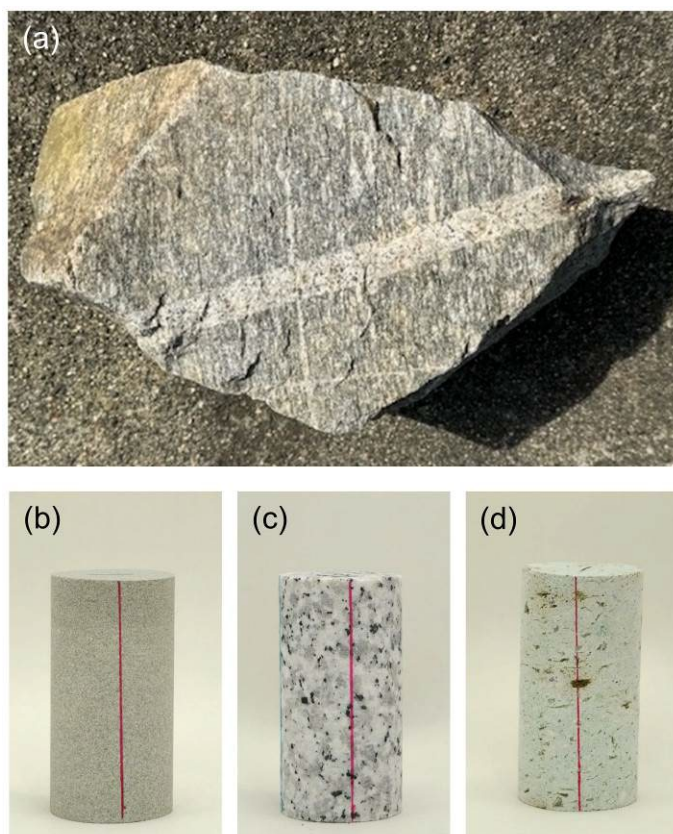


図 1. (a) 花崗岩質片麻岩, (b) 下浦砂岩, (c) 稲田花崗岩, (d) 荻野凝灰岩

4.2.2 岩石試料の準備

片麻岩に花崗岩質の貫入がある花崗岩質片麻岩試料と、3点の標準的なマクロ亀裂のない砂岩、花崗岩、凝灰岩の試料を用意した(表1)。砂岩、花崗岩、凝灰岩は直径40 mm、高さ80 mmの円柱形に成形した。花崗岩質片麻岩のオリジナルサイズは縦200×横320×厚さ110 mm程度、重さは10.5 kgであった(図1a)。図1aの中央部にはしる帯状の部分が花崗岩質の貫入部であり、これを含むように直径40 mmのビットでコアリングをし、試料を円柱形に成形した。ただし、多くの試料はコアリング時に割れてしまったため、試料下端のみを研磨し端面整形し、長さを維持するために上端は折れたまま利用することとした。コアリング後の花崗岩質片麻岩試料を図2に示す。図2a-1にオレンジの曲線で示すように、試料は花崗岩の貫入による変性を受けており、花崗岩と片麻岩が混ざった構成となっている。境界部には目視でわかる明瞭な亀裂は見られなかった。

4.2.3 蛍光観察手法

試料内での流体の進展を見やすくするために、陳・他(2016)で利用されたアクリル樹脂のモノマーである熱硬化性のメチルメタアクリレート(MMA)中にあらかじめ蛍光剤を混入したものを蛍光液として利用した。この蛍光液の粘性はほぼ水と同一である。段ボールの内側に黒紙を貼り、開口部を黒布で覆ったものを観察箱として利用し、内部に波長365 nmのUVランプを設置した。直径74 mmのシャーレに底から50 mmの位置まで蛍光液を注入し、試料下部を静かに浸けた。その後、30秒間隔で写真撮影をおこないながら、数時間～1日に渡りそのまま放置し、十分な時間が経過した後に試料を90℃に熱した炉に入れ、加熱によって試料中のMMAを固定した。

4.2.4 結果

実験に使った全ての試料において試料内部への蛍光液の浸透が見られた。砂岩、花崗岩、凝灰岩については、それぞれ20.5 mm、43.7

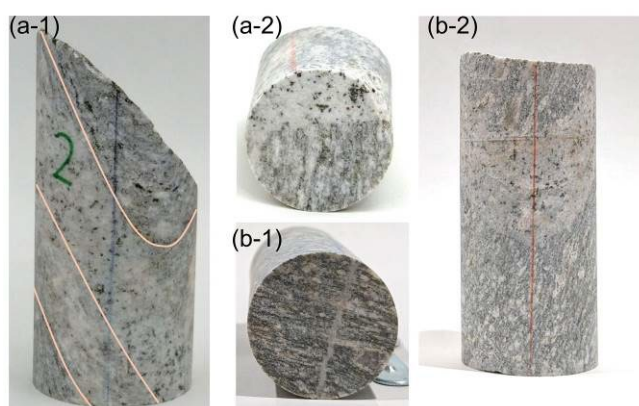


図2. (a-1) 花崗岩質片麻岩試料1, (a-2) a-1の底部, (b-1) 花崗岩質片麻岩試料2の底部, (b-2) 片麻岩試料2

mm, 25.9 mm の高さまで液体が浸透していた (図 3)。

蛍光液浸透中の試料を紫外線照射下でタイムラプス撮影した画像から、浸透面の位置を読み取ったところ、図 4 のようになった。グラフから推定したおよその浸透速度は、稲田花崗岩については 0.05 mm/sec, 荻野凝灰岩については 0.08 mm/sec 程度であった。

花崗岩質片麻岩試料は、2 つの試料で異なる浸透の様子を見せた。蛍光液に浸けた試料を一晚放置したところ、花崗岩質片麻岩試料 1 は試料上端まで蛍光液が浸透した (図 5a) のに対して、試料 2 では試料半ばまでしか浸透が起こらなかった (図 5b)。試料 2 をよく観察すると、花崗岩質部分に優先して浸透が起こっており、片麻岩質の部分にはあまり浸透して

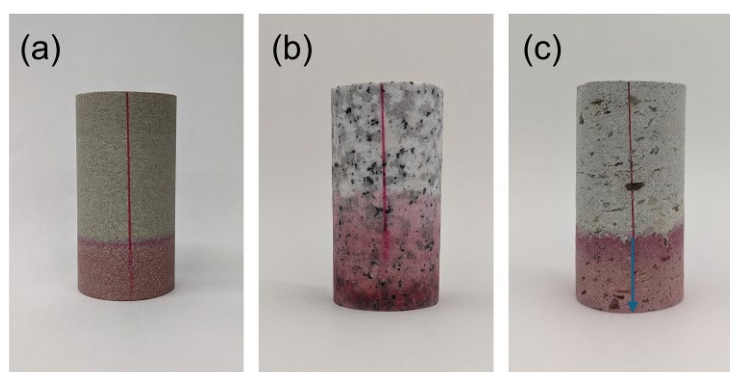


図 3. 蛍光液浸透後の(a) 下浦砂岩, (b)稲田花崗岩, (c) 荻野凝灰岩. 画像は可視光下における観察. 赤く色づいているのは蛍光液に混ぜてある色素.

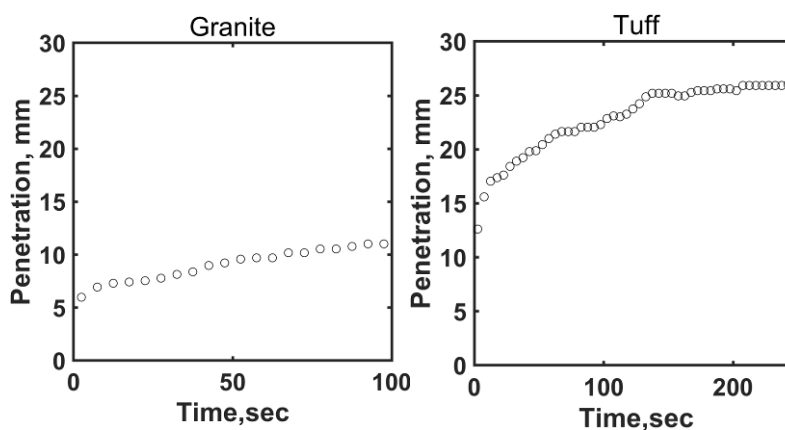


図 4. タイムラプス画像から推定した浸透過程. (左)稲田花崗岩, (右)荻野凝灰岩.

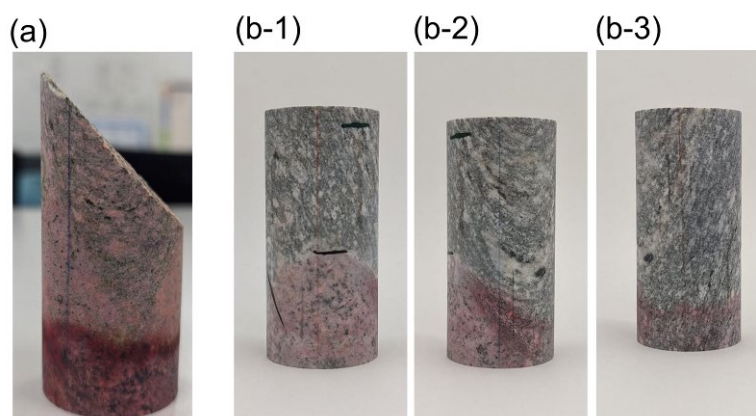


図 5. 実験終了後の(a) 花崗岩質片麻岩 1, (b) 花崗岩質片麻岩 2 を 3 方向から撮影したもの.

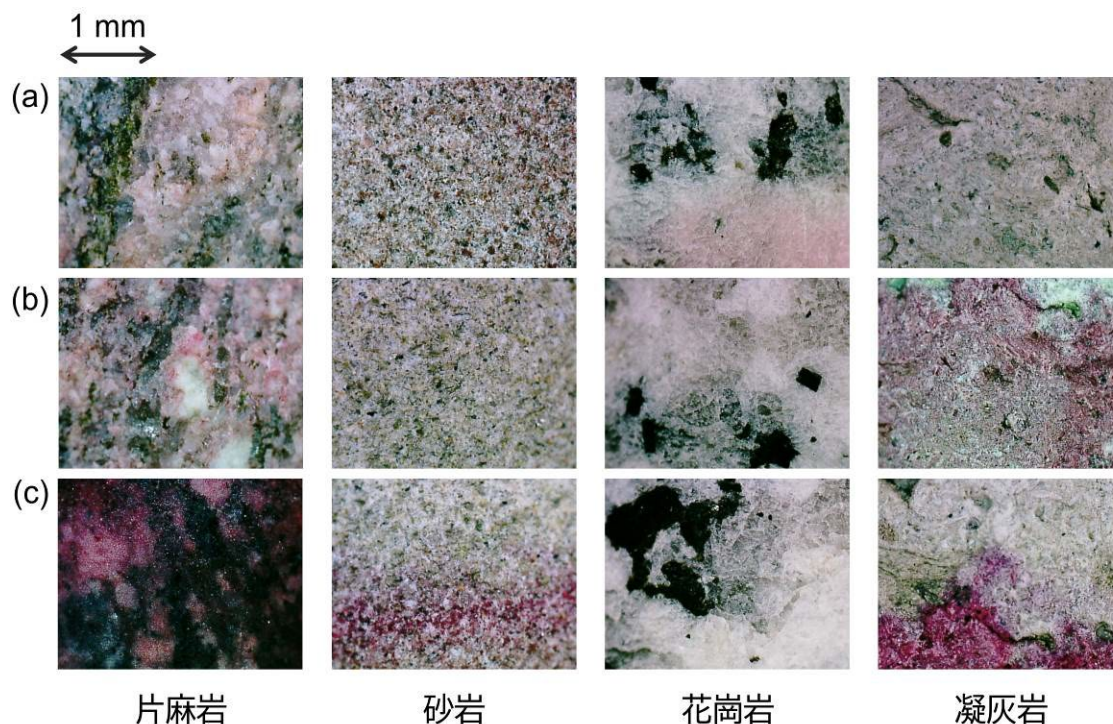


図 6. 実験後の試料をハンディマイクロスコープで撮影したもの. 赤く色づいている部分は蛍光液が浸透した部分.

いなかった. また, 試料 1 の方では, 浸透度にムラが見られ, 試料下部では濃く染色されていたのに対して, 試料 2 には強い濃淡差は見られなかった.

4.2.5 議論

液が試料内に浸透していく過程には, 毛細管現象が関わっている. 流体中の分子同士には分子間力が働くが, 異なる相が接する境界面において, 液表面の分子は液中から引っ張られることにより表面が丸くなる表面張力と呼ばれる現象を示す. 細い管に入った液体の場合, 菅の端では管壁と液体分子の間に働く付着力の

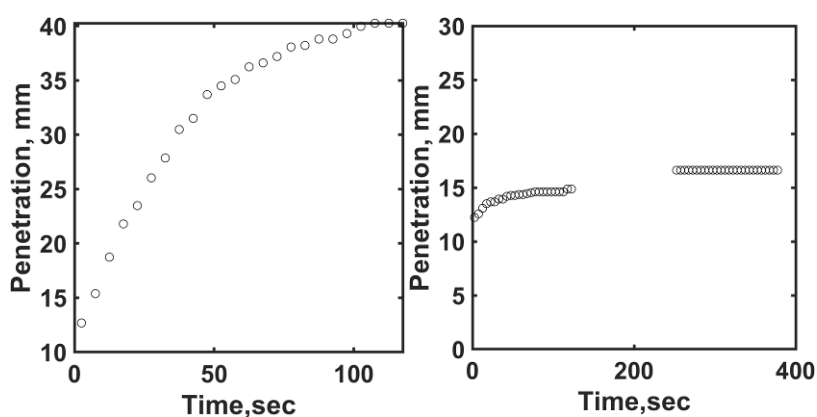


図 7. タイムラプス画像から推定した花崗岩質片麻岩への蛍光液浸透過程. (左) 試料 1, (右) 試料 2.

方が液表面に働く表面張力よりも大きいため、液体は上部に引き寄せられ、最終的に付着力と水の重力が釣り合うまで移動が続く。管が細いほど上昇した水の重さは軽くなるので、水はより高い位置まで移動する。

既往研究により、本研究で用いた 3 種の岩石試料内の空隙サイズは、下浦砂岩が $1\mu\text{m}$ 以下、稲田花崗岩と荻野凝灰岩は $0.1\mu\text{m}$ 以下と調べられている。毛細管現象は空隙サイズとその連続性の両方に依存するが、砂岩に比べて空隙サイズが小さい花崗岩、凝灰岩では高い位置まで浸透が起こったことは、一般的な毛細管現象の知識から考えて矛盾はない。

既往研究において、花崗岩を構成する斜長石の中に物質が拡散していることが指摘されているが（石橋・他, 2016）、本研究の花崗岩でもハンディマイクロスコープ画像を確認すると（図 6）、斜長石の内部亀裂に溶液が浸透しているように見える。薄片を作成し、さらに倍率の高い顕微鏡で観察をおこなった結果、ほとんどの部分では粒子境界にのみ蛍光剤が浸透していたが、一部では斜長石へ液体が浸透した様子も見られた。今後、試料全体を浸ける長時間の浸透試験を実施し、どのような部分に浸透が起こるかさらに精査する。

花崗岩質片麻岩については、2 つの試料の間で浸透度に大きな差が見られた（図 7）。試料 1 では試料上端まで蛍光液が浸透したが、試料 2 については試料下部にしか浸透がおこらなかった。両試料の下部を見ると、試料 1 は花崗岩と片麻岩が接している様子が見られた。試料 2 はほぼ片麻岩で構成されており、ベインのような薄い貫入が中央に見られた。

4.2.6 不均質岩石試料における弾性波の透過特性

地震波やフィールドにおける能動的透過波には、それらが透過した地殻内部の構造情報が含まれる。媒質の不均質特性と弾性波形の関係がわかれば、直接観測の難しい地下の不均質場の特性を波形から推定することができ、放射性廃棄物の地層処分において、処分場周辺の岩盤をモニタリングする際に応用できると期待される。これまで実験室において、媒質の構造変化や亀裂生成の様子を詳細に観察するための岩石試料を用いた透過波計測が行われてきた（例えば、Yukutake, 1989, JGR）。既往研究では、初動の到達時刻や振幅の変化から不均質状態の変化が推定されたものの、後続波からはほとんど情報が得られてこなかった。その理由として、後続相には試料の端面で何度も反射・変換した成因が不明な後続相が多数含まれることが挙げられる。そこで後続相の素性を知るために、Yoshimitsu et al. (2016, GJI)は円柱形の均質な試料内を透過した弾性波を 3 次元差分法による波動伝播シミュレーションで再現し、実験波形に見られる特徴的な位相の起源を計算波形との比較に

より同定した。本解析では、不均質な岩石試料を用いた場合の弾性波の振る舞いを数値計算により観察・評価するとともに、2023 年度に取得された実験波形との比較を実施する。

4.2.7 差分法による弾性波数値シミュレーション

2023 年度は不均質特性の異なる 3 つの岩石試料を用いて弾性波の透過試験を実施し、波形の違いを観察した。本年度はこの結果を数値計算で追加検証した。試料 AO1 と名付けられた青森県今別市で取得された多孔質安山岩の不均質特性を参考にして計算モデルを作成し、OpenSWPC (Maeda et al., 2017, EPS)を利用して 3 次元差分法による波動伝播シミュレーションを実施した。試料を含む矩形の解析領域を、格子間隔 $50 \mu\text{m}$ で $1024 \times 1024 \times 2048$ グリッドに

離散化してモデル媒質とした (図 8)。AO1 は、直径 50 mm 、高さ 100 mm の円柱形試料の中にランダムに直径数 mm ～数 cm の空隙を含む。このうち、圧電素子が貼付された振動入力面から 90 度回転した方向の高さ 60 mm の位置にあった直径約 30 mm の最大の空隙を、

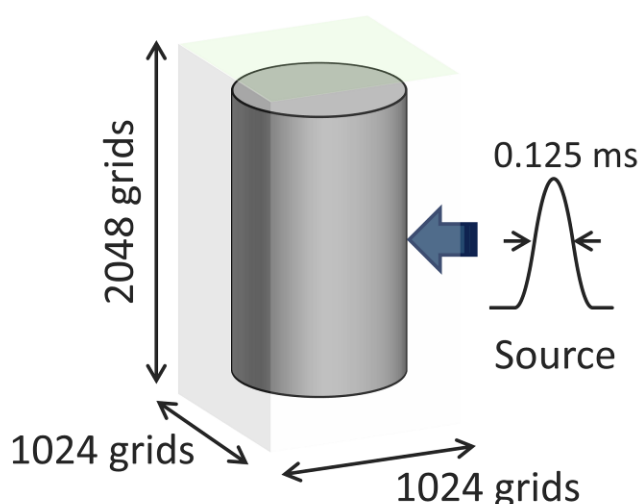


図 8. 数値シミュレーションのための岩石試料モデル

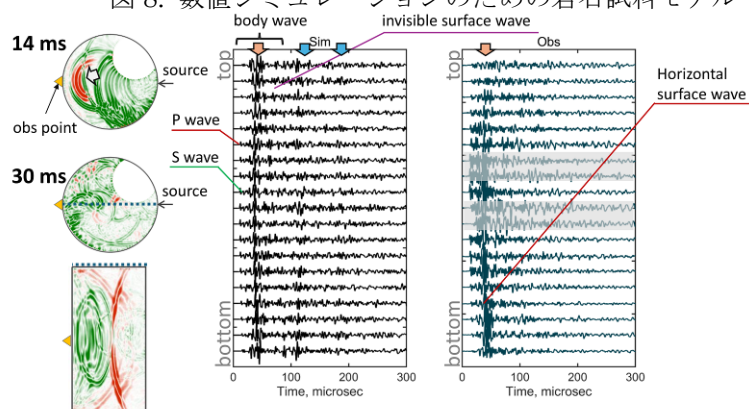


図 9. AO1 の最大空隙を含むモデル媒質における透過波動場と透過波を震源に与えた力と平行方向に見た図

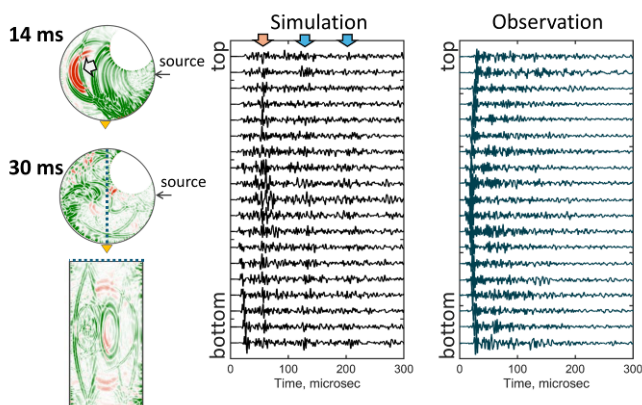


図 10. AO1 の最大空隙を含むモデル媒質における透過波動場と透過波を震源に与えた力と垂直方向に見た図

球形な孔としてモデル媒質内に再現した。2023 年度の測定結果を参考に、弾性パラメタは $V_p=4.2$, $V_s=2.4$, $\rho=2.23$ と設定した。岩石実験に用いた圧電素子の動きを模したシングルフォースを高さ 50 mm から入力し、タイムステップ 0.005 秒、空間・時間ともに 2 次精度で計算をおこなった。比較のために同様の条件で空隙がないモデルを用いた計算も実施した。

4.2.8 数値計算の結果

計算によって得られた波形には 50 kHz - 1 MHz の 4 次のバターワースバンドパスフィルタをかけ、波動場は速度の発散場と回転場から P 波と S 波の速度振幅に分離して評価した。空隙のない場合は震源から試料内部に入射した波が、曲率のある試料の周境界で反射波や変換波を生成しながら伝播し、震源とは反対の面で反射・変換した実体波が震源方向へ戻っていく。一方、空隙を含むモデルでは、実体波が震源の対面に到達する前に球形の空隙により進路を曲げられ、P 波や S 波が直進することができず、波面の広がりによがみが出ている様子が観察された（図 9, 10）。このように、波動場の進行方向が曲がった影響で放出された方向とは異なる方向に波面が傾いたため、試料モデル表面の仮想観測点で取得された振幅は試料の片側で大きくなっていた。また震源の対面に近い領域で得られた波形は、他の領域に比べて振幅が大きかった。空隙がない場合の計算では後続波部分で試料の周方向に伝播する表面波の大きな振幅が見られたが、空隙を含む場合は後続波の乱れが大きく、表面波の伝播は波形からはわからなかった。これらの後続波の傾向は、2023 年度の実測により得られた結果とよく一致しており、空隙のサイズと位置が波動場形成に強く影響していることを意味する。本解析の結果は、アレイ状の複数観測点で得られた波形から不均質の位置やサイズが推定できる可能性を示唆している。

4.2.9 フィールドにおける弾性波観測の準備

フィールドにおける地層処分坑道の弾性波モニタリングとしては、釜石鉱山においてモニタリングが実施された事例がある（田中・他, 1997）。本研究では、現在の技術を用いて、複数の波形解析を混ぜたモニタリングの実施を目指す。

2024 年度は、2023 年度に選定した機器の設置に向けて準備をすすめた。地震計設置予定地の京都大学別府キャンパスに赴き、キャンパスの状況について聞き取りを行うとともに、機器の設置可否について地盤や電源の状況を確認した。また、近計システム社製の速度型

地震センサ(KVS-300/100) を 4 台準備し、挙動の確認をおこなった。

4.2.10 フィールド水位計測

観測フィールドには過去に複数のボアホールが掘削されている。ボアホールの長さと配置を図 11 に示す。キャンパス内には傾斜があり、A、B と C の孔口高さには 1 m 程度の高低差がある。最も深いボアホール A は、掘削時にコア調査が行われ、周辺岩盤の地層が同定された。由佐・他(1994)によると、深さ 150 m 程度までは砂礫や凝灰角礫岩、それ以深は粘土化した凝灰角礫岩で構成されていることが明らかになっている。

水位計測には接点方式水位計を用いた。これは、ロープをボアホール内に垂らし、先端が水面に接したら音が鳴る仕組みを利用したものである。水位は 3 つのボアホール間で異なる値を示し、特に一番深いボアホール A

でもっとも深い位置に水面があった。この違いは、地下帯水層の位置の違いを反映したものと考えられる。一般的に、地下浅部にあり地下水が圧力を受けていない帯水層を不圧帯水層と呼ぶ。一方、上部から圧力を受けている地下深部の帯水層は被圧帯水層と呼ぶ。被圧と不圧では水面変動の特性が違うと考えられるため、次年度以降も定期的に継続して水位計測を行う。

4.2.11 地震観測の開始

合計 4 点の地震計を設置予定であるが、その 1 点目を設置した。観測用の地下室を利用させてもらい、図 12 のように特別に作られた水平を出した観測台の上に設置した。サンブ



図 11. 別府キャンパスにおけるボアホールの位置（青三角）。

表 2. 観測井の深さと水位

孔名	A	B	C
孔長 [m]	300	50	50
水位 [m]	60	38	31

リング周波数は 100 Hz で連続収録をおこなった。データファイルは 1 時間に 1 つ生成される予定である。半月間の試験収録継続後にデータを回収したところ、データファイルが生成された期間と収録されていない期間が存在した。この原因は不明であるが、収録ロガーにおいて GPS 信号取得が途切れ、時刻補正がうまく行かなかった可能性がある。そこで、収録開始時以外は GPS を使わない設定とし、電源をコンセントから取得するように変更し、収録を再開した。この改善の結果は 2025 年度に確認する予定である。

一方、2 月 15 日 21 時に豊後水道で発生したマグニチュード 3 程度の地震波形が明瞭に捉えられていた。得られた波形を防災科学技術研究所によって取得された地震波形と比較した一例を図 13 に示す。波形は震源決定や解析にとって重要な初動到達が明瞭に捉えられている。

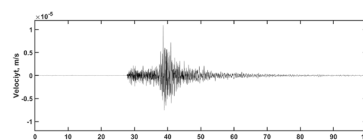
観測波形には、時間帯によってノイズ振幅が異なる様子が見られた。これは、交通などの影響によるものと思われる。また、地震波形かどうか定かではないデータも見られた。このような記録は、今後複数台の地震計を展開した後で、地震波形かどうか同定される。また、電源が不安定であった影響である可能性もある。

5. まとめ

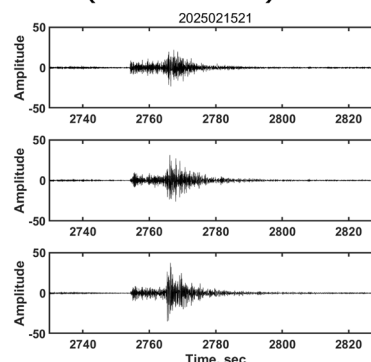
今年度は実験室における岩石試料への液体の浸透過程に関する実験を中心に研究を進めた。花崗岩質片麻岩への浸透過程の観察から、同じ岩石でも液体が接触する位置によって浸透速度や浸透範囲が変化することが明らかになった。事前調査で層構造や異方性の方向を把握することによって、浸透に対して強い方向を把握できる可能性があり、地下環境



図 12. 設置された地震計



Hi-net(一般観測網)の地震波形



本研究の観測で得られた地震波形

図 13. 得られた地震波形の一例

の利活用に置いて有益な情報となると期待される。今後は、顕微鏡を用いた微細構造の観察をおこない、粒子間に流体がどのように入り込んでいるか観察をする。

次年度は、フィールド観測を本格化させるとともに、今年度の成果発表時にいただいたコメントを元に、実験と対比させる数値計算の解釈を深め、不均質を含んだ媒質における亀裂サイズと弾性波の詳細な理解を目指していく。

参考文献

- 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(2), 121-130.
- 陳友晴, 直井誠, 石田毅, 黒澤功, 赤井崇嗣, 高木是 (2017), 水圧破碎フラクチャーの可視化技術, 石油技術協会誌, 82(6), 438-442.
- 由佐悠紀, 北岡豪一, 神山孝吉, 竹村恵二 (1994), 掘削による地下温泉水の層構造の検出-別府温泉南部地域での試み-, 温泉科学, 44(2), 39-44.

2024 年度 外部発表

【口頭発表】

1. 森本光貴, 吉光奈奈, S 波スプリッティングを用いた山葵沢地域での亀裂特性の検出, 日本地球惑星科学連合 2024 年大会, 2024 年 5 月 28 日
2. 松田航洋, 吉光奈奈, 前田拓人, 行竹洋平, 箱根群発地震を用いた小空間スケールにおける MLTWA の適用, 日本地球惑星科学連合 2024 年大会, 2024 年 5 月 28 日
3. 吉光奈奈, 松田航洋, 計測波形と数値計算波形の比較を通じた実験試料内の不均質場が波形に与える影響の評価, 日本地球惑星科学連合 2024 年大会, 2024 年 5 月 28 日

謝辞

解析においては松田航洋氏の多大な貢献があった。また、岩石の蛍光観察においては陳友晴氏から実験の手順等について詳細にアドバイスをいただいた。数値計算には東京大学情報基盤センターの Wisteria と、東京大学地震研究所の EIC を利用した。記して感謝する。

研究報告 4

地下環境の透水性イメージング・モニタリングに 資する岩石物理モデルの構築

京都大学 大学院理学研究科

澤山 和貴

【目次】

1. 背景・目的	1
2. 全体研究計画（3 ヶ年における全体計画）	2
3. 2023 年度の成果概要	4
4. 2024 年度研究実施内容	5
4.1 2024 年度の計画，実施方法.....	5
4.2 2024 年度の成果内容.....	5
5. まとめ	33

参考文献

2024 年度外部発表

1. 背景・目的

本研究は、放射性廃棄物の地層処分にあたり必要な、候補地の事前評価ならびに閉鎖後の地上モニタリングに資する岩石物性値の詳細把握を目的とする。地層処分した物質の長期安定性能を評価するためには、地下の流体流動挙動の評価が急務である。しかし原位置での浸透率測定は容易ではなく、その時間変化の推定は数値モデリングに頼らざるを得ない（例えば Xing et al., 2021）。これまでの研究では、原位置の応力条件における岩石の透水性測定や統計的に構築した亀裂ネットワークによる数値シミュレーションが主流であったが、岐阜県瑞浪地域の結晶質岩では複雑な亀裂パターンが確認され、実際には天然環境の透水性を実験室から予測することは非常に困難であることが示された。そこで本研究では、地球物理学的探査手法（弾性波探査や電気比抵抗探査）を活用して間接的に地下の流体流動評価を可能とする理論モデルを構築し、事前評価ならびに地上モニタリングの双方への還元を目指す。地球物理学的探査手法を用いたイメージングは、候補地の事前選定において目に視えない地下空間を定量化するために不可欠である。さらに近年では、これらの物理探査をタイムラプスの取得し、地震や地熱開発中の時空間変化のモニタリングが行われている例もある（例えば Johnson et al., 2021; Taira et al., 2018）。これらの観測物性値と流体流動挙動の関係を精緻に明らかにすることができれば、これまで定量的な解釈が不十分であった複雑な地下の現在ないしは将来に渡る流体流動の時空間分布に関する解釈精度の向上が期待できる。

先行研究として使用されるモデルとしては、Kachanov (1993) をはじめ円盤状クラックを想定した解析解が多く、これらの解析解は亀裂同士の相互作用を考慮していないため、複雑な亀裂パターンを有する地下では直接適用できないという課題があった。本研究で新たな岩石物理モデルが構築できれば、地層処分の現場だけでなく地熱開発等の地下空間を利用する様々な工学分野・地震発生地域の断層近傍のモデリングの精度向上にも寄与することが期待される。本研究の目標は、このような岩石物性値と流体流動挙動の直接的な対比を様々なスケールで行うことで、実際の地下環境で得られる観測物性値から目に視えない地下の流体流動挙動の時空間変化を予測可能なモデル（以下、岩石物理モデル）を構築することである。これにより、候補地の物理探査データを解釈する際により定量的な透水性評価が行えるだけでなく、閉鎖後の長期間モニタリングにおいても地上の観測物性値から地下空間の変化を推定することが可能となる。さらには、地下環境の高精度な岩石物性分布の解明

はそのまま数値モデリングの精度向上に貢献する。研究最終段階では、熱水流動シミュレーター **Hydrotherm** でその効果を確認することも検討している。このフィールドスケールシミュレーションのアウトプットに上記で構築する岩石物理モデルを適用することで、例えば火山活動が活発化した場合や亀裂が広がった場合にどの程度地上の物理探査から検知することができるかも検討することができ、閉鎖後のモニタリングの必要な観測点の分布・スペックの検討にも資することが期待される。

2. 全体研究計画（3 カ年における全体計画）

本研究は、実験と数値解析を併用し、以下の 4 ステップで研究を進める。

1. 実験試料の準備と観察・デジタル化（2023～2024 年度）

岩石試料として、日本の代表的かつ空隙構造の異なる地層を念頭に花崗岩・砂岩・泥質片岩（直径 1.5 インチ、高さ 3 インチ）を使用する予定で、実際の地層処分候補地やそれに準ずる地層の岩石コアが得られた場合はそれらも活用する。これらの岩石に対して、(i)熱クラックを入れた場合、(ii)開口亀裂を入れた場合、(iii)(i),(ii)の双方を入れた場合の 3 パターンを検討する。母岩の亀裂は高解像度 μ X 線 CT で撮像し、マイクロクラックの 3 次元分布を特定する。開口亀裂は表面粗さ計で高解像度にデジタル化する。これらの手法で作製したデジタル岩石モデルは、亀裂の幾何学形状の把握に加え、3. デジタル岩石シミュレーションにも活用する。

2. 透水実験中の岩石物性同時測定（2023～2025 年度）

上記で用意したサンプルを地下応力条件に至るまで変形させ、地上観測可能な岩石物性値を測定する。過去に開発した手法を応用することで、封圧 5-200 MPa までの広い圧力条件で浸透率と弾性波速度・電気比抵抗を同時に測定する (Sawayama et al., 2018)。さらに実際の物理探査手法を模擬して多数のセンサーを設置し、弾性波速度・電気比抵抗のトモグラフィー測定も実施する。これらの測定は、先行研究 (Sueyoshi et al., 2023; Suzuki et al., 2021) を応用して本研究用にアレンジして行い、サンプルスケールの不均質性が作り出す異方性がセンサー類の配置間隔でどのように観測されるかを明らかにする。センサーを多数配置したアレイ計測によるトモグラフィー手法に関して、弾性波トモグラフィーと電気アレイ計測についてはそれぞれ手法が開発されているが、圧力容器の中でこれらを同時に

計測するシステムは未だ世界で報告例がない。

3. デジタル岩石シミュレーション (2023～2025 年度)

1 で作製したデジタル岩石試料に対し、種々の数値解析手法で微視的流路や水・電気の流れの連結度、亀裂接触部の弾性エネルギー等のミクロな特性の 3 次元分布を明らかにし、そこからマクロな浸透率・弾性波速度・比抵抗を解析する。流体流動シミュレーションは格子ボルツマン法、弾性波動伝播シミュレーションは有限要素法と有限差分法、電気伝導シミュレーションは有限差分法と有限体積法を使用し、既に構築済みのコードを使用する (Sawayama et al., 2021a, 2021b, 2022, 2023)。既にこれらの解析手法をもとに開口亀裂の場合のミクロな物性とマクロな物性のリンクを明らかにしてきたが、本研究ではさらに母岩の空隙率や複数の亀裂が交差する場合を検討し、複雑な亀裂パターンでも活用可能な岩石物理モデルを提案する。ミクロな亀裂をインプットした複雑な亀裂パターンでの解析を可能とするため、まずは実験試料から構築したデジタル岩石の数値解析結果と上記のトモグラフィー測定で得られる物性値の比較によって計算手法を評価し、それをもとに(i)亀裂面粗さ (Matsuki et al., 2006), (ii)マトリックス部分の不均質性, (iii)亀裂の枚数(Min et al., 2004)の 3 種類の不均質を考慮した数値モデルを構築する。

4. フィールドスケールの流体流動シミュレーション (2025～2026 年度)

3 次元流体流動を解析可能な Hydrotherm (USGS のオープンソースコード) を活用し、上記で得られたミクロな特性を組み込んだ長期間の流体流動挙動の変化を可視化する。また上記の検討で得られた流体流動と岩石物性値の関係を新たに組み込むことで、地下の温度・圧力構造や亀裂分布が変化した際に地球物理学手法で地上からどのように観測されるかをシミュレートする。アウトプットに上記で構築する岩石物理モデルを適用することで、例えば火山活動が活発化した場合や亀裂が広がった場合にどの程度地上の物理探査から検知することができるかもあわせて検討する。

3. 2023 年度の成果概要

2023 年度はまず、拘束圧最大 190 MPa、間隙水圧最大 130 MPa まで増圧可能な実験システムを目標に配管・圧力容器等を整備した。フィードスルー部の不具合によって拘束圧 80 MPa 以上ではリークが起きてしまったが、それより低圧の条件下では、シリンジポンプによって浸透率と空隙率を、フィードスルーによって P 波速度・S 波速度・電気比抵抗をそれぞれ同時計測可能なことを確認した。また構築した実験システムで使用する直径 1.5 インチの円柱状岩石サンプルを成形し、火成岩と溶岩試料を準備して、浸透率・空隙率・P 波速度・S 波速度・電気比抵抗の予備試験を行った。間隙水の電気伝導度を変えた比抵抗の測定結果から、変質が見られる岩石の場合でも、間隙水の電気伝導度が 1 S/m を超える場合は表面伝導の影響がほとんどないことが示された。また P 波速度・S 波速度・電気比抵抗の測定結果を既存の岩石物理モデルと照らし合わせると、今回測定したサンプルの空隙構造はややアスペクト比の大きいクラック〜チューブ状であることが示唆された。また亀裂を含む岩石の粗さを表面形状測定機で観察し、このフラクタル特性から数値亀裂を造成した数値シミュレーションによって浸透率・P 波速度・S 波速度・電気比抵抗の変化を推定した。実験結果の知見をもとに、デジタル岩石モデルのマトリックス部分に空隙率を与えた条件で計算を行うと、浸透率・比抵抗や比抵抗・空隙率の変化の傾きが大きく変化することがはじめて明らかとなった。このことは、デジタル化することの難しいミクロスケールの空隙構造を実験によって明らかにする必要性を意味している。その一方で、P 波速度・S 波速度・電気比抵抗の関係は、空隙率に依存せずにパーコレーション閾値と相関していることが示され、これらの物性の同時モニタリングによって浸透率が精度良く求まる可能性を示唆する結果が得られた。なおここで明らかにした浸透率・比抵抗関係式は、サイズや粗さ・せん断変位に依らないことから、様々なフィールドにおいて普遍的な解釈に活用できることが期待される。

4. 2024 年度研究実施内容

4.1 2024 年度の計画, 実施方法

(1) 室内実験装置の改良

高拘束圧高間隙水圧下で浸透率・弾性波速度・電気比抵抗を計測可能な実験システムを整備・改良する。

(2) 岩石試料の準備

上記の実験システムで使用する直径 1.5 インチの円柱状岩石サンプルを成形し, 試験環境を整備する。亀裂を有するサンプルについては, 表面粗さデータを取得する。

(3) 予備実験

上記の岩石サンプルについて, 浸透率・空隙率・密度・電気比抵抗・P 波速度・S 波速度をそれぞれ測定する。

(4) 数値解析の予察的な検討

空隙内部構造をデジタル化した岩石試料に関して, 数値解析を行う。

4.2 2024 年度の成果内容

(1) 室内実験装置の改良

昨年度の実験システム整備により, 拘束圧 80 MPa, 間隙水圧最大 50 MPa までの条件で, フィードスルーを使用した P 波速度・S 波速度・電気比抵抗をそれぞれ同時計測可能なことを確認した。今年度の改良では, まずフィードスルーからのリークを解決し, 最大 150 MPa で計測可能であることを目標に整備を継続した。設計業者から頂いた図面をもとに必要部分の増し締めを行い, 一時は最大 150 MPa までの増圧に成功した。その一方で, シリンジポンプの不具合で圧力の維持制御ができなくなり, 現在も修理中である。この間, 試料を設置する土台部分を特注設計し, 絶縁物質である PEEK に変更した。当初はステンレス製としていたが, 電気の絶縁性能を向上するための変更である (図 1)。これらの改修の後改めて実験を再開したところ, フィードスルー部分からのリークが著しく, 低圧であっても実験が困難になってしまった。業者にオーバーホールを依頼し, フィードスルー部分の改修は今年度中に終了する見込みとなっている。そのため当初の計画を見直し, 高封圧下における実験は来年度以降に集中して実施する予定である。

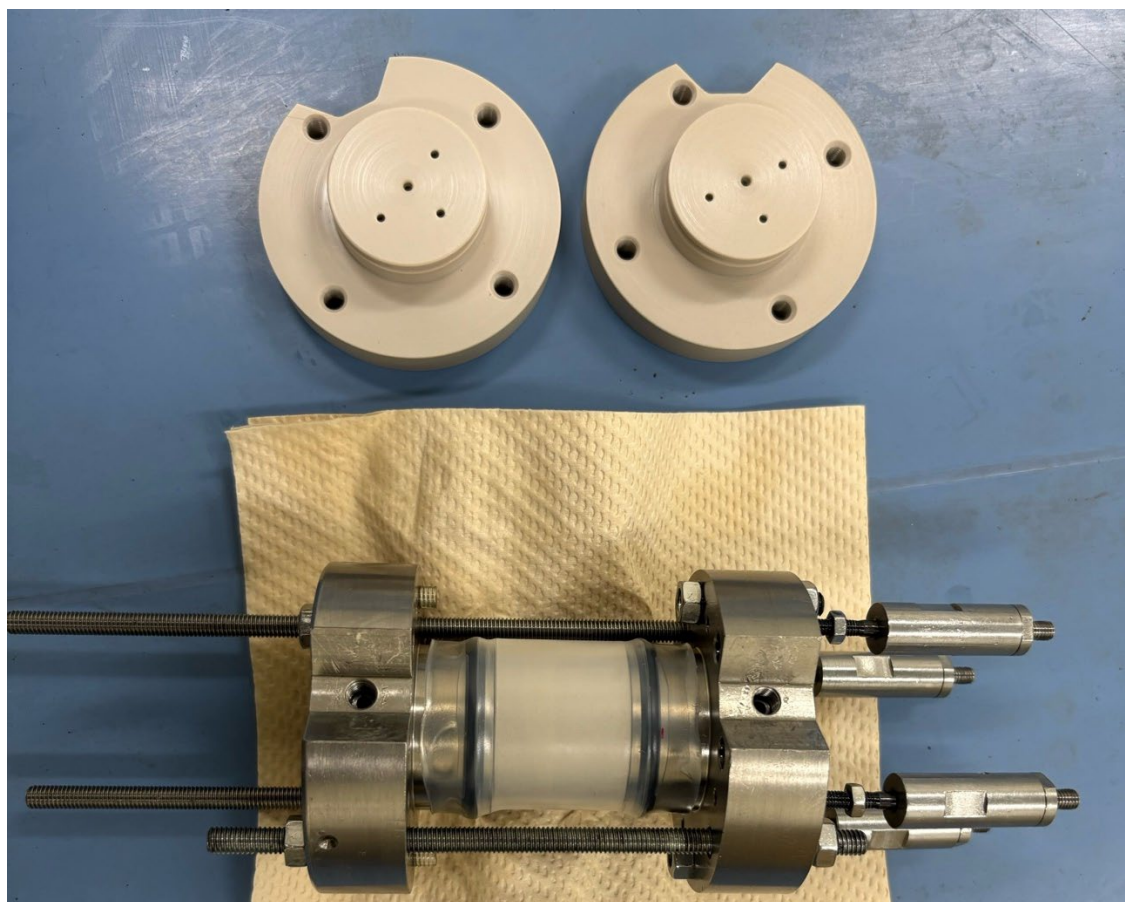


図 1. 土台とサンプルアセンブリーの写真。

(2) 岩石試料の準備

昨年度に引き続き、構築した実験システムで使用する直径 1.5 インチの円柱状岩石サンプルを追加で成形した。今年度は異方性を持つ試料として、黒色片岩・黒色千枚岩・泥質片岩・泥質千枚岩を成形した。また亀裂を有するサンプルとして、野島断層コア、阿蘇カルデラ掘削コア、伽藍岳掘削コア（地熱地帯）、岳の湯掘削コア（温泉地域）を採集した（図 2）。



図 2. 採集・成形したサンプルの一例（野島断層コア）。

さらに昨年度成形したサンプルについて、今年度新たにマイクロ X 線 CT を取得した（昨年度はマイクロ X 線 CT 装置の不具合のため未取得のデータがあった）。得られたマイクロ X 線 CT 像は、Otsu 法によって固相と空隙にセグメンテーションし、空隙構造を可視化した。図 3 に泥質片岩の一例を示す。

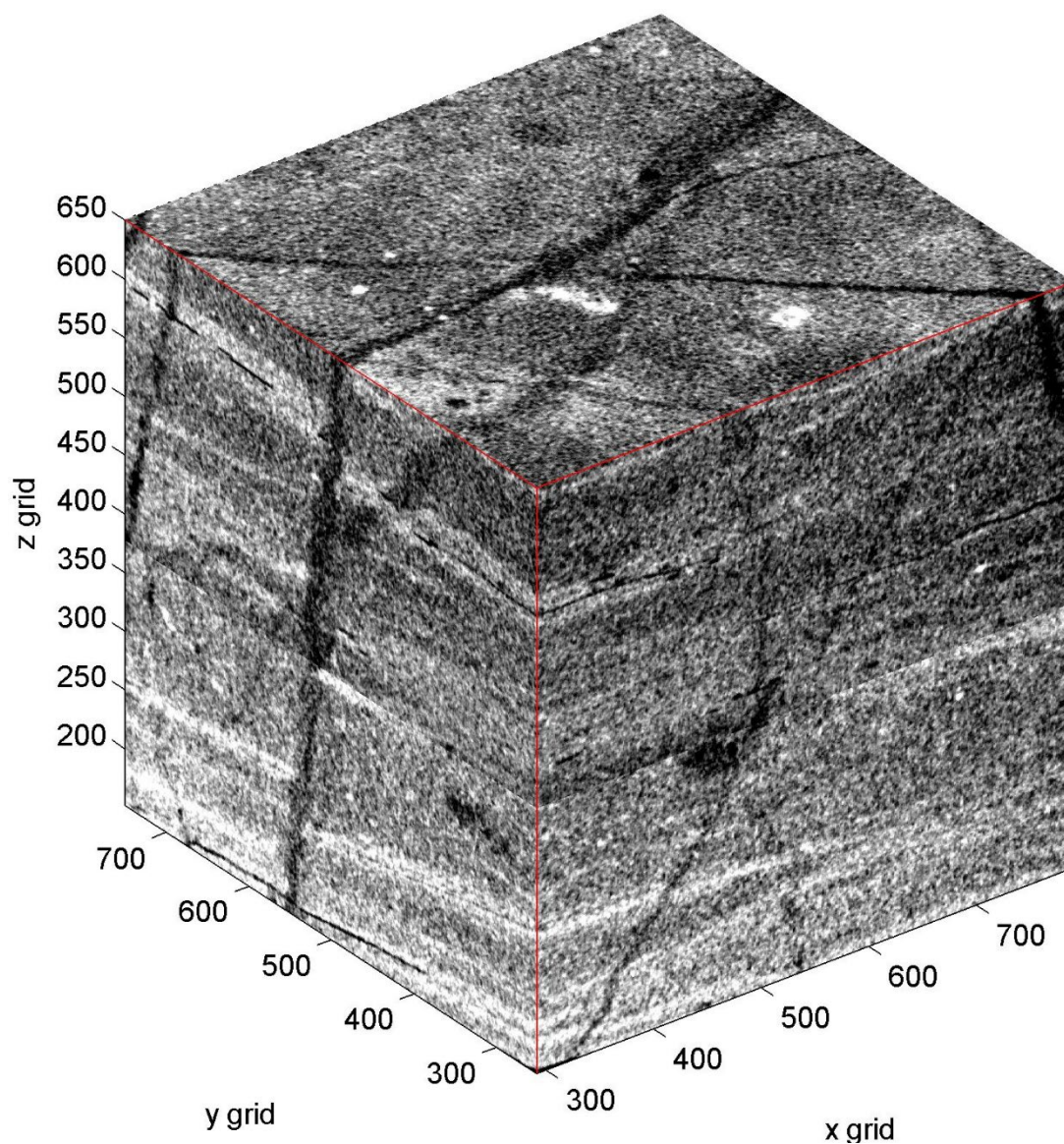


図 3 亀裂を含む泥質片岩のデジタルロック。マイクロ X 線 CT の撮像データから固相（黒）と空隙（白）にセグメンテーションしている。

これらのうち庵治花崗岩とベルファースト斑レイ岩で予備テストを行った。庵治花崗岩

は、香川県産の黒雲母花崗閃緑岩で、平均粒径は 0.5 mm、主要構成鉱物は、石英 (約 30%)、斜長石 (約 37%)、カリ長石 (約 24%)、黒雲母 (約 8%) である (工藤ほか, 1991)。本試料は細粒緻密であり、弾性波速度の測定 (Watanabe and Higuchi, 2015) ならびに一軸圧縮試験 (金子ほか, 1987) によっても異方性がほとんどないことが報告されている。これら岩石の亀裂性状について、亀裂の位置・初期開口幅分布・上盤と下盤の粗さプロファイル・下盤の表面高さのヒストグラム・パワースペクトル密度 (PSD) を解析した (図 4)。上盤と下盤の PSD 勾配から、フラクタル次元 D は以下の式から求められる (Power et al., 1987; Power and Durham, 1997)

$$D = 7 - 2a$$

ここで、 a は表面高さの PSD の傾きであり、破線で示されている。なお亀裂面の傾きと水平方向のオフセットは、得られる平均開口幅が最小になるように補正している。 L , σ , D , λ_c はそれぞれ亀裂長さ、表面粗さ、フラクタル次元、ミスマッチ波長を示す。これらの解析の結果を表 1 にまとめる。

表 1. 試料の亀裂性状。

Sample	d_{ini} (mm)	Footwall		Hanging wall		λ (mm)
		s (mm)	D	s (mm)	D	
Granite A	0.772	0.930	2.36	0.934	2.42	0.357
Granite B	0.636	1.02	2.28	1.05	2.33	0.353
Gabbro	0.889	0.892	2.37	0.970	2.24	1.65

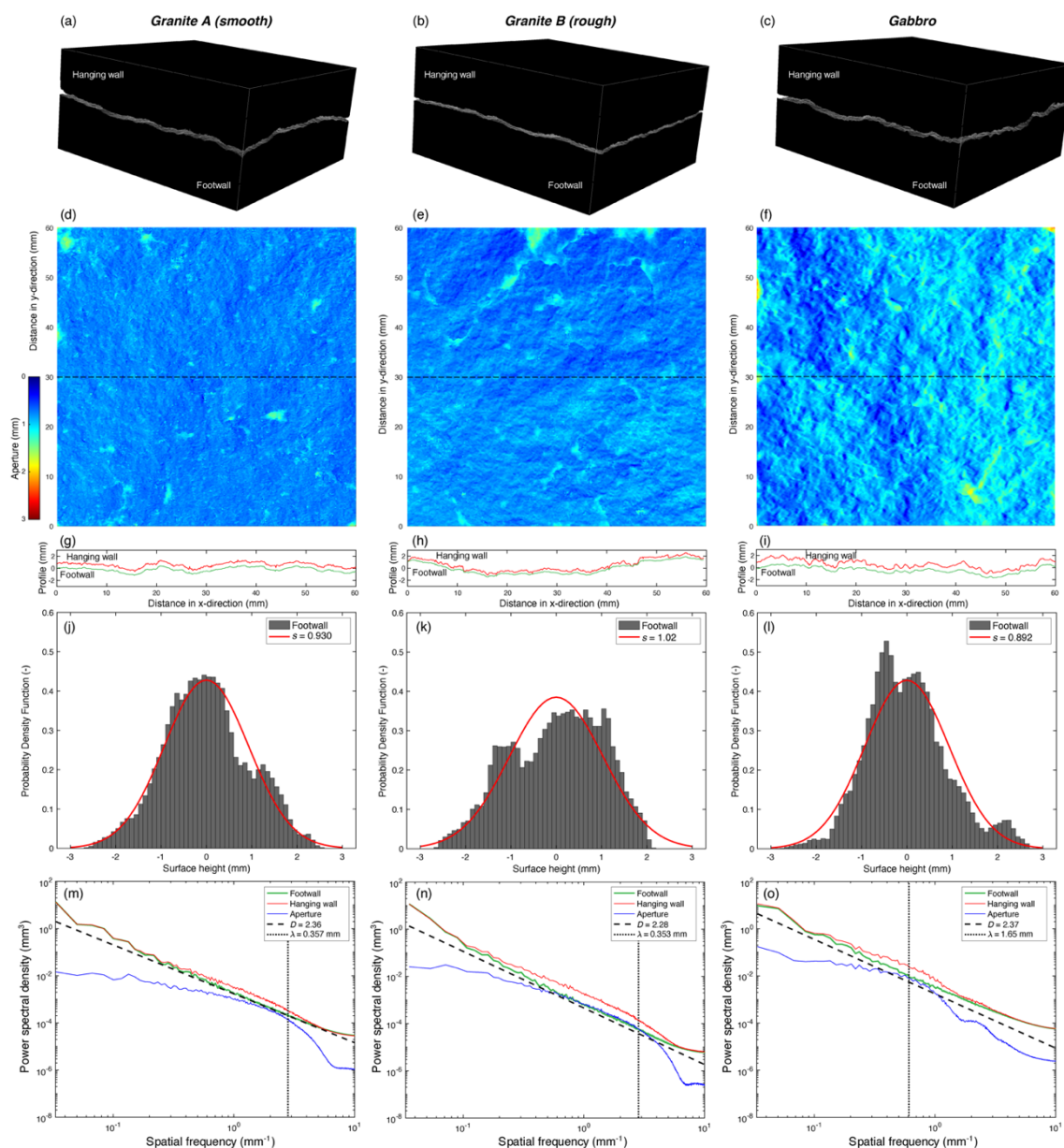


図 4. 各試料のフラクタル特性を示す図。(a–c)岩石ブロック全景，(d–f)初期開口幅分布，(g–i)上盤と下盤の断面形状，(j–l)下盤の表面高さの確率密度関数，(m–o)空間周波数（または波数）に対する上盤・下盤・初期開口幅のパワースペクトル密度。

(3) 予備実験

準備した岩石サンプルについて、空隙率・密度・電気比抵抗・P波速度・S波速度をそれぞれ測定した。空隙率は、乾燥質量 W_d 、飽和質量 W_s 、懸吊質量 W_h の計測によって求めた。乾燥質量は、試料を電子炉（70℃）で一日以上乾燥させたうえで測定した。飽和質量は、水

に飽和させて 3 日以上経過した試料の表面を軽く拭いてから測定した。なお水飽和の方法は、乾燥状態の試料に真空引きを行ったのち、そのまま真空条件下で試料を水で含浸させる含浸法を採用した（長瀬ほか，2021）。同様に、水飽和した試料の懸吊質量をアルキメデスの原理によって計測した。懸吊質量は、乾燥質量と浮力の差であり、浮力は固相体積 V_f が押しのけた流体の重さから計算される。以上より、以下の式が成り立つ。

$$\rho_w V_f = W_d - W_h$$

また空隙体積 V_v は、飽和質量と乾燥質量の差から次式のように計算される。

$$V_v = \frac{W_s - W_d}{\rho_w}$$

これらの質量から、空隙率 ϕ を以下の通り計算した。

$$\phi = \frac{V_v}{V_v + V_f}$$

電気比抵抗は LCR 測定器（NF 製，ZM2376）を使用し、インピーダンス法によって測定した。一般に、直流回路の抵抗は電圧と電流の比で表されるが、交流回路においてこれらは時間変化する。そのため、同じ定義で交流回路の抵抗を表現することはできない。そこで、直流回路における抵抗を複素数へ拡張したものを電気インピーダンス $Z(\omega)$ といい、実部成分 $Z(\omega)'$ と虚部成分 $Z(\omega)''$ 、虚数単位 i を用いて以下の式で表される。

$$Z(\omega) = Z(\omega)' + iZ(\omega)''$$

ここで、 ω は各周波数を示す。なお、実部成分 $Z(\omega)'$ はレジスタンス、虚部成分 $Z(\omega)''$ はリアクタンスと呼ばれ、電気インピーダンスの絶対値 $|Z|$ と位相差 θ を用いて以下の式で表される。

$$Z(\omega)' = |Z| \cos \theta$$

$$Z(\omega)'' = |Z| \sin \theta$$

以上から、電気インピーダンスの絶対値 $|Z|$ と位相差 θ は、以下の式で表される。

$$|Z| = \sqrt{(Z(\omega)')^2 + (Z(\omega)'')^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{Z(\omega)''}{Z(\omega)'}$$

本研究では、1 mHz から 5.5 MHz の周波数で $|Z|$ と θ を測定した。測定はすべてパソコン制御によるスイープ測定により行い、データを収録した。これらの測定値から電気比抵抗 ρ 以下の式で計算した。

$$\rho = \frac{|Z|S\cos\theta}{L}$$

なお、 θ の値が最も 0 に近い周波数 (=1 kHz) での $|Z|$ の値を計算に使用した。また、浸透率と電気比抵抗の関係性を理解するうえで、先行研究に倣って電気比抵抗をフォーメーションファクタで表した。フォーメーションファクタ F は実験に使用した流体の影響を取り除いた電気比抵抗値であり、以下の式で示される。

$$F = \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{water}}$$

ρ_{bulk} はバルクの電気比抵抗を示し、 ρ_{water} は流体の電気比抵抗を示す。なお、本研究で使
用した KCl 水溶液の電気比抵抗値は約 0.806 Ωm であった。

P 波速度と S 波速度はパルス透過法によって測定した。本研究で構築したシステムでは、パルスの入力トリガをファンクションジェネレータ (WF1974) で発生させ、送信波をオシロスコープ (DLM5034) で記録した。初動の到達走時と送受信トランスデューサ間の距離に基づいて、P 波速度と S 波速度を算出することができる。送受信器にはオリンパスの超音波トランスデューサ (P 波速度測定用 V103-RM・S 波速度測定用 V153-RM) を用いた。これらの共振周波数に基づき、入力パルスは周波数 1 MHz、振幅 10 V に設定した。また S/N 比を改善するため、送信波形はプリアンプ (NF9913) で増幅し、256 回以上スタックして解析に使用している。このようにして求めたサンプルの母岩の空隙率と岩石物性値を表 2 に示す。

表 2. 母岩の岩石物性値。

Sample		ϕ_m (%)	$\log_{10}\rho_m$ (Ωm)	V_p (km/s)	V_s (km/s)
Granite A	Footwall	1.41	3.29	5.21	2.91
	Hanging wall	1.39	3.08	5.31	3.11
Granite B	Footwall	0.963	3.08	5.54	3.14
	Hanging wall	1.07	3.18	5.37	3.26
Gabbro	Footwall	0.647	4.46	6.63	3.54
	Hanging wall	0.633	4.53	6.57	3.73

変形前の予備実験として、常圧状態の比抵抗と弾性波速度のセットアップを確認した。ベレア砂岩における比抵抗の測定結果を図 5 に示す。測定の結果、銀/塩化銀電極をサンプル周囲に巻いた 4 極法のセットアップが、最も安定して比抵抗を測定できることが分かった。銀/塩化銀電極は試料側面の大きさに合わせて銀網を切り取り、銀/塩化銀ペーストを両面に塗って乾燥させたものを使用している。

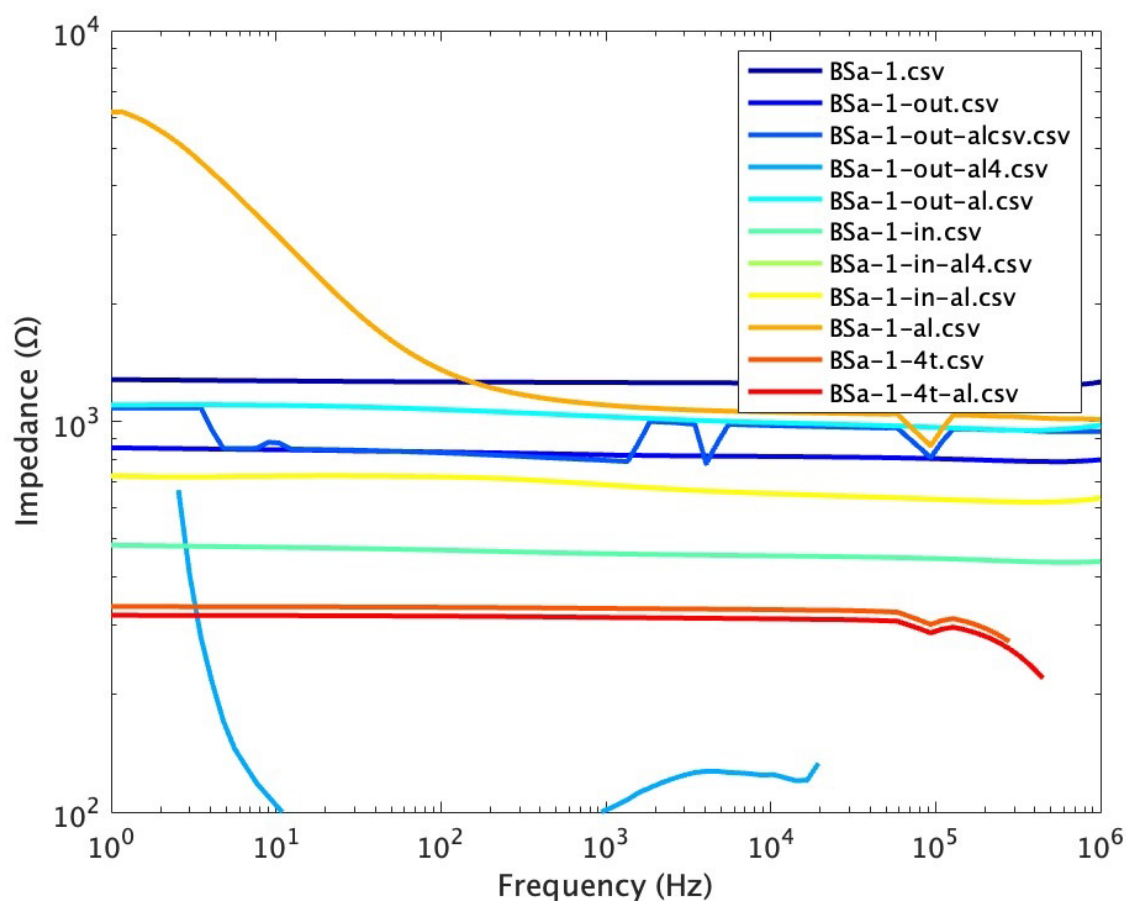


図 5 様々な電極セットアップにおける比抵抗測定の結果。

P 波速度と S 波速度のベレア砂岩における測定の結果を図 6 に示す。いずれも、サンプルの縦方向（長軸方向）に設置した圧電素子では波形を確認することができなかったが、横方向に圧着した圧電素子では、透過波を確認することができた。

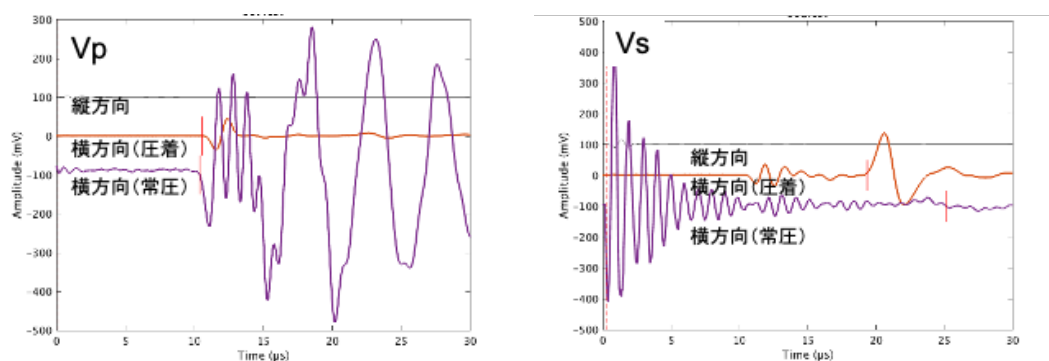


図 6 様々な電極セットアップにおける弾性波速度測定の結果。

本年度は、上述の理由で圧力容器内部での変形実験に着手することができなかった。そのため、一軸圧縮試験機を拡張し、浸透率・電気比抵抗・弾性波速度の同時測定が行える実験システムを構築した。一軸圧縮試験では実験試料に封圧をかけることが不可能であり、そのままの実験試料に流体を流すと亀裂からの水漏れが起きてしまう。そこで、ステンレス製の治具を用いて実験試料の四方を塞いで水漏れが発生しないように工夫した（図 7）。治具は電極側と流入側で形が異なり、電極側には弾性波速度を測定する圧電素子の導線を通すための穴が開いている。また、流入側には流体が治具内を通過して試料に届くように穴が開いている。本研究ではハンドポンプを用いた一軸圧縮試験により载荷を行い、垂直応力を最大約 50MPa まで上げた。载荷中の垂直応力と軸変位の変化はそれぞれロードセルと外部変位計を用いて評価した。そして、シリンジポンプ（ISCO 製）を用いて実験試料の亀裂内部に KCL 水溶液（0.1mol/L）を流した。シリンジポンプは水圧や流量を制御することが可能であり、変形に応じてこれらの値を適宜調整した。電気比抵抗と弾性波速度測定は、上述のセットアップを使用している。なお弾性波速度の測定には、P 波素子を 15 か所、S 波素子が 1 か所取り付け付けたスペーサーを使用した。このスペーサーを使用する際、穴の開いたステンレスの枠組に圧電素子を取り付け、ゴム板を上から張ることで圧電素子の圧着を高めた。また、本研究では直進方向の速度に加え、斜行方向の速度も測定を行った。図 8A は送信・受信点の配置を番号で示しており、直進方向で両点の番号が同じになるように振り分けた。なお、番号 1～番号 9、番号 11～番号 16 には P 波素子、暖色で示した番号 10 には S 波素子を設置した。また、図 8B は測定経路の例として、送信点が番号 1 のときの測定経路を矢印で示しており、図 8C は送信・受信点の測定経路の組み合わせを表す。

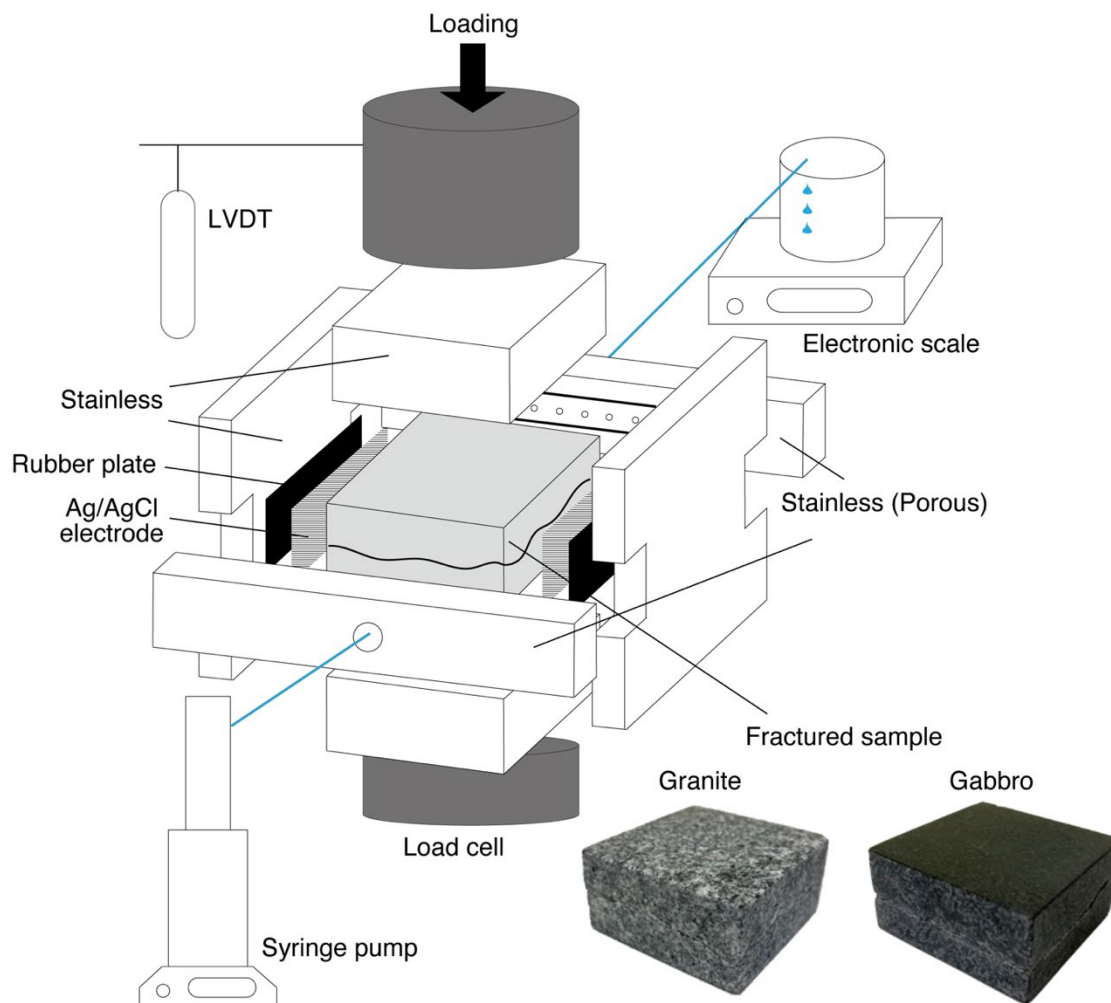
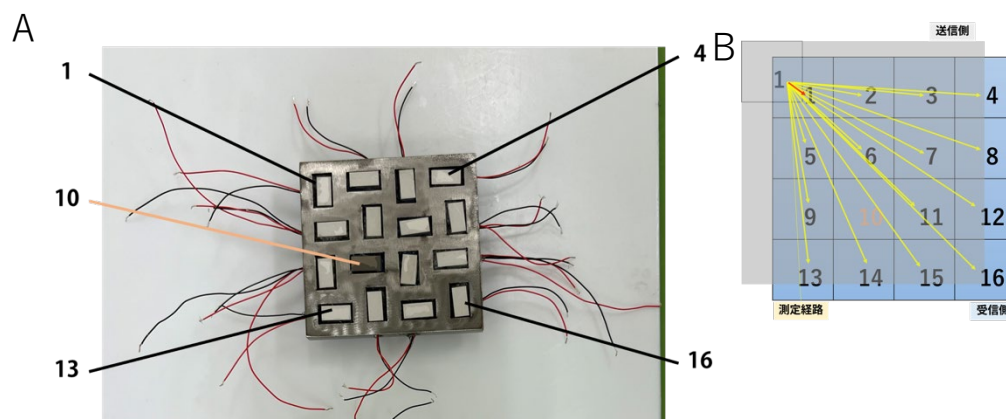


図 7. 実験装置の模式図。

弾性波速度の測定に関して、オシロスコープで読み取った波形の生データの一部を図 9 に示す。縦軸が 0 のときの波形は大気圧での測定結果を示し、上部にいくほど高い応力での波形の測定結果を示す。また、各図最下部の波形は実験後の波形の測定結果を示す。波形については、直進経路でははっきりと測定することができた。しかし、測定経路が離れてしまう場合では波形を読み取ることが難しくなり、うまく解析することが困難であった。なお、複数の測定経路で得られた P 波速度の空間分布をマッピングすることで、実測定した接触分布との比較を行った。



C

送信点	受信点	送信点	受信点
1	1~9、11~16	9	9、11~16
2	1~9、11~16	10	10
3	1~9、11~16	11	9、11~16
4	1~9、11~16	12	9、11~16
5	5~9、11~16	13	13~16
6	5~9、11~16	14	13~16
7	5~9、11~16	15	13~16
8	5~9、11~16	16	13~16

図 8. 弾性波速度測定用スペーサーに振り分けた番号と送信・受信点の組み合わせ。

A：振り分けた番号の配置図，B：測定経路の例（送信点が番号 1 のとき），

C：送信点と受信点の測定経路の組み合わせ。

A について，番号 10 は S 波を示す。また，B は直進経路を赤色，斜行経路を黄色で表している。

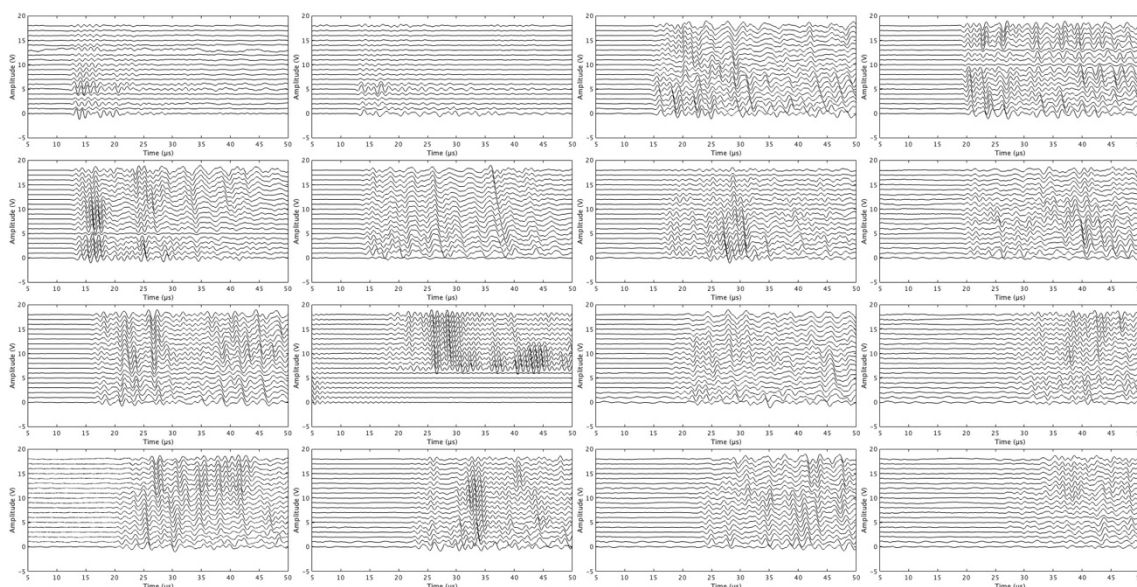


図 9. 収録した波形の例。

浸透率 k は、以下のダルシー則から計算した

$$\frac{Q}{S} = -\frac{k\nabla P}{\mu}$$

ここで、 Q は体積流量 (m/s), S は試料側面の面積 (m²), ∇P は流体圧差 (Pa/m), μ は粘性 (Pa・s) を示す。各応力での流体圧差や注入した体積流量はシリンジポンプを用いて測定した。また、電子天秤を用いて試料を通過した KC1 水溶液の体積流量を測定した。これにより、注入流量と排出流量の比較を行った。なお、体積流量は定常状態における値を計算に用いた。なお実験には、岩石試料に加えて 3D プリント試料を実験に使用した。3D プリント試料を使用した理由は、亀裂面の粗さや等方性を制御することが可能であるという点と、同じ粗さ形状を持つ試料の複製が可能であるという点である。特に後者については、接触面積と弾性波速度の関係性を理解するうえで非常に重要であり、同じ粗さ形状を持つ岩石試料の複製が非常に難しいという問題を解決できた。試料の作成にあたり、はじめに実際の花崗岩から得た亀裂面の粗さに関する情報 (Sawayama et al., 2023, 図 10) をもとに、非整数ブラウン運動によりデジタル岩石亀裂を造成した (Matsuki et al., 2006)。そして、造成したデジタル岩石亀裂を有する 3D プリント試料を作成した。なお、3D プリント試料は紫外線硬化型アクリル樹脂を素材としている (Ishibashi et al., 2020)。

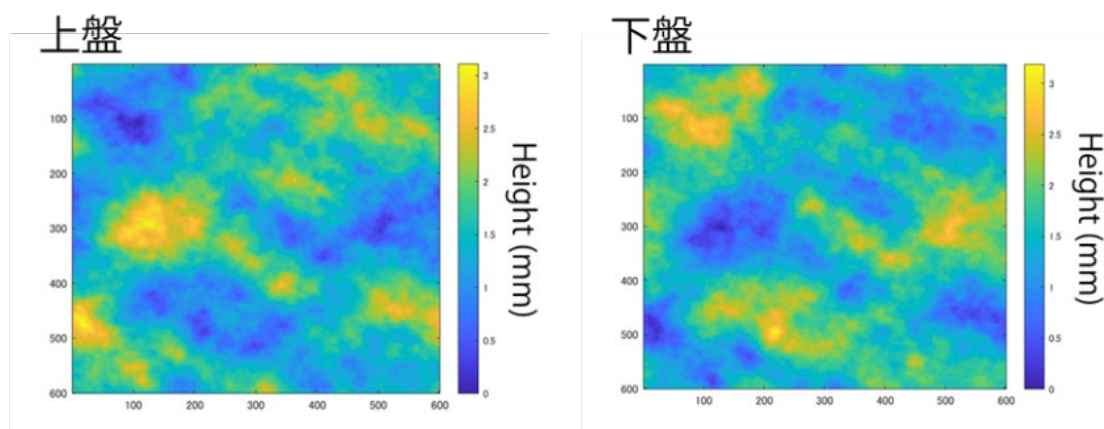


図 10. 3D プリンタ試料の作成時に用いた花崗岩試料の亀裂表面形状。

色分けは亀裂面の粗さを示し、黄色に近いほど粗い。

作成には国立研究開発法人産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所（AIST）、及び大分大学医学部附属臨床医工学センターにある高精細 3D プリンタ（AGILISTA, KEYENCE 製）を使用した（図 11）。AGILISTA はインクジェット印刷方式を採用しており、水平（x-y 平面）分解能が $40\ \mu\text{m} \times 62.5\ \mu\text{m}$ 、垂直（z 方向）分解能が $15\ \mu\text{m}$ となっているため、3D プリンタの高精度な複製が可能である。これを踏まえ、本研究で準備した 3D プリンタ試料の粗さは $100\ \mu\text{m}$ で設計されたため、3D プリンタ試料の亀裂面の粗さ精度は十分であると考えられる。そして、本研究では亀裂面の粗さによる影響を調べるために、粗さが異なる 2 種類の 3D プリンタ試料を準備した（RMSH=0.2 mm, 0.5 mm）。また、3D プリンタ試料のフラクタル次元 D は Renard et al. 2013 を参考にして、 $D=2.23$ とした。そのほか、2 種類の粗さにおける初期開口幅について、RMSH=0.2 mm では 0.358 mm, RMSH=0.5 mm では 0.845 mm であった。ここで RMSH（Root Mean Square Height）は亀裂面の高さを二乗した値の算術平均の平方根であり、値が大きいほど粗いことを示す。

また、3D プリンタ試料を実験に使用するうえで、材質の特性を理解するための载荷実験を行った。実験には広島大学の二軸圧縮試験機（図 12）を使用し、円柱に加工した 3D プリンタ試料を準備した。そして、ひずみゲージ（TML 製, GFLAB-3-50-1LJCT-F）を使用して試料の軸ひずみと周ひずみを測定し、これらのデータから体積ひずみを計算した。



図 11. 高精細 3D プリンタ（左写真，AIST）と作成した 3D プリンタ試料（写真）。

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r$$

ここで、 ε_v は体積ひずみ、 ε_a は軸ひずみ、 ε_r は周ひずみを示す。なお、本研究では圧縮方向を正とした。そして、この式で得られた ε_v を用いて、3D プリンタ試料のヤング率を求めた。計算にはフックの法則を用いた。

$$\sigma = E\varepsilon_v$$

ここで、 σ は応力 (GPa)、 E はヤング率 (GPa) を示す。その結果、図 13 で示す応力—ひずみ曲線を得た。そして、ヤング率は約 2.83GPa であることが分かった。また、軸ひずみと周ひずみのデータを用いて、以下の式からポアソン比 ν も計算した。

$$\nu = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a}$$

その結果、ポアソン比は約 0.43 であることが分かった。そのほか、この载荷実験では 3D プリンタ試料は破壊まで至らず、応力の増加に伴って変形し続けた。このことから、実験データを解析して降伏応力が約 19.3MPa であることが分かった。なお、実験に使用した 3D プリンタ試料の特性に関する情報を表 3 にまとめた。



図 12. 二軸圧縮試験機（広島大学）。

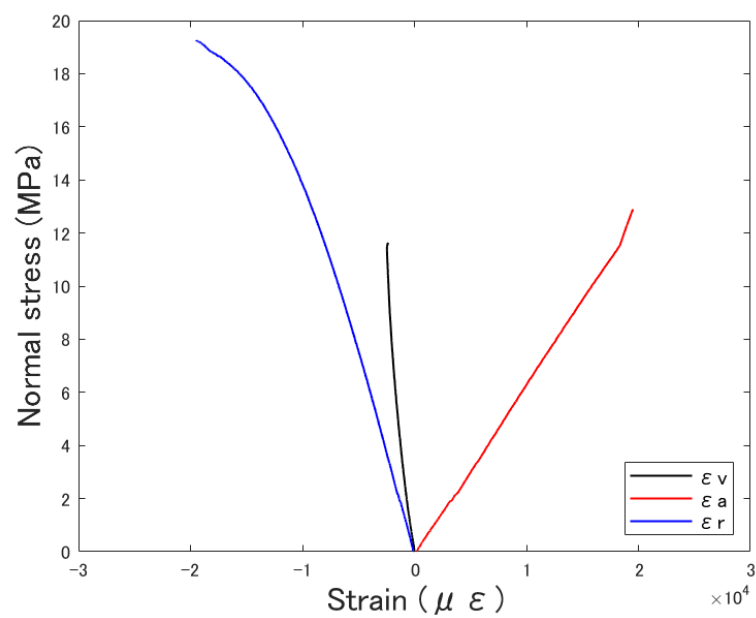


図 13. アクリル樹脂の応力－ひずみ曲線。

黒色は体積ひずみ ϵ_v ，赤色は軸ひずみ ϵ_a ，青色は周ひずみ ϵ_r を示す。

表 3. 実験に使用した 3D プリント試料の亀裂特性, 素材に関する情報。

試料	3D プリント試料 (アクリル樹脂)	
	RMSH=0.2mm	RMSH=0.5mm
初期開口幅 (mm)	0.3583	0.8957
フラクタル次元	2.23	
ヤング率 (GPa)	2.829	
ポアソン比	0.428	
降伏応力 (MPa)	19.26	

本研究では注入（シリンジポンプ測定）流量と排出（電子天秤測定）流量のそれぞれから浸透率を求め、それぞれの結果を比較した。その結果、変形中盤まではおおよそ整合的であった。しかし、高圧時では水漏れが起きてしまい、注入と排出で乖離が見られた。そのため、ここでは排出流量から求めた浸透率の結果を示す（図 14a）。結果として、全ての試料の浸透率は応力の増加に伴って低下した。3D プリント試料については、浸透率は亀裂面が粗いほど高くなった。また、岩石試料について、花崗岩試料は低圧での浸透率の変化量が大きく、変形中盤以降は変化量が低下した。一方で、ガブロ試料は花崗岩試料と比較して低圧での浸透率の変化量は小さく、変形中盤以降も変化の挙動が異なった。この違いは、各試料の母岩の構成鉱物の違いが起因すると考えられる。そして、構成鉱物の違いにより、岩石の非弾性変形が起きる応力はそれぞれ異なるため、このような違いが確認されたと示唆される。つまり、花崗岩試料はガブロ試料に比べて非弾性変形（圧力溶解など）が進んでいたと考えられる。なお、3D プリント試料と岩石試料の浸透率の値に大きな差は見られなかった。また変形実験により得られた電気比抵抗の結果を図 14b に示す。結果として、すべての試料

の電気比抵抗は応力の増加に伴って上昇した。3D プリント試料については、電気比抵抗は亀裂面が粗いほど大きくなった。一方で、岩石試料については、変形序盤に電気比抵抗が大きく上昇し、変形中盤以降は電気比抵抗の変化量が低下した。このことから、亀裂面の閉鎖による影響は変形序盤に見られ、変形序盤以降は母岩の影響を受けていると推測した。また、ガブロ試料の電気比抵抗は花崗岩試料に比べて高かった。これは、ガブロ試料の母岩の空隙率が花崗岩試料に比べて小さいことが起因したと考えられる。さらに、亀裂試料と母岩の電気比抵抗値との比較を行った。その結果、同じ測定条件（大気圧下）において花崗岩亀裂試料の電気比抵抗は母岩（約 $10^3 \text{ } \Omega\text{m}$ ）の約 24.4%まで低下し、約 18 MPa 以降は母岩を上回った。一方で、斑レイ岩亀裂試料は大気圧下において母岩の（約 $10^4 \text{ } \Omega\text{m}$ ）約 1.1%まで低下し、50 MPa でも約 20.4%に留まることが分かった。

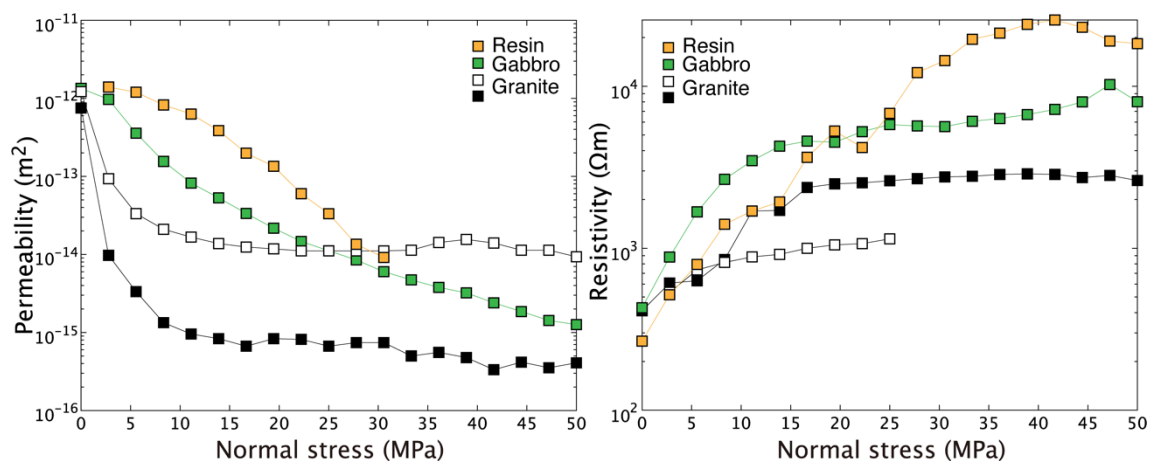


図 14 応力に対する浸透率と比抵抗の変化

変形実験中の試料の垂直応力と軸変位をプロットした結果を図 15 に示す。この図から、どの試料も変形初期で軸変位が上昇したことが分かった。この変化は、試料の歪み以上に亀裂部分の変位が影響していると考えられる。一方で、3D プリント試料は岩石試料に比べて変形終盤まで軸変位が上昇したという違いも見られた。これは、3D プリント試料のヤング率が岩石試料に比べて小さいことに由来すると考えられ、試料自体が歪むことで軸変位が上昇し続けたと示唆される。また、3D プリント試料については、亀裂面が粗いほど軸変位は小さくなることが示唆された。

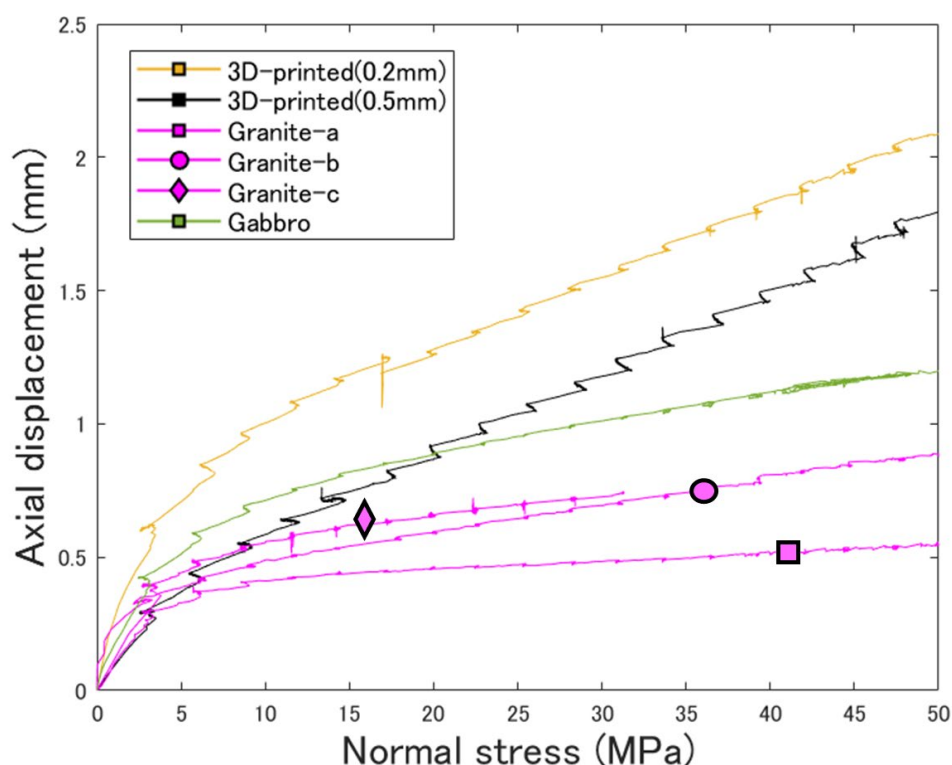


図 15. 各亀裂試料の変位—応力曲線。

橙色は RMSH=0.2 mm の 3D プリント試料，黒色は RMSH=0.5 mm の 3D プリント試料，桃色は花崗岩試料，緑色は斑レイ岩試料を表す。

変形実験により得られた P 波速度の変化を計算した結果を図 16 に示す。結果として，3D プリント試料の P 波速度は応力の増加に伴って上昇した。また，15 点の測定点で得られた P 波速度はそれぞれ異なる値を示した。これは，各測定点における亀裂面の開口幅の違いが影響を与えたと考えられる。粗さの影響については，P 波速度は亀裂面が粗いほど上昇した。この影響は，S 波速度でも同様の結果が見られた（図 17）。これに関して，先行研究で報告された結果と比較を行った。まず，Stesky (1985) はソーカットで切断された平らな亀裂面を有する岩石試料を用いて，封圧の変化における弾性波速度を測定した。このとき，粒度の異なる研磨粉を用いて平らな亀裂面を磨き，粗さによる影響について調べた。その結果，亀裂面が粗いほど弾性波速度は低下することを発見し，本研究で得られた結果とは異なった。次に，Sawayama et al. (2021) は平らな亀裂面と粗い亀裂面の弾性波速度を数値シミュレ

ーションで求め、比較を行った。その結果、亀裂面が粗いほど弾性波速度は上昇することを発見し、本研究で得られた結果と整合的であった。また、本研究の結果を踏まえて、十分に粗さを考慮した亀裂試料の弾性波速度は粗さに比例することが実験的・数値的研究により確認された。

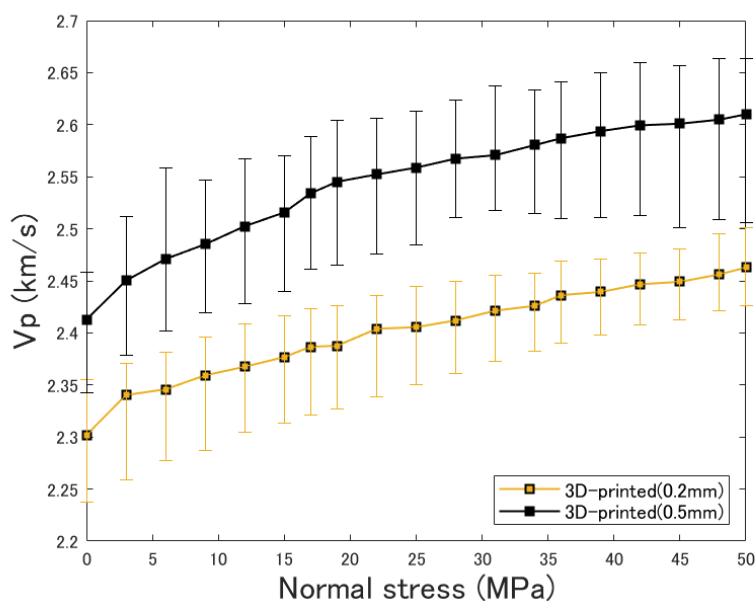


図 16 応力に対する P 波速度の変化

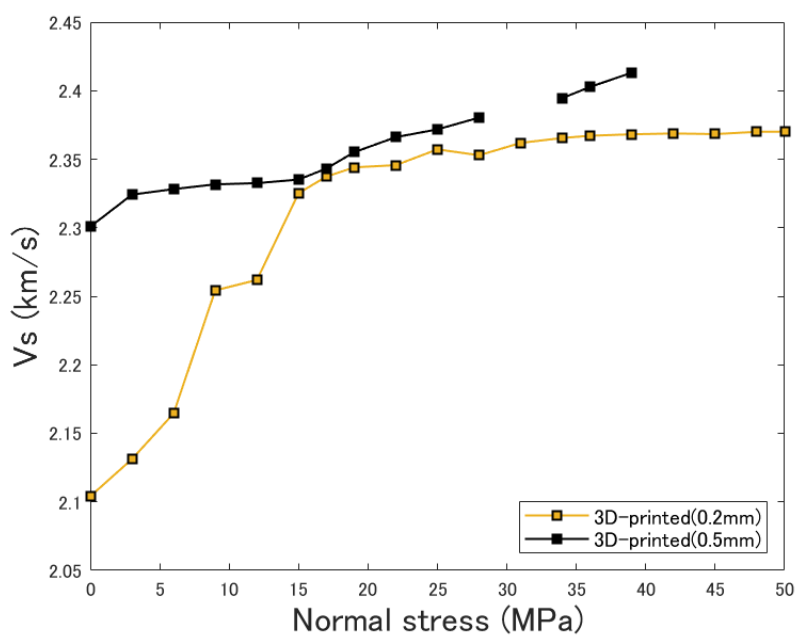


図 17 応力に対する S 波速度の変化

また本研究は感圧紙を用いて亀裂面の接触部分の測定を行った。その結果を接触率として図 18 に示す。結果として、本研究では 50MPa の垂直応力に対して、最大約 60%の接触率が確認された。この結果に関して、本研究と同様に感圧紙を用いて接触率を測定した先行研究の結果と比較を行った。まず、Nemoto et al., (2009)は亀裂を有する花崗岩試料を用いて接触率を測定した。その結果、接触率は 50MPa の垂直応力で最大約 50%に達した。次に、Gong et al., (2024)は砂岩を用いた接触率の測定を行った。その結果、50MPa で約 22%に達した。本研究は前者の花崗岩の測定例と整合的な結果となった。

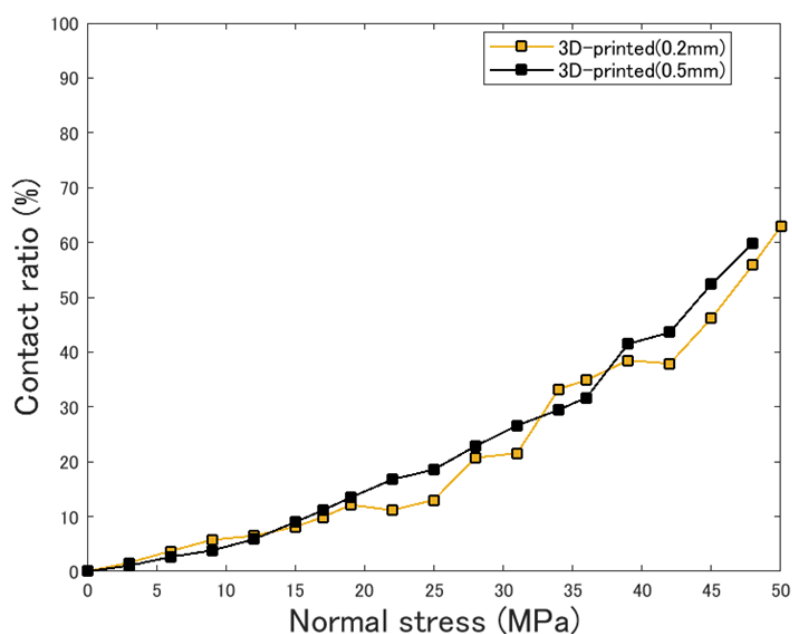


図 18 応力に対する接触面積の変化

また本研究では载荷による加圧過程だけでなく、除荷による減圧過程における物性値の測定も行った。そして、両過程での物性値を比較し、非弾性変形による違いが見られるか確認した。その結果を図 19 に示す。花崗岩試料については、中圧から高压での载荷と除荷のそれぞれで得られた物性値に大きな差は見られなかった。しかし、低圧においては除荷過程の浸透率が载荷過程に比べて低く、電気比抵抗が高かった。また、ガブロ試料についても同

様の結果が得られ、両過程の差は高压部から生じていた。これらから、変形実験により非弾性変形が生じたことを確認することができた。

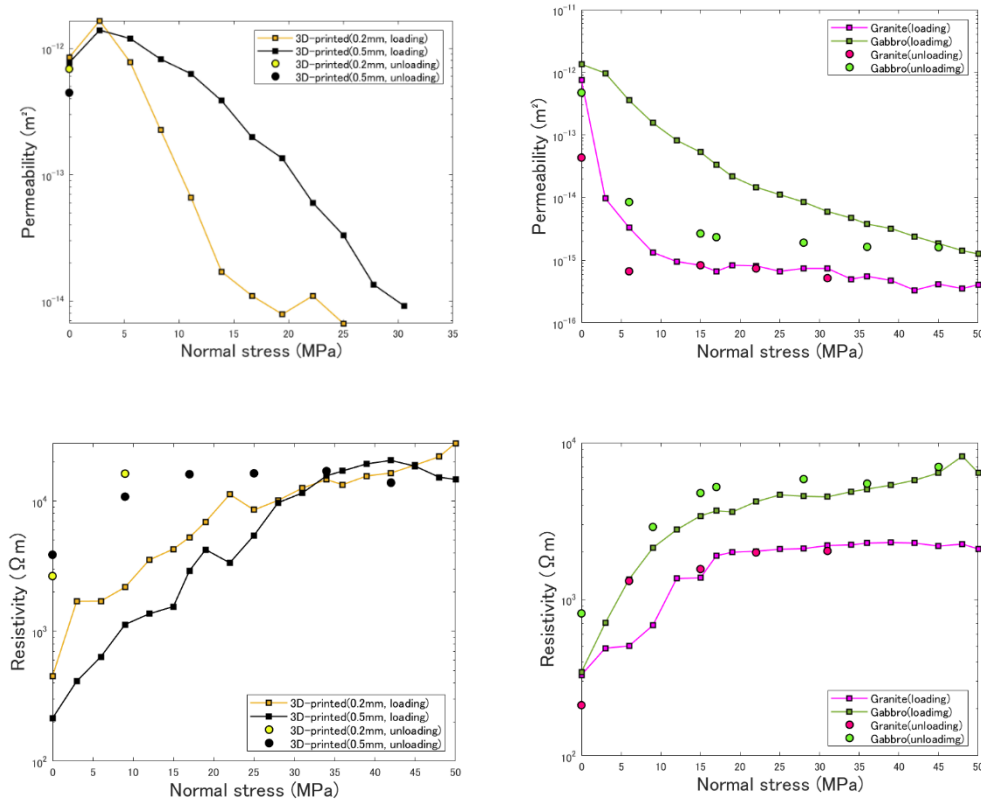


図 19. 载荷過程と除荷過程のそれぞれで得られた物性値の比較。

本研究は応力変化に伴う亀裂試料の開口幅の変化を求めるために、試料の軸変位の変化を測定した。軸変位は実験試料の変位量と亀裂の幅の変化量の合計であり、亀裂に着目するうえで実験試料の変位量を考慮する必要があった。そのため、変位量 δ_{Sample} を以下の式で計算した。

$$\delta_{Sample} = \frac{\sigma}{E} L$$

ここで、 σ は応力 (GPa)、 E はヤング率 (GPa)、 L は試料の厚さ (mm) を示す。なお、ヤング率について、3D プリンタ試料は実測値 (2.83GPa)、花崗岩試料は 60GPa、斑レイ岩試料は 100GPa を用いた (Sawayama and Katayama, 2016; Akamatsu et al., 2019)。そして、亀裂の幅の変化量 $\delta_{Fracture}$ を以下の式で計算した。

$$\delta_{Fracture} = \delta_{Axial} - \delta_{Sample}$$

ここで、 δ_{Axial} は測定した軸変位 (mm) を示す。さらに、以下の式から開口幅の変化を求めた。

$$\langle d \rangle = \frac{1}{n} \sum_{x,y=1}^n (d_{x,y} - \delta_{Fracture})$$

ここで、 $\langle d \rangle$ は平均開口幅 (mm)、 $d_{x,y}$ は実験前にあらかじめ測定した各グリッドの初期開口幅 (mm) を示す。以上から、応力変化に伴う開口幅の変化を図 20 に示す。全体的に、開口幅は低圧部分で最も大きく低下し、高圧にかけて変化量が小さくなった。また、50 MPa における開口幅と初期開口幅と比較した結果、3D プリント試料の開口幅は約 87%、花崗岩試料の開口幅は約 73%、斑レイ岩試料の開口幅は約 75%閉鎖することが分かった。つまり、3D プリント試料の開口幅は岩石試料に比べてより小さくなることが分かった。一方で、花崗岩試料と斑レイ岩試料の開口幅の低下率には大きな差が見られず、母岩の種類には依存しない可能性が示唆された。

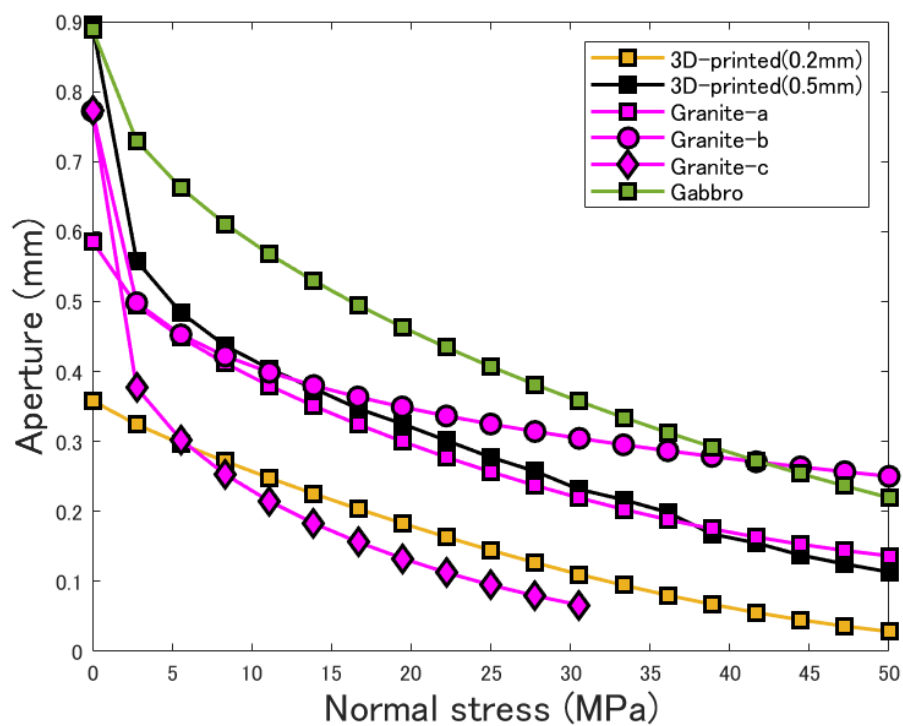


図 20. 応力変化に伴う各亀裂試料の開口幅の変化。

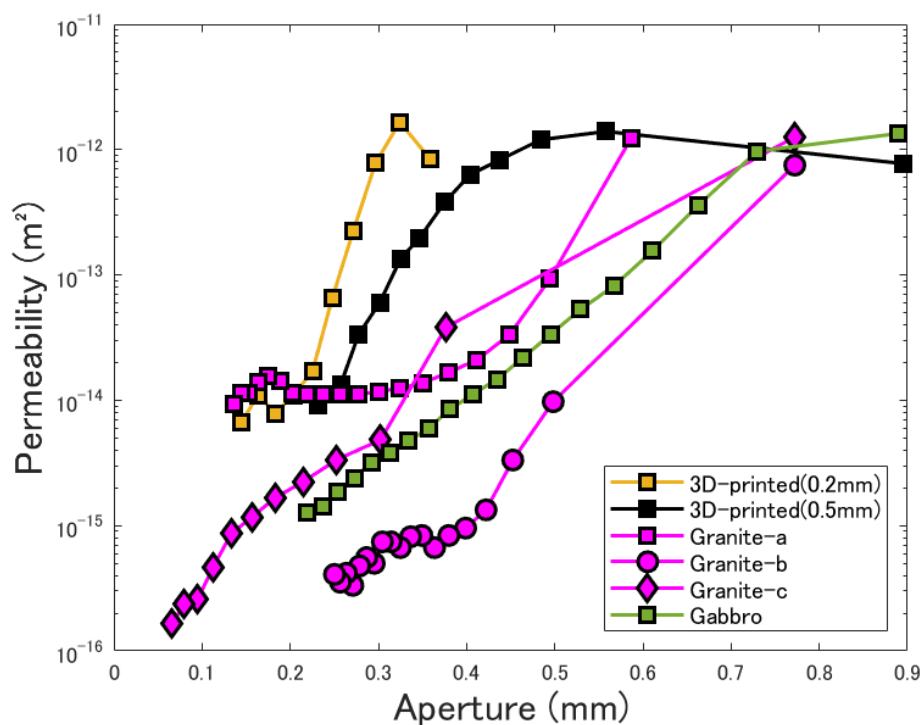


図 21. 各亀裂試料の開口幅と浸透率の関係。

また測定した各物性値と開口幅の関係性をそれぞれ確認した。浸透率と開口幅の関係を図 21 に示す。結果から、3D プリント試料については、開口幅が初期から約 50%閉鎖した辺りから浸透率が低下することが分かった。花崗岩試料については、開口幅が初期から約 30%閉鎖するまでに浸透率は 2 桁以上低下しており、さらに開口幅が閉鎖しても浸透率は大きく変わらなかった。このことから、低圧部での開口幅の閉鎖が浸透率の変化を大きく支配することが確認された。斑レイ岩試料については、変形序盤の開口幅の閉鎖に伴って浸透率は比較的低下した。しかし、応力の増加に伴って開口幅の変化量は低下したにもかかわらず、浸透率は低下し続けた。また、電気比抵抗と開口幅の関係についても、開口幅の閉鎖が顕著である低圧部で電気比抵抗は変化した（図 22）。

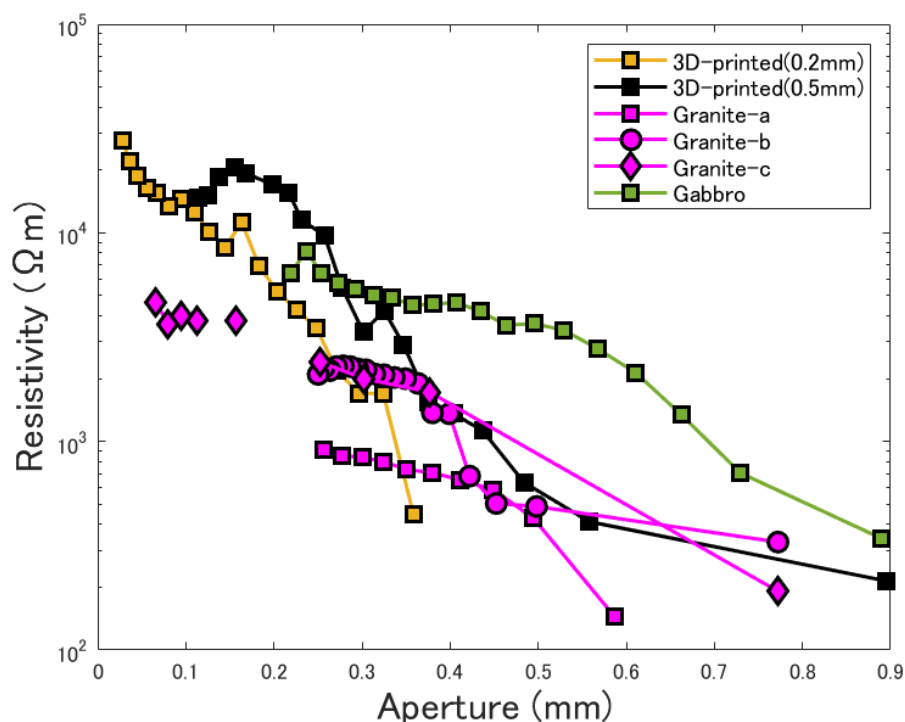


図 22. 各亀裂試料の開口幅と電気比抵抗の関係。

浸透率と電気比抵抗の関係を理解するために、各応力におけるこれらの物性値を両対数グラフで示した（図 23）。なお、横軸は流体の影響を取り除いた電気比抵抗値であるフォーメーションファクタを表す。その結果、応力の増加に伴って傾きが変わることを確認することができた。例えば、RMSH=0.2mm の 3D プリント試料や花崗岩試料の傾きは小さくなり、Brown (1989) と同様の結果が得られた。しかし、ガブロ試料の傾きは大きく変化しており、

先行研究とは異なる結果が得られた。このことから、亀裂面の粗さや母岩の種類によっては必ずしも傾きは低下しない可能性が示唆された。

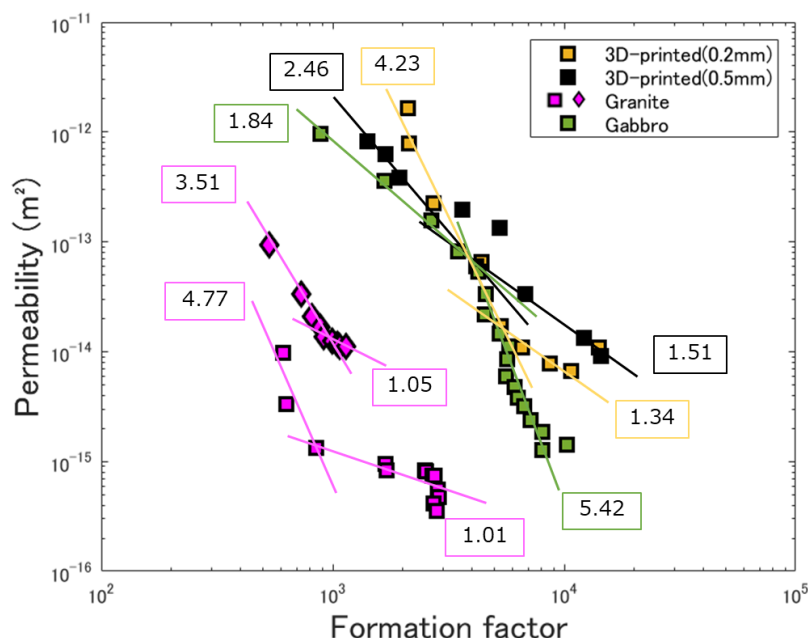


図 23. 応力変化に伴う浸透率とフォーメーションファクタの両対数グラフ。

他にも、傾きの値についても考察を行った。Brown (1989)では、平行平板を仮定した等価流路モデル (Paterson, 1983) を想定したとき、傾きの値 a が $1 \leq a \leq 3$ の範囲におさまることを報告した。しかし、均質な内部構造をもつ 3D プリンタ試料 (RMSH=0.2mm) の傾きがこの範囲を超えており、粗さによっては先行モデルと整合的でないことが示唆された。また、岩石試料の傾きも範囲外であることから、不均質な内部構造 (空隙率等) を考慮した場合でもこの先行モデルの適応外になることが考えられる。

3D プリンタ試料を用いて測定した接触面積と弾性波速度の関係を図 24 に示す。この図から、変形序盤から中盤において、弾性波速度は接触率の上昇に感度が高いことが分かった。一方で、変形終盤では感度が低下しており、ある接触率に達すると弾性波速度では捉えられない可能性が示唆された。なお、浸透率と電気比抵抗の関係を示す傾きが変化した点は弾性波速度が感度を持つ変形序盤に見られた。そのため、弾性波速度はこれらの関係を詳細に理解する際に重要な情報を提供できるポテンシャルを有すると考えられる。

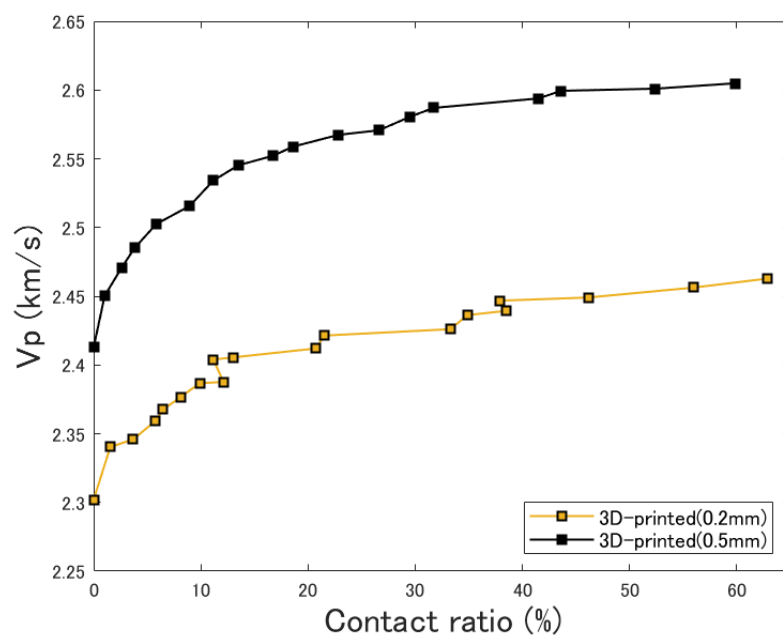


図 24. 応力変化に伴う P 波速度と接触率の関係性。

最後に、複数の測定経路で得られた P 波速度の空間分布をマッピングした結果を図 25 に示す。この結果は下の図にいくほど応力が高くなっており、P 波速度の空間分布マッピングの結果から弾性波速度は接触部分に感度を持つ可能性が示唆される。

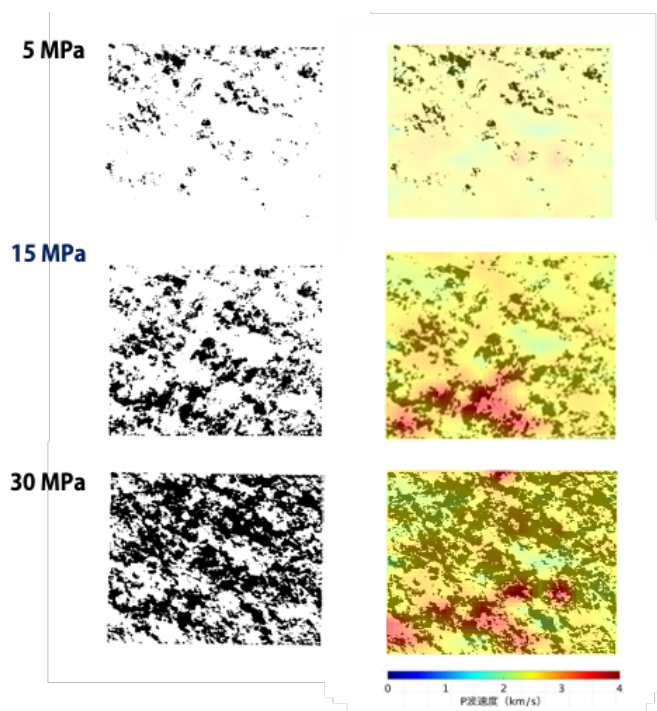


図 25 . P 波速度の空間分布マッピングと実測定した接触面積（3D プリンタ試料 RMSH=0.5 mm）。

空間マッピングは赤色ほど P 波速度が速く，接触面積は黒色が接触部分を示す。

(4) 数値解析の予察的な検討

比抵抗の計算も同様の方法で，有限要素法により解析した。電荷の保存則により，電流密度ベクトル $\mathbf{J}$ は以下の式に従う。

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$$

また，オームの法則と電場 $\mathbf{e}$ と電位 φ の関係

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{e}$$

$$\mathbf{e} = -\nabla \varphi$$

から以下の式が導かれる。

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0$$

これは，以下の式で定義されるエネルギー

$$U = \frac{1}{2} \iiint_V \mathbf{J}(x, y, z) \mathbf{e}(x, y, z) dx dy dz.$$

の最小化

$$\frac{\partial U}{\partial \phi} = 0$$

を解くことで計算できる。本研究では、周期境界条件でモデル両端に電位差を加え、共役勾配法によって繰り返し計算を解くことで電流分布を求めた。得られた電流と電位の関係から、オームの法則によって比抵抗を算出した。

図 26 に解析した比抵抗と空隙率の関係を示す。マーカーの違いは電圧の印加方向を示している。比抵抗は空隙率の減少に対して累乗的に増加し、その傾向は比抵抗の方向に依らず概ね同じであった。また空隙率が低いモデルにおいて得られた比抵抗は、その値のばらつきが大きく、空隙率が高いモデルにおいて得られた比抵抗は、値のばらつきが小さかった。空隙率と比抵抗の関係については、両対数グラフ上で直線的な関係が確認できるが、空隙率 13%前後を境に低空隙率側と高空隙率側でその傾きが異なっている。

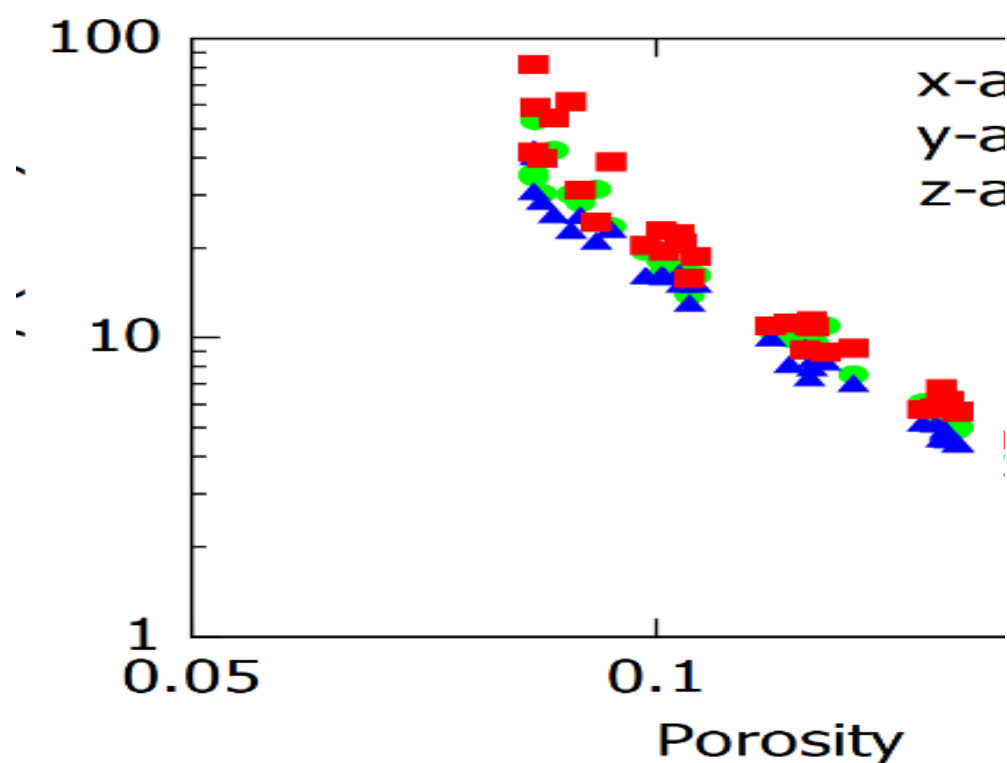


図 26 比抵抗と空隙率の関係

5. まとめ

本研究は、地下開発における大きな課題の 1 つである地下の岩盤の浸透率の推定に着目し、電気比抵抗・弾性波速度から浸透率を推定するモデルの構築を目指した。そのために、

(1) 浸透率と電気比抵抗の関係は粗さや応力によってどのように変化するのか、(2) 浸透率と電気比抵抗の関係は亀裂の真実接触面積や弾性波速度とどのような関係かを解明することを目標とした。そして、粗い一枚亀裂試料を一軸圧縮試験で変形させながら、応力変化に伴う浸透率・電気比抵抗・弾性波速度の同時測定を行った。また、感圧紙を用いた 3D プリント試料の接触面積の実測定を行った。その結果、浸透率は応力の増加に伴って低下し、3D プリント試料は $1.40 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ から $6.41 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、花崗岩試料は $7.51 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ から $3.33 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 、斑レイ岩試料は $1.34 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ から $1.26 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ まで変化した。そして、粗さの異なる 3D プリント試料の比較により、浸透率は亀裂面が粗いほど高くなることも分かった。また、岩石試料については、花崗岩試料と斑レイ岩試料の浸透率は変化の挙動が異なることが確認された。これは、母岩の特性（構成鉱物等）の違いに起因すると考えられる。次に、電気比抵抗は応力の増加に伴って上昇し、3D プリント試料は $2.14 \times 10^2 \text{ } \Omega \text{ m}$ から $2.79 \times 10^4 \text{ } \Omega \text{ m}$ 、花崗岩試料は $3.29 \times 10^2 \text{ } \Omega \text{ m}$ から $2.30 \times 10^3 \text{ } \Omega \text{ m}$ 、斑レイ岩試料は $3.44 \times 10^2 \text{ } \Omega \text{ m}$ から $8.20 \times 10^3 \text{ } \Omega \text{ m}$ まで変化した。そして、粗さの異なる 3D プリント試料の比較により、電気比抵抗は亀裂面が粗いほど大きくなることが分かった。一方で、岩石試料は 3D プリント試料と比較して、変形中盤以降の電気比抵抗の変化量が低下することが分かった。次に、P 波速度は応力の増加に伴って上昇し、3D プリント試料は平均で 2.30 km/s から 2.61 km/s まで変化した。また、複数の経路で得られた P 波速度はそれぞれ異なる値を示し、各測定点における亀裂面の接触点の違いが影響を与えたと考えられる。さらに、P 波速度は亀裂面が粗いほど上昇することが分かり、先行研究の報告と整合的であった。最後に、3D プリント試料を用いて測定した接触面積は、50 MPa の垂直応力に対して最大約 60% の接触率に達した。これらの結果をもとに、浸透率と電気比抵抗の関係を示す両対数グラフを作成した結果、応力の増加に伴って傾きが変わることが確認され、平らな亀裂面を有する岩石試料の実験結果とは異なる傾向が発見された。また、他の先行研究では傾きが低下する傾向が見られたが、本研究では必ずしも傾きは低下しないことが発見され、亀裂面の粗さや母岩の種類が起因する可能性が示唆された。また、接触面積と弾性波速度の関係については、傾きの変化が見られた範囲において弾性波速度は接触率の上昇に感度が高いこと

が分かった。これらのことから、電気比抵抗・弾性波速度の同時測定により浸透率を定量的に評価できる可能性が示唆される。ただし、本研究では一枚亀裂を考慮したが、実際の地下構造は複雑な亀裂を有していると考えられる。今後、本研究をもとに亀裂と物性に関する実験的・数値的研究が進められることで、地下の浸透率の定量的な評価の実現が期待される。また拘束圧最大 190 MPa、間隙水圧最大 80 MPa まで増圧可能な実験システムの整備を継続し、シリンジポンプによって浸透率と空隙率を、フィードスルーによって P 波速度・S 波速度・電気比抵抗をそれぞれ同時計測可能なことを確認した。また構築したデジタル岩石を利用した比抵抗計算の結果、小さな空隙スケールから大きな亀裂スケールに至るまで、流路の屈曲度が比抵抗を支配していることが明らかとなり、この無次元数を利用することで実験室スケールの知見がフィールドスケールに拡張できる可能性を確認した。

参考文献

- Archie, G. E. (1942). The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(01), 54–62.
- Bernabé, Y., Mok, U., & Evans, B. (2003). Permeability-porosity Relationships in Rocks Subjected to Various Evolution Processes. *Pure and Applied Geophysics*, 160(5), 937–960.
- Brace, W. F., Walsh, J. B., & Frangos, W. T. (1968). Permeability of granite under high pressure. *Journal of Geophysical Research*, 73(6), 2225–2236.
- Brown, S. R. (1995). Simple mathematical model of a rough fracture. *Journal of Geophysical Research*, 100(B4), 5941–5952.
- Chen, S., & Doolen, G. D. (1998). LATTICE BOLTZMANN METHOD FOR FLUID FLOWS. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 30(1), 329–364.
- Glover, P. (2009). What is the cementation exponent? A new interpretation. *Leading Edge*, 28(1), 82–85.

Glover, P. W. J., Matsuki, K., Hikima, R., & Hayashi, K. (1998). Synthetic rough fractures in rocks. *Journal of Geophysical Research, [Solid Earth]*, 103(B5), 9609–9620.

Hilfer, R. (1992). Local-porosity theory for flow in porous media. *Physical Review. B, Condensed Matter*, 45(13), 7115–7121.

稲室隆二 (2001). 格子ボルツマン法-新しい流体シミュレーション-. *物性研究*, 77(2), 197–232.

Jiang, F., & Tsuji, T. (2017). Estimation of three-phase relative permeability by simulating fluid dynamics directly on rock-microstructure images. *Water Resources Research*, 53(1), 11–32.

Johnson, T. C., Burghardt, J., Strickland, C., Knox, H., Vermeul, V., White, M., Schwering, P., Blankenship, D., Kneafsey, T., & the EGS Collab Team. (2021). 4D proxy imaging of fracture dilation and stress shadowing using electrical resistivity tomography during high pressure injections into a dense rock formation. *Journal of Geophysical Research, [Solid Earth]*, 126(11). <https://doi.org/10.1029/2021jb022298>

Kachanov, M. (1993). Elastic Solids with Many Cracks and Related Problems. In J. W. Hutchinson & T. Y. Wu (Eds.), *Advances in Applied Mechanics* (Vol. 30, pp. 259–445). Elsevier.

金子勝比古・村田健司・柴 拓海・大見美智人 (Kaneko, K., Murata, K., Shiba, K. and Ohmi, M.) , 1987, 花崗岩の弾性率とその評価・岩盤の変形性の評価法に関する基礎的研究 (第2報) -, 日本鉱業会誌 (Jour. Min. Metall. Inst. Japan) , 103, 9-15.

工藤洋三・橋本堅一・佐野修・中川浩二 (Kudo, Y., Hashimoto, K., Sano, O. and Nakagawa, K.) , 1991, 花崗岩内に発生するクラックと鉱物粒の関係. 資源と素材 (Jour. MMIJ), 107, 423-427.

Kranz, R. L., Saltzman, J. S., & Blacic, J. D. (1990). Hydraulic diffusivity measurements on laboratory rock samples using an oscillating pore pressure method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 27(5), 345–352.

林 為人・中村敏明・高橋 学 (2003). 稲田花崗岩の熱特性, 超音波速度, 強度および変形特性の異方性. *応用地質*, 44, 175–187.

Matsuki, K., Chida, Y., Sakaguchi, K., & Glover, P. W. J. (2006). Size effect on aperture and permeability of a fracture as estimated in large synthetic fractures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(5), 726–755.

Min, K.-B., Rutqvist, J., Tsang, C.-F., & Jing, L. (2004). Stress-dependent permeability of fractured rock masses: a numerical study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(7), 1191–1210.

Polonsky, I. A., & Keer, L. M. (1999). A numerical method for solving rough contact problems based on the multi-level multi-summation and conjugate gradient techniques. *Wear: An International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear*, 231(2), 206–219.

Power, W. L., & Durham, W. B. (1997). Topography of natural and artificial fractures in granitic rocks: Implications for studies of rock friction and fluid migration. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(6), 979–989.

Power, W. L., Tullis, T. E., Brown, S. R., Boitnott, G. N., & Scholz, C. H. (1987). Roughness of natural fault surfaces. *Geophysical Research Letters*, 14(1), 29–32.

Revil, A., & Glover, P. W. J. (1998). Nature of surface electrical conductivity in natural

sands, sandstones, and clays. *Geophysical Research Letters*, 25(5), 691–694.

笹田政克 (1991). 稲田みかげ. *地質ニュース*, (441), 34–40.

Sawayama, K., Ikeda, T., Tsuji, T., Jiang, F., Nishizawa, O., & Fujimitsu, Y. (2022). Elastic wave velocity changes due to the fracture aperture and density, and direct correlation with permeability: An energetic approach to mated rock fractures. *Journal of Geophysical Research, [Solid Earth]*, 127(2). <https://doi.org/10.1029/2021jb022639>

Sawayama, K., Ishibashi, T., Jiang, F., & Tsuji, T. (2023). Relationship between permeability and resistivity of sheared rock fractures: The role of tortuosity and flow path percolation. *Geophysical Research Letters*, 50(20). <https://doi.org/10.1029/2023gl104418>

Sawayama, K., Ishibashi, T., Jiang, F., Tsuji, T., & Fujimitsu, Y. (2021). Relating Hydraulic–Electrical–Elastic Properties of Natural Rock Fractures at Elevated Stress and Associated Transient Changes of Fracture Flow. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(5), 2145–2164.

Sawayama, K., Ishibashi, T., Jiang, F., Tsuji, T., Nishizawa, O., & Fujimitsu, Y. (2021). Scale-independent relationship between permeability and resistivity in mated fractures with natural rough surfaces. *Geothermics*, 94(April), 102065.

Sawayama, K., & Katayama, I. (2016). Effects of confining pressure and pore water pressure on the strain behavior and deformation property of Aji granite under triaxial compression test. *Journal of the Geological Society of Japan. Tokyo*, 122(11), 603–615.

Sawayama, K., Kitamura, K., & Fujimitsu, Y. (2018). Laboratory measurements on electric and elastic properties of fractured geothermal reservoir rocks under simulated EGS conditions. *GRC Transactions*, 42, 2459–2475.

Sueyoshi, K., Kitamura, M., Lei, X., & Katayama, I. (2023). Identification of fracturing behavior in thermally cracked granite using the frequency spectral characteristics of acoustic emission. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 118(1), 221014.

Suzuki, T., Yoshimura, R., Yamazaki, K. I., & Oshiman, N. (2021). *A procedure for stable electrical measurements on a rock sample against high contact resistance as a prerequisite for electrical tomography* (Vol. 73, pp. 1-18). Springer Berlin Heidelberg.

Taira, T. 'aki, Nayak, A., Brenguier, F., & Manga, M. (2018). Monitoring reservoir response to earthquakes and fluid extraction, Salton Sea geothermal field, California. *Science Advances*, 4(1), e1701536.

Tsuji, T., Jiang, F., & Christensen, K. T. (2016). Characterization of immiscible fluid displacement processes with various capillary numbers and viscosity ratios in 3D natural sandstone. *Advances in Water Resources*, 95, 3–15.

Watanabe, T., & Higuchi, A. (2015). Simultaneous measurements of elastic wave velocities and electrical conductivity in a brine-saturated granitic rock under confining pressures and their implication for interpretation of geophysical observations. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2(1), 37.

2024 年度 外部発表

【学術論文】

Hydro-mechanical-electrical simulations of synthetic faults in two orthogonal directions with shear-induced anisotropy

Kazuki Sawayama, Takuya Ishibashi, Fei Jiang, Takeshi Tsuji

Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 16(11) 4428-4439

【口頭発表】

Universality and diversity of resistivity-permeability relationship of faulted rocks

Kazuki Sawayama

JpGU2024

Simultaneous measurement of permeability, electrical resistivity, and elastic wave velocity as fracture closure

Sawayama, K., So, J.

Coupled Processes in Fractured Geological Media 2024

【ポスター発表】

別府・阿蘇の地熱・火山地域で採取された岩石試料の比抵抗・浸透率測定

鈴木 健士, 澤山 和貴

日本地球惑星科学連合 2024 年大会

応力変化に伴う一枚亀裂試料の水理的・電氣的・弾性的性質の同時測定

宗 慈瑛, 澤山 和貴

日本地球惑星科学連合 2024 年大会

亀裂浸透率推定モデル構築に向けた電気比抵抗・弾性波速度の同時測定

宗 慈瑛, 澤山 和貴

日本地熱学会令和 6 年度学術講演会

研究報告 5

放射性核種の超長期安定固化に向けた次世代型 シンロック固化技術の開発

岡山理科大学 工学部

牧 涼介

【目次】

1. 背景・目的	1
2. 全体研究計画（3 ヶ年における全体計画）	4
3. 2023 年度の成果概要	6
4. 2024 年度研究実施内容	10
4.1 2024 年度の計画、実施方法	10
4.2 2024 年度の成果内容	10
4.2.1 模擬 An を含有するムラタイト基シンロックの合成および耐浸出性評価	10
4.2.2 ウランを含有するムラタイト基シンロックの合成	12
4.2.3 ウランを含有するムラタイト基シンロックの耐浸出性評価	14
4.2.4 M3 ムラタイト基シンロックの化学組成の最適化	16
4.2.5 ムラタイト基シンロックの物性評価	18
4.2.6 シンロックの低温合成技術の検討	19
4.2.7 SPS を用いたパイロクロア基およびジルコノライト基シンロックの合成	23
4.2.8 SPS で合成したパイロクロア基およびジルコノライト基シンロックの密度評価	25
4.2.9 SPS で合成したパイロクロア基およびジルコノライト基シンロックの耐浸出性評価	27
5. まとめ	33

参考文献

2024 年度外部発表

1. 背景・目的

多種類の放射性核種が含まれる高レベル放射性廃棄物の安全かつ低コスト保管法の確立は日本における重要な課題であり、最先端の材料科学、地球科学および地質学など関連する分野の科学的知見や手法に基づいた廃棄物の処理・処分技術の開発が求められる。同時に、何十万年後の放射性廃棄物の状態や安全性を予測できる評価手法を構築していくことが重要である。地層処分は長期に渡る事業であるため、常に最新の科学的知見に照らして、固化体の長期的な腐食・劣化挙動評価に基づいて安全性を担保するとともに、将来的に変化していくと予想される多様な燃料および処理・処分形態に対応できる新たな固化技術基盤を構築していく必要がある。

現在までに様々な固化体が研究対象となっており、それらを大別すると①ガラス、②セラミックス、③コンクリート、④複合体に分類される。これらの固化体のうち、高レベル放射性廃棄物を処理・処分するうえで最も適切な固化体を決定するため、米国エネルギー省(DOE)主導のもと固化体の評価および選別が行われた^(1,2)。最終的に 7 種類の固化体が選別され、固化体の健全性(性能)および製造性に関する詳細な予備研究・評価を経て、ホウケイ酸ガラスは製造性に優れ、シンロック(セラミック固化体)は健全性に優れていることが結論付けられた(図 1)。長期的な固化体の健全性については、地質学的年代での損傷や環境変化による影響を類似した自然現象から把握しようとする取り組み(ナチュラルアナログ)が行われており、シンロックが地質学的年代で安定であることは U や Th などを含むシンロック構成鉱物、ジルコノライトやペロプスカイトが天然に存在することにより裏付けられている。

そこで本研究では、使用済燃料の再処理施設から発生する高レベル放射性廃液を含め、特に潜在的有害度が高く長期的な発熱源かつ α 核種であるマイナーアクチノイド(MA)を含めたアクチノイド(An)に注目し、多様な放射性核種の超長期安定固化に向けた次世代型シンロック固化技術の開発を目的とする。シンロックは、自然界に存在する天然鉱物の無機結晶を参考に、放射性核種を結晶構造の構成元素として固体結晶中に閉じ込める(固溶させる)ことで優れた耐浸出性、耐熱性および長期安定性を示し、ガラス固化に比肩し得る代替法として期待される。これまでは核種の一部が非晶質を含む目的外の相に固溶することで浸出性にバラつきが見られ、良質な固化体の製造が難しいと考えられてきたが、近年の無機構造化学および結晶学分野の発展により、多様な放射性核種を豊富に固定可能な無機結晶および

合成手法が数多く見出されている(図 2)^(3,4)。最新の材料科学的観点から、固化体モデルとして実績があるチタン酸塩鉱物系シンロックの一つである蛍石型構造関連の無機結晶（ムラタイト、パイロクロア、ジルコノライト）を中心にシンロック母材を選定し、放電プラズマ焼結(SPS)や誘導加熱法などの焼成技術を駆使した廃棄物の迅速固化技術を新たに提案する。さらには、シンロックと天然鉱物について、結晶構造解析および第一原理計算などの計算科学を併用して結晶安定性評価を実施することで、何十万年後の廃棄物の状態や安全性を予測できる新しい評価技術の創出を図る。以上の目標を達成することで、ナチュラルアナログ研究をベースとした信頼性の高い固化技術として、高レベルを中心に放射性廃棄物全般に対するガラス固化の代替オプションとなり得る。将来的には燃料および処理・処分形態も変化していくことが予想され、本研究を遂行することで、処分方法の選択肢を拡大し、核種に応じた柔軟な対応が可能となり、高レベル放射性廃棄物などの地層処分の技術開発に与える影響は大きい。また、本研究では SPS および誘導加熱法などの高速焼成技術を利用した固化手法についても新たに検討し、将来処分事業を進めるに当たり必要となる技術基盤として、種々のプロセスが固化体に及ぼす影響についてデータの拡充を図る。

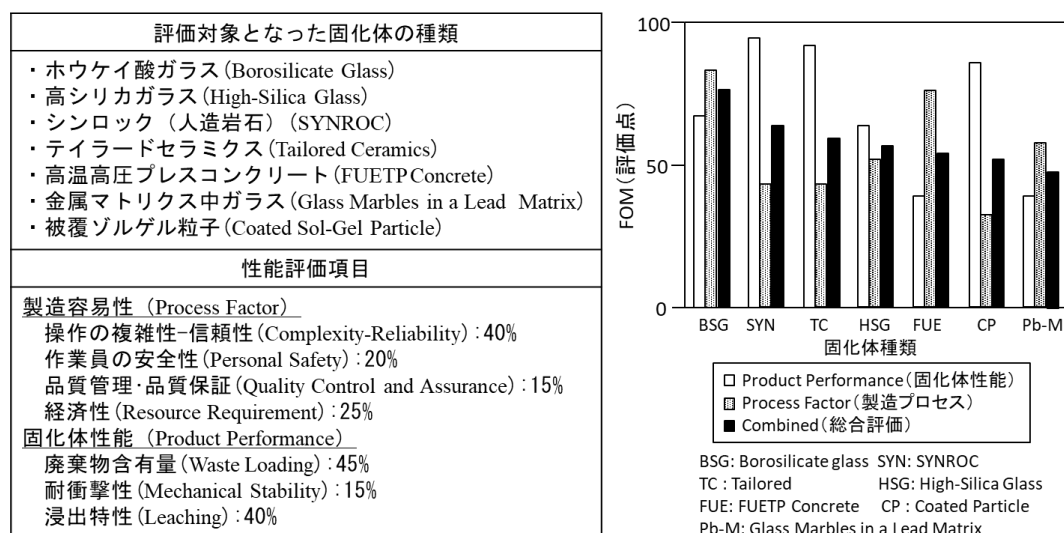
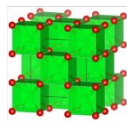


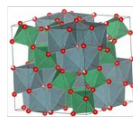
図 1 米国エネルギー省(DOE)による固化体の評価⁽¹⁾

➤ 蛍石型構造関連の鉱物相

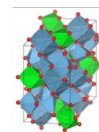
- フローライト
- パイロクロア
- ジルコノライト
- ムラタイト



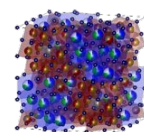
フローライト
(Zr, Hf, Th, U, Np, Pu)



パイロクロア
(Na, Ca, Y, Ln, Th, U, Fe, Ti, Zr, Nb, Ta)



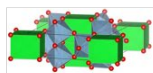
ジルコノライト
(Gd, Hf, Ce, Th, U, Pu, Nb)



ムラタイト
(U, Np, Pu, Am, Cm, REE)

➤ その他のシンロック結晶

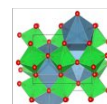
- ホランダイト
- ガーネット
- ペロブスカイト



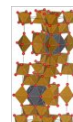
ホランダイト
(Na, K, Cs, Mg, Ca, Sr, Ba, Al, Fe, Mn, Si, Ti)



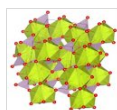
ガーネット
(Mg, Ca, Mn, Co, Cd, Al, Sc, Fe, Ga, Y, In, La, REE, Ti, Zr, Ru, Sn, N, P, V, As)



ペロブスカイト
(Ca, Y, REE, Ti, Zr, U, Pu)



マグネットブランバイト
(Na, Cs, Mg, Sr, Ba, Pb, Mn, Co, Cu, An, Si, Ti, Sn)



モナザイト
(Li, Na, K, Rb, Mg, Ca, Sr, Ba, Cd, Pb, Bi, Y, La, Pr, Nd, Sm, U, Pu, Ce, Si, Se, V, As, S, P)

(チタン酸塩以外)

- マグネットブランバイト
- モナザイト

図 2 無機結晶シンロックの例 (括弧の中は固溶可能な元素) (4)

2. 全体研究計画（3 カ年における全体計画）

本研究では、使用済燃料の再処理施設から発生する高レベル放射性廃液を含め、特に潜在的有害度が高く長期的な発熱源かつ α 核種であるマイナーアクチノイド(MA)を含めたアクチノイド(An)に注目し、ナチュラルアナログ研究をベースとした信頼性の高い固化技術として、多様な放射性核種の超長期安定固化に向けた次世代型シンロック固化技術の開発を目的とする。本研究を通して基礎研究を推し進めることでシンロック固化の技術基盤を確立し、将来的に高レベル放射性廃液(HLW)や燃料デブリの固化技術へと発展させる。

包括的な微構造評価を通して、SPS などの多様なプロセスを用いて合成した種々のシンロックの結晶構造や物性、表面状態や固化元素の電子状態などについて理解し、固化体合成に及ぼす諸条件の影響を明らかにする。また、合成した固化体について多様な環境を想定した核種の浸出試験を行い、溶出モデルについて検討するとともに、シンロックと天然鉱物を比較することで、計算科学と結晶構造解析に基づいた超長期的な安全性の評価手法を構築することを最終目標としている。

以下の研究展開に基づき、ナチュラルアナログ研究をベースとした信頼性の高い固化技術として、高レベルを中心に放射性廃棄物全般に対する固化技術を提案する。

シンロックの合成

粉末冶金的手法により、酸化物粉末などの試薬を用いて(模擬)An を含むシンロックを合成する。シンロックは簡便な固相反応法により合成可能であるが、より迅速かつ頑強な固化体の作製方法として SPS あるいは誘導加熱法による固化体合成を実施する。SPS はパルス通電による電磁的エネルギーを駆動力に元素拡散・反応を促進させる合成技術で、迅速かつ低温でシンロック固化を可能とする。また、誘導加熱法は SPS よりもはるかに急速に昇温し、反応を進行させることが可能となる。本事業では、固化体モデルとして実績があるチタン酸塩鉱物系シンロック（ムラタイト、パイロクロア、ジルコノライトなど）を中心に、核種に応じた最適な結晶相を選択する。U および Am の模擬物質として Ce^{4+} および Eu^{3+} 等を固定化元素とし、プロセスに応じたシンロック合成条件を明らかにする。また、硝酸ウラニル(VI)等の試薬を用いて HLW を仮焼した際に生成する核分裂生成物の酸化物形態を模擬し、模擬 HLW 仮焼体に対する固化技術としての適用性について検討する。

② シンロックのキャラクタリゼーション

試薬に加えて、模擬 HLW 仮焼体を用いて合成したシンロックについて X 線回折(XRD)

および顕微的手法(SEM, STEM-EDS 等)を用いたキャラクタリゼーションを行い、種々の合成プロセスが固化体合成に及ぼす影響を明確化し、①の合成実験にフィードバックして材料設計指針を得る。また、多様な環境を想定した模擬地下水への核種浸出実験を行い、誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)などを用いて元素ごとの浸出率を評価し、浸出試験を行った試料の微構造評価を通して核種の溶出モデルについて検討する。

③ 計算化学による天然鉱物の結晶状態評価

結晶構造解析および第一原理計算などの計算科学を併用し、合成したシンロックと天然鉱物の結晶状態を比較し、何十万年後の廃棄物の状態や核種の拡散挙動を評価する。また、浸出試験を行った試料の結晶構造解析結果と比較し、固化体中の An の安定サイト位置や結晶構造変化を第一原理計算により解析する。

表 1 本研究の年度別全体計画

	2023年度 (11月～3月)	2024年度 (4月～9月) (10月～3月)	2025年度 (4月～9月) (10月～3月)	2026年度 (4月～9月)
①シンロックの合成	合成手法の目処づけ 化学組成の最適化	固化体の合成 Anを含む固化体の合成	固化体の合成 Anを含む固化体の合成	固化条件の最適化 廃棄物に応じた固化手法の整理
②固化体のキャラクタリゼーション	微構造評価	固化体合成にフィードバック 微構造評価 浸出試験・元素分析 物性評価	微構造評価 多様な環境を想定した浸出試験 物性評価	評価・まとめ データ整理
③天然鉱物の結晶状態評価	文献調査・整理	天然鉱物とシンロックのエネルギーパラメータの計算 浸出モデルの検討	天然鉱物とシンロックのエネルギーパラメータの計算 多様な環境での浸出モデルの検討	評価・まとめ

3. 2023 年度の成果概要

3 ヶ年における研究計画の1年目(前半)として、シンロックの合成では常圧焼成およびSPS法を用いたシンロックの合成プロセスの目処づけを行い、固化体のキャラクタリゼーションでは得られた試料について微構造評価を実施した。また、天然鉱物の結晶状態評価では、天然鉱物の結晶構造に関する文献調査・整理を行った。2023年度における成果の目標および成果概要については以下のとおりである。

① シンロックの合成

種々のプロセス(常圧焼成およびSPS)により試薬を用いて模擬Anを含むシンロックを合成し、対象とする核種に応じた化学組成の最適化および合成手法の目処づけを実施した。

(a) 模擬HLWのシンロック固化

HLWのシンロック固化方法について検討するため、HLWを模した試料(模擬HLW)と市販の酸化物粉末を混合・焼成することで模擬HLWに含まれる種々の元素が固溶したシンロックを合成し、生成する結晶相について検討した。本研究ではムラタイトを宿主相として選定し、簡便な常圧焼成による固相反応法によりシンロックを合成した。模擬HLWをムラタイト原料粉末(CaO , MnO_2 , ZrO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3)に対して0~40 wt%となるよう秤量し、乳鉢を用いてムラタイト原料粉末および模擬HLWを混合した。混合粉末は18.2 MPaで一軸加圧成型し、得られた成型体を電気炉を用いて1300℃で6h焼成した。得られた試料について粉末X線回折装置(XRD)を用いて相同定を行った。

得られたシンロックには目視において不均質さは見られず、焼結による変形およびひび割れがない固化体を得られた。得られた試料を粉砕し、粉末XRDにより相同定を行った結果、主要生成相はムラタイトであった。合成したシンロックは主にムラタイトの結晶多形(M3およびM8ムラタイト相)で構成されており、この二つの結晶相は蛍石型構造の超周期性が異なるが非常に近い化学組成を有する化合物であり、どちらも優れた固化体性能を示すことが知られている⁽⁵⁾。また、ジルコノライトおよび擬ブルッカイト相の生成も確認された。模擬HLW含有率の増加に伴いペロブスカイト相(CaTiO_3)およびマグネトプランバイト相が生成した。ペロブスカイト相にはイオン半径の大きいAnが容易に固溶し、核種浸出率が高いのでシンロックにおいては望ましくない。特に模擬HLW含有率が30 wt%を超えるとペロブスカイト相の割合が急激に増加することから、優れた性能を有するシンロック

を合成するためには化学組成の最適化が必要であることが分かった。

(b) SPS によるパイロクロアおよびジルコノライト基シンロックの合成

HLW には多種類の放射性核種が存在し、蛍石型構造関連の無機結晶(パイロクロアおよびジルコノライト)は希土類やアクチニドなどの幅広い元素を固溶体に収容できることから、An および発熱性核分裂生成物の優れたホスト相として活発な研究が進められている。そこで、新たに迅速なシンロック固化技術として SPS を用いてパイロクロアおよびジルコノライト基シンロックの合成を試みた。パイロクロア($\text{Y}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$)およびジルコノライト($\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$)の化学量論比となるように酸化物原料粉末(Y_2O_3 , TiO_2 , CaO および ZrO_2)を秤量・混合し、ボールミルを用いてエタノール中で 24 h 湿式混合した後、乾燥させることで均質な混合粉末を得た。得られた混合粉末を黒鉛型に充填し、SPS を用いて通電することで焼結した。

パイロクロアは 900°C 近傍から収縮が開始し、1200°C までほぼ単調に収縮が生じた。収縮開始直後である 950°C で焼結を停止して XRD 測定を行った結果、出発原料は未反応で残っているものの、900°C 付近からパイロクロア相が生成し、収縮途中ではあるが 1200°C においてはほぼ単相のパイロクロア相が形成されることが明らかとなった。1200°C で SPS した試料の密度は 4.7 g/cm³ であり、相対密度においても 90% 以上であった。電気炉で焼成した場合の試料密度は 2.5 g/cm³ 前後であったことから、SPS を用いた加圧焼結により緻密化が促され、固化体の減容化に向けて高い効果が見込まれた。

ジルコノライトの場合、950°C から 1100°C までの収縮に加え、1450°C 付近で収縮が起こり、二段階で収縮が発生した。1 段階目の収縮の手前である 800°C(①)では原料粉末もしくは中間生成物(ZrTiO_3)が固化体の主要な構成相で、1 段階目の収縮の際にジルコノライト相が生成した。1450°C で SPS した試料の密度は 4.3 g/cm³ であり、相対密度においても 90% 以上の緻密な固化体を得られた。

以上の結果から、SPS を用いてパイロクロアおよびジルコノライトの合成に成功した。また、従来の電気炉を用いた場合よりも緻密な固化体を得られていることから高密度化および迅速固化という点において優位性を確認できた。

② 固化体のキャラクタリゼーション

粉末 X 線回折装置および顕微的手法を用いて、得られた試料について微構造評価を実施し、得られたデータを合成実験にフィードバックした。

(a) ムラタイト基シンロックにおける核種固溶サイトの解明

シンロックは結晶格子に An が固溶することで優れた固化体性能を示すが、ムラタイト結晶は蛍石型構造関連のチタン酸塩鉱物において最も複雑な結晶構造を有し、HLW に対する応用検討は未だ行われていない。そのため、まずは HLW に含まれる核種についてムラタイト結晶格子への置換固溶性について検討することが重要である。そこで、 U^{4+} および TRU (Am^{3+} , $Cm^{3,4+}$ など)の模擬 An として Ce^{4+} および Eu^{3+} が固溶したムラタイト基シンロックを合成するため、XRD を用いて M3 ムラタイトの詳細な結晶構造解析を行った。

リートベルト解析の結果、M3 ムラタイトは $a=b=c=14.560\text{ \AA}$, $a=b=c=90^\circ$ の立方晶($F\bar{4}3m$)であり、化学組成は $Ca_{3.2}Mn_{2.1}Zr_{2.6}Fe_{6.13}Ti_{7.6}Al_{3.9}O_{44}$ であった。M3 ムラタイトは対称的に独立した5つのカチオンサイトを有しており、イオン半径の大きい Ca^{2+} , Mn^{2+} および Zr^{4+} は8配位のカチオンサイトを占有していることが分かった。得られた結晶構造パラメータを基に種々の模擬 An が占有するサイトについて検討した結果、 Ce^{4+} は Zr^{4+} 、 Eu^{3+} は Mn^{2+} と置換するように調整することで単相の M3 ムラタイトが得られた。原子価数の変化は電気的中性を保つように補償されなければならない、ムラタイトの場合は3, 4 価の Ti および 2, 3 価の Fe がこれに関与したと考えられる。以上の結果から、An が固溶したムラタイト基シンロックを合成する際には、 U^{4+} は Zr^{4+} 、 Am^{3+} は Mn^{2+} と置換するように化学組成を調整することで良質な固化体が得られると考えられ、化学組成の最適化および合成手法の目処づけを達成した。

(b) 模擬 An を置換したパイロクロア基シンロックのキャラクタリゼーション

模擬 An として Ce^{4+} を Y^{3+} に置換した $Y_{2-x}Ce_xTi_2O_7$ ($x=0.0-0.4$)を SPS を用いて合成し、微構造評価を行った。

得られた固化体の断面観察を行った結果、無添加の試料は全体が黒色化したが、Ce 置換した試料は表面のみ黒色化し、内部が褐色であった。電気炉で焼成した場合はほぼ白色であったことから、SPS を用いることで一部の金属元素が還元したものと考えられる。

得られた固化体を粉砕して XRD 測定を行った結果、原料粉末の CeO_2 が未反応で残っているものの、ほぼ単相のパイロクロア固化体を得られた。また、 Ce^{4+} が Y^{3+} に置換することで起こる原子価数の変化は電気的中性を保つように補償されなければならない、SPS による還元反応により生じた酸素欠損がこれに関与したと考えられる。また、SPS した試料は Ce 置換に伴い結晶格子の歪み（軸長の変化）が顕著に現れることが判明し、それに伴い Ce の置

換量が増加したことから、SPS を用いてパイロクロア基シンロックを合成することで模擬 An 固溶量の増加が期待された。

(c) 模擬 An を置換したジルコノライト基シンロックのキャラクタリゼーション

模擬 An として Eu^{3+} および Ce^{4+} を置換した $\text{Ca}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Zr}_{1-x}\text{Ce}_x\text{Ti}_2\text{O}_7$ ($x=0.0-0.2$) を SPS を用いて合成し、得られた固化体を粉砕して XRD 測定を行った。

模擬 An を 20% 置換した $\text{Ca}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Zr}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Ti}_2\text{O}_7$ では、第 2 相として中間生成物である ZrTiO_3 が生成しているが、いずれの試料においてもジルコノライト相が主要な構成相であった。パイロクロアと同様、置換量の増加に伴い、置換固溶による結合長の伸長が確認された。

③ 天然鉍物の結晶状態評価

天然鉍物の結晶状態評価に向けて、天然鉍物の結晶構造に関する資料収集を行い、原産地に対応させて構造パラメーター等の情報を整理した。

シンロックとして実績のあるチタン酸塩鉍物のなかで、ムラタイトと同じ結晶構造を有する天然鉍物の微構造および化学組成に関わる文献を収集した。ムラタイト結晶は 1974 年に初めて発見され、ロッキー山脈の南端に位置するアメリカコロラド州で採取されたペグマタイト(火成岩の一種)について調査する中で、アストロフィライトと石英の間の接触部から発見された⁽⁶⁾。ロッキー山脈南端に位置するサンフアン山地で見られる火山岩の地層は第三紀(6430 万年前から 260 万年前)に形成されたと考えられており、ムラタイト結晶が生成してから、地質学的年代に渡り化学的に安定であったことがうかがえた。1995 年に T. S. Ercit らによって詳細に解析され、正確な結晶構造パラメーターが報告された⁽⁷⁾。天然鉍物の結晶構造パラメーターから、ほとんどの HREE (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) がムラタイト結晶に固溶可能であることが分かった。

特筆すべき点として、本研究で合成した M3 ムラタイトの結晶構造と比較すると、天然鉍物は 8 配位のカチオンサイトが一つ少ないことが明らかになった。このカチオンサイトの欠損が起きた原因は不明だが、もし長年に渡る劣化・変質による結果であるとするならば、本研究で合成したシンロックの浸出試験および微構造評価を通して、ムラタイト結晶からの溶出挙動を予測できる新しい評価技術につなげられる可能性が期待された。

4. 2024 年度研究実施内容

4.1 2024 年度の計画、実施方法

3 カ年における研究計画の 2 年目として、2024 年度における成果の目標および業務の実施方法については以下のとおりである。

(1) シンロックの合成

昨年度の検討を継続しながら、予備検討結果を反映させて技術的妥当性の高い合成方法にて、試薬からのシンロック合成および既往の廃棄物を想定した固化プロセスへと検討を深化させる。また、An を含むシンロックを合成する。

(2) シンロックのキャラクタリゼーション

昨年度に引き続き、粉末 X 線回折装置および顕微的手法を用いて、得られた試料について微構造評価を実施し、得られたデータを合成実験にフィードバックする。合成した固化体について、最も簡便な純水に対する固化元素の浸出試験を行い、誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)あるいは ICP 発光分光分析法(ICP-AES)を用いて種々の元素の浸出率を測定する。

4.2 2024 年度の成果内容

4.2.1 模擬 An を含有するムラタイト基シンロックの合成および耐浸出性評価

前年度の結果を基に、 U^{4+} の模擬元素として Ce^{4+} を含有するムラタイト基シンロックを合成し、XRD を用いて相同定および詳細な結晶構造解析を行った。市販の CaO , MnO_2 , ZrO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CeO_2 , SUS304, および Zr 粉末を化学組成が $Ca_{3.2}Mn_{2.1}Zr_{2.34}Ce_{0.26}Ti_{7.53}Fe_{6.5}Cr_{0.05}Ni_{0.02}Al_{2.5}O_{44}$ となるように秤量し、図 3 に示すように乳鉢を用いて混合した。混合粉末を 18.2 MPa で一軸加圧成型し、得られた成型体を電気炉を用いて 1300 °C で 6 h 焼成してムラタイト基シンロックを合成した。得られた試料について粉末 XRD 装置を用いて相同定およびリートベルト法による詳細な結晶構造解析を行った。

図 4 に Ce を含有するムラタイト基シンロックの結晶構造解析の結果を示す。合成した試料は M3 ムラタイト単相であった。この結晶相は対称的に独立した 5 つのカチオンサイトを有しており、イオン半径の大きい Ca^{2+} , Mn^{2+} および Zr^{4+} と同様に Ce^{4+} は 8 配位のカチオンサイトを主に占有していた。M3 ムラタイト結晶において 8 配位のカチオンサイトは二つ存在

し、特に 6 配位の多面体（八面体）と稜を共有する 8 配位サイトに多く存在することが分かった。

得られた M3 ムラタイト単相のシンロックについて、静的浸出試験 MCC-1 法に準拠して浸出率を測定した。得られた試料の表面をアルミナ研磨紙（～#1000）を用いて研磨した後、イオン交換水中で 5 min×3 回、超純水中で 5 min およびエタノール中で 5 min 超音波洗浄を行った。恒温乾燥機を用いて試料の重量が一定となるまで 100℃で乾燥した後、PFA テフロン容器中で 90℃に保持した超純水に 3～58 日間浸漬した。3, 7, 14, 28, 58 日経過した後、それぞれの容器から試料を取り出し、誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)を用いて浸出液に含まれる各元素の濃度を分析した。図 5 に ICP-MS の結果から算出した各元素の浸出率を示す。Ce および Zr は非常に低い浸出率を示したが、Mn はやや高い浸出率を示した。この理由として、M3 ムラタイトの同じ結晶サイトを占有する Ce^{4+} , Zr^{4+} および Mn^{2+} の中で Mn^{2+} のみ二価イオンであるため、結晶中での安定性が異なり浸出しやすいのではないかと考えられる。また、M3 ムラタイト結晶中に最も多く含まれる Ti は検出下限以下という結果になり、浸出率が非常に低いことが分かった。28 日浸漬した場合の浸出率の合計は、 $3.1 \times 10^{-4} \text{ g}/(\text{m}^2\text{d})$ であり、既存のホウケイ酸ガラスによる固化体の浸出率は $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ g}/(\text{m}^2\text{d})$ オーダーであることから M3 ムラタイト単相のシンロックは極めて優れた耐浸出性を有することが分かり、社会実装に向けた固化体性能を確認することができた。

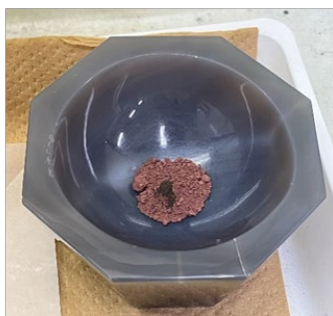


図 3 乳鉢を用いて試薬を混合する様子

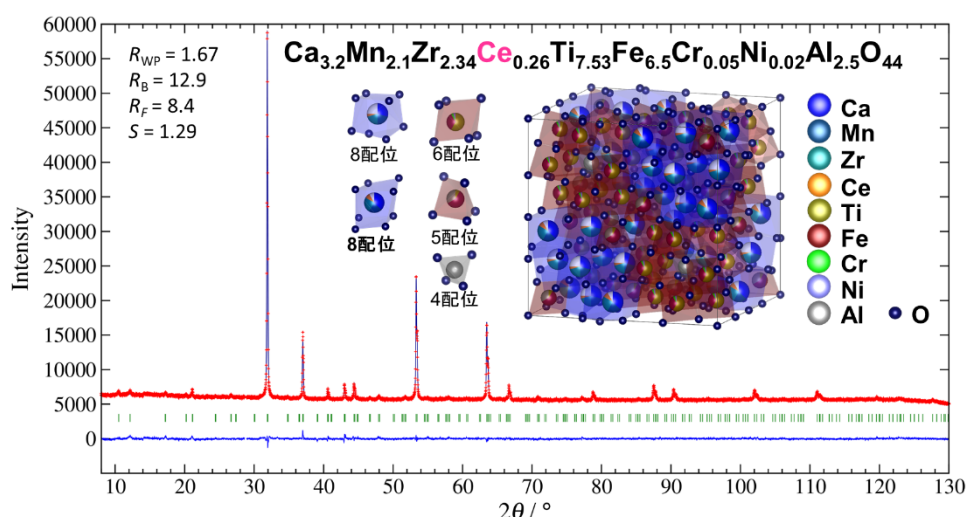


図 4 Ce を含有する M3 ムラタイト試料の結晶構造解析結果。詳細な結晶構造モデルおよび各カチオンサイトを図中に示す（信頼度因子 $R_{wp}=1.67\%$ 、 $S=1.29$ ）。

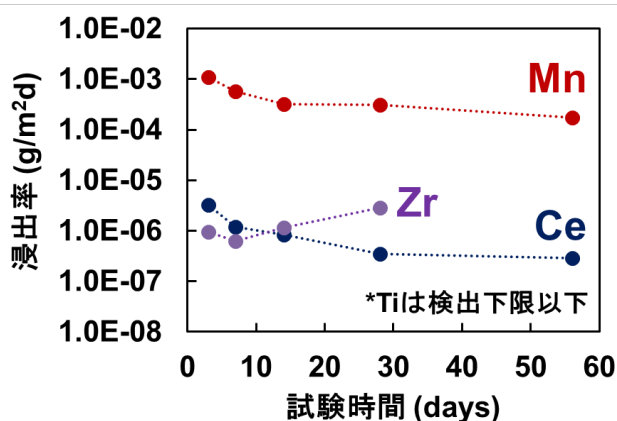


図 5 MCC-1 法に準拠して測定した Ce を含有する M3 ムラタイト試料の浸出率

4.2.2 ウランを含有するムラタイト基シンロックの合成

前項の結果を基に、ウランを含有するムラタイト基シンロックを合成し、XRD を用いて相同定および詳細な結晶構造解析を行った。市販の CaO , MnO_2 , ZrO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SUS304, Zr 粉末および UO_2 を化学組成が $\text{Ca}_{3.2}\text{Mn}_{2.1}\text{Zr}_{2.34}\text{U}_{0.26}\text{Ti}_{7.53}\text{Fe}_{6.5}\text{Cr}_{0.05}\text{Ni}_{0.02}\text{Al}_{2.5}\text{O}_{44}$ となるように秤量し、乳鉢を用いて混合した。混合粉末を一軸加圧成型し、得られた成型体（図 6）を電気炉を用いて $1350\text{ }^\circ\text{C}$ で 2 h 焼成してムラタイト基シンロックを合成した。得られた試料について粉末 XRD 装置を用いて相同定およびリートベルト法による詳細な結晶構造解析を行った。

図 7 にウランを含有するムラタイト基シンロックの外観写真を示す。合成した試料はこれまでに合成したムラタイト試料と同様に黒色を示した。また、試料には目視で確認できるき裂が発生していた。これは一軸加圧成型による残留応力の影響と考えられ、今後は成型条件についても最適化を図る必要があることが分かった。図 8 にウランを含有するムラタイト基シンロックの XRD パターンを示す。相同定の結果、M3 ムラタイトが主要な構成相であり、わずかに中間生成物であるジルコノライト $[(\text{Ca},\text{Zr},\text{U})_2\text{Ti}_2\text{O}_7]$ および擬ブルッカイト $[(\text{Al},\text{Fe})_2(\text{Ti},\text{Zr})\text{O}_5]$ 相を含むことが分かった。ウランは主に M3 ムラタイトおよびジルコノライト相に固溶していると考えられ、いずれの結晶相も優れたチタン酸塩系シンロックとして知られる無機結晶である。ウランを含有する M3 ムラタイトについて、リートベルト法による詳細な結晶構造解析を行った結果を図 9 に示す。M3 ムラタイト結晶中のウランは U^{4+} の価数を有することが知られており、本研究で U^{4+} が占有するカチオンサイトは 8 配位であることが分かった。この結果は Ce^{4+} を模擬元素として用いた M3 ムラタイトと同じであり、6 配位の多面体（八面体）と稜を共有するカチオンサイトに多く存在することが明らかになり、 Ce^{4+} は U^{4+} の占有サイトを模擬するうえである程度は有効であると考えられる。



図 6 市販試薬および UO_2 の混合粉末の成型体



図 7 ウランを含有するムラタイト基シンロック

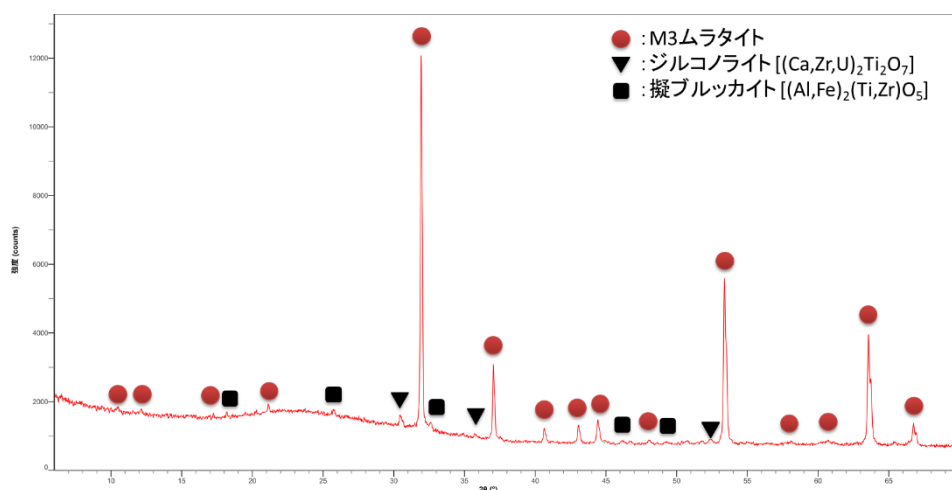


図8 ウランを含有するムラタイト基シンロックの XRD パターン (1350°C焼成)

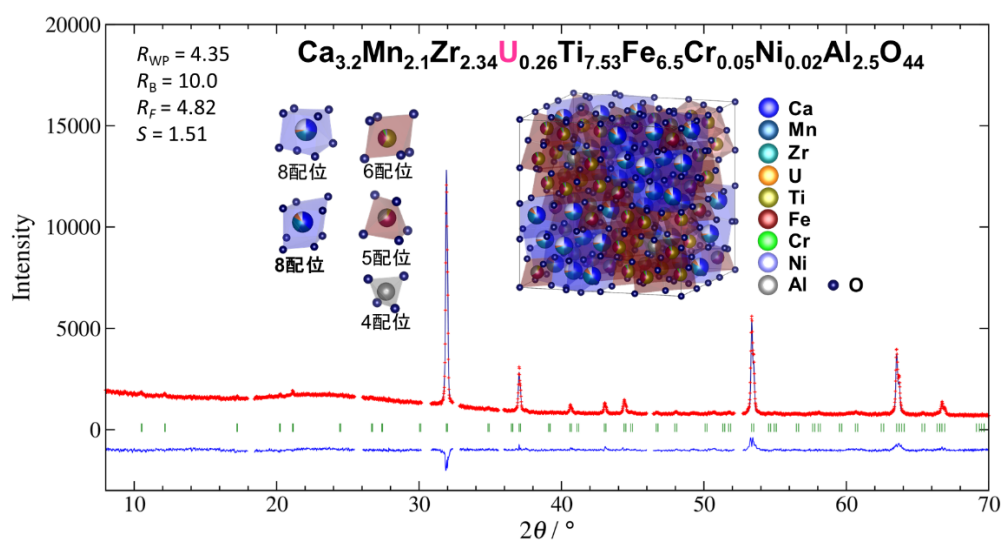


図9 ウランを含有する M3 ムラタイトの結晶構造解析結果。詳細な結晶構造モデルおよび各カチオンサイトを図中に示す (信頼度因子 $R_{wp}=4.35\%$ 、 $S=1.51$)。

4.2.3 ウランを含有するムラタイト基シンロックの耐浸出性評価

ウランを含有するムラタイト基シンロックを合成し、静的浸出試験により浸出率を測定した。ウランを含有するムラタイト基シンロックの合成は、前項の実験手順に準拠した。市販の CaO 、 MnO_2 、 ZrO_2 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 粉末および過酸化ウラニル $[\text{UO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}]$ を化学組成が $\text{Ca}_{3.2}\text{Mn}_{2.1}\text{Zr}_{2.34}\text{U}_{0.26}\text{Ti}_{7.53}\text{Fe}_{6.5}\text{Cr}_{0.05}\text{Ni}_{0.02}\text{Al}_{2.5}\text{O}_{44}$ となるように秤量し、乳鉢を用いて混合した。混合粉末を一軸加圧成型し、図 10 に示すように得られた成型体を電気炉を用いて 1300

°C で 3 h 焼成してムラタイト基シンロックを合成した。得られた試料について粉末 XRD 装置を用いて相同定を行った。また、浸出率を測定するため、得られた試料の表面をアルミナ研磨紙 (~#1000) を用いて研磨した後、イオン交換水中で 5 min×3 回、超純水中で 5 min およびエタノール中で 5 min 超音波洗浄を行った。恒温乾燥機を用いて試料の重量が一定となるまで 100°C で乾燥した後、PFA テフロン容器中で 90°C に保持した超純水に 1~73 日間浸漬した。1, 6, 34, 73 日経過した後、容器から浸出液を採取し、誘導結合プラズマ発光分析法 (ICP-AES) を用いて浸出液に含まれる各元素の濃度を分析した。

図 11 にウランを含有するムラタイト基シンロックの XRD パターンを示す。相同定の結果、M3 ムラタイトが主要な構成相であり、次いでジルコノライト $[(\text{Ca}, \text{Zr}, \text{U})_2\text{Ti}_2\text{O}_7]$ および擬ブルッカイト $[(\text{Al}, \text{Fe})_2(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_5]$ 相が生成していることが分かった。前項では 1350°C で焼成することではほぼ単相の M3 ムラタイトが得られたが、本項では 1300°C で焼成したことで中間生成物であるジルコノライトおよび擬ブルッカイト相が多く含まれるムラタイト基シンロックが得られた。この試料について静的浸出試験を行い、ICP-AES を用いて浸出液に含まれる U, Mn, Ti, Fe の濃度を測定した結果、いずれも検出下限 (0.01ppm) 以下であることが分かった。ICP-AES の検出限界は、元素にもよるが一般的には ICP-MS と比べると微量分析能力に劣る傾向にある。それを加味しても、今回の分析結果からウランを含有するムラタイト基シンロックの浸出率は $10^{-5} \text{ g}/(\text{m}^2\text{d})$ オーダーを下回ることであり、非常に優れた耐浸出性を示す結果となった。ウランの浸出量も低い値を示しており、これは優れたチタン酸塩系シンロックとして知られる M3 ムラタイトおよびジルコノライト相にウランは固溶しているためと考えられる。以上の結果から、ムラタイトをホスト相としたシンロックを合成することで、たとえ中間生成物であるジルコノライトおよび擬ブルッカイト相が多く含まれていたとしても、優れた耐浸出性を有する固化体を得られることが分かった。

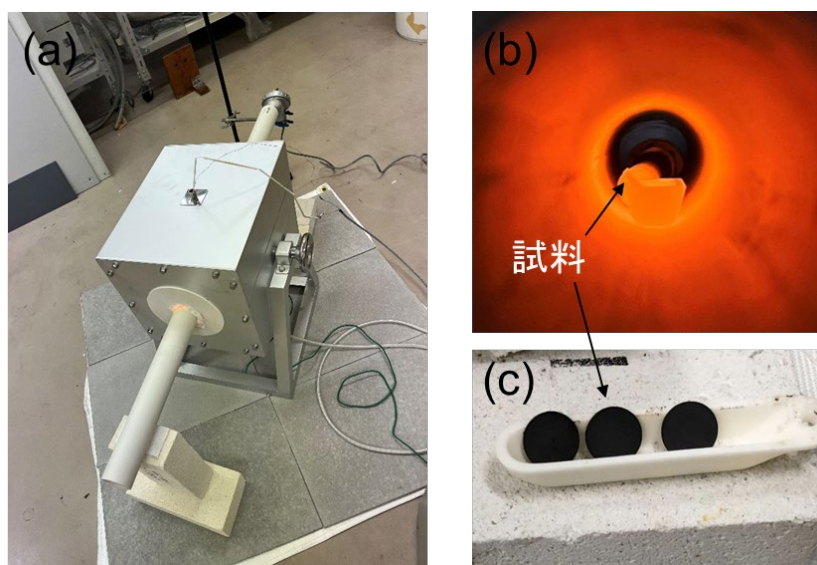


図 10 (a) シンロック合成用の管状炉、(b) 焼成中の様子、
(c) ウランを含有するムラタイト基シンロックの外観写真

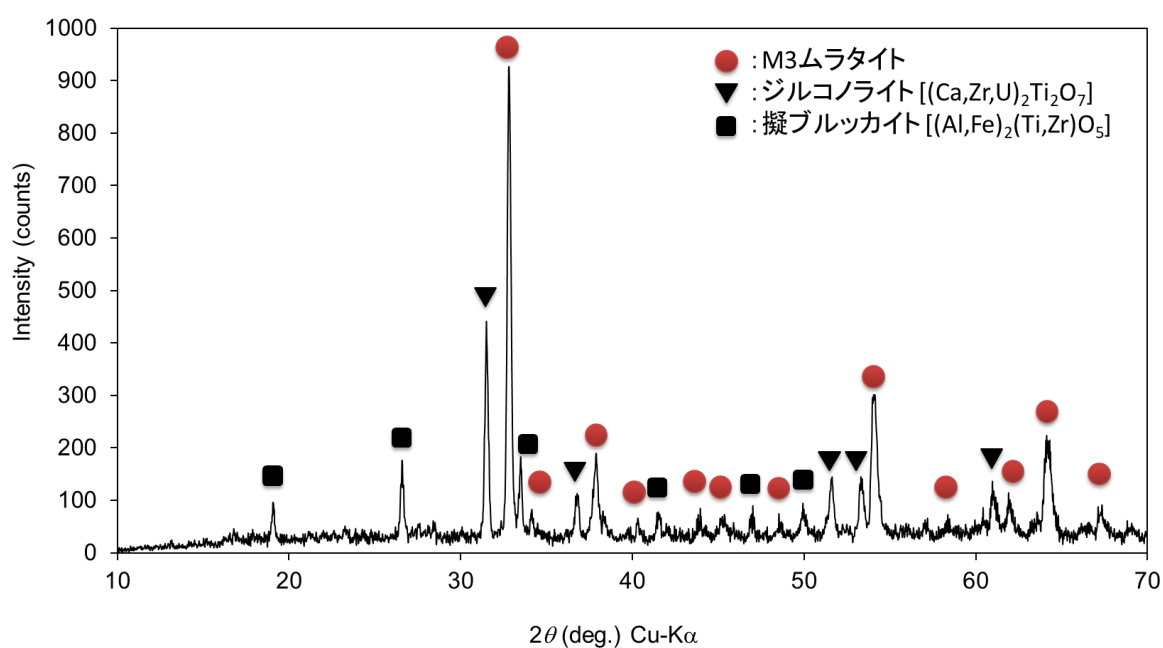


図 11 ウランを含有するムラタイト基シンロックの XRD パターン (1300°C焼成)

4.2.4 M3 ムラタイト基シンロックの化学組成の最適化

4.2.1 項の結果を基に、ムラタイト基シンロックの化学組成の最適化について検討した。浸出試験の結果から M3 ムラタイトは Mn の浸出率が高いことが明らかとなったため、本項では Mn を含まないムラタイト基シンロックの合成を試みた。

4.2.1 項の実験手順に準拠し、市販の CaO , ZrO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CeO_2 および Gd_2O_3 粉末を化学組成が $\text{Ca}_{3.72}\text{Gd}_{0.42}\text{Zr}_{2.80}\text{Ce}_{0.32}\text{Ti}_{6.41}\text{Fe}_{9.10}\text{Al}_{4.63}\text{O}_{44}$ となるように秤量し、乳鉢を用いて混合した。また本項では、Gd は熱中性子吸収断面積が大きいことから、シンロックの潜在的な臨界リスクを低減するために Gd_2O_3 を添加した。混合粉末を 18.2 MPa で一軸加圧成型し、得られた成型体を電気炉を用いて 1300 °C で 6 h 焼成してムラタイト基シンロックを合成した。得られた試料について粉末 XRD 装置を用いて相同定を行った。

図 12 に Mn を含まないムラタイト基シンロックの XRD パターンを示す。相同定の結果、M3 ムラタイトが主要な構成相であり、中間生成物であるジルコノライト $[(\text{Ca}, \text{Zr}, \text{U})_2\text{Ti}_2\text{O}_7]$ および擬ブルッカイト $[(\text{Al}, \text{Fe})_2(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_5]$ 相に加え、ペロブスカイト $[(\text{Ca}, \text{Gd})(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Ce}, \text{Al})\text{O}_3]$ 相を含むことが分かった。興味深いことに、これまで M3 ムラタイト相を生成するには Mn は必須の元素と考えられてきたが、本研究では Mn フリーのムラタイト基シンロックの合成に成功した。先行研究ではムラタイト結晶中の電気的中性を保つために多様な価数をとることができる Mn ($\text{Mn}^{2+} \sim \text{Mn}^{7+}$) が必要と考えられてきたが、今回合成した M3 ムラタイトは Ti よりも Fe を豊富に含むチタン酸塩であるため、 $\text{Fe}^{2+, 3+}$ イオンが重要な役割を果たしたと考えられる。

Mn を含まないムラタイト基シンロックについて、静的浸出試験 MCC-1 法に準拠して浸出率を測定した。得られた試料の表面をアルミナ研磨紙 (~#1000) を用いて研磨した後、イオン交換水中で 5 min × 3 回、超純水中で 5 min およびエタノール中で 5 min 超音波洗浄を行った。恒温乾燥機を用いて試料の重量が一定となるまで 100°C で乾燥した後、PFA テフロン容器中で 90°C に保持した超純水に 3~30 日間浸漬した。3, 7, 14, 30 日経過した後、それぞれの容器から試料を取り出し、誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)を用いて浸出液に含まれる各元素の濃度を分析した。図 13 に ICP-MS の結果から算出した各元素の浸出率を示す。Zr, Fe, Gd および Ti はいずれも非常に低い浸出率を示し、Al および Ce は検出下限以下という結果になった。一方で、Ca は高い浸出率を示したが、Ca は地殻中に石灰石などの状態で豊富に含まれる元素であり環境に与える影響は非常に小さいものと考えられる。以上の結果から、Mn を含まない M3 ムラタイト基シンロックの合成に成功し、得られた試料は優れた耐浸出性を有することが明らかとなった。今後は最適化した化学組成を基にムラタイト基シンロックの合成を実施する予定である。

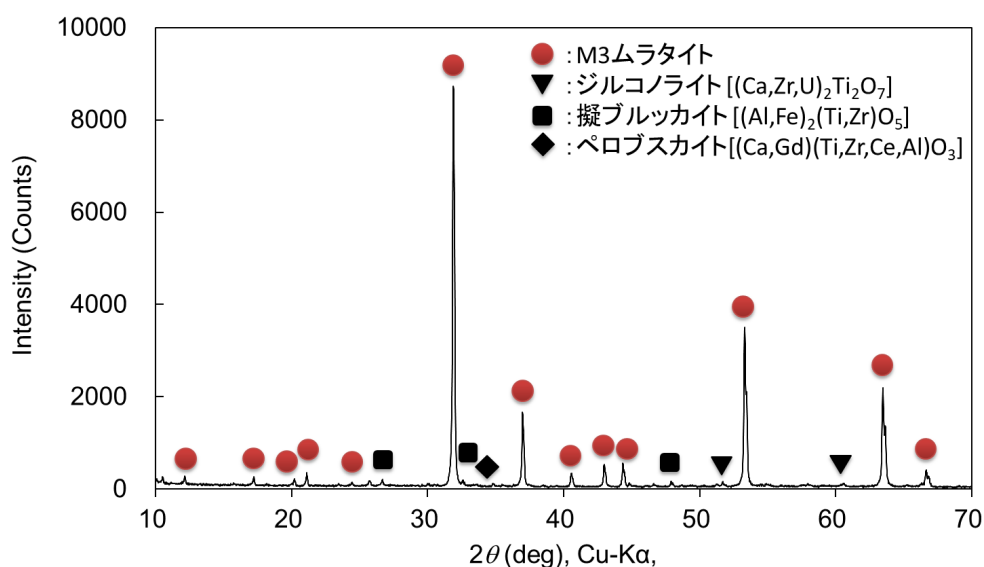


図 12 Mn を含まないムラタイト基シンロックの XRD パターン

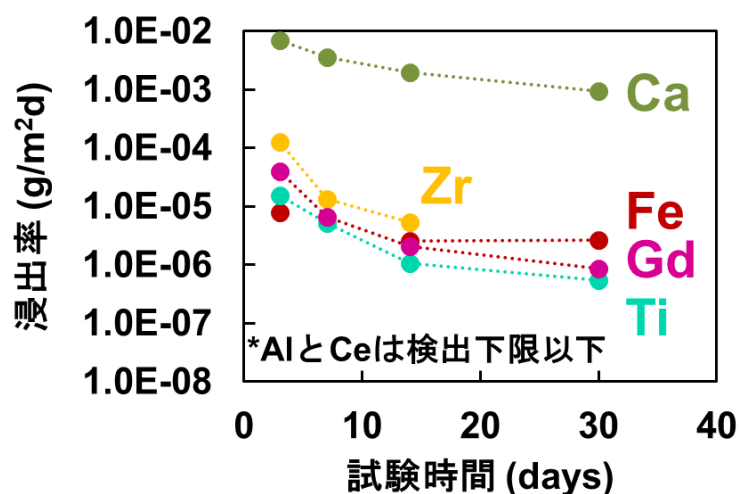


図 13 MCC-1 法に準拠して測定した Mn を含まないムラタイト基シンロックの浸出率

4.2.5 ムラタイト基シンロックの物性評価

合成したシンロックについて、化学的耐久性の評価だけに留まらず、機械的・熱的特性といった物性を評価することは固化体の長期的安定性を予測するうえで非常に重要である。そこで合成したムラタイト基シンロックの物性評価として、本項では熱的特性評価を行った。

4.2.1 項の実験手順に準拠し、市販の CaO 、 MnO_2 、 ZrO_2 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 を秤量し、乳鉢を用いて混合した。混合粉末を 18.2 MPa で一軸加圧成型し、得られた成型体を電気炉を用

いて 1300℃ で 6h 焼成してムラタイト基シンロックを合成した。得られた試料についてレーザーフラッシュ法により 25-720℃の温度域で熱拡散率および比熱容量を測定し、熱伝導率を算出した。図 14 に得られたムラタイト基シンロックの熱拡散率および熱伝導率を示す。熱拡散率は温度上昇に伴い低下したが、これはフォノン散乱によるものと考えられる。熱伝導率は 25℃から 720℃の温度域で大きな変化はなく、約 3.3 W/m·K であった。これは一般的なホウケイ酸ガラスの熱伝導率 1.2 W/m·K と比べて 3 倍ほど高い値である。今後は機械的特性の評価も実施し、地層処分シナリオにおけるシンロックの優位性および課題について検討を行う予定である。

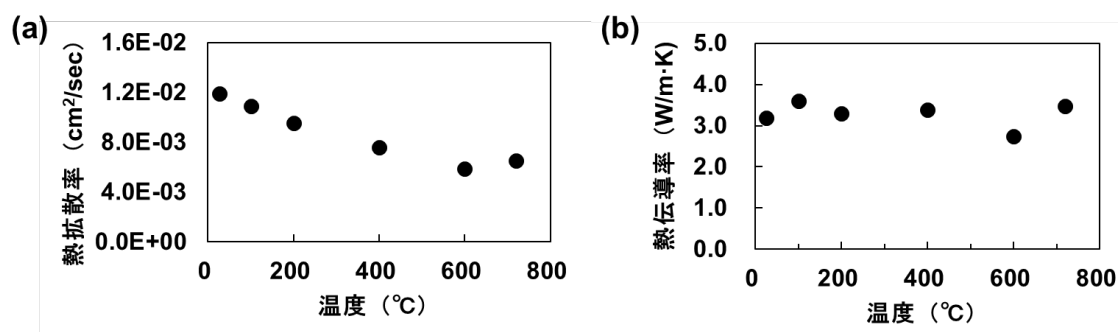


図 14 ムラタイト基シンロックの (a) 熱拡散率および (b) 熱伝導率

4.2.6 シンロックの低温合成技術の検討

一般にシンロックの合成には電気炉などを用いた高温での化学反応および焼結挙動を利用することになる。しかしながら、HLW には Cs などの揮発性核種も含まれており、シンロックの合成に必要な高温雰囲気下では核種がシンロックに固溶せずに揮発してしまう恐れがある。また、HLW には硝酸塩が多量に含まれているため、頑強なシンロック（いわゆる酸化物系セラミック固化体）を合成するためには事前に乾燥あるいは酸化処理が必要となる。例として硝酸セシウム (CsNO_3) の加熱に伴う熱分解挙動について熱重量示差熱分析装置 (TG-DTA) を用いて測定した結果を図 15 に示す。 CsNO_3 は 600℃を超えると急激な重量減少に伴い Cs_2O_2 に分解し、800℃を超えると大部分が揮発することが分かる。そのためシンロックが優れた固化体性能を有していても、1000℃以上を必要とするような固方法ではこのような揮発性核種の固化には不向きである。そこで本項では、硝酸塩の前処理が不要で、かつ低温でシンロックを合成可能な技術について新たに検討するため、下記の(1)～(3)の方法を用いてパイロクロア基シンロックの合成を試み、得られた試料について XRD を用いて

相同定を行った。

- (1) 市販の硝酸塩試薬を用いて、Self-propagating room temperature (SPRT) 法と呼ばれる反応技術を用いてシンロックを合成した。 $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Sm}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ および ZrCl_2 粉末を化学組成が $(\text{La}_{0.5}\text{Nd}_{0.5}\text{Gd}_{0.5}\text{Sm}_{0.5})\text{Zr}_2\text{O}_7$ となるように乳鉢を用いて混合した。混合粉末に対して 2:3 mol になるように水酸化ナトリウム (NaOH) を秤量し、先ほどの混合粉末に加えてさらに乳鉢で混合した。24 h 経過した後、得られた混合粉末を電気炉を用いて 600-900°C で 2 h 焼成してパイロクロア基シンロックを合成した。
- (2) 比較として、市販の硝酸塩試薬を用いて Modified glycine nitrate procedure (MGNP) 法と呼ばれる反応技術を用いてシンロックを合成した。 $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Sm}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ および ZrCl_2 粉末を化学組成が $(\text{La}_{0.5}\text{Nd}_{0.5}\text{Gd}_{0.5}\text{Sm}_{0.5})\text{Zr}_2\text{O}_7$ となるように秤量した。秤量した試薬中の金属成分に対して 1:1 mol になるようにグリシン ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) を秤量および添加し、すべての試薬をイオン交換水に溶かした後、ヒーターで乾燥した。得られた乾燥粉末を電気炉を用いて 600-1100°C で 2 h 焼成してパイロクロア基シンロックを合成した。
- (3) 比較として、市販の硝酸塩試薬と NaOH を反応させて酸化物にした後、酸化物の混合粉末を電気炉で加熱する従来の固相反応法によりシンロックを合成した。 $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Sm}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ および ZrCl_2 粉末にそれぞれ NaOH を加えて酸化物にした後、化学組成が $(\text{La}_{0.5}\text{Nd}_{0.5}\text{Gd}_{0.5}\text{Sm}_{0.5})\text{Zr}_2\text{O}_7$ となるように乳鉢を用いて混合した。得られた混合粉末を電気炉を用いて 900-1100°C で 2 h 焼成してパイロクロア基シンロックを合成した。

得られた試料について粉末 XRD 装置を用いて相同定を行った結果を図 16-18 に示す。SPRT 法により合成したシンロックは、驚くべきことに 600°C で焼成することで単相のパイロクロアが得られた。RT (室温) ではアモルファスだが、加熱に伴い結晶性が向上し、900°C まで加熱することで結晶性の良いパイロクロア基シンロックの合成に成功した。この合成方法を用いることで、Cs の揮発温度である 800°C まで加熱することなくシンロックに核種を固溶することが可能であり、硝酸塩から直接シンロックを合成することができる。

MGNP 法では、900°C まで加熱すると、結晶性は低いものの単相のパイロクロアが得られた。1100°C まで加熱することで結晶性の良いパイロクロア基シンロックの合成に成功した。

一方で、従来の固相反応法では、1100°C まで加熱しても反応は十分に進行しておらず、シ

ンロック中にはパイロクロア相ではない不純物相が多く含まれていた。

以上の結果から、従来の固相反応法に代わる固化方法として SPRT 法によるシンロックの合成技術を見出した。この技術を用いることで硝酸塩から直接シンロックを合成することができ、乾燥・酸化といった前処理が不要となるほか、 600°C という低温で核種を固溶させることが可能となる。本年度はシンプルな化学組成を有するパイロクロアについて検討したが、今後は様々な結晶相を対象として SPRT 法によるシンロックの合成を試みる予定である。

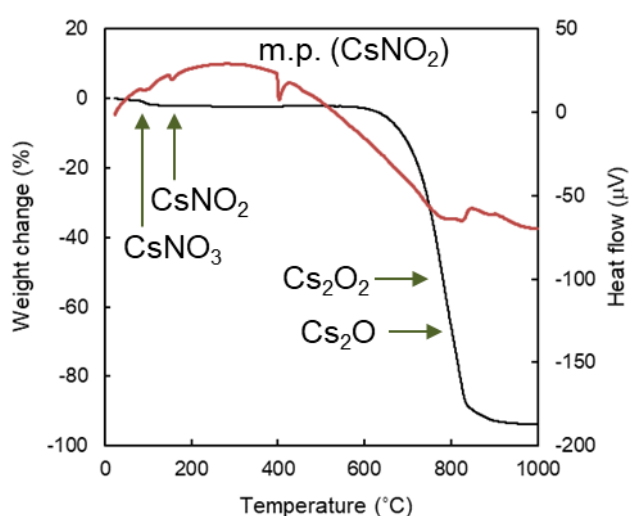


図 15 CsNO_3 の TG-DTA 測定結果

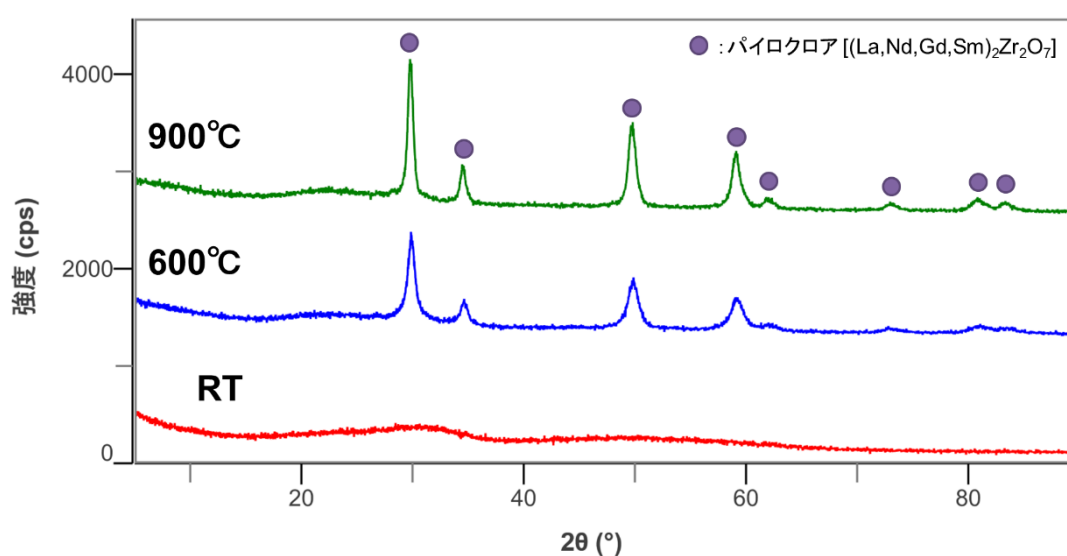


図 16 SPRT 法により合成したパイロクロア基シンロックの XRD パターン

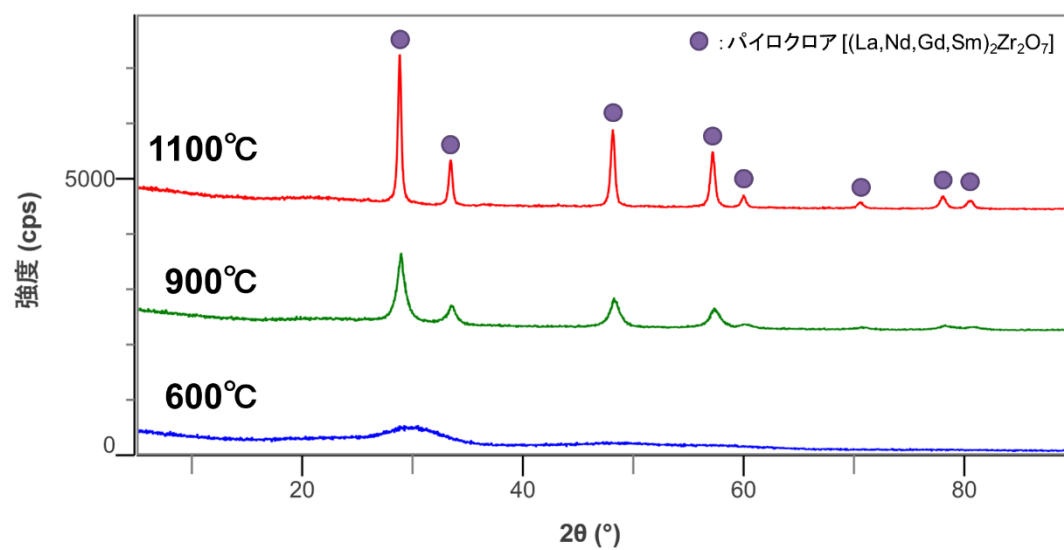


図 17 MGNP 法により合成したパイロクロア基シンロックの XRD パターン

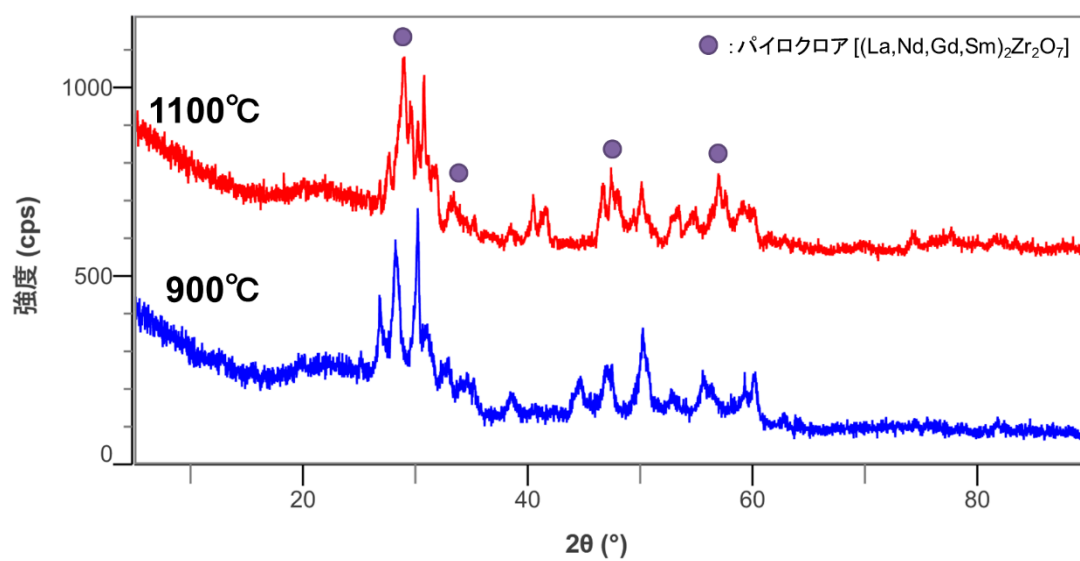


図 18 固相反応法により合成したパイロクロア基シンロックの XRD パターン

4.2.7 SPS を用いたパイロクロア基およびジルコノライト基シンロックの合成

前年度の結果を基に、 U^{4+} および TRU (Am^{3+} , $Cm^{3,4+}$ など)の模擬元素として Ce^{4+} および Eu^{3+} が固溶したパイロクロア基およびジルコノライト基シンロックを合成し、XRD を用いて相同定および詳細な結晶構造解析を行った。先行研究におけるシンロックの作製では、ホスト相への核種の固溶と緻密化を二段階の工程（煅焼および焼結）に分けており、SPS でシンロック合成と焼結を同時に行う研究例は稀有である。そこで本項および次項では、模擬元素の置換およびシンロックの緻密化を SPS の同一温度プログラム中に実施することで簡便かつ迅速なシンロック合成を試みた。

市販の CaO , ZrO_2 , TiO_2 , Y_2O_3 , CeO_2 および Eu_2O_3 を化学組成が $Y_{2-x}Ce_xTi_2O_7$ ($x=0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6$)および $Ca_{1-x}Zr_{1-x}Eu_xCe_xTi_2O_7$ ($x=0, 0.1, 0.2$)となるように秤量し、エタノールを加えてボールミルを用いて 24 h 混合した。恒温乾燥機で乾燥した後、混合粉末をグラファイト製のダイ（内径:10 mm, 外径:30 mm, 高さ:30 mm）に充填し、SPS を用いて 80 MPa、アルゴン（Ar）雰囲気下で 1200-1300 °C で焼成してパイロクロア基およびジルコノライト基シンロックを合成した。得られた試料について電子線マイクロアナライザ（EPMA）を用いた微細組織観察を行った。

鏡面研磨したパイロクロア基シンロック切断面中心部の二次電子像（SEI: Secondary Electron Image）および反射電子像（BEI: Back-scattered Electron Image）を図 19 に示す。BEI において黒色部は空孔に対応する。いずれの試料も緻密な組織を形成しているが、 $x=0.5$ および 0.6 では微細な空孔が増加した。 $x=0$ の BEI においてコントラストは見られず、生成相は単一組成であった。また、Ce を添加した試料では灰色の母相に加えて白色相が発生した。

鏡面研磨したジルコノライト基シンロック切断面中心部の SEI および BEI を図 20 に示す。BEI において黒色部は空孔に対応する。 $x=0, 0.1$ は緻密な組織を形成した。一方で、 $x=0.2$ では $1 \mu m$ を超える大きさの空孔が見られた。構成相は全ての試料において多相であり、 $x=0, 0.1$ はコントラストの異なる三相が主要な構成相であったが、 $x=0.2$ は他の 2 試料と比較して多くの組成が存在した。

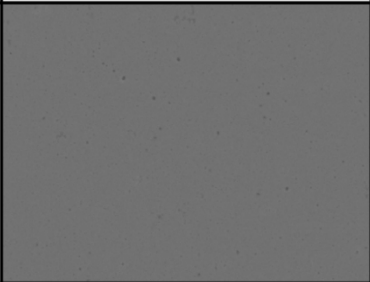
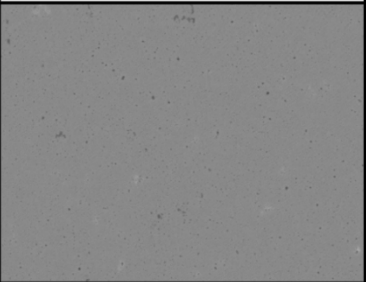
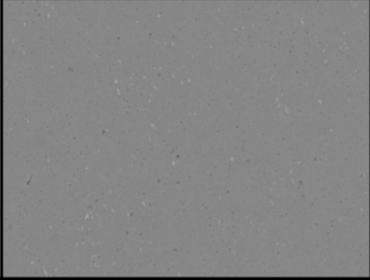
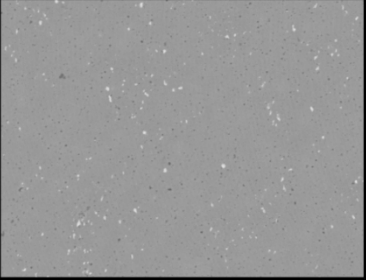
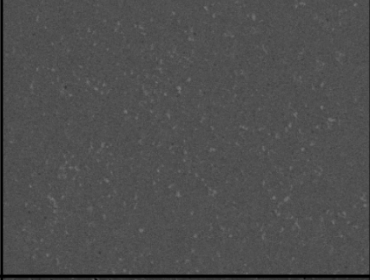
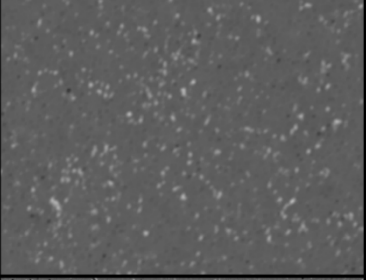
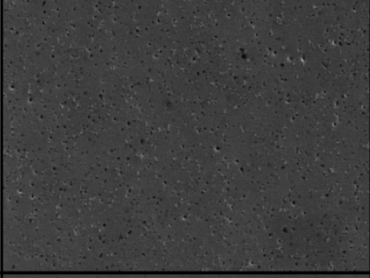
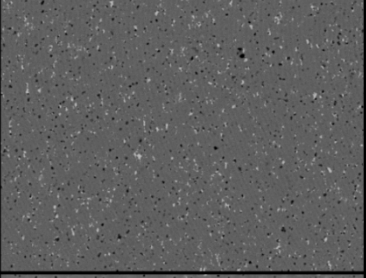
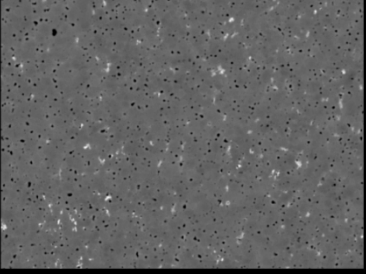
10 μm 	SEI	BEI
$x = 0$		
$x = 0.2$		
$x = 0.4$		
$x = 0.5$		
$x = 0.6$		

図 19 パイロクロア基シンロック切断面中心部の SEI および BEI

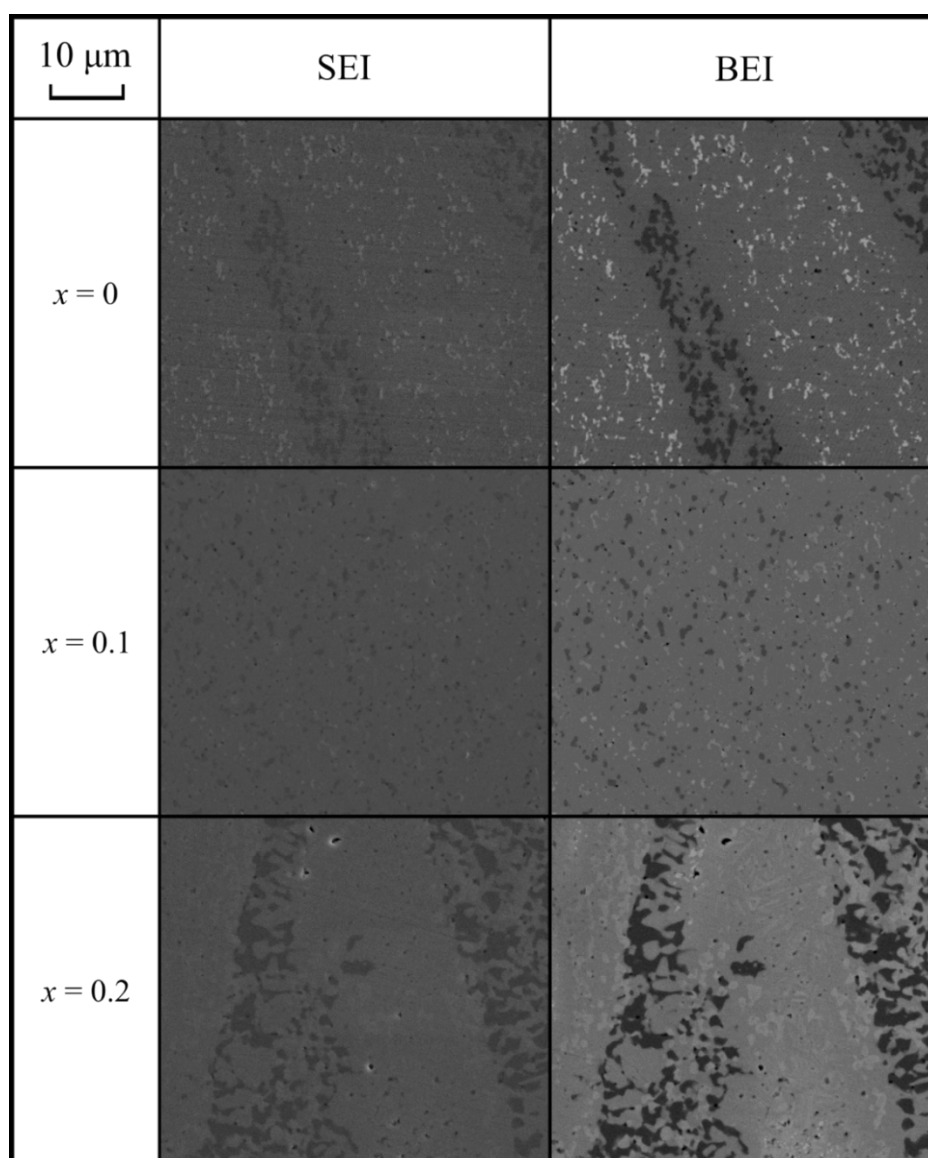


図 20 ジルコノライト基シンロック切断面中心部の SEI および BEI

4.2.8 SPS で合成したパイロクロア基およびジルコノライト基シンロックの密度評価

固化体の減容化における SPS の有用性を調査するため、従来の電気炉を用いて最高温度 1200°C および 1300°C で試料を作製し、前項で SPS を用いて合成したパイロクロア基およびジルコノライト基シンロックとの密度の比較を行った。電気炉を用いて作製した試料は、SPS と同様に 1 g の粉末を $\phi 10$ の型に充填して成型した後、型から成型体を取り出し、1200°C -1300°C の空气中で 2 h 焼成した。密度はマイクロメーターを用いた寸法法により測定した。

SPS および電気炉を用いて合成したパイロクロア基シンロックの密度を図 21 に示す。SPS を用いて合成した試料の密度は 1200°C と 1300°C で大きな差異は見られなかった。 $x=0$ では

理論密度より少し低い密度であったが、 $x=0.4$ までは Ce 量の増加に伴い密度は増加した。一方で、 $x=0.5, 0.6$ では $x=0.4$ の密度と比較して低い値であった。これは前項の微細組織観察で見られた空孔の増加が原因であると考えられる。SPS を用いて合成したシンロックの密度は、従来の電気炉を用いて作製した試料の密度を大きく上回っており、SPS を用いることで短時間での緻密化が可能であることが明らかになった。

SPS および電気炉を用いて合成したジルコノライト基シンロックの密度を図 22 に示す。SPS を用いて合成した試料の密度は 1200°C と 1300°C で大きな差異は見られなかった。 $x=0$ では理論密度より少し低い密度であったが Ce および Eu 量の増加に伴い密度は増加した。パイロクロア基シンロックと同様に、SPS を用いて合成したジルコノライト基シンロックの密度は、従来の電気炉を用いて作製した試料の密度を大きく上回っており、SPS を用いることで短時間での緻密化が可能であることが明らかになった。

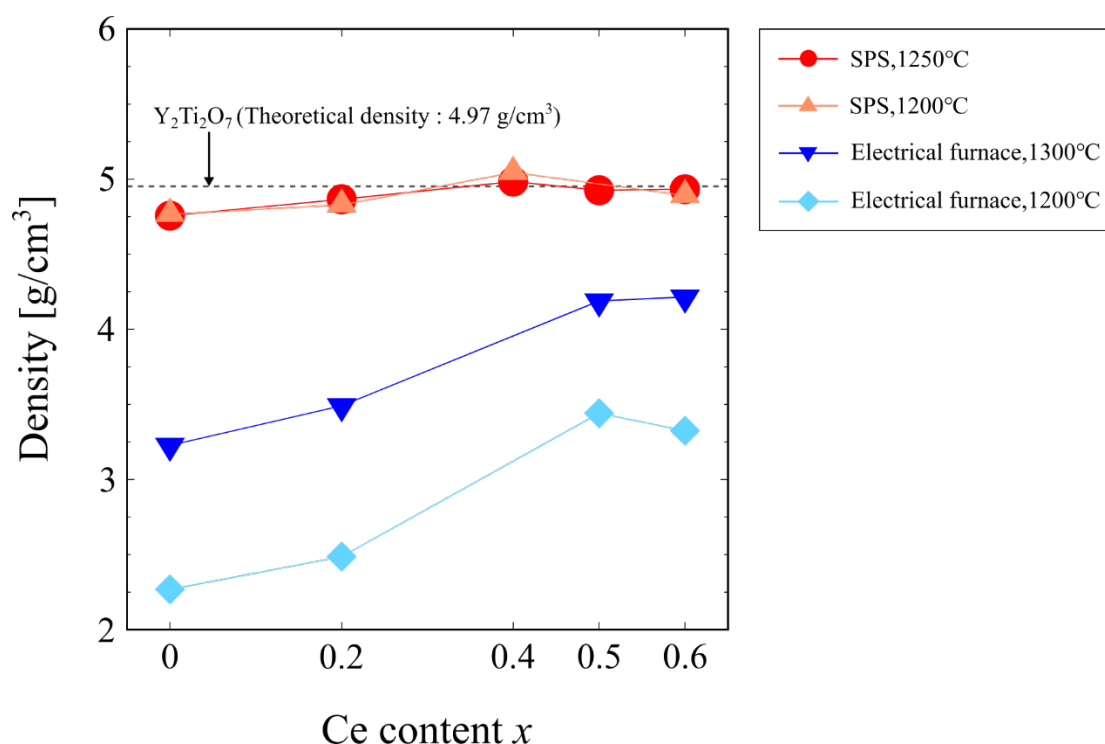


図 21 SPS および電気炉を用いて合成したパイロクロア基シンロックの密度

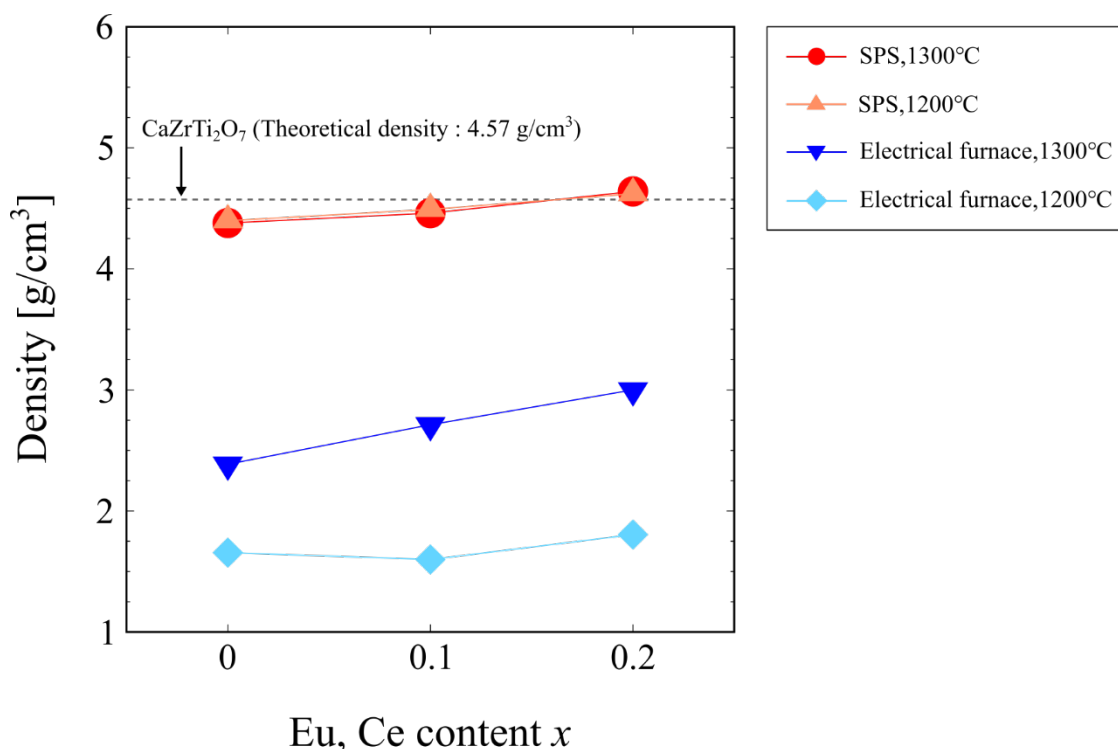


図 22 SPS および電気炉を用いて合成したジルコノライト基シンロックの密度

4.2.9 SPS で合成したパイロクロア基およびジルコノライト基シンロックの耐浸出性評価

4.2.7 項で SPS を用いて合成したパイロクロア基シンロックについて、 $x=0.2, 0.4, 0.6$ および $x=0.4$ の試料内部が浸出液と接触するように加工した試料を用い、超純水中における各試料の耐浸出性を評価した。浸出試験に用いた全ての試料は、SPS を用いて 1200°C で合成した。

浸出試験の結果を図 23 に、浸出試験の結果を基に算出した各元素の有効拡散係数、浸出指数および規格化浸出率を図 24 に示す。なお有効拡散係数および浸出指数は、全プロット範囲の線形回帰によって導出された傾きを用いて算出した。全試料の全元素で浸出指数 L は 6 を大きく上回っており、低レベル放射性廃棄物の固化体として有用であることが明らかになった。また、規格化浸出率は $x=0.6$ の試料が示した Ce における $1.6 \times 10^{-7} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{d}$ が最高値であった。高レベル放射性廃棄物の固化体として用いられるハウケイ酸ガラスにおいて、アクチノイド元素の規格化浸出率は $10^{-7} \sim 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{d}$ の範囲で多く報告されており、本実験における規格化浸出率は固化体として十分低い値であると考えられる。

$x=0.6$ を除く 3 試料において、有効拡散係数は Y と Ce が同程度であり、Ti は Y および Ce と比較して 1 桁から 2 桁低い値であった。一方で、 $x=0.6$ の有効拡散係数は、Ce が他の

試料と同程度であるのに対し、Y は Ce と比較して 2 桁低い値であった。Ti は検出濃度が検量線を下回っており、他の試料に比べて浸出率が低いと考えられる。 $x=0.4$ と $x=0.4$ (inside) を比較すると Ti の有効拡散係数は同程度であるが、Y と Ce は $x = 0.4$ (inside) の方が低い値であった。各元素に着目すると、Y と Ce は試料ごとに似通った浸出挙動である一方、Ti は全試料で 6 h を境に傾きが減少した。固化体の浸出において、初期は試料の付着物や試料表面の欠陥からの溶出が支配的であるのに対し、中期は試料内部から表面にかけての元素の拡散が支配的であり、時間経過によって遷移することが知られている。そのため、Ti における浸出挙動の変化は拡散を律速する浸出過程が変化したことに起因すると考えられる。

4.2.7 項で SPS を用いて合成したジルコノライト基シンロックについて、1200°C で焼結した $x=0.1, 0.2$ の試料の超純水中における耐浸出性を評価した。なお Ca は ICP-AES、その他の元素は ICP-MS を用いて濃度分析を行い、有効拡散係数および浸出指数は全プロット範囲の線形回帰によって導出された傾きを用いて算出した。浸出試験の結果を図 25 に、浸出試験の結果を基に算出した各元素の有効拡散係数、浸出指数および規格化浸出率を図 26 に示す。全試料の全元素で浸出指数 L は 6 を大きく上回っており、低レベル放射性廃棄物の固化体として有用であることが明らかになった。規格化浸出率は $x=0.2$ の試料が示した Eu における $7.7 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{d}$ が最高値であった。これは、ホウケイ酸ガラスによるアクチノイドの規格化浸出率 $10^{-7} \sim 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{d}$ の範囲内であり、 $x=0.1$ および 0.2 の規格化浸出率は十分低い値であると考えられる。 $x=0.1$ および 0.2 で Zr と Ce の有効拡散係数は同程度であり、Ca および Ti の検出濃度は $x=0.1$ において検量線を下回った。また、Eu の有効拡散係数は $x=0.1$ で $2.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2/\text{s}$ であるのに対し、 $x=0.2$ は $1.2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{s}$ であり、Eu の浸出率は大きく増加した。Ti を除く全元素の浸出挙動は、パイロクロア基シンロックにおける Ti の浸出挙動と同様に 6 h を境に傾きが減少した。

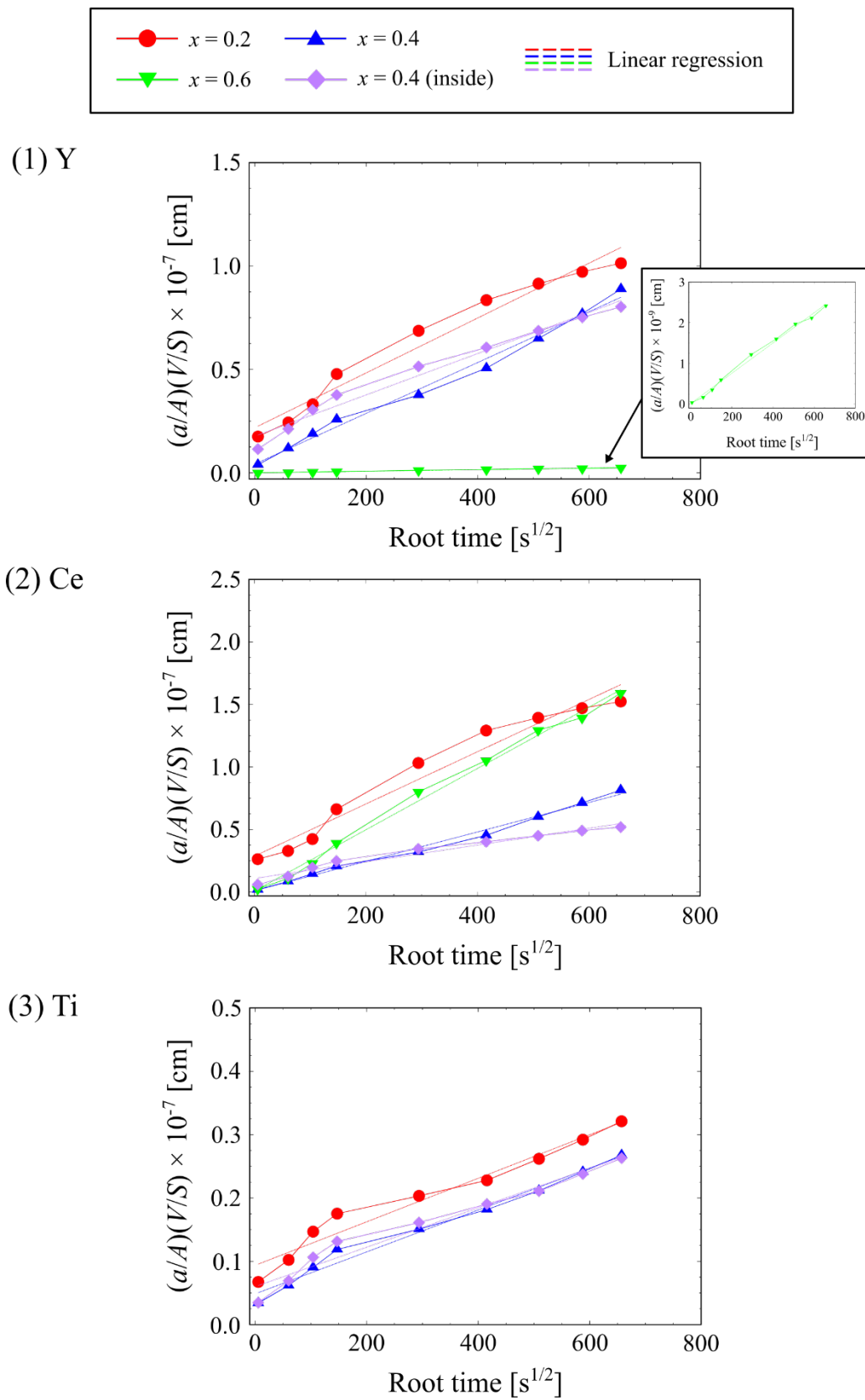


図 23 パイロクロア基シンロックの浸出試験結果

x	element	D [cm ² /s]	L	R [g/cm ² /day]
0.2	Y	1.4E-20	19.9	9.8E-08
	Ce	3.4E-20	19.5	1.5E-07
	Ti	9.3E-22	21.0	3.1E-08
0.4	Y	1.2E-20	19.9	8.5E-08
	Ce	1.1E-20	20.0	7.8E-08
	Ti	8.6E-22	21.1	2.6E-08
0.4 (inside)	Y	7.8E-21	20.1	7.6E-08
	Ce	3.5E-21	20.5	4.9E-08
	Ti	7.6E-22	21.1	2.5E-08
0.6	Y	1.1E-23	23.0	2.4E-09
	Ce	4.7E-20	19.3	1.6E-07
	Ti	—	—	—

図 24 パイロクロア基シンロックの有効拡散係数、浸出指数および規格化浸出率

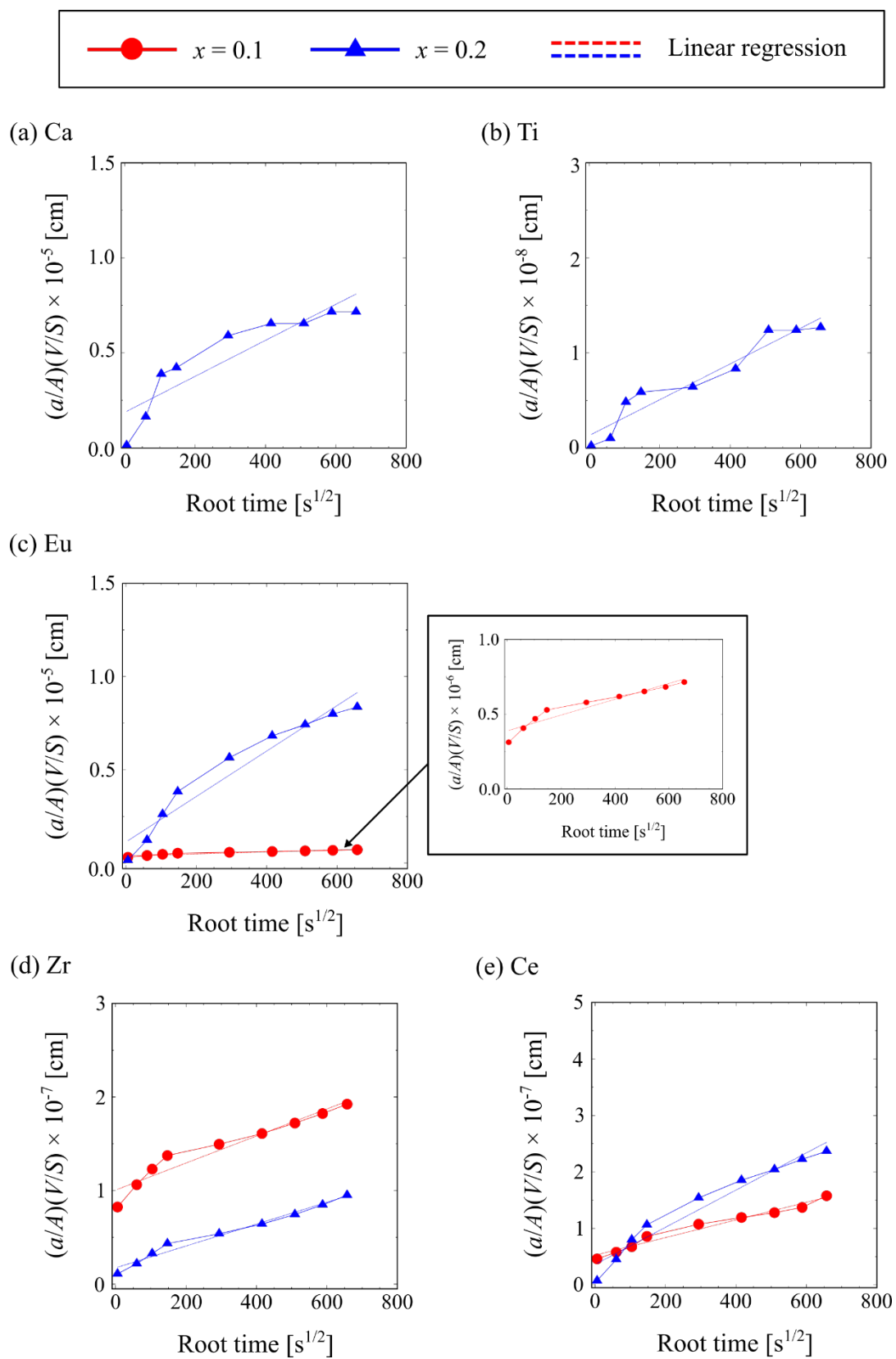


図 25 ジルコノライト基シンロックの浸出試験結果

x	element	D [cm ² /s]	L	R [g/cm ² /day]
0.1	Ca	—	—	—
	Zr	1.6E-20	19.8	1.7E-07
	Ce	1.9E-20	19.7	1.4E-07
	Eu	2.2E-19	18.7	6.4E-07
	Ti	—	—	—
0.2	Ca	7.0E-17	16.2	6.6E-06
	Zr	1.1E-20	20.0	8.8E-08
	Ce	8.5E-20	19.1	2.2E-07
	Eu	1.2E-16	15.9	7.7E-06
	Ti	2.8E-22	21.6	1.2E-08

図 26 ジルコノライト基シンロックの有効拡散係数、浸出指数および規格化浸出率

5. まとめ

本研究では、使用済燃料の再処理施設から発生する高レベル放射性廃液を含め、特に潜在的有害度が高く長期的な発熱源かつ α 核種であるマイナーアクチノイドを含めた **An** に注目し、多様な放射性核種の超長期安定固化に向けた次世代型シンロック固化技術の開発を目的とした。本年度は、昨年度の成果を基に模擬 **An** を含有するムラタイト基、パイロクロア基およびジルコノライト基シンロックを合成し、詳細な結晶構造解析に加え、顕微的手法による微構造評価を実施した。また、ウランを固溶したシンロックの静的浸出試験を行い、種々の元素の耐浸出性を評価した。SPS を用いたシンロックの合成では、模擬元素の置換およびシンロック固化体の緻密化を同一温度プログラム中に実施することで簡便かつ迅速なシンロック合成を試みた。SPS を用いて合成したシンロックの密度は、従来の電気炉を用いて作製した試料の密度を大きく上回っており、SPS を用いることで短時間での緻密化が可能であることが明らかになった。また、Cs のような揮発性核種をシンロックに固化する技術として、従来の固相反応法に代わる固化方法として SPRT 法によるシンロック合成技術を新たに見出した。この技術を用いることで硝酸塩から直接シンロックを合成することができ、乾燥・酸化といった前処理が不要となるほか、600℃という低温で核種を固溶させることが可能となる。本年度は化学組成がシンプルなパイロクロアを SPRT 法により合成したが、今後は様々な結晶相を対象として HLW の低温固化に向けたシンロックの合成技術について検討する予定である。また、合成したシンロックについて詳細な物性評価を進め、化学的安定性に加えて機械的および熱的特性の観点からもより高度なシンロック固化技術の開発を目指す。浸出試験に関しては超純水だけでなく多様な環境を想定した耐浸出性評価を実施し、微構造との関係性について深く言及していく予定である。

参考文献

- (1) 古屋廣高、高レベル放射性廃棄物固化体研究の現状、*日本原子力学会誌*、**29** [5], 400-405 (1987).
- (2) U.S. DOE: DOE/TIC-11612, (1982).
- (3) Z. Wang, C. Zhu, H. Wang, M. Wang, C. Liu, D. Yang, and Y. Li, Preparation and irradiation stability of $A_2B_2O_7$ pyrochlore high-entropy ceramic for immobilization of high-level nuclear waste, *Journal of Nuclear Materials*, **574**, 154212 (2023).
- (4) A. I. Orlova and M. I. Ojovan, Ceramic mineral waste-forms for nuclear waste immobilization, *Materials*, **12** [16], 2638-2682, (2019).
- (5) N. P. Laverov, S. V. Yudintsev, S. V. Stefanovskii, B. I. Omel'yanenko, and B. S. Nikonov, Murataite matrices for actinide wastes, *Radiochemistry*, **53** [3], 229-243 (2011).
- (6) J. W. Adams, T. Botinelly, W. N. Sharp, and K. Robinson, Murataite, a new complex oxide from El Paso County, Colorado, *Am. Mineral.*, **59** [1-2], 172-176 (1974).
- (7) T. S. Ercit and F. C. Hawthorne, Murataite, a UB 12 derivative structure with condensed Keggin molecules, *Can. Mineral.*, **33** [1], 1223-1229 (1995).

2024 年度 外部発表

【学術論文】

1. R. Maki, S. Matsumura, T. Maeda, H. Taira, and Y. Kusano, Synthesis and crystal structure of monophasic Al_3BC_3 , *Taikabutsu* **76** (2024) 1-5.
2. M. Nakase, R. Maki, S. Maruyama, T. Sakuragi, S. Tanaka, M. Harigai, H. Asano, T. Kobayashi, H. Kikunaga, Progress in development of decommissioning technology in TEPCO collaborative research cluster for decontamination and decommissioning frontier technology creation (8) Development of rapid solidification technology for 1F waste using advanced sintering methods, *Proceedings of FDR2024* (2024) 1058.

【特許出願】

1. 牧涼介・中瀬正彦・丸山恵史・白崎謙次・秋山大輔・櫻木智史 (2024) 燃料デブリの固化方法および固化体. 特許願 23T178.

【口頭発表】

1. M. Nakase, R. Maki, S. Maruyama, T. Sakuragi, S. Tanaka, M. Harigai, H. Asano, T. Kobayashi, H. Kikunaga, Progress in development of decommissioning technology in TEPCO collaborative research cluster for decontamination and decommissioning frontier technology creation (8) Development of rapid solidification technology for 1F waste using advanced sintering methods, International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research, Oct. 11-13 (2024), Fukushima, Japan.

【受賞】

1. FDR2024 Selected Paper

M. Nakase, R. Maki, S. Maruyama, T. Sakuragi, S. Tanaka, M. Harigai, H. Asano, T. Kobayashi, H. Kikunaga, Progress in development of decommissioning technology in TEPCO collaborative research cluster for decontamination and decommissioning frontier technology creation (8) Development of rapid solidification technology for 1F waste using advanced sintering methods, *Proceedings of FDR2024* (2024) 1058.

研究報告 6

分散型台帳技術と機械学習を用いた先進的地層処 分場設計スキームの構築

東京科学大学 科学技術創成研究院

岡村 知拓

【目次】

1. 背景・目的	1
2. 全体研究計画（3 ヶ年における全体計画）	4
3. 2024 年度研究実施内容	6
3.1 2024 年度の計画、実施方法	6
3.1.1 高レベル放射性廃棄物発生シナリオの解析	6
3.1.2 廃棄物データベースの設計と構築	6
3.1.3 地層処分場の伝熱解析モデルの構築	6
3.2 2024 年度の成果内容	7
3.2.1 高レベル放射性廃棄物発生シナリオの解析	7
3.2.2 廃棄物データベースの設計と構築	25
3.2.3 地層処分場の伝熱解析モデルの構築	30
4. まとめ	34

参考文献

2023 年度外部発表

1. 背景・目的

持続可能な社会の構築に向け、世界的に安定的かつクリーンなエネルギーの供給と、社会全体にわたる脱炭素化が求められている。我が国においても、「2050年カーボンニュートラル」の達成に向けた動きが加速しており、その一環として、脱炭素化と経済成長の両立を目指す経済社会構造の変革を進めるグリーントランスフォーメーション基本方針（GX基本方針）が、閣議において決定された（2023年2月）。この方針の下、原子力発電はCO₂を排出しない安定的な電源として位置づけられている。また、第7次エネルギー基本計画[1]では、原子力発電の最大限活用の方針が示されており、原子炉の再稼動をはじめ、核燃料サイクルの推進、次世代革新炉へのリプレースが計画されている。その結果として、我が国では中長期にわたり原子力発電の利用が継続される見通しであり、プルサーマル発電や次世代革新炉の運用により、従来とは異なるインベントリの高レベル放射性廃棄物の発生が予測されている。

我が国の高レベル放射性廃棄物の地層処分事業の実施主体である原子力環境整備機構（NUMO）の現在の計画によると、六カ所再処理工場および海外委託分等から発生するガラス固化体約4万体の地層処分が計画となっている[2]。しかし、上述の通り中長期的に原子力発電を継続し、プルサーマル発電の推進や次世代革新炉へのリプレースがされた際の高レベル放射性廃棄物のインベントリの多様化、その影響については未だ研究段階にある。

また、NUMOが想定しているガラス固化体の標準的な仕様に基づくインベントリも変化が出てきている。例えば、六カ所再処理工場の保安規定の改定によって、使用済燃料の冷却期間は4年以上から15年以上に変更されている[3]。また、燃焼度においても低燃焼度～比較的高燃焼度のものが生じるなど、ガラス固化体の発生シナリオには幅がある。このようなガラス固化体の発生シナリオの差異は固化体中の核種組成に作用し、物量、発熱量、放射能量等のインベントリに変化を及ぼすことが報告されている[4-6]。そのため、より精度が高いインベントリ解析が必要である。さらに、核燃料サイクル上流の条件が変化し、ガラス固化体の発生シナリオが多様化したとしても、柔軟に対応可能な地層処分システムを検討する必要がある。

近年、人工知能（AI）を中心にデジタル技術が加速度的に進歩している。このデジタル技術の進展速度を鑑みると、多様な核燃料サイクルの条件が複雑に絡み合った高レベル放射性廃棄物発生シナリオをより精緻かつ、迅速に地層処分システムに反映させるためにはデジタル技術を

用いた問題解決が必要不可欠である。それ以外にも、デジタル技術を地層処分に導入することで、評価の精緻化や視野の拡大による工学技術の信頼性向上・コスト低減の効果が期待できる。更には、今後処分地の地質環境が明らかになった際に地層処分側から核燃料サイクル側への技術オプションの提示が可能になる。デジタル技術を活用し、廃棄物発生シナリオの多様化に対応した地層処分システムを構築する際の課題を以下に記す。

- 今後発生する発生シナリオ及び、そこで生じる高レベル放射性廃棄物の特性にどの程度振れ幅が生じるのか明らかにされていない。
- ガラス固化体のインベントリの多様性を地層処分システムの設計に反映するためには、実廃棄物の素性に関わるデータベースが必要である。しかし、そのデータベースには原子炉の運転履歴や再処理履歴などの機微情報が含まれることから、このようなデータを如何に共有・管理していくか検討が必要である。
- デジタル技術とガラス固化体のインベントリの多様性を考慮した地層処分システムの設計手法の開発が必要である。

そこで、本研究では、処分場設計の中でも専有面積に大きく影響を与える処分場の熱解析を対象として、シナリオ研究とデジタル技術を起点にした先進的な設計スキームの構築を行う。具体的には、上述の課題に対して以下の3項目を実施し、最終目標を遂行する。

1. 今後発生するガラス固化体の発生シナリオ及び、そのインベントリにどの程度振れ幅が生じるか動的な核燃料サイクルシミュレータを用いて明らかにする。
2. 非改竄性・冗長性に優れたデータ管理手法として注目されている分散型台帳技術、ブロックチェーン技術に着目し、実廃棄物の素性に関わるデータベースを共有・管理する手法を開発する。また、項目1の結果を基にガラス固化体のデータベースの実証を行う。
3. 大規模な処分場伝熱解析モデルを作成し、項目2のガラス固化体データベースと機械学習を組合せて、発熱特性が異なる廃棄体の専有面積が最小となる配置設計スキームの開発・検証を実施する。

本研究の遂行によって、得られる地層処分事業への波及効果は以下が想定される。

- 将来発生するガラス固化体の予測精度の改善：今後発生が想定されるガラス固化体の発生シナリオをより精緻に解析することで、ガラス固化体の多様なインベントリを定量的に明らかにすることができる。これにより、地層処分場の設計や研究に用いられているインベントリデータの精度向上・不確実性の低減に貢献する。

- 実用的な廃棄物データベースを実証：将来の地層処分事業・研究を見据えた拡張性を重視したガラス固化体データベースを実証する。多様な研究開発や事業への活用を可能とし、更には、地層処分におけるナレッジマネジメントに貢献するデータ管理法の選択肢を提示することが可能。
- 地層処分研究の新たな方向性の提示：本研究は、これまでの地層処分研究とは異なり、ガラス固化体データの生成から、データ管理、データ活用までを一気通貫で実施するデータ・デジタル技術を起点としたアプローチを採用している。地層処分研究の新たな研究開発要素を開拓する。

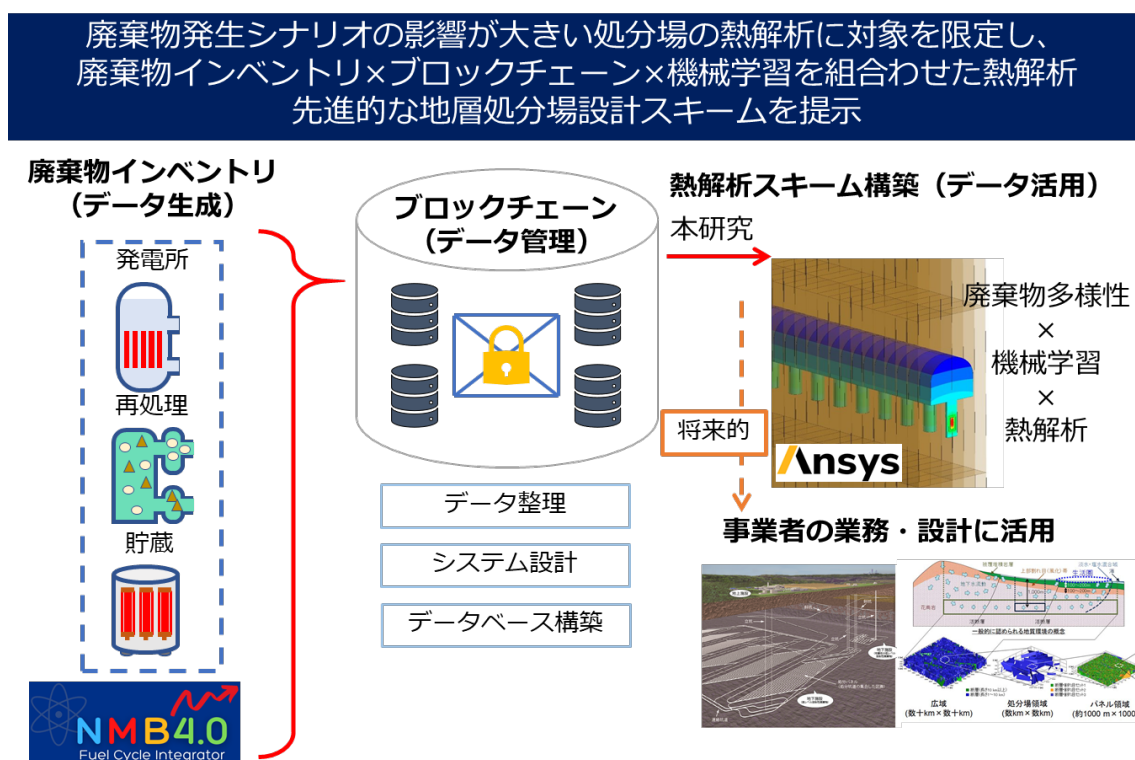


図 1-1 本研究の全体像

2. 全体研究計画（3 カ年における全体計画）

本業務の全体計画を図 2-1 に示す。3 つの研究項目を実施して、最終目標を遂行する。研究項目 1「高レベル放射性廃棄物発生シナリオの解析」では、六ヶ所再処理工場の運転シナリオと高速炉シナリオから生じる廃棄物インベントリの評価を実施する。研究項目 2「廃棄物データベースの設計と構築」では、ブロックチェーン技術の調査を実施し、ブロックチェーンを用いた廃棄物データベースの設計を実施する。また、研究項目 1 の高レベル放射性廃棄物インベントリデータを基に、廃棄物データベースを構築する。研究項目 3「処分場の熱解析モデルの構築」では、地層処分場の大規模過渡伝熱モデルを構築し、発熱特性の異なる廃棄体の最適な配置を求める解析スキームを開発する。

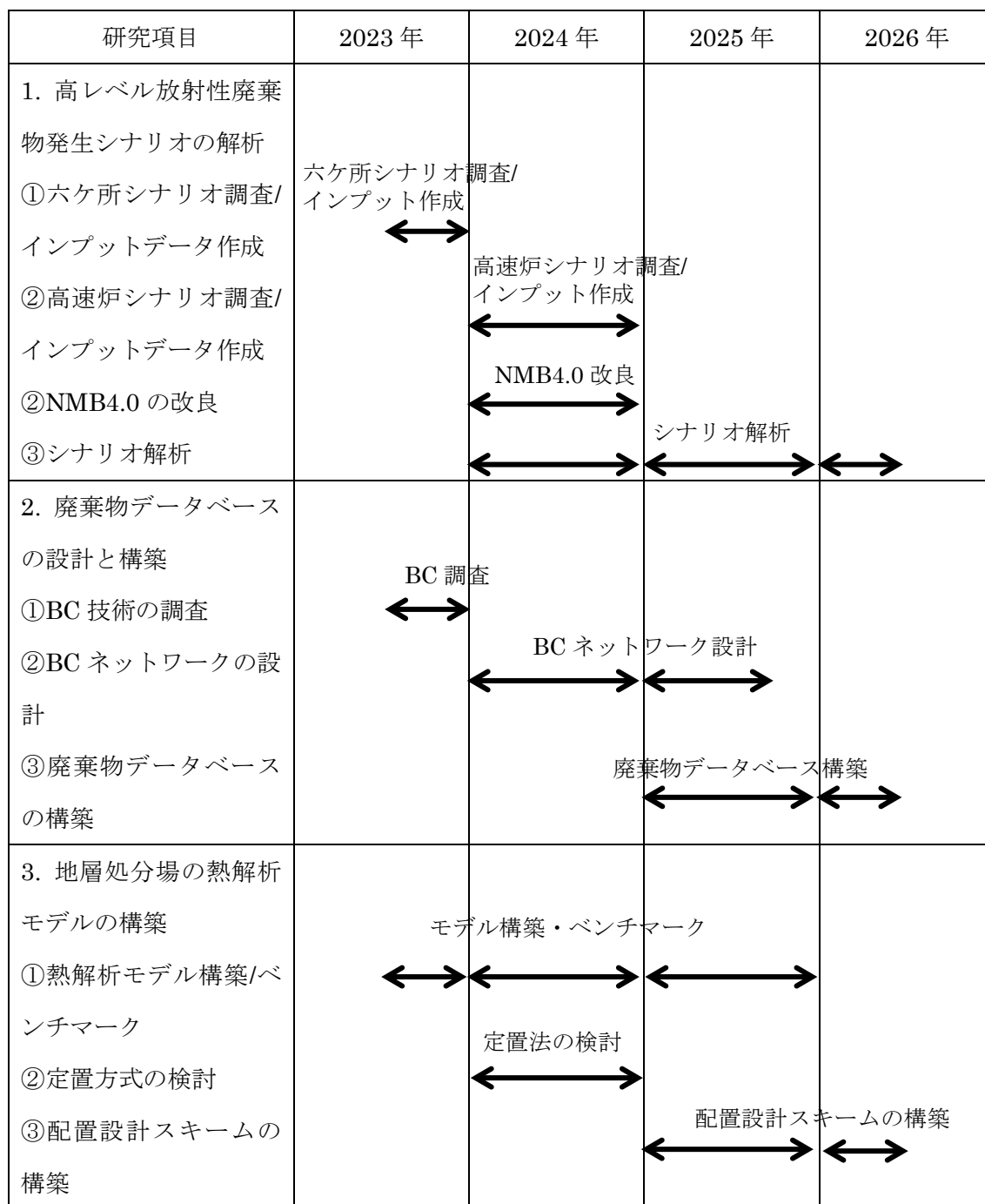


図 2-1 全体計画

3. 2024 年度研究実施内容

3.1 2024 年度の計画、実施方法

2024 年度の計画の概要を以下に示す。

3.1.1 高レベル放射性廃棄物発生シナリオの解析

① 六ヶ所再処理工場運転シナリオの解析

令和 5 年度に設定した六ヶ所再処理工場からの廃棄物発生シナリオの評価を実施する。

② 高速炉シナリオのインプットデータ作成

高速炉実用化された際の原子力発電シナリオを調査し、廃棄物発生シナリオを設定する。

3.1.2 廃棄物データベースの設計と構築

② システム要件の整理・ブロックチェーンネットワークの設計

令和 5 年度に選定したブロックチェーン基盤を用いて、廃棄物データベース構築の為の要件整理とブロックチェーンネットワークの設計を行う。

3.1.3 地層処分場の伝熱解析モデルの構築

① 伝熱解析モデル構築/ベンチマーク

令和 5 年度に作成した処分場の大規模過渡伝熱解析モデルの改善と複数の発熱特性の異なる廃棄体埋設を仮定した際の熱解析を実施する。

3.2 2024 年度の成果内容

3.2.1 高レベル放射性廃棄物発生シナリオの解析

3.2.1.1 六ヶ所再処理工場運転シナリオの解析

昨年度六ヶ所再処理工場運転時に想定されるガラス固化体発生シナリオを解析するために、そのシナリオの設定条件を調査し、NMB4[7]のインプットデータを作成した。今年度はそのインプットデータを用いて諸量評価を実施した。

(1) 解析条件

a. 原子炉設定

本検討で仮定した炉型とその燃焼条件を表 3-1 に示す。核データは NMB4 用に改良した ORLIBJ40[8]を用いた。既設の原子力発電所の運転条件を表 3-2 に示す。東京電力福島第一原子力発電所事故以降に運転を行わず、廃炉になった原子炉は 2011 年に運転終了とした。現在建設が進んでいる中国電力島根 3 号機は 2030 年と電源開発の大間原発は 2030 年に運転開始を仮定した。現状廃炉になっていない全ての原子炉は運転期間を 60 年に設定した。

軽水炉の設備利用率の推移を図 3-1 に示す。2023 年までの値については、原子力産業協会が毎年公開している「日本の原子力発電所の運転実績」[9]を参照した。2024 年以降は 2030 年に設備利用率 75%を達成することを想定した。また、図 3-2 に仮定した通常の軽水炉に MOX 燃料を装荷する際の装荷量の上限値を示す。これは、「プルトニウム利用計画」（電気事業連合会）[10]を参考に設定し、2050 年以降は通常の軽水炉における上限である BWR 炉心で 3 分の 1、PWR 炉心で 4 分の 1 に MOX 燃料が装荷されることを想定した。大間原発はフル MOX 炉心とした。MOX 燃料の富化度の上限は、13wt%[11]とした。

表 3-1 炉型・燃料条件の仮定

炉型	燃料	熱効率	設備利用率 (最大)	燃焼度 GWd/tHM	比出力 MW/tHM
低燃焼度 PWR	UO ₂ /MOX	34%	75%	33	37.5
中燃焼度 PWR	UO ₂ /MOX	34%	75%	45	37.5
高燃焼度 PWR	UO ₂ /MOX	34%	75%	50	37.5
低燃焼度 BWR	UO ₂ /MOX	34%	75%	33	37.5
中燃焼度 BWR	UO ₂ /MOX	34%	75%	45	37.5
高燃焼度 BWR	UO ₂ /MOX	34%	75%	55	37.5

表 3-2 各原子炉の設定

設置	発電所	号機	炉型	出力(万 kW)	運転開始	運転終了
日本原電	東海	1	GCR	16.6	1966	1998
日本原電	敦賀	1	BWR	35.7	1970	2011
関西電力	美浜	1	PWR	34	1970	2011
東京電力	福島第一	1	BWR	46	1971	2011
関西電力	美浜	2	PWR	50	1972	2011
中国電力	島根	1	BWR	46	1974	2011
東京電力	福島第一	2	BWR	78.4	1974	2011
関西電力	高浜	1	PWR	82.6	1974	1905
九州電力	玄海	1	PWR	55.9	1975	2011
関西電力	高浜	2	PWR	82.6	1975	2035
中部電力	浜岡	1	BWR	54	1976	2009
東京電力	福島第一	3	BWR	78.4	1976	2011
関西電力	美浜	3	PWR	82.6	1976	2036
四国電力	伊方	1	PWR	56.6	1977	2011
東京電力	福島第一	5	BWR	78.4	1978	2011
東京電力	福島第一	4	BWR	78.4	1978	2011
日本原電	東海	2	BWR	110	1978	2038
中部電力	浜岡	2	BWR	84	1978	2009
関西電力	大飯	1	PWR	117.5	1979	2011
東京電力	福島第一	6	BWR	110	1979	2011
関西電力	大飯	2	PWR	117.5	1979	2011
九州電力	玄海	2	PWR	55.9	1981	2011
四国電力	伊方	2	PWR	56.6	1982	2011
東京電力	福島第二	1	BWR	110	1982	2011
東京電力	福島第二	2	BWR	110	1984	2011
東北電力	女川	1	BWR	52.4	1984	2011
九州電力	川内	1	PWR	89	1984	2044
関西電力	高浜	3	PWR	87	1985	2045
関西電力	高浜	4	PWR	87	1985	2045
東京電力	福島第二	3	BWR	110	1985	2011
東京電力	柏崎刈羽	1	BWR	110	1985	2045
九州電力	川内	2	PWR	89	1985	2045
日本原電	敦賀	2	PWR	116	1987	2047
東京電力	福島第二	4	BWR	110	1987	2011
中部電力	浜岡	3	BWR	110	1987	2047
中国電力	島根	2	BWR	82	1989	2049
北海道電力	泊	1	PWR	57.9	1989	2049
東京電力	柏崎刈羽	5	BWR	110	1990	2050
東京電力	柏崎刈羽	2	BWR	110	1990	2050
北海道電力	泊	2	PWR	57.9	1991	2051
関西電力	大飯	3	PWR	118	1991	2051
関西電力	大飯	4	PWR	118	1993	2053
北陸電力	志賀	1	BWR	54	1993	2053

東京電力	柏崎刈羽	3	BWR	110	1993	2053
中部電力	浜岡	4	BWR	113.7	1993	2053
九州電力	玄海	3	PWR	118	1994	2054
東京電力	柏崎刈羽	4	BWR	110	1994	2054
四国電力	伊方	3	PWR	89	1994	2054
東北電力	女川	2	BWR	82.5	1995	2055
東京電力	柏崎刈羽	6	ABWR	135.6	1996	2056
東京電力	柏崎刈羽	7	ABWR	135.6	1997	2057
九州電力	玄海	4	PWR	118	1997	2057
東北電力	女川	3	BWR	82.5	2002	2062
中部電力	浜岡	5	ABWR	126.7	2005	2065
東北電力	東通	1	BWR	110	2005	2065
北陸電力	志賀	2	ABWR	120.6	2006	2066
北海道電力	泊	3	PWR	91.2	2009	2069
中国電力	島根	3	ABWR	137.3	2030	2090
電源開発	大間		ABWR	138.3	2030	2090

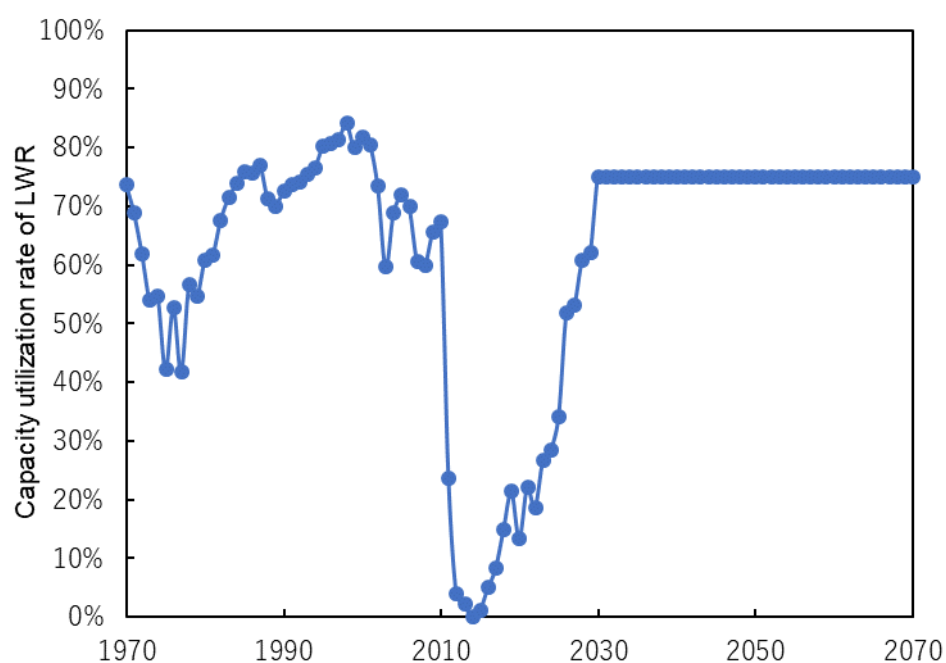


図 3-1 設備利用率の推移

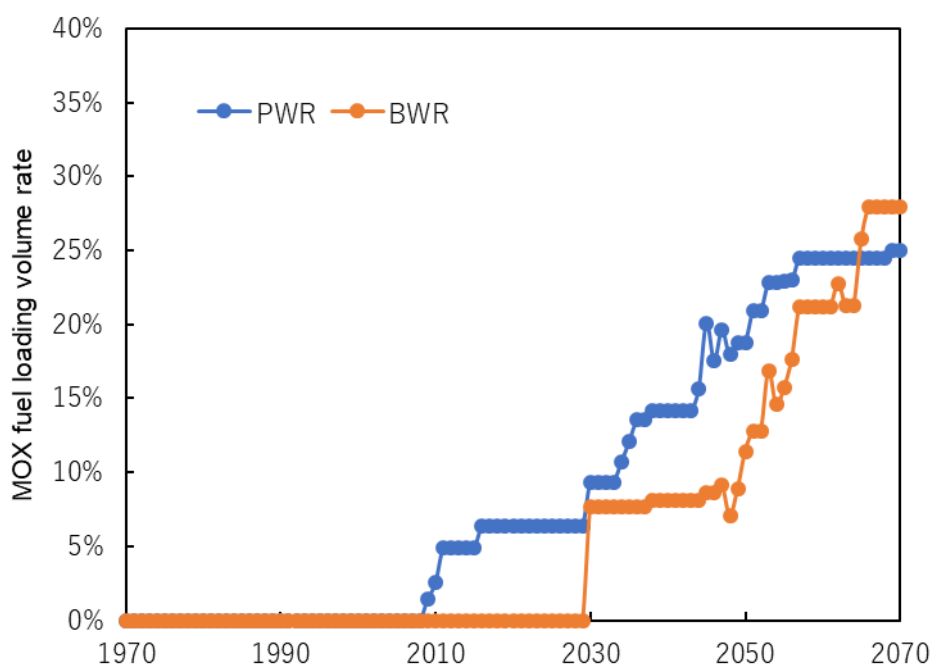


図 3-2 プルサーマル発電における MOX 燃料装荷量の推移

b. 再処理設定

六ヶ所再処理工場で再処理される使用済燃料を想定するために、各再処理で処理された、または、処理される使用済燃料の年次展開の仮定を表 3-3 に示す。東海再処理工場の運転条件は文献[12]を参考にした。海外委託分は、文献[13]と文献[14]を参考に適当な年代に振り分けた。六ヶ所再処理工場の運転は文献[15]を参考にし、NUMO の想定と処理量を合わせるために運転期間 44 年間に 32000tHM の処理を仮定した。再処理量は、運転計画に基づき 1 年目 70tHM、2 年目 170tHM、3 年目 70tHM とした。それ以降については 2030 年に最大再処理量 800tHM に達することを想定し、2029 年までに合計 800tHM を再処理すると仮定した。東海再処理と海外委託分の再処理は、使用済燃料冷却期間 4 年以上で再処理し、六ヶ所再処理工場以降は 15 年以上とした。包括的技術報告書と同様に U と Pu の回収率は 99.558%と 99.452%とした。また、ヨウ素と希ガスは 100%回収されるものとし、残りは高レベル放射性廃棄物としてガラス固化することを仮定した。

c. ガラス固化体と地層処分設定

ガラス固化体と地層処分の設定を記載する。今回のシナリオ解析では、ガラス固化される高レベル放射性廃液の核種インベントリの変動を考慮している。そのため、ガラス固化体中

に含有される高レベル放射性液量は変動するものと仮定し、以下のいずれかの条件によって決まるものとした。

1. ガラス固化体中に含有できる高レベル放射性廃液重量%の上限：35wt%（Na 成分 10wt%を含む）
2. 発熱量の上限：2.3kW
3. 地層処分した際の緩衝材温度の上限：100℃

ガラス固化体の貯蔵期期間は 50 年を仮定した。地層処分場は硬岩系の 1000m 以深の地層に設置されることを仮定した。

表 3-3 各再処理での年次展開

	東海再処理	海外委託(LWR)	海外委託(GCR)	六ヶ所再処理
1977	26.4			
1978	26.4			
1979	26.4			
1980	6			
1981	53			
1982	33.4			
1983	1.9			
1984	5.2			
1985	73.5			
1986	69.2			
1987	51.4			
1988	19			
1989	49.1			
1990	85.9	600	400	
1991	81.7	600		
1992	71	600		
1993	37	600		
1994	95.7	600		
1995	51.4	600	400	
1996	71.5	600		
1997		600		
1998		600		
1999		200		
2000	14.3		400	
2001	33.7			
2002	25			

2003	28.4			
2004	37.2			
2005	42.1		300	
2006	20.3			
2007	3.1			
2008-2024				
2025				70
2026				170
2027				70
2028				190
2029				300
2030-2068				800
Total	1139.1	5600	1500	32000

(単位：tHM)

d. 包括的技術報告書における基本ケース

包括的技術報告書では、標準的なガラス固化体の条件を設定している（表 3-4）。これらの値を用いて ORIGEN[11]を用いてガラス固化体のインベントリを評価している。

表 3-4 標準的なガラス固化体の算出条件

項目	値
炉型	PWR
燃焼度	45,000MWd/tHM
初期濃縮度	4.5wt%
比出力	38MW/tHM
再処理までの冷却期間	4 年
再処理から固化までの冷却期間	0
固化体発生量	1.25 本/tHM
再処理量	32,000tHM

(2) 解析結果

a. ガラス固化体インベントリ

六ヶ所再処理工場運転シナリオで生じるガラス固化体インベントリ、特に本研究と関連する発熱特性にどの程度の差異があるのか評価を行った。表 3-5 に NMB を

用いて計算した六ヶ所再処理工場で 32000tHM 使用済燃料を再処理した際に生じる高レベル廃液をガラス固化した際の平均核種組成を示す。この組成がどの程度包括的技術報告書で設定された標準的なガラス固化体と異なるのかを調べるために表 3-6 に包括的技術報告書と本研究で算出されたガラス固化体に含まれる主要発熱核種のインベントリを示す。本研究での解析結果は包括的技術報告書の値に比べて Am-241 が多く、Sr-90 と Cs-137 が少ないことが明らかとなった。この原因としては、使用済燃料冷却期間が関係していると考えられる。

図 3-3 に六ヶ所再処理工場で再処理される使用済燃料の冷却期間とその重量の関係を示す。再処理される使用済燃料の多くは現行六ヶ所再処理工場の運転条件である 15 年よりも長期間冷却された燃料が再処理されることとなる。再処理される使用済燃料 32,000tHM の内、約 58% が 40 年以上となっている。使用済燃料の重量で重みづけした平均冷却期間は 36.8 年であった。包括的技術報告書の条件である 4 年と現行の 15 年と比較して、20～30 年長く冷却された使用済燃料が再処理されることになる。使用済燃料冷却期間が長期化した場合、Sr-90 と Cs-137 が崩壊する一方で、Pu-241 の崩壊に伴って生じる Am-241 のガラス固化体中の量が増加するため、表 3-6 の結果となった。その結果、図 3-4 に示す通り包括的技術報告書に示された標準的なガラス固化体の発熱量が変化し、本研究の平均的なガラス固化体の発熱量は処分後初期には低いものの、50 年以降は高い値で推移する形となる。

表 3-5 六ヶ所再処理工場運転シナリオで生じるガラス固化体の平均核種組成

核種	組成 [-]	核種	組成 [-]	核種	組成 [-]	核種	組成 [-]
Th232	1.46E-07	Zr90	0.015035	Sn117	0.000122	Ce144	1.12E-13
Pa231	1.05E-08	Zr91	0.0179	Sn118	0.000104	Pr141	0.033552
Pa233	5.24E-10	Zr92	0.019501	Sn119	0.000108	Pr143	5.58E-15
U232	7.17E-11	Zr93	0.021419	Sn119m	6.64E-19	Nd142	0.000695
U233	2.33E-07	Zr94	0.023012	Sn120	0.000108	Nd143	0.022739
U234	3.83E-05	Zr95	1.08E-14	Sn121m	2.76E-06	Nd144	0.040981
U235	0.000998	Zr96	0.024189	Sn122	0.000154	Nd145	0.020061
U236	0.000514	Nb93m	2.1E-07	Sn124	0.000233	Nd146	0.02117

U237	9.16E-14	Nb94	3.26E-08	Sn126	0.00054	Nd147	2.23E-15
U238	0.099754	Nb95	5.9E-15	Sb121	0.000108	Nd148	0.010971
Np237	0.015209	Mo94	3.13E-07	Sb123	0.000137	Nd150	0.005271
Np238	4.7E-12	Mo95	0.022737	Sb125	1.02E-12	Pm146	7.16E-12
Np239	2.54E-09	Mo96	0.001246	Sb126	1.29E-11	Pm147	1.05E-11
Pu238	2.19E-05	Mo97	0.024255	Te125	0.00031	Pm148	2.03E-21
Pu239	0.000712	Mo98	0.024473	Te125m	2.16E-14	Pm148m	3.53E-20
Pu240	0.000579	Mo99	1.08E-15	Te126	2.53E-05	Sm147	0.008083
Pu241	2.89E-06	Mo100	0.028845	Te127m	2.89E-16	Sm148	0.004423
Pu242	8.44E-05	Tc99	0.023688	Te128	0.002623	Sm149	5E-05
Am241	0.024262	Ru100	0.002995	Te130	0.011219	Sm150	0.008103
Am242m	2.28E-05	Ru101	0.023336	Te132	1.31E-15	Sm151	0.000144
Am243	0.0029	Ru102	0.023597	I127	7.06E-13	Sm152	0.00298
Cm242	5.97E-08	Ru103	2.71E-14	I129	2.29E-12	Sm154	0.001003
Cm243	1.77E-06	Ru104	0.016228	I131	2.42E-15	Eu150	3.44E-12
Cm244	4.36E-05	Ru106	2.84E-13	Xe128	1.35E-18	Eu151	0.00014
Cm245	6.5E-05	Rh102	2.7E-23	Xe130	2.94E-15	Eu152	6.18E-09
Cm246	6.73E-06	Rh103	0.013482	Xe131	1.09E-11	Eu153	0.003413
H3	1.48E-14	Rh105	1.32E-15	Xe132	1.52E-11	Eu154	8.82E-07
Se78	6.51E-05	Pd104	0.007107	Xe133	2.95E-15	Eu155	2.45E-09
Se79	0.00013	Pd105	0.011516	Xe134	2.86E-11	Eu156	3.04E-16
Se80	0.000391	Pd106	0.010328	Xe135	2.79E-16	Gd154	0.000792
Se82	0.000998	Pd107	0.006205	Xe136	2.72E-11	Gd155	0.000227
Br81	0.000593	Pd108	0.004132	Cs133	0.03331	Gd156	0.002614
Kr83	4.13E-13	Pd110	0.00134	Cs134	5.91E-14	Gd157	2.25E-06
Kr84	4.15E-13	Ag109	0.002167	Cs135	0.015681	Gd158	0.000477
Kr85	3.55E-14	Ag110m	5.39E-18	Cs137	0.004835	Gd160	2.97E-05
Kr86	7.25E-13	Cd109	5.75E-23	Ba133	3.15E-11	Tb158	8.68E-10
Rb85	0.003707	Cd110	0.001001	Ba134	0.005619	Tb159	6.78E-05

Rb87	0.007479	Cd111	0.000636	Ba136	0.000723	Tb160	3.4E-19
Sr86	1.76E-05	Cd112	0.000305	Ba137	0.032928	Dy160	7.31E-06
Sr88	0.010246	Cd113	2.56E-06	Ba138	0.039095	Dy161	9.23E-06
Sr89	3.55E-15	Cd113m	5.13E-08	Ba140	7.77E-15	Dy162	7.55E-06
Sr90	0.001969	Cd114	0.000359	La139	0.036569	Ho166m	2.79E-10
Y89	0.013743	Cd116	0.000134	Ce140	0.036626	Tm171	7.87E-18
Y90	5E-07	In115	4.19E-05	Ce141	1.81E-14	FP	0.001248
Y91	4.79E-15	Sn116	7.67E-05	Ce142	0.033712		

表 3-6 主要発熱核種のインベントリ比較 (kg/本)

	包括的技術報告書	本研究
Am241	0.27	1.17
Sr90	0.16	0.0953
Cs137	0.39	0.234

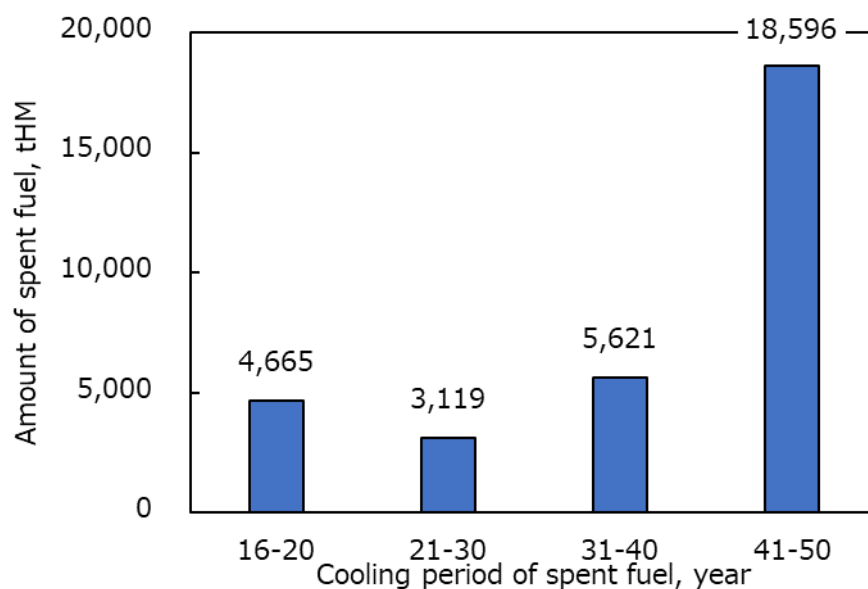


図 3-3 六ヶ所再処理工場で再処理される使用済燃料の冷却期間と重量

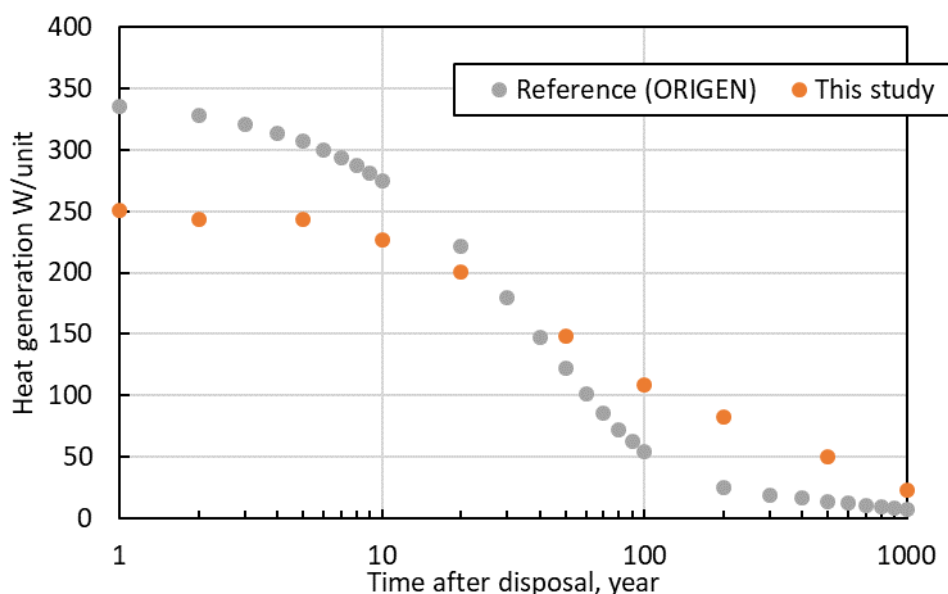


図 3-4 包括的技術報告書の条件と本研究のガラス固化体発熱量の推移

b. ガラス固化体発生本数・処分場面積

次に上述のガラス固化体のインベントリを考慮してガラス固化体数と処分場面積について評価を行う。今回は横置き PEM 方式の時に、NMB4 の機能を用いてガラス固化体中の廃棄物含有率もしくは、廃棄体専有面積のどちらかを変動させて、(1) c. に基づいてガラス固化体発生本数と処分場面積を算出することとした。以下に今回評価したシナリオを示す。

- ✧ P0：ガラス固化体中の廃棄物含有率と廃棄体専有面積を、六ヶ所再処理工場でのガラス固化製造目標値[2]である 22.1wt%と 43.82 m²で固定
- ✧ P1（専有面積を最適化）：ガラス固化体中の廃棄物含有率を 22.1wt%に固定し、廃棄体専有面積を横置き PEM 方式の処分坑道の力学的安定性の観点から決まる最小値 30.048m²以上で変化
- ✧ P2（廃棄物含有率を最適化）：廃棄体専有面積を横置き PEM 方式の処分坑道の力学的安定性の観点から決まる最小値 30.048m²に固定し、ガラス固化体中の廃棄物含有率を 11～35wt%で変化

図 3-5 と図 3-6 に各シナリオでのガラス固化体発生本数と処分場面積（廃棄体数と各廃棄体の専有面積の積）を示す。また、P1 の専有面積を変動させた際のガラス固化体数と専有面積の関係を図 3-7、P2 のガラス固化体含有率を変動させた際のガラ

ス固化体数と廃棄物含有率の関係を図 3-8 に示す。ガラス固化体発生本数は P0 と P1 が 32,229 本、P2 が 38,592 本となり、P2 は、P0 と P1 に比べて約 5,300 本多くなる結果となった。一方で、処分場面積は P0～P2 でそれぞれ 1.42km²、1.21km²、1.16km² となり、P0 と比較して、専有面積を最適化した P1 では約 15%減、廃棄物含有率を最適化した P2 では約 18%減となった。

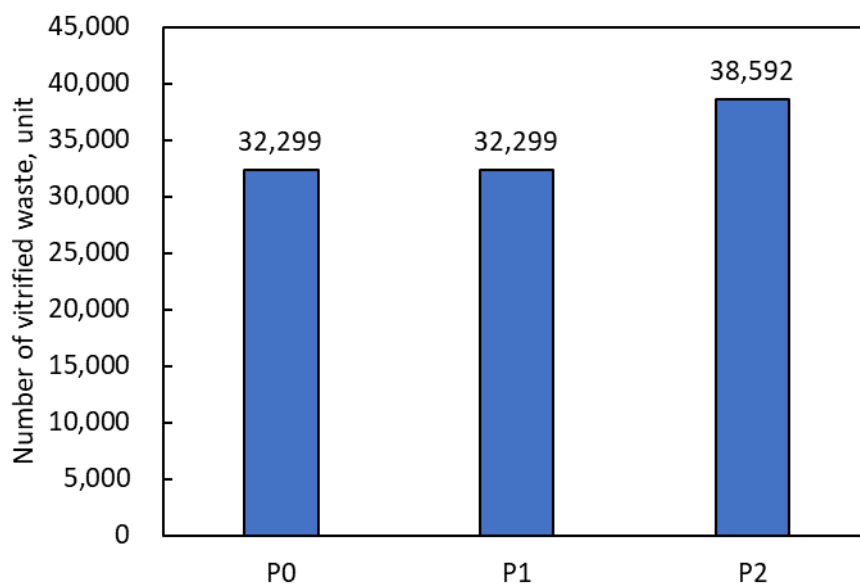


図 3-5 ガラス固化体発生量

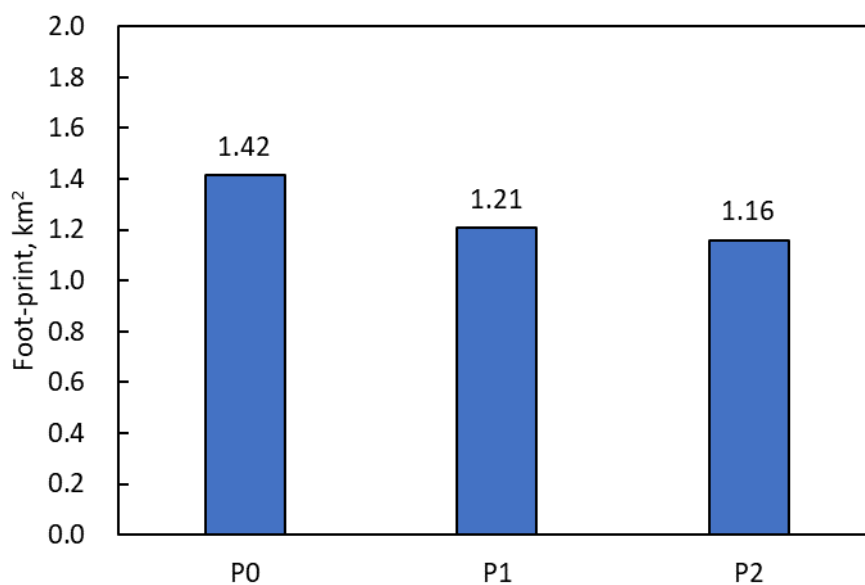


図 3-6 処分場面積

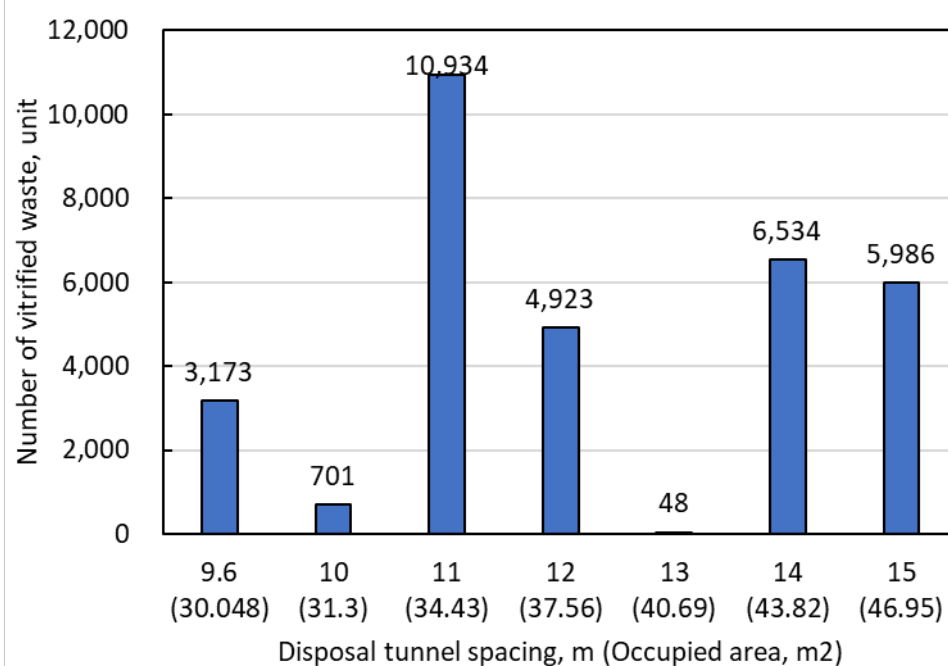


図 3-7 ガラス固体数と専有面積の関係

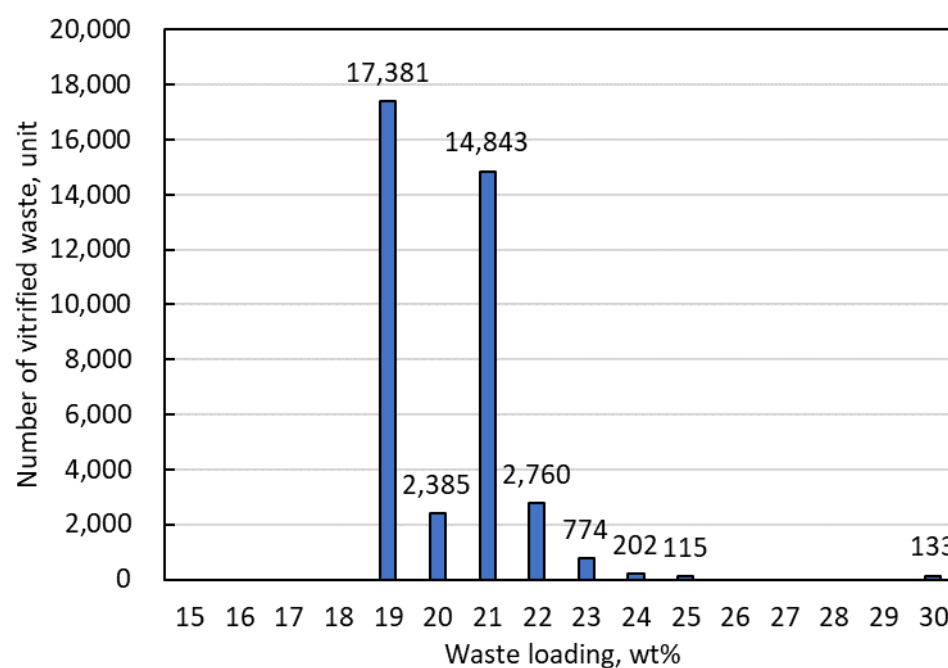


図 3-8 ガラス固化体数と廃棄物含有率の関係

3.2.1.2 高速炉導入シナリオの条件整理・インプットデータ作成

高速炉の実証炉開発が進められており、我が国では 21 世紀中盤に実証炉を導入される計画である。3.2.1.1 で評価した六ヶ所再処理工場の運転後の次世代再処理工場では必然的に MOX 燃料の再処理が行われることが想定される。その中で、次世代再処理工場で MOX 燃料を再処理した際の高レベル放射性廃棄物のインベントリを理解する必要がある。そこで、2069 年以降に次世代再処理が稼働することを想定し、そこから生じる高レベル廃棄物の特性を NMB4 で分析を行う。そのための条件を整理し、そのインプットデータを作成した。

(1) 解析条件

a. 原子力発電量の設定

資源エネルギー庁が公開した「2040 年度におけるエネルギー需給の見通し（関連資料）」[17]によると 2040 年度の電力需要は 0.9～1.1 兆 kWh 程度、総発電電力量は 1.1～1.2 兆 kWh 程度を見込んでいる。第 7 次エネルギー基本計画[1]によると、2040 年度における電源構成に占める原子力発電の割合は 20%程度を見込んでおり、原子力発電が 2,200 億 kWh～2,400 億 kWh を担うことになっている。この発電量における原子力発電容量は設備利用率を 75%と仮定すると、発電容量は 33.5GWe～36.5GWe となる。そのため本研究では、2030 年以降の原子力発電容量は 35 ± 1 GW であると仮定した。

b. 原子炉の設定

原子炉の新設は、原子炉寿命が 60 年を迎えたものから順次リプレースすることを仮定した。2065 年までは軽水炉でリプレースを行い、高速炉は 2045 年に 60 万 kW の高速炉実証炉を導入し、その後 2065 年以降のリプレースで商業炉を順次導入していくことを仮定した。リプレースで導入する原子炉の発電容量は 90 万 kW と 120 万 kW の 2 種類とした。高速炉は FaCT プロジェクト[18]で提案された酸化物燃料炉心（FBR 多重リサイクル TRU 燃料）を設定した。

c. 再処理の設定

2069 年からの 40 年間再処理、MOX 燃料の処理量は 100tHM、年間処理量の全体は 800tHM とした。その他、ガラス固化、地層処分条件は六ヶ所シナリオと同じとした。これらの条件を踏まえて、NMB4 のインプットデータを作成した。

3.2.1.3 諸量評価の不確かさの考え方と対応

(1) 諸量評価の不確かさ、検証と妥当性確認の考え方

諸量評価とは、核燃料サイクルを構成する多様なプロセスを数学的モデルで表現し、これらを組み合わせたうえで各プロセスの運転シナリオを入力し、特定時点における諸量を算出する方法である。一方、この評価には、数学的モデル自体に内在する不確かさや、入力として与えるシナリオの不確かさなど、さまざまな要因による誤差が含まれる。評価委員会のコメントにおいても、諸量評価コードにおける品質保証や評価検証の重要性と、その明確化の必要性が指摘された。そこで日本原子力学会「原子力将来シナリオの諸量評価技術研究専門委員会」での議論ならびに西原らの研究[19]を参考に、諸量評価に内在する不確かさ、および検証と妥当性確認（V&V: Verification & Validation）の考え方と、その対応例をまとめる。

まず、諸量評価の不確かさについて概説する。評価対象はウラン資源、各施設規模、燃料供給量、使用済燃料の貯蔵量、核燃料物質量、放射性廃棄物量、発電単価など多岐にわたり、それぞれに多くの不確かさを伴う。不確かさの要因としては、将来予測の困難さに由来するものと、各工程をモデル化する際に生じるものが挙げられる。図 3-9 に示すように、これらの不確かさは複合的に絡み合っており、その影響を的確に把握するための検討が重要である。以下では、諸量評価における代表的な不確かさの具体例と、それに対応する評価手法の例を示す。

✧ 偶発的不確かさ

例：将来シナリオの変動、偶発的イベント（事故や外乱など）、将来技術の設計パラメータなど

- 対応する評価方法例：代表的なシナリオを設定し、想定される偶発的イベントを組み込んだロバスト性解析を実施

✧ 認識された不確かさ

例：各工程をモデル化する際の近似、入力値（炉心・燃料設計、再処理・処分設計など）の近似など

- 対応する評価方法例：各工程における誤差の評価（検証）、代表シナリオに基づく誤差伝搬解析、妥当性確認における再検証

✧ 認識されない不確かさ

例：概念モデル作成時の誤り、ユーザーによる誤った使用など

➤ 対応する評価方法例：代表シナリオを用いた複数コードのベンチマーク比較

日本原子力学会が公開しているシミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン：2015 (AESJ-SC-A008 : 2015) [20]には、シミュレーションの信頼性確保のための基本的な考え方として以下が示されている。

シミュレーションの信頼性確保のための基本的な考え方は、原子力分野で実施されるシミュレーションの対象をモデル化して計算機プログラムに落とし込み、一方で実験を実施するか又は実験データを用意して、計算と実験との比較を実施してその差異を定量化して同プログラムの予測性能の合否を判定し、予測計算を実施できる一連の適切な仕組みにより達成できる。

本ガイドラインで示されたモデル V&V の手順の概略を図 3-10 に示す。諸量評価の場合も同様に、検証 (Verification) ではシミュレーション結果と真値、またはより精度の高いモデルによる参照解との差異を評価し、妥当性確認 (Validation) では実測データ、または参照解と諸量評価結果 (部分的または全体的) との比較を行うことで、その妥当性を判断ことが必要となる。

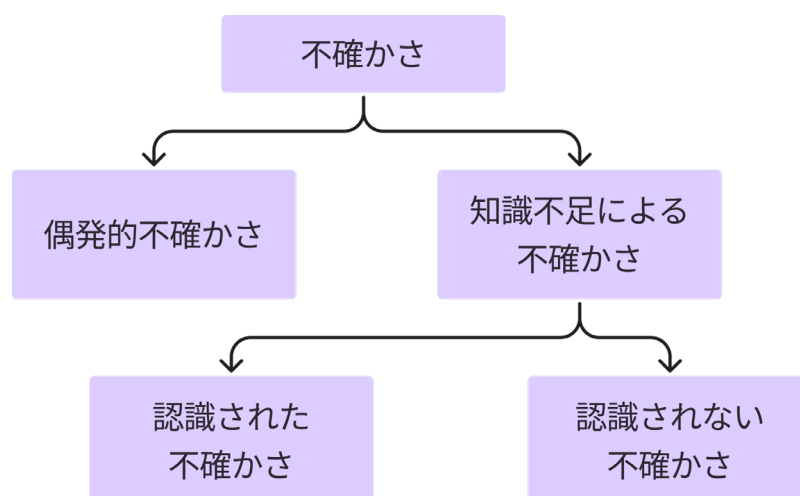


図 3-9 諸量評価の不確かさの構造

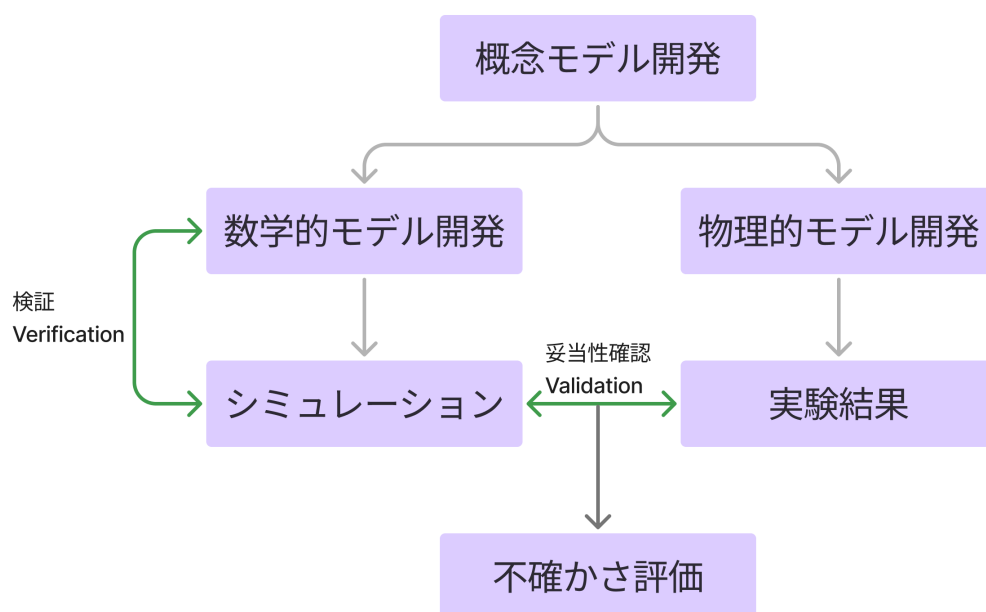


図 3-10 モデル V&V (Verification & Validation) の手順の概略

(2) 諸量評価の不確かさへの対応

上述した諸量評価の不確かさや V&V への考え方に基づいて、それぞれの項目に対する NMB4 での対応について説明する。

a. 認識されない不確かさへの対応

認識されない不確かさへの対応として、NMB4 では、OECD NEA が取りまとめた諸量評価コードのベンチマークに関する報告書[21]をもとに、代表的な 3 シナリオにおいて海外の主要コードとベンチマークを実施済みである[7]。その結果、計算結果は概ね一致し、特に仏国 CEA が開発している COSI と非常に近い値が得られている。また、日本原子力学会「原子力将来シナリオの諸量評価技術研究専門委員会」では、東芝エネルギーシステム社の ATRUNCYS や三菱重工業社の MISA とベンチマークを実施中であり、さらに米国の諸量評価コードである CYCLUS とのベンチマークも進行中である[22]。

b. モデルの検証 (Verification)

モデルの検証および各工程の検証では、真値または上位レベルの参照解との比較により差を確認する必要がある。NMB4 では、包括的技術報告書で示されている

ORIGEN と COMSOL Multiphysics を用いた解析結果と比較を行い、高い精度で一致していることを確認した（表 3-7）。

また、燃焼計算モデルの検証としては、OECD NEA が取りまとめている炉心解析コードのベンチマーク[23-24]を参照し、NMB4 の燃焼計算モデルを評価している[19]。その結果、アクチノイドおよび核分裂生成物（FP）双方について概ね良好な精度が得られている一方、特定の核種や解析条件において精度が低下する事象も確認されている。

表 3-7 NMB4 と ORIGEN+COMSOL の解析結果の検証

Index	Scenario								
	S1			S2			S3		
	NMB4.0	ORIGEN	①/②-1	NMB4.0	ORIGEN	①/②-1	NMB4.0	ORIGEN	①/②-1
Waste number, unit/tHM	1.23	1.23	-0.220%	1.14	1.14	-0.143%	1.58	1.58	-0.403%
Heat in vitrification, kW/unit	2.39	2.39	-0.210%	0.531	0.533	-0.284%	2.30		
Heat in disposal, kW/unit	0.347	0.348	-0.147%	0.253	0.254	-0.538%	0.335	0.334	0.124%
Radioactivity in vitrification, Bq/unit	2.30E+16	2.29E+16	0.165%	5.01E+15	5.01E+15	0.035%	2.11E+16	2.10E+16	0.373%
Radioactivity in disposal, Bq/unit	4.09E+15	4.09E+15	0.067%	1.65E+15	1.65E+15	-0.147%	3.86E+15	3.85E+15	0.314%
Mo content, wt. %	1.38%	1.38%	0.127%	1.50%			1.32%	1.31%	0.318%
Max buffer temperature, °C	97.8	98.0	-0.227%	104	105	-0.414%	95.6	95.6	-0.0390%

(3) 解析の妥当性確認 (Validation)

妥当性確認では、実測データに近い値と諸量評価結果（部分的または全体的）を比較し、その差を評価することで妥当性を判断する必要がある。本研究では実際の原子炉サイトに着目し、過去の運転データから現在の状況として、使用済燃料貯蔵量と Pu 保有量を算出し、その妥当性を確認した。解析対象は、中部電力浜岡原子力発電所の 1～6 号機である。

図 3-11 および図 3-12 に、浜岡原子力発電所における使用済燃料貯蔵量と Pu 量の推移を示す。青い棒グラフが NMB4 による解析値、オレンジ色の棒グラフが中部電力から公開されている実績値である。使用済燃料貯蔵量に関しては、2008 年以降の計算精度が非常に高く、この期間における平均的な誤差は 2.2% にとどまった。一方、2003 年から 2007 年に見られた誤差は、燃料取り出しに関する NMB4 の仕様に起因するものである。浜岡原発 1 号機と 2 号機は 2009 年に廃止措置が決定されたが、実際にはそれ以前に運転を停止しており、解析上では運転停止直後に燃料を取り出したため、一時的に計算値が大きくなる現象が生じた。一方、公開データで

は廃止措置の決定に伴い装荷されていた燃料が使用済燃料として扱われた結果、2009 年頃に貯蔵量が大きく増加している。

Pu 量においては、公開情報が限られており比較できるのは 3 年分のみではあるものの、その差異は約 0.3 トン程度で、非常に少ない誤差にとどまっている。以上の結果から、NMB4 の妥当性が十分に確認できたといえる。

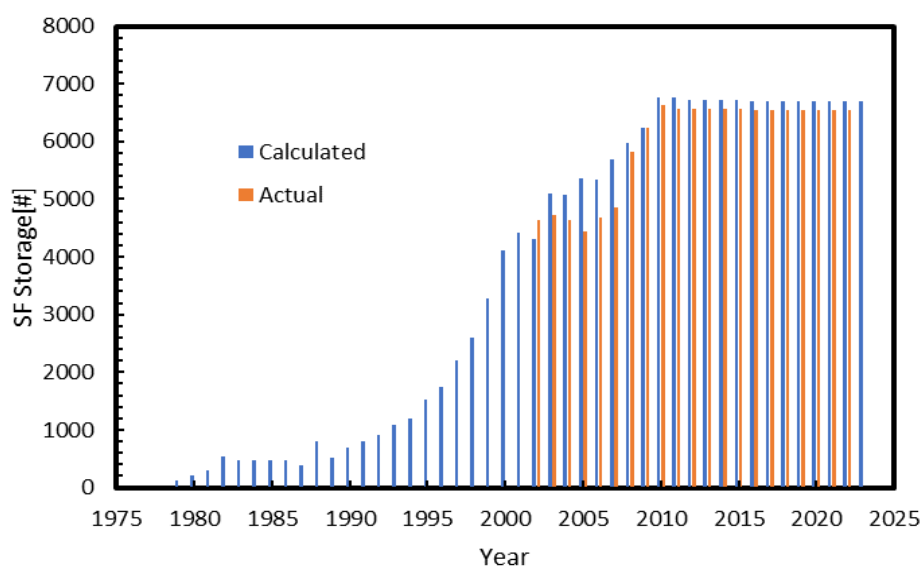


図 3-11 浜岡原子力発電所の使用済燃料の推移

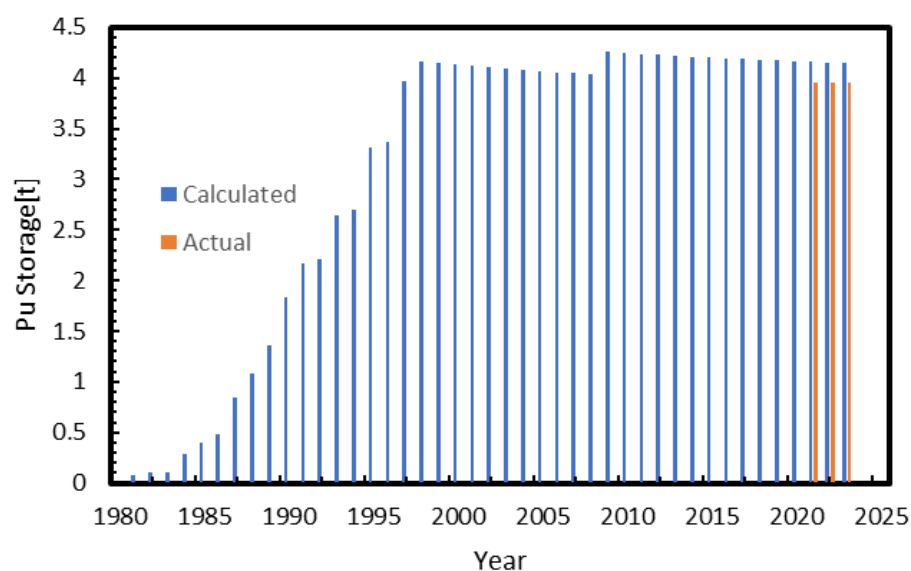


図 3-12 浜岡原子力発電所の使用済燃料の推移

3.2.2 廃棄物データベースの設計と構築

3.2.2.1 昨年度と今年度の実施内容

昨年度の検討において、セキュリティ性、開発団体の長期サポート見込、開発ノウハウ成熟度、組織間データ管理の柔軟性、モジュール性・スケーラビリティ、秘匿情報管理の観点から、本研究で開発するブロックチェーンを活用した廃棄物データベースの基盤に、Hyperledger Fabric を採用した。本年度は廃棄物データベースの設計と構築を実施した。

3.2.2.2 システム要件の整理

(1) 地層処分事業の業務フローと目的の整理

本研究では、低レベル廃棄物の発生から埋設までのフローを基に、高レベル廃棄物の発生から埋設までのフローを想定した。図 3-13 に想定した高レベル廃棄物の発生から埋設までのフローを示す。

地層処分は図 3-14 に示すように超長期の事業期間を有しており、安全性を確保した効率的な事業遂行が必要である。そこで本研究では、安全性の確保を大前提に以下の項目に重点を置いたブロックチェーン技術を活用した廃棄体データ管理システムを検討した。

- ✧ 透明性（規制機関などの監督官庁・社会的ステークホルダーに対してデータ改ざんリスクを下げ、正確かつ迅速なデータ共有ができる）
- ✧ 事業遂行の効率向上（認可プロセスや報告作業の効率化、電力・原燃・研究現場・埋蔵現場などへのリアルタイムデータの提供など）
- ✧ 回収可能性の担保（将来的に必要な応じて回収する際、どの廃棄体がどこにあるか、アクセスしやすいか等のデータがわかるように管理）

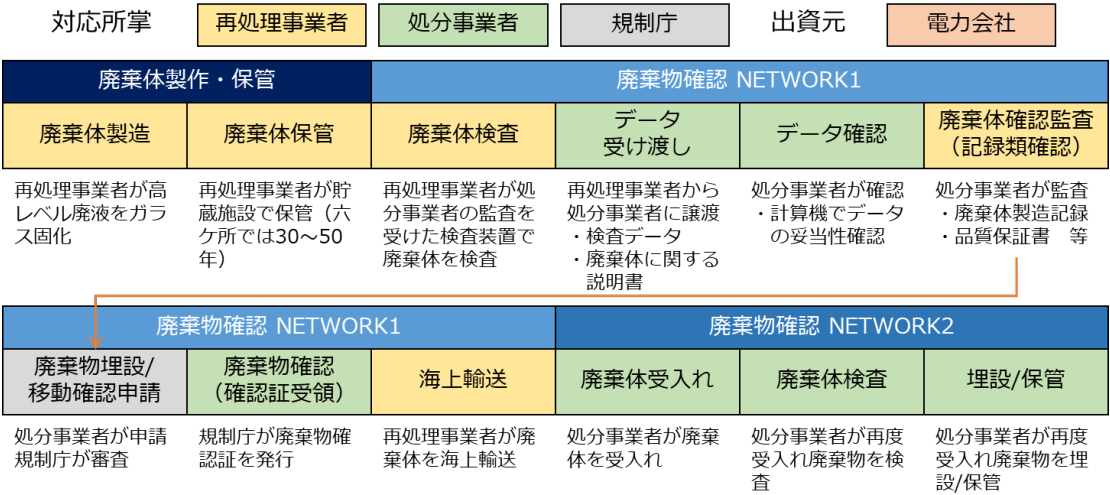


図 3-13 高レベル放射性廃棄物の発生から埋設までのフロー

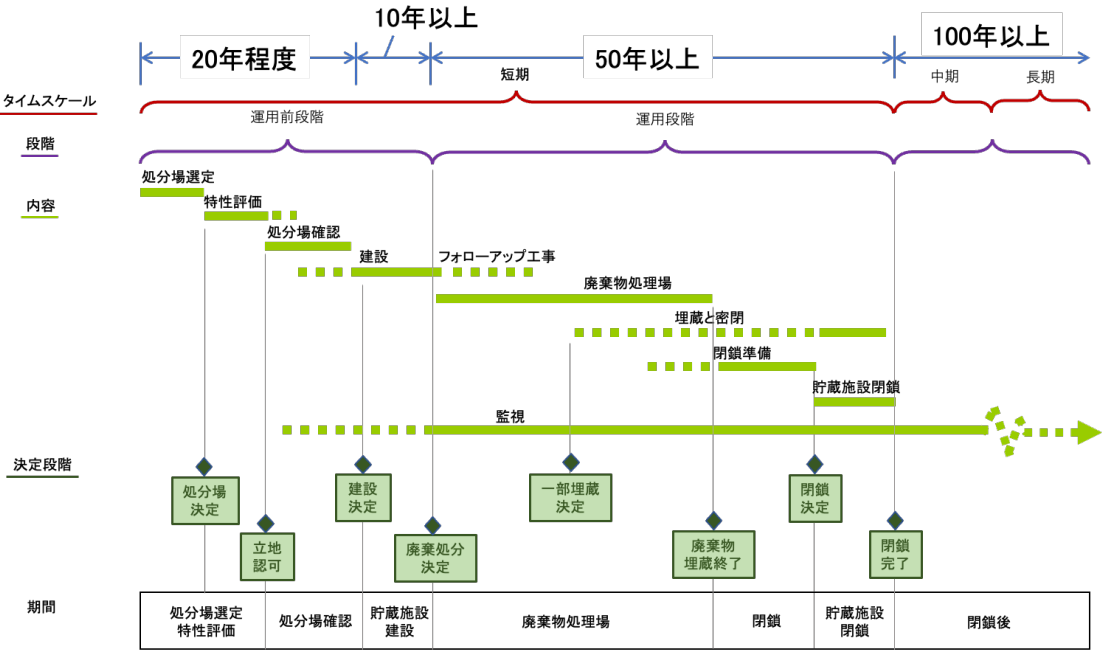


図 3-14 地層処分事業のライフサイクル (Flüeler, T. (2023)[25]を参考に作成)

(2) プロダクトのゴール

本研究で開発するプロダクトのゴールを以下にまとめる。なお、本研究でのみ扱う用語として、廃棄物、ガラス固化体、廃棄体がある。それぞれの使い分けとしては、ガラス固化体は、再処理工場で製造後、埋設される状態になるまでを指し、廃棄体とはガラス固化体に人工バリアを取り付けて PEM 容器で一体化された状態、廃棄物とは、上記のガラス固化体と廃棄体の総称である。

A) 廃棄物データベースの構築（廃棄物 DB）

- ✧ 再処理事業者から受け入れたガラス固化体の個々のデータを登録し、追跡可能な形で保管する。
- ✧ 廃棄物情報を体系的に管理し、Ansys など解析用ツールへ出力が可能な CSV 形式でエクスポートできる。

B) リアルタイム管理の実現

- ✧ 廃棄物の所在情報（どこの区画にあるか、誰がどこへ移動したかなど）がリアルタイムで更新され、追跡できる。
- ✧ ネットワーク内の全ステークホルダーに必要な情報が即時に共有される体制を整備する。

C) セキュリティ・耐改ざん性の向上

- ✧ ビザンチン・フォールトトレラント性を確保し、障害や改ざんリスクを軽減する。
- ✧ 長期にわたる（50 年以上）事業継続を前提としたデータ保存と拠点分散管理を実現する。

(3) 機能要件（ユースケース）

本研究で開発するプロダクトのメインユーザーを地層処分事業会社の作業員と設定し、そこで必要となる機能の詳細を以下にまとめる。

A) 廃棄物の管理（閲覧 / 作成 / 編集 / 埋設 / 移動 / 報告）

(ア) 廃棄物情報の参照

- ① 管理番号に紐づく所有者、製造年、貯蔵期間、核種組成、放射能量、貯蔵場所等の閲覧機能
- ② 対象廃棄体の所在区画・保管容器・移動履歴の参照

(イ) 廃棄体登録

- ① ガラス固化体と人工バリアを組み合わせで製造した際の情報（オーバーパック、ベントナイト等）を登録・紐づけ
- ② 再処理事業者から受け入れた廃棄物データを取り込み

データの共有先としては、以下を設定した。

A) 規制機関

- ✧ 廃棄物が適切に管理・埋設されているかを監視・確認

B) 電力事業者

- ✧ 廃棄物量・保管状況のモニタリング、計画策定
- ✧ 必要なときに取り出し可能なデータの取得

3.2.2.3 データ構造

整理したプロダクト要件を踏まえ、それぞれの機能を実現するために必要なデータ構造を作成した。データ構造のクラス図を図 3-15 に示す。基本思想としては、本研究で開発している NMB4 との連携を視野したデータ構造になっている。主要なクラス間の関連性を以下に示す。

- A) Waste（廃棄物）と WasteBody（廃棄物本体）：主要なクラスとして、異なる粒度での廃棄物管理
- B) Form クラス：廃棄物の物理的形状の定義
- C) CompositionWtPercentage クラス：放射性核種インベントリの定義
- D) Location と DisposalBranch のクラスにより廃棄物の保管場所と処分施設の定義
- E) WasteGroup クラス：廃棄物の論理的なグループを定義
- F) Report クラス：報告書情報の定義
- G) Person クラス：関係者情報の定義
- H) incidentInformation クラス：インシデント情報の定義。

次年度以降は今回整理したプロダクト要件、データ構造を基にブロックチェーン廃棄物データ管理システムを構築する。

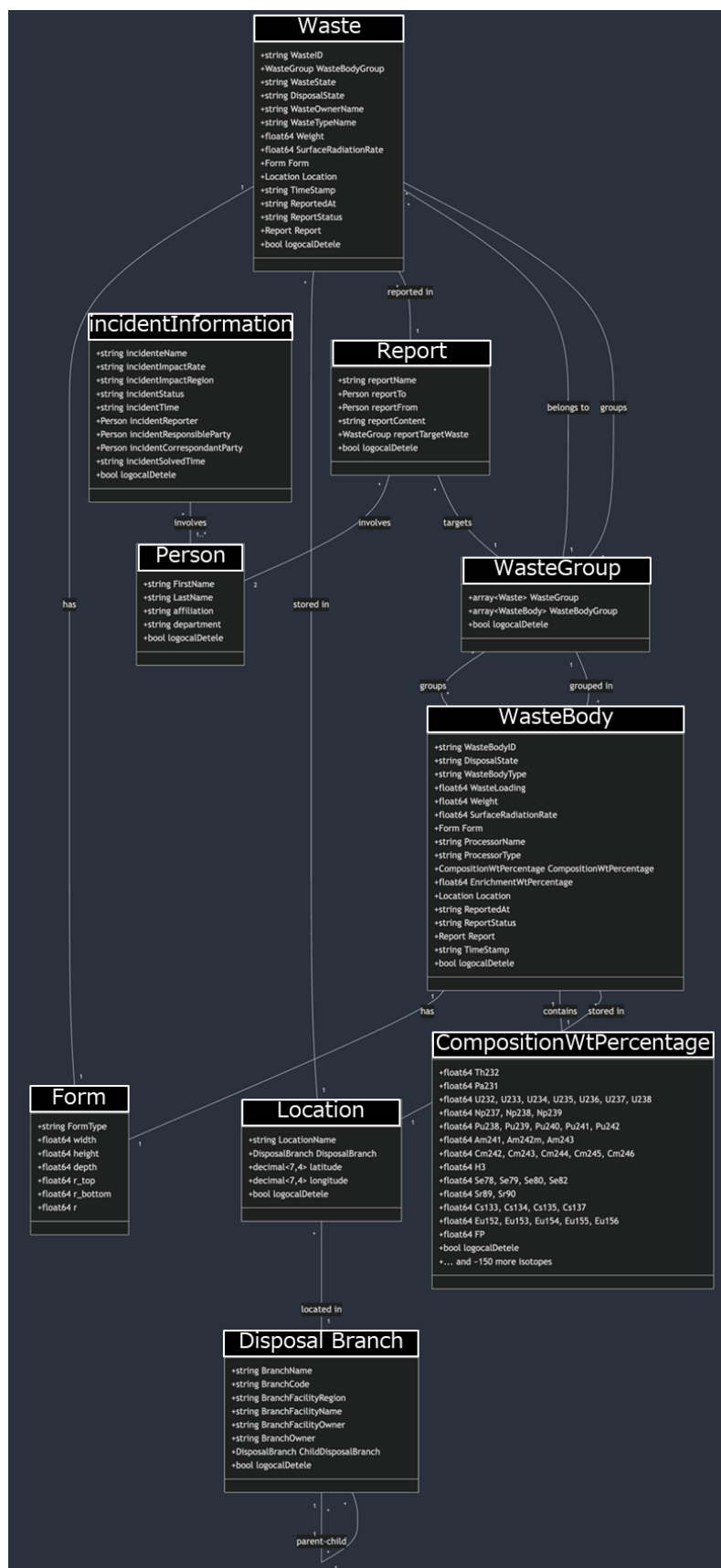


図 3-15 データ構造のクラス図

3.2.3 地層処分場の伝熱解析モデルの構築

3.2.3.1 昨年度と今年度の実施内容

高レベル放射性廃棄物の処分区画 1 ヶ所分を想定して、処分坑道数 20 本、1 つの処分坑道あたり 60 体の廃棄体を埋設できる大規模過渡伝熱解析モデルを有限要素ソフトウェア Ansys Mechanical [26]を用いて構築した。構築した大規模過渡伝熱モデルの外観図と内観図をそれぞれ、図 3-16 と図 3-17 に示す。構築した伝熱モデルは、第 2 次取りまとめ[31]および、包括的技術報告書において使用されている、廃棄体を埋設した際の人工バリアや岩盤の温度変化を解析する伝熱モデル（1/4 体型モデル）を参考にして作成した。報告書に示された 1/4 体型モデルは、ガラス固化体中心を原点として上部に地下施設設置深度 1000m、下部に 200 m の岩盤を設定し、水平方向に複数の廃棄体が一定間隔で定置されることを想定されている。母岩は硬岩系として、坑道中心間距離は 10m、廃棄体ピッチは 44.4m とした。人工バリアや岩盤の物性値は包括的技術報告書の条件を使用した。

今年度は昨年度構築した大規模過渡伝熱解析モデルを用いてパラメトリック解析や最適化解析を行っていくためのモデルの拡張およびカスタマイズ性を向上するための機能実装を実施した。また、改良したモデルを用いた解析を実施した。

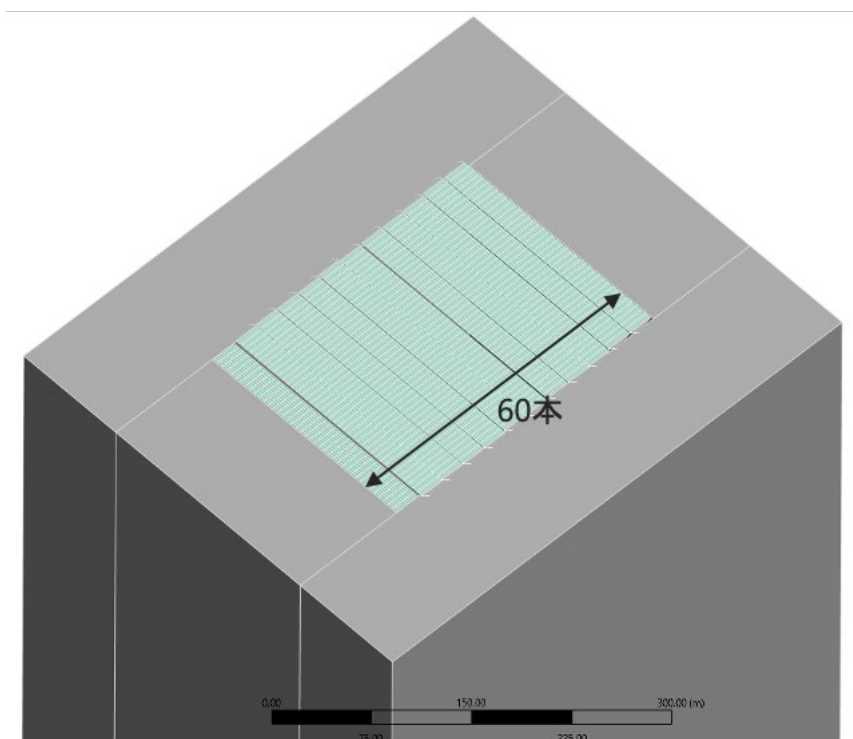


図 3-16 大規模過渡伝熱モデル外観図

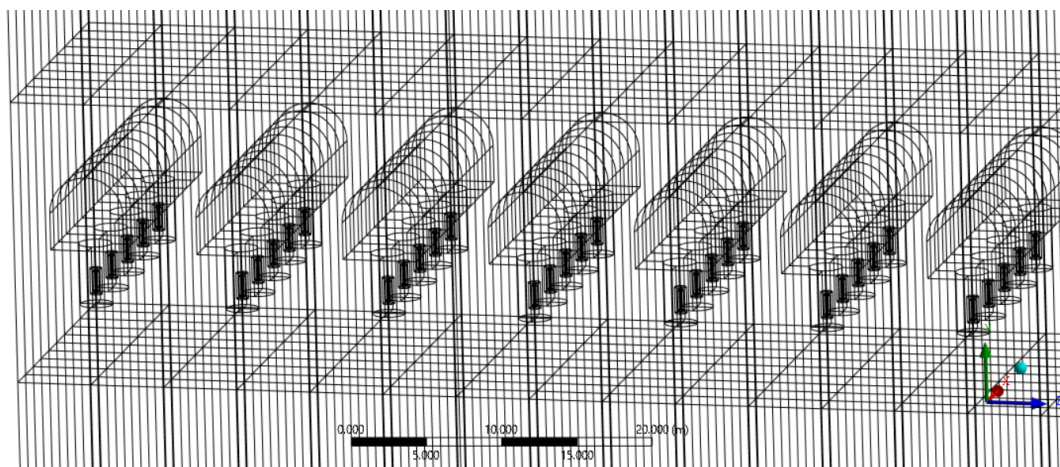


図 3-17 大規模過渡伝熱モデル内観図（廃棄体を配列）

3.2.3.2 モデル構築と自動化の検討

昨年度構築した大規模過渡伝熱モデルを用いて効率的に解析、パラメータの最適化を行えるように、以下、2 件のモデルおよび自動化手法を検討した。

(1) 奥行き方向配置個数をパラメータとした最適化検討用モデルの構築

大規模過渡伝熱モデルを活用し、処分パネルあたりの廃棄体数を最適化する解析を想定して、1 坑道あたりに配置する廃棄体数を変数とするパラメトリック解析用の伝熱解析モデルを構築した。その概要図を図 3-18 に示す。また、Workbench パラメータセット画面のパラメータチャート上で、1 坑道あたりの廃棄体数に応じた時間範囲内の温度最大値を比較可能な仕組みを整備した。さらに、ピッチと坑道離間距離を入力すると自動で体系を変更しメッシュを生成するスキームを開発し、これらのパラメータを変数として設定することで、複数の寸法で伝熱計算を実施しながら設計パラメータ同士の相関や感度（応答局面）を取得できるようにした。こうして得られた応答局面を利用することで、例えば緩衝材温度の制限値を 100°C に設定した際、廃棄体の発熱による緩衝材温度の上昇を考慮しながら制限値を満たす配置寸法の候補を機械学習で推定し、その候補パラメータのみを対象に詳細な伝熱計算を行うことで、効率的な熱設計を実現するスキームを導入した。一方で、後述のとおり解析に用いるメッシュ数が増加すると計算コストが極めて高くなることも明らかとなり、さらなる工夫が必要である。以上により、大規模過渡伝熱モデルを用いた処分パネルあたりの廃棄体数の最適化解析に必要なモデルが整備された。

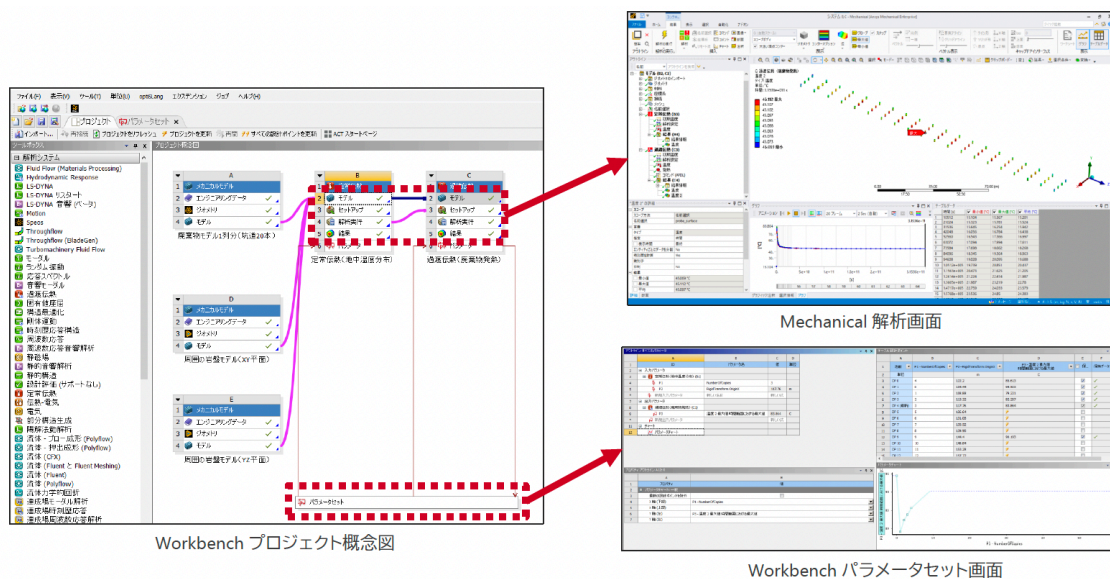


図 3-18 奥行き方向配置個数をパラメータとした最適化検討用モデルの構築

(2) 各廃棄体に個別の発熱量を割り当てる処理の自動化

各廃棄体に個別で発熱量を割り当てる作業の自動化機能として、複数の簡易発熱量データ（表データ形式の入力値）を読み込み、各対象ジオメトリに個別で発熱量を割り当てる作業をコマンドで自動化機能を開発した。その概要図を図 3-19 に示す。これにより、大規模過渡伝熱モデルに異なる発熱特性の廃棄体を迅速に設定することが可能になる。

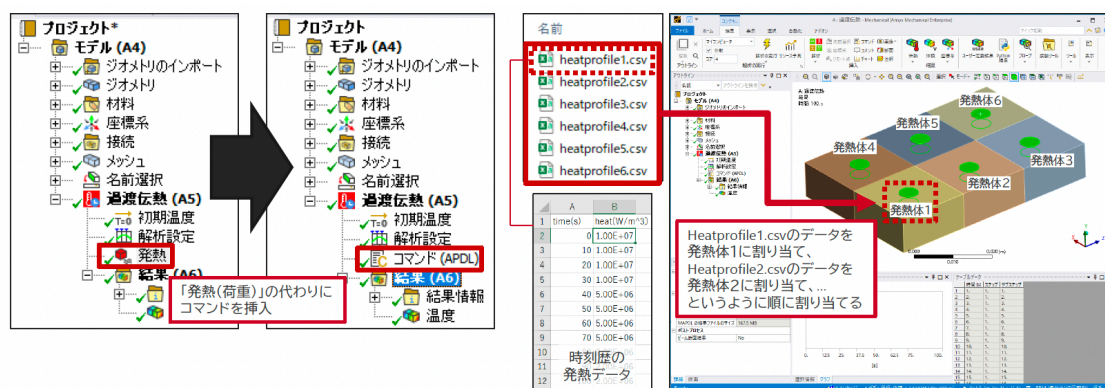


図 3-19 各廃棄体に個別の発熱量を割り当てる処理の自動化機能

3.2.3.3 伝熱解析

昨年度に構築した大規模過渡伝熱モデルをもとに、本解析では指定座標内にある「内側」の廃棄体と、それ以外の「外周」の廃棄体の2つのグループを想定し、それぞれ異なる発熱量を設定して伝熱解析を行った（図 3-20）。廃棄体の発熱量は、図 3-21 に示す通り包括

的技術報告書に示されている標準的なガラス固化体の仕様値を基準とし、これに加えて発熱量を 50%に低減させた低発熱ガラス固化体の 2 種類を想定した。解析は中瀬研究室が所有する複数のワークステーション (Windows 11) を用いて実施し、主に 40 コア・約 200 GB のメモリを有するマシンを使用した。

一方、解析の実施過程で計算機性能の不足が顕在化した。現在、大規模解析のベースとして用いている 1/4 体系モデルは比較的計算規模が小さいため、報告書に沿ってガラス固化体周辺の詳細な構造を再現できている。試験的には 1/4 体系の対称性を 1/2 まで低減し、さらに 5 本並べた際の計算までは実行可能であることを確認した。しかし、対称性を完全に解いて 1/1 体系とすると、2 本並べた計算ですらメモリ不足が生じ、最後まで計算を続行できなかった。なお、本計算では地表面から深度 100 m 下がるごとに約 3°C 上昇すると仮定し、地上の温度を 15°C とすると、固化体が設置される 1,000 m 下、さらにその下 200 m におよぶ母岩部分は 51°C になる。まずはこの定常計算によって各部材の温度分布を求め、その後、廃棄体に発熱を与えて過渡伝熱計算を実施している。定常伝熱解析までは順調に計算できるが、過渡計算に移行した段階でメモリ不足が顕著になることがわかった。以上の問題に対応するため、現在以下の対策を進めている。

- ✧ 解析メッシュの最適化による総要素数の削減
- ✧ 解析体系の対称性を活用したモデル規模の縮小
- ✧ 計算アルゴリズムの効率化

しかしながら、これらの対応を実施してもなお、現有の計算リソースでは十分な解析精度を維持しながら計算を収束させることができなかった。

次年度の対応方針としては、以下の二つのアプローチで課題解決を図る予定である。

- ✧ 計算リソースの大幅な増強：東京科学大学のスーパーコンピュータ TSUBAME4.0 の利用を申請し、高性能計算環境での解析実行を目指す。TSUBAME4.0 の並列計算機能を活用することで、現状の計算負荷に対応可能と考えられる。
 - ✧ 解析アプローチの抜本的見直し：評価委員会でのコメントを踏まえ、モデルの物理的表現を維持しつつも計算効率を大幅に向上させるための代替アプローチを検討する。
- これらの対応により、次年度は実用的な解析結果の取得を目指す。

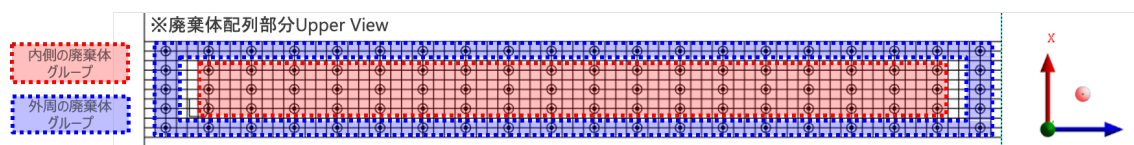


図 3-20 発熱量の異なる廃棄体の定置条件

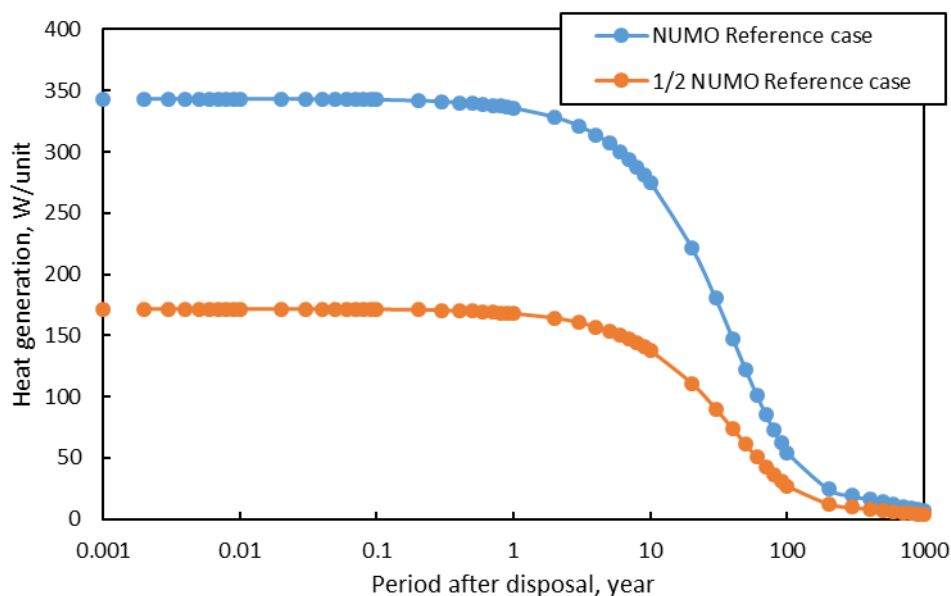


図 3-21 想定した廃棄体の発熱量

4. まとめ

本研究は、多様化する高レベル放射性廃棄物の発生シナリオに柔軟に対応可能な地層処分システムの構築を目指し、デジタル技術を活用した新たな設計スキームの開発に取り組んでいる。2024年度は、放射性廃棄物発生シナリオの解析、ブロックチェーン技術を用いた廃棄物データベースの設計、および地層処分場の大規模伝熱解析モデルの構築を中心に研究を進展させた。主要成果は以下の通りである。

1. 高レベル放射性廃棄物発生シナリオの解析

六ヶ所再処理工場運転シナリオにおいて、再処理される使用済燃料の冷却期間が長期化（約 58%が 40 年以上冷却）していることを確認した。この結果、ガラス固化体中の核種組成は従来想定と異なり、Am-241 の増加および Sr-90、Cs-137 の減少が見られた。廃棄体専有面積と廃棄物含有率の最適化により、従来設定と比較して最大 18%の

処分場面積削減の可能性を示した。また、高速炉導入シナリオのインプットデータを整備し、諸量評価コード NMB4 の検証・妥当性確認を実施した。

2. 廃棄物データベースの設計と構築

セキュリティ性、長期サポート、データ管理の柔軟性等を考慮し、Hyperledger Fabric を基盤とした廃棄物データベースのシステム要件を整理した。地層処分事業の超長期性を踏まえ、透明性確保、事業遂行の効率向上、廃棄体回収可能性の担保を重視したデータ構造を設計した。NMB4 との連携を視野に入れたクラス設計により、廃棄物の物理的形状、核種インベントリ、保管場所等を体系的に管理可能なデータベース基盤を構築した。

3. 地層処分場の伝熱解析モデルの構築

処分坑道 20 本、1 坑道あたり 60 体の廃棄体を埋設できる大規模過渡伝熱解析モデルを構築した。坑道あたりの廃棄体数をパラメータとした最適化検討用モデルの開発や、各廃棄体に個別発熱量を割り当てる処理の自動化機能を実装し、異なる発熱特性を持つ廃棄体の最適配置に向けた解析基盤を整備した。計算リソースの制約が課題として浮上し、次年度は TSUBAME4.0 等の高性能計算環境の活用を検討している。

参考文献

1. 資源エネルギー庁, エネルギー基本計画, 2025.
2. 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一適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築-, NUMO-TR-20-03, 2021.
3. 日本原燃株式会社, 平成 28 年度 再処理事業所 事業者とのヒアリング概要・資料, 2016.
4. Yaohiro INAGAKI, Tomohiko IWASAKI, Seichi SATO, Toshiaki OHE, Kazuyuki KATO, Seishi TORIKAI, Yuichi NIIBORI, Shinya NAGASAKI, Kazumi KITAYAMA, LWR High Burn-Up Operation and MOX Introduction; Fuel Cycle Performance from the Viewpoint of Waste Management, Journal of Nuclear Science and Technology, 46:7, 677-689, 2009, <https://doi.org/10.1080/18811248.2007.9711575>.
5. T. Okamura, K. Kawai, E. Minari, M. Nakase, H. Asano, K. Takeshita, Effect of Cs and Sr separation on occupied area reduction in current nuclear energy system and its evaluation by CAERA index, Separation Science and Technology, 54:12 1970-1976, 2019, <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1577897>.
6. Kota Kawai, Hiroshi Sagara, Kenji Takeshita, Masahiro Kawakubo, Hidekazu Asano, Yaohiro Inagaki, Yuichi Niibori, Seichi Sato, High burn-up operation and MOX burning in LWR; Effects of burn-up and extended cooling period of spent fuel on vitrification and disposal. Journal of Nuclear Science and Technology 55:10, 1130-1140, 2018, <https://doi.org/10.1080/00223131.2018.1480427>.
7. Tomohiro Okamura, Ryota Katano, Akito Oizumi, Kenji Nishihara, Masahiko Nakase, Hidekazu Asano, Kenji Takeshita, NMB4.0: development of integrated nuclear fuel cycle simulator from the front to back-end, EPJ Nuclear Science and Technology, 7, 19, (2021), <https://doi.org/10.1051/epjn/2021019>.
8. 奥村啓介, 杉野和輝, 小嶋健介, 神智之, 岡本力, 片倉純一, JENDL-4.0 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット:ORLIBJ40, JAEA-Data/Code 2012-032, 2013, 148p. <https://doi.org/10.11484/jaea-data-code-2012-032>.
9. 日本原子力産業協会, 日本の原子力発電所の運転実績, <https://www.jaif.or.jp/category/column/npp/>, 閲覧日 2024 年 3 月 14 日.

10. 電気事業連合会, プルトニウム利用計画, 2024.
11. 原子力安全委員会, 発電用軽水型原子炉施設に用いられる混合酸化物燃料について, 第 11 版原子力安全委員会指針集, 897-993, 2003.
12. 原子力安全基盤機構, 原子力施設運転管理年報平成 25 年版, ISSN 1347-0493, 2013.
13. 西原健司, 幅広い原子力発電利用シナリオの諸量評価, JAEA-Data/Code 2020-005, 2020, DOI:10.11484/jaea-data-code-2020-005.
14. ATOMICA, 海外委託再処理から返還される放射性廃棄物, https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_05-01-04-05.html, 閲覧日 2025 年 2 月 10 日.
15. 使用済燃料再処理機構, 使用済燃料再処理等実施中期計画, 2023.
16. S. B. Ludwig, A. G. Croff, Revision to ORIGEN2 - Version 2.2, Transmittal memo of CCC-371/17, Oak Ridge National Laboratory, 2002.
17. 資源エネルギー庁, 2040 年度におけるエネルギー需給の見通し (関連資料), 2025.
18. 日本原子力発電株式会社, 高速増殖炉サイクル実用化研究開発 (FaCT プロジェクト); フェーズ I 報告書, JAEA-Evaluation 2011-003, 2011.
19. 西原健司, 竹下健二, 島田隆, 中瀬正彦, 諸量評価コードの検証と妥当性確認, 日本原子力学会 2024 年春の年会 3L06, 2024.
20. 日本原子力学会, シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン : 2015, AESJ-SC-A008 : 2015, 2015.
21. NEA, Benchmark Study on Nuclear Fuel Cycle Transition Scenarios Analysis Codes, OECD Publishing, Paris, 2012.
22. Amanda M. Bachmann, Kenji Nishihara, Scott Richards, Takumi Abe, Bo Feng, Initial benchmark comparison of the open-source Cyclus and NMB fuel cycle simulators, *Progress in Nuclear Science and Technology* 7, 2025.
23. NEA, Burn-up Credit Criticality Benchmark - Phase IV-B, OECD Publishing, Paris, 2003.
24. NEA, Burn-up Credit Criticality Safety Benchmark - Phase III-C, OECD Publishing, Paris, 2015.
25. Thomas Flüeler, Systems, Governance and Institutions. In: Governance of Radioactive Waste, Special Waste and Carbon Storage. Springer Textbooks in Earth

Sciences, Geography and Environment. Springer, Cham. 2025.

https://doi.org/10.1007/978-3-031-03902-7_5

26. ANSYS, Inc.,有限要素ソフトウェア Ansys Mechanical version 2023R1.

2024 年度 外部発表

【基調講演】

1. 岡村知拓, 西原尚宏, 中瀬正彦, NEUChain (ニューチェーン) インベントリを起点とした原子力産業のデジタルツインへの挑戦, 日本原子力研究開発機構 埋設事業部研究会, 2024.

【口頭発表】

1. 鈴木大河, 岡村知拓, 中瀬正彦, 西原健司, 阿部拓海, 原子力発電シナリオの諸量評価のための日本詳細モデルの構築, 日本原子力学会 2024 秋の大会 3J07, 2024
2. 岡村知拓, 西原尚宏, 中瀬正彦, インベントリを起点としたガラス固化体廃棄物含有率の最適化アプローチ, 第 6 回放射性廃棄物固化体討論会, 2024
3. Tomohiro Okamura, Takumi Abe, Takahiro Nishihara, Taiga Suzuki, Masahiko Nakase, Kenji Takeshita, Kenji Nishihara, Three Years of NMB4: A Driving Force Toward Nuclear Innovation Through Open Access Nuclear Fuel Cycle Simulator Development, International Symposium on Green Transformation Initiative and Innovative Zero-Carbon Energy Systems, GXI-ZES, 14 - 16 January 2025, Tokyo, Japan.

【ポスター発表】

1. 岡村知拓, 西原尚宏, 中瀬正彦, NEUChain (ニューチェーン) インベントリを起点とした核燃料サイクルのデジタルツイン, NuMBAC2025, 2025.

研究報告 7

広域応力場を考慮した流体供給源周辺の 応力場のモデル化

日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター

安邊 啓明

【目次】

1. 背景・目的	1
2. 全体研究計画（3 ヶ年における全体計画）	3
3. 2023 年度の成果概要	5
3.1 既存の応力場モデルの実装.....	5
3.2 応力場推定手法適用のための事例の選定.....	7
4. 2024 年度研究実施内容	8
4.1 2024 年度の計画、実施方法.....	8
4.1.1 実データの測定と応力場の把握.....	8
4.1.2 応力場逆解析手法の実装と適用.....	8
4.1.3 モデル検証・応力場逆解析手法適用のための事例の選定.....	8
4.2 2024 年度の成果内容.....	9
4.2.1 実データの測定と応力場の把握.....	9
4.2.2 応力場逆解析手法の実装と適用.....	10
4.2.3 モデル検証・応力推定手法適用のための事例の選定.....	12
5. まとめ	15

謝辞

参考文献

2024 年度外部発表

1. 背景・目的

火山・火成活動の影響範囲の把握に係る調査・評価技術の高度化は、地層処分のサイト選定調査において重要な課題である。火成岩脈の伸展に伴う地殻浅部におけるマグマの長距離水平移動は、火山・火成活動の影響範囲を決定する現象の一つである。その伸展方向は、火道やマグマだまりなどの流体供給源の圧縮に起因する局所応力と、プレートの沈み込みなどのテクトニクスに伴う広域応力によって決定される (Odé, 1957)。流体供給源周辺の応力場に関する有効なモデルが構築できれば、流体の供給位置や流体圧を仮定することで、火成岩脈の貫入する範囲を評価できる。

既存の流体供給源周辺の応力場モデル (Mogi, 1958; McTigue, 1987) は、半無限弾性体を仮定し、点圧縮源または球状圧縮源に伴う応力場を近似的に導出した。これらのモデルは実際の火山体近傍の地殻変動をよく説明できる。一方、これらのモデルは広域応力の影響を仮定しておらず、圧縮源周辺の応力場は軸対称である。実際の火山活動の影響範囲は広域応力の異方性に従い、水平面内で最大圧縮方向に広く、それと直交する方向に狭いことが知られている。このように、既存のモデルは異方的な火山活動の影響範囲を説明できない。

そこで本研究は、(1) 火成岩脈の貫入方向や火山活動の影響範囲を予測するための理論的枠組みの構築、(2) この枠組みに基づき、局所応力と広域応力を峻別しながら過去の応力場を推定する手法の開発を目的として掲げる。第一の目的のために、広域応力の影響を仮定した新たな流体供給源周辺の応力場モデルを提案する。また、実際の火山・火成活動に伴う応力場は温度構造や亀裂の分布などの様々な不確実性を含む。そこで、変形・応力履歴の比較的単純な若い火山・火成活動を事例として、提案したモデルから予測される応力場と実際の火山周辺の応力場とを比較し、モデルの妥当性を検証する。高レベル放射性廃棄物の最終処分における文献調査段階で概要調査地区から避ける場所の基準として、第四紀に活動した火山の活動中心からおおむね 15 キロメートル以内であることが明らかまたは可能性が高い場所であることが挙げられており (経済産業省資源エネルギー庁, 2023)、火山・火成活動の影響範囲が円形であると想定されている。上述のような応力場モデルを構築できれば、火山・火成活動の中心位置や影響範囲をより詳細かつ高い信頼性をもって提示できることが期待される。また、火山・火成活動のみならず深部流体の流入ポテンシャルの評価にも適用可能である。さらに、火山活動における将来の火口の発生位置の推定にも繋がる知見となるため、火山の防災・減災にも貢献する。

第二の目的のために、岩脈群の貫入方位が貫入時の応力場に従うことを利用し、岩脈群の方位分布から貫入時の応力場を推定する逆解析手法を開発する。過去の応力を推定する手法を開発できれば、火山活動に伴う数十万年スケールでの応力の変動や流体供給源周辺の局所応力場に関する事例蓄積に貢献する。従って本手法は、地層処分のように将来予測の不確実性を伴う火山・火成活動の影響範囲の評価において重要である。さらに局所応力を峻別しながら広域応力を推定する手法が開発できれば、過去の地質構造発達史に関する新たな制約を与え、地質学分野の学術的知見の拡充にも寄与する。

2. 全体研究計画（3 ヶ年における全体計画）

本研究では、新たな流体供給源周辺の応力場モデルの構築と活用を目的に、3 ヶ年の全体計画として以下の3項目を実施し、モデルの提案、妥当性の評価、有用性の検証を行う（表 2-1）。これらの項目を実施することで、定性的な理解に留まってきた流体供給源周辺の局所応力と広域的な造構応力の関係を定量的に理解し、地層処分に係る長期安定性の評価技術の高度化や火山防災・減災、地質学分野の学術的知見の拡充に貢献すると期待される。

（1）広域応力場を仮定した新たな流体供給源周辺の応力場モデルの構築

本研究が主に参照する McTigue (1987) は、半無限弾性体中に球状の圧縮源が存在すると仮定し、流体供給源の膨張に伴う近傍の地殻変動・応力場モデルを導出した（図 2-1a）。このモデルは実際の火山体近傍の地殻変動をよく説明できる。ところで、マグマの長距離移動を担う火成岩脈は、応力の異方性に従い、最小圧縮方向に直交して貫入しやすく、最大圧縮方向に直交して貫入しにくい (Delaney et al., 1986)。そのため、実際の火山活動の影響範囲は広域応力の異方性に従い、水平面内で最大圧縮方向に広く、それと直交する方向に狭いことが知られている。ところが、McTigue (1987) の応力場モデルは広域応力の影響を仮定しておらず、圧縮源周辺の応力場は軸対称である。そのためこのモデルは、火成岩脈の分布・貫入方向、および火山活動の影響範囲の異方性を説明できない。以上の問題を解決するため、本研究は、対象地域全域で一様に広域応力が作用すると仮定し、広域応力場を組み込んだ流体供給源周辺の応力場モデル（図 2-1b）の構築を目指す。

表 2-1 3 ヶ年の全体計画.

	2023 年度	2024 年度	2025 年度	2026 年度
応力場モデルの提案	モデルの構築			
モデルの妥当性の検証		事例の選定・データ収集		
		定量的な比較・検証		
応力逆解析手法の 開発・適用		事例の選定・データ収集		
		プログラム作成		
		手法の適用		
学会での発表予定		2024.12 AGU	2025.5 JpGU	2025.9 地質学会
				2026.4 EGU

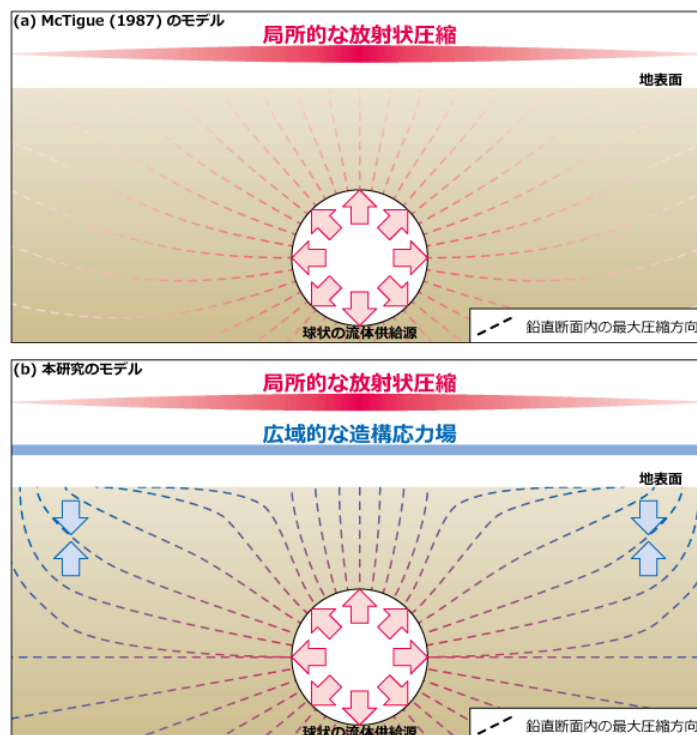


図 2-1 モデル模式図. (a) McTigue (1987) のモデル. (b) 本研究が提案するモデル.

(2) 若い火山・火成活動を事例とした新たな応力場モデルの妥当性の検証

先行研究および本研究で提案するモデルは、地殻が半無限弾性体であると仮定する。ここでは、無数にあるはずの割れ目や断層、複雑な温度構造などを考慮していない。また、流体供給源の形状が完全な球形であることはなく、岩株や岩床、岩脈など多様な形態が想定される。さらに、活動が地質学的に長期間に及ぶ火山では、複数の流体供給源が存在する可能性がある。このように実際の流体供給源周辺の応力場は様々な不確実性を伴うため、提案したモデルが実際の応力場をどのような場合にどの程度再現できるかを検証する必要がある。そこで、実際の活火山周辺の応力場とモデルの予測する応力場がどの程度一致するかを定量的に評価する。

(3) 過去の岩脈群を利用した応力場逆解析手法の開発・適用

提案したモデルを仮定し、地質時代の岩脈群の位置・方位情報から貫入当時の応力場を推定する逆解析手法を開発する。またこの手法を用い、野外調査で取得した実際の岩脈の位置・方位データから、貫入時の応力場を局所応力と広域応力を峻別しながら推定する。

3. 2023 年度の成果概要

2023 年度は、(1) 応力場モデルの実装、および (2) 文献調査・野外調査による応力場逆解析手法を適用する事例の選定を行った。

3.1 既存の応力場モデルの実装

先行研究および本研究の応力場モデルについて、モデルの検証や過去の応力場推定におけるフォワードモデルとして利用することを目的とし、MathWorks 社の数値解析ソフトウェア MATLAB を用いて実装した。本報告で用いる記号の一覧を表 3-1 に示す。なお、本研究では圧縮を正とする

既存の流体供給源周辺の応力場モデルのうち、McTigue (1987) は地殻を半無限弾性体と仮定し、有限サイズの球状の圧縮源に伴う周辺の応力場を近似的に導出した (図 3-1)。このモデルでは、長さを球状圧縮源の中心の深さで、応力を球状圧縮源の流体圧で、それぞれ規格化した値を用いる (図 3-1)。基礎方程式は、外力がない場合の応力の平衡方程式

表 3-1 記号リスト。

b	広域応力の等方応力成分
C	応力解空間上のフォン・ミーゼス・フィッシャー分布の正規化定数
$\Delta\sigma$	広域応力の差応力
ϵ	球状圧縮源中心の深さで規格化した球状圧縮源の半径
η	広域応力の差応力を深さで規格化した値 $-\Delta\sigma/z$
g	重力加速度
$\mathcal{L}(\theta)$	パラメーター θ における対数尤度
$\mathbf{I}$	等方テンソル
N	調査区画数
ν	ポアソン比
ϕ	x 軸からの偏角
Φ^f	広域応力の応力比 $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$
ϕ_i	σ_i 軸の偏角
ψ_i	σ_i 軸の伏角
$\mathcal{P}_{\text{vMF}}$	応力解空間上のフォン・ミーゼス・フィッシャー分布の確率密度関数
r	球状圧縮源の中心からの距離
$\mathbf{R}$	広域応力の応力主軸方位を表す直交行列
ρ	z 軸からの水平距離
ρ_d	岩石の密度
$\tilde{s}(\sigma)$	σ に対応する応力解空間でのベクトル
σ^c	球状圧縮源からの放射状応力を表す応力テンソル
σ^f	広域応力を表す応力テンソル
σ_{zz}^f	広域応力の鉛直応力成分
σ^{fMT}	広域応力と局所応力を考慮した応力テンソル
$\sigma^{(i)}$	区画 i におけるモデル規格化応力テンソル
σ_i^f	広域応力の主応力, $i = 1, 2, 3$
$\sigma_{i,j}$	i 方向を極とする面にかかる応力の j 方向成分
σ^{MT}	McTigue (1987) による応力テンソル
$\sigma_{\text{obs}}^{(i)}$	区画 i で検出された規格化応力テンソル
σ^s	地表にかかる仮想的な応力テンソル
θ	球状圧縮源中心からの位置ベクトルと z 軸のなす角
θ	新しい応力場モデルのパラメーター
$\mathbf{u}$	変位
x_j	第 j 座標, 地理座標系での座標 x, y, z に対応
x, y, z	球状圧縮源頂上の地表を原点とする直交座標, z は上方が正
x_c, y_c, z_c	球状圧縮源の中心の地理座標系における位置
z_0	現在の地表面の当時の深度

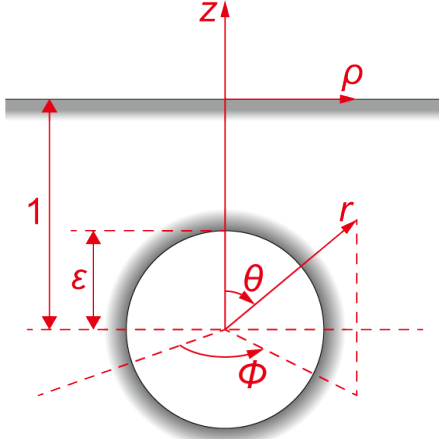


図 3-1 モデルの座標系.

$$\sum_j \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0$$

で与えられる．地表および圧縮源表面の応力に関する境界条件は以下の通りである．

$$\text{地表 } (z = 0): \sigma_{zz} = 0, \sigma_{\rho z} = 0, \sigma_{\phi z} = 0$$

$$\text{圧縮源表面 } (r = \epsilon): \sigma_{rr} = P_0, \sigma_{\theta r} = 0, \sigma_{\phi r} = 0$$

これらの境界条件を満たすよう、各座標における応力テンソル σ^{MT} を、球状圧縮源からの放射状応力を表す応力テンソル σ^c と地表に作用する仮想的な応力

テンソル σ^s の和 ($\sigma^{\text{MT}} = \sigma^c + \sigma^s$) に分解して近似的に導出した．

本研究では、McTigue (1987) のモデルを基に、水平無限遠で広域応力に収束するような応力場モデルを提案する．重ね合わせの原理に基づき、各座標における応力テンソル σ^{fMT} を、球状圧縮源に伴う応力テンソル σ^{MT} と広域応力テンソル σ^f の和 $\sigma^{\text{fMT}} = \sigma^{\text{MT}} + \sigma^f = \sigma^c + \sigma^s + \sigma^f$ で表す．ここで、 σ^f は直交座標系において以下のように表される：

$$\sigma^f = (-z) \times \left\{ \frac{\eta}{\sqrt{3[(\Phi^f)^2 - \Phi^f + 1]}} \mathbf{R} \text{diag}(2 - \Phi^f, 2\Phi^f - 1, -\Phi^f - 1) \mathbf{R}^T + b \mathbf{I} \right\}$$

ただし、 $\mathbf{R}$ は応力主軸方位を表す直交行列を、 $\Phi^f = (\sigma_2^f - \sigma_3^f) / (\sigma_1^f - \sigma_3^f)$ は応力比を、 η は差応力 $\Delta\sigma = \sigma_1^f - \sigma_3^f$ の深度に対する増加率 $-\Delta\sigma/z$ を表す． b は広域応力の等方成分であり、鉛直応力 $\sigma_{zz}^f = \rho_d g z$ となるような値である．広域応力を加味したモデルに基づく応力軸跡の例を図 3-2 に示す．水平断面、鉛直断面の両方で、球状圧縮源近傍では局所応力の影響が大きく、離れるに従って広域応力の影響が大きくなる．鉛直断面をみると、深度が大きくなる (z が小さくなる) につれて、局所応力の影響範囲が小さくなる．また、地表近傍の鉛直断面内での最大圧縮方向に注目すると、球状圧縮源直上から離れるに従って、鉛直、球状圧縮源方向へ傾いた方向、水平と変化し、遠方では広域応力の方向に近づく．つまり、応力主軸方向の配置を表す応力の型が、球状圧縮源からの距離に従って変化すると考えられる．水平断面をみると、最大圧縮方向の分布に異方性があり、球状圧縮源直上から x 軸方向には放射状をなす範囲が小さく、 y 軸方向には大きくなる．また、各変数を変えた場合の応力軸跡の変化についても検討し、本研究のモデルが既存モデルより多様な応力場を表現できることを確認した．

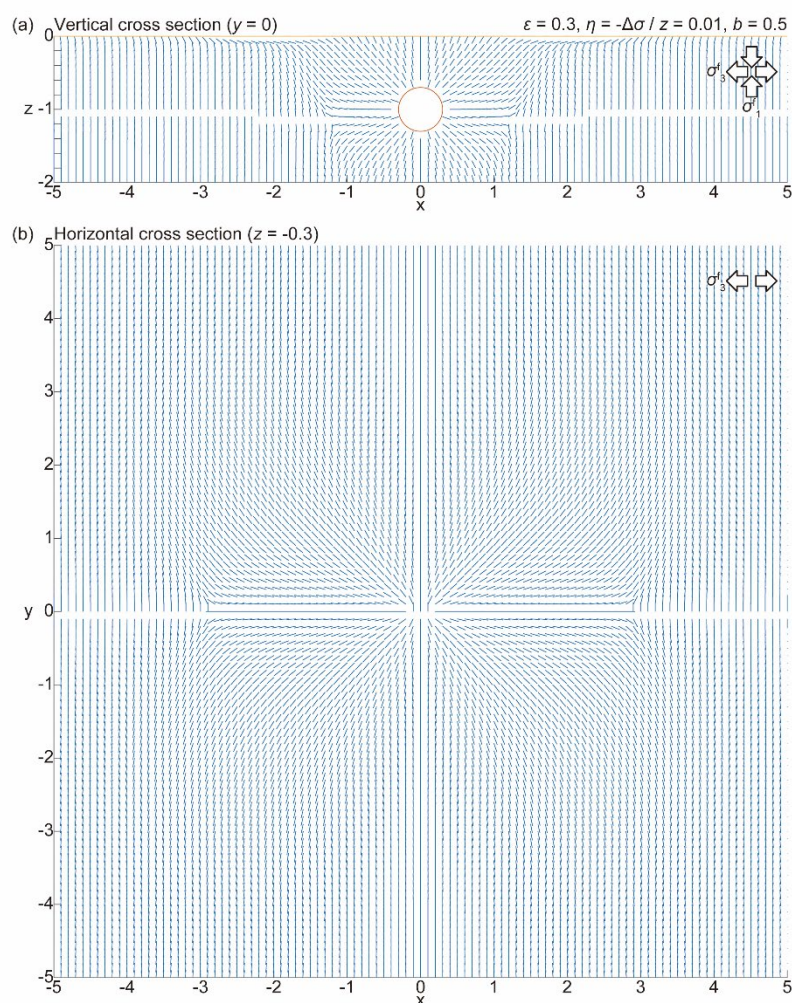


図 3-2 本研究が提案する応力場モデルに基づく応力軸跡。
(a) 鉛直断面 ($y=0$) および (b) 水平断面 ($z=-0.3$) を示す。

3.2 応力場推定手法適用のための事例の選定

応力場逆解析（全体計画 3）を適用する地質時代の岩脈群を選定した。逆解析の適用に好ましい条件としては、流体供給源の存在が示唆されること、多数の岩脈の方位データから応力の空間変化を検出できることが挙げられる。予察的な調査、文献調査、および他研究者からの情報収集によって、飛騨金山地域、和歌山県白浜町、串本町、兵庫県豊岡市、熊本県天草市などを逆解析手法の適用候補地として検討するに至った。

4. 2024 年度研究実施内容

4.1 2024 年度の計画、実施方法

2024 年度の計画、および実施方法は以下の通りである。

4.1.1 実データの測定と応力場の把握

紀伊半島南西部に分布する中新統田辺層群に貫入した碎屑岩脈を対象に、実際の流体供給源周辺の応力場の推定を行う。調査を行う和歌山県田辺市の鳥の巣地域は、一部の区画において先行研究で碎屑岩脈の方位データが収集されている（安邊・佐藤，2021）。そこで本研究では、応力場の把握に必要な周辺地域についてのみデータの補充を行う。応力場の推定では、調査地域を区画分けし、各区画に働いた応力を推定する。

4.1.2 応力場逆解析手法の実装と適用

田辺層群の鳥の巣地域で推定した区画ごとの応力状態、および区画の位置を基に、この地域の応力場に影響を与えた流体供給源に関するパラメーター、および広域応力に関するパラメーターを求める応力場逆解析手法を、MATLAB を用いて実装・適用する。

4.1.3 モデル検証・応力場逆解析手法適用のための事例の選定

新たな流体供給源周辺の応力場モデルの検証（全体計画 2）のための事例を選定する。モデルの検証に好ましい条件としては、マグマだまりの構造や周辺の応力場または地殻変動が高精度で推定可能であることが挙げられる。また 2023 年度に引き続き、応力場逆解析手法の適用（全体計画 3）のための事例を選定する。逆解析の適用に好ましい条件としては、流体供給源の存在が示唆されること、多数の岩脈の方位データから局所的な応力の空間変化を検出できることが挙げられる。以上のデータを収集するため、文献の洗い出しや他研究者からの情報収集、予察的な野外調査を行う。

4.2 2024 年度の成果内容

4.2.1 実データの測定と応力場の把握

田辺層群（図 4-1）は前期～中期中新世の前弧海盆堆積物である（田辺団体研究グループ, 1984）。田辺層群には多数の泥ダイヤピルや碎屑岩脈が貫入している（清水, 1985）。これらは未固結ないし半固結状態の堆積物中に泥漿が注入したものと考えられる。泥ダイヤピルは碎屑岩脈を形成した流体の供給源にあたり、火山

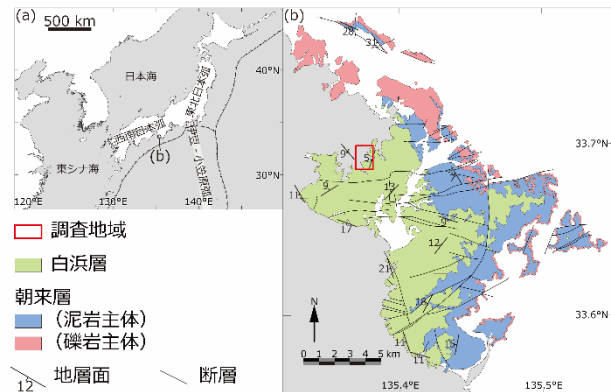


図 4-1 (a) 日本周辺の概況, および (b) 田辺層群の地質図。

活動におけるマグマだまりと火成岩脈に相当する。これら碎屑性貫入岩周辺の応力場はマグマだまり周辺のそれに対比できると期待できる。本研究では、鳥の巣地域（図 4-1b の赤枠内）において、碎屑岩脈の方位データを収集する。収集した方位データは、数 10～数 100 m 規模の区画ごとに応力逆解析手法（混合ビンガム分布法；Yamaji and Sato, 2011）を適用し、各区画に働いた応力を推定する。これにより、調査地域全体での応力場を把握する。

各区画の応力逆解析結果を図 4-2 に示す。調査地域全体での岩脈の卓越方向は北北東-南

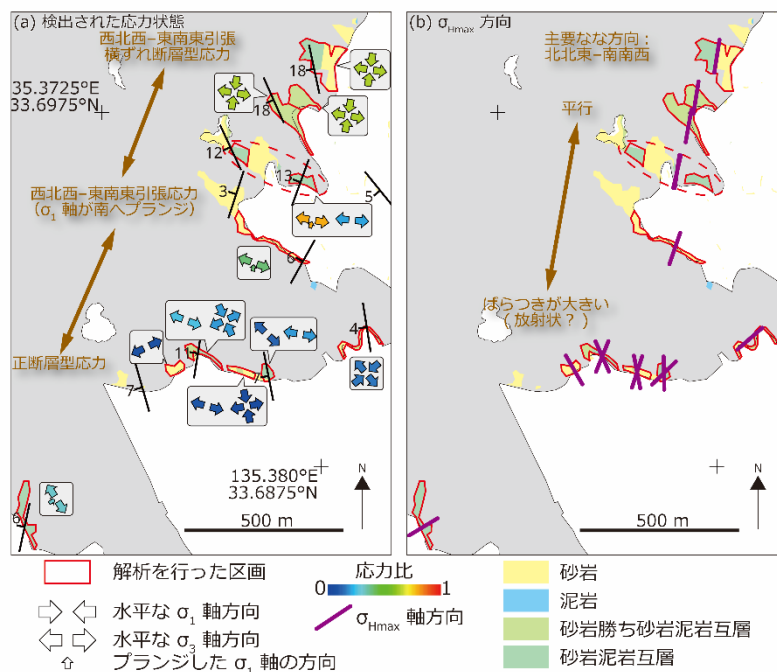


図 4-2 (a) 各区画で検出された応力状態, および (b) 水平面内最大圧縮方向。

南西方向だった。これは、調査地域全体に北北東-南南西方向の水平面内最大圧縮 (σ_{Hmax}) 軸を持つ応力が働いたことを示唆する。 σ_{Hmax} 軸の方向のばらつきに注目すると、調査地域北部ではよく揃っているのに対し、南部ではばらつきが大きく、放射状の分布を示すようにも見える。また、岩脈の貫入密度に注目すると、北から南へ向かうにつれて大きくなる (図 4-3)。 σ_{Hmax} 軸方向のばらつきおよび岩脈の貫入密度の空間変化の特徴は、砕屑

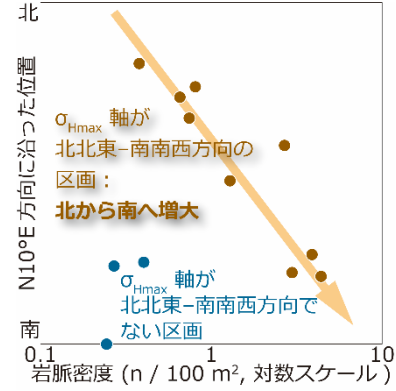


図 4-3 岩脈の貫入密度と区画の位置の関係。

岩脈を形成した泥漿の供給源が調査地域南部に存在することを示唆する。応力の型については、南から北へ向かって正断層型応力、最大圧縮主応力 (σ_1) 軸が南へプランジした応力、横ずれ断層型応力の順に変化する傾向がある。McTigue (1987) の応力場モデルに基づく、流体供給源周辺の応力は供給源から離れるに従って引張場から圧縮場へ遷移することが知られている (Konstantinou and Yeh, 2012)。また本研究で提案している応力場モデルにおいても、鉛直断面内での最大圧縮方向が鉛直、球状圧縮源方向へ傾いた方向、水平と変化し、遠方では広域応力の方向に近づくことを確認している (2023 年度成果)。調査地域における応力の型の空間変化は、南部に流体供給源が存在する場合のモデル応力場と整合的である。

以上のことから、調査地域の砕屑岩脈の方位分布は、調査地域南部に存在した流体供給源 (泥ダイアピル) に伴う局所応力と、北北東-南南西方向の σ_{Hmax} 軸を持つ広域応力の合成による応力場を反映していると考えられる。

4.2.2 応力場逆解析手法の実装と適用

調査地域の応力場をよく説明する応力場モデルを推定する手法を実装・適用した。解析に用いるデータは、区画ごとに検出された応力状態と区画の位置情報である。応力場モデルの変数を θ と仮定すると、提案したモデル (フォワードモデル) に基づき各区画に働く応力の規格化応力テンソル $\sigma^{(i)}(\theta)$ が計算できる。定性的には、 $\sigma^{(i)}$ が各区画で実際に検出された応力 $\sigma_{obs}^{(i)}$ と似たものになるようなパラメーターが適当であるとみなせる。本研究では、応力解空間 (Sato and Yamaji, 2006) において、各区画で検出された応力がモデル応力を平均方向とするフォン・ミーゼス・フィッシャー分布

$$P_{VMF}(\sigma_{obs}^{(i)} | \sigma^{(i)}) = C \exp\left(\vec{s}(\sigma^{(i)}) \cdot \vec{s}(\sigma_{obs}^{(i)})\right)$$

に従うと仮定する。ただし、 C は正規化定数、 $\vec{s}(\sigma)$ は規格化応力テンソル σ に対応する応

力解空間でのベクトルを表す．このとき，対数尤度は以下のように計算される．

$$\mathcal{L}(\theta) = \sum_{i=1}^N \log \mathcal{P}_{\text{VMF}}(\sigma_{\text{obs}}^{(i)} | \sigma^{(i)}(\theta))$$

ただし， N は区画数である．このとき，対数尤度が大きくなるパラメーターが，検出された応力場をよく説明できるとみなせる．逆解析には，マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた．これにより，対数尤度が大きいパラメーターを選択するようリサンプリングを行った．出力されるパラメーターは，流体供給源の位置 (x_c, y_c, z_c)，流体供給源の規格化半径 (ε)，砕屑岩脈貫入当時の現在の地表面の深度 (z_0)，広域応力の σ_1, σ_3 軸の方位角・伏角 ($\varphi_i, \psi_i, i=1, 3$)，広域応力の応力比 (Φ)，差応力の深度に対する増大率 ($\eta = -\Delta\sigma / z$) の 10 変数である．ポアソン比 (ν) は 0.25 とした．

逆解析の結果を図 4-4 に示す．周期関数である φ_1, φ_3 ，およびそれらと従属的な関係にある ψ_1, ψ_3 を除く多くの変数について，単峰性の分布が得られた (図 4-4a)．ただし， ε については単峰的でなくばらつきが大きい分布となり，あまり制約できなかった．広域応力は，西北西-東南東引張で応力比が中程度の正断層型応力を表すパラメーターによくまとまった分布が得られており (図 4-4b)，広域応力についてはよく制約することができた．球状圧

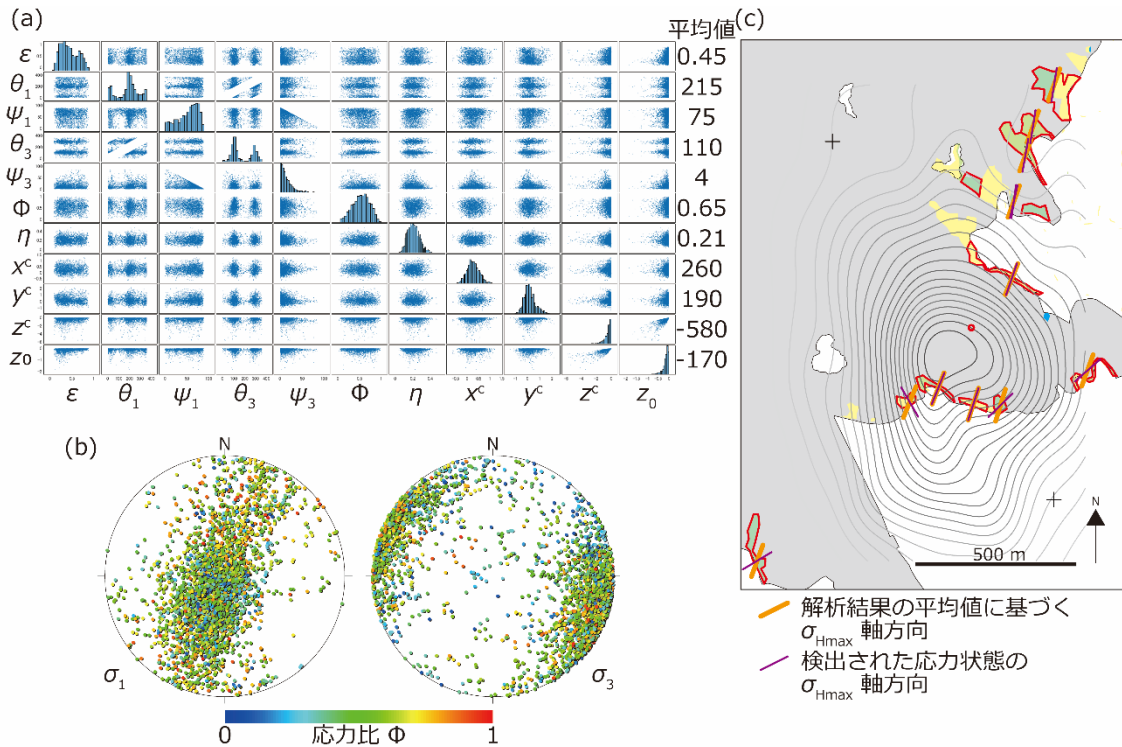


図 4-4 応力場逆解析の結果．(a) リサンプリングされた各パラメーターのヒストグラムおよび変数どうしの散布図．(b) 広域応力状態，および (c) 球状圧縮源の位置のコンターダイアグラム．

な背景を理解するためにジルコンの U-Pb 年代測定を行い，貫入年代の推定を行う．

岡山県の柵原地域では，升本・弘原海（1983）に記載された火成岩脈について，貫入方位データが収集可能かを確認するため，予察的な調査を行った．この結果，14 本の岩脈の貫入方位を測定し（図 4-7），露頭にて花崗斑岩，苦鉄質岩および細粒完晶質岩に分類した．貫入方向は多様であり，升本・弘原海（1983）と比較しても異なる方向に貫入している地点が複数あった．特に苦鉄質岩脈については母岩の泥岩と区別しづらい場所も多く，升本・弘原海（1983）とは別の岩脈を観察している可能性がある．また，岩相については露頭で判別の難しいものも多く，薄片観察を行い再分類する必要がある．ただし，本年度の調査によって岩脈データが取得できることが分かった一方，露頭の舗装などによって観察ができなくなったと思われる場所も多く，応力場逆解析に十分な数の岩脈データを収集できるかは不明である．従って，本地域は未だ応力場逆解析手法の適用候補地であるものの，来年度は飛騨金山地域や後述の潮岬地域などのより有望な地域を優先して調査を行う．

和歌山県串本町では，三宅（1981）や Haji et al. (2022) で記載・測定された岩脈群について，方位分布が空間的に変化するかを検証するため，潮岬地域の海岸露頭において岩脈の方位および位置情報を収集した．潮岬・大島地域には，噴出岩類と貫入岩類とが密接に伴った火成複合岩体が分布している（三宅，1981）．三宅（1981）は潮岬地域全体で岩脈の卓越方向を報告しているものの，個々の貫入方位が不明であること，岩脈の傾斜量を無視していることなど，3 次元的な応力逆解析を行うには問題がある．一方，Haji et al. (2022) は個々

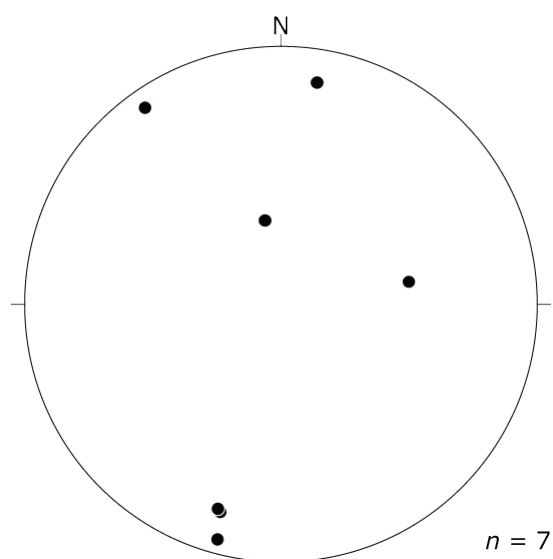


図 4-6 飛騨金山地域の岩脈データ．ステレオ投影図内のデータ点は岩脈の極を表す． n : データ数，ステレオ投影図は下半球等積投影．

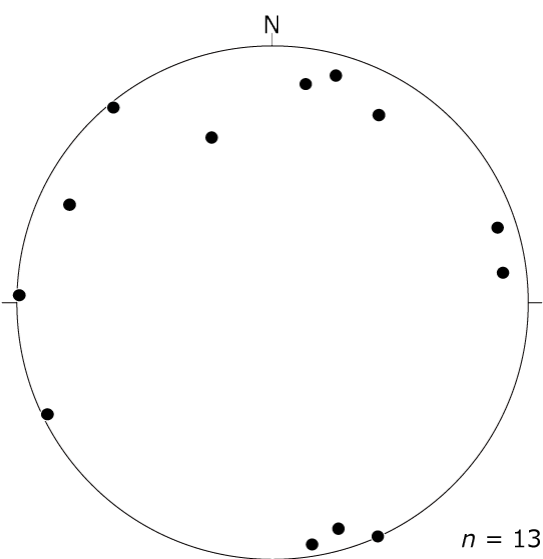


図 4-7 柵原地域の岩脈データ．ステレオ投影図内のデータ点は岩脈の極を表す． n : データ数，ステレオ投影図は下半球等積投影．

の岩脈の 3 次元方位を測定し応力逆解析を行っているが、潮岬地域で見出した岩脈群全体を単一の応力下で貫入したものと解釈しており、応力の空間変化の可能性を検討していない。潮岬沖では地震波探査断面でドーム状の構造が見いだされており (Tsuji et al., 2013), 中期中新世のマグマだまりが存在する可能性がある。従って、潮岬地域の岩脈は貫入当時のマグマだまりの影響で応力が空間的に変化していた可能性がある。本年度は 104 枚の岩脈データを収集した (図 4-8)。潮岬地域の岩脈が反映する応力場を予察的に推定するため、調査地域を 3 区画に分け、区画ごとに混合ビンガム分布法 (Yamaji and Sato, 2011) による応力逆解析を行ったところ、西部では北北西-南南東方向の軸性圧縮応力が、南西部では北東-南西引張の正断層型応力が、南東部では南北引張の正断層型応力が、それぞれ検出された。以上の結果から、 σ_{Hmax} 軸方向および応力の型とも一様ではないことが分かった。また西部と南東部の卓越方向は、三宅 (1981) で報告されている方向と大きく異なっていた。今後は海岸沿いの調査を進め、より連続的な岩脈データの収集を行う。

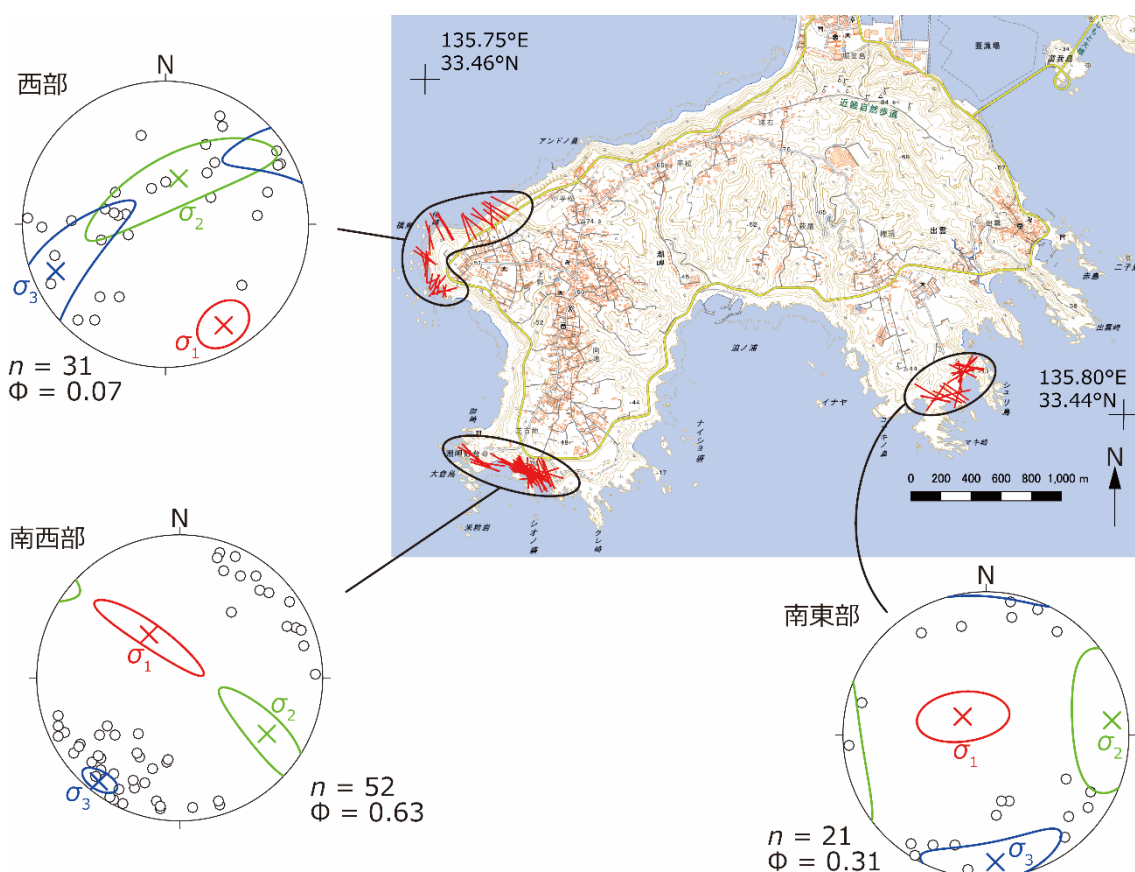


図 4-8 潮岬地域の岩脈データおよび地点ごとの応力逆解析の結果。地図内の赤線の方
向は岩脈の貫入方向を示し、長さが長いほど急傾斜であることを表す。ステレ
オ投影図内のデータ点は岩脈の極を表す。n: データ数, Φ : 応力比。ステレオ
投影図は下半球等積投影。

5. まとめ

本研究は、火山・火成活動の影響範囲の把握に係る調査・評価技術の高度化、特に火成岩脈の伸展に伴う地殻浅部におけるマグマの長距離水平移動による火山・火成活動の影響範囲を予測するための理論的枠組みの構築と活用を目的としている。全体計画として、(1) 広域応力場を仮定した新たな流体供給源周辺の応力場モデルの構築、(2) 若い火山・火成活動を事例とした新たな応力場モデルの妥当性の検証、(3) 過去の岩脈群を利用した応力逆解析手法の開発・適用を行う。

本年度は、中新統田辺層群中の碎屑岩脈を対象として、実際の流体供給源周辺の応力場を推定した。その結果、調査地域の応力場が南部に存在した流体供給源に伴うものであると解釈できることが分かった。さらに、新たな応力場モデルに基づく応力場逆解析を行い、広域応力状態を制約することができた。また、逆解析の適用事例選定のための予想的な調査および他の研究者からの情報収集を行い、新たに2つの逆解析適用地域、および1つの応力場モデルの妥当性検証事例の候補を見出した。

謝辞

本年度の調査にあたっては、日本原子力研究開発機構の西山成哲氏、福田将眞氏、山田来樹氏にご協力いただいた。日本原子力研究開発機構の中嶋 徹氏（現、富山大学）、京都大学大学院理学研究科の成瀬 元氏には、応力場逆解析手法に関する貴重なご意見を賜った。京都大学防災研究所附属火山活動研究センターの山本圭吾氏および同センターの皆様には、桜島火山周辺の水準データをご提供いただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

1. 安邊啓明・佐藤活志 (2021) 泥ダイアピル周辺の碎屑岩脈の方位解析による広域応力と局所応力の検出：中新統田辺層群の例。地質学雑誌, **127**, 709–725.
2. Delaney, P. T., Pollard, D. D., Ziony, J. I., Mckee, E. H. (1986) Field relations between dikes and joints: Emplacement processes and paleostress analysis. *Journal of Geophysical Research*, **91**, 4920–4938.
3. Haji, T., Yamaji, A., Iwano, H., Danhara, T., and Hirata, T. (2022) Extensional stress accompanied by Miocene near-trench magmatism in the southern Kii Peninsula, SW

- Japan. *Journal of Asian Earth Sciences*, **235**, 105266.
4. 経済産業省資源エネルギー庁 (2023) 文献調査段階の評価の考え方.
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/radioactive_waste/20231102_literature.html
 5. Konstantinou, K. I., Yeh, T.-Y. (2012) Stress field around the Coloumbo magma chamber, southern Aegean: Its significance for assessing volcanic and seismic hazard in Santorini. *Journal of Geodynamics*, **54**, 13–20.
 6. 升本真二・弘原海清 (1983) 岡山県柵原地域の古第三紀岩脈群について : 岩脈法による広域・地域応力場. 地質学雑誌, **89**, 87–97.
 7. McTigue, D. F. (1987) Elastic stress and deformation near a finite spherical magma body: Resolution of the point source paradox. *Journal of Geophysical Research*, **92**, 12931–12940.
 8. 三宅康幸 (1981) 和歌山県潮岬火成複合岩体の地質と岩石. 地質学雑誌, **87**, 383–403.
 9. 水谷伸治郎・小井土由光 (1992) 金山地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 111p.
 10. Mogi, K. (1958) Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, **36**, 99–134.
 11. Odé, H. (1957) Mechanical analysis of the dike pattern of the Spanish Peaks area, Colorado. *Bulletin of the Geological Society of America*, **68**, 567–576.
 12. Sato, K., Yamaji, A. (2006) Embedding stress difference in parameter space for stress tensor inversion. *Journal of Structural Geology*, **28**, 957–971.
 13. 清水博行 (1985) 紀伊半島田辺層群中の含礫泥岩ダイアピル. 地質学雑誌, **91**, 691–697.
 14. 田辺団体研究グループ (1984) 紀伊半島田辺層群の層序と構造. 地球科学, **38**, 249–263.
 15. Tsuji, T., Kodaira, S., Ashi, J., Park, J.-O. (2013) Widely distributed thrust and strike-slip faults within subducting oceanic crust in the Nankai Trough off the Kii Peninsula, Japan. *Tectonophysics*, **600**, 52–62.
 16. 脇田浩二・小井土由光 (1994) 下呂地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図

幅), 地質調査所, 79p.

17. 山田直利 (1961) 加子母地域の地質. 地域地質研究報告 (5 萬分の 1 地質図幅), 地質調査所.
18. Yamaji, A., Sato, K. (2011) Clustering of fracture orientations using a mixed Bingham distribution and its application to paleostress analysis from dike or vein orientations. *Journal of Structural Geology*, **33**, 1148–1157.

2024 年度 外部発表

【学術論文】

該当なし.

【口頭発表】

1. Noriaki Abe, Spatial transition from radial compression around fluid supply source to regional stress: An example of clastic dikes intruding into the Miocene Tanabe Group. AGU24, 2024 年 12 月 13 日 (ポスター).

別添資料 2

2024 年度人材育成プログラム

モニターアンケート

2024 年度人材育成セミナー

『地層処分技術の視野を広げよう！』～国際協力と分野間連携～

アンケート

あなたのプロフィールについて

1. お名前をご記入下さい。

2. 最終学歴を教えてください。

選択肢：①「学士」、②「修士」、③「博士」、④「答えたくない」

1 日目のプログラムについて

1 日目は午前中に我が国の地層処分に関する動向、諸外国の地層処分に関する動向の話聞き、諸外国が長い時間をかけ地道に地層処分事業を進めており、我が国の地層処分事業は今後長い道のりであることを理解したうえで、NUMO の講演会を聴講するという流れでした。

3. NUMO の講演会での諸外国の講師の話を理解したり、パネルディスカッションでのテーマについてご自身で考えるうえで、我が国と諸外国の地層処分の状況を知っておいたことが役に立ちましたか。

選択肢：①「役に立った」、②「やや役に立った」、③「どちらでもない」、④「あまり役に立たなかった」、⑤「役に立たなかった」

4. 我が国や諸外国の状況に関連して、さらに聞きたい、知りたいと思った内容がありましたら、お聞かせください

動画教材についてお尋ねします。

今回のセミナーでは動画教材を用いた情報提供を行いました。

5. 動画「放射性廃棄物対策：地層処分選択の背景」を視聴して内容を理解できましたか。

選択肢：①「理解できた」、②「やや理解できた」、③「あまりどちらでもない」、④「あまり理解できなかった」、⑤「理解できなかった」

6. 上記の動画教材では、分かりやすかった点やわかりにくかった点を教えてください。

7. 動画「地層処分の安全確保とセーフティケース」を視聴して、内容を理解できましたか。

選択肢：①「理解できた」、②「やや理解できた」、③「あまりどちらでもない」、④「あまり理解できなかった」、⑤「理解できなかった」

8. 上記の動画教材で、分かりやすかった点やわかりにくかった点を教えてください。

9. 講師による対面での座学・講義に代わり、動画教材を学習することについてどのように思いますか。ご自身の考えに最も近いものをお選びください。当てはまるものが無い場合には、その他に自由にご意見をお書きください。

選択肢：①「基礎的な内容であれば動画教材で問題ない」、②「専門的な内容でも動画教材で問題ない」、③「動画教材の場合、質問を受け付け、別途回答するシステムなどがあれば、専門的な内容でも問題ない」、④「どのような内容・システムでも対面での座学・講義でないと十分な学習はできない」、⑤「その他」

10. 動画教材視聴後に行ったグループワークは、動画教材の内容の理解を深めることや考えを発展させることに役立ちましたか。

選択肢：①「役に立った」、②「やや役に立った」、③「あまり役に立たなかった」、④「役に立たなかった」

11. 具体的にどのような点が役立ったか、または役立たなかったか教えてください。

グループワークⅠとそのために行った座学についてお尋ねします。

12. 「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件（隆起・侵食）及び（熱環境）」で学習したことは、グループワークⅠでの作業に役立ちましたか。

選択肢：①「役に立った」、②「やや役に立った」、③「どちらでもない」、④「あまり役に立たなかった」、⑤「役に立たなかった」

13. 上記について、具体的にどのようなことが役に立ちましたか、役に立ちませんでしたか。

14. 上記の座学に関連して、さらに聞きたい、知りたいと思った内容がありましたら、お聞かせください。

15. グループワークⅠの課題設定は、地質分野が専門でないメンバーを含むグループで議論を行ううえで適切なものでしたか（専門でない人が置き去りになったりしていなかったか、活発に議論ができたかなど）。

選択肢：①「適切であった」、②「やや適切であった」、③「どちらでもない」、④「あまり適切でなかった」、⑤「適切でなかった」

16. 上記について、そのように回答した理由をお書きください。

グループワークⅡとそのために行った座学についてお尋ねします。

17. 「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件（水理場）、（力学場）及び（化学場）」で学習したことは、グループワークⅡでの作業に役立ちましたか。

選択肢：①「役に立った」、②「やや役に立った」、③「どちらでもない」、④「あまり役に立たなかった」、⑤「役に立たなかった」

18. 上記について、具体的にどのようなことが役に立ちましたか、役に立ちませんでしたか。

19. 上記の座学に関連して、さらに聞きたい、知りたいと思った内容がありましたら、お聞かせください。

20. グループワークⅡの課題設定は、地質分野が専門でないメンバーを含むグループで議論を行ううえで適切なものでしたか（専門でない人が置き去りになったりしていなかったか、活発に議論ができたかなど）。

選択肢：①「適切であった」、②「やや適切であった」、③「どちらでもない」、④「あまり適切でなかった」、⑤「適切でなかった」

21. 上記について、そのように回答した理由をお書きください。

22. グループワークⅢの課題設定は、地質分野が専門でないメンバーを含むグループで議論を行ううえで適切なものでしたか（専門でない人が置き去りになったりしていなかったか、活発に議論ができたかなど）。

選択肢：①「適切であった」、②「やや適切であった」、③「どちらでもない」、④「あまり適切でなかった」、⑤「適切でなかった」

23. 上記について、そのように回答した理由をお書きください。

ランチョンセミナーについて

24. ランチョンセミナーについての感想をお聞かせください。

グループでの作業について

今回のセミナーではグループ毎での作業を行いました。グループでの作業に対する感想について伺います。

25. セミナーを通じて、ご自身は「主体的」にグループの作業に関われたと思いますか。

選択肢：①「主体的に関わった」、②「やや主体的に関わった」、③「どちらでもない」、④「あまり主体的に関わっていなかった」、⑤「主体的に関われなかった」

26. そのように感じた理由をお書きください。

27. セミナーを通じて、グループでの作業は活発だったと思いましたか。

選択肢：①「活発だった」、②「やや活発だった」、③「どちらでもない」、④「やや低調だった」、⑤「低調だった」

28. グループでの作業が活発になった要因やきっかけについて、あなたの気づきを教えてください。

29. 異なる専門家とのグループでの作業を経験したことで、処分技術やご自身の今後の地層処分事業へのかかわりなどについて新たな気づき・発想はありましたか。

選択肢：①「あった」、②「少しあった」、③「どちらでもない」、④「あまりなかった」、⑤「なかった」

30. 新たな気づき・発想がある場合、具体的にどのようなものかお書きください。

セミナーの全体について

今回のセミナープログラムは、グループワークに取り組むための基本的な知識を学習しグループワークを行うという流れで構成していました。

31. セミナーのプログラム構成はいかがでしたか。

選択肢：①「とても良かった」、②「やや良かった」、③「普通」、④「あまり良いとは言えない」、⑤「良いとは言えない」

32. なぜそう思いましたか。

33. セミナーの進行はいかがでしたか。

選択肢：①「とても良かった」、②「やや良かった」、③「普通」、④「あまり良いとは言えない」、⑤「良いとは言えない」

34. なぜそう思いましたか。

35. 2日目及び3日目のセミナーでは、閉鎖後長期の地質環境に求められる要件をテーマとしていました。このテーマ設定はご自身の地層処分にに関する知識獲得、グループでの作業という観点でどう思いましたか。

選択肢：①「とても良かった」、②「やや良かった」、③「どちらともいえない」、④「あまり良いとは言えない」、⑤「良いとは言えない」

36. なぜそう思いましたか。

37. 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はありますか。(複数選択可)

選択肢：①「2019 人材育成セミナー（サブタイトルなし）〔千葉県成田市〕」、②「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〕」、③「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〕」、④「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「2023『地層処分研究開発を知る！』～10年後のあなたをイメージする～」

38. 以前に参加したセミナーと比べて、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（以前開催のセミナーに参加された方のみ）

以上

二次利用未承諾リスト

令和6年度放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務） 報告書

令和6年度放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務）

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

頁	図表番号	タイトル
(別添1) 研究報告1-6	表1	FA3, FA8, FA10試料の化学組成
(別添1) 研究報告1-7	図1	(a) 未処理(NT), エージング(AG), およびCaO添加条件における液相中のSe濃度, (b) CaO添加後のFA10のSEM写真
(別添1) 研究報告1-11	図2	FAの浸漬試験における液相のpH
(別添1) 研究報告1-12	図3	浸漬試験における液相中の有害成分 (B, F, As, Se, Cr(VI)) 濃度
(別添1) 研究報告1-13	図4	浸漬試験における液相中の主要成分 (Si, Mg, Al, Ca) 濃度
(別添1) 研究報告1-15	図5	IO3-およびSeO42-吸着実験後の液相のpH
(別添1) 研究報告1-15	図6	IO3-吸着実験における液相中のI濃度
(別添1) 研究報告1-15	図7	SeO42-吸着実験における液相中のSe濃度
(別添1) 研究報告1-16	図8	(a) I- 1 mM, (b) SeO32- 1 mMを用いた吸着実験後の液相中のIおよびSe濃度
(別添1) 研究報告1-17	図9	セメント混合試料におけるXRD分析結果
(別添1) 研究報告1-18	図10	セメント混合試料の浸漬試験における液相のpHの経時変化
(別添1) 研究報告1-19	図11	セメント混合試料の浸漬試験における液相中の有害成分 (B, F, As, Se, Cr(VI)) 濃度の経時変化
(別添1) 研究報告1-20	図12	セメント混合試料の浸漬試験における液相中の主要成分 (Si, Al, Na, K, Ca, SO42-) 濃度の経時変化
(別添1) 研究報告1-21	図13	FAの浸漬試験における液相のpHの経時変化
(別添1) 研究報告1-22	図14	FAの浸漬試験における液相中の有害成分 (B, F, As, Se, Cr(VI)) 濃度の経時変化
(別添1) 研究報告1-23	図15	FAの浸漬試験における液相中の主要成分 (Si, Al, Na, Mg, K, Ca, SO42-) 濃度の経時変化
(別添1) 研究報告2-1	図1-1	地層処分システム概念図及ぼす崩壊熱の影響
(別添1) 研究報告2-2	図1-2	地下水浸入の概念図
(別添1) 研究報告2-3	表 2-1	模擬条件の計画まとめ表
(別添1) 研究報告2-5	図3-1	蒸留水および人工海水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの平衡膨潤圧

頁	図表番号	タイトル
(別添1) 研究報告2-6	図3-2	蒸留水および人工海水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの水分拡散係数
(別添1) 研究報告2-7	図3-3	温度履歴の異なるベントナイトのメチレンブルー吸着量
(別添1) 研究報告2-8	表4-1	2024年度の検討項目と実施スケジュール
(別添1) 研究報告2-8	図 4-1	クニゲルV1ベントナイトの様子
(別添1) 研究報告2-9	表 4-2	クニゲルV1の基本的性質
(別添1) 研究報告2-9	表 4-3	人工海水の主な組成
(別添1) 研究報告2-10	図 4-2	供試体作成の概念図
(別添1) 研究報告2-10	図 4-3	温度履歴実験の概念図
(別添1) 研究報告2-11	表 4-4	一部の国で採用されている緩衝材の制限温度
(別添1) 研究報告2-11	図 4-4	膨潤圧実験の様子
(別添1) 研究報告2-12	図 4-5	モンモリロナイト2:1構造と底面間隔
(別添1) 研究報告2-13	図 4-6	水分拡散実験の概念図
(別添1) 研究報告2-13	表 4-5	浸潤試験の試験条件
(別添1) 研究報告2-14	図 4-7	供試体の分割方法
(別添1) 研究報告2-15	図 4-8	膨潤圧のモニタリング実験の概念図
(別添1) 研究報告2-16	図 4-9	蒸留水で飽和させたベントナイトの膨潤圧曲線
(別添1) 研究報告2-17	図 4-10	人工海水で飽和させたベントナイトの膨潤圧曲線
(別添1) 研究報告2-18	図 4-11	蒸留水および人工海水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの平衡膨潤圧
(別添1) 研究報告2-19	図 4-12	蒸留水で飽和させた温度履歴150日間のベントナイトの水分分布
(別添1) 研究報告2-19, 20	図 4-13	蒸留水で飽和させた温度履歴300日間のベントナイトの水分分布
(別添1) 研究報告2-20	図 4-14	人工海水で飽和させた温度履歴150日間のベントナイトの水分分布
(別添1) 研究報告2-21	図 4-15	人工海水で飽和させた温度履歴300日間のベントナイトの水分分布
(別添1) 研究報告2-22	図 4-16	蒸留水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの θ と χ の関係
(別添1) 研究報告2-23	図 4-17	人工海水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの θ と χ の関係
(別添1) 研究報告2-24	図 4-18	蒸留水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの水分拡散係数
(別添1) 研究報告2-25	図 4-19	人工海水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの水分拡散係数

頁	図表番号	タイトル
(別添1) 研究報告2-26	図 4-20	飽和溶液が水分拡散係数に及ぼす影響
(別添1) 研究報告2-27	図 4-21	温度履歴の異なるベントナイトのメチレンブルー吸着量
(別添1) 研究報告2-28	図 4-22	蒸留水飽和後の異なる温度履歴ベントナイトの底面間隔
(別添1) 研究報告2-28, 29	図 4-23	温度履歴の異なるベントナイトのSi, Al, K 含有率
(別添1) 研究報告2-30	図 4-24	蒸留水および人工海水で飽和させた温度履歴なしのベントナイトのSEM写真
(別添1) 研究報告2-31	図 4-25	膨潤圧の長期モニタリング
(別添1) 研究報告3-6	図2	花崗岩質片麻岩試料
(別添1) 研究報告3-7	図3	蛍光液浸透後の下浦砂岩, 稲田花崗岩, 荻野凝灰岩
(別添1) 研究報告3-7	図4	タイムラプス画像から推定した浸透過程.
(別添1) 研究報告3-7	図5	実験終了後の花崗岩質片麻岩
(別添1) 研究報告3-8	図6	タイムラプス画像から推定した花崗岩質片麻岩への蛍光液浸透過程
(別添1) 研究報告3-10	図9	透過波動場と透過波を震源に与えた力と平行方向に見た図
(別添1) 研究報告3-10	図10	透過波動場と透過波を震源に与えた力と垂直方向に見た図
(別添1) 研究報告3-12	表2	観測井の深さと水位
(別添1) 研究報告4-6	図1	土台とサンプルアセンブリーの写真
(別添1) 研究報告4-6	図2	採集・成形したサンプルの一例（野島断層コア）
(別添1) 研究報告4-7	図3	亀裂を含む泥質片岩のデジタルロック
(別添1) 研究報告4-8	表1	試料の亀裂性状
(別添1) 研究報告4-9	図4	各試料のフラクタル特性を示す図
(別添1) 研究報告4-11	表2	母岩の岩石物性値
(別添1) 研究報告4-12	図5	様々な電極セットアップにおける比抵抗測定の結果
(別添1) 研究報告4-13	図6	様々な電極セットアップにおける弾性波速度測定の結果
(別添1) 研究報告4-14	図7	実験装置の模式図
(別添1) 研究報告4-15	図8	弾性波速度測定用スペーサーに振り分けた番号と送信・受信点の組み合わせ
(別添1) 研究報告4-16	図9	収録した波形の例
(別添1) 研究報告4-17	図10	3Dプリンタ試料の作成時に用いた花崗岩試料の亀裂表面形状

頁	図表番号	タイトル
(別添1) 研究報告4-18	図11	高精細3Dプリンタと作成した3Dプリンタ試料
(別添1) 研究報告4-19	図12	二軸圧縮試験機
(別添1) 研究報告4-19	図13	アクリル樹脂の応力－ひずみ曲線
(別添1) 研究報告4-20	表3	実験に使用した3Dプリンタ試料の亀裂特性，素材に関する情報
(別添1) 研究報告4-21	図14	応力に対する浸透率と比抵抗の変化
(別添1) 研究報告4-22	図15	各亀裂試料の変位－応力曲線
(別添1) 研究報告4-23	図16	応力に対するP波速度の変化
(別添1) 研究報告4-23	図17	応力に対するS波速度の変化
(別添1) 研究報告4-24	図18	応力に対する接触面積の変化
(別添1) 研究報告4-25	図19	載荷過程と除荷過程のそれぞれで得られた物性値の比較
(別添1) 研究報告4-27	図20	応力変化に伴う各亀裂試料の開口幅の変化
(別添1) 研究報告4-27	図21	各亀裂試料の開口幅と浸透率の関係
(別添1) 研究報告4-28	図22	各亀裂試料の開口幅と電気比抵抗の関係
(別添1) 研究報告4-29	図23	応力変化に伴う浸透率とフォーメーションファクタの両対数グラフ
(別添1) 研究報告4-30	図24	応力変化に伴うP波速度と接触率の関係性
(別添1) 研究報告4-31	図25	P波速度の空間分布マッピングと実測定した接触面積
(別添1) 研究報告4-32	図26	比抵抗と空隙率の関係
(別添1) 研究報告5-2	図1	米国エネルギー省(DOE)による固化体の評価
(別添1) 研究報告5-3	図2	無機結晶シンロックの例
(別添1) 研究報告5-5	表1	本研究の年度別全体計画
(別添1) 研究報告5-11	図3	乳鉢を用いて試薬を混合する様子
(別添1) 研究報告5-12	図4	Ceを含有するM3ムラタイト試料の結晶構造解析結果
(別添1) 研究報告5-12	図5	MCC-1法に準拠して測定したCeを含有するM3ムラタイト試料の浸出率
(別添1) 研究報告5-13	図6	市販試薬およびUO ₂ の混合粉末の成型体
(別添1) 研究報告5-13	図7	ウランを含有するムラタイト基シンロック
(別添1) 研究報告5-14	図8	ウランを含有するムラタイト基シンロックのXRDパターン（1350℃焼成）

頁	図表番号	タイトル
(別添1) 研究報告5-14	図9	ウランを含有するM3ムラタイトの結晶構造解析結果
(別添1) 研究報告5-16	図10	(a) シンロック合成用の管状炉、(b) 焼成中の様子、 (c) ウランを含有するムラタイト基シンロックの外観写真
(別添1) 研究報告5-16	図11	ウランを含有するムラタイト基シンロックのXRDパターン (1300℃焼成)
(別添1) 研究報告5-18	図12	Mnを含まないムラタイト基シンロックのXRDパターン
(別添1) 研究報告5-18	図13	MCC-1法に準拠して測定したMnを含まないムラタイト基シンロックの浸出率
(別添1) 研究報告5-19	図14	ムラタイト基シンロックの (a) 熱拡散率および (b) 熱伝導率
(別添1) 研究報告5-21	図15	CsNO3のTG-DTA測定結果
(別添1) 研究報告5-21	図16	SPRT法により合成したパイロクロア基シンロックのXRDパターン
(別添1) 研究報告5-22	図17	MGNP法により合成したパイロクロア基シンロックのXRDパターン
(別添1) 研究報告5-22	図18	固相反応法により合成したパイロクロア基シンロックのXRDパターン
(別添1) 研究報告5-24	図19	パイロクロア基シンロック切断面中心部のSEIおよびBEI
(別添1) 研究報告5-25	図20	ジルコノライト基シンロック切断面中心部のSEIおよびBEI
(別添1) 研究報告5-26	図21	SPSおよび電気炉を用いて合成したパイロクロア基シンロックの密度
(別添1) 研究報告5-27	図22	SPSおよび電気炉を用いて合成したジルコノライト基シンロックの密度
(別添1) 研究報告5-29	図23	パイロクロア基シンロックの浸出試験結果
(別添1) 研究報告5-30	図24	パイロクロア基シンロックの有効拡散係数、浸出指数および規格化浸出率
(別添1) 研究報告5-31	図25	ジルコノライト基シンロックの浸出試験結果
(別添1) 研究報告5-32	図26	ジルコノライト基シンロックの有効拡散係数、浸出指数および規格化浸出率
(別添1) 研究報告6-3	図 1-1	本研究の全体像
(別添1) 研究報告6-5	図 2-1	全体計画
(別添1) 研究報告6-7	表 3-1	炉型・燃料条件の仮定
(別添1) 研究報告6-8, 9	表 3-2	各原子炉の設定
(別添1) 研究報告6-9	図 3-1	設備利用率の推移
(別添1) 研究報告6-10	図 3-2	プルサーマル発電におけるMOX燃料装荷量の推移
(別添1) 研究報告6-11, 12	表 3-3	各再処理での年次展開
(別添1) 研究報告6-12	表 3-4	標準的なガラス固化体の算出条件

頁	図表番号	タイトル
(別添1) 研究報告6-13～15	表 3-5	六ヶ所再処理工場運転シナリオで生じるガラス固化体の平均核種組成
(別添1) 研究報告6-15	表 3-6	主要発熱核種のインベントリ比較 (kg/本)
(別添1) 研究報告6-15	図 3-3	六ヶ所再処理工場で再処理される使用済燃料の冷却期間と重量
(別添1) 研究報告6-16	図 3-4	包括的技術報告書の条件と本研究のガラス固化体発熱量の推移
(別添1) 研究報告6-17	図 3-5	ガラス固化体発生量
(別添1) 研究報告6-17	図 3-6	処分場面積
(別添1) 研究報告6-18	図 3-7	ガラス固体数と専有面積の関係
(別添1) 研究報告6-18	図 3-8	ガラス固化体数と廃棄物含有率の関係
(別添1) 研究報告6-21	図 3-9	諸量評価の不確かさの構造
(別添1) 研究報告6-22	図 3-10	モデルV&V (Verification & Validation) の手順の概略
(別添1) 研究報告6-23	表 3-7	NMB4とORIGEN+COMSOLの解析結果の検証
(別添1) 研究報告6-24	図 3-11	浜岡原子力発電所の使用済燃料の推移
(別添1) 研究報告6-24	図 3-12	浜岡原子力発電所の使用済燃料の推移
(別添1) 研究報告6-26	図 3-13	高レベル放射性廃棄物の発生から埋設までのフロー
(別添1) 研究報告6-26	図 3-14	地層処分事業のライフサイクル (Flüeler, T. (2023)を参考に作成)
(別添1) 研究報告6-29	図 3-15	データ構造のクラス図
(別添1) 研究報告6-30	図 3-16	大規模過渡伝熱モデル外観図
(別添1) 研究報告6-31	図 3-17	大規模過渡伝熱モデル内観図 (廃棄体を配列)
(別添1) 研究報告6-32	図 3-18	奥行き方向配置個数をパラメータとした最適化検討用モデルの構築
(別添1) 研究報告6-32	図 3-19	各廃棄体に個別の発熱量を割り当てる処理の自動化機能
(別添1) 研究報告6-34	図 3-20	発熱量の異なる廃棄体の定置条件
(別添1) 研究報告6-34	図 3-21	想定した廃棄体の発熱量
(別添1) 研究報告7-9	図4-2	田辺地域の岩脈解析結果
(別添1) 研究報告7-10	図4-3	田辺地域の岩脈密度データ
(別添1) 研究報告7-11	図4-4	応力場逆解析の結果
(別添1) 研究報告7-13	図4-6	飛騨金山地域の岩脈データ

[illegible]