

技術開発成果概要 2022

2024年5月
原子力発電環境整備機構

2024年5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) 2024

技術開発成果概要 2022

2024 年 5 月
原子力発電環境整備機構

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・評価技術及びモデル化技術の高度化.....	5
2.1.1 四次元地質環境モデルの構築技術の整備に係る検討.....	6
2.1.2 地質環境データの品質評価手法の高度化（2022）.....	10
2.1.3 物理探査の最適化のための既存物理探査データの再解析.....	13
2.1.4 レーザーを利用した地下水水質計測技術の高度化.....	20
2.1.5 断層及び断層破碎帯における水理・力学的挙動の把握に関する試験研究.....	23
2.1.6 概要調査に向けた地質環境調査・評価技術の体系化及び高度化.....	27
2.1.7 ボーリング孔を利用した地下水の水圧・水質・温度に係るモニタリング技術の高度化.....	31
2.2 処分場の設計と工学技術の体系的な整備.....	34
2.2.1 処分容器の長期腐食寿命評価の信頼性向上のための検討.....	36
2.2.2 銅コーティングオーバーパックの耐食性評価.....	40
2.2.3 緩衝材中の微生物活性に関する試験研究.....	43
2.2.4 TRU 等廃棄物の回収技術に係る技術的根拠の整備.....	47
2.2.5 PEM 方式を適用した TRU 等廃棄物の人工バリア設計に係る技術的根拠の整備.....	51
2.2.6 高レベル放射性廃棄物に係る PEM の製作・施工技術の適用限界の把握.....	55
2.2.7 炭素鋼オーバーパック溶接時の残留応力低減方法の検討.....	60
2.2.8 銅コーティングオーバーパックの製作技術の開発.....	64
2.2.9 アクセス坑道内搬送システムの安全設計.....	68
2.2.10 処分場の坑内湧水量等解析・評価技術の適用性に関する検討.....	72
2.2.11 スウェーデン・キルナ鉱山のベントナイト事例調査.....	76
2.2.12 操業期間中の What if シナリオに対する被ばく評価の試行.....	80
2.3 閉鎖後長期の安全性の評価に関する技術の高度化.....	86
2.3.1 オーバーパック及びセメントとの相互作用による緩衝材の長期変質挙動の研究.....	87
2.3.2 ベントナイトコロイド影響評価に関する研究.....	91
2.3.3 割れ目が卓越した母岩中の核種移行モデルに関する原位置試験データを用いた妥当性確認.....	95
2.3.4 TRU 等廃棄物の安全評価における核種溶出モデルの改良に関する研究.....	98
2.3.5 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の拡充.....	102
2.3.6 ガラス変質層による溶解速度の低減現象に係る根拠情報の拡充.....	104
2.3.7 原位置試験データを用いた THMC（熱－水－力学－化学）連成現象評価技術の高度化に関する研究.....	109
2.3.8 割れ目ネットワークを対象とした物質移行モデルの妥当性評価.....	113
2.3.9 施設設計等を反映した評価のための核種移行解析モデルの改良.....	118
2.3.10 地下水流動場の広域的变化を反映した粒子追跡解析コード Partridge の改良.....	122
2.3.11 セメント系材料成分による坑道近傍の母岩割れ目の閉塞に伴う水理場・化学場の変化を反映した核種移行評価技術の整備.....	126

2.3.12	地下浅層から地表の環境を考慮した生活圏評価モデルの構築.....	132
2.3.13	生活圏評価に係るパラメータ設定のためのデータ取得.....	137
2.3.14	土壌分配係数の取得手順書の外部レビューの実施.....	140
2.3.15	地層処分における廃棄体の放射能インベントリ設定手法の検討.....	142
2.4	技術マネジメント.....	148
2.4.1	要件マネジメントシステム・知識マネジメントシステムの検討.....	149
2.4.2	規制要件とその考え方を中心とした海外情報の収集と整理.....	151
2.4.3	セーフティケースのコミュニケーションに関する検討.....	154
第3章	終わりに.....	157

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 NUMO が実施する技術開発によって進められており、これらを進めるうえで5年ごとに、我が国全体の開発計画として「地層処分研究開発に関する全体計画」（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」（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、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。

2020年11月から北海道の寿都町及び神恵内村で開始した文献調査においては、「文献調査計画書」に基づき収集した文献・データから抽出した情報を用いて、特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（最終処分法）に定められた要件に照らした評価及び地層や岩体、断層等の分布といった地下の状況の取りまとめと地質環境特性の検討を行った。また、最終処分法に定められた要件に照らした評価における考え方については、NUMO 作成の「文献調査段階の評価の考え方（案）」が国の地層処分技術ワーキンググループ（以下、「技術WG」という）で技術的・専門的な観点から審議され、意見公募の後、国によって「文献調査段階の評価の考え方」が公表された（2023年11月）。NUMO はこの「文献調査段階の評価の考え方」に基づき、文献調査の結果について最終処分法に基づく報告書（案）を取りまとめ、技術WGに付議・公表した（2024年2月13日）。

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し、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。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取りまとめた「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—」（レビュー版）と題する技術報告書（以下、「包括的技術報告書」という）については、日本原子力学会によるレビュー結果¹等を踏まえ改訂した包括的技術報告書²を2021年2月に公表している。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、同報告書の技術的妥当性や技術的信頼性について国際社会に向けて英語版を公開するとともに、経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）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の英語版³は2023年1月、日本語翻訳版⁴は2023年5月にOECD/NEAのホームページ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、これをどのように活かしていくかについて取りまとめ、NUMO ホームページ上に公表した⁵（2023年6月）。

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

2 NUMO ホームページ (https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/tr180203.html)

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

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

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

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。ここから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し、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・評価技術及びモデル化技術の高度化」、 「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」を加えて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専門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す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 が行った技術開発成果は、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していくとともに、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、広く社会に発信していくこととしている。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、上記の四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あり、2022 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関わっていただいた関係研究機関や大学、企業等の関係者には、多大なご支援・ご協力をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表す。

(編集：西崎耀，藤木美千代，岡本旭生，高橋美昭)

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
- 原環センター
公益社団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター, Radioactive Waste Management Funding and Research Center
- 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
- 日本保健物理学会
一般社団法人 日本保健物理学会, Japan Health Physics Society
- NUMO
原子力発電環境整備機構, Nuclear Waste Management Organization of Japan
- QST
国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構, National Institutes for Quantum Science and Technology

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)
- LBNL
Lawrence Berkeley National Laboratory, ローレンス・バークレー国立研究所 (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, カナダ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)
- RWM
Radioactive Waste Management, 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)

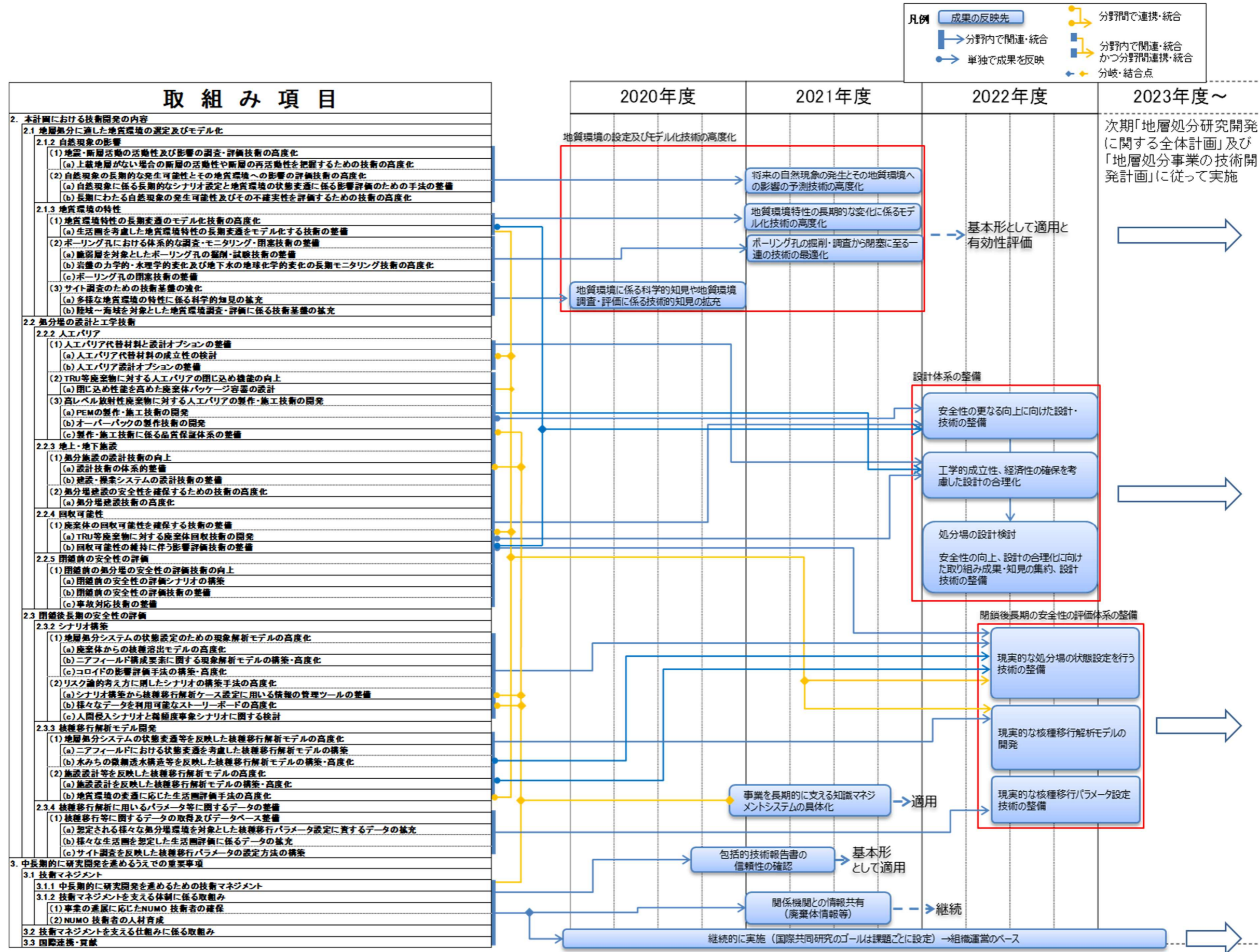


図1 中期技術開発計画における各取組みの相互関係図

第2章 技術開発成果の概要

2.1 地質環境の調査・評価技術及びモデル化技術の高度化

地層処分に適した地質環境を選定するための調査・評価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、サイト調査を見据えて、地上物理探査、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（2.1.3, 2.1.4 及び 2.1.7 参照）。

具体的には、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、断層を対象としたボーリング孔を用いた原位置試験及びコア試料を用いた室内試験の計画を策定するとともに、ボーリング孔の掘削、物理検層、断層の変位・間隙水圧・地震波等の観測装置の設置及び作動確認試験を実施し、観測装置が正常に作動していることを確認した（2.1.5 参照）。

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に反映することを目的として、深部流体の処分場への流入の可能性やその影響の評価に必要な過去の熱水活動に係る情報の収集・整理を進めた。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、処分場の設計及び安全評価の基盤情報とするため、モデルの構築方法や妥当性確認方法、処分場の設計及び安全評価に利用する際の考え方の整理に取り組んだ（2.1.1 参照）。

我が国の多様な地質環境特性を対象とした調査・評価技術を体系的に整備するため、電中研との共同研究により、電中研横須賀地区において大深度ボーリング実証試験を継続し、脆弱な地層を対象としたボーリング孔掘削、孔内試験及び関連する室内試験に関する方法論や最適化に関する知見を蓄積するとともに、それらの成果を共同研究報告書に取りまとめ、プロジェクトを完了した（2.1.6 参照）。また、ボーリング調査の一環として実施する室内試験に関し、NUMO と Nagra における品質管理・品質保証手法の比較検討を行い、両者の違いを明らかにするとともに、NUMO の品質管理・品質保証手法の改善点を抽出した（2.1.2 参照）。ボーリング孔閉塞技術に関わる Nagra 及び NWS, RWM との協定に基づく情報交換を継続するとともに、これを踏まえて、ボーリング孔内に金属プラグを設置する装置の開発、試験場における閉塞材の性能に係る原位置試験を実施し、技術の適用性・有効性に関する知見の蓄積を図った。

サイトでの地質環境調査により取得するデータの具体的な管理の考え方を、海外情報を参考にして整理するとともに、大深度ボーリング実証試験等の現場作業で得た安全・品質管理に関する経験やノウハウ、人材育成面での成果等について取りまとめた。

2.1.1 四次元地質環境モデルの構築技術の整備に係る検討

尾上 博則 吉田 芙美子 高畑 祐美 高林 佑灯 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し、それに基づく処分場の設計や安全評価を実施した。これらのモデルでは、時間変化を考慮していないが、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考慮した地質環境モデルの構築技術の整備が重要である。

本技術開発では、地下深部から地質圏-生活圏インターフェース (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安全評価に資することを目的として、隆起・侵食など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いる (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、並びに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)。

2022 年度は、これまでに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を目的とし、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) における 100 万年程度以前の過去から現在までの地質環境の変遷をモデル化し解析を実施した。

2. 主な成果

事例検討地域における過去数百万年間の地形・地質事象の変遷に関する情報に基づき、蓋然性が高いと考えられる地形・地質環境の長期変遷の概念化や変動条件の設定を行うことで、100 万年前から現在までの地形変化及び気候・海水準変動を考慮した四次元地質環境モデルを構築した。構築したモデルを用いて地下水流動解析、移流分散解析及び粒子追跡線解析を実施し、地形・地質環境の長期変遷の影響を受けて形成された地下水の水質や地下水年代に関する実測データと解析結果の比較・検討を実施した。その結果、本解析で推定した地下水中の塩分濃度の分布傾向は、電磁探査による比抵抗分布やボーリング孔で観測された分布とおおむね調和的であるとともに (図 2)、解析によって求められた地下水の滞留時間は、実際に測定された ^{36}Cl や ^4He のデータから推定された地下水年代と整合的であった。これらのことから、さらに事例検討を進め信頼性を高めていく必要があるものの、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が示された。

また、上記のモデル化やこれを用いた解析を通じて、四次元地質環境モデルの構築技術の適用にあ

たって実施される、地形・地質構造モデルや水理地質構造モデルの構築、地形や地質構造の時間変遷を代表する時間断面の設定、モデル化・解析結果の妥当性確認及び処分場の設計及び安全評価への反映などに関する一連の作業手順や留意点について得られた知識を文書化した（図 3）。

3. 今後の展開

2022 年度の技術開発では、事例検討地域において蓋然性が高いと考えられる地形・地質環境の長期変遷に基づくモデル化・解析を実施した。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上では、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。

今後は、引き続き四次元地質環境モデルの構築技術の妥当性確認に係る検討として、上記に示したモデルに内在する不確実性がモデルを用いた解析結果に及ぼす影響を感度解析によって明らかにし、影響の程度に応じて地質環境の長期変遷に関する不確実性を評価するための考え方や手順を整理するとともに、モデルの構築やモデルに内在する不確実性の低減に有効なデータ拡充のための調査項目や手法などについて検討を進める。

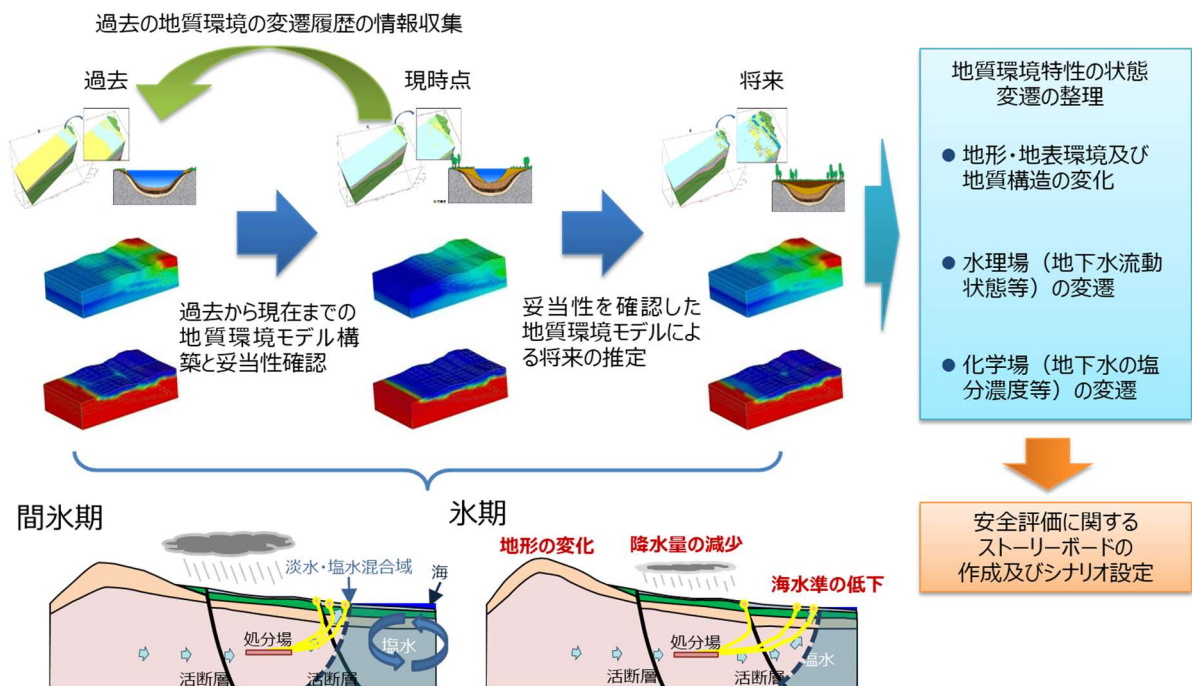


図 1 四次元地質環境モデル構築の基本的な考え方

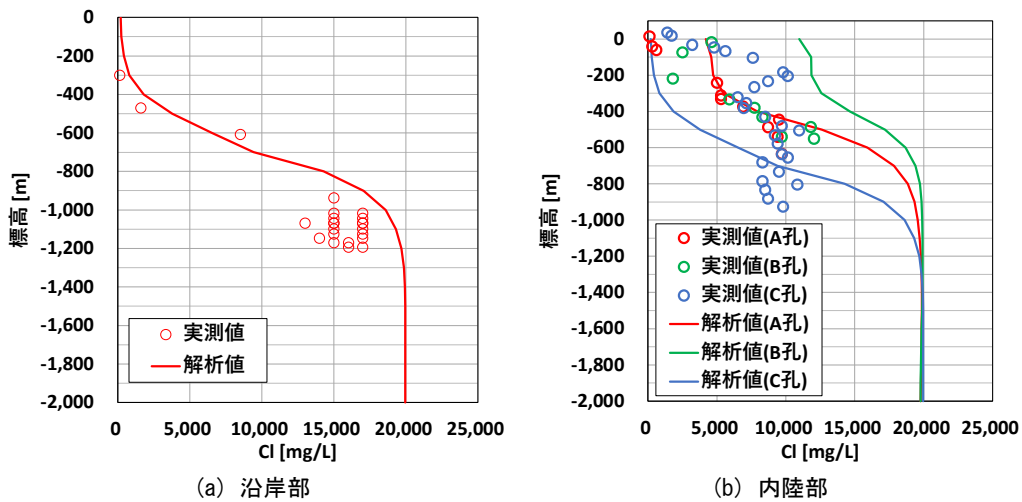


図 2 ボーリング孔での地下水の塩分濃度分布と四次元地質環境モデルによる解析結果との比較

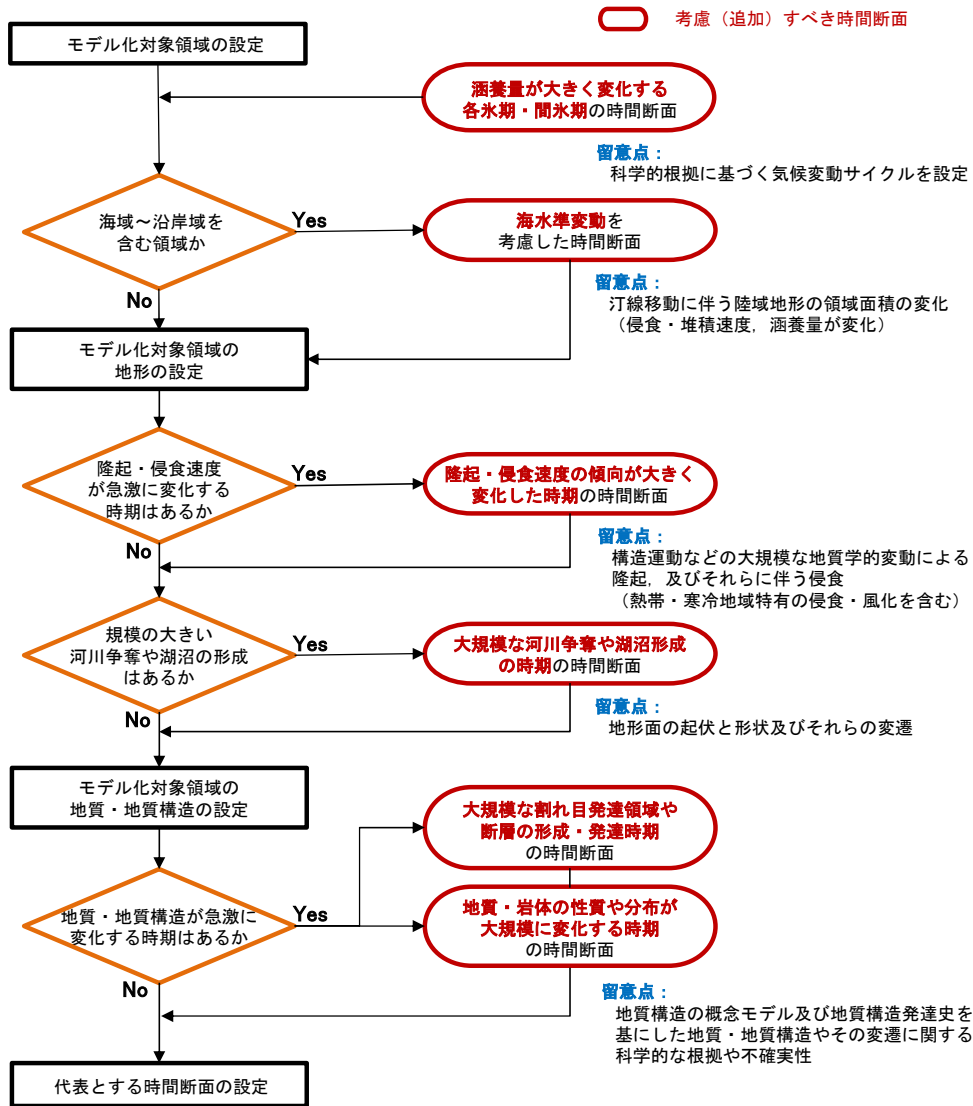


図 3 四次元地質環境モデルにおける代表的時間断面の設定手順 (文書化の一例)

参考文献

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) (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) (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.

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> (2023 年 7 月 13 日閲覧) .

2.1.2 地質環境データの品質評価手法の高度化 (2022)

松岡 稔幸¹ Armin PECHSTEIN² Andrew MARTIN² Herwig R. MÜLLER² 國丸 貴紀¹

¹原子力発電環境整備機構 ²放射性廃棄物管理共同組合 (Nagra)

1. 背景・目的

NUMO は、幌延及び瑞浪での地質環境調査の事例で蓄積された知見等を参考に、地質環境データ（地質構造、透水係数、地下水水質等）を取得する際の品質管理・品質保証プロセスを整理し、体系的な QMS（Quality Management System：以下、「QMS」という）の構築を整備することを目的に、電中研横須賀地区においてボーリング実証試験を行ってきた。2006 年度から 2014 年度において実施したボーリング実証試験では、岩石や地下水などの試料採取の目的や試料採取時の状況、試料を用いた室内試験時の記録など、品質管理・品質保証に係る情報が体系的に記録されていないなどの課題が確認された。

そこで、2019 年度から 2022 年度に実施した横須賀地区におけるボーリング実証試験（YDP-4 孔）は、ボーリング孔の掘削、ボーリング孔を利用した試験、コア試料を利用した室内試験などを対象に、既存の試験方法の適用性や有効性などの確認、及び品質管理・品質保証を体系化した QMS の構築を目的として電中研との共同研究を実施した。

また、我が国に適用可能な体系的な QMS を構築することを目的に、スイスの規制機関 (Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate : ENSI) により承認が得られているボーリング孔を利用した試験や室内試験に関する品質管理・品質保証の考え方や、地質環境データ取得に関する多くの経験やノウハウなどを有している Nagra との共同研究を並行して実施した。

具体的には、コア試料を利用した拡散試験を対象に、Nagra の品質管理・品質保証手法と、NUMO のそれとの比較検討を行い、両者の違いを明らかとするとともに、NUMO の品質管理・品質保証手法の改善点の抽出を行った。なお、当初使用する計画であった YDP-4 孔のコア試料は、膨潤性を有し、脆弱かつ破碎質であったため、拡散試験を行うための供試体の成形が困難であることが確認されたため、ジュラ紀及び白亜紀の付加体である秩父帯に位置する神流川発電所内で実施したボーリング試験（横田ほか、2022）で取得したコア試料を利用して検討を実施した。

2. 主な成果

Nagra と NUMO のそれぞれにおける拡散試験の計画や作業手順を比較した結果、以下に示す相違点を抽出し、それを踏まえた今後の室内試験時の留意点をまとめた。

(1) 室内試験に用いる岩石試料の採取計画

Nagra の大深度ボーリング調査では、品質管理・品質保証の観点から、ボーリング孔の掘削によりコア試料が地上に回収された直後から生じる応力開放、乾燥、脱ガスなどによる影響を最小限にするため、室内試験の実施項目を考慮したコア試料の採取方法やコア試料利用の優先順位などを明確化し、ボーリングコア回収、室内試験に用いるコア試料の選定・保存・輸送、及び室内試験の開始に至る時間管理を行っている。また、ボーリング調査計画の検討段階からコア試料採取計画が策定されており、実際の調査段階における試験試料採取の優先順位の変更などに係る判断の考え方も

考慮されている。

NUMO は、Nagra と同様にコア試料の採取計画やコア採取方法などを事前に策定している。しかしながら、優先度が高いコア試料以外については、コア試料の採取時期が明確ではなく、コア試料の採取から試験までに時間を要する事例が多く確認される。

このことから、コア試料採取の優先順位を明確化すること、ボーリングコアの状態に応じたコア試料採取の計画や、コア試料の優先順位を判断可能な人材を配置することにより、ボーリングコアの回収から室内試験までの時間の短縮化が図れ、より品質が高いデータを取得できるものと考えられる。

(2) 供試体の成形方法

Nagra では、粘土質岩を対象としたコア試料の膨潤を防ぐために乾式で切断・成形する方法を採用している。

NUMO は、神流川の硬質で粘土質の乏しいコア試料に対して、湿式切断を採用している。

膨潤の可能性のある岩石に対しては乾式切断が必要であり、硬岩で粘土質の乏しい岩石に対しては、湿式切断がより滑らかな平面の成形が可能であり、Nagra と NUMO は、岩石の特性に応じて適切な切断・成形方法を採用することが重要であるとの共通した認識を持っている。

(3) 間隙率測定

Nagra における拡散試験に付随する間隙率の測定は、拡散試験の初期データと拡散実験後の試料をオープン乾燥させることで実施されているとともに、予備のコア試料に対して間隙率測定が行われ、これらの異なる測定方法から、間隙率の測定値のばらつきを確認している。

NUMO における拡散試験に付随する間隙率測定では、拡散試験に使用する試料を用いて、拡散試験前に超純水を用いた再飽和とオープン乾燥により測定するとともに、別途、別のコア試料を用いた間隙率測定を行っている。

Nagra と NUMO では、オープン乾燥による間隙率の測定手順が異なっており、コア試料の種類によっては（例えば、膨潤性を有する岩石）、試料へ不可逆的な影響を及ぼす可能性があることから、岩石の特性に応じた実施手順を選択することが重要であることを確認した。

(4) 拡散試験

Nagra は、拡散試験において下流側リザーバーから高頻度のサンプリングを行うことにより、拡散試験の初期データから試験試料の間隙率と見かけの拡散係数が推定できるほか、初期のブレイクスルー現象や定常状態の確認ができ、試験全般の信頼性を高めることが可能となることから、拡散試験の初期は、1～2 日間隔で下流側リザーバーからのサンプリングを実施し、定常状態に達してからは2～3 日間隔でのサンプリングを行っている。

NUMO は、神流川のコア試料に対する拡散試験では、拡散試験時の下流側リザーバーからのサンプリングを拡散係数を求めるための必要最低数である試験期間中 3 回（1 回／月）としたが、YDP-4 孔のコア試料で予定していた拡散試験では、週 1 回程度の頻度でのサンプリングを計画している。NUMO は Nagra が実施している方法の重要性を認識しており、調査期間、取得するデータの種類や品質などを考慮し、今後の調査では、拡散試験計画の検討に反映していく。

また、NUMO の将来の調査や試験において、粘土質（膨潤性がある）岩石が含まれる場合は、

スイスにおける調査と同様のアプローチが有効であることを確認した。具体的に必須なアプローチとして、コア試料の採取と成形では、湿度や酸化還元状態の変化のような大気条件による擾乱を最小限に抑えること、拡散試験に使用する試料を用いた間隙率の測定は拡散試験後にオープン乾燥で実施すること、粘土が膨潤・崩壊するため、試料は乾式切断することなどが挙げられる。

3. 今後の展開

今後は、概要調査に向けて、本共同研究で取得した技術的知見をもとに本試験に係る一連の手順や品質管理・品質保証のための要求事項を整理し、概要調査開始までに品質管理の体系を構築する。また、実験室での拡散試験による実効拡散係数の測定方法など NUMO で検討を進めている核種移行パラメータに関する試験方法とその結果などの比較検討を行い、体系的な QMS の構築を進める。

参考文献

横田秀晴, 後藤淳一, 大城遥一, 國丸貴紀, 西尾光, 松岡稔幸, 三枝博光 (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.

2.1.3 物理探査の最適化のための既存物理探査データの再解析

松岡 稔幸 國丸 貴紀

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

NUMO は、概要調査段階において必要となる地質環境の調査・評価技術の適用性を確認するとともに、サイト調査を実施するための管理技術の整備を図ることを目的とした共同研究を電中研と実施している。この共同研究では、電中研横須賀地区において、2006 年度から 2014 年度にかけて、既存文献資料（地質図や文献情報など）の収集、地表地質踏査、地上物理探査（地震探査、電磁探査など）及びボーリング試験（YDP-1～YDP-3 孔）などの実証試験を実施し、それらの結果を統合して、電中研横須賀地区周辺における地質構造モデルの構築・更新を段階的に進めた（例えば、吉村ほか、2011；近藤ほか、2014）。また、この地質構造モデルに基づき大深度ボーリング実証試験（YDP-4 孔）を計画し、2019 年度から 2022 年度までボーリング孔掘削、及びボーリング孔を利用した孔内試験や室内試験を実施した。YDP-4 孔では、地質構造モデルによる予測と異なり、葉山層群の上位に分布する三浦層群が確認されなかった。このため、2006 年度から 2014 年度の共同研究で得られた地上物理探査データを見直したところ、これらのデータには多数のノイズが混入しており、それが解析結果に影響している可能性があることが判明した。そこで、これらのノイズを適切に除去することや、ボーリング孔で得られた物理検層データを利用することによって、既存の物理探査データの再解析・解釈を実施し、当該地区の地質構造モデルの見直しを行うとともに、最新の物理探査データの解析手法に関する知見の蓄積を図った。既存の解析で実施した標準的なデータ解析に対して、反射法地震探査の再解析では、複合的なノイズ抑制処理に基づく重合後マイグレーションのほか、地層の傾斜があることを考慮した重合前マイグレーション、及び重合効果を高めて SN 比を向上できる MDRS 法（Multi-Dip Reflection Surfaces；青木ほか、2010）などの最新の解析技術を取り入れた。

2. 主な成果

既存の物理探査データとして反射法地震探査データを用いた再解析を実施し、反射法地震探査測線沿いの反射面分布を求めるとともに、反射面分布をボーリング孔で確認された地質分布と対比するため、ボーリング孔（YDP-2～4 孔）の物理検層データ（P 波速度、密度）を用いて合成地震記録（理論的な反射波）を求めた。反射法地震探査データを用いた再解析では、表層厚や表層速度、表層基底層速度の変化に起因する影響を取り除く表層補正を行うとともに、取得データ上には屈折多重反射波、表面波及びその他のランダムノイズが混入していたことから、それらのノイズに対するノイズ抑制処理を実施し、反射面の抽出精度の向上を図った。

YDP-2 孔を利用したウォークアウェイ VSP 探査データの再解析では、反射法地震探査の再解析において実施される表層補正の結果を用いることで、VSP の反射断面の精度向上を図り、反射法地震探査で得られる反射面との対比可能な VSP 反射断面を求めた。また、反射法地震探査データ及びウォークアウェイ VSP 探査データを用いた P 波速度トモグラフィ解析を実施し、反射法地震探査測線沿い及びウォークアウェイ VSP 探査測線沿いの速度構造を求めた。

電磁探査（MT/AMT 法）データについては、ノイズの混入が多数認められ、そのようなノイズは解

析結果に影響を及ぼすことから、入力データの品質確認を行い、データの取捨選択を行うとともに、ボーリング孔（YDP-2～4 孔）の物理検層データ（電気）を拘束条件（既知情報）として利用して再解析を実施し、空間的な比抵抗分布を求めた。

これらの再解析に必要なデータセットの作成においては、観測野帳（品質管理記録のひとつ）と実際のデータを対比した結果、測量データの不一致（測点番号の不一致）や測定データの欠番、測定回数が観測野帳に適切に記録されていないこと、データ編集の過程が報告書に適切に記載されておらず、報告書に記載されたデータの図と収集した測定データに不一致が認められるなどの問題が確認された。そのため、当時のデータ取得・解析に従事した委託業者への聞き取り調査を実施し、必要に応じて新たにデータを受領するなど、再解析用のデータセットの品質を確認して必要な改善を図った。

以上の結果から三浦層群の分布を再解釈し、YDP-4 孔で三浦層群が確認されなかった理由を推定することができた。

既存の物理探査データの再解析を通じて得られた具体的な成果を以下にまとめる。

(1) 各種データの再解析による地質構造分布の再評価

- ・ 再解析結果の一例として、反射法地震探査の東西測線（EW-1）の再解析結果（反射断面）とボーリング孔データの比較及び反射断面の地質解釈結果を図 1 に示す。
- ボーリング孔データと反射断面の比較から、地表面下 30m 程度までに弱振幅で連続性の悪い反射波が卓越する領域は完新統の堆積物であると考えられる。
- 完新統の堆積物の下位には、YDP-3 孔の深度 70m 付近までにおいて確認される葉山層群の二次堆積物が、反射断面では強振幅で比較的連続性の良い反射波として確認される。さらにその下位には、YDP-3 孔で三浦層群が深度 180m まで確認されるが、対応する深度の反射断面は、弱振幅で連続性の悪い反射波が卓越し、その下位の葉山層群では、強振幅で連続性の悪い反射波が卓越している。
- 三浦層群と葉山層群に対応した反射波の特徴は、YDP-3 孔の物理検層データでも顕著であり、図 2 に示す物理検層データのうち、P 波速度と密度検層データから算出される音響インピーダンスに基づく合成地震記録を見ると、上位の葉山層群の二次堆積物と葉山層群では、振幅の強い反射波が生成されるのに対して、三浦層群ではそれらよりも弱い反射波が生成されており、反射断面の反射波の特徴と一致する。
- 三浦層群と葉山層群に対応した反射波の特徴に基づくと、三浦層群は、反射断面上の中央よりも西方には分布するものの、それよりも東方に位置する YDP-4 孔までは分布していないことがわかった（図 1）。
- 図 1 に示した反射断面は、ボーリング孔データと最も整合性が高かった重合前マイグレーションによる解析結果である。MDRS 法を適用した反射断面については、深部やデータ数の少ない測線端部において反射面の連続性の改善が図られるものであるが、振幅が増幅される傾向にあり、今回のように反射波の強弱の特徴に着目した場合には、地層境界が不明瞭となり解釈が難しくなることがわかった。
- ・ 反射法地震探査の結果と同様の傾向は、ウォークアウェイ VSP 探査の結果として得られる VSP 反射断面でも認められた（図 3 上）。
- ・ 電磁探査（MT/AMT 法）の結果では同様の傾向は認められなかった（図 3 下）。これは、電磁探査の結果として得られる比抵抗分布が、地層境界ではなく、地下水の塩分分布に対応し

ている（近藤ほか，2014）ためと考えられる。高比抵抗部（図 3 下の青色部）は淡水の分布を，それよりも低い数 Ωm 以下の分布域は，塩分濃度が高い地下水の分布を示していると考えられる。

(2) 概要調査に向けた主な知見

既存の物理探査データの再解析を通して，主に以下の知見を得た。

- 反射法地震探査で得られる反射断面は往復走時表示であるため，反射断面を深度変換する必要がある。ウォークアウェイ VSP 探査で得られる時間 - 深度曲線を用いることで精緻な深度変換を実施することができ，ボーリング孔で得られる地質情報との精度の高い対比が可能となった。また，物理検層（P 波速度，密度検層）が，反射波とボーリング孔での地質との対応評価において重要であった。このことから反射法地震探査後には，反射法地震探査測線沿いにおいてボーリング孔を掘削するとともに，VSP 探査，物理検層を実施することが反射法地震探査データの解析・解釈精度を高めるうえで極めて有効であることがわかった。
- 既存の反射法地震探査データの品質確認時に，屈折多重反射波，表面波及びその他のランダムノイズが混入していることが確認され，それらのノイズ抑制処理を実施する必要がある。このことから，データ解析時にはノイズ状況を含む品質確認を行うとともに，品質に応じた解析手法を選択して実施することが重要である。
- 既存の反射法地震探査データを用いた P 波速度トモグラフィ解析では，深度数十 m 程度の速度構造しか得られなかったため，完新統の分布以深の評価ができなかった。P 波速度構造を深部まで求め，地質構造解釈に寄与するためには，測線長を長くすることが重要である。
- 今回の再解析を通じ，現場での観測野帳と実際のデータに不一致が認められ，当時のデータ取得業者への聞き取りや現場写真から状況を推定して解析入力データの編集を行うなどの必要が生じたことから，現地でのデータ取得から解析に至る品質を追跡可能とする品質確認記録の作成と記録の妥当性を検認するような仕組みを構築しておくことが重要である。

3. 今後の展開

今後は，本検討で得られた技術的知見を技術報告書として取りまとめるとともに，これに基づいて物理探査に係る一連の手順や品質管理・品質保証のための要求事項を整理し，概要調査開始までに品質管理の体系を構築する。

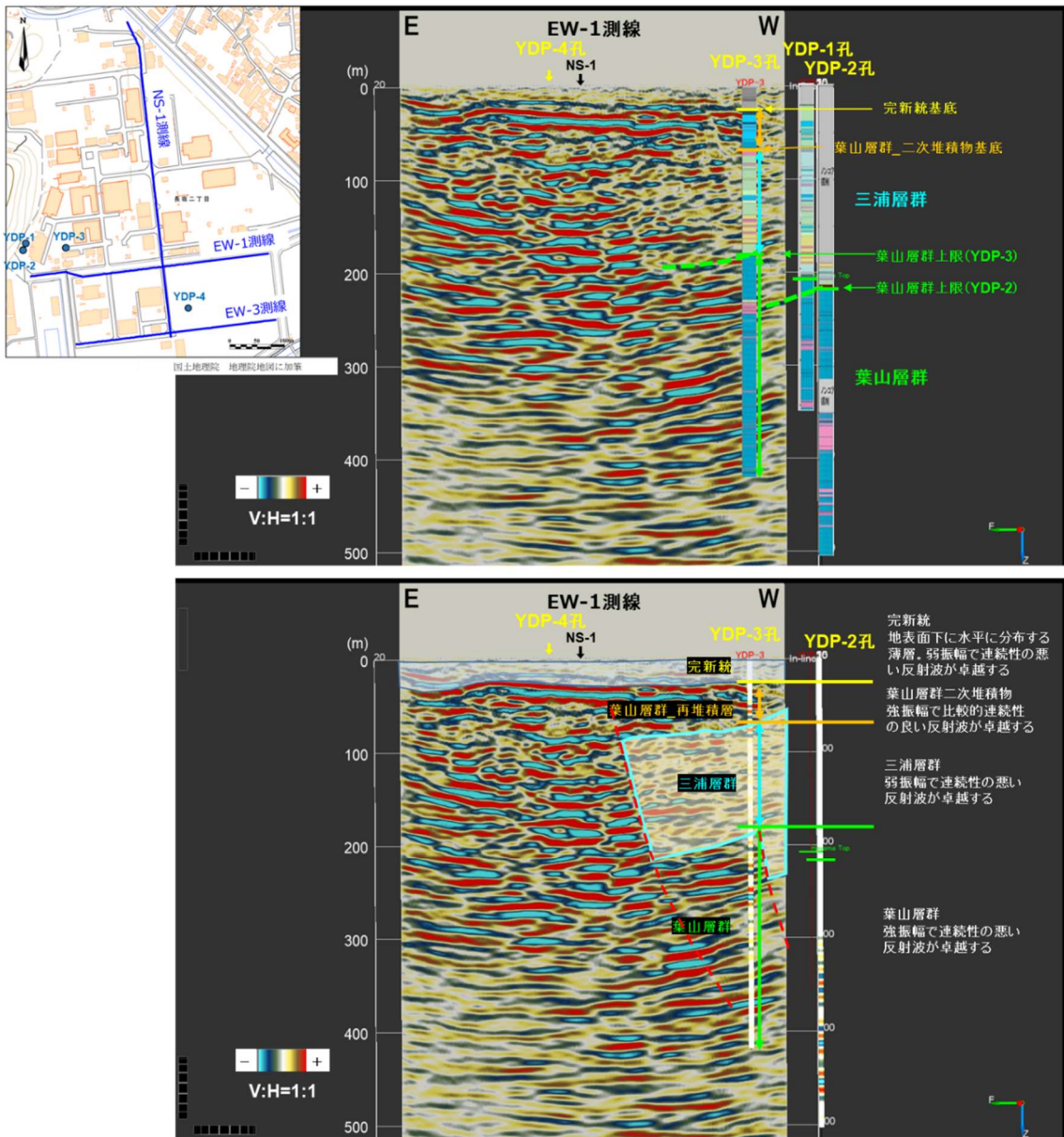


図 1 反射法地震探査の東西測線 (EW-1) の再解析結果とボーリング孔データの比較及び反射断面の地質解釈結果

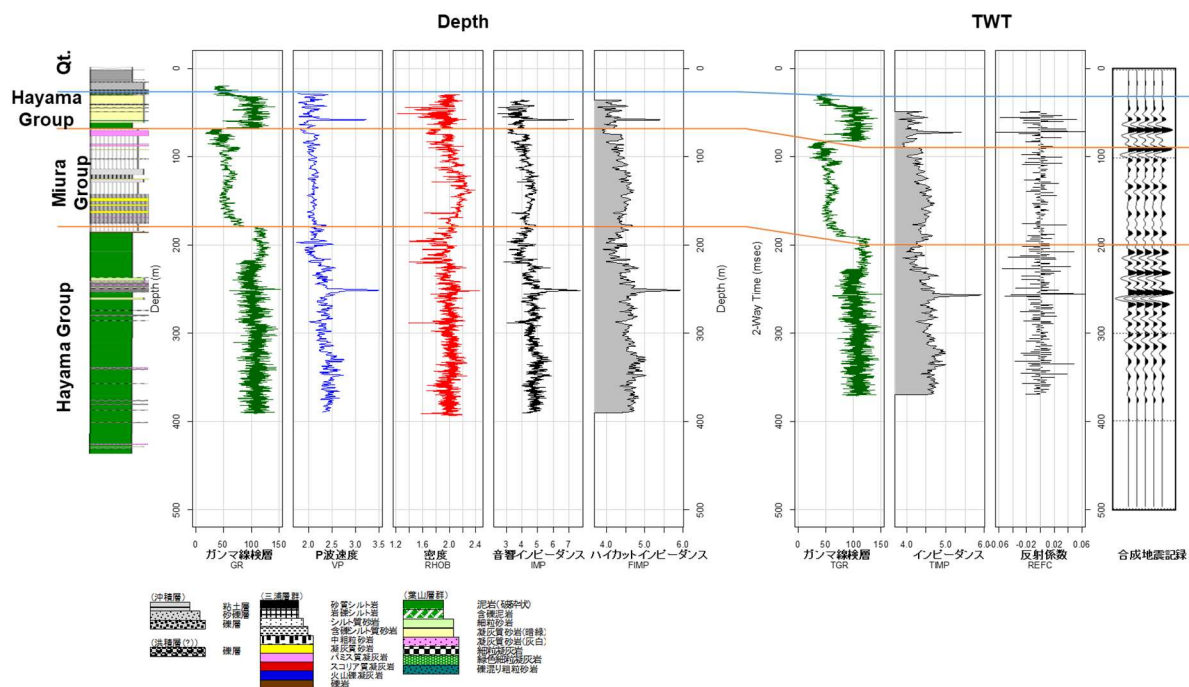


図 2 YDP-3 孔における物理検層データと合成地震記録

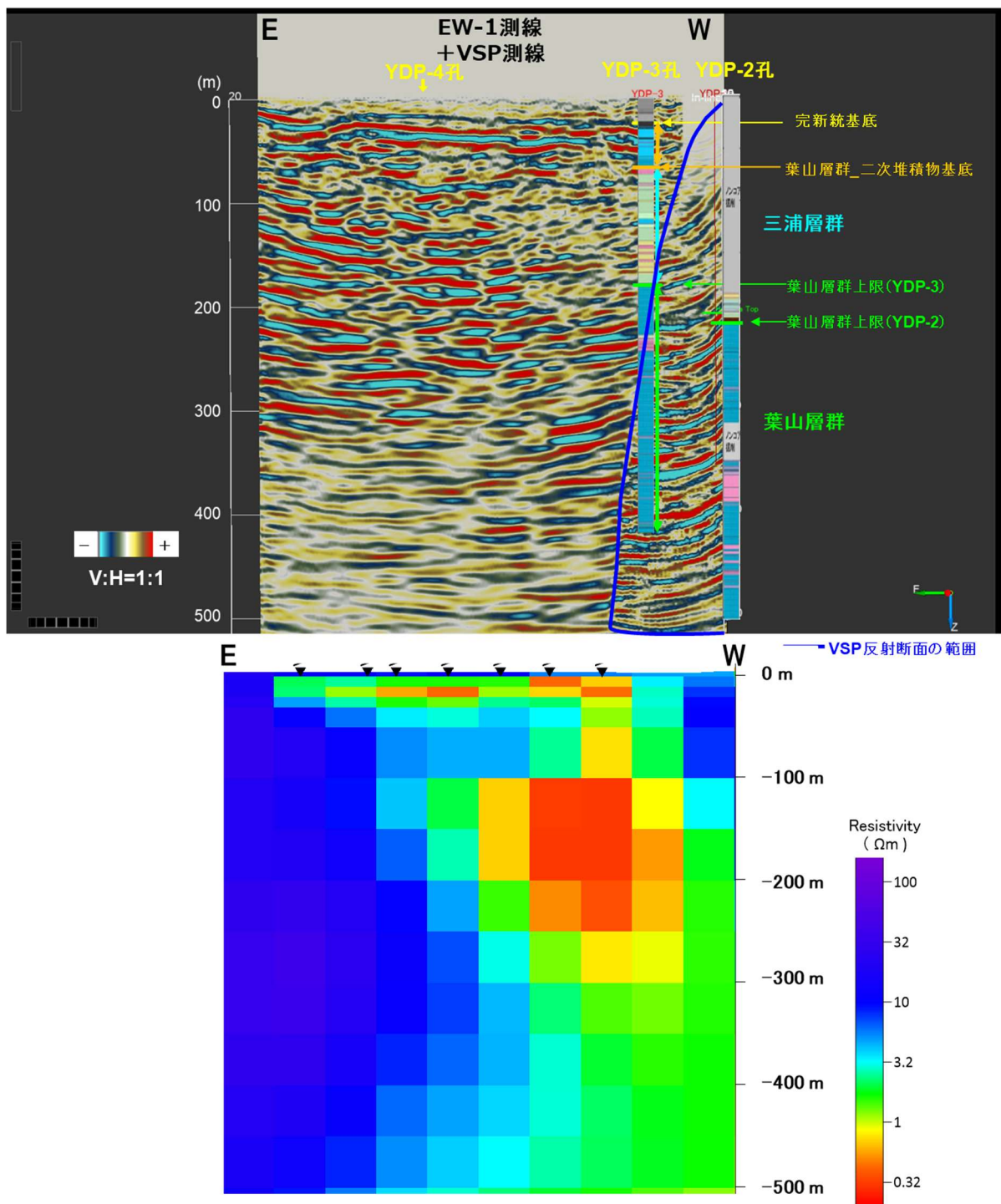


図3 ウォークアウェイ VSP 探査で得られた VSP 反射断面 (上) 及び電磁探査で得られた比抵抗分布 (下)

参考文献

青木直史, 檜原省吾, 高橋明久, 西木司 (2010): MDRS 法によるコンフリクティング・ディップのイメージング, 物理探査学会第 122 回学術講演会論文集, pp.60-63.

近藤浩文, 鈴木浩一, 長谷川琢磨, 濱田崇臣, 吉村公孝 (2014) : 地層処分地選定のための地質環境調査技術の実証研究 : 調査段階に応じた地質環境モデルの構築と調査手法の適用性検討, 地質学雑誌, 第 120 巻, 12 号, pp.447-471.

吉村公孝, 村元茂則, 石井英一, 土宏之, 近藤浩文, 鈴木浩一, 五嶋慶一郎, 富田一夫 (2011) : 放射性廃棄物の概要調査に関する物理探査技術実証研究, 物理探査学会第 124 回学術講演論文集, pp.231-234.

2.1.4 レーザーを利用した地下水水質計測技術の高度化

吉田 芙美子¹ 國丸 貴紀¹ 寺林 稜平² 長谷川 秀一²

¹原子力発電環境整備機構, ²東京大学

1. 背景・目的

地層処分事業において、地下水の水圧、水質、温度等をモニタリングすることは、処分場建設前の自然状態における地質環境を把握し、地下施設建設などに伴う地下水の水圧や水質の変化を把握するうえで重要である。従来、地下水の水質分析（一般水質、同位体比、溶存ガスなど）は、ボーリング孔内（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。特に同位体比については、封圧採水を行った後に、実験室において分析対象となる核種を分離・精製する必要がある。そのため、地質環境を把握するうえで分析対象となり得る同位体について、地下水を採水することなしにボーリング孔内で分析ができれば、地下水を採水する時間の低減、採水時の水圧計測中断の回避、水圧や水質の連続的な変化の把握などが可能となり、コストの低減やデータ信頼性の向上に寄与できると考えられる。また、この技術によって処分した廃棄物に含まれる安全上重要な核種（例えば、地下環境で易動性の高い¹²⁹Iや¹⁴Cなど）を測定できれば、処分場閉鎖後の多重バリアシステムの閉じ込め性能を確認するためのモニタリングに適用することができる。本共同研究は、2022年度から東京大学と進めており、地下水中に含まれる特定の放射性核種の濃度について、地下水を地上へ採水することなしに連続的な分析を可能とし、かつボーリング孔内で動作可能な可搬型の同位体分析モニタリングシステムを整備することを最終目標として実施するものである。

システムの検討にあたり、高感度測定かつボーリング孔に設置できるほどに小型化の可能な共振器強化型レーザー吸収分光法のうち、キャビティリングダウン分光法（Cavity Ringdown Spectroscopy：以下、「CRDS」という）（Romanini, D. et al., 1997）を採用することとした。一般的な（通常の）レーザー吸収分光では、レーザー光を試料に入射し、入射前後の光強度の差から光吸収物質の種類・量を特定するが、入射レーザー光の強度差を測定するためレーザー光の強度変動が雑音となり、感度を律速する大きな要因となる。CRDSは図1に示すように、一組の高反射率ミラー（反射率>99.98%）で構成された光共振器をガスセル内に配置し、多重反射により光共振器内に蓄積されたレーザー光を利用することで感度を強化した吸収分光法である。光共振器により実効的な光路長を通常レーザー吸収分光法の数十cmオーダーから（現実的な装置サイズで）数km以上まで増幅すると同時に、レーザー強度ではなく共振器蓄積光の減衰時間を測定することによりレーザー強度変動に依存しない高感度吸収分光が可能である。

2. 主な成果

新技術導入の初年度に該当することもあり、CRDSを用いた地下水中の核種測定の可能性と、現状の技術状況、及び分析技術の地層処分事業への適用の可能性について検討を実施した。具体的には①分析システムの構築とターゲット分子を用いた予備試験、②ターゲット分子の地下水からの分離法と装置小型化の検討、の二つに取り組んだ。ターゲット分子として、地下水中からの分離の容易さと幌延で分析経験のあるメタン分子を選択した。

① 分析システムの構築とターゲット分子を用いた予備試験

メタンの同位体 $^{12}\text{CH}_4$ ・ $^{13}\text{CH}_4$ を識別・観測できる吸収帯を数値計算により割り出し、 $1.65\ \mu\text{m}$ 帯半導体レーザーを用いて CRDS システムの試作機を設計・構築した。測定系にレーザー光を照射し波長掃引した結果、 $^{12}\text{CH}_4$ ・ $^{13}\text{CH}_4$ の同位体分子吸収スペクトルの観測に成功した (図 2)。さらにガスセル中の全圧依存性を評価し、 $8,000\ \text{Pa}$ 程度の比較的高圧な条件下においても各同位体分子由来の吸収スペクトルが弁別可能であることを明らかにした。加えて、減圧に伴うメタン分子分圧の線形的な減少を観測できたことから、本装置ではメタン分子の量的変化 (濃度変化) が観測可能であるといえる。一方、同位体比分析の性能については、 $^{13}\text{CH}_4$ 同位体比を強めたメタンガス標準試料を用いることなども含め、今後さらなる評価実験が必要である。

② 地層処分事業への適用の可能性についての検討—ターゲット分子の地下水からの分離法と装置小型化に向けた検討—

地下水中からターゲット分子を取り出し、CRDS によって測定する機構として疎水性メンブレンフィルターを用いたシステムを検討した。疎水性フィルターでは気相状の水分子をメタンと同様に透過するため、測定試料中の水分子分圧が大きくなることが懸念される。水分子の吸収波長がメタン分子吸収波長の近傍にあり測定の影響となる可能性があったことから、水分子の分圧が高い試料を模擬的に作成し、メタン同位体分子スペクトルの測定が可能かどうかを評価した。その結果、水分圧が 30% 程度含まれる試料中であってもメタン同位体分子の明瞭なスペクトルを取得できた。

また、地下水からサンプリングされた微量メタン分子を想定し、大気試料中に含まれる微量なメタン分子の測定実験を行った。結果として、数 ppm レベルの濃度の微量メタンに含まれる大気組成 $^{13}\text{CH}_4$ ($^{13}\text{CH}_4/\text{CH}_4 \sim 1.11\%$, $^{13}\text{CH}_4$ の濃度は $89\ \text{ppb}$) の検出を可能にした。信号対雑音比から評価された検出限界メタン分圧 $2,000\ \text{ppb}$ (全圧 $8,000\ \text{Pa}$) におけるメタンの分子数密度は、 4.4×10^{12} 分子/ cm^3 と計算され、このうち $^{13}\text{CH}_4$ は 1.11% であることから、検出限界 $^{13}\text{CH}_4$ 数密度は 4.5×10^{10} 分子/ cm^3 と評価される。セル体積を $250\ \text{cm}^3$ と仮定した場合、 $8,000\ \text{Pa}$ のセル中試料気体の中に絶対数として 1.1×10^{13} 個の $^{13}\text{CH}_4$ 分子があれば本システムにおいて検出可能であることが明らかとなった。絶対分子数としての検出感度は装置小型化に伴うデッドボリュームの減少により向上が見込まれる。

3. 今後の展開

耐圧・耐熱容器に格納した分析装置をボーリング孔内へ設置できる程度にまで小型化することを目指し、光共振器・ガスセル、及びレーザー入射・検出のための光学系について容積低減に関する検討を継続する。具体的には共振器ミラーサイズのハーフインチへの変更、及びそれに伴うミラーマウントの小型化を実施する。光共振器への入射・出射体系については入出力箇所カップリング用のレンズを組み入れた光ファイバーを採用することにより、モードマッチング用のレンズ系とそれに付随する光路の省略化が可能となり、最終的な装置全体の小型化が十分可能であるとの見通しを得ている。

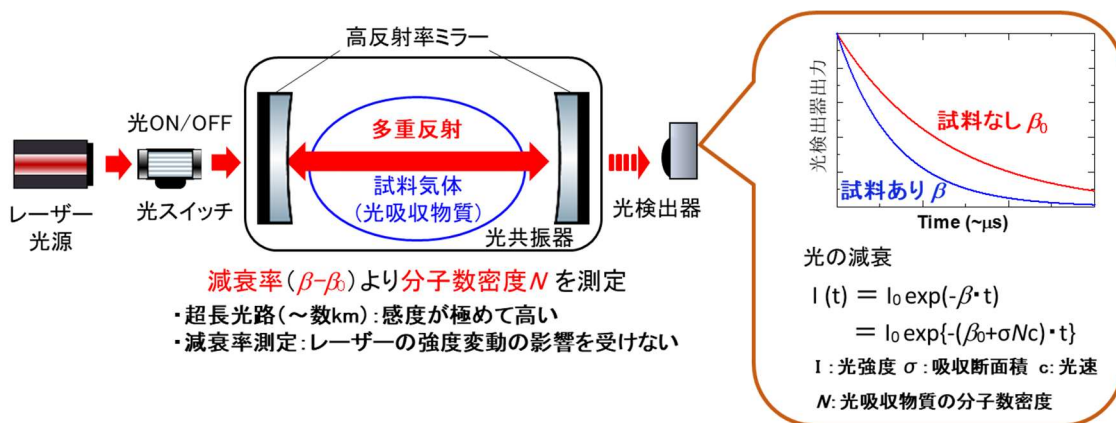


図 1 CRDS の原理

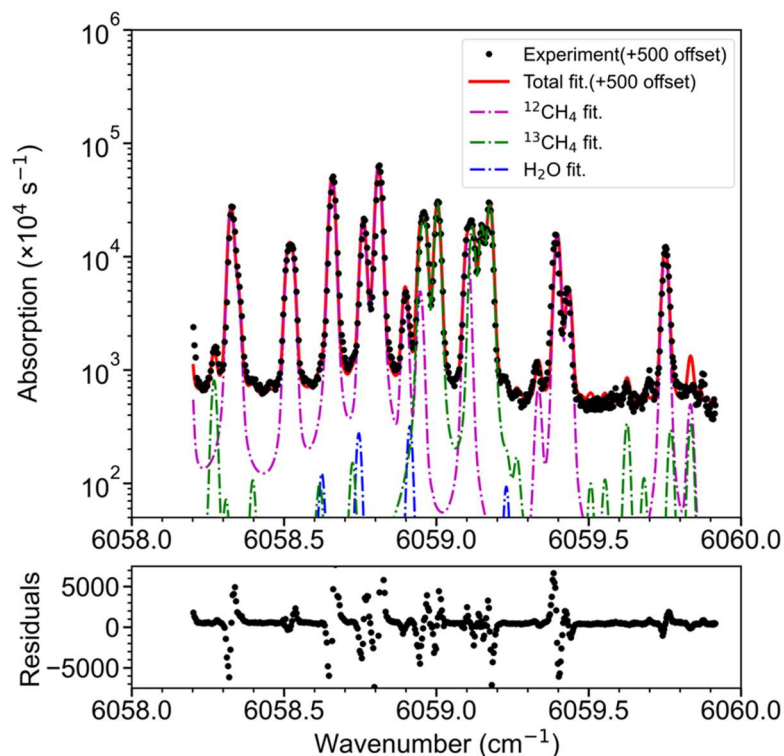


図 2 得られた吸収スペクトルとフィッティング解析結果
 (上) 吸収スペクトル (縦軸 log スケール), (下) フィッティング残差

参考文献

Romanini, D., Kachanov, A. A., Sadeghi, N. and Stoeckel, F. (1997): CW cavity ring down spectroscopy, Chemical Physics Letters, Vol. 264, pp.316-322.

2.1.5 断層及び断層破碎帯における水理・力学的挙動の把握に関する試験研究

大城 遥一¹ 國丸 貴紀¹ 吉田 芙美子¹ Guglielmi Yves²

¹原子力発電環境整備機構, ²ローレンス・バークレー国立研究所 (LBNL)

1. 背景・目的

地質環境調査や地下施設の建設の際には、ボーリング孔や地下坑道の掘削時に活動性が不明瞭な断層に遭遇することが想定され、そのような断層が地震活動等によって活動した場合に、それに伴う断層変位や、それが周辺岩盤の水理学的・力学的特性に与える影響を把握することは、我が国における地層処分場の開発にあたり、工学的対策や地下施設のレイアウトに対する安全性や経済性などを考慮した合理的な検討を行ううえで不可欠となる。このため、断層の変位や、断層及びその周辺における水理学的・力学的特性の変化をモニタリングにより直接観測するとともに、これら水理-力学連成現象を解析的に評価することが可能なシミュレーション技術の整備を行って、処分場閉鎖後の長期的安全性を確保するうえで前提となる閉鎖前の地質環境の変動を把握することが重要である(地層処分研究開発調整会議, 2023)。

このような背景から NUMO と LBNL は、LBNL が保有していた断層の間隙水圧、変位、地震波形などを断層の極近傍で計測可能な SIMFIP (The Step-Rate Injection Method for Fracture In-situ Properties) と呼ばれるモニタリング技術に着目し、上述の目的に応じた改良や、装置の適用性・耐久性の確認を行うための共同研究を 2016 年度から行っている。加えて、地震・断層活動に伴う断層及び断層周辺の地質環境特性の変化を評価するための水理-力学連成解析コード (FLAC3D 及び 3DEC) の改良を進めており、モニタリング装置で取得されるデータを利用した水理-力学連成現象に関するシミュレーション技術の高度化及びその妥当性確認を実施している。

2. 主な成果

2022 年度までの成果として、LBNL が開発した SIMFIP と呼ばれるマイクロメートルスケールでの断層変位や間隙水圧、それに伴う地震波などを観測することによって断層やその周辺の応力状態を推定する技術(渡邊ほか, 2019)の改良を進め、DORSA (Downhole Robotic Stress Analyzer) と呼ばれるモニタリング装置を設計・試作した。これにより SIMFIP と同程度の変位分解能を維持しつつ、断層変位量の観測レンジを日本における断層変位の測定に対応できるように拡大した。また、断層変位を確実に把握できるよう、DORSA の設置方法や地震波形を計測するためのセンサー位置などを変更した。

さらに、本モニタリング装置の有効性や耐久性、計測データの品質などを確認するために、実際の断層を対象とした実証試験に着手した。実証試験の対象となる断層として、モニタリング装置の作動試験が実施できること、適度に断層の変位が生じること、地震が生じてそれに伴う地震波や間隙水圧の観測ができること、地質構造が把握され水理-力学連成現象に関するシミュレーションに必要なデータが整備されていることなどを考慮して、米国カリフォルニア州に分布する活断層であるサンアンドレアス断層を選定した。具体的な試験場所は、掘削長数十~100m 程度の複数のボーリング孔を用いてサンアンドレアス断層を穿通することができること、モニタリング装置の電源や通信設備が確保できること、数年間に及び当該研究を実施できること、などを考慮して選定した(図 1)。試験場所

周辺はサンアンドレアス断層を境界として、北東部には古第三紀堆積岩が分布し、南西部には斑レイ岩が分布している。特にサンアンドレアス断層及び分岐断層周辺は断層運動により粘土化した斑レイ岩が分布している。試験場所においては南西に傾斜しているサンアンドレアス断層を境界として古第三紀堆積岩と斑レイ岩が分布しており、分岐断層が南西傾斜で複数分布している（図 2、図 3）。

試験場所において掘削長の異なるボーリング孔を 3 本（NW-1, NW-2, NW-3）掘削した（図 2）。NW-1 には光ファイバーケーブルをケーシングパイプの背面に設置するとともに、地下水位の計測装置、温度計測装置、DORSA を設置している。NW-2 には NW-1 と同様にケーシングパイプ背面に光ファイバーケーブルを設置している。NW-3 には地下水位計測装置、温度計測装置を設置している。これらボーリング孔とは別に試験孔（Water Well）を掘削し、地下水位計測装置、温度計測装置を設置している。それぞれ動作確認を実施したうえで計測を開始した。

また、水理-力学連成現象に関するシミュレーションを行うために必要となる当該サイト周辺の地質構造モデルの構築に必要なデータを既往の文献などによって収集・整理し、当該サイトに分布する岩種や断層の三次元的形状などを把握した。当該シミュレーション技術に関しては、瑞浪超深地層研究所周辺のボーリング孔における観測結果を対象に実施し、その妥当性を確認している（Pierre et al., 2021）。

3. 今後の展開

サンアンドレアス断層に設置した各モニタリング装置によって継続的にデータ収集を行い、モニタリング装置の作動確認、耐久性、取得データの品質などの確認を行うとともに、必要に応じてこれらの装置のメンテナンスや改良などを定期的実施する。

また、整理した地質構造に係る情報を基に、当該サイトの地質構造モデルを構築して、それを用いた地震・断層活動による断層及び断層周辺における水理-力学連成現象に関するシミュレーションを行うと同時に、モニタリングにより蓄積されたデータとの比較検討によるシミュレーション技術の妥当性の確認や必要に応じて改良などを進める計画である。



図 1 サンアンドレアス断層と試験場所の位置図

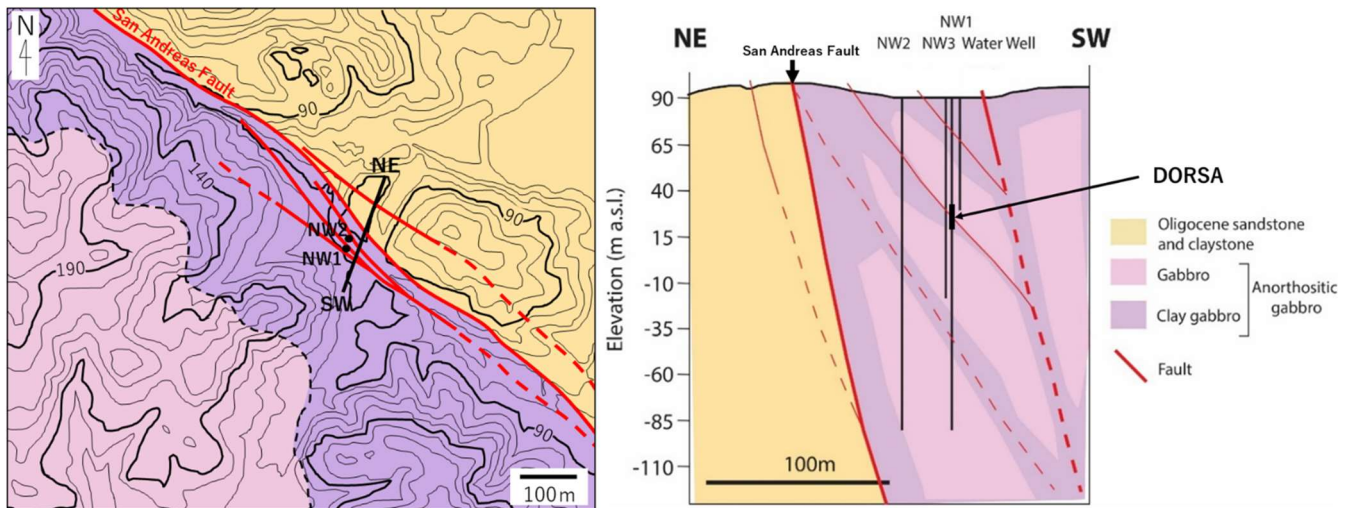


図 2 試験場所の地質平面図及び地質断面図

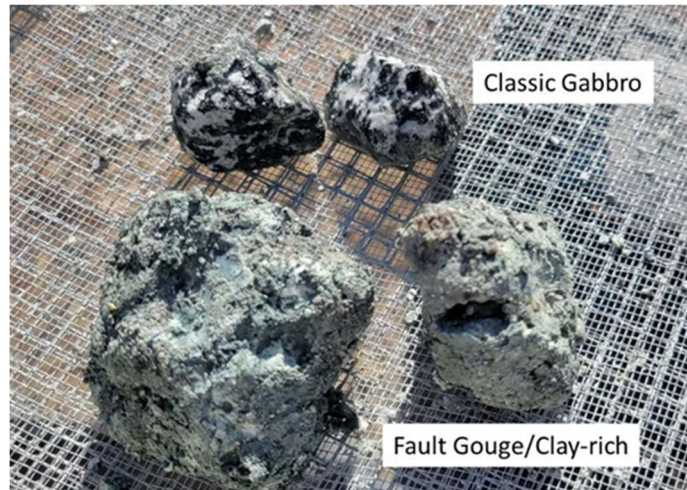


図 3 ポーリング掘削中に採取された岩石

参考文献

地層処分研究開発調整会議 (2023) : 地層処分研究開発に関する全体計画 (令和5年度～令和9年度) .

Jeanne, P., Guglielmi, Y., Rutqvist, J., Kunimaru, T. and Umeki, H. (2021) : Evaluation of faults stability due to passing seismic waves : Study case of groundwater level changes induced by the 2011 Tohoku earthquake in Central Japan, *Journal of Hydrology X*, 13(2021)100103.

渡邊貴央, 田中遊雲, 青木和弘, Guglielmi, Yves., Cook, Paul., Soom, Florian., 若濱洋, 能城悠, 岩崎悦夫, 亀高正男, 瀬下和芳 (2019) : 断層活動性評価手法の検討 (断層の活動条件把握への新たな試み) その2-塩ノ平断層とその南方延長における SIMFIP 試験結果-, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会講演要旨, SCG61-P14.

2.1.6 概要調査に向けた地質環境調査・評価技術の体系化及び高度化

後藤 淳一

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

NUMO は、国及び地層処分研究開発機関が整備してきた地質環境の調査・評価技術について、我が国の多様な地質環境に対する適用性や課題などを事前に確認し、必要に応じて高度化・最適化すること、調査の計画立案、工程・品質管理、結果の解析・評価における自らのマネジメント能力を高め、人材育成を図ることなどを目的とした取組みを、電中研との共同研究により 2006 年度から 2014 年度までの期間で、電中研横須賀地区における「実証研究」として進めてきた。この実証研究では、それまでに地層処分研究開発において事例のない新第三紀付加コンプレックス中の堆積岩類（葉山層群など）を対象に、大深度ボーリング実証試験（YDP-1～3 孔；図 1）などを通じて各種データを取得するとともに、それらを統合し調査に応じて段階的に地質環境モデルを構築・更新するアプローチの適用性を確認した（例えば、近藤ほか，2014）。また、NUMO 内の実施体制の検討、現場工程会議による工程管理、手引書に基づく調査・試験の品質管理、現場巡視による安全管理などを通じて、若手を含む職員による調査のマネジメントに関する経験を蓄積した。併せて、適用した技術の信頼性をより高めるための課題として、脆弱な葉山層群における孔壁崩壊や孔径拡大、コアロス低減に向けた掘削技術の最適化、掘削泥水が地質環境データに及ぼす影響の把握、付加コンプレックスの層序区分方法の高度化、低透水性岩盤に対する水理試験装置や採水装置の改良、岩盤の物理・力学・熱特性及び物質移行特性に関する未検討の評価技術の適用性確認、微生物が地層処分システムに及ぼす影響の解明、コア室内試験の品質管理・保証技術の最適化などを明らかにしている。また、こうした実証研究は、NUMO 職員のマネジメント能力の向上及び人材育成の観点からもさらに継続していくことが有益であると結論づけられた。

以上の背景を受け、上記の課題への取組みやマネジメント能力の向上、人材育成を目的として、NUMO と電中研は、2016 年度より 2021 年度まで、新規大深度ボーリング実証試験（YDP-4 孔；図 1）を中心とする新たな技術開発を実施した。YDP-4 孔では、試験計画の策定、ボーリング孔掘削方法の事前検討、深度 720m までのボーリング孔掘削、及びボーリング孔を利用した孔内試験や室内試験を実施し、品質を確保した地質環境特性に関する一連のデータを取得するとともに、適用した掘削方法や試験手法の有効性に関する技術的成果を得ている（西尾ほか，2017；幡谷ほか，2017；今井ほか，2017；Hasegawa et al., 2023；後藤ほか，2023；西尾ほか，2023；濱田ほか，2023；西本ほか，2023；長岡，2023；松岡ほか，2023）。また、この期間の取組みにおいて得られた試験計画策定と調査のマネジメントに関する経験や知見は、今後の概要調査に向けた知識の向上という観点で重要な成果である。本稿では、研究開発策定や調査のマネジメントに関する知見に関する成果を概括的に述べる。

2. 主な成果

YDP-4 孔における試験計画策定とマネジメントに関する検討成果について、概要調査に反映するという観点で得られた有効な知見を以下に整理する（後藤ほか，2023）。

(1) 試験計画策定を通じた知見の蓄積

高レベル放射性廃棄物等の処分地選定における概要調査では、ボーリング調査などにより、文献調査の評価結果を確認するとともに、その結果を地質環境モデルに統合し、処分場の設計及び安全評価を行う。本実証試験の計画策定に際しては、概要調査における最初のボーリング調査を想定し、既存の地質環境モデルの更新に必要な地質・地質構造、水理特性、地下水の地球化学特性、処分場の設計に必要な岩盤の物理・力学・熱特性など、安全評価に必要な物質移行特性（地下深部の微生物群集を含む）に関するデータを網羅的に抽出した。これを基に、地質環境の調査・評価、処分場の設計、安全評価の全分野の担当で、ボーリング孔の掘削長・掘削方法・掘削泥水、データ取得の目的・方法・深度などについて、品質や費用への影響も含めて検討を行い、試験計画を具体化している。さらに、1.で述べた技術的な課題への対応を考慮し、同一地点に2孔（YDP-4a 孔、4b 孔）を配置した試験計画を策定した（図 1）。試験計画の策定を通じた検討で得られた経験や知識は、包括的技術報告書の作成、及び地質環境データの品質評価手法の高度化に係る検討に反映されている（NUMO, 2021 ; 松岡ほか, 2022）。

(2) ボーリング調査のマネジメントに関する経験や知見の蓄積

上述した計画に基づいて実証試験を実施する過程では、様々な状況に応じた対応を通じてボーリング調査におけるマネジメントに関して有用な経験・知見を蓄積することができた。

YDP-4a 孔では、沖積層下位に葉山層群に類似する岩石が出現し、それ以深も試験計画策定時に用いた地質環境モデルで予測されていた三浦層群は確認できなかった。また、孔壁崩壊や試験装置の不具合・抑留などのトラブル、新型コロナウイルス感染症緊急事態宣言に伴う休工などが重なり、こうした事態への対策を検討し柔軟に対処するという経験によってマネジメント上は有益な知見を蓄積することができたものの、当初の試験計画を予定通り続行することについて再検討する必要が生じた。このため、三浦層群が確認できなかったという地質環境モデル上の課題を解決することを優先して、YDP-4b 孔の掘削を中止し YDP-4a 孔を深度 420m から深度 720m まで延伸（YDP-4 孔に改名）するよう計画を変更した（図 1、「変更後」参照）。

このように計画とは異なる状況に遭遇するたびに、掘削泥水や孔内試験が地質環境に与える影響や、室内試験用のコア試料採取の優先度を検討して、適宜計画を修正するという経験と知見を蓄積したことは、概要調査に向けたマネジメント能力の向上に大きく貢献するものである。これらの実績に基づき掘削から各孔内試験に至る手順を体系的に整理した。また、当初計画からの変更点やその経緯・理由が追えるよう記録を整理し、知識ベースとして取りまとめている。工程管理については、工程表や日々の作業日報などに基づき、工程に影響を与えた主な事象と休工・遅延期間について取りまとめた。以上を通じて、脆弱かつ膨潤性を有する地層に対するボーリング調査の流れや実施する試験における留意点などを体系化し、今後の概要調査に反映可能な知識ベースの向上を図ることができた。また、YDP-4 孔を深度 720m まで延伸しても三浦層群は確認できなかったことから、適用した地質環境モデル自体が有する問題点について検討を行う必要があることが課題として明らかとなった。

3. 今後の展開

本実証試験を通じて、概要調査に向け、適用したボーリング掘削方法や試験手法の有効性を確認するとともに、ボーリング調査の計画立案及びマネジメントに関する経験・知見を蓄積することができ

た。今後は、孔内試験手法の適用性確認や高度化を継続し、その結果を踏まえて試験手法の合理化及び最適化、調査・試験の品質・安全等に関するマネジメント能力のさらなる向上を図り、調査結果を適切に評価し地質環境モデルとして統合するための知見をより充実したものとしていく。

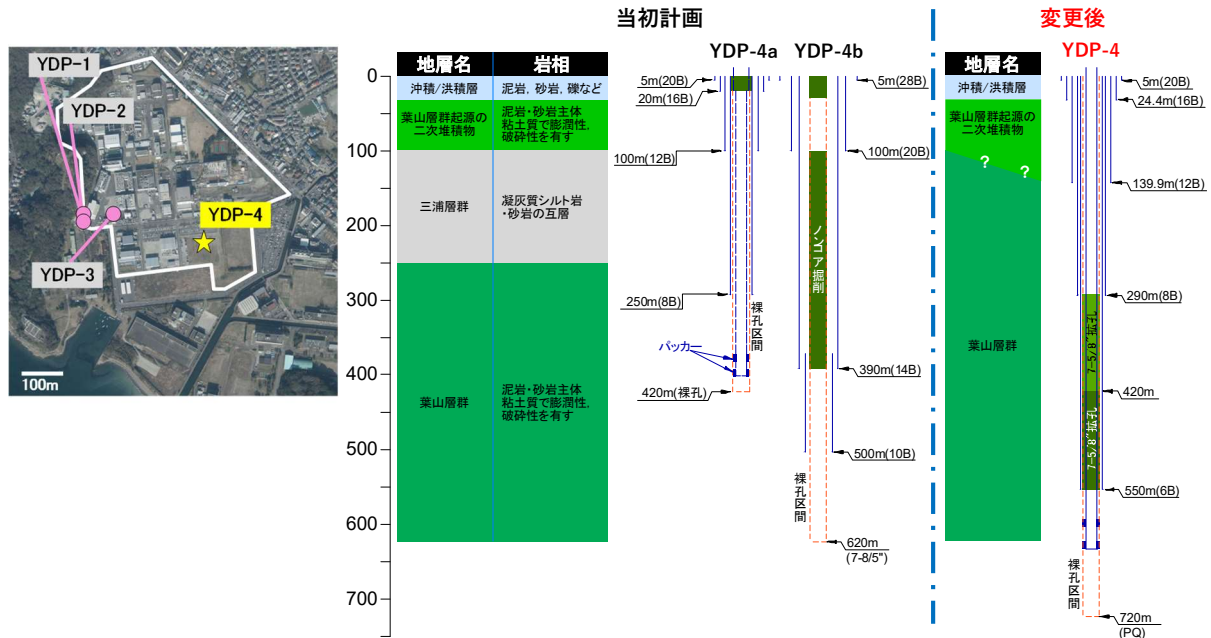


図 1 ボーリング試験実施位置及び YDP-4 孔の計画変更

参考文献

- 後藤淳一, 松岡稔幸, 西尾光 (2023): 高レベル放射性廃棄物等の処分地選定に係るボーリング調査技術の実証研究 (1) 研究計画策定とマネジメント, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会講演要旨, HCG21-05.
- 濱田藍, 濱田崇臣, 楠原文武, 向中野勇一, 植木忠正, 中瀬千遥, 大山隆弘, 近藤浩文, 幡谷竜太 (2023): 高レベル放射性廃棄物等の処分地選定に係るボーリング調査技術の実証研究 (3) 付加コンプレックスの地質構造の調査・評価, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会講演要旨, HCG21-P02.
- Hasegawa, T., Nakata, K., Tomioka, Y., Kondo, H., Kunimaru, T. and Alexander, W.R. (2023): Modern and fossil seawater identification using ground- and pore-water dating from the western coast of the Miura Peninsula, Japan, *Chemical Geology*, 621, 121299.
- 幡谷竜太, 西尾光, 富岡祐一, 堀尾淳, 小玉和弘 (2017): 膨潤性を示す破砕質泥岩のボーリング孔掘削に適した掘削泥水の選定のための室内試験, 日本応用地質学会平成 29 年度研究発表会論文講演集, pp.225-226.
- 今井悟, 堀尾淳, 若濱洋, 富岡祐一, 西尾光 (2017): 破砕質泥岩を対象としたボーリング掘削におけるシリケート泥水の適用事例, 全地連「技術フォーラム 2017」旭川, 32, 技術発表論文集.
- 近藤浩文, 鈴木浩一, 長谷川琢磨, 濱田崇臣, 吉村公孝 (2014): 地層処分地選定のための地質環境調査技術の実証研究: 調査段階に応じた地質環境モデルの構築と調査手法の適用性検討, *地質学雑誌*, 120 巻, 12 号, pp.447-471.
- 松岡稔幸, 國丸貴紀, 西尾光, 大城遥一, Vomvoris, S., Armin, P., Andreas, R. (2022): ボーリング調査

- で取得される地質環境データの品質管理・品質保証手法の高度化, 技術開発成果概要 2021, NUMO-TR-22-02, pp.8-10.
- 松岡稔幸, 西尾光, 後藤淳一, Vomvoris, S., Armin, P., Andreas, R. (2023) : 高レベル放射性廃棄物等の処分地選定に係るボーリング調査技術の実証研究 (6) コア試料を用いた室内試験の品質管理・品質保証, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会講演要旨, HCG21-P05.
- 長岡亨, 平野伸一, 栗田宗大 (2023) : 高レベル放射性廃棄物等の処分地選定に係るボーリング調査技術の実証研究 (5) 深部地下環境の微生物調査における掘削泥水の影響, HCG41-P04.
- 西本壮志, 佐藤稔, 後藤考裕 (2023) : 高レベル放射性廃棄物等の処分地選定に係るボーリング調査技術の実証研究 (4) 岩盤の物理・力学・熱特性等の調査・評価技術, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会講演要旨, HCG21-P03.
- 西尾光, 幡谷竜太, 富岡祐一, 堀尾淳, 若濱洋, 今井悟, 小玉和弘, 丸山廣明 (2017) : シリケート泥水を用いた膨潤性を示す破碎質泥岩のボーリング孔掘削, 日本応用地質学会平成 29 年度研究発表会講演論文集, pp.73-74.
- 西尾光, 後藤淳一, 松岡稔幸 (2023) : 高レベル放射性廃棄物等の処分地選定に係るボーリング調査技術の実証研究 (2) 膨潤性を示す破碎質泥岩のボーリング孔掘削・試験, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会講演要旨, HCG21-P01.
- 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.

2.1.7 ボーリング孔を利用した地下水の水圧・水質・温度に係る モニタリング技術の高度化

西尾 光 國丸 貴紀

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

地層処分事業では、サイト調査段階から処分場の閉鎖までの期間において、さらには必要に応じて閉鎖後の一定期間、安全評価に用いる地質環境条件（熱的、水理的、力学的、化学的）の設定や環境保全などの観点から各種のモニタリングを実施することが示されている（IAEA, 2014）。例えば、水理場については、地下調査施設や処分場の地下施設（以下、「地下施設」という）の建設・操業に伴い地下水圧の低下が発生し、初期の状態から変化することが予想される。このため、地下施設の建設前の状態（ベースライン）から水圧のモニタリングを実施し、地下施設の建設・操業による擾乱を受けた水理場が地下施設の閉鎖に伴って回復し、処分場の周辺の地質環境が本来有する安全機能を発揮する状態になることを確認する必要がある。また、地下施設の建設・操業時の水理場の変化に伴い、地表水の引き込みなどが発生し、地下水の水質や処分場近傍の母岩中における地下水の物理化学パラメータ（水温、電気伝導度、pH、溶存酸素濃度、酸化還元電位）など、化学場の変化が生ずることが考えられる。このため、地下水の水質についても同様にベースラインからのモニタリングによりその変化を把握する必要がある。熱環境についても、高レベル放射性廃棄物などの発熱性の廃棄物が処分場の地下坑道に定置されることによって生じるベースラインへの熱的影響を把握するため、温度変化をモニタリングする。このようなサイト調査段階から開始する地質環境のベースラインの把握は、調査で掘削したボーリング孔を利用したモニタリングによって実施するため、これに対応可能なモニタリング技術を整備することが必要となっている。

これまでに整備された地下水の水圧のモニタリング技術には、水圧センサーを用いて観測区間の水圧を直接計測する方式（直接水圧計測方式）と観測区間から立ち上げたピエゾ管内に水圧センサーを挿入し、管内の水位を測定する方式（ピエゾ水頭計測方式）（図 1）がある。直接水圧計測方式は定期的な水圧センサーのメンテナンス・交換に伴うデータの欠測期間が生じること、ピエゾ水頭計測方式は溶存ガスの脱ガスにより計測結果に影響を及ぼすことなどの課題が示されている（JAEA, 2020）。

こうした課題に取り組むため、近年、海外の実施主体においても、光ファイバーケーブルをセンサーとして利用する光ファイバーセンシング技術によるモニタリング技術開発が進められている（Kishida et al., 2017）。光ファイバーセンサーケーブルは、光ファイバー全体がセンサーとなるシンプルな構造を有し、計測対象物全体の情報を網羅的に取得できるとともに、メンテナンス頻度を大幅に低減でき、かつ耐久性に富むといった利点を有する。

NUMO では、ボーリング孔を利用した既存の地下水の水圧・水質・温度に係るモニタリング技術に光ファイバーセンシング技術を適用し、上記の課題に対応するとともに、数十年という時間スケールを視野に入れた適用性、作業性、精度の向上などを目的とした技術の高度化を、2018年度から実施している。これまでに、地下水モニタリング装置の概念設計、装置を構成する各部品の試作、光ファイバーセンサーケーブルの距離分解能の確認などを実施し、地下水モニタリング装置に必要な各技術の整備を進めてきた。

2. 主な成果

2022年度の検討では、ボーリング孔を利用した地下水の水圧・水質・温度に係るモニタリング装置の試作及び性能確認試験を実施した。

(1) 試作

深度 2,000m 相当の水圧に対応した耐圧性, 150°C程度の地温に対応した耐熱性など地層処分事業における大深度のボーリング孔を利用した地下水の水圧・水質・温度に係るモニタリング装置に要求される性能を検討し, これを満たす装置を製作できる見通しを得た。一方で, 本検討で試作する装置は, 実験室で地下の模擬環境を人工的に発生可能な試験機器の性能や試験の安全性などを考慮し, 光ファイバーセンサーケーブルは 1,000m 以上相当, パッカーに要求される差圧 300m 以上の耐圧性を有する装置を試作した。

温度計測用光ファイバー及び水圧計測用光ファイバーについては, ケーブルの被覆がない場合に圧力の感度が高いものの, 光ファイバー素線を剥き出しのままボーリング孔に設置することは強度的に困難である。そのため, 光ファイバー素線を保護・補強するために鋼線と撚り合わせる加工を施し, 光ファイバーセンサーケーブルを試作した。なお, 温度計測用光ファイバーセンサーで測定する温度は, 水圧計測用光ファイバーセンサーで取得する水圧変化の補正用としても用いる。パッカーは水圧により拡張する方式とし, 実際のボーリング孔の孔径を想定して 2 種類の適用孔径が異なるパッカーを 1 組ずつ試作した。また, パッカー内も含めて地上から孔底までのパイプ内に原位置での物理化学パラメータの計測装置や採水装置を挿入することから, 必要な内径をパッカー内に確保した。地上からの操作により任意の区間の地下水採水口を開閉させ, 地下水採水装置による採水が可能となるように装置を試作した。

(2) 性能確認試験

光ファイバーセンサーケーブルの距離分解能, 温度・圧力に係る測定精度, 応答性などを確認するために, 温度及び圧力を制御可能な試験容器に光ファイバーセンサーケーブルを設置し, 試験を実施した。水圧は, これまでに利用されている地下水の水圧モニタリング装置の一つである直接水圧計測方式と同程度の測定精度を考慮し, 1psi (約 6kPa) 毎に人為的に変化させた。その結果, 目標としていた 1psi 以内の精度を有することを確認した (図 2)。パッカー及び地下水の採水口の開閉については, 試験パイプ内に当該装置を挿入し, 作動確認を実施した。パッカーについては区間圧 3 MPa の止水性能を有すること, 地下水の採水口についても正常に作動することを確認した。一方, 光ファイバーセンサーケーブルの止水性能を確認した結果, 一時的には止水できたものの観測区間の上下において, 遮水・遮圧のために約 1m 毎に設けている止水部から漏水が発生し, ケーブルの交換や補修が必要となった。

3. 今後の展開

光ファイバーセンサーケーブルの止水性能にばらつきが生じたが, この原因を特定できていることから, 製造設備の改良などにより確実な止水方法を構築する。実際のボーリング孔を用いた実証試験を通じて, 地下水の水圧・水質・温度に係るモニタリング技術の体系化を図っていく計画である。

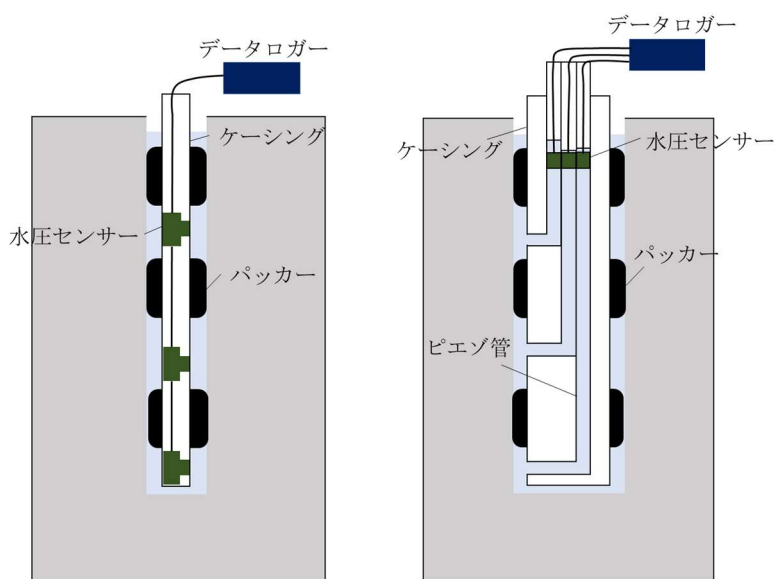


図 1 既存の地下水水圧モニタリングシステムの概念図
(左図：直接水圧計測方式，右図：ピエゾ水頭計測方式)



図 2 光ファイバーセンサーケーブルを用いた圧力測定

参考文献

- IAEA (2014) : Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities, IAEA Safety Standards Series, No.SSG-31.
- JAEA(日本原子力研究開発機構) (2020) : 超深地層研究所計画における調査研究—必須の課題に関する研究成果報告書—, JAEA-Research 2019-012.
- Kishida, K., Frieg, B., Yamauchi, Y. and Guzik, A. (2017) : Development of distributed pore pressure fibre optics for repository and deep borehole measurements, The 7th International conference of clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement, Davos, Switzerland, 24-27 September 2017.

2.2 処分場の設計と工学技術の体系的な整備

人工バリアの設計・施工に関する技術の信頼性を向上させるため、沿岸海底下を含む我が国の多様な地質環境条件と処分対象となる廃棄物の特性を考慮した人工バリアの材料や仕様を合理的に設定するための科学的基盤の整備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）の一つであるオーバーパックの材料については、JAEA や大学との共同研究及びスイスのグリムゼル試験サイトにおける国際共同研究プロジェクト MaCoTe（Materials Corrosion Test）を通じて、長期腐食試験データの整備に取り組んだ。腐食試験は、従来の高炉品を用いた鍛鋼に加え、製造方法の異なる鋳鋼や板巻鋼管も対象として実施し、これまでの試験結果から、これらの材料が母材としてはほぼ同等の耐食性を有していることが明らかとなった。板巻鋼管を利用する場合には、容器として製作する際の溶接継ぎ目部の耐食性を向上するための溶接方法について検討を進めた。リサイクル品の有効利用が期待できる電炉品についても同様の試験を実施し、母材としては高炉品と同等の耐食性が期待できる知見を得た。また、金属製処分容器の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設置していただいた長期腐食寿命評価技術検討委員会において、最新の科学的知見に基づく議論を通じて取り組むべき課題を明らかにした（2.2.1 及び 2.2.3 参照）。緩衝材や埋戻し材の主要材料となるベントナイトについては、現在の設計上の制限温度を超えた温度領域での特性を把握するため、複数の国産ベントナイトを対象として室内試験によるデータ取得を進めた。具体的には、100°Cを超える高温履歴を受けることにより膨潤性や透水性などの性能がどのように変化するかを確認している。また、緩衝材の長期健全性を説明するための技術的根拠の整備として、ナチュラルアナログ事例を調査する国際共同研究プロジェクト KiNA（Kiruna Natural Analogue）に参加した。地下深部で長期間にわたり磁鉄鉱と接触していた天然ベントナイト試料を大学との共同研究において分析した結果、ベントナイトにおける鉄含有量の増加はわずかであり、鉱物学的な変質は観察されなかったことから緩衝材の長期健全性に対する技術的信頼性の向上に資する成果を得た（2.2.11 参照）。TRU 等廃棄物の人工バリアの閉じ込め機能を向上させた円筒型の廃棄体パッケージを対象として、PEM（Prefabricated Engineered barrier system Module、金属製処分容器及び緩衝材で構成される人工バリアモジュール）を適用した処分概念（以下、「TRU-PEM」という）の検討を実施した。廃棄体パッケージの腐食膨張を考慮した力学応答解析を実施し、TRU-PEM の構造健全性が長期にわたって確保可能な緩衝材の仕様を設計した（2.2.4 及び 2.2.5 参照）。

ガラス固化体を対象とした PEM については、緩衝材の静的締固め、PEM 容器の蓋接合に係る工場での製作試験を実施して、工学的成立性を確認するなど、設計オプションの整備を進めた（2.2.6 参照）。オーバーパックについては、炭素鋼オーバーパックと銅コーティングオーバーパックの製造技術の開発に継続して取り組んだ。品質の確保や作業の効率性向上を目的として、炭素鋼オーバーパックの蓋接合部の電子ビーム溶接技術、板巻鋼管を対象とした銅コーティング技術及び銅コーティング層の摩擦攪拌接合技術、内側炭素鋼容器のねじ込み接合技術の開発を進め、実用化に向けての課題を整理した（2.2.2、2.2.7 及び 2.2.8 参照）。

処分場の建設作業の安全性と効率性の向上を目的として、様々な産業分野における遠隔操作化・自動化の動向を調査するとともに、原子力バックエンド全体を対象としたロボット技術や遠隔操作技術の適用に関する国際的な取り組みである OECD/NEA の専門家グループ EGRRS（Expert Group on the Application of Robotics and Remote System in the Nuclear Back-End）への参加を通じて、最新情報の収集と遠隔操作化・自動化技術の地層処分事業への適用におけるベンチマーク、規制対応、コスト便益分

析に係る課題を整理した。廃棄体の回収可能性を維持することに伴い、坑内湧水が周辺の地質環境や処分場の設計に与える影響を定量的に評価するため、坑内湧水量や地下水位低下量及び地下水水質の化学変化等に関する解析技術の整備を進めた。開発に適用した解析コードを用いて、国内外の地下研究所で取得された坑内湧水量及びその周辺におけるボーリング孔内の地下水位の観測データを実用可能なレベルで再現できることや類似の解析コードを用いた先行研究の解析結果について同様の結果が得られたことから、技術的な信頼性が確保されていることを確認した (2.2.10 参照)。閉鎖前の安全性を評価する技術の整備として、NEA の専門家グループ EGOS (Expert Group on Operational Safety) への参加を継続するとともに、建設・操業期間中に発生する可能性のある地震や津波といった自然現象等に起因する火災、水没、電源喪失等の異常事象について、国内外の原子力施設や関連する施設等での事例を分析し、事故の未然防止、事故対応及び復旧のあり方についての知見を拡充した (2.2.9 及び 2.2.12 参照)。

2.2.1 処分容器の長期腐食寿命評価の信頼性向上のための検討

長田 柁平¹ 小川 裕輔¹ 鈴木 覚¹ 西方 篤² 渡邊 豊³

¹原子力発電環境整備機構, ²東京工業大学, ³東北大学

1. 背景・目的

NUMO は、金属製処分容器の長期腐食寿命評価の更なる信頼性向上を目的に、腐食防食学会（以下、「学会」という）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）を設置し、金属腐食に係る幅広い研究分野における国内外の専門家などの最新知見を結集している。2021 年度からは、検討委員会の下に、長期腐食寿命評価において重要となる 4 つのテーマ（①廃棄体定置後から緩衝材の再冠水に至るまでの温度、水分量及び放射線などの腐食環境が過渡的に変化する期間（以下、「過渡期」という）における腐食、②微生物活動による腐食、③長期腐食寿命評価モデルの高度化、④処分環境を模擬した腐食試験技術の信頼性確保）について、それぞれ分科会を設置し、最新知見の話題提供を受けて、引き続き信頼性向上のために取り組むべき課題について議論されている。このうち、過渡期における腐食現象の理解を進めるため、不飽和環境における腐食や腐食反応の律速過程の検討などについて、東北大学と共同研究を実施している。微生物活動による腐食については、微生物腐食対策に有益な防食技術や地層処分分野に適用しうる防食技術を考えるため、学会主催のシンポジウムを開催した。

2. 主な成果

2.1 検討委員会

2022 年度は、総勢 36 名（大学：13 名、研究機関：15 名、民間：8 名）で上記 4 つテーマについて議論を行うとともに、検討委員会が採択した各テーマに関連した提案型研究 6 件の成果をまとめた。各テーマに関する議論及び提案型研究の成果を以下に示す。

テーマ①では、温度、緩衝材の水飽和度、放射線量などの「腐食環境の理解」とそれらの環境下で発生する「腐食現象の理解」を論点として、分科会で議論された。「腐食環境の理解」に関しては、最新の放射線分解生成物の解析事例として、放射線分解生成物による腐食加速の原因物質となる過酸化水素の生成が、溶存イオンの種類と量によって異なることについて話題提供があった。この知見は、放射線分解生成物による腐食の防止に必要となる放射線遮蔽代の設定に利用することが期待できる。「腐食現象の理解」に関しては、過渡期の環境を再現して実施した腐食試験結果について話題提供があった。オーバーパックを模擬した試験体は、接触する緩衝材密度の不均一性や水飽和度の不均一性があると、局所的に腐食が進むなど、不均一な腐食が生じる可能性が共有され、腐食現象の再現性確認などが課題として挙げられた。

テーマ②では、処分環境下における「微生物腐食の評価方法」と「微生物腐食の抑制対策」を論点として、分科会で議論された。「微生物腐食の評価方法」に関しては、生菌数測定法や定量 PCR 法などの微生物の増殖しやすさを評価する方法だけでなく、どのような種類の微生物が時間とともに増減しているかなど、微生物の動態や群衆構造の理解につながるような評価方法にも取り組むべきことが課題として挙げられた。「微生物腐食の抑制対策」に関しては、学会主催のシンポジウムの中で過渡期における微生物腐食のリスクが再認識され、緩衝材による微生物活動の抑制が万一機能しない場合

を想定して、一般産業分野における防食対策が処分環境下における微生物腐食の対策として適用できるかという観点から、地層処分の専門家と防食技術の専門家がそれぞれ講演を行い、パネル討論を行った。パネル討論では、電気防食が有効と考えられるが、処分環境への適用性については、技術開発が必要であるのではないかという意見が示された。

テーマ③では、「1,000年を超える期間を対象とした腐食予測」、「機械学習を活用した腐食評価」、「確率論を取り入れた腐食評価」及び「考古学・ナチュラルアナログによる腐食寿命評価モデルの検証」を論点として、分科会で議論された。炭素鋼の腐食速度が時間とともに低下するという試験結果に関して、金属表面を覆う錆層内の酸化性物質の移行現象理解が課題であること、また、大気腐食の評価に機械学習を適用した事例について話題提供を受け、機械学習を適用する場合の留意事項について意見交換があった。確率論を取り入れた腐食評価に関しては、確率分布を持って信頼の高い長期の腐食量を評価し、金属製処分容器の腐食代が評価した腐食量に対して十分に余裕を持っていることを定量的に示すことが課題であることが示された。また、腐食寿命評価モデルの検証においては、金属製考古学遺物のアナログ事例を比較対象として活用することも有効とされた。これらの成果を地層処分に反映していくためには、地層処分の環境条件で取得された腐食試験データやアナログ事例の更なる拡充が課題として挙げられた。これらの議論を踏まえて、長期腐食寿命評価モデルの開発のアプローチが示された（図1参照）。

テーマ④では、地層処分に特有な腐食試験として、低酸素環境下で圧縮ベントナイト中に金属試験片を埋め込んだ腐食試験技術について議論された。試験条件について、設定根拠の整理が課題として挙げられた。また、提案されている試験技術の妥当性確認が課題であり、今後、複数機関で同じ試験条件、同じ試験手順で腐食試験を実施し、試験結果を統計的に比較する必要があることが示された。

提案型研究に関しては、上述の4つのテーマに関連した課題をNUMOから複数提示し、大学などの研究者から課題解決を目標とした6つの研究提案（表1参照）を受けた。

例えば、「4Dイメージングを駆使した微生物腐食評価系の新構築」では、微生物の四次元可視化技術により、金属表面における微生物付着挙動を捉えることができ、画像解析と併用することで、微生物が金属表面に占める被覆率を定量評価することが可能となっている（図2参照）。図中の緑色の点は微生物の存在を表し、ステンレス鋼及び炭素鋼表面では、緑色の点が多く観察されたが、銅の表面では緑色の点がほとんど確認されていない。画像解析により、緑色部が金属表面を占める割合を求めることにより微生物の被覆率が算定され、ステンレス鋼あるいは炭素鋼に比べ、銅の表面に微生物が付着しにくいという観察結果が定量的に裏付けられている。この評価方法は、微生物の増殖しやすさを評価する方法以外の微生物評価手法として期待される。また、「深部地下生物圏のスロー代謝による長期的微生物腐食の影響評価」では、微生物腐食の抑制対策として、炭素鋼-亜鉛の電極対を用いた犠牲防食（イオン化傾向の低い亜鉛が炭素鋼よりも優先的に腐食することで、炭素鋼の腐食進行を防止する防食技術）が検討され、ベントナイト中でも犠牲防食が有効である見通しが得られている。この結果は、緩衝材による微生物活動の抑制が万一機能しない場合の微生物対策として期待される。

2.2 過渡期の腐食現象評価に関する研究

過渡期の腐食現象評価の課題として、NUMOと東北大学との共同研究において緩衝材密度や水飽和度の不均一性に起因した不均一な腐食及び緩衝材中の腐食反応における律速過程の評価に取り組んだ。

不均一な腐食に関しては、腐食の局在化を促進する塩化物イオン濃度（ 0.21 mol/L あるいは $1.1 \times$

$10^{-3} \text{ molL}^{-1}$) 及びベントナイトに接触する試験溶液への吹込みガスの酸素濃度 (大気 (21%) あるいは窒素 (0%)) を変数として腐食試験を実施し、腐食の局在化について検討した。炭素鋼試験片 (40mm × 10 mm × 3.5mm) をベントナイト中に埋め込んで、2 か月後に試験片を取り出して表面を観察したところ、塩化物イオン濃度が 0.21 molL^{-1} 、酸素濃度が 21% の条件において、平均腐食深さ約 $1 \mu\text{m}$ に対して、最大腐食深さ $20 \mu\text{m}$ 程度の凹みが観察された。これ以外の条件において、凹みは確認できなかった。この凹みが局部腐食によるものかについて検討するため、試験片寸法をより大きくして、局部腐食を観察しやすい条件において試験を実施する予定である。

腐食反応における律速過程の評価に関しては、化学反応輸送解析と腐食反応解析が可能な解析ソフト (COMSOL6.1 及び Corrosion Module) を用いて、腐食反応モデルを構築した。この腐食反応モデルは、腐食反応 (還元反応及び酸化反応) により溶出する鉄イオンが、緩衝材中を拡散により移行し、その過程で反応により FeCO_3 や Fe_3O_4 などの腐食生成物が生成することを評価するものである。予察的な解析において、腐食生成物の生成を考慮しない場合には、酸化反応により金属表面近傍の鉄イオンの濃度が上昇するが、鉄イオンが緩衝材中を拡散するため、両者のフラックスのバランスによって腐食速度が変化することが示唆された。今後も鉄イオンの物質移行と反応に着目して、解析条件を変えた検討を継続し、緩衝材中のオーバーパックの腐食の律速反応について検討する。なお、この共同研究で得られた成果は 2.1 のテーマ①に関連する分科会にも話題提供し、長期腐食寿命評価の更なる信頼性向上のために取り組むべき課題の議論にも役立てた。

3. 今後の展開

検討委員会においては、金属製処分容器の長期腐食寿命評価の引き続き信頼性の向上を目的として、4 つの分科会で「地層処分環境と腐食現象の理解」、「長期腐食寿命評価モデルの構築」及び「腐食試験データの品質」の観点から、地層処分事業で取り組むべき課題について討議し、NUMO の技術開発計画に反映する。また、検討委員会を通じて抽出した課題に対し、学界及び産業界からブレークスルーとなる研究開発の提案を得つつ、課題解決に取り組む。

過渡期の腐食に関しては、検討委員会で示された課題を踏まえ、共同研究などを通じて不均一腐食の再現性の確認及び腐食反応モデルの構築に取り組むとともに、ガラス固化体からの放射線による腐食の促進について、ラジオリシス解析手法の緩衝材間隙水への適用性の確認に取り組む。得られた結果を検討委員会にも情報提供し、過渡期の腐食現象に関する議論に役立てる。

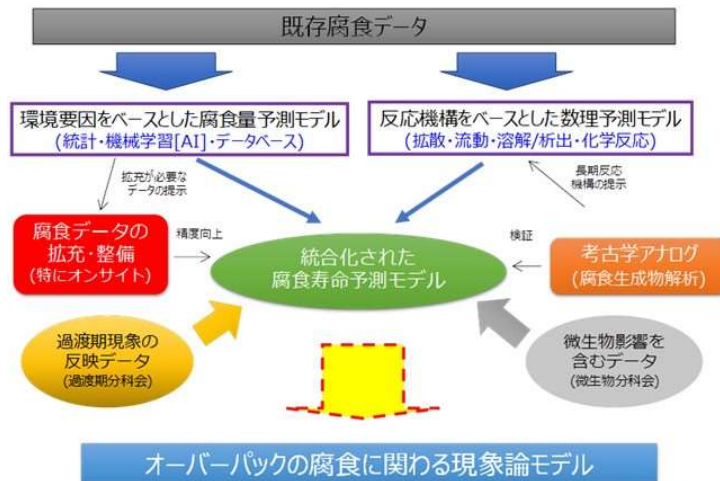
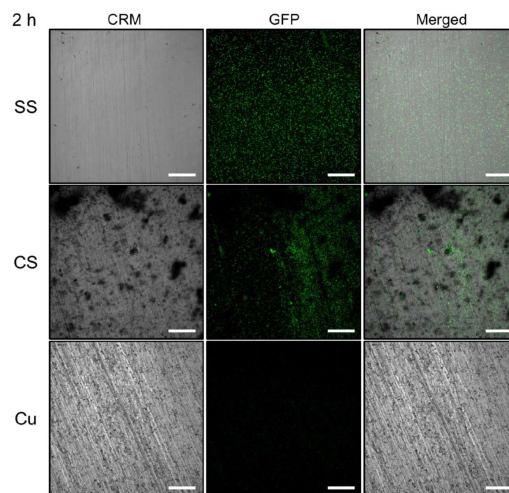


図 1 腐食寿命評価モデルの開発のアプローチ



CRM : 金属表面画像, GFP : 細菌分布 (緑色の発色部), Merged : CRM と GFP の合成画像, SS : ステンレス鋼, CS : 炭素鋼, Cu : 銅

図 2 種々の金属表面への微生物付着に関する研究成果例 (筑波大尾花助教提供)

表 1 研究提案一覧

関連テーマ	研究課題名	研究提案者 (敬称略)
① 過渡期における腐食	オーバーパックの過渡期腐食環境の推定に向けた、極低線量率照射下でのラジオリシス影響の評価	日本原子力研究開発機構 佐藤智徳
	過渡期の地層処分環境を模擬した湿潤ベントナイト中での銅の腐食挙動に及ぼす湿度および応力の影響の検討	大阪大学 宮部さやか
② 微生物活動による腐食	4D イメージングを駆使した微生物腐食評価系の新構築	筑波大学 尾花望
	深部地下生物圏のスロー代謝による長期的微生物腐食の影響評価	海洋研究開発機構 若井暁
③ 長期腐食寿命評価モデルの高度化	出土鉄製文化財から探る埋設環境が超長期腐食機構に及ぼす影響	奈良文化財研究所 柳田明進
	海水系地下水で飽和したベントナイト緩衝材中における銅の腐食挙動の解明	北海道大学 植松慎一郎

2.2.2 銅コーティングオーバーパックスの耐食性評価

長田 柁平¹ 小川 裕輔¹ 鈴木 覚¹ 井上 博之²

¹原子力発電環境整備機構, ²大阪公立大学

1. 背景・目的

地層処分場が設置されると想定される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などに対応して、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は重要である (NUMO, 2021)。高レベル放射性廃棄物を封入するオーバーパックスの設計オプションに関しては、炭素鋼製オーバーパックスに加え、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ス (以下、「銅コーティングオーバーパックス」という) の技術開発を進めている。銅耐食層には銅めっき材や銅溶射材等を用いることを検討しており、2021年度までに、NUMO-大阪公立大学の共同研究を通じて一般的な銅材と銅コーティング材の耐食性を電気化学的に比較し、ベントナイト中では、銅材と銅コーティング材で、腐食挙動に電気化学的な差がないことを示した (Nagata et al., 2022)。

地下深部のように酸素がほとんどない環境では、銅は高い耐食性を有するが、操業中に何らかの原因で、銅耐食層の一部が欠損し炭素鋼が露出した場合には、銅との接触によって、炭素鋼の腐食速度が増加する異種金属接触腐食が発生する可能性がある。これまで、銅コーティングオーバーパックスの技術開発を共同で実施している NWMO において (「2.2.8 銅コーティングオーバーパックスの製作技術の開発」参照)、銅と炭素鋼の異種金属接触腐食に関し、ベントナイトスラリー中において電気化学的な検討がなされている (Braithwaite et al., 2022)。本検討では、オーバーパックスを定置するまでのハンドリングにおいて銅耐食層が傷つき、炭素鋼が露出した場合を想定して、圧縮ベントナイト中における銅と炭素鋼間の異種金属接触腐食の発生可能性を電気化学的に検討した。

2. 主な成果

圧縮ベントナイト中における異種金属接触腐食の発生可能性を検討するため、図 1 のように、専用の試験カラムに 1 組の銅線電極と炭素鋼線電極を圧縮したベントナイトに埋込んだ。2 つの電極間に流れる電流 (以下、「ガルバニック電流」という) は、異種金属接触腐食の発生に起因する電流を表す。図 2 に示したように、この原理を用いて、浸漬溶液に異なる酸素濃度 (約 0%あるいは約 20%) のガスを吹き込んで電極間のガルバニック電流を室温で測定した。その結果を図 3 に示す。ガスの酸素濃度が高いほど、大きなガルバニック電流が流れたが、アルゴンガスを吹き込んだ (酸素濃度が約 0%) 場合、ガルバニック電流は、低酸素環境における炭素鋼単独試験極の分極曲線から推定される、水素発生型腐食に対応する腐食電流 ($4 \times 10^{-6} \text{ Acm}^{-2}$) を下回った。この結果は低酸素環境では銅との接触による炭素鋼の異種金属接触腐食が停止したことを示す。同様の傾向は、銅コーティング材を用いた水溶液中での試験において、腐食量と吹込み酸素量の関係を検討した先行研究でも報告されている (Standish et al., 2019)。また、大気吹込み環境において、圧縮ベントナイト中のガルバニック電流 ($5 \times 10^{-6} \text{ Acm}^{-2}$) は、水溶液中 (Standish et al., 2019) と比較して 1 桁程度電流密度が小さかった。この差は、圧縮ベントナイトが存在することによって電極上の酸素拡散が抑制されるために生じたと推測される。以上の成果は、処分場の閉鎖後長期に想定される溶存酸素濃度が低い環境では、銅

耐食層の一部が欠損していたとしても、銅コーティング材を含む銅と炭素鋼間で異種金属接触腐食が起り難く、その結果、欠損部基底での炭素鋼の腐食速度は比較的小さいことが期待できる。

3. 今後の展開

本検討では、銅線及び炭素鋼線を用いて圧縮ベントナイト中では異種金属接触腐食が起りにくいことを示したが、今後は銅コーティング材の銅の一部を除去した試験片で、腐食試験を実施し、低酸素環境における銅と炭素鋼間の異種金属接触腐食の発生についてさらに評価を進める。また、閉鎖後初期の段階においては、高レベル放射性廃棄物の発熱によって周辺温度が高い状態にあることから、別途実施している閉鎖後におけるニアフィールドのTHMC (Thermal-Hydrological-Mechanical-Chemical) 状態変遷を把握するための研究開発(「2.3.7 原位置試験データを用いた THMC (熱-水-力学-化学) 連成現象評価技術の高度化に関する研究」参照)とも連携し、異種金属接触腐食の温度依存性についても検討を行う。

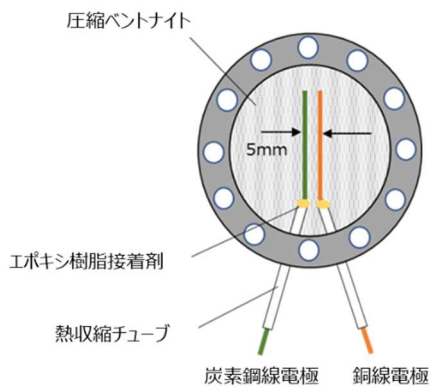


図 1 圧縮ベントナイトに埋込んだ1組の試験極の模式図

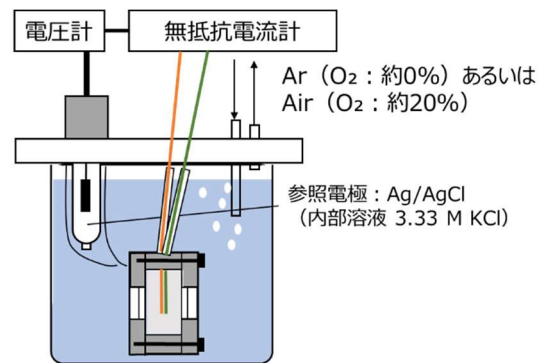


図 2 測定方法の模式図

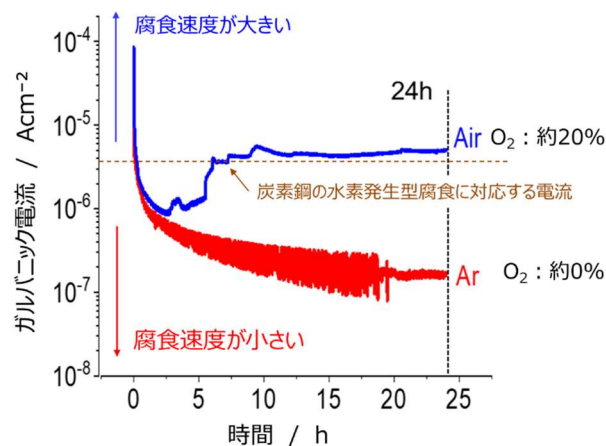


図 3 酸素濃度とガルバニック電流の関係

参考文献

Braithwaite, L., Albrechtas, K., Zagidulin, D., Behazin, M., Shoesmith, D. and Noël, J.J. (2022) : Galvanic Coupling of Copper and Carbon Steel in the Presence of Bentonite Clay and Chloride, Journal of The Electrochemical Society, Vol. 169, No.5, 051502.

- Nagata, S., Ogawa, Y., Suzuki, S., Inoue, H. and Keech, P.G. (2022) : Electrochemical behaviour of copper-coating materials in compacted bentonite for geological disposal of HLW in Japan, LTC2022, 8th International Workshop on Long-term prediction of Corrosion in Nuclear Waste Systems, p.56.
- 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.
- Standish, T.E., Braithwaite, L. J., Shoesmith, D.W. and Noël, J.J. (2019) : Influence of Area Ratio and Chloride Concentration on the Galvanic Coupling of Copper and Carbon Steel, Journal of The Electrochemical Society, Vol. 166, No.11, C3448-C3455.

2.2.3 緩衝材中の微生物活性に関する試験研究

後藤 考裕 鈴木 覚 北川 義人

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリアは、ガラス固化体、金属製オーバーパックと緩衝材により構成される。緩衝材の主要材料であるベントナイトには微生物が存在しており、このうち、硫酸塩還元菌をはじめとするいくつかの微生物は金属製オーバーパックの腐食を促進する可能性がある。これらの微生物の代謝、増殖などの活動（以下、「微生物活性」という）は、ベントナイトの乾燥密度を高めることで抑制できることが報告されており（例えば King et al., 2010）、地層処分を実施する各国の実施主体で微生物腐食の抑制対策として採用されている。NUMO では、我が国で想定される処分環境及び採用を検討しているいくつかのベントナイト候補に対し、この抑制対策の有効性を確認するため、微生物活性に関する調査を 2018 年度から実施している。

高レベル放射性廃棄物処分場の処分後初期の期間においては、ガラス固化体中の放射性同位体が崩壊する際に放出する崩壊熱と放射線を考慮した環境を考える必要がある。オーバーパックの表面温度は処分深度や岩種によって異なるが、最も高いケースでは数十年間にわたり、温度が 80°C 以上となると推定されている（NUMO, 2021）。ガラス固化体を封入したオーバーパック表面の吸収線量率については、1,000 年間の累積線量で、製造後 30 年間貯蔵したガラス固化体の場合約 6.7 kGy、製造後 50 年貯蔵したガラス固化体では約 5.9 kGy に達する（（若杉ほか, 2003）の表面線量率の解析結果に基づいて算出）。また、一般に地表に比べ、地下深部では地下水の流れが遅いため、微生物の活動に必要な栄養塩の供給も限定的と考えられる。このような処分環境において、ベントナイトに存在する微生物がどのような耐性を有しているかについては、これまで知見が少なく、これを拡充するために本技術開発を開始している。

2020 年度までに、ベントナイトの乾燥密度と微生物活性の関係を調査するため、既往の研究事例を参考に、微生物活性が高くなるよう栄養塩を添加し、温度 30°C に維持した条件でベントナイト中における試験を実施した。この試験では、十分な微生物量を確保して実施するため、微生物を人工培養し、ベントナイトの圧縮成形前に添加した。低酸素環境下に 2 か月間静置したところ、ベントナイトの乾燥密度が高い条件ほど微生物活性が低くなるという結果が得られた（Goto et al., 2022）。しかし、微生物活性が抑制されたのは試験前に添加した微生物が大半であり、ベントナイト中に元から存在していた微生物の活性が抑制されるかどうかは、この試験方法では判断できなかった。

このため、2022 年度の研究では、微生物を試験前に人工培養することなく、試験に必要な微生物量を確保できるか確認した上で、ベントナイト中に存在する微生物とベントナイトの乾燥密度の関係とともに、より高温域及び放射線が存在する環境（以下、それぞれ「高温環境」、「高放射線環境」という）におけるベントナイト中の微生物活性を調べた。

2. 主な成果

試験では、ベントナイトとして包括的技術報告書（NUMO, 2021）において緩衝材の設計で対象としたクニゲル®V1（クニミネ工業株式会社）を使用した。試験溶液は、微生物活性を促すために、硫

酸イオンを含む人工海水とした。温度条件は、2020年度までに実施した試験結果と比較するため 30°C に設定し、温度の影響を確認する目的では 80°C に設定した。

人工培養した微生物を添加せずに検出下限を上回る微生物量を確保できるかを確認するため、ベントナイトを人工海水に懸濁させた液（以下、「ベントナイト懸濁液」という）で 6 か月間、温度 30°C の条件で試験を実施した。比較のため、栄養塩を添加した試験も同一の条件で実施した。その結果、栄養添加の有無に関わらず、微生物量の検出が確認でき、好気性菌の数量（生菌数）は検出下限を上回ったが、嫌気性菌は栄養塩を添加しない場合で検出下限と同程度の生菌数となった（図 1 参照）。この結果を踏まえ、以降の試験では、嫌気性菌の微生物活性に与える影響を確認するため、栄養塩を添加して試験を実施した。

ベントナイト中に元より存在している微生物の活性と乾燥密度の関係、及び炭素鋼の腐食への影響を調べるため、人工培養した微生物を添加せず、圧縮ベントナイトの乾燥密度を 1.0~1.8 Mg/m³ の範囲で調整し、温度 30°C の条件で 6 か月間、低酸素環境下で維持した。その結果、ベントナイト懸濁液よりも、圧縮ベントナイトの試験後の生菌数は少なく、乾燥密度が高くなるほど生菌数が減少し、乾燥密度が 1.5 Mg/m³ 以上の条件では、生菌数が検出下限値と同程度か、検出されない（図中の N.D.）という結果となった（図 2 参照）。この結果を踏まえ、高温環境条件及び高放射線環境条件の微生物活性に対する影響を調べる試験では、微生物活性が高いベントナイト懸濁液と微生物活性が低い乾燥密度 1.6 Mg/m³ の条件で実施し結果を比較した。

高温環境による影響についての試験は、処分環境で想定される 80°C に温度を設定し、低酸素環境下で 6 か月間にわたり実施したが、ベントナイト懸濁液及び圧縮ベントナイトのどちらの場合にも、好気性菌及び嫌気性菌共に不検出となった。高温では多くの微生物でたんぱく質が変性し、微生物活性が低下することが知られており、ベントナイト中の微生物に対しても高温で微生物活性が低下したと考えられる。

高放射線環境による影響に関する試験は、栄養塩を添加して、3 か月間にわたり、室温でγ線 (Co-60) を照射した。図 3 に示すように、ベントナイト懸濁液では、累積線量が増加するほど、好気性菌、嫌気性菌ともに微生物活性が低下し、累積線量が 216 kGy となる条件では、生菌数は検出下限未満となった。ガラス固化体からの放射線による累積線量が 5.9 kGy（50 年貯蔵したガラス固化体の場合）または 6.7 kGy（30 年貯蔵したガラス固化体の場合）となることを考慮すると、放射線によって微生物活性は低下するものの、オーバーパックに接するベントナイト中であっても、放射線の影響だけで微生物が死滅するには至らないと考えられる。同様の試験を圧縮ベントナイトで実施したところ、累積線量に依らず生菌数は検出下限と同程度か不検出となった。

以上のことから温度が 80°C 以上、あるいは乾燥密度が 1.5 Mg/m³ 以上では微生物活性は著しく低下するものと考えられる。解析によれば、80°C 以上となる緩衝材の領域は、最大で緩衝材の内側 60 cm 程度となるが、緩衝材外側では温度は 80°C よりも低いため、緩衝材中の微生物活性は維持される可能性がある。しかしながら、緩衝材の乾燥密度を 1.5 Mg/m³ に維持できれば、温度は低くとも、緩衝材の全領域にわたり、微生物活性を抑制することが可能ということが出来る。また、放射線の累積線量が高いほど微生物活性は低下するが、処分環境として予測される累積線量程度では、微生物活性の抑制効果は高くないと考えられる。

3. 今後の展開

本検討では緩衝材中の微生物活性に対する緩衝材の乾燥密度、温度及び放射線による影響を試験に

よって明らかにすることができた。今後は微生物活性を抑制できる緩衝材の条件について再現性を確認するため、30℃を基準に乾燥密度を変えた試験を追加実施し、生菌数などと乾燥密度との関係を整理する。

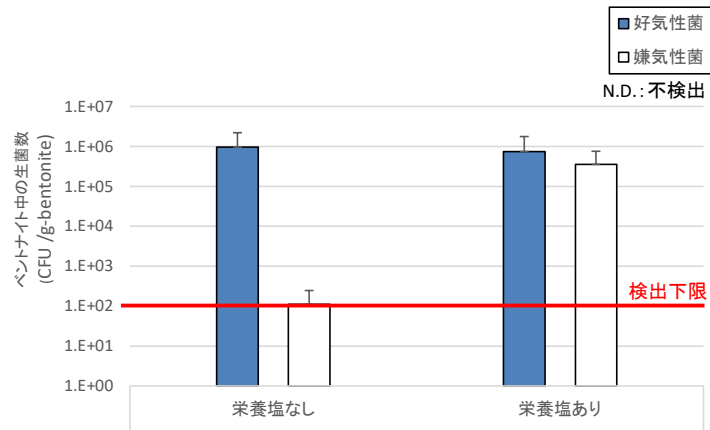


図 1 ベントナイト懸濁液中の生菌数

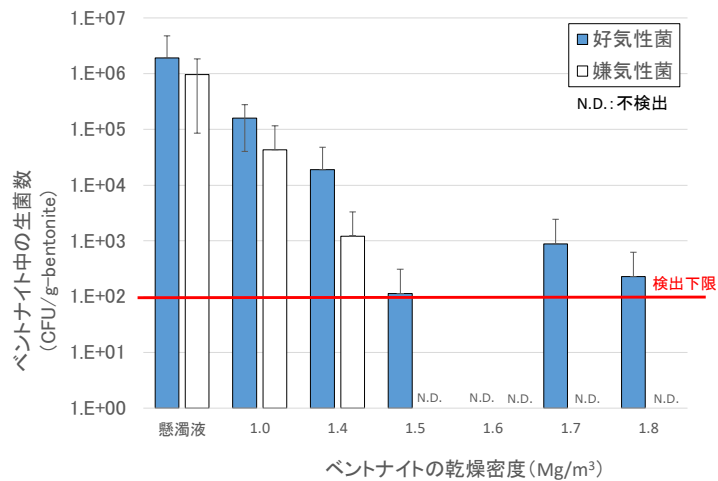


図 2 ベントナイト中の生菌数の乾燥密度依存性

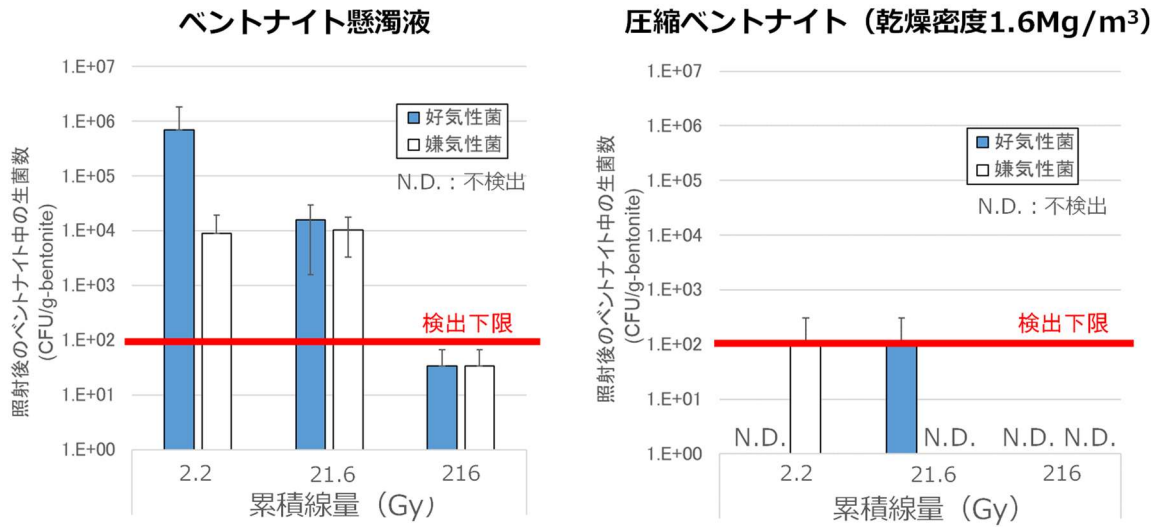


図 3 ガンマ線を照射したベントナイト中の生菌数の線量依存性

参考文献

- Goto, T., Suzuki, S., Nagaoka, T., Hirano, S., Kurita, T., Yokoyama, S., Watanabe, Y. and Shimbashi, M. (2022) : Study of critical density to prohibit microbially influenced corrosion in various domestic bentonites in Japan, 8th International conference on clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement, CLAY00112,.
- King, F., Lija, C. and Pedersen, K. (2010) : An update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository, SKB TR-10-67.
- 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.
- 若杉圭一郎, 宮原要, 牧野仁史, 石黒勝彦, 澤村英範, 根山敦史, 西村和哉 (2003) : ガラス固化体からの放射線量に関する検討 (研究報告), JNC TN8400 2003-022.

2.2.4 TRU 等廃棄物の回収技術に係る技術的根拠の整備

鈴木 覚 市村 哲大 後藤 考裕 山本 陽一

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

TRU 等廃棄物の地層処分において、適用する回収技術の難易度は、廃棄体回収時の人工バリアの状態によって異なるため、さまざまな設計オプションや状態での回収手順について検討し、実現可能な回収技術を整備することが重要である。NUMO は、包括的技術報告書で示した TRU 等廃棄物の処分概念に加え、設計オプションとして、高レベル放射性廃棄物の処分概念にも適用を検討している PEM (Prefabricated Engineered Barrier System Module) 方式を採用した人工バリアの試行的な設計と、これに対応した回収技術の検討を 2018 年度より実施している (NUMO, 2020)。この方式では、地上施設において、TRU 等廃棄物を封入した廃棄体パッケージを緩衝材とともに、角型の PEM 容器内に一体成型 (以下、この状態を「TRU-PEM」という) し、地下施設に搬送後、処分坑道内に集積して配置したうえで、PEM 容器と処分坑道壁面の間をベントナイト混合土で埋め戻す。

2021 年度からは、このように概念化した TRU-PEM 方式 (角型廃棄体パッケージと円筒型廃棄体パッケージの 2 種類の処分概念) と包括的技術報告書で示した処分概念のそれぞれに対応した回収技術を相互に比較検討しながら進めている (TRU-PEM の人工バリア設計については「2.2.5 PEM 方式を適用した TRU 等廃棄物の人工バリア設計に係る技術的根拠の整備」参照)。この技術開発では、各々の処分概念に対応する回収方法を①回収可能性の維持方法の検討、②適用可能な回収技術、及び③回収装置の概念設計の手順で検討することとし、そのための要件を以下のように設定した。

- 回収作業によって廃棄物を封入した廃棄体パッケージを損傷させないこと
- 回収作業時の作業員の放射線被ばくを避けるため、遠隔操作による作業が可能であること
- 適用する技術は、既存の技術、あるいは近い将来に実現の見通しを有する技術であること

2021 年度までに手順①人工バリアの状態に応じた回収可能性の維持方法を検討し、包括的技術報告書の処分概念では硬化したモルタルの除去技術が、TRU-PEM 方式では埋戻し材 (ベントナイト混合土) の除去技術がそれぞれ課題となることを明らかにした (NUMO, 2023)。2022 年度は、これらの課題への対応を念頭において、回収に適用可能な既存の技術を調査 (手順②) し、これに基づいて回収装置の概念を検討した (手順③)。

2. 主な成果

検討にあたっては、TRU 等廃棄物の処分概念のうち、包括的技術報告書の廃棄体パッケージ B の処分概念、及び円筒型廃棄体パッケージの TRU-PEM 方式を対象とした。以下にそれぞれの検討結果について述べる。

(1) 廃棄体パッケージBの処分概念

廃棄体パッケージBの処分概念は、厚さ50mmの炭素鋼製の容器内に廃棄体を溶接封入した廃棄体パッケージを大断面の地下坑道に設置した鉄筋コンクリート製構造躯体内に積み上げて定置し、廃棄体パッケージ間の隙間(幅約150mm)をモルタルで充填したものである(NUMO, 2021)。構造躯体の周囲には厚さ1mのベントナイト製緩衝材が施工される。廃棄体の回収が必要となった場合には、硬化したモルタルを遠隔操作で除去した後、クレーンを用いて廃棄体パッケージを遠隔操作で取り出すこととなる。コンクリートあるいはモルタルの除去に関して施工実績を有する技術としては、コアボーリング、ウォータージェット、ワイヤソーイング、ディスクカッター、油圧割裂、放電衝撃破碎、小型ブレーカーがある。これらの既存技術について、遠隔操作の適用性、狭隘な隙間のモルタル除去への適用性、及び廃棄体パッケージの損傷防止の観点から調査し、廃棄体パッケージBの処分概念への適用性を定性的に評価した。その結果、幅150mmの廃棄体パッケージ間の狭隘な隙間で硬化したモルタル充填材を除去する技術として有効と考えられるのはウォータージェットのみであった。しかし、この技術を用いて狭隘な隙間を対象に廃棄体パッケージ1個分の深さまでモルタルを除去した実績はなく、引き続きその実施可能性について検討を行うことが必要である。これらの成果及び課題は、廃棄体パッケージ間をモルタルで充填する廃棄体パッケージAの処分概念にも共通である。

(2) 円筒型廃棄体パッケージ用 TRU-PEM

対象とした TRU-PEM は、鋼材の腐食膨張の影響、発熱の影響を考慮し、角型形状の ISO 輸送コンテナ(幅2.4m、長さ6.0m、高さ1.2m)内に円筒型廃棄体パッケージ2本をベントナイト緩衝材(Na型ベントナイト100%、乾燥密度 $1,600\text{kg/m}^3$)とともに地上で組み立てたものである。包括的技術報告書の処分概念では、廃棄体パッケージ間のモルタル充填材の施工のために構造躯体が必要であったが、TRU-PEM方式の場合、PEMを処分坑道に直接定置することになるため、構造躯体は不要となる。この結果、定置装置には包括的技術報告書で提示した天井クレーンによる定置は必要ではなくなり、代わりにフォークリフトが利用できるため、処分坑道の安定性が確保できることを条件に、坑道断面の合理化を検討し矩形の処分坑道(内空断面、幅8m、高さ8.5m)としている(図1)。

TRU-PEMを矩形の処分坑道に定置する場合には、坑道閉鎖後の床面コンクリートの地下水の反応により生成される高アルカリ性のプルームによる TRU-PEM 内の緩衝材の劣化を抑え、かつ積み重ねた TRU-PEM による荷重を支持するため、1段目に PEM 容器に埋戻し材を充填した台座を設置する構造(鈴木ほか, 2023)とし、作業時の安全性、効率性や経済合理性の観点から、自走式の定置装置で4段の PEM を積み設計とした(図1)。この定置装置は TRU-PEM の回収にも使用する。処分坑道に所定数の TRU-PEM の設置が完了した後に、TRU-PEM と処分坑道壁面間の空間を、ベントナイトと掘削土を1:1で混合した材料で、吹付けベントナイト工法により埋め戻す。

図1に示した坑道と埋戻し材の形状を考慮して、既に実用化されている矩形シールド装置を参考に、埋戻し材の除去装置の概念設計を実施した。図2に設計した装置の概念図を示す。この装置では、高レベル放射性廃棄物の処分概念に適用した PEM に対して実証試験が行われている埋戻し材の除去技術(機械的掘削とウォータージェットによる流体を用いた除去技術の組み合わせ)の成果(原環センター, 2020)も参考にしており、機械的掘削の後、水を吹きかけることでベントナイトをスラリー化し回収しやすくする機構、及び把持部のベントナイトを除去する機構を備えている。

埋戻し材を除去した後は、前述の定置兼回収装置で TRU-PEM を回収し、搬送装置に載せて地上に搬出することを想定している。以上の検討により、TRU-PEM の回収技術の実現可能性について見通しを得た。これらの成果は、PEM の周囲をベントナイト混合土で埋め戻す角型廃棄体パッケージ用の TRU-PEM 方式による処分概念に対しても適用可能と考えられる。

3. 今後の展開

TRU-PEM 方式に関しては、実用的な埋戻し材除去技術について見通しが得られているが、除去効率の確認などの実証的研究が今後必要である。廃棄物パッケージ B の処分概念に関する回収技術については、引き続きウォータージェットによる除去方式について所要の性能を実現できるかどうかを確認していく計画である。ベントナイト埋戻し材の除去技術は、高レベル放射性廃棄物の処分概念に適用した PEM と共通の技術であり、今後それらの技術開発と連携して進めていく予定である。

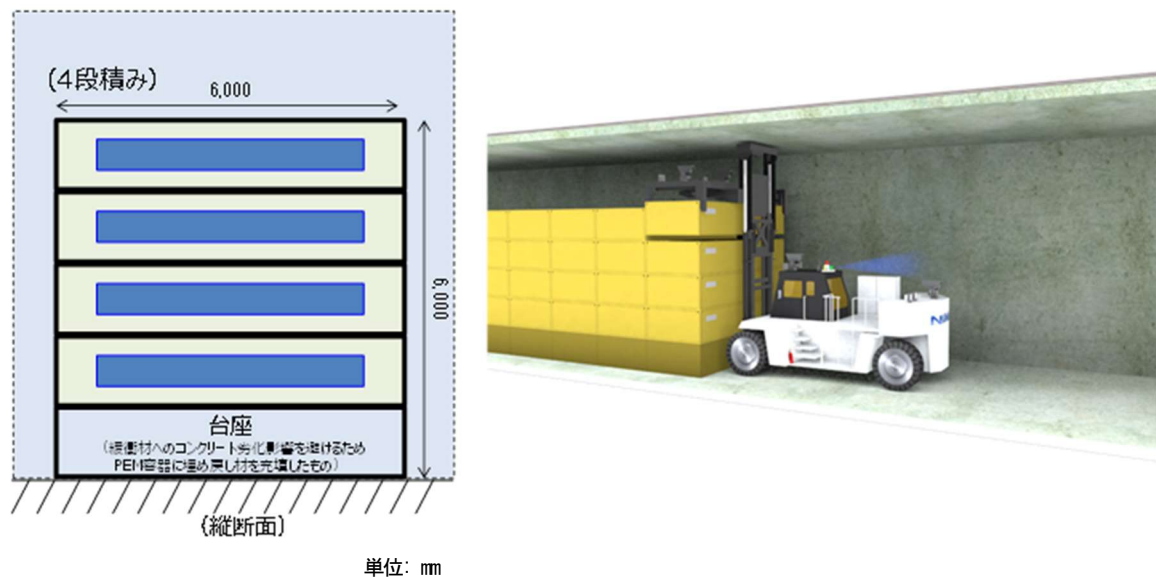


図 1 TRU-PEM の集積方法と定置兼回収装置のイメージ

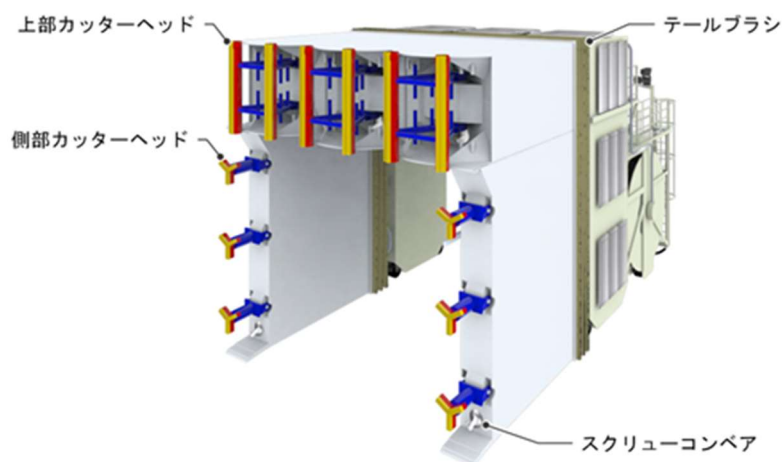


図 2 TRU-PEM 用門型埋戻し材除去装置の概念図

ベントナイトをスラリー化するための機構は、上部カッターヘッドの背部に設置

参考文献

- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2020) : 地層処分事業の技術開発計画 (2018 年度～2022 年度) 改訂版, NUMO-TR-20-05.
- 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, pp.163-164.
- 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.32-34.
- 鈴木覚, 山本陽一, 小川裕輔, 後藤考裕, 高橋拓麻 (2023) : PEM 方式を適用した TRU 等廃棄物の人工バリア設計 (その 1), 土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会, 講演要旨集, CS12-15.
- 原環センター(原子力環境整備促進・資金管理センター) (2020) : 平成 31 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 平成 27 年度～平成 31 年度 5 ヶ年取りまとめ報告書, pp.2-53 – 2-60.

2.2.5 PEM方式を適用したTRU等廃棄物の人工バリア設計に係る技術的根拠の整備

高橋 拓麻 後藤 考裕 鈴木 覚 山本 陽一

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

地層処分場が設置されると想定される多様な地質環境や長い事業期間中における科学技術の進歩などに対応して、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は2018年度より、TRU等廃棄物の新たな処分概念として、TRU-PEM方式の技術開発に取り組んでいる。TRU-PEM方式は、地上でPEM容器内に緩衝材とともに廃棄体パッケージを収納してTRU-PEMを組み立て、その後、TRU-PEMを地下施設に搬送し、処分坑道に集積配置するという方法である。TRU-PEM方式の開発では、人工バリアの設計、処分坑道への定置方法の検討、処分坑道断面の設計、処分坑道の埋戻し方法の検討、回収方法の検討、及び安全性の評価が必要であるが、本技術開発では、人工バリアである緩衝材の設計に必要な技術的根拠の整備に取り組んだ。

TRU等廃棄物を封入する鋼製の廃棄体パッケージ容器には、操業中に加えて閉鎖後数百年程度の放射性物質の閉じ込め性能を期待しており、これまでに、包括的技術報告書で示した角型の廃棄体パッケージに加え、円筒型廃棄体パッケージの2種類の設計オプションを検討している (NUMO, 2021; 鈴木ほか, 2023)。包括的技術報告書 (NUMO, 2021) においては、角型の炭素鋼製廃棄体パッケージを鉄筋コンクリート製の構造躯体内に集積配置し、放射性物質の移行遅延を期待するモルタルを廃棄体パッケージ間の隙間に充填する設計例を示した。この場合、炭素鋼は不働態化するため、廃棄体パッケージ容器に閉じ込め機能を期待する数百年程度の期間における腐食膨張量はわずかであり、これによる構造躯体の変形、及び緩衝材の変形量に応じて発生する応力は無視できる程度と考えられる。TRU-PEM方式の場合には、放射性物質の移行抑制を目的として角型あるいは円筒型の廃棄体パッケージ容器に接するように緩衝材を設置するため、炭素鋼は全面腐食となり、廃棄体パッケージ容器の腐食速度は、モルタルを充填する場合よりも大きくなる。このため、廃棄体パッケージ容器の腐食膨張により起因して増加する緩衝材の有効応力の影響を考慮して、廃棄体パッケージ容器の構造健全性が確保できる範囲において、緩衝材の乾燥密度と厚さを設計する必要がある。また、TRU-PEM方式は緩衝材などの人工バリアを地上施設で一体化して組み立てることで、多様な地下環境の影響を受けずに人工バリアを構築できるメリットがある一方、PEM容器によって地下水の緩衝材への浸透が不均一となる結果、緩衝材の密度が不均一となる可能性がある。この場合、緩衝材の性能も、密度に依存して不均一になるので、その影響を評価する必要がある。

このため、2022年度の技術開発では、TRU-PEM方式の緩衝材の設計、及び再冠水過程における緩衝材の飽和までの挙動 (緩衝材の温度及び飽和度の時間的及び空間的变化など) に関する技術的根拠の整備を目的とし、廃棄体パッケージ容器の腐食膨張に伴う人工バリアの応力解析及び再冠水過程の熱-水連成解析を実施した。

1 廃棄体をまとめて金属性などの処分容器に収納し隙間をモルタルなどで充填したものをいう。

2. 主な成果

(1) 廃棄体パッケージ容器の腐食膨張に対する緩衝材の適用条件の検討

物理的緩衝性の設計要件を満足する緩衝材の適用条件を、次の考え方と手順で求める。

- ・ 緩衝材はクニゲル[®]V1 を 100%使用したものとす。廃棄体パッケージ容器の形状は、角型あるいは円筒型の 2 種類の廃棄体パッケージ容器を対象とする。PEM 容器は直方体とする。
- ・ 図 1 に示す TRU-PEM の緩衝材の形状に対して、有限要素法を適用した応力解析により、緩衝材の厚さ（最薄部）と乾燥密度を変数として、廃棄体パッケージ容器と PEM 容器の腐食膨張（平均腐食深さはそれぞれ 2 mm, 1,000 年経過時に相当）により増加する緩衝材の有効応力を求める。解析は、単体の TRU-PEM を対象とし、PEM 容器表面が拘束されている条件とする。応力解析には、解析コード Abaqus を用いる。PEM 容器の腐食膨張方向は、緩衝材及び廃棄体に作用する応力に対して保守的な設定になる内側方向への膨張とする。一方、廃棄体パッケージ容器については、法線方向外側への膨張とする。
- ・ 廃棄体パッケージ容器の耐圧代は、地下施設の設置深度に依存して増加する静水圧に加えて、最大 5 MPa の外圧が作用しても設計要件を満足するように設計されている（例えば、処分深度が 500 m であれば約 10 MPa の外圧に耐える；鈴木ほか, 2023）。よって、この耐圧代の算定において、許容可能な緩衝材の有効応力の最大値を 5 MPa に設定し、応力解析により算出した緩衝材の有効応力がこの条件を下回る緩衝材の乾燥密度と厚さに関する適用条件を設定する。
- ・ 緩衝材の乾燥密度と厚さは、上記の適用条件に加え、PEM 容器の形状（直方体）及びサイズを考慮して設定する。
- ・ 設定した緩衝材の仕様が TRU-PEM を集積配置しても適用可能であることを確認するため、処分坑道内に TRU-PEM を集積し、処分坑道を埋め戻した状態をモデル化したもの（図 2 参照）を対象に応力解析を実施する。集積配置した TRU-PEM の緩衝材要素の中で、最も高い有効応力を示した要素の値を代表値として採用し、上述の許容可能な有効応力を下回ることを確認する。

応力解析の結果、図 3 に示すとおり、乾燥密度が高いほど廃棄体パッケージ容器に及ぼす緩衝材の有効応力は大きくなり、緩衝材の厚さが厚くなるほど、その有効応力が低下する結果を得た。これらの結果より、緩衝材の乾燥密度を 1.7 Mg/m^3 以下とすることで、緩衝材の有効応力は許容可能な有効応力を超えることはなく、緩衝材の適用条件を満足した。

この結果を踏まえ、緩衝材の乾燥密度を 1.6 Mg/m^3 に設定し、PEM 容器寸法により求まる緩衝材の最小厚さは、角型廃棄体パッケージでは 200 mm（ドラム缶、キャニスタに共通）、円筒型廃棄体パッケージでは 150 mm（ドラム缶）または 270 mm（キャニスタ）となった（図 4 参照）。

処分坑道を埋め戻した状態をモデル化した応力解析では、4 段で積み重ねた PEM のうち上・下段の PEM 容器の腐食膨張の影響を受け、中段の緩衝材の有効応力が大きくなることがわかった。ただし、上記の緩衝材の乾燥密度と厚さであれば、許容可能な有効応力を超えることはなく、緩衝材の適用条件を満足した。

(2) 再冠水過程における緩衝材飽和に関する挙動の把握

再冠水過程における処分坑道内の緩衝材に対する飽和までの挙動を確認するため、処分坑道の埋

戻しから、処分場の閉鎖を経て 10,000 年後までの期間を対象に、処分深度を 500 m とし地表面から深度 1,000 m までをモデル化した。解析モデルの条件は、(1) の応力解析による検討結果に基づき設定し、円筒型廃棄体パッケージ容器を対象とする。廃棄体仕様は、発熱性を有するグループ 2 廃棄物（キャニスタ）、及びグループ 3 廃棄物（ドラム缶）の 2 ケースを対象とする。

キャニスタとドラム缶による廃棄体の結果を比較すると、坑道中央部の緩衝材の飽和度が 100% に達するまでの時間は、キャニスタの方がドラム缶より 70 年程度早い。また、緩衝材の最高温度は、発熱量が高いグループ 2 廃棄物であっても最高 45°C 程度であり、発熱による緩衝材の再冠水時間に対する影響は無視できる程度であった。

また、解析によれば、TRU-PEM を集積配置した上段の緩衝材は処分場の閉鎖後、20 年程度で飽和度が 100% に達するのに対し、坑道中段に位置する緩衝材では、飽和度が 95% に達するのに 1,100~1,400 年程度、飽和度が 100% に達するまでには 2,400~2,500 年程度を要するという結果となった。中段の TRU-PEM において緩衝材の飽和までの期間が長期に及んでいるのは、PEM 容器により緩衝材への地下水の浸透が妨げられたことによるものではなく、地下水の供給面となる坑道壁面から TRU-PEM までの距離の違い（例えば、上段は坑道天端から 2.5 m、中段は 4.9 m）により生じている。

3. 今後の展開

今後も TRU-PEM 方式の技術開発を継続して実施し、TRU 等廃棄物の処分概念の設計オプションの整備に取り組む。本検討で設定した緩衝材の仕様に対して、施工方法の検討及び PEM の組み立て方法の検討を進める。また、緩衝材の再冠水解析による検討では、中段の TRU-PEM の再冠水時間が長くなる傾向であったが、廃棄体パッケージ容器の耐食性に与える影響、及び廃棄体パッケージの閉じ込め性を喪失後に、放射性物質が不飽和状態の緩衝材中を移行することによる影響を、核種移行解析における不確実性として評価することを検討する。そのため、岩盤の透水性などの水理条件や PEM 容器の地下水の浸透性を変更した感度解析を実施し、核種移行解析の不確実性低減の観点から TRU-PEM 方式の改良を進めるとともに、得られた結果を閉鎖後の安全評価の状態設定に反映する。

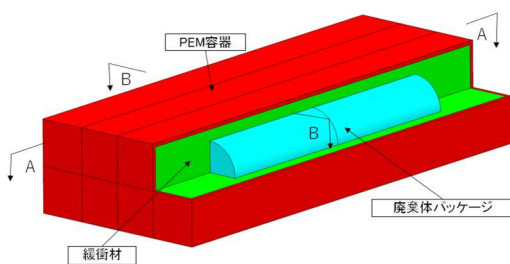


図 1 3次元単体モデルの例

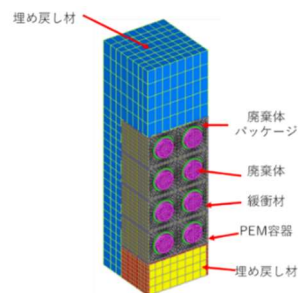


図 2 3次元坑道モデルの例
(円筒型廃棄体パッケージ容器)

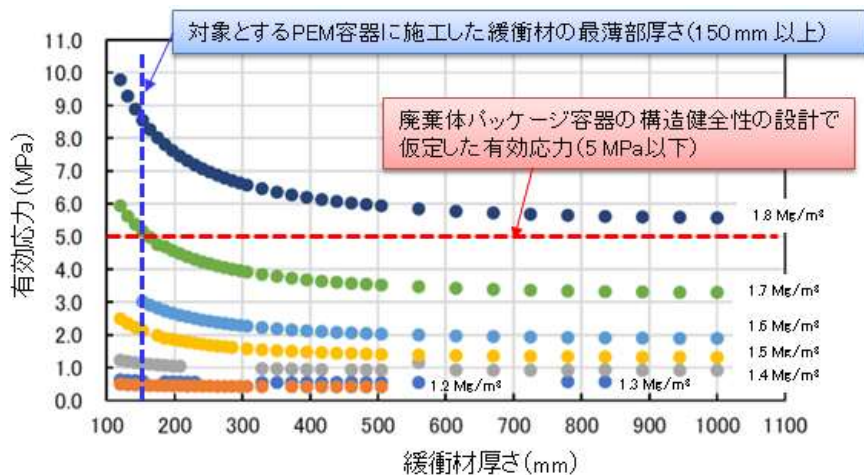


図 3 緩衝材の適用条件の検討結果

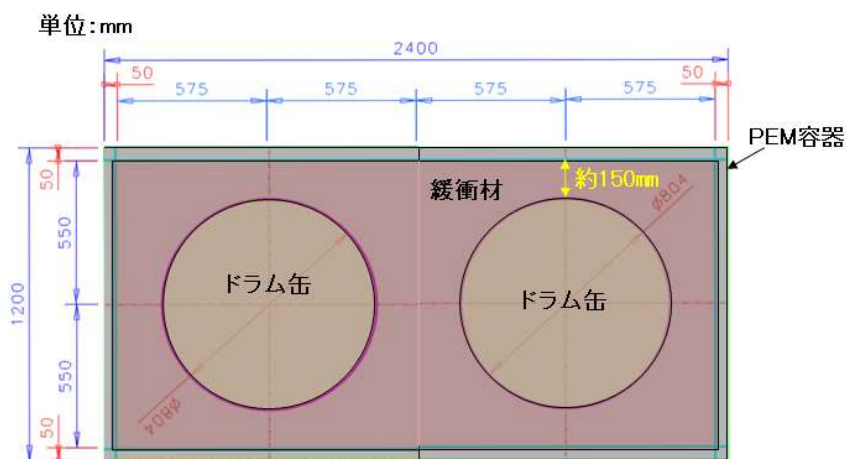


図 4 緩衝材の最小厚さの例（円筒型廃棄体パッケージ容器，ドラム缶）

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—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，本編第4章，pp. 4-47～4-54.

鈴木覚，山本陽一，小川裕輔，後藤考裕，高橋拓麻 (2023)：PEM方式を適用したTRU等廃棄物の人工バリア設計（その1），土木学会全国大会第78回年次学術講演会，講演要旨集，CS12-15.

2.2.6 高レベル放射性廃棄物に係る PEM の製作・施工技術の適用限界の把握

高橋 拓麻 山本 陽一 北川 義人

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

高レベル放射性廃棄物を対象とした PEM (Prefabricated Engineered Barrier System Module : 地上施設で廃棄体を人工バリアと一体化したモジュールを地下施設に搬送し定置する技術, 以下, 「PEM」という) 方式による人工バリアの製作技術については, PEM 容器を複数に分割した鋼殻リング内で緩衝材を製作し, これを積み重ねて組み立てるという方法が, 実規模スケールの実証試験として実施されている (原環センター, 2013)。この方法では, 緩衝材には多連装ランマによる動的締固め方式が, 分割した PEM 容器の結合には印籠結合がそれぞれ採用され, 製作及び組立が可能であることを確認している。しかし, これらの方法は緩衝材の目標密度にするための一層当りの締固め厚さが, 多連装ランマによる締固めエネルギーとの関係から 5 cm と薄いことや, 容器の複数分割化による組立工程及び品質管理工程の増加などにより, 1 体当りの PEM 製作に時間を要することが課題であった。特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画 (平成 20 年 3 月 14 日閣議決定) で定められている年間 1,000 体 (年間の稼働日を 200 日として 1 日に 5 体) の廃棄体を処分する操業工程を実現するためには, PEM 容器の構造や製作方法に関して, 品質管理を容易にし, 効率性を高めた技術オプションを開発することが重要である。

本検討では, 包括的技術報告書 (NUMO, 2021) で示した PEM 容器を対象に, PEM の製作と組立方法に関する複数の技術オプションの中から最も効率的な方式の候補として上蓋 2 分割型を選定し, PEM 容器と一体化させた緩衝材の製作方法と PEM 容器の蓋結合方法について, 実現可能性と適用限界の把握のために確認する項目を定め, 2021 年度にそれぞれの試験計画を策定した (NUMO, 2023)。2022 年度は当該計画に基づき, 大型プレス機 (20,000kN) による緩衝材製作試験と, 産業用ロボットを用いた PEM 容器の蓋結合試験を実施した。それぞれの試験で確認する項目とその内容は以下の通りである。

(1) 緩衝材製作試験

高いエネルギーでベントナイトの締固めが可能な大型プレス機による静的締固め方式を採用した小スケール (実規模の内径 2,260 m に対し約 1/4 及び約 1/8 スケール) の試験を実施する。緩衝材の材料となるベントナイトには, これまでに国内産ベントナイト及びベントナイト混合土を対象として基本特性データを取得 (NUMO, 2022) している, 3 種のベントナイト (クニゲル®V1, 三川原鉱, 天竜原鉱) を用いた。大型プレス機による緩衝材製作については, 効率化が期待できる一方で, 一度のプレスによる緩衝材の製作径や仕上がり厚さ等の適用限界が不明であることから, 製作の適用限界, 品質確保の容易性, 製作の効率性を確認項目として表 1 に示す内容と, 上記 3 種類のベントナイト使用した場合の緩衝材製作の実現可能性について, 本試験により確認する。

(2) PEM 容器の蓋結合試験

廃棄体を封入した後の PEM 容器の蓋と胴部の結合は, 放射線環境での作業となることから, 遠

隔操作または自動化されたロボットにより行う必要がある。その結合方法として印籠結合、機械結合（ボルト、ナット）等が考えられる。本試験では既存の技術を用いて遠隔操作または自動化による操作が可能かつ作業性が他の方式と比べ容易な、ボルト方式及びナット方式を対象として、産業用ロボットによりボルト・ナットの脱落や緩みなく作業を行うことが実現可能であるか確認を行うとともに、技術的な課題の整理を行う。

2. 主な成果

(1) 緩衝材製作試験

表 2 に示すとおり、ベントナイト材料、成形容器の内径、一度のプレスによる締固め厚さと製作径の比 (H/D) を変えて試験を実施した。試験状況を図 1 に示す。本試験の結果は以下のとおりである（高橋ほか, 2023 ; 竹内ほか, 2023）。

まず、 H/D と成形圧力の関係については、図 2 に示すように H/D が大きくなると成形圧力は増加する傾向となった。クニゲル[®]V1 の成形容器の内径 $D=596.8$ mm のケースでは締固め厚さ H が高くなっても最大成形圧力はわずかな増加で 5 MPa 程度であったが、三川原鉱と天竜原鉱では顕著な増加傾向がみられたことから、これらのベントナイトでは容器内壁と材料間の摩擦が大きくなっている可能性がある。先行実施した内径 50 mm のモールドを用いた各ベントナイトの締固め試験（以下、「要素試験」という）（山本ほか, 2023）の結果と本試験結果とを比較すると、成型圧力がクニゲル[®]V1、三川原鉱、天竜原鉱の順で大きくなるのは要素試験と本試験結果と同様であった。 H/D が同じ場合、クニゲル[®]V1 では要素試験と本試験結果の成形圧力は同程度であるが、三川原鉱と天竜原鉱では乖離が認められた。図 3 に示す H/D とリバウンド率（リバウンド量/締固め厚さ）の関係から、3 種類のベントナイトともに、 H/D が大きくなるとリバウンド率は低下する傾向を示した。要素試験の結果と比較すると、 H/D が同じ場合、リバウンド率がクニゲル[®]V1、三川原鉱、天竜原鉱の順で大きいという傾向は両方の試験で同様であった。また、成形圧力の除荷に伴うリバウンドは緩衝材の中央部分で大きく同心円状に広がる性状を示した。成型後の緩衝材の密度については、断面中心部では試験条件とした H/D に関係なく上下方向（厚さ方向）でおおむね一様であるが、側部では H/D が大きくなると底部の密度が上部に比べて低くなる傾向であった（最大で 0.1Mg/m^3 程度の密度差）。これには、図 4 に示すように側方土圧の分布結果との対応から荷重伝播の違いや容器との間の摩擦による影響が考えられた。

本試験 ($D=596.8$ mm, $H/D=0.64$ のケース) での 1 層当りの作業時間の内訳は、PEM 容器のプレス位置への移動と位置合わせに 5 分、ベントナイトの撒き出しと敷き均しに 6 分、载荷に 0.5 分、载荷保持時間に 5 分、除荷に 0.5 分、そして PEM 容器のプレス位置からの移動に 3 分の合計 20 分であった。本試験と同様のプレス方法を仮定し、本試験に要した緩衝材製作時間 20 分を 1 層当りの作業時間とすると、実規模の PEM1 体（長さ 3,356 m）当り 9 層の締固めが必要であることから、製作時間は 20 分 \times 9 サイクル = 180 分と概算される。動的締固め方式では、一度に製作できる緩衝材厚さは 5 cm でその転圧時間に約 8 分を要していたことから（原環センター, 2012）、PEM1 体分の転圧だけで約 540 分（9 時間）の製作時間を必要としていたことになる。このように、本試験の静的締固め方式による製作は、動的締固め方式に比べて製作時間を 1/3 以下に短縮できることを確認することができた。

(2) PEM 容器の蓋結合試験

搬送工程における PEM 容器の蓋部に作用する引張荷重を計算し、PEM 容器の結合部（蓋部と胴部の接触部分）に必要なボルトの仕様（M6～M12、引張強さ 1,200 N/mm²）と本数（8 本～16 本）を設定した。また、ボルト孔による PEM 容器の力学的な影響を評価するため、設定したボルトについて、ボルト孔による蓋部の断面欠損を考慮して 3 次元 FEM 解析を実施し、許容応力を満足することを確認した。蓋結合試験（図 5）では、ボルト方式及びナット方式ともに、0.05 mm の隙間ゲージは入らず、蓋と胴部の結合部に有意な隙間はなく、自動化したロボットアームによるボルト締め付けにおいて結合部の品質影響（操業期間中の構造健全性）に与える課題がないことを確認した。品質影響に与える課題はないものの、本試験ではロボットのアームの先端にインパクトレンチ（市販品）を使用したため、作業性の観点から、以下のような工具の仕様に対する改善が必要であることが明らかとなった。

- ・ 締め付け時の回転によりソケット及びボルトがぶれること
- ・ 締め付けトルク値を直接管理できないこと
- ・ ボルトの締め付けスピードとロボットのアーム下降速度の調整が難しいこと

これらは、締め付け条件（回転速度・角度・締め付けトルク）の設定が可能かつ締め付け精度の高いナットランナーという工具を用いることで解決できると考えられる。蓋結合の締め付けに要する時間は、ボルト方式及びナット方式ともに約 3 分であったが、本試験ではアームの移動速度に余力があり（最大能力まで 10 倍程度の速度増が可能）、実規模の PEM 容器における移動距離を考慮しても、同結合方法・同条件の蓋結合であれば本試験と同程度かそれ以下の時間で蓋結合が可能であると考えられる。

3. 今後の展開

本試験で得た成果を踏まえ、PEM の製作及び組立に関する技術オプションについて、品質確保の容易性と効率性の向上の観点から、引き続き検討を進める。試験条件等を変更した場合（例えば、緩衝材製作試験では、PEM 容器のスケールアップ、締固めの多層化（2 層締固め等）について緩衝材の締固め特性や蓋結合に関するデータを拡充し、PEM 製作・組立技術に関する要素技術の開発・改良を進めるとともに次段階の実証試験に向けた準備を整える。



図 5 試験状況（容器 300.5 mm, 実規模の 1/8 スケール）

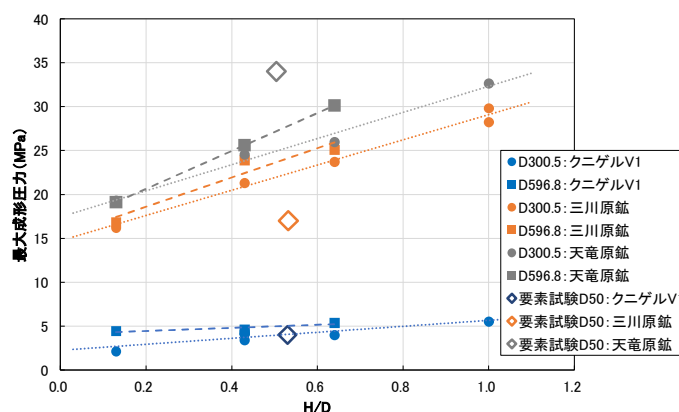


図 6 H/D と成形圧力の関係

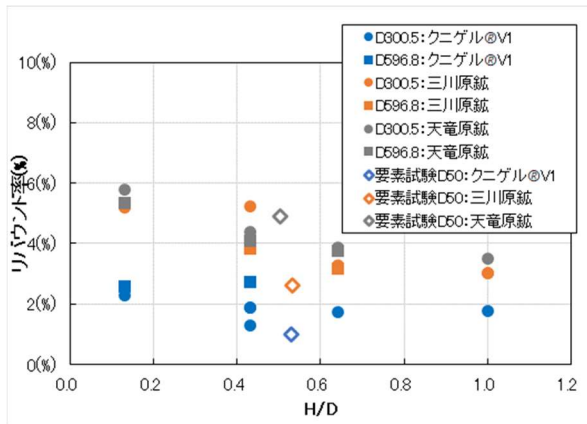


図 7 H/D とリバウンド率の関係

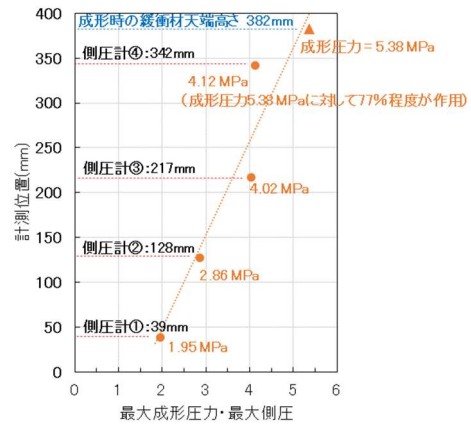


図 8 成形圧と側圧の関係の例 (D596.8, H/D=0.64, クニゲル®V1)



図 10 試験状況 (蓋結合試験)

表 1 緩衝材製作試験の確認項目

確認項目	内容
製作の適用限界	成形圧力と直径・締固め厚さの関係
品質確保の容易性	密度分布, 成形圧力保持時間, 成形圧力除荷後のリバウンドなど
製作の効率性	締固めや密度計測時間などを含めた PEM1 体当たりによる要する製作時間

表 2 緩衝材製作試験の試験条件

項目	内容
試料 (ベントナイト)	クニゲル®V1 (クニミネ工業社製), 三川原鉱 (ホーゲン社製), 天竜原鉱 (関ベン鉱業社製)
配合	ベントナイト 100%
目標乾燥密度	1.6 Mg/m ³ (圧縮時)
含水比	20% ± 1%
製作方法	20,000 kN プレス機による静的締固め
成形容器の内径	300.5 mm, 596.8 mm
締固め厚さ/直径比(H/D)	D300.5 : 0.13, 0.43, 0.64, 1.00 D596.8 : 0.13, 0.43, 0.64
载荷条件	1 段階プレス, 保持時間 5 min

参考文献

原環センター(原子力環境整備促進・資金管理センター) (2012) : 平成 23 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 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書 (第一分冊) -遠隔操作技術高度化開発-, pp.3-6 – 3-33.

- 原環センター(原子力環境整備促進・資金管理センター) (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 処分システム工学要素技術高度化開発 平成 19 年度～平成 24 年度の取りまとめ報告書, pp.2-80-2-84.
- 市野彰吾, 山本陽一, 後藤考裕, 北川義人 (2023) : 高レベル放射性廃棄物に対する PEM 方式の人工バリア製作技術に関わる適用性検討, 技術開発成果概要 2021, NUMO-TR-22-02, pp.32-34.
- 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, 本編第 4 章, pp. 4-46.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (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.
- 高橋拓麻, 山本陽一, 北川義人, 沖原光信, 竹内伸光, 戸栗智仁 (2023) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材の静的締固め試験 (その 1), 第 78 回土木学会年次学術講演会.
- 竹内伸光, 沖原光信, 戸栗智仁, 高橋拓麻, 山本陽一, 北川義人 (2023) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材の静的締固め試験 (その 2), 第 78 回土木学会年次学術講演会.
- 山本陽一, 後藤考裕, 渡邊保貴, 吉川絵麻, 小栗光, 伊藤歩夢, 山田淳夫 (2023) : 国内産ベントナイトの静的締固め特性に関する試験検討, 第 78 回土木学会年次学術講演会.

2.2.7 炭素鋼オーバーパック溶接時の残留応力低減方法の検討

小川 裕輔 根本 脩平 鈴木 覚

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

オーバーパックの腐食現象のうち、応力腐食割れ（以下、「SCC」という）及び水素脆化割れは早期の破損要因となりうるため、その発生の可能性を評価することが重要である。SCC 及び水素脆化割れは、材料条件、環境条件、応力条件の3条件が揃った場合に生じる現象である。炭素鋼という材料条件において、SCC 及び水素脆化割れが発生する環境条件は様々に存在するが、処分場の環境条件はニア・ニュートラルpHSCC（井上, 2015）を除いてその条件に含まれず、同SCCについても、熱処理により材料中の引張残留応力を低減可能であることから応力条件が満たされないため、SCC 及び水素脆化割れが発生する可能性は低いとして包括的技術報告書では評価した（NUMO, 2021）。このような熱処理による方法に加え、溶接部の引張残留応力については、溶接方法及び溶接条件を適切なものとする事で低減することも可能である。本技術開発においては、残留応力が低くなる溶接方法を選定し、その方法を対象に残留応力が最も低くなる溶接条件を検討している。

2021年度は、残留応力が低くなる溶接方法を選定するため、産業界において適用事例が多い溶接方法である、TIG（Tungsten Inert Gas）溶接、MAG（Metal Active Gas）溶接、電子ビーム溶接、サブマージアーク溶接、レーザー溶接、レーザーアークハイブリッド溶接を比較した。その結果、残留応力に影響する溶接時における入熱量の少なさ等の観点から電子ビーム溶接を検討対象として選定した。2022年度は、電子ビーム溶接を対象として残留応力が最も低くなる溶接条件を調べるため、残留応力に影響を与えうる溶接パラメータに着目した複数の条件において電子ビーム溶接試験を実施した。その後、溶接中の温度測定値を再現するように入熱条件を設定した熱伝導解析により、材料中の温度分布の時系列データを得て、当該データを入力として、材料内での熱変形の拘束により発生する残留応力を熱弾塑性解析により計算した。

2. 主な成果

オーバーパックの溶接部の構造としては、円筒胴の端部に平板の蓋を溶接する構造を想定した（図1参照）。本研究における溶接試験体は、図1の赤枠の部分を模擬した矩形状の炭素鋼ブロックを突合せたものとした（図2参照）。図1の構造では周溶接となることを考慮し、溶接終盤における既溶接部の拘束による残留応力への影響を模擬するために、溶接線の端部を鋼板のすみ肉溶接によって拘束した。

溶接時の温度変化を測定するため、温度計を溶接面とその裏面の3か所に設置した（図2参照）。残留応力に影響を与えうるパラメータとして入熱量、溶接能率、溶接深さに着目し、これらのパラメータを変化させた7つの溶接条件で電子ビーム溶接を実施した（表1参照）。全ての溶接条件において溶接欠陥のない健全な溶接部であることを放射線透過試験にて確認した。

解析モデルを図3に示す。熱伝導解析については、溶接後の断面マクロ組織観察（一例としてCase7のものを図4に示す）により測定した溶接部の形状を入熱領域としてモデル化し（図5参照）、溶接線方向に長さ5mm（2要素分）の入熱領域を表1の溶接速度に従って溶接線方向に移動させ、その

後1時間放置する解析をした。溶接試験体の初期温度は室温とし、電子ビーム溶接は真空チャンバー内で行うため、試験体表面の対流熱伝達条件は設定せず、試験体表面から真空チャンバー内の空間への放射を考慮した。入熱領域への入熱量については、溶接時に測定した温度変化に近い結果となるように、実際のビーム出力に対して入熱効率を設定した(図6参照)。次に、熱伝導解析結果から得られた温度分布の時系列データを用いて、材料内での熱変形の拘束により発生する残留応力を熱弾塑性解析により計算した。また、長期にわたるSCCの発生過程を検討する上では、全面腐食の進展後における材料表面の残留応力についても重要であるため、全面腐食による腐食減肉を模擬して溶接面近傍の要素を削除した際の応力再配分についても解析した。

Case6及びCase7の腐食減肉前後の残留応力解析結果を一例として図7に示す。ここでは、溶接線直交方向よりも残留応力が高かった溶接線方向の残留応力分布を示している。各Caseの溶接面の表面における溶接線方向の残留応力の最大値を図8に示す。図8に示すとおり、入熱量(Case1, 2, 3)と溶接能率(Case1, 4, 5)については、腐食減肉前後ともに表面の残留応力の最大値にあまり感度がなかった。一方で溶接深さ(Case1, 6, 7)については、腐食減肉前はあまり感度がないが、腐食減肉後は部分溶接(Case6)よりも全厚溶接(Case7)とした方が表面の残留応力の最大値が約50%低下することが分かった。このような結果となった要因としては、図7のCase6とCase7を比較すると分かるように、溶接深さが浅いと残留応力のピーク箇所も浅くなり、腐食減肉すると溶接面の表面がピーク箇所に接近したためと考えられる。以上のことから、電子ビーム溶接において、長期にわたる腐食減肉についても考慮した材料表面の残留応力の最大値を低減するには、入熱量や溶接能率を制御するよりも、溶接深さを深くすることが効果的であることが分かった。

3. 今後の展開

本研究では要素試験として矩形ブロックを用いて残留応力の溶接条件依存性を調べたが、実際の溶接構造を考慮した周溶接試験体による残留応力の確認を今後実施することで、SCC発生の可能性をさらに評価していく必要がある。

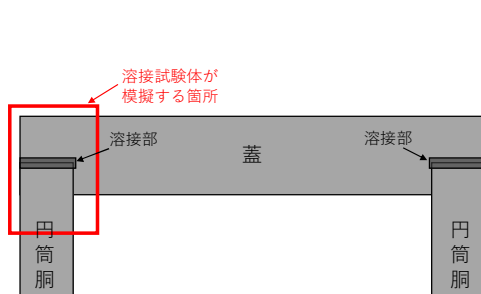


図1 溶接部周辺の容器の構造

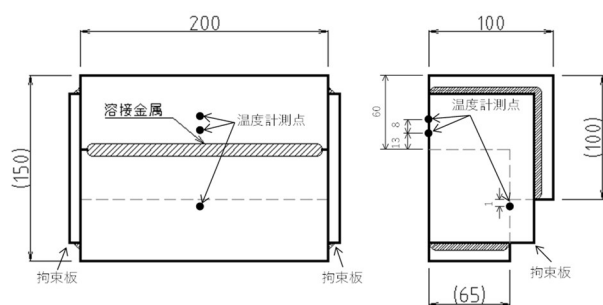


図2 溶接試験体の寸法

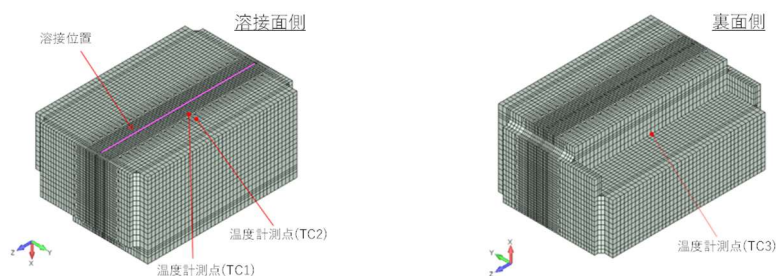


図3 解析モデル

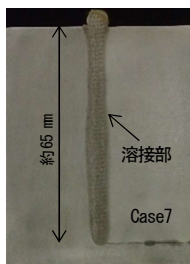


図 4 溶接部断面写真

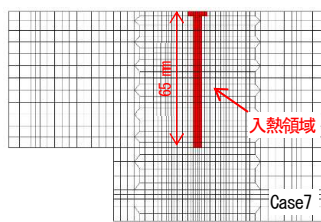


図 5 入熱領域のモデル化

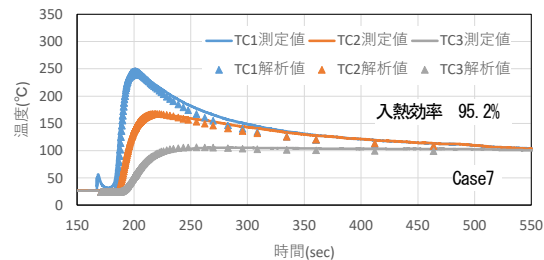
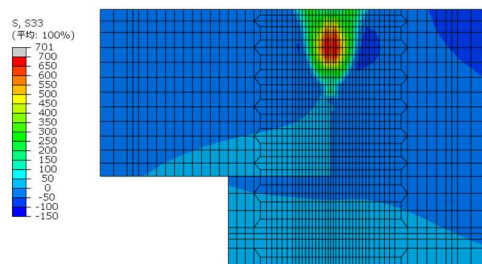
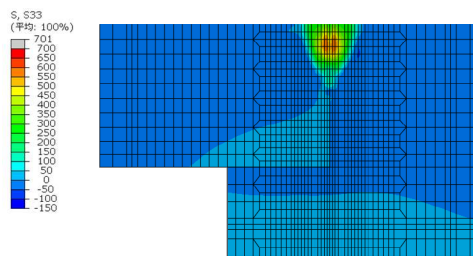


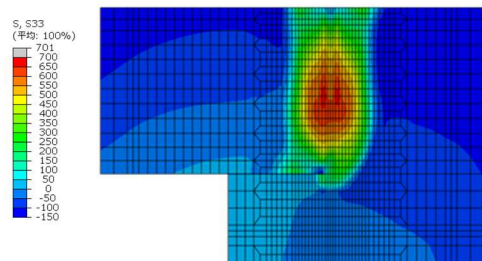
図 6 温度測定値と解析値の比較



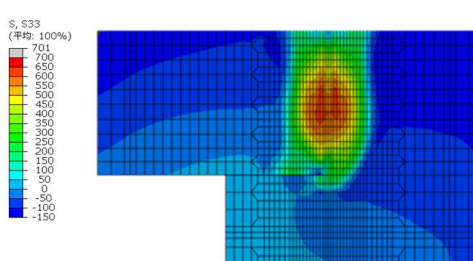
(a) Case6 腐食減肉前



(b) Case6 腐食減肉後

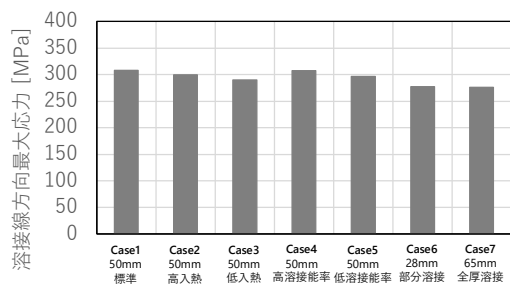


(c) Case7 腐食減肉前

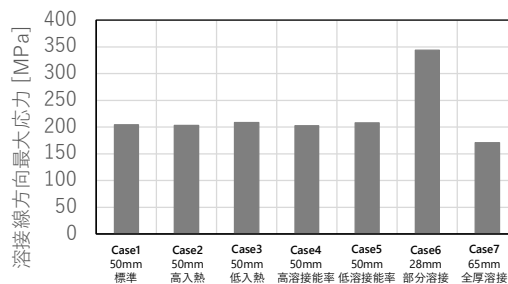


(d) Case7 腐食減肉後

図 7 残留応力解析により求めた溶接線方向の残留応力分布 (単位: MPa)



(a) 腐食減肉前



(b) 腐食減肉後

図 8 溶接面表面における溶接線方向の最大残留応力値

表 1 溶接条件

Case	1	2	3	4	5	6	7	
説明	標準	高入熱 * 1	低入熱 * 1	高溶接能率 * 2	低溶接能率 * 2	部分溶接	全厚溶接	
溶接深さ (狙い値)	[mm]	約50				約28	約65	
加速電圧	[kV]	150						
ビーム電流	[mA]	150	190	120	170	120	50	190
ビーム出力	[kW]	22.5	28.5	18.0	25.5	18.0	7.5	28.5
溶接速度	[mm/min]	400			460	320	400	
理論入熱値 (ビーム出力/溶接速度)	[W/(mm/min)]	56	71	45	55	56	19	71

* 1 溶接速度を一定にして、理論入熱値を変化させる。* 2 理論入熱値を同程度にして、溶接速度を変化させる。

参考文献

井上博之 (2015) : 埋設ラインパイプ鋼のニア・ニュートラル pHSCC (NNpHSCC) - 腐食き裂発生
の環境条件-, 材料, Vol. 64, No. 12, pp.970-975.

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.

2.2.8 銅コーティングオーバーパックスの製作技術の開発

小川 裕輔¹ 根本 脩平¹ 鈴木 覚¹ Peter G. Keech² 藤井 英俊³ 森貞 好昭³ 宮野 泰征⁴

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

1. 背景・目的

地層処分場が設置されると想定される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などに対応して、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スの設計オプションに関しては、炭素鋼製オーバーパックスに加え、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ス (以下、「銅コーティングオーバーパックス」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スの製作方法には、2種類の候補があり、NWMO が開発中の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 (図 1) (以下、「NWMO 方式」という) と、炭素鋼容器の表面を電気めっきまたはクラッドにより銅コーティングし、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する方法 (図 2) (以下、「NUMO 方式」という) がある。

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行っている。2022年度は、製作技術の実証及び各種施工条件の最適化を目的として 2018年度から実施している 15体の実規模による連続製造試験を継続した。また、2021年度からは、NUMO が調達した板巻鋼管¹への銅コーティング技術の適用性を確認するため、板巻鋼管に特徴的な部位である鋼管継目部に着目し、この部位を含む図 3 の赤枠に示す箇所を模擬した銅電気めっき試験、溶接試験、銅冷間溶射試験を実施している。2021年度は、溶接試験体を製作した (図 4 (b))。2022年度は、2021年度に製作した溶接試験体の非破壊検査を実施するとともに、銅電気めっき試験体及び銅冷間溶射試験体の製作と非破壊検査を実施した。

NUMO 方式のうち、銅接合部の摩擦攪拌接合に関しては、2020年度から大阪大学及び秋田大学との三者共同研究により技術開発を行っている。2021年度までに、適切な接合条件を確認するため、単一材として銅板での試験を経て、銅クラッド鋼板を用いた摩擦攪拌接合試験を実施した。2022年度は、NWMO が製造した銅電気めっき鋼板を対象に摩擦攪拌接合試験を行い、健全な継手外観が得られる接合条件を確認した。NUMO 方式のうち、炭素鋼接合部については、2021年度に、産業界において適用事例の比較的多い機械的接合方法である、ねじ込み接合、焼きばめ、冷やしばめ、ピン、ボルト、リベットを比較し、後工程の摩擦攪拌接合を含めた接合部の構造の単純さ、遠隔による接合作業の容易性等から、ねじ込み接合を検討対象に選定した。2022年度は、ねじ込み接合部の設計、試作及び締結試験を行った。

1 NWMO は継目無鋼管を用いているが、本研究において NUMO が用いた鋼管は板巻鋼管である。銅コーティングオーバーパックスに適用する継目無鋼管は、一般的な継目無鋼管よりも肉厚・大口径であり、製造可能な工場数が限られ、製造コストも高価である。板巻鋼管は、鋼板を曲げ加工して継目部を溶接して製造される鋼管であり、継目無鋼管よりも製造可能な工場数は多く、製造コストも安価である。継目部が何らかの悪影響を及ぼさないのであれば、板巻鋼管を適用することにより、調達性や経済的合理性を向上できる可能性がある。

2. 主な成果

NWMO 方式については、15 体の実規模による連続製造試験が、2022 年度までに数体の接合作業を残してほぼ完了した。連続製造試験を通じて、銅電気めっきや銅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施工パラメータの許容範囲を特定した (NWMO, 2023)。板巻鋼管を対象とした銅コーティングオーバーパックの製作試験については、NWMO が採用している条件を適用して、図 4 (a) (c) に示すとおり銅電気めっき試験体及び銅冷間溶射試験体を試作した。これらの試験体と 2021 年度に製作した溶接試験体 (図 4 (b)) に対し、非破壊検査 (超音波探傷試験及び渦電流探傷試験) を実施した結果、銅電気めっき試験体については非密着部が検出されなかったが、銅冷間溶射試験体については溶接線に沿って部分的に非密着部が検出された。また、溶接試験体にも一部に溶接欠陥が検出された。今後、板巻鋼管用に最適な溶接条件や冷間溶射条件を検討することで、非密着部や溶接欠陥の発生を低減できるか検討する。

NUMO 方式については、銅接合部の摩擦攪拌接合に関して、銅電気めっき鋼板を用いて摩擦攪拌接合試験 (図 5) を行い、銅めっき層の剥離やトンネル欠陥等の発生なく摩擦攪拌接合が可能な接合条件 (接合ツールの回転速度や接合速度等) を確認した。炭素鋼接合部の機械的接合については、オーバーパック周辺の外圧 (最大深度 1,000 m を想定) に耐え、緩みにくさや締結容易性等が考慮されたねじ込み接合部を、有限要素法による構造解析を踏まえて設計した。また、設計したねじ込み接合部を試作し、鋼管の外表面を摩擦力で把持するゴムシート付回転バンドを用いた締結試験 (図 6) を行った。その結果、締結時の噛み込み及び締結後の接合部のギャップがなく、必要な軸力を確保した締結が可能であること、核種移行評価に影響を与えない無機系潤滑剤 (グラファイト) の適用が可能であることが示された。

3. 今後の展開

NWMO 方式及び NUMO 方式の銅コーティングオーバーパックの製作技術について、信頼性、品質及び効率性の向上のため、以下の検討及び製作技術の改良を重ねて、設計オプションの整備を継続する。

NWMO 方式については、残り数体分の連続製造試験を完了させる。併せて、銅電気めっき工程の効率化を目的として、めっき速度の向上に取り組む。銅冷間溶射については、溶射中の溶射装置と溶射面の距離の制御が品質を確保する上で重要であるため、レーザーを用いた位置制御装置の適用を検討する (NWMO, 2023)。また、板巻鋼管に対する銅冷間溶射及び溶接については、今回の試験における欠陥の発生原因を特定するため、銅冷間溶射の密着性に影響しうる鋼管表面の硬さ等の機械的特性や、溶接部における空隙の発生に影響しうる鋼管内の不純物の分析等を行う。

NUMO 方式については、円筒形の銅クラッド鋼材を用いた摩擦攪拌接合試験を行い、施工対象となるオーバーパックにより近い形状での摩擦攪拌接合の適用性を評価する。また、炭素鋼容器の表面をクラッドにより銅コーティングする技術の開発のため、爆着、圧延、HIP (Hot Isostatic Pressing) 等のクラッド方法の適用性を評価する。

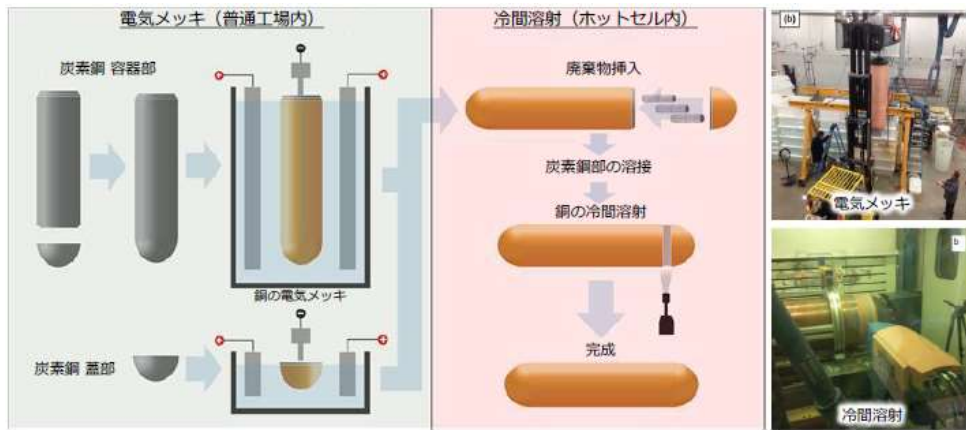


図 1 NMMO 方式による製作方法 (NMMO, 2016 ; 2017 ; 2018 を編集)

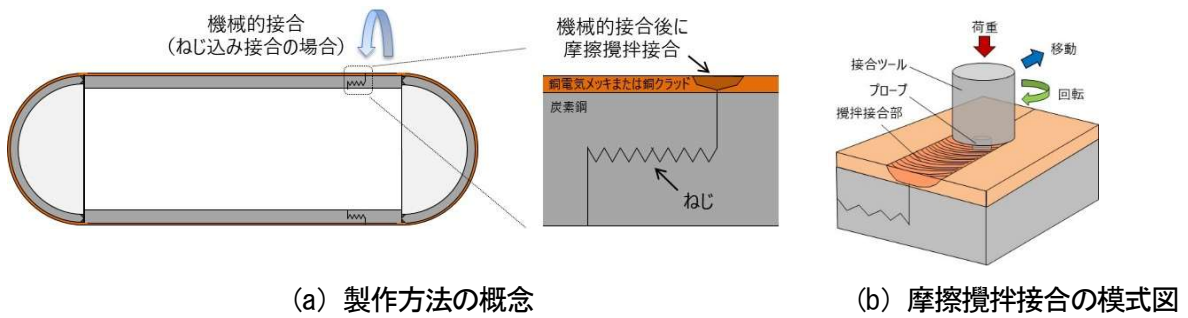


図 2 NUMO 方式による製作方法

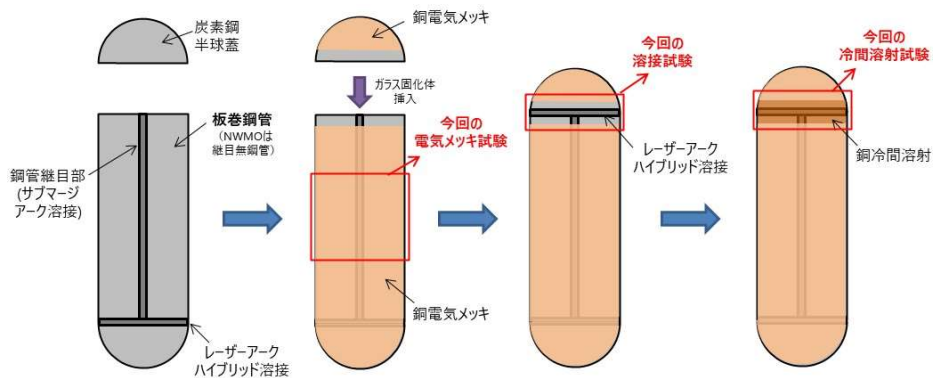
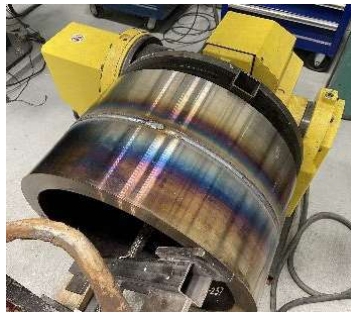


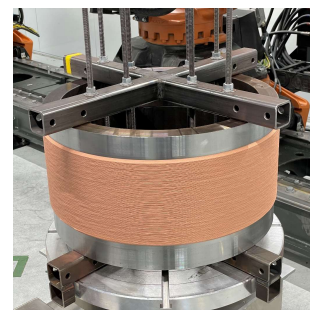
図 3 板巻鋼管を用いた NMMO 方式による製作方法と今回の試験部位



(a) 銅電気めっき試験体



(b) 溶接試験体



(c) 銅冷間溶射試験体

図 4 板巻鋼管を用いた NWMO 方式による製作試験

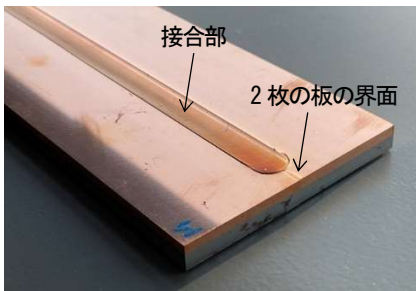


図 5 銅電気めっき鋼板の
摩擦攪拌接合



(a) 締結前



(b) 締結後

図 6 試作したねじ込み接合部の締結試験

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—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.
- NWMO (2016): Technical Program for the Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel - Annual Report 2015, NWMO TR-2016-01.
- NWMO (2017): Technical Program for the Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel - Annual Report 2016, NWMO TR-2017-01.
- NWMO (2018): Postclosure Safety Assessment of a Used Fuel Repository in Sedimentary Rock, NWMO TR-2018-08.
- NWMO (2023): Technical Program for the Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel - Annual Report 2022, NWMO TR-2023-01.

2.2.9 アクセス坑道内搬送システムの安全設計

市村 哲大 鈴木 覚

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

処分場の設計では、サイトの地形や環境条件、及び地下の地質構造に応じて柔軟に地上施設及び地下施設のレイアウト可能な設計オプションを整備しておくことが重要となる。包括的技術報告書（NUMO, 2021）では、地下施設に廃棄体などを搬入するアクセス坑道の線形を緩勾配の螺旋型の斜坑とした設計例を提示した。この設計例では、内燃機関をもつタイヤ方式の車両を用いて廃棄体を地下施設に輸送し、逸走防止対策を多重に設定することで事故時の放射性物質の飛散防止を図りやすいという利点がある。その一方で、廃棄体搬送車両の燃料である軽油だけでなく、ゴム製タイヤも可燃物となるため、これらに起因する火災・爆発リスクの低減が課題である。これらの背景を踏まえ、アクセス坑道の設計オプションを拡充するとともに、地下火災リスクの低減を目的として、2021年度から急勾配の直線斜坑や立坑の線形を対象に廃棄体を搬送するシステムの技術開発に着手している。これまでに、海外の実施主体の搬送システムの事例も参考に、搬送車両の落下または逸走による廃棄体からの放射性物質の飛散防止対策を備えた3種類の搬送システム（立坑用のエレベータ、直線斜坑用のインクライン、立坑及び直線斜坑に適用可能な空気カプセル方式）の概念的な検討を実施した（NUMO, 2023）。2022年度は、上述の搬送システムを対象に、放射性物質の飛散防止対策として検討した衝撃力緩和部材の有効性を評価する。

2. 主な成果

検討対象としている3種類の搬送システムについて、搬送部が落下または逸走する場合のイベントツリーを作成した（図1に例示）。イベントツリーには、異常状態の推移と安全対策となる異常発生防止策及び異常拡大防止策の関係を示した。イベントツリーを用いて廃棄体に衝突衝撃力が作用する状態のうちで最も影響が大きくなるケースを抽出した。

エレベータ及びインクライン方式については、落下あるいは逸走時に、副系統のブレーキシステムが全て故障すると、立坑底部の床（インクライン搬送方式であれば坑道端部の壁）に搬送物が衝突する可能性が想定される。空気カプセル方式については、図2に示すように、坑底部を上り勾配の線形とすることや、十分な滑走距離を確保することによる摩擦の影響、及び空気抵抗による減速効果が得られるように装置の気流調整用の板形状を工夫することによる静的な対策を組み合わせることで十分に減速の効果を得ることができ、衝突を防止できる見通しが得られた。

このため、エレベータ及びインクラインを対象に、衝突時の速度が最も大きくなるケースについて、搬送物である PEM（Prefabricated Engineered Barrier System Module の略：地上施設で廃棄体を人工バリアと一体化したモジュール）、オーバーパックあるいは廃棄体パッケージ容器が衝突した状況を想定した弾塑性解析を実施した。搬送物が破損する可能性を評価するために、衝突時の搬送物の変形を解析するとともに、エレベータの下部（インクラインであれば側部）、及び坑道底部（インクラインであれば坑道端部）に複数設置する箱型の鋼製構造体からなる衝撃力緩和部材の有効性を評価するために、衝撃力緩和部材の有無による搬送物に作用する荷重の違いを比較した。搬送物の質量が最大である PEM 容器（37,200 kg）を対象に、立坑から 500 m の高さから落下した状態を模擬した解析ケー

スでは、衝撃力緩和部材を設置しなかった場合には PEM 容器及び緩衝材は大きく変形し破損に至るが、PEM 容器に内包されたオーバーパックは一部が塑性変形するものの、限界ひずみを超える領域が内部にまで貫通することはなかった(図 3-左列下段参照)。鋼製の衝撃力緩和部材を坑道底部及び搬送ゲージ下部に設置した場合には、PEM 容器及びオーバーパックの変形は大幅に減少する結果となった(図 3-右列下段参照)。同様の解析を、搬送容器に収納したオーバーパック、及び搬送容器に収納した廃棄体パッケージ容器 B (ドラム缶、キャニスタまたは角型容器に密封または固化された廃棄物を封入した金属製の容器)を対象に実施したが、いずれの場合でも廃棄体の容器は一部が塑性変形するものの、限界ひずみを超える領域が内部にまで貫通することはなかった。エレベータを対象に PEM 容器に作用した衝突時の荷重を比較したところ、衝撃力緩和部材を設置しない場合には約 36 GN の荷重が作用するが、衝撃力緩和部材を設置した場合には 0.14 GN まで減少した。以上の結果は、鋼製の衝撃力緩和部材の有効性を示すものであり、これによって搬送システムの搬送部や坑道底部に施した多重の飛散防止対策を備えた立坑及び急勾配の直線斜坑での廃棄体搬送システムが技術的に成立する見通しを得ることができた。

3. 今後の展開

本検討の結果から、搬送システムに備える飛散防止対策として、速度緩和機構及び衝撃力緩和部材が有効であることが分かった。これらの成果を踏まえ、多重の速度緩和機構を備える動力部に関して、海外の実施主体の先行事例を参考に詳細な設計を実施するほか、衝撃力緩和部材に関しても鋼製構造体の材質、形状及び必要な段数の検討といった個別要素の設計の具体化を進める。また、設計した処分場を対象に廃棄体のアクセス坑道搬送に関するシステムとしての最適化に向けて、メンテナンス性の確保や安全審査段階での落下試験の実施も視野に落下試験計画に反映するなどの検討にも取り組む。

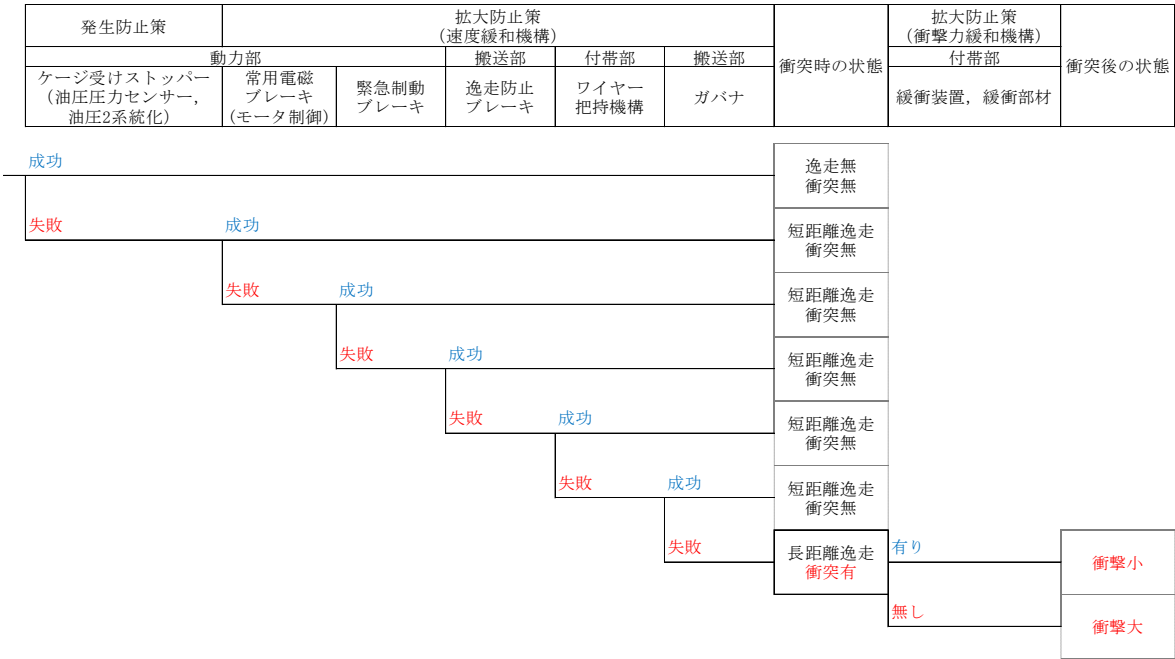


図 1 イベントツリーの作成例
(直線斜坑搬送システムへ廃棄体積込作業中に搬送ゲージが逸走するシナリオ)

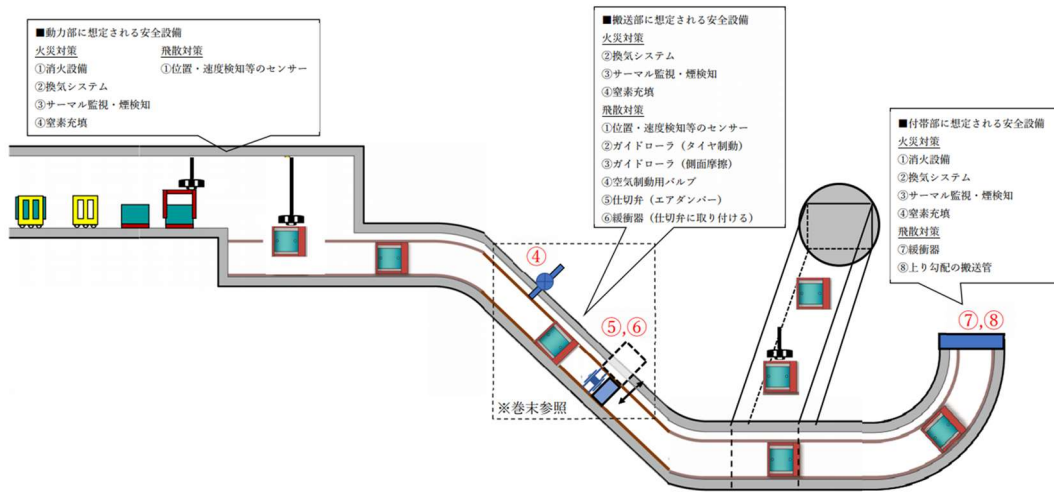


図 2 空気カプセル方式の安全対策の検討例

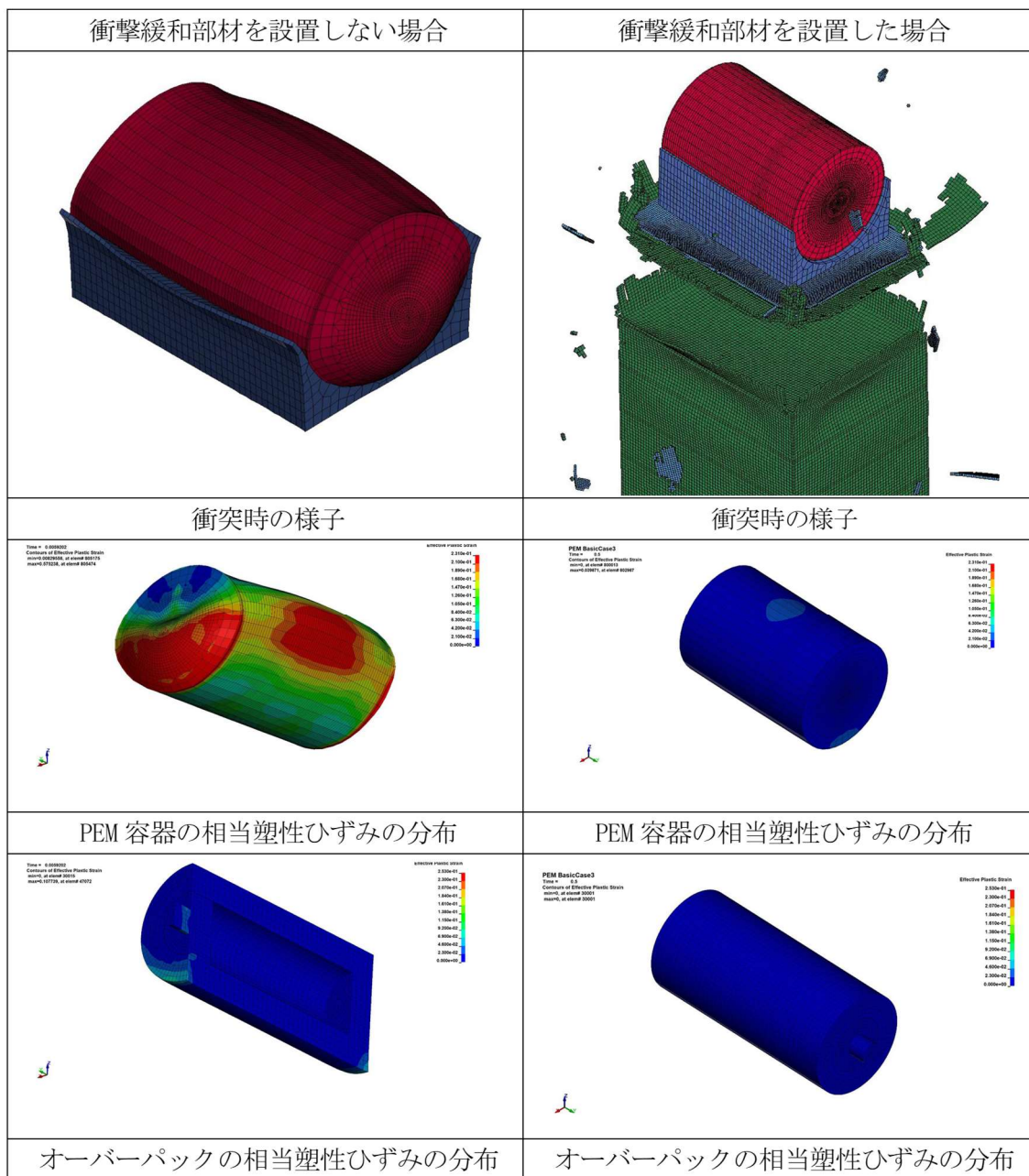


図 3 立坑落下（落下高さ 500m）時の衝突解析結果（搬送物：PEM）

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－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，アクセス坑道内搬送システムの安全設計，NUMO-TR-22-02，pp.39-40.

2.2.10 処分場の坑内湧水量等解析・評価技術の適用性に関する検討

市村 哲大 鈴木 覚

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

処分場の地下施設建設のための坑道掘削に伴う坑内湧水については、建設時やその後の操業を経て閉鎖に至るまでの地下での作業の安全性を確保するうえで、また、処分場周辺における河川流量や地下水位の変化といった環境条件に影響を及ぼす可能性について十分に配慮し、その排水処理作業も含め適切な対策を施す必要がある。こうした対策を検討するうえで、処分場を立地する場所の水理地質学的条件と地下施設の設計、建設・操業方法を考慮して坑内湧水量を推定するための解析・評価技術を整備することが重要であり、2017年度よりこの技術開発に取り組んでいる。

2019年度までの技術開発においては、地下水流動解析コード HydroGeoSphere（以下、「HGS」という）を用いて、包括的技術報告書（NUMO, 2021）で設定した深成岩類及び新第三紀堆積岩類の地質環境モデルを対象に内陸部や沿岸海底下に設置した処分場の坑内湧水量と周辺の地下水位の低下の評価を実施し、HGS が様々な地質環境や地下施設レイアウトの設計オプションに対し柔軟に適用可能であることを示した。2020-2021年度には、坑内湧水量等評価・解析技術の品質保証のため、解析コードの検証（Verification）と妥当性確認（Validation）（以下、「V&V」という）を目的に、水理地質構造及び水理条件が比較的簡単で結晶質岩が地表にまで露出しているといった特徴を有するスウェーデンのエスポ岩盤研究所の坑内湧水量と地下水位の観測データと HGS を用いた推定値との比較評価を実施した。その結果、坑内湧水量と施設周辺のボーリング孔の水頭低下量の観測値が、HGS を用いた解析によりおおむね再現できることが示された（NUMO, 2023）。

我が国の地質環境は、上述のエスポ岩盤研究所周辺の結晶質岩と比較して、一般に水理地質構造及び水理条件が複雑であり、処分場の設置が想定される地下深部の岩盤の上部には被覆堆積層を有する。このため、2022年度の検討では、こうした一般的特徴を有する我が国の地質環境に対して、HGS を用いた坑内湧水量等評価・解析技術が適用可能かどうかについて評価するため、被覆堆積層を有する深成岩類に設置された地下研究施設の例として、JAEA の瑞浪超深地層研究所の建設過程を対象に、坑内湧水量及び水頭低下量に関する観測値と解析値の比較により、HGS の妥当性確認を実施した。瑞浪超深地層研究所周辺の地質構造は、深成岩類である花崗岩を基盤として、新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）と固結度の低い新第三紀中新世～鮮新世の砂礫層（瀬戸層群）が分布している（野原ほか、2016）。同研究所は、地表からの2本の立坑（主立坑、換気立坑）とそれらを結ぶ深度100m毎の予備ステージ及び深度200m、300m、500mで展開される水平坑道により構成され、水平坑道は主として花崗岩中に設置されていた。なおこの施設は、2022年1月に坑道の埋戻し及び地上施設の撤去が完了している。

2. 主な成果

JAEAが公表している瑞浪超深地層研究所周辺の地質に関するデータに基づいて構築された水理地質構造モデル（図1参照）を用いて、同研究施設の建設過程（2003～2014年）をHGS上でモデル化し地下水流動解析を実施した。坑内湧水量と施設周辺のボーリング孔の地下水位の観測値とHGSによる解析値を比較したところ、総湧水量については、深度200m、300m、400m、500mの各予備ス

ページの掘削開始に伴い、解析によって観測値に見られる各予備ステージ掘削時の総湧水量に関するスパイク状の増加がよく表現できている（図2）。また、瑞浪超深地層研究所周辺のボーリング孔を用いた水頭低下量の観測値についても、解析により、処分場の設計や環境影響評価を実施するうえでは実用的なレベルで再現することができることが示された（図3参照）。

以上の技術開発を通じて、V&Vも含め、HGSを用いた処分場の坑内湧水量等解析・評価技術の適用性評価に関する技術開発を一通り完了した。

3. 今後の展開

概要調査段階の処分場設計における地下施設のレイアウト設計や、設計オプション間の比較評価、環境保全対策の検討に活用するため、HGSを用いた坑内湧水量等評価・解析技術の適用範囲の拡大といった高度化と信頼性の向上のための技術開発を継続する。

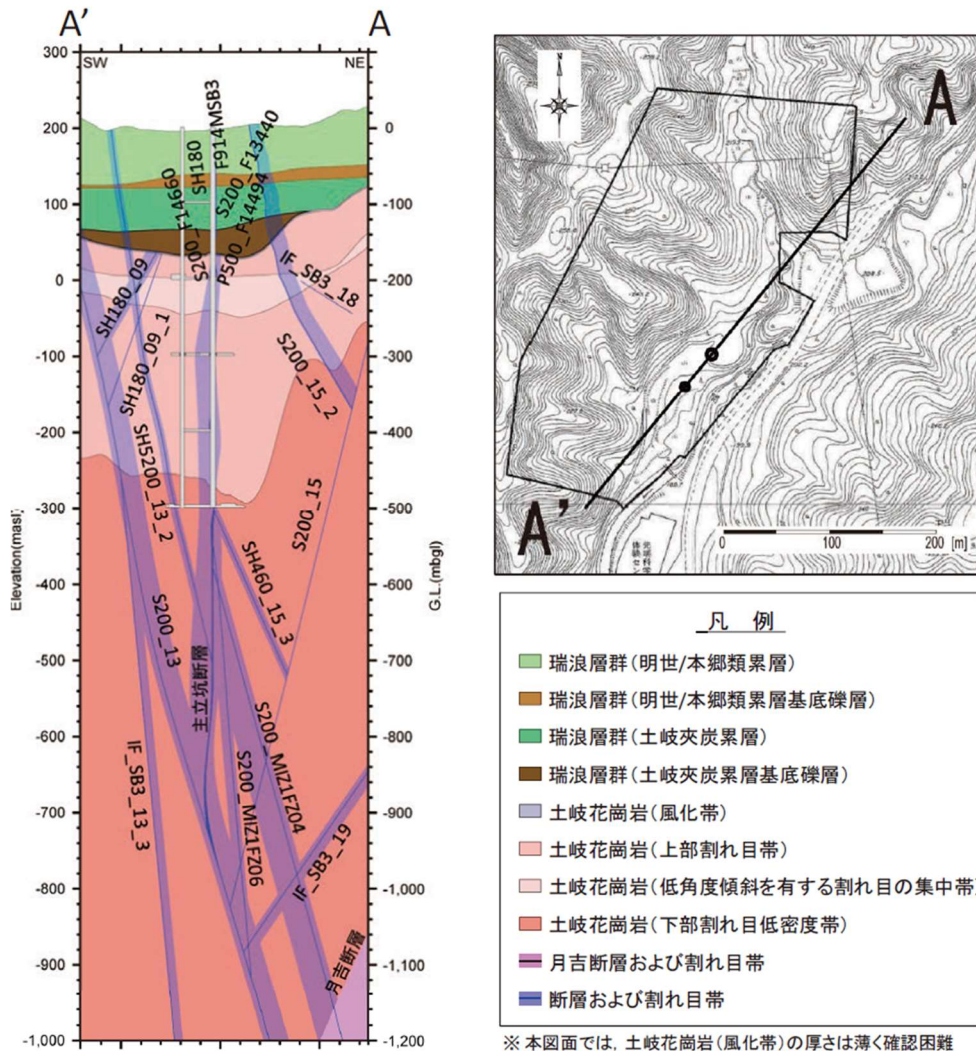


図1 瑞浪超深地層研究所周辺の地質構造モデル（野原ほか，2016）

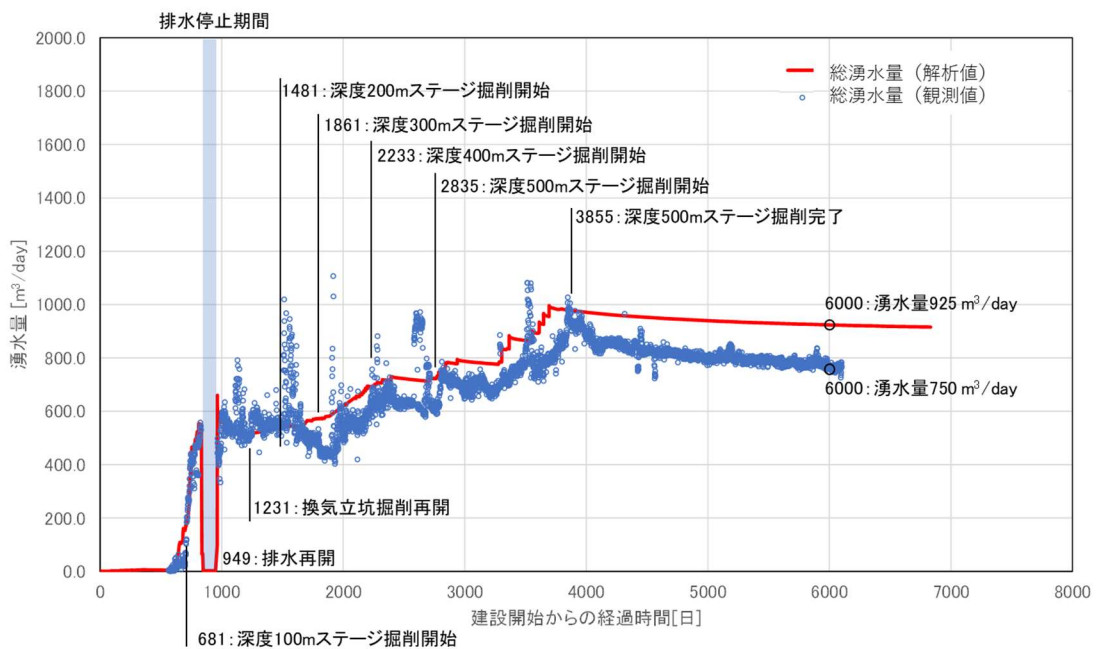


図 2 HGS を用いた坑内湧水量の解析値と観測値の比較
 (瑞浪超深地層研究所の湧水量の実測値は (尾上・竹内, 2020) より引用)

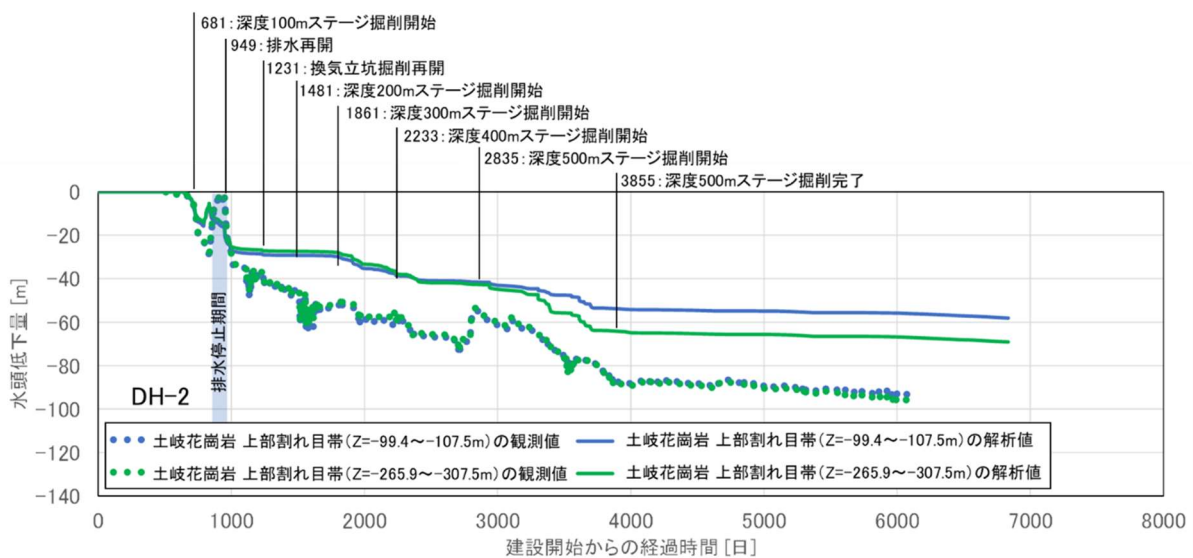


図 3 HGS を用いた水頭低下量の解析値と観測値の比較
 (瑞浪超深地層研究所用地近傍の深度約 500 m のボーリング孔 DH -2 号孔の実測値は
 (野原ほか, 2016) より引用)

参考文献

野原壯, 三枝博光, 岩月輝希, 濱克宏, 松井裕哉, 見掛信一郎, 竹内竜史, 尾上博則, 笹尾英嗣 (2016):
 超深地層研究所計画における研究坑道の掘削を伴う研究段階 (第 2 段階) 研究成果報告書,
 JAEA-Reserch 2015-026.

- 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, 坑内湧水に伴う処分場周辺の水理・化学場の回復過程の検討, NUMO-TR-22-02, pp.43-47.
- 尾上博則, 竹内竜史 (2020): 超深地層研究所計画における研究坑道での湧水量計測データ集 2019年度, JAEA-Data/Code 2020-015.

2.2.11 スウェーデン・キルナ鉱山のベントナイト事例調査

根本 脩平¹ 鈴木 覚¹ 後藤 考裕¹ 藤村 竜也² 菊池 亮佑²
大竹 翼² 佐藤 努² Raphael Schneeberger³ Ulf B. Andersson⁴

¹原子力発電環境整備機構, ²北海道大学, ³放射性廃棄物管理共同組合 (Nagra),

⁴Luossavaara Kiirunavaara Aktiebolag (LKAB)

1. 背景・目的

地下深部に埋設されたオーバーパックは、処分場の閉鎖後に地下水と接触することによって、鉄がイオンとして溶出し、腐食が進行する。緩衝材の主成分であるベントナイトは、溶出した鉄イオンと化学反応し、変質することで、緩衝材の膨潤性や収着性などの性能を低下させる可能性がある。これまでに国内で実施された室内試験結果や化学反応シミュレーションに基づくと、長期間を経てもベントナイトの変質はオーバーパックとの境界付近である限定的な範囲に限られ、鉄-ベントナイト相互作用による緩衝材の性能低下は許容可能なレベルであると考えられる (NUMO, 2021)。

これらの知見は主に 10 年程度の室内試験に基づいて得られたものであるため、より長期間にわたり鉄とベントナイトが接触し反応した試料を分析して、上述のような現象理解に対する根拠をより強固なものとしておくことが望ましい。このため、NUMO や関係機関では室内試験で得ることのできない長期間における鉄-ベントナイト相互作用をナチュラルアナログによって傍証する取り組みを進めてきた。

近年、スウェーデンのキルナ鉱山において、天然の磁鉄鉱 (炭素鋼の主な腐食生成物のひとつ) がベントナイトと長期間にわたり接触していると考えられる事例が発見された。NUMO は海外実施主体と協力して国際共同研究プロジェクト KiNa (Kiruna Natural Analogue Project) を立ち上げた。NUMO と北海道大学は、KiNa からサンプル提供を受け、人工バリア材料の長期健全性の傍証のため、ナチュラルアナログ事例を用いて鉄鉱物とベントナイトの鉱物学的な相互作用を明らかにすることを目的として、磁鉄鉱とベントナイトの接触部における鉱物学的な反応について研究している。

NUMO と北海道大学は、(1) 磁鉄鉱-ベントナイトにおける接触部及び変質状況の調査、(2) 磁鉄鉱-ベントナイトの接触期間及び生成環境の調査、(3) ベントナイトの変質が抑制されている要因の考察に順次取り組んでいる。2021 年度まで、(1) に関しては、キルナ鉱山から採取した試料は主に磁鉄鉱、黒雲母、スメクタイト (ベントナイトの主成分) により構成され、スメクタイトは母岩である安山岩あるいは流紋岩を構成する曹長石が熱水変質することによって生成していることが分かった。また、この試料は磁鉄鉱とスメクタイトが接触しているにも関わらず、スメクタイトへの鉄イオンの拡散は確認されず、ベントナイトの変質が進んでいないという結果が得られた (NUMO, 2023)。2022 年度は (2) について、K-Ar 年代測定や磁鉄鉱の微量元素分析に基づき、磁鉄鉱とベントナイトの相互作用の環境条件と継続期間について検討した。

2. 主な成果

(1) 磁鉄鉱とベントナイトの接触期間の推定

上述の磁鉄鉱とベントナイトの接触期間を推定するため、磁鉄鉱と接触するスメクタイト及び黒雲母に対して K-Ar 年代測定を行った。黒雲母とスメクタイトは水ひ法により分離して回収した。

スメクタイトを主成分とし、少量の磁鉄鉱、黒雲母が含まれる白～灰色の岩石試料を測定したところ、今回の測定範囲において、黒雲母の K-Ar 年代は 10 億年前、スメクタイトのそれは 3.5 億年前であった。また、磁鉄鉱、黒雲母を主成分とし、少量のスメクタイトが含まれる岩石試料の測定によって、黒雲母の K-Ar 年代は 8 億年前と推定された。この試料については、分析に必要な量のスメクタイトが採取できなかつたため、スメクタイトの年代測定はできなかつた。既往研究において、試料が採取された地域周辺では複数回の熱水変質作用が報告されていることから、本測定結果もそのうちの一つによるものと考えられる。既往研究においても測定結果のばらつきが確認されており、今後、同様の年代測定の試料数を増やす必要はあるが、少なくとも黒雲母とスメクタイトの生成年代は異なることが分かった。また、鉄鉱石に含まれる磁鉄鉱の生成年代は約 19 億年前と報告されており (Westhues et al, 2016) ベントナイト中の磁鉄鉱も同年代に生成した可能性があるが、熱水作用で生成した場合は黒雲母と同様の生成年代であることも考えられる。

(2) 磁鉄鉱の生成環境の調査

試料に含まれる磁鉄鉱の生成環境を調査するため、レーザーアブレーション導入法を用いた誘導結合プラズマイオン源質量分析器 (LA-ICP-MS) による磁鉄鉱の微量元素分析を行い、磁鉄鉱の生成時の温度などの推定を試みた。既報を参考に、磁鉄鉱中の Al と Mn の含有率の合計値を Ti と V の含有率の合計値に対してプロットし、微量元素と生成温度の関係を比較したところ、鉄鉱石中の磁鉄鉱はベントナイト中の磁鉄鉱粒子と異なる領域にプロットされた (図 1)。これらの結果は鉄鉱石とベントナイトに含まれる磁鉄鉱粒子の生成条件が異なることを示唆している。磁鉄鉱の生成環境の推定には、この他の指標も利用して確認する必要があるが、ベントナイト中の磁鉄鉱粒子の生成温度は 300°C 程度と示唆された。

(3) 磁鉄鉱-ベントナイトの生成環境及び時間変遷に関する考察

微量元素分析の結果、及び磁鉄鉱と共存している黒雲母の閉止温度が 250~350°C 程度であること (Armstrong et al., 1966) は、磁鉄鉱と黒雲母が同時期の熱水活動により生成したことを示している。また、スメクタイトが 150°C 未満で生成されること (Inoue, 1995) は、スメクタイトが生成して以降、150°C を超えるような熱水活動が起こっていないことも示唆している。これらのことから、磁鉄鉱と黒雲母を生成した熱水活動は、スメクタイトを生成した熱水活動とは異なる時期と温度の熱水によるものであり、磁鉄鉱の生成後に、より温度が低い熱水活動によって、曹長石が変質しスメクタイトが生成したと考えられる (図 2)。

これら 2 種類の熱水活動の時期について、K-Ar 年代によれば黒雲母は 8~10 億年前に生成しており、磁鉄鉱の生成温度が黒雲母の閉止温度に近いことから、磁鉄鉱は黒雲母とほぼ同時期に生成したと考えられる。一方、スメクタイトの生成年代は 3.5 億年前と若く、少なくとも 3.5 億年前から現在まで 150°C 未満の温度環境で磁鉄鉱とベントナイトが接触していたと推察される。これらの K-Ar 年代は、磁鉄鉱の生成後にスメクタイトが生成したことも整合している。

3. 今後の展開

鉄-ベントナイト相互作用については、2016 年から JAEA との共同研究において室内試験を実施しており、この試験では鉄の表面付近の狭い領域に Fe と Si を主成分とする腐食生成物が生成され (「2.3.1 オーバーパック及びセメントとの相互作用による緩衝材の長期変質挙動の研究」参照)、キ

ルナ鉱山のナチュラルアナログ事例とは異なっている。このような違いについて検討を進めることで、鉄-ベントナイト相互作用の発生条件など、メカニズムについてさらに知見を蓄積する可能性がある。今後は、このような比較を通じ、キルナ鉱山のベントナイトの変質が抑制されている要因について地球化学反応モデリングによる検討を実施し、人工バリア材料の長期健全性の傍証に資するものとしていきたい。

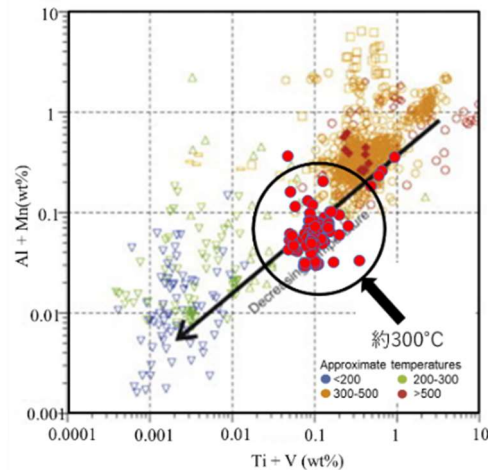


図 1 磁鉄鉱の微量元素組成を用いた判別図
(微量元素分析結果を (Ti + V) vs (Al + Mn) (Nadoll et al., 2014) にプロット)

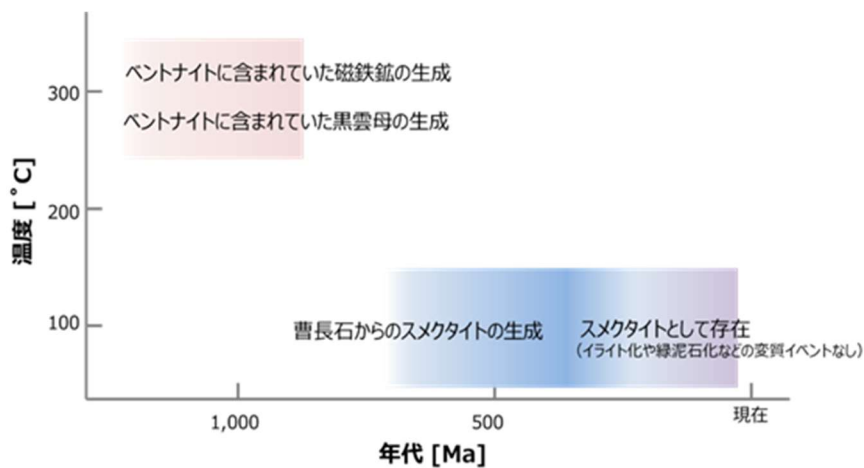


図 2 磁鉄鉱-ベントナイトの生成環境と時間変遷

参考文献

- Armstrong, R. L., Jäger, E. and Eberhardt, P. (1966) : A comparison of K-Ar and Rb-Sr ages on Alpine biotites. Earth Planet. Sci. Lett. 1, pp.13-19.
- Inoue, A. (1995) : Formation of clay minerals in hydrothermal environments, Origin and Mineralogy of Clays, pp.268-329.
- Nadoll, P., Angerer, T., Mauk, J.L., French, D. and Walshe, J. (2014) : The chemistry of hydrothermal magnetite: A review. Ore Geology Reviews. Vol. 61, pp.1-32.

- 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.
- Westhues, A., Hanchar, J.M., Whitehouse, M.J. and Martinsson, O. (2016) : New constraints on the timing of host rock emplacement, hydrothermal alteration, and iron oxide-apatite mineralisation in the Kiruna district, Norrbotten, Sweden. *Economic Geology*, vol. 111, pp.1595–1618.

2.2.12 操業期間中の What if シナリオに対する被ばく評価の試行

前田 正 市村 哲大

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) では、廃棄物の受入・検査及び金属製処分容器への封入のための地上施設 (以下、「受入・検査・封入施設」という) において、ガラス固化体は、落下を防止する装置や、仮に落下したとしても破損しないつり上げ高さ (9 m) の設定により、落下による破損は考えにくいとしている。また、TRU 等廃棄物グループ 3 に分類する JAEA での再処理によって発生する溶媒洗浄液 I (アスファルト固化体 (MA 系)) (以下、「TRU 等廃棄物アスファルト固化体」という) を取り扱う施設は、労働安全衛生法 第 611 条に従い 37 °C 以下に管理されており、TRU 等廃棄物アスファルト固化体は、施設内の温度では安定であり、火災が発生しないような環境が維持されているものとして安全評価の対象のシナリオから除外している。

本技術開発では、施設の放射線安全を考慮し、敷地境界の公衆に対する安全性を被ばく線量の観点で示すために、何らかの原因により、ガラス固化体の落下破損や TRU 等廃棄物アスファルト固化体の火災が発生し、放射性廃棄物から放射性物質が漏洩することを仮定した評価を実施する。本年度の評価にあたっては、ガラス固化体の落下破損については、日本原燃株式会社の廃棄物管理施設の再処理事業所廃棄物管理事業変更許可申請書 (以下、「事業変更許可申請書」という) (日本原燃, 2020) に基づくとともに、TRU 等廃棄物アスファルト固化体の火災については、アスファルト固化体火災爆発事故報告書 (PNC, 1998) を参照した。これらの評価を通じて、ガラス固化体落下破損時やアスファルト固化体火災といった What-if シナリオに対し、敷地境界の公衆への放射線影響について検討し、防火区画を設ける等の延焼及び爆発防止対策を施設設計に反映する。

2. 主な成果

(1) ガラス固化体 1 体の落下破損を想定した場合の敷地境界での被ばく線量評価

本検討では、ガラス固化体の落下を想定する場所として、図 1 に示すようにガラス固化体の受入・検査・封入施設のガラス固化体検査・仮置室でのつり上げを考える。敷地境界の公衆の被ばく線量評価は、事業変更許可申請書の評価フローを参考に図 2 に示す評価フローを作成し、以下の通り実施した。

- ① ガラス固化体検査・仮置室でのつり上げ中の高さ 9 m からの落下による衝突速度は 13 m/s となる。
- ② ガラス固化体 1 体に含まれる放射性物質は、表 1 の放射能インベントリの評価条件 (NUMO, 2021) に基づき、ORIGEN2.2-UPJ (JENDL-4.0 に基づく核ライブラリ PWR47J40 を使用) (Croff, 1980) (奥村ほか, 2013) を用いて評価する。
- ③ 破損したガラス固化体から空気中へ移行するガラス固化体微粉の発生率は想定した 9 m から落下したとして 7×10^{-4} wt% (Smith and Ross, 1975) を用い、発生したガラス固化体の微粉はガラス固化体容器 (キャニスタ) 外へ全て放出するものとする。また、放出された固化ガラス

微粉の空気中への移行率は1% (Sutter et al., 1981), (Mishima, 1973a), (Mishima, 1973b) とする。

- ④ 空気中へ移行した放射性物質は、通常は換気設備の排気フィルター（チャコールフィルター、HEPA フィルター等）を経て、排気口から放出されるが、本検討では計算上厳しい条件として換気設備（排気フィルターを含む）の機能不全を仮定し、ガラス固化体検査・仮置室から建屋外への移行率は10% (Flew. and Liste, 1969) とする。排気フィルターを含む換気設備が正常に作動することにより、HEPA フィルターにより粒子状放射性物質が99.97% (JIS, 2000)、チャコールフィルターによりヨウ素が95% (NRC, 2012) 除去されることにより、被ばく線量の低減が図られる。
- ⑤ 建屋から放出されたガラス固化体微粉は、大気により敷地境界まで運ばれ敷地境界の公衆が被ばくする。なお、大気による拡散は、気象指針のプルームモデルを用いた。評価では、風速毎に最大となる大気安定度を選定し、その大気による拡散を用いて、敷地境界での公衆の被ばく線量を算出した。

評価の結果、何らかの理由により、ガラス固化体の1本が落下破損し、ガラス固化体微粉が大気に放出されたとしても、図3に示すように、敷地境界の公衆の被ばく線量が5 mSv/事故未満であり、敷地境界の公衆に過渡な放射線障害を及ぼさない被ばく線量であるとの見込みが得られた。

(2) TRU等廃棄物アスファルト固化体1体の全焼を想定した場合の敷地境界での被ばく線量

本検討では、TRU等廃棄物受入・検査・封入施設におけるTRU等廃棄物アスファルト固化体1体の全焼を想定した場合の敷地境界での公衆の被ばく線量を、1997年3月11日に発生したアスファルト固化体処理施設火災爆発事故 (PNC, 1998) に基づくパラメータ（気相への移行割合、開口部からの放出割合）を用いて評価した。敷地境界の被ばく線量の評価について図4に示す評価フローを作成し、以下の通り実施した。

- ① TRU等廃棄物アスファルト固化体1体に含まれる放射性物質は、包括的技術報告書 (NUMO, 2021) に基づき評価する。
- ② TRU等廃棄物アスファルト固化体1体が全焼した場合のアスファルト固化体から空気中への核種毎の移行率を火災事故の際の最大値により設定する。
- ③ 空気中へ移行した放射性物質は、通常、換気設備の排気フィルターを経て、排気口から放出されるが、火災事故時で、換気設備の機能不良により換気装置が停止している。本検討でも、換気設備の機能不全を仮定し、建屋の開放部から建屋外への移行率も火災事故に基づく最大値を核種毎に設定する。
- ④ 建屋外に放出された微粉は、大気により敷地境界まで運ばれ敷地境界の公衆が被ばくする。なお、大気による拡散は、気象指針のプルームモデルを用いて評価した。評価では、風速毎に最大となる大気安定度を選定し、その大気による拡散を用いて、敷地境界での公衆の被ばく線量を評価した。

その結果、仮にTRU等廃棄物アスファルト固化体1体が全焼したとしても、図5に示すように、敷地境界の公衆の被ばく線量は5 mSv 未満であり、敷地境界の公衆に過渡な放射線障害を及ぼさ

ない被ばく線量であるとの見込みが得られた。火災事故では、複数のアスファルト固化体が延焼及びアスファルト固化体から発生した可燃ガスにより爆発していることから、立地場所の気象条件及び敷地境界までの距離を考慮し、複数のアスファルト固化体の火災及び爆発を避けるために防火区画を設ける等の安全対策を施設設計に反映することにより、敷地境界の公衆に放射線影響を及ぼさないようにすることが可能であるとの見込みが得られた。

3. 今後の展開

2023 年度以降、処分場の操業中に発生する可能性のある事象として、イベントツリーの形式で評価シナリオの拡充を図っていく。What-if シナリオについてもその一環としてさらに検討を継続する。また、地震や津波等の外部事象については、原子力関連施設の規制ガイドラインを参考に、安全対策の考え方を示すとともに、既往の原子力関連施設の学会標準を参考に、検討すべき外部事象の選定方法の整備と、外部事象に起因して処分場に発生する可能性がある内部事象の検討の拡充を図っていく。その検討から複数の安全機能を同時に失うような、共通要因故障モードのシナリオを作成し、そのシナリオに基づいて敷地境界の公衆に対する安全性を評価し、敷地境界の公衆に放射性障害を及ぼさないような安全対策などを検討し施設設計に反映する。また、こうした事故に対する作業員の安全対策についても検討を行う。

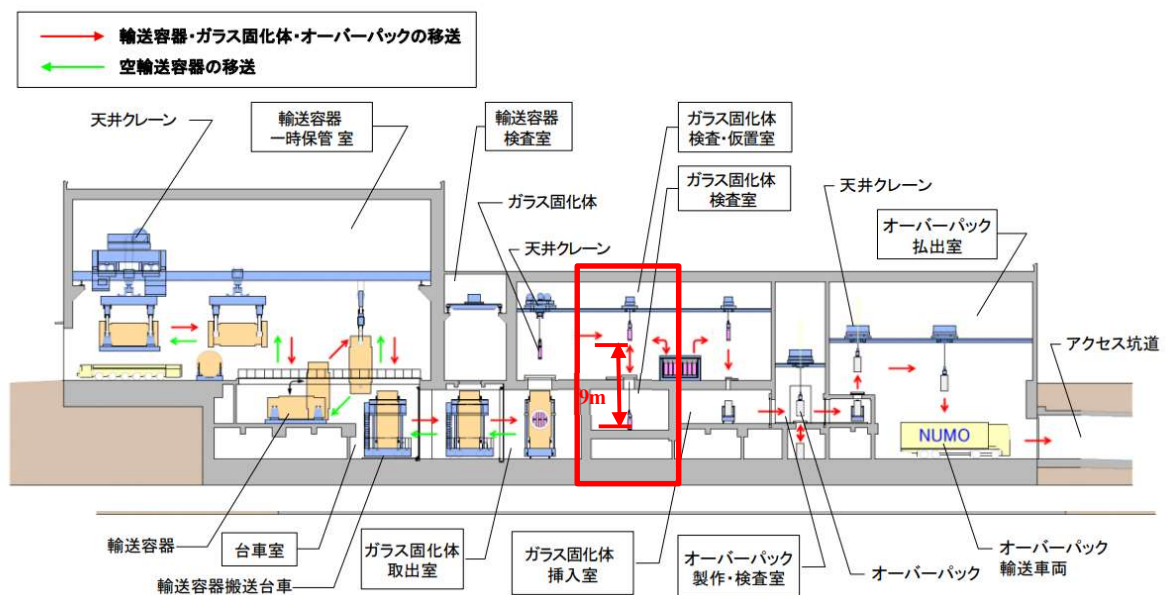


図 1 ガラス固化体検査・仮置室のガラス固化体吊り上げ高さ (NUMO, 2021)

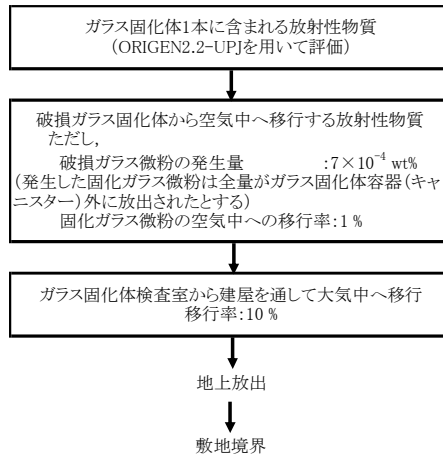


図 2 ガラス固化体落下破損時の評価フロー

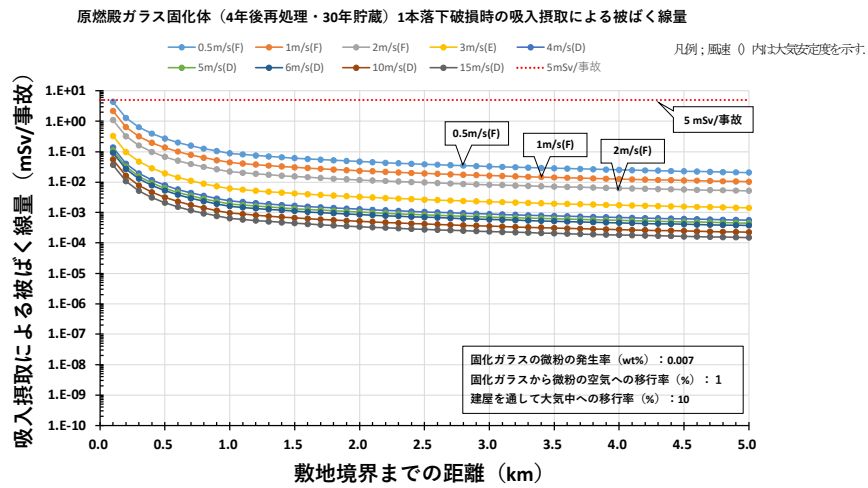


図 3 ガラス固化体落下損傷による被ばく線量

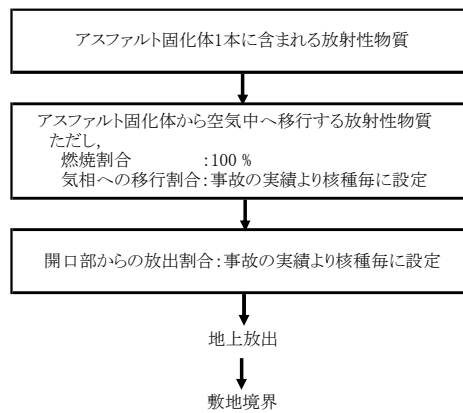


図 4 TRU 等廃棄物アスファルト固化体火災時の評価フロー

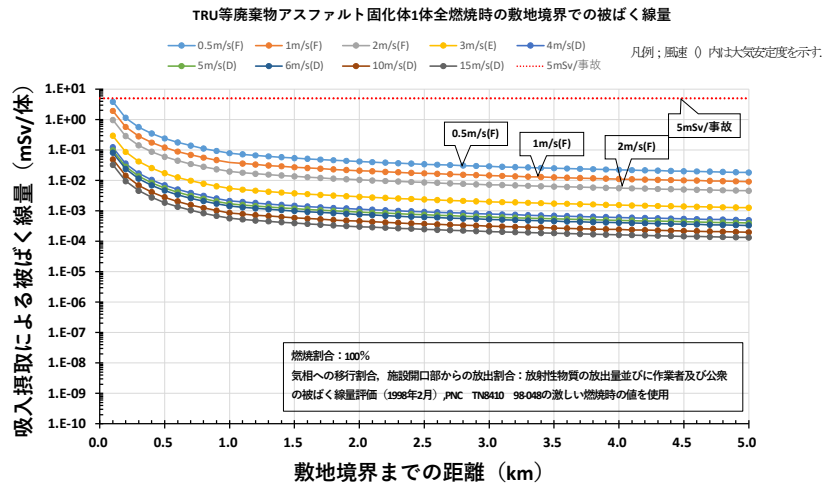


図 5 TRU 等廃棄物アスファルト固化体 1 本全焼による被ばく線量

表 1 放射能インベントリの評価条件

		再処理事業者	原燃殿
燃焼条件	炉型		PWR
	U235初期濃縮度 (wt%)		4.5
	比出力 (MW/MTU)		38.0
	燃焼度 (MWd/MTU)		45,000
	運転日数 (日)		1184.21日連続
再処理条件	炉取出し後の再処理までの冷却期間 (年)		4.0
	燃料中の核種の移行率	U	0.422
		Pu	0.548
		H,C,Cl	0.0
		希ガス	0.0
その他	100.0		
構造材の移行率	全核種	1.0/264.5	
固化条件	再処理から固化までの冷却期間 (年)		0.0
	固化体発生量 (本/MTU)		1.25
	ウラン等価量 (MTU/本)		0.8
中間貯蔵	固化から処分までの貯蔵期間		30

参考文献

Croff, A.G. (1980) : A User's Manual For The ORIGEN2 Computer Code, ORNL/TM-7175.

Flew, E.M. and Lister, B.A.J. (1969) : "Assessment of the Potential Release of Radioactivity from Installations at AERE, Harwell. Implications for Emergency Planning". Handling of Radiation Accidents, IAEA-SM-119/7.

JIS(日本工業規格) (2000) : コンタミネーションコントロール用語, JIS Z 8122.

Mishima, J. and Schwendiman, L.C. (1973a) : Some Experimental Measurements of Airborne Uranium(Representing Plutonium)in Transportation Accidents, BNWL-1732.

Mishima, J. and Schwendiman, L.C. (1973b) : Fractional Airborne Release of Uranium(Representing Plutonium)during the Burning of Contaminated Wastes, BNWL-1730.

日本原燃 (2020) : 再処理事業所廃棄物管理事業変更許可申請書, 2020 再計発 102 号, 添付書類七.

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－, NUMO-TR-20-03.
- NRC(U.S.NUCLEAR REGULATORY COMMISSION) (2012) : REGULATORY GUIDE 1.52
- 奥村啓介, 杉野和輝, 小倉健介, 神智之, 岡本力, 片岡純一 (2013) : JENDL-4.0 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット : ORLIBJ40, JAEA-DATA/Code2012-032.
- PNC(動力炉・核燃料開発事業団) (1998) : 放射性物質の放出量並びに作業員及び公衆の被ばく線量の評価－アスファルト固化体処理施設火災爆発事故 原因究明・再発防止策に関する報告 (6/7), PNC TN 8410 98-048.
- Smith, T.H. and Ross, W.A. (1975) : Impact Testing of Vitreous Simulated High Level Waste in Canisters, BNWL-1903.
- Sutter, S.L., Johnston, J.W. and Mishima, J. (1981) : Aerosols Generated by Free Fall Spills of Powders and Solutions in Static Air, NUREG/CR-2139.

2.3 閉鎖後長期の安全性の評価に関する技術の高度化

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、JAEA や大学との共同研究、グリムゼル試験サイトにおける国際共同研究プロジェクト (HotBENT : High Temperature Effects on Bentonite Buffers, CIM : Carbon-14 and Iodine-129 Migration in Cement, LTD : Long Term Diffusion, CFM : Colloid Formation and Migration) への参加等を通じて、実験データの継続的な取得を行うとともに、得られた実験データを基に、評価に用いる数理モデルの開発・改良及び妥当性の確認を進め、モデルの信頼性向上を図った。合わせて核種移行評価に必要な核種の溶解度や収着分配係数など重要なパラメータに関するデータベースの拡充を図った (2.3.1~2.3.8 参照)。また、「包括的技術報告書」(2021年2月公表)で適用した三次元水理・物質移行解析コード Partridge を用いて、地表を含む処分場広域スケール (数十 km×数十 km 程度) に対して地質環境の時間変遷を考慮した物質移行解析を行い、その結果に基づいて安全評価上の保守性を合理的に確保して簡略化した核種移行解析モデルを構築する手法について検討を進めた (2.3.9~2.3.12 参照)。廃棄体の放射能インベントリをより正確に把握するため、ガラス固化体と TRU 等廃棄物グループ 2 (ハル等圧縮体) を対象として、原子炉の形式、使用済燃料の燃焼履歴等の情報に基づいてインベントリの分布を推定するための方法論を構築した (2.2.15 参照)。また、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所との共同研究において、生活圏評価で重要となる核種に対し、移行パラメータである土壌の収着分配係数の取得を継続した (2.2.14 参照)。さらに、2020年度に作成した、土壌の収着分配係数を取得するための試験手順書について、日本保健物理学会に設置していただいた委員会においてレビューを継続し、2021年度に示されたコメントに対応して改訂した手順書について妥当であるとの評価を得た (2.2.13 参照)。

2.3.1 オーバーパック及びセメントとの相互作用による緩衝材の長期変質挙動の研究

浜本 貴史¹ 石寺 孝充² 笹本 広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

人工バリアの一つである緩衝材は、図 1 のように、オーバーパック（鉄）やセメント系材料と接する。オーバーパックから溶出する鉄イオンや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・変質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、緩衝材に期待する安全機能に悪影響を及ぼす可能性がある。

包括的技術報告書（NUMO, 2021）では、緩衝材とオーバーパック、及び緩衝材とセメント系材料それぞれの変質現象（鉄-ベントナイト相互作用、セメント-ベントナイト相互作用）を、その時点で利用可能な最新の知見に基づき安全評価上の保守性を確保するように配慮した反応輸送解析モデルにより個別に評価した。この解析モデルは、化学反応モデルと物質移行モデルから構成される。化学反応モデルについては、緩衝材に含まれる鉱物の溶解と変質鉱物の沈殿が反応速度論に従うとし、化学種分配及びモンモリロナイトのイオン交換反応は瞬時に化学平衡が成り立つとして取り扱っている。物質移行モデルについては、鉱物組成変化に伴う間隙率の変化に応じて拡散係数が変化することを表現した拡散方程式を適用している。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。鉄と緩衝材、及び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いては関係する複数のプロセスが複合的に生起することになるが、まず関連する個別のプロセスに着目して試験を実施している。こうしたプロセス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、最長 10 年程度までの試験を想定している。各試験期間で取得する試験データ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を改良していく。本検討は JAEA との共同研究で実施しているものである。

2022 年度においては、鉄と緩衝材の相互作用について化学反応プロセスに関する長期間の試験データ取得を開始するとともに、セメントと緩衝材の相互作用については 2021 年度に取得したバッチ変質試験のデータを用いた化学反応モデルの妥当性確認を行った。

2. 主な成果

(1) 鉄と緩衝材の相互作用

鉄粉とベントナイトを混合させて圧縮充填し、鉄とベントナイトの接触面積を増加させて変質を促進させる試験（図 2）と、鉄とベントナイト界面でのベントナイト変質挙動を詳細に観察するため、圧縮ベントナイトに鉄箔を埋め込んで変質挙動を観察する試験（図 3）を 80℃の環境で実施した。鉄粉を用いた試験では、SEM を用いた観察により、鉄粉の周囲に鉄とケイ素から成る固相の生成を確認し、鉄粉の粒径変化から、この試験条件における固相の生成量を試験期間約 2 か月でベントナイト重量比 2wt%以下であると見積もった（図 4）。鉄箔を用いた試験でも、SEM 観察により、鉄箔表面に鉄とケイ素から成る固相の生成を確認し、鉄箔の腐食厚さを試験期間約 9 か月で 8µm 程度と評価した（図 5）。今後は、固相の鉱物同定を行うとともに、両試験により認められた

固相の生成量と鉄の腐食量に関する定量的なデータを継続的に取得する。

(2) セメントと緩衝材の相互作用

50°Cの環境で2年間、高アルカリ溶液中に浸漬させた試料のモンモリロナイト含有率、鉱物組成、溶液組成等のバッチ変質試験(図6)データに対し、化学反応モデルを用いた解析的検討を行った(市川ほか, 2022)。本検討では、室内試験で確認された化学反応プロセス(①モンモリロナイトの溶解, ②イオン交換反応, ③随伴鉱物の溶解, ④変質鉱物の沈殿)をモデル化した解析を行い、この結果と試験結果を比較することで、化学反応モデルの妥当性確認において重要なプロセスを抽出した。化学反応モデルによる解析結果と試験結果との比較を行った結果、モンモリロナイト量の経時変化について乖離が生じた(図7)。①~④を考慮した化学反応モデルによる解析では反応開始後数日から変質鉱物であるフィリップサイトの沈殿が見られた。試験では試験期間1.4年の試料からフィリップサイトが確認されたものの、XRDの相対ピーク強度はモンモリロナイトと比べ小さく、沈殿量は少ないと推定された(図8)。試験結果を踏まえ、④の影響が十分に少ないとし④を考慮せずに解析を行うと、解析結果と実験結果が良く一致するようになった(図7)。しかし、試験期間2年の試料からもフィリップサイトが確認されており、長期的には変質鉱物の沈殿量が増加すると考えられることから、変質鉱物の沈殿プロセスに関する化学反応モデルの妥当性については引き続き検討する必要がある。具体的には、変質鉱物の沈殿について単純化して取り扱っている点(フィリップサイトを含めた沸石類鉱物に共通の生成速度式を利用している点や、反応比表面積の経時変化を考慮していない点など)を改善する必要があると考えられた。

3. 今後の展開

鉄と緩衝材の相互作用の研究については、継続的に得られる室内試験データやスウェーデン・キルナ鉱山のベントナイト事例(「2.2.11 スウェーデン・キルナ鉱山のベントナイト事例調査」参照)を活用して化学反応モデルの妥当性確認を進める。セメントと緩衝材の相互作用の研究については、2.(2)に挙げた改善点を反映した化学反応モデルを作成し、これを用いた解析結果と継続的に得られる室内試験データ等との比較を通じてモデルの妥当性確認を進める。

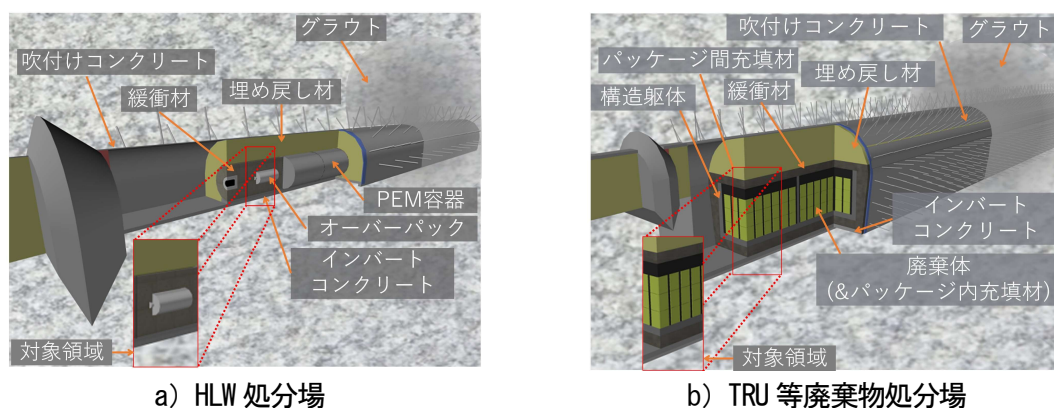


図1 処分場の構成要素 (NUMO, 2021 を編集)

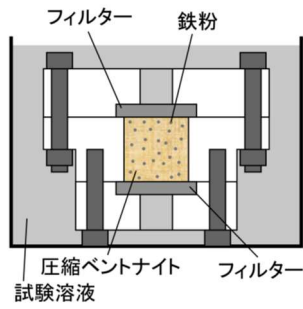


図 2 鉄粉試験の試験概念

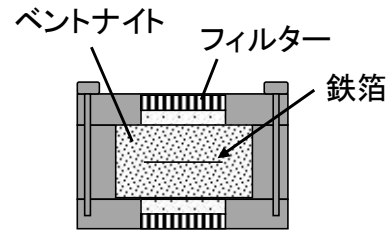


図 3 鉄箔試験の試験概念

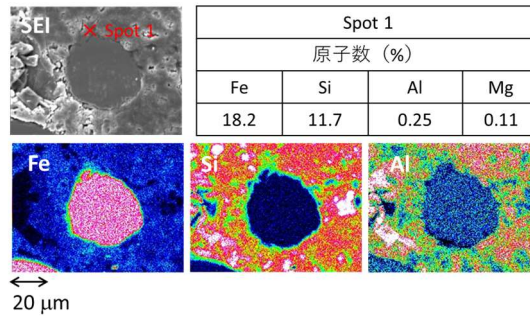


図 4 鉄粉試験試料の SEM・EDS 観察結果 (試験期間 2 か月, 80°C。EDS 観察結果について赤い部分が高濃度を表す)

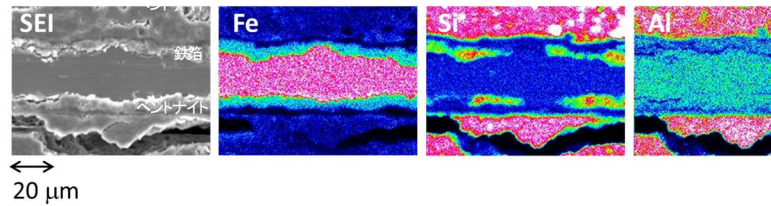


図 5 鉄箔試験試料の SEM・EDS 観察結果 (試験期間 9 か月, 80°C。EDS 観察結果について赤い部分が高濃度を表す)

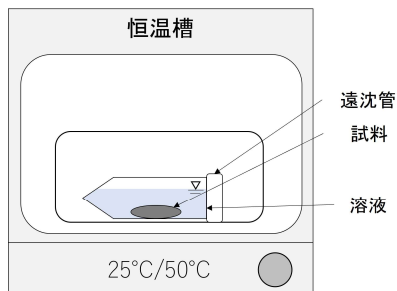


図 6 バッチ変質試験の試験概念

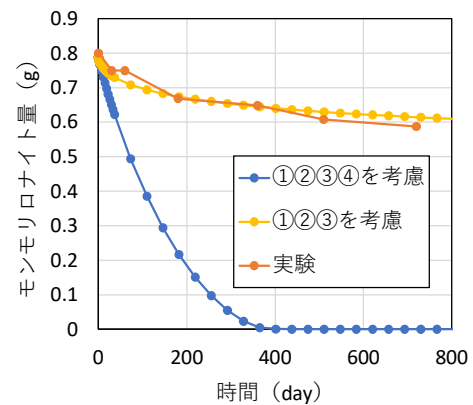


図 7 バッチ変質試験におけるモンモリロナイト溶解量の解析結果及び実験結果
(固相はクニピア F (99% モンモリロナイト + 0.5% 炭酸カルシウム + 0.5% 石英), 液相は 0.2M NaOH + 0.2M KOH 溶液)

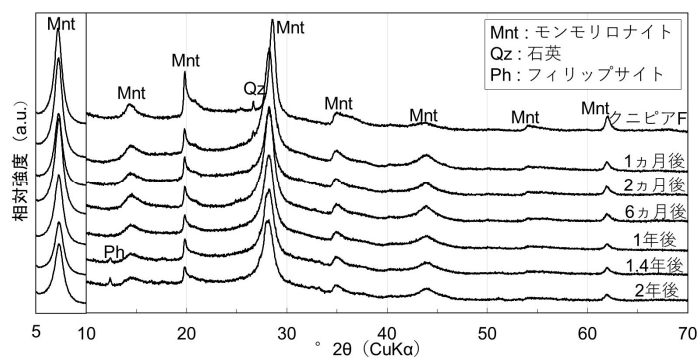


図 8 バッチ変質試験における XRD 分析
(市川ほか, 2022)

参考文献

市川希, 浜本貴史, 笹本広, 市毛悟, 川喜田竜平, 藤崎淳 (2022): 高アルカリ条件における緩衝材の変質挙動: バッチ式反応試験とモデル化, 2022 年度日本地球化学会第 69 回年会講演要旨集.
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.

2.3.2 ベントナイトコロイド影響評価に関する研究

松原 竜太¹ 浜本 貴史¹ 石寺 孝充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むことによって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）における安全評価では、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、全国規模の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移行の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評価する必要がある。コロイドが生成され、かつ安定に存在する場合、閉鎖後長期の安全性の評価にあたっては、コロイドに取り込まれた核種の移行を考慮した検討が必要となる（図 1）。NUMO では、コロイドによる核種移行を評価するためのモデルの整備を行い、サイトが特定された際の性能評価に対する信頼性の向上を目的とした研究を2016年度から開始している。このため、日本原子力研究開発機構との共同研究（2016年～）や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）への参加（2016年～）を通じて、国内産ベントナイトを対象とした、(1) コロイド安定性・生成条件の明確化とともに、(2) コロイドによる核種移行モデルの開発を進めている。

(1) コロイド安定性・生成条件の明確化

CFM でコロイド生成挙動の理解のために実施している天然の割れ目中に定置した圧縮ベントナイトのコロイド生成試験（in-rock Bentonite Erosion Test : 以下、「i-BET」という）を継続（2019年～）し、ベントナイトから生成したコロイド量の時間変化に関するデータを継続的に取得している。CFM で得られる原位置データ分析を目的に地下水中で代表的な 1 価陽イオンである Na 及び代表的な 2 価陽イオンである Ca を対象として、これらの濃度をパラメータとした安定性・生成条件を特定する室内試験を実施した。2021 年度には、Na と Ca が共存する系でのコロイド安定性試験（図 2）を行い、溶質が Na のみの条件ではコロイドが安定である Na 濃度 1×10^{-2} mol/L の環境において、Ca 濃度が 1×10^{-3} mol/L 以上になるとコロイドが不安定化することを明らかにした。さらに、溶質が Na のみの溶液を使用し、既知のコロイド安定条件（Ahmad and Karube, 1998）で実施したコロイド生成試験（図 3）により、Na 濃度が 0.026 mol/L 以下でコロイドが生成することを明らかにした（NUMO, 2023）。CFM のデータを解釈するためには、室内試験データを拡充し、コロイド安定条件の範囲を明確化したうえで、これに応じた生成条件の範囲を確認することが必要である。

(2) コロイドによる核種移行モデル

CFM では、モデル構築に必要な移行現象の理解とモデルの妥当性確認を目的とした原位置データを取得している。2013～2018 年に実施したコロイド共存下での天然の割れ目中の放射性トレー

サー (Ca-45, Se-75, Tc-99, Cs-137, U-233, Am-241, Pu-238, Pu-242, Np-237) 移行試験 (Long-term In situ Test : 以下, 「LIT」という) (図 4) において, ベントナイト及び割れ目を含む試験系の一部を坑道からオーバーコアリングにより採取し, 放射性トレーサーの放射能測定等の分析に向けた試料の加工を進めた。

2. 主な成果

(1) コロイド安定性・生成条件の明確化

i-BET で取得した原位置試験データより, 割れ目中に定置した圧縮ベントナイトからコロイドが継続的に生成していることが確認された。観測されたコロイド生成量の時間変化から生成速度は 70 mg/year であることが分かった。この生成速度に関する要因分析に向け, Na と Ca が共存する条件下のコロイド安定性試験データを拡充し, Na 濃度 $1.0 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-2}$ mol/L で Ca 濃度 1.1×10^{-4} mol/L 以下の範囲でコロイドが安定に存在していることを確認した (図 5 参照)。この成果を用いて, i-BET が実施されている原位置の複雑な地下水組成におけるコロイドの安定性を分析するためには, 元素の種類に依らず地下水中の陽イオンの電荷の違いのみでコロイドの安定性を評価可能であることを確認する必要がある。

(2) コロイドによる核種移行モデル

LIT においては, ベントナイト中の核種の拡散状態やベントナイトの変質状態を調べるため, ベントナイト及び母岩割れ目を含む試験系の一部を坑道からオーバーコアリングにより採取した試料の分析を実施している。また, LIT で得られる原位置データの分析のため, 割れ目中のコロイド共存下における核種の移行挙動の理解を目的として, 2つの平滑な岩石試料を重ねることで単一亀裂を模擬 (以下, 「模擬亀裂」という) し, これを対象としてコロイド共存下におけるトレーサー移行に関する室内試験の計画を作成した。

3. 今後の展開

(1) に関しては, i-BET でデータ取得を継続するとともに, ベントナイト試料の質量減少や, ベントナイトの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与える陽イオン組成の変化などを分析するため, 試験終了後に行うオーバーコアリングの計画策定を進める。また, 地下水中の Ca と Na の電荷の違いによるコロイド安定化のプロセスを分析するための室内試験を行う。(2) に関しては, LIT で採取した試料分析と, 作成した計画に沿って模擬亀裂を対象としたコロイドとトレーサー (非放射性同位体の Sr または Cs) を含む溶液の透過による室内試験を行うことで, コロイド共存下での核種の移行挙動に関する現象理解を進める。これら原位置試験データと室内試験データを用いて, コロイド共存下での核種移行モデルの構築を進める。

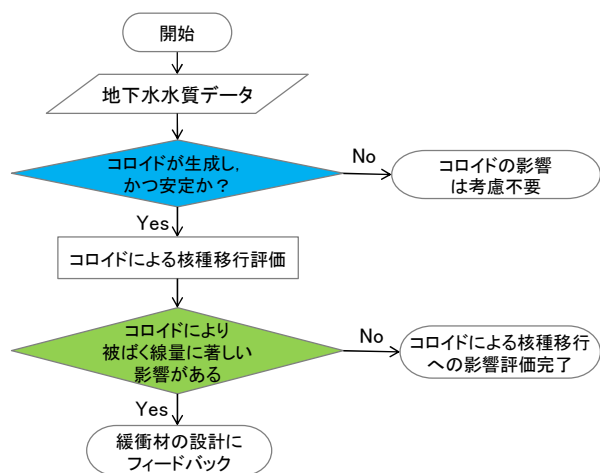


図 1 コロイド影響の評価フロー (案)

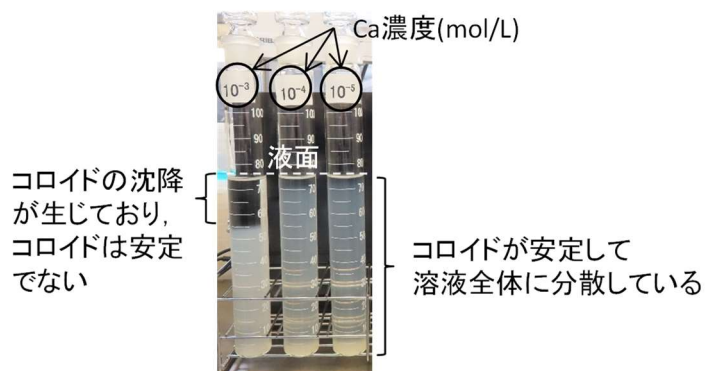


図 2 コロイド安定性評価試験

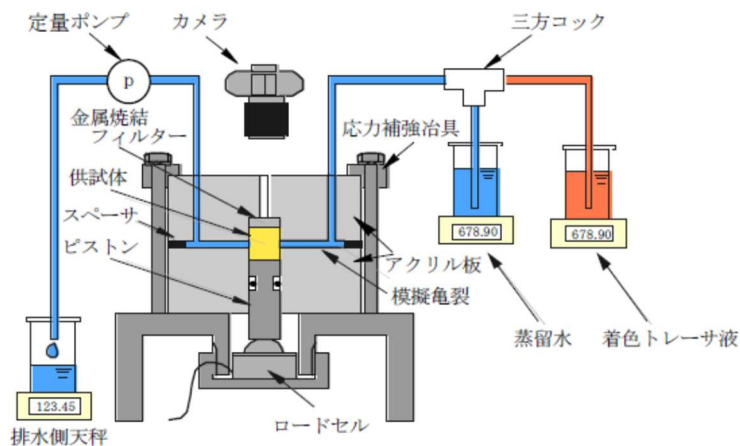


図 3 コロイド生成試験に用いる試験装置の概略図

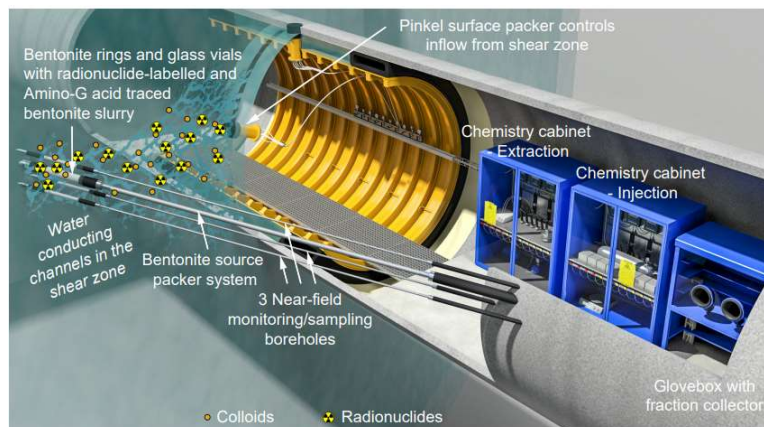


図 4 天然の割れ目を利用したコロイド共存下での放射性トレーサー移行試験の概念図 (Schlickenrieder et al., 2017)

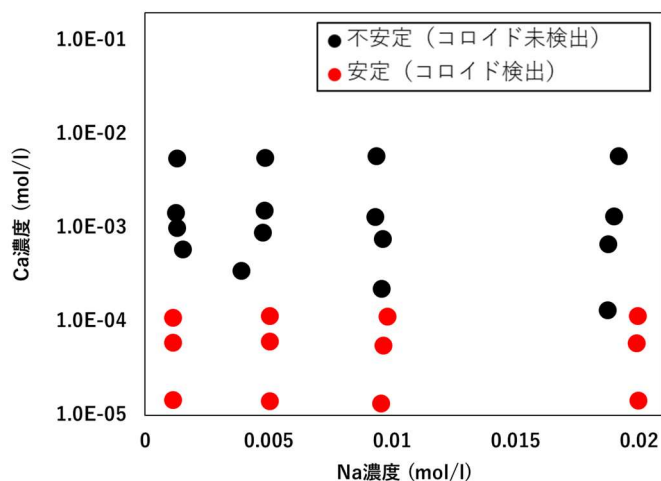


図 5 Na 及び Ca 濃度とコロイドとの安定性の関係

参考文献

- Ahmad, M.M. and Karube, J. (1998) : Effects of Salts and pH on the Critical Coagulation Concentration of Montmorillonite, 農業土木学会論文集, 1998 巻, No. 195, pp.93-99.
- Birgersson, M., Börgesson, L., Hedström, M., Karlund, 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.
- Schlickenrieder, L., Lanyon, G.W., Kontar, K. and Blechschmidt, I. (2017) : Colloid Formation and Migration Project: Site instrumentation and initiation of the long-term in-situ test, Nagra Technical Report NTB 15-03.
- SKB (2010) : Buffer and backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site, SKB Technical Report TR-10-47.

2.3.3 割れ目が卓越した母岩中の核種移行モデルに関する原位置試験データを用いた妥当性確認

浜本 貴史¹ 深津 勇太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

割れ目が卓越した物質移行経路となる花崗岩等の結晶質岩における核種移行に関しては、割れ目中の移流・分散と、割れ目から母岩マトリクス部への拡散（マトリクス拡散）及び吸着を組み合わせたモデルが適用される。ここで、割れ目は平行平板、母岩マトリクスは均質な多孔質媒体で近似されるのが通例である。この核種移行モデルを用いた安全評価では、マトリクス拡散及び吸着による遅延効果が生活圏で生ずる被ばく線量の低減に大きく寄与しており、実際の複雑な構造を有する母岩に対してモデルの妥当性を確認することは、安全評価の信頼性を示すうえで重要である。

NUMO は、JAEA との共同研究（2016 年～）やスイスのグリムゼル試験サイトにおける国際共同プロジェクト LTD（Long-Term Diffusion）への参加（2016 年～）を通じて、この課題に取り組んでいる。上記モデルに対し、採取した割れ目の観察や室内試験を通じて母岩マトリクス内部の空隙構造の不均質性を考慮した核種移行モデルや充填鉱物などによる割れ目内部の空隙構造の不均質性を考慮した核種移行モデルが提案（Tachi et al., 2018 ; JAEA・RWMC, 2020）されているが、これらは小規模の岩石試料を用いた試験に基づくものであり、より大きなスケールにおいても、このような不均質性を考慮したモデルによって現象を適切に表現できるかどうかを調べることが必要である。このため、グリムゼル試験サイトにおいて、割れ目とその周辺のマトリクス部を含む天然の系に対し計画されている放射性トレーサー移行試験（Nagra, 2022）を対象として、上述した不均質性を考慮した核種移行モデルの適用性に関する検討を 2019 年から開始している。図 1 に放射性トレーサー移行試験の概念図を示す。これまでに、国際共同研究の枠組みのなかで、上記のマトリクス内部の空隙構造の不均質性を考慮したモデル（図 2 左）や割れ目内部の空隙構造の不均質性を考慮したモデル（図 2 右）を用いた予備解析を行ってきた。この結果に基づいて試験条件を設定し、非吸着性トレーサーを用いた原位置試験の準備を進めてきた。2022 年度は、非吸着性トレーサー及び弱吸着性トレーサーを用いた原位置試験を開始する。また、今後計画している吸着性トレーサーを用いた原位置試験を対象に、試験期間やトレーサー注入の条件設定を目的として、割れ目特性の不均質性や不確実性を考慮した予備解析を実施する。

2. 主な成果

非吸着性のウラン、トリチウム及び弱吸着性のナトリウムを利用した放射性トレーサー移行試験を 2022 年 10 月から開始した。

今後計画しているナトリウムより吸着性の高いトレーサーを対象とした試験に向けて、前述のマトリクス内部の空隙構造の不均質性を考慮した核種移行モデルを用いて、原位置試験で使用を予定している吸着性トレーサー（Cs）を対象に予備解析を実施した。マトリクスや割れ目内部の不均質性が解析結果に及ぼす影響を考慮して試験期間やトレーサー注入の条件を設定するため、割れ目表面近傍の雲母堆積層及びバーミキュライト層（以下、「変質層」という）の厚みをグリムゼル試験サイトから

採取した岩石のデータ (Tachi et al., 2018) に基づいて変化させた感度解析を実施した。Cs の破過挙動については、変質層の厚み (図 2) に依存し、100 日程度で破過が捉えられる可能性もあるが、変質層が厚くなると十分な破過データを得るのに 1 年以上を要する可能性もある結果となった (図 3)。このように、トレーサーの収着特性に応じて、原位置条件での破過データを取得するために要する試験期間を推定し、原位置試験の条件設定に資する情報を取得することができたことから、こうした情報を国際共同研究に提供し、試験条件設定を進める計画である。

3. 今後の展開

非収着性及び弱収着性トレーサーを対象とした試験を完了した後、収着性トレーサーを対象とした試験に着手する。原位置試験開始後は、モニタリングデータを用いて、逐次核種移行モデルの妥当性確認と改良を行う。試験終了後には、亀裂を含む試験系の一部を坑道からのオーバーコアリングによって採取することで、母岩マトリクスや割れ目内部の空隙構造や核種の詳細な分布を調べる。その後、モニタリングデータによって改良した核種移行モデルによる解析結果とオーバーコアリングで取得したデータとを比較し、特に母岩マトリクス部の核種移行モデルの妥当性を確認するとともに必要に応じて改良を行う。

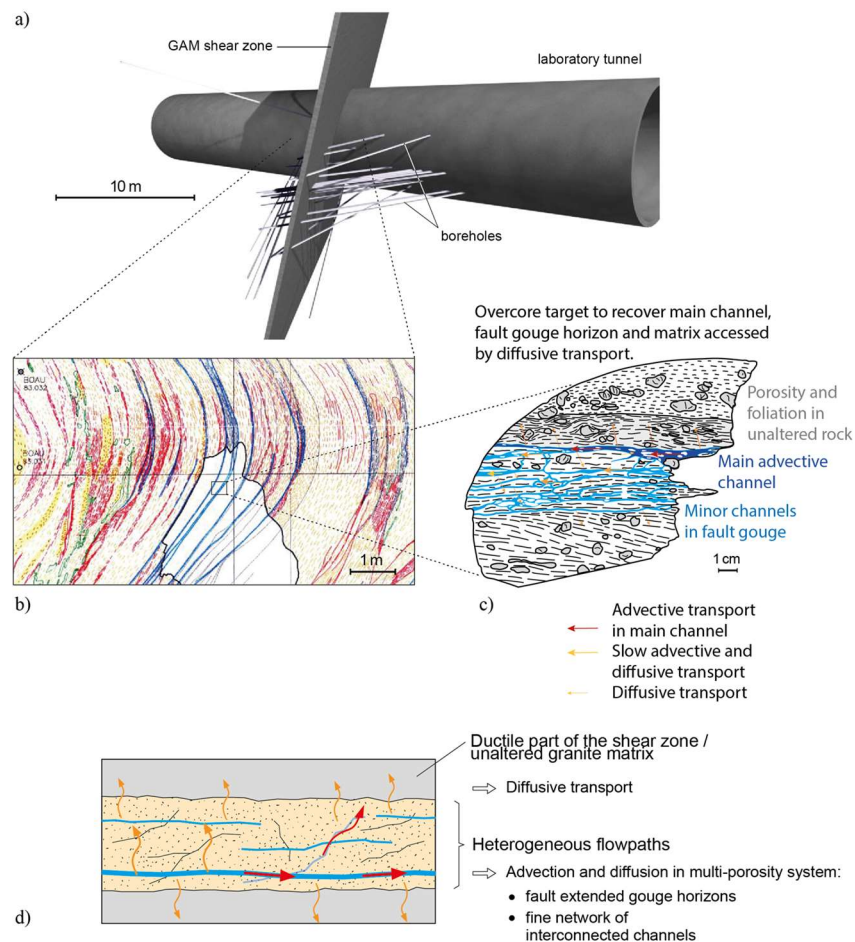


図 1 放射性トレーサー移行試験で対象とする割れ目 (Marschall and Lunati, 2006)

(図 a : 試験実施箇所のボーリング孔の概念図, 図 b : 坑道壁面の割れ目の分布, 図 c : 割れ目の中の微細構造の概念図, 図 d : 核種移行経路の概念図)

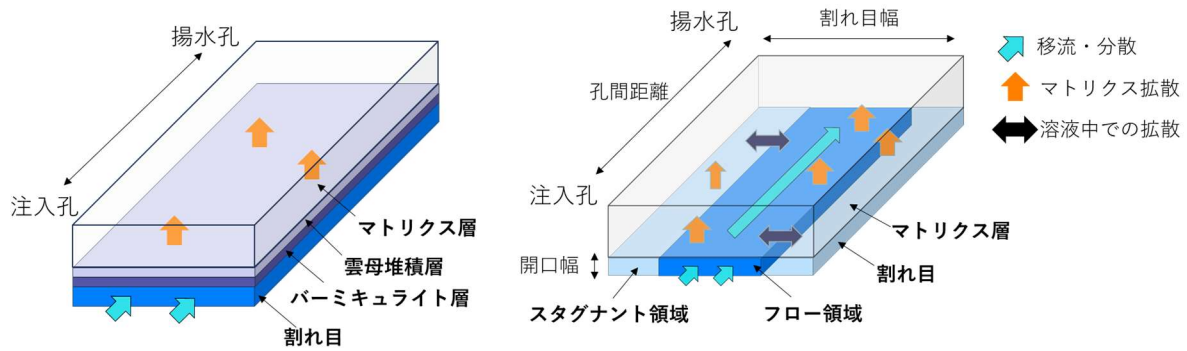


図 2 母岩中の不均質性を考慮した核種移行モデルの概念図

(左：母岩マトリクス内部の空隙構造の不均質性を考慮した核種移行モデル，右：充填鉱物などによる割れ目内部の空隙構造の不均質性を考慮した核種移行モデル。各層・領域は多孔質媒体としてモデル化)

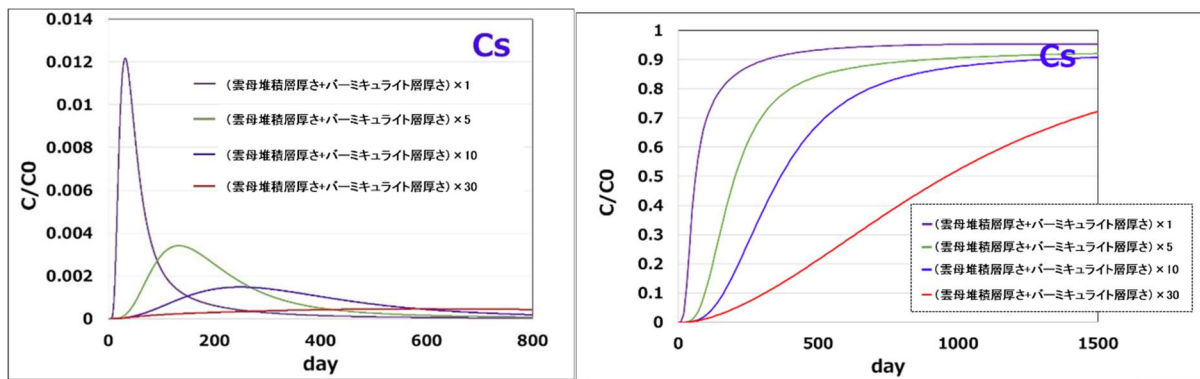


図 3 雲母堆積層及びパーミキュライト層の厚さを変化させた条件での収着性トレーサー (Cs) 移行試験の解析による揚水孔側の規格化トレーサー濃度の経時変化

(左：トレーサー注入を1時間に限定した試験，右：トレーサー注入を継続した試験)

参考文献

- 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)(2020)：平成31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 ニアフィールドシステム評価確認技術開発報告書.
- Marschall, P. and Lunati, I. (editors) (2006) : GAM – Gas Migration Experiments in a Heterogeneous Shear Zone of the Grimsel Test Site, Nagra Technical Report NTB 03-11.
- Nagra (2022) : Grimsel Test Site Newsletter, December 2022, year 4, vol. 8.
- Tachi, Y., Ito, T., Akagi, Y., Satoh, H. and Martin, A.J. (2018) : Effects of Fine-Scale Surface Alterations on Tracer Retention in a Fractured Crystalline Rock from the Grimsel Test Site, Water Resources Research, Vol. 54, pp.9287-9305.

2.3.4 TRU等廃棄物の安全評価における核種溶出モデルの改良に関する研究

小池 彩華¹ 石田 圭輔¹ 浜本貴史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, 2021) 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は廃棄体から溶出した核種の移行を抑制する機能を持つと考えられるが、安全評価においては、充填されたセメント系材料の状態変遷に関する不確実性に対応するためこの機能を保守的に考慮せず、砂と同程度 (1.0×10^{-5} m/s) の透水性を付与して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仮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、本研究ではセメント系材料の状態変遷を評価可能な反応輸送解析モデルの開発を JAEA との共同研究として進めている。

2018 年度から、Ca が溶脱したセメント系材料中における Cs と I の移行挙動を確認するため、CsI 溶液に 5 体のセメント系材料試料を浸漬させ (図 1)、一定期間ごとに試料を取り出し試料中の生成固相や元素分布等を分析する試験を実施した (川戸ほか, 2021)。この試験において生じている現象としては、①CsI 溶液との接触によるセメント系材料からのアルカリ成分の溶脱、②間隙水の pH の変動に伴う固相の溶解/沈殿、③間隙率の変動に伴うセメント系材料の物質移行特性の変化、④間隙水中や CsI 溶液中における物質の拡散が考えられる。これらに対して、①CsI 溶液へのアルカリ成分の溶脱を平衡論で取扱い、②セメント系材料に含まれる固相の溶解/沈殿反応については速度論を考慮し、③物質移行特性の変化について、セメント系材料の間隙率と実効拡散係数の関係式 (Mihara and Sasaki, 2005) を適用、④セメント系材料中の物質移動と CsI 溶液中の物質移行を濃度差に起因した拡散方程式に従うとした概念モデルを構築した。この概念モデルに基づき、数理モデルや解析に用いるデータセットを準備した。具体的には、包括的技術報告書にて①~④を考慮して構築した、緩衝材に与えるセメント系材料由来の影響分析に用いたモデルを基本とし、比表面積と熱力学データベース (GWB20.dat (v1.2)) は最新の知見に基づき更新している。モデルの幾何学形状を、セメント系材料 1 体あたりの CsI 溶液の体積 (固液比 1 : 22.5) に基づいて設定した解析体系を図 2 に示す。境界条件はセメント系材料と CsI 溶液との界面を除き、反射境界を与えている。このモデルを解析コード MINARET (MINeral Alteration due to REactive Transport) (Quintessa ホームページ) に実装した。この時、セメント系材料中及び CsI 溶液中における拡散現象については、間隙水が電氣的に中性な状態であることを表現するため化学種ごとに拡散係数を設定することはせず、電荷が中性である化学種 (HTO) の自由水中の拡散係数 (2.27×10^{-9} m²/s) を全ての化学種に適用した。また、一定期間ごとの試料取り出しに伴う固液比の変化と CsI 溶液中のセメント系材料成分の濃度分布の擾乱については、解析結果に影響を与えないと仮定し、数値解析においては取出し過程は反映しなかった。

2021 年度に試料の溶脱により生じた固相の組成の変化を走査電子顕微鏡により分析した結果と解析の結果得られたセメント系材料の溶脱部における固相の組成を比較したところ、溶脱部におけるエトリンタイトの生成、ポルトランタイトの溶解という点では整合していた。しかし、電子線マイクロアナライザー (EPMA) により分析した試料の Ca 溶脱範囲は解析結果の方が小さい (図 3) ものと

なった（小池ほか，2023）。2022 年度は，この解析結果との差異を生じている要因を特定するため，④の拡散方程式，及び②の溶解速度式に関するパラメータ（拡散係数，間隙率，平衡定数，比表面積，溶解定数）の感度解析と，上述した一定期間ごとの試料取り出しを数値解析に反映しなかったことの影響を検討した。

2. 主な成果

(1) 試料取り出しに関する取扱いの検討

2021 年度の数値解析において考慮しなかった試料の取り出しに伴う固液比の変化と，CsI 溶液内の溶脱 Ca 成分に関する濃度分布の擾乱について，実際の試験方法を下記 (i) ～ (iii) のように取り扱うことにより，反応輸送解析で得られる溶脱範囲に及ぼす影響を把握することとした。

- (i) 当初浸漬させた試料 5 体に対する固液比を設定し，0～4 週まで解析
- (ii) (i) の解析結果からセメント系材料の溶脱領域と CsI 溶液濃度の平均値を出力
- (iii) 試験を継続する残りの試料 4 体に対する固液比に変更し，(ii) の溶脱部の組成を与えて 4～52 週まで解析

上記の手順で実施した解析結果（図 4）では，溶脱範囲の試験結果との差は小さくなるものの，なお，試験結果をうまく表現することができなかった。今後は，試験条件をより忠実に反映した解析手順の改良を進めるとともに，モデルとの比較がより簡易的に実施できる試験手法について検討する。

(2) パラメータの不確実性による影響

本解析において用いた支配方程式（拡散方程式，溶解速度式）の各パラメータ（拡散係数，間隙率，平衡定数，比表面積，溶解定数）について，それらを取得した試験条件等による不確実性を考慮し，文献（JAEA，2018）に基づいて設定した誤差範囲を対象とした感度解析を実施した。感度解析結果を図 5 に示す（図中の ref は基準となる値を示す）。これらのパラメータのうち溶脱範囲に感度を有しているパラメータは溶液中の拡散係数の元素依存性と主要なセメント水和物であるポルトランドイトの平衡定数（logK）であった。このことから，これらのパラメータの値の不確実性を考慮して溶脱範囲を評価することが重要と考えられる。また，モデルにおいては全ての化学種に対して HTO の拡散係数（ D_0 ）を適用しているが，拡散係数の感度が高いことを踏まえると，化学種毎に拡散係数を設定することも重要である（図 6）。近年の研究では，溶存化学種の電荷ごとに拡散係数を設定した解析（Jenni et al., 2021）も実施されており，化学種ごとに拡散係数を設定可能な数値解析モデルの適用について検討を進める。

3. 今後の展開

2. (1)，(2) を受けて，以下について今後取り組むことでより現象に即したモデルの開発を継続する。

- ・ 試験手法をより精緻に反映した解析モデルの改良
- ・ モデルへ反映させることが簡易な試験体系の構築（例えば，試料暴露面の濃度を一定とする試験体系や，幾何学形状モデルと同様の試験体系）
- ・ 溶存化学種ごとに拡散係数を設定可能な数値解析モデルの検討

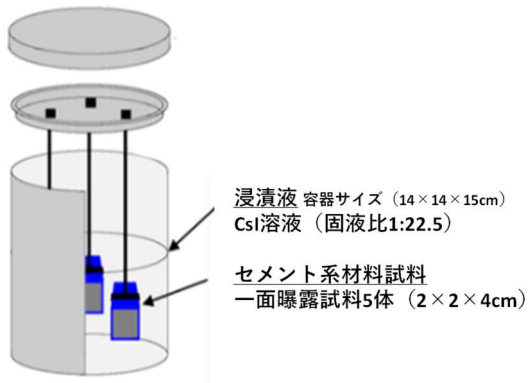


図 1 試験体系



図 2 反応輸送解析モデルの解析体系

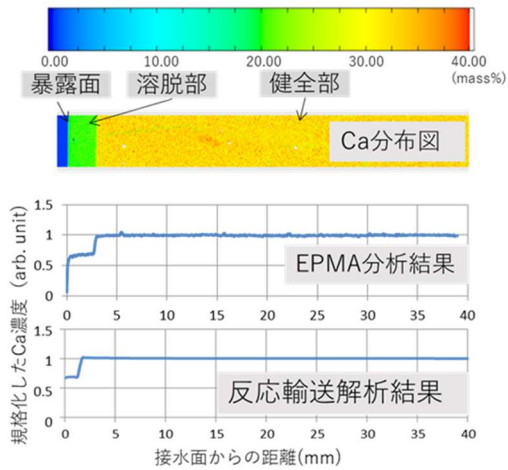


図 3 浸漬 52 週後の試験体中の Ca 濃度分布に関する EPMA 分析結果 (カラーバー付き) (上) と反応輸送解析結果 (下)

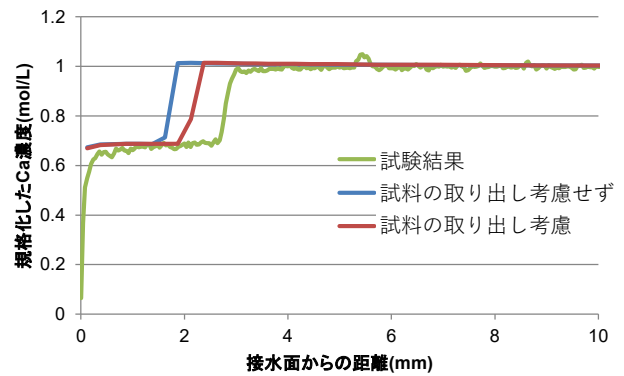


図 4 試料の取り出しを考慮した解析結果 (浸漬 52 週後)

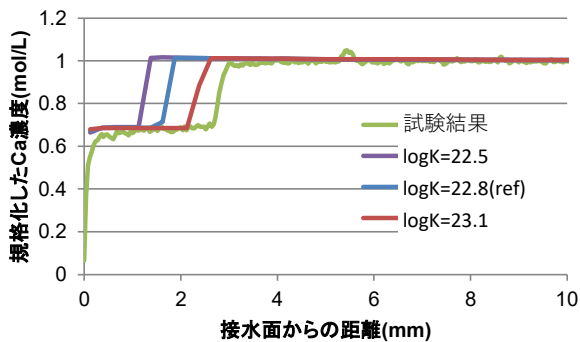


図 5 ポルトランタイトの平衡定数の感度解析結果 (浸漬 52 週後, logK は平衡定数の対数值,)

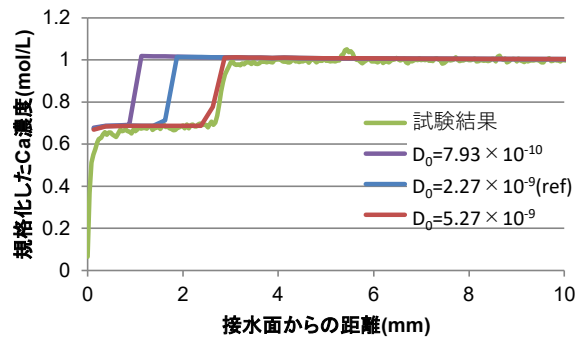


図 6 拡散係数の感度解析結果 (浸漬 52 週後, 拡散係数 D_0 の単位は m^2/s)

参考文献

- JAEA(日本原子力研究開発機構)(2018):平成29年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 処分システム評価確証技術開発.
- Jenni, A., Meeussen, J.C.L., Pakkanen, T.A., Hirvi, J.T., Akinwunmi, B., Yustres Á., Navarro, V., Lopez-Vizcaino, R., Muri, E., Niskanen M., Wersin, P. and Mäder, U. (2021) : Coupling of chemical and hydromechanical properties in bentonite: A new reactive transport model, *Applied Clay Science*, 214.
- 川戸陸也, 石田圭輔, 山本武志, 湊大輔, 藤崎淳, 浜本貴史, 三原守弘 (2021): 硬化セメントペースト中のヨウ素イオンおよびセシウムイオンの拡散挙動, 原子力学会 2021 年秋の大会, 1A12.
- 小池彩華, 石田圭輔, 浜本貴史, 三原守弘 (2023): セメント系材料の状態設定に用いる反応輸送解析モデルの妥当性確認, 日本原子力学会 2023 年秋の大会, 1D08.
- 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)(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.
- Quintessa ホームページ: MINARET, <https://www.quintessa.org/software/custom-software/minaret> (2023 年 6 月 28 日閲覧)

2.3.5 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の拡充

浜本 貴史¹ 石寺 孝充² 舘 幸男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

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) では、これまでに蓄積された室内試験データや文献データに基づいて構築された、JAEA のデータベースを参照して設定する方法を示した。この過程で、日本国内の地質環境に対して設定に必要なデータが十分ではない元素については、安全評価上の保守主義に立ち移行遅延性能を低く見積もってパラメータを設定した。概要調査段階以降においては、サイト調査により得られる地質環境等のデータ・情報を用い、処分場の空間的な広がりに伴う不均質性や時間変遷に起因する地質環境特性の不確実性を考慮し、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データ・情報と、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て包括的にこれを行うための手法の構築が重要である。

本検討は、JAEA との共同研究により、このような手法の構築を目的として実施しているものである。検討にあたっては、包括的技術報告書の作成過程で明らかになった十分でないデータ (溶解度、収着分配係数 (Kd)、実効拡散係数 (De)) を試験により継続的に取得し、多様な地質環境特性に応じた値を設定可能とすることで、安全評価における技術的信頼性を向上させる。具体的には、45°C以上の地温環境、高炭酸濃度地下水、閉鎖後の長期間において想定される Ca 型化した緩衝材を考慮したデータの拡充を図る。さらに、原位置試料を利用した母岩中の核種移行パラメータ値の設定手法の整備を進める。

2. 主な成果

溶解度に関して、Se に対する 60°C 及び 90°C のデータを拡充し、既往の 75°C (Doi et al., 2016) 及び 2021 年度に取得した 45°C (Yoshida et al., 2023) のデータと組み合わせることで、深部地下の地温に応じた、より確からしい値を設定できるようになった。

Kd に関しては、岩石中での収着反応を支配すると考えられている粘土鉱物の一種であり、緩衝材の主成分でもあるモンモリロナイトについて、高炭酸環境において Np の Kd を取得し (石寺ほか, 2022)、高炭酸濃度地下水における Kd を設定可能とした。

De に関しては、Ca 型に変質した緩衝材中の De を設定するために陰イオンの拡散データの緩衝材乾燥密度に対する依存性及び液相の塩濃度依存性を明らかにするための試験を実施し、確からしい値を設定するためのデータ充足性を高めた。

母岩に対する核種移行パラメータ値の設定手法の構築に関し、これまでの共同研究で構築してきた Kd 設定手法 (舘ほか, 2017) の原位置試料への適用性を確認するため、NUMO が公表した先新第三紀付加体堆積岩の地質環境データ (横田ほか, 2022) を利用して、閉鎖後長期の安全評価で重要な元素である Cs, Ni, Am を対象とした Kd 設定を試行した。この結果、対象とした岩石のような比較的粘土鉱物の含有率が高い堆積岩については、鉱物量比の測定結果等に基づく粘土含有率、水質分析結果に基づく地下水水質、既存のデータベースに格納されている粘土鉱物に対する Kd の実測データ

(Tachi and Suyama, 2016) 等の利用により K_d を設定できる可能性が示された。今後は、この設定値と収着試験で得られる実測値との比較を通じた K_d 設定手法の妥当性確認を進める。

3. 今後の展開

拡充したデータについては、将来の安全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、母岩の K_d 設定手法の妥当性確認のため、付加体堆積岩試料を対象として K_d 等を実測し、得られるデータと 2022 年度に設定した値との比較を行う。これらにより、概要調査段階以降の安全評価に適用するサイト調査を反映した核種移行パラメータ値の設定手法を段階的に構築していく。

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.
- 石寺孝充, 浜本貴史, 岡崎充宏, 山田良英, 戸村努 (2022) : 炭酸共存下でのモンモリロナイトへの Zr, Np(IV)の収着分配係数の評価, 日本原子力学会 2022 年秋の大会.
- 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.
- 横田秀晴, 後藤淳一, 大城遥一, 國丸貴紀, 西尾光, 松岡稔幸, 三枝博光 (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.
- Tachi, Y. and Suyama, T. (2016) : Development of JAEA Sorption Database (JAEA-SDB); Update of sorption/QA data in FY2015, JAEA- Data/Code 2015-028.
- 館幸男, 陶山忠宏, 澁谷早苗 (2017) : 地層処分性能評価のための岩石に対する収着分配係数の設定手法の構築 : 花崗岩を対象とした適用評価, *原子力バックエンド研究*, Vol. 24, No. 2, pp.109-134.
- 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.

2.3.6 ガラス変質層による溶解速度の低減現象に係る根拠情報の拡充

松原 竜太¹ 田窪 勇作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溶解速度に基づく核種の溶出速度を設定する。ガラス溶解挙動は地質環境及び人工バリア材料の変質状態により決定される環境条件（接触する地下水水質、温度環境等）に依存する。特に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の蓄積に伴い、それに応じて設計した処分場の環境条件、その条件下で生じるプロセスを考慮してガラス溶解挙動を予測するため、様々な環境条件に対応可能なガラス溶解モデル（図 1）の開発を進めている。

ガラス溶解モデルの開発に向けて、ガラス表面の溶解・変質プロセスにより形成する変質層がガラス溶解速度を低減させる影響の把握を目的とした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の把握（JAEA 共研, 2016 年～）、ガラス溶解挙動の液性・温度条件依存性の把握（九州大学（以下、「九大」という）共研, 2020 年～）、変質層によるガラス溶解挙動への影響要因を分子構造から推定する手法構築（千葉大学（以下、「千葉大」という）共研, 2020 年～）に取り組んでいる。2021 年度までに得られたこれらの取り組みの成果（NUMO, 2023）については、米国セラミックス協会 The American Ceramic Society 主催の 2022 Glass and Optical Materials Division Annual Meeting（Matsubara et al., 2022）、日本原子力学会主催の 2022 年秋の大会（松原ほか, 2022；江上ほか, 2022；大窪ほか, 2022）、日本セラミックス協会ガラス部会放射性廃棄物分科会主催の第 4 回放射性廃棄物固化体討論会（日本セラミックス協会ガラス部会放射性廃棄物分科会, 2022）で発表している。概要は以下のとおりである。

- ・ JAEA 共研：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 イオン濃度が長期間（約 10 年）に亘って維持できるように試験装置（図 2）を改良。
- ・ 九大共研：ガラス溶解挙動の Si 濃度依存性を評価するため、模擬廃棄物ガラスに接触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）を用いた試験を計画。日本で想定される地下水条件（NUMO, 2021）に基づき 6 試験条件を設定。このうち 1 条件でデータを取得。
- ・ 千葉大共研：変質層中の水の移行シミュレーションに用いる変質層の分子構造モデルを古典分子動力学計算により作成。

これを踏まえ、2022 年度は、JAEA 共研では改良した試験装置を用いたガラス溶解挙動に関する長期試験を開始し、九大共研では 2021 年度にデータ取得した 1 条件（表 1 第 3 欄）を除く残りの 5 条件でデータを取得する。千葉大共研では 2021 年度に作成した分子構造モデルを対象に物質の移行シミュレーションのための技術を開発する。

2. 主な成果

JAEA 共研では、2021 年度に改良した試験装置を用いて、模擬廃棄物ガラスを FeCl₂ 溶液または

MgCl₂ 溶液に浸漬させた試験系（図 2 参照）による長期間のガラス溶解試験（最大 10 年を想定）を開始した。MgCl₂ 溶液よりガラスとの反応がより早く進むと考えられる FeCl₂ 溶液を用いた浸漬試験を対象に、浸漬開始から約 3 か月後の試料を取り出して分析を行い、変質層の形成を確認した。九大共研では、2021 年度に設定した試験条件（表 1 第 1～第 6 欄）に従いガラス溶解速度及びガラス表面変質層の組成等のデータを拡充した。試験 No.1～No.5 はガラス溶解速度が試験期間中ほぼ一定であったが、一方、試験 No.6 においては試験期間中にガラス溶解速度が時間とともに低下する傾向が確認されたことから（図 4）、試験 No.6 のみ保護膜として機能する変質層が形成、時間とともに成長してガラス溶解を抑制していると考えられる。試験 No.6 と試験 No.3 の試料を SEM・EDX 分析した結果、No.6 についてはガラスに対して変質層に含まれる Si 量が多いことがわかった。このことから、変質層が溶液中の溶存 Si を取り込みながら形成し、このプロセスが保護膜として機能する変質層の形成に寄与していることが推測された。試験 No.1～No.6 における変質層の影響がない条件下のガラス溶解速度を算出し初期溶解速度（Inagaki et al., 2012）と比較した結果（表 1）、いずれの温度においても Si 濃度の増加とともにガラス溶解速度が小さくなることを確認した。千葉大共研では、2021 年度に作成した変質層の分子構造モデル（NUMO, 2023）を対象とした水分子の移行シミュレーションの試行を通じて、変質層の細孔構造（孔径や連結性等）における細孔壁面に分布する Si と空隙中に存在する水との相互作用（水素結合）を反映した分子動力学シミュレーション手法を構築し、間隙率に応じた水の拡散係数（図 5）を評価した。

3. 今後の展開

JAEA 共研では、2021 年度に改良した装置を用いて、模擬廃棄物ガラスを FeCl₂ 溶液または MgCl₂ 溶液に浸漬させた長期試験を継続し、得られたデータに基づいてガラス溶解挙動に対する溶液中の Fe イオンや Mg イオンの影響をモデル化する。九大共研では、ガラス溶解挙動の pH 依存性を評価するため、日本で想定される地下水水質（NUMO, 2021）に対するデータ拡充を行う。千葉大共研では、2022 年度に構築した分子動力学シミュレーション手法について、変質層中の水の移行挙動に加え、ガラス固化体から溶出する B や Na, Al 等の移行挙動を推定可能とするために改良する。

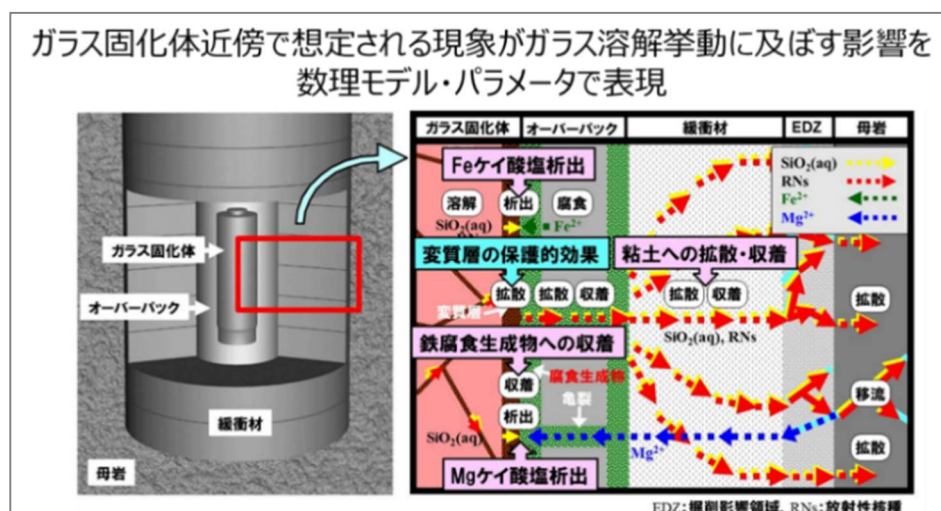


図 1 ガラス溶解モデルの概念図（柴田ほか, 2015）

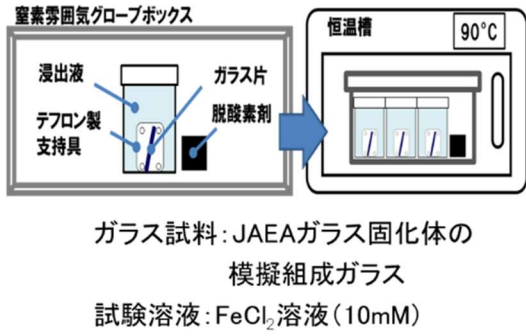


図 2 長期間のガラス溶解挙動を調べるための静的試験装置の概略

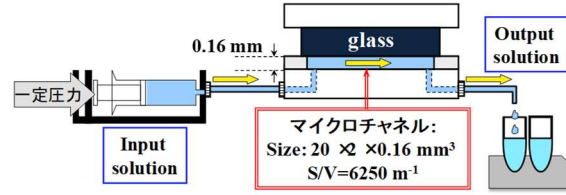


図 3 液性・温度条件を一定に制御可能なマイクロチャネル流水試験装置の概略

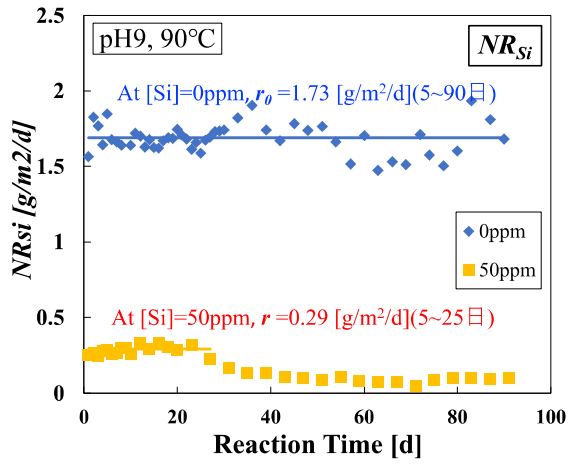


図 4 Si 溶出量から算出したガラス溶解速度の経時変化 (試験 No. 3 (青) と No. 6 (オレンジ) の比較)

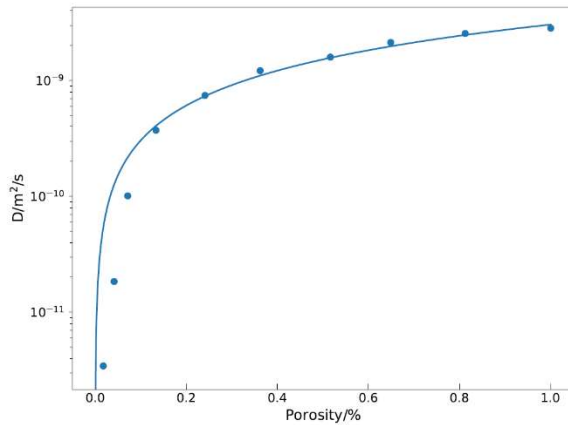


図 5 変質層の空隙率と水の拡散係数の関係

$$NR_{Si} [\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}] = \frac{C_{Si} V}{f_{Si} S} \frac{1}{\Delta t}$$

- C_i : 反応溶液中の Si の濃度 [g/m³]
- f_i : 反応前ガラス固化体中の Si 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]
- Δt : 反応時間 (サンプリング時間) [d]

表 1 ガラス溶解試験の条件・ガラス溶解速度

試験 No	pH	Si 濃度	温度	試験期間	溶解速度	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	1.73 g/m ² /d	2021 年度
No.4	pH9	50 ppm	50℃	23 日 ※1	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	0.29 g/m ² /d ※2	2022 年度

※1 試験開始後 23 日目にガラス試料が破損，23 日までガラス溶解速度の大きな変化は観測できなかった。

※2 ガラス溶解速度が大きく変化しなかった試験開始後 25 日までの平均値。

参考文献

- 江上立樹, 稲垣八穂広, 横山礼幸, 来海寿宏, 有馬立身, 出光一哉, 松原竜太 (2022) : 地層処分におけるガラス固化体性能評価の信頼性向上に向けた取り組み (2) 模擬ガラス固化体 P0798 の溶解速度評価 : 溶存 Si 濃度及び pH の影響, 日本原子力学会 2022 年秋の大会.
- 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.
- 松原竜太, 石田圭輔, 藤崎淳, 石黒勝彦, 稲垣八穂広, 大窪貴洋, 岩田孟 (2022) : 地層処分におけるガラス固化体性能評価の信頼性向上に向けた取り組み (1) 全体概要, 日本原子力学会 2022 年秋の大会.
- 日本セラミックス協会ガラス部会放射性廃棄物分科会 (2022) : 第 4 回放射性廃棄物固化体討論会 講演要旨集, 日本セラミックス協会ガラス部会放射性廃棄物分科会.
- 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.65-67.
- 大窪貴洋, 松原竜太 (2022) : 地層処分におけるガラス固化体性能評価の信頼性向上に向けた取り組み (3) アルミノホウケイ酸塩ガラス溶解で生じるゲル層の原子構造の解明 : 実験とシミュレーションによる研究, 日本原子力学会 2022 年秋の大会.
- Matsubara, R., Fujisaki, K., Ishida, K., Ishiguro, K., Inagaki, Y., Ohkubo, T., Mitsui, S., Iwata, H. and Sekine, N. (2022) : R&D program of operational model of long-term performance for vitrified High-level Radioactive Waste, 2022 Glass and Optical Materials Division Annual Meeting.
- 柴田雅博, 澤田淳, 館幸男, 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, 鈴木覚, 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.

2.3.7 原位置試験データを用いた THMC (熱-水-力学-化学) 連成現象評価技術の高度化に関する研究

田窪 勇作¹ 高山 裕介² 石田 圭輔¹ 藤崎 淳¹

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

地層処分場の設計では、ベントナイト中のモンモリロナイトの熱変質による安全機能の低下を防止するため、ベントナイトが使用される緩衝材や埋戻し材の温度を 100°C 以下に抑えることが設計要件として考えられている (JNC, 1999 ; NUMO, 2021)。この設計要件を満足するためには、ニアフィールドにおける温度場 (Thermal : T)、水理場 (Hydrological : H)、力学場 (Mechanical : M)、化学場 (Chemical : C) の条件及び条件に応じた緩衝材の熱伝導特性に関する不確実性、人工バリア設置に関する隙間の充填状態等の不確実性や、廃棄体の発熱特性に関する不確実性などを考慮し、廃棄体の定置間隔や坑道離間距離の設計にあたって十分な設計裕度を考えておくことが重要である。一方、緩衝材の熱による変質に関する室内試験の先行研究などでは、100°C を超えた温度領域においても比較的短期間であれば急激な熱変質が進むわけではないことが示唆されている (e.g., Leupin et al., 2014)。

したがって、緩衝材温度を 100°C 以下とする設計要件に対して、上記の不確実性への対処としての過度な設計裕度を排し、合理性をもった設計を実施するうえで、どの程度の温度環境 (最高温度及びその温度の継続期間) であれば緩衝材の安全機能を著しく損なうような影響が生じないのかを科学的な根拠に基づいて把握しておくことが重要となる。そのため NUMO では、2019 年から JAEA との共同研究や、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 Buffers (Nagra, Grimsel Test Site HP : 以下、「HotBENT」という) への参加を通じて、100°C 以上の温度環境も含めた緩衝材のより現実的な状態評価を行うための解析モデルの開発を進めている。開発にあたっては、再冠水の過渡的状态下における複雑な THMC 連成現象 (図 1) を評価する技術を着実に構築するため、TH 連成解析モデルの整備から始め、必要な化学連成・力学連成のプロセスを段階的に追加し、その後、100°C 以上へ解析モデルの適用温度を拡張する開発アプローチ (図 2) を採用している。

2021 年度までに、サンディア国立研究所など複数の米国国立研究所で共同開発が行われているオープンソース PFLOTRAN (Lichtner et al., 2020) を用いて、100°C 未満の温度条件へ適用可能な TH 連成解析モデルを整備した (Takubo et al., 2022)。

2022 年度は、100°C 未満の温度条件に対して 2021 年度に整備した TH 連成解析モデルを THC 連成解析モデルへ拡張し、原位置試験データとの比較を行うことで、その適用性を評価した。また、2021 年度に整備した TH 連成解析モデルの 100°C 以上の温度領域への適用性を評価するため、HotBENT 原位置試験で得られる原位置データとの比較のための TH 連成解析を開始した。

2. 主な成果

(1) THC 連成解析モデルの適用性評価

THC 連成解析モデルは、2021 年度に整備した TH 連成解析モデルをベースに、PFLOTRAN に実装されている反応輸送解析機能を用いて、緩衝材と間隙水との間で生じる溶解・沈殿反応や緩衝材

表面における溶存化学種の可逆性の吸着反応といった化学反応及び移流と拡散による溶存化学種の移行を取り扱えるように拡張して作成した(図 3)。THC 連成解析の結果に影響を与える主なパラメータとして、ベントナイトの初期鉱物組成割合や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関するパラメータや、間隙率や固有透過度、屈曲度といった緩衝材間隙における水の移行及びその間隙水中の溶存化学種の移行に関するパラメータがある。これらのパラメータについてモデル化する試験対象にあわせて設定した。構築した THC 連成解析モデルを用いて、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 (Lanyon and Gaus, 2016 : 以下「FEBEX」という)で実施された 100°C 未満の室内試験及び原位置試験を対象とした THC 連成解析を実施し、緩衝材中の Cl や S 等の分布に関する試験データと解析結果の比較によって、このモデルの適用性を確認した。THC 連成解析モデルで考慮した化学反応に関するパラメータや、緩衝材中の物質の移行挙動に寄与するパラメータを対象として各パラメータに対する個別要素試験の文献値等に基づき設定した値の範囲における感度解析を行い、解析結果への影響が大きいパラメータを評価し、室内試験及び原位置試験それぞれの試験から得られた緩衝材中の Cl や S 等の元素分布と比較した結果、実験値との差を生じさせているパラメータは間隙率や固有透過度、屈曲度といった物質の移行挙動に寄与するものであることが示された。これらのパラメータは、緩衝材の膨潤挙動に支配されることから、より確からしい評価を行うためには、解析において力学の効果を直接取り扱うことが重要であることが示された。

(2) TH 連成解析モデルの高温環境 (100°C以上) への適用性評価に向けた解析

2021 年度に整備した TH 連成解析モデルを使用して、熱源であるヒーターの表面温度を 200°C まで加熱する HotBENT 原位置試験を対象とした解析を実施した(図 4)。200°C まで TH 連成解析モデルの適用温度を拡張しても計算が発散することなく収束することを確認するとともに、100°C を超えた温度条件で顕著となるヒーター近傍の水分飽和度の減少について解析で表現することが可能となった。

3. 今後の展開

引き続き、HotBENT プロジェクト及びその前身の FEBEX プロジェクトにおける原位置データに基づいて、THMC 連成現象を考慮した再冠水過程におけるニアフィールドの状態変遷の評価を行うためのモデルの高度化やその妥当性確認を段階的に実施していく。これによって、概要調査以降で得られるサイトの地質環境データに対し、緩衝材の温度制限に関する、より現実的な設計手法を検討する。

具体的には、2021 年度に整備した TH 連成解析モデルに対して、力学現象も取り扱えるように拡張するとともに、THMC 連成解析に向けた数理モデルの技術的課題を明らかにしながら改良に取り組む。また、2027 年度以降に HotBENT 原位置試験における 175°C の温度まで加熱したベントナイト緩衝材の回収試験が予定されており、この結果を用いて高温域を対象とした THMC 連成解析モデルの妥当性を確認することで、連成解析評価技術の信頼性をさらに高めていく。

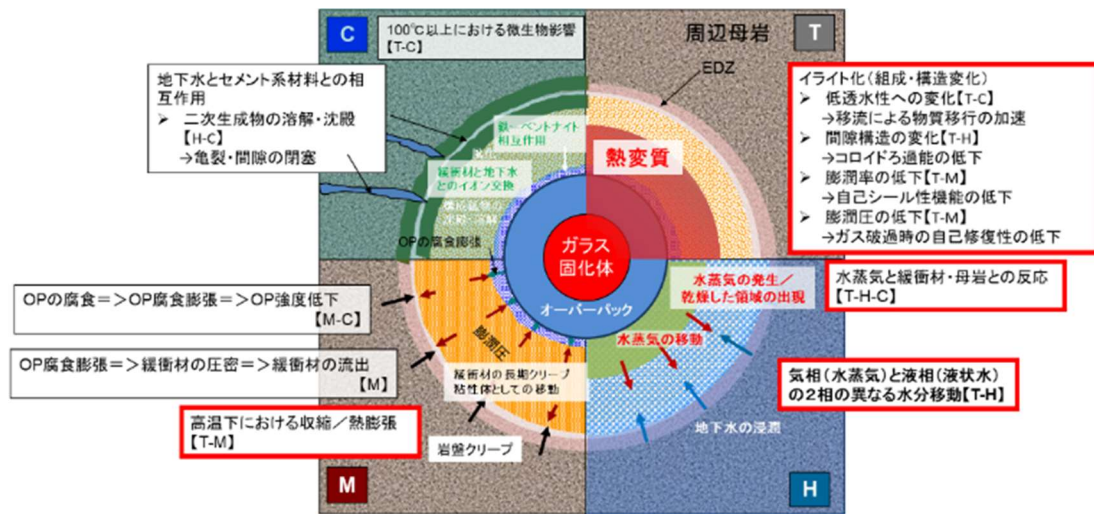


図 1 ニアフィールド再冠水過程で想定される THMC 連成現象 (赤枠内は温度影響が大きいと考えられる現象) (Takubo et al., 2022 を編集)

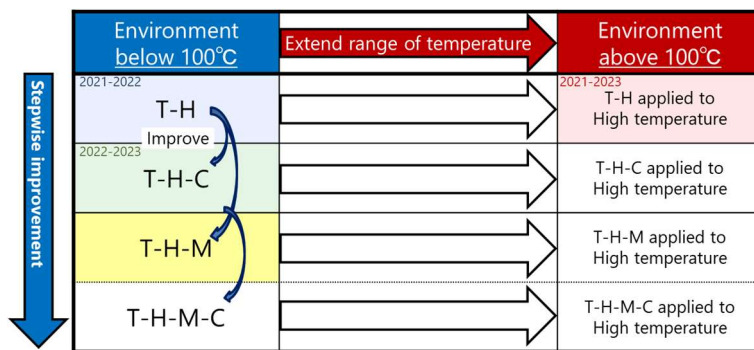
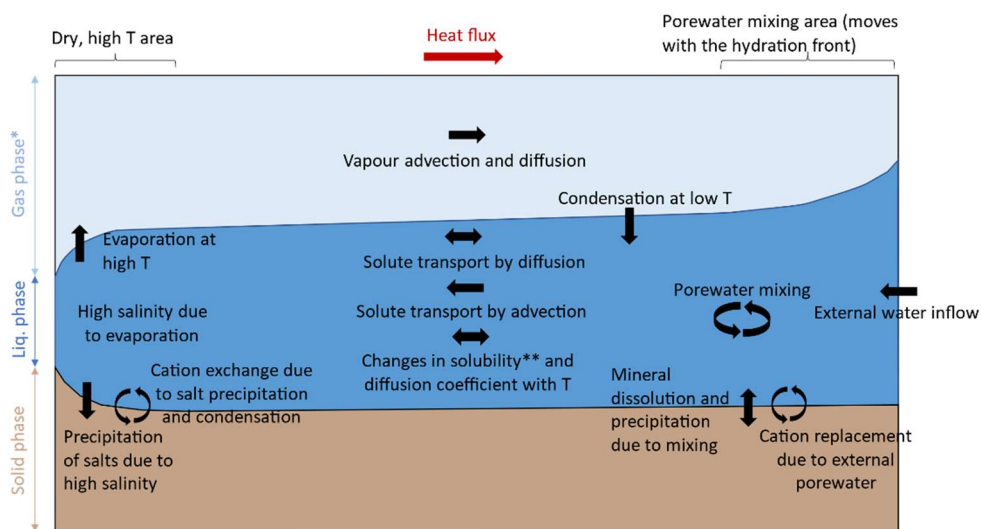


図 2 連成解析モデルの高度化アプローチ (Takubo et al., 2022 を編集)



* Chemically inert, only water and air

** Meaning that the aqueous concentrations in equilibrium with a given mineral change with temperature. As a result, diffusive transport can be triggered due to the thermal gradient.

図 3 THC 連成解析モデルで考慮したプロセスの概念図

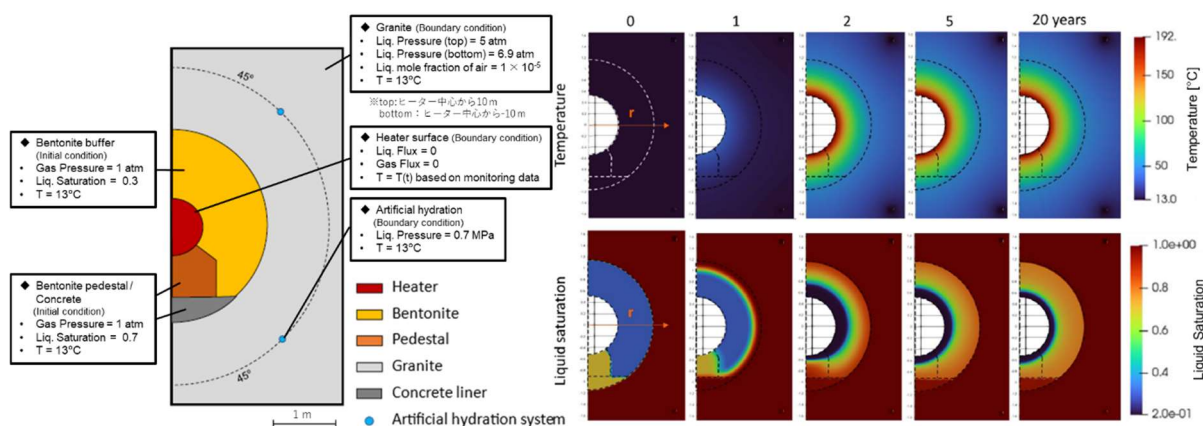


図 4 ヒーター温度 200°C, 注水圧 700 kPa における 20 年後までの温度, 水分飽和度の解析例

参考文献

- JNC(核燃料サイクル開発機構) (1999) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊 2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022.
- 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.
- Leupin, O.X. (ed), Birgersson, M., Kamland, O., Korkeakoski, P., Sellin, P., Mäder, U. and Wersin, P. (2014) : Montmorillonite stability under near field conditions, Nagra Technical Report 14-12.
- Lichtner, P.C., Hammond, G.E., Lu, C., Karra, S., Bishit, G., Andre, B., Mills, R.T., Kumar, J. and Frederick, J.M. (2020) : PFLOTRAN User Manual.
- Nagra : Grimsel Test Site , High Temperature Effects on Bentonite Buffers (HotBENT) - Aims & Objectives, <https://grimsel.com/gts-projects/hotbent-high-temperature-effects-on-bentonite-buffers/hotbent-introduction> (2023年6月7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—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.
- Takubo, Y., Takayama, Y., Idiart, A., Tanaka, T., Ishida, K. and 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.

2.3.8 割れ目ネットワークを対象とした物質移行モデルの妥当性評価

尾上 博則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

処分場の設計及び閉鎖後長期の安全評価では、地下水流動・物質移行モデルを用いた数値シミュレーションが実施されるが、地下水流動評価や物質移行評価の対象となる地質環境は、開放系かつ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限定的なものであるため、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）。こうした割れ目系岩盤の水理学的不均質性をモデル化する方法としては、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で表現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）が提案されている。DFN モデルは、割れ目特性の確率分布から統計的なサンプリングによって、割れ目のネットワーク（これらの一つ一つを、以下、「リアライゼーション」という）をモデル化するものであり、この DFN モデルのような統計モデルの妥当性の確認にあたっては、モデルを用いた数値シミュレーションによって表現される水理特性あるいは物質移行特性と原位置で取得したデータをどのように対比させてこれを行うのか、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、解析結果に影響を及ぼす不確実性因子の抽出やモデルの妥当性確認を行うための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；尾上, 2022；石橋ほか, 2022；尾上ほか, 2022；羽根ほか, 2022）。

2022 年度は、2021 年度に引き続き JAEA の瑞浪超深地層研究所で取得されたデータ（川本ほか, 2014；長谷川ほか, 2015；JAEA・電中研, 2019；尾上・竹内, 2020a；尾上・竹内, 2020b；尾上, 2020；福田ほか, 2020；Onoe et al., 2021）を用いたモデル化・解析を実施し、これまでの検討で整理したモデルの妥当性確認の考え方を試行した。

2. 主な成果

瑞浪超深地層研究所の深度 500 m（標高-300 m 付近）坑道周辺における 100 メートル程度の空間スケールの岩盤を対象に、原位置データやその解釈、モデル構築の条件設定などに含まれる不確実性を考慮した複数のモデル化手順を検討した。そして、その手順に従って複数の DFN モデルを構築し、構築したモデルを用いて地下水流動解析及び

移流分散解析を実施した（図 1）。それらの結果から、湧水量や水圧分布などの原位置での観測値の再現性確認を通じて、モデル化・解析作業に内在する様々な不確実性が解析結果に及ぼす影響について分析した。本技術開発で対象とした事例では、割れ目のコンディショニング（調査で取得した割れ目の幾何学的特性や岩盤中の水理学的な連続性などの情報を用いた割れ目分布の校正作業）の有無によって、数十メートルの長さの坑道への総湧水量の解析結果が大きく異なる（図 2）。したがって、割れ目のコンディショニングに伴う不確実性は、モデル化・解析結果に大きな影響を及ぼすものであり、特に透水性が高い割れ目の幾何学的特性や岩盤中の水理学的な連続性のコンディショニングが重要である。

閉鎖後長期の安全評価にとって重要となる地下水の移行特性は、地下水流動解析及び移流分散解析の結果（湧水量、地下水の水圧及び塩化物イオン濃度）から求められ、こうした解析を実施するためのデータ解釈やモデル作成に関する妥当性が確認されていることが重要である。このため、坑道への総湧水量の再現性が最も高い修正 DFN_A とその基となっている DFN_A の二つのモデルを用いて粒子追跡線解析を実施した。その結果、ばらつきはあるものの坑道への湧水量が多い区間ほど粒子の移行時間が小さいという相関関係が示された（図 3）。このことから、地下水の移行時間と相関性のある区間湧水量を指標として、その妥当性を確認したモデルで推定した地下水の移行時間の信頼性を示すことができると考えられ、坑道の区間湧水量は地下水の移行特性を推定するためのモデルの妥当性確認に有効な指標となる可能性が示唆された。しかし、総湧水量をある程度再現できている修正 DFN_A においても区間毎の湧水量の傾向を再現できているとは言い難い（図 4）。本技術開発では、調査で取得した割れ目の幾何学的特性などをコンディショニングしているものの、その水理特性まではコンディショニングしていないため、実測値との整合性を高めるうえでは、統計モデルである DFN モデルにおける割れ目の水理特性のコンディショニングに必要な調査データを取得する手法とともに、そのデータに基づくモデルのコンディショニング手法を整備する必要がある。

本技術開発を通じて、地下水流動解析によって推定される移行特性に関する指標（例えば、地下水の移行時間）と原位置調査で直接取得することができる指標（例えば、坑道への湧水量）との相関性を明らかにしたうえで、この直接取得することができる指標に対してモデルの妥当性を確認するといった、これまでの検討で整理した考え方が適切であることを確認した。

3. 今後の展開

今後は、性能評価に用いられる地下水流動モデル及び物質移行モデルの構築手法や解析手法の信頼性向上を目的とした国際プロジェクト“SKB Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes (<https://skb.se/taskforce/>)”において設定される課題への取組み（2023 年度から参加）を通じて、割れ目系岩盤の水理学的な不均質性の要因となる割れ目のネットワーク構造のモデル化と、その妥当性確認に関わる検討事例を蓄積するとともに、2022 年度の技術開発で明らかになった課題の解決に向けた検討を進める。さらに、上記の検討を通じて得られた技術的知見に基づき、DFN モデルの構築及び妥当性確認に関わるより実用的な手法や考え方を取りまとめる。

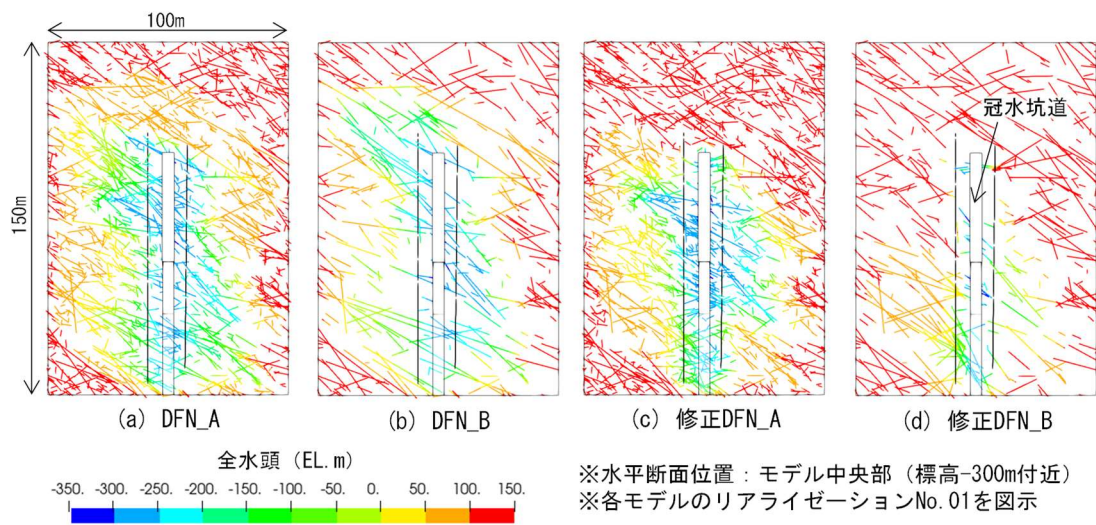


図 1 DFN モデルによる地下水流動解析結果（全水頭分布）

- (a) DFN_A : 全ての割れ目が地下水流動に寄与すると仮定したモデル
- (b) DFN_B : 透水性の高い割れ目のみが地下水流動に寄与すると仮定したモデル
- (c) 修正 DFN_A : DFN_A を用いて全ての割れ目を対象に割れ目の幾何学的特性や割れ目の連結性をコンディショニングしたモデル
- (d) 修正 DFN_B : DFN_B を用いて湧水を伴う割れ目を対象に割れ目の幾何学的特性や割れ目の連結性をコンディショニングしたモデル

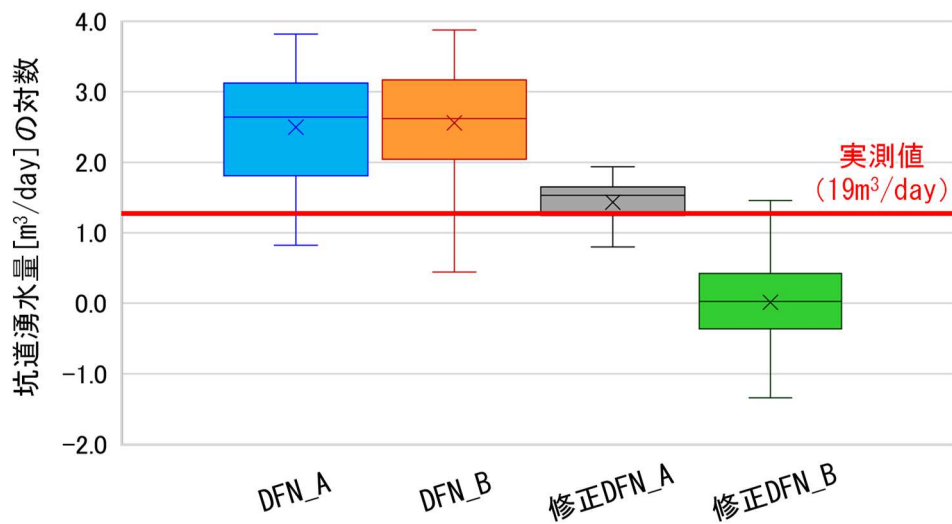
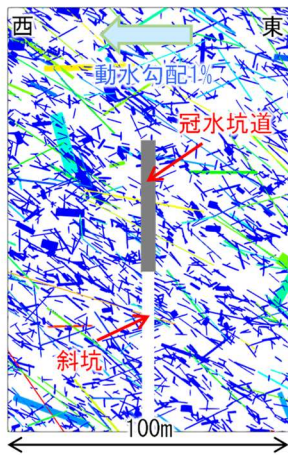
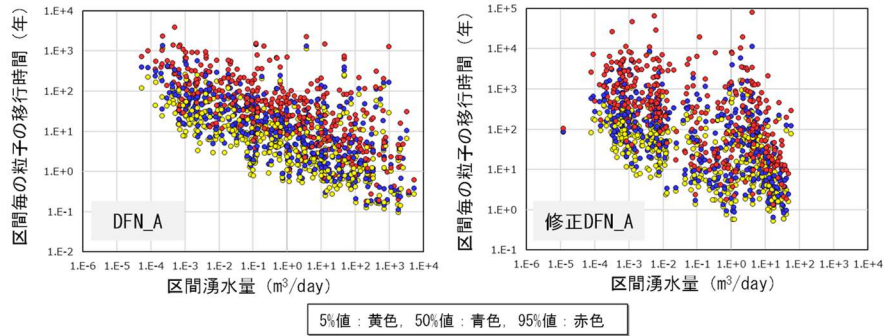


図 2 冠水坑道における総湧水量の推定結果

50 リアライゼーションの解析値を箱ひげ図で表示。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、箱内のバーは 50%値（中央値）を示す。図中の×印は平均値を示す。図に併記した実測値は坑道掘削後の計測値（松岡・濱（2020））を適用



(a) 解析モデル
(水平断面図：標高-300m付近)



(b) 坑道区間ごとの粒子の移行時間と区間湧水量の関係

図 3 DFN モデルによる粒子追跡線解析結果 (DFN_A 及び修正 DFN_A の一例)

- (a) 1つのリアライゼーションの割れ目分布 (割れ目の色は透水量係数を表示 (暖色系：高透水性, 寒色系：低透水性)。冠水坑道部は低透水性を設定した円柱状オブジェクトでモデル化し, 斜坑部は不透水条件とするため空洞でモデル化。東西の境界面には東から西向きに動水勾配が1%となるように固定水頭条件を与え, それ以外の境界面は不透水境界条件を設定。粒子を配置する冠水坑道の円柱オブジェクトは, 約5mで9区間に分割して, それぞれの区間から流量配分法で10,000個の粒子を投入。
- (b) 各区間の湧水量と粒子投入後下流側 (西側) のモデル境界面に到達するまでの移行時間の累積確率密度における5%値, 50%値及び95%値を, リアライゼーション毎にプロット

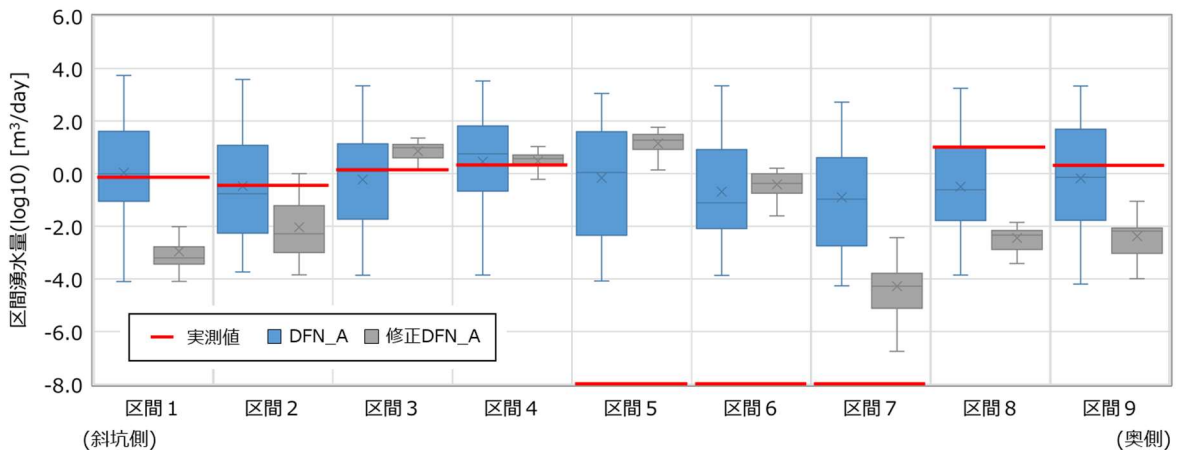


図 4 冠水坑道における区間湧水量の推定結果

冠水坑道を約5mで9分割した各区間の湧水量について, 50リアライゼーションの解析値を箱ひげ図で表示。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, 箱内のバーは50%値 (中央値) を示す。図中の×印は平均値を示す。図に併記した実測値は坑道壁面観察結果に基づき, 各区間に交差する割れ目の湧水量を合計して算出

参考文献

- 福田健二, 渡辺勇輔, 村上裕晃, 天野由記, 青才大介, 原直広 (2020) : 超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究 瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集 (2019年度), JAEA-Data/Code 2020-012.
- 羽根幸司, 尾上博則, 石橋正祐紀, 田部井和人, 並川正, 田川陽一, 三枝博光, 石田圭輔, 藤崎 淳, 澤田 淳 (2022) : 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 (2) 瑞浪超深地層研究所で取得された調査データを用いた検討事例, 日本原子力学会 2022 年秋の大会, C000250.
- 長谷川隆, 川本康司, 山田信人, 大貫賢二, 大森一秋, 竹内竜史, 岩月輝希, 佐藤稔紀 (2015) : 深度 500m 研究アクセス北坑道におけるボーリング調査報告書 (13MI38 号孔~13MI44 号孔), JAEA-Technology 2015-011.
- 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水理パラメータの推定, 令和4年度日本応用地質学会研究発表会, 89.
- JAEA(日本原子力研究開発機構), 電中研(電力中央研究所)(2019) : 平成30年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 (岩盤中地下水流動評価技術高度化開発) .
- 川本康司, 村上裕晃, 石橋正祐紀, 笹尾英嗣, 渡辺和彦, 見掛信一郎, 池田幸喜 (2014) : 超深地層研究所計画 瑞浪超深地層研究所 深度 500m ステージの壁面地質調査データ集, JAEA-Data/Code 2014-014.
- 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.
- 松岡稔幸, 濱克宏 (2020) : 超深地層研究所計画における調査研究 必須の課題に関する研究成果報告書, JAEA-Research 2019-012.
- 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.
- 尾上博則, 竹内竜史 (2020a) : 超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング (2017~2019年度), JAEA-Data/Code 2020-010.
- 尾上博則, 竹内竜史 (2020b) : 超深地層研究所計画における単孔式水理試験結果 (2016年度~2019年度), JAEA-Data/Code 2020-011.
- 尾上博則 (2020) : 超深地層研究所計画 地質構造モデル/水理地質構造モデルの数値データ集, JAEA-Data/Code 2020-016.
- 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, 144, 104737.
- 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> (2023年7月13日閲覧) .
- 尾上博則, 三枝博光, 田中達也, 石田圭輔, 藤崎 淳, 澤田 淳 (2022) : 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 (1) エスポ岩盤研究所で取得された調査データを用いた検討事例, 日本原子力学会 2022 年秋の大会, C000228.

2.3.9 施設設計等を反映した評価のための核種移行解析モデルの改良

石田 圭輔 藤崎 淳 尾上 博則 三枝 博光

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（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。その一環として、包括的技術報告書（NUMO, 2021a）では、ニアフィールドスケール（100m程度四方）を対象とし母岩の特徴とその中に建設した処分場の設計仕様を反映した現実的な核種移行解析モデルを以下のように開発している。

- ① 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（Discrete Fracture Network model：以下、「DFN」という）で表現し、その中に設計仕様即して処分場を設置した三次元モデルを構築
- ② ①で構築した三次元モデルを含む領域を対象として、水理解析コードFEMWATERを利用した地下水流動解析により、三次元モデルの水理場を設定
- ③ ランダムウォーク粒子追跡解析コードPartridgeを利用して、②で与えた水理場に基づき、①で構築した三次元モデルを対象にランダムウォーク粒子追跡解析（以下、「粒子追跡解析」という）を実施し、核種の移行挙動を評価
- ④ 人工バリアの長期的変質に伴うニアフィールド水理特性の変化についても地下水流動・粒子追跡解析へ反映

上記の方法を出発点として、広域スケール（数十km四方以上）までを解析対象領域（図1）とした処分システム全体の時間変遷に対応可能な核種移行解析技術を段階的に整備している。

ニアフィールドスケールから解析対象領域を拡張するための課題の一つである計算負荷低減に対し、地下水流動解析の計算能力向上を目的として米国のサンディア国立研究所など複数の米国国立研究所によって開発された並列計算に特化した公開解析コードPFLOTRAN (Hammond et al., 2014)を導入するとともに、包括的技術報告書で用いたニアフィールドスケールのモデルを拡張し、2018年度から2021年度までの間に、

- ・ 処分パネル内の設計や周辺母岩の割れ目の不均質性を詳細に表現したパネルスケール（数百m四方程度）の三次元モデル
- ・ パネル配置やアクセス坑道の位置などに着目しパネルスケールで詳細に取り扱う処分坑道を簡略化して表現した処分場スケール（数km四方程度）の三次元モデル
- ・ 母岩に含まれる比較的大きな断層¹をクラックテンソル法により等価多孔質媒体モデル（Equivalent Continuum Porous Medium model）（以下、ECPMという）へ変換した広域スケールの三次元モデルを対象に地下水流動解析を実施し、この結果に基づき十分に大きい分散長を設

1 試行では、技術開発成果概要2021（NUMO, 2023）の「2.1.1 四次元地質環境モデルの構築技術の整備に係る検討」で整備した地質環境モデルに示された1km以上、10km以下の断層を対象。

定した粒子追跡解析により放射性核種が移行する可能性を有する母岩領域を選定。選定された領域は DFN で表現し、これ以外の母岩領域のうち割れ目の統計情報がある領域は ECPM で、これら以外の母岩領域や地表近傍の土壌等は多孔質媒体モデル (Continuum Porous Medium model) で表現することにより割れ目ネットワークによる機械的分散の効果を考慮しつつ計算負荷を低減することを可能とした広域スケールの三次元モデル

からなる入れ子モデルを用いた解析技術の整備を進めた。具体的には、各スケールの三次元モデルを対象として、それぞれの境界条件を整合させた PFLOTRAN による地下水流動解析の結果に基づき以下のような粒子追跡解析を実施

- ・ パネルスケールの三次元モデルを対象に地下水流動解析により得られた水理場に基づき廃棄体をソースタームとしてトレーサーが移行し、三次元モデルの端面に達したら、トレーサーの位置座標に合わせて処分場スケールの三次元モデルへ移動
- ・ トレーサーは処分場スケールの水理場に基づき三次元モデルの端面まで移行し、その位置座標に整合するように広域スケールの三次元モデルに移動
- ・ トレーサーは広域スケールの水理場に基づき地表まで移行

2. 主な成果

これまでの成果を受け、2022 年度は海水準変動や隆起・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て、パネルスケール～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するとともに、これを用いた解析の試行を通じて今後取り組むべき課題を明らかにした。この試行では技術開発成果概要 2021 (NUMO, 2023) において「2.1.1 四次元地質環境モデルの構築技術の整備」で整備した深成岩類の四次元地質環境モデルとこれに対して「2.2.10 地下施設レイアウトオプションの検討」で設計した処分場を対象とした。

(1) 海水準変動や隆起・侵食による地質環境の変遷に応じた解析技術の構築

上述したように、人工バリアの変質に伴う水理特性の変化を地下水流動・粒子追跡解析へ反映する方法は、包括的技術報告書において開発している。2022 年度の技術開発では海水準変動と隆起・侵食による地質環境の変遷を反映させた解析技術を整備した。

これらの現象による核種移行挙動への影響としては、海水準変動による汀線の変化や隆起・侵食に伴う地形の変化に伴う水理場や物質移行場の変化が挙げられる。2021 年度までに構築した技術へこれらを反映するためには、隆起・侵食を考慮して地形を変化させた入れ子モデルを十分に短い時間間隔で更新しつつ、汀線の連続的な変化を考慮した境界条件に基づく地下水流動解析 (以下、「非定常解析」という) により水理場を把握し、この水理場の変化と隆起・侵食による処分場の地表への接近を反映したトレーサーの移行を粒子追跡解析で取り扱うことが考えられる。

10 万年以上の長期の評価期間を想定した場合、短い時間間隔での更新に対応するためには膨大な量の入れ子モデルを準備する必要があることや、更新した入れ子モデル毎に汀線を連続的に変化させた非定常解析を行うには時間を要することから、これらの合理的な取り扱い方法の開発が重要である。このため、本技術開発においては、海水準変動に伴う汀線の変化傾向が変わる時期を考慮して入れ子モデルを更新すること、また、汀線の位置を定期的に更新し、更新までの間は汀線の位置を固定した境界条件で地下水流動解析を行うことで、水理場の変化を取り扱い、これにより得られた水理場に侵食を考慮して物質移動解析を行うという方法を適用した。入れ子モデルや汀線の更

新頻度の妥当性の確認は、今後の課題である。

① 水理場の変化への対応（括弧内は解析の試行のための条件設定）

- ・ 処分場閉鎖後の海水準変動の周期的な更新（海退期（8 万年²）と海進期（2 万年³）の切替時期に更新）とそれに応じた侵食量を反映した入れ子モデルを作成
- ・ 海水準変動を反映して、定期的に汀線の位置を更新（1 万年ごとに海水準変動による汀線の位置の変化を考慮した解析を実施）
- ・ 上記の更新を継続して、地下水流動解析を実施（100 万年までを対象）

② 物質移行の場の変化への対応（括弧内は解析の試行のための条件設定）

- ・ 入れ子モデルを更新するまでの解析：①で設定された水理場に基づいた粒子追跡解析を行い、解析により得られたトレーサーの座標に隆起量分（侵食量：0.3 m/1,000 年³）だけ鉛直上方向に移動させた値をトレーサーの真の座標として出力
- ・ 入れ子モデルの更新時：トレーサーを更新前の入れ子モデルから更新後の入れ子モデルへ移動させる際、更新前の入れ子モデルにおける真の座標と同一の座標へ移動
- ・ ①で設定された水理場の変化に、上述したトレーサーの位置変化を反映した粒子追跡解析を実施（100 万年まで）

(2) 試行を通じた課題抽出

2021 年度までに整備したパネルスケール～広域スケールの入れ子モデルを構築する技術と、処分システムの時間変遷を反映するための技術（(1) 参照）を利用して、パネルスケールから広域スケールまでの核種移行解析モデルを構築し、TRU 等廃棄物グループ 1 を対象として、I-129 の物質移行特性を有するトレーサーを用いた粒子追跡解析を実施した（図 2）。この試行を通じて実用性の観点から、次のような課題が挙げられた。サイトにおける地質環境の空間的・時間的な不確実性の考慮や設計オプションの比較を目的として、多数の異なる入れ子モデルにおいて廃棄体全てを対象とした解析を行うことは、計算負荷の観点から現実的ではない。このことから、本技術を活用しつつ計算負荷を低減し作業効率を向上することが可能な補完的技術の整備が必要である。加えて、本技術により出力されるデータの量は膨大なことから、これらを人間が直接判読して安全評価や設計最適化の観点で有用な情報として整理することは現実的ではない。このため、このような膨大な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ことが可能な処理技術が必要である。

3. 今後の展開

2.(1)に示した入れ子モデルや汀線の更新頻度の妥当性の確認に向け、今年度と同じ解析対象に対して入れ子モデルの更新頻度を増やし、非定常解析を行うことによって、これに基づく粒子追跡解析の結果と今年度に行った試行の結果とを比較する。また、実用性に関する課題に対しては、少量の核種移行解析結果（少数の廃棄体を対象とする解析など）を教師データとして機械学習し、処分場全体の解析結果を予測評価するための技術や、多数の解析結果を類似した属性を有するグループに分類し、グループ間の特徴を分析するために有用な教師データなしの機械学習の手法を用いた分析技術の整

2 小池・町田（編）（2001）の文献をもとに設定

3 日本全国を対象とした隆起速度の分布（NUMO, 2021b）において最も頻度が高い0～0.3 m/1,000 年を踏まえて隆起速度が最も大きくなる0.3 m/1,000 年を設定。侵食量は隆起=侵食と設定。

備を進める。

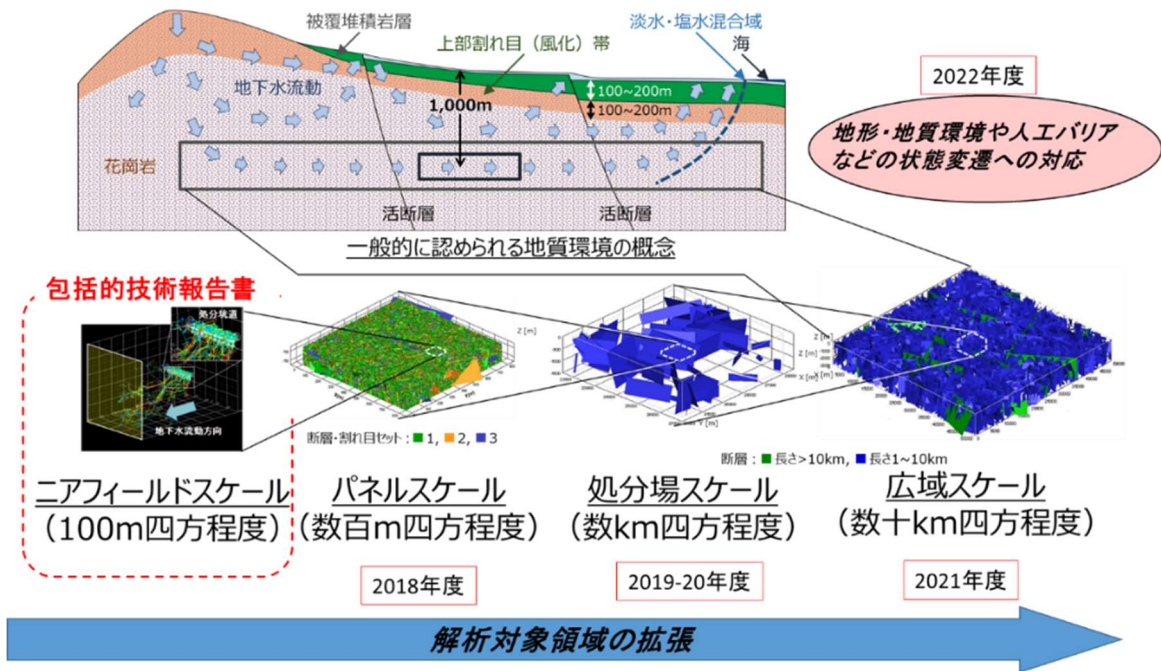


図 1 核種移行挙動評価技術の整備の考え方

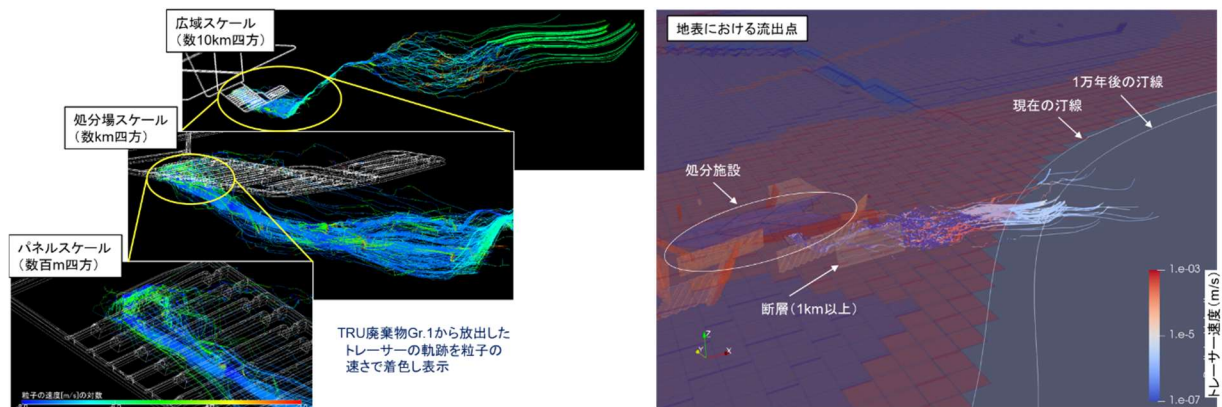


図 2 粒子追跡解析の結果

参考文献

Hammond, E.G., Lichtner, C. P. and Mills, T.R. (2014) : Evaluating the performance of parallel subsurface simulators: An illustrative example with PFLOTRAN, Water Resources Research, Vol.50, pp.208-228, doi: 10.1002/2012WR013483.

小池一之, 町田洋(編)(2001) : 日本の海成段丘アトラス, 東京大学出版会.

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—, 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 6-10 隆起・侵食の影響に係る検討, 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.

2.3.10 地下水流動場の広域的变化を反映した粒子追跡解析コード Partridge の改良

田窪 勇作 石田 圭輔

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

処分場閉鎖後の安全評価では、地層処分システムの長期間における熱環境、水理場、力学場、化学場の状態の変化とそれに応じて安全機能がどのように発揮されるかを考慮して廃棄体から生活圏までの核種の移行挙動（移行経路や移行時間、生活圏への核種の流出点）を解析する。水理場の状態については、対象とする時間スケール（10 万年以上）において、隆起・侵食に伴う地形変化や海水準変動による汀線の変化などの影響を定量的に把握したうえで、これを適切に反映して核種移行を行うことが必要である。

そのため NUMO では、「2.3.9 施設設計等を反映した評価のための核種移行解析モデルの改良」に示したように、包括的技術報告書（NUMO, 2021）で開発したニアフィールドスケール（100m×100m×100m 程度の空間領域）を対象とした母岩の特徴とそこに含まれる処分場の設計仕様を反映した現実的な核種移行解析モデルを出発点として、地形変化等に応じた水理場の時間変遷を反映して廃棄体から生活圏までの核種の移行挙動の評価を行うための技術を段階的に整備している（2.3.9 図 1）。これまで広域スケール（数 10km×数 10km×数 10km 以上の空間領域）を対象に隆起・侵食による一定期間ごとの地形変化を考慮した時間断面毎の水理地質構造モデルを作成し、水理場の時間変遷を解析する技術を ConnectFlow（Jacobs, 2021）を利用して進めてきた。また、包括的技術報告書における核種の移行挙動評価に使用したランダムウォーク粒子追跡解析コード Partridge について、解析対象領域を拡張するための改良を進め、広域スケールを対象とした粒子追跡解析を行える見通しを得た。以上の整備状況を踏まえ、2022 年度は ConnectFlow による時間変遷を考慮した地下水流動解析結果を反映した粒子追跡解析を実施できるように、ConnectFlow で構築した時間断面毎の水理地質構造モデル及びそれらのモデルを用いた地下水流動解析結果の数値データを、Partridge の入力データ形式に自動的に変換し処理するインターフェースを Partridge に追加する改良を行った。

2. 主な成果

(1) インターフェースの作成

ConnectFlow で取り扱う時間変遷する水理地質構造モデルのデータ及び地下水流動解析結果のデータを Partridge の入力データとして変換し、粒子追跡解析を実行する際の解析フローを図 1 に示す。ConnectFlow による時間変遷を考慮した地下水流動解析は次のように実施している。

- a. 処分場を設置する母岩部分に対して、断層の幾何学的・水理学的な分布特性から確率論的に三次元の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）を作成
- b. 隆起・侵食による長期的な地形変化の情報に基づき、地形及び地質・地質構造の分布を一定期間で変化させることで構築した代表時間断面ごとの広域スケールの三次元の地質構造モデル¹を非構造格子で分割したモデル（以下、「非構造格子モデル」という）を作成

¹ 断層や岩相層序区分に基づく、地層・岩体の空間分布などを表現したモデル

- c. 非構造格子モデルのうち母岩部分については、DFN モデルをクラックテンソル法により等価連続多孔質媒体モデル (Equivalent Continuum Porous Medium model : 以下、「ECPM モデル」という) へ変換し、その他の部分については対象とする空間領域に含まれる地層や決定論的な断層をそれぞれ連続多孔質媒体として水理特性を付与した水理地質構造モデルを作成し、水理地質構造モデルを対象に地下水流動解析を実施

上記の手順で得られる水理地質構造モデル及び地下水流動解析の結果を用いて、Partridge により粒子追跡解析を実施するためには次に示す機能が必要となる。本技術開発ではこれらを可能とする機能をもつインターフェースを Partridge に実装した。

- ・ DFN モデルの情報を Partridge で読み込めるようにデータ変換する必要がある。DFN モデルにおける確率論的な断層は、ConnectFlow では各頂点の座標で定義される四角形でモデル化され、Partridge では中心座標と半径で定義される円盤でモデル化される。このため、ConnectFlow で構築した DFN モデルの断層の位置や大きさ、走向・傾斜だけではなく透水性が等価となるよう、Partridge の粒子追跡解析で用いる DFN モデルへ変換する機能が必要である (機能①)。
- ・ Partridge で対象とする三次元モデルは構造格子で分割されたモデル (以下、「構造格子モデル」という) であるため、ConnectFlow で構築した非構造格子モデルを、幾何学形状が整合するよう Partridge で適用する構造格子モデルへ変換する機能が必要である (図 2) (機能②)。
- ・ ConnectFlow を用いた地下水流動解析で得られた非構造格子の節点の水頭情報を Partridge が取り扱う構造格子の節点へ割り付ける機能が必要である (機能③)。
- ・ ①～③に示した変換から粒子追跡解析までを自動的に処理する機能が必要である (機能④)。

(2) インターフェースの検証

深成岩類を母岩とする仮想地域を対象として、2021 年度に構築した時間変遷を考慮可能な地質環境モデル (NUMO, 2023 ; 尾上, 2022) を用いて、機能①～④の検証を行った。

機能①については、地下水流動解析に利用した DFN モデルを検証用データとして、断層の幾何学的情報が適切に変換されていることを変換前後の断層の座標データによって確認した。また、断層の水理学的情報については変換前後において透水量係数が等価な値となっていることを確認した。

機能②については、非構造格子モデルから構造格子モデルへの変換を行い、各要素領域の境界が変換前後で整合的であることを格子の地質特性に応じて色分けして可視化した水平方向の断面図から確認した (図 3)。

機能③については、水理場データが ConnectFlow で取り扱う非構造格子モデルの節点上から、Partridge における構造格子モデルの節点上へと適切に変換されていることを、水理データ変換前後の水頭値から導出される動水勾配や圧力水頭の分布の比較により確認した (図 4)。

機能④については、解析開始から 1 万年経過後に変化する水理地質構造モデルを対象に、機能①～③により ConnectFlow により得られた地下水流動解析結果を反映した Partridge による粒子追跡解析を実施し、時間変遷の設定に応じて Partridge の解析対象とするモデルが切り替えられていることをログファイルから確認した。また、前の時間断面から次の時間断面へ粒子の位置を引き継ぐことで時間変遷を考慮した粒子軌跡及び粒子の最終位置の解析結果が出力されていることを粒子

座標の出力情報から確認した。

3. 今後の展開

改良した Partridge を用いた水理場が時間変遷する三次元モデルの粒子追跡解析技術は、今後さらに種々の解析対象に対する適用実績を積み重ね、解析手法としての信頼性を確認したうえで、地下深部から地質圏—生活圏インターフェース（Geosphere-Biosphere Interface : 以下、「GBI」という）までの地質環境特性の状態変遷や GBI の時間変化を一体的に考慮した安全評価に活用する。

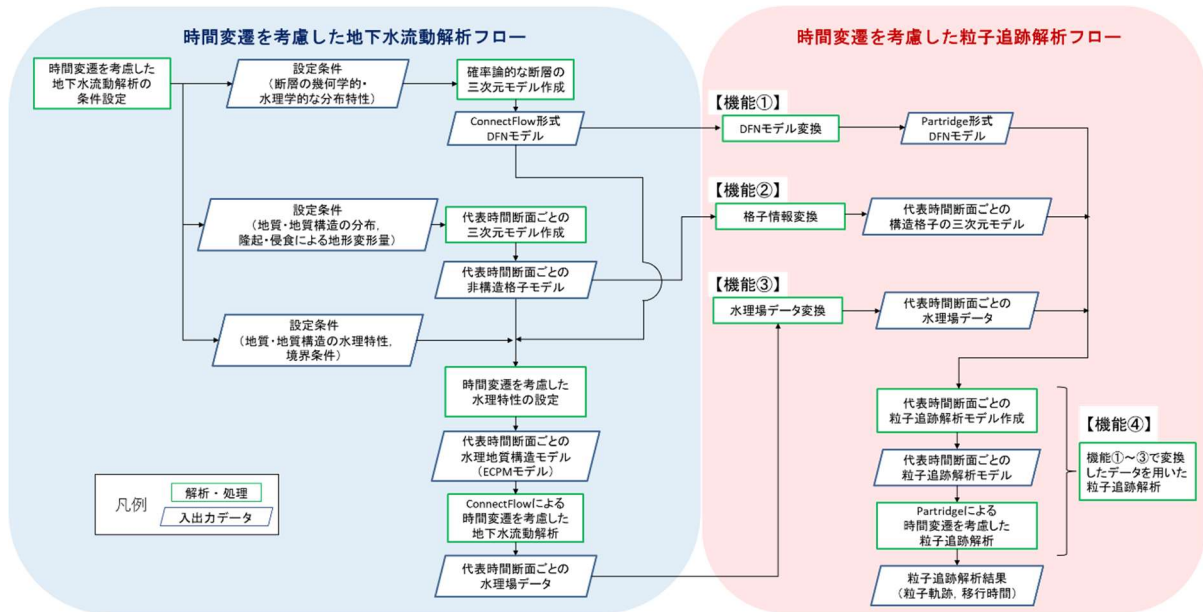


図 1 解析フロー

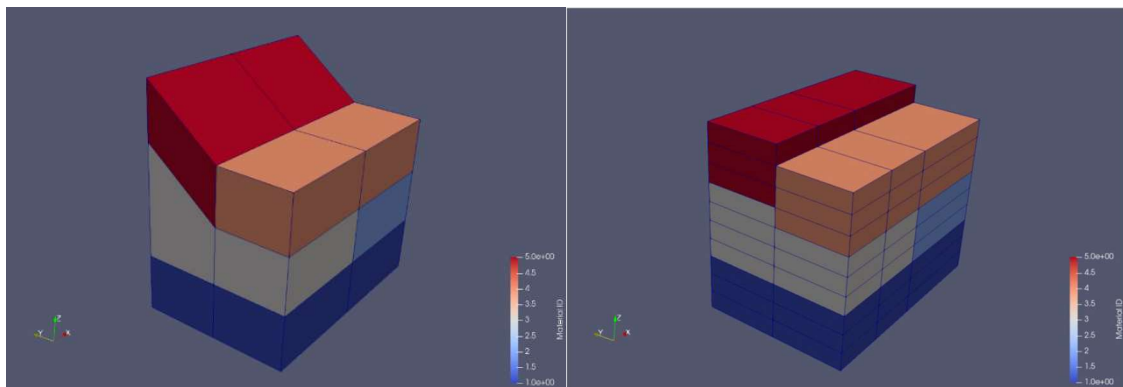


図 2 簡易的な水理地質構造モデル

(左 : ConnectFlow の非構造格子モデル, 右 : Partridge の構造格子モデル, 特性が異なる要素領域ごとに色分けして表示)

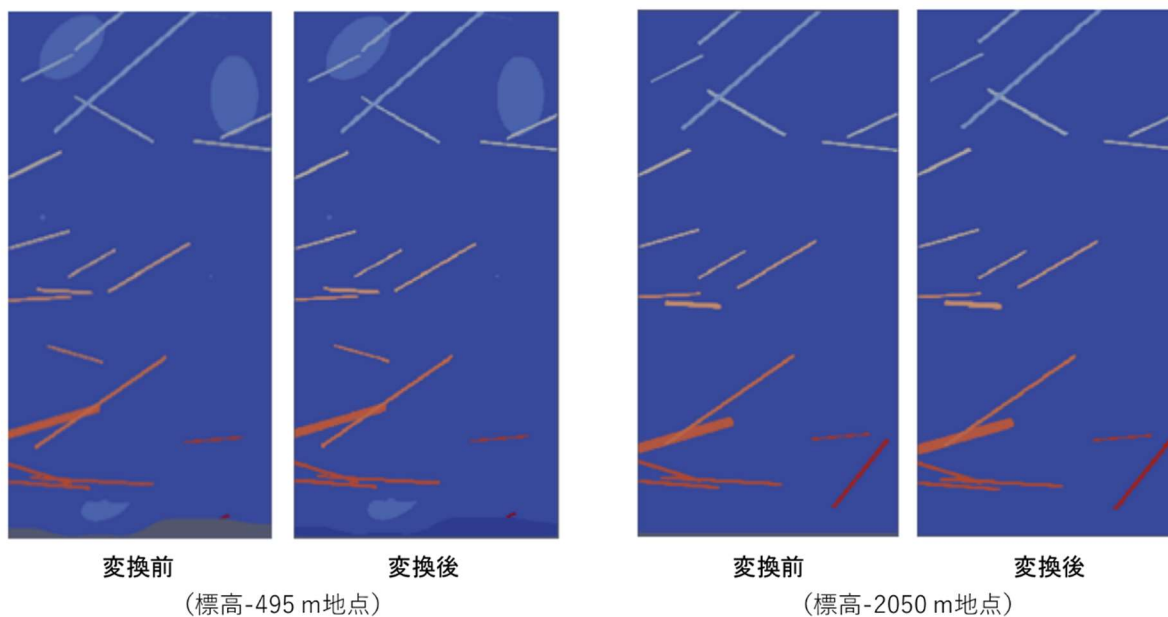


図 3 格子情報変換例
(特性が異なる要素領域ごとに色分けして表示)

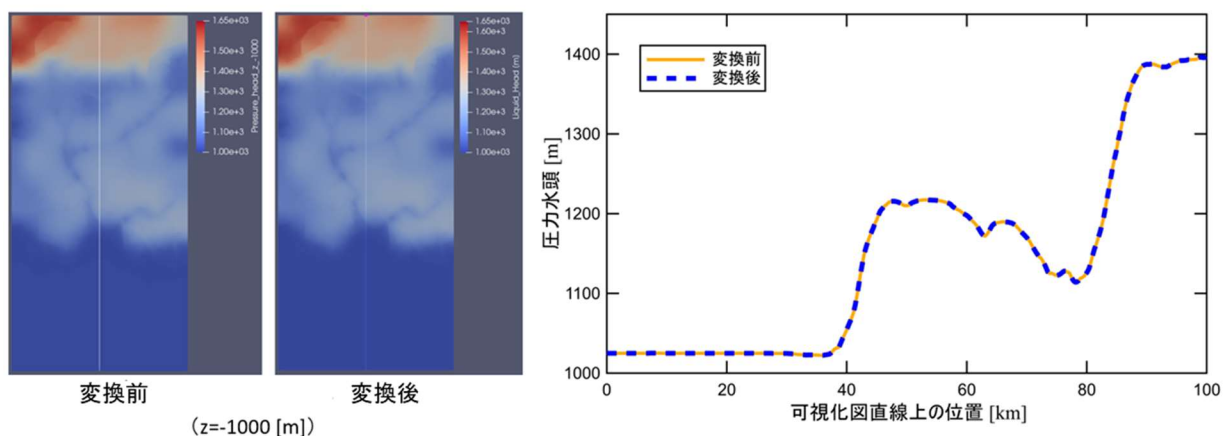


図 4 圧力水頭分布（時間経過 0 年（初期），深度 1,000 m 地点）のデータ変換の比較検証結果例
(グラフは圧力水頭分布図の中央白線上の圧力水頭値を比較したもの)

参考文献

Jacobs (2021) : ConnectFlow Technical Summary Version 12.3.

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.

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.

2.3.11 セメント系材料成分による坑道近傍の母岩割れ目の閉塞に伴う 水理場・化学場の変化を反映した核種移行評価技術の整備

石田 圭輔 田窪 勇作 藤崎 淳

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) の安全評価では、母岩の割れ目や処分場の設計仕様を忠実に反映して核種移行解析を行うために、三次元ランダムウォーク粒子追跡解析 (以下、「粒子追跡解析」という) コード Partridge を適用している。Partridge では、処分場から溶出した放射性核種が母岩中の割れ目に沿って移流・分散し、母岩基質部へ拡散・収着しながら移行するとして核種の母岩中の移行をモデル化している。処分坑道近傍の母岩の割れ目については、支保工等を使用されるセメント系材料から溶脱した成分 (以下、「溶脱成分」という) と地下水との化学反応で生成するカルサイトの沈殿等により閉塞する可能性や地下水組成が変化する可能性 (JAEA, 2015) が示唆されているものの、これまでは、割れ目の閉塞は処分坑道から母岩への核種移行率を低減させるものとして、安全評価上の保守主義の立場から粒子追跡解析を行ううえでは考慮していなかった。しかしながら、一部の割れ目の閉塞により閉塞しない割れ目の流速が増大し、この割れ目へ核種や溶脱成分が集中して移行する可能性や、地下水組成の変化や母岩の変質等により核種の母岩基質部への拡散が阻害される可能性も考えられる。これによって、安全機能 (「遅い地下水流速による放射性物質の移行の抑制」と「放射性物質の分散」) の性能が低下し、母岩中の核種の移行率が増大する可能性が考えられる。本取組みでは、溶脱成分による母岩の割れ目閉塞に伴う母岩中の水理場と化学場の変化に伴うトレーサーの物質移行特性の変化を反映した核種移行挙動を評価する技術を整備する。

これまでに、包括的技術報告書で示した高レベル放射性廃棄物処分場 (横置き・PEM 方式) を対象とした試行を通じて、以下のような評価技術を整備した。

- ① 処分坑道を連続多孔質媒体モデル、母岩を割れ目ネットワークモデル (Discrete Fracture Network Model : 以下、「DFN」という) で表現したニアフィールドスケール (100m×100m×100m 程度の空間領域) の三次元モデル (以下、「NF モデル」という) を作成
- ② NF モデルの母岩部分についてクラックテンソル法を用いて等価連続多孔質媒体モデル (Equivalent Continuum Porous Medium model : 以下、「ECPM」という) へ変換し、これを対象として解析コード FEMWATER (Lin et al, 2001) を用いた地下水流動解析を実施
- ③ 解析結果に基づき、処分坑道に交差する母岩割れ目 (以下、「交差割れ目」という) の中で支保工から流入する地下水が確認されたものを、溶脱成分が流入する交差割れ目として抽出
- ④ あらかじめ割れ目の開口幅と割れ目中の地下水の実流速を変数として、解析コード QPAC (Quintessa, 2012) による単一割れ目を対象とした反応輸送解析を多数実施して設定した割れ目が閉塞する条件に基づき、③で抽出した交差割れ目の閉塞の可能性を評価
- ⑤ 閉塞すると評価された交差割れ目が低透水性の充填物で満たされると仮定して更新した NF モデルを対象とする地下水流動解析 (FEMWATER を使用) を行い、水理場の変化を把握
- ⑥ NF モデルの処分坑道から解析領域の境界までの規模を有する交差割れ目を仮定して、これを対象に溶脱成分による地下水の化学組成 (例えば、イオン強度) の観点から、閉鎖後長期の評

価対象核種（例えば、Cs-135）の収着特性が有意に変化する処分坑道からの距離を、QPACによる反応輸送解析で把握

- ⑦ 更新したNFモデルを対象として、手順⑤と手順⑥で把握した水理場と化学場に基づき、非収着性または収着性トレーサーを用いた粒子追跡解析を実施

上記手法では、実現象と比較して保守的な設定としている手順がある。合理的な保守主義に基づく安全評価を行うためには、保守的な設定をより確からしいものとするのが重要である。特に対応すべき保守性に関する課題として、下記に示す2つが抽出された。

- ・ 手順④における割れ目の閉塞の可能性評価において、溶脱成分による交差割れ目の閉塞への影響を保守的に取り扱うため、交差割れ目へセメント平衡水と同濃度の溶脱成分を含む地下水が絶えず流入すると設定。より確からしい評価のためには、支保工等に使用されるセメント系材料中の溶脱成分の減少を考慮して交差割れ目に流入する地下水の組成等を設定することが必要（課題1）
- ・ 手順⑥における化学場の評価において、溶脱成分による影響範囲を保守的に取り扱うため、交差割れ目と連結している他の割れ目から、溶脱成分を含まない地下水が交差割れ目へ流入することはないと設定。より確からしい評価のためには、溶脱成分を含まない地下水による溶脱成分の影響緩和の考慮が必要（課題2）

2. 主な成果

2022年度は包括的技術報告書で示した深成岩類と新第三紀堆積岩類における高レベル放射性廃棄物処分場（横置き・PEM方式）、及びTRU等廃棄物の中で緩衝材を設置していないことからセメント系材料の影響がより明瞭に表れると推定されるTRU等廃棄物グループ3の処分場を対象とした試行を通じて、2021年度に明らかとなった課題に対応した解析技術の整備を進めた。ここでは、新第三紀堆積岩類の高レベル放射性廃棄物処分場を対象とした試行の結果を例示して、新たに整備した解析技術について述べる。

(1) セメント系材料の溶脱成分の減少への対応

課題1に対応するため、手順③に対して、処分坑道内における溶脱成分の残存状態を評価し、交差割れ目へ流入する溶脱成分を含む地下水の組成等を設定する方法を整備した。まず、NFモデルをECPMへ変換する際に、交差割れ目について位置や形状を表現できるよう処分坑道近傍を細かく要素分割し、処分坑道と交差割れ目を含む領域を切り出したモデル（図1：以下、「処分坑道モデル」という）を準備する。これを対象として、あらかじめ実施したNFモデルを対象とする地下水流動解析の結果に基づき水理境界条件を設定したうえで反応輸送解析を行い、この結果から得られた支保工の間隙水のpH変化や溶脱成分残存量の変化等から交差割れ目へ流入する溶脱成分を含む地下水の組成変化を評価する（図2参照）。ここでは、ECPMの詳細度に対して必要となる解析時間を考慮し、米国のサンディア国立研究所等、複数の米国国立研究所によって開発された並列計算に特化した公開解析コードPFLOTRAN（Hammond et al., 2014）を用いた。さらに、個々の交差割れ目の特徴を割れ目の閉塞評価へより確かなものとして反映するため、手順④について、個々の交差割れ目に対し、溶脱成分を含む地下水の流入速度と組成変化を入力値としてQPACを用いた

反応輸送解析により閉塞評価を行うこととした。この評価結果に基づき更新した処分坑道モデルを対象に上記の手順を繰り返すことで、処分坑道における溶脱成分の減少を考慮したうえで、交差割れ目へ流入する地下水の組成変化を評価へ反映することを可能とした（図 3 参照）。

(2) 地下水による溶脱成分の影響の緩和への対応

課題 2 へ対応するため、手順⑥に対して、NF モデルの割れ目の不均質性を反映しつつ、溶脱成分の移流・分散や拡散といった物質移行プロセスと、溶脱成分と地下水や母岩基質部との化学反応プロセスを取り扱うことが可能な反応輸送解析技術を整備した。

具体的には、(1) の作業で更新した NF モデルから三次元の連続多孔質媒体モデルを構築し、これを対象とした計算負荷が高い反応輸送解析に対応可能な PFLOTTRAN を用いた解析により化学場を評価する。2021 年度に実施した単一割れ目を対象とした反応輸送解析から上記の化学反応プロセスは主として割れ目近傍で生じると想定された。このため、地下水流動解析と同様に NF モデルの母岩部分を要素分割し、クラックテンソル法を用いて DFN から変換した三次元の連続多孔質媒体モデルを反応輸送解析に用いると、要素において溶脱成分と接しない母岩基質部も化学反応する解析となる。これを解消するために、化学反応に寄与する母岩基質部のみを取り扱うことが可能な三次元の連続多孔質媒体モデルを構築することとした。

図 4 に示すような、単一割れ目と母岩基質部を異なる連続多孔質媒体で表現した二重空隙媒体モデルと同一の連続多孔質媒体のみで表現されたモデルを対象として、割れ目の開口幅や動水勾配、マトリクス拡散深さ、連続多孔質媒体モデルの間隙率を対象とした感度解析を実施し、化学反応に伴う地下水の pH 変化の観点から二重空隙媒体モデルと等価となる連続多孔質媒体モデルの間隙率を評価する。この結果に基づき、割れ目が含まれる要素に対しては評価結果に基づく間隙率（新第三紀堆積岩類：0.02%）を、割れ目が含まれない要素に対しては母岩基質の間隙率（新第三紀堆積岩類：25%）を設定した三次元の連続多孔質媒体モデル（以下、「NF 化学モデル」という）を構築する。次に、これを対象とした反応輸送解析（図 5 参照）に際しては、化学場の境界条件として

(1) の評価で得られた時間変遷する溶脱成分を含む地下水の組成を処分坑道壁面に、溶脱成分を含まない地下水の組成を NF 化学モデルの端面に設定する。また、NF 化学モデルは、交差割れ目の閉塞を反映した NF モデルに基づき作成していることから、沈殿による間隙率の低下は考慮しないこととした。これらの解析技術により、溶脱成分による化学場への影響の範囲と変化をより確からしく評価することが可能となった。

(3) 母岩の割れ目の閉塞評価と閉塞に伴う水理場・化学場の変化を反映した粒子追跡解析技術

(1) と (2) で構築した技術を適用し、2021 年度に整備した技術を下記のように改良した。

- ① 処分坑道を連続多孔質媒体モデル、母岩を DFN で表現した NF モデルを作成
- ② NF モデルの母岩部分についてクラックテンソル法を用いて ECPM へ変換し、これを対象として地下水流動解析を実施。手順③以降で用いる三次元モデルの詳細度を考慮し、2021 年度に使用した FEMWATER に代えて PFLOTTRAN を利用
- ③ 処分坑道モデルを対象として、手順②で得られた結果に基づき設定した水理場の境界条件で PFLOTTRAN による反応輸送解析を実施し、溶脱成分を含む地下水が流入する交差割れ目を抽出するとともに、地下水の流入速度と組成の時間変化を設定

- ④ 手順③で設定した地下水の流入速度と組成を入力として、個々の割れ目に対する反応輸送解析をQPACで行い、交差割れ目の閉塞の可能性を評価
- ⑤ 閉塞すると評価された割れ目が低透水性の充填物で満たされると仮定して更新したNFモデルを対象とした地下水流動解析結果に基づき水理場の変化を評価
- ⑥ 更新したNFモデルに基づいて構築したNF化学モデルを対象とし、手順③の評価で得られた時間変遷する溶脱成分を含む地下水の組成を処分坑道壁面に、溶脱成分を含まない地下水の組成をNF化学モデルの端面に設定した反応輸送解析を実施
- ⑦ 更新したNFモデルを対象として、手順⑤と手順⑥で把握した水理場と化学場に基づき、非収着性または収着性トレーサーを用いた粒子追跡解析を実施

(4) 試行を通じた課題抽出

上記(3)に挙げた手順のうち、手順④で行う個々の交差割れ目に対する解析では、作成するインプットファイルや整理すべき出力データが多いことから、解析体系が大きくなった場合や多数の解析ケースを対象とする場合、手順④で示した方法は現実的ではない。このため、本技術を活用しつつ計算負荷を低減し作業効率を向上することが可能な補完的技術の整備が必要である。手順⑥について、(2)で示した方法では、割れ目の形状や位置、方向等を明示的に取り扱うことができない。より確からしい評価を行うためには、NFモデルにおける割れ目の情報を直接取り扱い、反応輸送解析を行うことが可能な技術を整備することが必要である。

3. 今後の展開

上記課題に対し、少量の解析結果（交差割れ目の形状や流入する溶脱成分の組成等を変えた複数の反応輸送解析）を教師データとして機械学習し、割れ目の閉塞を評価する技術の整備を行う。また、NFモデルを対象として、割れ目の形状や位置、方向の情報を損なわずに反応輸送解析を行う技術の構築を行う。

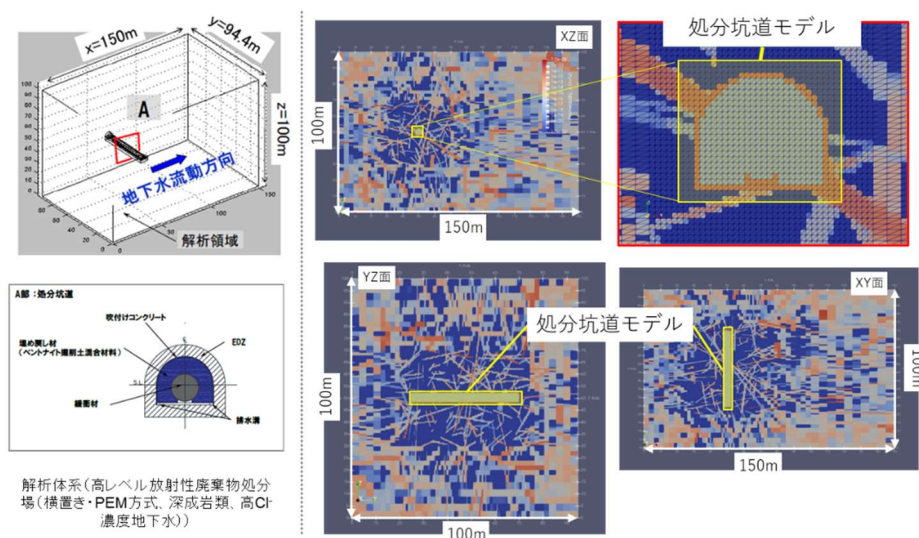
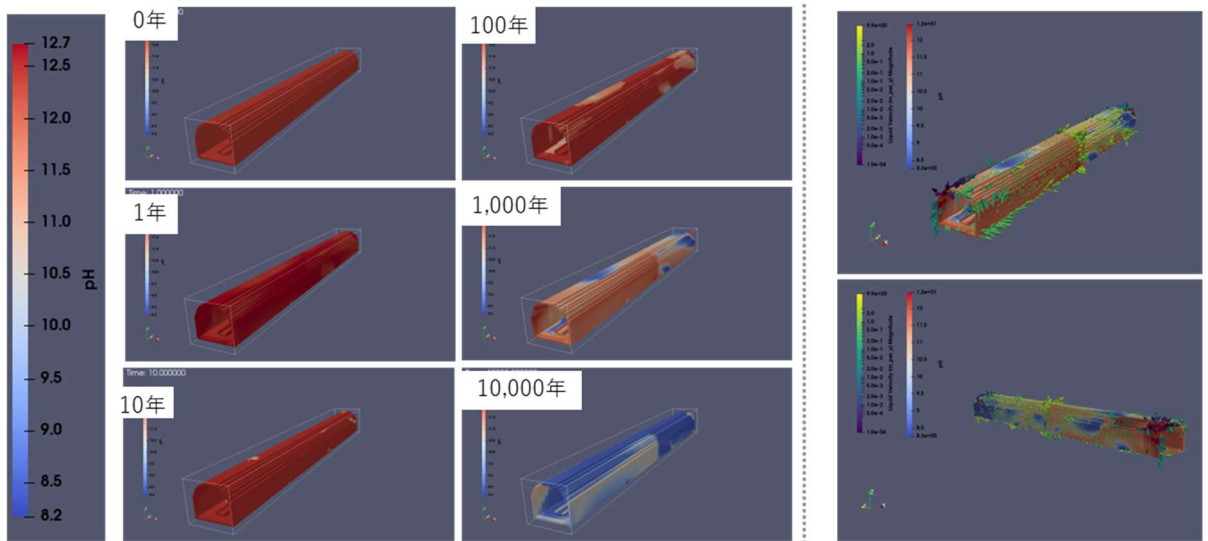


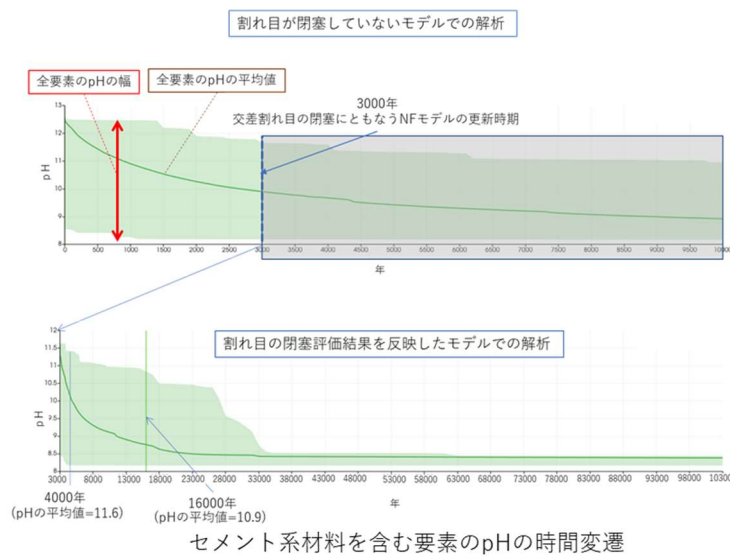
図1 処分坑道モデルの切り出し方



セメント系材料を含む要素のpH変遷

10,000年時点の支保工上のpH分布と地下水流動場（上図：坑道下流側から見た図、下図：坑道上流側から見た図）

図 2 支保工の間隙水の pH 変遷



セメント系材料を含む要素のpHの時間変遷

期間	溶存成分
0～4,000年	Region I
4,000年～16,000年	Region III-A
16,000年～	Region III-B

セメント系材料を含む要素のpHの時間変遷を踏まえた、交差割れ目へ流入する溶存成分とNF化学モデルの境界条件に用いる溶存成分の組成

図 3 支保工の pH の変遷に基づく割れ目へ流入する溶脱成分と NF 化学モデルの境界条件に用いる溶存成分の組成

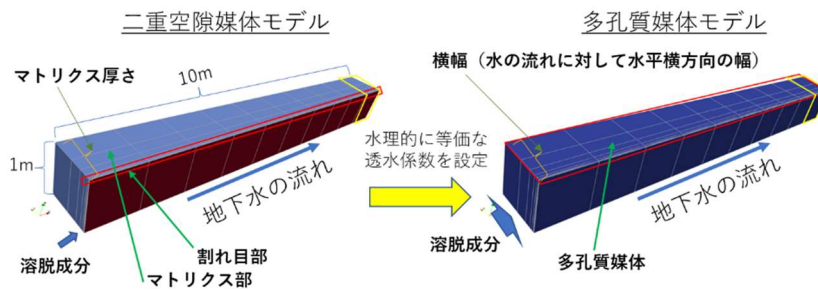


図 4 多孔質媒体の間隙率設定を目的とした感度解析の解析体系

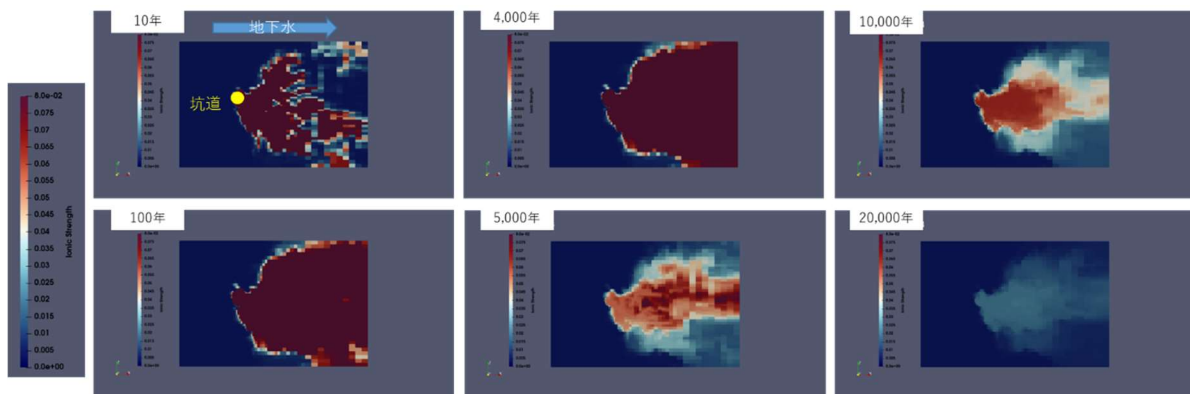


図 5 NF 化学モデルを対象とした解析結果 (イオン強度)

参考文献

- Hammond, E.G., Lichtner, C.P. and Mills, T.R. (2014) : Evaluating the performance of parallel subsurface simulators: An illustrative example with PFLOTRAN, Water Resources Research, Vol.50, pp.208-228, doi: 10.1002/2012WR013483.
- JAEA(日本原子力研究開発機構) (2015) : 平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 セメント材料影響評価技術高度化開発-4 ヶ年研究成果の取りまとめ-
- Lin, H.C., Richards, D.R., Talbot C. A., Yeh, G.T., Cheng, G.R., Cheng, H.P. and Jones, N.L. (2001) : FEMWATER: Three-Dimensional Finite Element Computer Model for Simulating Density-dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media. Vol.3.0 Reference Manual, p.587.
- 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.
- Quintessa (2012) : QPAC: Quintessa's General-Purpose Modelling Software, QRS-QPAC-11.

2.3.12 地下浅層から地表の環境を考慮した生活圏評価モデルの構築

草野 由貴子 石田 圭輔 浜本 貴史

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ず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、最終的に人間が被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）が作成される。

生活圏評価モデルは、放射性核種的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反映し、これらの空間的不均質性を考慮して生活圏システムを記述したうえで、これに基づき核種移行プロセスや被ばくのグループを設定し、核種移行プロセスを表現したコンパートメントモデルや被ばくプロセスモデル（これらのモデルを以下、「生活圏評価モデル」という）を作成する必要がある。

本技術開発では、仮想的なサイトを対象として、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（以下、「地表環境モデル」という）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する技術と、この生活圏システムを対象として生活圏評価モデルを構築する技術の整備を目的としている。今年度はこれまでに整備した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（以下、「地質環境モデル」という）に対して設計した処分場（NUMO, 2022）を対象として検討を行った。

2. 主な成果

(1) 仮想的な評価対象地域における地表環境モデルの構築

地質環境モデルの河川流域の地形や地表水系の分布に基づき、第四紀沖積層の分布、土地利用分布、土壌分布、宅地分布等を検討し、地表環境モデルを作成した（図 1）。地表環境モデルにおける地表水と地下水の交流関係や河川流量などの水文環境に関する情報を生活圏評価の核種移行モ

デルに反映させることを目的とし、解析コード GETFLOWS（株式会社地圏環境テクノロジー）を用いて、地表水と地下水の交流関係及び人為的な水利用を考慮した水循環解析を行った。

解析においては、地形起伏や土地利用分布を十分に表現できるよう、地表の構成要素の大きさに応じた要素（5m～200m）で分割した空間モデルを用いた。また、水理場に関しては陸域において降雨が自由に地表面を移動することを考慮し、地表面に一定の有効降水量を与え、地表水・降水の地下への浸透、地下水湧出が発生する上部境界条件とした。ここで、有効降水量については、日本の先新第三紀堆積岩類が分布する河川流域の有効降水量の平均的なデータに基づき複数ケースを設定したうえで、飽和－不飽和状態における地下水流動解析を予想的に実施し、地表環境モデルにおいてより現実的な河川水位分布や地下水位分布が表現できる値を採用した。海域の上部境界については、海水面を標高 0 m とした固定水頭境界とし、側方境界及び下部境界は不透水境界とした。化学場の境界条件については、海底面は海水と接触していることから海水の塩分濃度で固定濃度境界とし、その他の境界を塩分濃度 0% の固定濃度境界と設定した。このような地質環境モデルと境界条件で実施した水循環解析の結果を図 2 に示す。対象流域における南北断面の地下水流線の結果を示しており、断面の北側（図の右側）と中央部には、地形的な分水界に従って独立した地下水流動系が形成されていることが分かる。

(2) 生活圏評価モデルの作成

地表環境モデルと水循環解析結果をもとに、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作成した。BIOMASS は IAEA による IAEA-BIOMASS-6 (IAEA, 2003) の公表以降、その後の検討の中間報告書として BIOMASS 2020: Interim report (Lindborg, 2018) が公表されている。本技術開発では最新版である BIOMASS 2020: Interim report (Lindborg, 2018) による方法論（図 3 参照）を用いて、以下 a) ～c) のような手順で生活圏評価を行うことにより、地表環境の特徴を反映した生活圏評価モデルを作成した。

水循環解析の結果から、地下深部から地下浅層に移行した核種が地下浅層の地下水に流入した後、浅層地下水や地表水によって生活圏を移行していくことが想定されることから、本技術開発で作成した生活圏評価モデルでは、浅層地下水を GBI として設定できるように浅層地下水のコンパートメントを配置したが、GBI の空間分布及び GBI に流入する核種濃度の設定方法は今後の検討課題である。

a) Compilation of generic FEPs :

- ・ 包括的技術報告書 (NUMO, 2021) で整備された NUMO-FEP と海外で整備された最新の FEP リスト（例えば、IFEP Version3.0 (OECD/NEA, 2019)）を基に生活圏評価で考慮すべき FEP リストを整備（例えば、NUMO-FEP に対して、IFEP Version3.0 の「FEP5.3.6 放射性核種の崩壊と連鎖生成」の追加）

b) Representation of the biosphere for the exposure modeling :

- ・ a) で整備した FEP リストに基づき、評価対象とする生活圏システム（地表近傍の環境の構成要素、構成要素間の核種移行経路、核種移行プロセス、人間の生活様式など）を記述
- ・ 河川流域を地形的な分水界で分け、小流域ごとに特徴の異なる水利用形態や人間の生活様式を記述

c) Development of biosphere exposure models :

- ・ b) に示した小流域ごとの生活圏システムの記述に基づいて被ばくグループを設定し、その生活様式から、被ばくプロセスモデルを作成 (図 4 参照)
- ・ 核種移行プロセスを分析し、小流域ごとにコンパートメントモデルを作成した後、これらを結合させて流域全体のコンパートメントモデルを構築 (図 5 に小流域のコンパートメントモデルを記載)
- ・ 小流域における河川水系、河川堆積層、土地利用ごとの土壌などの地表環境の構成要素をコンパートメントとして配置し、コンパートメント間の核種移行プロセスを生活圏システムの記述に従った数理モデルとして設定
- ・ 数理モデルに必要なパラメータの値 (例えば、河川流量) を水循環解析結果などを用いて設定

3. 今後の展開

包括的技術報告書 (NUMO, 2021) における閉鎖後長期の安全評価では、評価期間において 1 つの GBI に核種が流入し続けるとして評価している。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ると、廃棄物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が考えられる。このため、構築した生活圏評価モデルを解析コードに実装し、様々な試行を通じて、生活圏評価における GBI の取り扱いの考え方を整理する。また、処分場からの核種移行解析結果を GBI への核種流入量の設定に関する情報として用いる手法の検討や、地表環境の長期時間変遷によるコンパートメントモデル構造の時間変化に関する生活圏評価モデルへの反映方法の検討などについて技術開発を進める。

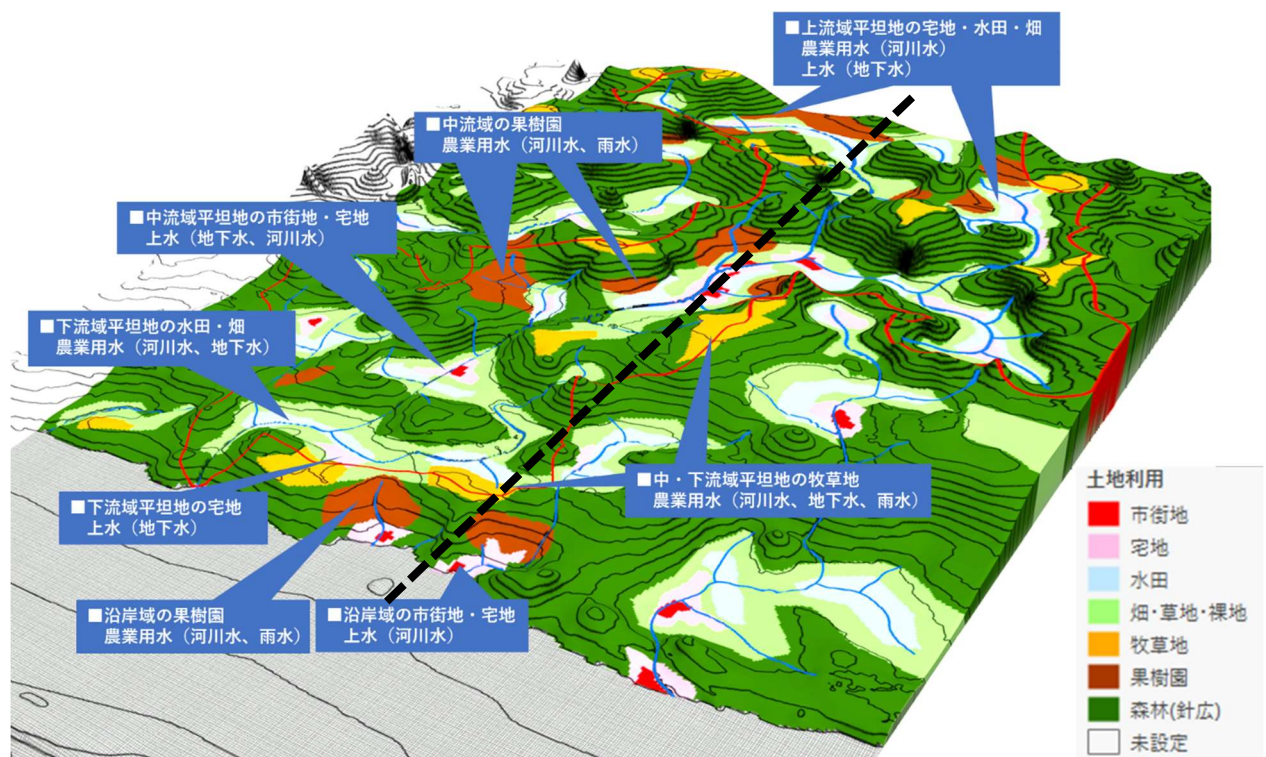


図 1 生活圏評価対象の地下浅層～地表の環境モデルの例
(図中の黒破線は図 2 の南北断面の位置)

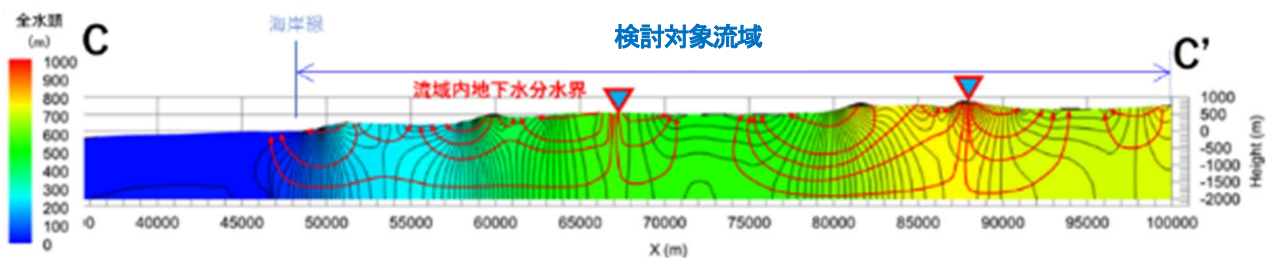


図 2 水循環解析結果から得られた評価対象の南北断面における地下水流線（先新第三紀堆積岩類地質環境モデル）

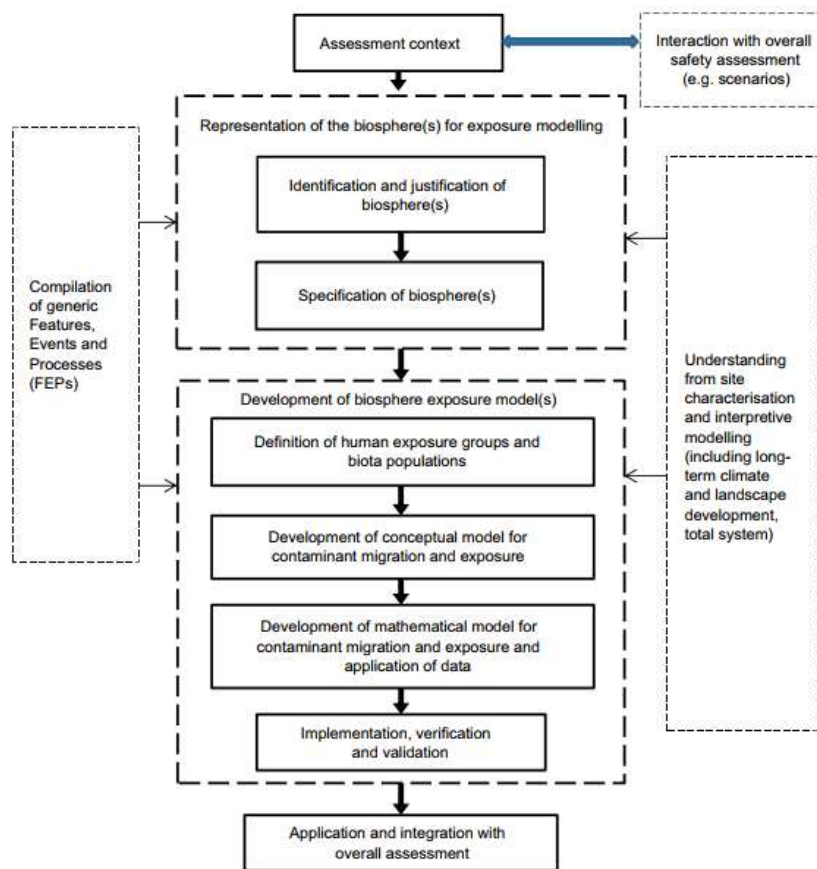


図 3 BIOMASS による生活圏評価のフロー (Lindborg, 2018)

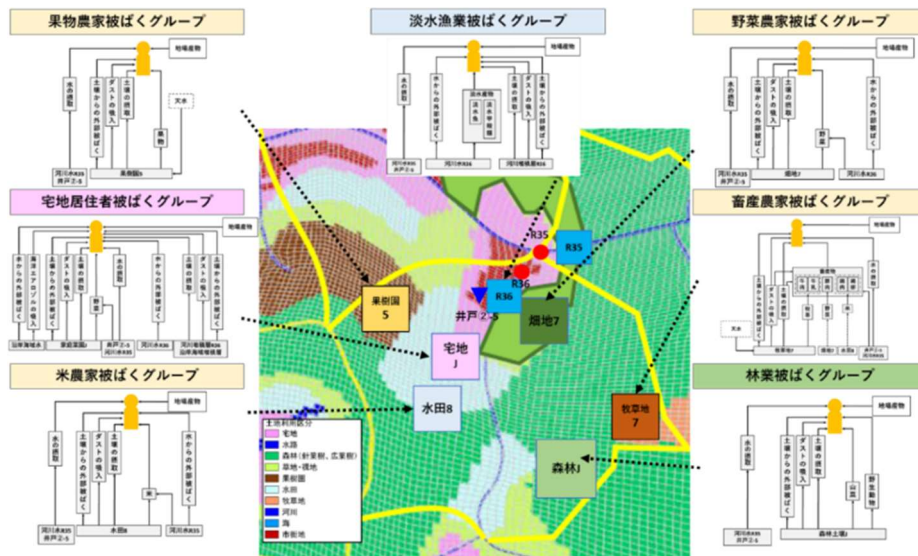


図 4 評価対象の小流域に対する被ばくプロセスモデルの例

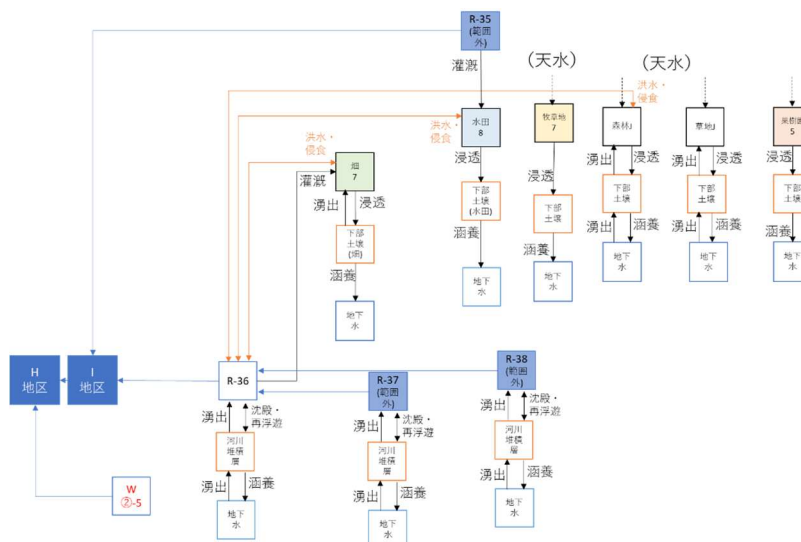


図 5 小流域のコンパートメントモデル

参考文献

IAEA (2003) : “Reference biospheres” for solid radioactive waste disposal: Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOSphere Modelling and ASSESSment (BIOMASS) Programme. IAEA-BIOMASS-6.
 地圏環境テクノロジー : GETFLOWS, <http://www.getc.co.jp/> (2023年3月15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—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.
 OECD/NEA (2019) : International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste Version 3.0, NEA/RWM/R(2019)1.
 Lindborg, T. (ed) (2018) : BIOMASS 2020 : Interim report, SKB, R-18-02.

2.3.13 生活圏評価に係るパラメータ設定のためのデータ取得

越後谷 浩二¹ 浜本 貴史¹ 草野 由貴子¹ 石田 圭輔¹ 田上 恵子² 石井 伸昌²
鄭 建² 福田 美保²

¹原子力発電環境整備機構, ²量子科学技術研究開発機構

1. 背景・目的

閉鎖後長期の安全評価における生活圏評価を、サイトの環境条件をより現実的に反映して行うため、「2.3.12 地下浅層から地表の環境を考慮した生活圏評価モデルの構築」で示したように、まず気候・海水準変動や隆起・侵食に伴う地形変化といった地表環境などを考慮した生活圏システム¹を記述する。次に、生活圏システムにおいて放射性核種の移行経路となる主要な構成要素を、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モデル化する。このモデルと生活圏システムの状態に応じて設定する様々なパラメータ値（コンパートメントの特性とその時間変化、核種移行パラメータなど）を用いた数値解析により、地表における核種の移行プロセスを定量的に取り扱う。

生活圏システムが時間的に変遷する過程で生じる様々な状態を反映したパラメータ値の設定を可能とするために、将来の日本で想定される気候・地形、これらに応じた土地利用などを類型化し、それぞれに対して着実にデータ取得を進めることが重要である。本取り組みでは、こうしたデータを拡充することにより、生活圏システムの状態に応じたパラメータ値の設定を可能とすることで、生活圏評価における不確実性を低減し、安全評価の信頼性を向上させることを目的としている。

包括的技術報告書 (NUMO, 2021) の基本ケースでは、処分場が平野部に建設されることを想定し、農作業従事者を代表的個人として設定している。これを出発点として、NUMO では、2018 年度から量子科学技術研究開発機構（以下、「QST」という）との共同研究により、以下に取り組んできた。

- ・ 既往の感度解析などの研究事例（加藤・鈴木, 2008）を参考に、農作業従事者の被ばく評価に関して重要となる農耕地土壌（水田土壌：98 種、畑地土壌：50 種）に対する核種の分配係数（以下、「Kd」という）を拡充
- ・ 処分場が沿岸部に建設される場合を想定し、海水準変動によって形成されることが考えられる湖沼の堆積物に対する Kd を拡充
- ・ 包括的技術報告書の基本ケースにおける線量評価で支配核種となる I-129 に着目し、モデルでは保守的に考慮しないこととしているヨウ素の揮発プロセスについて生活圏評価上の重要性を明らかにし、揮発プロセスを評価に取り入れる場合には関連するパラメータの設定方法を検討するために、多様な環境条件を想定した現象理解

2. 2022 年度の主な成果

NUMO と QST が共同で作成し、外部専門家によるレビューにより実用性を有することが認められた「脱離法による土壌－土壌溶液間分配係数 (Kd) の試験手順書」（「2.3.13 土壌分配係数の取得手順

¹ 気候、地理・地形、表層水理、土壌、生物相や人間の活動など、生活圏に流入すると想定される放射性核種の影響を計算する基盤となる地表環境の特徴や人間の生活様式、GBI（地質環境中から生活圏への排出点）を設定し、これらの相互関係などを考慮したもの。（NUMO, 2021）

書の外部レビューの実施」参照)に従い、2022年度は、農耕地土壌について、日本全国から採取した59種類の畑地土壌を対象としたKdデータを取得し、2021年度の成果と併せて109種類のKdデータ(鄭ほか, 2021; Zheng et al., 2022; 田上ほか, 2021)を整備した(表1参照)。

沿岸域の堆積物や海水準変動により形成されることが想定される湖沼の堆積物に対するKdについて、国内の環境調査などで得られているデータを調査し、包括的技術報告書の生活圏評価における評価対象元素(24元素)のうち13元素に対するKdを収集した。多様な地表環境に対応するため包括的技術報告書の生活圏評価モデルに水田や畑地、湖沼などのコンパートメントを追加した生活圏評価モデル(澁谷ほか, 2017)を用い、13元素の湖沼堆積層のKdに対する農作業従事者、淡水漁業従事者、海洋漁業従事者の線量換算係数(Dose Conversion Factor; 以下、「DCF」という)の感度解析を行った。¹³⁷Csと²²⁹Thの湖沼堆積層のKdへの感度が高く、これらの核種に関するデータ取得の重要性が示された。

ヨウ素の揮発プロセスに関しては、上記の生活圏評価モデルを、水田土壌及び畑地土壌からのヨウ素の揮発が取り扱えるよう改良し、揮発したヨウ素の吸入量に対するDCFの感度解析を実施した。I-129による被ばく経路は、井戸水の摂取が支配的であり、土壌から揮発したヨウ素の吸入の寄与は限定的であった。

3. 今後の展開

これまでに類型化した将来の日本で想定される気候・地形、これらに応じた土地利用などを考慮し、引き続き生活圏評価に必要なパラメータ設定のためのデータの拡充を行う。

表1 本研究で取得した脱離Kdの数※

土壌種	水田土壌	畑土壌
褐色低地土	7	8
グライ低地土	24	11
グライ台地土	2	1
多湿黒ボク土	7	10
灰色台地土	1	1
灰色低地土	32	15
黄色土	4	9
火山放出物未熟土	1	0
黒ボクグライ土	1	0
黒ボク土	6	30
黒泥土	1	0
低地水田土	10	8
泥炭土	1	1
非アロフェン質黒ボク土	1	2
褐色森林土	0	9
砂丘未熟土	0	1
赤色土	0	2
未熟低地土	0	1
合計	98	109

※収集した元素は、包括的技術報告書の安全評価における評価対象元素25元素のうち13元素(Cl, Co, Ni, Se, Sr, Zr, Nb, Mo, Sn, Cs, Pb, Th, U, Np及びPu)に対するKdデータであった。土壌中濃度が低い元素や分析条件の影響を受ける測定困難なため対象外とした。

参考文献

- 加藤智子, 鈴木祐二 (2008): 地層処分生活圏評価における感度解析による重要パラメータの抽出に関する検討, JAEA-Research 2008-021.
- 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.
- 澁谷早苗, 深谷友紀子, 杉山武, 市川恭子(2017): 生活圏環境を詳細化した核種移行プロセスモデルの設定と評価技術の高度化, 日本原子力学会 2017年秋の大会予稿集.
- 田上恵子, 浜本貴史, 澁谷早苗, 石田圭輔, 内田滋夫 (2023): 農耕地土壌における塩素の土壌-土壌溶液間分配係数について, 第60回アイソトープ放射線研究発表会.
- 鄭建, 田上恵子, 内田滋夫, 澁谷早苗, 石田圭輔, 浜本貴史 (2021): 水田土壌における ^{237}Np 及び ^{239}Pu の土壌-土壌溶液間分配係数について, 第22回「環境放射能」研究会プロシーディング集.
- Zheng, J., Tagami, K., Uchida, S., Shibutani, S., Ishida, K. and Hamamoto, T. (2022): Soil-soil solution distribution coefficients of global fallout ^{239}Pu and ^{237}Np in Japanese paddy soils, Chemosphere, Vol. 291, Article 132775.

2.3.14 土壌分配係数の取得手順書の外部レビューの実施

越後谷 浩二¹ 浜本 貴史¹ 藤崎 淳¹ 田上 恵子² 鄭 建² 福田 美保² 内田 滋夫²

¹原子力発電環境整備機構, ²量子科学技術研究開発機構

1. 背景・目的

生活圏評価に用いる重要なパラメータの一つである土壌分配係数について、概要調査以降の段階においては、調査地点の土壌を対象としたデータを迅速に効率良く、評価に必要なレベルの品質を保証しつつ取得する必要がある。取得したデータの品質を保証するうえでは、標準化された手順を構築し、これに従ってデータ取得を行うことができるようにしておくことが有効である。このため、NUMOでは、量子科学技術研究開発機構との共同研究を通じて、当該データ取得のための手順書を作成した。この手順書の構成を図1に示す。

この手順書について技術的信頼性を確認するため、2021年度から日本保健物理学会内に生活圏の収着分配係数に関する専門家からなる委員会（「土壌分配係数の試験方法に関する手順書」評価委員会：以下、「評価委員会」という）を設置していただき、以下(i)～(iii)の観点からレビューを実施した。2021年度に評価委員会は2回開催され、第1回評価委員会で86件のコメントをいただき、第2回評価委員会でコメントに対するNUMOの対応方針が了承された。

- (i) 土壌分配係数の取得手順書の適切性に関するレビュー
- (ii) 土壌分配係数の取得手順書における土壌分配係数の変動要因に関するレビュー
- (iii) 分析方法の妥当性確認について

2022年度は、評価委員会において了承された対応方針に従い更新した手順書について、レビューを行っていただき手順書が実用に足るものであるかどうかについて評価いただいた（日本保健物理学会ホームページ）。

2. 主な成果

2022年度は評価委員会を2回開催し、第1回評価委員会では、更新した手順書を対象にレビューいただいた結果、(i)～(iii)のレビュー観点から98件のコメントをいただいた（表1参照）。第2回評価委員会では、いただいたコメントへのNUMOの対応によって修正した手順書に対する評価委員会としての評価及び提言について審議が行われた。

コメントに対するNUMOの対応結果は全て了承された。評価委員会が取りまとめたレビュー結果の報告書において、「更新された手順書に関しては、分配係数取得の必要性、分析方法が、これまでに蓄積された高いレベルでの国内外の専門的知見、経験に基づいて記されており、さらに、補足情報が充実し、かつそれらが明瞭に説明・記述されており、手順書の水準や仕上がりも他の規格並みに必要事項がしっかり記載されていることから、実用に足るものである」との結論をいただいている。加えて、分析方法や分析機器の最新技術等を取り入れて手順書を定期的に更新することなどの手順書の品質に関する提言、土壌サンプリング時における未耕地の土壌を覆っている表層物の除去などの提言、及び取得した分配係数の品質管理とパラメータ設定に関する提言等を取りまとめていただいた。

3. 今後の展開

整備した手順書を活用した生活圏評価に用いる際の収着分配係数のデータセットの設定方法を整備し、NUMOの技術報告書として公表する。

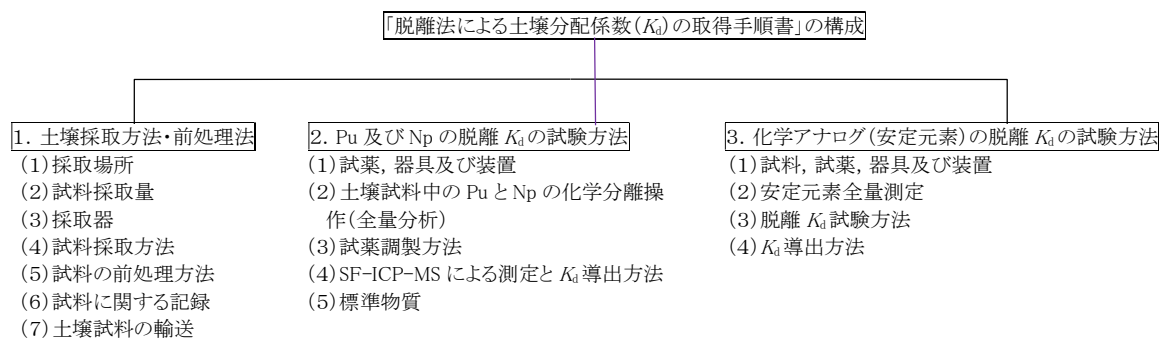


図1 土壌分配係数の取得手順書の構成

表1 2022年度のレビューの観点と取得手順書への評価委員会コメント

レビューの観点	レビューコメント※
(i) 土壌分配係数の取得手順書の適切性に関するレビュー 当該レビューは, 手順書に必要な土壌試料の採取, 分析の原理, 試料の処理や試薬の扱いなど一連の作業・操作手順, 留意事項等が適切に記されているかを専門家の視点で評価いただいた。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 文章構成の適正化 (手順書内容の特徴と想定読者を別々に示してはどうか) ・ 出典の根拠の明確化 ・ 用語・文章表現の適正化 ・ 補足説明及び留意事項等の充実
(ii) 土壌分配係数の手順書における土壌分配係数の変動要因に関するレビュー 当該レビューは, 分析手法の頑健性の観点から, 分析値に影響を与えそうな分析条件, 項目について設定根拠等が適切かを評価いただいた。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 土壌のサンプリング方法におけるバラツキ要因, 留意事項を記載 ・ 表層土壌の取扱いを記載(有機質層を含めて採取するかどうか) ・ 土壌の採取深度の明確化 ・ 放冷時間の明確化 ・ 塩素濃度の分析方法を補足説明に追加
(iii) 分析方法の妥当性確認について 当該レビューは, 品質管理の観点から記録管理方法や分析値の妥当性確認の実施方法について評価いただいた。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 検体数, 測定回数の解説追記 ・ 内部標準液, 分析試薬の有効期間の明確化 ・ 有効数字の適正化

※第1回目評価委員会のレビューコメント98件に関しては対応方針を整理した後, 手順書の修正・補足説明の追加等を行い, レビュー意見を反映した手順書を作成し第2回目評価委員会で審議した。

参考文献

日本保健物理学会ホームページ: 「土壌分配係数の試験方法に関する手順書」 評価委員会, <http://www.jhps.or.jp/cgi-bin/info/page.cgi?id=91> (2023年6月6日閲覧)。

2.3.15 地層処分における廃棄体の放射能インベントリ設定手法の検討

関 ルミ 石田 圭輔 越後谷 浩二 前田 正

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

安全を確保した地層処分システムを構築するためには、受け入れる廃棄体の放射能インベントリを設定し、これを対象として処分場の地上施設及び地下施設の設計を行うとともに、処分場閉鎖前及び閉鎖後の安全評価を行う必要がある。設計や安全評価をより合理的なものとするためには、受け入れる廃棄体の放射能インベントリをより信頼性の高いものとするのが重要である。

包括的技術報告書 (NUMO, 2021) においては、高レベル放射性廃棄物 (以下、「ガラス固化体」という) の放射能インベントリを以下に示す手順で設定している (図 1 参照)。ア～ウでは、解析コード ORIGEN2 シリーズの最新版 ORIGEN2.2-UPJ (奥村ほか, 2013) を用い、JENDL-3.3 に基づく核データセット ORLIBJ33 (片倉ほか, 2004) を使用した。エについては、崩壊計算が可能な解析コード GoldSim を用い、Publication 107 (ICRP, 2008) に基づく核データセットを使用した。

ア. 燃料の燃焼計算

イ. 使用済燃料の冷却期間における崩壊計算

ウ. 再処理における核種の使用済燃料からガラス固化体への移行計算

エ. 貯蔵期間における崩壊計算

これらの計算においては、図 1 に示す通り、燃焼条件 (アの条件)、再処理条件 (イ及びウの条件)、固化条件、処分条件 (エの条件) といった解析条件を設定する必要がある。

包括的技術報告書 (NUMO, 2021) においてはガラス固化体の大部分を製造する日本原燃の再処理施設に着目して代表的な解析条件を設定した。燃焼条件については、再処理事業指定申請書 (日本原燃, 1992) に記載されている再処理施設のガラス固化体貯蔵施設の設計に用いられた使用済燃料 (炉型: PWR, 燃料型式: 17×17, 濃縮度: 4.5wt%, 燃焼度: 45GWd/MTU) に基づき設定した。再処理条件及び固化条件についても同様に上記申請書に基づき条件を設定した。処分条件である「固化後の貯蔵期間」については「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」に基づき製造後 30 年と 50 年の 2 つの値を設定した。しかしながら、例えば、使用済燃料の仕様は炉型や型式によって異なることや、燃焼度は使用済燃料の照射履歴によりばらつきがあること等から、各解析条件を一意に定めることはできず、したがって処分場に受け入れる 4 万本のガラス固化体の放射能インベントリも分布を有すると考えられる。このため、包括的技術報告書 (NUMO, 2021) で用いた上記の手法を起点とし、各解析条件に分布を設定することで、ガラス固化体の放射能インベントリの分布を推定する手法を 2021 年度から段階的に整備している。

本技術開発においては、まず、ア. 燃料の燃焼計算とイ. 使用済燃料の冷却期間における崩壊計算について、各解析条件を与えるパラメータの値に分布を設定することで、ガラス固化体の放射能インベントリの分布を算出する手法の構築を行うこととした。

2. 主な成果

今年度においては、使用済燃料の型式ごとに、各パラメータの分布を設定し、これに基づくランダ

ムサンプリングにより作成した複数のデータセットを用いてガラス固化体の放射能インベントリの分布を算出した。そのうえで、使用済燃料の型式ごとの放射能インベントリの分布を各型式の発生量の割合で加重平均することによりガラス固化体 4 万本分の放射能インベントリの分布を求める手法を構築した。

(1) 解析対象とする使用済燃料の型式

各原子力発電所の設置許可申請書（例えば、東京電力，2007），電力各社のホームページ（例えば、北海道電力，2023），「軽水炉燃料のふるまい（第5版）」（原子力安全研究協会，2013）等の公開情報に基づき、各原子力発電所において過去に発生した使用済燃料の型式、発生量等の調査を行なうとともに、現在の最新の燃料仕様が将来にも使用されると仮定して、将来発生する使用済燃料の型式及び発生量を予測した。これを用いて上述した方法により、処分場に受け入れるガラス固化体 4 万本相当の発生源となる使用済燃料の型式及び発生量を求めた。さらに、これまでの燃料の型式には、PWR 用燃料では従来型、STEP I 及び STEP II が、BWR 用燃料では 7×7 燃料改良型、8×8 燃料、新型 8×8 燃料、STEP I、STEP II 及び STEP III があることが分かった。

(2) パラメータの分布の設定

図 1 に示した燃焼条件及び再処理条件の中で、特に放射能インベントリに影響を与えるパラメータを選定した後、パラメータの分布を試行的に設定した。

a) 分布を設定するパラメータの選定

- ・ 燃焼度：使用済燃料の照射量に比例するパラメータであり、核分裂生成物や放射化生成物の量への影響が大きいことから分布を設定
- ・ 濃縮度，U 同位体組成データ，燃料不純物データ，構造材組成データ：照射前の核種もしくは元素の成分を表しており、核分裂生成物及び放射化生成物の生成源であるため放射能インベントリに与える影響が大きいことから分布を設定
- ・ 比出力：比出力は原子炉の出力に依存するパラメータであり放射能インベントリへ与える影響の大きさが不明であったため、燃焼度を上述の包括的技術報告書（NUMO，2021）で代表的な使用済燃料の燃焼条件として設定した 45GWd/MTU に固定して、運転日数と比出力を変化させる感度解析を実施した結果、放射能インベントリへの影響が小さいことが確認できたため、固定値を設定（PWR の場合は包括的技術報告書（NUMO，2021）の値：38 MW/MTU，BWR の場合は第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ（JNC・電事連，2005）の値：26 MW/MTU）
- ・ 運転日数：運転日数は、燃焼度（MWd/MTU）を比出力（MW/MTU）で除した値
- ・ 再処理までの冷却期間：Am-241 等の超ウラン元素の生成に影響が大きいことから分布を設定

b) 分布様式の設定

燃料は基本的に国内で成型加工されていることから、国内文献を優先的に利用し、国内文献がない場合は海外の文献を利用して、上記 a) で選定したパラメータの分布を設定した。参照した規格や文献等に上限値と下限値が示されているパラメータはこれらの値に対する一様分布とした。データが 1 点のみの場合が多い燃料不純物と構造材組成の元素量の分布は、原料である鉱物や岩石中における分布様式が維持されるとみなし、「中深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法の基本手順」（日本原子力学会，2019）における「鉱物，岩石等における U 元素の濃度分布」と同様の対数正規

分布と仮定し、その標準偏差（対数）は、放射能インベントリの分布を網羅できるよう最も大きい値（0.246）を使用した。これらの考え方にに基づき、以下のように各パラメータの分布を設定した。

- ・ 燃焼度：燃焼度は公開情報で分布を設定することは困難であったことから、簡易的な取替炉心設計を模擬した解析コード（石谷ほか，2015）により、電力各社のホームページ等より入手した各原子力発電所の運転データ等を用いて計算を行い、使用済燃料の型式ごとに取出燃焼度のヒストグラムを作成し、その値を設定
- ・ 濃縮度：各原子力発電所の設置許可申請書に記載されている初期濃縮度を参照し、使用済燃料の型式ごとに範囲を設定して一様分布を設定
- ・ U 同位体組成データ：燃料型式ごとの U-235 は初期濃縮度の範囲を調査し、一様分布を設定。U-235 以外の U 同位体は「高レベル放射性廃棄物ガラス固化体のインベントリ評価（石原ほか，1999）」で用いられている燃料管理上の規定値（ASTM，1996）に基づき、U-234 を U-235 の 100 分の 1 の値とし、U-232 及び U-236 は固定値とした。U-238 については、燃料の全ウラン量から、U-232、U-234、U-235 及び U-236 の合計値を引いた値を設定
- ・ 燃料不純物データ：国内文献が存在しなかったため、海外の公開文献「Standard- and Extended-Burnup PWR and BWR Reactor Models for the ORIGEN2 Computer Code（Ludwig et al., 1989）」及び「Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository（Grahm et al., 2010）」に基づき、上限値と下限値を設定している元素については一様分布とし、データが 1 点のみとなる元素については対数正規分布を設定
- ・ 構造材組成データ：JIS 規格（JIS H 4751，JIS G 4303，JIS G 4901）に記載されている上限値と下限値を用いて一様分布とした。当該規格にない元素については「Standard- and Extended-Burnup PWR and BWR Reactor Models for the ORIGEN2 Computer Code（Ludwig et al., 1989）」もしくは「炉内構造物の放射化核種の主要な生成経路（山本ほか，2014）」に記載されている 1 点のデータを使用して対数正規分布とした。JIS 規格と上記文献に記載がない元素については英国の材料メーカーが公開している製品安全データシート「MATERIAL SAFETY DATA SHEET（WALLCOLMONOY，2015）」に記載されている上限値と下限値を使用して一様分布と設定
- ・ 再処理までの冷却期間：再処理事業指定申請書（日本原燃，1992）における「せん断処理するまでの使用済燃料の冷却期間は 4 年以上」との記載、国内の原子力発電所は 1970 年代に運転を開始していること、六ヶ所再処理施設の運転開始時期を考慮し、4 年～60 年の一様分布を設定

(3) 放射能インベントリの分布の算出

2. (2) で設定したパラメータの分布からランダムサンプリングにより複数のデータセットを作成し、試行的に 1. のア～エの計算を行い、放射能インベントリの分布を算出した。

a) 計算の手順

燃料型式ごとに各パラメータの分布に基づきランダムサンプリングにより、5,000 個のデータセットを用意した。次に、それぞれのデータセットに対してア～エの計算を試行し、ガラス固化体の総放射能の分布を算出した。これに基づき、2. (1) で求めた処分場に受け入れるガラス固化体 4 万

1 BWR 用燃料のうち、7×7 燃料改良型、8×8 燃料、新型 8×8 燃料については、それらの発生量が比較的少ないことから、STEP1 燃料相当として計算を実施

本相当の発生源となる使用済燃料の型式ごとの発生量から算出した、使用済燃料の型式ごとの発生割合に応じて、燃料型式ごとの総放射能の分布を加重平均して求めた。

ア～ウの計算では、最新版である ORIGEN2.2-UPJ コード及び JENDL-4.0 に基づく核データセット ORLIBJ40 (奥村ほか, 2013) を使用した。本技術開発において、包括的技術報告書 (NUMO, 2021) と異なり、最新の核データセット ORLIBJ40 を用いた理由としては、地層処分において重要な核種である Se-79, Tc-99, Sn-126 及び Cs-135 の半減期データに最新の知見が反映されていることに加えて、包括的技術報告書 (NUMO, 2021) の作成時に比べて使用実績 (例えば, 日本原子力発電, 2020) が増えていることがある。

エの計算では、包括的技術報告書 (NUMO, 2021) と同様に、崩壊計算が可能な解析コード GoldSim を用い、Publication 107 (ICRP, 2008) に基づく核データセットを使用した。

b) 試行計算の結果

処分場に受け入れるガラス固化体 4 万本全体の放射能インベントリの計算結果を図 2 に示す。包括的技術報告書 (NUMO, 2021) における放射能の値 (図中の赤線) に対して、算出された分布の最大値は大きくなっている。

これは、燃焼条件である燃焼度について、電力各社のホームページ等より入手した各原子力発電所の運転データ等を用いて設定した分布には包括的技術報告書 (NUMO, 2021) で用いた燃焼度より高い値が含まれていること、さらに、放射能インベントリは他のパラメータと比較して燃焼度への依存性が大きく、核分裂生成物、放射化生成物及び超ウラン元素の生成量が多いことによる。

3. 今後の展開

2022 年度は、燃焼条件及び再処理条件 (ただし、再処理までの冷却期間のみ) に分布を設定することにより、放射能インベントリの分布を算出することを試み、パラメータの分布の設定方法やガラス固化体のインベントリの分布を推定するための方法論を部分的に構築した。今後は、再処理までの冷却期間以外の再処理条件及び固化条件の分布について検討を行い、この方法論をより体系的なものとして現実的な廃棄体の放射能インベントリを設定する手法の構築を目指す。

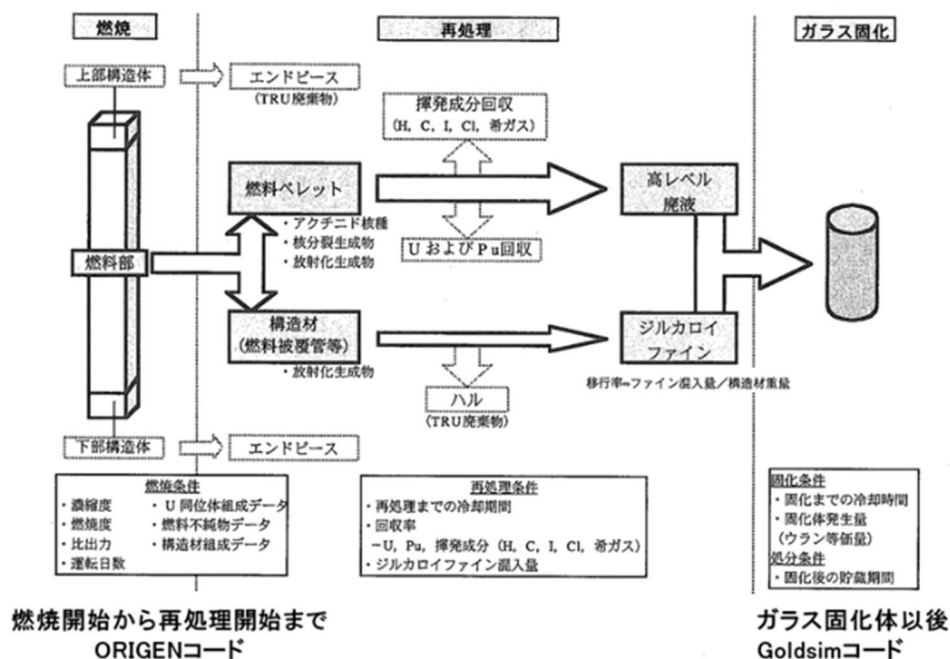


図 1 放射能インベントリ解析の概略フロー図 (石原ほか, 1999)

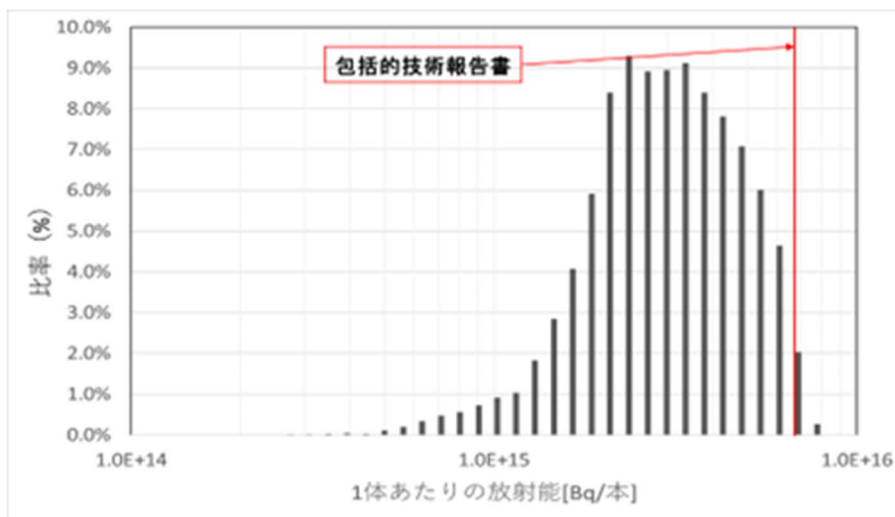


図 2 ガラス固化体 1 本あたりの放射能の分布 (ガラス固化体 4 万本全体, 貯蔵期間 30 年)

参考文献

ASTM (1996) : Standard Specification for Uranium Hexafluoride Enriched to less than 5% ²³⁵U, American Society for Testing and Materials, ASTM C-996-96.

原子力安全研究協会 (2013) : 軽水炉燃料のふるまい (改訂第 5 版) .

北海道電力ホームページ : エネルギー・発電設備, <https://www.hepco.co.jp/energy/atomic/data/fuel.html> (2023 年 1 月 14 日閲覧) .

- ICRP (2008) : Nuclear decay data for dosimetric calculations, ICRP Publication 107, Ann. ICRP, Vol.38, No.3.
- 石原義尚, 牧野仁史, 大井貴夫, 石黒勝彦, 宮原要, 梅木博之, 赤坂秀成, 藤原啓司, 橋愛幸 (1999) :
高レベル放射性廃棄物ガラス固化体のインベントリ評価, JNC TN8400 99-085.
- 石谷和己, 柴田雅博, 江橋健, 若杉圭一郎, 牧野仁史, 蛭名貴憲 (2015) : 直接処分研究のための使用済燃料の多様性を考慮したモデルインベントリ評価, 日本原子力学会「2015 年秋の大会」予稿集.
- JNC(核燃料サイクル開発機構)・電事連(電気事業連合会)(2005) : TRU 廃棄物処分概念検討書—第2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—, JNC TY 1400 2005-013, FEPC TRU TR2-2005-02.
- 片倉純一, 片岡理治, 須山賢也, 神智之, 大木繁夫 (2004) : JENDL-3.3 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット : ORLIBJ33, JAERI-Data/Code 2004-015.
- Ludwig, S.B. and Renier, J.P. (1989) : Standard- and Extended-Burnup PWR and BWR Reactor Models for ORIGEN2 Computer Code, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-11018.
- 日本原燃 (1992) : 再処理事業所 再処理事業指定申請書.
- 日本原子力学会 (2019) : 中深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法の基本手順, AESJ-SC-F015.
- 日本原子力発電 (2020) : 東海低レベル放射性廃棄物埋設事業所 第二種廃棄物埋設事業許可申請第二種廃棄物埋設施設の位置, 構造及び設備の基準に関する規則第十条(廃棄物埋設地)第四号への適合性について.
- 日本工業規格 (1999) : 耐食耐熱超合金棒, JIS G 4901.
- 日本工業規格 (2012) : ステンレス鋼棒, JIS G 4303.
- 日本工業規格 (2016) : ジルコニウム合金管, JIS H4751.
- 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.
- 奥村啓介, 杉野和輝, 小嶋健介, 神智之, 岡本力, 片倉純一 (2013) : JENDL-4.0 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット : ORLIBJ40, JAEA-Data/Code 2012-032.
- Grahn, P., Morén, L. and Wiborgh, M. (2010) : Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository, SKB Technical Report.
- 東京電力 (2007) : 福島第一原子力発電所設置変更許可申請書.
- WALLCOLMONOY (2015) : MATERIAL SAFETY DATA SHEET, NICROBRAZ® Group 1 Nickel-based Alloy Brazing Powders.
- 山本健士, 奥村啓介, 小嶋健介, 岡本力 (2014) : 炉内構造物の放射化核種の主要な生成経路, JAEA-Research 2013-038.

2.4 技術マネジメント

事業を規定する要件とこれを満たすために必要な知識の整備について、事業の時間軸に沿って効率的に要件マネジメント・知識マネジメントを行うことを目的としてロードマップの枠組みを作成した(2.4.1 参照)。また、NEAが実施する知識マネジメントに関する国際プロジェクトWP-IDKM(Working Party on Information, Data and Knowledge Management)への参加を継続し、NUMOの取組みを発信して各国の地層処分専門家と意見交換を行うとともに、長期の事業を見据えた知識・情報・データの継承・保管やセーフティケースのデジタル化、処分場閉鎖後の記憶継承、これらに対するDX推進に関する取組みについて、国際的な最新動向を把握した。

技術開発の着実な推進、成果の品質・信頼性の向上に係る取組みについては、文献調査をはじめ、地質環境の長期変遷、処分場の設計、閉鎖後長期の安全性等の技術開発に係る業務品質確保の実効性を高めるため、これまでに整備した品質マネジメントシステムについて、モニタリングを通じて有効性等の確認、必要に応じた改善といった整備に継続して取り組んだ。

全体計画(「地層処分研究開発に関する全体計画(平成30年度～令和4年度)」(平成30年3月、令和2年3月改訂))の改訂に当たっては、これまでの技術開発の成果、包括的技術報告書の国際レビュー報告書に示された提言、事業の進展や安全規制に関する議論の動向、国際機関の取組みや各国の動向等を考慮するとともに、NUMOの技術アドバイザリー委員会による助言、技術開発評価委員会による「評価・提言」等を踏まえ、分野間の連携や研究開発に関する一層の合理性を確保することを念頭に置いて、日本全体としての研究開発へのニーズを明らかにしたうえで、国・関係機関との役割分担等の検討・調整を地層処分の実施主体としてリーダーシップをもって進めた。

概要調査の実施能力等の向上に係る取組みについては、概要調査の手順・手法等の整備のため、NUMOの部門を横断して概要調査の実施に関する検討会議を設置し、概要調査実施において必要な技術的観点からの検討を進めて、前提条件の整理、実施工程案の検討、体制及びそれに基づく課題の抽出・整理等を行った。また、国土利用計画法に基づく5地域区分の指定と区分毎の個別規制法等による土地の利用制限及び利用に際して必要となる許可・届出に関して整理した。

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NEA、国際原子力機関(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(2.4.2 参照)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(NWS, Nagra, NWMO, SKB)や研究機関(LBNL等)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。また、NEAとJAEAによる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(NEA-JAEA Joint International Project, “Horonobe International Project”(HIP))に関し、準備会合への参画を経て、NUMOは計画されている3つのタスク(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)全てに参加することを公式に表明した。

2.4.1 要件マネジメントシステム・知識マネジメントシステムの検討

西川 将吾 藤山 哲雄 江橋 健

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

地層処分事業を進めるうえでは、事業に関する要件を適切に満足しながら様々なステークホルダーの安心感や納得感に繋がるように課題解決や意思決定を行っていくことが重要である。こうしたプロセスには、多岐にわたる学術分野の膨大な知識、情報、データ（以下、「知識、情報、データ」を総じて「知識」という）が関わり、これを体系的に管理し維持していくためのシステムの構築が不可欠である。このシステムによって、要件を満足するために必要な知識を技術開発等により「生産」し、セーフティケース等として「統合」とともに長期にわたる事業期間を通じて「継承」という一連の活動を効率的に実施することを可能にする必要がある。

NUMO では、以上に述べた要件の管理と知識の管理を組み合わせたマネジメントシステムの構築に取り組んでいる。日本原子力研究開発機構による検討成果（例えば（梅木ほか, 2006 ; Makino et al., 2012)）や OECD/NEA の WP-IDKM (Working Party on Information, Data and Knowledge Management) (OECD/NEA ホームページ) における最新の取組みに基づき、SKB との共同研究を通じてマネジメントシステム (Integrated Requirements and Knowledge Management System : NUMO-IRKMS) の概念を 2020 年度までに整理した。マネジメントシステムの具体化のため、2021 年度はセーフティケースの論証構造の可視化により、セーフティケースに必要な知識の構造を整理するとともに、OECD/NEA による包括的技術報告書のレビューでのコメント (OECD/NEA, 2023) の分析を通じ、今後拡充すべき知識を特定した (NUMO, 2023)。また、事業の各段階で必要な要件への対応と知識整備を遅滞なく実施するためには、事業に関する時間的視軸をマネジメントシステムに導入していくことが課題として整理された。

2. 主な成果

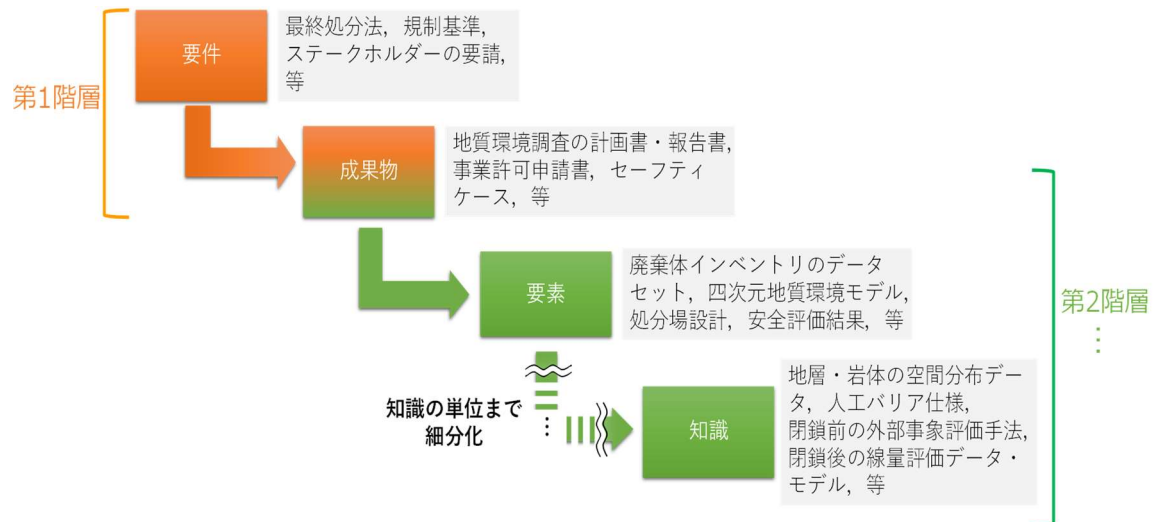
2022 年度は、事業の進捗に応じた要件への対応と知識整備に資するマネジメントシステムを構築するため、SKB との共研を通じて SKB が建設許可申請までに対応した外部のステークホルダーからの要件を整理するとともに SKB が各事業断面で策定した技術開発に関するロードマップの内容と事業展開に応じた改訂の経緯等を分析した。これらの情報を基に、実施主体が対応すべき要件と整備すべき知識を時間軸に沿ってロードマップとして展開するための考え方を整理した (図 1)。

具体的には、ロードマップの構成や NUMO の今後の事業段階におけるマイルストーン等に関する議論を通じて、事業の要件に基づき、必要な成果物とそれを構成する要素と関連する知識を階層化して整理するとともに、ロードマップを試作した。

また、要件マネジメント及び知識マネジメントにおけるデジタル技術や汎用的なツールの活用について SKB と NUMO 双方の取組み状況を共有し、地層処分に係る多分野にわたる技術的な知識の統合的な管理を目指していくために、引き続きこうした最新の技術の導入について共同で取り組むこととした。

3. 今後の展開

上記の成果に基づき、事業期間中の要件設定と対応して必要となる知識整備に関するロードマップ作成を継続するとともに、マネジメントシステムの運用にあたりデジタル技術やツールに求められる役割や機能を明確化し、有効性を確認しつつ利用可能な技術の導入を図る。



※ 事業の要件に基づき、必要な成果物とそれを構成する要素及び関連する知識を複数の階層に分類したうえで、これらの時間的な展開をロードマップとして整理

図 1 ロードマップ作成の考え方

参考文献

- Makino, H., Hioki, K., Osawa, H., Semba, T. and Umeki, H. (2012) : A Challenge on Development of an Advanced Knowledge Management System (KMS) for Radioactive Waste Disposal: Moving from Theory to Practice, New Research on Knowledge Management Technology, Dr. Huei Tse Hou (Ed.), InTech, ISBN: 978-953-51-0074-4.
- 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.99-102.
- OECD/NEA ホームページ : Working Party on Information, Data and Knowledge Management (WP-IDKM), https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_25233/working-party-on-information-data-and-knowledge-management-wp-idkm (2023年6月23日閲覧).
- 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.
- 梅木博之, 大澤英昭, 内藤守正, 中野勝志, 牧野仁史 (2006) : 地層処分技術に関する知識管理システムの基本概念, JAEA-Research 2006-078.

2.4.2 規制要件とその考え方を中心とした海外情報の収集と整理

加来 謙一 山田 基幸 石田 圭輔

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

地層処分の安全性を確保するためには、安全確保のために達成すべき具体的な目標を定め、その目標に向かって着実に事業を進めていく必要がある。我が国における安全性に関する要件や基準については、今後、原子力規制委員会によって示されていくことになるが、事業者である NUMO としては、規制当局が定めた要件や基準を確実に満足することはもとより、さらに高い水準の安全性を目指し、規制水準を超えた自主的な目標・基準を定めて必要な技術整備等に取り組むこととしている。このような背景から、本取組みでは、2020 年度から、諸外国において既に制定されている規制要件・基準や実施主体が自主的に定めている基準等の情報を収集・整理し、我が国において安全な処分場を構築していくために NUMO として考慮すべき自主的な目標・基準の考え方について検討を進めている。調査の対象とする国や事項に関する計画全体の枠組みを図 1 に示す。

2. 主な成果

2022 年度は米国及びカナダにおける地層処分を対象として、以下の事項について調査した。

- ・ 規制体系及び背景情報
- ・ 立地、施設設計及び安全評価等に関する規制要件の変遷
- ・ 立地、施設設計及び安全評価等に関する規制要件等と事業者による提案や自主基準
- ・ 放射性廃棄物の受入基準
- ・ 埋設後長期の安全評価手法や放射線防護基準

また、諸外国の横断的調査として、埋設後長期の安全評価手法や放射線防護基準についての調査を実施した。これらの事項を調査した結果、特に着目すべき成果として、以下が得られた。

米国の廃棄物隔離パイロットプラント (Waste Isolation Pilot Plant : 以下、「WIPP」という) では 1999 年 3 月から、核兵器開発などの軍事起源の TRU 廃棄物を対象として地層処分が実施されており、現時点で操業中の世界で唯一の地層処分施設である。そこで既に運用が開始されている放射性廃棄物の受入基準について詳細に調査を行った。WIPP で受け入れる TRU 廃棄物には、「廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) の廃棄物受入基準」(2020 年) が適用され、各発生サイトで廃棄物の処理、廃棄物特性評価などが実施され、基準に適合した廃棄物が輸送されてくる。WIPP の受入基準では、容器の特性、放射線学的特性、物理的特性、化学的特性、搬出データ等が対象となるデータパッケージという項目について定量的、定性的な基準が示されている。

カナダでは規制機関のカナダ原子力安全委員会 (Canadian Nuclear Safety Commission : CNSC) が制定している規制文書 (Regulatory documents : REGDOC) に加え、事業者である NWMO が定めた自主基準について調査を行った。これらについて、基本目標、放射線防護、サイト・地質環境、設計要件、安全評価、回収可能性、モニタリングに関する要件として整理した。

地層処分場の埋設後の安全評価手法や放射線防護基準に関する検討では、埋設後長期の安全評価手

法や放射線防護基準について、基準値、規制基準での安全評価の内容、規制基準で示された FEP 等の選定方法、事業者が設定した安全評価シナリオ等について各国の情報を整理した。さらに安全評価の対象期間、人間侵入、稀頻度事象、代替（補完的）指標、露出シナリオについて調査した。

2022 年度は 3 か年で実施した本調査業務の最終年度であったため、3 か年を通して得られた成果の総合的な整理・分析を実施した。その結果の概要を以下に示す。

- ・ スウェーデンについては、特に埋設後長期の安全評価手法や放射線防護基準に関して背景を含む詳細な調査を行い、整理することができた。
- ・ フィンランドについては、特に事業者が構築している要件管理システムに着目し、規制要件等に基づいた、処分場の安全機能、安全機能から導出された性能目標、設計要件等についての体系的な整理の方法について示した。
- ・ フランスについては、特に地層処分場の安全機能を人工構築物等の構成要素に割り当て、これに基づいた設計要件を策定するという方法、埋設後長期の不確定要素を踏まえた安全評価手法、埋設済みの廃棄物の回収可能性に関する取り組みに関して詳細な調査を行い、整理した。
- ・ スイスについては、長期閉じ込めと環境への放出の緩和という安全機能に対応する設計要件、レファレンスケースをベースにした様々な安全評価シナリオ、回収可能性とモニタリングの規制側の要件に関して詳細な調査を行い、整理した。
- ・ 米国については、規制文書と事業者による申請書が整っているユッカマウンテン処分場について、詳細に調査・分析するとともに、既に操業を行っている地層処分場である WIPP の放射性廃棄物の受入れ基準について整理した。
- ・ カナダについては、近年改正された規制文書の新旧の比較を行うとともに、事業者が作成した堆積岩と結晶質岩を対象としたセーフティケースにおける、特に長期安全性の評価について、岩種による違いを比較、整理した。
- ・ 英国については、特に放射性廃棄物の受入れ基準について、規制基準を整理するとともに、これに基づいて現在事業者が作成している予備的な受入れ基準である「廃棄物パッケージ仕様書」、及び廃棄物パッケージが処分可能であることを保証するために開発された「処分可能性評価プロセス」について調査を行い、整理した。

3. 今後の展開

今後は諸外国の情報に基づいて、我が国の地層処分における事業者としての考え方を整理していく。また、これまでに得られた情報を各国の規制基準や事業の進展に伴って更新するとともに、知識ベースとして整備していく。

	2020年度		2021年度		2022年度	
	国別規制調査	立地要件	国別規制調査	施設設計要件	国別規制調査	・安全評価 ・放射線防護
フィンランド	○	○		○		○
スウェーデン	○	○		○		○
フランス		○	○	○		○
スイス		○	○	○		○
英国		○	○	○		○
ドイツ		○		○		○
米国		○		○	○	○
カナダ		○		○	○	○
韓国		○		○		○

図 1 3 か年の年度展開と 2022 年度に調査対象とした項目

2.4.3 セーフティケースのコミュニケーションに関する検討

古崎 敦也 高橋 美昭

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

地層処分のセーフティケース (Safety Case) は、好ましい地質環境を選定し、これに適合するように適切に設計された処分場が、その建設・操業・閉鎖の期間とともに閉鎖後の長期間にわたって、放射性廃棄物を人間の生活環境から安全に隔離し閉じ込めることを説明するものである (例えば OECD/NEA, 2013)。セーフティケースは様々な学術分野の多岐にわたる膨大な情報、データ、知識を統合して作成され、全体像を把握することは地層処分に深く関わっている技術的専門家にとっても容易ではない。特に、セーフティケースの中核をなす処分場の閉鎖後長期の安全性に関する議論については、時間的・空間的な予測に関わる独特の方法論 (性能評価あるいは安全評価) が用いられ、科学技術的な知識とともに、安全性を判断するという作業プロセスについて理解することが必要となる。また、地層処分の安全評価という文脈で使用される概念や専門用語には、他の科学技術分野では用いられない、あるいは意味合いが異なるものもあり、これらに起因して専門家間でもすれ違いや誤解が生じ、セーフティケースに関するコミュニケーションや議論を行うことが困難となる場合もある。

セーフティケースは、技術的な専門家間だけの議論にとどまらず、社会が地層処分の安全性について理解し、この事業を進めるうえで必要な判断を行うための材料としても重要であることから、これを活用して技術的専門家以外の様々なステークホルダーといかにコミュニケーションを進めるかは国際的にも大きな課題となっている (例えば OECD/NEA, 2017)。この課題を解決するためにも、一般の方々の認知に大きな影響力を持つ専門家間でセーフティケースに係る概念や用語について、共通的な理解を得る必要がある。

以上のような背景から、セーフティケースに関するコミュニケーションにおいて、異なる学術分野の専門家間で生じやすい理解のギャップを明らかにするとともに、これを解消するための方法等について検討を行っている。具体的には、サイトが特定されていない段階のセーフティケースとして作成した包括的技術報告書 (NUMO, 2021) に対し、NUMO が原子力学会に依頼して実施した外部レビュー (原子力学会, 2019) における議論の過程などを分析した。このレビューにおいては、レビューに携わる技術的専門家がそれぞれの専門分野における理解のギャップを解消しつつ、レビューの結果が統合的な報告書として取りまとめられており、この議論の過程を分析することでセーフティケースに関するコミュニケーションの改善に資することが期待できる。

検討にあたっては、原子力学会内に上記のレビューに携わった技術的専門家や、科学技術社会学、言語学の専門家からなる「地層処分のセーフティケースに係る様々なステークホルダーを対象とした理解促進に関する方法の検討特別専門委員会」(表 1: 以下、「委員会」という) を設置していただき、様々な学術分野の専門家と協働して取り組んでいる (設置期間: 2021 年 9 月~2024 年 3 月)。

2. 主な成果

これまでの検討において、地層処分のセーフティケースを構成する語彙に関連して専門家間の理解のギャップが生じている、あるいは生じる可能性があると考えられる用語・概念を網羅的に挙げ、そ

の要因を類型化した。その中から代表的なものを選定し、まずIAEAなどの国際的な機関の定義に基づく説明から出発し、異なる専門分野の委員間での議論を通じてギャップが生じる点を特定、これを解消するために必要と考えられる説明を加えて再度ギャップを特定し、解消するためにさらに説明を加えるというプロセスを、委員間でギャップがなくなったと考えられるまで繰り返し、必要と考えられる説明の全体像を把握する作業を行った。この方法に基づき、「閉じ込めと隔離」、「地質環境」、「セーフティケース」及び「安全評価」の4つの語について、歴史的背景や意味の解説及びコミュニケーション上の配慮事項等を「語彙基盤」としてまとめた。地層処分と比較的接点の少ない専門家や言語学、科学技術社会学の専門家を含む委員会の議論に基づいて、様々な学術分野の専門家の視点を考慮して取りまとめた「語彙基盤」は、地層処分に深く関わっている専門家では考えが及ばない指摘も含まれており、様々なステークホルダーとのコミュニケーションに資するものと考えられる。さらに、2022年度には委員以外の物理探査、放射線技術学・放射線教育、原子力工学、公共政策の専門家を招聘し、ギャップの特定と解消に資する議論を発展させることで、「語彙基盤」を改良した。

「語彙基盤」には、様々なステークホルダーとのコミュニケーションを想定し、以下のような階層的な整理によって詳細化した解説※1と、説明における留意点※2を記載している。

- ・まずこれだけは：ごく簡潔に、最低限の定義記載を中心とした説明
- ・少し詳しく：丁寧にきちんと伝えるための説明
- ・さらに詳しく：時間をかけてゆっくりと読み込む際の説明
- ・ここに注意：一般的なイメージ、誤解、他分野での使われ方等の説明
- ・相互理解を進めるために：専門家でない方へ説明する際の留意点・心構え

3. 今後の展開

2023年度は委員会の設置最終年度であり、成果の取りまとめを念頭に置きつつ、ギャップの解消に向けた議論を委員会において継続する。さらに地層処分になじみの薄い専門家や学生が集う場において「語彙基盤」の有効性を確認するための試行を実践し、更なる改良を目指す。なお、「語彙基盤」を含む委員会での検討成果及び議論の結果等については、委員会設置期間終了後に原子力学会より公表される予定となっている。

表1 地層処分のセーフティケースに係る様々なステークホルダーを対象とした理解促進に関する方法の検討特別専門委員会委員

2023年3月現在

	氏名	所属・役職
主査	佐々木隆之	京都大学 工学研究科 原子核工学専攻 教授
幹事	若杉圭一郎	東海大学 工学部 応用化学科 教授
委員	小林大志	京都大学 工学研究科 原子核工学専攻 准教授
〃	小山倫史	関西大学 社会安全学部 教授
〃	寿楽浩太	東京電機大学 工学部 人間科学系列 教授
〃	田中牧郎	明治大学 国際日本学部 教授
〃	半井健一郎	広島大学 先進理工系科学研究科 教授
〃	廣野哲朗	大阪公立大学 理学研究科 地球学専攻 教授
〃	松島潤	東京大学 新領域創成科学研究科 環境システム学専攻 教授
〃	安江健一	富山大学 都市デザイン学部 地球システム科学科 准教授

参考文献

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.

OECD/NEA (2013) : The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories,
NEA/RWM/R(2013)1.

OECD/NEA (2017) : Communication on the Safety Case for a Deep Geological Repository, NEA No.7336.

第3章 おわりに

地層処分事業の技術開発を継続的に進めるため、本書では「技術開発成果概要 2021」に続き、NUMO が 2022 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 (2.4.3 参照)。

2022 年度は、国の全体計画 (平成 30 年度～令和 4 年度) 及び NUMO の中期技術開発計画 (2018 年度～2022 年度) の最終年度 (5 年目) であり、当該年度の成果は 2023 年度以降の国の全体計画 (令和 5 年度～令和 9 年度) や NUMO の中期技術開発計画 (2023 年度～2027 年度) に反映されるとともに、具体的な技術開発の取組みに引き継がれる。

NUMO は、今後も関係研究機関や大学や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行く。

原子力発電環境整備機構
(略称：原環機構)

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)