

技術開発成果概要 2024



2025 年 10 月
原子力発電環境整備機構

2025 年 10 月 初版発行

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記へ
お問い合わせください。

〒108-0014 東京都港区芝 4 丁目 1 番地 23 号 三田 NN ビル 2 階
原子力発電環境整備機構 技術部
電話 03-6371-4004 (技術部) FAX 03-6371-4102

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Science and Technology Department
Nuclear Waste Management Organization of Japan
Mita NN Bldg. 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

©原子力発電環境整備機構
(Nuclear Waste Management Organization of Japan) 2025

技術開発成果概要 2024

2025 年 10 月
原子力発電環境整備機構

目次

第1章 はじめに.....	1
第2章 技術開発成果の概要.....	5
2.1 地質環境の調査と評価に関する技術.....	5
2.1.1 長期的な自然現象の確率論的評価手法の高度化.....	6
2.1.2 四次元地質環境モデルの構築技術の妥当性確認.....	11
2.1.3 ボーリング試験による地質環境データ取得技術の実証（YDP-5 孔）.....	18
2.1.4 レーザー光を用いた地下水水質計測装置の開発.....	27
2.1.5 ボーリング孔の閉塞技術に係る技術開発の現状.....	31
2.1.6 サイト調査におけるデータ管理方法に関する検討.....	39
2.2 処分場の設計と工学技術の体系的な整備.....	44
2.2.1 金属製処分容器の長期腐食寿命評価技術の技術的課題の検討.....	46
2.2.2 アナログ研究を利用した地層処分システムの長期健全性の傍証とコミュニケーション への活用方法の検討.....	52
2.2.3 銅コーティングオーバーパックの製作技術の開発.....	57
2.2.4 幅広い地質環境特性における坑道の安定性と熱影響の評価.....	61
2.2.5 坑道の耐震性評価手法の整備に関する共同研究.....	65
2.3 閉鎖後長期の安全性の評価に関する技術の高度化.....	70
2.3.1 ガラスの長期溶解挙動評価モデルの高度化.....	72
2.3.2 セメント系材料と緩衝材との相互作用による長期変質挙動の検討.....	79
2.3.3 ベントナイトコロイド影響評価に用いるデータ取得.....	83
2.3.4 処分場の THMC（Thermal（熱的）－Hydraulic（水理学的）－Mechanical（力学的）－ Chemical（化学的））場の変遷に関する解析評価技術の高度化.....	89
2.3.5 地下浅層を含む地表環境の特徴をより詳細に考慮した生活圏評価モデルの構築.....	94
2.3.6 TRU 廃棄物処分場に使用するセメント系材料の状態評価に関する検討.....	100
2.3.7 割れ目系岩盤を対象とした物質移行モデルの妥当性確認手法.....	105
2.3.8 割れ目を有する堆積岩を対象とした物質移行モデルの構築.....	112
2.3.9 不均質場における三次元解析ビッグデータの機械学習.....	118
2.3.10 サイト調査を反映した核種移行パラメータ設定の方法論の検討及びデータ拡充.....	124
2.3.11 安全評価情報管理ツールの高度化.....	127
2.4 技術マネジメント.....	132
2.4.1 幌延国際共同プロジェクトを活用した技術の実証.....	134
第3章 おわりに.....	142

第1章 はじめに

我が国における地層処分技術の開発は、国及び関係研究機関が進める研究開発と、その成果等を取り入れて地層処分実施主体である原子力発電環境整備機構（以下、「NUMO」という）が実施する技術開発によって進められている。これらを進めるうえで、我が国全体の開発計画として5年ごとに「地層処分研究開発に関する全体計画¹」（現行の計画期間は令和5年度～令和9年度（以下、「全体計画」という））が取りまとめられている。NUMOはこれを受けて、中期的な計画として「地層処分事業の技術開発計画²」（現行の計画期間は2023年度～2027年度（以下、「中期技術開発計画」という））を作成し、これらに沿って国や関係研究機関との適切な役割分担と協力のもと、国内外の関係研究機関、大学及び海外の地層処分実施主体との共同研究や地下研究施設を活用した国際共同プロジェクト等への参画、国内の産業界への委託を通じ、最終処分事業の安全な実施、経済性及び効率性の向上等を目的とする技術開発を進めている。このように、NUMOは研究開発を通じて得られた国内外の英知を統合して最新の科学的知見を反映させ、地層処分を安全に実施するための技術基盤を築いている。

2020年11月から開始した北海道の寿都町及び神恵内村の文献調査においては、このようにして蓄積してきた技術基盤を活用して調査を行うとともに、「文献調査段階の評価の考え方（案）」を作成した。本案が国の審議会及び意見公募を経て、国の資料として公表（2023年11月）された「文献調査段階の評価の考え方」に基づき、文献調査報告書（案）を取りまとめて公表し³（2024年2月）、数回の審議会での意見を反映し、修正・取りまとめた⁴（2024年8月）。その後「北海道寿都郡寿都町及び北海道古宇郡神恵内村における文献調査の報告書及び要約書（以下、「文献調査報告書等」という）」を作成し、寿都町長及び神恵内村長へ提出するとともに文献調査報告書等の縦覧・説明会の開催・意見書の提出に関する公告を実施した（2024年11月）。寿都町、神恵内村のほか、総合振興局及び振興局所在自治体や北海道内でご希望いただいた自治体などで文献調査報告書等に関する説明会を実施した（2024年11月～2025年2月）。2025年3月に文献調査報告書等の縦覧期間、意見書提出期限の延長に関する変更公告を実施し、2025年4月に文献調査報告書等の縦覧及び意見募集を終了した。

2024年4月には玄海町議会本会議で文献調査の受入れを求める請願書が採択されたことを受け、翌月国から文献調査の実施を求める申入れがあり、町長がこれを受諾する意向を表明した。2024年6月からNUMOは玄海町における文献調査を開始した。

2018年11月に処分場の立地サイトを特定しない段階におけるセーフティケースとして「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－（レビュー版）」と題する技術報告書を取りまとめた。その後、この技術報告書は、日本原子力学会によるレビュー結果⁵等を踏まえ改訂し、2021年2月に公表⁶している（以下、「包括的技術報告書」という）。公表後は、その内容を広く社会に向けて発信するとともに、様々な専門家等とのコミュニケーションに取り組んでいる。また、国際社会に向けて同報告書の英語版を公開し、技術的妥当性及び技術的信頼性について経済協力開発機構／原子力機関（以下、「OECD/NEA」という）

1 経済産業省ホームページ (https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chiso_shobun/pdf/20230324_1.pdf)

2 NUMO ホームページ (https://www.numo.or.jp/technology/technical_plan/pdf/TR-23-01.pdf)

3 経済産業省ホームページ

(https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/radioactive_waste/geological_disposal/001.html)

4 経済産業省ホームページ (https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/radioactive_waste/005.html)

5 日本原子力学会ホームページ (https://www.aesj.net/sp_committee/com_numo)

に国際レビューを依頼した。そのレビュー結果を取りまとめた報告書⁷が 2023 年 1 月、その日本語翻訳版⁸が 2023 年 5 月に OECD/NEA のウェブサイト上に公表されている。国際レビュー報告書では、「NUMO は具体的なサイトでの評価に使用される方法論とツールを含めて国際的な慣行と整合したセーフティケースを開発するための能力と成熟度を有している」、「日本の地質環境を考慮して地層処分の実現可能性を示す要素が実証されている」といった評価とともに、今後セーフティケースを段階的に発展させていくための提言などが示されている。NUMO は OECD/NEA のレビューで示された提言等について、これを着実に活かしていくための対応を取りまとめ、NUMO ホームページ上に公表している⁹ (2023 年 6 月)。

以上のように、個々の研究開発や技術開発成果を統合してセーフティケースを作成する過程や、セーフティケースの外部レビューからは、地層処分事業の進展に応じて計画的かつその段階において必要な技術を開発するための多くの貴重な示唆を得ている。これらを通じて明らかとなった技術開発上の課題については適宜、国の全体計画や NUMO の中期技術開発計画に反映させ、地層処分の安全な実施にとって主要な三つの技術分野（「2.1 地質環境の調査と評価に関する技術」、「2.2 処分場の設計と工学技術の体系的な整備」、「2.3 閉鎖後長期の安全性の評価に関する技術の高度化」と、「2.4 技術マネジメント」を加えた計四つの分野において、個々の取組みを具体的に示している。NUMO は、これらの取組みにおいて技術分野内及び分野間でどのように連携し、それらの成果を中期技術開発計画の最終年度までに統合して安全な地層処分の実現に反映させるのかに留意しつつ、個々の技術開発間の関係性を見える化しながら技術開発に取り組んでいる（図 1 参照）。

NUMO は、技術開発成果を個別の技術報告書（NUMO-TR シリーズ）に取りまとめるほか、上記の包括的技術報告書の更新に反映させていく。さらに、各種の学協会や学術雑誌・科学雑誌への投稿や、様々な研究会・講演会、NUMO 主催のオンライン説明会等を活用し、これらの成果を広く社会に発信していく。本書は、こうした情報発信の一環として、地層処分に関わりの深い専門家や地層処分の科学的・技術的根拠に関心の高い方々などを対象に、セーフティケースへ統合していくことを目的として進めている上記四つの分野における技術開発の現状や動向を概略的に把握していただくために 2021 年度から作成しているもので、2024 年度の成果を簡潔に取りまとめたものである。

今後も年度ごとに同様の報告を継続して公表し、地層処分に関する技術開発の動向や取り組むべき課題等について最新の情報を提供していく計画である。

地層処分事業の実現にあたっては、技術開発によって、地層処分システムとその将来にわたる時間的変遷に関する空間的・時間的不確実性を把握し、継続的に不確実性を低減していくことで技術的な信頼性を向上させていくことが重要である。NUMO は、中期技術開発計画に従い、科学技術的な視点での信頼性（technical reliability）を高め、それを基盤として地層処分の安全性に関する様々なステークホルダーの納得感（confidence）をさらに向上させるため、今後も技術開発に継続的に取り組んでいく。

最後に、本書の作成にあたり、共同研究や委託等を通じて技術開発に多大なご支援・ご協力をいただいた研究機関や大学、企業等の関係者には、ここに記して深く感謝の意を表する。

（編集：村上義揮，藤木美千代，西崎 耀，地井桐理子，大木鈴々音）

7 OECD/NEA ホームページ (https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_77138/the-nuclear-waste-management-organization-of-japan-s-pressing-safety-case-based-on-the-site-descriptive-model-an-international-peer-review-of-the-numo-safety-case)

8 OECD/NEA ホームページ (https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_82280/-numo)

9 NUMO ホームページ (https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/pdf/20230606_houkatsu_neareviewhoukoku.pdf)

国内機関

- ・ 電中研
一般財団法人 電力中央研究所, Central Research Institute of Electric Power Industry
- ・ 腐食防食学会
公益社団法人 腐食防食学会, Japan Society of Corrosion Engineering
- ・ 原子力学会
一般社団法人 日本原子力学会, Atomic Energy Society of Japan
- ・ JAEA
国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency
- ・ NUMO
原子力発電環境整備機構, Nuclear Waste Management Organization of Japan

海外機関（国名）

- ・ GTS
Grimsel Test Site, グリムゼル岩盤試験サイト（スイス）
- ・ IAEA
International Atomic Energy Agency, 国際原子力機関（オーストリア）
- ・ LBNL
Lawrence Berkeley National Laboratory, ローレンス・バークレイ国立研究所（米国）
- ・ Nagra
Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 放射性廃棄物管理共同組合（スイス）
- ・ NWMO
Nuclear Waste Management Organization, 核燃料廃棄物管理機関（カナダ）
- ・ NWS
Nuclear Waste Services, 原子力廃棄物サービス（英国）
- ・ OECD/NEA
Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency, 経済協力開発機構／原子力機関（フランス）
- ・ Posiva
Posiva, ポシヴァ社（フィンランド）
- ・ RWM
Radioactive Waste Management, 放射性廃棄物管理会社（英国）
- ・ SKB
Svensk Kärnbränslehantering AB, スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（スウェーデン）

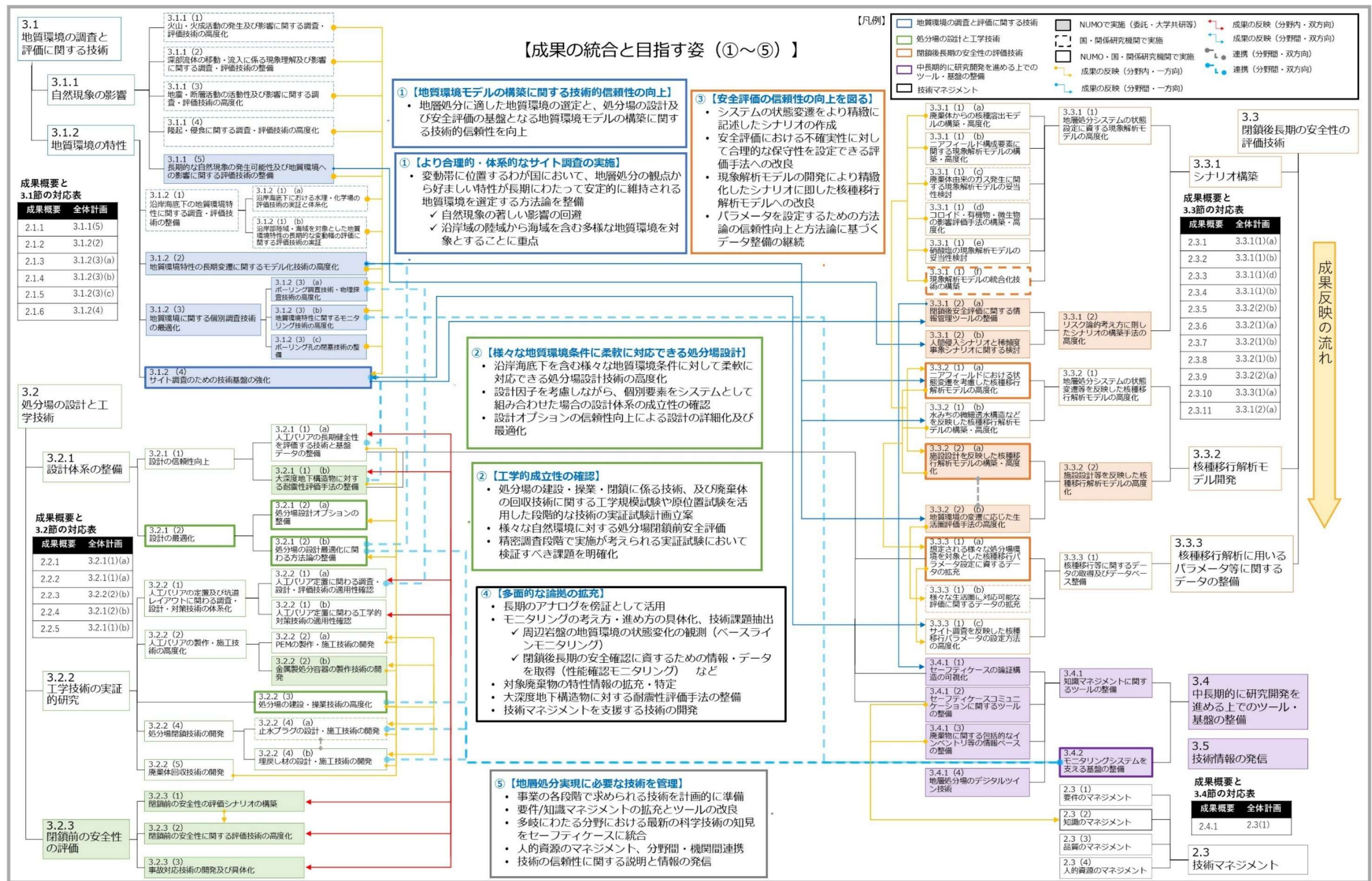


図 1 全体計画と各取組みの相互関係図

第2章 技術開発成果の概要

2.1 地質環境の調査と評価に関する技術

地層処分に適した地質環境を選定するための調査と評価に関する技術の信頼性を向上させる観点から、地層処分場に著しい影響を及ぼすと考えられる自然現象の長期的な発生可能性とその影響を予測・評価する技術や、地質環境特性の長期変遷をモデル化する技術等の高度化を進めるとともに、実際のサイト調査を見据えて、日本の多様な地質環境に対応可能な物理探査、ボーリング調査、地下水等のモニタリングといった調査技術の適用性確認や、ボーリング孔の閉塞技術の整備に関する技術開発に継続して取り組んだ。

具体的には、自然現象の著しい影響を回避したサイトにおいて、不確実性がより大きくなると考えられる将来 10 万年程度を超える期間を対象とした安全評価シナリオの設定に反映させることを目的として、自然現象の発生の可能性とその形態、それに伴う地質環境の状態変化を定量的に評価する技術を高度化するための具体的な方法について検討した (2.1.1 参照)。長期にわたる地形の変化や気候・海水準変動等に伴う地表から地下深部までの地質環境特性の三次元空間分布とその長期的変化を表現するために技術開発を進めている四次元地質環境モデルについては、構築したモデルの妥当性確認方法やモデルに内在する不確実性の評価方法に関する検討を継続した (2.1.2 参照)。

地質環境に関わる個別調査技術のうちボーリング調査技術については、電中研との共同研究により、電中研・横須賀地区においてボーリング孔を用いた孔内試験及び関連する室内試験に関する方法論や手法の最適化を目的としたボーリング試験を実施し、各種手法の有効性や適用性の確認に資するデータを取得した (2.1.3 参照)。この現場作業を通じて、品質・安全等に関する職員の気づきや受託者と協同した改善策等を共有するなど、今後の現地での調査・評価を見据えた安全、品質及び工程の確保に関する職員のマネジメント能力向上に取り組んだ。モニタリング技術に関しては、地震に伴う断層の変位とその変位が周辺岩盤に及ぼす影響の計測技術と測定されたデータを解析的に評価するためのシミュレーション技術の整備を目的とした LBNL との共同研究において、断層の変位・間隙水圧・地震波等の観測装置による連続観測を継続した。また、採水を伴わずにボーリング孔内の地下水の水質を測定する装置の開発を目的として、東京大学との共同研究により、レーザー光を用いた地下水水質計測装置の開発を進めた。具体的には、廃棄体由来のヨウ素分子や地質環境特性の把握に重要となる塩素同位体の測定分析装置の試作を行った (2.1.4 参照)。国際的に共通の課題となっている、地表から掘削したボーリング孔が地下水流動や核種移行の短絡経路等となる可能性への対策として、効果的にボーリング孔を閉塞するための技術の整備に向け、NWS (旧 RWM) 及び Nagra と、協定に基づく国際協力、及び Nagra との共同研究を実施し、閉塞材や金属プラグの原位置性能確認試験を実施した。また、ベントナイト系材料の閉塞材については、閉塞に用いるベントナイトペレットのコーティング技術の整備、ベントナイトペレットの膨潤圧及び水理特性に関する室内試験や、実規模の模擬発出試験を実施し、閉塞技術の整備に資するデータを取得するとともに今後の課題を抽出した (2.1.5 参照)。

サイトでの地質環境調査により取得するデータなどの具体的な管理の考え方に関する海外実施主体の知見の収集を継続するとともに、データマネジメントシステムの要件定義及び基本設計を実施した (2.1.6 参照)。

2.1.1 長期的な自然現象の確率論的評価手法の高度化

後藤 淳一 田窪 勇作 三枝 博光

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

これまで NUMO では、海外の地層処分及び自然現象評価の専門家とともに、将来 10 万年程度を超える期間における火山・火成活動や断層活動などの自然現象の発生とそれに伴う地質環境への影響を確率論的に評価する手法として ITM (International Tectonics Meeting) - TOPAZ (Tectonics Of Potential Assessment Zones) 手法を開発してきた (Chapman et al., 2009; NUMO, 2016)。このうち、火山・火成活動に関しては、約 100 km 四方の広範囲 (例えば東北地方など) を対象として、約 5 km 四方の領域ごとに将来 100 万年間の発生確率を算出しマップに示す手法を構築し、国際学会誌への論文公表 (Jaquet et al., 2017) などを通じて一定の評価が得られた。一方、断層活動に関しては、確率論的評価に用いる将来 10 万年以降のプレート運動の変化に伴い生じる広域的な事象やそれらに伴い生じるサイト周辺の地域的な事象の変遷に関するシナリオ (変遷シナリオ) の設定根拠などについて、国内専門家のさらなる理解と協力が必要である。また、火山・火成活動や断層活動、深部流体を含めた処分場周辺の地質環境への影響を評価する際のシナリオ (影響シナリオ) については、利用可能な情報が少なくより具体的な検討が望まれる。さらに、これらのシナリオを説明する要素 (現象、モデル、パラメータなど) を組み合わせたロジックツリーを構築し、各要素のもっともらしさを専門家の意見集約により重みづけし、それらを掛け合わせることで確率論的に評価する方法についても、特に国内の専門家との議論や協働を通じて、本手法の信頼性の向上・活用に向けた取組みが重要となっている。

これらの課題に対して、NUMO は 2023 年度までに、専門家の意見集約に基づく確率論的評価手法や、これまでの ITM-TOPAZ で検討対象としてこなかった深部流体の流入の発生可能性や影響の評価に必要な情報の収集・整理を進めた。また、専門家の意見集約に基づく確率論的評価手法について、原子力発電所の地震・断層活動や火山活動のハザード評価の分野における SSHAC (Senior Seismic Hazard Assessment Committee) 手法やベイジアンネットワーク (BN) 手法の適用事例 (亀田ほか, 2020; Aspinall et al., 2023 など) に関する情報収集・整理を進めた。

その結果、第四紀火山や活断層が分布している地点が処分地選定調査の対象となり、セーフティケースにおける稀頻度事象を対象とした安全評価を行う際には、上述の近年報告された事例を踏まえて ITM-TOPAZ 手法を高度化しておく必要があるという課題が見出された。

以上の課題等を踏まえて、これまでの ITM-TOPAZ 手法に対して、国内専門家のさらなる理解と協力が必要であるといった課題を解決し、特定サイトを対象としたセーフティケース構築における稀頻度事象の安全評価への反映、かつ国内専門家の理解獲得が可能な手法の高度化を目的として、2024 年度より 3 か年での検討に着手した。

2. 主な成果

2024 年度は、ITM-TOPAZ 手法に対する国内専門家のさらなる理解と協力が必要であるといった課題解決に向け、これまで開発に携わってきた海外専門家との議論を通じて、近年適用され始めている

説明性や透明性の高い BN 手法や SSHAC 手法などの利点を取り込み、これまでの手法を“ITM-TOPAZ-2 手法”として高度化するための具体的な方法について検討し、全体的な評価の流れを次のように提案した（図 1）。

- ① 評価スケールの設定：対象地点の評価（シナリオ設定、確率モデル構築など）を行うスケールを設定する。上述の広域及びサイト周辺の変遷シナリオを考慮するスケールは、従来の ITM-TOPAZ 手法と同様に、プレート運動の変化に伴い生じる広域的な事象を考慮する約 10 万 km²の領域と、それらに伴い生じるサイト周辺の地域的な事象の変遷を考慮する約 50 km 四方の領域を設定する。また、処分場周辺の地質環境への影響を評価する処分場変遷スケールとして約 5 km 四方の領域を設定する。
- ② 評価シナリオの設定：「変遷シナリオ」と「影響伝播シナリオ」を設定する。変遷シナリオは、従来同様にロジックツリーを用いて記述するが、その基となる現象モデルやパラメータは、国内専門家と議論しながら設定する。影響伝播シナリオは、従来の影響シナリオを発展させたものであり、隆起・沈降、侵食・堆積、海水準変動などの緩慢プロセスや、断層変位、マグマ貫入・噴火、火山性熱水・深部流体の流入などの突発事象の発生から処分場の地質環境に影響が伝播するまでのシナリオを、国内専門家と議論しながら設定する。これらの国内専門家との議論における意見集約に際しては、国内で実績のある SSHAC 手法の適用例からの知見を反映する。
- ③ 発生確率の算出：変遷シナリオの起こりやすさは、従来どおり専門家の意見集約によりロジックツリーの重みづけを行う方法で設定する。影響伝播シナリオの発生確率の算出には、新たに BN 手法の適用を試みる。BN 手法は、評価対象に係る情報、確率を求める数式・モデル、専門家の意見集約結果等を BN モデルにより関連付ける。この BN モデルは、以下の特長を有する（Kurowicka and Cooke, 2006 ; Smit et al., 2019 ; Lu et al., 2019 ; Li and Goda, 2023 ; Shoaefar and Goda, 2024 ; Bakhtiari et al., 2025）。
 - ・ 客観性・透明性の高い評価が可能
 - ・ 火山・火成活動や地震・断層活動のように必ずしも独立ではない複数の要因が関与する事象にも適用可能
 - ・ 論拠を支持するモデルやデータが不十分な場合にも科学的に説明性のある評価が可能また、BN モデルへの入力情報となる火山・火成活動や断層活動の空間確率密度分布の推定には、新たにランダムフォレスト法の適用を試みる。ランダムフォレスト法は、米国アイダホ国立研究所における火山ハザード評価（INL, 2024）に適用された決定木を用いた機械学習法（Breiman, 2001 ; 波部, 2016）であり、ITM-TOPAZ 手法で用いてきたカーネル法などによる推定結果、スラブ深度、地殻構造、地震波速度構造、重力異常、ひずみ速度分布などの様々な情報を取り込んだ客観的・包括的な評価が期待される。
- ④ 確率論的評価：リスク論に基づく線量／確率分解アプローチによる安全評価との連携に向けて、変遷シナリオと影響伝播シナリオの発生確率を統合し、評価の時間枠ごとに地層処分システムの安全機能に影響を及ぼす自然現象の発生確率を提示する。

上記のうち、新たな取組みとなる②の影響伝播シナリオの設定と③の BN モデルの構築については、その考え方や方法の理解を深めるために、評価地点を特定しないジェネリックな検討を行った。火山・火成活動については地下深部のマグマだまりから岩脈が発生し処分場に貫入するシナリオ、断層活動については地下深部の未認識の断層が伸展し処分場に交差するシナリオを設定し、それらに関する BN モデルの構築及び発生確率の試計算を行った。火山・火成活動に関する BN モデルの構築例

を図 2に示す。これらの検討を通じて、2025 年度以降に国内外の専門家の協力を得ながら特定の検討領域を対象としたケーススタディを実施する見通しを得ることができた。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編 3.5.2 項（今後の取り組み）に、自然現象の発生とその影響に係る今後の取組みの一つとして、長期的な自然現象の発生可能性とその地質環境への影響に係る評価技術の高度化が挙げられている。本検討の成果は、自然現象の発生とその地質環境への影響に関する将来予測における不確実性がより大きくなると考えられる将来 10 万年程度を超える期間における閉鎖後長期の安全評価の信頼性を高めるうえで有効な知見となり得るため、今後の包括的技術報告書の更新に反映することを検討する。

4. 今後の展開

2025～2026 年度は、2024 年度の成果を踏まえて、国内専門家との協力体制を構築したうえで、国内外の専門家との協働作業により ITM-TOPAZ-2 手法を高度化するとともに、その手法を用いて日本列島背弧側を対象としたケーススタディを実施し、適用性の確認及び改善を図る。併せて、同手法を特定サイトを対象とした処分地選定段階で活用していくための実用化に向けた検討を行う。

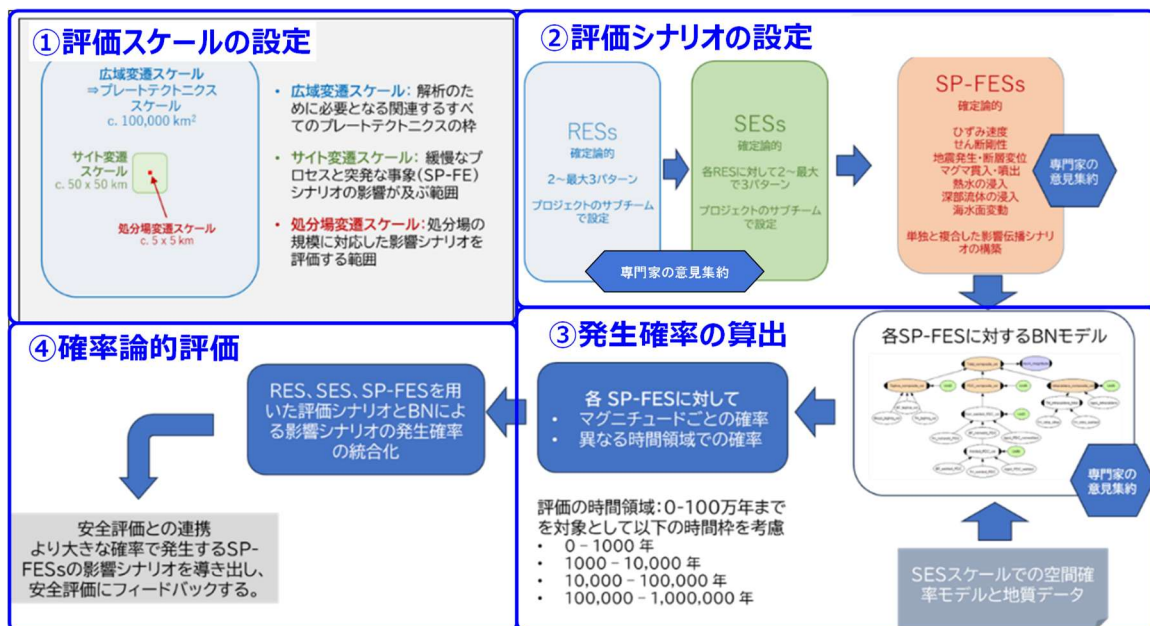


図 1 ITM-TOPAZ-2 手法の流れ (案)

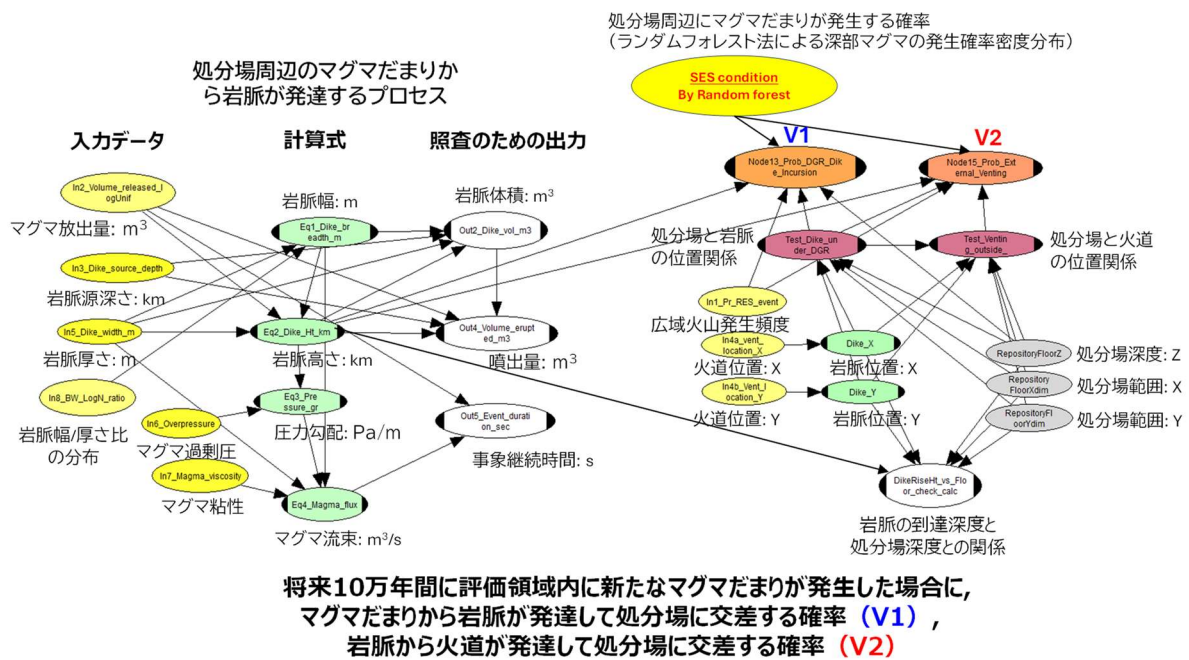


図 2 火山・火成活動に関するジェネリックな BN モデルの構築例

参考文献

- Aspinall, W., Sparks, R. S. J., Hill, B. E., Costa, A., Connor, C., Inakura, H., Hasenaka, H., Miyoshi, M., Kiyosugi, K., Tsuji, T. and Ushioda, M. (2023) : Aso volcano, Japan: assessing the 100-year probability of a new caldera-forming eruption based on expert judgements with Bayes Net and Importance Sampling uncertainty analysis, *Journal of Applied Volcanology*, 12:5.
- Bakhtiari, S., et al. (2025) : A dynamic Bayesian Network approach to characterize multi-hazard risks and resilience in interconnected critical infrastructures, *Reliability Engineering & System Safety*, 110815.
- Breiman, L. (2001) : “Random Forests”, *Machine Learning*, 45, 1, pp.5-32.
- Chapman, N., Apted, M., Beavan, J., Berryman, K., Cloos, M., Connor, C., Connor, L., Susan Ellis, Jaquet, O., Kiyosugi, K., Litchfield, N., Mahony, S., Smith, W., Sparks, S., Stirling, M., Villamor, P. and Wallace, L. (2009) : Development of methodologies for the identification of volcanic and tectonic hazards to potential HLW repository sites in Japan - Summary Report -, NUMO-TR-09-03.
- 波部 齊(2016) : ランダムフォレストの基礎と最近の動向, *映像情報メディア学会誌*, 70, 5, pp.788-791.
- INL (2024) : Idaho National Laboratory Site-wide SSHAC Level 3 Probabilistic Volcanic Hazards Assessment, Battelle Energy Alliance Report, INL/RPT-24-78997.
- Jaquet, O., Lantuéjoul, C. and Goto, J. (2017) : Probabilistic estimation of long-term volcanic hazard under evolving tectonic conditions in a 1 Ma timeframe, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 345, pp.58-66.
- 亀田弘行, 隈元崇, 藤原広行, 奥村晃史, 佃栄吉, 堤英明, 堤浩之, 遠田晋次, 徳山英一, 姥沢勝三, 香川敬生, 司宏俊, 古村孝志, 三宅弘恵, 森川信之, 奥村俊彦, 宮腰淳一(2020) : 伊方 SSHAC プロジェクト最終報告書.
- Kurowicka, D. and Cooke, R.M. (2006) : Uncertainty analysis and high dimensional dependence modeling, John Wiley & Sons, Ltd.

- Li, Y. and Goda, K. (2023) : Random forest-based multi-hazard loss estimation using hypothetical data at seismic and tsunami monitoring networks, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14 (1), 2275538.
- Lu, D., Liu, S. and Ricciuto, D. (2019) : An efficient Bayesian method for advancing the application of deep learning in earth science, *International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*, Beijing, China, pp.270-278.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2016) : TOPAZ Project Long-term Tectonic Hazard to Geological Repositories - Toward practical application of the ITM-TOPAZ methodology -, NUMO-TR-16-04.
- NUMO(原子力発電環境整備機構)(2021) : 包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－, NUMO-TR-20-03.
- Shoeifar, P. and Goda, K. (2024) : Investigation of the effect of integrated offset, GPS, and InSAR data in the stochastic source modeling of the 2002 Denali Earthquake, *Geosciences*, 14(11), 300.
- Smit, A., Stein, A. and Kijko, A. (2019) : Bayesian inference in natural hazard analysis for incomplete and uncertain data, *Environmetrics*, 30 (6), e2566.

2.1.2 四次元地質環境モデルの構築技術の妥当性確認

尾上 博則 吉田 芙美子 高畑 祐美 高林 佑灯 廣田 翔伍 周藤 優子 三枝 博光

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

包括的技術報告書（NUMO, 2021）においては、日本の代表的な三岩種（深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類）を対象として、地質構造の幾何形状や水理特性などの三次元的な空間分布を表現した地質環境モデルを構築するとともに、構築したモデルに基づき処分場の設計や安全評価を実施した。この一連の検討を通じて、数万年以上の長期間にわたる地層処分システムの安全機能をより現実に即して論ずるためには、水理場や化学場といった地質環境特性の状態変遷を推定するための地質環境モデルの構築技術を整備することが課題として示された。

本検討においては、2018 年度から 2022 年度にかけて、地下深部から地質圏－生活圏インターフェイス（Geosphere-Biosphere Interface：以下、「GBI」という）までの地質環境特性の状態変遷と GBI の時間変化を考慮した処分場の設計や閉鎖後長期の安全評価に資することを目的として、隆起・侵食等による長期的な地形変化や気候・海水準変動などに伴う地表から地下深部までの地質環境特性の状態変遷を表現することができる四次元地質環境モデル（三次元空間に時間軸を考慮したモデル）を構築するための方法論に係る検討を進めてきた（図 1）。これまでに、全国規模で収集した地質環境特性データ（NUMO, 2021）を用いて、三岩種がそれぞれ分布する仮想的な場及び河川水系の変遷を伴う広域的な地形変化や三岩種が混在する地形・地質構造条件を考慮した、より複雑な地質環境を想定した検討を通じて、四次元地質環境モデルの構築技術を整備してきた（尾上, 2022；松岡ほか, 2022；NUMO, 2023）。

四次元地質環境モデルは、数十 km といった大規模な空間スケール、かつ 100 万年といった長期の時間スケールを考慮する必要があるため、モデルの妥当性を確認するうえでは、そのモデルに設定した地質環境特性に関する不確実性に加えて、その地質環境特性の長期変遷に関わる解釈や仮定など、モデル化における条件設定に関する不確実性をどのように評価するかが重要となる。そのため、2022 年度からは、上記の検討を通じて整備した四次元地質環境モデルの構築技術の妥当性を確認すること及び四次元地質環境モデルの不確実性を評価するための方法論を整備することを目的とした検討を開始した。2022 年度には、事例的な検討対象として体系的な情報やデータが利用可能な地域（以下、「事例検討地域」という）において、蓋然性が高いと考えられる条件で 100 万年程度以前の過去から現在までの地形・地質環境の長期変遷に基づくモデル化・解析を実施した。このモデルを用いた解析結果が事例検討地域で取得されている実測値と整合的であったことから、さらに事例検討を進め信頼性を高める必要があるものの、これまでに整備した四次元地質環境モデルの構築技術が地形・地質環境の長期変遷のモデル化に適用可能であることを確認した（NUMO, 2024a）。2023 年度には、2022 年度に構築した四次元地質環境モデルに内在する不確実性要因を整理するとともに、不確実性要因を考慮した感度解析に用いる解析条件として、地形・地質構造の長期変遷の概念モデルや海水準変動パターンなどを複数設定した（NUMO, 2024b）。2024 年度は、2023 年度に整理した不確実性要因（表 1）を考慮した感度解析として、飽和・不飽和状態の三次元地下水流動・移流分散解析及び粒子追跡解析を実施し、それらの要因が解析結果として得られる評価指標に及ぼす影響を分析（以下、「不

確実性評価」という)した。

2. 主な成果

① 四次元地質環境モデルの不確実性評価の考え方

四次元地質環境モデルの不確実性評価においては、処分場の閉鎖後長期の地質環境に期待される安全機能 (NUMO, 2021) の観点から、「地下水流動の緩慢さ」、「地下水流動経路や地下水水質の長期的な変化」を評価可能な、「地下水の移行時間」、「地下水の塩分濃度」及び「地下水の涵養点・流出点」を評価指標として設定した。このうち、「地下水の移行時間」、「地下水の塩分濃度」については、不確実性要因がこれらの指標に及ぼす影響の程度を変動係数で定量化した。なお、変動係数は標準偏差を算術平均で規格化したものであり、母集団が有する数値の大小の影響を排除したばらつきを示す評価指標である。また、検討対象とする時間スケールや空間スケールによって、不確実性評価の結果が異なる可能性があるため、それらをいくつかに分けて評価することとした。具体的には、時間スケールは事例検討地域の地形・地質発達史や気候・海水準変動のサイクルを踏まえて、100 万年、数十万年及び 10 万年スケールの 3 区分とした。空間スケールは、地層処分事業の各調査段階と空間スケールとの関係 (NUMO, 2021) を参考にしつつ、各調査段階の調査範囲を考慮して、広域スケール (30 km×90 km 程度; 解析領域全体)、処分場周辺スケール (20 km×30 km 程度) 及びボーリング孔スケールの 3 区分とした。本稿では、「地下水の塩分濃度」を評価指標とした 100 万年かつ広域スケールを対象とした不確実性評価の事例について示す。

② 移流分散解析結果 (感度解析結果)

地下水の塩分濃度を算出するための移流分散解析は、表 1 に示す 6 つの解析ケースで実施した。各ケースの条件設定にあたっては、NUMO (2021)、JAEA (2017) 及び JAEA (2018) などの既往検討を参考にした。また、解析手法が不確実性評価に与える影響を確認することを目的として、約 100 万年前から現在までの地形や気候・海水準の連続的な変化を考慮した非定常解析と、事例検討地域の地形・地質発達史における特徴的な時期を踏まえて設定した代表時間断面 (約 100 万年前、約 30 万年前、現在) での定常解析を実施した。

図 2 に、移流分散解析結果の一例を示す。図 2 より、非定常解析結果と定常解析結果で塩分濃度の分布傾向が大きく異なっていることが見て取れ、定常解析結果 (図 2(b)) では、陸域 (汀線位置の右側領域) にボーリング孔で観測された実測値 (NUMO, 2024a) には見られない地下深部までの塩水の洗い出しが生じている。このことから、事例検討地域のような沿岸域において評価指標を現実的に評価するためには、地形や気候・海水準の連続的な変化を考慮した非定常解析を実施する必要があると言える。

③ 移流分散解析結果に基づく不確実性評価

不確実性要因が解析結果に及ぼす影響に着目すると、非定常解析・定常解析ともに、解析結果に大きな影響を与える不確実性要因が類似していることが分かった。このことは、どちらの解析方法を適用しても重要な不確実性要因を特定することができる可能性を示唆している。

各不確実性要因が評価指標に及ぼす影響の程度を定量的に評価するために、図 2 に示した鉛直断面上における解析モデルの全要素の塩分濃度値を用いて、基本ケースと他ケースとの変動係数を算出し、累積分布関数として整理した (図 3(a))。また、累積分布関数の形状を定量的に評価する試みとして、変動係数が 1% 以上の値 (有意な違いと仮定) をとる確率範囲の中央値と、その変動係数の値をグラフにプロットした (図 3(b))。図 3(a)からは、より幅広い確率範囲で大きな変動係

数値を示す不確実性要因として、非定常解析では地層の水理特性が、定常解析では断層の水理特性が他の要因と比べて塩分濃度分布に及ぼす影響が大きいと判断できる。これは図 2 に示した各ケースの塩分濃度分布の違いと整合的である。また、図 3(a)のような整理を行うことで、図 2 においては、不確実性要因の影響が不明瞭であったケース（例えば、地形・地質構造変遷の概念など）であっても、その影響を確認することができた。さらに、図 3(b)中の地形・地質構造変遷の概念（図中の□印）が塩分濃度分布に及ぼす影響に着目すると、定常解析と比べて非定常解析の方が、その影響は広い範囲に及ぶが、影響の程度は小さいといった分析が可能である。海水準変動の変遷など、非定常解析と定常解析でその影響度が大きく異なるケースも見受けられるため、数値自体の取扱いには留意する必要があるが、全体として定常解析の方が非定常解析よりも変動係数の感度が高い傾向にあることがわかる。

上記の検討から、不確実性評価に変動係数が適用できることが示された。また、影響の大きい不確実性要因を抽出する際に、感度が高い定常解析は有効な解析手法であると考えられ、最初にいくつかの代表時間断面を対象とした定常解析で影響度の大きい不確実性要因を絞り込んだうえで、その不確実性要因に対して非定常解析を行い、その影響を精緻に確認するといった段階的な評価アプローチが有効となる可能性が考えられる。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書（NUMO, 2021）の本編 3.5.2（今後の取り組み）項に示されているとおり、地質環境特性とその長期変遷に係る今後の取組みの一つとして、地質環境特性の長期変遷モデルを構築する技術の高度化が挙げられている。本検討を通じて得られる四次元地質環境モデルの構築技術とその妥当性確認に係る方法論は、処分場の設計及び閉鎖後長期の安全評価の信頼性を高めるうえで有効な知見となり得る。そのため、包括的技術報告書を更新する際には、本検討の成果である四次元地質環境モデル構築に係る方法論の適用を検討する。

4. 今後の展開

今後は、2024 年度に実施した感度解析結果に基づく不確実性評価を継続し、より詳細な分析を進めるとともに、異なる時間スケール・空間スケールにおいて不確実性要因が評価指標に及ぼす影響の程度を評価する。さらに、それらの結果に基づき、地質環境の長期変遷に係る不確実性を評価するための考え方や手順を、四次元地質環境モデルの構築技術として取りまとめるとともに、そのモデルに内在する不確実性の低減に有効なデータや調査項目などに関する技術的知見を整理する。

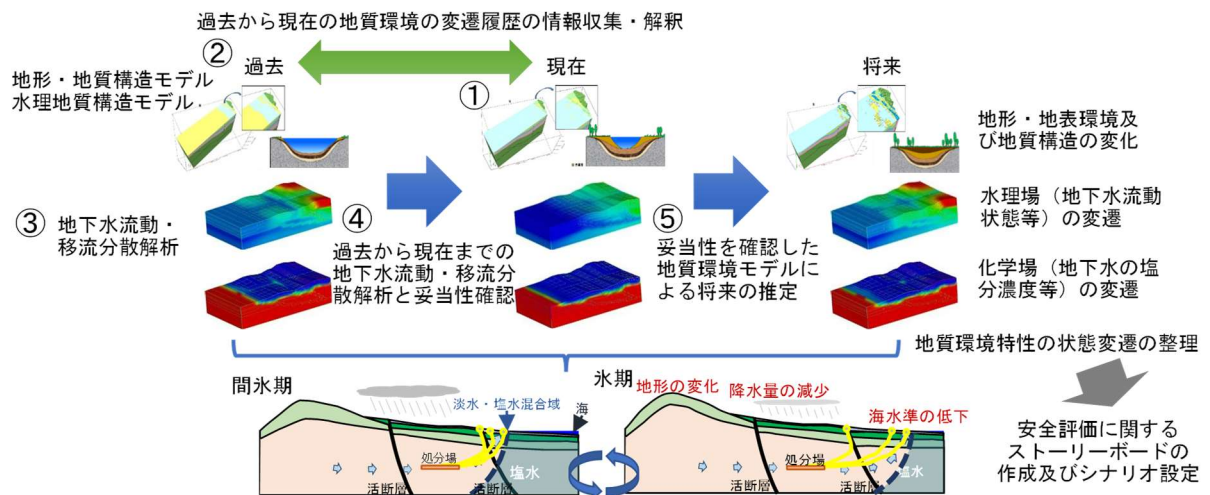
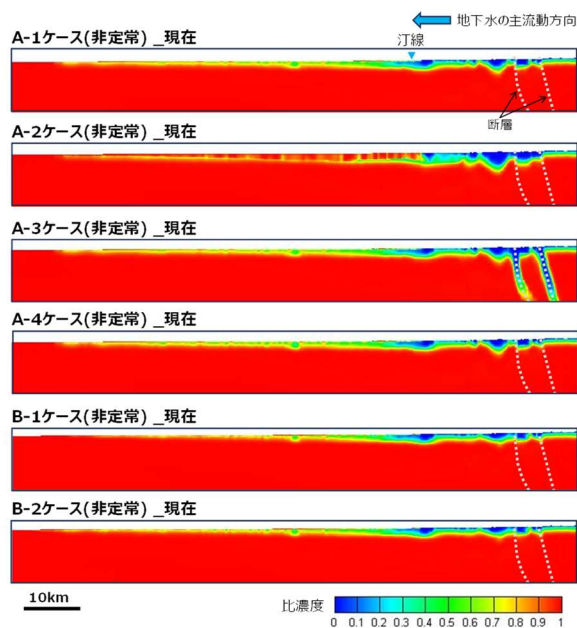
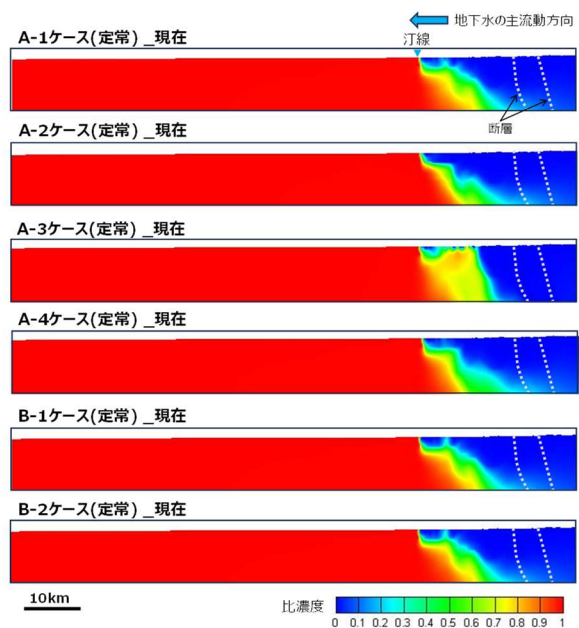


図 1 四次元地質環境モデルの位置付けと構築に係る基本的な考え方

（①現在の地質環境特性の情報を収集・解釈し、現在を対象とした地形・地質構造モデル及び水理地質構造モデルを構築、②過去から現在までの地質環境の変遷履歴に係る情報を収集・解釈し、その結果に基づく、過去の代表時間断面を対象とした地形・地質構造モデル及び水理地質構造モデルを構築、③上記①及び②で構築したモデルを用いた飽和・不飽和状態における非定常の三次元地下水流動・移流分散解析（地形の形状や上部境界条件の連続的な変化を考慮した解析）を実施、④上記③の解析結果が地下水の水圧・塩分濃度分布や地下水年代の観測値を再現できていることを確認し、解析に反映した過去から現在までの地質環境の変遷の妥当性を確認、⑤上記④で妥当性が確認された過去から現在までの地質環境の変遷に基づき将来の地質環境の変遷を推定、及びそれを考慮した地下水流動・移流分散解析により、将来の水理場・化学場の変遷を推定。）

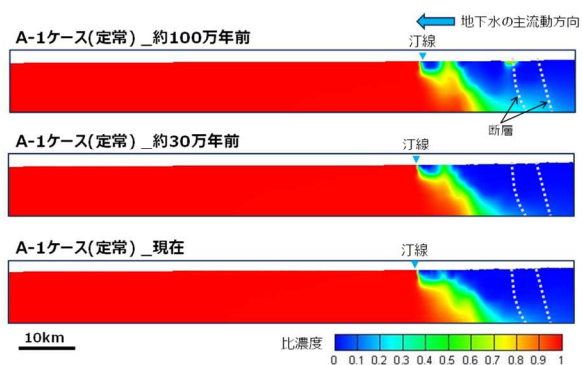


(a) 非定常解析結果：全ケースの現在時間断面



(b) 定常解析結果：全ケースの現在時間断面

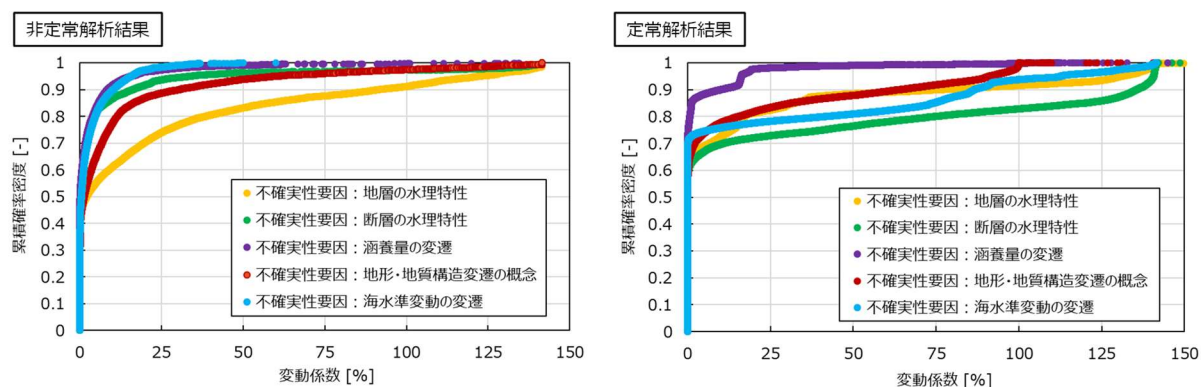
解析ケース	不確実性要因
A-1	(基本ケース)
A-2	地層の水理特性
A-3	断層の水理特性
A-4	涵養量の変遷
B-1	地形・地質構造変遷の概念
B-2	海水準変動の変遷



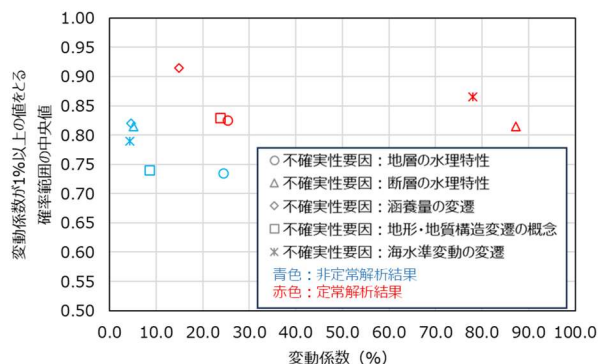
(c) 定常解析結果：A-1ケースの全代表時間断面

図2 移流分散解析結果の一例（鉛直断面図）

（地下水の塩分濃度分布は地下水の主流動方向に解析モデルのおおむね中央部を通過する鉛直断面において、水平方向は解析領域全体を、鉛直方向は地表から標高-5 km までを図化。非定常解析では事例検討地域における過去 100 万年間の地形・地質発達史や海水準変動を考慮して、地形や地質構造の三次元的な分布及び涵養量や汀線の位置といった上部境界条件が異なる 20 時間断面程度の解析モデルを構築。約 100 万年前の解析モデルに塩水（比濃度 1）を満たした初期条件で次の時間断面まで実施し、その解析結果を次の時間断面のモデルの初期条件として受け渡すことを繰り返し行うことで、100 万年間の地形・地質構造の長期変遷や気候・海水準変動を連続的に考慮。定常解析では、非定常解析を行うために構築した解析モデルのうち、事例検討地域における代表的な丘陵が陸化した時期などを踏まえて約 100 万年前と約 30 万年前を特徴的な時間断面として抽出し、それらに現在の時間断面を加えた 3 つの代表時間断面を解析対象として設定。）



(a) 不確実性要因による変動係数の累積分布関数



(b) 累積分布関数の代表点プロット

不確実性要因	変動係数の算出に用いた解析ケース (解析ケースは表-1参照)
地層の水理特性	A-1, A-2
断層の水理特性	A-1, A-3
涵養量の変遷	A-1, A-4
地形・地質構造変遷の概念	A-1, B-1
海水準変動の変遷 ^{*1}	B-1, B-2

^{*1}複数の海水準変動パターンを設定可能なモデルBを用いて変動係数を算出

図 3 不確実性評価結果の一例

(評価指標：地下水の塩分濃度，評価スケール：100 万年スケール/広域スケール)

(a) 非常解析結果は最終結果である現在時間の変動係数で累積分布関数を作成，定常解析結果は図 2(c)に示した3つの代表時間断面毎に変動係数を算出し，それらを全て足し合わせることで累積分布関数を作成。

(b) 縦軸の値（変動係数が1%以上の値をとる確率範囲の中央値）が小さいほど不確実性要因の影響が広範囲に及んでいることを示し，横軸の値（縦軸にプロットした中央値での変動係数値）が大きいほど不確実性要因の影響が大きいことを示す。）

表 1 不確実性要因を考慮した解析ケース

(地形・地質構造変遷の概念：事例検討地域における地形変動の開始時期が異なる2つのモデルを設定，地質構造の水理特性：JAEA (2017) 及び JAEA (2018) を参考に，設定値がとり得るばらつきとして地層，断層ともにそれぞれ2つのパターンを設定，地表環境の変遷：JAEA (2017) を参考にして海水準変動曲線の時期的な変動幅や周期を考慮し，設定値がとり得るばらつきとして海水準変動，涵養量ともに，それぞれ単純化の度合いが異なる2つのパターンを設定。)

解析 ケース	不確実性要因				
	地形・地質構造 変遷の概念	地質構造の水理特性		地表環境の変遷	
		地層	断層	涵養量	海水準変動
A-1	モデル A	パターン A	低透水	一定変動	一定変動
A-2	モデル A	パターン B	低透水	一定変動	一定変動
A-3	モデル A	パターン A	高透水	一定変動	一定変動
A-4	モデル A	パターン A	低透水	不規則変動	一定変動
B-1	モデル B	パターン A	低透水	一定変動	一定変動
B-2	モデル B	パターン A	低透水	一定変動	不規則変動

参考文献

- JAEA(2017): 平成 28 年度地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発 報告書.
- JAEA(2018): 平成 29 年度地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発 報告書.
- 松岡稔幸, 三枝博光, 尾上博則, 高畑祐美, 高林佑灯 (2022): 処分場の閉鎖後安全評価のための四次元地質環境モデル構築技術の整備の取り組みについて, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, HCG24-P05.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021): 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2023): 技術開発成果概要 2021, NUMO-TR-22-02, pp. 5-7.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024a): 技術開発成果概要 2022, NUMO-TR-24-01, pp. 6-9.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024b): 技術開発成果概要 2023, NUMO-TR-24-03, pp. 6-9.
- 尾上博則 (2022): NUMO における地質環境のモデル化技術の高度化に向けた取り組み状況, 放射性廃棄物処分技術の最新動向に関する総合シンポジウム, 土木学会エネルギー委員会, <https://committees.jsce.or.jp/enedobo/node/91> (2025 年 7 月 1 日閲覧) .

2.1.3 ボーリング試験による地質環境データ取得技術の実証 (YDP-5 孔)

國丸 貴紀¹ 西本 壮志² 林 隆正¹ 佐藤 稔² 竹内 竜史¹ 長谷川 琢磨²

¹原子力発電環境整備機構, ²電力中央研究所

1. 背景・目的

地層処分事業における概要調査では、調査対象の地質環境や社会的制約条件などを考慮したうえで、地下施設の設置場所の選定、地下施設の設計、安全評価などに必要な地質環境データを取得することが重要となる。本技術開発は、概要調査におけるボーリング調査を確実に実施するために電中研との共同研究として、電中研横須賀地区において既存の地質環境調査・評価技術の有効性、妥当性、課題などの確認を行うとともに、NUMO によるボーリング調査のマネジメント能力の向上、及び国内の次世代技術者の育成を行うことを目的に取り組んでいる。

電中研横須賀地区におけるボーリング試験では、これまでに YDP-1 から YDP-4 まで4本の深層ボーリング試験を実施してきた(図 1)。特に YDP-4 では、破碎質で脆弱な膨潤性の特徴を有する葉山層群を対象に、主に掘削泥水の見直しを行うことにより、従来のボーリング孔の掘削技術と比較して高いコアの回収率を確保し、安定したボーリング孔を掘削できる技術を整備することができた。一方、YDP-4 では葉山層群と比較して硬質で透水性の高い三浦層群が出現しなかったことから、三浦層群の様な堆積岩を対象とした地質環境調査・評価技術の有効性や課題などを確認する必要がある。また、岩盤の地圧を把握するための調査として室内応力測定試験を実施してきているが、三浦層群のような堆積岩を対象とし、体系的に様々な原位置試験(水圧破碎試験)や室内応力測定試験などを実施した成果がなく、これらの調査・評価技術の体系化が必要な状況にある。これらのことから本共同研究では、

- a. 地下深部の岩盤の力学特性を直接的に把握するうえで重要となる、大孔径のボーリング孔に対応した孔内水圧破碎試験の有効性や課題などの確認
- b. 透水性が高い母岩を対象とした水理試験技術(試験方法、試験管理方法、試験装置など)の有効性、適用性、妥当性、課題などの体系的検討
- c. ボーリング孔を利用した原位置での地圧調査・試験が困難な場合の代替手段となるコアを利用した ASR 法、DSCA 法、DCDA 法、AE 法、DRA 法、接線ヤング率法、音弾性法などの室内応力測定に係る有効性、適用性、妥当性、課題などの体系的検討
- d. コアを利用した室内透水試験、含水比試験、保水性試験、室内不飽和透水試験、ひずみ速度を交互に切り替える圧縮試験などの有効性、適用性、妥当性、課題などの体系的検討

を主な目的として電中研横須賀地区に分布する三浦層群を対象に、ボーリング試験を実施した。また、概要調査において重要な調査手法となるボーリング孔を利用した物理検層、流体検層、水理試験などを実施し、NUMO の技術者がボーリング調査を的確に行うためのマネジメント能力の向上、及び国内の次世代技術者の育成を行うことも目的として実施した。本報告書では、本共同研究の主な目的を考慮して上記の a. から c. までの成果について記載する。

2. 主な成果

本ボーリング試験で実施した深度 0m～220m までのコア観察結果に基づく地質柱状図を図 1 に示す。コア観察、物理検層結果、流体検層結果などの結果から本ボーリング孔（YDP-5 孔）の下位から葉山層群（深度 218.28m～220.00m）、三崎層（深度 47.74m～218.28m）、及び初声層（深度 1.50m～47.74m）が分布することが確認された。

葉山層群（深度 218.28 m 以深）は破碎質泥岩が主体であり、モザイク状の割れ目が多く発達している。三浦層群三崎層（深度 47.74m～218.28m）は、岩相の違いにより 5 層に大別でき、浅い深度では砂質シルト岩及びシルト質砂岩が主体であり、深度に伴って中粒～粗粒砂岩及び礫岩が優勢となる。また、深度 60 m～90 m 付近では開口割れ目が確認された。三浦層群初声層（深度 1.50 m～47.74 m）の岩質は、凝灰質砂岩を主体とし、細粒～粗粒砂主体でスコリア礫を多く含んでいる。また、深度 10 m 付近や 30 m 付近では傾斜 85～90°の高角割れ目が認められる。これらの地質学的な調査結果は、これまでに当該地区で実施したボーリング試験（YDP-1 孔～YDP-3 孔）において取得された地質学的な結果と整合的である（図 2）。

本ボーリング試験の主な目的である水圧破碎試験の結果について述べる。水圧破碎試験による初期地圧測定は、岩盤の応力をボーリング孔内（原位置）において直接測定するため、ひずみを測定する他の応力測定方法と比較して岩盤の力学特性を必要としないため、求めた応力値が岩盤の力学特性による誤差が小さいことが特徴である。

孔内水圧破碎試験は、地盤工学会基準「JGS 3761-2017」に準拠しつつ、6.25 インチ（約 158.75mm）のボーリング孔径に対応した水圧破碎試験装置を準備して実施した。水圧破碎試験装置の性能確認試験の一つとして、地上におけるコンプライアンス確認試験を実施し、目標値を満たすことを確認した。また、水圧破碎のために加圧するための送水流量については、試験対象地層（三浦層群）の透水性が高いことを考慮し、一般的に利用されるスーパーメータリングポンプ（最大吐出量 566 ml/min, 最大吐出圧 32 MPa）の代わりに、ハイドラセルポンプ（最大吐出量 11.2 l/min, 最大吐出圧 17.2 MPa）を使用した。水圧破碎試験の計測システムは、地盤工学会基準「JGS 3761-2017」に基づいて孔内において流量及び水圧を計測し、小型 PC 及び LAN ケーブルにより、これらのデータを地上で確認できる構造とした（図 3）。

本ボーリング試験において水圧破碎試験を実施する試験区間は、コア観察及び物理検層の結果に基づき、深度 50m 以深の三浦層群中で割れ目が無い、若しくは少ない健岩部を対象に 17 深度を選定した。その後、水圧破碎試験装置の適用深度の確認や深度変化による水平応力分布などを把握することを考慮し、17 深度から 6 区間を選定して水圧破碎を行う前にボーリング孔壁の状態を確認する型撮り試験を実施した。さらに、型撮りした結果を確認して不連続面や不明瞭さが無いこと、岩相が均一であること、測定深度などを考慮して水圧破碎試験の実施場所を 3 深度選定した。

透水性が高い軟岩に対して孔内水圧破碎試験を実施し、初期地圧の推定を行った。まず、ISIP（Instantaneous Shut-In Pressure）法により亀裂閉口圧（Ps）の読み取りを試みたが、圧力降下曲線における読み取り点が不明瞭であったため、代替手法として dt/dP -P 法（圧力変化に対する時間微分法）を用いて Ps を求めた。

さらに、ステップ流量試験を実施し、亀裂の透水性や開口挙動を評価したほか、圧裂引張試験により岩盤の引張強度を推定した。これらの試験結果を統合し、初期地圧を算出した。

また、型撮りによって得られた人工亀裂の方位情報をもとに、水平面内の最大主応力の方向を推定した（表 1）。

次に、概要調査において重要なボーリング孔を利用した試験である水理試験については、ボーリング孔掘削時の状況、コア観察、地質構造（地層境界、不連続構造など）、ボーリング孔を利用した物理検層、流体検層などの結果を総合的に判断し、本ボーリング試験では8区間の水理試験区間を選定した。試験区間 ht1 から ht3 は割れ目の少ないマトリクス部を中心とした三崎層、ht4 から ht7 は断層や開口割れ目を中心とした三崎層、ht8 はスコリア礫を多く含む初声層を対象に水理試験を実施した。また、これらの区間における水理試験では、透水係数が高かったことから当初計画していた水理試験の実施期間より短期間で水理試験を終了した。このことから、不連続構造及びその周辺の母岩を含めた長区間における透水性への影響（スケール効果）の確認や、水理試験装置の要求事項を把握するため4区間（ht9～ht11'）を新たに設定して水理試験を実施した。

水理試験は、竹内ほか（2007）に基づいてパルス試験（PW、PI）、スラグ試験（SW/SWS）、揚水試験（RW/RWS）、注水試験（RI/RIS）を組み合わせを行い、理論式に基づく解析により透水係数などの水理特性を推定した。

本ボーリング孔では地質学的な検討結果に基づくと、下位より深度 218.28 m～220.00 m に葉山層群、47.74 m～218.28 m に三崎層、1.50 m～47.74 m に初声層が分布すると想定されている。

間隙水圧について図4には、GL-0m から地下水の密度を $1,000\text{ kg/m}^3$ とした深度方向の静水圧分布を示し、静水圧分布に対する各試験区間の中心点に間隙水圧をプロットした。間隙水圧はいずれの区間においても、深度方向の静水圧分布を示した直線上に概ねプロットされる。

透水係数について、初声層はスコリア礫を多く含む地層で、この層の大部分を有する ht8（深度 16.3 m～46.3 m）の透水係数は $1.5\text{E-}07\text{ m/s}$ であった。三崎層は深度により岩相が異なり、砂質シルト岩を主体とし、深度 61.5 m の断層を含む ht6（深度 60.2 m～67.2 m）の透水係数は $2.7\text{E-}06\text{ m/s}$ であった。また、マトリクス部を主体とした ht5（深度 68.4 m～78.9 m）や ht7（深度 49.1 m～58.1 m）の透水係数は、それぞれ $2.9\text{E-}06\text{ m/s}$ 、 $2.8\text{E-}07\text{ m/s}$ であった。

シルト質砂岩を主体とする三崎層のうち、深度 82.8 m の断層を含む ht4（深度 80.1 m～90.6 m）の透水係数は $1.9\text{E-}07\text{ m/s}$ であった。断層ガウジを伴う密着割れ目が多く分布している ht3（深度 91.8 m～131.8 m）の透水係数は $1.0\text{E-}07\text{ m/s}$ であり、透水係数は全区間中最も低い区間であった。凝灰質砂岩・礫岩を多く狭在する ht2（深度 133.0 m～173.0 m）の透水係数は $1.3\text{E-}07\text{ m/s}$ であった。中粒～粗粒砂岩を主体とする ht1（深度 174.2 m～214.2 m）の透水係数は $1.4\text{E-}07\text{ m/s}$ であった（図4）。

また、深度 61.5 m に分布する断層、及び深度 78 m 付近に分布する割れ目を含む試験区間の透水係数は、それ以外の区間と比較して透水係数が高い傾向を示しており、流体検層の結果とも整合的であることから、当該断層及び割れ目が水を流しやすい構造であると考えられる。

一方で、サイトにおいて実施する簡易解析から異常に低い比貯留係数が算出される区間もあり、このような試験区間では数値解析などを実施し、スキニングや亀裂を考慮したフローモデルによる透水係数などの推定結果の品質評価を行う必要性が確認できた。

室内応力測定では、複数の異なる室内応力測定の有効性や課題などを体系的に検討が可能となるように、コア観察結果及びキャリパー検層結果を基に試料採取深度を検討し、実際のコアを確認しつつ可能な限り同一深度付近から供試体を採取した。各応力測定法の水平面内での主応力値・方向の比較結果を表2に示す。

表中の深度区分②において DCDA 法と ASR 法を比較すると、ASR 法の方が供試体間のばらつきが小さい結果を示している。深度区分③については、DCDA 法、ASR 法、DSCA 法、及びその他に4つの手法（AE 法、音弾性法、DRA 法、ヤング率法）を用いた試験を実施した。その結果 ASR 法は

供試体間のばらつきが小さく、水平面内の主応力差も他の手法に比べて小さい結果が確認された。

これらの具体的な要因として ASR 法は、掘削後のコア試料にひずみゲージを貼りつけ、非弾性ひずみを計測するため、コア掘削による乱れの影響を受けにくいと考えられる。

DCDA 法は、コアが正円で回収されることを前提とし、その後数日以上にわたって生じる非弾性ひずみを計測して応力を評価する手法である。よって、コア掘削時の掘削ビットの振動などによりコアが削剥などされる場合は、応力評価精度が低下する可能性がある。

DSCA 法は、軟らかく砂分を多く含む軟岩試料では、整形時の乱れや供試体表面の凹凸が応力の評価に影響を与える可能性が考えられる。また、間隙率が大きく水を多く含む堆積軟岩試料では、整形作業やひずみゲージの貼り付け前の乾燥過程において含水率変化が応力情報の保持に影響を与える可能性が考えられる。一方で、DSCA 法は、他の手法により取得が困難な 3 次元の応力比を算出した後に、他の手法との比較のための水平面内の主応力を求めることが可能である。また、供試体に資する試料のサイズも小さく、いくつかの課題はあるものの本室内応力測定試験を実施できる場合の利点が大きいと考えられる。

コア試料に対して一軸圧縮試験を行う 4 つの手法 (AE 法、音弾性法、DRA 法、ヤング率法) では、一軸圧縮試験時の弾性領域より地圧が大きい場合に評価精度が低下すること、一軸状態では間隙水圧を試験条件に反映できないことなどから、低強度で間隙が大きく間隙水圧の影響が顕著な軟岩試料の場合、十分な精度が得られない可能性がある。

以上のように、一連の室内応力測定試験は、一般的に硬岩を対象に適用事例が多い試験手法であり、軟岩を対象とした実施例が少ない状況にある。以上に述べたように、これらの結果は必ずしも整合的な結果となっていないものの、水圧破碎試験と同様にそれぞれの室内応力測定の試験手法が軟岩を対象に実施できたことは大きな成果であると言える。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書 (NUMO, 2021) の本編 7.2.1 項 (評価基盤の整備) に示した、自然現象の影響や地質環境特性を把握するための調査・評価技術の体系的な整備に該当するボーリング試験に係る共同研究の成果である。本共同研究で得られた孔内水圧破碎試験やコアを用いた水理特性を把握するための室内試験や室内応力測定試験などから得られた成果は、各調査・評価技術の原理や適用範囲などの最新情報を整理した調査技術シート (付属書 3-11) に反映することを検討する。

4. 今後の展開

当該地区で実施した既往の研究成果などと合わせ、各試験装置や試験方法などに係る有効性や課題などを確認するとともに、本業務成果の取りまとめを進める。また、得られた知見のうち水理試験に係る品質管理、取得データの評価技術 (解析技術)、水理試験装置に係る改良点等を確認し、水理試験装置の高度化に反映する。

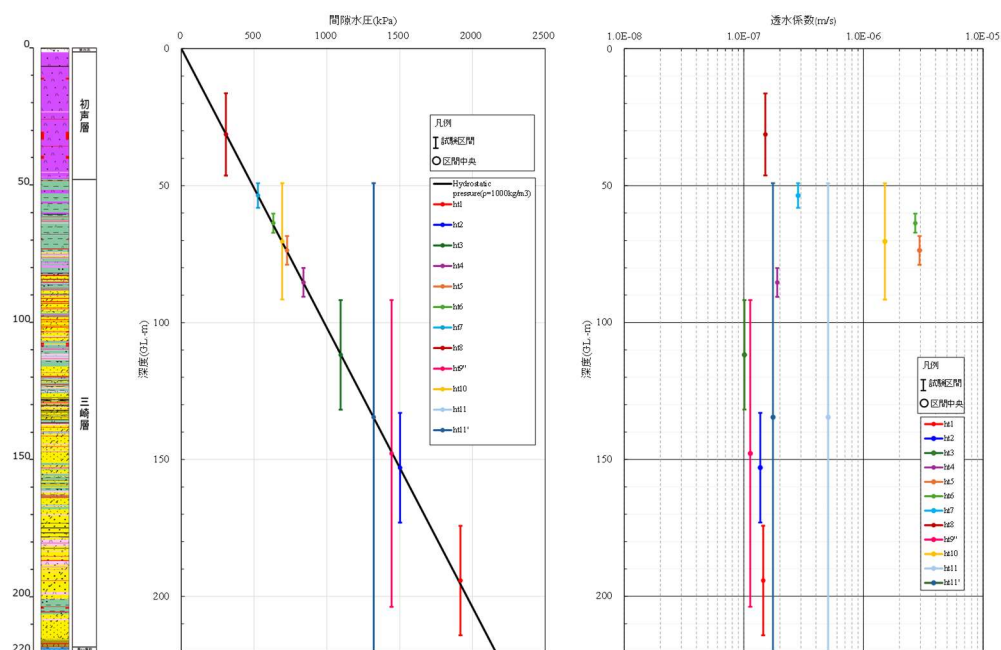


図 4 間隙水圧及び水理試験結果の深度分布図

表 1 水圧破碎試験結果（速報値）

試験番号	試験深度 (m)	中央深度 (m)	地圧算定に用いた試験値	初期水平地圧 (MPa)		
				S_H	S_h	S_H の方位 (真北)
HF-1	116.80 ~ 117.40	117.0	孔内水圧破碎試験による測定値	5.15	2.90	N72°W
			孔内水圧破碎試験とステップ流量試験 P_{spq} による各値	6.09	3.21	
			孔内水圧破碎試験と引張強さ T による各値	4.13	2.90	
HF-2	138.20 ~ 138.80	138.50	孔内水圧破碎試験による測定値	6.09	3.29	N87°E
			孔内水圧破碎試験とステップ流量試験 P_{spq} による各値	6.93	3.57	
			孔内水圧破碎試験と引張強さ T による各値	4.34	3.29	
HF-3	201.20 ~ 201.80	201.50	孔内水圧破碎試験による測定値	4.95	3.45	N57°E
			孔内水圧破碎試験とステップ流量試験 P_{spq} による各値	7.40	4.27	
			孔内水圧破碎試験と引張強さ T による各値	3.96	3.45	

表 2 各応力測定法の水平面内での主応力値・方向の比較（速報値）

深度 区分	試験 深度 (m)	土被 り圧 σ_z (MPa)	DCDA 法					ASR 法					DSCA 法					AE 法, DRA 法等※				
			S_H (MPa)	S_h (MPa)	S_H-S_h (MPa)	S_H/S_h	θ_H (°)	S_H (MPa)	S_h (MPa)	S_H-S_h (MPa)	S_H/S_h	θ_H (°)	S_H (MPa)	S_h (MPa)	S_H-S_h (MPa)	S_H/S_h	θ_H (°)	S_H (MPa)	S_h (MPa)	S_H-S_h (MPa)	S_H/S_h	θ_H (°)
			(MPa)	(MPa)	(MPa)		(°)	(MPa)	(MPa)	(MPa)		(°)	(MPa)	(MPa)	(MPa)		(°)	(MPa)	(MPa)	(MPa)		(°)
②	143 ～ 144	2.8	-	-	3.9	-	N10°E	4.0	3.0	1.0	1.3	N80°W										
	147 ～ 148	2.9	-	-	3.8	-	N33°W	5.1	3.2	1.9	1.6	N65°E										
	148 ～ 150	2.9	-	-	5.3	-	N65°W	4.3	2.6	1.7	1.7	N36°E										
③	171 ～ 176	3.4	-	-	2.3	-	N25°W	3.3	2.5	0.8	1.3	N36°E	5.0	3.8	1.2	1.3	N56°E	1.2 (2.9)	0.3 (1.9)	0.9	4.0 (1.5)	N35°E
	182 ～ 186	3.6	-	-	2.9	-	N2°E	3.6	2.7	0.9	1.3	N40°E	4.7	1.8	2.9	2.6	N31°W	2.3 (4.1)	0.6 (2.5)	1.7	3.8 (1.6)	N10°W
	191 ～ 192	3.8	-	-	2.7	-	N55°E	4.0	3.1	0.9	1.3	N19°E	5.7	3.8	1.9	1.5	N35°E	1.3 (3.1)	1.2 (3.0)	0.1	1.1 (1.0)	N45°E

※AE 法や DRA 等の括弧内の数値は、今回の測定結果が有効応力であると仮定し、各測定結果に間隙水圧を加え全応力とした場合の値

参考文献

- 竹内真司，中野勝志，平田洋一，進士喜英，西垣誠（2007）：深層岩盤を対象としたシーケンシャル水理試験手法の開発 と適用，地下水学会誌，第 49 巻，第 1 号，pp.17-32
- 地盤工学会（2020）：水圧破碎法による初期地圧の測定方法，JGS3761-2017. 新規制定地盤工学会基準・同解説書
- 原子力発電環境整備機構（2021）：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー，NUMO-TR-20-03.

2.1.4 レーザー光を用いた地下水水質計測装置の開発

草野 由貴子¹ 吉田 芙美子¹ 寺林 稜平² 堀 勝行² 野尻 雄幸² 長谷川 秀一² 國丸 貴紀¹

¹原子力発電環境整備機構, ²東京大学

1. 背景・目的

地層処分事業の概要調査及び精密調査においては、処分場建設前の自然状態における地質環境のベースラインを把握したうえで、地震・断層活動や地下施設建設等に伴う地質環境の変化を把握することが重要である。そのため、概要調査以降の地下環境のベースラインやその変化を把握するためのモニタリングを実施する計画であり、地下水の水質もモニタリング対象となる。従来、地下水の水質分析は、ボーリング孔内の原位置（封圧採水）や地上で地下水を採水し、実験室において分析する手法が一般的である。しかし、これらの方法は採水や分析に多くの時間や費用を要するため、地下水を採水することなく原位置で連続的に直接分析する技術を整備することで、作業効率の向上やコスト削減に加え、水圧変化や大気などによる地下水水質への影響の軽減を図ることができ、より信頼性の高いデータ取得が可能になると考えられる。

特に、高レベル放射性廃棄物に含まれる核種のうち、例えば地下環境で移動性が高い¹²⁹Iや¹⁴C等を本技術により測定できれば、処分場閉鎖後の閉じ込め性能の状況を、放射性物質が含まれる地下水を地上に採水することなく確認できることが期待される。本研究は、東京大学との共同研究として地下水中に含まれる特定の放射性核種を、ボーリング孔内の原位置で分析可能な可搬型の核種同位体分析モニタリングシステムを整備することが最終目標である。

2022年度の東京大学との共同研究では、地下水中からの分離の容易さ、レーザー吸収分光による測定可能性等の観点から、メタンガスをターゲット分子として選定し、安定同位体を含むメタン分子(¹²CH₄, ¹³CH₄)について共振器強化型レーザー吸収分光法(Cavity ringdown spectroscopy: 以下、「CRDS法」という)を用いて測定する分光システムを開発した(Terabayashi, et al., 2024)。

この成果を踏まえて2023～2025年度は、処分場閉鎖後の閉じ込め性能の確認において重要な核種の一つである¹²⁹Iについて、ボーリング孔内の高温・高圧環境下でも原位置で分析可能な装置開発に取り組んでおり、図1に示す実施内容・工程で装置開発を進めている。2023年度には、2022年度に構築したメタン安定同位体分子種の分析装置を基盤として、ボーリング孔内にCRDS法による光共振器セルを設置可能となるように小型化を行った。併せて、ヨウ素同位体の分析に向けて、吸収分光におけるターゲット吸収遷移の検討、地下水中に溶存するヨウ素を吸収分光装置に導入するための前処理方法の検討を行った。

2024年度には、これまでの成果に基づき、2023年度に構築した小型化光共振器セルの高温環境下での動作確認、CRDS法でのヨウ素同位体分析に向けたレーザー吸収分光装置の構築及び2023年度に引き続き溶液前処理方法の検討を行った。

2. 主な成果

2024年度に実施した検討の成果を以下に述べる。

(1) 小型化光共振器セルの高温環境下での動作確認

地下深部の高温環境を想定し、2023 年度に構築した CRDS 法によるメタン安定同位体分析用のレーザー吸収分光装置を 80 °C 程度まで昇温した状態で動作確認を行った。セルの昇温は、抵抗加熱リボンヒーターをセル中央部の配管に巻き付け、その周りを中空プラスチック段ボールで断熱した状態で行った。セルのレーザー光入射側、中央部、検出器側の 3 か所の温度が 80 °C 以上で安定した状態で、メタン分子同位体種 ($^{12}\text{CH}_4$, $^{13}\text{CH}_4$) の吸収スペクトルを取得した結果、常温時と同様の吸収スペクトルを取得することができ、高温環境下でも動作することが確認された。これにより、2023 年度に構築した装置を高温環境下の仕様に合わせて改良する必要性はないことが示された。

(2) ヨウ素核種分析に向けたレーザー吸収分光装置の構築

ヨウ素の放射性同位体 (^{129}I) を含むヨウ素分子 (I_2) 分析を対象とした CRDS 法によるレーザー吸収分光装置の整備に向け、ヨウ素の安定同位体 (^{127}I) 及び放射性同位体 (^{129}I) を含むヨウ素分子の吸収線や強度を把握するために、上記ヨウ素同位体の吸収スペクトルを計算可能なプログラム IodineSpec5 (Knöckel and Tiemann, 2013) を用いて、候補となる波長領域・吸収線の探査を行った。現在所有している外部共振器型半導体レーザー 650 nm, 670 nm, 690 nm の 3 つの中心波長の 5 nm の範囲について探査を行った結果、短波長ほど吸収強度が大きくなる傾向がみられたことから、本検討においては、中心波長 $650\text{ nm} \pm 5\text{ nm}$ 帯光源を用いたレーザー吸収分光装置を構築することとした。なお、光共振セル内に水分子が存在すると、水分子の光吸収がヨウ素分子の光吸収に干渉するため、地下水の前処理において光共振器セル内に導入する試料ガス中から水分子を取り除くことと併せて、水分子による吸収干渉の影響が小さい波長領域を確認しておくことが重要となる。大気吸収線プログラム HAPI プログラム (Kochanov, et al., 2016) を用いて $650\text{ nm} \pm 5\text{ nm}$ の波長帯における水分子の吸収スペクトルを確認した結果、水分子によるヨウ素分子吸収スペクトルへの干渉が少ない波長帯を特定することができた。

続いて、IodineSpec5 によって計算されたヨウ素分子吸収スペクトルの妥当性を確認することを目的として、分光実験用のヨウ素分子参照セル ($^{127}\text{I}_2$ のみ存在) を用いたダブルパルスレーザー吸収分光実験を行い、ヨウ素分子参照セルの吸収スペクトルを IodineSpec5 による計算値と比較した。その結果、レーザー強度変動の影響によるバックグラウンド値の変動がみられたものの、ピーク位置、ピーク形状、各ピークの相対強度は実験値と計算結果でよく一致しており、IodineSpec5 によるヨウ素分子の吸収スペクトル計算結果が妥当であることが確認できた。

以上の結果をふまえ、 $650\text{ nm} \pm 5\text{ nm}$ の波長帯におけるレーザー吸収分光装置の整備を行った。装置の基本的なデザインは (1) に記載した小型化したメタン安定同位体分子分析用のレーザー吸収分光装置と同様であるが、ヨウ素分子は金属などの材料を腐食することや吸着性が高いことを考慮し、ヨウ素分子に暴露されるセル中央管やその他のパーツは、耐腐食性・耐吸着性の材料を選定した。さらに、気体状ヨウ素分子の再凝華を防ぐために、分析セル全体に抵抗加熱ヒーターを取り付け断熱箱で覆うことで、装置全体の昇温・保温を可能とした。

続いて、構築したヨウ素同位体分析用のレーザー吸収分光装置を用いて、室温状態及び装置を昇温した状態で、セル内に試料を導入しない状態で装置の動作確認を行った。室温状態では、試料のない状態での共振器の減衰率（以下、「バックグラウンド値」という）が安定し、共振器のミラー反射率もメーカー仕様と同程度であると評価されたことから、装置が正しく作動していることが確認された。一方、昇温状態においては、昇温開始後 3 時間後に測定を開始したところ、共振器セル

の温度上昇に伴ってバックグラウンド値が上昇しており、これは昇温によるミラーマウントの熱膨張により光学調整にずれが生じたことが要因と考えられた。ピエゾ電圧値を変化させることで元のバックグラウンド値に補正することができたが、昇温開始後はより長時間加温を継続し、光共振器セル全体が熱平衡になってから測定を開始する必要があることが示唆された。

(3) 溶液前処理方法の検討

レーザー吸収分光装置には分析対象の分子を気体状にして導入する必要がある。ヨウ素は地下水中にヨウ化物イオンの状態で溶存していることから、地下水中に溶存しているヨウ化物イオンを気体状の I_2 としたうえでレーザー吸収分光装置のセルに導入する必要がある。本検討では、NaI 溶液中のヨウ化物イオンを酸化して発生した I_2 の抽出方法として、シリコンオイルを用いた抽出方法及びサンプルの濃縮と精製に使用されるクロマトグラフィーの固相抽出カートリッジを利用した抽出方法について検討を行った。

上記のどちらの方法においても、 I_2 回収ライン内には水が付着していた。(2)に記載したように、光共振セル内の水分子の光吸収がヨウ素分子の光吸収に干渉するため、地下水の前処理において光共振器セル内に導入する試料ガス中からの水分子除去が重要となることから、上記の抽出方法を採用する場合には、試料中からの水分除去方法についての検討を進める必要がある。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書（NUMO, 2021）の本編 7.2.3 項（本報告書で示したセーフティケースの目的に対する適合性）では、報告書の取りまとめを通じて地層処分技術の信頼性をより高めるために今後取り組む技術課題を明らかにしており、その中で、安全機能への影響を最小限に抑えて、処分場近傍の地質環境の熱的・水理学的・力学的・化学的状态の変化や人工バリア挙動を把握するための信頼性の高いモニタリング技術の開発も挙げられている。今後、包括的技術報告書を更新する際は、本技術開発の進捗状況や適用性に基づいて記載を更新する。本技術開発は、この全体計画にも盛り込まれているモニタリング高度化技術に該当する。

4. 今後の展開

今年度の成果をもとに、2025 年度は以下の項目を実施する。

(1) 溶液試料の前処理系の構築

今年度の成果を踏まえ、溶液試料中からのより効率的な I_2 抽出方法及び試料ガス中からの水分除去方法の検討並びにレーザー吸収分光装置への試料ガス導入のための前処理系の構築を進める。

(2) 安定同位体標準試料を用いたレーザー吸収分光分析実験

2024 年度に構築したレーザー吸収分光分析装置を用いて、ヨウ素安定同位体を含む対象分子の吸収スペクトルを観測し、その性能を評価する。

(3) レーザー吸収分光分析による溶液試料中安定同位体測定の実証

溶液前処理系をレーザー吸収分光装置と組み合わせ、溶液中に溶存するヨウ素を気体状 I_2 としたうえでレーザー吸収分光装置に導入し、吸収スペクトルを取得する実証実験を行う。また、この結

果を受けてヨウ素同位体分析を想定した場合のレーザー吸収分光装置の性能を評価する。

	2023 年	2024 年	2025 年
装置小型化等の検討			
1-1 小型化	→		
2-1 高温動作試験		→	
レーザー分光装置の構築と性能評価			
1-2 対象分子・ターゲット吸収検討	→		
2-2 吸収分光装置開発		→	
3-1 安定同位体標準試料分析実証			→
溶液試料前処理系の開発			
1-3 前処理法の検討	→	→	
2-3 溶液試料の前処理系の構築			→
3-2 溶液試料中安定同位体測定実証			→

図 1 研究計画

参考文献

- Knöckel, H. and Tiemann, E. (2013) : Basics and Usage of the Program IodineSpec5; Institut für Quantenoptik, Universität Hannover: Hanover, Germany.
- Kochanov, V. R., Gordon, E.I., Rothman, S.L., Wcisło, P., Hill, C., and Wilzewski, S. J., (2016) : HITRAN Application Programming Interface (HAPI) : A comprehensive approach to working with spectroscopic data, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 177, 15-30.
- Terabayashi, R., Yoshida, F., Kunimaru, T. and Hasegawa, S. (2024) : A cavity ring-down spectrometer for methane isotope analysis using a 1.65 μm distributed feedback diode laser with fiber optical feedback loop, Review of Scientific Instruments, 95, 043005.

2.1.5 ボーリング孔の閉塞に係る技術開発の現状

國丸 貴紀 佐々木 嘉月 遠藤 稜尚

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

SKB 及び Posiva では、地上からの調査において掘削したボーリング孔の一部が地下施設を建設する領域に近接する、地下施設の建設及び安全評価に影響を及ぼす可能性が指摘されている（図 1）。このため SKB 及び Posiva は、このようなボーリング孔を確実に閉塞する必要が生じ、規制機関と議論を行いつつボーリング孔の閉塞を実施している。

このような状況は、Nagra, ANDRA, NWS などのヨーロッパ諸国においても同様に指摘される可能性が考えられるため、ボーリング調査終了直後において地上から掘削したボーリング孔を閉塞する技術の整備が重要と考えられ始めている。

NUMO は、海外の実施主体の技術開発状況を収集・整理し、以下の検討が進められていることを確認しており、主にボーリング孔の閉塞材やこれらを適切に設置する機材の整備が重要であることを確認している。

- 1) ボーリング孔の状況に関する情報の記録の重要性
- 2) ボーリング孔内の残置物の撤去方法の開発
- 3) ボーリング孔周辺の掘削影響領域の対処方法の開発
- 4) 地下水流動解析及び物質移行解析に基づく閉塞材の要求性能の設定
- 5) 要求性能に基づく閉塞材の組成及び閉塞方法の開発
- 6) 実証試験による体系的な閉塞技術の確立

また一般的に、地下水流動解析の結果、グラウトなどを充填しない場合、ボーリング孔や孔周辺のダメージゾーン（Borehole Damage Zone（以下、「BDZ」という））が移行経路となり得ることも示唆されている。

このような背景から、Nagra や NWS などは、SKB 及び Posiva が検討してきたベントナイト、セメント、礫、砂、金属プラグなどの閉塞材をサンドイッチ状に設置する概念（図 2）に基づき、これらを利用した体系的な閉塞技術の整備を進めている。また、NUMO は NWS（旧 RWM）及び Nagra と「ボーリング孔閉塞に係る国際共同プロジェクト」として 3 国間協定を締結し、当該技術開発に関する情報交換及び共同研究を実施している。

2024 年度は、これまでに整備した閉塞材を地下深部まで運搬する装置（ダンプベイラー）内において、ベントナイトペレットが膨潤して発出困難となる事象への対応のため、ベントナイトペレットの膨潤を遅延するためのコーティング剤の選定及びその有効性の確認を実施した。また、NUMO と Nagra との共同研究では、ボーリング孔周辺の BDZ の閉塞及び閉塞材の設置区間長を維持するための金属プラグ（ブリッジプラグ）に係る設置技術や圧着性などの確認を実施した。さらに、GTS において、閉塞材をボーリング孔の深部に運搬して設置する技術、ボーリング孔周辺の BDZ の閉塞及び閉塞材の設置区間長を維持するための金属プラグ（ブリッジプラグ）などを利用し、ボーリング孔閉塞技術の実証試験を実施するためのボーリング孔を掘削した。

2. 主な成果

ベントナイトペレットの水中における膨潤開始を、一時的に遅延（約5時間程度）できると考えられるコーティング剤の候補について、無機化合物、有機化合物及び生分解性プラスチックを対象に、ベントナイトペレットへのコーティングが可能であると考えられる30種類の材料（表1）を選定した。コーティング剤の候補を対象に、文献調査及び簡易な予備試験を実施するとともに、これらの化学的性質や膨潤遅延効果など（表2）を検討して10種類の候補剤を選定した（表1）。

次に、国内で入手可能なNa型ベントナイト「クニゲルV1」を材料として、粒径が異なるベントナイトペレットを製造し、10種類のコーティング剤の候補によりこれらのコーティングを行い、膨潤状況の確認試験を実施した。この結果、有機化合物（天然樹脂）のシェラックをコーティングしたベントナイトペレットの膨潤遅延効果が他のコーティング剤と比較し高いことが分かった。発出状況の確認試験では、シェラックでコーティングしたペレットが粒状のまま比較的容易に発出できることが明らかとなり、シェラックをコーティング剤として使用することとした。

充填密度の最適化では、コーティングを行っていない粒径が異なるベントナイトペレットの混合割合をパラメータとして充填密度を計測し、従来の混合割合と整合的な結果であることを確認し、シェラックによるコーティングを実施して各試験に供した。

模擬運搬装置を用いた試験では、粒径5mm程度のコーティングしたベントナイトペレットが、模擬運搬装置内で膨潤することにより、模擬運搬装置からの発出が困難な状況であったことから、模擬運搬装置の内壁にシリコンを塗布し摩擦力を低減することや、ピストンの押し出し圧力がベントナイトペレットに直接作用しないよう、ピストンの位置を変更することなどにより、コーティングしたベントナイトペレットを粒状で模擬ボーリング孔内へ発出できることを確認した（図3）。

コーティング剤がベントナイトペレットの膨潤性や透水性に及ぼす影響を確認するために、コーティングしたベントナイトペレットを用いた膨潤圧・透水試験を実施した。コーティングしたベントナイトペレットに、イオン交換水及び人工海水を通水したいずれの場合においても、膨潤圧は既往研究と比較して大きい結果となり（図4）、透水係数については $10^{-13}(\text{m/sec})$ オーダー以下という既往研究と比べて小さい結果となった（図5）。

以上の検討から、膨潤抑制のための最適なコーティング剤（シェラック）を選定し、コーティングしたペレットの基本的な物性値を取得した。今後の課題として、ベントナイトペレットに均質かつ効率的にコーティングを行う技術の整備や、有機物であることの核種移行への影響評価等が必要である。

Nagraとの共同研究では、2024年度までに開発したブリッジプラグ、及びブリッジプラグの設置装置を利用して実際のボーリング孔にブリッジプラグを設置し、ブリッジプラグが岩盤に確実に圧着できることの確認試験を実施した（図6）。ボーリング孔内に確実にブリッジプラグを設置するため、ブリッジプラグがボーリング孔の孔壁（岩盤）に、一定以上の圧着力で設置されていない場合は、ブリッジプラグの設置装置との分離ができない構造となっており、ブリッジプラグの設置時における品質確保が考慮されている。

本共同研究では、深度が異なる2つのトンネル間を貫通するボーリング孔内に、ブリッジプラグを設置した後、下位のトンネルから上位のトンネル側に向け、ボーリング孔内に設置したブリッジプラグを最大10tの力で押した場合（加圧試験、図6）においても、ブリッジプラグが設置した場所から移動しないことを確認できた（表3）。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編 3.5.2 項（今後の取り組み）及び本編 4.5.7 項（3）（地下施設の閉鎖）に記載した課題の一つであり、包括的技術報告書を更新する際に本成果を反映させる。

4. 今後の展開

これまでの検討により、ベントナイトペレット（クニゲル V1）、セメント系材料、ブリッジプラグなどを用いてボーリング孔を確実に閉塞できる見通しが得られた。今後は、閉塞材とその運搬装置であるダンプベイラー及びブリッジプラグとその設置ツールについて、ボーリング孔を利用した実規模の実証試験を実施することによって、体系的なボーリング孔閉塞技術を構築する予定である。

一方で、閉塞材であるベントナイトペレットについては、地下水との接触による膨潤により閉塞材の運搬装置（ダンプベイラー）からの発出不良となるおそれがある。この課題への対応として、ベントナイトペレットの膨潤開始を数時間程度遅延するための膨潤遅延剤の選定、及び膨潤遅延剤をコーティングしたペレットの性能確認試験を実施しており、GTS において計画している実規模試験に反映させる予定である。今後、ボーリング孔の閉塞技術に関する国際ワークショップなどを開催し、国際的に信頼性が高いボーリング孔の閉塞技術として整備を進める。

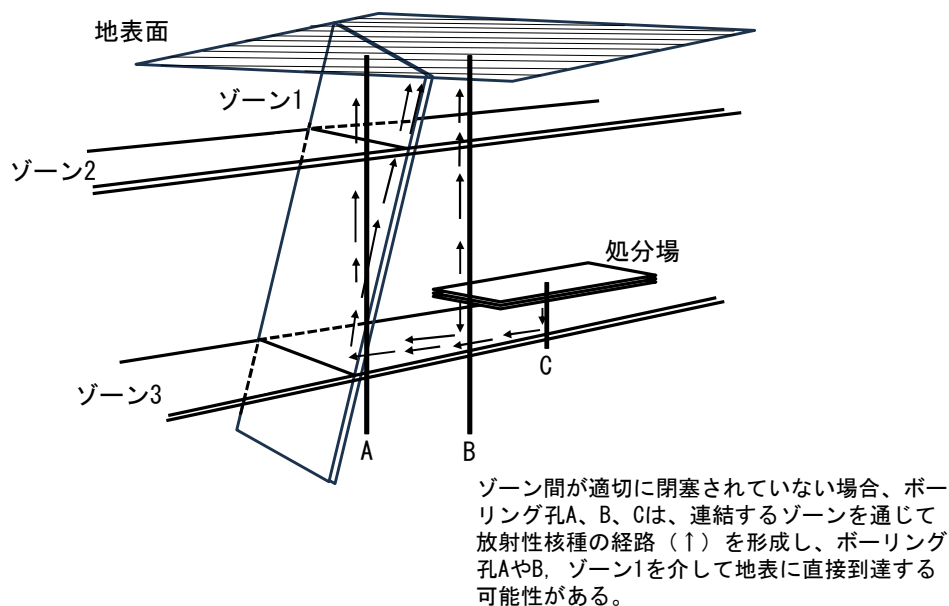


図 1 放射性核種の短絡経路の概念図（Pusch et al., (2016) を基に作成）

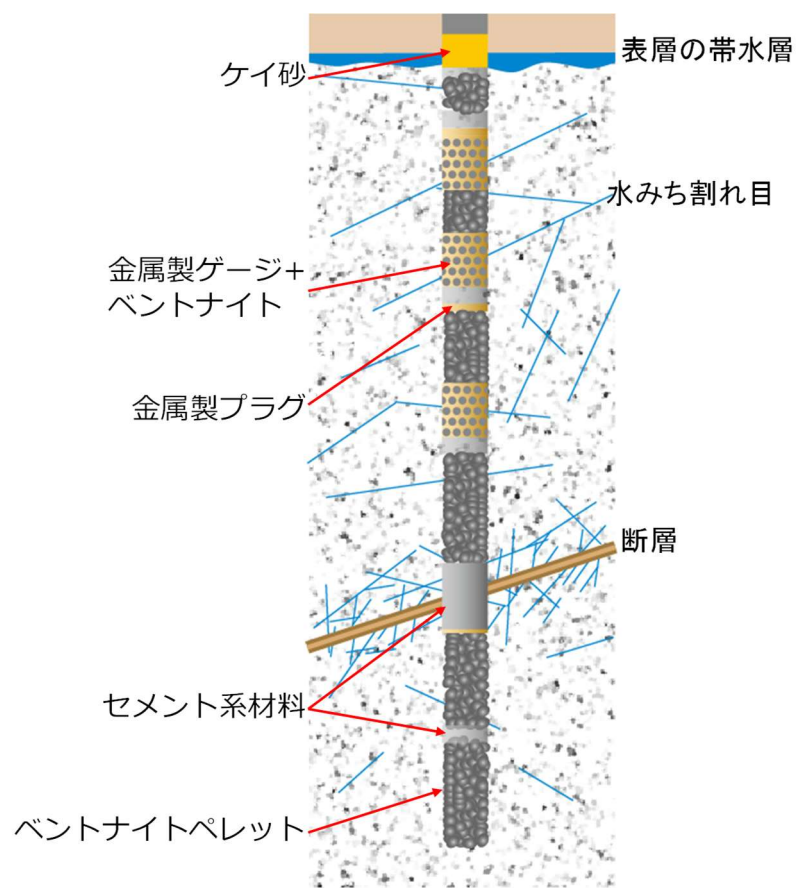


図 2 閉塞材をサンドイッチ状に設置してボーリング孔を閉塞する方法概念図（SKB(2010)を基に作成）



発出状況



発出したペレット

コーティングベントナイトペレット



発出状況



発出したペレット

コーティングなしベントナイトペレット

図 3 ベントナイトペレットの発出試験の様子

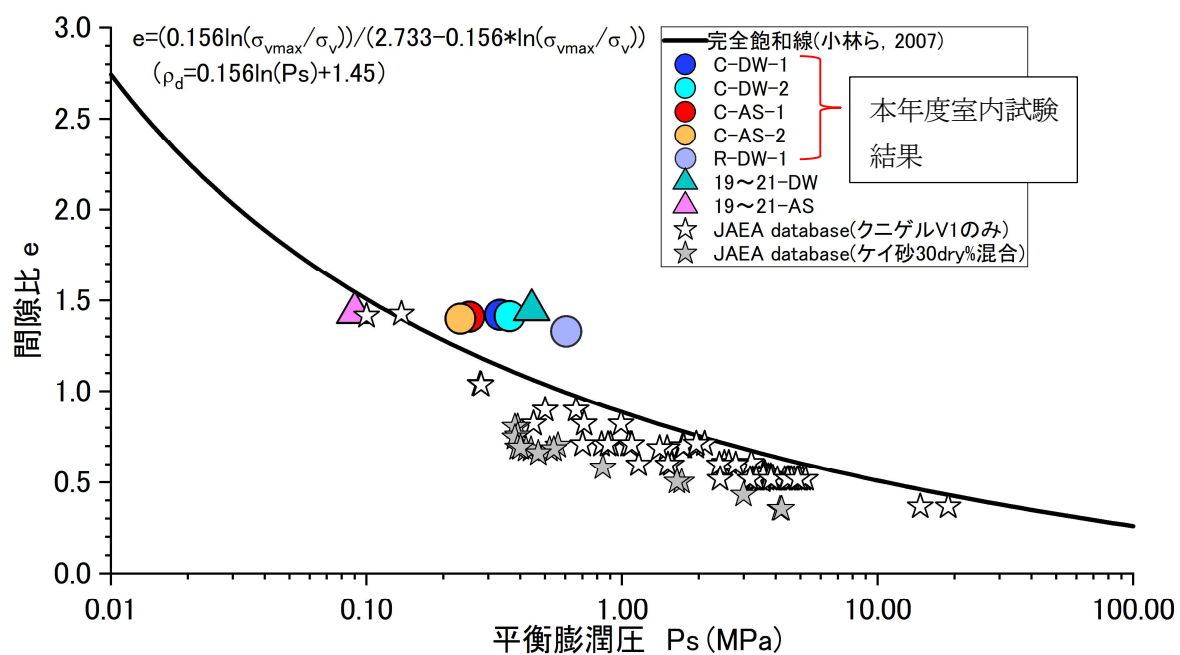


図 4 膨潤圧と間隙比の関係

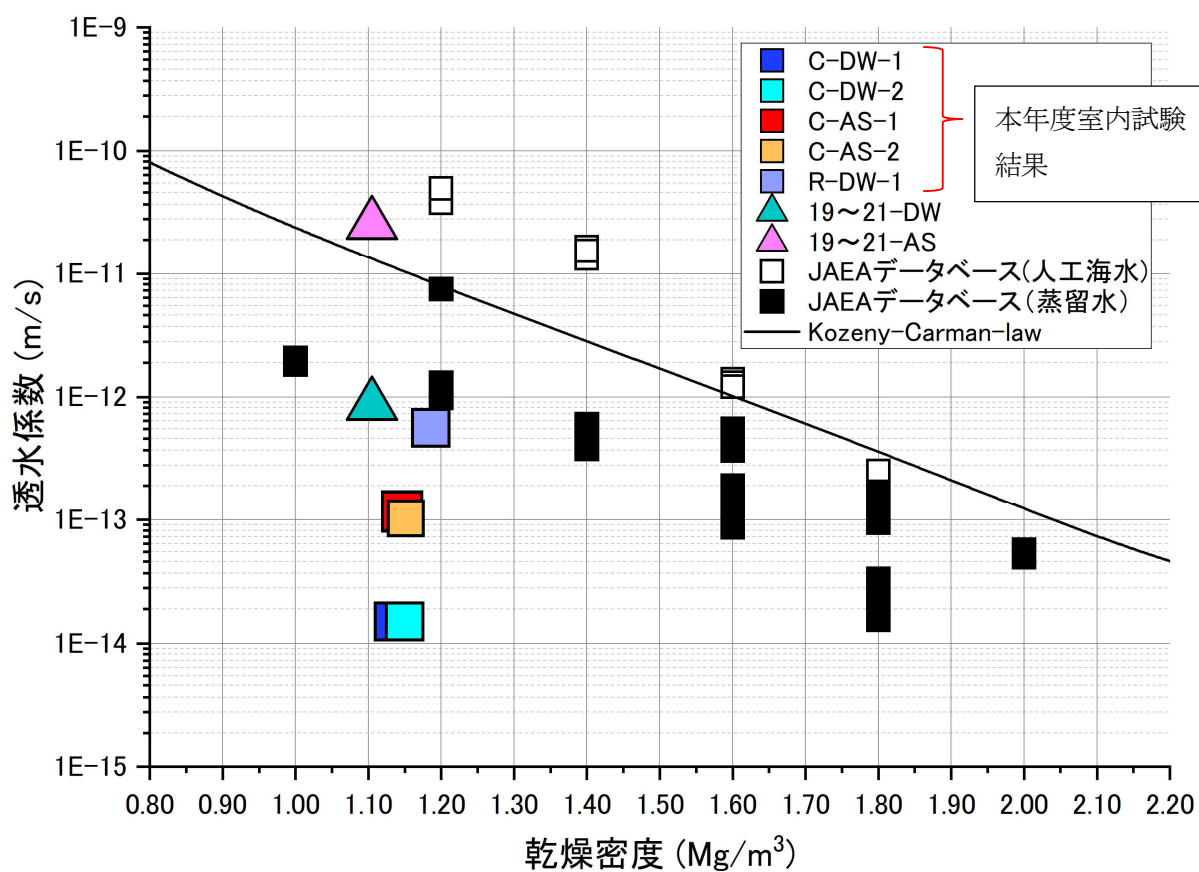


図 5 透水係数と初期乾燥密度の関係

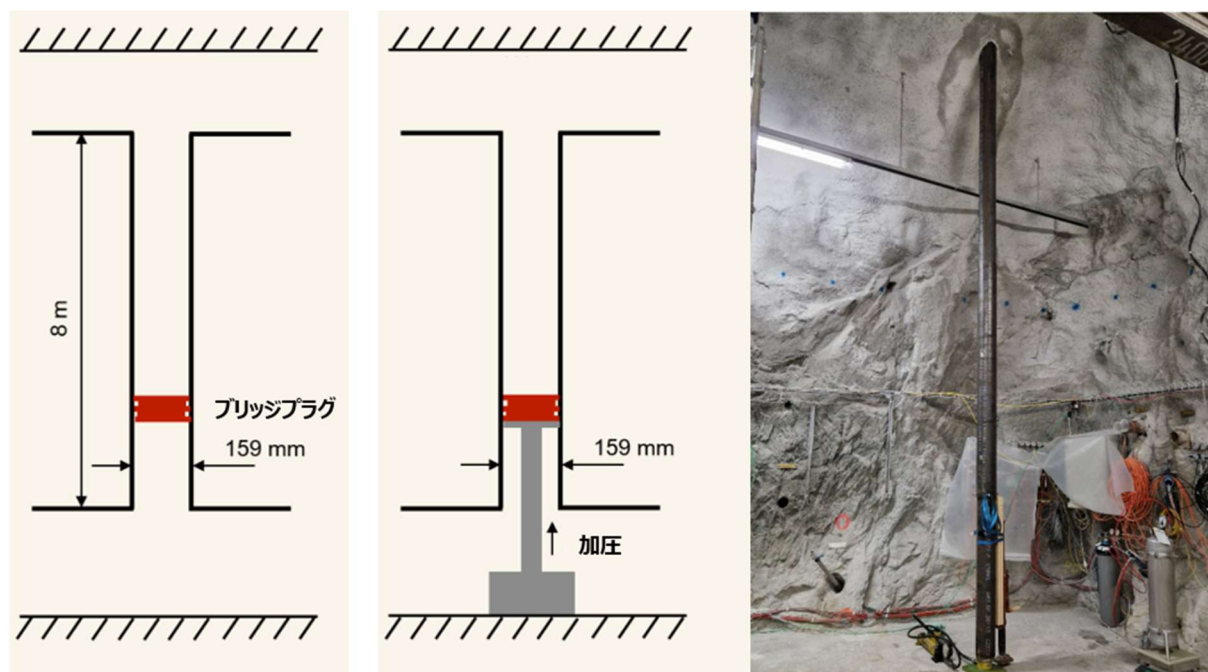


図 6 ブリッジプラグ設置の概念図（左図）、加圧試験の様子（右図）

表 1 検討対象としたコーティング剤（ハイライト部は表 2 を基に選定した 10 種）

No.	候補材料の名称	化学的 分類	(1) SDS 入手可否	(2) SO ₄ ²⁻ 含有有無	(3) 吸湿性 の有無	(4) 適用実績 の有無	(5) pH	(6) 作業性	(7) 変状の 有無	(8) 予備試験 結果
1	石膏	無機	○	×	×	×	◎	×	○	○
2	炭酸水素ナトリウム（飽和溶液）	無機	○	○	×	×	◎	○	×	×
3	炭酸ナトリウム（飽和溶液）	無機	○	○	×	○	○	○	×	×
4	水酸化カルシウム（飽和溶液）	無機	○	○	○	×	×	○	×	○
5	塩化ナトリウム（飽和溶液）	無機	○	○	×	×	◎	○	×	×
6	ジオポリマー	無機	○	○	○	×	○	×	○	×
7	SHCN	無機	○	×	○	×	○	×	×	○
8	OPC	無機	○	×	○	×	○	×	×	×
9	超早強セメント	無機	○	×	○	×	○	×	×	×
10	ミョウバン（4%溶液）	無機	○	×	×	×	○	○	×	×
11	水酸化ナトリウム（飽和溶液）	無機	○	○	×	×	×	○	×	×
12	塩化ナトリウムと カオリン粘土の混合物	無機	○	○	×	×	○	○	×	×
13	PVA	生分解性	○	○	○	×	◎	○	○	×
14	PGA	生分解性	○	○	○	×	○	×	○	○
15	シェラック	有機	○	○	○	○	◎	○	○	×
16	アルギン酸ナトリウム（3%溶液） および塩化カルシウム（19%溶液）	有機	○	○	×	×	◎	○	○	○
17	エチレン・酢酸ビニル樹脂	有機	○	○	○	×	○	○	○	○
18	フッ素系樹脂	有機	○	×	○	×	◎	○	○	○
19	グァーガム（3%溶液）	有機	○	○	○	×	◎	○	×	×
20	寒天	有機	○	○	○	×	◎	○	×	×
21	テフロンコートスプレー	有機	○	○	○	×	○	○	○	×
22	キサンタンガム（2%溶液）	有機	○	○	○	×	◎	○	×	×
23	アルギン酸ナトリウム（3%溶液）	有機	○	○	○	×	◎	○	×	×
24	コーンスターチ（6%溶液）	有機	○	○	○	×	○	○	×	×
25	マジカルリペラ	有機	○	○	○	×	×	○	×	×
26	CMC、ミョウバン、および砂糖水の 混合物	有機	×	×	×	×	○	○	×	×
27	砂糖水	有機	×	×	×	×	◎	○	×	×
28	土壁用撥水剤	有機	○	○	○	×	◎	○	×	×
29	PVA と砂糖の混合物	有機	×	×	×	×	○	○	×	×
30	床用ワックス	有機	○	×	○	×	○	○	×	×

表 2 コーティング剤に対する評価時の検討基準

評価項目	判定基準	点数
SDS 入手の可否	○： 入手可	1 点
	×： 入手不可	合計を 0 点
硫酸イオン含有の有無	○： 含まない	1 点
	×： 含む	0 点
吸湿性の有無	○： 無し	1 点
	×： 有り	0 点
ベントナイトに対する適用実績の有無	○： 有り	1 点
	×： 無し	0 点
pH	◎： 中性 (pH=6~8)	2 点
	○： 弱酸性 (pH=3~6) もしくは弱アルカリ性 (pH=8~11)	1 点
	×： 酸性 (pH=1~3) もしくはアルカリ性 (pH=11~14)	0 点
コーティングの作業性	○： 問題なし	1 点
	×： 特殊環境下での作業が必要もしくは作業時間の制約有り	0 点
コーティングに伴うペレットの変状	○： 無し	1 点
	×： 有り (ひび割れ発生など)	0 点
予備試験結果	○： 5 時間の鉛直方向の膨潤抑制効果有り	1 点
	×： 5 時間の鉛直方向の膨潤抑制効果無し	0 点
pH の差分	コーティング済ペレットを浸漬したイオン交換水の pH から 7 (中性) を引いた値の絶対値	

表 3 加圧試験の結果

Steps	加圧量 (t)	加圧時間 (min)	下部変位 (mm)	上部変位 (mm)
1	0.5	5	0.20	0.00
2	1.0	10	0.30	0.00
3	1.5	10	0.30	0.00
4	2.0	11	0.20	0.00
5	2.5	13	0.25	0.00
6	3.1	39	0.20	0.00
7	3.6	1 week	0.25	0.00
8	4.1	40	0.15	0.00
9	4.6	40	0.25	0.00
10	5.1	75	0.20	0.00
11	5.6	60	0.25	0.00
12	6.1	Several weeks	0.20	0.00
13	6.6	60	0.20	0.00
14	7.1	>1 week	0.20	0.00

参考文献

- Pusch, R., Mohammed, H.L., Knutsson, S., Ramqvist, G., and Liw, L. (2016) : Fracking - Prevention of Leakage of Oil and Gas from Abandoned Holes in Consolidated Rock, Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, vol.6, no.1, 2016, 19-27
- SKB (2010) : Fud-program 2010, ISSN 1104-8395, September 2010.

2.1.6 サイト調査におけるデータ管理方法に関する検討 － データマネジメントシステムの要件定義及び基本設計 －

西尾 光 尾上 博則 大城 遥一 石橋 梢

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

処分地を選定するためのサイト調査では、特定放射性廃棄物を長期にわたって人間の生活環境に有意な影響を与えないよう隔離し、閉じ込めるために必要な地質環境条件を備えたサイトかどうかを確認するために各種の調査・試験を実施する。具体的には、地表踏査、物理探査、ボーリング調査、室内試験に加えて、地下調査施設で調査を実施し、様々なデータを取得する。また、これらのデータを用いた地質環境モデルも構築する。

調査・試験で取得したデータと地質環境モデル構築結果、それらの関連情報（メタデータや品質管理記録の PDF ファイルなどを含む）は、サイト調査から処分地を建設・操業し、閉鎖するまでの 100 年程度にわたる事業期間において適切に管理する必要がある。そのためには、データの管理方法を整理するとともに、データの透明性、信頼性、追跡性、検索性、保護及び情報セキュリティを確保しつつ一元的に管理するためのデータマネジメントシステムが必要である。このデータマネジメントシステムは、データの作成者とそのユーザーがデータの登録、保存、表示を容易に実施できる機能とともに、適切なアクセス権限の設定による保護策を講じることができる機能が備わっている必要がある（IAEA, 2024）。また、原子力規制委員会（2022）では、「各調査段階において行われるボーリング等の調査によって得られた情報は、長期間にわたる埋設事業の期間中、保存しておく必要がある。」としている。

そのため、NUMO では継続的にサイト調査におけるデータ管理方法に関する情報収集とその結果に基づく管理方法の整理に関する検討を進めている。2024 年度は、データ管理の中核となるデータマネジメントシステムとして「サイト特性評価支援システム」（Geo-Synthesis Support System : 以下、「G3S（ジースリーエス）」という）の要件定義及び基本設計を行った。

2. 主な成果

G3S は、ユーザーインターフェース（以下、「UI」という）・ユーザーエクスペリエンス（以下、「UX」という）の向上を重視している。そのため、G3S の想定ユーザーへのインタビューやワークショップを行い、そこで得られた情報を精査して、ペルソナ（代表的なユーザー層の特徴をまとめて、一人のユーザー像として設定したもの）やカスタマージャー（ユーザーがシステムを利用する際の行動や思考を一連の時系列で整理したもの）の設定等を進めた。

サイト調査におけるデータ管理の特徴としては、事業の段階に応じてデータマネジメントシステムにユーザーが求めるニーズや機能が異なることが挙げられる。具体的には、調査の計画立案や実施の段階では、現場での意思決定を迅速に行うために NUMO と調査会社間でのデータの共有や議論といった速報性が重視される。地質環境モデルの構築や施設設計及び安全評価を行う段階には、誤ったデータが使用されていないか、関係者間で合意されているかどうかといったことに留意する必要があり、特に、データの適切なバージョン管理やメタデータなどの関連情報の保存が重要である。また、選定

されたサイトで各種モニタリングが開始された際には、リアルタイムでデータの異常値を検知できるような仕組みも求められる。

G3S で上記のニーズや機能を実現させるために、ユーザーのニーズに応じて必要な機能を利用できるように、①NUMO と調査会社などの関係者間でデータの速報性を重視して情報共有することを目的とする領域、②サイト調査で取得したデータ及び構築した地質環境モデル、それらのメタデータなどのデータを保存するデータレイク（表形式の構造化データや画像、文書などの非構造化データなどあらゆる種類のデータを一元的に取り扱うことが可能）の領域、③各種モニタリングデータを保存する領域の3つからなる構成とした（図 1、図 2）。また、UI・UX の観点からユーザーが直感的に操作できることや、運用面でユーザーに過度な負担がかからないことなどを意識して具体化を図った。以下に、それぞれの検討状況を成果としてまとめる。

① 情報共有用フォルダ

- ・ ユーザーごとに割り当てられたアクセス権に基づき、所定のフォルダを介してデータのやり取りを行う。速報性を重視していることから、メタデータの入力には基本的に行わない。ユーザーの利便性を高めるために、単なるファイルストレージではなく、データに係る更新履歴やメッセージはタイムラインとして画面上に表示させるなどの機能を実装する。
- ・ ソフトウェアの情報収集の結果、低コストでの運用が可能となる開発方法を選定することができた。

② データレイク

- ・ データ登録は、機械判読可能な CSV 形式の帳票をシステムに読み込ませて行う。調査の責任者などによる承認の後に、他のユーザーから検索が可能な本登録の状態となる。長期にわたる事業を鑑み、組織改編などに容易に対応できるよう、この承認ルートは任意な設定・追加を可能とする。なお、手書きの資料や PDF、画像データは、データ登録時に OCR（Optical Character Recognition）を実施し、テキストデータとともに登録することで全文検索を可能とする。
- ・ データ検索は、入力したキーワードによる全文検索や各種条件を設定した絞り込み検索、GIS を活用して地図上に調査地点を表示させる地図検索などを機能として実装する。
- ・ 地質環境モデルを構築する際には、複数のデータを整合的かつ調和的に解釈する。その際には、プロジェクト管理やモデルのバージョン管理、評価の一貫性の観点から、地質環境モデルの構築に用いるデータを特定の時点で固定し（データフリーズ）、その後取得したデータを使用できないようにすることが重要である。その支援として、データセットとしてデータを整理する機能やデータフリーズのバージョンを検索する機能などを実装する（図 3）。

③ モニタリング

- ・ G3S と連携する可能性がある外部インターフェースの調査として、地下水の水圧・水温や地震などの各分野におけるモニタリング装置のメーカー（10 社）にヒアリングを行い、データの取得方法やファイル形式、エンコーディングなどの情報を収集した。その結果、各種モニタリング装置が、図 4 に示すような連携方式で G3S との連携が可能であることが確認できた。
- ・ 今後は、実際に使用するモニタリング装置に応じて、即時データの取扱方法、通信量、異

常データのリカバリ，複数種類のセンサーによるデータの統一化等の調整を検討する。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編 3.5.2（今後の取り組み）に記載した課題である。包括的技術報告書の付属書 3-12（地質環境調査およびモデル構築にかかわる品質マネジメント）のとおり，地質環境調査・評価における品質に関連するすべての情報を追跡性・網羅性をもってデータベース化することが可能となるように引き続き検討し，システムを構築する。包括的技術報告書を更新する際には，本検討の成果であるデータマネジメントシステムの活用を検討する。

4. 今後の展開

2025 年度・2026 年度は，2024 年度に実施した要件定義及び基本設計に基づき，G3S の詳細設計・開発を着実に進める。以降は，データの拡充を図りつつ，システムの保守・運用を行う。また，実運用に基づいたニーズに応じてシステムの改良を行うことを検討する。

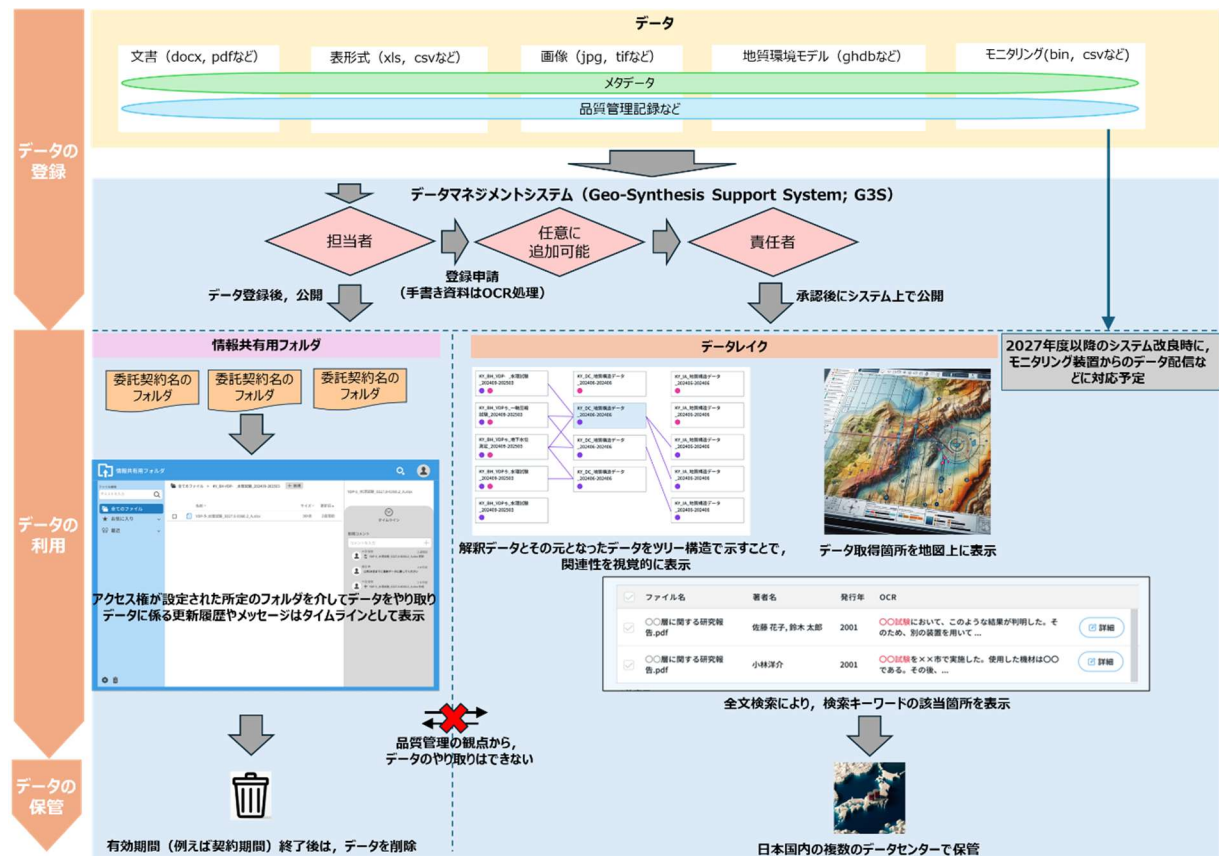


図 1 データの登録、利用、保管の一連の流れにおける G3S の位置づけ
(ツリー図の拡大版は図 3 に示す)

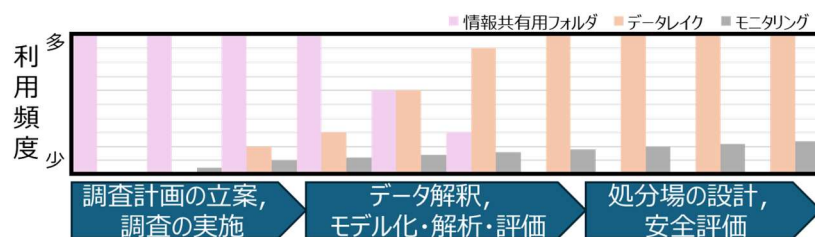


図 2 G3S の 3 つの領域（情報共有フォルダ，データレイク，モニタリング）における利用頻度とその変遷のイメージ

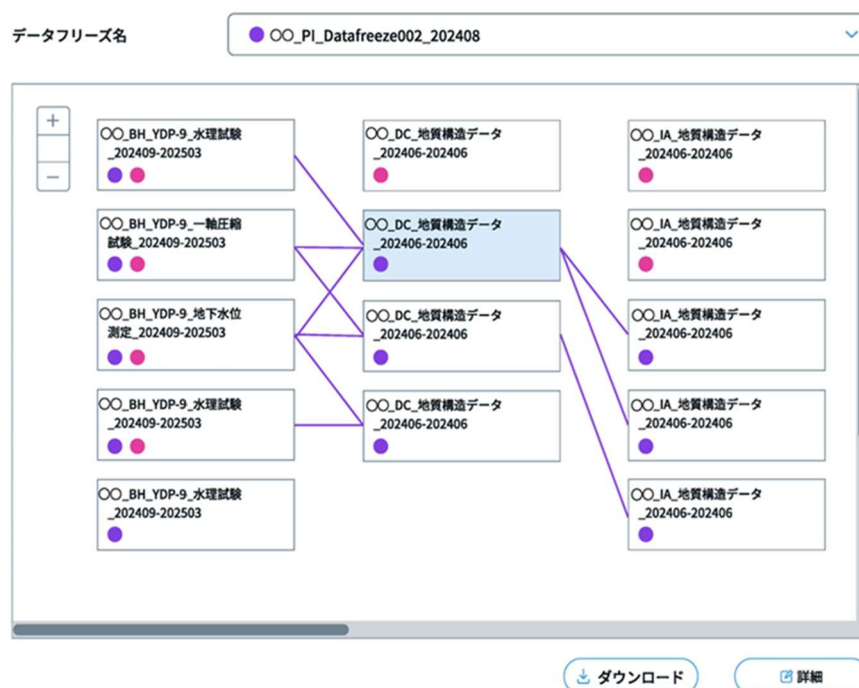


図 3 ツリー構造でデータフリーズしたデータの関連性を表示するイメージ

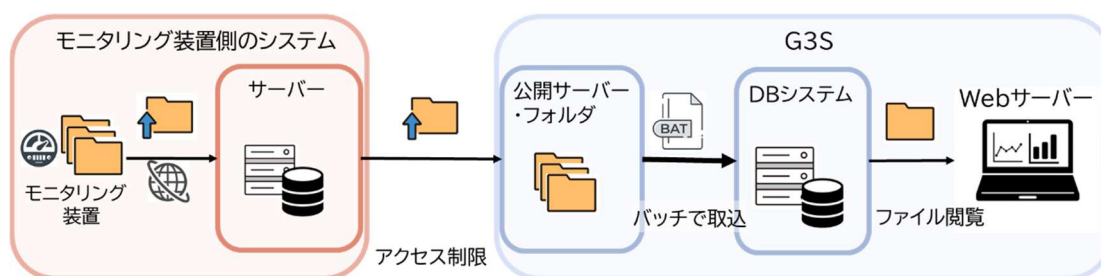


図 4 モニタリング装置から G3S へのデータ配信方法の例

参考文献

- 原子力規制委員会 (2022) : 特定放射性廃棄物の最終処分における概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮されるべき事項 (原規規発第 2208241 号 原子力規制委員会決定) .
- IAEA (2024) : Management of Site Investigations for Radioactive Waste Disposal Facilities, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.40.

NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告 : わが国における安全な地層処分の実現
ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー, NUMO-TR-20-03.

2.2 処分場の設計と工学技術の体系的な整備

我が国の多様な地質環境条件に柔軟に対応して処分場を設計できるよう、人工バリアの材料特性データや長期健全性の論拠となる科学技術基盤の整備、及び設計オプションの開発に継続的に取り組んだ。

人工バリアを構成する金属製処分容器（ガラス固化体のオーバーパック及び TRU 等廃棄物の廃棄体パッケージ容器の総称）について、長期耐食性に係る評価技術の信頼性向上のため、腐食防食学会に委託して「長期腐食寿命評価技術検討委員会」を設置いただき、過渡期における腐食、長期腐食寿命評価モデル、微生物腐食の抑制技術、腐食試験技術の標準化に関して検討を継続した。このうち過渡期における腐食に関連して、JAEA 及び大学との共同研究を通じて、局所的な腐食評価方法、放射性分解生成物による腐食促進評価方法、及び応力腐食割れ評価方法の高度化に取り組んだ。また、腐食防食学会では、金属製処分容器に関する腐食試験の品質確保のため、学会規格「圧縮粘土材料中での浸漬試験による炭素鋼の腐食減量測定方法」の作成を進めている。作成された規格案に示された試験方法について、ラウンドロビン試験（複数の試験者により同一の方法で行う試験）を実施し、異なる試験機関で実施しても、統計的に同じ試験結果が得られることを確認することができた（2.2.1 参照）。

緩衝材については、長期健全性を説明するための技術的根拠の整備の一環として、ナチュラルアナログ研究に取り組んでいる。オーバーパックの腐食生成物によるベントナイトの変質現象に関するナチュラルアナログとして、スウェーデンの鉄鉱石鉱山において磁鉄鉱（ Fe_3O_4 、オーバーパックの腐食生成物の一つ）が天然ベントナイトに接触している事例の研究を、大学との共同研究により進めた。昨年度に実施した現地採取試料の分析では粘土鉱物の変質は観察されなかったことを受け、そのメカニズムの解明に資するため、接触界面の状態が異なる複数の試料の分析を開始した。地下水による緩衝材の流出現象に関するナチュラルアナログとして、国内のベントナイト鉱山においてベントナイトと河川が接触している事例を対象とした研究を、国際共同プロジェクト IBL（International Bentonite Longevity）及び大学との共同研究により進めた。河川の流水下でも周囲の岩盤と比較して、ベントナイトの浸食量は同程度であることなどが分かった。これらを含めた国内でのナチュラルアナログ研究に関する最新情報の集約を目的に、ナチュラルアナログ国際ワークショップを JAEA 及び大学と共同で開催し、ワークショップにおいて得られた情報を NUMO-TR として取りまとめた（2.2.2 参照）。

設計の柔軟性を確保すべく、設計オプションの安全性と実現性の向上、さらには実用化に向けた効率性の改善を目的とした開発を継続している。長期的な耐食性を高めるオプションとして銅を耐食層とするオーバーパック（銅コーティングオーバーパック）について、2017 年度に開始した NWMO との共同研究により製造方法の開発を進めてきたが、炭素鋼容器に対し、電気めっきにより製造する方法について、実規模大で繰り返し実証試験を行い、実現可能であるとの見通しを得て、本共同研究を終了した。また、蓋接合部については摩擦攪拌接合技術の適用性の評価を、大学との共同研究により進めた。これまでに要素試験として平板の銅コーティング材を用いた摩擦攪拌接合試験により接合条件を確認したうえで、実機の形状を想定した円筒形の銅コーティング材を用いた試験により、円筒容器に対しても摩擦攪拌接合法が適用可能である見通しを得つつある（2.2.3 参照）。

地下施設の設計・施工に関する技術の信頼性を向上させるため、大深度地下坑道に対する耐震性評価手法の整備を電中研との共同研究により進めた。地層処分のための地下施設は、地震時においても高い安全性が求められる原子力関連施設であることから、建設、操業期間中における坑道の耐震設計手法の整備が必要と考え、耐震設計に必要な岩の繰返し強度、変形特性に係るデータの取得を進めた（2.2.5 参照）。また、熱及び力学条件を変数とした坑道の力学的安定性の解析を実施し、坑道断面の

設計を効率化する取組みも行った（2.2.4 参照）。

2.2.1 金属製処分容器の長期腐食寿命評価技術の技術的課題の検討

長田 柁平¹ 小川 裕輔¹ 鈴木 寛¹ 五十嵐 誉廣² 長岡 亨³ 三ツ井 誠一郎² 渡邊 豊⁴
西方 篤⁵

¹原子力発電環境整備機構, ²日本原子力研究開発機構, ³電力中央研究所, ⁴東北大学, ⁵東京工業大学

1. 背景・目的

高レベル放射性廃棄物を封入するオーバーパックは、埋設後初期の放射能が高い期間、ガラス固化体から放射性物質の溶出を防止するために、少なくとも1,000年間はガラス固化体と地下水との接触を防ぐことが要求されている。NUMOは、上述の要求事項を満たすことが可能なオーバーパックとして、炭素鋼製オーバーパック (NUMO, 2021; NUMO, 2025) や銅コーティングオーバーパック (Suzuki et al., 2020) の設計例を示した。また、TRU等廃棄物についても、廃棄体パッケージ容器 (炭素鋼製) により数百年程度の期間は耐食性を有することが可能であると考えられることを論じた (NUMO, 2021) (以下、オーバーパック及び廃棄体パッケージ容器を総称して「処分容器」という)。これらの処分容器の長期腐食寿命評価の信頼性をさらに向上させるためには、処分容器用金属材料の腐食現象に関する科学的根拠をより充実させることが重要であり、長期腐食寿命の評価技術についても幅広く専門家の意見を取り入れ、より適切なものとしていくことが必要である。

このような背景から、処分容器の長期腐食寿命評価において主要なプロセスとなる、①過渡期¹における腐食、②微生物腐食、③処分場閉鎖後長期の低酸素環境下における腐食及び④これらの腐食現象に関する最新の科学的知見を統合した腐食寿命の定量評価モデルを議論する場として、(公社)腐食防食学会 (以下、「学会」という) 内に「長期腐食寿命評価技術検討委員会」 (以下、「検討委員会」という) が組織された。NUMOは、検討委員会からの意見を取り入れながら、①～④に関する技術開発を進めている。本書では2024年度の成果を報告する。

2. 主な成果

①過渡期における腐食については、A) 放射線環境下における酸化剤総量の評価方法の検討、B) 腐食局在化評価方法の検討及びC) 応力腐食割れ評価方法の検討に取り組んでいる。本書では、A) に関する成果を報告し、B) 及びC) に関する成果は、Nagata et al., (2025) 及びTakita et al., (2025) を参照されたい。

一般に、放射線照射環境下では、水の放射線分解により過酸化水素が生成し、酸化剤の総量が増加するため、腐食が加速されることが報告されている (JAEA, 2013)。このため、包括的技術報告書においては、放射線により炭素鋼の腐食が加速されないようにオーバーパックの遮蔽代を設計した (NUMO, 2021)。一方で、ベントナイトに金属試験片を埋め込んで放射線を照射した場合には、腐食が加速されないという知見も報告されている (JAEA, 2013)。このような知見が利用できる場合には、腐食抑制の観点からの遮蔽代を合理化可能となるため、NUMOはJAEA及び東北大学と共同でベントナイト中における放射線分解過程と腐食の関係について共同研究を実施している。

ベントナイト中で放射線により腐食が加速されない原因としては、放射線分解生成物である過酸化

¹ 過渡期：地層処分において、処分容器の埋設後、金属腐食の影響要因となる環境条件が時間とともに大きく変化すると推定される期間であり、処分場の閉鎖から時間が経過し、各環境条件の変化が緩慢になるまでの期間。

水素の生成量が抑制されること、あるいは生成しても化学反応などにより分解されるためではないかと考えられてきた。例えば、ベントナイト中の還元性物質（黄鉄鉱等）や2 価の鉄腐食生成物の還元反応による過酸化水素の分解（JAEA, 2013）、あるいは酸化物と同様に、ベントナイトが過酸化水素の分解を促進する可能性（端, 2021）などが指摘されている。本研究では、ベントナイト間隙水の化学組成を考慮したラジオリシス解析により過酸化水素の生成量を推定するとともに（NUMO, 2024）、分解による過酸化水素の消費量の把握を試みている。本書では、過酸化水素の消費とベントナイト量の関係を求めた試験について報告する。

ベントナイトによる過酸化水素の分解挙動を評価するため、放射線を照射しない条件で、異なる重量のベントナイトと一定量の過酸化水素を含む模擬地下水を混合し、試料中の過酸化水素濃度の経時変化を調査した。その結果、ベントナイトとの共存により過酸化水素濃度が減少し、ベントナイト量が多いほどその減少量が大きくなった（図 1）。放射線照射により生成された過酸化水素の分解について評価するため、過酸化水素を添加せず、ベントナイトと人工海水を混合し、ガンマ線を照射する実験を実施したところ、放射線分解により過酸化水素の生成が確認できるが、ベントナイトを混合したほうが、溶液の過酸化水素の濃度が低かった（図 2）。これらの結果より、ベントナイトが過酸化水素を分解することが確認できた。

②微生物腐食の防止に関しては、緩衝材中の有効粘土密度を高めることにより、緩衝材内における微生物の増殖及び活性を抑制する対策が有効である。この対策の有効性を評価する方法には、試験前後のベントナイト中に含まれる微生物量を比較する方法を採用している（Beaver et al., 2024）が、ベントナイト中に含まれる微生物量が少ないため定量下限値未満となる場合もあり、信頼性の向上が課題であった。このため、培養法による定量精度の向上に電中研と共同研究で取り組んでいる。従来は、シャーレに注いだ寒天培地表面にベントナイト懸濁液を塗布する平板塗抹法を用いていたが、この共同研究では、平板混釈法の適用を検討した。平板混釈法は、寒天と懸濁液の混合後に培地を作成する方法であり、より多くのベントナイトを使用でき、定量下限値の引き上げが期待できる。この方法を用いることで、シャーレ1枚あたりに添加するベントナイトの量を数十倍に増加することができ、培養法による定量下限とされているシャーレ1枚あたり25個（Tomasiewicz et al., 1980）のコロニー数を超え、定量性が大幅に改善された（図 3）。この方法を適用することで、ベントナイト中の微生物の増殖活性を精度よく評価することが可能となった。

③低酸素環境下における腐食に関しては、試験前後の質量減量から平均腐食速度を算出する方法（質量減量法）を用いるが、低酸素環境下においては平均腐食速度が極めて遅いため、精度よく測定することが課題であった。このため、学会において「圧縮粘土材料中での浸漬試験による炭素鋼の腐食減量測定方法」の学会規格の検討が進められており、2022年度までに規格案を作成したが、規格案の有効性を評価するため、2024年度よりラウンドロビンテストを実施している。図4に示す試験データをJIS Z 8405（日本工業規格, 2021）に準拠して解析した結果、全ての測定値は平均値の $\pm 2\sigma$ 以内に収まっていたため、規格案の試験手順は有効であると考えられる。このほかにも、上述の規格案の策定に関連して、JAEAと共同で、真空含浸²の条件などの試験データの取得も行った。これらの結果は、規格案にまとめられた。

④腐食寿命の定量評価モデルに関しては、室内試験で求められた腐食速度を閉鎖後の長期にまで外挿することに適したモデルの整備が必要である。このため、学会において、研究提案を募集し、機械

² 真空含浸：ベントナイトを充填した試験カラムを減圧下で試験溶液に浸漬することにより、大気圧下と比較して試験溶液のベントナイトへの浸潤を加速させる手法。

学習法を用いた腐食寿命の定量評価モデルの開発に取り組んでいる（藤原ほか、2024）。この取り組みでは、JAEA が保有するオーバーパックデータベース（JAEA, 2011）に収録されたデータに対し、AI を用いて機械学習を行い、腐食量を推定するモデル式として、時間、温度、pH、NaCl 濃度、酸素濃度からなる関数を導出した。導出したモデル式が長期的な評価に利用できるか確認するために、考古学調査情報から得られた温度や pH 等を組み合わせた 124 通りの条件を入力し、考古学アナログ（鉄てい）の腐食深さを計算した。その結果は図 5 に示すとおりであり、1,500 年後に約 1 mm の腐食深さとなった。計算によって得られた腐食深さの範囲は考古学アナログの観察結果から推定される腐食深さと同程度であった。

①～④の成果は、検討委員会にて、国内外の腐食評価に関する最新知見と技術課題として取りまとめられ、金属腐食の専門家が参加したワークショップの中で議論された。ワークショップでは、埋設後初期の不飽和緩衝材中における腐食現象の理解が深まるとともに、微生物腐食に関するさらなる知見整備や機械学習を取り入れた腐食モデルの開発の重要性が確認され、専門家間で今後の技術開発に向けた必要性の理解が得られた。これにより、地層処分における長期的な腐食寿命評価の信頼性向上に資する技術開発の一層の加速が期待できる。

他にも、銅－炭素鋼複合オーバーパックの異種金属接触腐食評価にも取り組んでいる。詳細については相馬ほか（2024）を参照してもらいたい。

3. 包括的技術報告書への影響

①～④に関する知見の拡充は、包括的技術報告書（NUMO, 2021）の本編 4.8.3 項（今後の取り組み）に基づいた検討である。本技術開発により、包括的技術報告書（NUMO, 2021）の本編 4.4.1 項（高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリアの設計）及び 4.4.2 項（TRU 等廃棄物処分場の人工バリアの設計）に示した処分容器の必要最小厚さ設計の論拠を拡充する。

4. 今後の展開

検討委員会と連携して、処分容器の長期腐食寿命評価に関する技術的課題の整理と優先順位付けを行う。これらの成果に基づき、①～④に関する試験技術の高度化やデータの拡充を進めることで、腐食寿命評価技術の信頼性向上に資する技術開発を推進する。

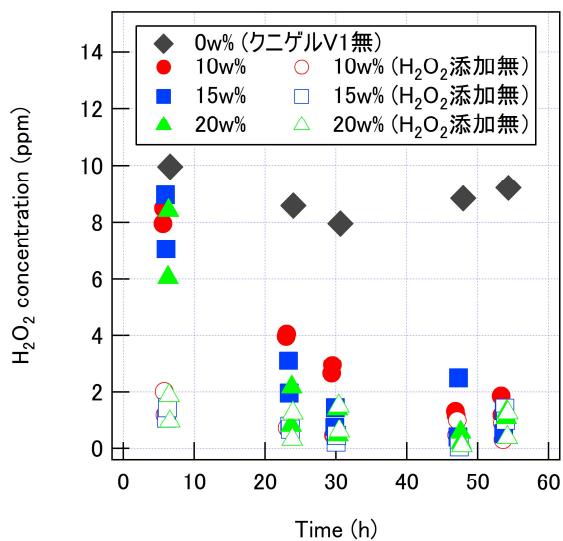


図 1 ベントナイトと共存した H_2O_2 を含む人工海水に含まれる H_2O_2 濃度の経時変化

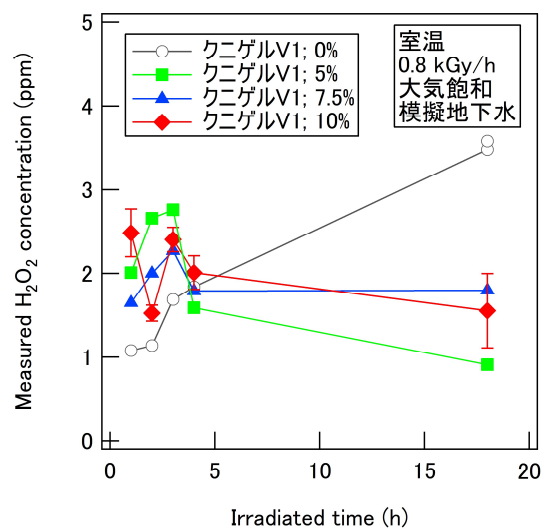
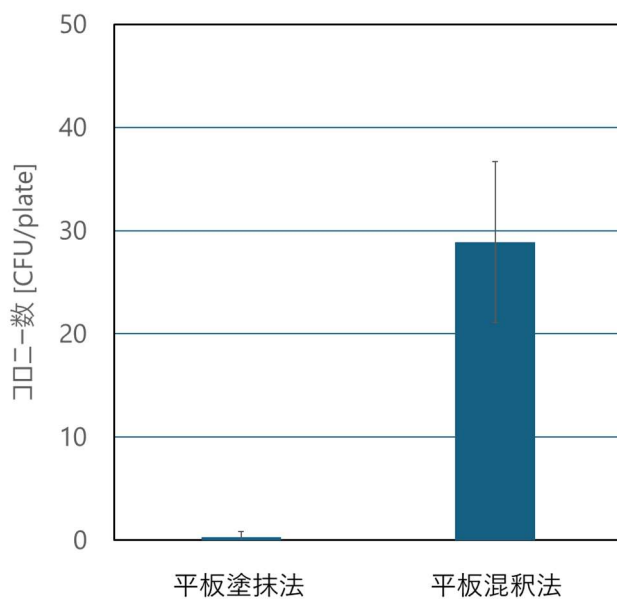
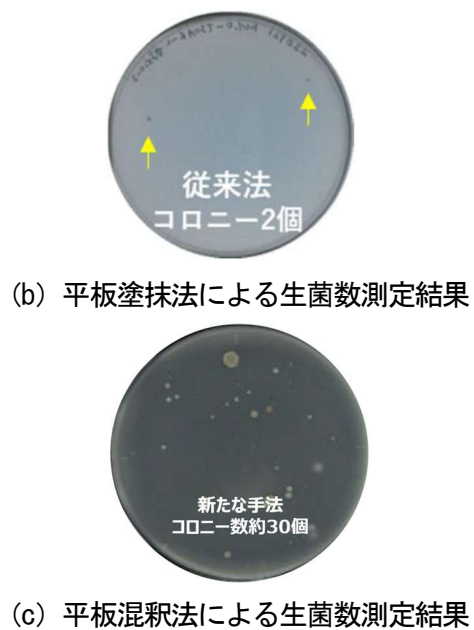


図 2 放射線照射後のベントナイトと共存した模擬地下水に含まれる H_2O_2 濃度



(a) 生菌数測定結果



(b) 平板塗抹法による生菌数測定結果

(c) 平板混釈法による生菌数測定結果

図 3 平板塗抹法と平板混釈法の比較

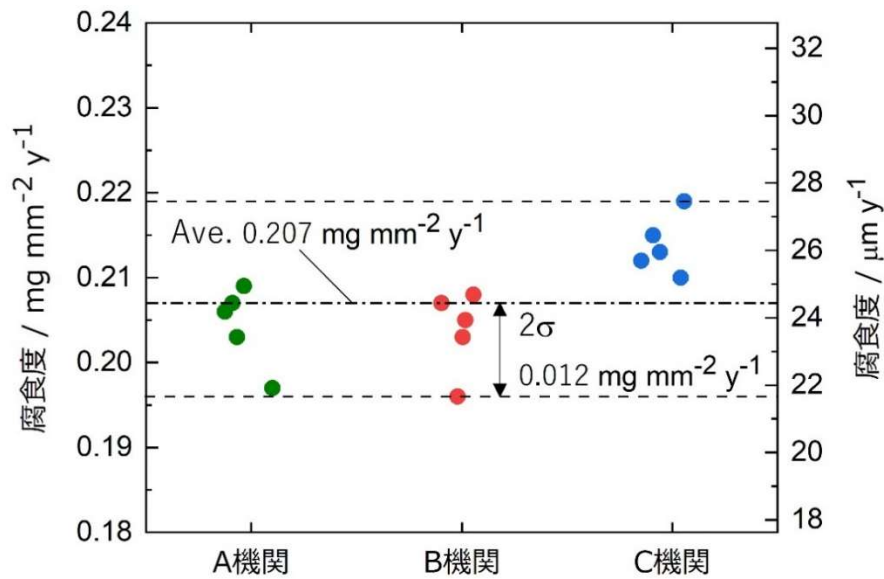


図 4 ラウンドロビンテストの結果

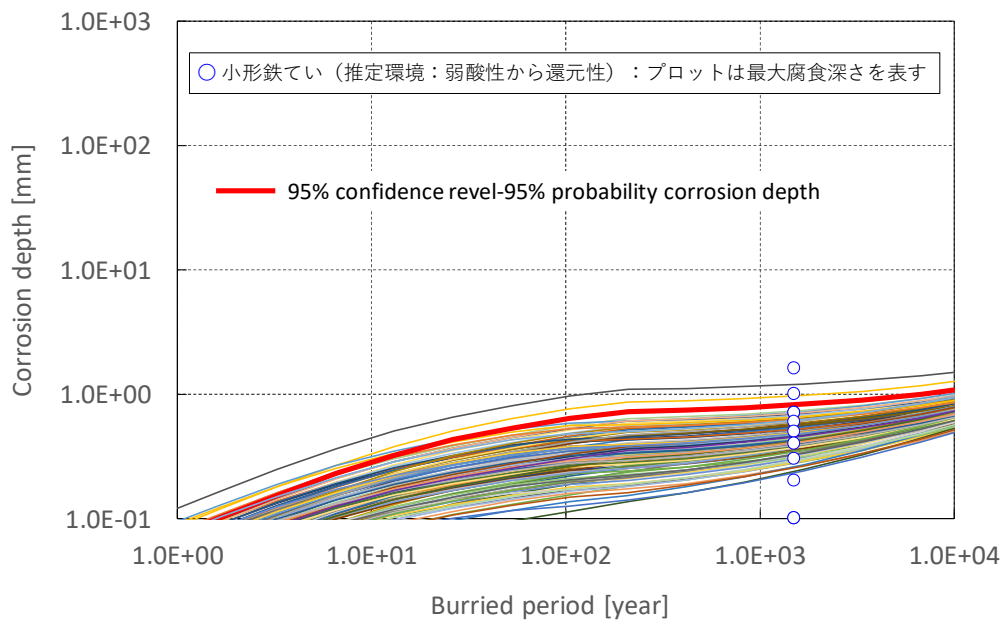


図 5 AI により導出した腐食評価モデルと考古学調査情報から得られた腐食量トレンドの分布

参考文献

Beaver, C. R., Vachon, A. M., Tully, S. C., Engel, K., Spasov, E., Binns, J. W., Noël, J. J. and Neufeld, J. D. (2024) : Impact of dry density and incomplete saturation on microbial growth in bentonite clay for nuclear waste storage, *Journal of Applied Microbiology*, Volume 135, Issue 3, 35, Ixae053.

藤原大資, 京久幸(2024) : 機械学習を用いたオーバーパック腐食評価モデルの整備, *材料と環境*, Vol.72, pp.107-112.

端邦樹(2021) : 福島第一原子力発電所の廃止措置を安全に進めるうえで考慮すべきラジオリシスの影響, *材料と環境*, Vol.70, pp.468-473.

- JAEA(2011) : オーバーパックデータベース,
https://www.jaea.go.jp/04/tisou/database/opdb/Shin_OPDB_carbonsteel.html (2025 年 6 月 11 日閲覧) .
- JAEA(2013) : 平成 24 年度地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム化学影響評価高度化開発一6 ヶ年研究成果の取りまとめ一.
- Nagata, S. and Abe, H. (2025) : Electrochemical behavior of carbon steel in unsaturated compacted Kunigel V1 bentonite, LTC2025 Abstract.
- 日本工業規格(2021) : 試験所間比較による技能試験のための統計的方法.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告 : わが国における安全な地層処分の実現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一, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024) : 技術開発成果概要 2023, NUMO-TR-24-03, pp.37-38.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2025) : 高レベル放射性廃棄物処分における横置き・PEM 方式の高度化, NUMO-TR-24-04.
- 相馬佑紀, 井上博之, 長田柊平(2024) : 模擬地下水を浸潤した圧縮ベントナイト中での Fe/Cu 対のガルバニック腐食挙動の検討, 第 71 回材料と環境討論会要旨集, A-303, pp.69-72.
- Suzuki, S., Ogawa, Y., Giallonardo, J. and Keech, P. G. (2020) : The design of copper-coating overpack for the high-level radioactive waste disposal concept in Japan, Materials and Corrosion, Vol.72, Issue 1-2, pp.94-106.
- Takita, T, Abe, H., Watanabe, Y., Ishijima, Y. and Ogawa, Y. (2025) : Susceptibility to near-neutral pH stress corrosion cracking of carbon steel in a simulated geological disposal environment, LTC2025 Abstract.
- Tomasiewicz, D. M., Hotchkiss, D. K., Reinbold, G. W., Read, R. B. and Hartman, P.A. (1980) : The Most Suitable Number of Colonies on Plates for Counting. Journal of Food Protection, 43(4), pp.282-286.

2.2.2 アナログ研究を利用した地層処分システムの長期健全性の傍証とコミュニケーションへの活用方法の検討

藤田 和果奈 鈴木 寛

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

NUMO が 2021 年に取りまとめた包括的技術報告書において、アナログ事例は地層処分システムの長期的な安全性の傍証として重要な要素を担っている。アナログ事例とは、地層処分システムに対して類似性を有する自然現象（ナチュラルアナログ）、考古学的な事物（考古学アナログ）、及び産業的な事物（産業アナログ）の総称であり、アナログ事例を自然科学的な手法で研究することをアナログ研究と呼ぶ。アナログ事例の有用性は、その事物・現象が経た長い時間にある。地層処分事業が対象とする数万年という安全確保の期間は、室内実験や原位置試験が扱える範囲を超えてしまうため、アナログ事例は地層処分システムの安全性の説明を補強する多面的な論拠の一つとして活用されている（NUMO, 2021 ; Reijonen et al., 2023）。

アナログ事例はセーフティケースの技術的信頼性に資する基盤情報の一部であるだけでなく、セーフティケースを用いて幅広いステークホルダーとコミュニケーションする際の重要なツールとなり得る。NUMO はアナログ事例を数多く収集し、「アナログカタログ」としてデータベース化すること、また、データベースを活用してステークホルダーの関心に応じたより効果的なアナログ事例の選定をできるよう準備を進めている。2023 年に開催したワークショップでは、アナログ研究に関わる専門家が、包括的技術報告書におけるアナログ事例の活用を踏まえ、今後「ナチュラルアナログをどのようにセーフティケースに活用していくか」というテーマで総合討論を実施した（藤田ほか, 2024）。総合討論では、地層処分事業の実施主体によるデータベースの活用、研究者によるデータベースの活用及び幅広いステークホルダーとのコミュニケーションへのアナログ事例の活用といった課題が出された。詳細については藤田ほか, 2024 を参照してもらいたい。

2024 年度は、これらの議論をさらに具体化して、NUMO の今後の取組みに役立てるため、海外実施主体の検討事例や最新のアナログ研究事例の講演を含む、国際ワークショップを企画し、以下に示す内容をテーマとして、参加者とともに討議した。

- ・ 国内外で蓄積されてきたアナログ研究の成果を収集し、データベース化するための情報の構造を設計・構築するにはどうしたらよいか。
- ・ 人工バリアの長期健全性に関する定量的評価技術について、室内実験や原位置試験の結果に基づいて構築された解析モデル及びその入力データの検証と妥当性確認（Verification & Validation : 以下、「V&V」という）において、各アナログ事例がどのように活用できるか。
- ・ アナログ事例を幅広いステークホルダーとのコミュニケーションにおいて効果的に活用するため、どのような事例、情報及びそれらの提供方法を整備しておくべきか。

2. 主な成果

本ワークショップは、2024 年 9 月 18 日から 19 日の 2 日間にわたり、対面とオンラインのハイブリッド形式で開催した。参加者は対面で 20 名、オンラインで約 40 名であった。国内外の研究機関、

大学、民間企業等の研究者から 10 件の講演をいただき、2 日目には対面でグループディスカッションを行った。

(1) 講演の概要

本ワークショップの講演では、NUMO 及び海外の地層処分事業の実施主体によるアナログ研究の活用事例、最新のナチュラルアナログ事例の研究成果とモデルの V&V への活用の取組み、及び、幅広いステークホルダーとのコミュニケーションにおけるナチュラルアナログ活用の課題について講演をいただいた。以下にその概要をまとめる。

① 地層処分事業者のアナログ研究の取組み

フィンランド、英国及び日本の事業者並びに研究機関から、地層処分におけるアナログ事例の活用方法について講演があった。フィンランドの研究機関からの出席者は、地域アナログ (Regional analogue) の事例として、後氷期に活動した断層や古地震の調査、さらに湖を対象とした氷河融解水の長期的影響評価について示し、処分地周辺における、将来の地殻変動や稀頻度シナリオの理解にアナログ事例を活用した事例などが紹介された。英国の事業者からの出席者は、アナログ研究がサイト選定前から閉鎖後に至るまでの各事業段階で果たす役割が整理され、アナログデータは実験やモデリングと同等に重要な情報源として、体系的な知識マネジメントのもとで活用すべきとの考えが示された。NUMO の出席者は、アナログ事例を地層処分システムの安全機能や FEP¹ と対応付ける手法を用いたデータベース構築の取組みが紹介された。さらに、こうしたアナログ研究をセーフティケースへの反映、ステークホルダーとの対話、人材育成へとつなげる包括的な活動の概要を示した。また、長年にわたり世界のアナログ研究に携わってきた海外有識者は、アナログ研究の包括的な意義として、セーフティケースの信頼性の傍証材料として有用であること、アナログ事例は各国の実施主体共通の関心事であり、地層処分分野における国際協力の良好事例となること、さらに、アナログ事例を共通の話題として世代間で議論することにより、若手人材の育成の場として機能することなどが紹介された。また、新たなアナログ研究を立ち上げる際には、従来の研究者主導の“ボトムアップ型”に加え、事業者が必要とする知見に基づく“トップダウン型”のアプローチも重要との考えが示された。

② 最新のアナログ研究とモデルの V&V への活用

本テーマでは、金属製オーバーパックを例として、最新のアナログ研究事例とモデルの V&V への活用事例について報告があった。金属腐食に関する考古学アナログ研究の事例として、フランス CEA の講演者より、欧州の鉄製遺物の調査事例について報告があり、腐食が進んだ遺物では、腐食生成物が層状の構造を形成しながら、腐食が進行すること、また、腐食生成物の層が地下水中の溶存酸素などの酸化剤の移行を阻害する結果、カソード反応が腐食生成物の表面で生起することを研究した事例など、最新の研究手法が紹介された。また、日本国内の事例として、文化財保存科学の専門家より、遺跡から出土した鉄製遺物の研究事例について講演があり、出土地点の地形や地層の性状の違いにより、地下水中の酸素濃度に違いがあり、砂質土に埋没した鉄釘などは、金属部分が腐食され、ゲーサイトなどの Fe(III) を主成分とする腐食生成物が生じているが、粘土質の多い環境に埋没した遺物は、金属が残存し、腐食生成物も Fe(II) を主成分とするシデライトなどであり、環境と現象の関係を探るのにアナログ研究が有用であるといった研究成果が示された。国内の解析の専門家からは、JAEA が整備した腐食データベースに収録された室内試験による腐食速度のデータと試験条件の関係を機械

¹ 放射性廃棄物の地層処分の安全評価において、処分場の閉鎖後の安全に関する要因を、地層処分システムの各構成要素の特性 (Feature) や、特性に影響を与える事象 (Event)、地層処分システムの時間的変遷の過程 (Process) に分けたリスト。

学習させ、長期腐食を予測する数理モデルをAIに提案させる研究事例について講演があった。提案された数理モデルを用いて、先の国内の考古学アナログ事例の環境を再現して、腐食深さを推定し、アナログ事例から求められる腐食深さと同程度となるといった研究事例が示された。このほか、緩衝材に関するアナログ研究の事例として、セメント系材料から溶出する高アルカリ成分によるベントナイトの変質を対象に、実験的検討とアナログ研究を組み合わせた手法について報告があった。

③ アナログ事例のコミュニケーションへの活用と課題

本テーマでは、アナログ事例を一般の方とのコミュニケーションに活用する際の課題について講演があった。NUMOの広報担当者は、出前授業や説明会においては、アナログ事例が利用しにくいという意見を述べたうえで、その理由として、オクロの天然原子炉のような事例や考古学アナログのような事例を除くと、ナチュラルアナログ事例の多くは、説明者に地質現象に対する専門的知識が要求されるため、説明資料にあっても避けて説明してしまうことを経験談として紹介した。ナチュラルアナログをコミュニケーションに活用するのであれば、説明者が説明しやすい題材に絞る必要があるが、一方で、分かりやすさを優先するあまり説明が不十分となると、聞き手である一般の人に不信感を与えるのではないかと、という意見もあった。こうした課題に対し、大学有識者は「ナラティブ・アプローチ」の重要性を提案し、アナログ事例を単なる証拠として一方的に示すのではなく、聞き手との対話を基本として、相手の疑問を引き出しながら、言葉をつないで丁寧に説明する方が理解を得られやすかったという体験談を紹介した。

(2) グループディスカッションの概要

上述の講演内容も踏まえて、3つのグループに分かれてグループディスカッションを行った。各グループのテーマは、2023年度のワークショップの全体討議の結果に基づいてNUMOが提案したテーマに対し、各グループのファシリテータが論点を検討して、設定した。

グループ1では、セーフティケースの文脈に沿ったアナログ事例データベースの在り方について討議した。アナログ事例データベースは、地層処分事業者だけでなく、研究者からも需要がある。既往のデータベース（NUMO, 2019）にある収録すべき情報のリストなどを参考に、推奨されるアナログデータベースのフォーマットを作成した。専門家が利用するのであれば、検索などに役立つキーワードなどのメタデータの整備が重要である。データベースを一般の方との対話において活用するのであれば、視覚的に理解しやすい図や写真の掲載が望ましいといった意見もあった。

グループ2では、安全評価に用いられている現象評価モデルの検証と妥当性確認にアナログ事例を活用する方法について討議した。これまでも、地層処分システムの場の状態変遷の記述の検証や、その設定根拠としている地球化学解析などのV&Vが必要であることは認識されていたが、アナログ事例がV&Vに十分に活用されていないのではという意見があった。その理由としては、多くの天然事象において初期条件、環境条件、境界条件の情報が必ずしも十分ではないという点にあると考えられた。この課題に対応するため、不十分なデータに基づいてV&Vを進めるために不確実性の定量化が重要であり、そのために統計的手法を取り入れるべきといった意見があった。

グループ3では、一般へのアナログ事例の情報の提供の在り方について討議した。アナログ事例を用いた情報提供が必要となるのは、説明会等で地層処分事業についてはじめて説明を受ける方、あるいは広報イベントの場などでNUMOのブースをはじめて訪れた方などが対象と考えられる。また、アナログ事例の説明の場としては、説明会のような一方向の説明の場と車座での対話のように双方向の場が考えられる。それぞれの状況において、情報提供の方法を工夫する必要があり、講演にもあったように、説明会で、短い時間でナチュラルアナログを通じて地層処分の仕組みなどを簡単に理解

してもらおうというアプローチに無理があるかもしれないという意見があった。このため、対話が可能であれば、ナラティブ・アプローチにより、時間をかけて段階的に説明をしながら理解を深めていただくことが可能となる。また、一般の方にも、自然科学に造詣の深い方もおり、そのような方には、アナログ事例として、自然界で実際に起こる現象を例に挙げることで、地層処分システムへの理解が深まる可能性もある。また、アナログ事例を身近に感じてもらうことも重要であり、例えば、地域に関連したアナログ事例を取り上げることなども効果があるのではないかといった意見があった。

3. 包括的技術報告書への影響

本技術開発は、包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編 4.8.3 項（今後の取り組み）の（1）(iii) 人工バリア長期挙動を評価する技術の整備と実証に基づいた検討である。2 年間にわたるナチュラルアナログ研究ワークショップを通じて得られた最新のアナログ事例を包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編 7.2.2 項（地層処分の安全性の検討）のナチュラルアナログによる多面的な論拠として活用することを検討する。

4. 今後の展開

NUMO は、国内の研究者のみならず海外の実施主体や経験者とも協力して、地層処分の仕組みや安全性を傍証するアナログ事例の収集を継続して進める。収集したアナログ事例についても、今後、データベースとして公表できるよう整備を進める。また、一般の方への説明におけるアナログ事例の説明の仕方が課題であることがわかったため、その対策として、ナラティブ・アプローチの具体化や対話において活用しやすいアナログ事例の整備、また、説明者へのアナログ事例に対する勉強会などを検討していきたい。



図 1 国際ワークショップの様子

参考文献

- 藤田和果奈，鈴木覚，森千穂，佐藤努（2024）：2023 年度ナチュラルアナログ研究ワークショップ開催報告，NUMO-TR-24-02.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2019)：放射性廃棄物管理のためのアナログカタログ（和訳版），NUMO-TR-19-01.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021)：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー，NUMO-TR-20-03.
- Reijonen, H. M., Alexander, W. R. and Norris, S. (2023) : Resilience in knowledge management – the case of

natural analogues in radioactive waste management. Process Safety and Environmental Protection, 180, pp.205-222.

2.2.3 銅コーティングオーバーパックの製作技術の開発

市村 哲大¹ 小川 裕輔¹ 鈴木 寛¹ Peter G. Keech² 宮野 泰征³ 森貞 好昭⁴ 藤井 英俊⁴

¹原子力発電環境整備機構, ²核燃料廃棄物管理機関 (カナダ), ³秋田大学, ⁴大阪大学

1. 背景・目的

包括的技術報告書において、炭素鋼製オーバーパックを採用した処分場の設計例を示したが、我が国の多様な地質環境や長い事業期間中における科学的な進歩等に対応して、処分場の設計を柔軟に進められるよう、様々な処分概念や設計オプションを整備しておくことが重要である (NUMO, 2021)。高レベル放射性廃棄物を封入するオーバーパックの設計オプションとして、上述の炭素鋼製オーバーパックに加え、炭素鋼製耐圧容器に銅を耐食層としてコーティングしたオーバーパック (以下、「銅コーティングオーバーパック」という) の技術開発を進めている。銅コーティングオーバーパックの製作方法には2種類の候補があり、炭素鋼容器の表面を電気めっきにより銅コーティングし、蓋接合部の炭素鋼部分を溶接した後、その上部を冷間溶射により銅コーティングする方法が NWMO により開発され (以下、「NWMO 方式」という)、2017 年度から共同研究によって、ガラス固化体のオーバーパックへの適用性を検討してきた。さらに、NUMO は、蓋接合部の品質向上と接合プロセスの改良を目的として、蓋接合部の炭素鋼部分を機械的に接合した後、銅接合部は摩擦攪拌接合 (以下、「FSW」という) する方法 (図 1) (以下、「NUMO 方式」という) を考案して、技術開発を進めてきた。本書では、これらの 2 種類の銅コーティングオーバーパック製作技術に関する成果を報告する。

2. 主な成果

NWMO 方式については、2017 年度から NWMO との共同研究により製作技術の開発を進めており、2023 年度からは、同方式における製作技術の実証及び製作条件の最適化を目的として、実規模銅コーティングオーバーパックの連続製造試験を実施した。連続製造試験では、計 17 体の銅コーティングオーバーパックを試作し、電気めっきや冷間溶射の付着品質、銅の純度、機械的性質等を向上させ、それらの品質を確保するための各種製作条件を把握し、技術開発を完了した (NWMO, 2024)。

NUMO 方式については、①炭素鋼接合部の機械的接合方法の検討と構造の設計、②銅コーティング層の摩擦攪拌条件の特定、③接合終端部に発生する接合ツールの引抜き穴の除去方法の検討が必要である。①に関しては、代表的な機械的接合方法から、ねじ込み接合を選定し、2022 年度までに接合部の設計、試作及び締結試験を行い、その成立性について確認した (NUMO, 2024)。②に関しては、これまでに銅コーティング容器に対する FSW の適用事例がなかったため、段階的に平板状の試験体を対象に銅コーティング層の接合が可能であることを確認した (NUMO, 2024)。その成果を踏まえて、2023 年度より、円筒形状のオーバーパックへの適用性の評価に取り組んでいる。これまでに、銅コーティング部の剥離や空洞状の接合欠陥等が発生しない適切な接合条件 (ツールの回転速度や接合速度) 及び制御方式 (位置制御・荷重制御) の範囲を特定し、円筒形状の銅コーティング部の FSW が可能であることを確認した (図 2)。なお、接合部の機械的特性及び耐食性は母材部と同等かそれ以上となる (宮野ほか, 2024)。③について、2024 年度より検討に着手し、エンドタブ (JLWA, 2008) を用いた接合終端部の接合ツール引抜き穴 (図 3) の除去に取り組んだ。この方法では、接合部から

外に引抜き穴を逃がすための補助板として、母材と同組成のエンドタブを銅コーティング鋼管の接合終端部に設置して試験を実施した（図 4）。試験結果から、接合ツールの回転速度や接合速度、荷重条件及びエンドタブの設置位置を適切に制御することで、銅コーティング部の剥離や空洞状の接合欠陥の発生がなく、引抜き穴を残さない FSW が可能であることを確認した（図 5）。これらの結果から、NUMO 方式による銅コーティングオーバーパックの製作に係る一連の要素技術が成立する見通しが得られつつある。

3. 包括的技術報告書への影響

本技術開発は、包括的技術報告書（NUMO, 2021）の本編 4.8.3 項（今後の取り組み）の（1）（i）人工バリア代替材料と設計オプションの整備に基づいた検討である。包括的技術報告書では、炭素鋼製オーバーパックを例示したが、本技術開発により銅コーティングオーバーパックを設計オプションとして選択することが可能となり、オーバーパックの腐食代を低減できることなどによる合理化の効果を期待することができる。包括的技術報告書の本編 4.4.1 項（高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリアの設計）で設定したオーバーパックの設計要件に基づく銅コーティングオーバーパックの仕様を出発点として、寸法や重量の変更を踏まえ、4.5.6 項（地下施設における建設・作業時の安全対策）のオーバーパックの地下施設への搬送・定置に用いる車両や装置による放射線遮蔽機能への影響を検討する必要がある。さらに、人工バリアの設計の変更に起因する熱的特性の変化を考慮し、4.5.4 項（地下施設レイアウトの設計）の処分坑道に埋設する際の定置間隔や処分坑道の離間距離に反映し、地層処分システムの状態と安全機能に与える影響について、6.3.1 項（処分場閉鎖後のシステムとしてのふるまいに関する記述）をはじめとする閉鎖後の安全性の評価に対して成果を反映する。

4. 今後の展開

NWMO 方式については技術開発を完了したが、NUMO 方式については、より実際の蓋接合工程に近い条件を模擬した銅コーティング部の突合せ接合を実証するため、炭素鋼部のねじ込み接合と銅コーティング部の FSW を一連の作業として組み合わせて行い、蓋接合に係る作業工程全体の成立性を確認する。

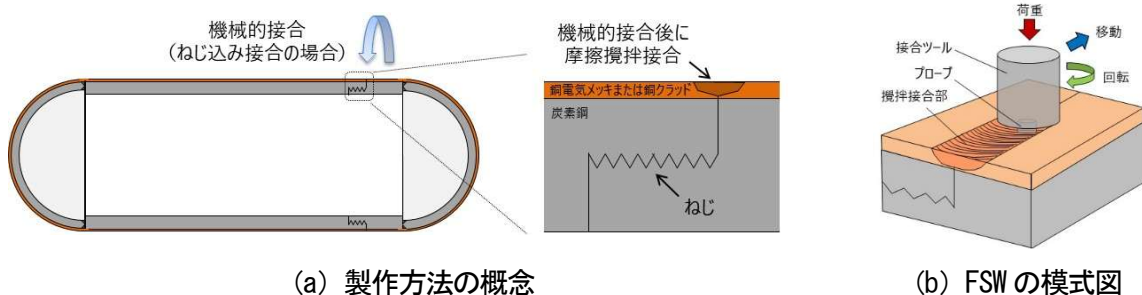


図 1 NUMO 方式による製作方法

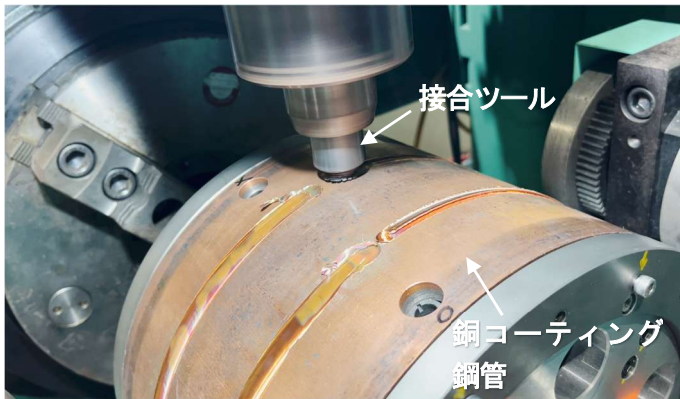


図 2 銅コーティング鋼管に対する FSW 試験の様子

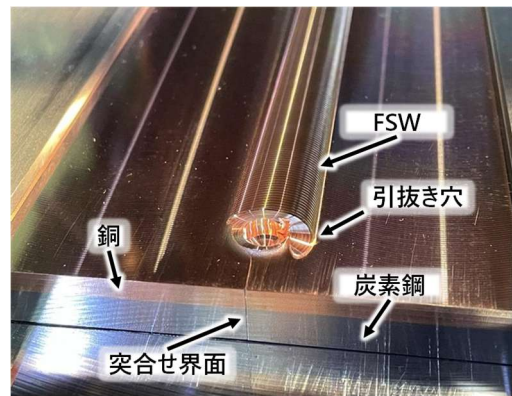


図 3 FSW における引抜き穴

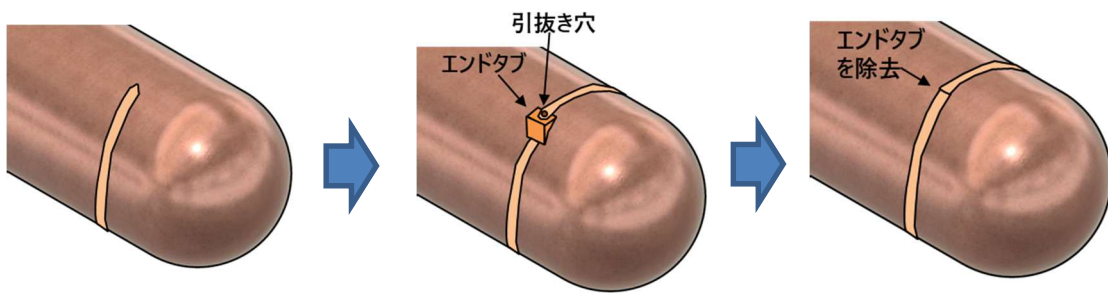


図 4 エンドタブによる引抜き穴除去のコンセプト



図 5 エンドタブを用いた FSW 試験の様子 (写真手前側が接合始端)

参考文献

JLWA(軽金属溶接協会)(2008)：軽金属の溶接 Q&A(12) ， 軽金属溶接 Vol 46 No. 4, p28.

宮野泰征，中道萌，野崎海斗，小川裕輔，鈴木覚(2024)：爆発圧着法によって製造した銅クラッド
鋼版を対象とした摩擦攪拌接合，2023 年度 大阪大学接合科学研究所 共同研究成果報告書，
pp128-129.

NUMO(原子力発電環境整備機構)(2021)：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現
ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー，NUMO-TR-20-03.

NUMO(原子力発電環境整備機構)(2024)：技術開発成果概要 2022，NUMO-TR-24-01.

NWMO (2024)：Technical Program for the Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel -Annual
Report 2023，NWMO TR-2024-01.

2.2.4 幅広い地質環境特性における坑道の安定性と熱影響の評価

レ アン ゴク 山本 陽一

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

地層処分において高レベル放射性廃棄物を埋設する地下施設の深度や、レイアウトを決定する坑道及び廃棄体の設置間隔は、岩盤の強度や地温等の条件により、安全性を確保できる範囲が異なる。そのため、地下施設を構成する坑道の力学的安定性や、地温及び廃棄体の発熱による人工バリアへの影響の理解は、処分場の設計及びサイト選定における重要な検討要素となる。したがって、地下施設の深度や坑道及び廃棄体の設置間隔の設定に際しては、坑道の力学的安定性に関する解析（空洞安定解析）及び熱伝導解析を行って、所定の設計要件を満たしているかを客観的に評価する必要がある。

包括的技術報告書（NUMO, 2021a）では、3種類の異なる岩種の地質環境モデルを対象に、閉鎖前と閉鎖後長期の安全性、並びに建設・操業・閉鎖の工学的成立性を満たす処分場の設計例を、実用的な設計の方法論とともに提示した。一連の検討では、岩盤の力学的・熱的特性について岩種ごとの代表値を設定して設計に用いた。しかし、実際のサイト調査で得られる地質環境特性は空間的に不均質であり、同一岩種でも物性値にばらつきを生じることが想定される。このため、より広範な地質環境条件を対象として、不均質性に起因する不確実性を適切に考慮し、工学的対応により地下施設の設計が成立する条件や範囲を概略的に評価できる基盤情報の整備が求められる。

本検討では、坑道の力学的安定性及び人工バリアへの熱的影響抑制の観点から、包括的技術報告書に示した処分概念を適用し、坑道仕様と岩盤物性の組合せによる設計条件が成立する範囲を明らかにすることを目的とした。具体的には、国内に分布する多様な岩種を対象に、力学的・熱的特性に関する物性値のばらつきを考慮して整理したデータセットを構築し、これに深度、坑道設置間隔、坑道径等の複数要因を同時に変動させた多変量条件下で、坑道の空洞安定解析と熱伝導解析を実施して、前述の観点に対する坑道成立性の影響を評価した。

2. 主な成果

(1) 岩盤物性データセット

地層処分におけるサイト選定の観点から対象となり得る国内の5岩種（新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類、火山岩類、深成岩類、変成岩類）を対象として、静的力学特性（静弾性係数、粘着力、内部摩擦角、ポアソン比）及び熱的特性（熱伝導率、比熱）に関する岩盤物性のデータセットを表1のように作成した。岩盤区分A～Eは、地盤工学会の岩盤の工学的分類方法（JGS 3811-2011）における一軸圧縮強さによる区分境界（ $q_u=1, 5, 10, 25, 50, 100$ MPa）に基づいて設定した。データセットの作成には、学術論文等で公表された地質環境情報をNUMOが収集・整理した岩盤物性データ（NUMO, 2021b）を活用した。静的力学特性については一軸圧縮強さと、熱的特性については有効間隙率と、それぞれ各物性値との平均的な相関に基づく回帰分析結果を用いた。その他、飽和密度と有効間隙率についても、一軸圧縮強さとの間に見出した相関関係に基づいて設定した。

静的力学特性の物性値と一軸圧縮強さの相関においては、内部摩擦角に関して、同じ一軸圧縮強さに対して高い傾向を示す岩種のグループ（深成岩類、変成岩類）と低い傾向を示す岩種のグループ

プ（新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類、火山岩類）に分けられた。一方、それ以外の物性値では、岩種にかかわらず共通した相関傾向が確認された。熱的特性の物性値と有効間隙率との相関においては、熱伝導率に関して、類似の分布傾向を示す新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類のグループと、深成岩類、変成岩類、火山岩類のグループに分けられ、後者の岩種グループの方が平均値及び最大値ともに高い傾向を示した。

(2) 坑道の空洞安定解析

包括的技術報告書（NUMO, 2021a）及び高レベル放射性廃棄物処分における横置き・PEM方式の高度化（NUMO, 2025）の地下施設設計例に適用した、掘削幅 3.1～14 m の 4 種類の坑道断面を対象として、岩盤の静的力学特性に応じた坑道の設置深度及び設置間隔について、空洞安定解析により検討を行った。小規模断面（掘削幅 $D=3.1\text{ m}$, 5.4 m ）の掘削形状は三心円馬蹄形、中～大規模断面（ $D=10\text{ m}$, 14 m ）は円形とし、前者には全断面掘削、後者には加背割りによる多段ベンチ掘削を解析工程で考慮した。検討にあたっては、まず単一坑道条件で解析を実施し、坑道の力学的安定性の基準を満足する最大の設置深度（以下、「下限深度」という）を求めた。次に、その結果を踏まえ、坑道の併設を考慮した解析を行い、基準を満足する最小の坑道設置間隔（以下、「最小坑道設置間隔」）を算定した。

単一坑道における設置深度の検討の結果、一軸圧縮強さが 10 MPa 以下の岩盤区分の安定性評価基準を満足する下限深度は 300 m 未満であった。この条件では、地山強度比は 2 を下回っていた。また、岩盤及び支保工に対してそれぞれ設定した安定性評価基準の中で、鋼製支保工の応力度が律速要因となって下限深度が決定されていた。そこで、鋼製支保工の剛性を 2 倍に増加させた場合（元の剛性で掘進長及び支保工の設置間隔を半分にした場合と同義）の効果を確認したところ、下限深度は 300 m 以上に改善された。このことから、当該岩盤区分では、支保工の強化等の工学的対策を講じた設計の見直しが必要であることが示唆された。一方、一軸圧縮強さが 25 MPa 以上の岩盤区分では、下限深度は 500 m 以上となり、包括的技術報告書における坑道設計の照査結果と整合する結果が得られた。

併設条件下の坑道設置間隔の検討では、図 1 に一例を示すように、最小坑道設置間隔を坑道の掘削幅 D で正規化した値と地山強度比の関係を整理した。その結果、地山強度比がおおむね 3 以上であれば、掘削幅や岩盤区分によらず最小坑道設置間隔は $2D$ 未満でも成立することが確認された。一方、地山強度比が 2 に近づくと、最小坑道設置間隔はおおむね $2D$ 以上の範囲でばらつく傾向が見られ、これは設置深度が下限深度に近い条件であったためと考えられた。したがって、本検討条件下において $2D$ 程度の坑道設置間隔を採用するためには、地山強度比が少なくとも 2 以上となるような、岩盤強度と深度の組合せが必要になると考えられる。

(3) 坑道の熱伝導解析

包括的技術報告書に適用した横置き・PEM方式の坑道断面を対象として、岩盤の熱的特性に応じた坑道の設置深度及び設置間隔、並びに廃棄体定置間隔について検討を行った。本検討では、まず点熱源による温度上昇量の線形性に基づく方法（NUMO, 2014）を利用し、任意の設定条件に対して緩衝材の最高温度を概算できる近似解析ツールを作成した。このツールの作成にあたっては、廃棄体 1 体による任意点の温度上昇量のデータを熱伝導解析により求め、対象の岩盤区分ごとに温度上昇の時刻歴をデータベース化しておくことで、物性の違いにも対応可能とした。このツールを

用いて、坑道の設置深度及び設置間隔、廃棄体定置間隔、地温勾配、岩盤物性をパラメータとし、「緩衝材中の最高温度が100℃未満」という評価基準を満足する条件を探索した。そのうえで、絞り込んだ条件に対応するモデルを用いた詳細な熱伝導解析を実施した。

評価基準を満足する最小坑道設置間隔と坑道設置深度の関係を示した算定結果の一例を図2に示す。この検討では、地温勾配を3℃/100m, 6℃/100m, 9℃/100mの3条件とし、地表面温度は15℃とした。その結果、岩盤区分A～Dの物性の違いによる影響は小さく、坑道設置深度と最小坑道設置間隔の関係は主に地温勾配に依存することが確認された。図3には、廃棄体専有面積（＝坑道設置間隔×廃棄体定置間隔）と緩衝材の温度増分（＝緩衝材最高温度－初期地温）との関係を整理した一例を示す。この結果は、坑道設置深度や設置間隔、廃棄体定置間隔、地温勾配の諸条件の違いによらず、両者の間には高い相関関係が存在することを示している。この相関を活用することで、対象サイトの岩盤物性にに基づき、人工バリアへの熱的影響を抑制する観点から、横置き・PEM方式での処分深度や廃棄体の専有面積の概算が可能であり、引き続きレイアウトの検討に有用な結果を提供するようになると思われる。

3. 包括的技術報告書への影響

本検討の成果は、包括的技術報告書における本編4.2.5項（処分場の設計で対象とする地質環境特性）、4.3節（地下施設設置深度の設定）、及び4.5.2項（坑道の設計）において、力学的及び熱的な岩盤物性に応じた坑道の成立条件に関する説明を補完する知見を提供するものである。今後、異なる岩盤物性条件を対象としたセーフティケースを検討・整備する際には、当該項目に本検討の成果を反映させ、これらの記述を適切に更新・拡充していくことが求められる。

4. 今後の展開

本検討の解析結果に基づき、地山強度比と地温勾配に応じて、任意の断面径を有する処分坑道の設置可能深度及び設置間隔等の成立範囲を一目で把握できる設計チャートを作成し、今後実施する処分場の坑道設計やレイアウト設計での活用方法について検討を進めていく。

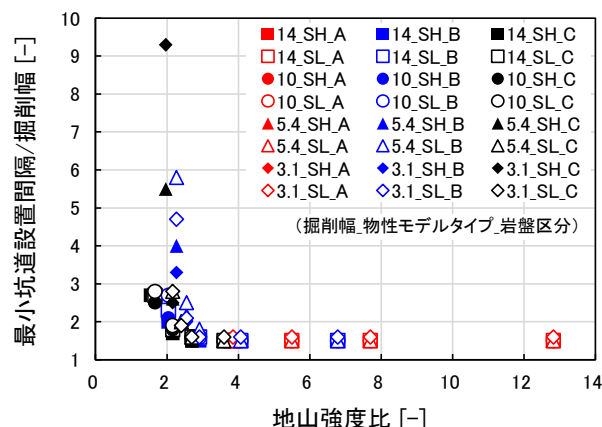


図1 坑道の掘削幅に対する最小坑道設置間隔と地山強度比の関係

（凡例のSHは内部摩擦角の高い岩種グループ：深成岩類、変成岩類、SLは内部摩擦角の低い岩種グループ：新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類、火山岩類の物性モデルタイプを表す）

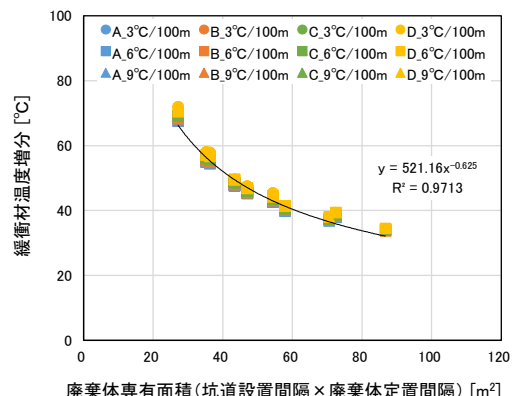
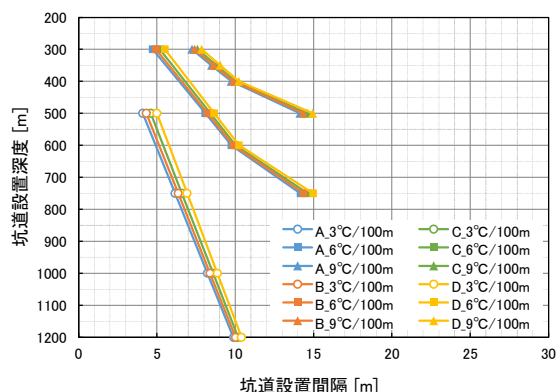


図 2 最小坑道設置間隔と坑道設置深度の関係
(熱伝導率の高い岩種グループ：深成岩類、
変成岩類、火山岩類、廃棄体定置間隔 4.356m
(PEM 間の隙間 1.0m) の例)

図 3 廃棄体専有面積と緩衝材温度増分の関係
(熱伝導率の高い岩種グループ：深成岩類、
変成岩類、火山岩類の例)

表 1 岩盤物性データセット

物性値名称	記号	単位	岩石の一軸圧縮強さによる区分と表示記号						新 第三 紀 堆 積 岩 類	先 新 第三 紀 堆 積 岩 類	火 山 岩 類	深 成 岩 類	変 成 岩 類
			F	E	D	C	B	A					
飽和密度	ρ_{sat}	Mg/m ³	1.73	2.05	2.19	2.37	2.51	2.65	●	●	●	●	●
有効間隙率	n_e	%	57	38	30	19	11	3	●	●	●	●	●
一軸圧縮強さ	q_u	MPa	1	5	10	25	50	100	●	●	●	●	●
静弾性係数	E	MPa	240	1,200	2,400	6,000	12,000	24,000	●	●	●	●	●
粘着力	c	MPa	0.2	1.2	2.4	6.1	12.1	24.2	●	●	●	●	●
内部摩擦角 (低)	ϕ_L	°	25	29	30	32	34	35	●	●	●		
内部摩擦角 (高)	ϕ_H	°	38	41	42	44	45	46				●	●
ポアソン比	ν	-	0.29	0.27	0.26	0.25	0.24	0.23	●	●	●	●	●
熱伝導率 (低)	λ_L	W/mK	1.33	1.65	1.79	1.98	2.11	2.25	●	●			
熱伝導率 (高)	λ_H	W/mK	1.58	2.01	2.20	2.45	2.63	2.81			●	●	●
比熱	C	kJ/kgK	2.06	1.60	1.45	1.27	1.16	1.06	●	●	●	●	●

※表右欄の●は、当該物性値を適用する岩種を表している。

参考文献

- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2014)：地層処分低レベル放射性廃棄物の安全性向上に関する検討，添付 2 重ね合せによる温度評価手法，NUMO-TR-14-03，pp.添付 2-1-添付 2-4.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021a)：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—第 4 章 処分場の設計，NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021b)：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—付属書 3-13 検討対象母岩の設定，NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2025)：高レベル放射性廃棄物処分における横置き・PEM 方式の高度化，NUMO-TR-24-04.

2.2.5 坑道の耐震性評価手法の整備に関する共同研究

レ アン ゴク¹ 窪田 茂¹ 及川 大夢² 石丸 真² 岡田 哲実² 山野井 悠翔² 宮川 義範²

¹原子力発電環境整備機構, ²電力中央研究所

1. 背景・目的

地震動により坑道の力学的安定性が損なわれると、人工バリアや廃棄体に損傷を与える要因となるうえ、地下における作業性も損なわれるおそれがある。このため、地震時に坑道の力学的安定性が維持されるか評価ができるように、耐震性評価手法が必要である。

処分場の地下施設は、アクセス坑道、連絡坑道、及び処分坑道など、役割の異なる坑道群で構成される。これらの坑道は現在の山岳トンネルと同様に、NATM (New Austrian Tunneling Method の略) を掘削方法として想定している (NUMO, 2021)。NATM は、切羽付近の地山が自立することを前提として発破、機械又は人力により掘削し、支保工を構築することにより内部空間を保ちながら、トンネルを建設する工法である (JR TT, 2023)。山岳トンネルでは小土被り区間や未固結地山での耐震評価事例があるものの、標準化された耐震設計法は整備されていない (土木学会, 2023)。このため、処分場の地下施設を対象とした耐震性評価手法の整備を目的として、2023 年度から、①岩盤及び支保工の解析モデル整備、②入力地震動の設定方法の信頼性向上、③評価指標と基準の整備という三つの課題に NUMO と電中研は共同で取り組んでいる (図 1)。本書では、課題①解析モデル整備のこれまでの検討成果を報告する。

坑道は、岩盤及び支保工から構成される複合構造物であり、坑道の種類によっては、覆工が施工される場合もある。そのため、坑道の耐震性を評価するためには、地層処分特有の高拘束圧環境下での、繰返し荷重下における各構成材料の強度・変形特性を明らかにする必要がある。

これまで、原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面を対象として、岩盤の破壊の影響を考慮した数値解析手法の適用性の確認が進められている (石丸ほか, 2017)。これらの知見が、地層処分の環境にも適用できるかについては、高い拘束圧の環境下において、繰返し荷重下の岩盤の強度・変形特性を測定し、確認する必要がある。また、本技術開発で対象とする処分坑道の支保工は吹付けコンクリートと鋼製支保などで構成されるが (NUMO, 2021)、これまでに吹付けコンクリートの繰返し荷重下の強度・変形特性が測定された事例はほとんどない。その理由は、一般的な山岳トンネルの場合、吹付けコンクリートは、覆工の背面側 (地山側) に配置され、掘削時のトンネルでは地山変形の抑制や岩盤の肌落ちの抑止に機能を期待するが、トンネルの耐震性評価を行う場合は覆工が主な評価対象となるからである。このため、吹付けコンクリートの繰返し荷重下の強度・変形特性を取得するとともに、覆工等のような打設コンクリート用の解析モデル (Mackawa et al., 2003) が吹付けコンクリートにも適用可能かどうかを確認する必要がある。

2. 主な成果

(1) 岩盤の試験結果

処分場の大深度坑道周辺においては、掘削による損傷や破壊に伴い、緩みが生じる可能性があるため、地震時の挙動評価に際しては、この緩み領域の力学特性を適切に考慮する必要がある。

岩盤材料の破壊後の力学特性に関して、これまで軟岩材料を用いた実験的な検討が行われている

(石丸ほか, 2017)。既往研究では、拘束圧 1 MPa 以下の条件で、比較的強度の小さい軟岩を用いた三軸圧縮試験によって破壊後の力学特性が定量的に評価されてきた。本研究では、大深度地下の坑道の力学的安定性についての検討を行うため、より強度の大きい軟岩材料（火山礫凝灰岩の大谷石）を用い、破壊前後の力学特性に着目した繰返し三軸試験を、三段階の拘束圧条件（0.5 MPa, 2.0 MPa, 6.0 MPa）で実施した。載荷方法は既往研究（石丸ほか, 2017）に倣い、単調載荷中の所定のひずみレベルにおいて繰返し載荷を行う Pattern-A（図 2 参照）を採用した。また、破壊前後の力学特性を比較するため、地盤工学会基準の試験法（JGS 2533-2020 及び JGS 2563-2020）（地盤工学会, 2020）に準拠した単調載荷の三軸圧縮試験及び繰返し載荷の三軸圧縮試験（Pattern-B, Pattern-C）もあわせて実施した。

試験結果について、Pattern-A の試験と Pattern-B の試験で得られた応力-ひずみ関係の骨格曲線の形状を比較したところ、載荷方法に関わらずおおむね同様の傾向が確認され、各拘束圧条件に応じたピーク強度や残留強度について、載荷方法による差異は認められなかった（図 3 参照）。また、Pattern-A の試験と Pattern-C の試験の繰返し荷重下における力学特性（等価ヤング率、履歴減衰率）の比較でも、破壊前の等価ヤング率、履歴減衰率及び破壊後の履歴減衰率は載荷方法の違いによらず、おおむね同程度であったが、破壊後の等価ヤング率は破壊前と比較して低下する傾向が確認された（図 4 参照）。これらの傾向は、低拘束圧条件下での既往研究結果（石丸ほか, 2017）と同様であった。

このように、軟岩材料に関しては、低拘束圧条件下で開発された解析モデルが、高拘束圧条件下における岩盤の繰返し荷重下の強度・変形特性に対しても適用可能であることが示唆された。なお、硬岩についても現在、繰返し三軸圧縮試験を実施中であり、その試験結果については今後の報告において示す予定である。

(2) 吹付けコンクリートの試験結果

吹付けコンクリートの基礎的な力学特性を把握するため、単調及び繰返し一軸圧縮試験を実施した。吹付けコンクリートは打設コンクリートと施工方法が異なるが、もし力学特性が類似するのであれば、今後実施予定の岩盤及び吹付けコンクリートの複合構造実験においてベースコンクリート（急結剤を添加せず、吹付けコンクリートと同配合の打設コンクリート）を吹付けコンクリート代用材とすることや、既存の打設コンクリート用の解析モデルを吹付けコンクリートにも適用することが可能となる。このため、ベースコンクリートに対しても、同様な試験を実施した。試験は材齢 6 時間から 91 日までの複数時点で行った。

単調載荷試験の結果、両コンクリートとも材齢の経過とともに、同材齢での吹付けコンクリートとベースコンクリートの強度差は見られたが、軟化挙動まで含めて両者の応力-ひずみ関係に有意な差は見られなかった（図 5 参照）。

図 6 に材齢 28 日における吹付けコンクリートの繰返し載荷試験の応力-ひずみ関係の一例を示す。応力-ひずみ関係から、ピーク後の繰返し時の剛性低下率（破壊パラメータ）を算出した結果を図 7 に示す。同図に打設コンクリート用の解析モデル（Maekawa et al., 2003）も併せて示す。図 7 より、ベースコンクリートは前川らのモデルと良好に一致し、吹付けコンクリートも類似の傾向を示し、おおむね一致した。これにより、吹付けコンクリートにおいても、前川らのモデルが適用可能と考えられる。

3. 包括的技術報告書への影響

本技術開発は、包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編 4.5.2 項（坑道の設計）に関する検討である。本共同研究で開発する地震時における岩盤及び支保工の応力-ひずみ関係の解析モデルは、地震時の坑道の空洞安定性に対する信頼性の向上に資するものと期待できる。

4. 今後の展開

軟岩については、破壊後も含めた繰返し荷重下の力学特性が高拘束圧条件下でも既往と同様の傾向を示すことが確認されたため、今後は解析モデルの適用性の確認に向けた数値シミュレーションを実施し、その結果を踏まえて解析モデルの改良を検討する。

吹付けコンクリートについては、今後は掘削時の地山変形を考慮した試験を実施し、地山変形を考慮した力学特性データも取得する予定である。

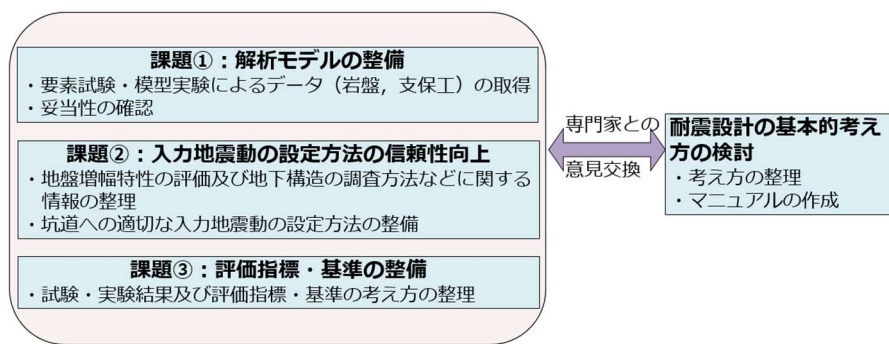


図 1 坑道の耐震性評価手法の整備における課題と取組み

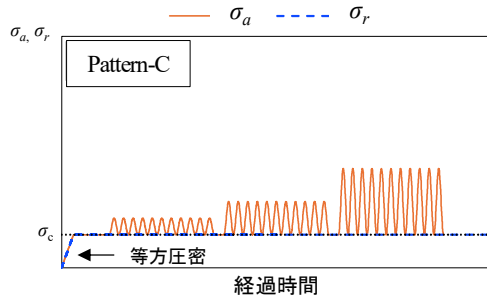
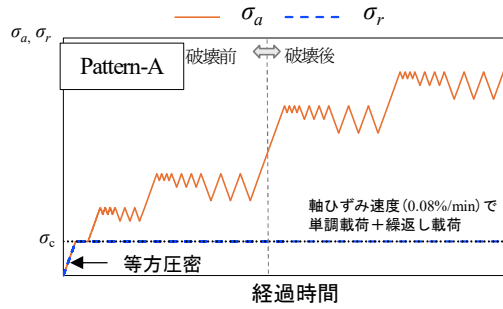


図 2 Pattern-A 及び Pattern-C の
繰返し载荷方法

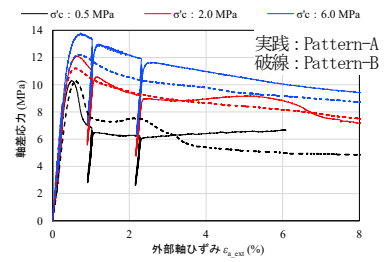


図 3 Pattern-A 及び Pattern-B の
応力-ひずみ関係

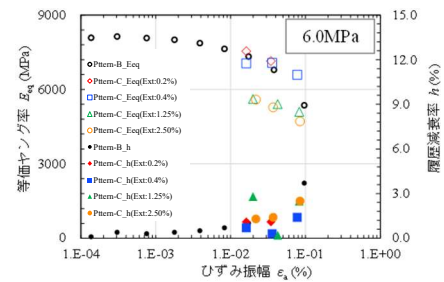
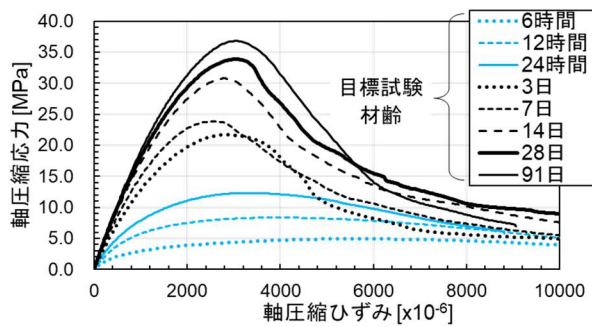
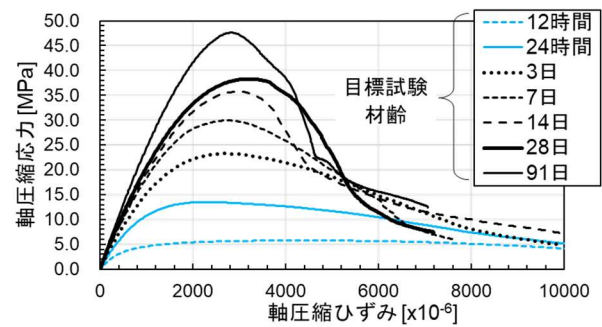


図 4 Pattern-A 及び Pattern-C の繰返し荷
重下の変形特性の比較 (6 MPa の拘束
条件)



吹付けコンクリート



ベースコンクリート

図 5 各材齢での応力-ひずみ関係 (単調载荷)

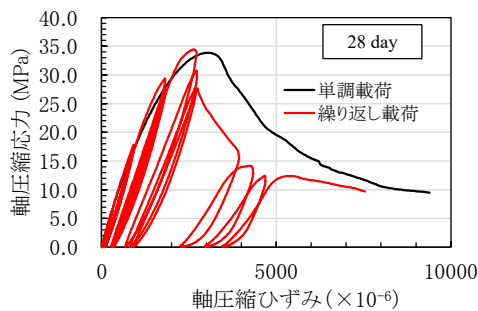


図 6 吹付けコンクリートの応力-ひずみ
関係例 (材齢 28 日)

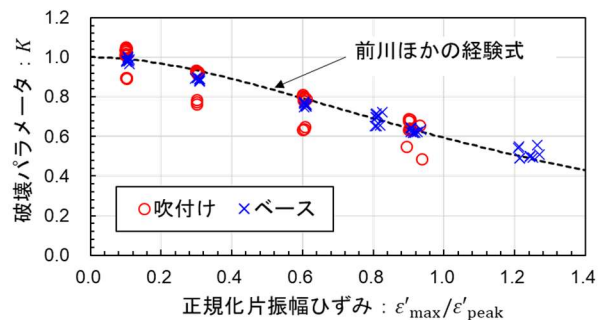


図 7 ピークひずみで正規化した片振幅ひずみ
と破壊パラメータの関係 (材齢 28 日)

参考文献

- 石丸真, 岡田哲実, 中村大史, 河井正, 風間基樹 (2017) : 軟岩のせん断破壊後の強度変形特性 のモデル化と斜面の地震時すべり安定性評価への適用, 土木学会論文集 C (地圏工学), 73 巻, 1 号, pp.23-38.
- 地盤工学会(2020) : 地盤材料試験の方法と解説 (第一回改訂版) .
- 土木学会(2023) : トンネルの地震被害と耐震設計-山岳・シールド・開削トンネル-, トンネルライブラリー第33号.
- JRTT(独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構)(2023) : 山岳トンネル設計施工指針.
- NUMO(原子力発電環境整備機構)(2021) : 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー, NUMO-TR-20-03.
- Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. (2003) : Nonlinear mechanics of reinforced concrete, CRC Press Taylor and Francis Group.

2.3 閉鎖後長期の安全性の評価に関する技術の高度化

閉鎖後長期の安全性の評価技術は、地層処分システムの長期的なふるまいをシナリオとして記述したうえで、これに基づき設計した処分場に埋設された放射性廃棄物に含まれている核種が人間の生活圏へ移行する挙動を表現した核種移行解析モデルを用いて解析することで、放射線学的影響を評価するためのものである。この技術の信頼性を向上させるため、「2.1 地質環境の調査と評価に関する技術」と「2.2 処分場の設計と工学技術の体系的な整備」に関する研究開発成果を適宜考慮しつつ、現象理解の深化を目的とした現象解析モデルの高度化、地層処分システム全体を対象とした核種移行解析モデルの高度化及び核種移行に用いるパラメータ等の拡充を継続的に取り組んだ。加えて、安全評価に用いる計算負荷が高い数値解析に対して、機械学習を適用して解析を高速処理する手法の整備に取り組んだ。

シナリオを記述するための処分場閉鎖後の長期間における地層処分システムの熱的 (Thermal)、水理的 (Hydrological)、力学的 (Mechanical)、化学的 (Chemical) (以下、「THMC」という) 状態変遷やこれを考慮した核種移行評価に関する技術の高度化を目的として以下を実施した。

- ・ 処分場の環境を反映したより現実的なガラス固化体の長期溶解挙動評価モデルの構築を目的として、JAEA や大学との共同研究を活用し、ガラスの長期溶解データ取得等を継続した (2.3.1 参照)。
- ・ 処分坑道等を使用されるセメント系材料の緩衝材への影響評価に用いる反応輸送解析モデルの構築に向け、モデルで取り扱う化学反応と物質移行プロセスに関する長期室内試験を継続するとともに、試験データと解析結果の比較を通じてモデルの信頼性向上に向けた課題を抽出した (2.3.2 参照)。
- ・ 緩衝材から生成したベントナイトコロイドに核種が吸着することによる母岩の核種移行遅延性能への影響を評価する手法の構築に向け、JAEA との共同研究や GTS における国際共同研究プロジェクト (CFM : Colloid Formation and Migration) への参画を通じて室内及び原位置試験によりデータ取得を継続するとともに、コロイド共存下における核種移行解析モデルの構築を開始した (2.3.3 参照)。
- ・ 廃棄体定置後からニアフィールドが再冠水するまでの過渡的な期間に対し、ニアフィールドにおける THMC 状態変遷を評価するため、段階的に連成解析技術を整備しており、GTS における高温環境下でのベントナイト緩衝材の再冠水挙動評価のための原位置試験 (HotBENT : High Temperature Effects on Bentonite Buffers) プロジェクト等へ継続的に参画しデータを取得するとともに、HotBENT プロジェクトの先行研究である国際共同研究プロジェクト (FEBEX : Full-scale Engineered Barriers Experiment) で実施された室内試験及び原位置試験で取得したデータを用いて、TH/THC 連成解析モデルの整備に取り組んでいる (2.3.4 参照)。

シナリオに基づく核種移行解析モデルに関して、サイトスペシフィックな生活圏評価に向け、地表環境の空間的不均質性や時間変遷といった特徴をより詳細に反映した評価解析技術の開発を目的として以下を実施した。

- ・ 2023 年度までに地下浅層を含む地表環境の空間的不均質性を反映した核種移行及び被ばくプロセスを表現した生活圏評価モデルを解析コード GoldSim に数値解析モデルとして実装し、これを解析が実施可能な計算環境を整えた。2024 年度は、この数値解析モデルを用いて、Geosphere-Biosphere Interface (以下、「GBI」という) の違いによる線量への換算係数を評価した (2.3.5 参照)。

- ・ TRU 等廃棄物処分場に設置される廃棄体パッケージ間及び廃棄体パッケージ内の充填材等に使用されるセメント系材料の状態変遷をより直接的に反映して核種移行解析を実施するため、2023 年度までに整備した反応輸送解析モデルを用いて、セメント系材料の状態変遷を評価し、これに基づく三次元地下水流動・粒子追跡解析を用いて構築した核種移行解析モデルにより線量評価を行った（2.3.6 参照）。
- ・ 割れ目系岩盤の割れ目ネットワーク構造のモデル化とその妥当性確認に係る方法論を整備するための検討を実施している。SKB の国際プロジェクト “SKB Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solute” で提供されるエスポ地下岩盤研究所で得られた調査試験データを対象に、2023 年度に作成した水理地質構造モデルの構築及び妥当性確認のワークフローを試行した（2.3.7 参照）。
- ・ 割れ目を有する堆積岩における核種移行挙動をより現実的に評価するための三次元物質移行モデルの開発を開始した。これまでに、幌延国際共同プロジェクト（Horonobe International Project : 以下、「HIP」という）において得られた原位置試験を対象として三次元物質移行モデルを構築するため、これに用いる割れ目ネットワークモデル（Discrete Fracture Network Model : 以下、「DFN モデル」という）を構築した（2.3.8 参照）。
- ・ 安全評価の信頼性向上及び処分場設計の最適化に資するため、2022 年度までに構築したランダムウォーク粒子追跡解析コード Partridge と処分場の詳細な仕様を反映できるよう改良した PFLOTTRAN を統合して開発した高解像度かつ大スケールの三次元不均質場における核種移行解析技術について、機械学習を適用して解析を高速処理するための手法の構築を 2023 年度より開始した。処分場のパネルスケール（約 1km×約 1km×約 200m）を対象とした粒子追跡解析により機械学習に利用するデータを整備し、これを用いて教師あり学習による廃棄体をソースタームとした粒子の移行挙動を予測する評価ツールと教師なし学習による多数の粒子の挙動を類型化するためのクラスター分析ツールを構築した（2.3.9 参照）。

核種移行解析に用いるパラメータ設定については、核種移行解析に必要なパラメータである収着分配係数（以下、「Kd」という）、実効拡散係数（以下、「De」という）、溶解度の設定に用いるデータが十分に整備されていない環境（沿岸域や高温領域など）に着目して、多様な地質・地下水条件や処分場の状態変遷を反映したデータの拡充を実施した（2.3.10 参照）。また、将来の調査に向けて構築したボーリング調査で取得したデータを用いた Kd や De の設定手法の適用範囲を広げるため、核種移行に関するデータや知見が少ない先新第三紀付加体堆積岩（整然相）を対象として De 設定を実施し、同設定手法の改良点を抽出した（2.3.10 参照）。

特定のサイトを対象としたセーフティケースの作成においては、調査の進展に伴うデータの追加とこれに基づく処分場の設計及び安全評価解析の更新を繰り返し行うことから、安全評価においては、地質環境情報や設計仕様が更新される都度、セーフティケースにおける影響箇所の抽出や更新された情報を用いた解析、セーフティケース文章への反映などの膨大な作業を、調査段階の限られた時間においてこれらの品質を確保したうえで実施する必要がある。このため、相互に関連する知識・情報・データの更新・管理を効率的に行うための情報管理ツールの開発を行った（2.3.11 参照）。

2.3.1 ガラスの長期溶解挙動評価モデルの高度化

松原 竜太¹ 岩田 孟² 稲垣 八穂広³ 大窪 貴洋⁴

¹原子力発電環境整備機構, ²日本原子力研究開発機構, ³九州大学, ⁴千葉大学

1. 背景・目的

地層処分場の閉鎖後長期の安全評価で実施する核種移行解析では、地下水に対するガラスの溶解速度に基づき核種の溶出速度を設定する。ガラス溶解挙動は環境条件（ガラス固化体に接する地下水の水質、温度環境等）に依存するため、概要調査段階以降のサイト選定に向けた安全評価ではサイト特有の地質環境に関する情報と、それに応じた処分場の設計を考慮したガラスの溶解速度を評価する必要がある。この評価に用いる現象解析モデルとして、ガラス固化体近傍で生じる可能性がある現象が溶解速度に及ぼす影響を定量的に評価するガラスの長期溶解挙動評価モデル（図 1）の高度化を進めている。溶解速度への影響を与える主な現象として、①ガラス固化体を構成する主な元素であるケイ素（以下、「Si」という）の溶出に伴いガラス固化体とオーバーパック間における間隙水（以下、「間隙水」という）中の溶存 Si 濃度が高くなるとガラスと間隙水との間での化学親和力が低下し、ガラスから Si が溶解しにくくなる現象、②ガラス表面に形成したゲル層（ガラス変質層の構成領域の一つ）が保護膜となりガラス溶解を抑制する現象（例えば、Grambow and Müller, 2001 ; Gin, 2001）、③ガラス表面に析出層（ガラス変質層の構成領域の一つ）としてケイ酸塩鉱物が沈殿・析出することで溶存 Si 濃度が低下、あるいはゲル層の保護機能が低下する現象（例えば、Michelin et al., 2012 ; Fleury et al., 2013 ; Debure et al., 2016）、④オーバーパック表面に生成した鉄腐食生成物や緩衝材への溶存 Si の収着・拡散（例えば、Godon et al., 2013 ; Mitsui et al., 2009）等により間隙水中の溶存 Si 濃度が低下してガラス溶解を促進する現象が考えられる。これらの現象理解を目的として、人工バリア材料成分の共存（オーバーパック由来の Fe イオン等）や様々な地下水成分（Mg イオン等）を考慮した水質条件下のガラス溶解挙動（日本原子力研究開発機構との共同研究（以下、「JAEA 共研」という）、2015 年度から継続）、ガラス溶解挙動の溶液条件・温度依存性（九州大学との共同研究（以下、「九大共研」という）、2020 年度～2024 年度）、ゲル層の形成によるガラス溶解挙動への影響要因（千葉大学との共同研究（以下、「千葉大共研」という）、2020 年度～2024 年度）に関する知見拡充に取り組んできた。これらの 2023 年度までの成果は下記のとおりである（NUMO, 2024）。

- ・ JAEA 共研：①～③に着目し、Fe イオンまたは Mg イオンの溶存下におけるガラス溶解挙動の時間変化を調べるため、低酸素環境かつ溶存中の Fe イオンまたは Mg イオンの濃度を長期間（最大 10 年を想定）維持する試験（以下、「長期試験」という）を開始。試験期間を 0.5, 1, 5, 10 年とし、溶液条件について、FeCl₂ 溶液条件（以下、「Fe 条件」という）、MgCl₂ 溶液条件（以下、「Mg 条件」という）、二種イオンの比較対象としての脱イオン水条件（以下、「DIW 条件」という）の三種類とした試験を実施中（図 2）
- ・ 九大共研：①～③に着目し、ガラス溶解挙動の pH 及び溶存 Si 濃度依存性を評価するため、模擬廃棄物ガラスに接触・反応させる溶液条件及び温度を一定に制御できる試験装置（図 3）を用いて、包括的技術報告書（NUMO, 2021）で設定した間隙水組成に基づき 10 試験条件（表 1 の No.1～10）のデータを取得
- ・ 千葉大共研：②に着目し、ゲル層中の水分子の移行挙動を分析するため、単純組成（ケイ素、

酸素)のゲル層の分子構造をモデル化(図4)し、ゲル層中における物質の移行経路となる細孔の構造(孔径や細孔の連結性等)と水分子の拡散係数との関係を分子動力学シミュレーションにより評価した結果(Hatori et al., 2024),ゲル層の含水率が大きい場合は細孔が多く接続し、水分子が移動するための経路が増えることで水分子の拡散が容易となること、含水率が小さい場合は孤立した細孔の形成や細孔内の水分子と細孔壁面のシラノール基(Si-OH)の H^+ と水分子(H_2O)の O^2 が水素結合し、水分子の拡散を抑制する要因として機能していることを確認

2. 主な成果

JAEA 共研では、2024年度から試験期間1.5, 2, 3, 4, 7, 9年とする長期試験を開始した。2023年度までに開始した試験期間を0.5, 1年とした試験については終了し、溶液中の元素濃度の分析結果から規格化浸出量を評価した結果、溶液条件による大きな違いは見られなかった(図5)。また、規格化浸出量の時間変化とガラス表面の析出鉱物の変遷との関係評価に向けて、試験期間0.5年の試料について固相分析を実施し、Fe条件ではFe蛇紋石鉱物(グリーンナライト)等、Mg条件ではLDH鉱物(ハイドロタルサイト)やMg蛇紋石鉱物(アンチゴライト)等、DIW条件ではZn蛇紋石鉱物(フライポンタイト)やZnスメクタイト鉱物(ソーコナイト)等を確認した。また、ガラス溶解挙動に関する長期試験を継続するとともに、④に着目した新たな取り組みとして、ガラス固化体の周辺に存在する鉄腐食生成物がガラス溶解挙動に及ぼす影響を評価するための試験手法と試験試料の分析手法の検討を開始した。

九大共研では、溶存Si濃度及びpH条件を変化させた試験により溶解速度に関するデータ拡充として、温度条件を処分期間中で想定される最も高い温度である90℃に設定し、pH条件を包括的技術報告書で設定した間隙水のpH6.4~9.8を中心にして、より広範な範囲を評価できるように、pH3.5からpH10におけるデータを取得した。pH10における溶解速度データ(図6, 表1のNo.11~14)及びpH4における溶解速度データ(図7, 表1のNo.15~17)を整理した結果(図8), pH7, 9, 10においては溶存Si濃度の増加とともに溶解速度が減少し、既往研究(Inagaki et al., 2012)のデータの傾向とも整合することを確認した。pH4では、溶存Si濃度の増加とともに溶解速度は減少せず、わずかに増加することを確認した。また、pH3.5からpH5における溶解速度データを整理した結果(図9), pH4.5を境に溶存Si濃度依存性の傾向が変化することを確認した。

千葉大共研では、分子動力学シミュレーションにより、ガラスからの溶出成分であるNaイオンのゲル層中における移行挙動に関する知見拡充として、ガラスから溶出したNaイオン(Na^+)を対象とした分子動力学シミュレーションの実施によるゲル層中の移行挙動を分析した。その結果、細孔壁面の H^+ を放出し負に帯電するSi-Oと正に帯電する Na^+ が静電的に結合することで Na^+ の拡散が抑制されることを確認した。

3. 包括的技術報告書への影響

ガラス固化体周辺で生じる現象による溶解速度の影響を定量評価することは、包括的技術報告書(NUMO, 2021)の本編6.6.2項(信頼性向上に向けた取り組み)に記載した課題である。本技術開発で得られる上記①~④等の現象理解に基づき、包括的技術報告書(NUMO, 2021)の本編の6.3節(シナリオの作成と解析ケースの設定)で示したガラス固化体の溶解速度をより確からしく設定することを検討する。

4. 今後の展開

模擬廃棄物ガラスの長期試験を継続するとともに、ガラス固化体と鉄腐食生成物の共存環境下におけるガラス溶解挙動の知見拡充を進める。

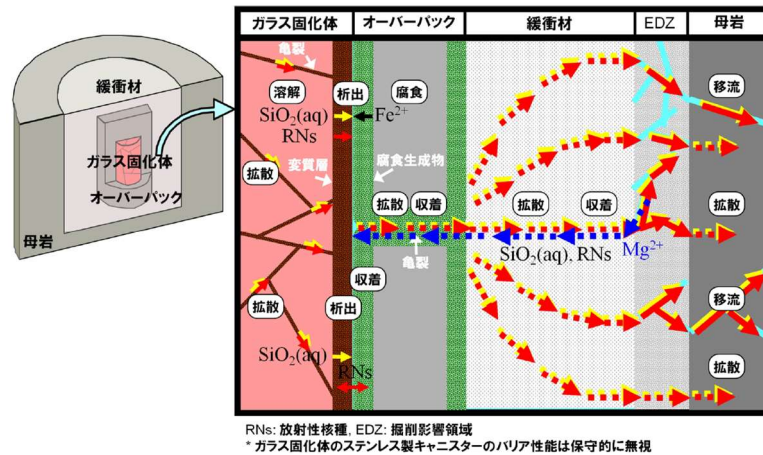


図 1 ガラス溶解モデルの概念図（柴田ほか，2015）

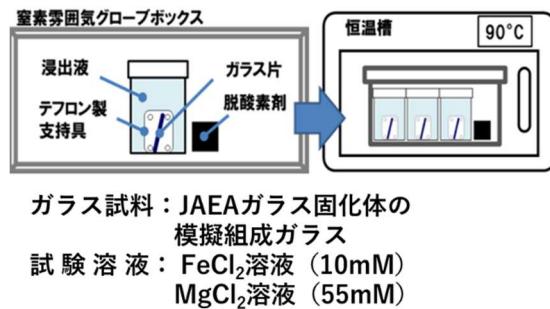


図 2 長期間のガラス溶解挙動を調べるための静的試験装置の概略

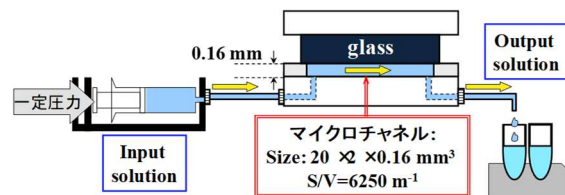


図 3 溶液条件・温度を一定に制御可能なマイクロチャネル流水試験装置の概略

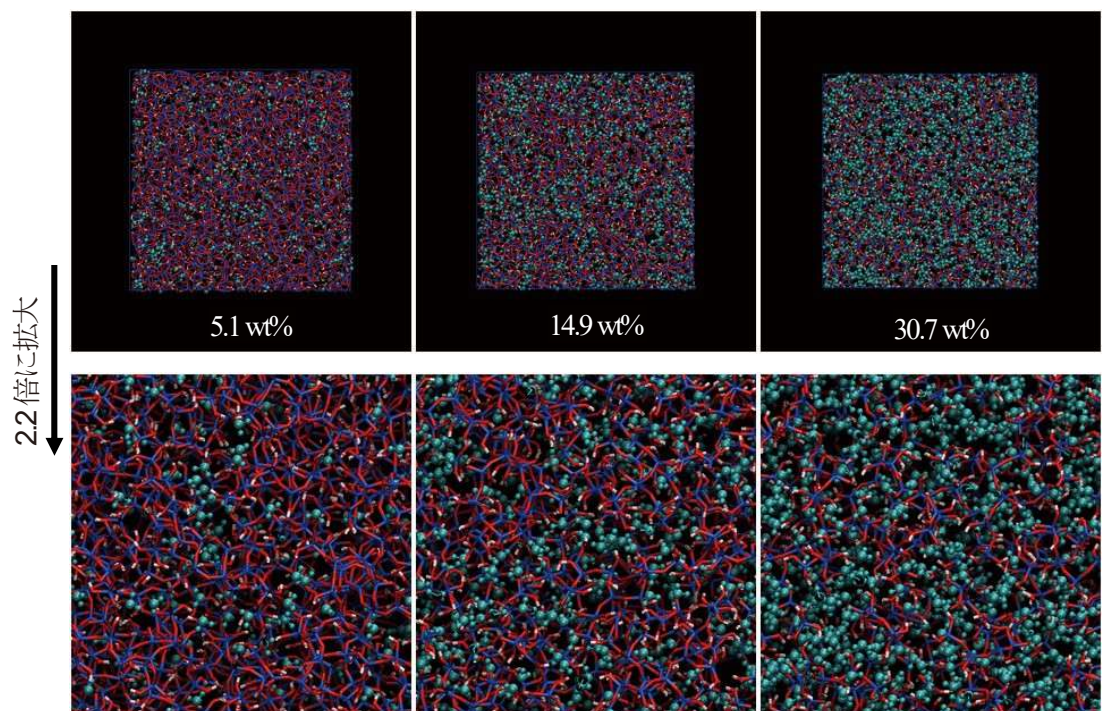
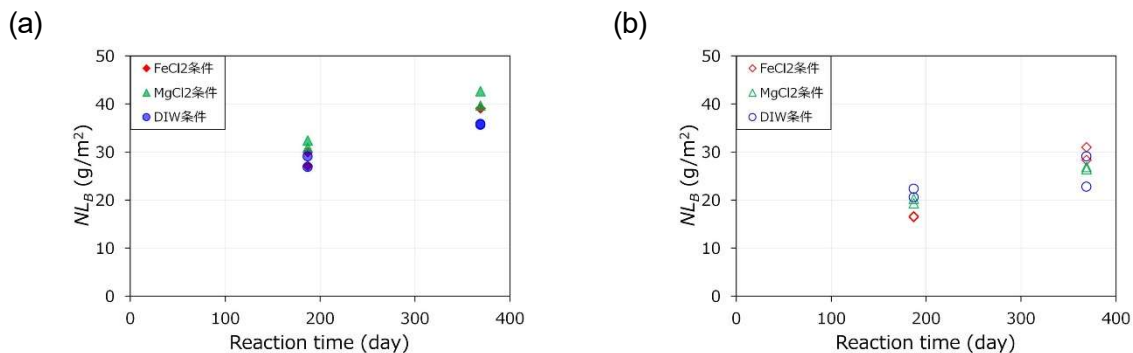


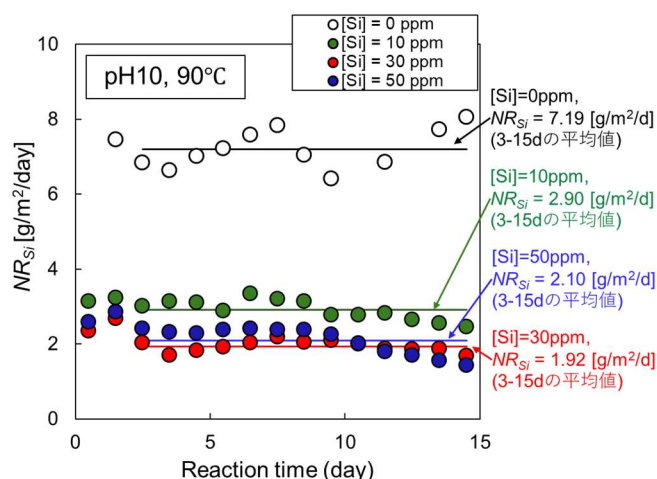
図 4 様々な含水率[wt%]におけるゲル層の分子構造モデル
(上の図は全体図, 下の図は上の図の2.2倍拡大図。色のついた棒はシリケートネットワークのSi-O結合とO-H結合を表す。シアン色の球と棒は水分子を表す。)



$$NL_i \text{ [g/m}^2\text{]} = \frac{C_i V}{f_i S}$$

- C_i : 反応溶液中の元素 i の濃度 [g/m³]
 f_i : 反応前ガラス固化体中の元素 i の重量分率 [-]
 V : 反応後溶液サンプリング体積 [m³]
 S : 反応表面積 [m²]

図 5 B の浸出量 (NL_B) の経時変化
(温度 90°C, a : S/V=5, b : S/V=10)



$$NR_i [g m^{-2} d^{-1}] = \frac{C_i V}{f_i S \Delta t}$$

C_i : 反応溶液中の元素 i の濃度 [g/m^3]
 f_i : 反応前ガラス固化体中の元素 i の重量分率 [-]
 V : 反応後溶液サンプリング体積 [m^3]
 S : 反応表面積 [m^2]
 Δt : 反応時間 (サンプリング時間) [d]

図 6 Si の溶解速度 (NR_{Si}) の経時変化
 (pH10, 90°C, Si 濃度=0, 10, 30, 50, 100ppm, 反応期間 15 日)

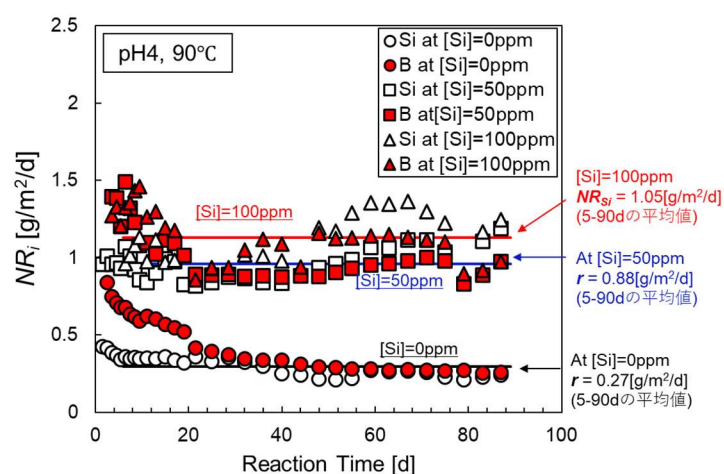


図 7 Si の溶解速度 (NR_{Si}) の経時変化
 (pH4, 90°C, Si 濃度=0, 10, 30, 50, 100ppm, 反応期間 15 日)

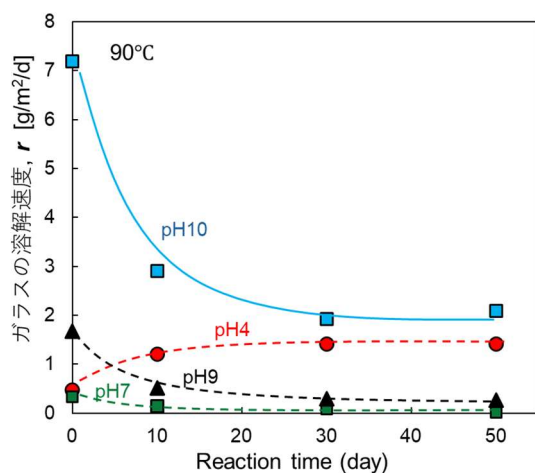


図 8 ガラスの溶解速度の溶存 Si 濃度及び pH 依存性
 (90°C, pH4, 7, 9, 10)

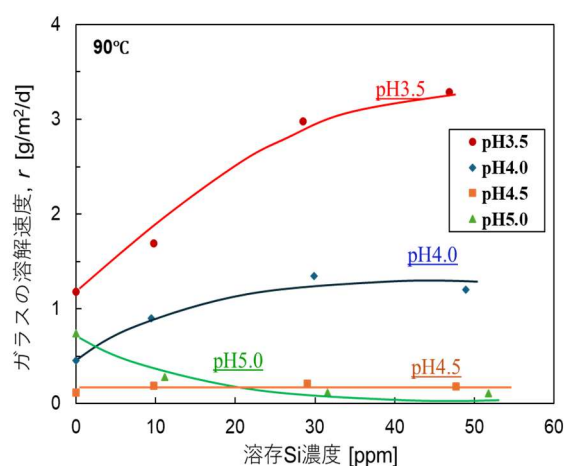


図 9 ガラスの溶解速度の溶存 Si 濃度及び pH 依存性
 (90°C, pH3.5, 4.0, 4.5, 5.0)

表 1 ガラス溶解試験の条件・ガラスの溶解速度

試験 No	pH	Si 濃度	温度	試験期間	ガラスの溶解速度 ※1	実施年度
No.1	pH9	0 ppm	50℃	90 日	0.048 g/m ² /d	2022 年度
No.2	pH9	0 ppm	70℃	90 日	0.39 g/m ² /d	2022 年度
No.3	pH9	0 ppm	90℃	90 日	1.69 g/m ² /d	2021 年度
No.4	pH9	50 ppm	50℃	23 日 ※2	0.0013 g/m ² /d	2022 年度
No.5	pH9	50 ppm	70℃	90 日	0.015 g/m ² /d	2022 年度
No.6	pH9	50 ppm	90℃	90 日	0.08 g/m ² /d ※3※4	2022 年度
No.7	pH9	100 ppm	90℃	90 日	0.02 g/m ² /d ※3	2023 年度
No.8	pH7	0 ppm	90℃	90 日	1.04 g/m ² /d	2023 年度
No.9	pH7	50 ppm	90℃	90 日	0.02 g/m ² /d	2023 年度
No.10	pH7	100 ppm	90℃	90 日	0.02 g/m ² /d ※3	2023 年度
No.11	pH10	0 ppm	90℃	15 日	7.19 g/m ² /d	2024 年度
No.12	pH10	10 ppm	90℃	15 日	2.90 g/m ² /d	2024 年度
No.13	pH10	30 ppm	90℃	15 日	1.92 g/m ² /d	2024 年度
No.14	pH10	50 ppm	90℃	15 日	2.10 g/m ² /d	2024 年度
No.15	pH4	0 ppm	90℃	90 日	0.27 g/m ² /d	2024 年度
No.16	pH4	50 ppm	90℃	90 日	0.88 g/m ² /d	2024 年度
No.17	pH4	100 ppm	90℃	90 日	1.15 g/m ² /d	2024 年度

※1 試験 No. 7 及び No. 10 では Si の溶解速度が測定下限（～0.01 [g/m²/d] 程度）以下となったため、B の溶解速度をガラスの溶解速度とし、その他の試験では Si の溶解速度をガラスの溶解速度と評価した。

※2 試験開始後 23 日目にガラス試料が破損したため、23 日以降のガラス溶解速度は測定できなかった。

※3 ガラスの溶解速度が試験期間中に低下した後、ほぼ一定値に近付いた試験期間 60～90 日の平均値。

※4 試験期間中にガラス溶解速度が低下する前の試験期間 25 日までの平均値は 0.3 [g/m²/d]。

参考文献

- Debure, M., Windt, D. L., Frugier, P., Gin, S. and Vieillard, P. (2016) : Mineralogy and thermodynamic properties of magnesium phyllosilicates formed during the alteration of a simplified nuclear glass, *Journal of Nuclear Materials*, 475, pp.255-265.
- Fleury, B., Godon, N., Ayral, A. and Gin, S. (2013) : SON68 glass dissolution driven by magnesium silicate precipitation, *Journal of Nuclear Materials*, 442, pp.17-28.
- Gin, S. (2001) : Protective effect of the alteration gel: a key mechanism in the long-term behavior of nuclear waste glass, *Material Research Society Symposium Proceedings*, 663, pp.207-215.
- Godon, N., Rebiscoul, D. and Frugier, P. (2013) : SON68 Glass Alteration Enhanced by Magnetite, *Procedia Earth and Planetary Science*, 7, pp.300-303.
- Grambow, B. and Müller, R. (2001) : First-order dissolution rate law and the role of surface layers in glass performance assessment, *Journal of Nuclear Materials*, 298, pp.112-124.
- Hatori, T., Matsubara, R., Inagaki, Y., Ishida, K. and Ohkubo, T. (2024) : Geometrical and chemical effects of water diffusion in silicate gels: Molecular dynamics and random walk simulations. *Journal of the American Ceramic Society*.
- Inagaki Y., Makigaki H., Idemitsu K., Arima T., Mitsui S. and Noshita K (2012) : Initial Dissolution Rate of A Japanese Simulated High-Level Waste Glass P0798 as a Function of pH and Temperature Measured by Using Micro-Channel Flow-Through Test Method, *J. Nucl. Sci. Tech.*, 49 [4] 438-449.
- Michelin, A, Burger, E., Rebiscoul, D. Neff, D., Bruguier, F., Drouet, E., Dillmann, P. and Gin, S. (2012) : Silicate Glass Alteration Enhanced by Iron: Origin and Long-Term Implications, *Environmental Science & Technology*, 47, pp.750-756.
- Mitsui, S., Makino, H., Inagaki, M. and Ebina, T. (2009) : Impact of Silicon Migration through Buffer Material on the Lifetime of Vitrified Waste, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.1193*, pp.397-404.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024) : 技術開発成果概要 2023, NUMO-TR-24-03, pp. 55-61.
- 柴田雅博, 澤田淳, 舘幸男, 牧野仁史, 若杉圭一郎, 三ツ井誠一郎, 北村暁, 吉川英樹, 小田治恵, 石寺孝充, 陶山忠宏, 畑中耕一郎, 仙波毅, 瀬尾俊弘, 亀井玄人, 黒澤進, 後藤淳一, 澁谷早苗, 後藤考裕, 窪田茂, 稲垣学, 守屋俊文, 鈴木寛, 石田圭輔, 西尾光, 牧内秋恵, 藤原啓司 (2015) : 概要調査段階における設計・性能評価 手法の高度化 (その3)－NUMO-JAEA 共同研究報告書 (2013 年度), JAEA-Research 2014-030.

2.3.2 セメント系材料と緩衝材との相互作用による長期変質挙動の検討

小池 彩華¹ 田窪 勇作¹ 安楽 総太郎² 川喜田 竜平²

¹原子力発電環境整備機構, ²原子力研究開発機構

1. 背景・目的

包括的技術報告書 (NUMO, 2021) で示した地層処分場の設計 (図 1) では, 人工バリアの一つである緩衝材はセメント系材料と接する。セメント系材料から溶出する高アルカリ成分は, 緩衝材中のモンモリロナイトの溶解と二次鉱物の生成やイオン交換反応といった変質現象を引き起こし, 緩衝材に期待する「放射性物質の移流による移行の抑制」等の安全機能の低下を及ぼす可能性がある。この時に生じる現象としては, ①モンモリロナイトの溶解/変質鉱物の沈殿, ②モンモリロナイトのイオン交換反応, ③鉱物組成等の変化による間隙率の変化とそれに伴う物質移動特性の変化, ④緩衝材中における物質の拡散が考えられる。

包括的技術報告書においては, ①②を考慮した化学反応モデルと③④を考慮した物質移行モデルを組み合わせることで反応輸送解析モデルを構築し, その時点で利用可能な最新の知見に基づき, 実証されているモンモリロナイトの溶解速度式の中から溶解が早いと考えられる Marty 式 (Marty et al., 2015) を用いるなど, 安全評価上の保守性を確保するように評価した。なお各プロセスについては, ①鉱物の溶解/沈殿は反応速度論, ②化学種分配及びモンモリロナイトのイオン交換反応は平衡論, ③物質移動特性の変化は間隙率と実効拡散係数の関係式, ④拡散は緩衝材中の濃度差を起因とした拡散方程式に従うとしている。

この解析モデルのさらなる信頼性向上に向け, 室内試験による現象理解の深化と, それを踏まえた実現象をより忠実に表現するための解析モデルの改良を 2016 年度から進めている。セメント系材料と緩衝材の相互作用は, 実際の処分場環境における複数の現象によって複合的に生起するが, 関連する個別現象の理解を深めるため, ①と②を対象としたバッチ変質試験, ①～③を対象とした圧縮ベントナイト試料の通水試験, ①～④を対象としたセメント系材料と緩衝材の接触を模擬した接触試験を実施した。こうした現象の理解においては長期間の試験データが重要になることから, 定期的に試験データを取得しながら, 最長 10 年程度の試験を想定している。各試験期間で取得する実験結果とモデルによる解析結果の比較を行い, 段階的に解析モデルの実現象に対する整合性を確認し, 必要に応じて改良を行っている。

これまで, セメント系材料由来の高アルカリ環境を想定し, 高 pH 溶液 (pH 12.5 又は 13.6) にベントナイト粉末試料を浸漬させたバッチ変質試験を実施してきた。2023 年度は, 試験期間 2 年までの試料を分析して取得したモンモリロナイトの変質量について, 包括的技術報告書で示した化学反応モデルを用いた解析結果と比較することで, 化学反応モデルの妥当性確認を行った (NUMO, 2024a)。

バッチ変質試験については, 2024 年度にサンプリングの予定がないことから, 試験の維持管理を継続した。通水試験及び接触試験についても試験を継続するとともに, 接触試験で得られた試験データと解析結果を比較した。

2. 主な成果

2018 年度から継続している模擬セメント間隙水溶液の通水試験及び膨潤圧の測定を行い, データ

の拡充を行った。また、2023 年度から試験系の検討を開始していた大口径カラムを用いた通水試験に関しては、予備通水試験により試験系の気密性に関する課題を抽出した。

接触試験では、2023 年度に取得した普通ポルトランドセメントペースト硬化体 (W/C=55 %) と圧縮ベントナイト (クニゲル V1) を 50 °C の条件で 3.5 年間接触させた試料の分析結果を対象として、包括的技術報告書で使用した反応輸送解析モデルにて解析を実施し、EPMA 分析による元素分布データと比較した。接触試験の試験体系と反応輸送解析に用いた解析体系を図 2 に、分析結果と解析結果の比較を図 3 に示す。ベントナイトの主要構成元素である Si については、EPMA 分析の結果と比較して解析結果の方が広範囲で含有量が低下しており、ベントナイトの変質が過大に評価されていた。また、セメント系材料の主要構成元素である Ca についても同様に、セメント系材料試料の変質範囲を過大に評価していることが確認された。これらの比較により、包括的技術報告書で使用した反応輸送解析モデルでは、セメントとベントナイトの相互作用による鉱物組成の変化量を過大に評価している可能性が示唆された。

2024 年度までに得られた試験データと解析結果の比較より、包括的技術報告書で使用した反応輸送解析モデルについて、化学反応と物質移行の観点から以下の課題が挙げられた。

- ・ 反応輸送解析モデルは、セメント系材料との接触による緩衝材中の構成鉱物の溶解や二次鉱物の沈殿について、準平衡状態を仮定した遷移状態理論に基づき各鉱物の飽和度をもとに反応速度を計算している。実験的に一次鉱物 (モンモリロナイトなど) の溶解は確認されているものの、二次鉱物 (フィリップサイトなど) の沈殿量はごくわずか (NUMO, 2024b) であることから、現時点での系は熱力学的平衡には達しておらず、遷移状態理論の前提となる準平衡仮定が成立しない可能性が示唆される。したがって、非平衡状態を前提としたモデルとすることで、初期の鉱物の溶解及び沈殿反応についてより確からしく評価可能なモデルとできる可能性がある。
- ・ ベントナイトの変質深さに寄与する物質移行を規定する要因の一つとして、ベントナイトとセメントの境界面で生成される二次鉱物による空隙率の低下が挙げられる。接触試験試料の XRD 分析 (図 4) でベントナイト側のセメント境界を含む試料に C-S-H のピークが検出されたこと、EPMA 分析でセメント境界面付近に Si が確認されたことから、ベントナイトとセメントの境界面には C-S-H が存在すると考えられる。解析結果においては、境界面における C-S-H の生成が認められなかったことから、数値解析で取り扱う二次鉱物の種類に C-S-H を加えることで、C-S-H の生成による物質移行特性の変化をより確からしく評価可能なモデルとできる可能性がある。

3. 包括的技術報告書への影響

セメント系材料が緩衝材に及ぼす相互作用による状態変遷の評価は、包括的技術報告書の本編 6.6.2 項 (信頼性向上に向けた取り組み) の (1) (ii) ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化に記載された課題であるとともに、OECD/NEA による国際レビュー (OECD/NEA, 2023) でも必要性を指摘された課題である。包括的技術報告書の本編 6.3.2 項 (シナリオの作成) の (3) (i) (a) - (c) ①ニアフィールドスケールにおける緩衝材の有する「放射性核種の移流による移行の抑制」等の安全機能の維持について、本検討によって得られる緩衝材の長期変質挙動を踏まえたより確からしい変質の進展の評価結果を基に同報告書の記述内容の更新を検討する。

4. 今後の展開

バッチ変質試験、通水試験及び接触試験を継続して長期試験データを拡充する。また、JAEA が資源エネルギー庁からの受託事業で実施している試験のデータや解析モデルの改良を反映し、異なる条件（試験期間や条件が異なる試料等）での試験結果を対象とした比較を行うことで、解析モデルの妥当性確認を進める。

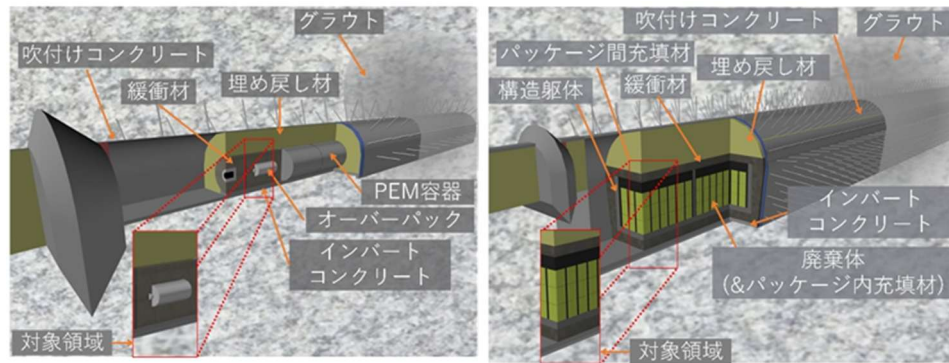


図 1 左) HLW 処分場の構成要素 右) TRU 等廃棄物処分場の構成要素

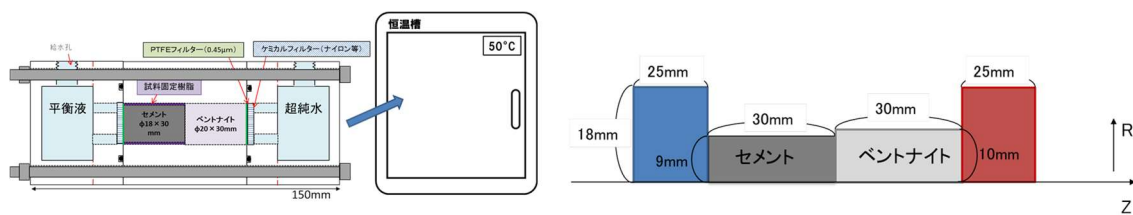


図 2 左) 接触試験概要、右) 接触試験を模擬した解析体系

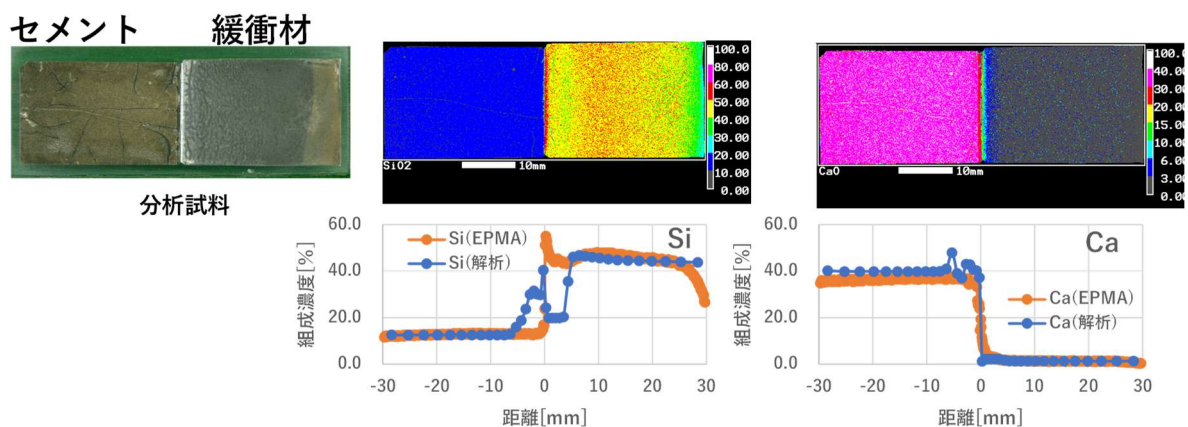


図 3 接触試験における EPMA 分析結果との比較
(横軸 0 [mm] 地点がセメントと緩衝材の接触面)

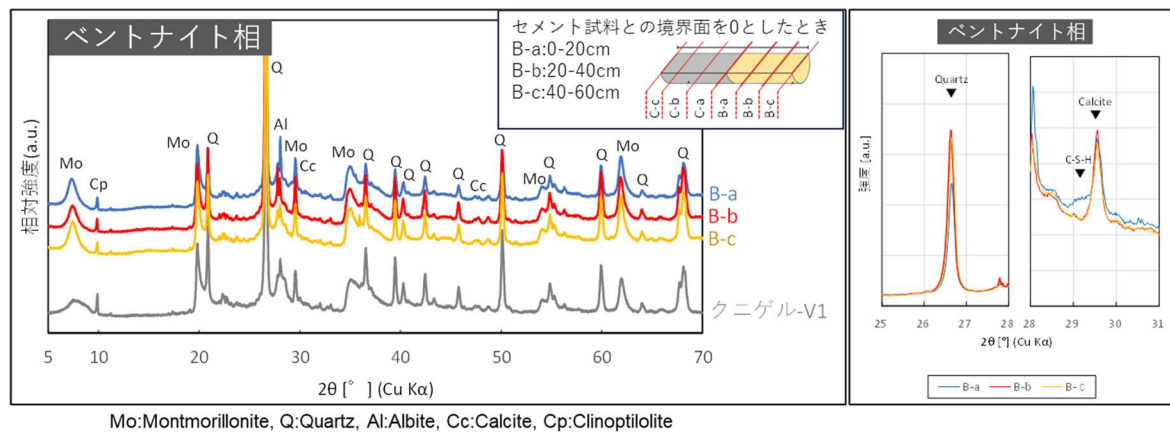


図 4 接触試験における XRD 分析結果

参考文献

- Marty, N. C. M., Claret, F., Lassin, A., Tremosa, J., Blanc, P., Madé, B., Giffaut E., Cochepin B. and Tournassat, C. (2015) : A database of dissolution and precipitation rates for clay rocks minerals, Applied Geochemistry, Vol. 55, pp. 108-118.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024a) : 技術開発成果概要 2023, NUMO-TR-24-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024b) : 技術開発成果概要 2022, NUMO-TR-24-01.
- OECD/NEA(経済協力開発機構／原子力機関) (2023) : The Nuclear Waste Management Organization of Japan's Pre-siting Safety Case Based on the Site Descriptive Model, NEA/RWM/R(2022)2.

2.3.3 ベントナイトコロイド影響評価に用いるデータ取得

松原 竜太¹ 石寺 孝充² 江口 綾乃²

¹原子力発電環境整備機構, ²日本原子力研究開発機構

1. 背景・目的

緩衝材を構成する圧縮ベントナイトと地下水の接触により生成した微粒子（ベントナイトコロイド：以下、「コロイド」という）は母岩への収着性が低いため、コロイドが廃棄体から溶出した核種を取り込んで移行することにより、母岩中の核種移行を促進させる可能性がある。コロイドの生成は地下水の水質に依存し、包括的技術報告書（NUMO, 2021）における地層処分場の閉鎖後長期の安全評価（以下、「安全評価」という）では、海外産ベントナイトのデータを用いた SKB の知見（SKB, 2010 ; Birgersson et al., 2009）に基づき、全国規模で収集されたデータにより設定した地下水水質ではコロイドが生成せず、核種の移行促進は生じないとしている。ただし、サイトが特定されれば、原位置の地下水水質を考慮してコロイドの生成可能性を改めて評価する必要がある。また、コロイドが生成し、かつコロイドが溶液中で沈殿や凝集せずに分散した状態を維持して（以下、「安定」という）存在する場合には、コロイドに取り込まれた核種の移行を考慮した安全評価が必要となる（図 1）。このため、NUMO は、(1) コロイドが生成し、かつコロイドが安定に存在する地下水水質を明確化するとともに、(2) コロイドが共存する条件での核種移行を定量的に評価するための核種移行モデルの構築に取り組んでいる。

(1) については、地層処分への使用が想定される国内産のベントナイトを対象として、コロイドが安定に存在できる溶液条件（以下、「安定条件」という）を調べる試験（図 2）（以下、「コロイド安定性評価試験」という）と、圧縮ベントナイトからのコロイドの生成挙動を調べる試験（図 3）（以下、「コロイド生成試験」という）を、JAEA との共同研究（以下、「JAEA 共研」という）により実施している。また、スイスのグリムゼル試験サイトにおいて実施されている国際共同プロジェクト CFM（Colloid Formation and Migration：以下、「CFM」という）（2016 年～）へ参画し、CFM で実施されている天然の割れ目中に定置した圧縮ベントナイトからのコロイド生成挙動を調べる試験（in-rock Bentonite Erosion Test：以下、「i-BET」という）を実施している。この i-BET で得られるデータを活用し、JAEA 共研で得られた試験結果の実際の地質環境への適用性を検討する予定である。

(2) については、JAEA 共研によりコロイド共存下での岩石模擬亀裂中の核種移行試験や、CFM で計画されている天然の割れ目を対象としたコロイド共存下での核種移行試験の結果等を活用して解析手法の構築を進めている。

2. 主な成果

(1) コロイドの安定条件・生成条件の明確化

コロイド安定性評価試験では、溶液中に分散させたコロイドの濃度変化から安定条件を設定するためのデータを取得している（図 2）。コロイドの安定性はイオン強度に依存するため、溶液条件は包括的技術報告書（NUMO, 2021）で設定したモデル地下水水質の中でイオン強度への寄与が大きい陽イオンとして Na イオンと Ca イオンを対象に設定した。2023 年度までに、Na 濃度 $1.0 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-2} \text{ mol/l}$, Ca 濃度 $5.0 \times 10^{-5} \sim 2.0 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$ の範囲で試験を実施した。その結果、Na 濃

度 2.0×10^{-2} mol/L 以下では、おおむね Ca 濃度 1.1×10^{-4} mol/L 以下でコロイドが安定に分散することを明らかにした (図 4) (NUMO, 2023 ; NUMO, 2024a ; NUMO, 2024b)。

コロイド生成試験では、装置の中心部に Ca 型または Na 型の圧縮ベントナイト (クニピア-F) を配置し、その周囲の模擬亀裂中に侵入したベントナイトからのコロイド生成挙動を評価している (図 3)。2024 年度は、2023 年度から継続している Ca 型に調整した圧縮ベントナイト試料を用いて、コロイド安定性評価試験でコロイドが安定に存在することを確認された Na 濃度 1.0×10^{-2} mol/l 条件の試験 (表 1 の条件 a) 及び、地下水流量の影響を確認するために溶液の流量を 4 倍に設定した試験 (表 1 の条件 b) を実施した。これらの試験では、約 150 日間の試験中、いずれの条件においてもコロイドの生成は確認されなかった。さらに、Na 型に調整した圧縮ベントナイト試料を用いて、コロイド安定性評価試験で確認された Na 共存下でもコロイドが安定に存在する Ca 濃度 5.0×10^{-5} mol/l 条件の試験 (表 1 の条件 c) を開始した。試験開始直後からコロイド濃度が上昇し、400~500 ppm の範囲で継続的にコロイドの生成が観察された (図 5)。試験開始から約 50 日後に試料の密度低下により設置したベントナイト試料がその形状を維持できなくなったため試験を終了した。これらのコロイドの生成挙動は、ベントナイト中の拡散移行とイオン交換反応によるベントナイト組成の変化により影響を受けていることが考えられる。表 1 の a, b の試験でコロイドが生成しなかった結果については、ベントナイト内部から試験溶液方向への Ca の拡散移行により、亀裂中に侵入したベントナイト端面が Ca 型のまま維持されている可能性が要因の一つとして挙げられる。

CFM において実施している i-BET では、天然の割れ目中に海外産の Na 型ベントナイト (圧縮した MX-80 ベントナイト) を定置し、2019 年度から圧縮ベントナイト周囲の天然割れ目中から地下水を採取してコロイド濃度を約 1,400 日間にわたり測定した結果、時間の経過とともにコロイド生成速度が低下し、試験開始後 250 日以降はコロイド濃度の時間的な変化が認められなかった (Schäfer et al., 2025)。

(2) コロイド共存下核種移行モデルの構築

コロイド共存下での核種移行モデルの構築に向けた基礎データの拡充を目的として、JAEA 共研では、グリムゼル試験場で採取した原位置の岩石試料 2 体を重ねることで単一割れ目を模擬し、この割れ目を対象としたコロイド共存下における非放射性トレーサー (Sr 及び Cs) の移行挙動試験 (以下、「コロイド共存下の核種移行試験」という) の準備を進めている (図 6)。

3. 包括的技術報告書への影響

コロイドの安定条件・生成条件の把握、及びコロイドによる核種移行挙動への影響を評価する手法の構築は、包括的技術報告書 (NUMO, 2021) の本編 6.6.2 項 (信頼性向上に向けた取り組み) に記載した課題であり、OECD/NEA による国際レビュー (OECD/NEA, 2023) においても必要性が指摘されている。同報告書の本編 6.3.2 項 (シナリオの作成) では、地下水組成の観点からコロイド生成を考慮しないとしている。本技術開発で取得したコロイドの安定条件に基づくと、同報告書で設定した地下水組成では同様にコロイドは安定化しない。このことから、同報告書の科学的信頼性の向上に資することができた。

4. 今後の展開

2. (1) に関して、JAEA 共研では、コロイドが生成する条件の明確化を目的としたコロイド生成試験を継続する。また、CFM の i-BET では、ベントナイトの質量減少や膨潤による亀裂への侵入状況、コロイド生成挙動に影響を及ぼす陽イオン組成の変化などを調べるため、コロイドが移行していると想定される亀裂を含む原位置試料を取得し、分析する。

2. (2) に関して、JAEA 共研では、コロイド共存下の核種移行試験を開始する。また、CFM では天然の割れ目中におけるコロイド共存下での核種移行試験を実施するため、試験場の状態を調査を目的としたダイポール試験を計画している。

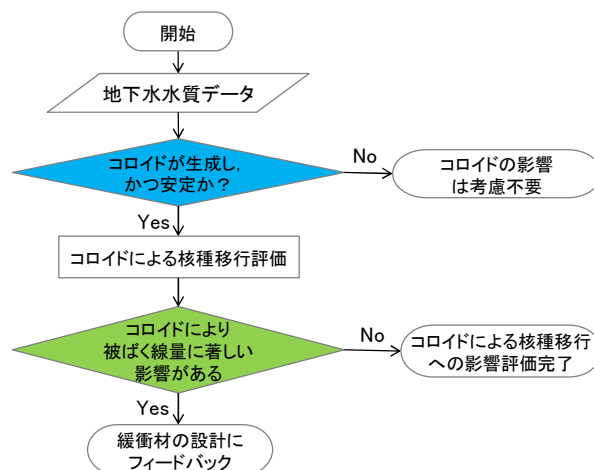


図 1 コロイド影響の評価フロー（案）

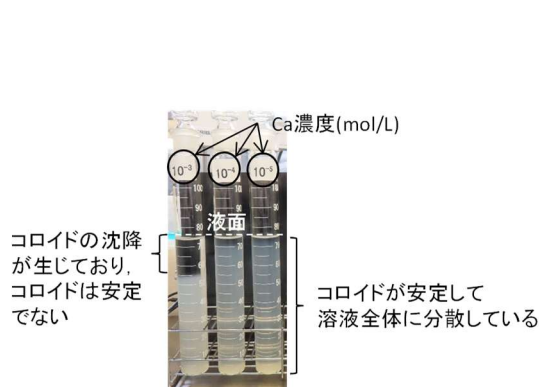


図 2 コロイド安定性評価試験

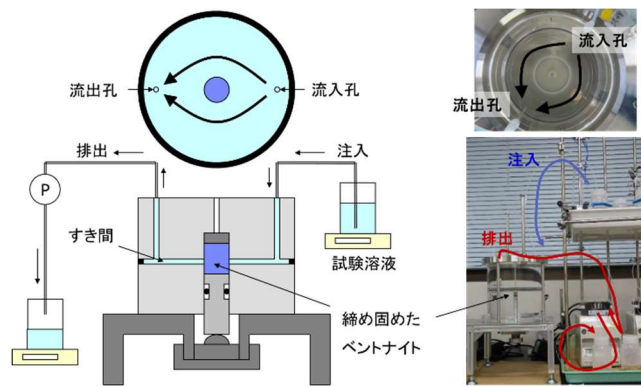


図 3 コロイド生成試験に用いる試験装置の概略図

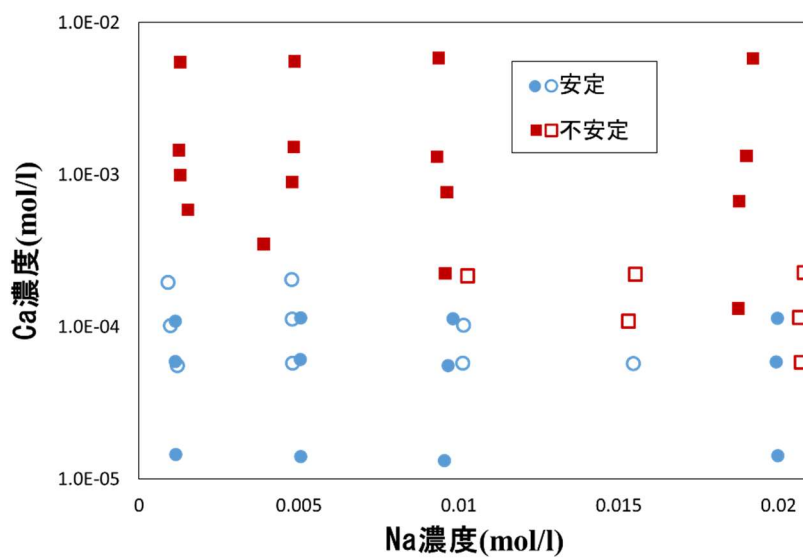


図 4 Na 及び Ca 濃度とベントナイトコロイドの安定性の関係
(●■：2022 年度の試験結果, ○□：2023 年度の試験結果)

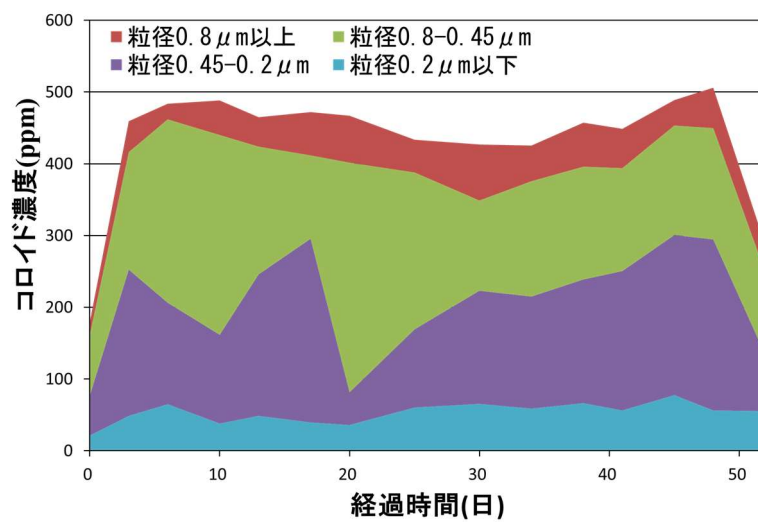


図 5 コロイドの濃度変化
(Na 型ベントナイト, Ca 濃度 5.0×10^{-5} mol/l 条件)

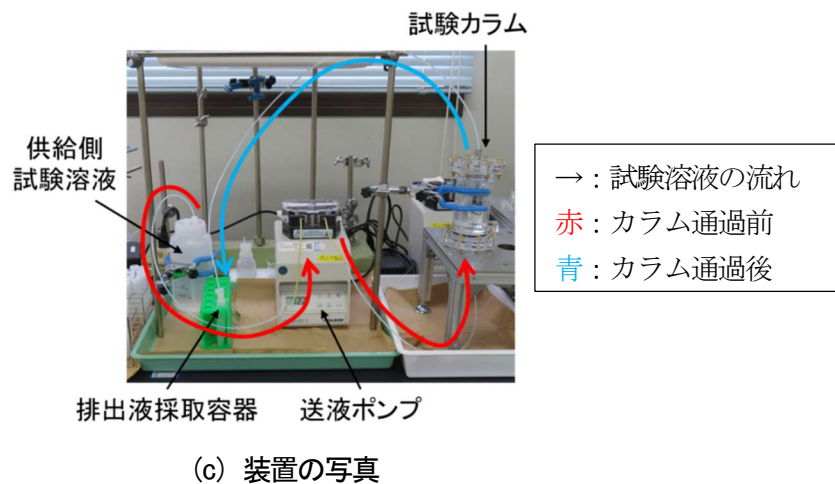
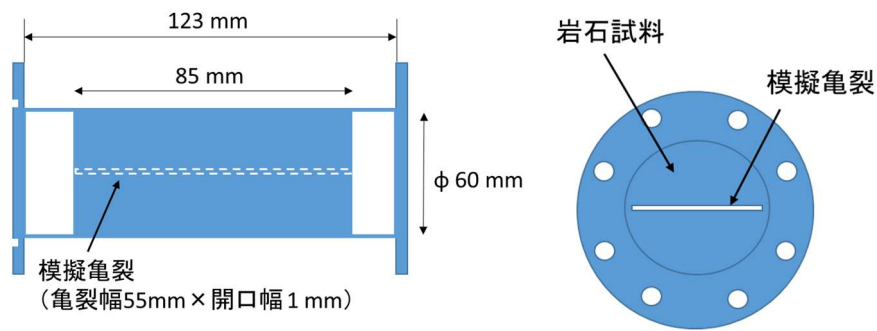


図 6 模擬亀裂中のコロイド移行試験装置

表 1 コロイド生成試験の条件

	条件 a	条件 b	条件 c
開始年度	2024 年度	2023 年度	2024 年度
ベントナイト	カルサイト除去 Na 型クニピア F (乾燥密度 1.6 Mg/m ³)	カルサイト除去 Ca 型クニピア F (乾燥密度 1.6 Mg/m ³)	カルサイト除去 Ca 型クニピア F (乾燥密度 1.6 Mg/m ³)
流量 (流速)	0.024 ml/min (5×10^{-6} m/s 程度)	0.024 ml/min (5×10^{-6} m/s 程度)	0.096 ml/min (2×10^{-5} m/s 程度)
試験溶液	CaCl ₂ 5×10^{-5} mol/l, pH9 付近	NaCl 0.01 mol/l, pH9 付近	NaCl 0.01 mol/l, pH9 付近
試験雰囲気	大気中の二酸化炭素の溶解により pH が低下することを防ぐため, 酸素濃度 1 ppm 以下の窒素雰囲気下で実施。		

参考文献

- Birgersson, M., Börgesson, L., Hedström, M., Karnland, O. and Nilsson, U. (2009) : Bentonite erosion. Final report, SKB Technical Report TR-09-34.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2023) : 技術開発成果概要 2021, NUMO-TR-22-02, pp. 58-60.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024a) : 技術開発成果概要 2022, NUMO-TR-24-01, pp. 104-108.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024b) : 技術開発成果概要 2023, NUMO-TR-24-03, pp. 104-108.
- OECD/NEA(2023) : 原子力発電環境整備機構 (NUMO) による「地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケース」－NUMO セーフティケースの国際ピアレビュー－, p. 24.
- SKB (2010) : Buffer and backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site, SKB Technical Report TR-10-47.
- Schäfer, T., Pingel, J., Frank, T., Noseck, U., Seher, H., Geckeis, H., Kouhail, Y., Quinto, F., Schneeberger, R. (2025) : In-situ Experiments on Bentonite Longterm Stability and Radionuclide Mobility at the Bentonite–Crystalline Interface at Grimsel Test Site, Nagra Technical Report NTB 23-10.

2.3.4 処分場の THMC (Thermal (熱的) –Hydraulic (水理学的) –Mechanical (力学的) –Chemical (化学的)) 場の変遷に関する解析評価技術の高度化

田窪 勇作¹ 杉田 裕² 小池 彩華¹ 生越 季理²

¹原子力発電環境整備機構, ²日本原子力研究開発機構

1. 背景・目的

処分場の安全評価において処分環境の状態設定を行うためには、処分環境において生じる熱的 (Thermal : T), 水理学的 (Hydrological : H), 力学的 (Mechanical : M), 化学的 (Chemical : C) な場の変化に応じた処分システムのふるまいを評価することが必要である。処分場閉鎖直後の水理場の変化が顕著となる再冠水過程においては、廃棄体からの発熱、地下水と人工バリア材料との間で生じる二次鉱物の沈殿・溶解等の化学反応、及び緩衝材の密度変化が、緩衝材中の地下水の浸潤挙動へ相互影響し、処分場の状態が複雑に変化することが考えられる。このような THMC 場の変化に関する不確実性は大きいことから包括的技術報告書 (NUMO, 2021) では、再冠水に至る過渡的な期間における THMC 連成現象について、より確からしく評価することが安全評価の課題として挙げられており、THMC 連成現象の解析評価技術の開発を進めている (Takubo et al., 2022)。

THMC 連成現象の解析評価技術の開発には、TH 連成解析モデルの整備からはじめ、必要な化学 (C)・力学 (M) のプロセスを段階的に追加する開発アプローチを採用している。開発した解析評価技術については、包括的技術報告書 (NUMO, 2021) で示している「縦置き・ブロック方式」と「横置き・PEM 方式」の 2 種類の設計オプションや、廃棄体の発熱特性や人工バリア設置に関する隙間の充填状態等の不確実性、地温条件の不確実性などに対応した解析評価を念頭に、表 1 に示す原位置・実規模スケール試験のプロジェクトにて取得されたデータを活用して、その妥当性を確認する計画である。

これまでに NUMO は、米国サンディア国立研究所をはじめとする複数の研究機関の共同開発によって作成されたオープンソースの TH/THC 連成解析コードである PFLOTRAN (Hammond et al., 2014) を用いて TH/THC 連成解析モデルの整備を行っている。2019 年からはスイスのグリムゼル試験サイトにおける国際プロジェクト「High Temperature Effects on Bentonite Buffer (HotBENT)」(Kober et al., 2023) への参画を通じて、開発した TH 連成解析モデルに対して 100℃以上まで適用性確認を進めている (NUMO, 2024)。2023 年度は、HotBENT プロジェクトの先行研究である国際共同研究プロジェクト「Full-scale Engineered Barriers Experiment (FEBEX)」(Lanyon & Gaus, 2016) で実施された室内試験及び原位置試験で取得したデータを用いて、TH/THC 連成解析モデルの適用性確認を試行した。FEBEX で緩衝材材料として用いられたベントナイトを対象とした TH/THC 連成解析の試行の成果では、緩衝材の状態変遷における不確実性を定量化するため、室内要素試験の先行研究データを基に、ベントナイト緩衝材の固有透過度や水分保持曲線といった解析モデルの入力パラメータが、不飽和ベントナイト中における水分移動の解析評価に及ぼす影響の大きいキーパラメータであることを特定した。これらのキーパラメータに着目した複数の解析ケースを設定することで、緩衝材の状態に係る連成解析結果の不確実性を評価し、この結果と試験測定結果との比較により、連成解析技術の妥当性確認が可能になる見通しを示した (Takubo et al., 2022; 田窪ほか, 2023)。

ベントナイトはその種類により、透水性や水分保持曲線などの水理特性が異なることがわかってお

り（例えば、Chen et al., 2021; Yamamoto et al., 2022）、また、上述の FEBEX の室内試験及び原位置試験で適用性を確認した連成現象評価技術を日本の処分環境においても適用できるか確認が必要である。そのため 2024 年度は、緩衝材材料に用いるベントナイトとして、膨潤性能などに優れた基本特性に関するデータが蓄積されているクニゲル V1 を対象に、室内試験の先行研究データを用いた水理場の状態変遷評価のキーパラメータを評価した。

2. 主な成果

クニゲル V1 の不飽和状態における水分移動に対してキーパラメータを評価するため、クニゲル V1 単体を試料に用いた浸潤試験（鈴木ほか, 2001）を解析対象とした。解析設定条件の概要を図 1 に示す。鈴木ほか（2001）の室内試験は、クニゲル V1 を直径 5 cm、長さ 10 cm の円柱状に圧縮成型したものを供試体とし、50 °C の等温条件、及び 1 °C/cm の温度勾配下で供試体の上端面から注水した浸潤試験である。解析の入力データセットは、クニゲル V1 に対する要素試験の先行研究（例えば、鈴木・藤田, 1999; 菊池・棚井, 2003）から設定した代表値で構成した Reference ケースの他に、Reference ケースに対して、ベントナイトの物性の不確実性を考慮し、それぞれのパラメータに対して先行研究で報告されている誤差の上限値・下限値の範囲内でパラメータを変更した複数のケースを設定した。

結果の一例として、温度勾配下浸潤試験の実験値に対して PFLOTTRAN による TH/THC 連成解析結果を比較したグラフを図 2 に示す。鈴木ほか（2001）は、水理学的流動場がない状態においても温度勾配が生じた場合、高温側では液状水が減少し、低温側では水分の上昇が起こることを報告しており、PFLOTTRAN による TH/THC 連成解析結果においても試験結果と同様に、温度勾配下で浸潤が遅くなる傾向を示す水分分布を表現できた。加えて、入力値の変化が解析結果に与える影響を評価するため、各パラメータについて基準ケースと上下限ケースの RMSE（Root Mean Squared Error）のばらつきを評価した。得られた知見は以下の 2 項目である。

- 等温条件及び温度勾配下条件のどちらにおいても、固有透過度は熱伝導率、比熱や拡散係数といった他の TH 連成プロセスのパラメータよりも水理条件の解析結果に 3 桁以上の感度があり、評価結果に大きな影響を与える。また、水分保持曲線に関する van Genuchten モデルのパラメータが固有透過度に次いで評価結果へ影響を与えるパラメータである。
- 反応速度の大きい随伴鉱物（方解石、石英）の含有率、モンモリロナイトの陽イオン交換容量といった緩衝材や間隙水中の化学組成、及びその組成変化に係る化学プロセスのパラメータが、水理条件の解析結果に与える影響は固有透過度よりも 4 桁小さい。

以上より、クニゲル V1 を緩衝材材料に用いた場合の水理場において得られた状態変遷評価のキーパラメータは、FEBEX ベントナイトのキーパラメータと同様であった。

3. 包括的技術報告書への影響

THMC 連成現象評価は、包括的技術報告書の本編 6.6.2 項（信頼性向上に向けた取り組み）の (1) (ii) ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化に記載された課題であるとともに、OECD/NEA による国際レビュー（OECD/NEA, 2023）でも必要性を指摘された課題である。包括的技術報告書の本編 6.3.2 項（シナリオの作成）の (3) (i) (a) - (c) ①ニアフィールドスケールの構成要素のふるまいとその不確実性について、本検討によって整備するニアフィールドスケールの THMC 連成現象評価技術を用いて、処分場の状態変遷を確からしく評価することを検討する。

4. 今後の展開

力学場と化学場の状態変遷評価に対してもキーパラメータを特定し、各入力パラメータの不確実性が解析に及ぼす影響を定量化することが必要である。過去に実施された膨潤圧試験、膨潤変形試験（例えば、高山・菊池，2021）、塩濃縮試験（例えば、木村ほか，2010；佐藤ほか，2023）を対象としたTHM/THC連成解析を実施し、力学場、化学場の状態変遷評価のキーパラメータを特定する。キーパラメータの特定完了後、キーパラメータに着目した解析評価と原位置試験データとの比較により、解析評価技術の妥当性確認を実施する。

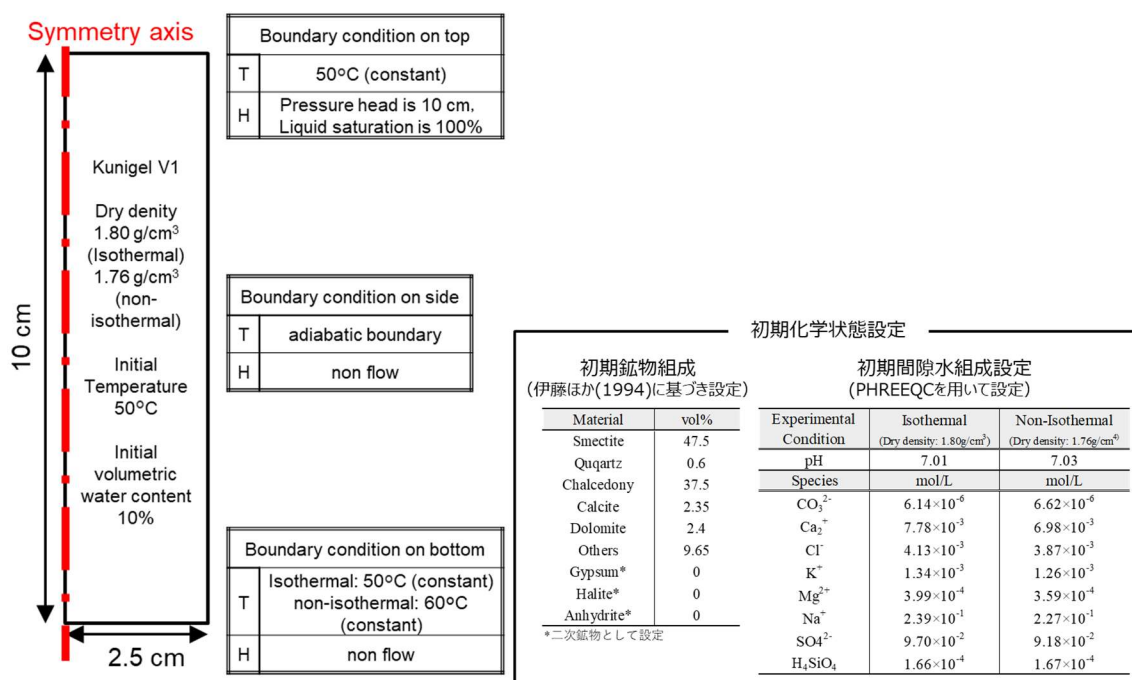


図 1 鈴木ほか（2001）の室内試験を対象とした解析設定条件

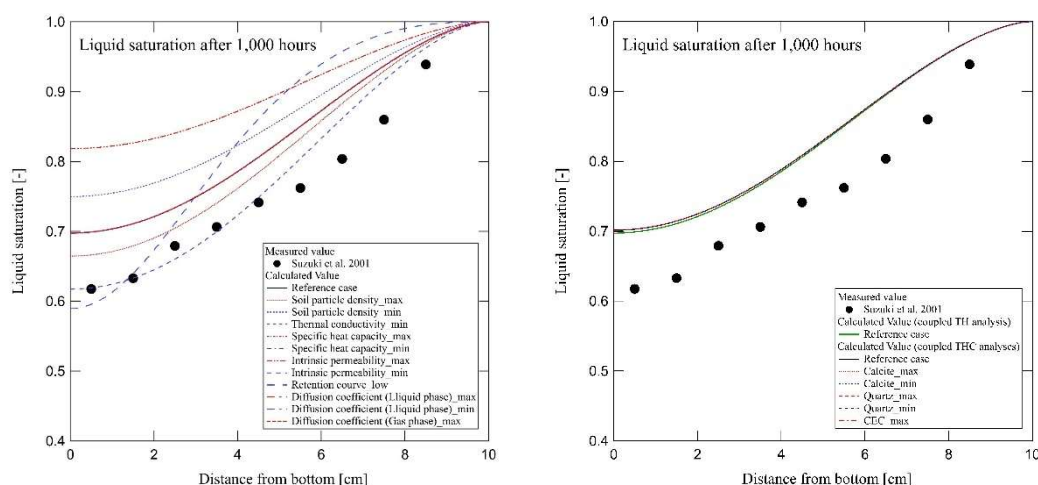


図 2 1000 時間後のベントナイト試料高さと飽和度との関係（温度勾配浸潤試験）

左：TH 連成解析結果との比較，右：THC 連成解析結果との比較

表 1 データを取得する各原位置試験プロジェクトの試験条件

定置方式	温度条件	NUMO-SCで示した緩衝材 (クニゲル®V1-30wt%ケイ砂)	NUMO-SCで示した緩衝材以外 (海外産ベントナイト)
縦置き	100℃以上	資源エネルギー庁の委託事業*5	-
	100℃未満	H I P Task C *1	D P R *2
横置き	100℃以上	-	H o t B E N T *3
	100℃未満	-	F E B E X *4

*1 : Horonobe International Project (H I P) Task C (大野, 2024) @幌延深地層研究センター

*2 : Dismantling of the Prototype Repository (D P R) (SKB, 2022) @エスボ岩盤研究所 (スウェーデン)

*3 : High Temperature Effects on Bentonite Buffers (H o t B E N T) (Kober et al., 2023) @グリムゼル試験場 (スイス)

*4 : Full - Scale Engineered Barriers Experiment (F E B E X) (Lanyon & Gaus., 2016) @グリムゼル試験場 (スイス) ※試験完了

*5 : 高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業

「地層処分安全評価確証技術開発 (ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発)」 (JAEA・RWMC・CRIEPI, 2024)

@幌延深地層研究センター

参考文献

- Chen, T., Sedighi, M., Jivkov, A. P., Seetharam, S. C, (2021) : A model for hydraulic conductivity of compacted bentonite – inclusion of microstructure effects under confined wetting, *Géotechnique*, vol. 71, no. 12, pp. 1071-1084.
- Hammond, G. E., Lichtner, P. C., Mills, R. T. (2014) : Evaluating the performance of parallel subsurface simulations: An illustrative example with PFLOTRAN, *Water Resources Research*, vol. 50, pp. 208-228.
- 伊藤雅和, 岡本真由美, 鈴木啓三, 柴田雅博, 佐々木康雄 (1994) : ベントナイトの鉱物組成分析, *日本原子力学会誌*, vol. 36, no. 11.
- JAEA(日本原子力研究開発機構), RWMC(原子力環境整備促進・資金管理センター), CRIEPI(電力中央研究所) (2024) : 令和 5 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業 地層処分安全評価確証技術開発 ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発報告書, 令和 5 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業 (ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発) .
- 菊池広人, 棚井憲治 (2003) : 緩衝材の熱物性測定試験 (III) - 面熱源法による緩衝材熱物性の取得 - (試験報告), JNC TN8430 2003-009.
- 木村誠, 九石正美, 藤田朝雄, 中間茂雄, 鈴木英明 (2010) : 緩衝材中の化学影響評価に向けた熱-水-応力-化学連成解析モデルの開発, JAEA-Research 2010-034.
- Kober, F., Schneeberger, R., Vomvoris, S., Finsterle, S., Lanyon, B. (2023) : The HotBENT Experiment: objectives, design, emplacement and early transient evolution, *Geoenergy*, vol. 1, issue 1.
- Lanyon, G.W and Gaus, I. (2016) : Main outcomes and review of the FEBEX In Situ Test (GTS) and Mock-up after 15 years of operation, *Nagra Technical Report 15-04*.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告 : わが国における安全な地層処分の実現 - 適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築 -, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024) : 技術開発成果概要 2022, NUMO-TR-24-01, pp. 109-112.
- OECD/NEA (2023) : The Nuclear Waste Management Organization of Japan's Pre-siting Safety Case Based on the Site Descriptive Model, NEA/RWM/R(2022)2.
- 大野宏和 (2024) : 幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開 (4) タスク C : 実規模の人工バリアシステムの解体試験, *原子力バックエンド研究*, vol. 31, no. 2, pp. 140-143.
- 佐藤久, 高山裕介, 鈴木英明, 佐藤大介 (2023) : 不飽和圧縮ベントナイト中での塩水浸潤挙動デー

- タの取得, JAEA-Data/Code 2023-010.
- SKB (2022) : Invitation to participate in the retrieval of The Full-Scale Prototype Repository at Äspö HRL, <https://www.skbinternational.se/wp-content/uploads/2022/07/Excavation-of-prototype-repository-Flyer.pdf>, (2025 年 5 月 22 日閲覧) .
- 鈴木英明, 藤田朝雄 (1999) : 緩衝材の不飽和水理特性 (試験報告), JNC-TN8430 99-010.
- 鈴木英明, 藤田朝雄, 杉野弘幸 (2001) : 圧縮ベントナイト中の温度勾配による水分移動, 土木学会論文集 C (地圏工学), vol. 77, No. 3, pp. 302-313.
- 高山裕介, 菊池広人 (2021) : X 線 CT 測定による膨潤圧試験中のベントナイトの吸水圧縮挙動の観察, 土木学会第 56 回年次学術講演会, CS1-012.
- Takubo, Y., Takayama, Y., Idiart, A., Tanaka, T., Ishida, K., Fujisaki, K. (2022) : Model development of coupled THMC processes for a geological repository at higher temperature region, Proc. Of International High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM 2022), pp. 906-915.
- 田窪勇作, 高山裕介, Andres Idiart, 戸谷成寿, 石田圭輔, 藤崎淳 (2023) : 原位置データを用いた再冠水過程の熱-水-化学連成現象のモデル開発, 日本原子力学会 2023 年秋の大会, 2D02.
- 山本陽一, 後藤考裕, 北川義人, 渡邊保貴, 横山信吾, 新橋美里 (2022) : 国内産ベントナイトおよびベントナイト混合土の基本特性データ, NUMO-TR-21-02.

2.3.5 地下浅層を含む地表環境の特徴をより詳細に考慮した生活圏評価モデルの構築

上野 吹佳 浜本 貴史 石田 圭輔

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

地層処分場閉鎖後の安全評価においては、処分場に埋設された放射性核種が長期間のうちに地下水により人工バリアや地質環境を経て人間の生活圏に運ばれるという想定によって生じる放射線学的影響を推定する。このため、生活圏に流入した放射性核種がどのようにふるまい、最終的に人間が受ける線量を算出するためのモデル（以下、「生活圏評価モデル」という）が必要となる。

生活圏評価モデルは、放射性核種の生活圏への流入口となる地圏環境と生活圏のインターフェース（Geosphere-Biosphere Interface：以下、「GBI」という）、気候、地理・地形、表層水理、土壌、生物相といったサイトの地表環境や人間の生活様式などによって記述される生活圏システムを数理的にモデル化したものである。一般的にこうしたモデル化には、生活圏システムの構成要素のうち放射性核種の主要な移行経路となるものを、ある一定の容積を有する区画（以下、「コンパートメント」という）として表現し、各コンパートメント内及びコンパートメント間の物質移動プロセスを解析する方法（以下、「コンパートメントモデル」という）が用いられる。

特定のサイトを対象としない生活圏評価を行った包括的技術報告書（NUMO, 2021）においては、地形と気候、処分場の地下施設の位置、想定される GBI の組み合わせによって日本で考えられる生活圏システムを類型化し、地質環境などの空間的不均質性を単純化して取り扱った生活圏システムを対象にコンパートメントモデルを作成している。実際のサイトを対象とした生活圏評価においては、その場所に固有の地理・地形、表層水理（地表水系や浅層地下水流動系、それらの交流関係）、土地利用などの地表環境や人の生活様式を考慮する必要がある。また、処分場のスケール（数 km×数 km）及び評価期間の時間スケールを踏まえ、廃棄体が埋設される位置の違いや広域流動系、地表水理系の時間変化などにより、GBI が時間・空間的に変化する可能性を考慮する必要がある。

本技術開発では、仮想的なサイト（図 1）を対象として、気候や地形、地質、それらに密接に関連する土地利用などの生活様式を含む地表環境を表現したモデルを構築したうえで、核種の主たる移行媒体である地下水・地表水の流動系の評価に基づいた生活圏システムを記述し、これらに基づく生活圏評価モデルを構築することで、地表環境の空間的不均質性や評価期間の時間スケールを踏まえた地表環境の時間変遷に対応した評価技術を整備することを目的としている。2021 年度より段階的に、まず地表環境の空間的不均質性について対応した評価技術の開発を進めている。2023 年度までに、先新第三紀堆積岩類の沿岸域を対象とした四次元地質環境モデル（NUMO, 2024）における現在の地質環境モデルを対象として（図 1 参照）、国際的に提案されている生活圏評価の方法論（以下、「BIOMASS」という）に従って生活圏評価モデルを構築し、これを解析コード GoldSim へ数値解析モデルとして実装した。なお、BIOMASS は IAEA による IAEA-BIOMASS-6（IAEA, 2003）の公表以降、その後の検討の最新版である BIOMASS 2020 : Interim report（Lindborg, 2018）に示された方法論を用いた。2024 年度は、GBI の位置の違いによる被ばく線量への影響評価を行うため、実装した生活圏評価モデルにより、候補となる GBI 毎に被ばくグループに対する線量への換算係数（Dose Conversion Factor：以下、「DCF」という）を算出し、これらを比較した。また、実際のサイトを対象

とした生活圏評価の経験を有する SKB との共同研究において、機構が構築した生活圏評価モデルとこれを用いた上記の解析結果を用いて、生活圏評価における GBI の取扱いの考え方の整理及びモデルの改良点の抽出を行った。

2. 主な成果

GoldSim に実装した生活圏評価モデルでは、各土壌の下部土壌、河川及び沿岸の堆積層、そして下部土壌の下部に位置する帯水層を表現した地下水のコンパートメントが GBI の候補となる。これらのコンパートメントを含む、図 1 に示した仮想地域の A 地区を対象に、各コンパートメントを GBI とした場合の A 地区の被ばくグループに対する DCF を算出した。A 地区のコンパートメントモデルを図 2 に、被ばくプロセスモデルを図 3 に示す。GBI の候補は 6 種の下部土壌、5 つの河川堆積層、沿岸堆積層と地下水（帯水層）のコンパートメントとなり、計 13 通りの解析ケースを設定した。評価対象として非収着性核種である ^{129}I と収着性核種である ^{135}Cs を選定した。

^{129}I に係る DCF の計算結果を図 4 に示す。横軸には GBI として設定したコンパートメントを示しており、A 地区の 6 つの被ばくグループについて各解析ケースにおける DCF を示している。算出した DCF は以下の 4 種に分類できる。

分類①：沿岸堆積層を GBI とした解析ケース

分類②：下部土壌と地下水を GBI とした解析ケース

分類③：河川 R1, R2, R11, R13 の堆積層を GBI とした解析ケース

分類④：河川 R12 の堆積層を GBI とした解析ケース

分類①に関しては、海洋エアロゾルの吸入などによる沿岸海域水を起源とした被ばく経路を有する被ばくグループは、宅地居住者被ばくグループのみであることから、他の被ばくグループの DCF は算出されなかった。分類②に関しては、DCF の値が被ばくグループに依らずほとんど同じとなった。これは A 地区の被ばくグループの食物の消費にともなう内部被ばくの観点から論ずることができる。田畑や果樹園、牧草地などは、水路整備等を踏まえ地下水湧出を利用していないものとして核種移行プロセスをモデル化した。これにより GBI である下部土壌コンパートメントに流入した核種は作物へ移行せず、単一の地下水コンパートメントに全量移行する。そして、地下水の飲用による被ばくに寄与する。これは、すべての被ばくグループに共通しており、かつ、寄与が大きいことから、すべての被ばくグループの DCF の値がすべての解析ケースで同様の値となったと考えられる。分類③については、淡水産物を主に摂取する淡水漁業被ばくグループや、淡水産物の摂取や河川周辺でのレクリエーションによる被ばくをモデル化している宅地居住者被ばくグループの DCF が大きい値となっている。分類④については、河川の中で R12 のみが飲用水と灌漑水へ利用されている。このため、他の河川堆積層が GBI である場合に比べ、河川水飲用や灌漑水利用で取得した生産物を消費することによる内部被ばくにより、すべての被ばくグループで DCF が大きくなっている。また、灌漑水の利用形態等の違いから他の河川堆積層が GBI である場合に比べ、DCF の相対関係も異なっている。

^{135}Cs に係る DCF の計算結果を図 5 に示す。その傾向は ^{129}I の計算結果に似ており、 ^{129}I と同様の 4 種に分類できる。 ^{129}I の DCF と比較して、 ^{135}Cs の値は総じて小さくなっている。これは ^{129}I に対して ^{135}Cs は外部被ばくによる影響がないこと、内部被ばくの線量換算係数が 2 桁程度低いことによると考えられる。分類①や分類②については、 ^{129}I と同様の解釈が可能である。分類③に関しては、宅地居住者被ばくグループの DCF が最大である ^{129}I の場合と異なり、 ^{135}Cs では淡水漁業被ばくグループの DCF が最も大きい。 ^{135}Cs は外部被ばくの影響がないため、レクリエーションに伴う宅地居住者被

ばくグループへの外部被ばくの寄与が小さくなったことに起因している。

上記の解析結果に関する SKB の専門家との議論を通じて、サイトの特徴を反映した評価のために重要な課題を抽出した。分類②に関して、全ての被ばくグループの DCF の計算結果が同じとなった点に着目した。実装した生活圈評価モデルにおける地下水コンパートメントは、仮想地域のモデルに対して実施した地表・地下の水収支を整合させた水循環解析によって得られた地下水の貯水量を合計し、各地区で一つのコンパートメントとしてモデル化している。このため、複雑な流動方向に起因した地下水中の核種の不均一性を表現できていない。このことから、サイトの地下水による核種の移行挙動をより適切に表現した生活圈評価モデルが必要である。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書の本編 6.3 節（シナリオの作成と解析ケース）、本編 6.4 節（核種移行解析と線量評価）で実施した生活圈評価について、本技術開発により、地表環境の空間スケール及び時間スケールをより確からしく反映する手法を構築することで、特定のサイトを対象とした生活圈評価の技術的信頼性を向上させることを検討する。

4. 今後の展開

特定のサイトを対象とした生活圈評価手法の整備に向け、2.で示した課題へ対応するため、地下水流に対応して詳細化された地下水コンパートメントを用いた試解析などを通じて地下環境のモデル構築に関する考え方の整理を行う。さらに、地形・気候の時間的変遷を反映した生活圈評価手法を構築する。

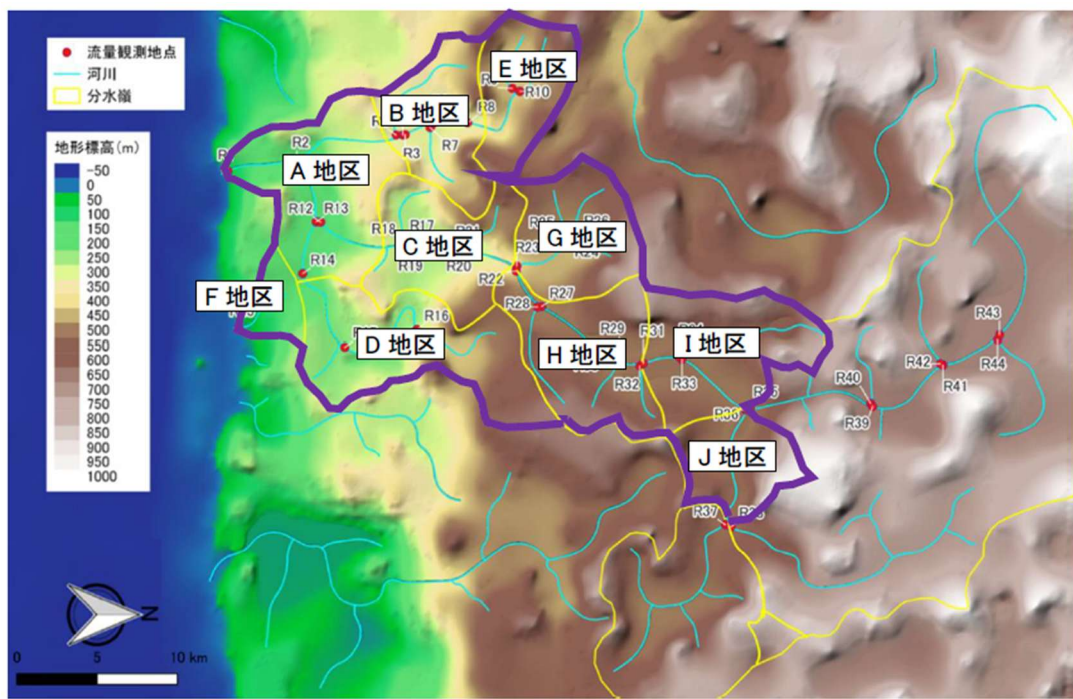


図 1 生活圈評価モデル作成において想定した仮想地域

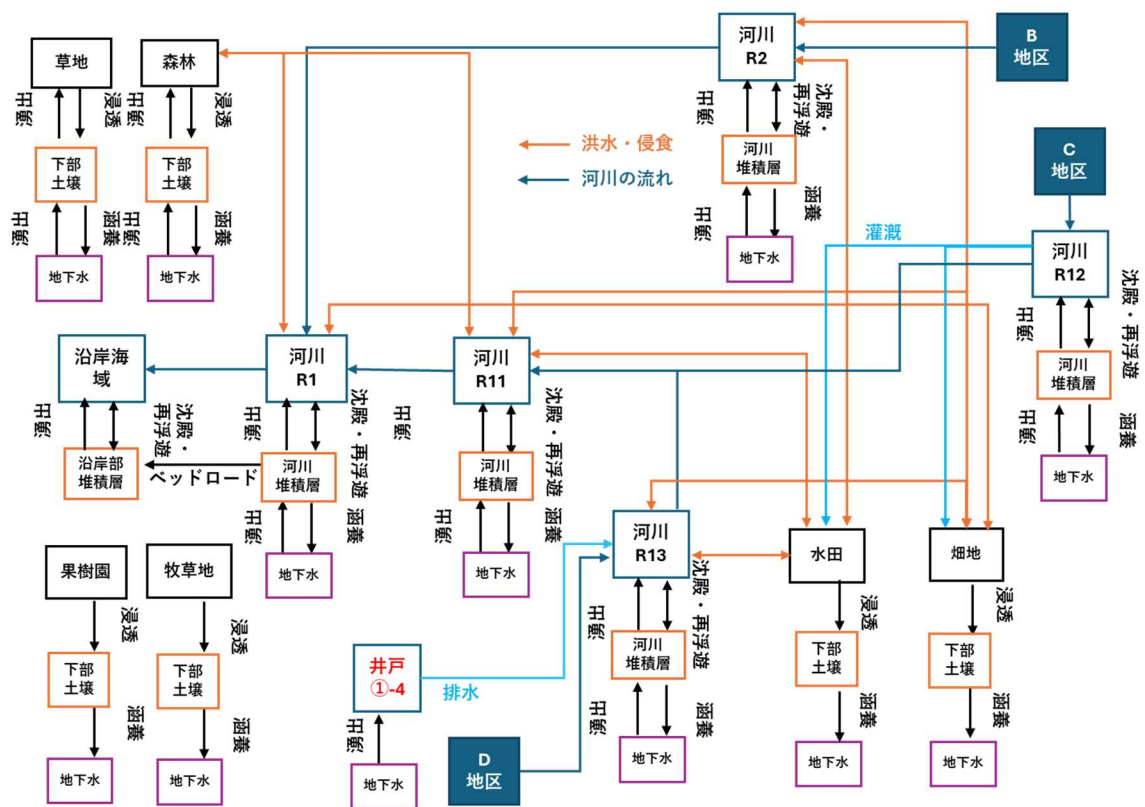


図 2 A地区のコンパートメントモデル

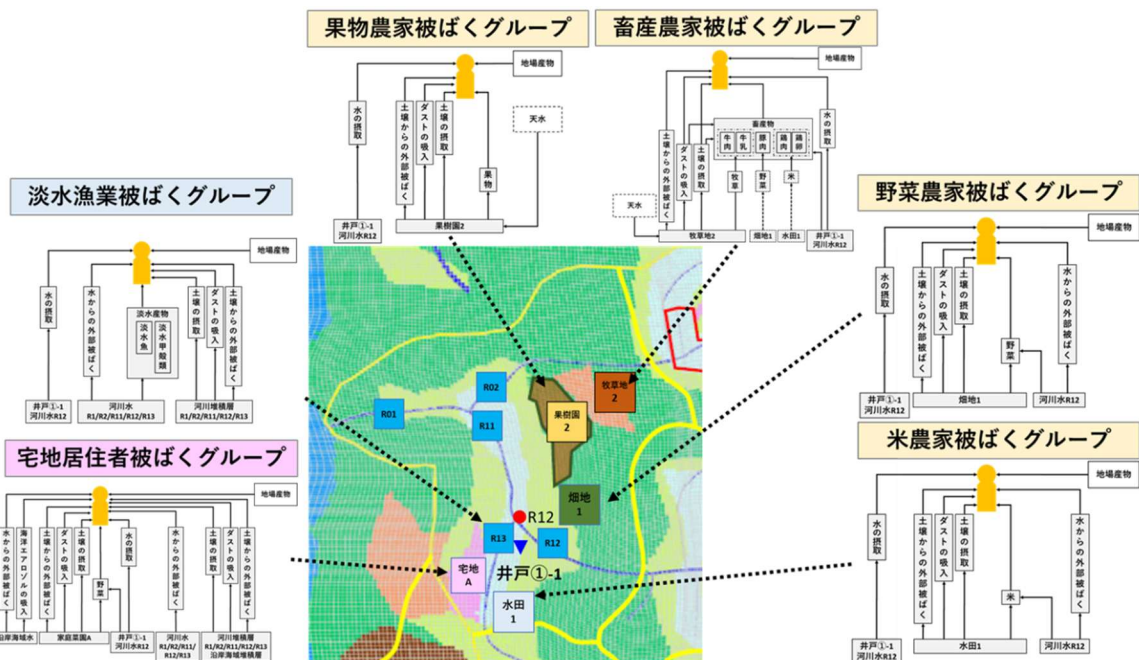


図 3 A地区の被ばくプロセスモデル

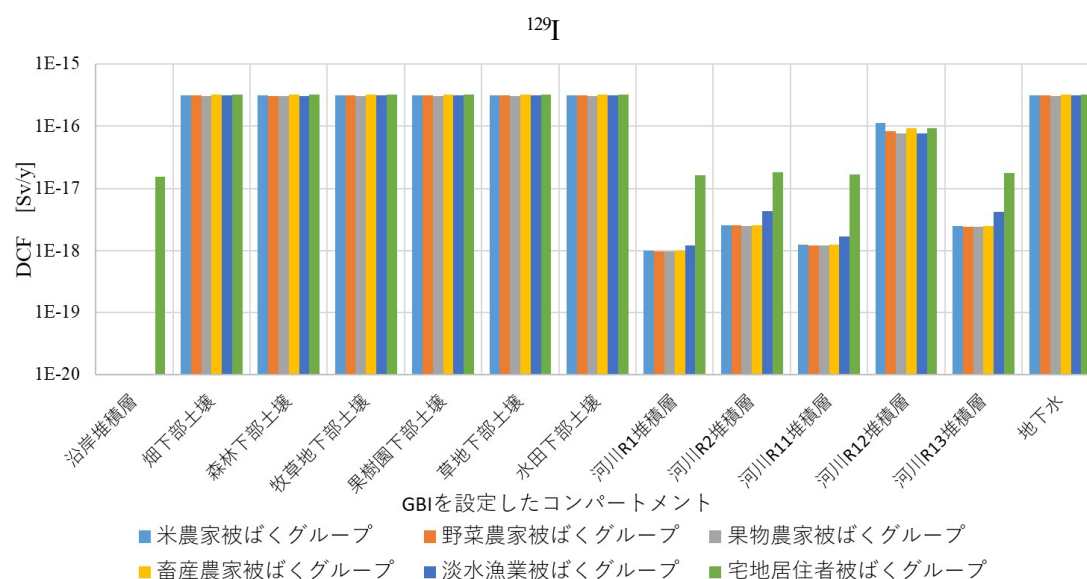


図 4 A 地区の被ばくグループを対象とした ^{129}I に関する DCF の計算結果

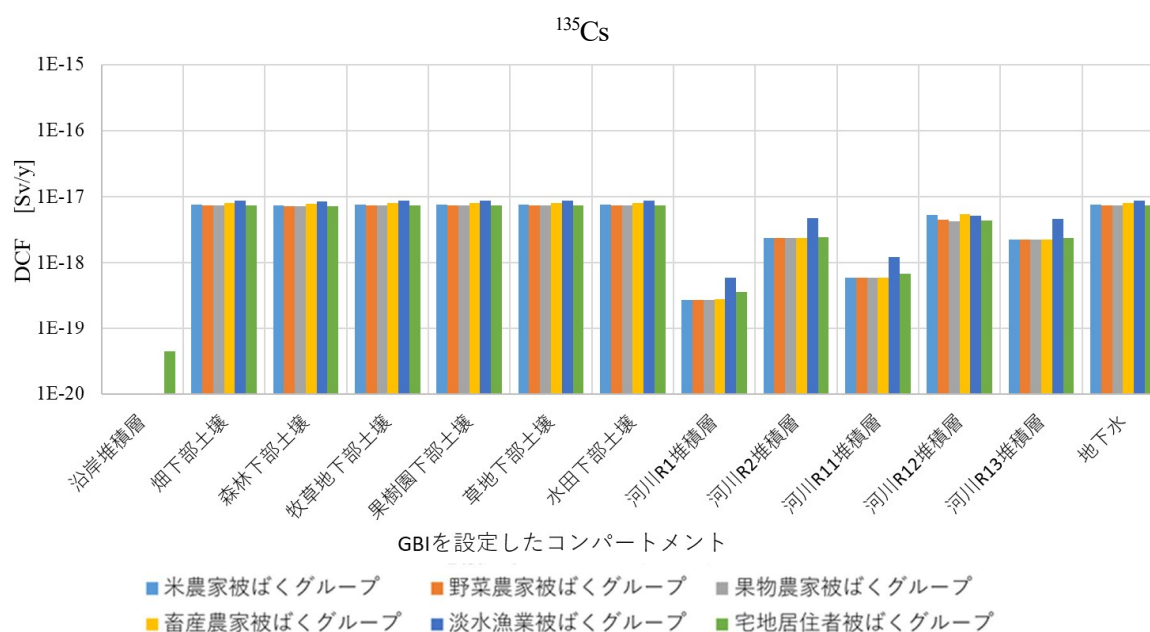


図 5 A 地区の被ばくグループを対象とした ^{135}Cs に関する DCF の計算結果

参考文献

- GoldSim ホームページ：Human Health Risk Assessment and Disease Transmission Modeling - GoldSim,
<https://www.goldsim.com/Web/Applications/Areas/EnvironmentalSystems/HumanHealthRisk/#PostClosureSafetyAssessmentNearSurfaceDisposalFacilities>, (2025 年 5 月 30 日閲覧).
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021)：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー, NUMO-TR-20-03.
- IAEA (2003)："Reference Biospheres" for Solid Radioactive Waste Disposal, IAEA-BIOMASS-6.

Lindborg, T (2018) : BIOMASS 2020: Interim report, R-18-02.
NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現
ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー, NUMO-TR-20-03.
NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024) : 技術開発成果概要 2022, NUMO-TR-24-01.

2.3.6 TRU 廃棄物処分場に使用するセメント系材料の状態評価に関する検討

小池 彩華¹ 田窪 勇作¹ 石田 圭輔¹ 三原 守弘²

¹原子力発電環境整備機構, ²日本原子力研究開発機構

1. 背景・目的

包括的技術報告書 (NUMO, 2021a) で示した TRU 等廃棄物処分場の設計では、各廃棄体パッケージ内や処分坑道の構造躯体内側に定置された廃棄体パッケージ間にセメント系材料が充填される。処分場閉鎖後、充填されたセメント系材料に期待される廃棄体から溶出した核種の移行を抑制する性能は、セメント系材料の構成成分と地下水との反応 (溶脱、沈殿など)、微生物活動、金属の腐食膨張などにより発生する亀裂などに関する科学的知見等の不足に起因した不確実性がある。そのため、安全評価上は移行抑制性能を保守的に考慮せず、処分場閉鎖直後から砂と同程度 (1.0×10^{-5} m/s) の透水性を付与し (NUMO, 2021b)、これに基づく核種移行解析を実施している。こうした安全評価上の保守的設定をより合理性のあるものとし、地層処分システムの性能をより確からしく評価することを目的として、セメント系材料の状態変遷を評価可能な核種移行解析モデルの構築を JAEA との共同研究及び SKB との共同研究により進めている。また、スイスのグリムゼル原位置試験場における国際共同プロジェクト (Carbon-14 and Iodine-129 Migration in Cement : 以下、「CIM」という) にてセメント系材料中への核種の移行に関する原位置試験データの取得を継続している。

2023 年度までに、セメント系材料の溶脱挙動を評価する反応輸送解析モデルの妥当性確認を行った (NUMO, 2024)。2024 年度は、これまでの成果を統合し、包括的技術報告書における TRU 等廃棄物の地層処分の安全評価において、数十年程度で線量の立ち上がりが確認された条件として深成岩類処分場 (低 Cl 濃度地下水) における TRU 等廃棄物グループ 3 の処分坑道を対象に、反応輸送解析を基にしたセメント系材料に係る水理や物質移行のパラメータを設定し、これを用いた三次元地下水流動・粒子追跡解析に基づき構築した核種移行解析モデルを用いた線量評価を実施した。

2. 主な成果

(1) 状態変遷の評価を基にしたパラメータ設定手法の構築

TRU 等廃棄物におけるセメント系材料の状態変遷に影響を及ぼす事象として 1. に挙げたもののうち、セメント系材料と地下水との反応に関しては、セメントの主な水和物であるポルトランドイト ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) やカルシウムシリケート水和物 (C-S-H) が周囲の水に溶解することにより、セメント系材料の溶脱が生じる。これにより、セメント系材料の空隙は増加し、物質移行特性 (透水係数や実効拡散係数) に影響を及ぼす。微生物影響に関しては、セメント系材料の溶脱に伴い形成される高 pH 環境において微生物の活性が低下すること (SKB, 2023)、金属の腐食膨張などにより生じる亀裂は、セメント系材料による自己治癒機能 (人見・片岡, 2011) によって閉塞すると考えられることから、これらの影響は限定的と考えられる。

これらを踏まえて、TRU 等廃棄物処分場の人工バリアとして使用するセメント系材料の物質移行特性の地下水との反応による変化を評価するため、上記処分施設を対象とした反応輸送解析を実施した。本解析では、解析の対象領域内における物質移動が拡散律速であることから、異方性を無視した一次元解析体系を採用した。また、材料特性や境界条件の違いを反映するため、図 1

に示す 3 つの解析体系を構築した。これにより、コンクリート（吹付、側部コンクリート、構造躯体、インバート）及び、モルタル（廃棄体モルタル）と地下水との反応を評価し、空隙率の変化から物質移行特性の変化を算出した（表 1）。物質移行特性の算出にあたっては、SKB（2019）を参照し、最も溶脱が進行する地下水との接触部付近における 10 万年後の空隙率を用いることで溶脱深さや溶脱量に関する解析上の不確実性を考慮した。

(2) 三次元地下水流動・粒子追跡解析モデルを用いた移行率評価

(1)にて算出したセメント系材料の物質移行特性の変化を考慮し、包括的技術報告書（NUMO, 2021b）で示した処分坑道の設計仕様を反映したニアフィールドスケール（約 100 m×約 100 m×約 100 m）を対象に三次元地下水流動・粒子追跡解析を実施した。

具体的な解析手順は以下のとおりである。まず、解析に用いる三次元モデルについては、構造躯体や埋戻し材などの人工物は均質な多孔質媒体モデル（Continuous Porous Medium：以下、「CPM」という）として表現し、母岩部分は割れ目ネットワークモデル（Discrete Fracture Network Model：以下、「DFN」という）として表現した。人工物のモデル化に関して、包括的技術報告書では構造躯体内側を 1 つの水理特性を持った CPM として表現するとともに、構造躯体内側の物質移行に関する不確実性に対応するために、砂と同程度（ 1.0×10^{-5} m/s）の透水性を付与するなど、保守的な取り扱いをした。本解析では、(1)で算出した人工バリア内の物質移行特性の変化を反映し、構造躯体内側の設計仕様をより忠実にモデル化することとし、廃棄体と廃棄体パッケージ充填材を分けて表現した。また、母岩のモデル化に関しては、包括的技術報告書の解析と同様に、深成岩類における亀裂密度等の情報を用いて、確率的に割れ目を発生させた DFN を作成した。このように作成した三次元モデルを対象に地下水流動解析コード FEMWATER（WES, 1994）により水理場を算出し、その結果に基づいてランダムウォーク法による粒子追跡解析コード Partridge（NUMO, 2011）を用いた物質移行解析を行った。包括的技術報告書では、DFN を 100 リアライゼーション作成し、地下水流動解析の結果から、それぞれの平均的な透水係数の大きさに応じて 5 層に層別し、各層から 2 つのリアライゼーションを任意にサンプリングした合計 10 リアライゼーションを粒子追跡解析に使用した。本解析では、10 リアライゼーションそれぞれの透水係数の頻度ごとに類型化し、最も多くのリアライゼーションが含まれる層の 2 リアライゼーションから一つを選択し解析用の DFN とした。

上記手順で算出した粒子追跡解析結果を図 2 に示す。包括的技術報告書の結果と比較して、セメント系材料の透水性の変化や設計仕様の反映により、核種の移行挙動をより確からしく表現することができるようになった。これにより、処分坑道から 100m 地点にある観測面における移行率が最大となる時期が約 1000 年遅れ、観測面における移行率の最大値が約 10 分の 1 まで低下する結果が示された。

(3) 核種移行解析モデルを用いた線量評価

(2)にて算出した処分坑道から 100m 地点におけるトレーサーの移行率を用いて、包括的技術報告書（NUMO, 2021c）と同様の手順にて核種移行解析モデルを構築し、線量評価を行った。

核種移行解析モデルの構築にあたっては、人工バリアの物質移行特性の変化は(2)と同様の設定とし、複数の一次元平行平板モデルを重ね合わせたマルチチャンネルモデルの透水量係数とチャンネル確率の算出法については、(2)により得られた非収着性トレーサーの移行率とのフィッテン

グにより算出した。線量への換算にあたっては、包括的技術報告書の基本ケースで適用した農作業従事者の換算係数を適用した。算出した線量評価結果を図3に示す。包括的技術報告書の線量評価結果において数十年程度で線量の立ち上がりが確認された ^{90}Sr については半減期が28.79年と短いことから、セメント系材料と地下水成分との反応による物質移行特性の変化や設計仕様の反映等をより確からしく考慮することで、移行時期の遅延と移行率の低下が生じ、 ^{90}Sr の線量はグラフの下限值($10^4 \mu\text{Sv/y}$)以下となることが確認された。また、収着による移行遅延効果が期待されないI-129についても、同様の見直しにより線量ピークが最大となる時期が約1000年遅れ、最大値が約2分の1まで低下することが確認された。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書の本編 6.6.2 項（信頼性向上に向けた取り組み）の（1）（ii）ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化と（3）（i）ニアフィールドにおける状態変遷を考慮した核種移行解析モデルの構築に記載された課題である。包括的技術報告書の本編 6.4.1 項（基本ケースに対する核種移行解析と線量評価結果）の（2）（v）（a）③-セメント系材料の透水性における、保守性を考慮した透水係数のより現実的な値への更新や、更新した値に基づく線量評価結果を用いた付属書 6-13、6-14、6-24、6-25、6-26 の更新を検討する。

4. 今後の展開

本検討において、セメント系材料の持つ核種移行抑制機能をより確からしく表現するための手法を構築した。今後は、本検討手法の妥当性を確認するため、以下を実施する。

- ・ セメント系材料の状態設定に用いた一次元反応輸送解析結果の妥当性を確認するため、二次元反応輸送解析結果との比較
- ・ CIM において取得するセメント系材料中のトレーサー移行に関する原位置試験データによる核種移行解析モデルの妥当性確認
- ・ セメント系材料の有する自己治癒機能について短期間の実証試験は数多く行われているものの、地層処分を対象とした10万年間における自己治癒機能の維持には不確実性が残ることから、セメント系材料の亀裂が閉塞しないことを想定した線量評価の実施

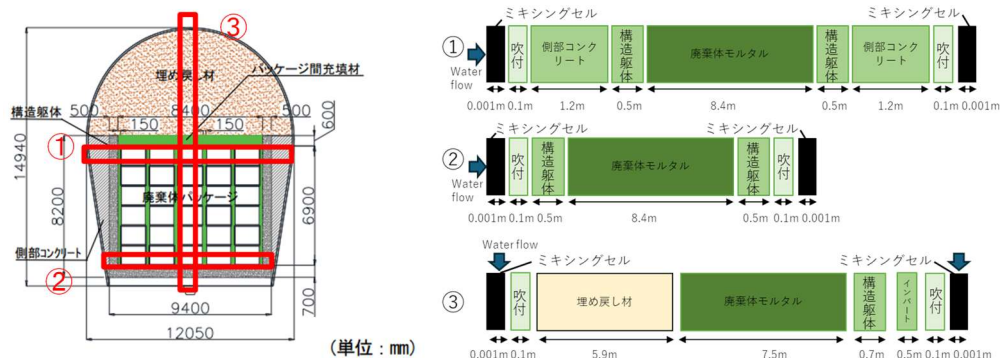


図1 処分坑道の設定（左）と解析体系（右）

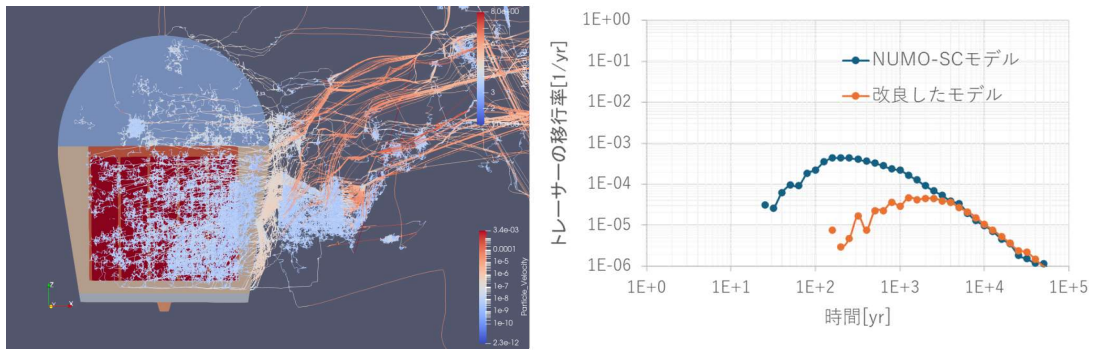


図 2 粒子追跡解析結果

(左：粒子軌跡，右：坑道から 100 m 地点における規格化した移行率)

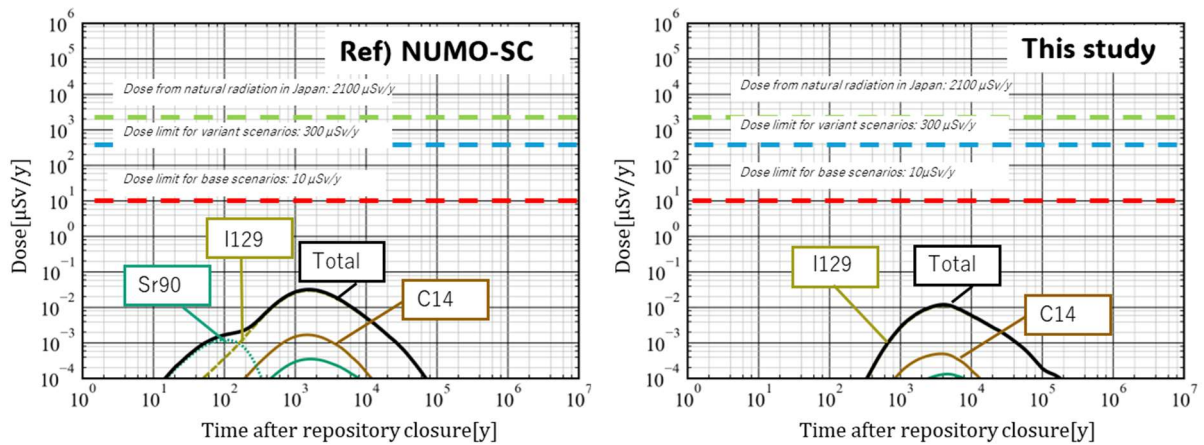


図 3 線量評価結果

(左：包括的技術報告書，右：セメントの状態変遷を考慮)

表 1 水理解析及び粒子追跡解析で用いる処分坑道の構成要素の水理特性

	コンクリート	モルタル
溶脱のタイミング[y]	1.5×10^3	3.0×10^3
溶脱深さ[m]	0.50	1.6
初期空隙率[-]	0.14	0.20
10 万年後の最大空隙率[-]	0.25	0.30
初期の実効拡散係数[m ² /s]	5.8×10^{-12}	1.7×10^{-11}
溶脱部の実効拡散係数[m ² /s]	3.2×10^{-11}	5.8×10^{-11}
巨視的な実効拡散係数[m ² /s]	3.2×10^{-11}	1.9×10^{-11}
初期の透水係数[m/s]	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}
溶脱部の透水係数[m/s]	7.0×10^{-9}	4.4×10^{-9}
巨視的な透水係数[m/s]	7.0×10^{-9}	1.2×10^{-9}

参考文献

- 人見尚, 片岡弘安(2011): ひび割れ導入モルタルの X 線 CT による自己治癒過程の研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1.
- Mihara, M. and Sasaki, R. (2005): Radio-nuclides Migration Datasets (RAMDA) on Cement, Bentonite and Rock for TRU Waste Repository in Japan, JNC-TN8400-2005-027.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2011): 地層処分事業のための 安全評価技術の開発 (II) -核種移行解析モデルの高度化, NUMO-TR-10-10.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021a): 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021b): 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー 付属書 6-14 ニアフィールドスケールにおける三次元地下水流動・粒子追跡解析, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021c): 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー 付属書 6-13 核種移行解析モデル, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024): 技術開発成果概要 2023, NUMO-TR-24-03.
- SKB(2019): Modelling of concrete degradation in a one-million-year perspective - Hydro-chemical processes. Report for the safety evaluation SE-SFL, SKB R-19-13.
- SKB(2023): Post-closure safety for SFR, the final repository for short-lived radioactive waste at Forsmark. Engineered barrier process report, PSAR version, SKB TR-23-04.
- WES(U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station) (1994): FEMWATER Reference Manual.

2.3.7 割れ目系岩盤を対象とした物質移行モデルの妥当性確認手法

尾上 博則¹ 吉田 芙美子¹ 廣田 翔伍¹ 周藤 優子¹ 三枝 博光¹ 石田 圭輔¹ 澤田 淳²

¹原子力発電環境整備機構, ²日本原子力研究開発機構

1. 背景・目的

地層処分事業においては、地質環境の調査・評価を通じて構築・更新する水理地質構造モデルを用いて地下水流動・物質移行解析を行い、その結果を処分場の設計や閉鎖後長期の安全評価に反映する (NUMO, 2021)。地下水流動や物質移行の場となる地質環境は、開放系であるとともに岩盤中に分布する断層や割れ目等によって水理学的に不均質である。また、調査によって得られる情報は評価領域の空間的な広がりに対して限定的なものである。そのため、このような条件で構築される水理地質構造モデルの信頼性をいかにして示すかが課題となっている (Oreskes et al., 1994)。このような不均質性を有する割れ目系岩盤を対象とした地下水流動・物質移行評価結果の信頼性を示すためには、調査データの解釈、境界条件や水理・物質移行パラメータの設定といったモデル化・解析の作業過程に内在する不確実性を評価したうえで、構築した水理地質構造モデルが利用目的に適合しているかの観点 (「fit for purpose」) として知られる概念：例えば、Beven and Lane, 2022) から、そのモデルの妥当性を確認することが重要である (例えば、Lanyon et al., 2021)。例えば、ある場所からの地下水移行時間の評価といった特定の目的に対して、そのモデルやモデルを用いた再現・予測結果が許容できる範囲であることを、パイロット孔や坑道への湧水量などの実測できる値との比較を通じて示すことが、モデルの妥当性確認につながると考えられる。

割れ目系岩盤の水理学的不均質性を考慮した水理地質構造モデルを構築する方法としては、原位置調査の結果に基づいて割れ目の大きさや方向性、透水量係数といった特性を確率分布として整理し割れ目ネットワークモデル (Discrete Fracture Network model：以下、「DFN モデル」という) によって表現するといった確率論的な手法が適用される場合が多い (例えば、Selroos et al., 2022)。ここで構築される DFN モデルは、割れ目特性の確率分布からの統計的なサンプリングによって、割れ目のネットワーク構造をモデル化するものである。このような手法で構築される水理地質構造モデルの妥当性を、地下水流動・物質移行解析によって求められる地下水流動特性値又は物質移行特性値と原位置で取得したデータとを比較することで確認する。しかしながら、その比較に用いることが可能な原位置データは限られるため、その考え方や手順といった方法論を整備する必要がある。

このため、NUMO は JAEA との共同研究により、不均質性を有する割れ目系岩盤を対象とした水理地質構造モデルの妥当性確認の考え方を整理するとともに、国内外の地下研究所で取得された調査データを用いたモデル化・解析を通じて、モデル化・解析の作業過程に内在する解析結果に影響を及ぼす不確実性因子の抽出や、水理地質構造モデルの妥当性確認を行うために有効な調査項目の考え方について検討を進めている (NUMO, 2023; 江崎ほか, 2023; 並川ほか, 2023a; 尾上ほか, 2023; 石橋ほか, 2023; 並川ほか, 2023b; 田川ほか, 2023; 羽根ほか, 2023; NUMO, 2024a; NUMO, 2024b; 石橋ほか, 2024; 尾上ほか, 2024)。

2023 年度からは、「処分坑道から任意の場所までの地下水移行時間を評価するために用いる水理地質構造モデルの妥当性を実測値との比較により示すための方法を具体的な事例とともに提示すること」を目的として、エスポ地下岩盤研究所で取得された調査試験データを用いた検討を開始した。2024

年度は、2023 年度に引き続き、水理地質構造モデルの構築及び妥当性確認のワークフロー（図 1）にある「概念化」以降のモデル化・解析として、「モデル構築」から「妥当性の確認」までを試行した。なお、本検討を進めるにあたっては、NUMO が参加している SKB の国際プロジェクト“SKB Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes (<https://skb.se/taskforce/>)”の枠組みを活用した。

2. 主な成果

本検討では、エスボ地下岩盤研究所で実施された国際共同プロジェクト（TRUE Block Scale Project; Andersson et al., 2002）で取得された調査試験データを用いて、エスボ地下岩盤研究所の深度 450 m 坑道周辺の岩盤において「構造 20」と呼ばれている不連続構造を対象としたモデル化・解析を実施した。構造 20 は、地下坑道周辺の地下水流動や物質移行などの挙動に大きな影響を及ぼしていると考えられる 100 m スケールの不連続構造である。

尾上ほか（2024）が例示したように、坑道への湧水量の解析結果と坑道からの地下水移行時間の解析結果には一定の相関関係があるため、湧水量の実測値との比較によりその妥当性を確認したモデルで評価した地下水移行時間は一定の信頼性を有するものと考えられる。そのため本検討では、「評価指標（処分孔からの地下水移行時間）と相関性がある実測値（処分孔やパイロット孔への湧水量）は、地下水移行時間を評価するためのモデルの妥当性確認の有効な指標になりうる」と仮定し、その仮定に基づき、構造 20 の水理学的な不均質性を表現した水理地質構造モデルを構築し、その妥当性を「構造 20 とボーリング孔（処分坑道のパイロット孔と想定）との交差部からの湧水量」によって確認するという一連のモデル化・解析手順を試行した。

2023 年度に構築した構造 20 を対象とした複数の水理地質構造の概念モデル（NUMO, 2024b）のうち、構造 20 の水理学的な不均質性を数値モデルにより表現することができ、かつ構造 20 内の主要な水みちの空間的なばらつきを割れ目のネットワーク構造によって陽に表現できる概念を採用し、DFN モデルとして数値化した（図 2）。DFN モデルの構築にあたっては、3 孔のボーリング調査（各ボーリング孔位置は図 2 を参照）で取得されたボーリングコア観察、BTV 観察のデータ及びそれらのボーリング孔間の水圧応答データを用いて、構造 20 を形成する割れ目の幾何学的特性及び水理学的特性を推定した（表 1）。さらに、構造 20 の透水特性に大きな影響を及ぼし得る不均質性要因として、他の不連続構造との交差部（Fracture Intersection Zones : 以下、「FIZ」という）を構造 20 内の DFN モデルに決定論的に配置した（図 2 の太点線）。

FIZ の透水性に関する情報は得られていない。その透水性の大小は構造 20 内の主要な水みちとしての機能や、地下水の流れを妨げる機能として働く可能性がある。そこで、本試行は最も留意すべき不確実性因子として FIZ の透水性に着目し、図 3 に示す 3 つの概念で構造 20 と交差する 2 本のボーリング孔からの湧水量についての感度解析を実施した。その結果（図 4）、FIZ 高透水ケース（概念 B）が他の場合と比較して、湧水量が多く、かつリアライゼーション間のばらつきが広がる傾向にある。しかし、ケース間の違いは小さいことから FIZ が湧水量に与える影響は限定的である可能性が示された。

さらに、モデルの妥当性確認として、Posiva 式流量検層（Pekkanen, 2011）で得られた構造 20 とボーリング孔との交差部からの湧水量の実測値と比較した（図 4）。その結果、いずれのケースでも、解析結果はリアライゼーション間で最大 2 桁程度のばらつきがあるとともに、実測値よりも大きい傾向が見られた。このことから、本検討に適用した DFN モデル（図 2）は湧水量の実測値の再

現性が乏しく、図 1 のワークフローにしたがってモデルを更新する必要性が示された。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編 2.5.2 項（品質マネジメント）に示されているとおり，処分場の設計や閉鎖後長期の安全評価の品質を保証するためには，その設計や評価のインプットとなる地下水流動特性値や物質移行特性値を推定するために用いる水理地質構造モデルの信頼性を確保することが重要となる。また，既存の水理・物質移行モデルの妥当性を確認するための手法の開発と試験データの整備は，包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編 6.6.2 項（信頼性向上に向けた取り組み）の（3）（ii）水みちの微細透水構造などを反映した核種移行解析モデルの構築・高度化に記載された課題である。本検討を通じて得られる水理地質構造モデルの構築・妥当性確認に係る方法論は，処分場の設計や閉鎖後長期の安全評価に用いる地下水流動・物質移行モデルの信頼性の向上に資すると考えられる。そのため，包括的技術報告書を更新する際には，本検討の成果であるモデル構築・妥当性確認に係る方法論の適用を検討する。

4. 今後の展開

2025 年度はワークフローに沿った構造 20 のモデル・解析の試行を継続する。具体的には，構造 20 の平均的な透水性の見直し，各ボーリング孔で確認された割れ目の幾何学的特性や透水性等の情報に基づくモデルの校正（図 1 中の「コンディショニング」）などを行うことで，2024 年度に構築したモデルを更新し，ボーリング孔で実測された湧出量データとの比較によるモデル妥当性を再確認する。さらに，妥当性が確認できたモデルを用いてボーリング孔からの地下水移行時間を推定し，その推定結果と湧水量との相関関係とそれに伴う不確実性を分析する。

上記の検討を通じて，ワークフローを更新するとともに，設定した目的に対してどの程度の精度で実測値と整合すれば妥当なモデルと言えるのかといった観点で，2023 年度からの成果を実用的なモデルの妥当性確認の考え方や手順として取りまとめる。

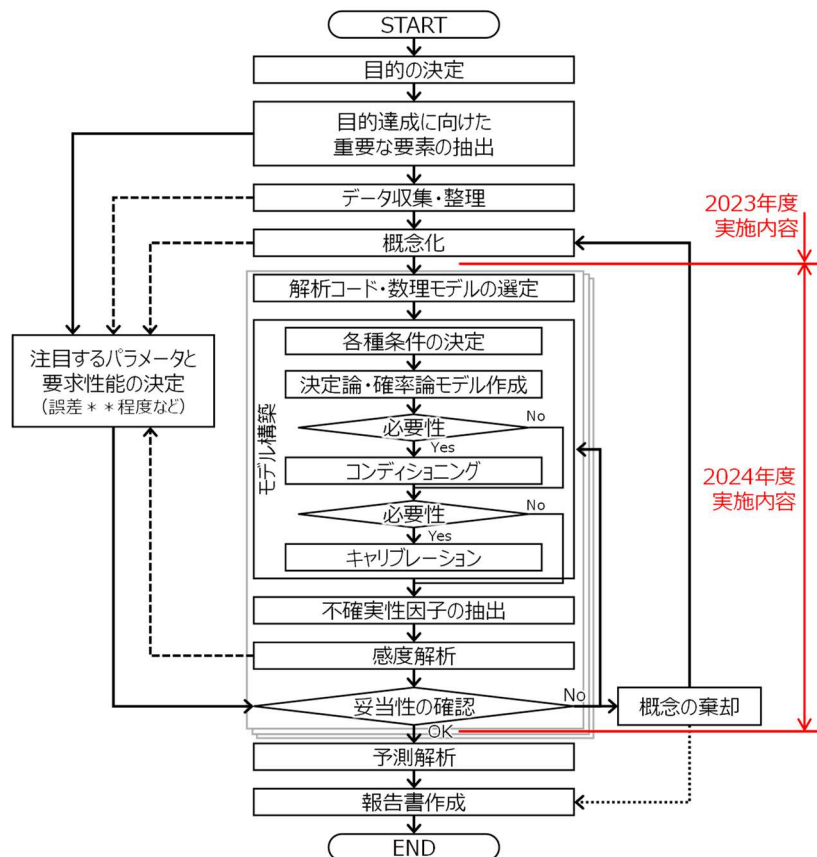
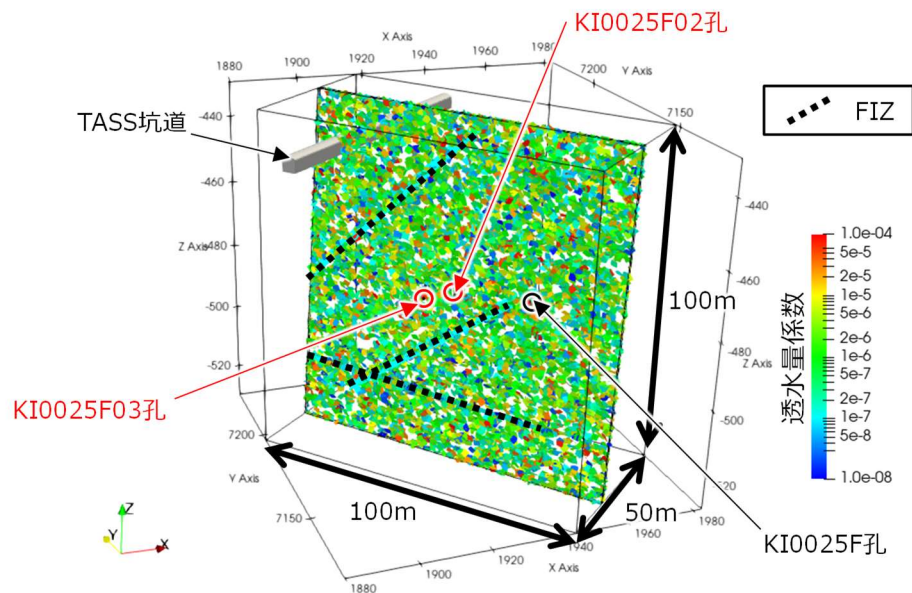


図 1 モデルの構築及び妥当性確認のワークフロー

(図中の「コンディショニング」とは、調査で取得した水理地質構造の幾何学的特性や透水性などの情報に合うようにモデルの一部を校正する作業を示す。図中のキャリブレーションとは、水圧や湧水量などの観測データをより適切に再現できるようにモデルのパラメータを現実的な範囲内で調整する作業を示す。)



赤色：Posiva式流量検層のデータがあるボーリング孔

図 2 構造 20 内の DFN モデル (1 リアライゼーションの例)

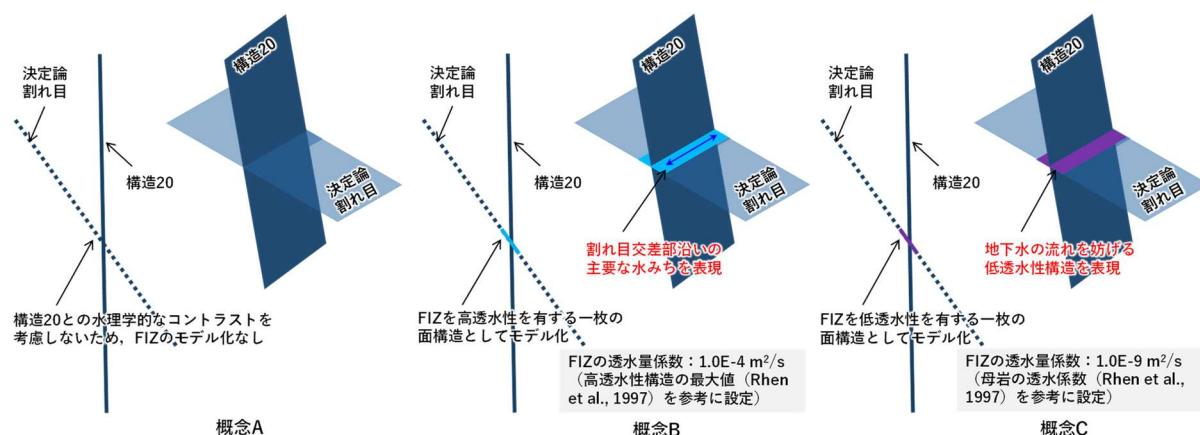


図 3 FIZ の透水性のモデル化概念のオプション図
(概念 A : FIZ 同透水ケース, 概念 B : FIZ 高透水ケース, 概念 C : FIZ 低透水ケース)

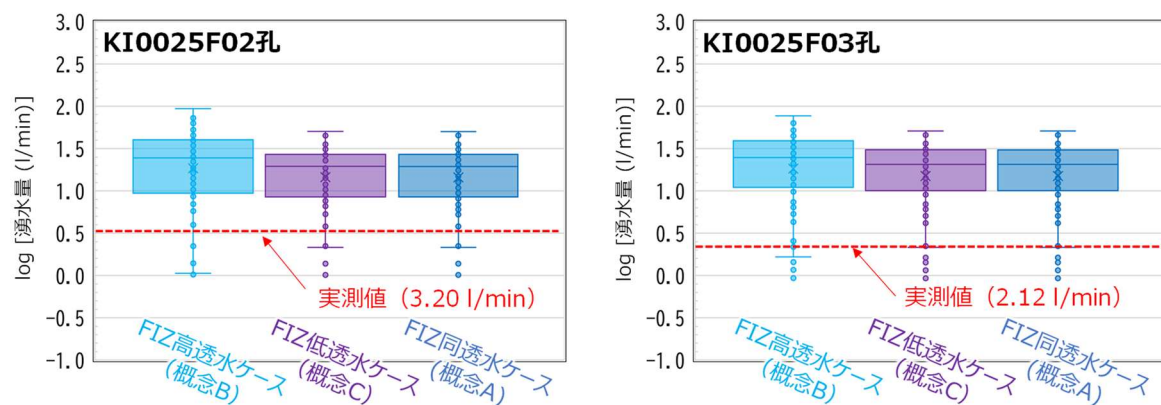


図 4 ボーリング孔からの湧水量を対象としたFIZ 感度解析結果とモデルの妥当性確認結果
(KI002502 孔及びKI0025F03 孔の位置は図 2 に示す。ひげの上下端は95%値及び5%値, 箱の上下端は75%値及び25%値, 箱内の横線は50%値(中央値)を, 図中の×印は平均値を示す。実測値: Posiva 式流量検層によって測定された構造 20 に相当する区間の孔内湧水量の平均値を示す。)

表 1 構造 20 内の DFN モデルに用いた割れ目のパラメータセット

セット No	Dip direction [°]	Dip [°]	Fisher K	P ₁₀ [n/m]	P ₃₂ [m²/m³]	割れ目長さ [m]	透水量係数 [m²/s]
1	51.1	71.3	8.5	2.24	2.67	2.0	対数平均値 : 7.9E-7 対数標準偏差 : σ=1.0

※P10 : 一次元割れ目密度, P32 : 三次元割れ目密度

参考文献

Andersson, P., Byegård, J., Dershowitz, B., Doe, T., Hermanson, J., Meier, P., Tullborg, E. L. and Winberg, A.

- (2002) : Final report of the TRUE Block Scale project, SKB, TR-02-13.
- Beven, K., and Lane, S. (2022) : On (in)validating environmental models. 1. Principles for formulating a Turing-like Test for determining when a model is fit-for purpose, *Hydrological Processes*, vol.36, Issue10.
- 江崎太一, 石橋正祐紀, 田川陽一, 並川正, 羽根幸司, 升元一彦, 尾上博則, 三枝博光, 石田圭輔, 藤崎淳, 澤田淳 (2023) : 原位置調査データを用いた DFN モデルのコンディショニングに関する検討(その 1), 土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会, CS12-06.
- 羽根幸司, 尾上博則, 石橋正祐紀, 江崎太一, 田川陽一, 田部井和人, 並川正, 三枝博光, 石田圭輔, 澤田淳 (2023) : 地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認手法の整備に係る検討事例 (5) 割れ目のモデル化概念の違いが地下水流動・物質移行特性評価に与える影響, 日本原子力学会 2023 年秋の大会, 1D13.
- 石橋正祐紀, 尾上博則, 江崎太一, 田川陽一, 田部井和人, 並川正, 羽根幸司, 三枝博光, 石田圭輔, 澤田淳 (2023) : 地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認手法の整備に係る検討事例 (2) 低透水性割れ目のモデル化方法の違いが地下水流動評価に与える影響, 日本原子力学会 2023 年秋の大会, 1D10.
- 石橋正祐紀, 尾上博則, 江崎太一, 田川陽一, 並川正, 羽根幸司, 三枝博光, 石田圭輔, 澤田淳 (2024) : 亀裂性岩盤を対象とした地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認に係る検討 (1) モデル化手法の不確実性が地下水の移行特性値の評価結果に及ぼす影響, 日本原子力学会 2024 年秋の大会, 2M09.
- Lanyon, G.W., Davy, P., Dershowitz, W. S., Finsterle, S., Gylling, B., Hyman, J. D., Neretnieks, I. and Uchida, M. (2021) : Pragmatic Validation Approach for Geomechanics, Flow, and Transport Models in Fractured Rock Masses, *DFNE* 21-2369.
- 並川正, 石橋正祐紀, 江崎太一, 田川陽一, 羽根幸司, 升元一彦, 尾上博則, 三枝博光, 石田圭輔, 藤崎淳, 澤田淳 (2023a) : 原位置調査データを用いた DFN モデルのコンディショニングに関する検討(その 2), 土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会, CS12-07.
- 並川正, 尾上博則, 石橋正祐紀, 田川陽一, 田部井和人, 羽根幸司, 三枝博光, 石田圭輔, 澤田淳 (2023b) : 地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認手法の整備に係る検討事例 (3) 割れ目のコンディショニング方法の違いが地下水流動評価に与える影響, 日本原子力学会 2023 年秋の大会, 1D11.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告 : わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2023) : 技術開発成果概要 2021, NUMO-TR-22-02, pp. 5-7.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024a) : 技術開発成果概要 2022, NUMO-TR-24-01, pp. 113-117.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024b) : 技術開発成果概要 2023, NUMO-TR-24-03, pp. 71-75.
- 尾上博則, 三枝博光, 石田圭輔, 澤田淳, 石橋正祐紀, 江崎太一, 田川陽一, 田部井和人, 並川正, 羽根幸司 (2023) : 地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認手法の整備に係る検討事例 (1) 全体概要, 日本原子力学会 2023 年秋の大会, 1D09.
- 尾上博則, 三枝博光, 石田圭輔, 澤田淳 (2024) : 亀裂性岩盤を対象とした地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認に係る検討 (2) 事例検討結果に基づくモデルの妥当性確認の考え方, 日本原子力学会 2024 年秋の大会, 2M10.
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., and Belitz K. (1994) : Verification, Validation, and Confirmation of Numerical

- Models in the Earth Sciences, Science, Vol 263, Issue 5147, pp. 641-646.
- Pekkanen, J. (2011) : Flow Measurements in ONKALO at Olkiluoto Probe Holes and Investigation Holes ONK-PP201, -PP254, -PP262, -PP263, -PP274, -PVA8 and -KR13, Working Report 2011-69.
- Rhen, I., Gustafson, G., Stanfors, R. and Wikberg, P., (1997) : Aspo HRL – Geoscientific evaluation 1997/5 Models based on site characterization 1986-1995, TR97-06.
- Selroos, J. O., Ivars, D. M., Munier, R., Hartley, L., Libby, S., Davy, P., Darcel, C. and Trinchero, P. (2022): Methodology for discrete fracture network modelling of the Forsmark site. Part 1 - concepts, data and interpretation methods, SKB R-20-11.
- 田川陽一, 尾上博則, 石橋正祐紀, 江崎太一, 田部井和人, 並川正, 羽根幸司, 三枝博光, 石田圭輔, 澤田淳 (2023) : 地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認手法の整備に係る検討事例 (4) 割れ目ネットワークモデルに基づく等価不均質連続体モデルの構築, 日本原子力学会 2023 年秋の大会, 1D12.

2.3.8 割れ目を有する堆積岩を対象とした物質移行モデルの構築

廣田 翔伍, 尾上 博則, 吉田 芙美子, 周藤 優子, 三枝 博光

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

処分場の候補母岩の一つとなる新第三紀堆積岩類において、放射性核種は地下水の主要な移行経路となる割れ目ネットワークに沿って、基質部への拡散と鉱物への収着を経ながら割れ目間隙中を移流・分散によって移行するとともに、基質部を鉱物への収着を経ながら移流・分散によって移行すると考えられる (NUMO, 2021)。新第三紀堆積岩類を対象とした既往の研究 (例えば, JAEA・電中研, 2021) では、堆積岩を多孔質媒体として取り扱い、割れ目と基質部に関係なく一様に移流・分散が生じているとみなすという物質移行概念に基づいた物質移行モデルを適用することが主流であり、割れ目ネットワークを考慮し、割れ目内の移流と、割れ目から基質部への拡散に加えて基質部内の移流による物質移行を取り扱う二重透水モデル (Ho, 2001) によるモデル化の事例は少ない。また、幌延深地層研究センターの既往研究によると、新第三紀堆積岩類である声間層及び稚内層浅部では、割れ目の水理学的な連続性が高く岩盤中に水みちの割れ目ネットワークが形成されていることが示されている (Ishii, 2017 ; Ishii, 2018)。

NUMO は JAEA の幌延深地層研究センターにおける幌延国際共同プロジェクト (Horonobe International Project (https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/status/hip/project_hip.html) : 以下, 「HIP」という) に参画し、国際的に重要な課題についての技術開発に取り組んでいる (NUMO, 2024)。このうちタスク A (物質移行試験) では、割れ目系の多孔質堆積岩 (以下, 「割れ目系堆積岩」という) における処分場の安全評価に適用可能な、より現実的な三次元物質移行モデルを開発するために、原位置試験結果を通じて三次元物質移行モデルが試験結果を適切に予測できる能力を評価することを目的とした検討を進めている。そこで、本検討では、HIP のタスク A における割れ目系堆積岩の三次元物質移行モデルの構築に使用する割れ目ネットワークモデル (Discrete Fracture Network Model : 以下, 「DFN モデル」という) を構築した。

2. 主な成果

本検討では、幌延深地層研究センターの 250 m 調査坑道に位置する西側第 1 ボーリング横坑周辺の声間層が分布している領域を検討対象として、①割れ目特性の分析とそれに基づく概念モデルの構築、②割れ目ネットワークを考慮した地質構造モデル (以下, 「Geo-DFN モデル」という) の構築とその妥当性の確認、③Geo-DFN モデルに割れ目の水理学的特性を付与したモデル (以下, 「Hydro-DFN モデル」という) の構築を行った。これらのモデルを構築するにあたっては、ConnectFlow Version 13.0 (Jacobs, 2023) を用いた。以下に、それぞれの作業項目の実施概要を記す。

① 割れ目特性の分析とそれに基づく地下水流動の概念モデルの構築

坑道壁面観察で得られた割れ目のトレース長や走向・傾斜、湧水状況といった情報を統合した「坑道壁面割れ目情報データベース」と、HIP のタスク A で実施したボーリング調査で得られたコア記載データ、孔壁面画像データ及び水理試験データをもとに「ボーリング割れ目情報データベース」を作

成した。また、作成したデータベースをもとに割れ目の卓越方位や透水性といった特徴について考察し、検討対象領域における地下水流動の概念モデルを構築した（図 1）。データベースより比較的長い割れ目ほど湧水を伴う傾向が認められたことから、検討対象領域は、比較的長い割れ目で構成された割れ目ネットワークが主要な水みちとなり、主要な水みちを通過する地下水と短い割れ目や基質部を通過する地下水によって全体の水理場が形成されていると解釈した。図 1 に示す概念モデルを基に、短い割れ目や基質部が有する透水性を考慮しつつ、主要な水理場を形成する割れ目の分布やその透水性を DFN モデルとしてモデル化することとした。

② Geo-DFN モデルの構築とその妥当性の確認

Geo-DFN モデルの構築にあたり、①で整理した「坑道壁面割れ目情報データベース」に基づき、Geo-DFN モデルの構築に必要となる割れ目の幾何特性に係るパラメータ（以下、「幾何特性パラメータ」という）を推定した（表 1）。幾何特性パラメータの推定には Onoe et al. (2021) で用いられた手法を用いつつ、構築した Geo-DFN モデルで算出した坑道壁面のトレース長分布が実測値を最もよく再現できるようなパラメータの組み合わせをベイズ最適化手法（Jasper et al., 2012）で推定した。パラメータ推定のときは、予備的に実施した検討においてベイズ最適化手法の目的関数が安定することが確認されたリアライゼーション数である 100 リアライゼーションを生成し、それらから算出されたトレース長分布を用いることとした。また、構築した Geo-DFN モデルで算出したボーリング孔における割れ目の方位分布と一次元密度は「ボーリング割れ目情報データベース」で整理した情報と整合的（図 2）であり、推定した幾何特性パラメータの妥当性が示された。

③ Hydro-DFN の構築

②で構築した Geo-DFN モデルをもとに Hydro-DFN モデルを構築した。Hydro-DFN モデルに設定する透水量係数分布に係るパラメータ（表 1 中の μ 、 σ 及び C）（以下、「水理パラメータ」という）は、仮想水理試験解析（水理試験を模した条件下で行った地下水流動解析）を実施し、原位置の水理試験で得られた岩盤の透水係数分布を最もよく再現できるような水理パラメータを推定した（表 1、図 3）。仮想水理試験解析は、予備的に実施した検討において透水係数の中央値と標準偏差が安定することが確認されたリアライゼーション数である 100 リアライゼーションを対象に実施した。仮想水理試験解析では、モデル中央部に一定の水頭値を設定した仮想ボーリング孔の試験区間を配置するとともに、モデルの外側境界を固定水頭境界に設定した。また、Hydro-DFN モデルの構築においては、大きな割れ目ほど透水性が高い傾向を有すると仮定して割れ目の透水量係数と半径に表 1 に示す準相関関係を設定した。なお、仮想水理試験解析結果から透水係数を算出する際には、①で整理した基質部も含めて水理場が形成されているとの考え方を反映し、Hydro-DFN モデルに表現した割れ目のネットワーク構造を通過する地下水流量に加えて基質部を通過する地下水流量を考慮した。

上述の①～③を通じて構築した Hydro-DFN モデルを図 4 に示す。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書（NUMO, 2021）の本編 2.5.2 項に示されているとおり、処分場の設計や閉鎖後長期の安全評価の品質を保証するためには、その設計や評価のインプットとなる地下水流動特性値や物質移行特性値を推定するために用いる水理地質構造モデルの信頼性を確保することが重要となる。また、水みちの微細透水構造を反映した核種移行解析モデルの開発は、包括的技術報告書（NUMO,

2021) の本編 6.6.2 項 (信頼性向上に向けた取り組み) の (3) (ii) 水みちの微細透水構造などを反映した核種移行解析モデルの構築・高度化に記載された課題である。

本検討を通じて得られる、基質部に割れ目が発達した新第三紀堆積岩類を対象とした DFN モデルの構築技術の有効性が確認された場合には、処分場の設計や閉鎖後長期の安全評価に用いる水理地質構造モデルの信頼性の向上に資すると考えられる。そのため、包括的技術報告書を更新する際には、本検討の成果である新第三紀堆積岩類を対象とした水理地質構造モデルの構築に係る方法論の適用を検討する。

4. 今後の展開

HIP のタスク A において、本検討で構築した DFN モデルを基に声間層を対象とした物質移行モデルを構築し、NUMO が開発した三次元核種移行解析コード (NUMO, 2011) を用いてトレーサー試験の予測解析等の物質移行解析を行い、実測値との比較を通じて構築した DFN モデル及び物質移行モデルの妥当性を確認する。また、必要に応じて新たに取得される調査データを用いて DFN モデルの更新を図る。

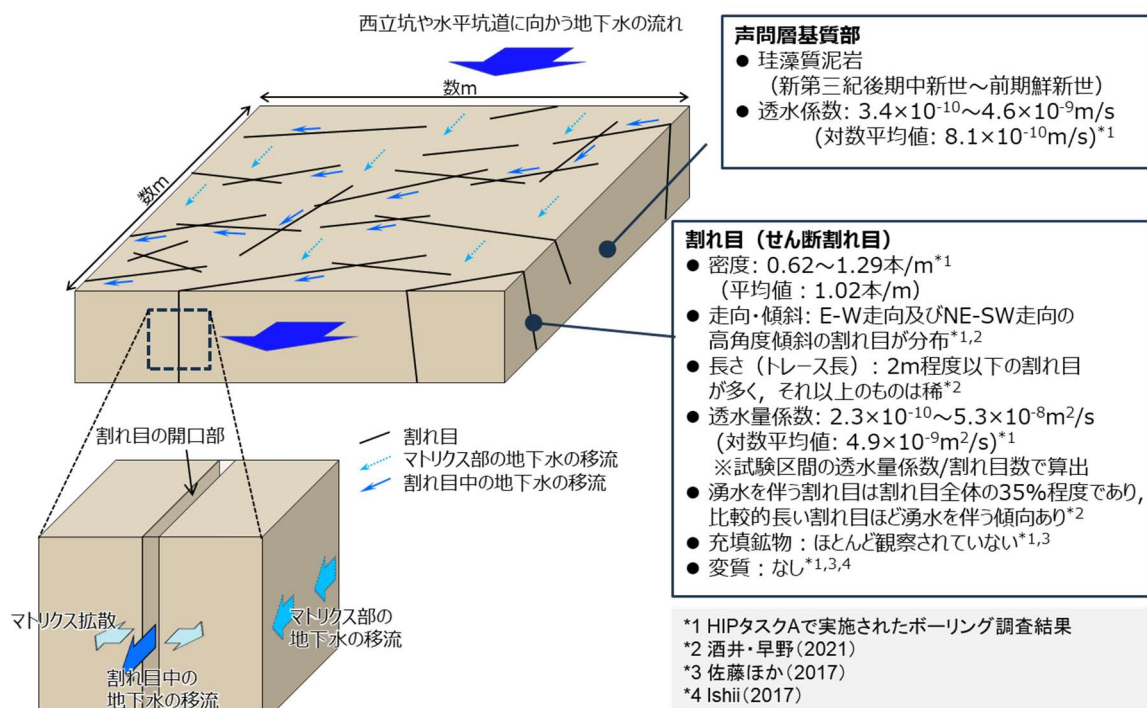


図 1 検討対象領域における地下水流動の概念モデルとそれに係る基質部及び割れ目の特性

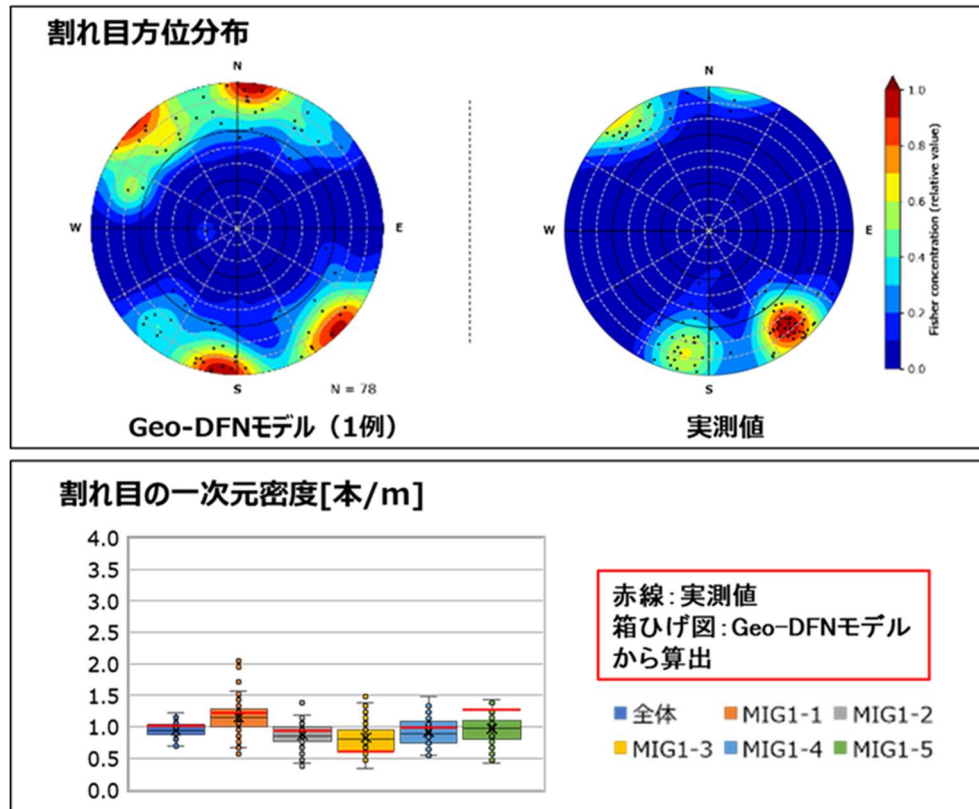


図 2 Geo-DFN モデルの算出結果と実測値との比較

(上図(割れ目方位分布)のGeo-DFNモデルの算出結果は1リアライゼーションの結果を示す。下図(割れ目の一次元密度)のGeo-DFNモデルの算出結果は100リアライゼーションの結果を示し、箱ひげ図のひげの上下端は95%値及び5%値、箱の上下端は75%値及び25%値、箱内の横線は50%値(中央値)を、図中の×印は平均値を示す。)

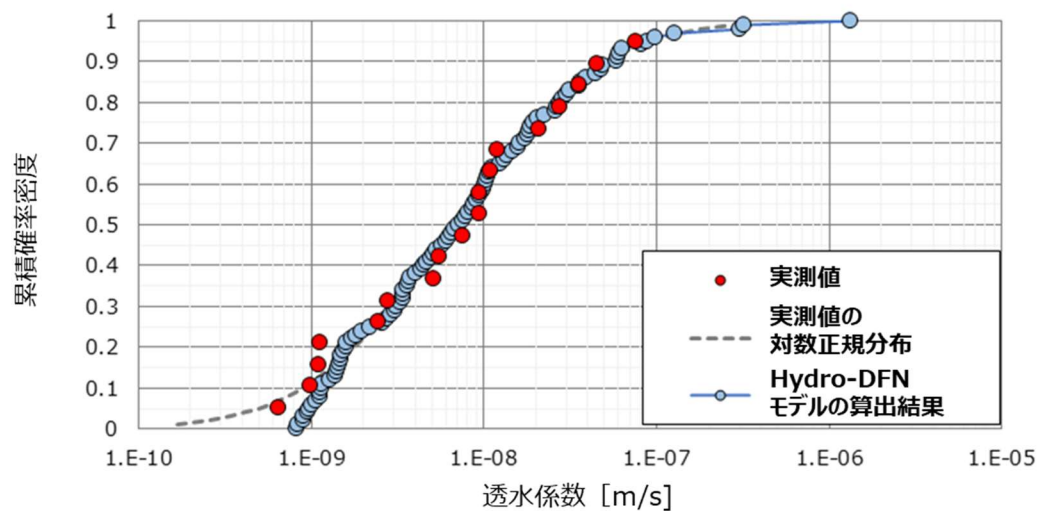


図 3 Hydro-DFN モデルで算出した岩盤の透水係数分布と実測値との比較
(Hydro-DFN モデルの算出結果は100リアライゼーションの結果を示す。)

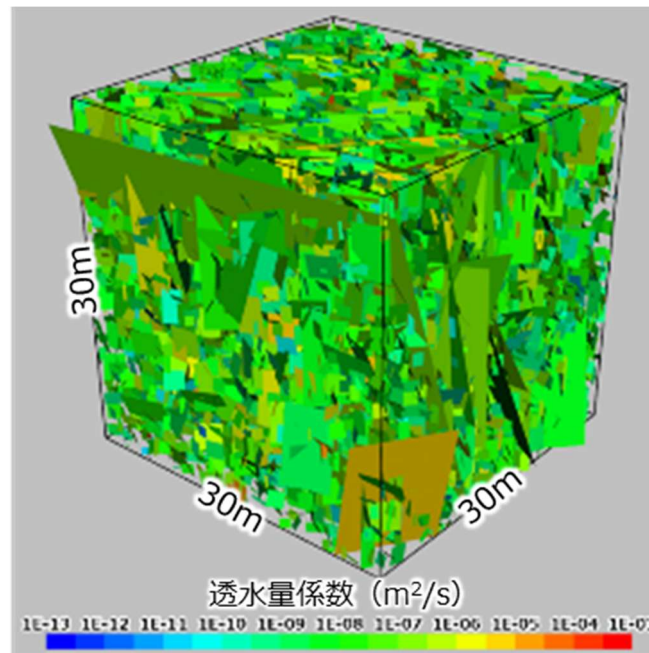


図 4 構築した Hydro-DFN モデルの一例
(図中に示された色付きの平板は割れ目を示す。)

表 1 Hydro-DFN モデルの構築に使用した割れ目のパラメータ

Set	割れ目方位分布			幾何学パラメータ			水理パラメータ		
	傾斜方位 [°]	傾斜 [°]	Fisher K [-]	3次元割れ目密度 [m²/m³]	割れ目長さ分布		透水量係数分布*1		
					べき数 [-]	L_{min} [m]	μ [log ₁₀ m²/s]	σ [log ₁₀ m²/s]	C [-]
1	14.1	85.4	9.0	0.54	4.2	1.0	-7.9	1.1	0.8
2	322.8	82.7	10.3	0.56	3.7	1.0			

$$*1 T = \text{lognorm}(\mu, \sigma) \cdot r^C$$

T : 透水量係数 (m²/s)

μ : 対数平均

σ : 対数標準偏差

r : 割れ目半径 (m)

C : 定数

Fisher K: Fisher分布を特徴づけるパラメータ

L_{min} : 最小割れ目長さ

参考文献

- Ho, C.K. (2001) : Dual porosity vs. dual permeability models of matrix diffusion in fractured rock, Proceedings of the 9th International High Level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas, NV, USA, 29 April - 3 May, 2001, ANS.
- Ishii, E. (2017) : Estimation of the highest potential transmissivity of discrete shear fractures using the ductility index. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.100, pp.10-22.
- Ishii, E. (2018) : Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single borehole investigations. Water Resources Research, Vol.54, pp.3335-3356, doi:10.1029/2018WR022556.
- 石橋正祐紀, 田川陽一, 並川 正, 尾上博則 (2022) : 割れ目ネットワークモデルにおける割れ目長

- さを考慮した透水量係数分布の推定, 令和 4 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp.173-174.
- Jacobs (2023) : ConnectFlow Technical Summary Version13.0
https://www.connectflow.com/resources/docs/conflow_technical.pdf (2024 年 1 月 10 日閲覧, 2025 年現在は同 URL で Amentum 社が v13.1 を公開しており閲覧不可).
- JAEA(日本原子力研究開発機構)幌延深地層研究センターホームページ:「幌延国際共同プロジェクト (HIP)」, https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/status/hip/project_hip.html (2025 年 6 月 3 日閲覧) .
- JAEA(日本原子力研究開発機構), 電中研(電力中央研究所) (2021) : 令和 2 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業—岩盤中地下水流動評価技術高度化開発—報告書.
- Jasper S., Hugo L., Ryan P. A. (2012): Practical Bayesian Optimization of Machine Learning Algorithms, Advances in Neural Information Processing Systems, p.9.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2011) : 地層処分事業のための安全評価技術の開発 (II) —核種移行解析モデルの高度化—, NUMO-TR-10-10.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現 —適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024) : 技術開発成果概要 2023, NUMO-TR-24-03, pp. 93-98.
- Onoe, H., Ishibashi, M., Ozaki, Y. and Iwatsuki, T. (2021) : Development of modeling methodology for hydrogeological heterogeneity of the deep fractured granite in Japan, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.144, 104737.
- 酒井利啓, 早野明 (2021) : 幌延深地層研究計画 深度 380 m までの立坑および調査坑道における坑道壁面の地質観察により取得したデータの統合・整理, JAEA-Data/Code 2021-010.
- 佐藤稔紀, 笹本広, 石井英一, 松岡稔幸, 早野明, 宮川和也, 藤田朝雄, 棚井憲治, 中山雅, 武田匡樹, 横田秀晴, 青柳和平, 大野宏和, 茂田直孝, 花室孝広, 伊藤洋昭 (2017) : 幌延深地層研究計画における坑道掘削 (地下施設建設) 時の調査研究段階 (第 2 段階: 深度 350 m まで) 研究成果報告書, JAEA-Research 2016-025.

2.3.9 不均質場における三次元解析ビッグデータの機械学習

吉田芙美子 永井翔 浜本貴史 石田圭輔

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

サイトの地質環境特性に応じて設計した処分場の閉鎖後安全評価においては、地表を含む地質環境と地下の処分施設からなる処分システムの構成要素の特徴や空間スケールの違い（廃棄体：1m 程度～生活圏：数十 km 以上）とともに、それらの時間変遷（現在～将来 10 万年程度以上の時間スケールを対象）を考慮して、廃棄体から生活圏までの核種の移行挙動を解析するモデルを構築する必要がある。これまでに、機構はランダムウォーク粒子追跡解析コード Partridge を利用して、海水準変動や隆起・侵食による地質環境の変遷や人工バリアの変質を反映した、パネルスケールから広域スケールまでの入れ子モデルを用いた粒子追跡解析を行うための技術を整備した（NUMO, 2024）。この技術により廃棄体から地表までの解析を粒子追跡解析により実施可能となったが、線量評価に必要となる多数のリアライゼーションを使った解析や不確実性を考慮した複数の繰り返し計算を行う場合、廃棄体すべてを対象とした多数回の解析を行うことは計算負荷が大きい。このため、計算負荷を低減することが課題となっている。さらに、三次元粒子追跡解析により出力されるデータの量は膨大なことから、出力データを自動的に整理・分析し人間が理解しやすい情報を抽出する処理技術の整備が課題である。

そこで、これら 2 つの課題の解決に向け、機械学習を活用した新たな解析技術の整備を進めることを目的に、少量の粒子追跡解析結果（少数の廃棄体を対象とする解析など）から、処分場全体の解析結果を予測評価するための技術（以下、「予測評価ツール」という）と、多数の解析結果を類似グループに分類（クラスター分析）し、グループ間の特徴を分析する技術（以下、「クラスター分析ツール」という）の開発を 2023 年度より開始した。

2023 年度は、包括的技術報告書（NUMO, 2021）における深成岩類高レベル放射性廃棄物処分場（堅置き・ブロック方式）の処分パネルを対象として、母岩に存在する割れ目の特徴を割れ目ネットワークモデルで表現し、その中に設計仕様に即した処分場を設置した三次元モデルを用いた粒子追跡解析を実施し（図 1）、この移行率の時間変遷（以下、「移行率分布」）を予測する予測評価ツールと粒子軌跡を分析するクラスター分析ツールを開発した。開発にあたり合理的な計算体系として、計算時間短縮のため、処分坑道距離と処分坑道本数をそれぞれ 2 分の 1 の規模として処分パネルの上流約 100m と下流・側方約 300m の母岩を含む解析体系を使用し、この処分パネルからランダムに選定した半数の廃棄体を対象としている。2024 年度は予測評価ツールの開発途上で明らかとなった課題解決に向けて、当該ツールの改良を実施した。

2. 主な成果

(1) 予測評価ツールの改良

2023 年度に開発した予測評価ツール（以下、「23 年度版ツール」）は数千年までの早期の移行率について、数値解析の結果に対して予測値が大きく振動し、予測精度が低いことが課題になっている（図 2）。移行率の振動的振る舞いについては、粒子追跡解析において、早期の移行率に寄与する評価面（図

1 に示す粒子が到達する端の面)へ早期に到達する粒子(及びそのような粒子が発生する廃棄体)が少なく、学習に用いる教師データが少ないことが要因と考えられる。また、目的変数を 23 年度版ツールにおいては一つの時刻の移行率の値としていることも要因と考えられる。このため、2024 年度は早期の移行率について数千年以後の移行率の値と外挿補間により関係づける補正を可能とする改良を実施した。具体的には「23 年版ツール」においては一つの時刻の移行率の値を目的変数としていたが、改良版ツールでは「移行率分布」を表すフィッティング関数の各係数を目的変数に設定することで、一点の時刻情報だけでなく異なる時刻の移行率情報を含めた学習ができる。すなわち、予測評価において各時刻を独立に予測するのではなく、全期間の移行率を複数の関数の組み合わせ(線形結合)で表すことで前後の時刻の移行率を考慮に入れた予測を行った。

改良したツールを用いて得られた移行率分布の予測結果を図 2 に示す。破線(黒)が Partridge による本来の移行率(予測せずに全廃棄体から粒子軌跡を計算して導出した移行率)、実線(赤)がニューラルネットワークによる予測結果である。予測結果は滑らかな曲線となっており、「23 年度版ツール」の課題であった、「移行率分布」が局所的に振動的である、隣接する時刻の移行率が数桁変動するといった挙動を解消できた。

予測精度については、1,000 年以後は 10 万年付近を除き、予測のない場合の移行率と良く合っている。一方、1,000 年未満については、予測値と予測なしで全て計算した場合に該当する移行率との差が大きい。このことから、次項に示すように、クラスター分析ツールを用いて廃棄体を分類したうえで、クラスターごとに学習と予測を行う手法を構築した。

(2) 分類されたクラスターごとの学習・予測(手法最適化に向けた改良)

2023 年度に開発した k-means 法(Lloyd, S. P., 1982)を用いたクラスター分析ツールは、ピーク時刻や、いくつかの特定時刻の移行率をもとに、廃棄体をクラスターに分類する。クラスター分析ツールによる分類の結果、同一のクラスターに分類された廃棄体の移行率分布はある程度似通ったものとなる。したがって、クラスターごとに学習・予測を行うことで、すべての廃棄体を一括で学習・予測するよりも精度の高い予測評価を行うことが可能になると考えられる。

そこで、2024 年度は、2023 年度と同じ亀裂の統計情報で新たに作成した割れ目ネットワークモデルを使用して粒子追跡解析を実施し、上述した手法の検証を行った。解析対象の全廃棄体 1,680 本中、学習・予測に利用した計 966 個の廃棄体を、クラスター分析ツールを用いて粒子の移行の早さに応じて表 1 に示すような 4 個のクラスターに分類した。

4 個のクラスターごとに学習・予測を行い、各クラスターの移行率分布を予測した結果を図 3 に示す。破線(黒)は Partridge を用いた粒子追跡解析により取得した移行率分布(以下、Partridge 移行率)、実線(赤)が予測結果である。早期の移行率に Partridge 移行率からの乖離がみられるものの、ピーク時刻やピーク位置はいずれのクラスターについても予測結果は Partridge 移行率とおおむね一致した。

次に、各クラスターの予測評価結果を各クラスターに分類された廃棄体数で重みづけ平均をとり、パネル内の廃棄体全体からの移行率分布を予測した結果を示す(図 4)。Partridge 移行率と比べ、ピーク時刻が数百年遅れ、ピーク値もわずかに過小評価しているが、100 年~7 万年まで、精度良く Partridge の移行率分布を予測出来ている。すべての廃棄体を一括で学習・予測した場合(図 2)は、100 年~1,000 年の予測結果は Partridge 移行率を過小評価し、最大で 1 桁程度過小評価していた時刻も見られた。したがって、クラスターごとに予測評価することで、より早期から Partridge 移行率を精度良く予測することができ、全期間にわたって移行率分布の予測精度が向上する結果となった。ただ

し、依然として、移行率の立ち上がりが予測評価においては早くなること、数百年までの早い期間の移行率が精度良く予測できていないことが課題として挙げられる。

3. 包括的技術報告書への影響

施設設計などを反映した核種移行解析モデルの高度化は、包括的技術報告書（NUMO, 2021）の本編の 6.2.2 項（信頼性向上に向けた取り組み）に記載した課題の一つである。包括的技術報告書の本編の 6.4 節（核種移行解析と線量評価）について、本技術により廃棄体から地表を含む地質環境までの核種移行挙動評価を、処分システムの特徴をより現実的に反映したモデルで検討できるようになり、計算負荷の低減の可能性が出てきたため、処分システムの特徴をより反映した線量評価への見通しが得られている。

4. 今後の展開

本業務により、改良された予測評価ツールによる予測精度の改善と、クラスター分析と予測評価ツールの二つを組み合わせた手法の有効性の示唆という二つの主な成果が得られた。本業務の成果を踏まえて、今後は予測評価ツールのさらなる改良や、評価スケールを現在のパネルスケールから広域スケールへ拡張することなどの改良に取り組んで行く。

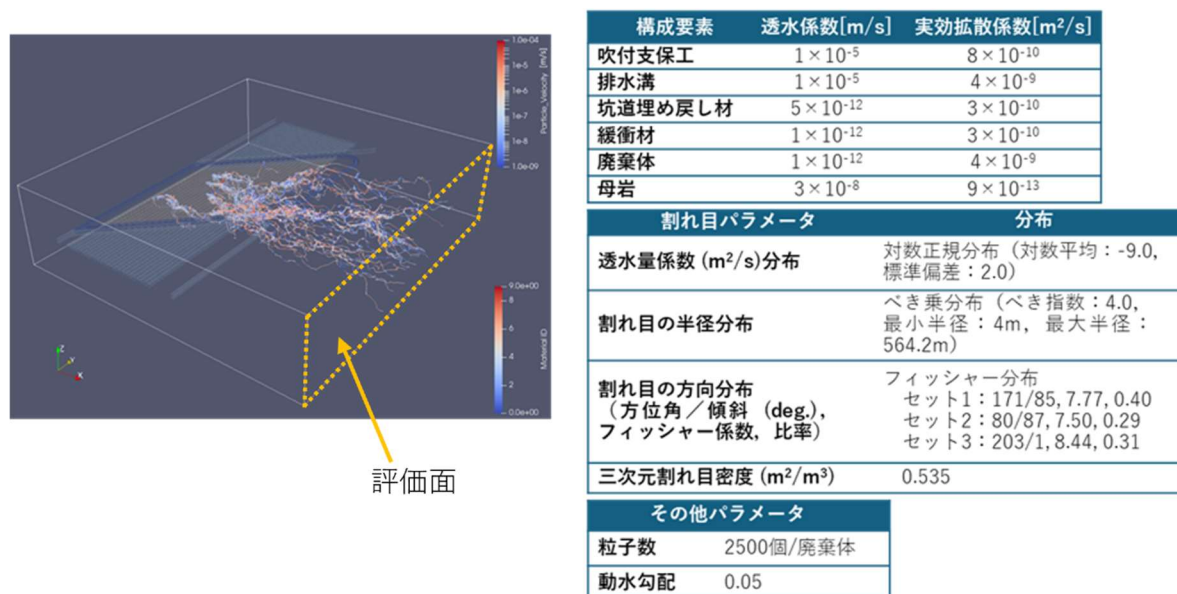


図 1 予測評価ツールとクラスター分析ツールを開発するための粒子追跡解析と解析パラメータ

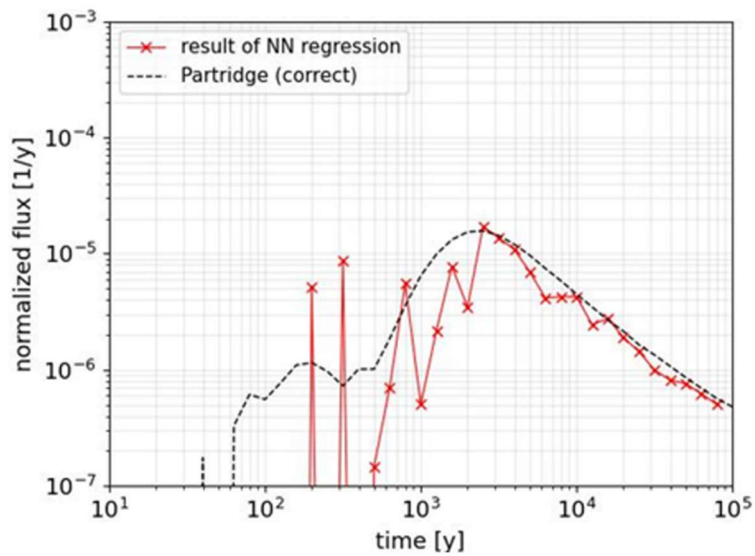


図 2 23 年度に開発した予測評価ツールによる移行率の予測の例
 (赤のプロットが予測結果, 黒の点線はPartridge による予測のない場合の移行率。解析条件は深成岩類高レベル放射性廃棄物処分場, 縦置き・ブロック方式)

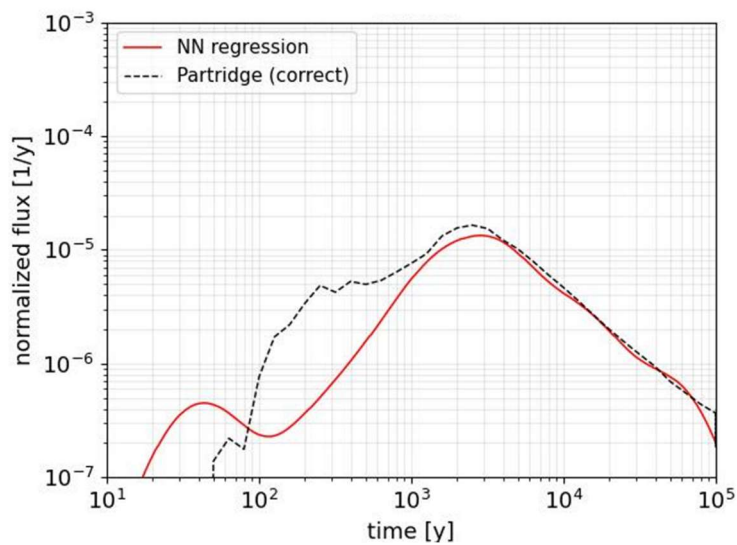


図 3 24 年度に改良した予測評価ツールによる移行率の予測の例
 (赤線が予測結果, 黒の点線はPartridge による予測のない場合の移行率。解析条件は深成岩類高レベル放射性廃棄物処分場, 縦置き・ブロック方式)

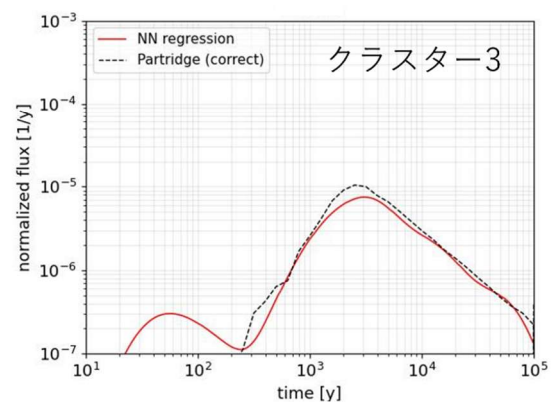
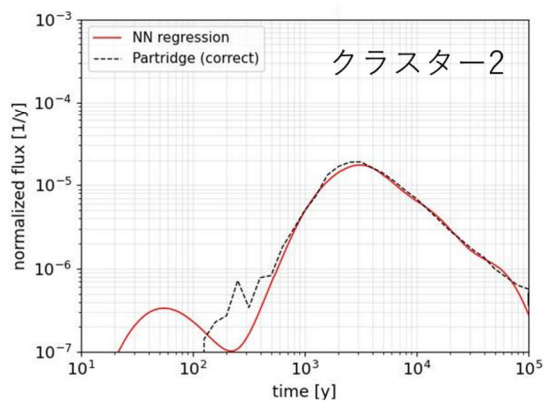
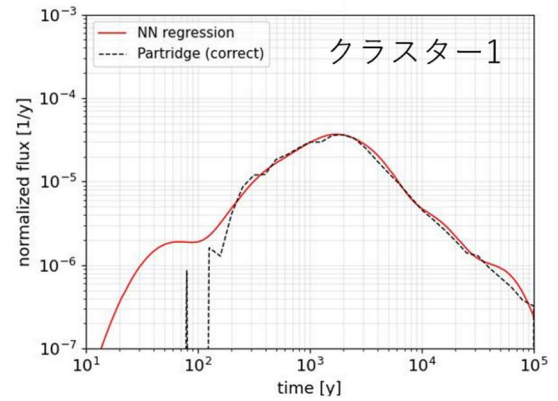
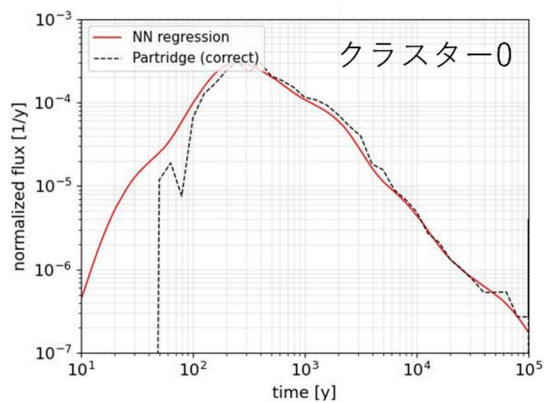


図 4 2024 年度の粒子追跡解析を教師データとしたクラスターごとの予測結果
(赤線が予測結果, 黒の点線は Partridge による予測のない本来の移行率。解析条件は深成岩類高レベル放射性廃棄物処分場, 縦置き・ブロック方式)

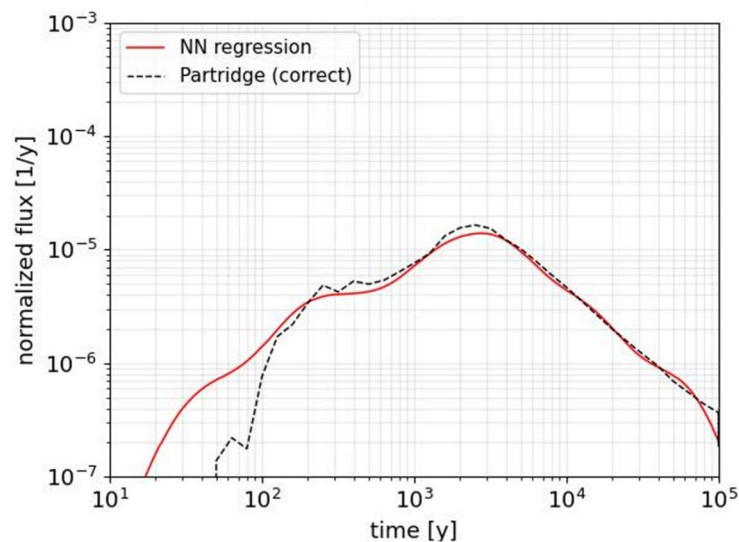


図 5 4 個のクラスターの予測評価結果を統合したパネル内廃棄体全体からの移行率分布の予測結果
(赤線が予測結果, 黒の点線は Partridge による予測のない本来の移行率。解析条件は深成岩類高レベル放射性廃棄物処分場, 縦置き・ブロック方式)

表 1 2024 年度の粒子追跡解析結果（深成岩類高レベル放射性廃棄物処分場，縦置き・ブロック方式）のクラスター分類結果

クラスター	廃棄体の数	核種移行（傾向）
0	7	早い
1	95	比較的早い
2	389	比較的遅い
3	475	遅い
合計	966	

参考文献

- Lloyd, S. P. (1982) : Least squares quantization in PCM. Information Theory, IEEE Transactions on 28.2, pp. 129-137.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024) : 技術開発成果概要 2022，NUMO-TR-24-01.

2.3.10 サイト調査を反映した核種移行パラメータ設定の方法論の検討及びデータ拡充

小池 彩華¹ 上野 吹佳¹ 石寺 孝充² 岩田 孟² 深津 勇太² 種市 やよい² 野中 麻衣²

¹原子力発電環境整備機構, ²日本原子力研究開発機構

1. 背景・目的

地層処分場の閉鎖後長期の安全評価において実施する核種移行解析のパラメータ設定に関して、包括的技術報告書（NUMO, 2021）においては、これまでに報告されている収着分配係数や拡散係数の実測値に基づいて構成された JAEA のデータベースを参照して設定する手法を示した。この過程で、日本国内の地質環境に応じたパラメータの設定に必要な実測値が十分ではない元素については、安全評価上の合理的な保守性の確保に配慮し、移行遅延性能を低く見積もってパラメータを設定した。今後の調査段階の進展を考慮した場合、サイト調査により得られる地質環境等の情報を活用し、処分場の空間的な広がり起因する不均質性や、時間的変遷に伴う地質環境特性の不確実性を考慮したうえで、そのサイトの特徴を反映して核種移行パラメータを設定することが必要となる。このため、サイト調査により得られる地質環境に関する情報等と、既存のデータベースやパラメータ値の推定モデルを組み合わせ、包括的にこれを行うための手法の構築が安全評価における技術的信頼性を向上させるためには重要である。

本検討は、JAEA との共同研究により、このようなパラメータ設定手法の構築を目的として実施しているものである。地質環境に応じた設定に必要なデータが不十分なパラメータ（溶解度、収着分配係数（以下、「Kd」という）、実効拡散係数（以下、「De」という））について、必要なデータを試験により取得し、多様な地質環境特性に応じた値を設定可能とするために検討を進める。

2024 年度は、線量評価への影響の大きな核種を対象に、溶解度の温度依存性、高炭酸濃度地下水や幅広い温度における緩衝材への Kd、地下水組成や硝酸共存環境下におけるセメント系材料への Kd、Ca 型化した緩衝材中の De についてデータの拡充を図るとともに、拡散試験の結果を用いて設定している緩衝材の Kd をバッチ系の収着試験に基づく Kd で代替する手法の検討を行った他、ボーリング調査で得られた原位置試料によって母岩に対する De の取得を行い、パラメータ設定における課題を抽出した。

2. 主な成果

- 溶解度の温度依存性：処分場で想定される幅広い温度条件に対応した Se の溶解度を評価するため、想定される温度条件で模擬地下水の pH、Eh の変化傾向を測定し、これによって得られた補正式を用いて、2023 年度に取得した 60 °C 及び 90 °C のデータ、75 °C のデータ（Doi et al., 2016）及び 2021 年度に取得した 45 °C のデータ（Yoshida et al., 2023）を補正した。これにより 45～90 °C における Se の溶解に係る平衡定数を算出し、平衡定数の熱力学的な温度依存性評価モデルを検討した。さらに、3 価アクチノイド元素の溶解度の温度依存性に資するデータ取得を目的として、3 価アクチノイド元素の化学アナログである Sm の 45 °C、60 °C、75 °C、90 °C における溶解度データを取得した。これにより算出した各温度の平衡定数より、ギブズの自由エネルギー変化を導出し、等圧熱容量の式を用いた溶解度の温度評価式の導出を行った。
- 高炭酸濃度地下水や幅広い温度における緩衝材の Kd 設定：還元条件・高炭酸共存下において

負に帯電する炭酸錯体を形成することで K_d が低下すると考えられる Np (4 価), Tc (4 価) を対象にベントナイトへの収着試験を実施した。さらに, K_d の温度依存性の報告例が少ない Am を対象に, 約 25 °C, 50 °C, 80 °C におけるベントナイトへの K_d を取得した。Np, Tc, Am の K_d それぞれに対して試験データに基づく収着モデルを作成し, 収着に寄与する表面錯体の錯生成定数を算出した。これにより K_d に対する炭酸濃度影響と温度影響の評価に関する信頼性が向上した。

- セメント系材料の K_d 設定 : TRU 等廃棄物の廃棄体パッケージ間充填材や廃棄体パッケージ内充填材等に使用されるセメント系材料の構成鉱物を対象に, Cs の K_d 設定に必要な試験データとして不足していた溶液中の Na 濃度依存性に関するデータを拡充した。また, 硝酸塩を含有する廃棄体である TRU 等廃棄物グループ 3 の線量評価で重要な I について, 硝酸共存下における収着試験を実施し, データを拡充した。取得したデータにより設定する Cs の K_d が包括的技術報告書の設定値と整合することを確認したほか, Cs と I に対してそれぞれ Na 濃度及び硝酸塩濃度が増加することにより K_d が低下する傾向があることを確認した。
- Ca 型化した緩衝材中の De : Ca 型に変化した緩衝材中の De を設定することを目的に, データが不十分な 2 価の陽イオンの拡散データを取得するため, Sr をトレーサーとした拡散試験により De の Ca 濃度依存性に係るデータを取得した。得られたデータを包括的技術報告書の設定値と比較することで, 包括的技術報告書の設定値の妥当性を確認した。
- 拡散試験の結果を用いて設定している緩衝材の K_d をバッチ系の収着試験に基づく K_d で代替する手法の検討 : 包括的技術報告書では拡散試験により取得した評価対象核種の見かけの拡散係数と自由水中の De から推定した評価対象核種の De により K_d を算出し, 核種移行解析のデータセットとして設定している。これにより廃棄体周囲に設置される圧縮ベントナイトの性能を確からしく評価可能と考えられるが, 試験時間や試験条件の制御が課題である。他方, バッチ法による収着試験は, 試験時間が短くかつ試験条件の制御が容易であるため, この試験手法で得られたデータを利用した K_d で代替することが精密調査における円滑なパラメータ設定には重要である。このことから代替方法の開発に向け, Cs を対象に圧縮ベントナイトを用いた試験系と粉末のベントナイトを使用したバッチ法に基づく試験系の二種類の試験系における収着試験を実施した。二種類の試験系において K_d データには大きな違いがなかったことから, バッチ法により取得した K_d を核種移行解析へ適用できる可能性が示唆された。
- 原位置試料を利用した核種移行パラメータ値の設定手法の構築 : 包括的技術報告書で採用した De の設定手法 (NUMO, 2021) について, データが不足している先新第三紀堆積岩への適用性を確認した。核種が地下水中で取りうるイオン価に応じたトレーサーとして HDO (重水 : 中性イオン), Cs (1 価の陽イオン), Ni (2 価の陽イオン), Eu (3 価の陽イオン) を選択し, 東京電力リニューアブルパワー株式会社神流川発電所の地下トンネル内において採取した先新第三紀付加体堆積岩 (NUMO, 2022) に対する拡散試験を実施した。この結果取得された HDO と Cs の拡散データ及び岩石の特性分析の結果, そして昨年度取得した I (1 価の陰イオン) の拡散データから, 付加体堆積岩を構成する泥岩や砂岩の混在状況や間隙構造, 炭酸塩鉱物の分布等によって De が一桁以上変動することが示唆された。付加体堆積岩類の De については, 空間的な鉱物分布の不確実性を踏まえた設定手法とすることの重要性が明らかとなった。

3. 包括的技術報告書への影響

溶解度、緩衝材やセメント系材料に対する K_d と De のデータ拡充及び付加体堆積岩類に関わる科学的知見の拡充は、包括的技術報告書の本編 6.6.2 項（信頼性向上に向けた取り組み）に記載した課題であるとともに、日本原子力学会レビュー（日本原子力学会, 2019）でも必要性を指摘された課題である。本技術開発により、包括的技術報告書の本編 6.4.1 項（基本ケースに対する核種移行解析と線量評価結果）及び 6.4.2 項（変動ケースに対する核種移行解析と線量評価結果）における溶解度、緩衝材やセメント系材料の K_d と De のデータセットを更新すること、付加体堆積岩類に対しては新たに得られたデータ等に基づき構築した手法により設定した De で母岩のデータセットを更新することを検討する。

4. 今後の展開

拡充したデータについては、将来の適合性審査への活用を念頭に、引き続きデータの品質を保証するために成果を論文として公表する。また、こうしたデータの活用が容易になるよう、品質が保証されたデータとして JAEA データベースに格納する。さらに、原位置試料を利用した核種移行パラメータ値の設定手法の構築に関して、ボーリング調査によって段階的に取得される限られた岩石試料を用いて取得される De と K_d の実測値を用いて、岩石試料の不均質性を考慮したうえでサイト全体の核種移行パラメータを設定する手法を検討する。

参考文献

- Doi, R., Uchikoshi, K. and Beppu, H. (2016) : The $FeSe_2(cr)$ solubility determined by solubility experiments of Se co-existing with Fe, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 53, Issue 10, pp.1554-1562.
- 日本原子力学会 (2019) : 「NUMO 包括的技術報告書」 レビュー報告書.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－, NUMO-TR-20-03.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2022) : 先新第三紀付加体堆積岩類における地質環境特性データの取得, NUMO-TR-22-01.
- Yoshida, Y., Kitamura, A. and Shibutani, S. (2023) : Solubility of $FeSe_2(cr)$ at 318 K in the presence of iron, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 60, Issue 8, pp.900-910.

2.3.11 安全評価情報管理ツールの高度化

永井 翔 浜本 貴史 森 千穂

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

特定のサイトを対象としたセーフティケースの作成においては、調査の進展に伴うデータの追加とこれに基づく処分場の設計及び安全評価解析の更新を繰り返し行うことが想定される。そのため、処分場の品質を確保するうえでは、調査・設計・安全評価に関する膨大な知識・情報・データについて、各分野にまたがる多くの関係者が共有しながら、適切に更新・管理を行うことが重要である。このうち安全評価においては、地質環境情報や設計仕様が更新される都度、セーフティケースにおける影響箇所抽出や更新された情報を用いた解析、セーフティケース文章への反映などの膨大な作業を、これらの品質を確保したうえで実施する必要がある。しかし、安全評価の各プロセスは複雑に関係し合っているため、調査段階の限られた時間で品質高く更新作業を実施するためには、相互に関連する知識・情報・データの更新・管理を効率的に行うためのツールの整備が不可欠であり、NUMO は、安全評価の情報管理を支援する「安全評価情報管理ツール（以下、情報管理ツールという）」の開発を2021年度から開始した。開発は、以下（1）～（3）の安全評価の手順に沿って段階的に進めている。

- （1） シナリオの作成と解析ケースの設定
- （2） 線量評価
- （3） セーフティケース文章への反映

2021年度には、主に（1）を対象とし、関連する膨大な知識を関係者が容易に取得できるよう、視覚的に分かりやすい図表（フロー図やストーリーボード）を用いて知識を整理する機能を有する情報管理ツールのプロトタイプを作成した（NUMO, 2022）。2022年度から2023年度にかけては、このプロトタイプを機構職員が試行的に利用し、主にユーザーの利便性の観点での課題を抽出した。

本業務は、2021年度に開発した情報管理ツールのプロトタイプについて、抽出した課題を解決するため、図1に示すa～fの機能を追加的に実装することを目的とした。aとbは（2）、cとdは（3）を扱うために必要な機能であり、eとfは機構内での試行により具体化された改良点である。

2. 主な成果

情報管理ツールの設計においては、2021年度に作成したプロトタイプをベースとして、a～fの機能を有するようにツール全体の設計を行った。情報管理ツールでは、データの追跡性の確保、データの更新に伴う影響箇所抽出の効率化のために、表1に示す解析ファイルやセーフティケース文書などの各データを適切に関連付けることが重要である。大量のデータを取り扱う調査段階においては、データに関連付けを、品質を確保しながら効率的に実施する必要がある。このため、本業務で開発したツールは、データ同士を直接的に関連付ける設計とせず、各データにタグと呼ばれる共通のキーワードを付し、これを介した間接的な関連付けを行う設計とした。新規データを格納する際、前者の手法では新規データと既存データの間を、すべて確認し関連付けする必要があるものの、後者では、新規データにタグを付けるだけで既存データと自動的に関連付けられ、品質高く効率的な作業が可能となる。タグを用いたデータの関連付け及び影響箇所の抽出の例を図2、図3に示す。図2は、分

割したセーフティケース文書に対して設定したタグの例であり、「母岩」や「物質移行特性」など、ファイルの内容に関連するタグを複数設定することができる。図 3 は、指定したタグの付いているファイルを一括で検索した結果の例である。「母岩」というタグを用いて検索を行うことにより、母岩に関連する記述のあるファイルが自動的に抽出される。これらの機能を用いることによって、情報が更新された際に、その影響を受ける箇所を効率的に把握することが可能となる。

また、作成した情報管理ツールが図 1 に示す a～f の機能を有しており、更新箇所を漏れなく抽出することが可能か確認するためのテストを実施した。具体的には、NUMO が検討した横置き・PEM 方式の高度化（NUMO, 2024）に係る仕様変更に応じた安全評価の更新をユースケースとし、情報管理ツールによる更新箇所の抽出結果と機構職員が人力で抽出した更新箇所を比較した。情報管理ツールには、あらかじめ包括的技術報告書本編 6 章を分割した Word ファイル及び解析フロー図を格納してタグ付けを行い、タグによる検索によって更新箇所を抽出した。結果として、情報管理ツールを用いて抽出された更新箇所は、NUMO（2024）付属書 14 に示した影響分析の対象とすべき統合 FEP に関連する箇所を網羅しており、セーフティケース更新作業の効率化の見込みが得られた。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書（NUMO, 2021）の本編 6.6.2 項（信頼性向上に向けた取り組み）について、情報管理ツールをさらに高度化し、利用することにより、シナリオ構築から核種移行解析ケースの設定までのプロセスにおける判断の経緯や結果を、その論拠も含めて一貫性をもって効率的に管理することができ、サイト調査段階における包括的技術報告書の更新についてより高い品質確保が可能となると考えられる。

4. 今後の展開

本業務で実施した高度化により、情報管理ツールは 1. に示した安全評価の手順（1）から（3）を支援するための一通りの機能を有するツールとなった。今後は、より実運用に近い形で試行を行い、精密調査段階でのツールの実運用に向け、整備を進めていく。具体的には、作成した情報管理ツールに、表 1 に示す包括的技術報告書の付属書の Word ファイルや解析入出力ファイルなどのデータを格納しタグ付けを行ったうえ、更新作業の試行を行う。また、概要調査段階で得られる特定のサイトに関する情報も格納する。これを用いた試行を通じて、実用性の観点から改善点を抽出し、情報管理ツールのユーザーインターフェースの改良や情報管理ツールの運用方法の検討を実施する。

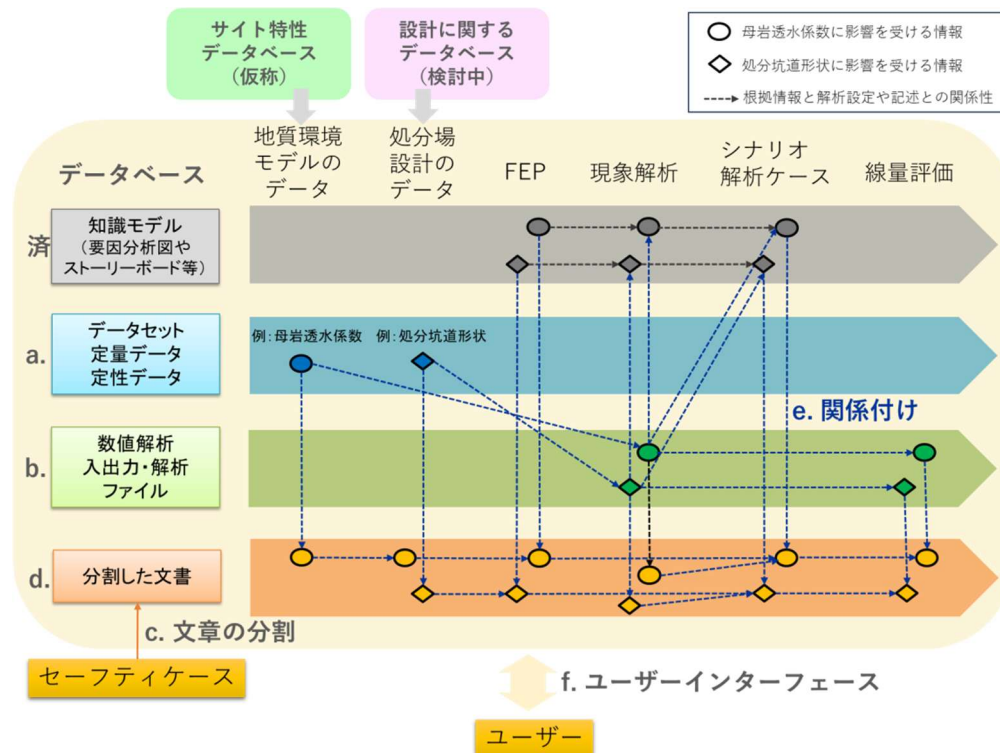


図 1 安全評価情報管理ツールに追加的に実装する機能のイメージ



図 2 1つのファイルに対するタグ付けの例

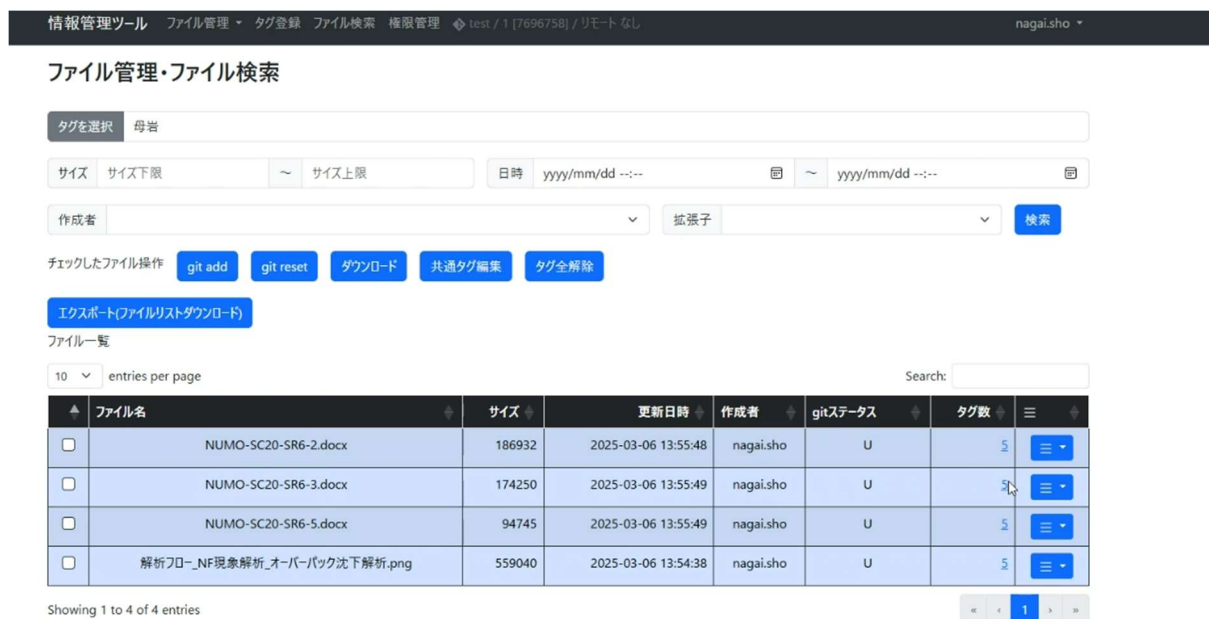


図 3 タグによる検索を用いた更新箇所抽出の例

表 1 安全評価情報管理ツールに格納するデータの種類

区分	項目	形式
入出力ファイル	Microsoft Excel 形式のファイル, CAD データ, 画像データ 等	ファイル (種々の形式)
解析ファイル	COMSOL Multiphysics, ConnectFlow, PHREEQC, MINARET, GoldSim, AMBER, Geochemist Workbench, Partridge 等の解析コード (包括的技術報告書付属書 6-12 参照) のファイル	ファイル (実行ファイル)
セーフティケース (SC) 文書	包括的技術報告書本編, 包括的技術報告書付属書	ファイル (ワード文書)
SC 文書を分割した文章群	包括的技術報告書本編を分割した文章群, 包括的技術報告書付属書を分割した文章群	ファイル (ワード文書)
データ間の関連付けに用いるタグデータ	状態変数をはじめとした変数, 記述や解析の対象情報, 解析ケース番号, 核種移行解析パラメータ番号 等のメタデータを含む	ツール内のデータベースで保管するデータ
ファイルタグ	ファイル実体とのリンクを示すためのタグデータ	ツール内のデータベースで保管するデータ

参考文献

NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告 : わが国における安全な地層処分の実現ー

適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築一， NUMO-TR-20-03.
NUMO(原子力発電環境整備機構) (2022)：成果概要 2021， NUMO-TR-22-02
NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024)：高レベル放射性廃棄物処分における横置き・PEM 方式の高度化， NUMO-TR-24-04

2.4 技術マネジメント

将来の概要調査業務の円滑な実施と概要調査計画の策定に向けて、法令で定められた要件等に対する適合性の評価を行うための指標の設定やその確認の仕方に関する考え方、これに基づく現地調査や技術的な観点からの検討に関する実施内容の整理を昨年度に引き続き進めた。また、概要調査の実施能力を高めるため、2.1 で述べた技術開発を通じて、個別調査技術の品質・安全・工程等の管理ノウハウを技術的知見として蓄積した。自然環境調査に関しては、現地調査（物理探査、ボーリング調査等）を実施する際の環境配慮項目について整理を進めるとともに、希少動植物の生息分布に関する調査の実施内容について、一般的な情報を基に整理した。

技術開発成果の品質向上に係る取組については、評議員会からの提言、技術アドバイザリー委員会における助言等を技術開発業務へ反映するとともに、技術開発成果の品質・信頼性の向上を目的とした品質保証プロセスの体系的な考え方の整理を継続的に実施した。

地層処分技術に関する情報発信については、論文発表、学会発表、技術報告書公表等を継続して実施するとともに、機構ホームページの技術開発トピックスにおいても公表した。この際、幅広い学術分野への情報発信を目指し、機構との接点が少なかった公益社団法人日本地下水学会、一般社団法人全国地質調査業協会連合会、一般社団法人日本環境測定分析協会などでの発表を行った。加えて、原子力学会（2024 年秋の大会）のブースに出展し、原子力の知識を有する学生や原子力関連企業に対して、地層処分の概要や文献調査の進捗状況を発信した。一般の方々に向けては、地層処分の安全確保の考え方や安全性を評価する方法を説明した動画を作成した。また、地層処分についてより深く考えていただく機会を考えるきっかけを提供することを目的として、技術の継承や地層処分事業に関与する魅力について海外の専門家から発信していただくための海外の専門家によるオンライン講演会¹を開催し、研究機関、大学、民間企業等から幅広い年代にご参加いただいた。

知識マネジメントについては、事業の各段階で扱う法令類、規制要件等の要件や必要となる知識の管理に向けて、各事業段階における技術的事項に関するロードマップを改良した。また、知識の効果的な活用を支援するデジタルツールの整備に向けて、関連する国際会議等への出席を通じて諸外国の状況を把握するとともに、生成 AI の導入に関するリスク対策と今後の進め方を取りまとめた。

人材育成については、対話型全国説明会（15 都市、説明会参加者累計 438 人）においては、ベテラン職員から若手職員まで累計 70 名の技術部職員がテーブルトークで対話する経験を蓄積し、技術を分かりやすく説明する能力を磨く機会となった。地層処分に関連する複数の関係機関（JAEA、電中研等）と共同でオンライン講演会をはじめとする人材育成セミナーを開催し、職員 7 名が受講するとともに、職員 3 名がセミナー講師として参加した。また、ベテラン職員からの OJT については、地層処分技術に関する技術伝承講座「地質環境のモデル化・解析について」を開催した。技術部職員の OECD/NEA への派遣を通じて、機構で培った業務スキルを発揮した結果として当該職員が所属部署の功労者として表彰され、機構として国際協力に必要な諸外国の技術全般を前提とした調整・管理能力を高いレベルで習得するとともに、国際協力に貢献し、国際人脈の拡充にも役立つ機会となった。電中研との共同研究で実施したボーリング調査技術の実証試験においては、ベテラン職員が若手職員とペアを組んで現場に駐在し、現場 OJT により安全・品質管理を指導することで、今後の現地での調査・評価を見据えた技術継承と職員育成の機会とすることができた。人材確保については、幅広い分野の技術者に関心を持っていただけるよう、地層処分事業の魅力を広く発信するほか、インターンシップや学校訪問等により、事業の進展に応じて各段階で必要となる技術者の確実かつ計画的な採用につながる取組を継続した。

¹ NUMO ホームページ (<https://www.numo.or.jp/technology/techpublicity/lecture/241122.html>)

国際連携・貢献については、地層処分プロジェクトに関する OECD/NEA, IAEA, 放射性物質環境安全処分国際協会 (EDRAM) といった国際機関等の活動に継続的に参加し国際動向の把握と国際貢献を行うとともに、海外の地層処分事業の実施主体や研究機関との共同研究の実施や国際共同プロジェクトへの参加を通じて最新の知見を取得した。特に、幌延深地層研究センターの地下研究施設を活用した幌延国際共同プロジェクト (“Horonobe International Project” (HIP)) については、3つの課題（物質移行試験、処分技術の実証と体系化、実規模の人工バリアシステム解体試験）への参画を通じて、技術力向上及び人材育成に取り組んだ（2.4.1 参照）。また、引き続き GTS における国際共同研究プロジェクト（例えば、(HotBENT, LTD (Long Term Diffusion) 等), IBL (International Bentonite Longevity project) 等の国際共同プロジェクトへの参画や Nagra, LBNL, NWMO 等との共同研究を通じて海外の先行研究や取組事例等の知見を収集し、機構の技術開発に反映した。

2.4.1. 幌延国際共同プロジェクトを活用した技術の実証

浜本 貴史 吉田 芙美子 レ アン ゴク 田窪 勇作 尾上 博則 市村 哲大 小池 彩華 永井 翔

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

幌延国際共同プロジェクトでは、OECD/NEA 協力の下、JAEA 幌延深地層研究センターの地下研究施設を活用し、先進的な安全評価技術や工学技術に関わる研究開発の成果を最大化することを目的として、(1) 物質移行試験、(2) 処分技術の実証と体系化、(3) 実規模の人工バリアシステム解体試験を実施している。各タスクの原位置試験の実施場所を図 1～図 3 に示す。これら 3 つのタスクはいずれも国際的に重要な課題である。また、地下研究施設における試験計画から得られたデータの解釈やそれらを用いた解析などを行い、諸外国の機関との議論を通じて国際的なレベルで技術の適用性とその信頼性を確認することは、事業者としての技術力向上及び人材育成の観点から価値が高い。このため、NUMO は、国際共同プロジェクトの利点を最大限に活用して、実サイトの精密調査段階における試験を合理化すること及び国際的に価値の高い成果の創出に貢献することを目的として、2023 年 4 月から、各タスクや運営委員会へ参加している。なお、2024 年度における参加機関は 8 つの国と地域の 11 機関である。

(1) 物質移行試験

フィンランドの規制機関は、実施主体に対して、岩盤中の不連続亀裂ネットワークモデル (Discrete Fracture Network モデル、以下 DFN モデルという) の信頼性を操業の許認可までに評価することを要求しており (STUK, 2015)、我が国でも同様な要求が想定される。これまでの研究開発により、1 つ 1 つの割れ目における物質移行モデルの妥当性は試験結果との対比により示されているものの (例えば、JAEA・RWMC, 2023)、それらの割れ目を組み合わせた三次元の DFN モデルを用いた物質移行モデルの妥当性を提示するまでには至っていない。このため、国内の地下研究施設における原位置試験結果を用いて、三次元の物質移行モデルの構築技術を整備するとともに、NUMO が開発した三次元核種移行解析コード (以下、「Partridge」という ; NUMO, 2011) の検証と、このコードを用いて構築する三次元物質移行モデルの妥当性やその適用限界を確認することは重要である。加えて、それらの結果を踏まえて、必要であればモデル構築技術や解析コードの改良へとつなげることも重要である。

(2) 処分技術の実証と体系化

包括的技術報告書 (NUMO, 2021) では、岩盤の変形量、湧水量、化学環境などの岩盤の特性を予測する技術や処分坑道に関する一連の設計手順、掘削により坑道周辺に生じる損傷領域が水みちとなることを防ぐための止水プラグなどを提示した。これらの技術や手順などについては、実際の地下環境に対しての適用性とその課題を明らかにすることが、今後の実サイトの精密調査段階における計画の立案や試験の合理化に向けて重要である。

特に、空洞の力学安定性が、坑道の支保工仕様や止水プラグなどの設計、並びに施工時の安全性及び合理化などに大きく関わることから、実際の調査坑道を対象とした数値解析と原位置試験結果

との比較を通じて、解析モデルや設計手順の精度向上を行っていくことが重要である。

(3) 実規模の人工バリアシステム解体試験

長期の安全評価におけるニアフィールドの状態変遷評価においては、人工バリアとその周辺岩盤の熱―水―応力―化学の状態を評価することが必要である。包括的技術報告書では、3つの地質環境モデルと2つの地下水組成に対して、人工バリアとその周辺岩盤の熱―水―応力―化学の状態を評価した。今後は、解体試験によって取得する試験データとの比較評価を通じて、実際の地下環境に対するこれらの評価技術の適用性と課題を明らかにしておくことが重要である。これにより、実サイトの精密調査段階における試験の合理化に資することとなる。

2. 主な成果

各タスクにおける機構の主な取組みを以下に記す。なお、原子力学会 2024 年秋の大会企画セッション「幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開」の総合討論において、NUMO から事業者として期待することを発表し、幌延国際共同プロジェクトに関する認知度及び価値の向上に貢献した（バックエンド部会運営小委員会、2024）。

(1) 物質移行試験

2024 年度は、図 1 に示す深度 250 m に位置する 250 m 西側第 1 ボーリング横坑周辺岩盤（以下、サイト I という）で取得した原位置データ及び 2023 年度に構築した声問層の物質移行概念モデルに基づき、主要な物質移行経路となり得る割れ目の幾何学及び水理パラメータを推定した（2.3.8 項参照）。割れ目の方向や密度、長さの分布といった幾何学パラメータについては、坑道壁面のトレース長分布が実測値を最もよく再現できるパラメータとした。割れ目の水理パラメータについては、実測値に基づき大きな割れ目ほど透水性が高い傾向があると仮定して、図 4 の右に示すように、岩盤の透水係数分布の実測値（図中の赤色）を最もよく再現できるパラメータとした。これにより、Partridge に適用する三次元物質移行モデルの構築に必要となる DFN モデルを整備した（図 4）。

また、サイト I で実施したトレーサー試験の結果のうち、各機関に提供されたウラニンの破過曲線の観測データについて、Partridge を使って再現解析を実施した。ここでは、①移流のみを考慮した解析、②移流に加えてマトリクス拡散を考慮した解析、③移流・拡散に加えて収着を考慮した解析、の三段階で解析を進めた。図 5 にそれぞれ①、②、③の解析から得られた結果を示す。ここでは観測データを再現するよう、拡散係数等のパラメータの値を決定している。この再現解析から、②の移流・拡散を考慮した解析が観測データとほぼ一致した。この解析から導出した透水係数と透水量係数は原位置水理試験の結果と整合することからも、解析結果は妥当であるといえるが、立ち上がりの形状等については検討の余地がある。また、②の再現性が高いことから、マトリクス拡散は考慮すべき重要な現象であること、③から推定された収着分配係数は非常に小さいことと③より②が実験をよく再現することを合わせると、ウラニンの収着はこの試験条件下では無視できると考えられるが、室内試験の結果を踏まえると更なる検討の余地がある。

(2) 処分技術の実証と体系化

地下研究施設における調査坑道を対象に、解析と現場観察及び原位置試験の結果を用いて設計手順や予測技術の適用性を確認し、解析モデルや予測解析の精度向上に向けた課題抽出を行っている。

2023 年度は、稚内層中の深度 350 m 調査坑道（図 2 参照）を対象に、空洞安定性解析を実施した結果、試験坑道 No.3 の側壁の掘削損傷領域は、側壁についておおむね観察値と整合的な結果となったが、底部については観察値より小さい結果となった。これらの傾向は、他の機関（JAEA、韓国原子力研究所）の解析と一致していた。

2024 年度は、事前予測解析の一環として、深度 350 m 調査坑道と同様に、深度 500 m に掘削した試験坑道 No.8, No.9（図 3 参照）の掘削順序（No.9, No.8）を考慮した空洞安定性解析を実施した。その結果を深度 350 m 調査坑道の解析結果と併せて図 6 に示す。試験坑道 No.3, No.8, No.9 の掘削損傷領域は側壁でそれぞれ 0.74 m, 1.25 m 及び 1.15 m で、底部で 0.65 m, 1.08 m 及び 1.11 m となり、いずれも深度 350 m 時よりも大きくなった。これは、深度増加による地圧の上昇が主な要因であると考ええる。なお、解析に用いた両深度での岩盤強度はほぼ同等であった。

(3) 実規模の人工バリアシステム解体試験

2023 年度より引き続き、人工バリア性能確認試験のモニタリングデータが参加機関に共有され、モニタリングされた緩衝材や埋戻し材の温度分布変化や飽和度分布変化の結果に基づき、2026 年より開始する解体試験実施計画案について議論を行った。また、実規模試験における熱—水—応力—化学場の状態変遷を評価するための連成解析技術適用の準備作業として、人工バリア性能確認試験において緩衝材として用いているクニゲル V1-珪砂混合体を用いた室内要素試験（膨潤圧試験、膨潤変形試験、浸潤試験、温度勾配下水分拡散試験）を対象に解析評価のベンチマークテストを各参加機関で開始した。

3. 包括的技術報告書への影響

(1) 物質移行試験については、包括的技術報告書（NUMO, 2021）では Partridge が長期安全性評価に大きな役割を果たしており、この解析コードやモデルの信頼性を補強する根拠として、幌延国際共同プロジェクトの成果に基づき、本編 6.4.1 項（基本ケースに対する核種移行解析と線量評価結果）及び付属書 6-14（ニアフィールドスケールにおける三次元地下水流動・粒子追跡解析）を更新することを検討する。

(2) 処分技術の実証と体系化については、幌延国際共同プロジェクトの成果に基づき、本編 4.5.2 項（坑道の設計）及び付属書 4-34（高レベル放射性廃棄物処分場における処分坑道の空洞安定性の評価）において、掘削損傷領域の幅や透水性に関する予測解析及び地下施設の設計要件に対する判断指標と基準（NUMO, 2021）を実際の地下施設に適用した事例として追記することを検討する。

(3) 実規模の人工バリアシステム解体試験については、幌延国際共同プロジェクトの成果に基づき、本編 6.3.1 項（処分場閉鎖後のシステムとしてのふるまいに関する記述）において、処分場閉鎖後のシステムとしてのふるまいを記述する際の論拠として追記することを検討する。

4. 今後の展開

(1) 物質移行試験

2024 年度に構築した DFN モデル及び推定した水理特性・物質移行パラメータを基に、Partridge を使ってサイト I とは異なる領域で実施するトレーサー試験の予測解析などを実施する。2024 年度に明らかにした課題を踏まえ、予測解析の結果と実測値との比較を行い、物質移行モデルの妥当性確認に関する検討を実施する。検討の余地のあった破過曲線の立ち上がり形状等の改善について

は、モデルを改良したうえで再度解析と検討を実施する。また、2025年度以降に実施する岩盤の水理地質調査、トレーサー試験、室内試験等の試験計画の策定と取得されたデータの解釈に関する国際的な議論に引き続き貢献する。

(2) 処分技術の実証と体系化

底部の掘削損傷領域を小さく評価する要因などを含め、予測解析技術の向上に向けて、深度 500 m の坑道掘削時に得られる原位置試験結果を反映した再解析と観測データの比較を進め、解析モデルの適用性確認と改善を図る。また、2025 年度以降に実施する深度 500 m の調査坑道の掘削、埋戻し、止水プラグ設置といった一連の施工技術の実証に関しても、引き続き議論に貢献する。

(3) 実規模の人工バリアシステム解体試験

引き続き、モニタリングデータに関する情報収集を進めるとともに、人工バリア性能確認試験の解体試験計画の策定に貢献する。また、室内試験を対象としたベンチマークテストで適用性を確認した連成解析技術を用いて、モニタリングデータや解体後に得られるデータとの比較評価を実施し、人工バリアとその周辺岩盤の熱－水－応力－化学の状態評価に関する解析技術の妥当性確認を行う。

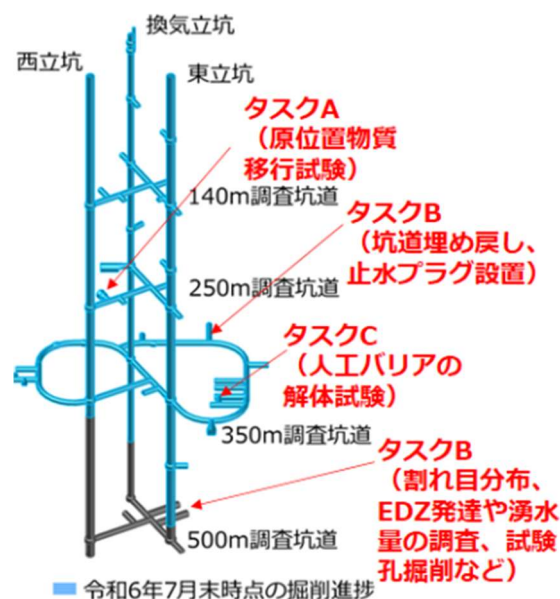


図 1 幌延深地層研究センターにおける原位置試験実施場所（青柳・館，2024）

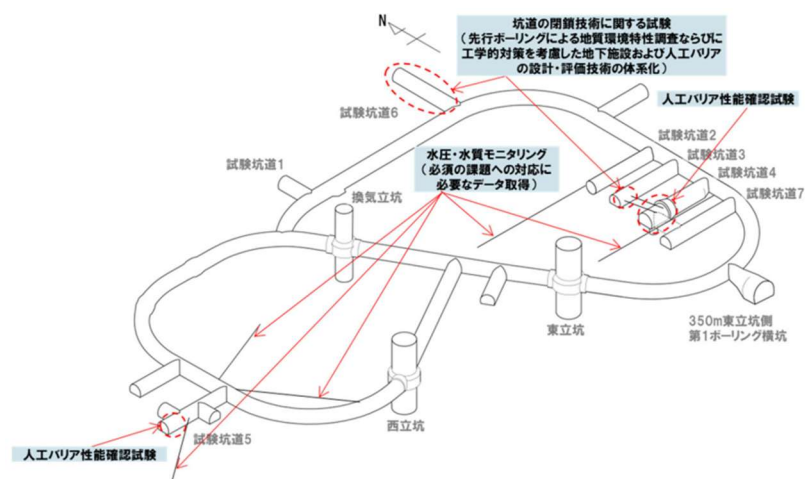


図 2 350 m 調査坑道における主な調査研究の実施場所 (JAEA, 2025)

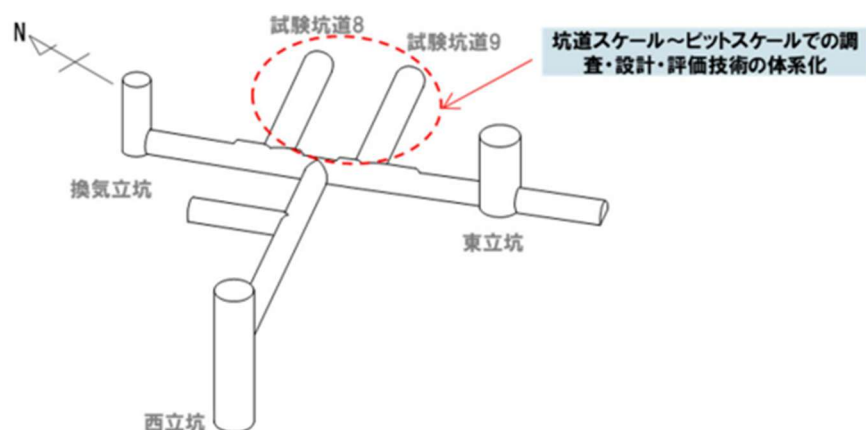


図 3 500 m 調査坑道における主な調査研究の実施場所 (JAEA, 2025)

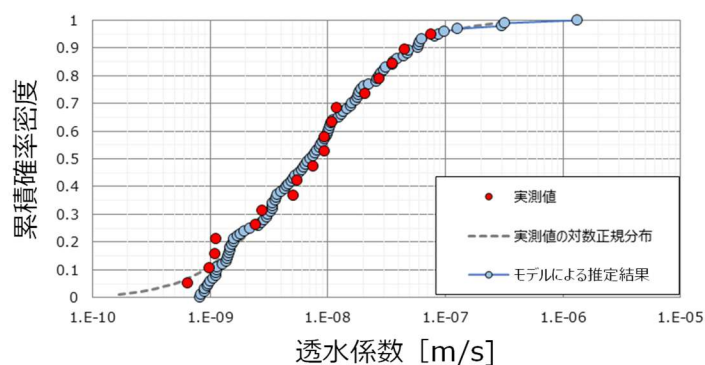
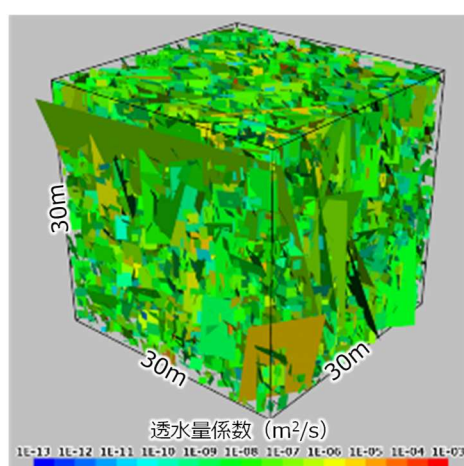


図 4 DFN モデル (左) と岩盤の透水量係数分布の実測値とモデルによる推定結果との比較 (右)
(DFN モデル: 幌延深地層研究センターの 250 m 調査坑道に位置する西側第 1 ボーリング横坑周辺の声間層を対象に構築)

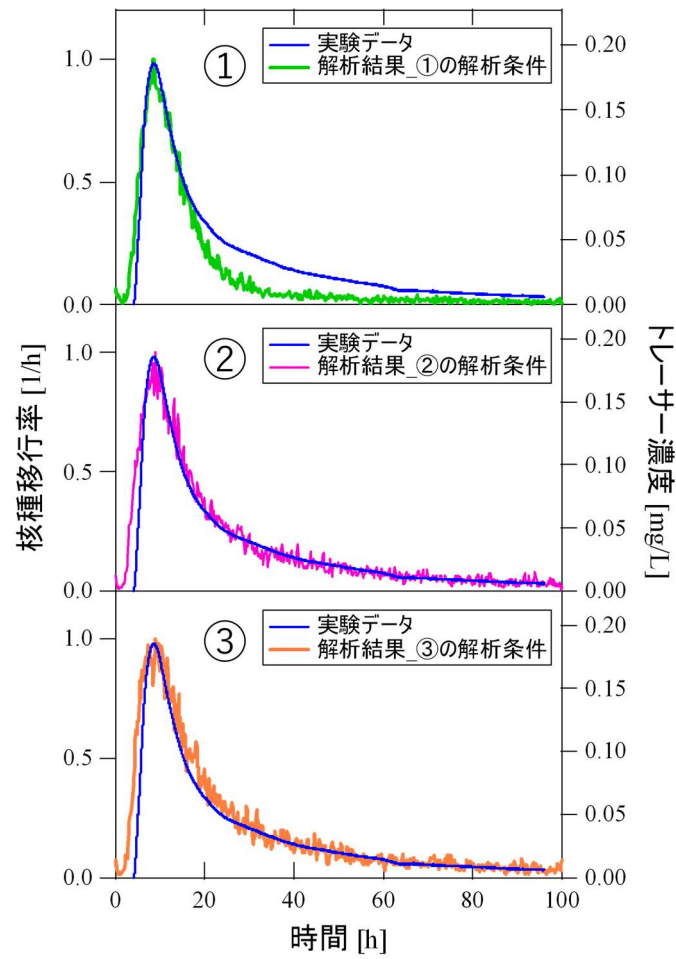


図 5 Partridge を用いた再現解析の結果

((①移流のみを考慮した解析結果, ②移流に加えてマトリクス拡散を考慮した解析結果, ③移流・拡散に加えて収着を考慮した解析結果を示す))

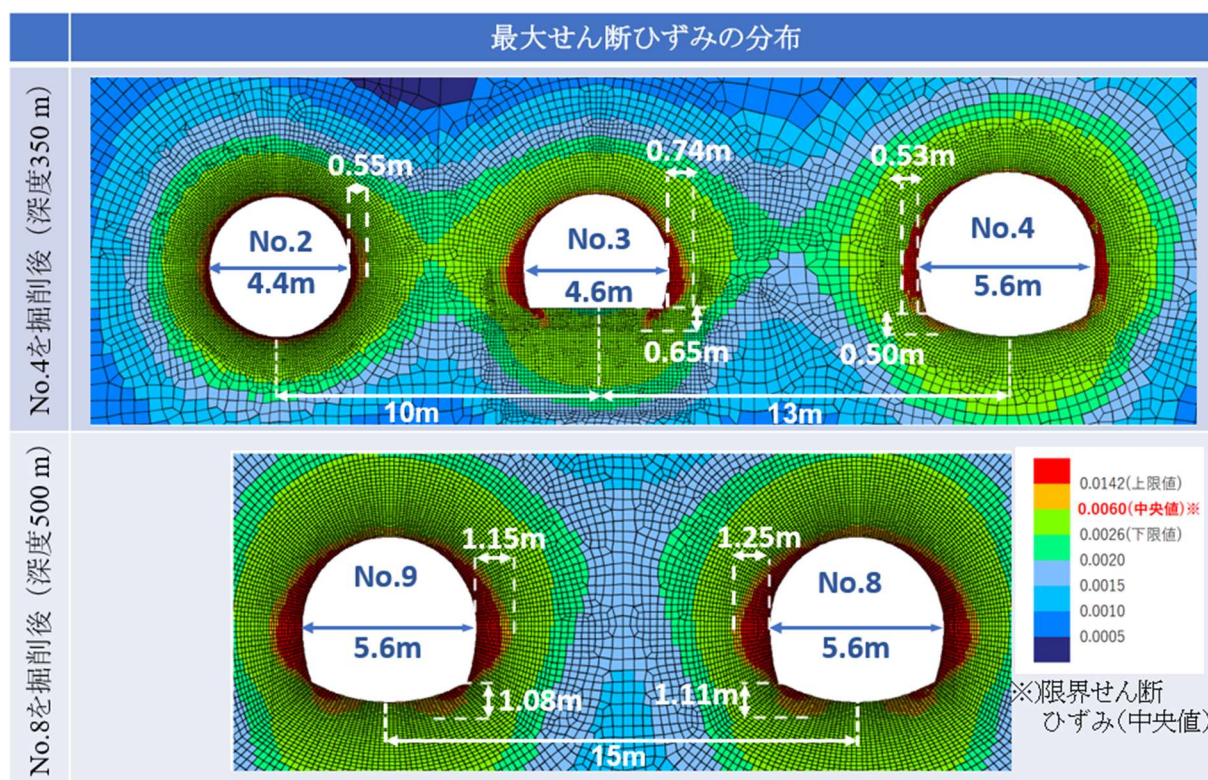


図 6 空洞安定性解析に基づく掘削損傷領域の評価結果

参考文献

- 青柳和平, 舘幸男(2024): 幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開 (1) 幌延深地層研究計画における国際共同プロジェクトの重要性, 原子力バックエンド研究, Vol.31, No.2, pp.124-127.
- バックエンド部会運営小委員会(2024): 幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開 (5) 総合討論, 原子力バックエンド研究, Vol.31, No.2, pp.144-147.
- JAEA(日本原子力研究開発機構), RWMC(原子力環境整備促進・資金管理センター)(2023): ニアフィールドシステム評価確証技術開発, 平成 30 年度～令和 4 年度取りまとめ報告書, 令和 5 年 3 月.
- JAEA(日本原子力研究開発機構)(2025): 幌延深地層研究計画 令和 7 年度調査研究計画, 令和 7 年 4 月.
- NUMO(原子力発電環境整備機構)(2011): 地層処分事業のための安全評価技術の開発 (II) 一核種移行解析モデルの高度化一, NUMO-TR-10-10.
- NUMO(原子力発電環境整備機構)(2021): 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー, NUMO-TR-20-03.
- STUK (2015): STUK's review on the construction license stage post closure safety case of the spent nuclear fuel disposal in Olkiluoto, STUK-B 197 / NOVEMBER 2015.

第3章 おわりに

地層処分技術の開発を継続的に進めるため、本書では2024年10月公表の「技術開発成果概要2023」に続き、NUMOが2024年度に実施した個々の技術開発やその成果の概要を簡潔に紹介した。NUMOの技術開発は、国内外の研究機関や大学、海外の地層処分実施主体との共同研究や地下研究施設を活用した国際共同プロジェクト等への参画のほか、国内の産業界に外部委託して進めている。本書で示した成果の概要が、NUMOの技術的取組みに対する幅広い理解の促進と興味・関心の高まりに通じることを期待する。特に将来の地層処分事業を担う次世代の若者や学生にとって、地層処分事業に関わる技術開発の魅力を伝える一助になることを願っている。また、本書を通じて技術情報を積極的に公開し、様々な分野のステークホルダーとのコミュニケーションがより円滑に進むよう、今後も工夫と改善に取り組んでいきたい。

2024年度は、国の全体計画（令和5年度～令和9年度）及びNUMOの中期技術開発計画（2023年度～2027年度）の2年度（2年目）である。NUMOは、引き続きこれらの計画に沿って具体的な技術開発に取り組む一方で、当該年度の成果をセーフティケースの信頼性向上に向けて活用していく。

NUMOは、今後も関係研究機関、大学及び産業界と積極的に協力するとともに、国際協力をより一層進め、安全な地層処分の実現のためにより信頼性の高い技術の開発に取り組んでいく。

原子力発電環境整備機構

(略称：原環機構)

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)