

技術開発成果概要 2021

2023 年 3 月
原子力発電環境整備機構

2023年3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) 2023

技術開発成果概要 2021

2023 年 3 月
原子力発電環境整備機構

目次

第1章	はじめに	1
第2章	技術開発成果の概要	4
2.1	地層処分に適した地質環境を選定するための調査・評価技術及び地質環境特性のモデル化技術の高度化	4
2.1.1	四次元地質環境モデルの構築技術の整備	5
2.1.2	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	8
2.1.3	ボーリング孔の閉塞技術に関する検討	11
2.1.4	地質環境調査によって取得するデータの管理	15
2.1.5	深部流体の流入による地層処分の安全性への影響に関する情報の収集・整理	18
2.2	安全な地層処分場の工学的実現性の向上に向けた設計と工学技術の体系的な整備	20
2.2.1	処分容器の耐食性評価	21
2.2.2	高温条件を考慮したベントナイトの諸特性に関する検討	23
2.2.3	緩衝材中の微生物活性に関する試験研究	26
2.2.4	TRU等廃棄物の回収技術の開発	29
2.2.5	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	32
2.2.6	オーバーパックの製作技術の開発	35
2.2.7	アクセス坑道内搬送システムの安全設計	39
2.2.8	遠隔操作化・自動化技術の地層処分事業への適用性検討	41
2.2.9	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	43
2.2.10	地下施設レイアウトオプションの検討	48
2.2.11	スウェーデン・キルナ鉱山における鉄-ベントナイト相互作用に関するナチュラルアナログ研究	51
2.3	閉鎖後長期の安全性評価に関する技術の高度化	54
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	55
2.3.2	ベントナイトコロイドによる核種移行に関する評価モデルの高度化	58
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	62
2.3.4	ガラス固化体の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	65
2.3.5	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	68

2.3.6	閉鎖後長期の安全評価に関わる安全評価情報管理ツールの設計とプロトタイプの試作	72
2.3.7	セメント系材料内を対象とした核種移行解析モデルの高度化	74
2.3.8	地下水流動・物質移行モデルの妥当性評価に係る方法論の整備	78
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	81
2.3.10	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	85
2.3.11	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	88
2.3.12	様々な地表環境を想定した生活圏評価に係るデータの拡充	90
2.3.13	土壌分配係数の取得手順書の外部レビューの実施	93
2.4	技術マネジメント	95
2.4.1	セーフティケースのコミュニケーションに関する検討	96
2.4.2	知識ベースの整備と知識マネジメントシステムの検討	99
2.4.3	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	103
第3章	おわりに	105

第1章 はじめに

わが国における地層処分技術の開発は、国及び関係研究機関が進める研究開発とその成果等を取り入れて地層処分実施主体である原子力発電環境整備機構（以下、「NUMO」という）が実施する技術開発によるものであり、5年ごとにわ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」（現行の計画期間は平成30年度～令和4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「地層処分の技術開発計画」（現行の計画期間は2018年度～2022年度、以下、「中期技術開発計画」という）を作成し、これに沿って国や関係研究機関との適切な役割分担と協力のもと、国内外の関係研究機関、大学、及び海外の地層処分実施主体との共同研究や地下研究施設を活用した国際共同プロジェクト等への参画、国内の産業界への委託を通じ、最終処分事業の安全な実施、経済性及び効率性の向上等を目的とする技術開発を進めている。

このようにNUMOは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きた。その成果として、2018年11月にNUMOは、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わが国として初めて「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—」（レビュー版）と題する技術報告書（以下、「包括的技術報告書」という）を取りまとめた。包括的技術報告書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、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。同報告書の技術的妥当性や技術的信頼性について更に国際社会に向けて英語版を公開するとともに、国際機関である経済協力開発機構／原子力機関（以下、「OECD/NEA」という）に国際レビューを依頼し、2023年1月にOECD/NEAよりレビュー結果を取りまとめた報告書³が公表されている。

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専門技術三分野（「2.1 地層処分に適した地質環境を選定するための調査・評価技術及び地質環境特性のモデル化技術の高度化」、「2.2 安全な地層処分場の工学的実現性の向上に向けた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評価に関する技術の高度化」）及び「2.4 技術マネジメント」の計四分野に対し、個々の取組みとして詳細化している。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、それらの成果を中期技術開発計画の最終年度（現行の計画では2022年度）までに統合して地層処分の安全な実施というレベルで反映するのか、見える化しながら取り組んでいる（図1）。

NUMOが行った技術開発成果は、上記の包括的技術報告書や個別の技術報告書（NUMO-TR シ

¹ 日本原子力学会ホームページ (https://www.aesj.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)

リーズ) に反映または取りまとめるほか、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、広く国内外社会に発信するものとなる。本書は、こうした情報発信の一環として、地層処分にかか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、この先セーフティケースへ統合されていく技術情報であることを前提として上記の四分野における技術開発の現状や動向を把握していただくため、2021 年度までの成果を速報として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。

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、多大なご尽力とご支援をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表す。

(編集：竹野竜平，高橋美昭)

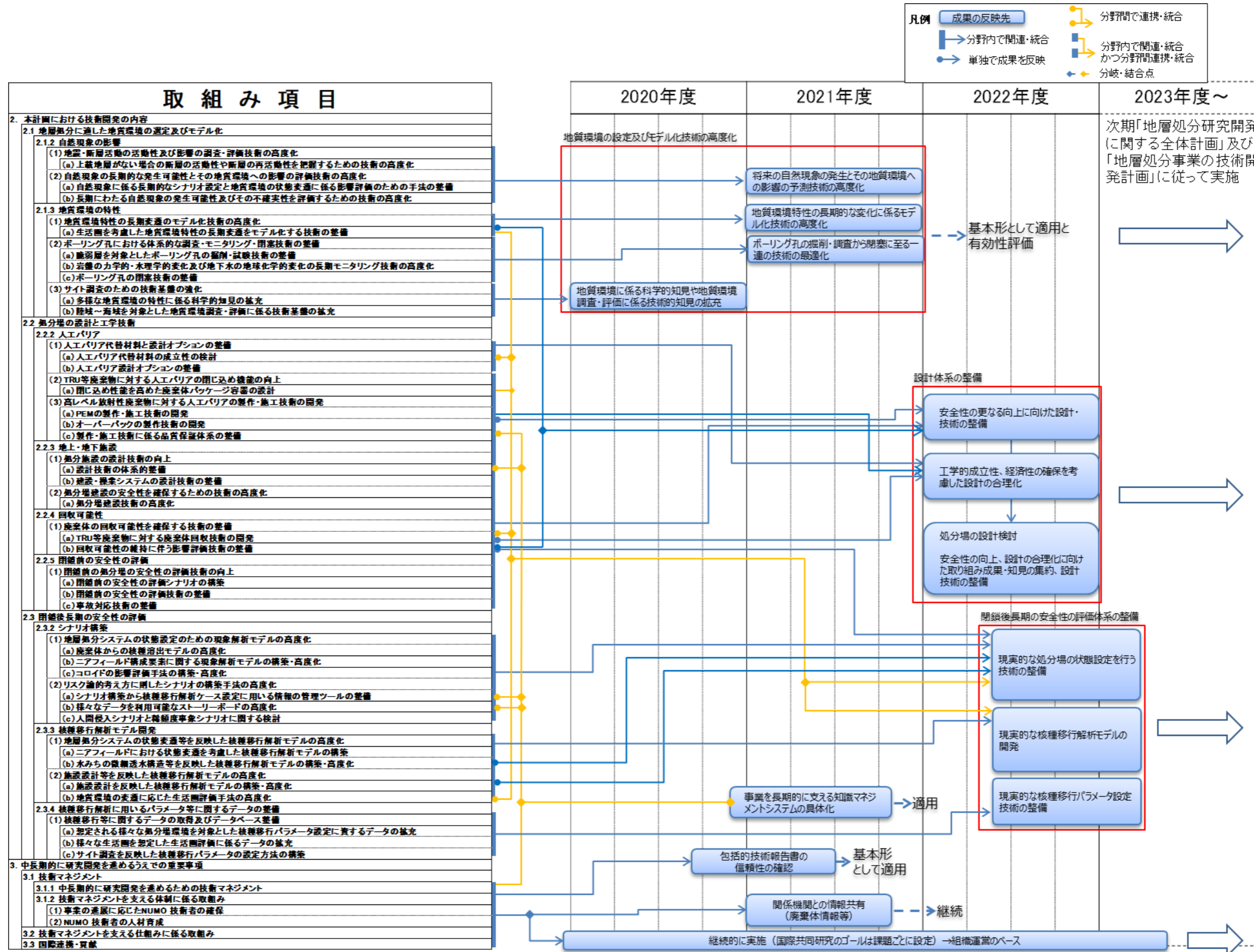


図 1 中期技術開発計画における各取組みの相互関係図

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・評価技術及び地質環境特性のモデル化技術の高度化

地層処分に適した地質環境を的確に選定するため、地質環境の調査・評価技術の信頼性を一層向上させる観点から、断層の活動性や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、サイト調査を的確に実施するための大深度のボーリング孔による調査技術・モニタリング、ボーリング孔の閉鎖に関する技術の体系的な整備に継続して取り組んだ。

具体的には、地震に伴う断層及び断層破砕帯における水理・力学挙動に関する解析技術の妥当性を、米国サンアンドレアス断層を対象とした原位置試験を通じて確認し、必要に応じて改良するローレンス・バークレー国立研究所（米国）（LBNL）との共同研究の計画策定等の作業を協働で実施し、解析対象となる領域のモデル構築に必要な情報を整理するとともに、原位置試験の計画策定や管理に係る知見を取得した。地表から地下深部の地質環境特性の長期変遷について、河川水系の変遷を伴う広域的な地形変化を考慮した検討を通じて、モデルを構築し解析を行う作業において着目すべき点や、解析条件設定時等に留意すべき点を整理するなどして、そのための技術の整備に取り組んだ。

また、実際のサイト調査を見据えて、わ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、電力中央研究所との共同研究による大深度ボーリング実証試験を通じて、掘削、孔内試験、室内試験等による調査・評価技術の品質管理の実践に取り組んだ。例えば、孔内試験時の試験装置のトラブルへの対処を通じて、トラブル発生時の柔軟かつ迅速な対処方法やデータの適切な品質管理計画への反映方法に関する知見を蓄積した。さらに、放射性廃棄物管理共同組合（スイス）（以下、「Nagra」という）との共同研究により、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・保証手法について、Nagraの手法との比較評価を通じて、概要調査に向けた室内試験の品質管理・保証に関する知見を拡充した。

加えて、ボーリング孔閉塞技術に関わる国際共同プロジェクト（Nagra-RWM（廃棄物管理会社（英国））共同研究）に参画し、閉塞材の原位置での性能確認試験の準備を進めるとともに、適用性・有効性に関する知見の蓄積を図った。

また、わが国における多様な地質環境の特性に係る科学的知見を拡充するため、付加体堆積岩類（先新第三紀堆積岩類）を対象とした原位置試験や室内試験の結果とあわせて、安全・品質管理に関する経験やノウハウ事例の取りまとめを進めた。

四次元地質環境モデルの構築技術の整備

尾上 博則 松岡 稔幸 高畑 祐美 高林 佑灯 守屋 俊文 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。このモデル化では、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イス（GBI）までの地質環境特性の状態変遷や 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・海水準変動等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ための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）。

2020 年度までの三年間、気候・海水準変動を考慮した将来の地質環境のふるまいを記述するための時間断面の設定や、岩種ごとに整理した隆起・侵食などに関するデータに基づく地形変化を考慮したモデル化に係る考え方・手順などを検討し、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に対し、四次元地質環境モデルを構築した。また、構築した四次元地質環境モデルを用いて地質環境特性の状態変遷を推定するための地下水流動・物質移行解析を実施し、地下施設の設置可能領域の選定やストーリーボード（地層処分システムの状態変遷に応じた安全機能の働き方等を表現するもの）の作成といった処分場の設計及び安全評価に反映するための情報の整理を試みている。こうした情報の整理にあたっては、地形の起伏や地質構造の不均質性を考慮して領域を細分化することが有効といった考え方を明らかにした。

2. 2021 年度の主な成果

これまでに蓄積した技術的知見に基づき、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対象とした検討を進めている。以下に、2021 年度に実施した検討の主な成果を取りまとめる。

2.1 河川水系の変遷を伴う広域的な地形変化を考慮した検討

三岩種が混在する仮想領域（80km×140km）を対象として、断層運動によって形成された山地（隆起量：最大 900m/百万年）による一級河川規模の河川水系の変遷を考慮した、現在から将来 100 万年間の地形・地質構造モデルを構築し（図 2）、10 万年程度の周期で繰り返す気候・海水準変動による境界条件の連続的な変化を考慮した非定常状態における地下水流動・物質移

行解析を実施した。その結果から、断層運動によって形成された山地の周辺における地下水の移行経路がより顕著な影響を受けるといった、河川水系の変遷が地下深部の水理場や化学場に与える影響の傾向や程度を明らかにするとともに、これまでの検討で蓄積した四次元地質環境モデルの構築手法をより複雑な地質環境の変遷に適用できるように拡張した。

2.2 設計・安全評価への反映に係る検討

事例検討として、先新第三紀堆積岩類の四次元地質環境モデルを用いた地下水流動解析・物質移行解析により、地下施設の設置可能領域から GBI までの範囲における水理場・化学場の状態変遷及びその不確実性を明らかにし、地下施設の設置領域の選定や、海水準変動に伴う海退期と海進期ごとの地下水の移行時間及び淡水・塩水環境の時間変化などのストーリーボード作成に必要な情報を整理した。

3. 今後の展開

中期技術開発計画の最終年度である 2022 年度は、以下の点について取り組む。

- ・ 河川水系の変遷を考慮した四次元地質環境モデルを用いて、処分場の設計や安全評価に提供する情報整理に係る技術的知見を蓄積する。
- ・ 四次元地質環境モデルの構築に必要な現在の地質環境特性とその変遷に関する情報やデータ、モデル化・解析結果との比較に用いる地球化学特性情報に係るデータが蓄積されている地域を対象として、過去から現在にかけての地質環境特性の状態変遷を考慮した四次元地質環境モデルの構築及びその結果と実測値との比較を実施し、四次元地質環境モデルの構築技術の妥当性を事例的に検討する。
- ・ これまでの検討で得られた技術的知見を統合し、特定のサイトを対象とした、より現実的な処分場の設計や安全評価に反映するための四次元地質環境モデルの構築に必要なデータや調査項目、モデル構築の際に着目すべき点や留意事項を含む作業手順等を体系的な方法論として整理する。

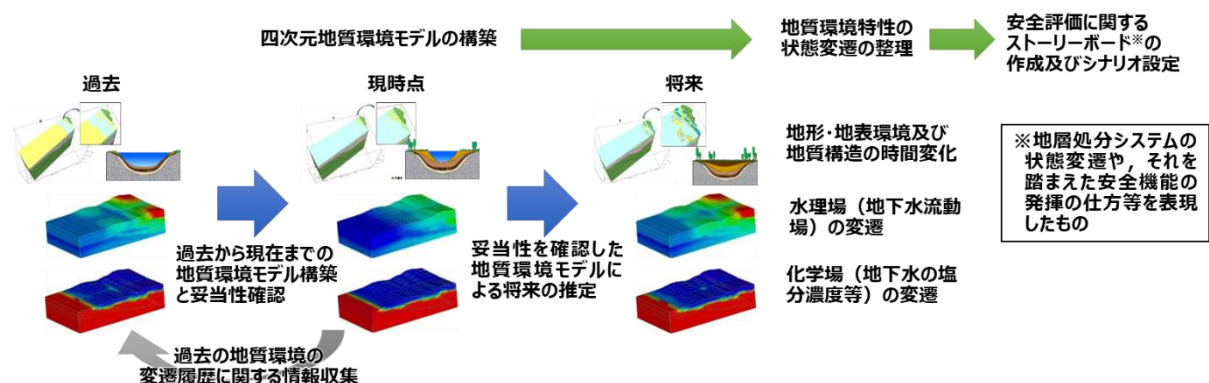


図 1 地質環境特性の長期変遷のモデル化イメージ

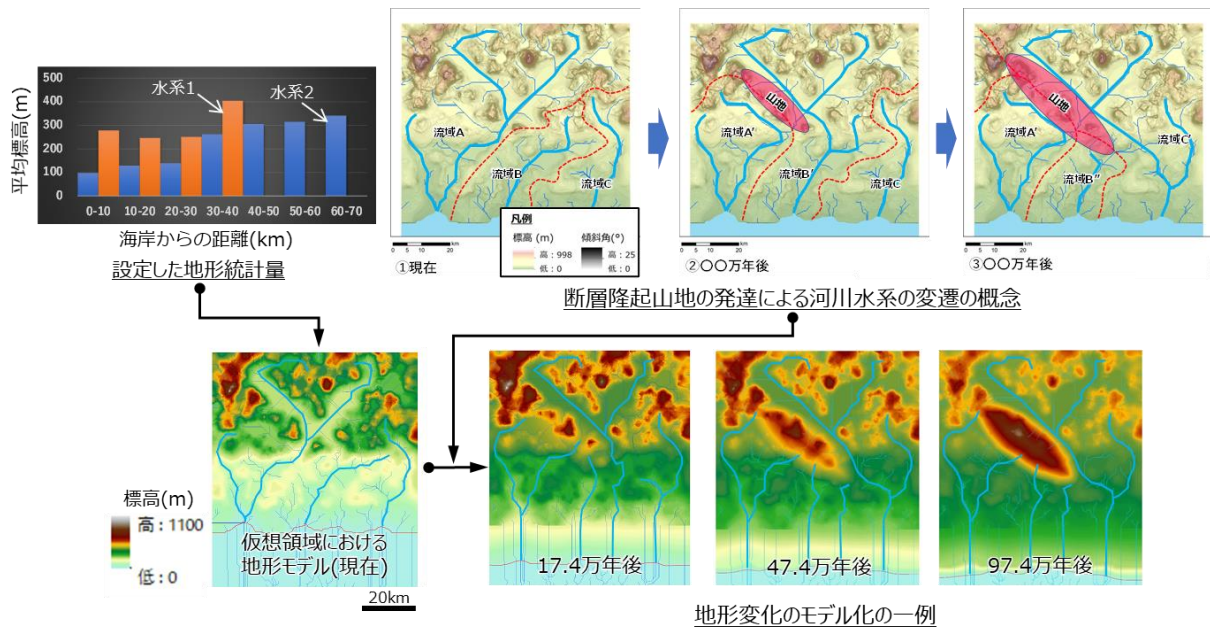


図 2 河川水系の変遷を考慮した地形モデルの構築結果

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.

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

松岡 稔幸¹ 國丸 貴紀¹ 西尾 光¹ 大城 遥一¹ VOMVORIS Stratis² PECHSTEIN Armin²
REINICKE Andreas²

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

電力中央研究所（以下、「電中研」という）横須賀地区におけるボーリング実証試験では、幌延及び瑞浪における地質環境調査の事例並びに海外のサイト調査事例で蓄積された知見等を参考に選択・適用した調査・評価技術を用いて、品質保証された地質環境データ（地質構造、透水係数、地下水水質等）を取得するための品質管理・品質保証プロセスの構築を進めてきた。

これまでに放射性廃棄物管理共同組合（スイス）（以下、「Nagra」という）との共同研究を通じて、ボーリング調査における掘削泥水の選択やボーリング調査の一環である各種検層、原位置試験等による物性値の把握に係る品質管理上重要な知見の収集・蓄積を行ってきた。2020年度からは、電中研横須賀地区及び神流川発電所において実施したボーリング実証試験で取得したコア試料を用いた岩盤基質（マトリクス）に関する力学及び水理特性に関する室内試験を対象に、Nagra がサイト選定における大深度ボーリング調査で適用している室内試験手法と電中研との共同研究及び NUMO で実施したそれとの比較を通じて、室内試験の手順や品質管理・品質保証手法を最適化するための技術的知見を拡充した。また、Nagra による技術支援を受けて、膨潤性を有する地層を対象とした水理試験方法に関する技術的知見を取得した。

2. 主な成果

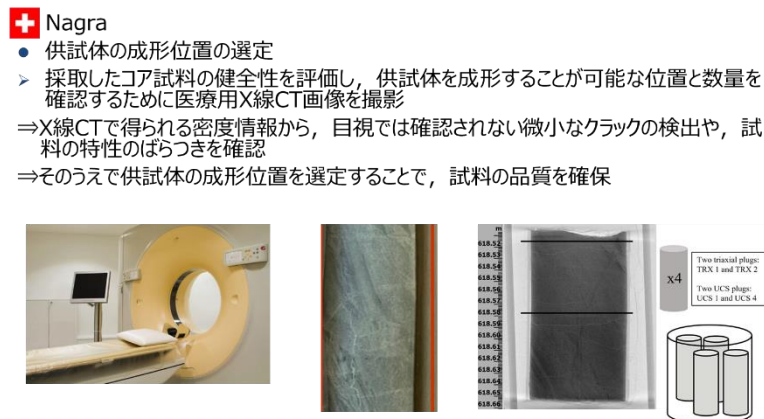
室内試験に供するコア試料の選定基準として、「各岩相を代表するコア試料を選定する（実際の地質状況を考慮しない、一定間隔での機械的な採取は行わない）こと」、「粒度、鉱物、堆積構造などの岩石学的な観点から均質であること」及び「亀裂がないこと」については、Nagra と NUMO とで同様の基準を有することを確認した（図 1）。

一方で、Nagra の大深度ボーリング調査プログラムでは、品質管理・品質保証の観点から、ボーリングコアの回収時点から生じる乾燥や溶存ガスの放出を避け、コアを原位置に近い状態に保持するために、事前に各室内試験に供するコア試料採取計画と試験の優先順位を明確化するとともに、現場で回収されたボーリングコアの状態に応じてコア試験への適合性を迅速に判断が可能な体制を構築し、ボーリングコアの回収から室内試験に用いるコア試料の選定・保存までに必要な時間を短縮化することに取り組んでいる（図 1）。

- | | |
|--|--|
| <p style="text-align: center;">● NUMO</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ コア試料は、 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 各岩相を代表するコア試料を選定する（実際の地質状況を考慮しない、一定間隔での機械的な採取は行わない） ➢ 粒度、鉱物、堆積構造などの岩石学的な観点から、均質である ➢ 円柱状のコア試料で亀裂がない ➢ 飽和している（回収したボーリングコアをコア箱に入れて、クロスで保護するとともに、霧吹きで保湿して、コア試料採取までの乾燥を防ぐ） | <p style="text-align: center;">+ Nagra</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ コア試料は、 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 各岩相を代表するコア試料を選定する（実際の地質状況を考慮しない、一定間隔での機械的な採取は行わない） ➢ 粒度、鉱物、堆積構造などの岩石学的な観点から、均質である ➢ コア試料の直径が85mmを超え、亀裂がない ➢ 飽和している（コア試料の乾燥と溶存ガスの放出は、ボーリングコアを原位置から回収した時点で始まるため、ボーリングコア回収後、迅速にコア試料を選定・保存） ■ 事前の各試験に供するコア試料採取計画とその優先順位の明確化及び現場でのボーリングコアの状態に応じたコア試料の適合性の迅速な判断が可能な体制 |
|--|--|
- 室内試験用のコア試料の選定基準は、NUMO・Nagraで概ね共通
 - **Nagraではボーリングコアの回収時の状態を維持し、可能な限り原位置での物性を取得するために、ボーリングコアの回収からコア試料の選定・保存までの経過時間を短縮するための取り組みを実施**

図 1 室内試験に供するコア試料の選定基準と保存に係る比較
(赤字：NUMO と Nagra で異なる点)

また、Nagra では、採取したコア試料の健全性を評価するために医療用 X 線 CT 画像を活用しており、それにより試験供試体の品質管理が行われている（図 2）。



Nagraによる横須賀コア試料のX線CT画像を用いた供試体（Φ25mm×50mm）の成形位置の選定

図 2 Nagra による X 線 CT 画像による供試体成形位置の選定

力学試験（三軸圧縮試験）については、Nagra は粘土質のコア試料の特性を考慮した試験手法を開発し、これは、スイス規制機関に承認されている。Nagra による試験の載荷速度（圧密係数から算定）は、地盤工学会基準に沿って設定した NUMO の載荷速度と大きく異なる（NUMO の載荷速度が大きい）ことが明らかとなった。

NUMO が実施した透気試験については、含水比試験による炉乾燥後の供試体を対象としているが、Nagra は、この方法では、炉乾燥が供試体に不可逆的な変形を誘発し、透気試験に影響している可能性があることを示唆した。

Nagra では、膨潤性を有するオパリナス粘土を対象とした水理試験前の掘削泥水の置換方法や水理試験方法の技術開発を実施してきた。NUMO が電中研横須賀地区で膨潤性を有する葉山層群を対象とした水理試験方法については、Nagra からの技術支援を受けつつ、この技術を適用することによって、膨潤性を有する地層を対象とした水理試験を実施することができた。

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これらの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する。さらに、室内試験のうち、拡散特性に関する室内試験（拡散試験）に着目して、Nagra との共同研究により、手順や品質管理・品質保証手法に係る知見を拡充し、概要調査開始までに品質管理の体系を構築する。

ボーリング孔の閉塞技術に関する検討

國丸 貴紀 西尾 光 大城 遥一

原子力発電環境整備機構

1. 背景

近年、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（以下、「SKB」という）及びポシヴァ社（フィンランド）（以下、「Posiva」という）では、サイト調査において地上から掘削したボーリング孔の一部が地下施設の建設領域に近接することから、ボーリング孔が地下水や核種などの短絡経路となる可能性があり、これらのボーリング孔を確実に閉塞することが、事業を進める上で喫緊の課題となっている。また、これらのボーリング孔は、地下施設建設への影響だけでなく、サイト調査中に掘削したボーリング孔が異なる水理特性を有する地質構造を連結させ、地下水流動場に影響を及ぼすことなども想定され、サイト調査の早い段階からボーリング孔の閉塞技術が必要となる可能性が指摘されている。このような背景から SKB 及び Posiva に加え、放射性廃棄物管理共同組合（スイス）（以下、「Nagra」という）、放射性廃棄物管理機関（ANDRA, フランス）、原子力廃棄物サービス（NWS, 英国）などにおいて、SKB が検討したベントナイト、セメント、礫や砂などの閉塞材をサンドイッチ状に設置する概念（図 1）に基づき、ボーリング孔の閉塞に係る技術開発が進められている。

2. 目的

国際的に検討が進められているボーリング孔の閉塞方法の概念（図 1）を参考に、本検討では、わが国における深層ボーリング孔に適応可能なボーリング孔の閉塞技術を構築するために、閉塞用材料として計画している国産のベントナイト（クニゲル V1）のペレット及び水中不分離性のセメント系材料（普通セメントや低アルカリセメントなど）の特性を把握し、ボーリング孔の閉塞材としての有効性や適用性を確認する。また、地下水に満たされたボーリング孔内に閉塞材を運搬する装置、及び金属プラグ（ブリッジプラグ）に関する技術の整備を進めるものである。

3. 主な成果

(1) 閉塞材の特性把握

① ベントナイトペレットに関する特性データ取得

国産の Na 型ベントナイト（クニゲル V1）を原料に、粒径が異なるベントナイトペレットを製造し、各ベントナイトペレットの乾燥密度、単位体積当たりの充填性、膨潤性、透水性などに係る特性を把握した。例えば、単位体積当たりの充填性（充填密度）や通水する水質（イオン交換水及び人工海水）を変えた透水試験を 13 試験（同じケース含む）実施し、 $7.8 \times 10^{-13} \sim 2.5 \times 10^{-10}$ m/s といった透水係数が得られた。これにより、ボーリング孔の閉塞に必要な国産ベントナイトを原料としたペレットの有効性・適用性を確認した。

② セメント系材料の物性データ取得

普通ポルトランドセメント（OPC）及び低アルカリ性のシェイクセメント N（SHCN）を対象に、OPC には水中不分離性に必要な材料を添加し、SHCN はそれ自体が水中不分離性を有することからそのまま試験に供した。試験は、実際のボーリング孔内の状況を考慮して水中不分離性コンクリートとした OPC 及び SHCN を異なる温度や高水圧（10MPa 程度）の水中で打設・養生を行い、硬化後の物理特性や化学特性などを把握した。

OPC については、養生温度が 40°C までは初期強度が増大して長期強度が低下する傾向が認められた。一方で 60°C では 20°C の供試体と比較して初期強度が増大したものの長期強度は緩やかに増進する傾向を示した。80°C についての初期強度は、20°C のそれと同程度であり、その後緩やかに強度が増進する傾向を示した。また、10 MPa の圧力をかけて養生した供試体の圧縮強度は、圧力をかけないものと比較して各養生期間において 2~4N/mm² 程度大きかった（図 2 及び図 3）。

SHCN については、養生温度 40°C~80°C の場合は 20°C と比較して初期強度、長期強度ともに低下した。また、60°C 及び 80°C の高温環境下においては、養生期間が 28 日から 91 日までの強度増加が 20°C 及び 40°C の環境と比較して大きかった（図 4 及び図 5）。

また、他の物性については、セメントの種類による鉱物組成への温度依存性や、10 MPa 程度の高水圧環境などがセメント系材料の基本的な物性に及ぼす影響が少ないことを確認した。

③ ベントナイトペレットとセメント系材料の接触面における相互作用

ボーリング孔を模擬した内径 180 mm の試験セルを準備し、ベントナイトペレットとセメント系材料（水中不分離性 OPC 及び SHCN）とが接するように充填し、セメント系材料や水質の違いによるベントナイトペレットの化学的変化を確認した。EPMA 分析の結果、OPC とベントナイトとの境界面からベントナイト側の 2~3 mm の範囲において CaO 濃度が高くなっており（図 6）、SHCN とベントナイトとの境界面ではほとんど変化が無いことが分かる（図 7）。

④ グリムゼル岩盤試験サイト（GTS）におけるベントナイトペレットの性能試験の準備

クニゲル VI を材料とするベントナイトペレットの膨潤性及び透水性については、室内試験結果により充填密度から所期の目標を達成できることが確認された。そこで、このベントナイトペレットを所定の充填密度にして、実際の岩盤でも同様の性能を確保できることを確認するために、過去に Nagra がグリムゼル岩盤試験サイト（GTS）で実施した類似の試験方法を参考に、NUMO が国内のボーリング孔掘削で実施している“6-1/4”（約 160mm）のボーリング孔を掘削し、クニゲル VI を材料とするベントナイトペレットの性能を確認するための試験の準備を行った。

4. 今後の展開

クニゲル V1 のベントナイトペレット及び水中不分離性としたセメント系材料は、閉塞材として利用できる見通しを得た。一方で、閉塞材を地下深部に運搬・設置する際は、地下水圧と閉塞材を運搬する装置の内圧との差が高い条件下で閉塞材を運搬装置から投入することが必要となる。これへの対応として、閉塞材を運搬する装置内を水で満たした状態でベントナイトペレットを運搬するといった方法が考えられるため、ベントナイトペレットの膨潤を数時間抑制するためのペレット加工技術の検討を行う。

また、ボーリング孔内に適切にベントナイトペレット、金属プラグ及びセメント系材料を設置できる状況を確認するための実規模スケールの試験を行う。

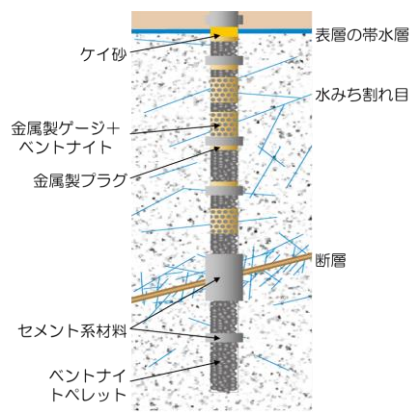


図 1 閉塞材をサンドイッチ状に設置してボーリング孔を閉塞する方法概念図 ((SKB, 2010) を基に作成)

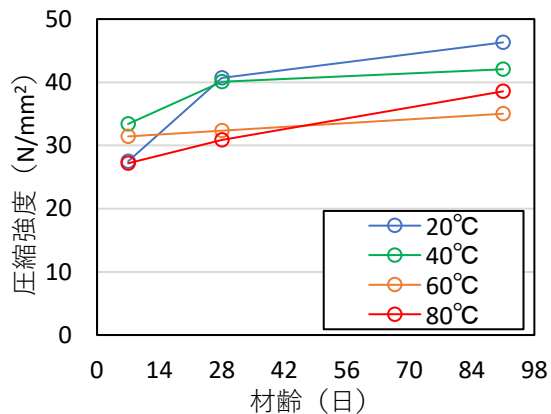


図 2 圧縮強度(水中不分離性 OPC_20, 40, 60, 80°C)

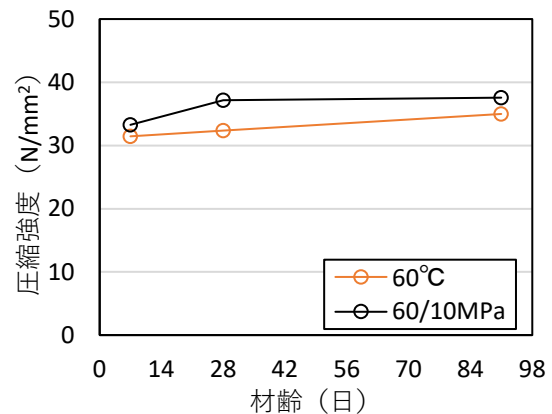


図 3 圧縮強度(水中不分離性 OPC_60°C, 60°C/10MPa)

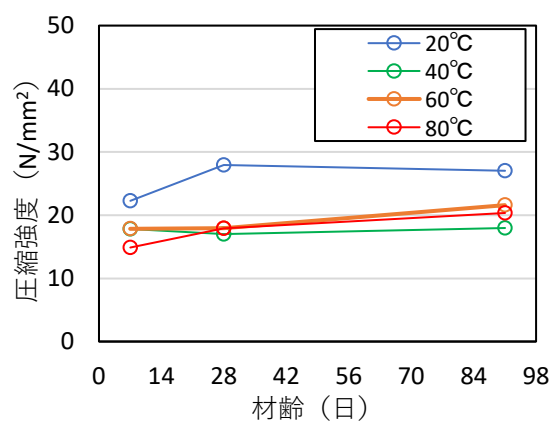


図 4 圧縮強度 (SHCN_20, 40, 60, 80°C)

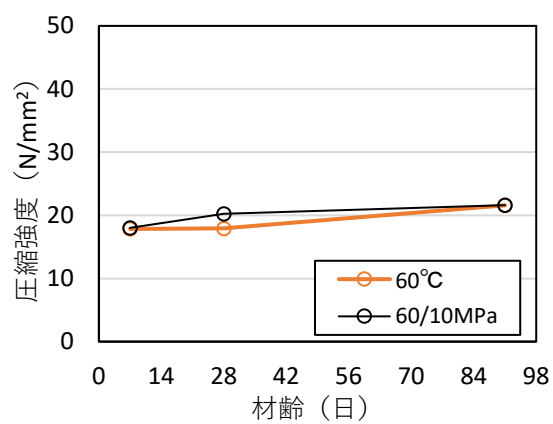


図 5 圧縮強度 (SHCN_60°C, 60°C/10MPa)

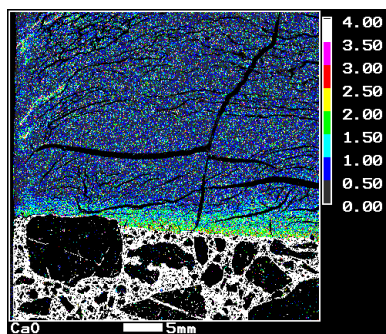


図 6 ベントナイトペレットとセメント (水中不分離性 OPC) との接触試験 (人工海水の場合)

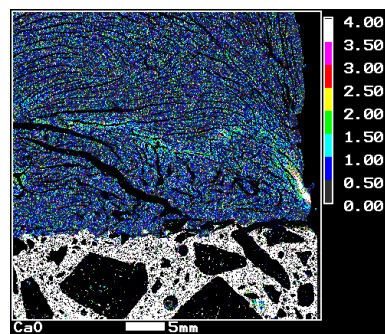


図 7 ベントナイトペレットとセメント (SHCN) との接触試験 (人工海水の場合)

参考文献

SKB (2010) : Fud-program 2010, ISSN 1104-8395, September 2010.

地質環境調査によって取得するデータの管理

西尾 光 尾上 博則 松岡 稔幸

原子力発電環境整備機構

1. 背景

地質環境調査では、地質環境モデルの構築や処分場の設計及び安全評価に用いる地質環境特性データを取得する。地質環境特性データはセーフティケースの信頼性を確保するうえで重要な要素であり、品質を保証する情報とともに、透明性や追跡性、検索性等を確保して管理される必要がある。このためには、データを管理するための考え方や運用方法を明確化した統一的なデータベースシステムを用いて一元的に管理することが有効である。

NUMOでは、2018年度から「地質環境特性データベースシステム」（以下、「DBS」という）を構築している。このDBSを用いたデータの管理を適切に実施するために、NUMOがこれまでに実施したボーリング孔掘削・試験等での経験や海外の地層処分事業の実施主体の事例を踏まえつつ、データ管理の考え方の整備を行っている。また、実際にデータ登録や検索等の作業を通じてDBSの利便性・操作性に係る課題を抽出し、システムの改良を図りつつ、さらに充実すべきデータを明らかにして技術開発に反映している。

2. 目的

① 地質環境特性データベースシステムへのデータ登録及び機能確認

包括的技術報告書（NUMO, 2021）の作成において収集した全国規模の地質環境特性データ及びNUMOが進めている技術開発において実施したボーリング孔掘削・試験等で取得したデータと、その関連情報（実施計画書等）をDBSに登録する。また、登録作業を通じてDBSの操作性・利便性に係る改善点を抽出する。

② 地質環境特性データの管理及びDBSの運用に関する検討

地質学的に日本と類似した条件が多いスイスでのサイト選定を目的とする地質環境調査において、取得したデータの管理やデータベースシステムの運用に関する技術的知見やノウハウを蓄積している放射性廃棄物管理共同組合（スイス）（以下、「Nagra」という）との共同研究を通じて、NUMOにおけるデータ管理の基本的な考え方を検討する。

3. 主な成果

① 地質環境特性データベースシステムへのデータ登録及び機能確認

- ・ 全国規模で収集した約3,300件の文献内の地質環境特性データ（約12.4万件）とともに、NUMOが電力中央研究所との共同研究で実施したボーリング孔掘削・試験等で取得した地質環境特性データとその関連情報（約1,000件）を登録し、DBSに約12.5万件のデータを格納した。
- ・ 登録作業の品質管理として、2人の作業員が入力用のファイルをそれぞれ作成・差分比

較し、数値の入力間違い等を確認・修正することで、成果品の品質を確保した。

- 物理検層結果などの大量のデータを一度に登録する場合のツールを整備し、データ登録の利便性を向上させた。また、データの検索時に該当データのリストとともに位置情報を地図上に表示・選択可能にする機能を追加し、データの空間分布の把握を容易にした(図1)。

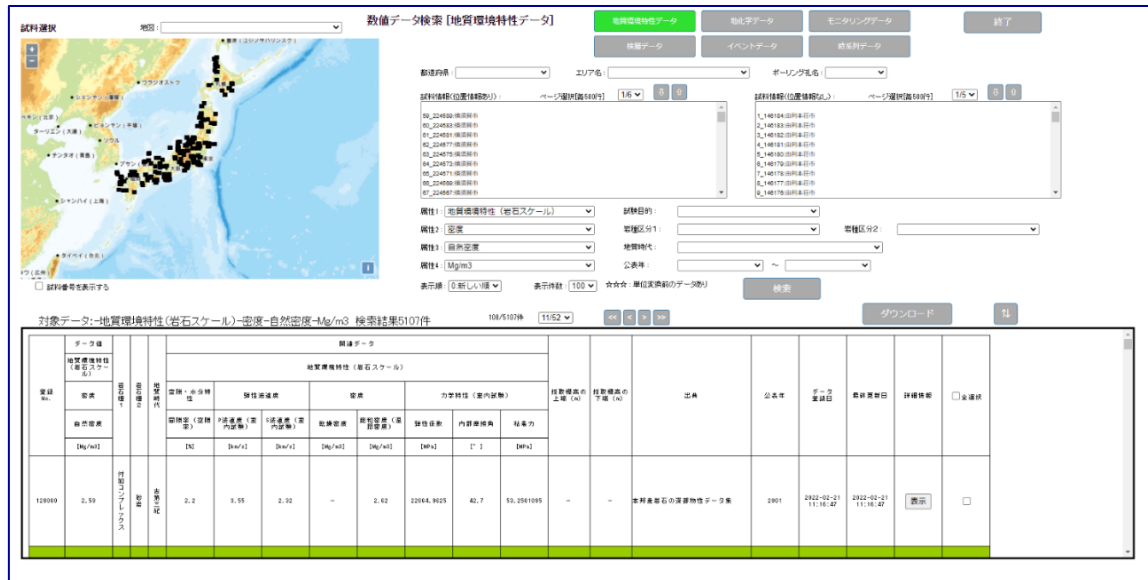


図1 地質環境特性の長期変遷のモデル化のイメージ

② 地質環境特性データの管理及びデータベースシステムの運用に関する検討

- データ管理の基本的な考え方を整備するうえで、Nagraにおける考え方(a~d)に加えて、体制やルールを整備、複数年に渡る段階的なデータベースシステムの機能拡充・改善といったNUMOのDBSの改善計画策定に参考となる情報(表1)を入手した。
 - データの追跡性や透明性、検索性を確保したデータ管理を行うため、メタデータ(データの属性情報や関連情報)を有効に活用する。
 - データ管理を継続的に実践していくため、ルールや作業手順の簡略化・合理化を図り、データの品質に影響を与える可能性のある不要な作業を最小限に抑える。
 - 最適化されたデータベースシステムを整備するためには、ユーザーの要望を取り入れつつプロトタイプテストを段階的に繰り返し実施する。
 - データベースシステムを運用したデータ管理を実践するためには、地質環境特性データに精通した技術者からなるデータ管理部門、データベースシステムの維持管理を行うIT部門を設けるなど、適切な人員配置と役割分担を設定する。また、データ管理部門は、IT部門と密接に連携する。
- データ管理の基本的な考え方として、データ管理の目標と基本方針、データ管理の対象データ、体制、ルール(データ登録方法、データフリーズとデータセットの登録方法、メタデータの区分、データの公開区分等)について整理し、案としてまとめた。

表 1 Nagra におけるデータベースシステムの段階的な整備の状況

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
フェーズ1(概念化) 要件整理・設計	■	■	■								
フェーズ2a(統合) GISデータ			■	■	■	■					
フェーズ2b(統合) 物理探査, 物理検層						■	■	■			
フェーズ2c(統合) 地質構造モデル, CADデータ							■	■			
フェーズ3(統合) 岩石室内試験データ									■	■	■
フェーズ4(統合) ボーリング調査										■	■

4. 今後の展開

今後も海外の実施主体におけるデータ管理の在り方及びデータベースシステムの運用に関する情報収集を継続し、地質環境調査及びモデル化・解析に係るデータ管理の基本的な考え方（案）の見直しを行うとともに文書化を進める。また、NUMO 自らの技術開発により得られるデータ等の登録を継続するとともに、関連研究機関で取得された地質環境特性データも含めた日本全体としてのデータ管理方法について検討を継続する。このような作業を通じて、DBS のシステム構成や機能の向上を指向し、サイト調査での運用を想定した DBS の改善計画を策定したうえで、2023 年度より改善作業に着手する。

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.

深部流体の流入による地層処分の安全性への影響に関する情報の収集・整理

浅森 浩一 後藤 淳一

原子力発電環境整備機構

1. 背景

自然現象（例えば、マグマの貫入等）に伴う地層処分システムへの著しい影響について、発生の可能性は極めて小さいが発生すれば著しい影響を与えるような事象は、一定程度以上のリスクとなるものとして安全評価の対象として考慮することを検討する必要がある。深部流体のうち、日本列島に沈み込むスラブ（プレート）やマントルを起源として、断裂系等を通じて地表付近に上昇する深部上昇水には、高温で pH が低く、炭酸化学種濃度が高いものが存在し、これらが流入する範囲では地層処分にとって好ましくない熱環境や化学場が生じる可能性がある。

しかしながら、地層処分場への深部流体の流入の可能性やその影響については、他の自然現象と比較して科学的知見が十分に得られていないことから、包括的技術報告書 (NUMO, 2021) では深部流体の流入の可能性については、サイト調査において排除するという議論に留め、具体的に安全評価上どのように取り扱うか（シナリオの作成や解析モデル・データについての検討）は今後の課題としている。

2. 目的

深部流体の流入により著しい影響を及ぼす範囲は局所的であるとも想定されるが、これに伴う地質環境の変化やその継続期間に関する情報は、現状において地層処分の安全性という観点から十分に整理されていない。このため、これまでに生じた流入の事例に関する学术论文等から、深部流体の流入に係る安全評価シナリオを検討するために必要な地質環境の変化に係る情報を抽出・整理する。

3. 2021 年度の主な成果

深部流体の流入が関与したと考えられている国内の 4 つの事例について、学术论文（国内誌及び国際誌）、研究機関報告書等から、安全評価シナリオの検討に有用な情報を抽出した。地質環境の変化に関する主な特徴は以下の通りである。

- ① 地震の発生に伴って、深部流体が関与した可能性が考えられる顕著な湧水が生じた事例が報告されており、深部流体の流入の発生は地震・断層活動との複合現象とも捉えられる。
- ② これらの事例では湧水の発生に伴った地下水化学組成の変化や水温の上昇が観測されており、その原因として断層近傍の透水性や間隙水圧の増加が推定されている。
- ③ 国内外で生じた地震の発生に伴う突発的な湧水の事例から、その継続期間は数年オーダーであるとの指摘がある。その一方で、非火山地帯において定常的に湧出する高温の温泉もみられ、周辺に比べて高温の領域の範囲（図 1）等が推定されている。
- ④ 以上のことから、深部流体の流入に係る安全評価シナリオには、水理場や熱環境等の変化

とともに、流入の継続期間や地震・断層活動との関連性についても留意が必要であると考
えらえる。

4. 今後の展開

深部流体の流入に伴う安全評価シナリオ及び発生可能性の評価に関する方法の検討や地質
環境の変化に関する情報の拡充を実施する。

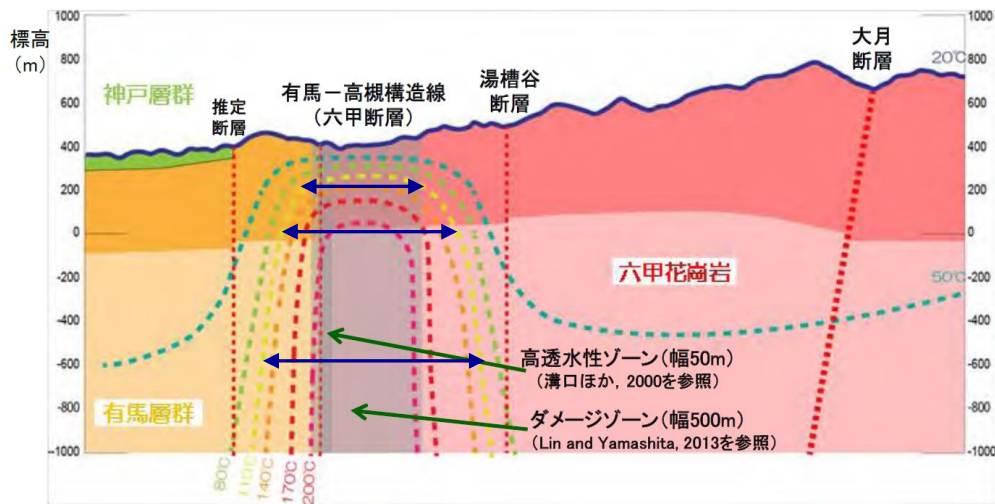


図 1 有馬温泉周辺の地下温度構造 (近藤・後藤, 2020)

参考文献

近藤浩文, 後藤淳一 (2020) : 火山性熱水・深部流体の分類に応じた影響評価手法の整備,
NUMO-TR-19-02.

NUMO (原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告 : わが国における安全な地層処
分の実現—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 安全な地層処分場の工学的実現性の向上に向けた設計と工学技術の体系的な整備

わが国の多様な地質環境特性における地層処分の安全性及び経済的合理性を更に向上させる観点から、オーバーパックや緩衝材について、代替材料の適用性や製作・施工技術の開発・改良を進めた。

オーバーパック材料については、日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という。）や大学との共同研究及び国際共同研究プロジェクト（MaCoTe（Materials Corrosion Test））を通じて、従来から行ってきた鍛鋼品の長期腐食挙動に関する科学的根拠の整備に加えて、鋳鋼品、板巻鋼管及び銅コーティング材の長期腐食挙動に関する評価検討を進めた。また、金属製処分容器の長期腐食・寿命評価技術の信頼性向上のため、金属腐食を専門分野とする腐食防食学会に検討委員会を設置していただき、長期腐食寿命評価に必要な課題の解決に向けた議論を進めるためのプラットフォームを構築した。

緩衝材については、材料となるベントナイトについて、現在の設計上の制限温度を超えた温度領域での特性変化を把握するため、100℃以上の高温による熱影響を受けた場合の透水性や膨潤性等の性能に関する試験を継続し、科学的知見の蓄積を図った。また、緩衝材中の微生物活動がオーバーパックの腐食挙動に与える影響についても、JAEA との共同研究や海外の機関との情報交換に基づいて、微生物影響評価を行うという目的に即した試験系を検討し、試験の妥当性を確認しながらデータ取得を進めることによって評価技術の整備を進めた。

TRU 等廃棄物の廃棄体パッケージについて検討を行うため、連邦放射性廃棄物機関（ドイツ）（BGE）との協定に基づいて、ドイツにおける低レベル放射性廃棄物処分容器及び容器把持部の形状に対応した定置装置に関する情報を入手し知見の蓄積を図っている。

また、高レベル放射性廃棄物や TRU 等廃棄物の搬送定置や回収の容易性を向上させるという観点から、PEM 方式の工学的成立性について、廃棄物の回収手順及び回収技術の検討を進めた。

さらに、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組みである経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）の EGRRS（Expert Group on the Application of Robotics and Remote System in the Nuclear Back-End）への参加を通じて、最新情報の収集と地下深部での適用という地層処分特有の課題への対応について検討を進めた。

加えて、処分場の建設・操業・閉鎖や廃棄体の回収可能性を維持することに伴って生じる地質環境特性の変化が閉鎖後長期の安全性に及ぼす影響を評価するため、建設・操業に伴う、また、回収可能性の維持による、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を定量的に評価する技術の整備を進めた。更に処分場閉鎖前の安全性評価の信頼性を向上させるため、発生する可能性のある異常事象と安全性への影響を評価する方法について、他の原子力施設における事例も含めて国内外の情報を収集し、確率論的安全評価の適用性検討、複合事象等の評価シナリオの整備、及び事故時の対応技術に関する検討を進めた。

処分容器の耐食性評価

長田 柁平¹ 小川 裕輔¹ 鈴木 覚¹ 井上 博之² 渡邊 豊³ 山本 正弘³ 阿部 博志³
三ツ井 誠一郎⁴

¹原子力発電環境整備機構, ²大阪公立大学, ³東北大学, ⁴日本原子力研究開発機構

1. 背景

包括的技術報告書 (NUMO, 2021) では、オーバーパックの候補材料として鍛鋼を例に挙げ、最新の知見に基づけば、処分場閉鎖後少なくとも 1,000 年間にわたりガラス固化体と地下水の接触を抑制するという安全機能の確保に必要な腐食代が 18 mm 以上であることを述べ、設計仕様例として示している厚さ 190 mm の容器では、約 17,000 年の寿命が期待できる可能性についても示した。こうした、より現実的な寿命評価について、今後策定される原子力規制等で定められる基準を満足させるとともに社会的な信頼を高めるには、根拠となる地層処分環境下におけるオーバーパック候補金属材料の腐食現象に対する科学的な理解と、腐食寿命評価の手法及び評価に用いる腐食試験データの信頼性を更に向上させていくことが重要であり、考古学アナログやナチュラルアナログを用いて寿命評価モデルの妥当性を示していくことも、信頼性の向上に資するものと期待している。これらの取組みは、TRU 等廃棄物の廃棄体パッケージ容器に一定期間、放射性物質の溶出を抑制する期間を求める場合にも同様に重要なものである。

2. 目的

高レベル放射性廃棄物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(以下、「処分容器」という)の長期腐食寿命評価に対する信頼性を向上させるために必要となる取組みとして、①金属材料に関する長期腐食試験データ取得、②腐食現象に関する最新の科学的知見収集及び継続的な更新、③長期腐食寿命評価に必要な数学モデル整備を実施する。

3. 主な成果

取組み①に関しては、緩衝材中に候補材料の 1 つである鋳鋼を埋込み、最大 10 年程度までの腐食試験を実施中である。2021 年度までに試験期間 3 年までの腐食試験を実施し、腐食速度が試験期間に応じて低下するとともに、処分容器の候補材である鍛鋼と比較して有意な差がないことを確認した (JAEA 共研)。

取組み②に関しては、電炉材や銅コーティング材など、候補材として新たに可能性を検討している材料についても、耐食性評価を実施しており、電炉材に関しては試験実施部位を顕微鏡観察において特定し、浸漬試験等を開始した。銅コーティング材については純銅品と耐食性に関して差がないことを電気化学的に確認した (電炉材の耐食性評価に関する委託業務及び大阪公立大学共研)。

取組み③に関しては、長期腐食寿命評価モデル開発に関わる国内外の文献情報を収集 (95 件) し、オーバーパックの定置後、処分場が閉鎖されてから周辺環境が安定するまでの期間 (過渡期) に着目すべき腐食現象を整理した。その整理結果を基に、取組み①に示した腐食速度の低

下が、オーバーパッカー緩衝材界面近傍における酸化剤等の拡散に律速される可能性があることなどを取りまとめるとともに、閉鎖後長期だけでなく、過渡期に生成した腐食皮膜が処分容器の長期腐食に与える影響を理解することも重要であることを示した（東北大学共研）。

前述の取組み①～③について、評価及び提言を得るための産学合同体制（検討委員会委員 7 名（分科会主査 4 名含む）、分科会メンバー 25 名）を腐食防食学会（以下、「学会」という）内に構築していただいている（腐食防食学会，2022）（図 1 参照）。

4. 今後の展開

金属材料の腐食現象に関する最新の科学的知見を拡充するため、腐食試験データの取得や文献収集を進めるとともに、取得した知見を学会内でレビューいただくことで、処分容器の放射性物質に対する放射性廃棄物と地下水との接触防止に関する性能（腐食寿命）に対する信頼性を更に向上させていく。特に学会との連携を通じて地層処分における処分容器の長期寿命評価に対する考え方について広く専門家に情報発信するとともに、NUMO と共に持続的に課題に取り組んでいただく体制の維持に努める。長期腐食寿命評価という課題に国内外の研究機関と引き続き共同で取り組むことで、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知見を結集して、合理的に技術開発を進めていく。

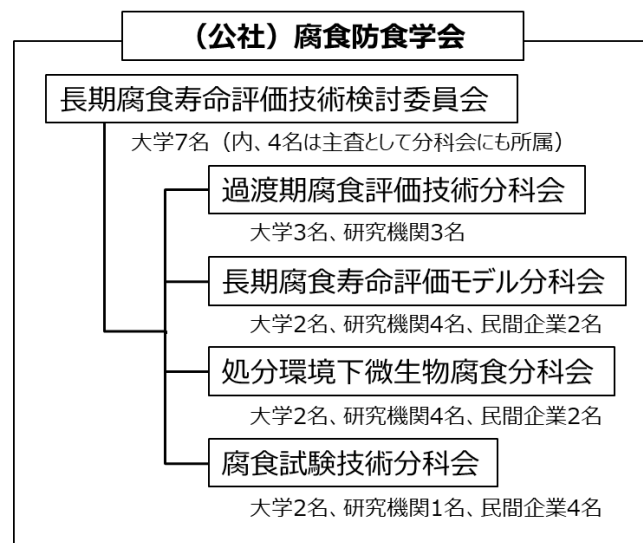


図 1 学会内に構築したレビュー体制図（腐食防食学会，2022 を基に作成）

参考文献

腐食防食学会（2022）：2021 年度 事業報告書，

https://www.jcorr.or.jp/entry_file/2021jigyohoukoku.pdf（閲覧日：2023 年 1 月 16 日）。

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。

高温条件を考慮したベントナイトの諸特性に関する検討

根本 脩平¹ 山本 陽一¹ 後藤 考裕¹ 渡邊 保貴² 吉川 絵麻² 新橋 美里² 横山 信吾²

¹原子力発電環境整備機構, ²電力中央研究所

1. 背景・目的

発熱する廃棄体を対象として人工バリアにベントナイトを主成分とする緩衝材を設置する場合には、熱によるベントナイト特性への影響について考慮する必要がある。ベントナイトに対する熱の影響については、ベントナイトの主要成分であるスメクタイトのイライト化やシリカセメンテーションによる変質現象などが考えられる。100°C以上の高温状態に長期間曝されたベントナイトについて、スメクタイトのイライト化はその温度に曝された時間や化学的環境条件に依存し、緩衝材の温度が100°Cを超える場合でも、ガラス固化体の発熱特性から予測される温度の時間変遷では、緩衝材の性能を大きく減じるようなスメクタイトのイライト化には至らないと考えられている（柴田ほか, 2004）。シリカセメンテーションについては、150°Cで水蒸気に曝した条件下において、圧縮成形されたベントナイトのシリカセメンテーションが観察されている（Pusch et al., 2003）。このような温度領域において人工バリア全体の挙動を評価するための知見が十分に得られていないことから、人工バリアの設計においては緩衝材の温度が100°C以下となるように設定しており、これまでに概ね100°Cまでの温度条件におけるベントナイト特性がNUMO及び関係研究機関などで調べられてきた。一方で、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などの不確実性や、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必要がある。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ためには、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ずる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。そこで、過渡期のT-H-M-Cの連成問題として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は、「2.3.5 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」より進めることとして、本検討では、100°Cを上回る熱影響を受けたベントナイトの膨潤性や透水性など基本的な性能の変化を明らかにすることを目的とする試験及び検討を実施する。

試験対象としたベントナイトは、これまでに実施したベントナイトの調査・研究の結果（山本ほか, 2022）から、緩衝材への適用が可能と考えられた三種類の国内産ベントナイト（Na型：クニゲル®V1、天竜原鉱、Ca型：三川原鉱）である。クニゲル®V1は緩衝材のわが国の地層処分場に使用する候補材料として、これまで最も多くの特性データが蓄積されている。天竜原鉱はクニゲル®V1と同じNa型であるが異なる基本特性を有するベントナイトである。三川原鉱はCa型でありイオン型が異なるベントナイトとして比較対象となる。本検討はNUMOと電力中央研究所の共同研究として実施しているものである。

2. 2021 年度の主な成果

廃棄体の発熱が大きい期間においては、原位置における緩衝材中の水分状態は、岩盤側から廃棄体側にかけて、主に液体として間隙に存在する状態、主に水蒸気として間隙に存在する状態、絶乾に近い状態と、原位置の温度（地温）・圧力条件に応じて様々な状態になることが想定される（図 1）。そこで、本検討ではまず、液体として水分が間隙に存在する状態と絶乾に近い状態の両極端の状態を想定した条件で試料を加熱養生した。使用した試料は上記三種類のベントナイト、加熱温度は想定される上限値として 200°C を基本に室温、100, 200°C（室温条件は加熱の有無による性能を比較するために実施）、加熱養生期間は 1 か月でシリカセメンテーションが報告されていることから（Pusch et al., 2003）、これと同程度の期間を確保するとともに系統的なデータを取得するため、7, 30, 90 日、一部 1 年とした。水質はイオン交換水と人工海水、供試体の有効粘土密度は 1.2~1.8 Mg/m³ とすることで材料仕様や環境条件などの多様性を考慮した。

上述した温度-水分状態を維持できる実験環境を構築し、圧縮成形したベントナイト供試体（いずれも供試体製作時の含水状態は同じ）に温度履歴を与えた。この加熱養生においては供試体の湿潤状態を維持するための供試体用耐圧容器のシールが難しいことが予想されたため、様々な方法を予備試験において確認した後、銅製のシール材を用いた方法を採用した。また、加熱による飽和水蒸気圧の計算値と実測値との比較や容器から取り出した加熱後の供試体の状態から、湿潤状態を維持して供試体の加熱養生が実現できていることを確認した。

所定の温度と期間で加熱養生した供試体は、室温になるまで冷ました後に、膨潤性や透水性など基本的な特性に関わるデータを取得するための試験（膨潤変形試験、透水試験、膨潤圧試験、圧密試験、透気試験）に供するとともに、試験手順を整備した。加熱養生期間を終えた供試体から順次上記の試験に着手したが、データは継続して取得中である。これまでに得られたデータの数は少なく、明確な傾向を見出すには至っていないが、条件によっては特性の変化を示唆するデータも得られていることから、2022 年度も引き続きデータを取得し、熱影響のメカニズムなどの考察を行う。

3. 今後の展開

2022 年度は加熱する温度と期間、供試体の密度と水質など様々な試験条件下で加熱養生した三種類のベントナイトに対して試験を継続して実施し、100°C 以上の高温領域も含めた熱影響によるベントナイトの性能の変化を明らかにしていく。

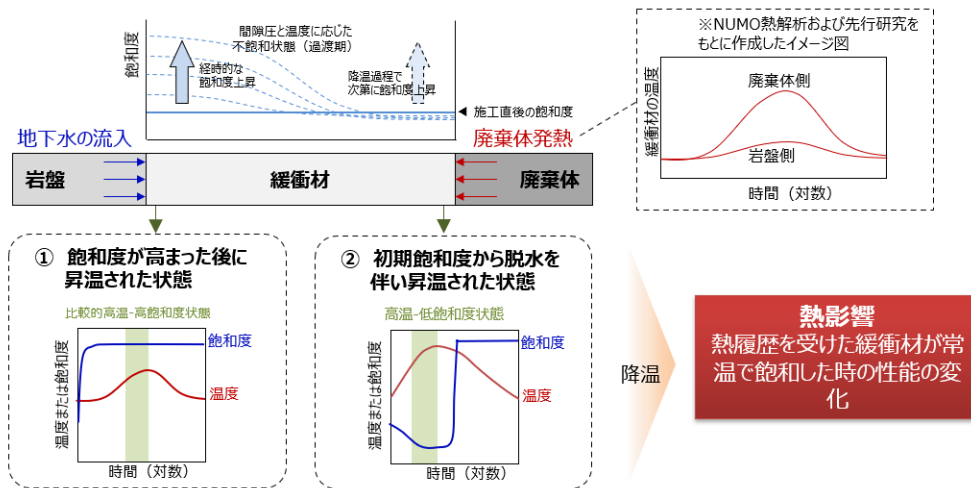


図 1 本件で想定する緩衝材の状態

参考文献

- 柴田雅博，笹本広，神徳敬，油井三和（2004）：緩衝材の長期安定性評価技術の現状（研究報告），JNC TN8400 2004-010.
- Pusch, R., Bluemling, P. and Johnson, L.（2003）：Performance of strongly compressed MX-80 pellets under repository-like conditions, Applied Clay Science, Vol. 23, Issues 1-4, pp.239-244.
- 山本陽一，後藤考裕，北川義人，渡邊保貴，横山信吾，新橋美里（2022）：国内産ベントナイトおよびベントナイト混合土の基本特性データ，NUMO-電中研共同研究，NUMO-TR-21-02.

緩衝材中の微生物活性に関する試験研究

後藤 考裕 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。緩衝材の原材料であるベントナイトには多くの種類の微生物が生息しており、このうち、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。谷口ほか(2001)はベントナイト/水比とベントナイト中で増殖する硫酸還元菌の関係について調査し、ベントナイト/水比を 1000 g/l 以上（ベントナイトの乾燥密度で 0.56 Mg/m³ に相当）とすれば、微生物の増殖を抑制できることを報告している。包括的技術報告書（NUMO, 2021）でも谷口ほか（2001）を参照し、緩衝材の設計において、微生物腐食の抑制のための基準値を 0.56 Mg/m³ としている。一方で、谷口ほか（2001）の報告以降、微生物の分析技術は高度化しており、谷口ほか（2001）では微生物の生菌数を計測していたが、JAEA（2018）では生菌数に加え、定量 PCR 法によってベントナイト中の DNA を計測することで、谷口ほか（2001）より高い乾燥密度で微生物が増加する可能性を指摘している。このため、定量 PCR 法を用いた場合も、包括的技術報告書の緩衝材仕様で微生物腐食の抑制が可能か確認する必要がある。

NUMO は、2018～2020 年度にかけて、緩衝材の候補となる国産の 3 種類のベントナイトを対象に、微生物腐食が抑制可能な乾燥密度の条件を確認するための試験を実施した（Goto et al., 2022）。その結果、包括的技術報告書で適用した緩衝材仕様の密度を維持できれば、硫酸還元菌の増殖や活動（以下、「微生物活性」という）を抑制、すなわち微生物腐食を抑制できることが示されている（図 1 参照）。

2021～2022 年度の 2 か年では、地層処分で想定される高温、放射線、貧栄養といった条件（表 1 参照）に対し、また、銅コーティングオーバーパックを想定し、その表面の環境におけるベントナイト中の微生物活性について調べることを目的として、試験を実施している（以下、「微生物活性確認試験」という）。

このうち、高温、放射線、貧栄養の 3 条件では、炭素鋼片を埋設したベントナイトを所定の密度で人工海水中に飽和させ、高温、放射線、貧栄養のいずれかの条件で所定の期間静置する。ベントナイトは、クニゲル®V1、クニゲル®V1 から粘土のみを精製したクニピア®F 及び、比較のため海外の地層処分の緩衝材の主原料として用いられるベントナイト（MX-80®）の 3 種類を対象とする。所定の期間静置した後、炭素鋼とベントナイトを分析し、炭素鋼の腐食挙動、微生物のベントナイト中の増減などのデータを取得することで、微生物活性の有無を評価する。銅コーティングオーバーパックの表面に対する試験では、銅試験片表面にベントナイトに由来する微生物培養液を所定の期間接触させ、微生物の増減に関するデータを取得して、微生物活性の有無を評価する。

2. 2021 年度の主な成果

微生物活性確認試験のデータ取得は 2022 年度の実施を計画しており、2021 年度は微生物活性確認試験のうち、貧栄養条件について試験を開始するとともに、高温条件、放射線条件についてそれぞれの試験条件に適した試験セルを製作した。また、ベントナイト中の微生物の定量評価を実施する上で必要な微生物の定量評価手法を構築した。

3. 今後の展開

高温、放射線、貧栄養の条件、銅表面の条件について微生物活性確認試験を実施し、金属腐食及び銅表面における微生物活性確認試験を実施し、金属腐食及び微生物に関するデータを取得する。取得したデータに基づき、各条件における微生物活性の有無を評価する。評価した結果は、オーバーパックの微生物腐食を抑制するために緩衝材に要求される指標と基準の設定に反映する。また、微生物とベントナイトの製造工程の関係について調査する。

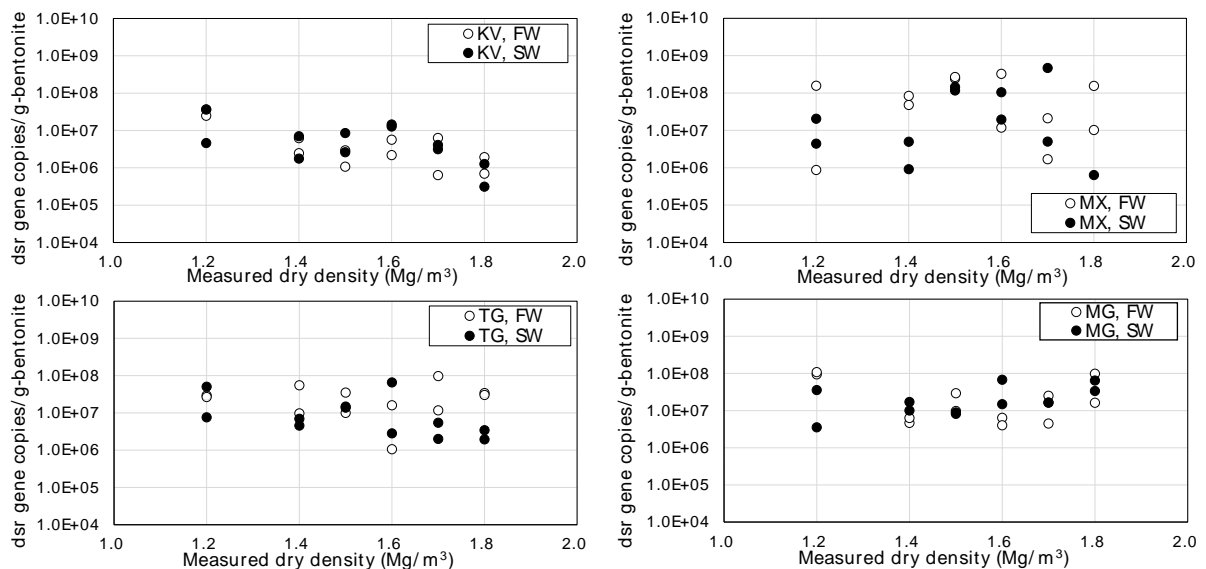


図 1 微生物（硫酸還元菌）の増殖と乾燥密度の関係 (Goto et al. (2022))

※縦軸：硫酸還元菌に含まれる dsr 遺伝子を定量 PCR 法により増幅した後に測定したもの

横軸：ベントナイトの乾燥密度

図中の凡例について、KV はクニゲル V1、MX は MX-80、TG は天竜原鉱、MG は三川原鉱、FW は人工淡水、SW は人工海水を指す

表 1 各試験の条件範囲

項目	温度条件※1	放射線照射条件	貧栄養条件
試験温度	30°C, 80°C, 120°C	室温	30°C
γ線照射線量	無し	1, 10, 100 Gy/h	無し
栄養塩添加	有り	有り	有り, 無し
ベントナイト	クニゲル®V1, クニピア®F, MX-80®	クニゲル®V1, MX-80®	クニゲル®V1, クニピア®F, MX-80®
乾燥密度※2	ベントナイトスラリー, 1.0~1.8 Mg/m ³	ベントナイトスラリー, 1.6 Mg/m ³	ベントナイトスラリー, 1.6 Mg/m ³

※1 乾燥密度と試験温度の組み合わせで 11 条件を設定

※2 表中の数値はクニゲル V1 の乾燥密度を指す。クニピア F 及び MX-80 の乾燥密度はクニゲル V1 の乾燥密度に相当する有効モンモリロナイト密度に基づいて設定

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.

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 直接処分等代替処分技術開発 報告書, 平成 30 年 3 月.

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.

谷口直樹, 川崎学, 藤原和雄 (2001) : ベントナイト中における硫酸塩還元菌の活性と硫化水素によるオーバーパック材料の腐食への影響, JNC TN8400 2001-011.

TRU 等廃棄物の回収技術の開発

鈴木 覚 市村 哲大

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

TRU 等廃棄物の処分概念を対象に、回収の容易性の向上という観点から、回収可能性の維持方法、適用可能な回収技術、及び回収装置の包括的な検討を通じて、技術的信頼性の向上を図るため、包括的技術報告書（NUMO, 2021）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 年度より開始している（図 1）。

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 容器内に一体成型し（以下、この状態を「TRU-PEM」という）、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系材料で埋め戻す。PEM 容器間の隙間は、充填しないか、あるいはシート状のベントナイト系の材料を設置することを想定した。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の検討を 2021 年度より進めている。

主要な構成要素	包括的技術報告書 (廃棄体パッケージB)	TRU-PEM（開発中の設計オプション）	
		角型廃棄体パッケージ	円筒型廃棄体パッケージ
廃棄体パッケージ	<p>(a) ドラム缶用</p>	<p>左記の廃棄体パッケージB または 角型十字鋼板補強割裂容器</p>	<p>ドラム缶4本入り容器</p> <p>※半球形蓋を例示。平蓋容器も設計</p>
PEM	対象外	<p>廃棄体 廃棄体パッケージ容器 緩衝材 フォークポケット (2018年度機構内部業務成果)</p>	<p>廃棄体パッケージ PEM容器 緩衝材</p>
定置時の状態	<p>廃棄体パッケージ上部充填材(モルタル) 廃棄体パッケージ間充填材(モルタル) 廃棄体パッケージ 緩衝材 構造躯体</p>	<p>ベントナイト系埋め戻し材</p>	<p>ベントナイト系埋め戻し材 PEM容器 緩衝材 建築限界 (埋め戻し材施工装置が動作可能な空間として設定)</p>

図 1 回収技術の検討対象とした TRU 等廃棄物の処分概念の設計オプション

2. 2021 年度の主な成果

回収可能性の維持方法、適用可能な回収技術、及び回収装置を検討する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

これらの検討においては、包括的技術報告書の処分概念として、炭素鋼製の廃棄体パッケージ容器内に 2~4 体の複数の廃棄体を封入し、操業期間における放射性物質の閉じ込めを確保したものを対象とした (図 1)。TRU-PEM 方式に関しては、操業期間中だけでなく、閉鎖後の閉じ込めも確保可能な円筒型処分容器を用いる概念を対象とした (図 1)。以下に、上記 2 つの処分概念を対象として回収可能性の維持方法を検討した結果を述べる。

検討にあたっては、包括的技術報告書の処分概念に対する回収可能性の維持方法を、図 2 に示すように、廃棄体パッケージを定置し、廃棄体パッケージ間をモルタルで充填しない状態で維持 (図 2 : 状態 BB-1)、廃棄体パッケージ間充填材をモルタルで充填した状態で、処分坑道の上部の空間を埋め戻さないで維持 (図 2 : 状態 BB-2)、処分坑道の上部までをベントナイト混合土で埋め戻し、処分坑道端部にプラグを設置して維持 (図 2 : 状態 BB-3) する場合に分類した。

TRU-PEM 方式については、図 3 に示すように、TRU-PEM を処分坑道に定置し、集積した TRU-PEM の上部及び側部の隙間を埋め戻さない状態で維持 (図 3 : 状態 CP-1)、上部及び側部の隙間を埋め戻し、処分坑道端部にプラグまでを設置した状態で維持 (図 3 : 状態 CP-2) する場合に分類した。

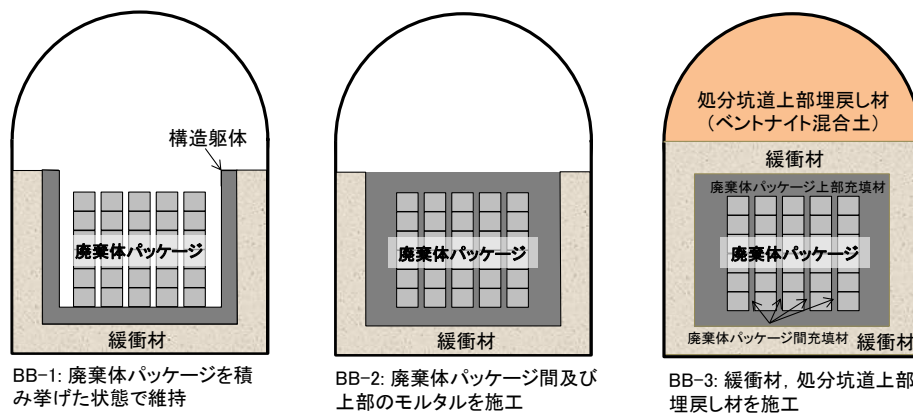


図 2 廃棄体パッケージ B の処分概念を対象とした回収可能性を維持する状態のイメージ

状態 BB-1 と状態 CP-1 に対しては、廃棄体パッケージあるいは TRU-PEM を定置した方法とは逆動線でも回収することが可能である。状態 BB-2 では、回収が必要となった場合に、廃棄体パッケージ間の硬化したモルタル充填材を除去してから、廃棄体パッケージを回収することになる。状態 BB-3 及び CP-2 については、回収が必要となった場合に、処分坑道端部プラグ及びベントナイト混合土を除去してから、廃棄体パッケージあるいは TRU-PEM を回収することとなる。

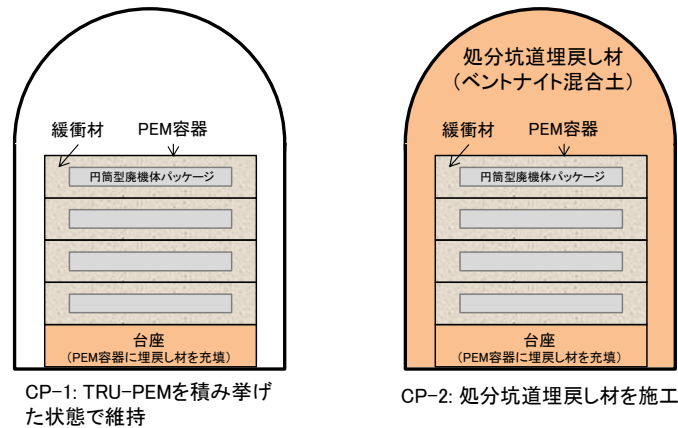


図 3 TRU-PEM 方式の処分概念を対象とした回収可能性を維持する状態のイメージ

回収の容易性という観点では、逆動線での回収が可能である状態 BB-1 と状態 CP-1 が最も高く、廃棄体の回収までの作業が多い状態 BB-3 及び状態 CP-2 が最も低くなる。状態 BB-1 と状態 CP-1 は、処分坑道を開放した状態での維持となるため、坑内換気に伴って湿度が高い大気に長期間さらされることになるため、そのほかの状態に比べ、炭素鋼製の廃棄体パッケージ容器の大気腐食に関する評価が必要となる。また、積み上げた廃棄体パッケージ間が充填されていないため、地震時に倒壊する可能性も想定したリスクの評価が必要となるといった課題がある。

状態 BB-3 においては、廃棄体パッケージ充填材上部のモルタル充填材の厚さが作業員の被ばく管理の基準を考慮して設計されているため、処分坑道上部の埋戻し材の除去作業はすべて遠隔操作で実施する必要はない。廃棄体パッケージ間及び上部の硬化したモルタルの除去は、作業員の被ばくの防止の観点から遠隔操作による必要があり、そのような除去技術の検討が課題となる。この課題は、廃棄体パッケージ間の硬化したモルタルの除去が必要な状態 BB-2 にも共通である。状態 CP-2 に関しては、ベントナイト混合土を遠隔操作で除去する技術の検討が課題となる。

このように回収の容易性の向上については、処分場の閉鎖前及び閉鎖後の安全性との両立が可能となるように検討する必要がある。回収可能性を維持する期間の大気腐食と廃棄体パッケージあるいは TRU-PEM の地震によるずれや倒壊を想定した評価技術を今後整備していくことが必要である。また、回収技術に関しては、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、TRU-PEM 方式ではベントナイト混合土の除去技術がそれぞれ課題となる。

3. 今後の展開

2022 年度は、図 1 に示した TRU 等廃棄物の各々の処分概念を対象に適用する回収技術、及び回収装置の検討を実施する計画である。

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.

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

市野 彰吾 山本 陽一 後藤 考裕 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 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を地下施設に搬送し定置する技術) 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 と小さいことや、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った。

本件では、作業の容易性と工程短縮などの観点から、適用する緩衝材製作や PEM 容器蓋結合に関する技術の得失の検討を行って選定した PEM 方式オプションについて、実現可能性と適用限界を把握するための要素試験を実施する。2021 年はこれらの試験計画の策定を行った。この計画に基づき、緩衝材製作との蓋結合の試験を 2022 年度に実施を予定である。

2. 2021 年度の主な成果

対象とする PEM 方式については、表 1 に示す複数の方式に対して PEM 容器と一体化させた緩衝材製作や PEM 組立の実現性、容易性などを項目として得失の検討を行った。この中から、最も効率的な方式の候補として、上蓋 2 分割型を選定した。

緩衝材の製作方法には高いエネルギーでの締固めが可能であり、緩衝材ブロック製作の実績を有する大型プレス機による静的締固め方法を、PEM の組立には 2 分割した PEM 容器(胴体部と蓋)をボルト・ナットで結合する方法を、表 2 に示すそれぞれ複数の方法の得失を比較検討した上で選定した。

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に関する適用限界が不明であること、製作時には高いプレス圧に抗しうる強固な補強型枠が必要となることから、表 3 に示す項目を試験において確認する。緩衝材製作試験のイメージを図 1 に示す。

表 1 比較検討した PEM 方式オプション

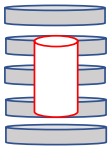
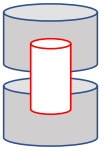
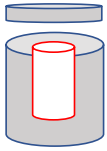
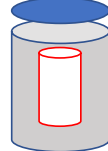
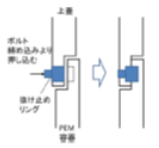
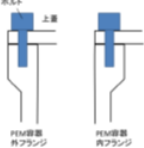
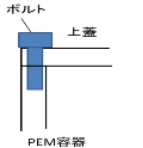
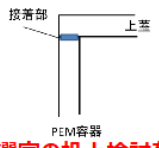
方式名称	鋼殻リング(複数分割型) (原環センター, 2013)	中央 2 分割型	緩衝材付上蓋 2 分割型	上蓋 2 分割型
容器継ぎ目の数	複数箇所 (分割数-1)	1 箇所		
イメージ図				
得失	6 分割のため、オーバーパックの挿入が難しく、緩衝材とオーバーパック間に隙間が発生。	2 分割であれば、オーバーパックの挿入が可能となり、緩衝材とオーバーパック間に隙間が発生しないと考えられる。 結合面の緩衝材整形のため、効率性は上蓋 2 分割型に劣る。	2 分割であれば、オーバーパックの挿入が可能となり、緩衝材とオーバーパック間に隙間が発生しないと考えられる。 緩衝材が異形分割となり、効率性は中央 2 分割型や上蓋 2 分割型に劣る。	2 分割であれば、オーバーパックの挿入が可能となり、緩衝材とオーバーパック間に隙間が発生しないと考えられる。 中央 2 分割型及び緩衝材付上蓋 2 分割型に比べ、効率性に有利となる。

表 2 蓋結合方法の比較

	印籠結合	機械結合		ケミカル結合 (接着剤)
イメージ図				
出張り	なし	あり(フランジ・ボルト)		なし
遠隔操作 (既存技術)	可能	可能	困難	可能
救済性	事象 リング・ボルトの脱落	ボルトの脱落		不明
	補修	可能	可能	可能
その他	-	-	板厚に対する成立性が課題	接着強度の検討が必要

遠隔自動化で蓋結合試験を実施し、技術的な課題を整理

表 3 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・仕上がり厚さの関係
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体当たり要する製作時間

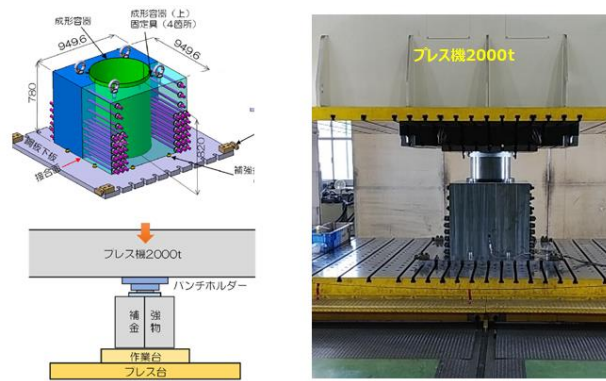


図 1 緩衝材製作試験のイメージ

廃棄体を封入した後の PEM 容器の蓋結合は、放射線環境での作業となること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。本試験では産業用ロボットアームにより、ボルト・ナットの脱落や緩みなく作業を行うことが可能であるか確認する。蓋結合試験のイメージを図 2 に示す。

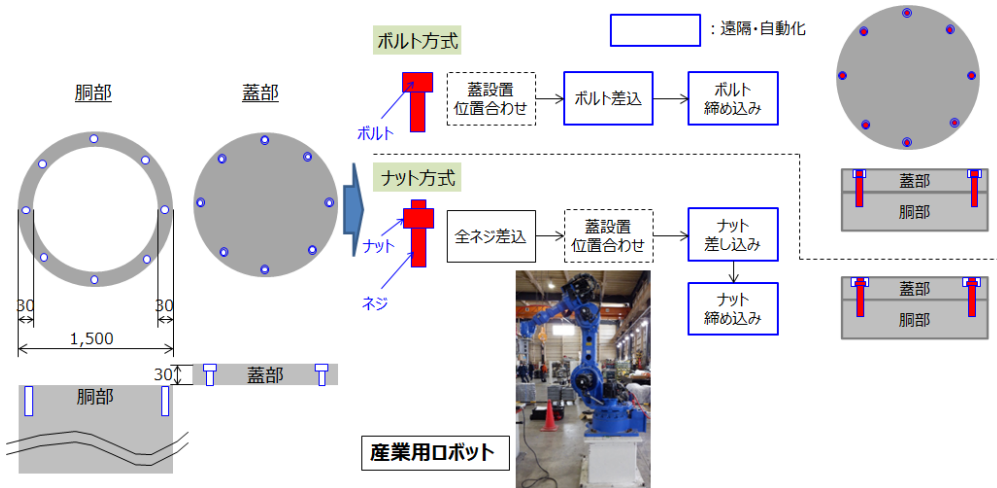


図 2 蓋結合試験のイメージ

3. 今後の展開

2022 年度に緩衝材製作試験，蓋結合試験を行って，上蓋 2 分割型の容器構造を採用した PEM 方式の実現可能性と製作方法の適用限界について検討する。また，本試験結果を踏まえて PEM 製作・組立技術の改良を進めるとともに，品質確保の容易性と効率性の向上の観点から設計オプションの設計最適化，さらには実規模実証試験に向けた準備を進める。

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）（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。

オーバーパックスの製作技術の開発

小川 裕輔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, ²カナダ核燃料廃棄物管理機関 (NWMO), ³大阪大学, ⁴秋田大学

1. 背景・目的

(1) 炭素鋼オーバーパックスの溶接技術

炭素鋼オーバーパックスの溶接技術は、これまで関係研究機関により実証されており、応力腐食割れの原因となりうる溶接部の残留応力についても、溶接後の熱処理により低減する技術が開発されている(原環センター, 2013)。一方で、溶接時に残留応力の発生を低減できる方法が開発できれば、長時間を要する溶接後の熱処理工程を省略できる可能性がある。そのため、残留応力が発生しにくい溶接方法の開発を行う。

(2) 銅コーティングオーバーパックスの製作技術

a) 銅母材部：電気メッキ，銅接合部：冷間溶射，炭素鋼接合部：溶接による方法

銅オーバーパックスについては、これまで、厚さ約 50 mm (製作性確保のために必要な厚さ) の銅製容器内に炭素鋼容器を挿入する製作方法が関係研究機関(本間ほか, 1999)や諸外国(SKB, 2010)で開発されてきたが、約 10 年前からカナダ核燃料廃棄物管理機関(以下、「NWMO」という)において、炭素鋼容器に厚さ 3 mm (腐食代として必要な厚さ) の銅をコーティングすることで銅の使用量を削減した製作技術の開発が進められている(NWMO, 2012)。NWMO の製作方法では、接合部以外を電気メッキにより銅コーティングし、炭素鋼接合部を溶接した後、銅接合部は冷間溶射により銅コーティングする(NWMO, 2018)(図 1)。この技術は日本の地層処分にも適用可能と考えられ、NWMO との共同研究により銅コーティングオーバーパックスの製作技術の開発を行う。

b) 銅母材部：電気メッキ，銅接合部：摩擦攪拌接合，炭素鋼接合部：機械的接合による方法

a) の製作方法の代替として、図 2 に示すように炭素鋼接合部を機械的に接合し、銅接合部を摩擦攪拌接合する製作方法が考えられる。この製作方法では、予熱や余盛除去、非破壊検査を含めた炭素鋼接合部の溶接工程を省略でき、摩擦攪拌接合は冷間溶射よりも速く銅接合部を形成できる等の理由から、接合時間を短縮でき、品質管理の容易性も向上する可能性がある。このため、a) の技術開発と並行して、図 2 の方法による製作技術の開発を行う。

2. 2021 年度の主な成果

(1) 炭素鋼オーバーパックスの溶接技術

産業界において適用事例の比較的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結果、残留応力が発生しにくく、かつオーバーパックスに適用可能な溶接方法として、電子ビーム溶接(図 3)が有力であることが示された。

(2) 銅コーティングオーバーパックの製作技術

a) 銅母材部：電気メッキ，銅接合部：冷間溶射，炭素鋼接合部：溶接による方法

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，NWMO との共同研究により NWMO の銅コーティング容器の仕様を対象とした 15 体の実規模による連続製造試験を 2022 年度までに実施する計画で進めている。また，炭素鋼材料の調達性の向上を目的として，NWMO が採用しているシームレス鋼管に加えて，NUMO が着目している板巻鋼管を対象に銅コーティングオーバーパックへの適用性を確認するための製作試験を開始し，2021 年度は板巻鋼管と蓋部の接合部を模擬した試験体を対象に溶接試験を実施した（溶接部の品質確認については 2022 年度実施）。

b) 銅母材部：電気メッキ，銅接合部：摩擦攪拌接合，炭素鋼接合部：機械的接合による方法

炭素鋼接合部の機械的接合については，産業界において適用事例の比較的多い方法である，ねじ込み接合，焼きばめ，冷やしばめ，ピン，ボルト，リベットを比較した結果，銅コーティングオーバーパックの構造との相性，接合作業の容易性等から，ねじ込み接合が有力であることを明らかにした。

銅接合部の摩擦攪拌接合については，大阪大学・秋田大学との共同研究により，銅の電気メッキ鋼板を模擬した銅クラッド鋼板（爆発圧着により製造した銅と炭素鋼の合わせ板）を用いて摩擦攪拌接合試験を行い，銅部の剥離やボイド等の欠陥の発生なく接合可能な条件（接合ツールの回転速度や接合速度等）を特定できた。

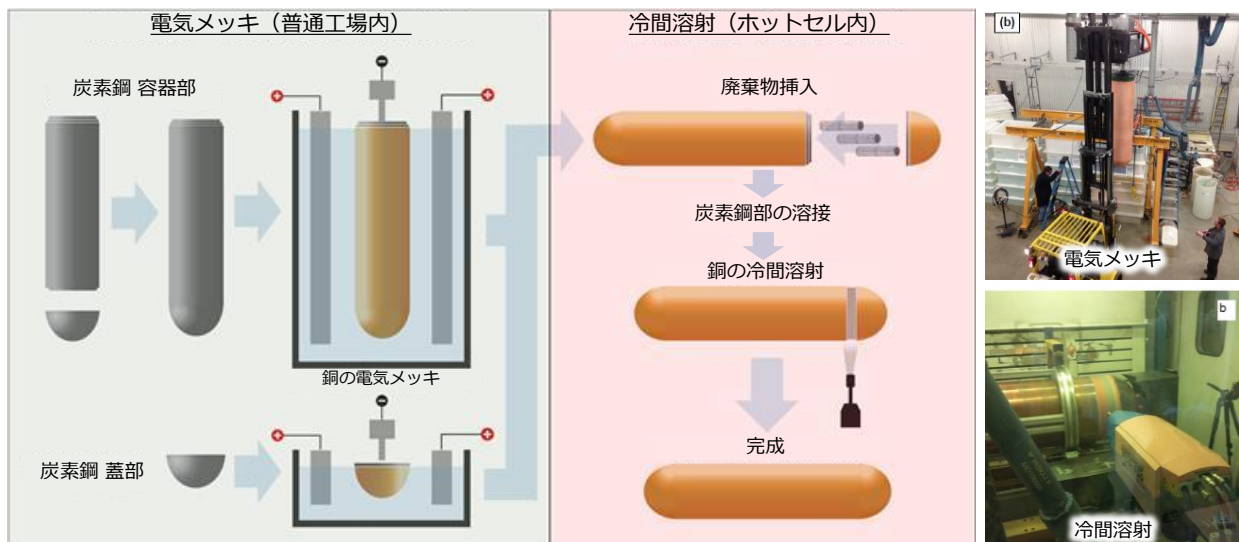


図 1 銅母材部：電気メッキ，銅接合部：冷間溶射，炭素鋼接合部：溶接による製作方法
(NWMO, 2016 ; 2017 ; 2018 を編集)

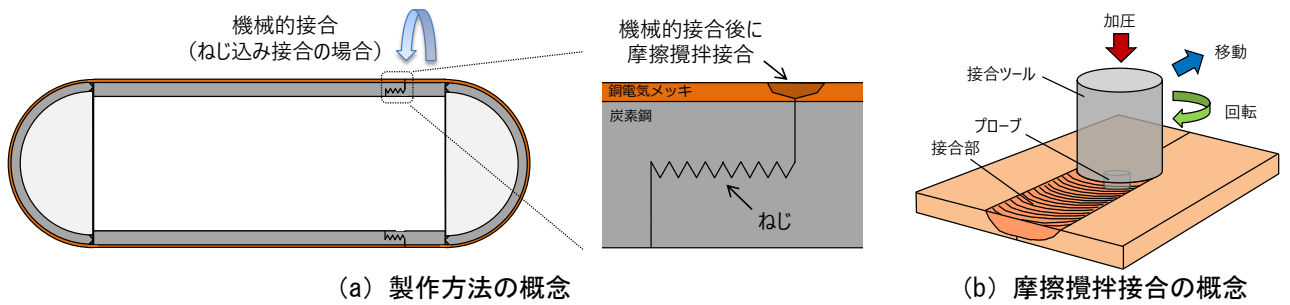


図 2 銅母材部：電気メッキ，銅接合部：摩擦攪拌接合，炭素鋼接合部：機械的接合による製作方法

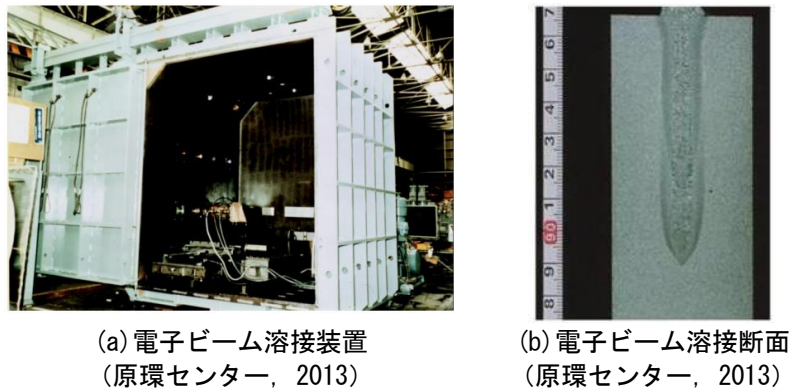


図 3 電子ビーム溶接

3. 今後の展開

(1) 炭素鋼オーバーパックスの溶接技術

残留応力を最も低減可能な溶接条件を特定するための電子ビーム溶接試験を行う。

(2) 銅コーティングオーバーパックスの製作技術

a) 銅母材部：電気メッキ，銅接合部：冷間溶射，炭素鋼接合部：溶接による方法

溶接部の品質確認試験に加え，電気メッキ，冷間溶射の試験を行い，適用性を確認する。

b) 銅母材部：電気メッキ，銅接合部：摩擦攪拌接合，炭素鋼接合部：機械的接合による方法

炭素鋼接合部の機械的接合については，ねじ込み接合試験体の接合試験を行い施工性を確認する。銅接合部の摩擦攪拌接合については，銅の電気メッキ鋼板や円筒状の銅クラッド鋼管を用いた接合試験を行い施工性を確認する。

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）（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 遠隔操作技術高度化開発 人工バリア品質評価技術の開発 モニタリング技術の開発 平成 19 年度～平成 24 年度の取りまとめ報告書。

本間信之，千葉恭彦，棚井憲治（1999）：銅－炭素鋼 複合オーバーパックスの試作，JNC TN8400 99-049。

NWMO（2012）：Technical Program for the Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel –

Annual Report 2011, NWMO TR-2012-01.

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.

SKB (2010) : Design, production and initial state of the canister, SKB TR-10-14.

アクセス坑道内搬送システムの安全設計

市村 哲大 鈴木 寛

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）では廃棄体を搬送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が（図 1）、海外の事例では、アクセス坑道の設計オプションとして螺旋型の斜坑だけでなく、立坑及び急勾配の直線斜坑も考えられている。わが国における地下施設の規制基準は今後整備されることとなっているが、「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」を参考にすると、廃棄体のアクセス坑道搬送工程において放射性物質の飛散防止対策及び火災・爆発対策が要求されることが考えられる。

包括的技術報告書で示した螺旋型の斜坑の場合、緩勾配で廃棄体を輸送することから、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。緩勾配のため内燃機関を搭載した搬送車両により廃棄体を搬送することが可能であるが、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。

緩勾配による搬送システムに対して、海外の事例では、急勾配の直線斜坑や立坑にフリクションホイール方式など、鉱山やインクライン施設で実用化されている技術を組み合わせた搬送システムも採用されている。この方式では動力源を地上に設置することが可能となるため、地下施設に持ち込む可燃物の量を削減することが可能であり、地下施設における火災・爆発リスクを低減できる。また地上施設に関しては、類似の原子力施設の火災・爆発対策を適用することが可能である。一方で直線斜坑又は立坑で廃棄物を搬送する場合には、搬送装置の落下・逸走などの事故に伴う放射性廃棄物の飛散防止対策の具体化が必要である。

以上の背景から、立坑及び直線斜坑を対象に、廃棄体搬送時における搬送装置の落下または逸走事象を想定し、廃棄体に衝撃が加わった状況においても廃棄体からの放射性物質の飛散防止の維持が可能な対策を備えた一連の搬送システムの概念的な検討を実施する。

2. 2021 年度の主な成果

立坑及び直線斜坑を用いた搬送システムに関する海外の事例を参考に、搬送車両の落下または逸走に伴う廃棄体からの放射性物質の飛散防止対策を備えた一連の搬送システムの概念的な検討を実施した。地上施設であらかじめガラス固化体を封入したオーバーパックと緩衝材を一体化して組み立てた PEM モジュールの質量は 37,200kg であるが、海外の設計例では直線斜坑搬送システムで最大 130,000kg（Andra, 2016）、立坑搬送システムで最大 85,000kg（Filbert et al, 1994）まで積載可能な立坑及び斜坑の搬送装置が実用化されていることから、直線斜坑及び立坑搬送は技術的に実現性が見通しがある。また、搬送装置の飛散防止対策についても、海外

の事例を参考に落下防止対策、落下時の衝撃力の緩和策に大きく分類して検討し、動力部、搬送部及びアクセス坑道の底部のそれぞれにおいて、多重の安全対策を検討した。具体的には、常用の電磁ブレーキのほか、過速度を検知するとワイヤを挟むことによる摩擦力でワイヤを制動するなどの速度緩和機構の多重化を始め（図 2、「4-ワイヤ把持機構」）、ゲージ下部及び坑道底部には鋼材をトラス状に組んだ緩衝装置を取り付けることで、搬送車両が逸走し緩衝装置と衝突した際には緩衝部材が塑性変形することでそのエネルギー損失によって衝突時の衝撃力を緩和する緩衝部材（図 2、「2,3-緩衝部材」）を設計するなどの多重の安全対策を検討した。これらに基づいて、立坑及び急勾配の直線斜坑のアクセス坑内搬送システムの概念設計を実施した（図 2）。

3. 今後の展開

2022 年度は、2021 年度に実施した立坑及び直線斜坑の搬送システムの多重の飛散防止対策の有効性を確認するために、概念設計結果に基づいて想定される衝撃力の大きさや衝撃荷重方向をパラメータとして、搬送物となるガラス固化体を封入したオーバーパックや TRU 等廃棄物の廃棄体パッケージを対象に弾塑性解析を実施する。

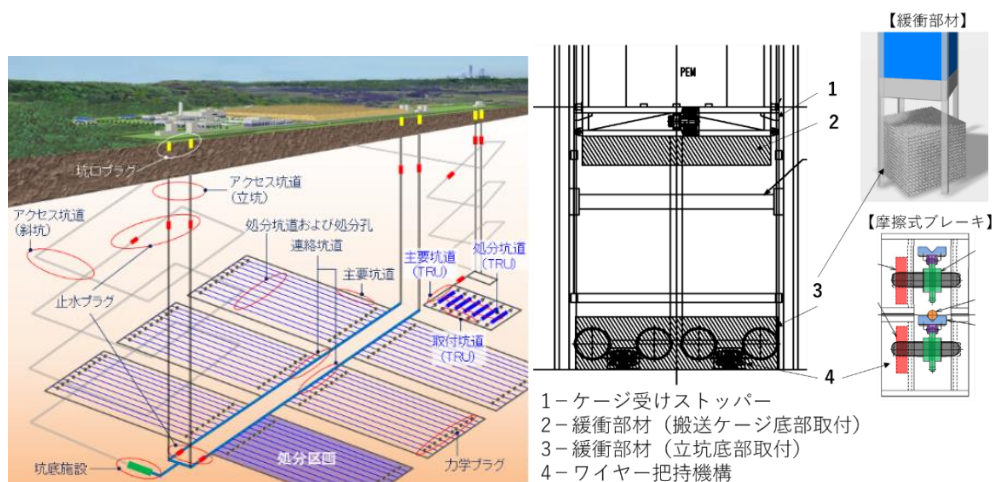


図 1 地下施設のイメージ（包括的技術報告書） 図 2 安全対策の例（エレベータ方式）

参考文献

Andra (2016) : Safety options report - Operating Part - (DOS-EXPL) , Andra516.A.
 Filbert, W., Rissel, J. and Weber, W (1994) : Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB, Simulation des Schachttransportes - Versuchsstand zur Simulation des Schachttransportes. DEAB (T 13). Peine, März 1994.
 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.

遠隔操作化・自動化技術の地層処分事業への適用性検討

山本 陽一 市村 哲大

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

地層処分場の建設や操業の実施には、作業従事者の労働安全と放射線安全を確保する必要がある。また、わが国の生産年齢人口は今後 30 年で 30%減少すると言われており、建設産業における労働力不足は今後一層深刻になることが予想されている（i-Construction 委員会, 2016）。これらの問題に対する施策として、情報伝達技術やロボット技術の全面的な活用による無人化施工が考えられる。近年これらの技術の進歩は目覚ましく、様々な産業分野で積極的な開発が行われている。こうした状況は地層処分事業にも当てはまり、本件では建設及び操業における作業の遠隔操作化・自動化（無人化施工）に関する最新の技術情報を収集して現状技術をまとめ、将来的な技術の進展を見据えた地層処分場への適用に関する実現性の検討を進めることを目的としている。

2. 2021 年度の主な成果

- ・ 経済協力開発機構／原子力機関（以下、「OECD/NEA」という）の EGRRS（Expert Group on the Application of Robotics and Remote Systems in the Nuclear Back-End）の活動に参加し、各国の原子力バックエンドにおける取組みについて最新の情報を入手（原子力事故対応事例、開発したロボットの一覧表等）。最新のロボット技術の適用にあたって、エンドユーザー組織内の専門知識の欠如が障壁の一つに含まれていることや、AI が高度に発達した結果として、自動的に適用されるロボット内のコードのすべての行を人が理解できなくなった場合に、安全性をどのように評価できるのかという問題に直面していること等の課題を共有（OECD/NEA, 2023）。
- ・ 最新のトンネル施工技術に関する総合建設業者及び建設機械メーカーとの意見交換の実施、建設技術の企画展等への参加を通じて、自動化された削孔機の導入や ICT（Information and Communication Technology）の建設現場への活用について把握。
- ・ 自動化された掘削機を導入したトンネル現場を視察し、作業の安全性と施工精度が向上している状況を確認（図 1）。
- ・ 開発者との意見交換を通じて、地層処分における小断面の坑道に適した無人化施工の実現のためには、施工機械の小型化に伴う施工精度の問題など、独自の技術開発の必要性を明確化。

3. 今後の展開

関連する学会・セミナーへの参加や、メーカー等との意見交換、国際的な取組み（OECD/NEA の EGRRS）への参加などを通じて、最新技術情報の収集を継続する。また、地層処分における関連技術適用の課題を整理し、2023 年度以降の技術開発計画に反映する。



図 1 全自動化されたドリルジャンボによるトンネル切羽における穿孔作業

参考文献

i-Construction 委員会 (2016) : i-Construction～建設現場の生産性革命～, i-Construction 委員会報告書, 国土交通省.

OECD/NEA (2023): Status, Barriers and Cost-Benefits of Robotic and Remote Systems Applications in Nuclear Decommissioning and Radioactive Waste Management Status, Barriers and Cost-Benefits of Robotic and Remote Systems Applications in Nuclear Decommissioning and Radioactive Waste Management, NEA/RWM/R(2022)1.

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

鈴木 覚 市野 彰吾 市村 哲大

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

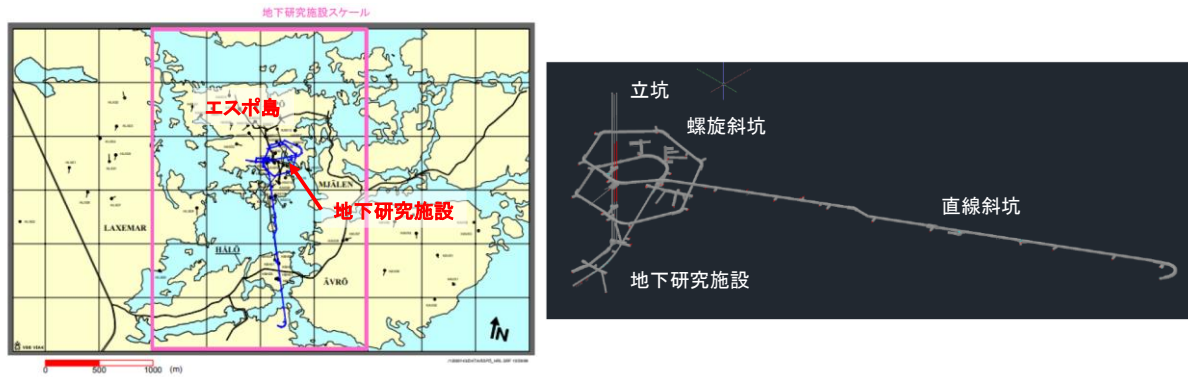
処分場の建設・操業（回収可能性を維持する期間を含む）中の坑内湧水は、作業の安全性への影響や処分場周辺における河川流量の減少や地下水位の低下などの環境影響を引き起こす可能性に加え、排水処理作業の負荷やコストの問題にもつながるものである。また、坑内湧水に伴い、処分場周辺の酸素を含む地表水や地下深部の化石水、沿岸部における海水の引き込みが生じ、処分場周辺の地下水の化学組成が変化する可能性がある。これらの坑内湧水に伴う影響と坑内湧水抑制対策の有効性を評価するため、2017年度より地下水流動解析コードを用いた評価技術の開発に取り組んでいる。この評価技術は、坑内湧水量及び処分場周辺の地下水位の分布などを推定するとともに、処分場の建設・操業期間における湧水に伴う処分場周辺の水理場及び酸化還元環境などの化学場の変化、閉鎖後の過渡期におけるそれらの回復過程を定量的に把握することを目的としている。

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 (Aquanty, 2018) を用いて、処分場の建設・操業・埋戻しの各工程が同時に進行する過程をシミュレーションし、坑内湧水量及び処分場周辺の地下水位の分布を推定する坑内湧水量等の評価・解析技術について検討した。検討した方法を、「2.1.1 四次元地質環境モデルの構築技術の整備」で構築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利用し、その内陸部や沿岸海底下に設置した処分場（「2.2.10 地下施設レイアウトオプションの検討」参照）の坑内湧水量と周辺の地下水位の低下の評価に適用し、同技術が地下施設レイアウトの設計オプションの比較に利用可能であることを示した。2020年度からは、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）にも取り組んでいる。

2. 2021年度の主な成果

2021年度は、HydroGeoSphere を用いた坑内湧水量等評価・解析技術の総合的な V&V を目的として、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を用いて、解析結果の妥当性の確認を進めた。エスポ岩盤研究所は、エスポ島の割れ目や断層帯を伴う結晶質岩中に設置されており、直線及び螺旋斜坑、立坑、水平坑道及び試験坑道から構成されている（図 1 参照）。これらの特徴は日本の深成岩類に設置した処分場の地下施設レイアウトと類似であり、こうした処分場の特徴を可能な限り忠実にモデル化して解析を行った。

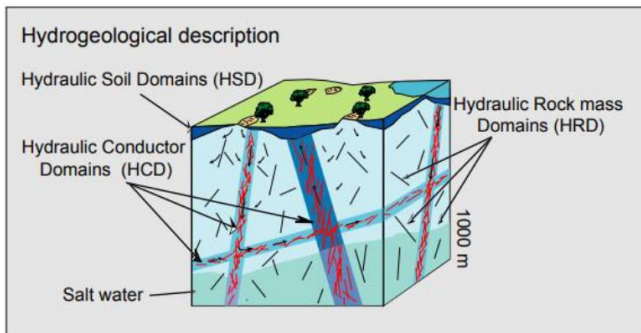
処分場の建設・操業中の化学場の変化を評価するために、異なる化学組成を有する地下水（降水、海水、古海水など）が坑内湧水に伴って混合される現象、及び地表からの酸素の流入と岩盤中の含鉄鉱物（黒雲母など）による消費の現象を評価する解析技術についても検討した。



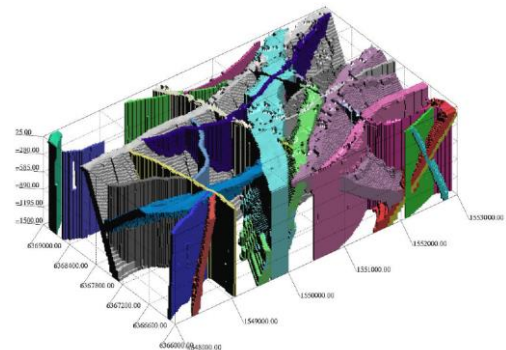
(a) エスポ岩盤研究所の位置 (Rhén and Smellie, 2003 に加筆) (b) エスポ岩盤研究所の構成 (SKB 提供図に加筆)

図 1 エスポ岩盤研究所周辺の水理地質構造

スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（以下、「SKB」という）より提供されたエスポ岩盤研究所周辺の地質に関するデータに基づいて、水理地質構造モデルを構築し（図 2 参照）、同研究施設の建設過程（1990～1997 年）を再現して、地下水流動解析を実施した。坑内湧水量と施設周辺の観測孔の地下水位の観測値と解析値を比較したところ、坑道掘削の進展に伴い、坑内湧水量が徐々に増加し、その後、増加が鈍化する様子、及びエスポ岩盤研究所周辺のボーリング孔を用いた全水頭の観測値のどちらの値も設計や影響評価を実施する上で概ね実用的な範囲で再現できた（図 3 参照）。また、化学場の変化に関しても、HydroGeoSphere を用いて、エスポ岩盤研究所周辺のボーリング孔内の地下水化学組成について、異なる組成を有する地下水の混合を想定して解析することによって概ね再現することができた（図 4 参照）。



(a) エスポ岩盤研究所周辺の水理地質構造の概念モデル (Rhén and Smellie, 2003)



(b) 広域スケールにおける断層の三次元分布

図 2 エスポ岩盤研究所周辺の水理地質構造

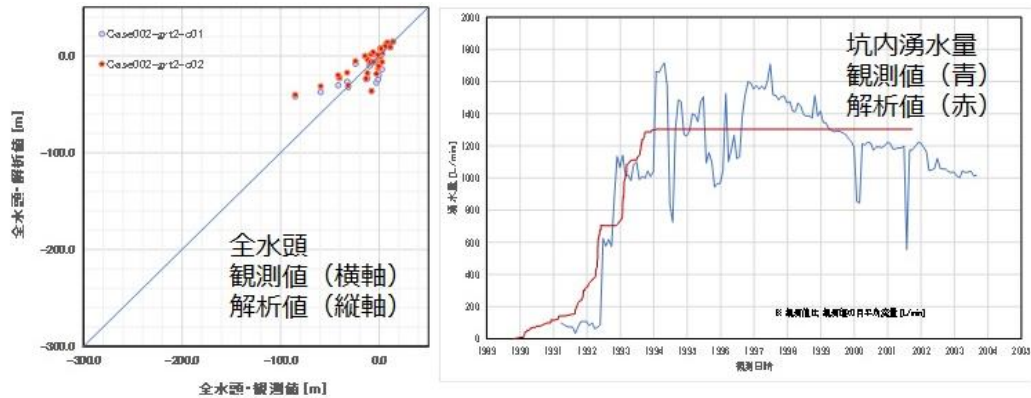


図 3 解析コード HydroGeoSphere を用いた坑内湧水量及び全水頭の解析値と観測値の比較

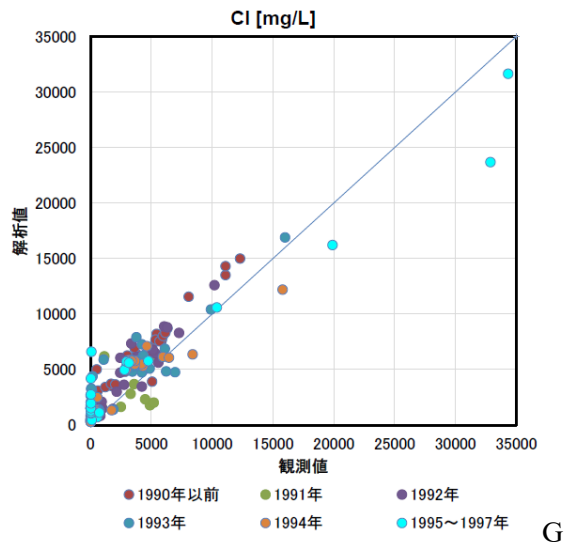
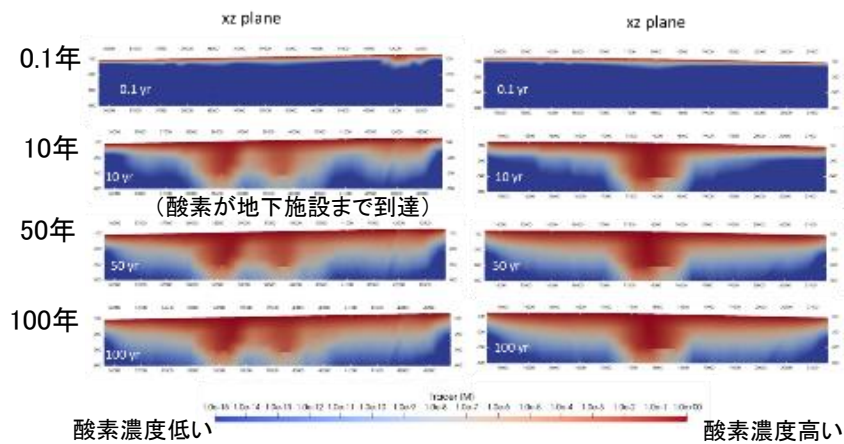


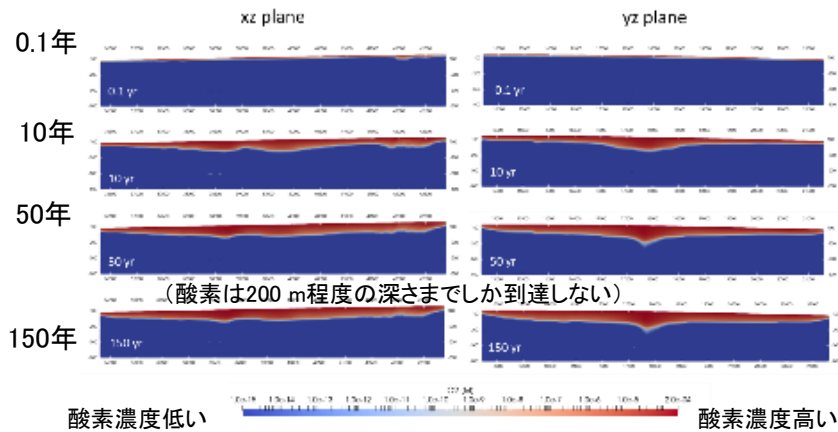
図 4 エスポ岩盤研究所周辺のボーリング孔内の地下水化学組成の解析値と観測値の比較

このように複数の指標において、良好な再現性が得られた理由としては、エスポ岩盤研究所周辺の地形が平坦であり、周囲を海で囲まれていること（図 1(a) 参照）、地下水の移行経路が透水性の高い断層（図 2 に示した HCD）であること、水理地質構造及び水理環境条件が単純であり、地下水流動解析においてモデル化の不確実性となる要因が少ないことが考えられる。国内で観測されるような被覆堆積層を有する結晶質岩への本解析技術の適用性については、被覆堆積層の透水性と貯留性が地下深部の結晶質岩からの坑内湧水や地下水位の空間分布などにも影響を与えると考えられることから、さらなる確認が必要である。

化学場の解析技術のうち、坑内湧水に伴う地表からの酸素の流入の評価については、HydroGeoSphere と既存の化学反応輸送解析コード QPAC (Quintessa, 2012) を連成する方法（一次元解析）、及び水理場と化学場の連成解析が可能なコード PFLOTRAN (Hammond et al., 2014) を組み合わせる方法（三次元解析）を検討した。どちらの方法でも、立坑を除けば、割れ目内を地下水が浸透していく過程において、割れ目の周辺の岩盤中に黒雲母が存在していれば地下水中の溶存酸素が消費され、地下施設までは酸素が到達しないという結果が得られており（図 5 参照）、地下施設の建設・操業中、及び回復過程の化学場の解析に利用可能であると考えられる。



(a) 岩盤中で酸素が消費されないケース



(b) 還元性鉱物(黒雲母)で酸素が消費されるケース

図 5 仮想的な地下施設を用いた割れ目の地下水中の溶存酸素消費の評価例 (三次元解析)

3. 今後の展開

被覆堆積層を有する結晶質岩に設置された地下研究施設の例として、瑞浪超深地層研究所の建設過程に得られた観測データに対して、これまでに開発した湧水評価技術を適用し、その妥当性の確認を行う。化学場の解析技術については、評価解析のための基盤が整ったことから、引き続き酸素消費反応解析の V&V に取り組む。

参考文献

- Aquanty (2018) : A New Boundary Condition in HGS to improve Numerical Precision in Simulating Groundwater Flow into Underground Openings, Technical note, Aquanty Inc., Canada.
- 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.
- Quintessa (2012) : QPAC: Quintessa's General-Purpose Modelling Software, QRS-QPAC-11.

Rhén, I. and Smellie J. (2003) : Task force on modelling of groundwater flow and transport of solutes,
Task 5 Summary report, SKB Technical Report TR-03-01.

地下施設レイアウトオプションの検討

市村 哲大 鈴木 寛

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

処分場を設置する場所の地上及び地下環境（サイト環境条件）は、内陸部あるいは海底下も含めた沿岸域、深成岩類あるいは堆積岩類など、多様な組み合わせとなることが想定される。サイトの環境条件に対応して、柔軟に処分場の地下施設レイアウトの設計を可能とする方法論の整備に取り組んでいる。

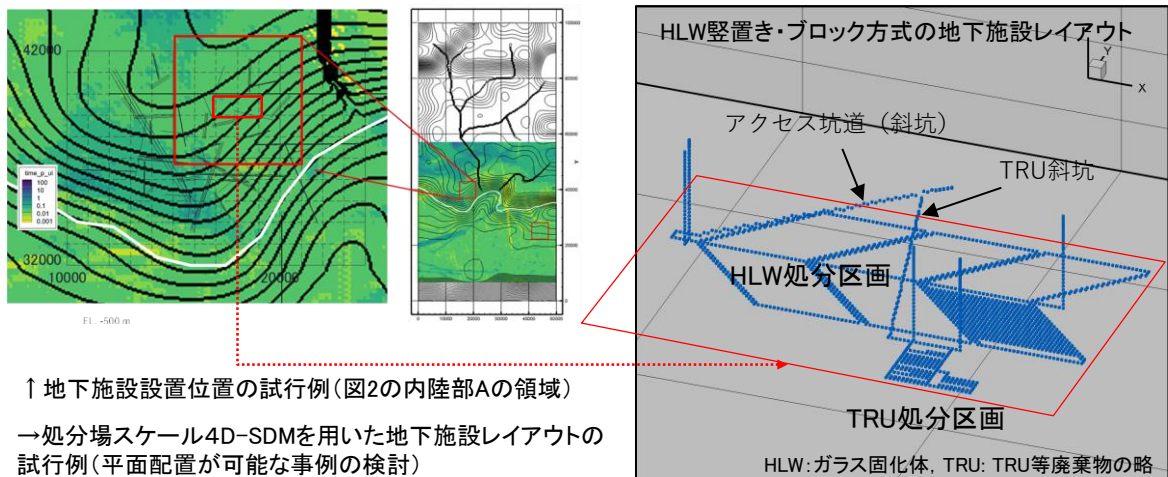
包括的技術報告書（NUMO, 2021）においては、地下深部の検討対象母岩に対する地質環境モデルを対象に地下施設レイアウトの設計要件と設計方法を示したうえで、内陸部を想定して設計例を示した。その後、上載地形や将来 100 万年程度の長期にわたる地表から地下深部までの地質環境特性の時間的・空間的な変化の情報を含む四次元地質環境モデル（4D-SDM）の構築技術の整備（「2.1.1 四次元地質環境モデルの構築技術の整備」参照）に伴い、長期的な気候変動や隆起に伴う海水準変動などの影響を考慮して処分場の設計を試行することが可能となっている。

この技術開発では、これまでに例示的に作成されている深成岩類及び新第三紀堆積岩類の 4D-SDM を対象に地下施設レイアウトの試設計を実施することで、包括的技術報告書で示した地下環境のみを対象とした地下施設レイアウトの設計の方法を、地上までを含む 4D-SDM に適用可能な方法として改良することを目的とする。

2. 2021 年度の主な成果

深成岩類と新第三紀堆積岩類に対して事例的に作成した 4D-SDM に対するレイアウト検討の結果をそれぞれ図 1、図 2 及び図 3 に示す。これらの 4D-SDM は、沿岸域を対象としており、内陸部だけでなく沿岸海底下も地下施設の設置可能領域として検討することが可能である。試設計においては、包括的技術報告書で示した設計要件（「坑道掘削の容易性」、「坑内湧水量の抑制」、「閉鎖後長期の放射性物質の移行の抑制」）に加えて、沿岸域に特徴的な事象である海水準変動に伴う地下水流動系の変化とそれに伴う流出点位置の変化を考慮した。

図 1 に示すように内陸部に地下施設を建設する場合には、包括的技術報告書で示した方法に基づいて、長さ 1 km 以上の断層が処分坑道を横切らないように 6 区画分の処分区画を配置した。アクセス坑道の線形は直線斜坑とし、高レベル放射性廃棄物と TRU 等廃棄物の受入・検査・封入施設が地下施設の直上にあることを想定した。立坑、主要坑道、及び連絡坑道については、掘削土の搬出、坑内の換気、湧水の排水経路が建設区画と操業区画で独立となるように配置した。



↑ 地下施設設置位置の試行例 (図2の内陸部Aの領域)
 → 処分場スケール4D-SDMを用いた地下施設レイアウトの試行例 (平面配置が可能な事例の検討)

図 1 深成岩類に対して作成した 4D-SDM を用いた内陸部における地上施設の位置と地下施設レイアウトの試行例 (広域スケール及び処分場スケールの定義は包括的技術報告書と同じ)

包括的技術報告書では検討していなかった地上施設の設置可能領域についても、上述の 4D-SDM を対象として実施した。沿岸海底下に地下施設を配置する場合には、内陸部のように地上施設を地下施設の直上に配置することができない。このため、地下施設または地上施設の設置位置のそれぞれで活断層を避けるだけでなく、両施設を繋ぐアクセス坑道の配置においても活断層の位置を考慮した。地下施設の設置にあたっては、水深を考慮して、海退期においても地表面 (海底面) から 300 m 以上の深度を確保できるようにした。

地上施設の場合には、設置可能領域周辺の地形、地震や津波などの自然現象の影響低減及び既存の社会インフラと輸送ルートとの関係を考慮して検討することが求められる。図 2 に深成岩類に対して作成した 4D-SDM に対する地上施設の設置可能領域の検討事例を示す。この例では、上述の検討で設定した 3 か所の地下施設の設置可能領域から、直線距離が短くなること、輸送ルートの傾斜が構外輸送車両の走行に問題ないこと、津波の影響を受けやすい地形ではない、あるいは台地など津波が到達しにくい位置であること、及び陸域の断層の位置を考慮して、地上施設の設置可能領域の選定を試行した。

図 3 に示す新第三紀堆積岩類の 4D-SDM に関しては、上述のような考慮事項に該当するような地形や断層が少なく、津波の影響の観点からも差が少ないと考えられたため、沖合の地下施設の位置から最も近い陸地を地上施設の設置可能領域とする選定を試行した。

3. 今後の展開

引き続き、4D-SDM の構築技術に関する進展に応じてレイアウト検討を行い、設計手法の高度化を図るとともに、安全評価との連携をより高めた技術として改良を行う。本検討で得られた成果は、サイト環境条件に応じた処分場設計の具体的な方法と手順に反映する。

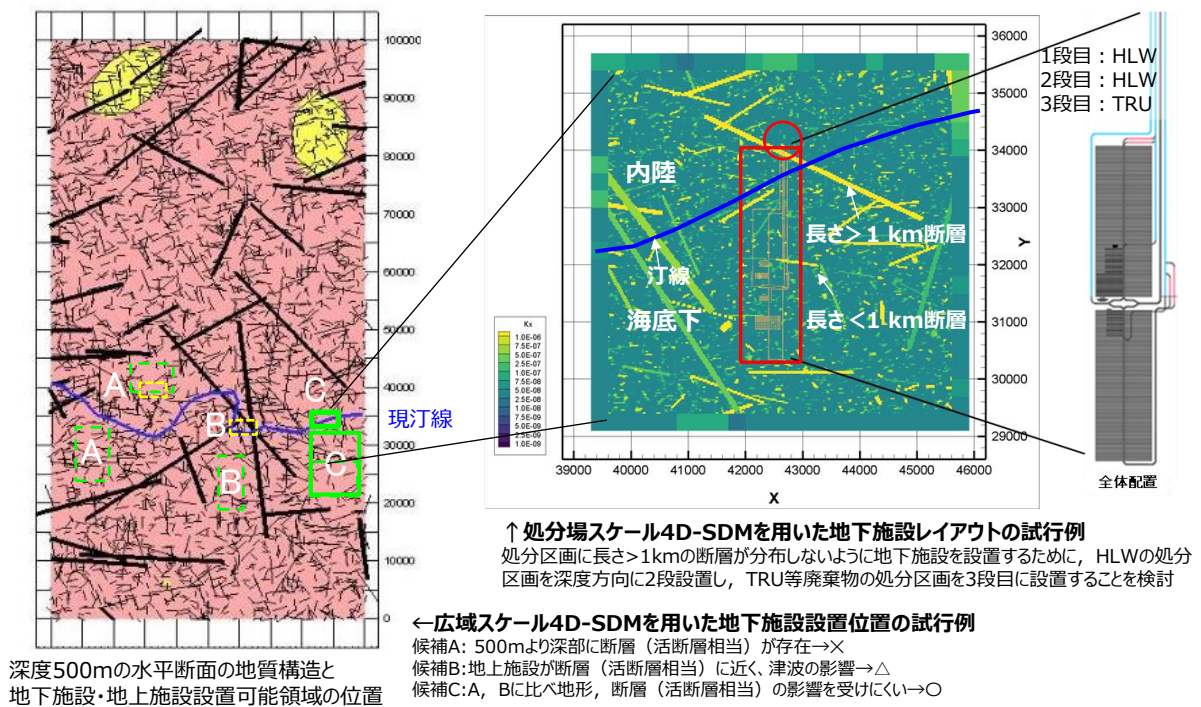


図 2 深成岩類に対して作成した 4D-SDM を用いた地上施設の位置と地下施設レイアウトの試行例（広域スケール及び処分場スケールの定義は包括的技術報告書と同じ）

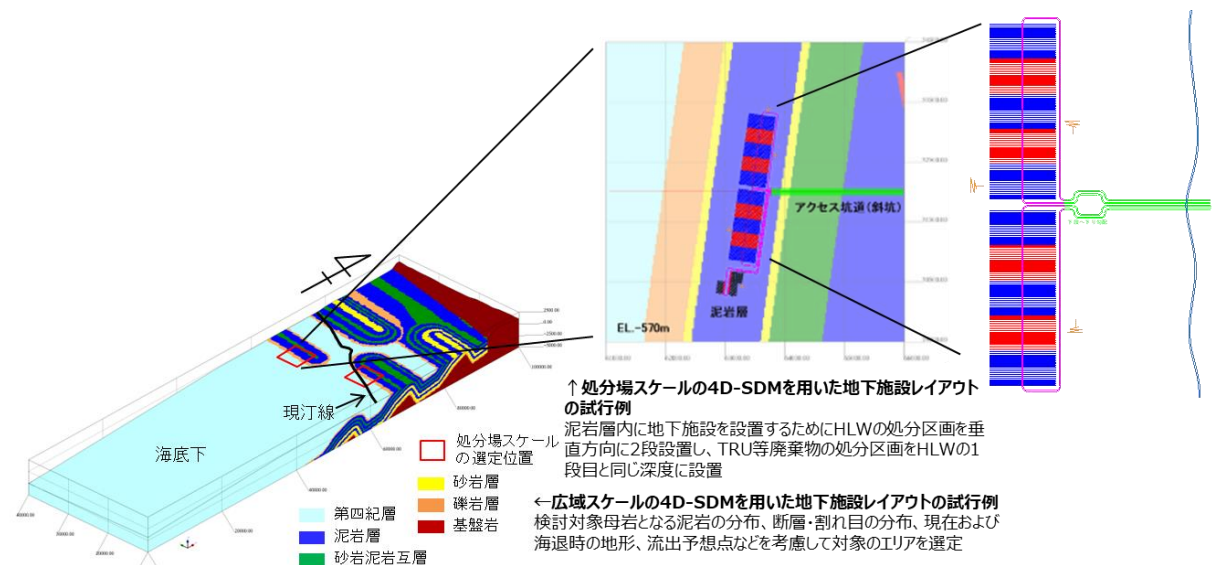


図 3 新第三紀堆積岩類に対して作成した 4D-SDM を用いた地上施設の位置と地下施設レイアウトの試行例（広域スケール及び処分場スケールの定義は包括的技術報告書と同じ）

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.

スウェーデン・キルナ鉱山における鉄-ベントナイト相互作用に関するナチュラルアナログ研究

後藤 考裕¹ 根本 脩平¹ 鈴木 覚¹ 北川 義人¹ 藤村 竜也² 菊池 亮佑² 大竹 翼²
佐藤 努² Raphael Schneeberger³

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)

1. 背景・目的

炭素鋼オーバーパックの腐食に伴う化学反応によって、ベントナイトが変質し（鉄-ベントナイト相互作用という）、緩衝材の膨潤性や収着性などの性能が低下する可能性が指摘されている（NUMO, 2021）。このため、包括的技術報告書では、室内試験結果や化学反応シミュレーションに基づいて、鉄-ベントナイト相互作用による性能低下の範囲が許容可能であることを論じた。

地層処分の閉鎖後長期の時間スケールを考えると、このような化学反応シミュレーションの対象となる時間スケールは長期間にわたるため、室内試験の結果や科学的に認められている法則だけでなく、シミュレーションの妥当性を説明するさまざまな証拠を準備して、シミュレーション結果の信頼性を高めることが重要である。このため、鉄-ベントナイト相互作用に関し、処分場で発生する現象と類似の自然現象（以下、「ナチュラルアナログ」という）を用いて傍証する取組みが国際的に行われてきている。

スウェーデン北部のキルナ鉱山はヨーロッパの主要な鉄鉱床であるが、一部で粘土鉱物が確認されている。粘土鉱物は地表から約 1,200m の深さに位置しており、Ca 型のモンモリロナイト、Na, K 型のイライト-スメクタイト、緑泥石、黒雲母、滑石が含まれている。ベントナイトに含まれる粘土鉱物であるスメクタイトの形成温度は 50°C~120°C と推定されており、形成年代はキルナ鉱山近隣のマルムベリエトで採取された粘土より K-Ar 法で測定された 837~941 Ma と推定されている（Martinsson et al., 2016 ; Rieger, 2017）。

このため、鉄鉱床とスメクタイトが、地温、深度が地層処分と類似の環境条件で長期間接触しているにもかかわらず存在していることから、ベントナイトの変質が抑制されるメカニズムが働いていることが示唆され、鉄-ベントナイト相互作用の傍証事例となる可能性がある。

接触部近傍でベントナイトの変質が抑制されているメカニズムを解明し、化学反応シミュレーションに反映することを目的として、現地で採取した試料の化学分析を実施するとともに、変質が抑制されている原因について調査した。

なお、本検討は NUMO と北海道大学の共同研究として実施し、試料は NUMO が参画している国際共同研究プロジェクト KiNa（Kiruna Natural Analogue Project の略。IDG-TP¹の一つ）を通じて入手した。

¹ IGD-TP: Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform の略
欧州の実施主体・研究機関が地層処分の実用化に関する国際共同研究を実施する際の研究コンソーシアムの名称

2. 2021 年度の主な成果

2021 年度は、採取した鉄鉱床とベントナイトの接触部試料のうち、ベントナイト部に対して X 線回折 (XRD) を実施し、スメクタイトのピークを確認した (図 1)。また、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて境界部分のベントナイトを観察した。図 2 (a) はベントナイト中にマグネタイトの粒子が存在する様子を示している。このうち、赤枠で囲んだ領域に対して、エネルギー分散型 X 線分析 (EDS) による元素マッピングを実施した。図 2 (b) に元素マッピングの結果を示す。マグネタイト粒子とスメクタイトが接触しているにも関わらず、マグネタイトからスメクタイトへの鉄イオンの侵入を示唆する結果は確認できなかった。

以上のことから、2021 年度に分析した鉄鉱床との接触部位近傍の微細部において、ベントナイト中の粘土鉱物は健全であり、変質は確認できなかった。この要因として、スメクタイト間隙に水が浸入せず、その結果磁鉄鉱から Fe がスメクタイト側に広がらず相互作用が起きなかったことと、接触期間が想定より短く相互作用がまだ起きていないことの二つが考えられる。

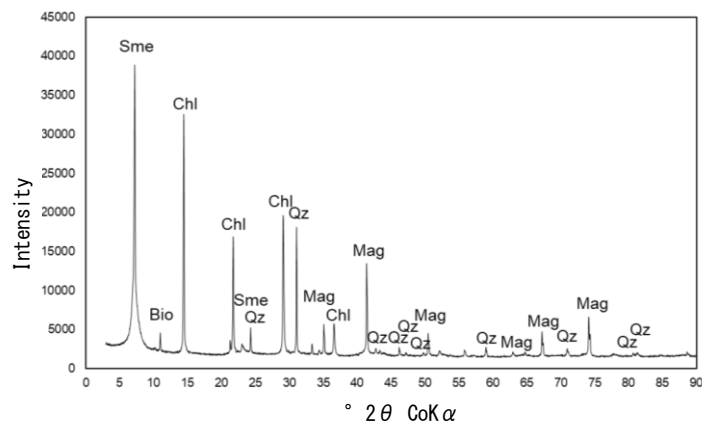
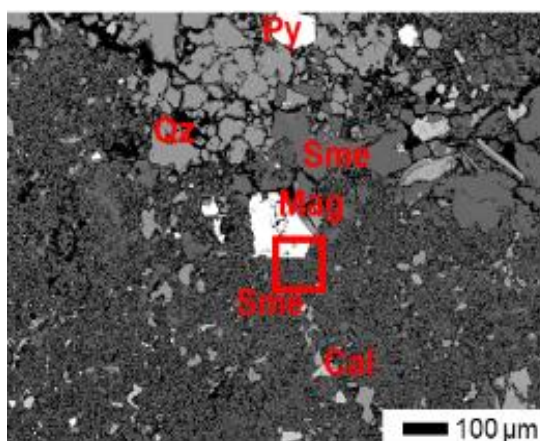
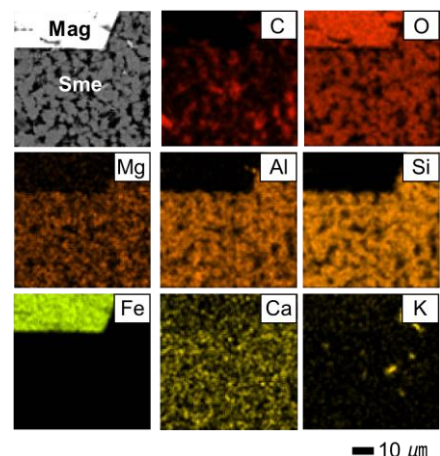


図 1 ベントナイト部分の XRD 分析結果

Sme : Smectite, Bio : Biotite, Chl : Chlorite,
Mag : Magnetite, Qz : Quartz



(a) SEM 観察画像



(b) 元素マッピング分析結果

図 2 SEM-EDS による分析結果

Sme : Smectite, Bio : Biotite, Cal : Calcite, Mag : Magnetite, Qz : Quartz,
Py : Pyrite

3. 今後の展開

変質が確認できなかった二つの要因についてさらに検討するため、鉄鉱床とベントナイトの接触期間及び、ベントナイト中の地下水の飽和に関する履歴について調査する。

参考文献

Martinsson, O., Billström, K., Broman, C., Weihed, P. and Wanhainen, C. (2016) : Metallogeny of the Northern Norrbotten Ore Province, Northern Fennoscandian Shield with emphasis on IOCG and apatite-iron ore deposits. *Ore Geology Reviews*, Vol.78, pp.447–492.

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.

Rieger, P. (2017) : LOW-TEMPERATURE ALTERATION IN THE IRON ORE DEPOSITS OF NORRBOTTEN, Ludwig-Maximilians Universität München Fakultät für Geowissenschaften Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Master Degree Program in Geology.

2.3 閉鎖後長期の安全性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、水理的、力学的、化学的な状態変遷に関する評価のための数理モデルについて、日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という）や大学との共同研究と、国際共同研究プロジェクト（CIM（Carbon-14 and Iodine-129 Migration in Cement）、LTD（Long Term Diffusion）、CFM（Colloid Formation and Migration）等）への参加を通じて、実験データの継続的な取得を行うとともに、これらに基づき、評価に用いる数理モデルの開発・改良、妥当性の確認を進め、これらモデルの信頼性向上を図った。

また、閉鎖後長期の安全性の評価を実施するために必要となるシナリオ構築、モデル及びデータセットに関連する多様な情報・データ・ノウハウ等を整理するための知識モデルの開発とこれに基づく情報管理ツールの整備に継続的に取り組み、プロトタイプ製作を行った。

さらに、地下深部の環境下での核種移行に関する解析技術の信頼性をより一層高める観点から、処分場の設計、処分場の状態変遷、処分場周辺の岩盤の水理地質構造等に関する様々な情報を核種移行モデルにより現実的に反映する方法と、地下深部から生活圏に至る核種移行評価に重要な役割を果たす地下水流動モデルの高度化を進めた。このため、地質環境の長期変遷を考慮した地質環境モデルに基づき設計した処分場を対象として、地下水流動解析とランダムウォーク粒子追跡解析を組み合わせた解析に基づく核種移行解析モデルの改良に継続して取り組んだ。

また、核種移行解析を行うために必要となる放射性核種の溶解度や吸着分配係数等について、わが国の多様な地質環境に対応できるよう拡充を図るため、JAEA や大学、量子科学技術研究開発機構放射線医学研究所との共同研究を進めるとともに、地表環境におけるデータ取得の方法の妥当性を確認するため、保健物理学会に専門委員会を設置していただきレビューを進めた。また、試験データを実際のボーリング調査で明らかとなるサイトの地質環境条件に応じて適用する方法の整備に努めた。

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

市川 希¹ 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・二次鉱物の生成やイオン交換反応といった変質現象を引き起こし、緩衝材に期待する安全機能に悪影響をおよぼす可能性がある。

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。本検討は日本原子力研究開発機構との共同研究で実施しているものである。

2021 年度においては、試験で取得したデータから解析モデルの改良に向けて特に考慮すべき不確実性の大きいパラメータを特定するための感度解析手法を整備する。

2. 主な成果

(1) 鉄と緩衝材の相互作用

ベントナイトと鉄粉を圧縮して反応させた試験試料(図 2)の SEM 観察と元素分析の結果、図 3 のように、反射電子像中の鉄粉(中央の白い領域)の周囲に Al を含まず、Si と Fe を主成分とする化学反応モデルに含まれる珪酸塩鉱物の一種と考えられる変質鉱物の生成が認められた。この結果より、試験をさらに長期間継続することで化学反応モデルの妥当性確認に必要なデータの一つである圧縮試料中で生じる変質鉱物の種類を特定できる見通しを得た。

(2) セメントと緩衝材の相互作用

50℃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4）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。解析モデルに反映する鉱物、及び鉱物の反応比表面積、反応速度定数、平衡定数等のパラメータには不確実性が伴うため、不確実性解析により解析結果の変動幅を確認したうえで、解析結果と試験結果とを比較することが必要である。こうした不確実性の定量化にあたっては、解析結果に大きく影響する鉱物やパラメータを明らかにし、これらに着目することが有効である。このため、包括的技術報告書に基づくパラメータ値と室内試験条件を考慮したレファレンスケースから確認した二次鉱物4種、及びモンモリロナイトを対象に反応比表面積を対象とした感度解析を行った。その結果、反応比表面積が変化することでモンモリロナイトの減少量が大きく変化することが分かった（図5）。

3. 今後の展開

2022年度までに、鉄と緩衝材の研究については、現在の試験を継続することで実現象をより忠実に表現するための化学反応モデルに必要な変質鉱物データを取得する。加えて、不実性の検討にあたって重要と考えられる反応速度定数や平衡定数についても引き続き感度解析を実施し、解析結果に影響を及ぼす重要な鉱物やパラメータを特定した後、それらの不確実性を定量化してモデル解析結果の幅を把握し、試験結果との比較によってモデルの妥当性を確認する。

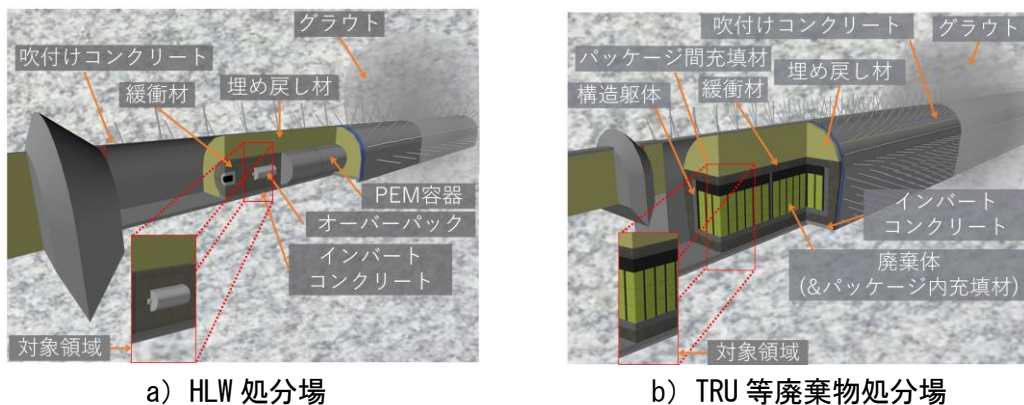


図1 処分場の構成要素（NUMO, 2021を編集）

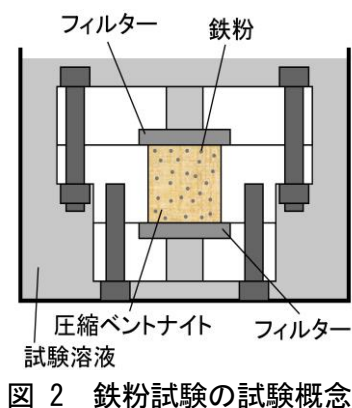


図2 鉄粉試験の試験概念

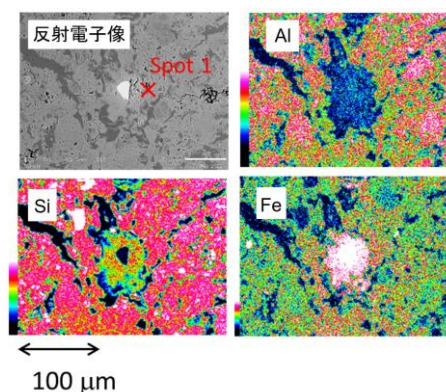


図3 ベントナイトと鉄粉を圧縮して反応させた試験試料のSEM・EDS観察結果（試験期間1年8か月、80℃）

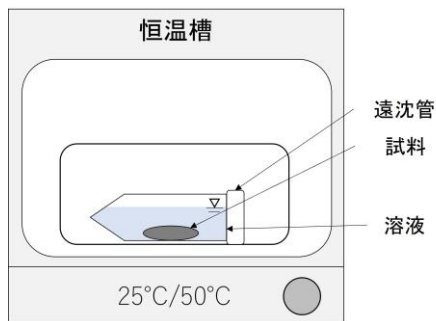


図 4 バッチ変質試験の試験概念

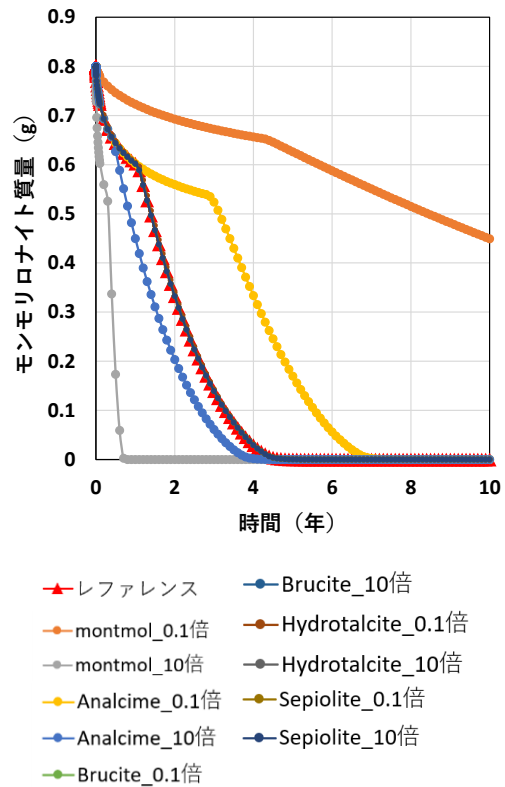


図 5 バッチ変質試験におけるモンモリロナイト溶解量に関わる感度解析結果

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.

ベントナイトコロイドによる核種移行に関する評価モデルの高度化

浜本 貴史¹ 石田 圭輔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スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（以下、「SKB」という）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ことを指摘している。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、概要調査段階で行う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）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・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に関しては、地下水中の代表的な 1 価陽イオンであるナトリウム（Na）濃度と、代表的な 2 価陽イオンであるカルシウム（Ca）濃度をパラメータとして安定・生成条件を特定する（図 2）。2021 年度には、①に関して Ca 濃度のみをパラメータとした安定条件の特定、Na 濃度のみをパラメータとした生成条件の特定を目的として検討を実施した。また、②に関しては、モデルの構築や妥当性確認に必要なデータの取得を行うための検討を実施した。

2. 主な成果

① 国内産ベントナイトのデータによるコロイド生成条件の明確化

コロイド安定性評価試験（写真 1）を実施し、溶質に含まれる陽イオンが Na のみの条件ではコロイドが安定である Na 濃度 0.01 mol/L の環境において、コロイドが不安定になる（沈殿する）Ca 濃度が 1×10^{-3} mol/l 以下の範囲に存在することを明らかにした。さらに、安定条件が既知（Ahmad and Karube, 1998）である溶質に含まれる陽イオンが Na のみの溶液において、コロイド生成試験により、生成条件が 0.028 mol/l であることを特定した。

② コロイド・核種移行モデルの構築

CFM では、モデル構築に必要なコロイド生成及び移行現象の理解とモデルの妥当性確認

(validation) を目的とした原位置データを取得している。同プロジェクトにおいて、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 (図 3) について、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を行うことで採取した岩石試料の分析に向け、岩石試料の加工方法を決定した。また、同プロジェクトにおいて、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の圧縮ベントナイトからのコロイド生成試験を継続 (2019 年～) し、割れ目におけるコロイドの移行量の経時変化に関するデータを取得し、コロイド共存下での核種移行モデルの妥当性確認に必要なデータの整備を進めた。

3. 今後の展開

①に関しては、溶質に含まれる陽イオンが Na のみである水質におけるコロイド生成条件を特定できたため、2022 年度はこの安定条件を参考に試験条件を設定し、Na・Ca 共存系におけるコロイドの安定条件を明らかにしていく。②に関しては、モデル構築に必要な境界条件を制御した系でのコロイド・核種移行データを取得するために、室内でのコロイド共存下での核種移行試験を開始する。原位置試験で採取した岩石やベントナイト試料の分析に基づく現象理解と室内試験のデータにより、コロイド共存下での核種移行モデルの構築を進める。

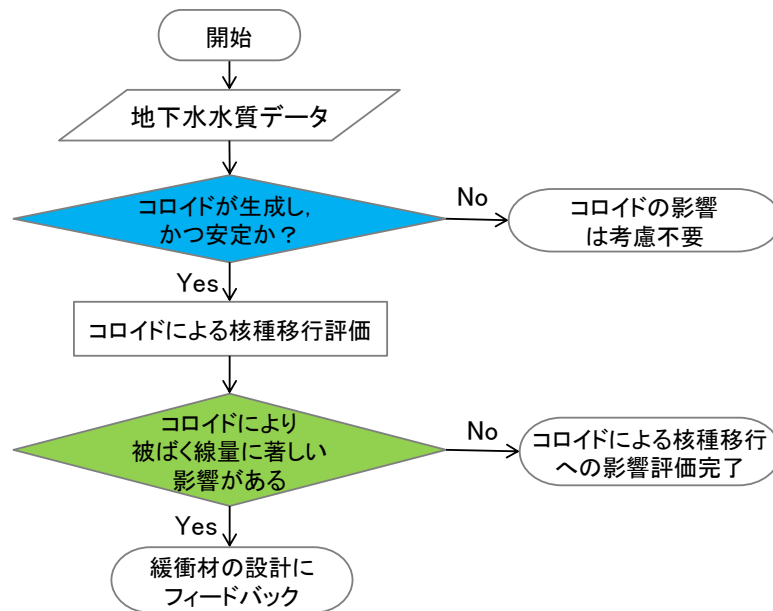


図 1 コロイド影響の評価フロー (案)

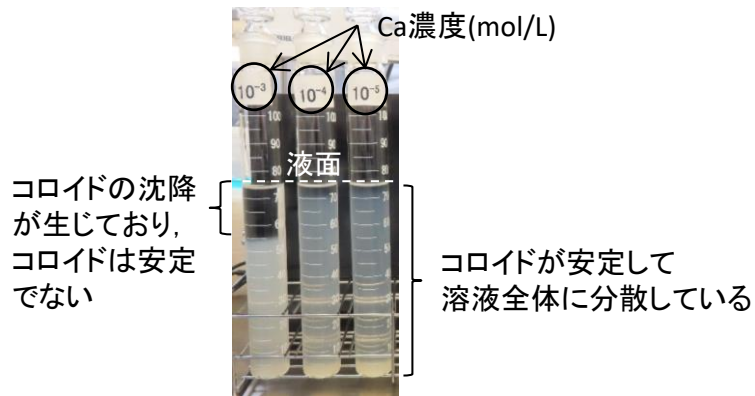


写真 1 コロイド安定性評価試験

(Ca 1×10^{-3} mol/l では、液面下部にコロイドが存在しない透明な領域があり、コロイドが沈降している。 1×10^{-4} mol/l, 1×10^{-5} mol/l では溶液全体にコロイドが安定して分散している)

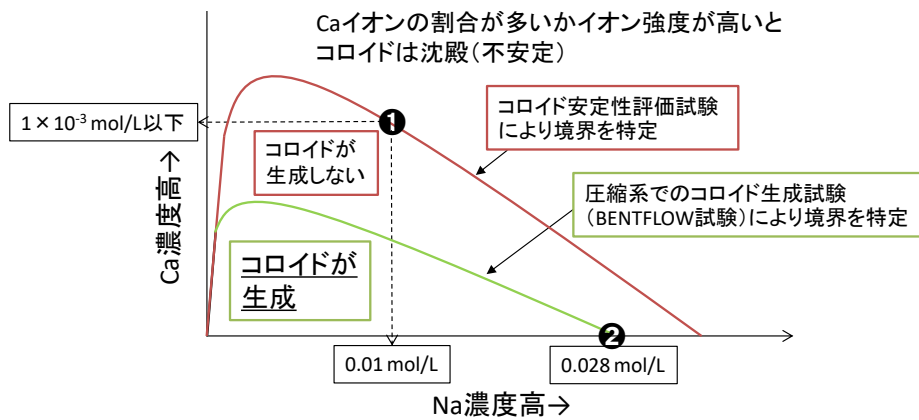


図 2 コロイド安定条件及び生成条件の概念図

(図中①は、Na 濃度 0.01 mol/L の条件では Ca 濃度が 1×10^{-3} mol/L 以下に安定条件があることを表す。②は、Na のみの条件では 0.028 mol/L が安定条件であることを表す。)

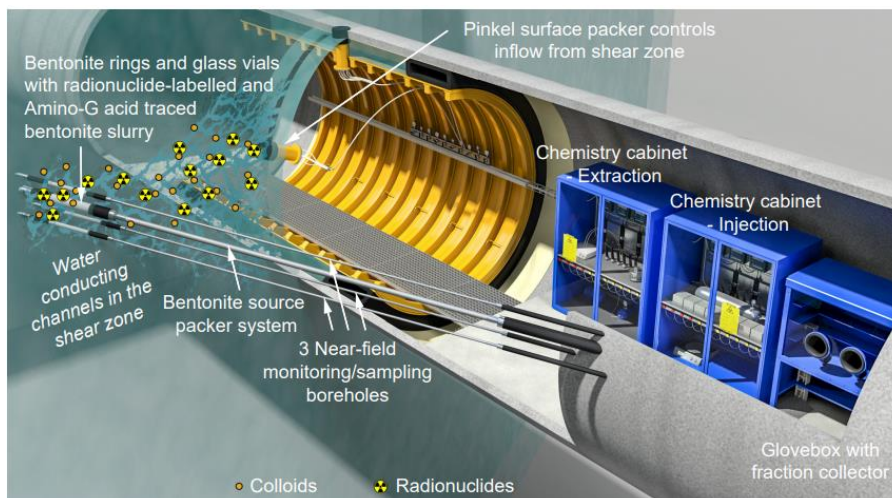


図 3 天然の割れ目を利用したコロイド共存下での放射性トレーサー移行試験の概念図 (Schlickerieder et al., 2017)

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., Karnland, O. and Nilsson, U. (2009) : Bentonite erosion. Final report, SKB Technical Report TR-09-34.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告 : わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－, NUMO-TR-20-03.
- 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.

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 石田 圭輔¹ 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

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）及び収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収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、日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という）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きている。上記モデルに対し、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必要がある。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、図2に放射性トレーサー移行試験の概念図を示す。これまで、国際共同研究の枠組みのなかで、原位置試験の実施に向け準備を進めるとともに、上記のマトリクス内部の不均質性を考慮したモデルや割れ目内部の不均質性を考慮したモデルを用いた予備解析を行ってきた。2021年度には、原位置データとの比較のためのモデルの較正（calibration）を目的として、モデルに含まれるパラメータの検討を実施した。

2. 2021年度的主要成果

グリムゼル試験サイトにおける原位置試験で使用するパッカーシステムについて、老朽化した部品の交換が実施された。非収着性トレーサー（ウラン）を用いて予備的トレーサー移行試験を行うことにより、更新したパッカーシステムが正常に機能していることを確認している。また、原位置試験用のトレーサー注入／排出システムの製作が完了し、試験開始の準備は順調に進んでいる。

割れ目内部の不均質性を考慮したモデルに対し、事前に測定することが困難である割れ目の形状に関するパラメータ（地下水が流れる領域の幅や厚み）について、予備的トレーサー移行試験で得たウラン移行量のデータに対するフィッティングによりパラメータ値を推定してモデルの較正を行った。これにより、今後実施する放射性核種を用いたトレーサー試験におけるモニタリングデータと較正した核種移行モデルによる解析結果との比較による妥当性確認（validation）の準備を完了

した。

3. 今後の展開

2022年10月に非収着性及び収着性の放射性トレーサーの注入を段階的に開始し、約2年間試験を継続してモニタリングデータを取得する。試験継続中は、その時点で得られている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オーバーコアリングを行うことで、母岩中の核種の詳細な分布を約1年かけて調べる。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。

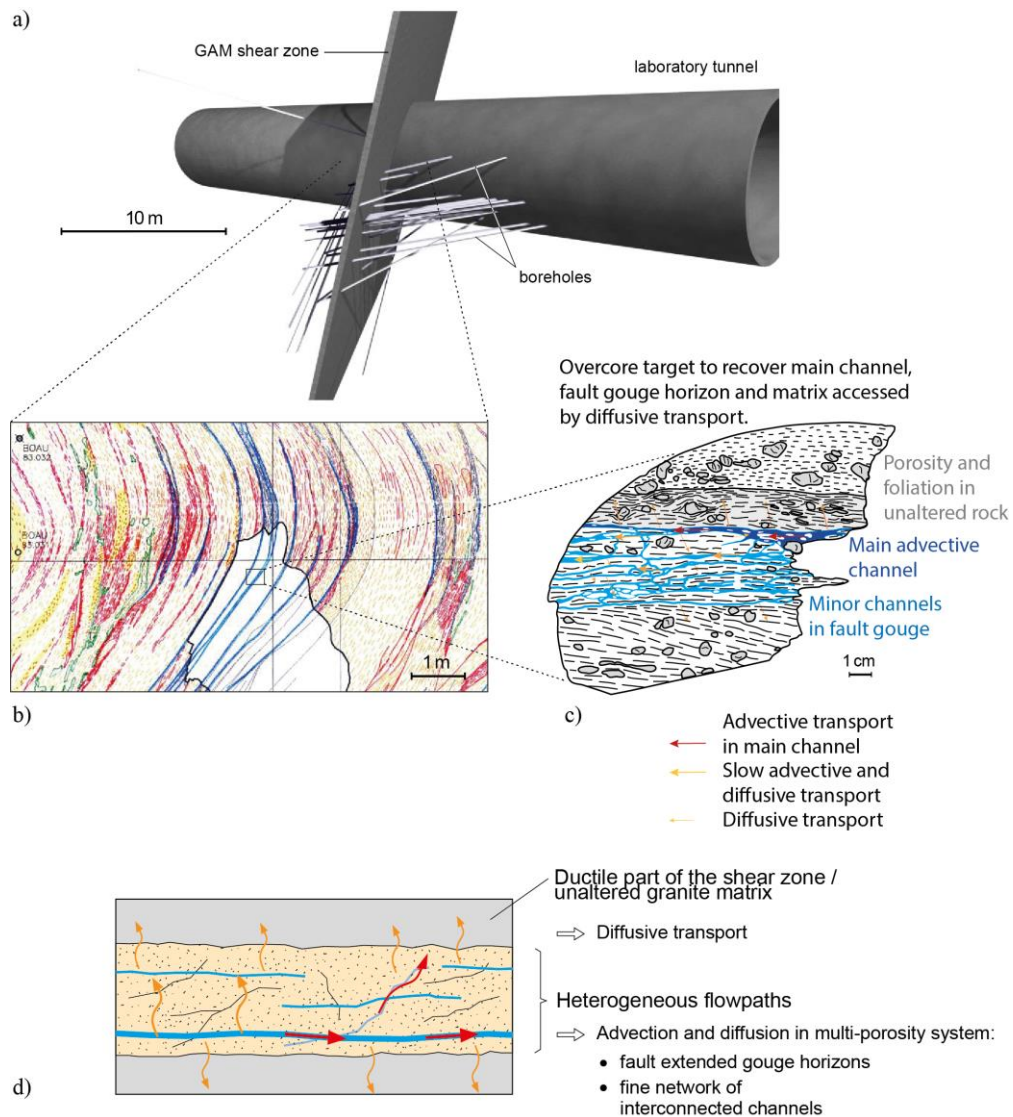


図1 放射性トレーサー移行試験で対象とする割れ目 (Marschall and Lunati, 2003)
 (図a: 試験実施箇所のボーリング孔の概念図, 図b: 坑道壁面の割れ目の分布, 図c: 割れ目
 中の微細構造の概念図, 図d: 核種移行経路の概念図)

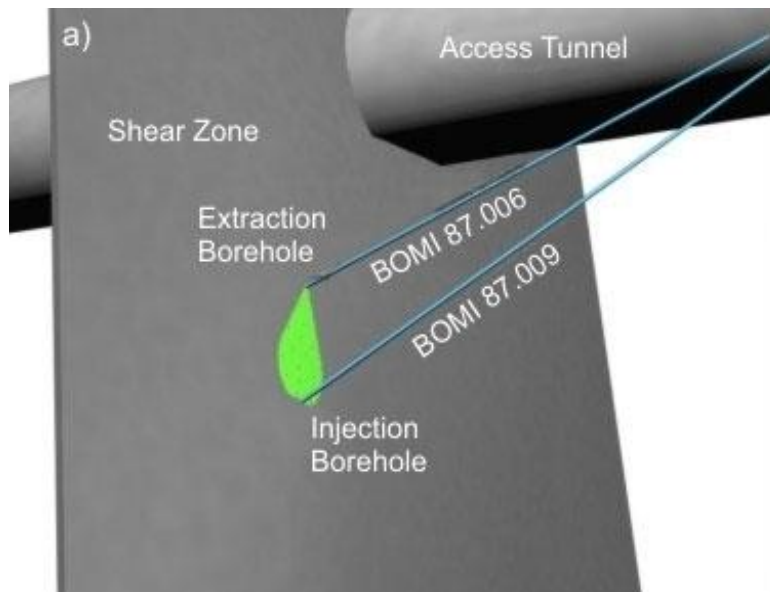


図 2 2つのボーリング孔を用いた放射性トレーサー移行試験の概念図
(Alexander et al., 2009)

参考文献

- Alexander, W. R., Frieg, B. and Ota, K. (editors) (2009) : The Nagra-JAEA in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock, III: The RRP project final report, Nagra Technical Report NTB 00-07.
- 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.
- 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関する技術開発事業 ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書.
- 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.

ガラス固化体の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 石田 圭輔¹ 三ツ井 誠一郎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。ガラスの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（接触する間隙水の水質、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（オーバーパック由来の Fe イオン等）や地下水成分（Mg イオン等）が共存する条件下のガラス溶解挙動の把握（日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という）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。それぞれの取り組みにおいて、これまでに次のような成果を得ており、日本セラミック協会ガラス部会放射性廃棄物分科会主催の第 3 回放射性廃棄物固化体討論会において成果を発表（日本セラミックス協会、2020）した。

- ・ JAEA 共研：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）により短期間（約 6 か月）のガラス溶解挙動に関するデータを取得
- ・ 九大共研：模擬廃棄物ガラスに接触させる溶液条件（液性・温度）を一定に制御できる試験装置（図 3）により、短期間（最長 10 日）の溶存 Si 濃度及び pH の条件依存性データを取得
- ・ 千葉大共研：廃棄物ガラスの組成を単純化した 4 成分（Si, B, Na, Al）のガラスを対象として高エネルギー X 線回折や多角固体 NMR 等による変質層の構造分析

これを踏まえ、2021 年度は、JAEA 共研ではガラス溶解挙動に関するデータ拡充、九大共研ではより長期間の試験による溶存 Si 濃度及び pH の条件依存性データ拡充、千葉大共研では変質層の構造の分析結果を再現した分子構造のモデル化を目的として研究開発を進めた。

2. 主な成果

JAEA 共研では、模擬廃棄物ガラスを FeCl₂ 溶液または MgCl₂ 溶液に浸漬させてガラス溶解挙動に関するデータを取得する短期（約 6 か月）の試験系について、これまでの経験に基づき、Fe イオンまたは Mg イオンの溶存状態を長期間（約 10 年）維持できるように装置の改良を実

施した。九大共研では、ガラス溶解挙動への影響が大きい溶存 Si 濃度及び pH の条件依存性データを取得し、図 4 に示すように溶存 Si 濃度 $[Si]=0$ ppm の条件ではガラス溶解速度はほぼ一定で変化せず、Si 濃度が増えるに従い、条件に応じて変質層がガラス溶解を抑制する保護膜として機能することが推測された。千葉大共研では、廃棄物ガラスの組成を単純化したガラスを対象に、変質層の分子構造を古典分子動力学計算でモデル化する手法を構築した（図 5 左）。この手法で作成したモデルを用いた分析により、変質層を介した核種の溶出挙動の把握に資する細孔構造（孔径や連結性等）及び細孔中に存在する水の状態の推定が可能となる。

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ガラス-溶液系の長期試験を開始するとともに、ガラス-炭素鋼共存系等のより現実的な条件での試験方法を検討する。九大共研では、日本で想定される環境条件（NUMO, 2021 で設定した地質環境を参照）でのデータ拡充によりガラス溶解挙動の環境条件依存性を評価する。千葉大共研では、分子構造モデルに基づく水の移行シミュレーションにより、変質層中を物質が移行する経路や拡散挙動を分析する（図 5 右）。

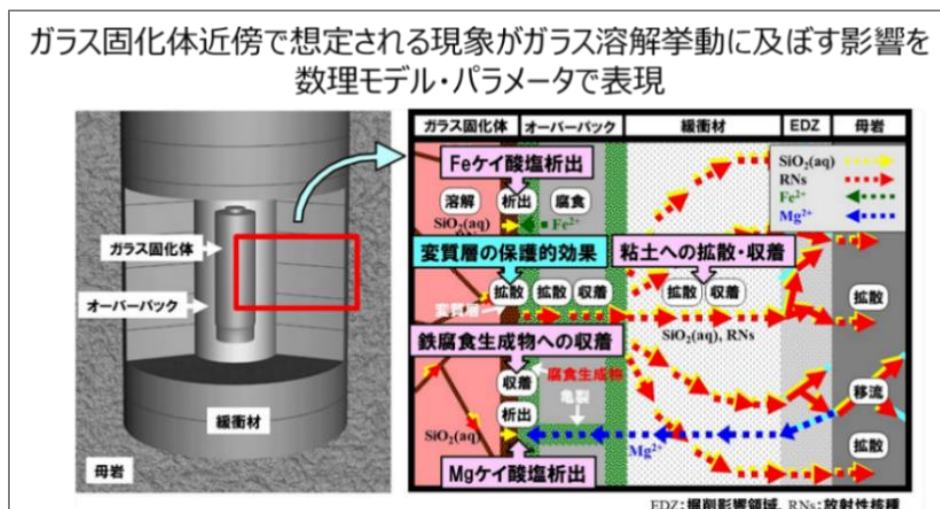
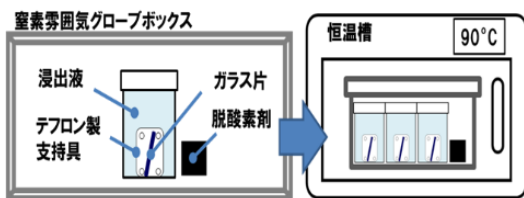


図 1 ガラス溶解モデルの概念図
(柴田ほか, 2015)



ガラス試料: JAEAガラス固化体の
模擬組成ガラス
試験溶液: $FeCl_2$ 溶液 (10mM)

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

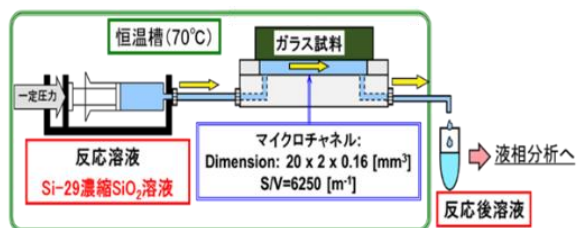


図 3 液性・温度条件を一定に制御可能なマイクロチャネル流水試験装置の概略

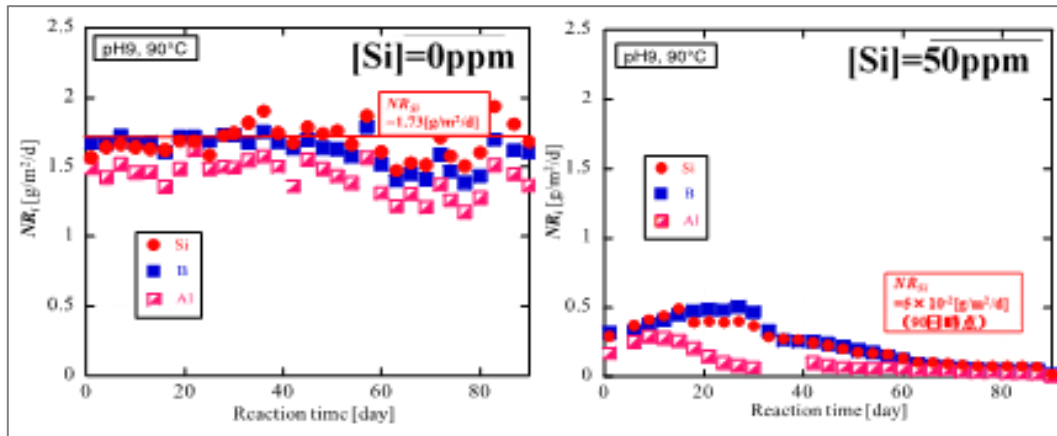


図 4 溶出速度の溶存 Si 濃度依存性
(pH9, 90°C, 90 日間)

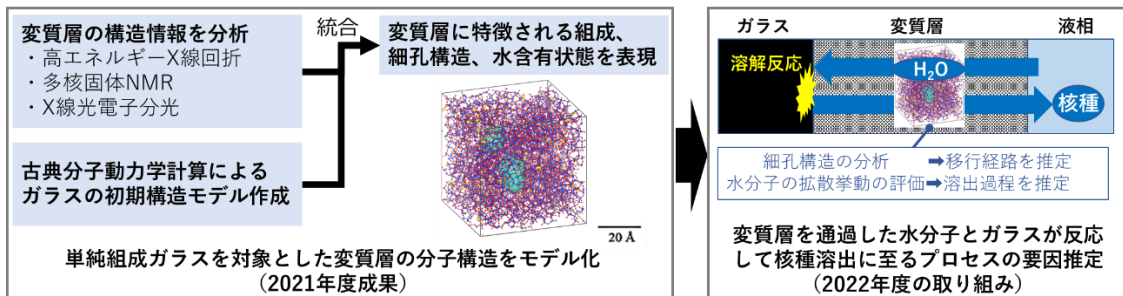


図 5 千葉大共研の実施概要

参考文献

- 柴田雅博, 澤田淳, 舘幸男, 牧野仁史, 若杉圭一郎, 三ツ井誠一郎, 北村暁, 吉川英樹, 小田治恵, 石寺孝充, 陶山忠宏, 畑中耕一郎, 仙波毅, 瀬尾俊弘, 亀井玄人, 黒澤進, 後藤淳一, 澁谷早苗, 後藤考裕, 窪田茂, 稲垣学, 守屋俊文, 鈴木覚, 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.
- 日本セラミックス協会 (2022): 第3 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.

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 市川 希¹ 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なっている (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 年から日本原子力研究開発機構との共同研究や、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 HotBENT (High Temperature Effects on Bentonite Buffers) (Nagra, Grimsel Test Site ホームページ) に参加し、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。これまでに、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はじめ、必要な化学連成・力学連成のプロセスを段階的に追加するというモデル開発のアプローチ (図 2) を明らかにするとともに、既存の連成解析モデルやモデルの妥当性を検討するために必要なパラメータの利用可能性について検討を行ってきた。これを受けて 2021 年度は室内試験及び原位置試験結果を用いた TH 連成解析のモデル妥当性確認の方法の構築を目的とした検討を行った。

2. 2021 年度の主な成果

上記目的に沿って、サンディア国立研究所等の複数のアメリカの国立研究所で共同開発が行われているオープンソースの TH/THC 連成解析コードである PFLOTRAN (Lichtner et al., 2020) を用いた感度解析によって TH 連成現象の支配的なプロセスやパラメータを調査するとともに 100°C未満における既存の TH 連成解析技術の適用性の確認を実施することで、高温環境も想定した連成解析モデルの妥当性の確認及びモデルの改良の方法の構築に資する情報を取得した。

具体的には、スイスのグリムゼル試験サイトにおいて 200°Cまでの高温環境での原位置試験

を実施中の HotBENT プロジェクトの先行研究であり、100°C未満の原位置試験の国際共同研究プロジェクトである FEBEX (Full-scale Engineered Barriers Experiment) プロジェクト (Lanyon & Gaus, 2016) で測定された 100°C未満の室内試験を対象に TH 連成解析を実施し、温度や飽和度といった温度場、水理場の状態に関する指標に対して、固有透過度や水分保持曲線パラメータなど感度の高いパラメータを特定した。特定したパラメータに関して原位置試験における緩衝材の乾燥密度及び熱伝導率の不確かさを反映した入力データセットを複数設定し、FEBEX 原位置試験を対象とした解析を実施することで、既存の TH 連成解析技術の適用性を確認した(図 3)。図 3 で示されているように、緩衝材の乾燥密度と関係の深いパラメータ (固有透過度、水分保持曲線パラメータや、比透水係数パラメータ) が、原位置試験の観測値を評価するうえで重要であり、乾燥密度の不確かさをパラメータの入力値に反映することで空間的にばらつきのある原位置の状態変化を評価できる可能性を示すことができた。

3. 今後の展開

引き続き、HotBENT 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、概要調査以降のサイトにおける原位置データに基づく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。

2022 年度は、2021 年度に整備した TH 連成解析モデルに対して化学現象も取り扱えるように拡張し、THMC 連成解析に向けた数理モデルの改良点に関する技術的課題を明らかにして改良に取り組む。さらに 2023 年度以降に力学場の連成現象も考慮した連成解析モデルを整備する。

また、2025 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緩衝材の回収試験が実施予定であり、この回収試験の実測結果を用いて高温域を対象とした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。

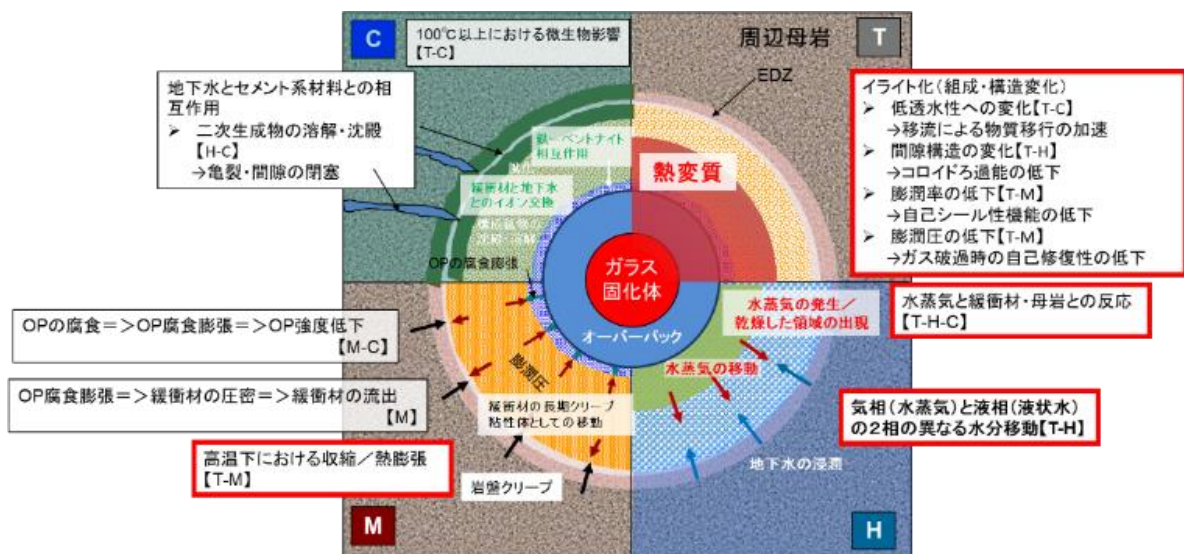


図 1 ニアフィールド再冠水過程で想定される THMC 連成現象 (赤枠内は温度影響が大きいと考えられる現象)

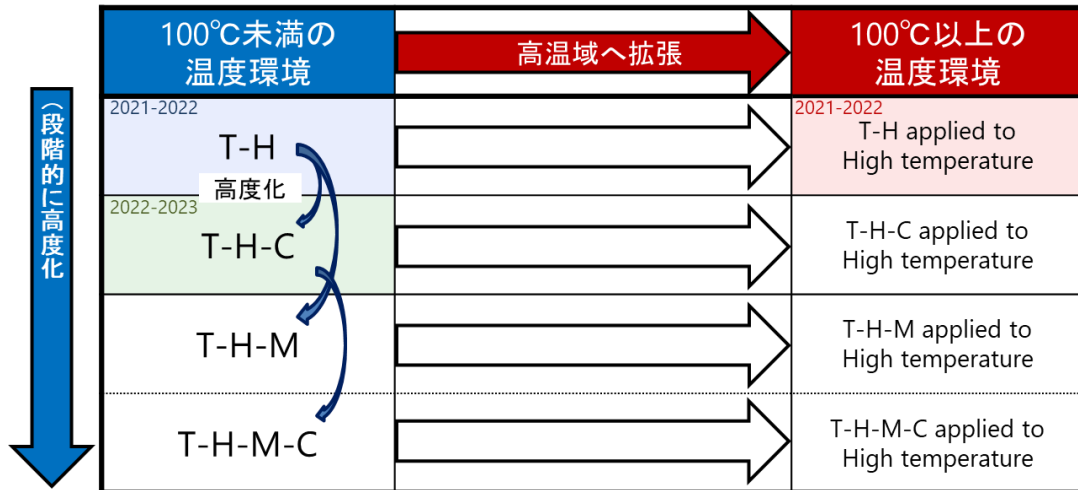


図 2 連成解析モデルの高度化アプローチ

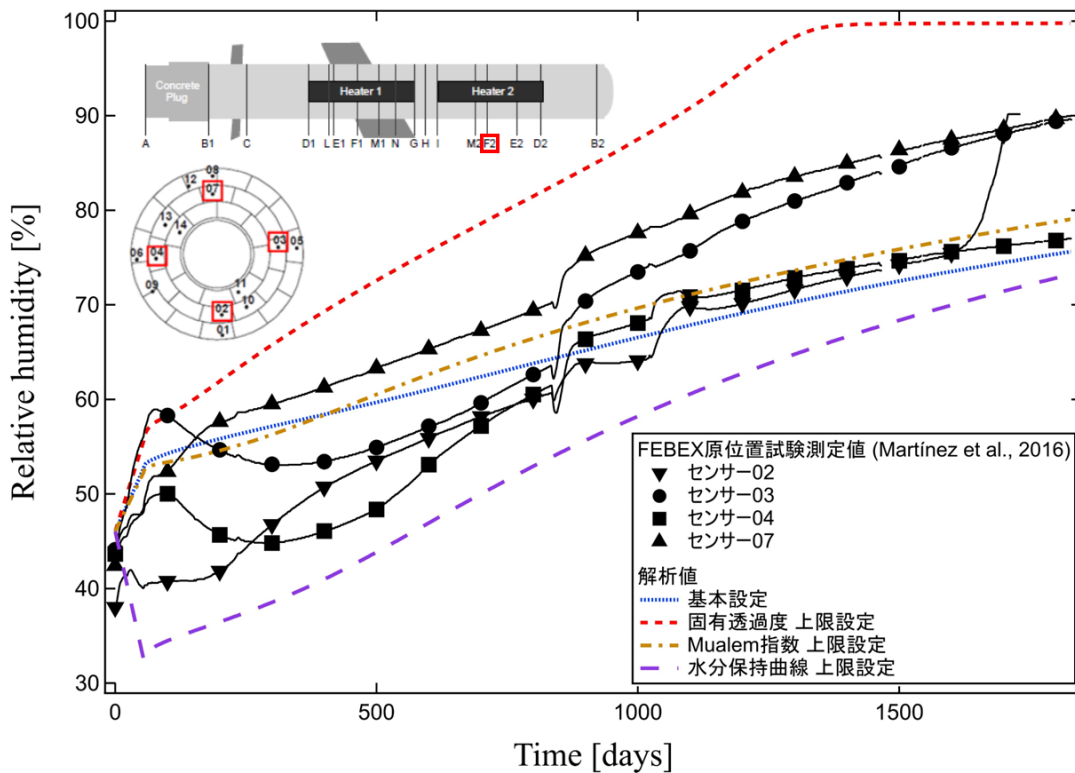


図 3 FEBEX 原位置試験を対象とした相対湿度の時間変化解析例
(FEBEX 原位置試験におけるセンサーの配置セクション及び配置位置の図は、それぞれ Lanyon and Gaus (2016) 及び Martínez et al. (2016) に一部加筆)

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., Karland, 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.
- Martínez, V., Abós, H. and García-Siñeriz, G.L. (2016) : FEBEXe: Final Sensor Data Report (FEBEX “in situ” Experiment), Nagra Arbeitsbericht NAB 16-19.
- Nagra, Grimsel Test Site ホームページ : 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1月18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.

閉鎖後長期の安全評価に関わる安全評価情報管理ツールの設計とプロトタイプの試作

草野 由貴子

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

地層処分の安全評価に関する知識マネジメントには、事業の各段階で入手する多様な知識・情報・データだけでなく、安全評価業務担当者による検討内容や暗黙知等を効率的に管理・活用するための仕組みが必要となる。品質管理の観点からも、相互に関連する知識・情報・データの変更管理や追跡性を確保し、安全評価に係る作業を効率的に行うための作業環境やツールの整備が不可欠である。

本取組みでは、安全評価に関する知識・情報・データの効率的な管理・活用及び安全評価業務の品質管理の支援を目的として、処分場閉鎖後長期の安全評価に係るシナリオ構築からモデル・データ設定までの一連の知識・情報について、相互の関連性を電子的に確保したうえで知識モデルとして整理し、これらの効率的な活用・管理を可能とする安全評価情報管理ツール（以下、「ツール」という）のプロトタイプを開発した。

2. 2021年度の主な成果

ツールの設計において、対象とする知識・情報は、閉鎖後長期の安全評価業務における、図1に示す範囲のものとした。知識モデルに組み込まれている情報の変更管理及び関連する情報の追跡が可能となるようにツールを設計し、そのプロトタイプを作成した（図2）。ツールは、大まかにストーリーボード作成管理ツール、Assessment Model Platform から成る。ストーリーボード作成管理ツールでは、図1における現象解析から安全評価のシナリオ策定に係る情報について、その根拠情報などとリンク付けした状態で整理が可能である。また、Assessment Model Platform では、モデル解析に関する情報について、解析のカテゴリ、解析コードに必要とする要件・選定理由、解析ケースという3つの階層構造で整理が可能である。

このプロトタイプを用いて、包括的技術報告書（NUMO, 2021）で示した閉鎖後長期の安全評価を対象として、関連する知識・情報の一部を相互に結び付けた知識モデルを事例的に構築した。

これより、閉鎖後長期の安全評価に関する知識マネジメント及び業務の品質管理を支援するための基盤を整えた。

3. 今後の展開

試作したプロトタイプを実際に業務に利用しつつ、包括的技術報告書にある閉鎖後長期の安全性評価に関する知識・情報を知識モデルに整理する作業を継続する。これによって、ツール上で包括的技術報告書の安全評価に関する知識モデルを構築し、概要調査で得られた情報の変更・更新などの管理をツール上で実施できる状態を目指す。また、この過程で、今後取り組むべき課題等を抽出し、ツールの機能拡張等の改良を行う。

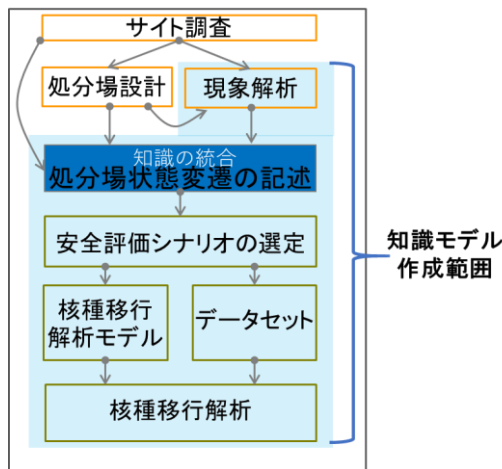


図 1 閉鎖後安全評価に関する情報管理ツールにおける知識モデル作成の範囲

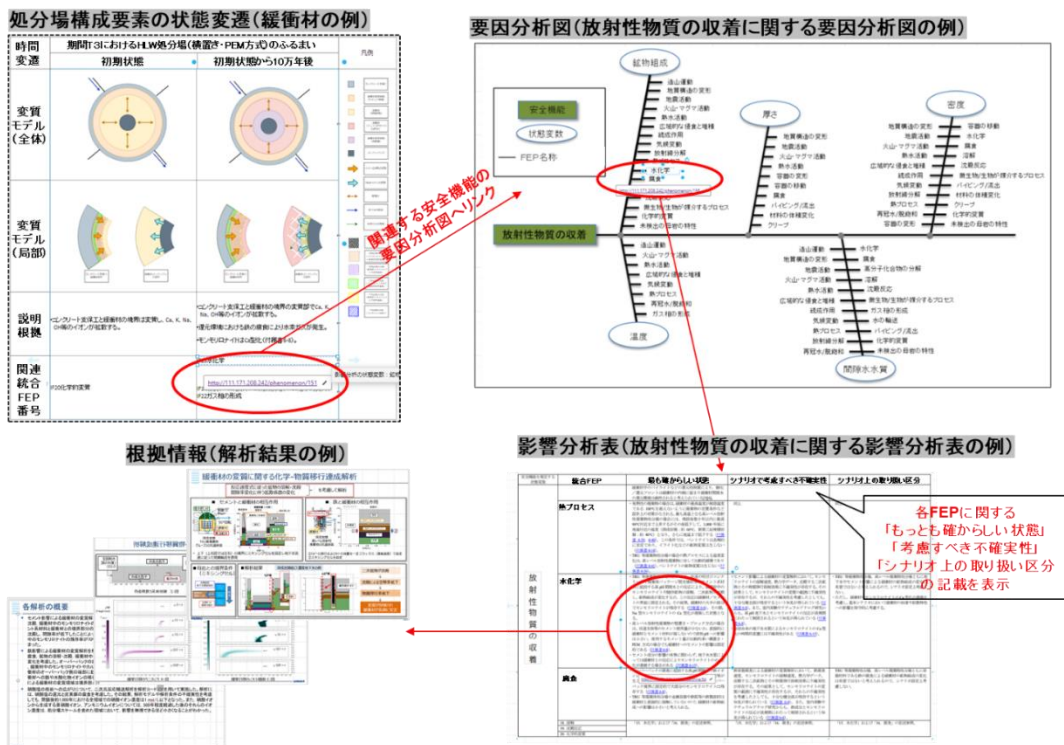


図 2 安全評価情報管理ツール上での情報の追跡の例 (緩衝材の状態変遷の例)

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.

セメント系材料内を対象とした核種移行解析モデルの高度化

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メカニズムが働くと考えられるが、安全評価上はこれを保守的に考慮せず、核種が廃棄体から充填材の間隙水へ全量瞬時に溶出し、構造躯体内側の領域で均一に混合すると仮定した核種放出モデルを用いた。このモデルを用いた TRU 等廃棄物を対象とした処分場閉鎖後の線量評価では、最大値は基本シナリオのめやす線量 (10 $\mu\text{Sv}/\text{y}$) を下回るものの閉鎖後数十年で線量が上昇するという結果となっている (図 1)。こうした処分場閉鎖後の短期間での線量上昇は、上述したような充填材の核種移行抑制効果を考慮していないといった、安全評価における様々な保守的仮定の結果として生じたものである。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ための研究の一環として、「(A) 構造躯体内側の設計仕様 (廃棄体パッケージの形状・配置など) を忠実に反映可能な核種放出モデルの構築」、「(B) 状態変遷を反映可能な核種放出モデルの構築」及び、これらのモデルについて「(C) セメント系材料中の核種移行解析モデルの妥当性確認 (validation)」を実施している。それぞれの課題に関するこれまでの取組みの状況は以下の通りである。

- ・ (A) : 2019 年度までに、構造躯体内側の設計仕様を忠実に表現した三次元モデルを対象に粒子追跡解析を実施し、この解析結果に基づき核種放出モデルを構築する手法を整備
- ・ (B) : (A) で述べた粒子追跡解析に適用するため、(i) 廃棄体パッケージ内及び廃棄体パッケージ間のセメント系材料を対象として閉鎖後の状態変遷を評価し、(ii) セメント系材料の状態変遷に応じて、その水理特性や粒子追跡解析に用いるトレーサーのパラメータ値 (拡散係数, 吸着分配係数) を設定するため、技術の整備のための研究開発を継続
 - (i) 包括的技術報告書で用いた反応輸送解析によるセメント系材料の状態変遷の評価に用いたモデルの最新知見に基づく改良と妥当性確認のため、様々な条件での浸漬試験 (図 2) によるセメント系材料試料の溶脱挙動に関するデータ取得
 - (ii) セメント系材料の状態変遷に応じたトレーサーパラメータ値の設定手法の構築とそのためのデータ取得:
 - － (i) で述べた浸漬試験を活用して溶脱した試料中のヨウ素 (I) とセシウム (Cs) の拡散挙動に関するデータ取得
 - － 地層処分の地下施設で想定される温度条件において生成が確認された Al-トバモライト (Maruyama et al., (2021)) に着目し、Al-トバモライト化したセメント系材料への核種の吸着分配係数を取得するための試料を作製
- ・ (C) : 妥当性確認に利用するためのデータ取得を目的とした、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（セメント系材料中の核種移行挙動評価のための原位置拡散試験 CIM（Carbon-14 and Iodine Migration in Cement））に参画，水理場把握などの予備試験準備や原位置試料分析などを実施

2. 2021 年度の主な成果

(1) 反応輸送解析モデルの妥当性確認（NUMO と日本原子力研究開発機構の共同研究）

包括的技術報告書で使用したセメント系材料の変質挙動に関する反応輸送モデルの比表面積や初期鉱物組成を最新の知見に基づき更新し，解析コード（MINeral Alteration due to REactive Transport（MINRET）, <https://www.quintessa.org/software/custom-software/minaret>）を用いて反応輸送解析を実施した。実施した浸漬試験を対象に作成したモデル体系を図 3 に示す。解析モデルにおける境界面では全て反射境界となるように境界条件を設定している。

これによって，試料の溶脱部における鉱物組成の変化は試料の分析結果とモデル解析の結果が整合することを確認したが，試料のカルシウム（Ca）溶脱範囲（図 4）や浸漬液中 Ca 濃度の経時変化は解析結果と整合が見られなかった。要因を特定するため，パラメータ及び解析条件（境界条件等）を変化させて感度解析を行ったところ，浸漬液中の元素濃度がセメント系材料中の溶脱範囲に高い感度を持つことが示された。このことから，上記不整合については，妥当性確認に用いた試験体系における浸漬液中の元素濃度の時間変化を解析モデルにおいて適切に反映できていないことが主要因であると考えられる。

(2) 溶脱・変質したセメント系材料試料の物質移行特性に関するデータの取得

CsI 溶液（溶媒：セメント平衡水，純水）を用いた浸漬試験によりセメント系材料試料から Ca が溶脱する範囲の経時変化に関するデータを取得した結果（図 5），溶脱部では健全部と比較して Cs が高濃度で存在していることが明らかとなった。これを確認するため，複数の条件で Al-トバモライト化させたセメント系材料試料への Cs と I の収着分配係数を取得したところ，アルミニウムが混和してトバモライト化したセメント系材料への Cs の収着分配係数は未変質のものと比較して大きかった。このことから，Cs やこれと性質が類似する元素についてはセメント変質部において移行が抑制されることが顕著であることが示された。

3. 今後の展開

(B) (i) については，これまでの研究で反応輸送解析モデルによる結果が境界条件の設定に敏感であることが示されていることから，境界条件設定がより明確に設定できるような試験体系でデータを取得し，その試験系に適合した解析モデルによる解析結果との比較を行って，反応輸送解析モデルの妥当性確認を進める。(B) (ii) については，図 1 で示した線量評価の早期上昇に寄与する Sr などの元素を対象として継続的なデータ拡充を図る。これらの成果を踏まえながら，粒子追跡解析におけるパラメータ値の設定手法の整備を継続する。

(C)については，2021 年度より開始した原位置試験国際プロジェクトへの参加を継続してデータの取得を行う。

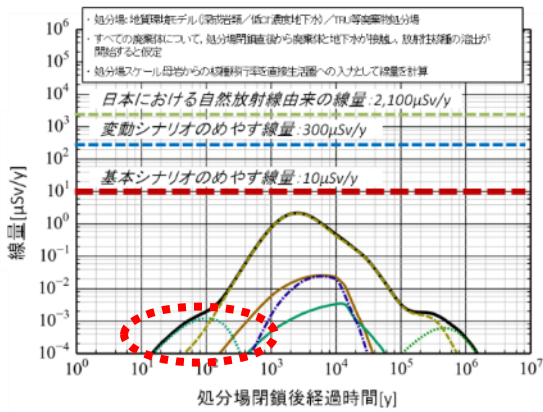


図 1 深成岩類処分場（低 Cl⁻濃度地下水）、TRU 等廃棄物、基本ケース

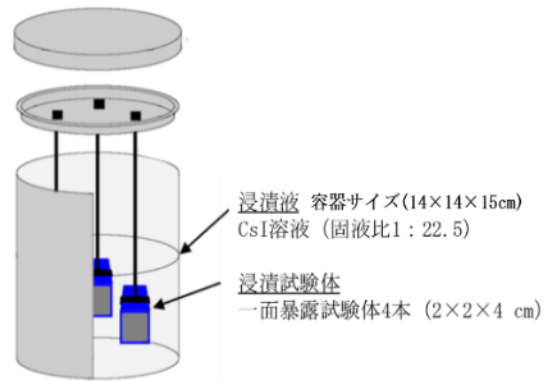


図 2 浸漬試験装置

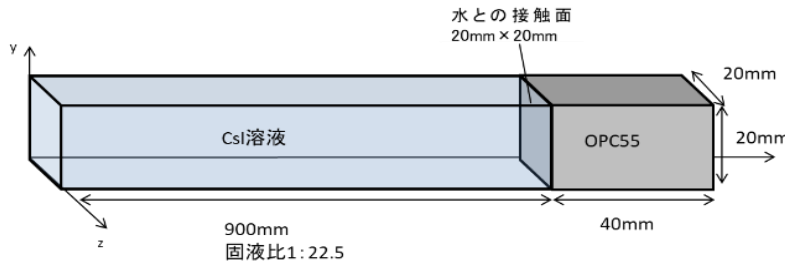


図 3 解析体系

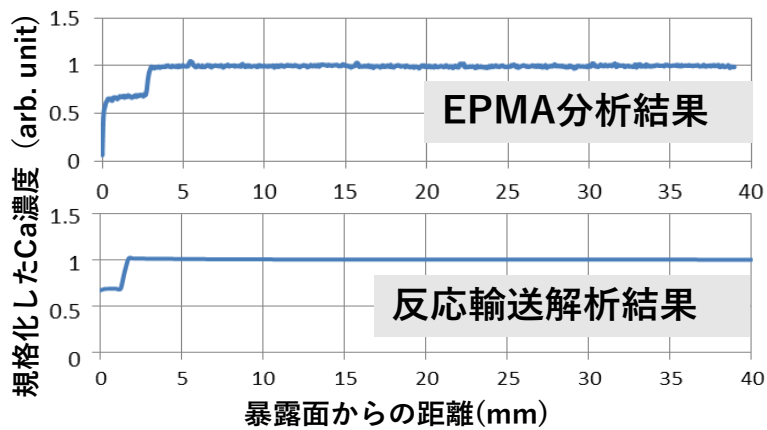


図 4 浸漬試料中及び浸漬液中の濃度の比較
(水セメント比 0.55, 純水+ CsI 溶液, 浸漬後 52 週)

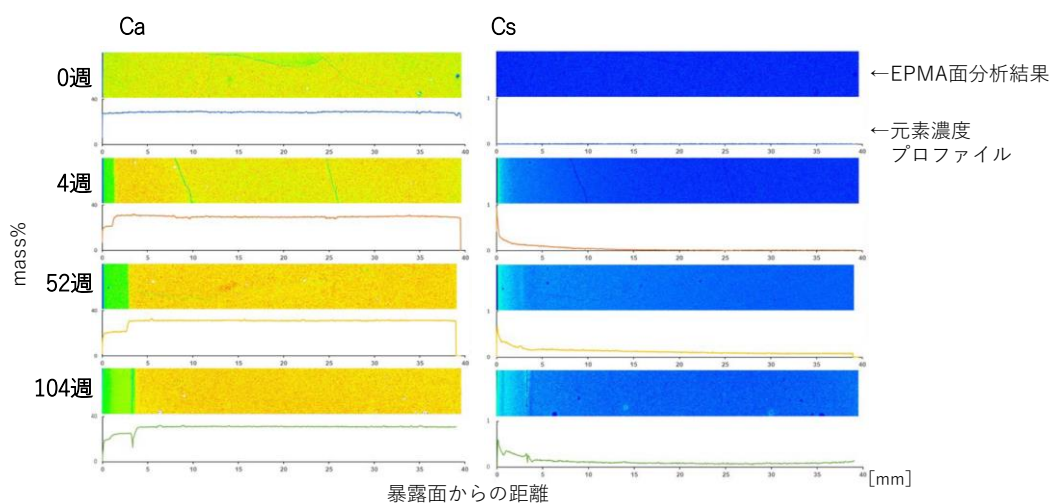


図 5 セメント系材料試料の Ca, Cs の分布図と深さ方向プロファイル
(水セメント比 0.55, 純水+ CsI 溶液)

参考文献

- Maruyama, I., Rymeš, J., Aili, A., Sawada, S., Kontani, O., Ueda, S. and Shimamoto, R. (2021): Long-term use of modern Portland cement concrete: The impact of Al-tobermorite formation, *Material & Design*, Vol.198, 15.
- 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.

地下水流動・物質移行モデルの妥当性評価に係る方法論の整備

尾上 博則¹ 三枝 博光¹ 石田 圭輔¹ 藤崎 淳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、地下水流動や物質移行の場となる地質環境は、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り、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、モデル化にあたっては境界条件や水理・物質移行パラメータの設定も含め、特別な配慮が必要である。こうした不均質性を扱うため、一般には統計的なモデルが適用され、例えば岩盤中の割れ目を対象とした地下水流動のシミュレーションにあたっては、現位置での調査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与え、この分布から統計的なサンプリングによって割れ目ネットワーク（これらの一つ一つを「リアライゼーション」という）を構成するモデル（Discrete Fracture Network model：以下、「DFN」という）の適用（図 1）など、種々のモデル化の方法が提案されている。これらのモデルの妥当性の確認にあたっては、モデルを用いた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について、地質環境の不均質性と調査で得られる実測値の範囲、シミュレーション結果を利用する処分場の設計及び閉鎖後長期における安全評価の信頼性の確保という観点を踏まえて構築する必要がある。

このため、NUMO は日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という）との共同研究により、不均質性を有する岩盤を対象とした地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認の考え方や手順について検討を進めている。

2. 2021 年度の主な成果

これまでの検討では、SKB International との協力協定に基づき入手したスウェーデンのエスポ岩盤研究所で取得されたデータを用いて、岩盤中の地下水流動や物質移行現象のシミュレーションを目的として、様々な手法に基づく岩盤の不均質性を表現するモデル化と作成したモデルを用いた解析を行い、それぞれの手法の特徴や適用性・課題を抽出した。

2021 年度からは、JAEA の瑞浪超深地層研究所で取得されたデータ（例えば、川本ほか、2014）を用いて、海外に比べて割れ目の密度が高い日本の岩盤を対象とした地下水流動場の不均質性のモデル化や作成したモデルを用いた解析を通じて、モデルの妥当性確認に係る技術的知見の蓄積及び方法論の整備に資するための検討と課題の抽出を開始した。

この検討においては、深度 500 m に位置する冠水坑道周辺岩盤を対象に百メートル規模の空間スケールに対して DFN を構築し、調査で取得した割れ目の幾何学的情報や岩盤の水理特性などの実測値に基づいてパラメータを設定することにより、モデルの校正（以下、「コンディショニング」という）を実施した（図 2）。この作業を通じて、DFN を用いて実測値と整合的な

岩盤の水理学的な不均質性を表現するための割れ目の統計パラメータの推定手順や考え方を提示するとともに、冠水坑道の壁面観察やボアホールテレビ観察で取得された割れ目の幾何学的・地質学的情報を用いた DFN のコンディショニングによって、冠水坑道やボーリング孔沿いの割れ目の位置や頻度等の再現性が向上し、その有効性を確認した（図 3）。

コンディショニングを行った DFN の妥当性を確認するため、これを用いた地下水流動解析を行い、冠水坑道への湧水量の測定データやボーリング孔沿いで観察されている水頭値との比較を行った結果、これらの実測値を十分に再現できていないものがあり、その再現性を向上させるためには実測値から推察される数メートルから数十メートル規模の水理学的な不連続性を表現できるようにモデルの精緻化を図る必要性が示された。また、これらのモデル構築及び解析に用いたデータやその解釈、さらにはモデル構築及び解析の条件設定に含まれる不確実性を抽出し、解析結果に大きな影響を及ぼす可能性のある不確実性因子として、割れ目の水理パラメータ値の設定や DFN のコンディショニングに係る条件の修正や手法の改善点を整理した。

3. 今後の展開

今後は、2021 年度に抽出したモデルの妥当性確認に関する考え方や方法論の整備に関する課題や不確実性因子について、これまでに検討したモデルを対象として構築手法を改良し、それらが地下水流動解析結果へ与える影響を確認するとともに、リアライゼーション間のばらつきの程度や傾向などの比較を通じて、構築したモデルによって表現される水理特性や物質移動特性に関する不確実性を把握する。また、長期安全性の評価指標となる地下水の移行特性については、その妥当性を直接確認するための実測値が取得できないため、地下水流動解析による湧水量などの推定結果が、地下水の移行特性の妥当性を確認するための代替指標となり得ることの確認を行う。

同様に統計的モデルとして表現される等価不均質連続体モデルについても、実測されたデータを用いて、その構築方法の検討や移流分散解析及び粒子追跡解析を実施して、妥当性の確認に関する考え方や方法を検討する。

また、エスポ岩盤研究所と瑞浪超深地層研究所で取得されたデータを用いた検討結果の類似点や相違点を分析し、海外に比べて割れ目の密度が高い日本の岩盤に対する手法として、モデルの構築及び構築したモデルの妥当性の確認に有効なデータや調査項目・数量等に関する技術的知見をまとめる。

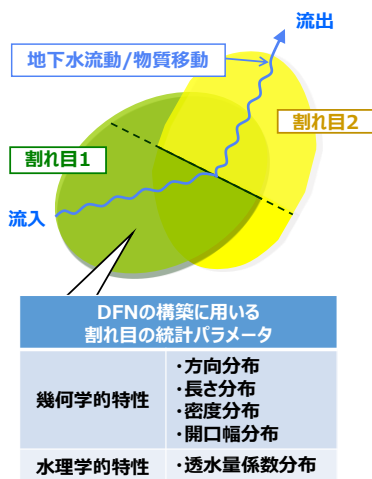


図 1 DFN の概念

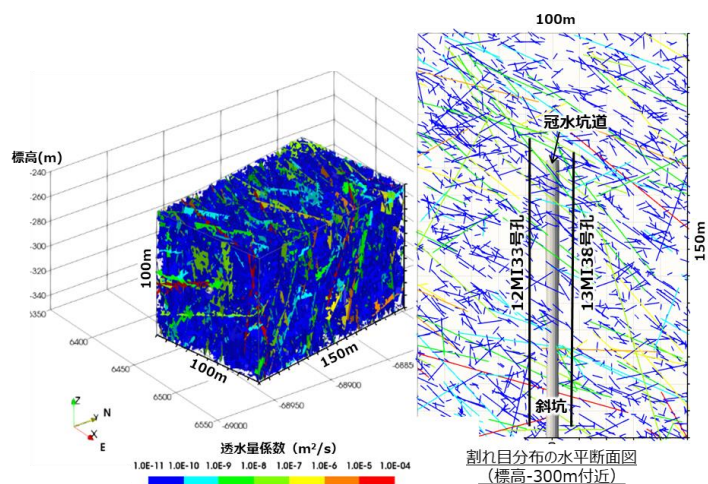
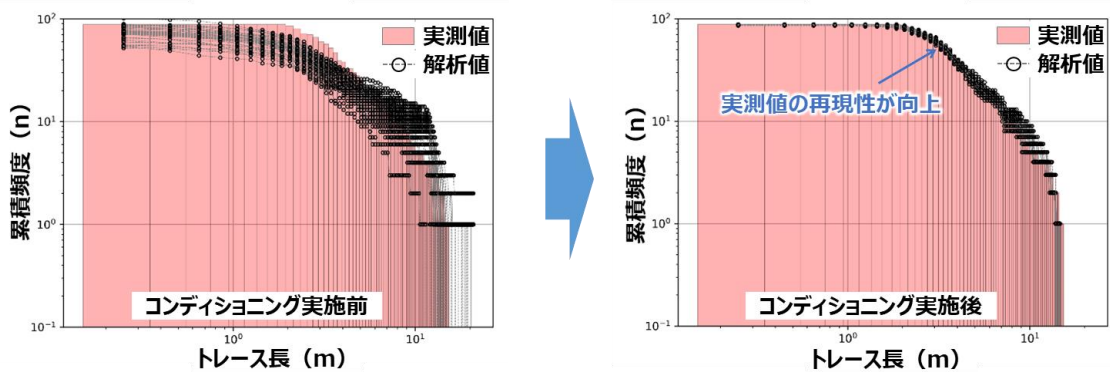


図 2 DFN の構築結果の一例



(a) 冠水坑道部の割れ目の空間分布



(b) 冠水坑道部の割れ目のトレース長の累積頻度

図 3 調査データに基づく DFN のコンディショニング結果の一例

参考文献

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.

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

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

調査対象となった地域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を行い、この地域で安全な処分場の構築が可能かを判断するためには、地表を含む地質環境と処分場からなる処分システムの構成要素に関する空間スケールの違い（廃棄体：1 m 程度～生活圏：数十 km 以上）や時間変遷（10 万年程度以上）を考慮して、廃棄体から生活圏までの核種の移行挙動を現実的かつ定量的に評価する必要がある。サイトを特定しないセーフティケースを示した包括的技術報告書（NUMO, 2021）においては、地質環境が有する初期の状態が長期間にわたって安定的に維持されると考えることができる母岩とその中に建設した処分場について現実的な核種移行解析モデルを開発し、計算負荷の観点からニアフィールドスケール（100 m 程度四方）を対象として次のような解析を行い、この結果を処分場全体に適用するという方法をとった。

- 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、その中に設計仕様に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（以下、「粒子追跡解析」という）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粒子追跡解析を実施し、核種の移行挙動を評価

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とした処分システムの時間変遷に対応可能な解析技術を段階的に整備している（図 1）。このため、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サンディア国立研究所が開発し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た、「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」と「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」からなる入れ子モデルを対象とする解析技術を整備した。これらにより、2020 年度までに処分場スケールまでを対象として処分システムの特徴を反映した粒子追跡解析が可能となった。

2. 2021 年度の主な成果

これまでの成果を受け、2021 年度は解析対象領域を広域スケールまでに拡張した解析技術を整備するとともに、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試行し、解析技術をさらに改良するための課題を明らかにする。なお、この試行においては「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する。

(1) 解析対象領域の広域スケールへの拡張

一般的に広域スケールの規模を対象とした地下水流動解析と粒子追跡解析では、計算負荷の観点から母岩を DFN で表現した三次元モデルを使用するのではなく、DFN で表現した割れ目の水理特性を比較的大きな領域毎（数百 m 以上）で平均化し、DFN と等価な水理特性を有する多孔質媒体（Equivalent Continuum Porous Medium model：以下、「ECPM」という）で母岩を表現した三次元モデルを用いる。この方法では比較的大きい領域で平均化するため、粒子追跡解析において母岩の割れ目の不均質な分布に由来する機械的な分散効果を過小評価する可能性がある。また、こうした分散効果に関する相違は、生活圏への核種の流出点（Geosphere-Biosphere Interface：以下、「GBI」という）の位置に影響を及ぼす。このため、以下の手法により広域スケールにおいても計算負荷を低減しつつ、DFN を用いて解析する技術を整備した。

- ① 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 ECPM へ変換した三次元モデルを作成
- ② 三次元モデルを対象として実施した地下水流動解析の結果に基づき、十分に大きい分散長を設定して粒子追跡解析を行うことで、トレーサーの移行経路範囲を予測
- ③ 予測したトレーサーの移行経路範囲のみに対して母岩の割れ目情報²に従い DFN で表現した三次元モデルを作成
- ④ ③で作成した三次元モデルについて①と同様にクラックテンソル法により母岩を ECPM へ変換し、地下水流動解析を実施
- ⑤ ④で取得した地下水流動解析の結果に基づき、③で作成した三次元モデルを対象として粒子追跡解析を実施し、核種の移行挙動を評価

(2) 試行を通じた課題抽出

2020 年度に整備したパネルスケールと処分場スケールの入れ子モデルを構築する技術と、これを広域スケールまで拡張するための技術（(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入れ子モデルを構築し、TRU 等廃棄物グループ 1 を対象とした粒子追跡解析を実施した（図 2）。なお、粒子追跡解析の計算負荷を低減して効率的な課題抽出を行うため、あえて地下水流動方向を処分場領域から地表方向へ設定した。地質環境モデルでは地下浅部の流紋岩を均質なものとしている³ため、この領域における機械的な分散が考慮できていないことや、地表近傍の表層土壌などの堆積層が地質環境モデルで詳細に表現されていないため地表近傍

¹ 試行では、「2.1.1 四次元地質環境モデルの構築技術の整備」で整備した地質環境モデルから 1km 以上、10km 以下の断層を対象。

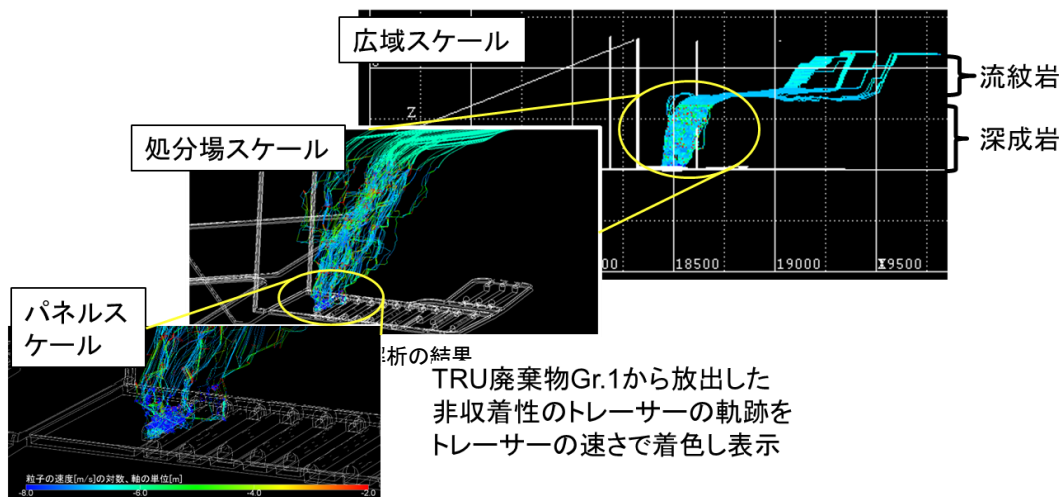
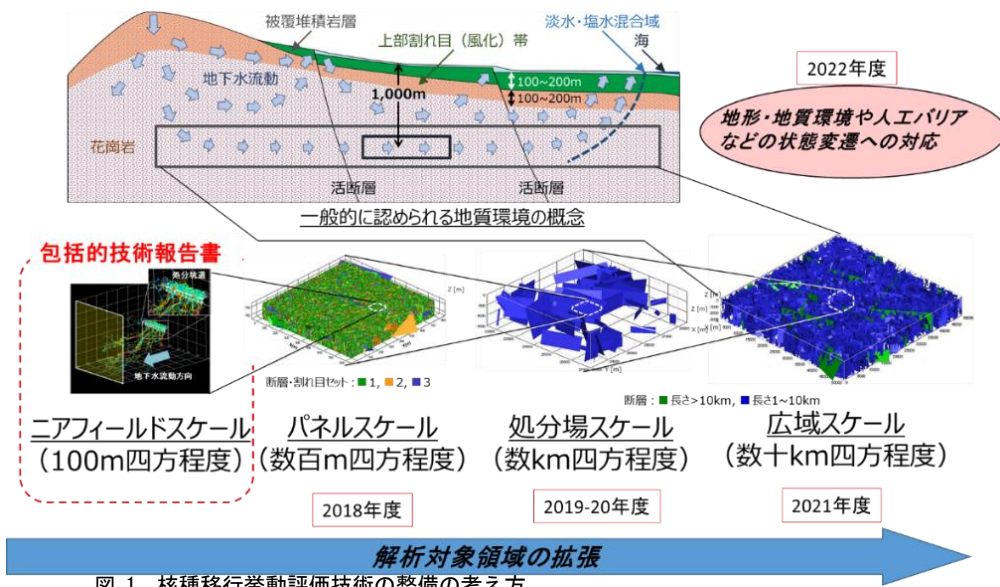
² 包括的技術報告書の表 3.3-13 で示した値を使用。

³ 「2.1.1 四次元地質環境モデルの構築技術の整備」で整備した地質環境モデルと同様の設定。

の地下水流動による移行挙動が考慮できないことから、この試行における GBI の評価にはなお改善の余地がある。地下浅部に対する深部と同様のモデル化や地表近傍の地下水流動を考慮するための表層土壌などの詳細なモデル化などが課題として挙げられた。

3. 今後の展開

2022 年度は処分システムの地形・地質環境や人工バリアなどの状態変遷に対応した解析技術を整備する。また、地下浅層や地表の環境に関する不均質性や状態変遷を考慮した生活圈評価手法の整備を開始する。これらの技術を整備することによって、実際のサイトの地下深部から地表の環境までの特徴を反映した広域スケールを対象とする線量評価技術の整備を進める。



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.

G. E. Hammond, P. C. Lichtner and R. T. Mills (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.

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 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、支保工などに使用されるセメント系材料から溶脱したセメント成分と地下水や母岩との化学反応で生成するカルサイトの沈殿などにより、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セメント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など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」）に関する性能が低下し、母岩中の核種の移行率が増大する可能性が考えられる。このため、本取組みでは、セメント成分による母岩の割れ目閉塞に伴う母岩中の水理場の変化と、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。

2. 2021 年度の主な成果

2021 年度は包括的技術報告書における高レベル放射性廃棄物処分場（横置き・PEM 方式）を対象に、既存の解析技術を用いた試行を通じて、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の整備を進めた。

(1) 母岩の割れ目の閉塞に伴う水理場・化学場の変化を反映した粒子追跡解析の試行

この試行においては、処分坑道を多孔質媒体モデル、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 四方程度）の三次元モデルを作成して地下水流動解析を行い、処分坑道に交差する母岩割れ目の中で支保工から溶脱したセメント系材料成分が流入するものを抽出した。

これらについて、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（図 1）に基づき、閉塞の可能性に関する評価を行った。次に、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

定して更新した三次元モデルを対象とする地下水流動解析で水理場の変化を評価し、処分坑道に交差する割れ目の規模が三次元モデルの処分坑道から解析領域の境界までと仮定してセメント成分により母岩間隙水のイオン強度が有意に変化する処分坑道からの距離を反応輸送解析で評価した。最後に、更新した三次元モデルを対象に地下水流動解析で得られた水理場（図2）に基づき、非収着性トレーサーを用いた粒子追跡解析を行った（図3左図）。加えて、セメント成分による化学場（ここでは、イオン強度）に応じて設定した、Csを例とした物質移行特性を有する収着性トレーサーを用いた粒子追跡解析を行った（図3右図）。図3より、収着性の考慮によりトレーサー移行率の最大値が減少するとともに算出時期が遅延していることが分かる。また、図3左図より割れ目の閉塞によるトレーサーの移行挙動への影響はほとんどないものの、図3右図よりセメント成分により化学場が変化すること（ここでは、イオン強度の増大）でトレーサー移行率の最大値は増大するとともに算出時期が早まることが分かる。これらから、安全評価におけるセメント成分による化学場への影響の重要性が示された。

(2) 抽出された課題

以上のような母岩の割れ目の閉塞評価や化学場の評価では、割れ目へのセメント成分と地下水の流入量が重要となる。このため、今後の技術開発にあたっては、セメント系材料中の溶脱成分の枯渇や地下水の流入による沈殿物の再溶解に伴う割れ目中の流量の変化を評価へ反映することが重要となる。また、処分坑道に交差する割れ目は他の割れ目と連結しており、こうした連結の効果により割れ目中に流入した地下水がセメント成分の影響を緩和することが考えられることから、こうした効果を化学場の影響評価で考慮することも重要と考えられる。

3. 今後の展開

これまでに開発した解析技術について、明らかとなった課題に今後取り組んでいくことで、母岩の割れ目の閉塞に伴う水理場・化学場の変化を反映した粒子追跡解析技術をさらに高度化していく。抽出された課題への対応として、セメント系材料を多用する TRU 等廃棄物処分場に対し、これまでに開発した解析技術の適用性を確認する。また、その作業を通じて、セメント系材料の使用に関する設計上の留意点及び、廃棄体や処分坑道由来の物質（例えば、硝酸塩）による化学場の影響を核種移行解析で取り扱う場合の課題を抽出し、技術開発に反映する。

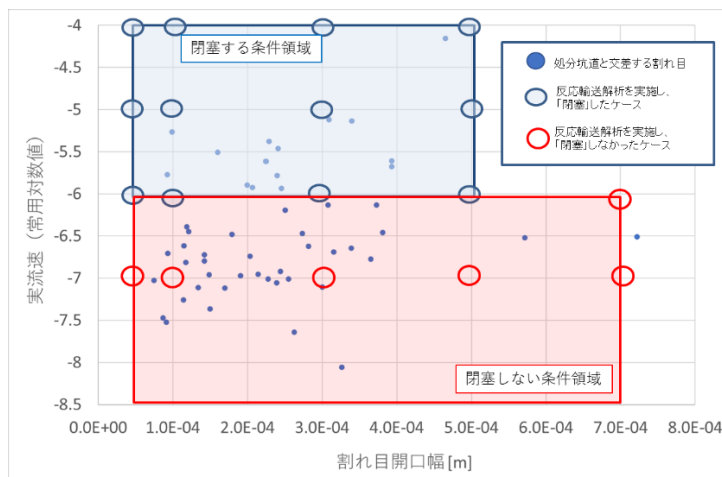


図1 母岩割れ目が閉塞する条件

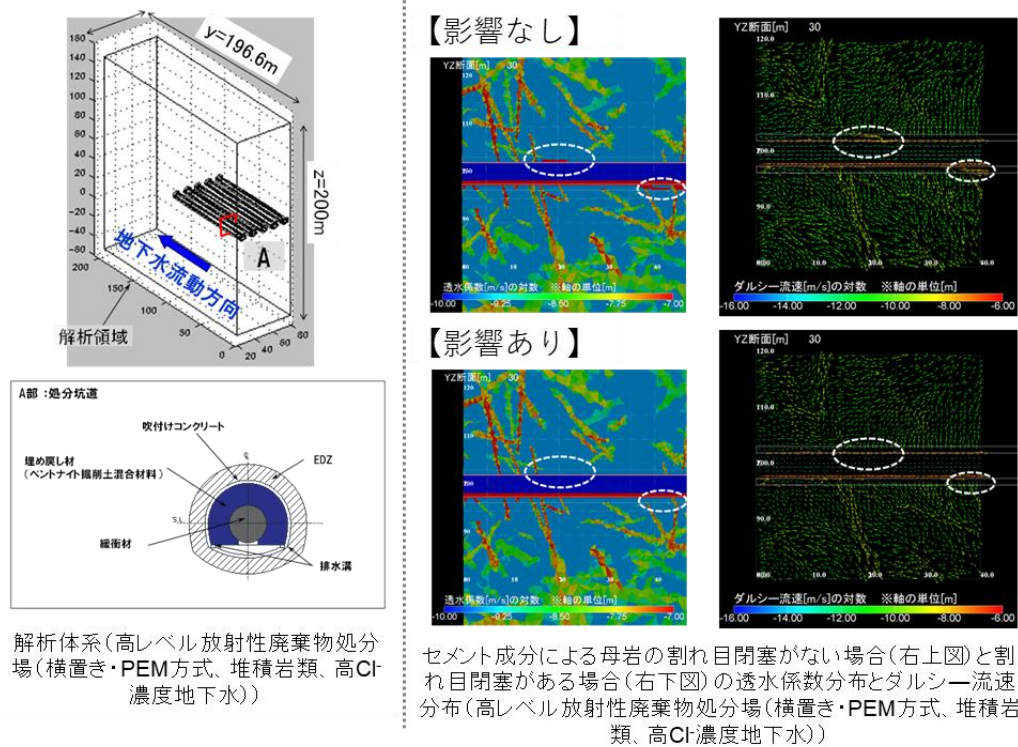


図 2 地下水流動・粒子追跡解析の解析体系(左図)、及び、セメント系材料成分による割れ目閉塞の有無を考慮した地下水流動解析(右図)

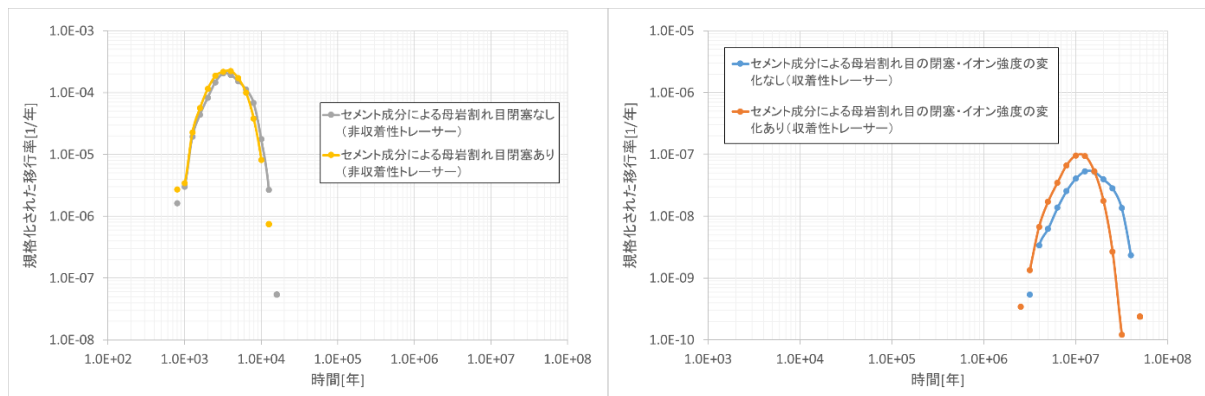


図 3 セメント成分の影響による母岩割れ目閉塞を考慮した非収着性トレーサーの移行率(左図)、及び、セメント成分による母岩割れ目の閉塞とイオン強度変化を考慮した収着性トレーサーの移行率(右図)

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.
- 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ヵ年研究成果の取りまとめ—.

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 石田 圭輔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、日本原子力研究開発機構 (以下、「JAEA」という) 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る包括的にこれを行うための手法の構築を行うことが重要である。

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、高炭酸濃度地下水, 室温より高温である地温, 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、原位置試料を用いたデータの取得方法や地質環境特性の不確実性の取り扱いについて検討を加えることで、サイト調査を反映した核種移行パラメータ値の包括的な設定手法の構築を進める。

2. 2021 年度の主な成果

溶解度に関して、セレンに対する 45°C のデータを拡充し、既往の 75°C 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 (Yoshida et al., 2023)。

Kd に関しては、次の 3 つの観点でデータを取得した。

- (1) 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ジルコニウムの Kd を取得し、高炭酸濃度地下水における Kd を設定可能とした (石寺ほか, 2022)。併せて、50°C, 80°C でのモンモリロナイトへの鉛の Kd を取得し、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。
- (2) 高炭酸濃度かつ還元環境においてウランの Kd を取得し、高炭酸濃度かつ還元性の地下水における Kd を設定可能とした (津田ほか, 2021 ; 津田ほか, 2022)。さらに、収着挙動が

複数の環境条件に鋭敏なこれらの元素について、実験で得た K_d を用いて収着モデルを構築し、幅広い pH・炭酸濃度に応じた K_d を計算によって容易に設定可能な手法を構築することができた。

- (3) Ca 型緩衝材へのラジウムの K_d を取得し、地下水やセメント系材料との反応により Ca 型に変質した緩衝材に対する値を設定できるようになった。

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及び 2 価陽イオンの拡散データを取得し、確からしい値を設定するためのデータ充足性を高めた。

以上の取組みを通じて、包括的なパラメータ設定手法の高度化に関し、各元素の移行パラメータに対する影響因子（例えば、炭酸化学種濃度やイオン強度など）を特定したうえで、これら影響因子を原位置の環境条件に合わせた簡易的な模擬地下水でデータを取得するという考え方を構築した。この考え方に基づくパラメータ値の設定に必要な各元素の影響因子について、 K_d を対象として整理した。これによって、設定手法の構築に必要な情報のうち、 K_d 設定に必要な装置や設備を明らかにすることができた。

3. 今後の展開

拡充したデータについては、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、品質を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、これまでにデータが十分に得られていない実際の付加体堆積岩試料を対象として実測データを取得し、データベースやモデルも活用しながらパラメータ値の設定を試行することにより、現行の手法の課題を明らかにしながら、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

- 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.
- 津田基秀, 佐々木隆之, 春木和人, 小林大志, 浜本貴史, 石田圭輔 (2021): 炭酸存在下における 4 価ウラン-モンモリロナイトの収着挙動とモデル化, 日本原子力学会 2021 年秋の大会.
- 津田基秀, 佐々木隆之, 小林大志, 浜本貴史, 石田圭輔 (2022): 4 価ウラン-炭酸-モンモリロナイト系の収着挙動評価, 日本原子力学会バックエンド部会 第 38 回「バックエンド」夏期セミナー ポスターセッション.
- Yoshida, Y., Kitamura, A. and Shibutani, S. (2023): Solubility of FeSe₂(cr) at 318 K in the presence of iron, Journal of Nuclear Science and Technology, DOI: 10.1080/00223131.2022.2159892.

様々な地表環境を想定した生活圏評価に係るデータの拡充

浜本 貴史¹ 越後谷 浩二¹ 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では、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を記述することが必要となる。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、通常、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、このコンパートメント間を放射性核種が移行・分配するとして核種移行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。

評価対象となる地域の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。本取組みでは、生活圏システムの長期変遷を想定した様々な環境条件に関するデータの拡充を行うことにより、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、安全評価結果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）を考慮し、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、畑地）に対する核種の分配係数（Kd）を整備。
- ・ 処分場が沿岸部に建設される場合に対応できるように、海水準変動により形成されることが考えられる湖沼の堆積物に対する Kd の拡充
- ・ 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、現在のモデルでは保守的に単純化しているヨウ素の揮発について、生活圏評価上の重要性を明らかにし、揮発に関するパラメータの設定の必要性を判断するために多様な環境条件を想定した現象理解

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）

2. 2021 年度の主な成果

農耕地土壌について、日本全国から採取した畑地土壌 80 種類のうち 50 種類に対して Kd データの取得を完了した。また、2021 年度までに取得した水田土壌の Kd データに関して、ネプツニウムとプルトニウムのデータ（鄭ほか，2021；Zheng et al., 2022）及び塩素のデータ（田上ほか，2021）について公表した。成果の一例を図 1 に示す。また、Kd の取得方法を手順書として取りまとめ、これについて外部専門家によるレビューを実施し、妥当性の確認を行っている（「2.3.13 土壌分配係数の取得手順書の外部レビューの実施」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 を対象に、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安全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 データを収集した。これまでに報告例のない 11 元素についてのデータを取得するために、試料の採取方法や分析方法、測定機器などに係るデータ取得上の課題を整理した。さらに、データ取得の準備として、生活圏評価モデルを用いた感度解析により、優先的にデータを取得する元素を抽出するための手法を構築した。

ヨウ素の揮発に関しては、水田土壌や畑地土壌からのヨウ素の揮発試験を行い、これら土壌が存在することによりヨウ素が揮発すること（最大 44%）を明らかにした。

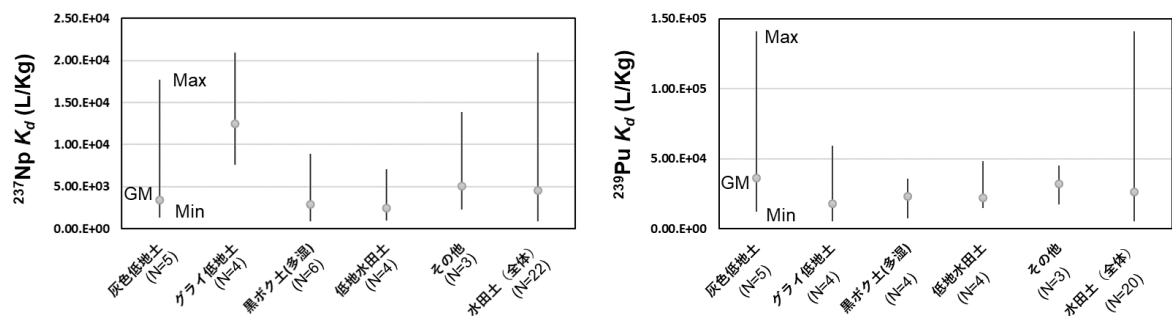


図 1 水田土壌における Np-237 と Pu-239 の Kd の比較 (Zheng et al., 2022)

3. 今後の展開

2022 年度は、残された 30 種類の畑地土壌の Kd データを引き続き拡充する。また、湖沼や沿岸域の堆積物に対する Kd について、国内の環境調査などのために得られているデータの収集を継続する。ヨウ素の揮発に関しては、引き続き試験によるデータを拡充して揮発量を支配する要因の解明に取り組むとともに、取得したデータを用いて、揮発を考慮した地表における核種移行解析を行い、生活圏評価上における揮発プロセスの重要性について検討を行う予定である。

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.
- 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.

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。

この手順書は図 1 のような内容から構成している。

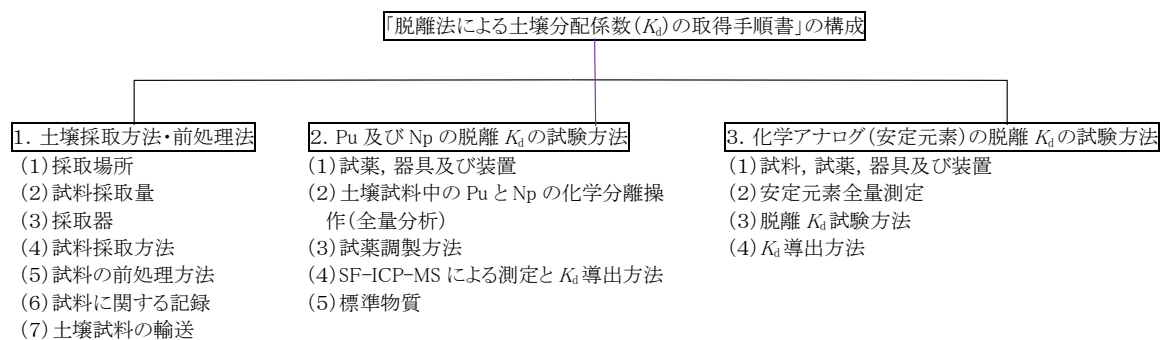


図 1 土壌分配係数の取得手順書の構成

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（日本保健物理学会ホームページ）を設置していただき、以下の観点からレビューを実施している。

- (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

表 1 レビューの観点と取得手順書への専門家コメント

レビュー観点	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。	・ コメントとしては、手順書の位置づけに関するものや、出典の根拠の明確化を求めるもの意図した操作ができるよう用語定義、補足説明及び留意事項などの充実についてご意見いただいた。
(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。	・ コメントとして、温度調整範囲の適正化(温度一定値となっているが、実際の温度調整幅を記載すること)、土壌特性分析の要否(土壌の特性分析と取得した分配係数を紐づけて保存しておくことが重要なので土壌特性分析の要否を検討してはどうか)、ろ過前の硝酸添加の要否(ろ過前に硝酸を添加について、懸濁物質からの溶出が懸念されるため、文献等で補足すること)などをご意見いただいた。
(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。	・ コメントとしては、品質管理の実施方法や考え方について解説の充実を求めるものであった。繰り返し精度や測定の反復回数、内部精度管理方法について解説を追加すること。また、一般的な品質管理の方法について付録等で概説することなどのご意見をいただいた。

2. 2021 年度の主な成果

2021 年度には、手順書の位置づけに関するものや、出典の根拠の明確化を求めるもの、説明性の向上に関するものなど、全体で 86 件のご意見・コメントをいただくとともに、これらを集約しレビュー委員会として、一般的な品質管理の手順に求められる要件に係る提言、レビューの観点に係る提言、及び土壌分配係数の取得と評価の品質に関する提言などをレビュー報告書に大別して取りまとめていただいております。さらに検討を進めていくことで手順書の内容の向上が期待できるとのご助言をいただきました。また、手順書における土壌分配係数取得のための分析方法に関しては、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、経験に基づき、丁寧に記述されており妥当なものであるとの結論をいただいております。

3. 今後の展開

手順書としては、過年度のレビュー結果を踏まえ、詳細な補足説明や留意事項を盛り込んで更新した手順書に対する再度のレビューを受けたいと、確定する。さらに、当該手順書のサイト調査段階における活用を念頭に、NUMO の技術報告書として公表する。

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 3 月 23 日閲覧)。

2.4 技術マネジメント

中長期的な観点から、関係研究機関のみならず産業界や大学との協力・連携を強化し、科学技術の進歩や法令・規制基準等の社会的要件の変化に的確に対応できるよう、暗黙知も含めた知見・経験の蓄積と継承を図る。そのため、地層処分事業を規定する様々な社会的要件の時間的変化に対して、常に最新の科学的知見を反映してこれら要件を満たすような処分場の構築を可能とする技術的知識基盤を提供するための知識マネジメントの仕組みとこれを支援するツールの開発・整備を進めた。

情報発信を通じた技術的信頼性の更なる向上に関しては、地層処分と接点の少ない学術分野も含めた幅広い専門家の関心喚起・理解増進に向けて、日本原子力学会に特別専門委員会を設置していただき、地層処分技術や安全性に関するコミュニケーションの仕方やノウハウ等の整備に向けた検討を進めた。

また、今後のサイト調査の進展に応じてセーフティケースを更新するための準備として、地層処分事業の先進諸国におけるセーフティケースに関する最新の取組み状況や規制基準の整備状況等に関する情報の収集に取り組んだ。また、原子力規制委員会における関連する規制基準に関する検討状況や、新たに開始された外部専門家からの意見聴取会合を通じた「地層処分において安全確保上少なくとも考慮されるべき事項に関する検討」について情報収集に努めた。

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 菅原 弘匡 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とその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、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、セーフティケースという統一的な視点に立った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の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)。セーフティケースについて、地層処分の専門家だけでなく、より多くの技術的専門家、さらには社会とのコミュニケーションを進め、広く理解と納得を得ることは、地層処分事業の実現に向け、その技術的信頼性を構築するうえで極めて重要である。

以上のような背景から、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 が日本原子力学会 (以下、「原子力学会」という) に依頼して実施した外部レビュー (日本原子力学会, 2019) における議論の過程などを分析し、セーフティケースの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。検討にあたっては、原子力学会内に、上記原子力学会のレビューに携わった技術的専門家や、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の協働によって、セーフティケースに関し専門家間での議論のすれ違いや誤解が生じている原因を探り、これを解消するうえで特に重要となる用語や概念、考え方などを取りまとめたコミュニケーションのための知識ベースの構築に取り組んでいる。

2. 2021 年度の主な成果

これまでの検討を継続し、地層処分に特有の概念や用語に対する認識のずれ、セーフティケースの分かりにくさの原因を分析・整理した上で、地層処分の説明で特に重要な「隔離・閉じ込め」及び「地質環境」の2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・社会学の専門家を含む委員会の議論に基づいて、様々な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の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。

「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、以下のような三段階で詳細化した解説^{※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
- } ※1
- } ※2

3. 今後の展開

これまでに作成した「語彙基盤」の改良に加え、対象語彙を拡張する。また、地層処分になじみの薄い専門家や学生が集う学会等において「語彙基盤」の有効性を確認するための試行を通じ更なる改良を進める。

さらに、セーフティケースの論証構造（「2.4.2 知識ベースの整備と知識マネジメントシステムの検討」参照）における位置づけを明らかにし、どのような文脈でどのように説明すべきかという観点から「語彙基盤」の充実を図る。これにより、セーフティケースの論証を構造化した「討論モデル」をより分かりやすく説明することができるよう、「語彙基盤」をセーフティケースの説明のための知識ベースとして整備し、幅広いステークホルダーに対するセーフティケースの理解促進に資する。

表 1 特別専門委員会委員

2023年3月現在

	氏名	所属・役職	専門
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	安全評価
幹事	若杉圭一郎	東海大学 工学部 応用化学科 教授	安全評価
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	安全評価
"	小山倫史	関西大学 社会安全学部 教授	工学
"	寿楽浩太	東京電機大学 工学部 人間科学系列 教授	科学技術社会学
"	田中牧郎	明治大学 国際日本学部 教授	言語学
"	半井健一郎	広島大学 先進理工系科学研究科 教授	工学
"	廣野哲朗	大阪公立大学 理学研究科 地球学専攻 教授	地質
"	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	地質
"	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	地質

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.

知識ベースの整備と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・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」する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））や経済協力開発機構／原子力機関（以下、「OECD/NEA」という）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、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（以下、「SKB」という）との共同研究を通じてマネジメントシステム（NUMO-IRKMS（Integrated Requirements and Knowledge Management System））の概念を 2020 年度までに整理した。

2. 2021 年度の主な成果

2021 年度は上述したマネジメントシステムの概念を具体化する取り組みを行った。また、マネジメントの対象となる知識ベースの拡充を目的として、OECD/NEA による包括的技術報告書（NUMO, 2021）の国際レビューの過程で示されたコメントの分析を通じてセーフティケースに補強していくべき知識の特定を行った。

(1) マネジメントシステムの具体化

必要な知識をもれなく抽出するため、事業に求められるさまざまな要件を視軸とし、長い事業期間におけるそれらの変化も考慮に入れて要件を満たすように知識を取りまとめるための基本的フローを SKB との共同研究によって開発した。これに基づいてマネジメントシステムの具体化・詳細化を実施し、2021 年度は主に、技術開発課題の特定やセーフティケースの今後の更新をより容易にするため、セーフティケースの論証構造を可視化する取り組みを実施した。これまでに包括的技術報告書の本編第 1～4 章の要点を整理し、討論モデルとして表現するための作業に取り組んでいる（図 1）。

(2) 包括的技術報告書の知識ベースとしての整備

包括的技術報告書について、国際的な視点での技術的な信頼性を確認するため、2021年11月より OECD/NEA に依頼して国際レビューを行っている。レビューの過程における OECD/NEA レビューチームからの質問に対する回答作成を通じて、国際的な視点からセーフティケースに求められる知識の本質的な要素の確認と明確化を行い、今後のセーフティケース作成に向けて知識ベースの補強すべき要素を抽出した。

3. 今後の展開

設定した要件に対する主張、主張を支える根拠を構成する知識（例えば、少なくとも処分後1,000年間地下水とガラス固化体の接触を妨げるという要件を満たすオーバーパックの材料・寸法などの仕様、この設定根拠となる設計方法や解析・実験データ等）を関連づけて追跡可能なものとするため、要件と討論モデルを結びつける作業を実施する。また、地質環境の調査・評価、処分場の設計と工学、安全評価の各分野の知識を保存・更新するためのツール（「2.3.6 閉鎖後長期の安全評価に関わる安全評価情報管理ツールの設計とプロトタイプを試作」参照）と討論モデルとの連携について検討を進めていく。また、2022年まで継続する予定の包括的技術報告書の OECD/NEA レビューを通じた知識ベースの拡充を継続する。

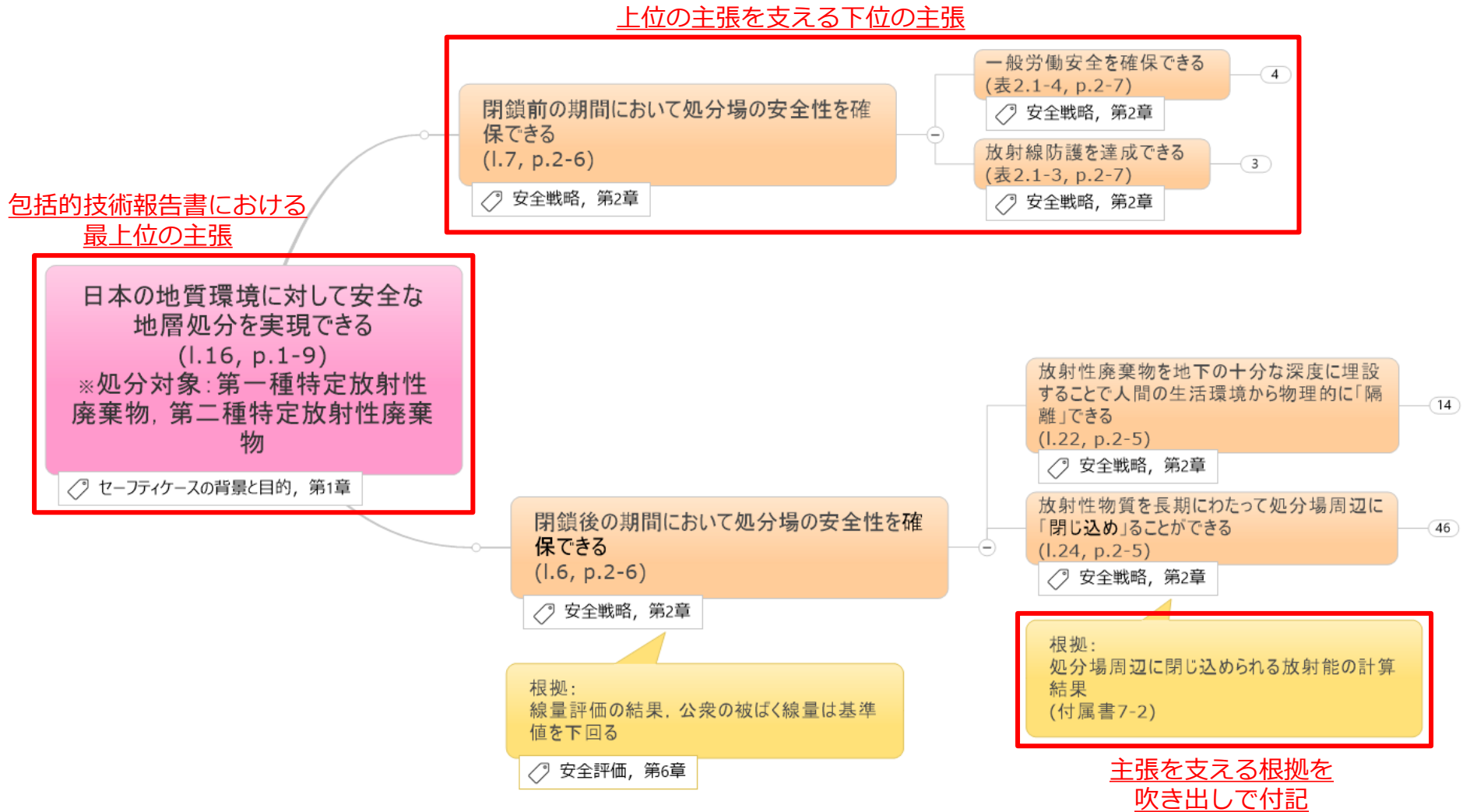


図 1 セーフティケースの論証構造を可視化したモデル (上位の階層の例)

参考文献

- Hitoshi Makino, Kazumasa Hioki, Hideki Osawa, Takeshi Semba and Hiroyuki Umeki (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.
- 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 (2022年7月4日閲覧) .
- 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.

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。わ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、原子力規制庁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、わ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。

これまでに、北欧の規制要件と諸外国の立地要件について調査し、情報を取りまとめている。

2. 2021 年度の主な成果

2021 年度は、フランス及びスイス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。一部、地下百メートル前後の中深度への処分事業についても調査の対象とした。また、英国における放射性廃棄物の受入れ基準について調査を行った。

- ・ 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れ基準
- ・ 埋設後長期の安全評価手法や放射線防護基準

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。

フランスについては、処分場の安全機能を特に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情報を得た。

スイスについては、長期封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情報を入手した。

英国の放射性廃棄物の受入れ基準については、規制基準として検討されている内容について情報を得るとともに、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-

ジング仕様書」，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，処分可能性の評価として処分事業者が段階的に適合証明書（Letter of Compliance）を発行するという方法が取られていることが判明した。

これらに加え，フィンランド，スウェーデン，フランス，スイス，ドイツ，英国，米国，カナダ及び韓国を対象として，地層処分施設の設計要件について調査を行った。具体的な調査内容は，処分施設の構築に当たっての土木工学的な要件，人工バリアの性能や施工性に係る要件，自然災害や事故時の対応に関する要件，回収可能性・モニタリングに関する事項である。

調査により得られた詳細な情報を対象に，各国の施設設計に関する規制要件に加え，事業の進展に応じた事業者による取組みについて，各国の比較等を含めて結果を横断的に整理した。その結果，多くの国において，処分場の安全機能の設定によって閉鎖後の安全性の確保を行うことを規制機関が要求しており，利用可能な最善技術（BAT：Best Available Technology）の考慮や回収可能性を求めている国もある。これに対して事業者は事業の進展段階により詳細さに違いがみられるものの，規制機関の要件に則って施設設計要件を提示している。また，事業が進展している国では，規制要件や事業者による取組みとして，処分場閉鎖後のバリアの安全機能と性能目標との関連で設計要件が設定し，施工時に検証する特性が導出されている。

3. 今後の展開

2022年度は3か年で計画している本調査業務の最終年度であり，北米2か国（米国，カナダ）等を対象として，規制要件や事業者が設定した要件等について調査を行う。また，規制基準や実施主体の自主基準に関しては，特に安全評価の方法論や放射線防護基準について調査する。さらに，これまでの調査結果について，必要に応じ追加調査を行って情報の更新を図る。その上で，諸外国の規制基準や実施主体による自主基準などに関する総合的な整理・分析を行うとともに，NUMOとして考慮すべき自主基準等について検討を行う。

	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2021年度に調査対象とした項目

第3章 おわりに

NUMO は、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に参画しているほか、国内の産業界への委託を通じ、英知を結集して、地層処分に関する技術開発を進めている。本書は、こうした技術開発の成果や今後の課題に関する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の一助とするため、NUMO が 2021 年度までに実施した技術開発における取組みやその成果を簡潔にまとめたものである。今後も工夫と改善を進めつつ、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。

本書が、この先セーフティケースへ統合されていく技術情報であることを前提に、地層処分技術の更なる信頼性の向上や高度化（例えば、BAT (Best Available Technology) への取組み）という観点から、国内の関係研究機関や大学、産業界等において NUMO の取組みに関する理解や連携の促進、関心の高まりに資することを期待している。更に、次世代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ことに役立てば幸いであるとともに、多岐にわたる学術分野が関係する地層処分事業に対し、幅広い産業界からの新たな参画を促す契機となることを願っている。

原子力発電環境整備機構

(略称：原環機構)

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)