

RWmc

原環センター
2021年度 技術年報



公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

ご あ い さ つ

当センターは、1976年の設立以来、産業界、学協会、官界などの幅広いご支援を得て、放射性廃棄物に特化した我が国唯一の中立的調査研究機関として、低レベルから高レベルに至る放射性廃棄物の処理・処分に関する調査研究活動を行ってまいりました。

近年は、高レベル放射性廃棄物やTRU廃棄物を対象とした地層処分や廃炉等に伴う放射性廃棄物を対象とした中深度処分に係る工学的な技術の調査研究に力を注いでいます。また、海外の研究機関、処分事業実施機関等との国際的なネットワークで収集した放射性廃棄物に関する各国の政策、制度、事業の進捗状況、研究開発動向等の膨大な情報を分析・加工し、我が国各界の利用の便に供する情報センターの役割も担っています。

原子力利用や放射性廃棄物の最終処分に関する様々な議論が行われていますが、当センターは、原子力技術分野に関わる一員としての立場を認識し、社会から求められる調査研究やそれら成果の普及に積極的に取り組んでいます。

2020年2月に始まった新型コロナウイルス感染症まん延の影響は、2021年度も継続し、様々な制約に直面しましたが、調査研究等を着実に実施することができました。この技術年報は、当センターが2021年度に実施した調査研究の概要を紹介するとともに、論文投稿・学会等での発表、講演会・セミナー・研究発表会の開催、刊行物、海外情報の発信などの成果普及活動を取りまとめたものです。

本技術年報を通じて、当センターの活動をご理解いただければ幸いです。

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター
理事長 高 橋 彰

目 次

I. 低レベル放射性廃棄物の処分に関する調査研究.....	1
1. 地下空洞型処分調査技術高度化開発.....	1
2. その他の低レベル放射性廃棄物処分に関する調査研究.....	10
II. 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する調査研究.....	11
1. ニアフィールドシステム評価確証技術開発.....	11
2. 地層処分施設閉鎖技術確証試験.....	15
3. 回収可能性技術高度化開発.....	21
4. 沿岸部処分システム評価確証技術開発.....	29
5. TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発.....	33
5-1 事業の全体概要.....	33
5-2 廃棄体パッケージの閉じ込め性能に係る試験と評価.....	35
5-3 陰イオン核種に対する閉じ込め技術の開発.....	41
5-4 廃棄体からの核種溶出モデルの高度化.....	45
5-5 ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化 ーナチュラルアナログによる緩衝材の長期安定性の検証ー.....	49
5-6 廃棄体由来の発生ガスに関する現象解析モデルの妥当性検討.....	53
6. 廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究.....	58
7. 使用済燃料の多様化を考慮したシナリオ評価.....	60
8. 固化体のハイブリッド化及び処分概念・安全評価に関する検討.....	61
9. その他の地層処分に関する調査研究.....	62
III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	63
1. 放射性廃棄物海外総合情報調査.....	63
2. 放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等 に関する業務.....	65
2-1 事業の全体概要.....	65
2-2 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理・成果のとりまとめ等..	67
2-3 人材育成プログラムの実施・作成.....	72
3. その他の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	75
IV. 国際交流.....	77
V. 資料.....	78
1. 講演会、セミナー、研究発表会.....	78
2. 論文投稿、学会発表等.....	79
3. 刊行物.....	85
4. ホームページへの海外最新情報の掲載.....	86
5. 委員会一覧.....	88

Ⅰ．低レベル放射性廃棄物の処分に関する調査研究

1．地下空洞型処分調査技術高度化開発

◇事業の概要

我が国においては、これまでの原子力発電の利用に伴って既に多種多様な放射性廃棄物が発生しており、その処分対策を着実に進める必要がある。このうち、原子炉施設や再処理施設等の運転と解体から発生する低レベル放射性廃棄物の一部には、長期にわたり比較的高い放射能が残存し、既存の浅地中処分に適さないものが存在する。このような低レベル放射性廃棄物については、大断面の地下空洞型処分施設に処分する方法（以下、「中深度処分」という。）で処分の事業化が検討されてきている¹⁾（図-1）。

中深度処分の安全規制については、規則等の改正や審査ガイドの策定が行われ、処分施設は、侵食等を考慮しても、10 万年後の将来にわたって地表から 70 メートル以上の設置深度が確保できること、また、設置深度の地下水流動等も考慮し、複数の技術オプションの中から最適な組合せを選択して施設設計することが求められている^{2), 3)}。

これら検討状況を踏まえると、大断面の地下空洞の掘削可能性を評価するため、初期の設置深度として地表から百数十メートル程度までを想定し、設置深度毎の初期地圧を極力、場を乱すことなく、かつ、効率的に測定できる基盤技術の開発等、地下環境を把握するための技術整備が必須となる。また、掘削可能な地下空洞の形状・寸法、地下環境、人工バリアの長期的な安全性等を考慮し、複数の技術オプション（多様な選択肢）の実効性を確認することが必要である。

本事業は、これらの中深度処分固有の課題を踏まえ、2020 年度から 5 ヶ年の予定で、大規模な坑道や地下空洞型処分施設などを建設する上で必要となる、岩盤にかかる初期地圧の三次元的な分布を測定する技術の開発を始めとした中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化開発を行うと共に、最適な施設設計を支援するための手法の検討を始めとした中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化開発を行うものである。

なお、本事業は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和 3 年度低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業（JPJ010897）（地下空洞型処分調査技術高度化開発）」により、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター及び東電設計株式会社の 2 機関が共同で実施したものである。

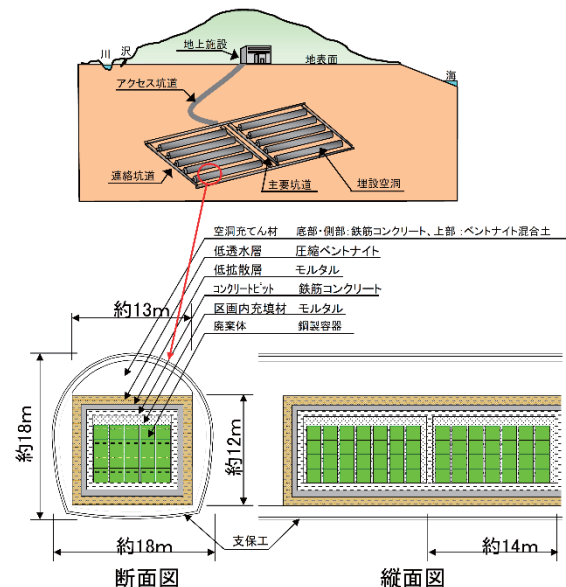


図-1 中深度処分の概念図¹⁾

◇2021 年度の成果⁴⁾

本事業は、中深度処分で求められる調査技術の高度化を狙いとして実施するもので、次の二つの大項目を掲げている。

- I 中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化
- II 中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化

この大項目の下で、I については三つ（初期地圧測定技術の高度化開発、地下水流動評価技術の調査、地震時影響評価技術の検討及び地震動観測）の、II については二つ（既往検討成果の調査と技術オプションの検討、ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究）の研究開発テーマを設け、開発を進めることとした。低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業（地下空洞型処分調査技術高度化開発）の 2 年目となる 2021 年度は、いずれの研究開発テーマについても

初年度に策定した5ヵ年計画に従い技術開発や研究開発を進めた。

以下に、2021年度の成果の概要を示す。

(1) 中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化

1) 初期地圧測定技術の高度化開発

中深度処分施設の地下空洞の断面形状寸法は、設置深度での初期地圧に依存すること、地下空洞の断面形状寸法は、人工バリア、支保工や処分坑道配置等の設計に影響を与えることから、初期地圧の情報は中深度処分施設の最適な設計を目指すために必須であり、特に施設設置深度での3次元の初期地圧は、空洞の掘削方向や形状を設計する際に非常に重要な情報となる。そこで、中深度処分施設の設置深度に応じた3次元の初期地圧を極力、場を乱すことなく、かつ、効率的に測定できる方法として、応力解放法に着目し、我が国に広く分布する堆積軟岩へ適用可能な新たな測定技術を開発することとした。その新たな手法を「円錐孔壁ひずみ法」(図-2)と呼称し、2020年度に実施した概念設計⁵⁾に基づき、基本設計を行った。

基本設計では、まず、測定深度以浅までの掘削、パイロットボーリング及び孔底整形、ひずみ計設置、オーバーコアリング及びコア回収、感度試験という測定手順毎に技術課題を整理した。その上で、以下に示す試験や検討を通じて課題解決を図った。

- ・ 孔形状及びひずみ計の最適配置の検討
- ・ 接着方法及び接着剤の検討
- ・ 接着方法及び接着剤の検討のための基礎試験
- ・ 接着方法及び接着剤の検討のための岩石ブロックを利用した試験
- ・ ストレインセルの検討
- ・ データロガーの検討
- ・ 掘削ツールの検討
- ・ 孔内状況確認方法の検討
- ・ 感度試験方法の検討

検討結果の一例として、接着試験結果を紹介する。表-1は候補とした7つの接着剤に対する試験結果の一覧、図-3は接着状態の写真である。良好な接着状況が確認されたHIC接着剤を最有

力候補とすることとし、次段階の検討として、試験フィールドから採取した岩石ブロック試料を用いた接着試験及び二軸載荷試験を実施し、その適用性を確認した。

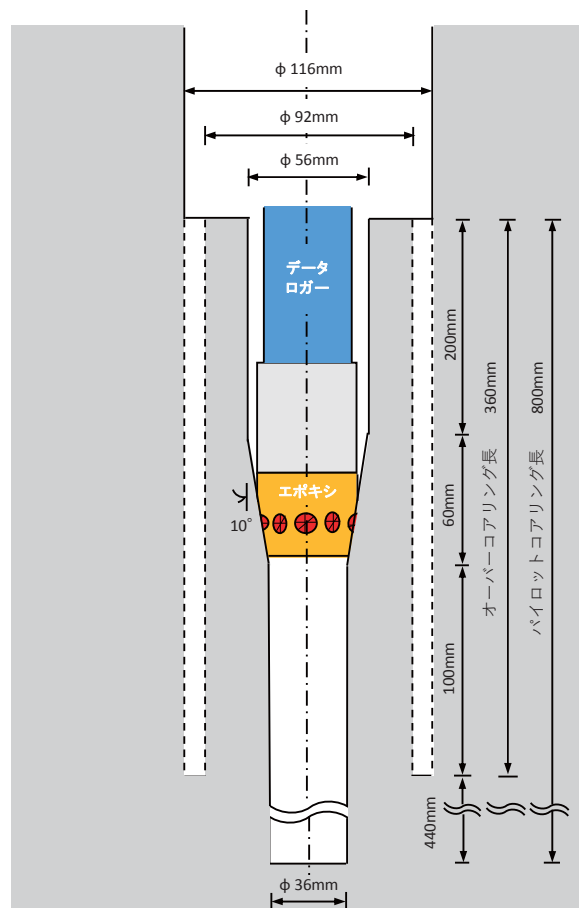


図-2 円錐孔壁ひずみ法の概念図

更に、2022年度に計画している詳細設計に向けての技術課題を整理するとともに、今後の検証試験内容と装置の設計製作計画について検討した。

表-1 接着試験の結果

No.	接着剤名	販売業者	粘度 (cP)	比重	可使時間 (時間)	硬化時間 (日)	接着時間 (時間)	
							ケースA 直接塗布想定	ケースB どぶ漬け想定
1	Eセット	コニシ	30,000	1.10	1.5	1	中止※	中止
2	水中エポキシ	セメダイン	パテ状	1.08	1	1	2	不実施
3	ロンジーパテF-197N	スリーバوند	パテ状	1.60	1	1	2	不実施
4	アルファテック841 (骨材なし)	アルファ工業	記載なし	記載なし	記載なし	記載なし	18	18
5	アクアスケープングルー	アズージャパン	記載なし	記載なし	記載なし	記載なし	1	中止
6	ゼリー状接着剤	神畑養魚	記載なし	記載なし	記載なし	記載なし	1	不実施
7	HIC接着剤	Earth sciences	記載なし	記載なし	0.3~0.5	0.7 (16h)	22	22

※2時間で硬化せず



図-3 各条件（接着剤、養生時間）での接着状態

初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討では、岩盤の塑性化・破壊のメカニズムを解明する解析手法の適用性検討と、初期地圧測定装置の仕様の検討を実施した。

はじめに、岩盤の塑性化・破壊のメカニズム解明のための解析手法としての DEM 解析の適用性を確認するために、三軸圧縮試験、水圧破碎法試験のシミュレーションを行った。三軸圧縮試験のシミュレーションでは、試験結果と解析結果を比較して、コアのせん断面や、破壊前の応力-ひずみ曲線が概ね整合することを確認した。水圧破碎法のシミュレーションでは、破碎圧（応力レベル）が試験結果を精度よく再現できるまでには至らなかったが、最大主応力方向のクラックの発生現象を表現できることが確認された。

次に、初期地圧測定装置の仕様設定に資するため、FEM 解析及び DEM 解析を用いて円錐孔壁ひずみ法によるオーバーコアリングのシミュレーションを実施した。

初期地圧測定装置の寸法、形状等をパラメータとした 3D - FEM 解析を行った結果、ひずみの傾向は、既往調査坑内からの円錐孔底ひずみ法の結果と類似する結果となった。また、ストレイ

ンセルの角度や薄肉部鉛直長を変えた解析を行い、その結果を装置の設計にフィードバックし、装置の形状寸法を決定した。ただし、今回の初期地圧、岩盤物性値を用いた線形 FEM 弾性解析において薄肉部に材料の強度限界に近い応力が発生していることが認められたため、DEM 解析による非線形、破壊を考慮した解析を実施することとした。

設計した初期地圧測定装置を対象に DEM 解析を用いた詳細検討を行い、オーバーコアリング時の薄肉部の塑性化・破壊を検討した。検討の結果、以下の知見を得た。

- ・三軸圧縮試験のシミュレーションにおいて、粒子形状をクランプとすることで、三軸圧縮試験のピークから残留強度までの挙動を再現できることを確認した。
- ・応力-ひずみ曲線において非線形性が現れる軸ひずみ付近で微視クラックが発生しており、DEM 解析により、軟岩のピーク強度に至る非線形挙動を評価できることが明らかとなった（図-4）。
- ・三軸圧縮試験シミュレーションで設定したパラメータを用いて、オーバーコアリングの

DEM 解析を実施した結果、微視クラックが連結して薄肉部を貫通するようなクラックが発生しないことがわかった。

- ・微視クラックは、ストreinセルの上端・下端で多く発生することから、ひずみゲージは、上下端部を避けて設置することが望ましい。
- ・薄肉部の応力状態を評価した結果、ひずみゲージ設置位置近傍では、マクロ的に概ね弾性挙動となっていて、現行仕様により、現場に適用できる可能性がある見通しを得た。

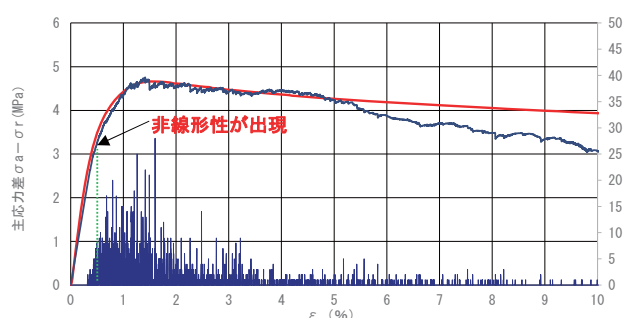


図-4 応力-ひずみ曲線と微視クラック発生数
(cb=65, fric=0.3)

今後、水圧破碎の再現解析を含め、室内検証試験、現場検証試験のシミュレーションにより、詳細な検討を実施する予定である。

2) 地下水流動評価技術の調査

本調査は、地下水流動評価技術（計測・測定及び解析技術）について、国内外の低レベル及び高レベルの放射性廃棄物処分に係る既往の関連技術の調査を行い、我が国における中深度処分へ

の適用を考慮した場合の現状分析と課題の抽出・整理を行うものである。実施にあたっては、原子力規制委員会により整備が進められている第二種廃棄物埋設事業の規制基準（特に中深度処分）における要求事項と原子力学会の学会標準や土木学会の技術検討の既往成果を十分に考慮し、さらには高レベル廃棄物地層処分に向けの関連技術等も参考にして、目的、想定される調査目標並びに処分事業の時間的変遷と測定・計測・解析の必要箇所・エリア等を想定し、それらへ適用可能な現状技術を分類・整理するとともに、適用に向けての技術課題等を考察した。

2021 年度の検討においては、2020 年度に実施した調査結果を踏まえ、まず、地下水流動評価技術（計測/測定及び解析技術）について既往技術の更なる調査を行った。既往技術の調査では、規制要求の最新動向をレビューした上で、不均質性や不確実性の取り扱い等に重点を置き、中深度処分だけでなく地層処分に係る文献等も対象とした。その上で、中深度処分に係る想定される事業展開とその各段階に対応して新しく改訂された規制基準・規則における規制要求への対応が必要となる事項を総合的に整理し、今後に向けてさらなる技術の高度化・開発や確証をしていくことが必要な技術課題について検討・整理を行った。事業展開に応じた地下水等監視モニタリングが新規規制基準策定の過程で重要視され要求事項とされたことを考慮し、図-5 に示す 4 つを中深度処分における地下水流動評価技術に係る今後の重要な技術課題として抽出した。

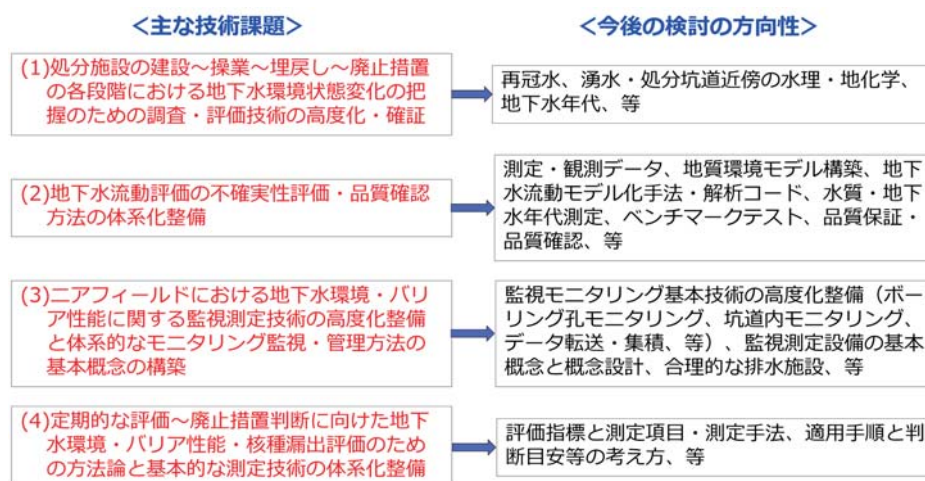


図-5 中深度処分の今後の重要な技術課題の抽出と今後の高度化・開発の方向性

3) 地震時影響評価技術の検討及び地震動観測

地震時影響評価技術の検討として、2021 年度に地表面に設置した地震計⑤の観測データや、過去に取得された地震計①～④の観測データを用いて、以下の検討を実施した。

空洞掘削に伴い岩盤に生じる緩み領域及び空洞規模が観測地震動に与える影響の検討では、1次元及び2次元モデル(図-6)による緩み領域を模擬した解析検討により、評価対象の振動数帯(0~20Hzの範囲)では、空洞のインバート部に生じている緩み領域の影響は認められず、緩み領域が観測地震動に与える影響は小さいことがわかった。一方、空洞の規模の影響については、図-7に示すように試験空洞の地震計①と計測坑Cの地震計④のフーリエスペクトル比の分析により、観測地震動には空洞規模の影響が含まれている可能性が示唆された。

地下及び地上の観測地震動の整合性の確認では、地表の地震計⑤の観測結果を用いて入力地震動を作成し、2次元地震応答解析を実施した。試験空洞底盤位置の応答加速度を、解析結果と観測結果で比較すると、両者の結果は乖離した。乖離の要因の一つとして、解析で用いている入力地震動が精度よく設定できていない可能性が考えられた。

現状の入力地震動作成のための引戻し解析における改良項目として、文献調査の結果を踏まえて「減衰定数の周波数依存性の考慮」と「逆解析による地盤物性の同定」が候補として挙げられ、2022 年度に検討を進める予定である。

地震動観測については、2021 年度に新規に地表面に地震計⑤を設置した。また、地震計①～③については、従来のシステムにより継続観測を行うとともに、地震観測システムのメンテナンスを実施した。地震計④については、別研究で観測している地震動データを活用した。

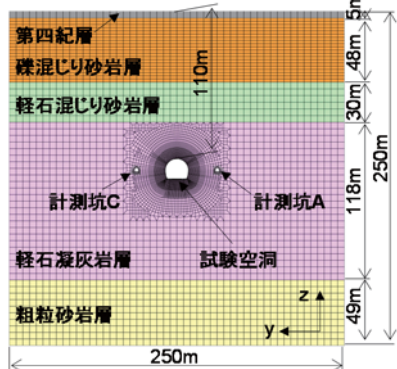
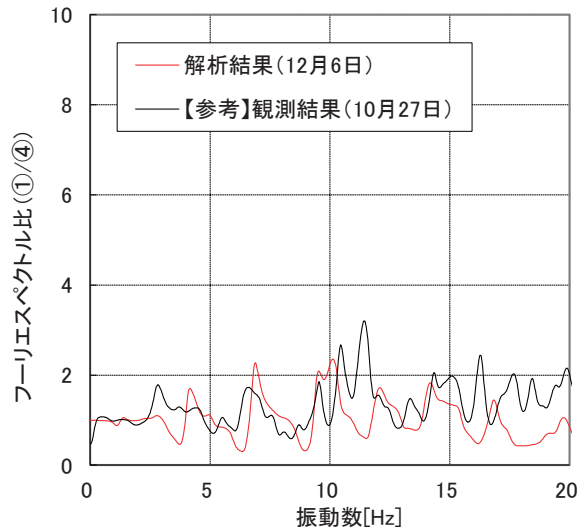
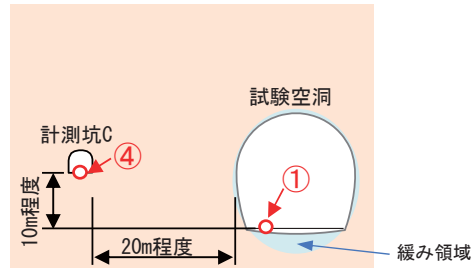
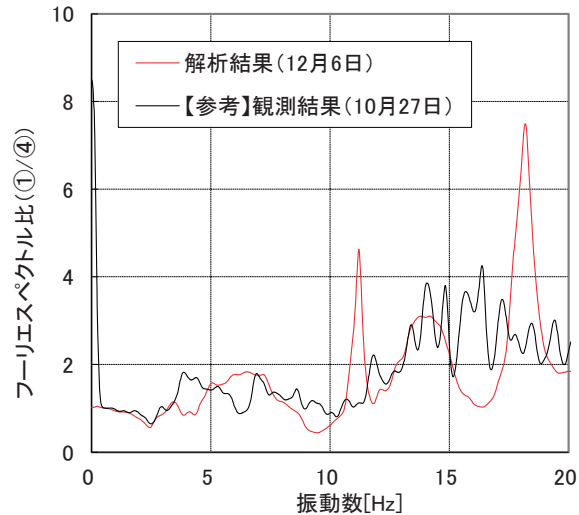


図-6 2次元地震応答解析モデル



(1) 水平方向



(2)鉛直方向

図-7 フーリエスペクトル比 (①/④) の解析結果と観測結果の比較

(2)中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化

1)既往検討成果の調査と技術オプションの検討

中深度処分に係る規則等の改正及び審査ガイドの策定に関する新たな情報が原子力規制委員会より示されたことを受けて、2020年度に引き続き既往検討成果の追加調査を行い、技術オプションの検討に資することとした。調査では「設計の選定プロセス」に重点を置き、本検討を行う上での考え方を整理した。

その考え方を参考にして、技術オプションの検討では、長期安全性に係る感度解析を実施し、そこで得られた人工バリア仕様の違いが線量評価結果に及ぼす影響度を参考に設計オプションを抽出した上で、設計オプションの絞り込みを試行した。

長期安全性に係る感度解析は、表-2に示すように低拡散層の部材厚、低透水層の部材厚、及び断面あたりの廃棄体数に加えて、岩盤の透水係数を変動パラメータとした核種移行解析として実施した。数値解析モデルはGoldSimで作成した。なお、水理解析（各領域の流量の算出）は2次元の多重円筒モデルの解析解を用いた。感度解析結果の一例として、低拡散層の部材厚と被ばく線量との関係を図-8に示す。

表-2 感度解析対象パラメータの範囲

データセット名	設定範囲
低拡散層（セメントの利用を想定）の厚さ	0～3m
低透水層（粘土系土質材料を想定）の厚さ	0～3m
断面当たりの廃棄体数	6、12、20、30、42

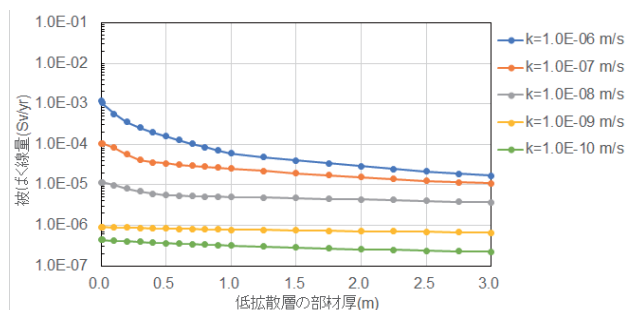


図-8 感度解析結果（低拡散層の部材厚）

長期安全性に係る感度解析結果より、以下の知見が得られた。

- ・低拡散層の部材厚は、 1×10^{-8} m/s 以下の透水係数を有する岩盤では被ばく線量にほとんど影響しない。その一方で、 1×10^{-7} m/s 以上の透水係数を有する岩盤では、部材厚の低減に伴って被ばく線量が増加する。
- ・低透水層の部材厚は、岩盤の透水係数によらず被ばく線量への影響度は小さい。しかしながら、岩盤の透水係数が 1×10^{-7} m/s 以上の場合では、部材厚が 0 cm になると被ばく線量は大きく増加する。
- ・断面当たりの廃棄体数が変動しても、被ばく線量はほとんど変動せず、その傾向は岩盤の透水係数によらない。

天然バリアに係るオプションとして2種類の岩盤（母岩 A（透水係数： 1×10^{-6} m/s）、母岩 B（透水係数： 1×10^{-8} m/s））を設定し、上記で得られた知見を参考にしてそれぞれの岩盤に対して人工バリアオプションを設定することで、岩盤の特性を考慮した設計オプションのバリエーションを抽出した。母岩 A に対して抽出したオプションの仕様を表-3に示す。

オプションの絞り込み手法に関しては、諸外国での検討事例等も参考に、その考え方と評価項目について検討した。評価項目として考えられるのは、設計の実現性、建設・操作性、閉鎖後長期の安全性、閉鎖前の安全性、環境保全、回収可能性、費用・経済性である。今回の比較対象とした設計オプションの範囲では、それら以外の項目は大差ないと考え、閉鎖後長期の安全性と費用・経済性の二つを評価項目として設計オプションの絞り込みを試行した。閉鎖後長期の安全性については、個々の設計オプションに対して核種移行解析を実施して被ばく線量を算出した。費用・経済性については、工事種別のマクロ単価に物量を乗じることにより算出した処分施設の建設費に基づき、廃棄体一体当たりの事業費として評価した。母岩 A に対して得られた結果を一例として、表-4 及び表-5 に示す。図-9 は、これらを相関関係図としてグラフ化したものである。定性的ではあるが、グラフの下方かつ左方に位置するものが望ましい設計オプションとなる。

一連の検討を通じて、このような評価手法が、設計オプションの絞り込みや最適化に向けた有効な手段の一つになることが確認された。

表-3 母岩 A に対して抽出したオプションの仕様

		母岩 A ($1 \times 10^{-6} \text{m/s}$)						
オプション		A-Base	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
低透水層 (mm)	上部	1000	1000	1000	1500	1800	1500	300
	側部	1000	1000	1000	1500	1800	1500	700
	底部	1000	1000	1000	1500	1800	1500	300
低拡散層 (mm)	上部	600	900	1400	600	600	900	900
	側部	600	900	1400	600	600	900	900
	底部	600	900	1400	600	600	900	900
廃棄体数		5×4	4×3	4×3	4×3	4×3	4×3	5×4

表-4 母岩 A に対するオプションの被ばく線量比率

オプション	A-Base	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
線量 (Sv/y)	1.22E-04	7.44E-05	4.40E-05	1.06E-04	9.23E-05	6.17E-05	8.35E-05
$ \log_{10}(\text{線量}) $	3.91	4.13	4.36	3.97	4.03	4.21	4.08
対数比率	1.00	1.06	1.11	1.02	1.03	1.08	1.04

表-5 母岩 A に対するオプションの事業費比率

オプション	A-Base	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
比率	1.00	1.09	1.15	1.10	1.15	1.15	0.98

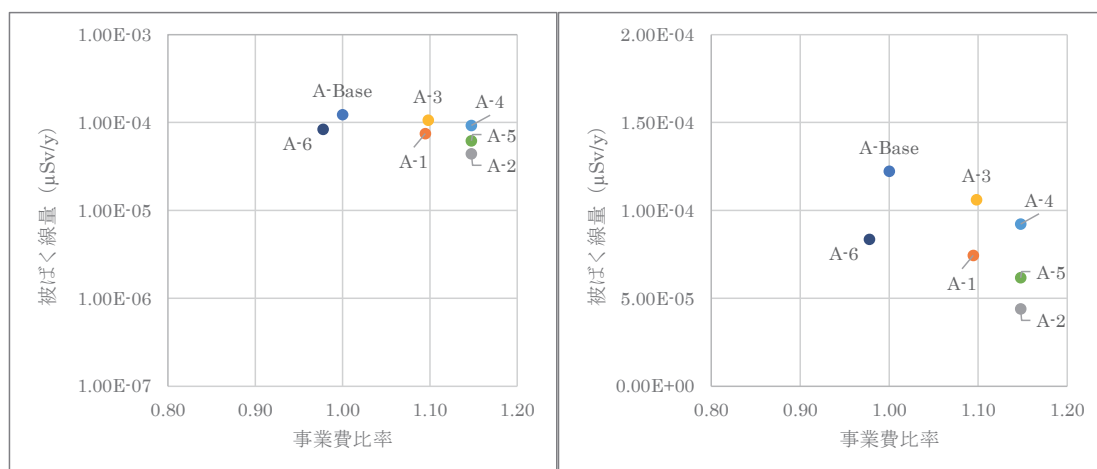


図-9 母岩 A に対するオプションの相関関係 (左：対数軸、右：線形軸)

2) ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究

中深度処分施設や低レベル放射性廃棄物処分施設におけるベントナイト系材料による人工バリアの重要な機能として、放射性物質の移行抑制機能が挙げられる。移行抑制機能として、低透水性及び収着性を期待しており、特に低透水性については重要な設計要件となっている。また、処分場の人工バリアの設計には長期的な評価が求められ、これは初期性能（施工完了時の性能）に対し、物理的あるいは化学的な作用による経年劣化を評価するものであるが、データや知見が十分でないとその評価は保守的になりがちである。合理的な設計を行うためには、まずは初期（施工時）の性能を正確に評価し、さらにその設計に基づいた施工時の品質管理が肝要となる。しかしながら、施工段階において透水係数を直接測定することは困難であり、低レベル放射性廃棄物処分では、締固めエネルギー、乾燥密度（モンモリロナイト湿潤密度）、含水比を代替指標として品質管理を実施する計画となっている。その代替指標は、室内試験や現場試験でそれぞれの関係性を精査し決定されるが、試験や材料のばらつき及び不確実性などを考慮し、その管理値もまた、保守的な設定となっている。これらの技術的課題を解決するためにはまず、「そもそも締固められた土の遮水性はどのようなメカニズムで発現するのか」を明確にする必要がある。本研究は、土粒子の間隙とその間隙を通る水のメカニズム解明を最初の着眼点として、最終的にはベントナイト系材料の透水特性を支配する要因について科学的合理性を持ってその設定値の保守性を説明することにより、中深度処分施設等における人工バリアの初期性能及び長期性能の最適化設計を行う上で有効な知見を得ることを目的としている。

2020 年度の研究では、この研究意図を再確認する事を目的とし、文献調査・有識者ヒアリング・ベントナイト混合土の基本的な締固め－透水特性の確認、及び上記「土粒子の間隙とその間隙を通る水のメカニズム」を検証するための実験手法の模索を試みた。上記のうち、検証については、従来のマクロな室内締固め－透水試験に加えて電子顕微鏡による土粒子間隙構造の可視化、通水時の水の浸透状況を把握するための中性子イメージング実験等にチャレンジし、実験手法の最適

化に着手している。また、これらの結果を総括し、遮水性発揮メカニズムの評価手法とそのための組合せ実験方法、ベントナイト系材料以外の土も対象とした段階的実験手法に関する5年にわたる研究構想と具体的な計画を立案した。

2021 年度は、その5ヵ年計画に従いベントナイト系及び通常の土質材料の透水特性に関するデータの取得、及びメカニズムの評価を進めた。図-10 は、2020 年度に構築したベントナイト系材料の透水係数発現メカニズム解明のための研究のフレームワークである。実験 A は最も基本的な情報を得るための室内 1Ec 締固め－透水試験であり、2020 年度に実施済である。2021 年度は、これに引き続き実験 B、実験 C、実験 D を実施した。

実験 B「室内締固め－透水実験」は、締固め土の透水係数が締固め時の乾燥密度と飽和度の関数として表現できるものと仮定し、それを確認するために以下 2 つのシリーズの実験を実施した。

① λk 実験：飽和度一定で乾燥密度を数種類変更した供試体の透水係数を計測

② εk 実験：乾燥密度一定で飽和度（含水比）を数種類変更した供試体の透水係数を計測

実験 C「電子顕微鏡による締固め土の構造観察」は、 λk 及び εk ライン上で締固め土の粒子間隙構造がどのように変化しているか（あるいは変化しないのか）を確認する目的で、顕微鏡撮影（実体顕微鏡及び SEM）を実施した。ベントナイト混合土については、長期透水試験（JGS0312）に用いた供試体の試験終了後（十分に飽和・膨潤後）に取り出した供試体を観察することにより行った。

実験 D「中性子イメージング実験」は、土粒子間隙構造の可視化、通水時の浸透状況の可視化を試みるものであり、締固め時の含水比の違いが土粒子空隙構造や通水性状の違いにどの程度の影響を及ぼすのか、それがどこまで可視化できるのか、といった基礎的な検討を実施した。

試験結果の一例として、ベントナイト混合土を対象に行った実験 B から得られた結果を図-11 に示す。透水係数は、乾燥密度に依存するだけでなく、同じ乾燥密度であっても締固め時の飽和度の違いにより変化することを明らかにするとともに、その変化率に関する試験データを取得することができた。

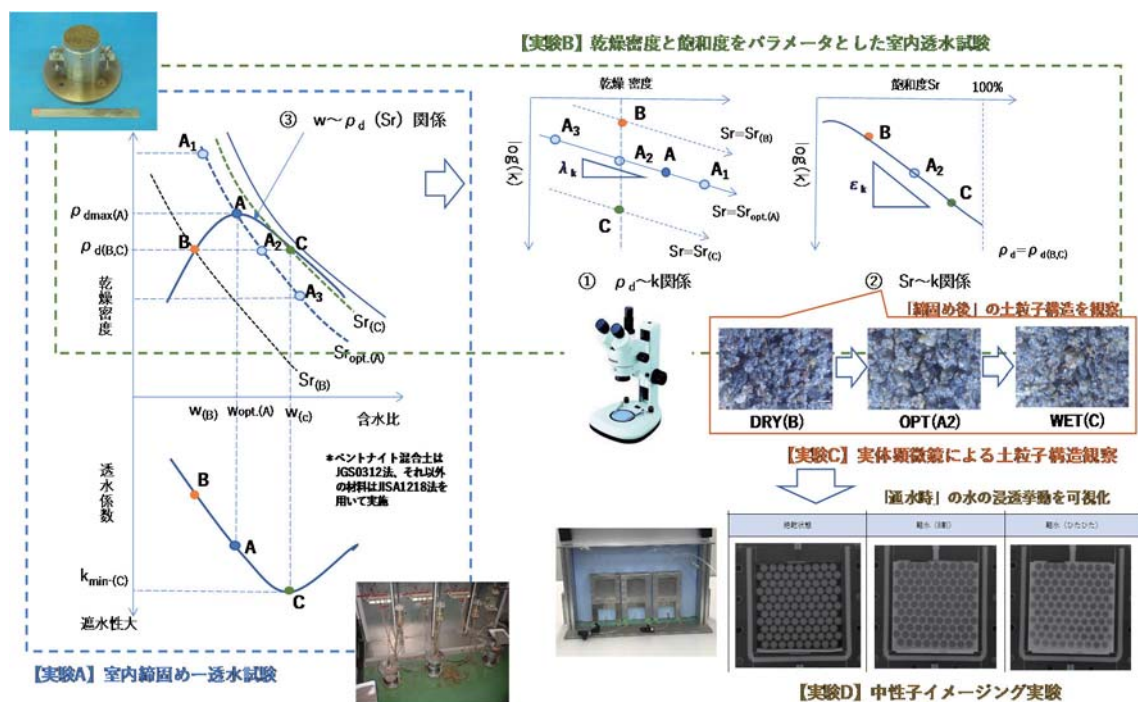


図-10 ペントナイト系材料の透水特性データの取得と研究のフレームワーク

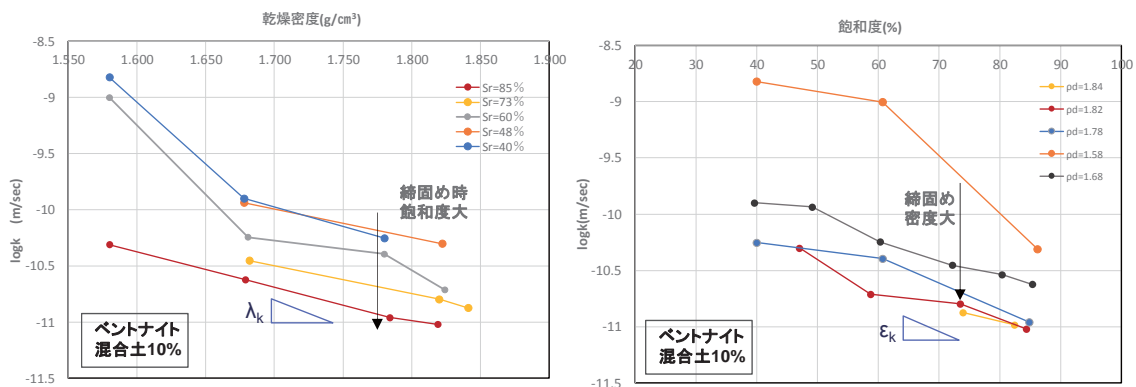


図-11 $\lambda_k \cdot \epsilon_k$ 実験（実験B）の結果（ペントナイト混合土）

- 1) 第2回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合（平成27年2月12日）資料2-1「原子力発電所等の廃止措置及び運転に伴い発生する放射性廃棄物の処分について」、電気事業連合会
- 2) 第二種廃棄物埋設の廃棄物埋設地に関する審査ガイド、原子力規制委員会、令和4年4月20日
- 3) 平成30年第22回原子力規制委員会（平成30年8月1日）資料3「中深度処分等に係る規制基準等の策定について—第二種廃棄物埋設に係る事業許可基準規則等の骨子案の事業者との意見交換の実施—」、原子力規制庁
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター、東電設計株式会社、令和3年度 低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業 地下空洞型処分調査技術高度化開発 報告書、2022
- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター、I. 低レベル放射性廃棄物の処分に関する調査研究 1. 地下空洞

型処分調査技術高度化開発、原環センター 2020 年度技術年報、pp. 1～pp. 8、2022

2. その他の低レベル放射性廃棄物処分に関する調査研究

その他、低レベル放射性廃棄物の浅地中処分、中深度処分に関する以下の調査研究を行った。

(1)L1 廃棄体の遠隔製作技術の実証試験計画策定に関する検討

L1 廃棄体製作各段階で要求される技術要件を踏まえ、実証試験の試験条件や試験装置仕様等の検討を行った。

(2)L2 廃棄体の製作検査方法の標準化に関する業務委託

浅地中ピット処分対象廃棄体（大型角型容器形態）製作方法及び検査方法に関する標準本体及び附属書の原案を作成し、日本原子力学会標準委員会 LLW 廃棄体等製作・管理分科会審議などを行った。

(3) 中深度処分施設の埋設後管理標準の改訂支援補助業務

埋設後管理標準に関して、L1 新規制基準の検討状況を考慮し、学会標準のより適正な改定に資することを目的として、調査、検討、学会審議支援などを行った。

(4) 中深度処分の安全評価手法標準の改定支援業務助勢

中深度処分の安全評価手法標準に関して、L1 新規制基準の検討状況を考慮し、学会標準のより適正な改定に資することを目的として、調査、検討、学会審議支援などを行った。

II. 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する調査研究

1. ニアフィールドシステム評価確証技術開発

◇事業の概要

人工バリアと近傍の岩盤を含めたニアフィールドと称される領域は、人工バリアであるオーバパック（金属）と緩衝材（粘土）ならびにセメント系材料や岩盤等の複数の材料で構成されており、それらの変質や材料間の相互作用等により状態は時間とともに変遷し、バリア構成要素の安全機能や核種移行挙動に影響を与える可能性がある。そのため、人工バリアの状態や性能の変遷挙動を確からしく評価するための技術の開発が望まれる。

本事業では、ニアフィールド構成要素の状態等の変遷を評価するための技術の開発と確証を進めており、当センターは「緩衝材の流出現象及びその後の飽和プロセスにおける挙動」に関する研究開発に取り組んでいる。

処分孔縦置き・ブロック方式では、緩衝材の設置後に処分孔の上端よりも周辺岩盤の水位が高い場合に、緩衝材ブロックと孔壁の隙間を流れる孔内湧水の排出とともに緩衝材が流出する可能性が懸念されている。本事業では、緩衝材定置直後から再冠水するまでの期間を対象として、緩衝材の流出挙動の把握及び抑制するための工学的対策の具体化に向けて、施工時に存在する緩衝材ブロックと孔壁の隙間に対する処理方法（施工技術オプション）の開発・整備を進めている。

また、人工バリアである緩衝材に長期的に期待する機能は緩衝材の飽和後に発揮されるものであり、緩衝材の長期的な性能の評価は、完全飽和、密度均一を前提として行われている。しかし、密度均一な緩衝材ブロックが飽和に至る過程で発生する膨潤に伴う密度不均一が、膨潤圧により均一化せずに残存する可能性が報告されている¹⁾。再冠水に至る迄の過渡期における緩衝材の変遷挙動は、地下水の浸潤に伴う膨潤圧の発生や透水性の変化等に加え、孔内湧水環境や施工時の孔壁との隙間の閉塞プロセスや不均一性等の影響を受ける。そこで、飽和までの期間に緩衝材の状態がどのように変遷するかを把握し、過渡期を経た飽和後の緩

衝材の密度分布を確からしく予測することは、その後の長期にわたる緩衝材の機能の評価に重要となる。そのため、本研究では、緩衝材の飽和プロセスの評価技術の整備に取り組んでいる。

なお、本事業は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構及び公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが共同で実施した経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和3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（JPJ007597）（ニアフィールドシステム評価確証技術開発）」の一部である。

◇2021年度の成果²⁾

(1)検討項目

本事業では、次の2項目の検討を進めた。

- 1)緩衝材の流出を抑制する工学的対策の具体化
- 2)緩衝材の飽和プロセスを対象とした解析手法の構築

1)では、縦置き・ブロック方式に適用する隙間処理方法として、隙間未充填オプション、ケイ砂充填オプション、ペレット充填オプションの3つの施工技術オプションを対象として緩衝材の許容流出量を見積もるための流出量評価方法等の技術情報の整備を進めた。2)では、2019年度までに構築した、小型供試体サイズを対象とした緩衝材の浸潤・膨潤プロセスに伴う隙間閉塞挙動に関する力学解析技術（飽和後の密度分布を示す解析手法）をベースに、解析領域のスケールアップや解析モデルの多次元化を行う。また、解析結果と試験結果との比較や入力パラメータの見直し等を行い、段階的な解析手法の高度化に取り組む。

(2)緩衝材の流出を抑制する工学的対策の具体化

1)隙間未充填オプション

本オプションは、緩衝材が膨潤して孔壁との隙間を充填することを期待するものである（条件により水みちが残存する場合がある）。本オプションの適用性の判断には、その過程における緩衝材の流出量の評価方法が必要となる。そのため、原位置で取得できる処分孔内外水頭差、孔内湧水量を入力パラメータとした緩衝材流出量の評価手法の開発に向けて、図-1に示す装置を用いて水頭差と流量をパラメータ（表-1）とした定水位条件の室内流出試験（以下、「水頭差制御流出試

験」という。)を実施し、物理的な隙間閉塞の有無を確認するとともに、緩衝材流出量の評価手法の構築に資するデータを取得した。なお、本試験は、隙間幅を 20mm に設定し、緩衝材仕様としてケイ砂 30wt%混合の乾燥密度 1.9Mg/m^3 に圧縮成形した供試体、試験溶液としてイオン交換水を用いた。

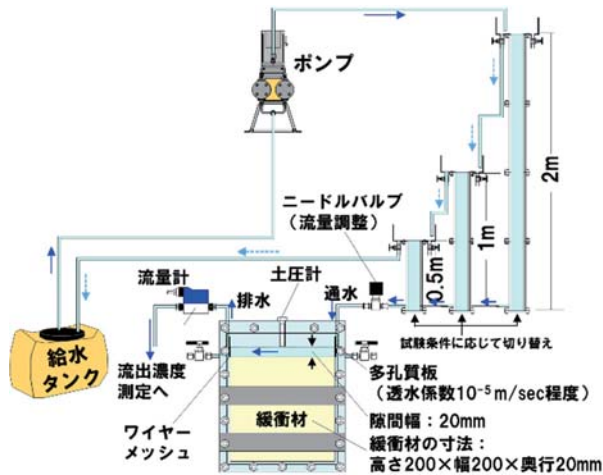


図-1 室内流出試験の装置概要

表-1 隙間未充填の試験パラメータ及び隙間閉塞状況

	流量 V [mL/min]	水 頭 差 H [m]		
		0.5	1.0	2.0
隙間閉塞状況 ^{※1}	1	○	○	○
	10	△	△	○
	20	△	○	×

※1 ○：閉塞、△：閉塞せず(少量の排水あり流出なし、2か月間で試験終了)
×：閉鎖せず(排水減少2か月間で試験終了)

試験結果（流出挙動）にはばらつきがあり、隙間閉塞状況には水頭差や流量との相関は見受けられない（表-1）。その理由として、緩衝材の膨潤に伴い隙間を充填する際、緩衝材中のモンモリロナイト成分が流出し、ケイ砂のみが残存したこと、或いは、試験装置内に設定した隙間の上面に緩衝材表面が到達するまでの膨潤挙動にばらつきが生じ、試験装置の設定や試料成形などが影響した可能性が示唆された。

また、本室内試験の累積流出量の経時変化（図-2）では、緩衝材が膨潤により隙間を充填した時点（変曲点：隙間上部で膨潤圧の発生した時点）を境とした前後の期間（T1 と T2）で排水量や緩衝材流出量の変化が確認された。本試験結果は、2020 年度に幌延深地層研究センターの地下施設

350m 調査坑道（以下、「幌延 URL 地下 350m」という。）で実施した原位置試験³⁾の累積流出量の経時変化（図-3）と同様の傾向を示すことを確認した。

今後は、水頭差と流量をパラメータとする水頭差制御流出試験の再現性確認を含む試験データの拡充を進め、水みちの形成前後の流出挙動の違いを把握してモデル化を試みる。更に水質の違いやスケール効果による流出挙動の違い等を原位置試験の結果と比較しつつ把握し、緩衝材流出量の評価モデルの構築を目指す。

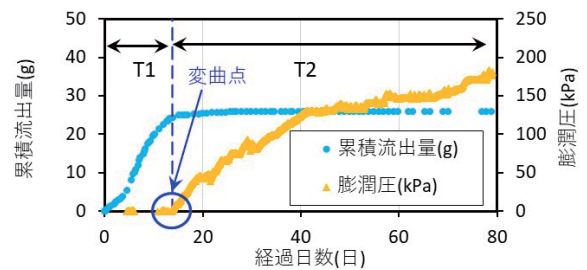


図-2 室内試験の累積流出量と膨潤圧の経時変化（水頭差:1m、流量L:10mL/min）

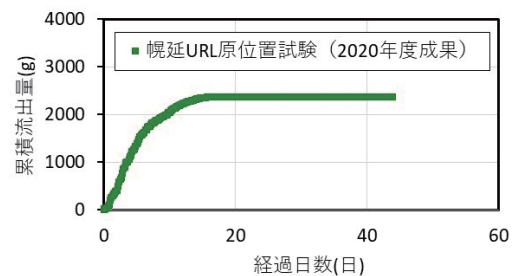


図-3 原位置試験の累積流出量の経時変化³⁾

2) ケイ砂充填オプション

本オプションは、緩衝材と孔壁の隙間にケイ砂を充填することで、緩衝材が地下水と接触する面積を減らして緩衝材流出量の抑制効果が得られること、ケイ砂領域を介して緩衝材の浸潤環境を均質化できること等を期待するものである。2019、2020 年度の室内要素試験^{3),4)}では、孔内湧水量（流量）の大小によらず緩衝材の流出濃度は比較的低く維持されることを確認している。

2021 年度は、地下坑道の原位置水理環境を考慮し、図-1 に示す装置を用いて水頭差 1m、流量 10mL/min の水頭差制御流出試験を実施した。試験の経過に伴い流量が減少し（図-4）、2019 年、2020 年度の定流量条件の室内流出試験^{3),4)}や 2019

年度の原位置試験⁴⁾とは異なる挙動を示した。流量減少の要因として、ベントナイトの膨潤によりケイ砂の間隙に侵入して間隙比が低下（流路断面積が低下）したことが考えられる。

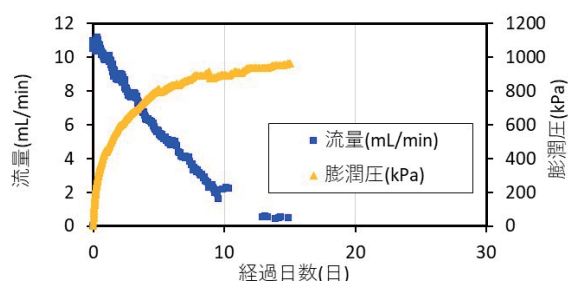


図-4 流量と膨潤圧の経時変化

今後は、水頭差と流量等をパラメータとした水頭差制御流出試験で流出挙動（流量低下の傾向等）を確認するための試験データを拡充し、2021 年度から継続中の幌延 URL 地下 350m における原位置試験の結果と比較しつつ緩衝材流出量の評価モデルの構築を目指す。

3) ペレット充填オプション

本オプションは、緩衝材と孔壁の間隙にベントナイトペレットを充填することで、処分孔全体で緩衝材の乾燥密度を高く維持すること、緩衝材流出の遅延効果を得ること等を期待するものである。

2021 年度は、施工方法及び流出量評価方法に関する予備検討を進めた。湿潤環境下で隙間にペレットを投入すると、ペレット表面が膨潤してゲル状となり、ペレット同士、或いは孔壁や緩衝材に付着して詰まりの要因となり、隙間への充填が不均一になる可能性がある。改善策として、ペレット表面のコーティングによる膨潤の遅効、防水シートの設置等を抽出した。また、ペレット充填オプションにおける流出挙動は、隙間未充填と類似した挙動を示すと考えられる。

今後は、施工方法の改善策に関する効果の確認や評価モデルの構築に向けた更なる検討や試験に取り組む必要がある。

(3) 緩衝材の飽和プロセスを対象とした解析手法の構築

前述した隙間未充填オプションへの適用を念

頭に置き、地下水の浸潤に伴う緩衝材の膨潤による孔壁との隙間の充填挙動、その後の再冠水完了までの期間における緩衝材内で生ずる応力再分配や乾燥密度変化の挙動について、定量的に評価するための解析手法の構築を進めている。具体的には、解析コードのドメインを小型試験体サイズから実規模の 1/4 スケール、実規模スケールへとスケールアップし、各種試験結果の再現性を確認しつつ段階的に高度化を進めている。なお、本検討で用いる有限要素解析コードは、DACSAR^{4),5)}の解析コード群の一つである DACSAR-I⁶⁾をベースに、不飽和状態にある緩衝材の力学特性を表現するための改良を施したものである。

1) 小型セル試験を対象とした解析手法の検証

小型セル試験スケールへの適用を念頭に、図-5 に示すセル試験のプロセスを対象に再現解析を実施した。解析対象となるセル試験のプロセスは、不飽和ベントナイト供試体（初期寸法： $\phi 40 \times$ 高さ 20 mm）の上部に隙間（5 mm 等条件を変えて実施）を設けた小型セル内に上部から給水することにより供試体が上部（軸方向）に膨潤して隙間を充填する過程、さらに隙間充填後の平衡状態に至るまでの過程である。

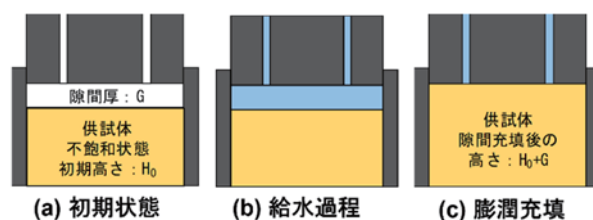


図-5 解析の対象となるプロセスの概念図

2020 年度に実施した解析の結果、自由膨潤過程で発現する側圧の最大値は 1.3 MPa となり、小型セル試験で計測された側圧の最大値である 3.27 MPa に対して半分以下の値であった。

そのため 2021 年度には、自由膨潤過程で発現する最大側圧が小型セル試験結果と整合するように、不飽和状態の力学応答に関連するパラメータとポアソン比のキャリブレーションをした。これにより、自由膨潤過程で発現する側圧の最大値が 3.0 MPa と改善され、小型セル試験の結果と同程度となった（図-6）。

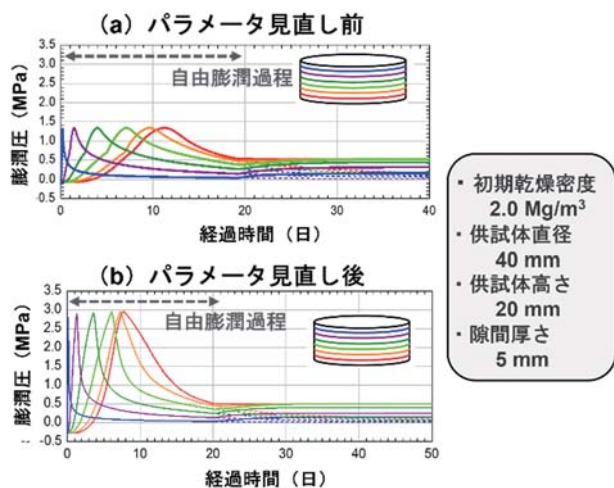


図-6 解析結果の比較（側圧の経時変化）

2) 実規模 1/4 スケールへの拡張

前記 1) のパラメータの見直しの後に、解析体系の多次元化やスケールアップに向けて、実規模の 1/4 スケールへの拡張を検討した。解析モデルや境界条件は、2020 年度に幌延 URL 地下 350m で実施した原位置試験²⁾に基づき設定した。

解析の適用性の確認に向けて、一次元解析から二次元解析へと段階的に拡張を行いつつ試験結果の再現性（膨潤圧等の基礎的な挙動）を確認した。図-7 にモデル概念図と境界条件を示す。

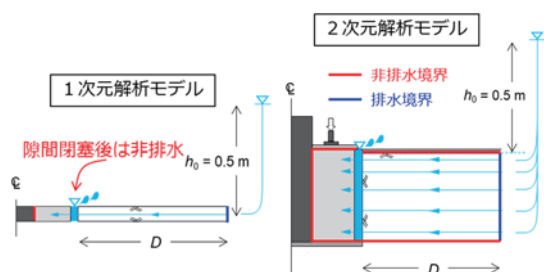


図-7 モデル概念図（軸対象モデル）

一次元解析の結果は、外側面からの地下水の浸透に伴い膨潤圧（軸圧、側圧）が上昇し、最大値約 1.9MPa に到達後、緩やかに減少した。これは、原位置試験の膨潤圧の挙動と概ね整合するものであったが現象の進行速度は原位置試験に比べて緩慢であった。二次元解析結果は、軸圧に関して、同じ半径位置の上面と底面ではほぼ同じ経時変化となり、原位置試験で現れた上面と底面での顕著な差異は再現できなかった。側圧に関しては、下部の平衡圧が上部の平衡圧より大きくなり（図-8）、中央が大きい結果となる原位置試験とは異

なる傾向を示した。以上のように、軸圧および側圧の傾向が原位置試験と異なる点は、緩衝材と周辺の岩盤等との摩擦を考慮していない影響等が考えられる。今後は、摩擦を考慮した解析の再現性を確認すること等により解析手法の高度化を進める。

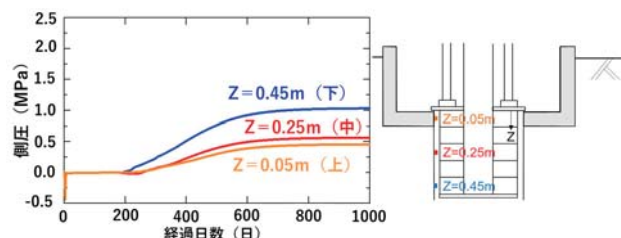


図-8 二次元解析の土圧計測位置における側圧の変化

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 処分システム工学確証技術開発（第 2 分冊）—人工バリア品質／健全性評価手法の構築—緩衝材，2018
- 2) 日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、令和 3 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、2022
- 3) 日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、令和 2 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、2021
- 4) 日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、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、2020
- 5) Iizuka, A. and Ohta, H., A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp.71-87, 1987
- 6) Takeyama, T., Tachibana, S. and Furukawa, A.: A finite element method to describe the cyclic behavior of saturated soil, International Journal of Material Science and Engineering 2 (1), pp. 20-25, 2015

2. 地層処分施設閉鎖技術確証試験

◇事業の概要

本事業では、地層処分研究開発に関する全体計画¹⁾を踏まえて、“坑道シーリングに関わる施工技術の整備”及び処分場の最終閉鎖の判断に資する“高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発”に取り組んでいる。

坑道シーリングに関わる施工技術の整備では、多様な地質環境条件や処分場設計オプションに柔軟に対応できる“埋め戻し施工技術オプション”の整備に向けて、撒き出し・転圧工法及び吹付け工法に関する施工試験、スクリー工法及びブロック工法に関する要素試験を実施した。

高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発では、人工バリアを含む地下構成要素の品質保証体系の構築に向けて、地下構成要素の設計や性能評価の内容を調査したうえで、品質管理（製造・施工プロセス管理）や性能確認プログラムの全体枠組みの構築に関する考え方を整理した。また、本事業で施工試験等を実施している埋め戻し材を対象として、品質管理及び性能確認に必要な測定技術の適用性確認のための要素試験を実施するとともに、モニタリングに関する共通基盤技術として、無線給電技術の高度化に向けた要素試験を実施した。

なお、本事業は国立研究開発法人日本原子力研究開発機構及び公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが共同で実施した経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和3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（JPJ007597）（地層処分施設閉鎖技術確証試験）」の一部である。

◇2021年度の成果²⁾

(1) 坑道シーリングに関わる施工技術の整備

本事業では、多様な地質環境条件や処分場設計に柔軟に対応できるように、埋め戻し施工技術オプションの整備を進めている。また、材料製造から施工の各段階におけるプロセス管理と非破壊検査等の測定技術を活用し、作業中の埋め戻し施工時に破壊的な検査を極力必要としない品質確認方法を指向して施工試験や要素試験に

取り組んでいる。

1) 撒き出し・転圧工法

施工した埋め戻し材の物性データの取得及び施工プロセス管理手法の構築を目的として、図-1に示す模擬坑道（天端までの高さ、坑道幅ともに5m）において埋め戻し施工試験を実施した。なお、転圧施工が困難な坑道の妻部及び側部については吹き付け工法を併用した。埋め戻し材には、模擬掘削土（最大粒径20mmの玄武岩）とベントナイト（クニゲルV1、混合率15%）を用いた。転圧機械には1.5t小型振動ローラを使用した。予備試験の結果から、撒き出し厚さを25cm、転圧回数を6回に設定し、計12層の施工試験を実施した。

施工試験後に砂置換法で測定した埋め戻し材



図-1 模擬坑道の外観

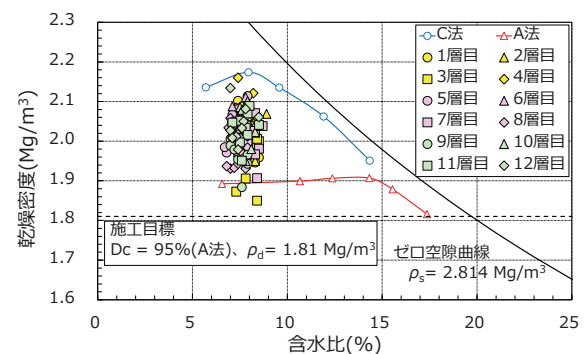


図-2 転圧施工試験後の埋め戻し材の乾燥密度

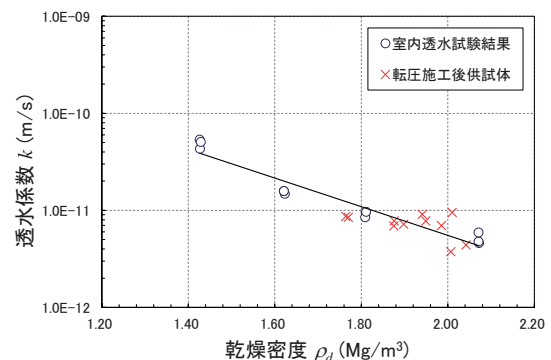


図-3 転圧後の埋め戻し材の乾燥密度と透水係数の関係

の乾燥密度を図-2 に示す。乾燥密度の平均値は 2.018 Mg/m^3 、標準偏差は 0.054 Mg/m^3 であり、測定した全ての位置で乾燥密度の目標値 (1.81 Mg/m^3) を満足した。また、施工試験後のブロックサンプリング試料を用いて測定した乾燥密度と透水係数の関係を図-3 に示す。施工試験後の埋め戻し材の透水係数は $1 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ 以下であり、室内透水試験結果から求めた近似曲線と整合した。

2) 吹付け工法

連続的に施工が可能な材料条件及び施工条件を把握することを目的として、図-4 に示す吹付け箱を用いた要素試験及び幅 $1.5 \text{ m} \times$ 高さ 1.5 m のアーチカルバートを用いた小規模模擬坑道試験を実施した。



(a)要素試験 (b)小規模模擬坑道試験
図-4 吹付け試験の状況

吹付け施工では、粒径の大きな碎石はリバウンドして材料ロスが増えるため、埋め戻し材には、最大粒径 5 mm と 2.5 mm の模擬掘削土（玄武岩）とベントナイト（クニゲル V1、混合率 15% ）の混合土を用いた。埋め戻し材の含水比は、ホース内の目詰まりの低減効果を期待して、締固め試験 C 法の最適含水比 (W_{opt}) より低い値 ($W_{\text{opt}} - 3\%$ 、 $W_{\text{opt}} - 1.5\%$) とした。小規模模擬坑道試験では、 $W_{\text{opt}} - 3\%$ の配合を約 10 t 施工し、長時間施工における品質確認、実規模施工に向けた課題の抽出を行った。

工学規模試験では、模擬掘削土の粒度分布（均等係数 $U_c = 9.6 \sim 13.8$ ）及び材料供給量が施工品質に及ぼす影響について確認した。その結果、均等係数 $U_c = 9.6 \sim 13.8$ の範囲では、埋め戻し材の乾燥密度や透水係数に及ぼす影響は小さかった。また、材料供給量については、供給量の増加に伴い乾燥密度及びリバウンド率は減少傾向を示した。この要因は、コンプレッサーから供給される空気量が一定のため、材料供給量の増加に伴い材料に与えられるエネルギーが減少したためと考えられる。

小規模模擬坑道試験で得られた乾燥密度の頻

度分布、乾燥密度と透水係数の関係を図-5 及び図-6 に示す。 10 t 程度の連続施工においても、ホースやノズルの目詰まりが生じることはなく、乾燥密度、透水係数ともに施工目標値を満足することを確認した。ただし、埋め戻し材のリバウンド率は 61% であり、坑道の隅角部に対するノズルワーク等が課題として残った。

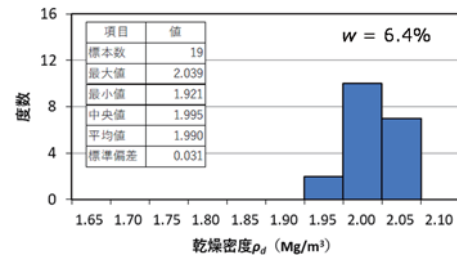


図-5 乾燥密度の頻度分布（小規模模擬坑道試験）

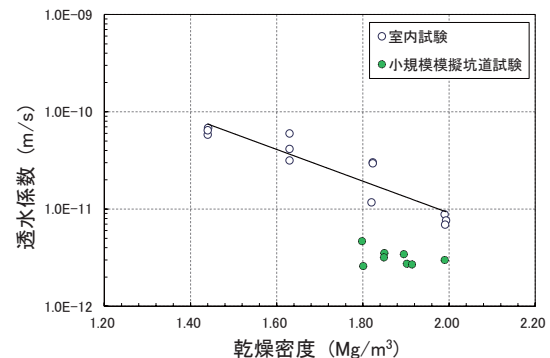


図-6 透水試験結果（小規模模擬坑道試験）

3) スクリュー工法

スクリーウの回転方向による坑道の天端や隅角部に対する充填性を確認するために、図-7 に示す 2 本のスクリーウで構成される要素試験装置を用いた充填試験を実施した。スクリーウ本体の基本仕様を表-1 に、試験に用いた埋め戻し材の配合を表-2 に、試験後の試料採取位置を図-8 に示す。



(a)スクリーウ本体 (b)試験土槽
図-7 要素試験装置

表-1 スクリュー本体の基本仕様（単位：mm）

外径	ピッチ	シャフト径	シャフト長さ
300	190	100	4,591

表-2 埋め戻し材の配合（質量%）

碎石 2005	碎石 1005	砕砂	ベントナイト (クニゲル V1)
20	40	25	15

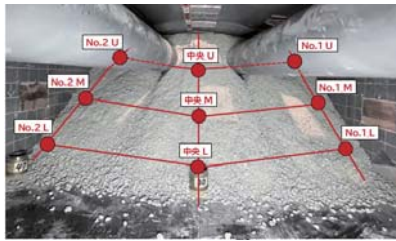
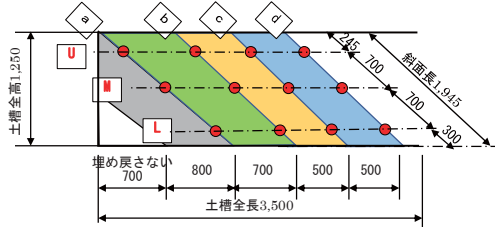
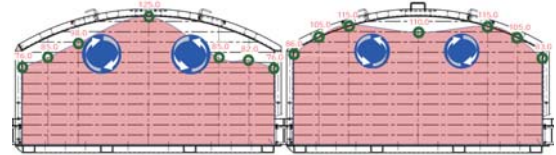


図-8 試料採取位置

2本のスクリーは互いに逆回転とし、図-9に示すように2ケースの回転方向を設定した。充填試験では、スクリー先端を土槽妻側から300mmの位置に設置した後、スクリー先端の埋め込み長さが560mmとなるまでスクリーを固定して充填し、坑道の天端や隅角部に対する充填能力を確認した。その後30～60mm/minの速度でスクリーを後退させながら充填を実施した。

埋め戻し材の充填完了時の形状を図-9に示す。スクリー先端から土槽内に供給された埋め戻し材は、スクリーの回転慣性により回転方向へ押し込まれる傾向となった。また、採取した試料の乾燥密度及び透水係数を表-3に示す。事前の室内透水試験では、乾燥密度1.552 Mg/m³の試料の透水係数は7.08×10⁻¹¹ m/sであったが、採取試料においては、乾燥密度が1.6 Mg/m³程度の試料の透水係数は1×10⁻⁹ m/sよりも大きかった。これは、充填試験中に材料分離が発生し、土槽底盤部に粒径の大きな碎石が多く、相対的にベントナイト混合率が小さくなったためである。

充填中の材料分離の程度はスクリー工法により施工された埋め戻し材の透水係数を確保するうえでの重要な指標となり得ることから、埋め戻し材の配合、施工装置ならびに施工方法等の改善による材料分離の抑制について検討する必要がある。



(a) ケース 1 (2) ケース 2
(充填完了時、妻面より150cm断面)

図-9 埋め戻し材の充填形状

表-3 採取試料の乾燥密度及び透水係数（ケース2）

採取位置 (図-8参照)	左側スクリー、高さ位置L		
	a断面	b断面	c断面
乾燥密度(Mg/m ³)	1.638	1.657	1.627
透水係数(m/s)	4.23×10 ⁻⁹	6.45×10 ⁻⁸	3.28×10 ⁻⁶

4) ブロック工法

埋め戻し材ブロックの低透水性と自己シール性に関するデータを取得するために、静的に締め固めて作製した供試体を用いて透水試験と膨潤変形試験を実施した。試験条件を表-4に示す。模擬掘削土には玄武岩の碎石（最大粒径20mm）及び砕砂（最大粒径5mm）を使用した。また、透水試験及び膨潤変形試験の供試体の寸法は、それぞれφ100mm×H100mm、φ60mm×H25mmとした。供試体の作製時には、所定の有効粘土密度になるように乾燥密度を管理した。透水試験では、碎石と砕砂の割合をパラメータとして、模擬掘削土の粒度分布が透水係数に及ぼす影響を確認した。

有効粘土密度と透水係数の関係を図-10に示す。有効粘土密度が0.6～0.8 Mg/m³の範囲では、碎石と砕砂の割合が異なると透水係数に1桁程度の変化が見られたが、有効粘土密度が1.0 Mg/m³以上では、碎石と砕砂の割合が透水係数に及ぼす影響は小さかった。有効粘土密度と最大膨潤変形率の関係を図-11に示す。高さ25mmの供試体については、試験期間中に膨潤変形率が定常に至らなかったため、双曲線近似により最大膨潤変形率を求めた。図中には、膨潤特性理論評価式^{3), 4)}において埋め戻し材中の間隙水のイオン濃度 $n_0 = 20 \sim 40 \text{ mol/m}^3$ として算出した最

表-4 ブロック工法における試験条件

	模擬掘削土 (乾燥質量比)		ベントナイト クニゲル V1	有効粘土密度 (Mg/m ³)
	碎石	砕砂		
透水試験	0	10	15% 30%	0.6
	2	8		0.8
	4	6		1.0
	6	4		
膨潤変形試験	—	85	15%	0.8
			100%	0.95 1.1

大膨潤変形率を点線で示した。なお、最大粒径と供試体サイズの関係から模擬掘削土として玄武岩を用いたケースでは砕砂のみを用いて供試体の高さを25mmとし、ケイ砂を用いたケースでは、供試体の高さを5mm及び25mmとした。ケイ砂のケースでは、供試体の高さに依らず最大膨潤変形率は同程度であった。一方、玄武岩のケースでは、同じベントナイト混合率にも関わらずケイ砂のケースと比べて最大膨潤変形率が3～5割程度小さかった。ケイ砂のケースの結果から、供試体の高さは最大膨潤変形率に影響しないと考えられるため、最大膨潤変形率が小さかった要因としては、砕石や砕砂が形成した骨格や玄武岩からの溶出イオンなどが考えられる。

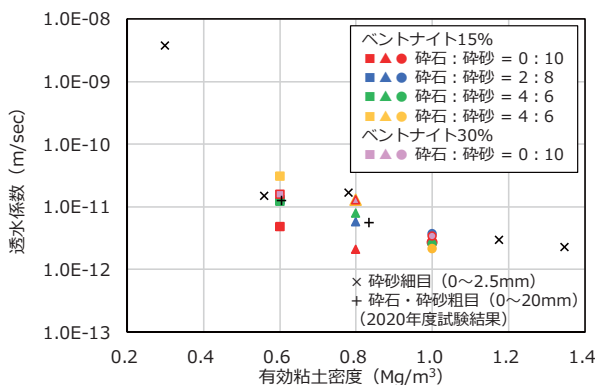


図-10 有効粘土密度と透水係数の関係

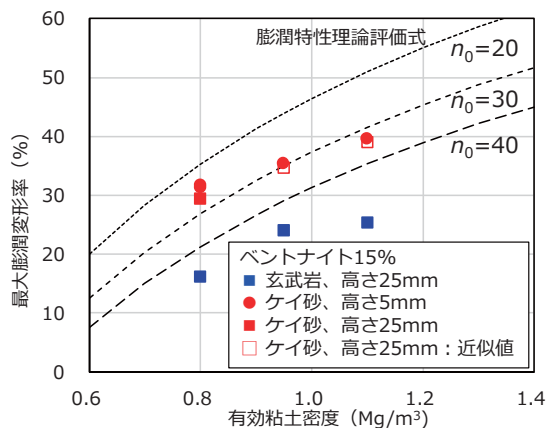


図-11 有効粘土密度と最大膨潤変形率の関係

(2) 高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発

1) 製造・施工技術に係る品質保証体系の整備

処分場の事業期間中に定期的実施される安全レビューでは、最新の技術的知見を踏まえて人工バリアを含む地下構成要素の製作・施工に

係る品質や施工後の状態変遷をより精度よく評価するための情報が必要になる。本事業では、これらの情報を取得するための品質保証体系を施工時と施工後の段階に分けて、各々に適用する次の2つの取組(プログラム)について検討を進めている。

品質管理プログラム

一定の施工品質(仕様)を確保するための取組

性能確認プログラム

施工後の地下構成要素の変遷挙動を評価する性能評価の入力情報を取得する取り組み

品質管理プログラムについては、地下構成要素の施工時のサンプリングなどの破壊的な検査を最小化するために、材料製造及び施工の各段階で適切な品質管理を実施して品質を保証する製造・施工プロセス管理手法を主体としたプログラムを指向している。同様の取り組みが進められているスウェーデン(SKB)やフィンランド(Posiva)の先行検討事例などを参考にしつつ、2021年度は縦置き・ブロック方式を対象としてオーバーバック、緩衝材、埋め戻し材の製造・施工プロセス管理手法の素案を整備した。

性能確認プログラムで取得する情報は、操業期間中に実施される安全レビューにおける性能評価の入力情報をアップデートするものであり、プログラムを具体化するためには、地下構成要素の施工後の変遷挙動に関するパラメータを把握する必要がある。そのため、設計、性能評価、FEPで考慮されているパラメータについて調査して、地下構成要素を変遷させる駆動力となる環境要因(例えば、地下水の組成や濃度など)と変遷項目(例えば、ベントナイトの流出や変質など)に分類して整理した。地下構成要素の設計時には、将来の環境要因の変動の幅を考慮して仕様を設定されることが考えられるため、操業期間中の地下環境の詳細な把握や継続的な測定により環境要因やその変遷を把握することで設計時の試験データ等を利用した性能評価の入力情報をより精度よく提供することができると考えられる。また、処分坑道内にモニタリング機器を設置／残置することは長期的な安全性に影響を及ぼす可能性があるため、原位置の状態をより精度よく把握する必要がある場合には、原位置での長期的な要素試験や実規模試験等によりデータを取得することも考えられる。

2) 人工バリアを含む地下構成要素の状態把握に係る関連ハード技術の高度化

地下構成要素の品質管理や性能確認のためには、施工試験や実証試験等において施工直後や施工後の変遷に関するデータを取得する必要がある。本事業では、埋め戻し材を検討対象として光ファイバ等を用いた測定技術の適用性を確認するための要素試験及び測定機器の長期運用のための無線給電技術の高度化に取り組んでいる。

①埋め戻し材の乾燥密度測定技術

埋め戻し材の乾燥密度と熱伝導率には相関があることから、2020 年度に加熱式光ファイバを用いて含水比が比較的低い埋め戻し材（含水比 3%程度）の熱伝導率を算出し、その乾燥密度の推定が可能なることを確認した⁵⁾。2021 年度には、撒き出し・転圧工法による施工試験で使用している含水比が比較的高い埋め戻し材（含水比 9%程度）を対象として幅広い乾燥密度に対する測定への適用性を確認するための要素試験を実施した。

図-12 に示す試験土槽内に埋め戻し材を乾燥密度が 1.3、1.5、1.7、1.9 Mg/m³ の 4 条件となるように締め固め、光ファイバケーブルの発熱用銅線に一定量の電流を印加してケーブル周辺の埋め戻し材を加熱し、光ファイバにより温度の時間変化を測定した。また、試験前の埋め戻し材の温度が室温と一致していることを確認したうえで、合計で 4 回の測定を行い試験結果の再現性を確認した。

温度上昇量と時間の関係から求めた乾燥密度と熱伝導率の関係を図-13 に示す。乾燥密度が 1.7 Mg/m³ 以上では測定値にばらつきが見られたが、乾燥密度の増加に伴い熱伝導率は大きくなる傾向にあり、含水比が比較的高い埋め戻し材（含水比 9%程度）に対しても、熱伝導率から乾燥密度を推定できる見通しが得られた。

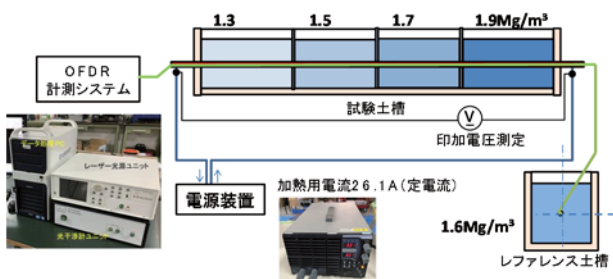


図-12 乾燥密度の測定システムの概略図

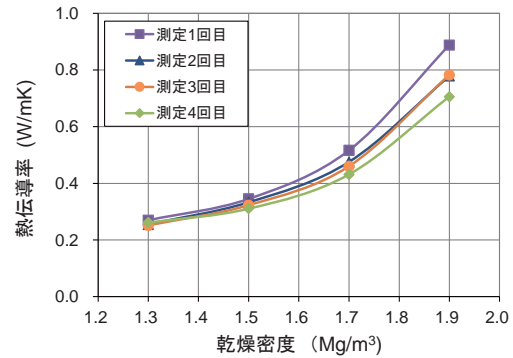


図-13 埋め戻し材の熱伝導率の推定結果

②坑道天端の隙間検知技術

埋め戻し材と坑道界面に生じる可能性のある隙間を検知するため、2020 年度に時間領域反射率測定法（Time Domain Reflectometry：TDR）を用いて測定される抵抗値の変化からケーブルに沿った隙間の長さや位置が推定可能なることを確認した⁵⁾。2021 年度には、隙間の深さ方向の検知能力を把握するための要素試験を実施した。

図-14 に示す試験土槽内に埋め戻し材（クニゲル V1：クニゲル GX：砕石：砕砂＝7：8：35：50、含水比約 3%）を乾燥密度 1.88 Mg/m³ となるように締め固めた。検知の対象とする空隙を、試験ケース 1 では 100 mm と 50 mm、試験ケース 2 では 25 mm と 0 mm とし、TDR ケーブルを上段、下段（ケーブル間隔 50 mm）に設置し、TDR ケーブルにパルス状の電圧を入力して反射波の波形を測定した。

各土槽の上段ケーブルで測定した電圧値と伝送時間の関係を図-15 に示す。ケーブルと埋め戻し材が接触している区間 D では、0.15 V 程度の電圧値であった。ケーブルが気中にある区間 A～

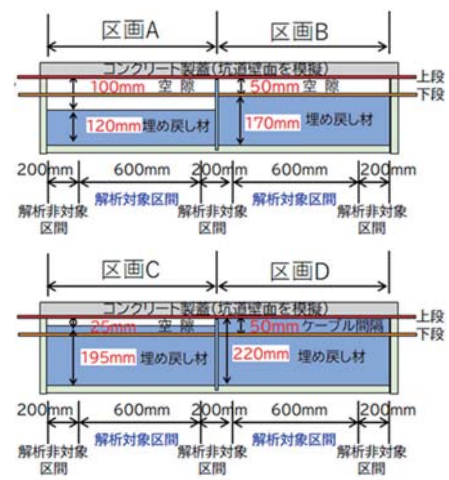


図-14 隙間検知測定試験の試験土槽の概略図

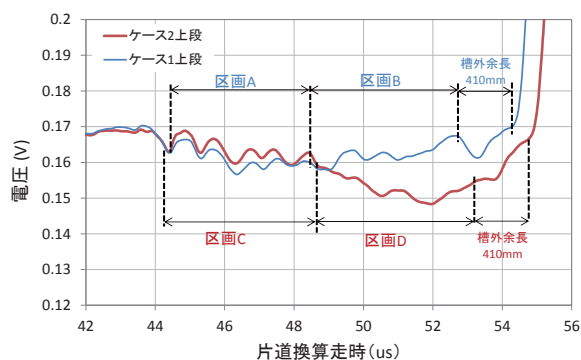


図-15 ケーブル TDR による隙間の測定結果

C では電圧値が 0.16 V 程度になり、空隙の存在が判別できたが、空隙の深さを判別するには至っていない。

③光ファイバを用いた圧力測定技術

埋め戻し材と坑道界面に隙間が生じた場合に、ベントナイトの膨潤により閉塞することを確認するための測定技術として、膨潤時に発生する圧力に対する光ファイバ技術の適用性を確認するための要素試験とその再現解析を実施した。

クラッド径 0.125 mm、外径 0.15、0.25、0.50、0.90 mm の被覆厚さの異なる 4 種類の光ファイバケーブルを水圧式の加圧試験装置で加圧し、光ファイバに生じたひずみを測定した結果を図-16 に示す。水圧の増加に伴いひずみの換算値は圧縮方向に大きくなり、光ファイバの直径(被覆厚)が大きいほど、水圧(外部圧力)に対する感度が高かった。このことから、適切な被覆厚を選択することにより、光ファイバケーブルを用い

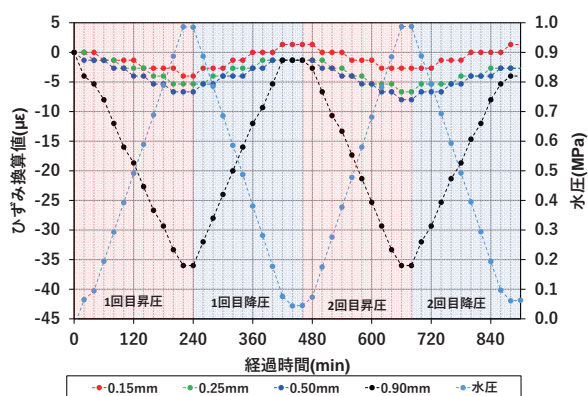


図-16 水圧とひずみ換算値の関係

て圧力が推定できることがわかった。また、試験を模擬した再現解析の結果から、光ファイバにひずみが発生する要因としては、被覆部のポア

ソン効果による軸方向の変形の影響が主要因であると考えられる。

④無線給電技術

処分施設における柔軟なモニタリング計画の立案に資するため、力学プラグなどの鉄筋コンクリート構造物を介してセンサー等に長期的に電力を供給できる無線給電システムの給電効率の向上を目的とした要素試験を実施した。

要素試験では、(i)送受電コイル間距離、(ii)鉄筋間隔、(iii)鉄筋交差部の絶縁処置の有無をパラメータとして給電効率を確認した。試験結果を図-17 に示す。コイル間距離が長く、鉄筋間隔が小さいと給電効率は低下した。一方で、鉄筋交差部に絶縁処置を行うことで給電効率の低下を抑制できることを確認した。このことから、力学プラグの施工時に鉄筋交差部の絶縁処置を施すことで給電効率の低下を抑制した無線給電が可能であることがわかった。

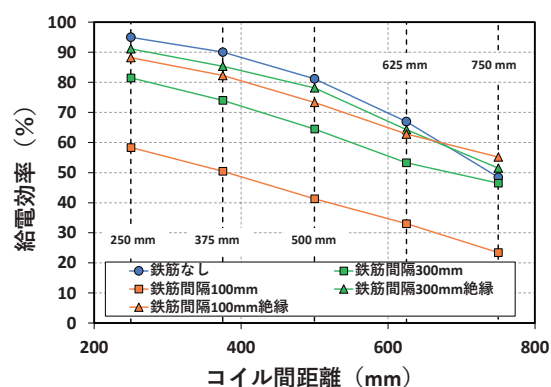


図-17 給電効率とコイル間距離の関係

- 1) 地層処分研究開発調整会議、地層処分研究開発に関する全体計画(平成 30 年度～令和 4 年度)、2020
- 2) 日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、令和 3 年度 地層処分技術調査等事業地層処分施設閉鎖技術確認試験 報告書、2022
- 3) Komine, H., and Ogata, N., New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials. Canadian Geotechnical Journal, 40, No. 2, pp.460-475, 2003
- 4) Komine, H. and Ogata, N., Predicting swelling characteristics of bentonites. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), 130, No. 8, pp.818-829, 2004
- 5) 日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、令和 2 年度 地層処分技術調査等事業地層処分施設閉鎖技術確認試験 報告書、2021

3. 回収可能性技術高度化開発

◇事業の概要

2015 年 5 月に改定された特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（以下、「基本方針」という。）では、安全な管理が合理的に継続される範囲内で施設の最終閉鎖までの可逆性・回収可能性を確保することとし、併せて、回収可能性を維持した場合の影響等について調査研究を進めることとしている。また、地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～令和 4 年度）¹⁾では、廃棄体の回収可能性を確保する技術の整備として、次の 2 つの項目を挙げている。

- ・回収可能性に関わる技術的実現性を示すため、設計オプションとして整備する処分概念に対応した廃棄体回収技術の開発と段階的な技術実証
- ・回収可能性を維持した場合の影響等に関する評価技術や対策技術の整備

地層処分事業への可逆性の導入という新たな施策に対する社会の信頼感を更に高めて行くためには、それを裏付ける回収可能性という技術的能力に対する信頼性を高めていく必要があり、更に、基本方針が要求している回収可能性に係る調査研究課題を着実に進めて行く必要がある。

本事業では、上述した回収可能性に係る技術的課題に取り組み、施策に対する社会の信頼感の更なる醸成に資することを目的とする。

なお、本事業は、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター及び国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が共同で実施した経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和 3 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（JPJ007597）（回収可能性技術高度化開発）」の一部である。

◇2021 年度の成果²⁾

本事業では、以下を研究開発の出発点（前提）として取り組んでいる。

○NUMO 包括的技術報告書³⁾に示された、2 つの処分場の候補概念（以下「現行の候補概念」）

- ・処分孔縦置き・ブロック方式（パネル型）
 - ・処分坑道横置き・PEM[※]方式（デッドエンド型）
- ※PEM：Pre-fabricated Engineered barrier system Module の略

○処分坑道が埋め戻され、端部に力学プラグが設置された状態

基本方針に示される“安全な管理が合理的に継続される範囲”について、図-1 のように安全性と回収作業期間の関係として表現した。本事業では、回収の容易性（回収作業時間）の向上（図-1 の②の短縮）に対応する(1)廃棄体回収技術の高度化と、(2)回収の容易性を高めた設計オプションの開発、ならびに、安全性への影響の定量化に向けた（図-1 の①と①'）に対応する(3)回収可能性維持に伴う影響の定量化手法の整備の 3 項目を個別課題として設定した。以降に、それぞれの成果を述べる。

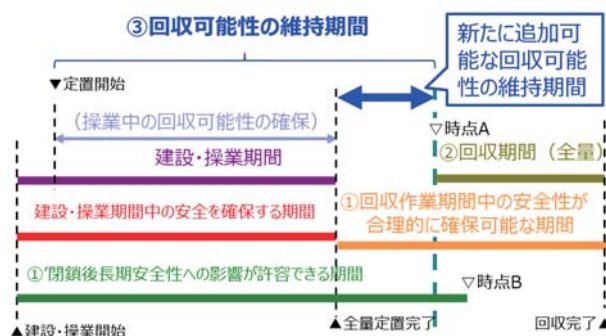


図-1 回収可能性が維持されている状態の模式図

(1)HLW 廃棄体回収技術の高度化

現行の候補概念に対する回収技術のうち、廃棄体を拘束する土質材料の除去技術から開発に着手している。これまでに第一段階の除去技術開発として、流体的除去技術による緩衝材除去（処分孔縦置き方式）、機械的除去技術による隙間充填材除去（処分坑道横置き・PEM 方式）について技術開発を進め、除去作業の技術的実現性を示した^{4),5)}。一方で、この技術では廃棄体 1 体当たりの除去に約 70 時間を要するため全量回収に係る作業期間が長期化し、回収作業の安全上の不確実性を高める要因となっている。

そこで、一定の期間内に回収作業を完了する技術の提示を目的として第二段階の技術開発に着手した。ここでは、定置状態からの回収工程の

分析から設定した除去作業時間を、流体的／機械的除去技術それぞれの開発目標とした。

1) 処分孔縦置き方式の回収技術の高度化

回収対象のオーバーパック（以下「OP」と称す。）の機械的な損傷を防ぐため、緩衝材の除去に流体的除去技術（湿式）を選定した。第一段階の技術開発では、電解質溶液による緩衝材の崩壊効果を利用した緩衝材除去システム（噴射・吸引設備、塩水リユース設備、遠隔操作設備）を整備し、回収工程の技術的な実現性を示した⁵⁾。

第二段階の技術開発では、回収作業の工程分析から目標とする除去作業時間を 20 時間以内と設定した。第一段階で整備した緩衝材除去システムのうち、緩衝材の拘束力を解きスラリー化させる噴射・吸引設備を高度化対象技術として着目し、塩水の噴射圧を 0.6 MPa から 20 MPa 程度に高圧化して迅速化を図ることとした。具体的には、実寸大の実証試験（図-2）を通した除去技術の迅速化を成果として提示することを最終的な目標に設定するとともに、塩水リユース設備と遠隔操作設備の改良に必要な課題抽出、流体的除去技術による土質材料の除去効果の定量的な評価に資する知見も併せて取得した。

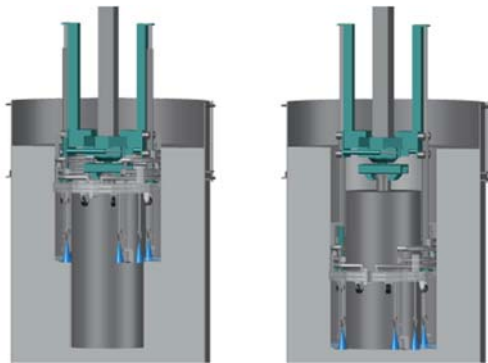


図-2 実寸大での緩衝材除去試験のイメージ図

噴射・吸引設備が除去対象とする緩衝材のうち、OP 側部と OP 把持部含む頂部（以下「OP 把持部」と称す。）に対する噴射リングの改良及び運転条件の設定に資するため、噴射要素試験を実施し、種々のパラメータが除去効率に及ぼす影響を体系的に取得した。

噴射角度 22 度（メーカー提示）のトルネードノズルを使用した場合の OP 側部の緩衝材除去効率を表-1 に示す。この結果より、OP 側部の緩衝

材除去では、噴射口から緩衝材までの「離隔距離」の管理が重要であることなどが明らかとなり、最も除去効率の高い組合せ（離隔距離 25 cm、緩衝材上の停留水の水深 5 cm、噴射リングの揺動速度 50 cm/min）を運転管理値の基本として設定した。

表-1 トルネードノズルによる除去効率（4%並塩溶液）

離隔距離 (cm)	水深 (cm)	揺動速度 (cm/min)	供試体 飽和度 (%)	堆積換算 除去効率 (cm ³ /min)
25	5	50	60	2,743
25	5	50	80	3,382
25	5	100	80	3,005
25	10	50	80	2,316
50	5	50	80	885
75	5	50	80	62

一方、OP 把持部の緩衝材除去については、吸引時の障害となり得る緩衝材の塊が残らない手順として、直射ノズルを 45° 傾けて中心からすり鉢状に切削する動作手順を想定し、噴射要素試験を通して適用性や離隔距離に対する切削効率を確認し（表-2）、OP 把持部の緩衝材除去について、図-3 に示す動作手順（及び離隔距離と噴射時間等）を設定した。要素試験により得られた除去効率から、実寸大の試験における除去時間を推定した結果、目標とした 20 時間を達成できる見通しを得た。

表-2 直射ノズルによる必要切削深度と噴射回数（4%並塩溶液）

離隔距離 (cm)	必要切削深度 (cm)	噴射回数 (回)
5	48	2
46	43	5
63	19	5

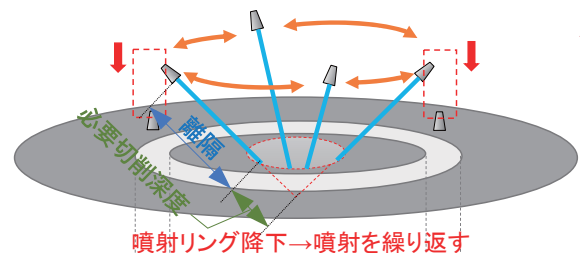


図-3 把持部緩衝材除去のイメージ図

要素試験の結果を踏まえ、設定した動作手順の実現が可能な噴射リングを製作し、機能確認試験を行い設計通りの噴射能力を確認した。一方で、高圧噴射による気泡の大量混入に伴い、吸引側で気泡の吸い込みによる流量の脈動が生じた。この現象については、除去作業時の吸引効率の低下、塊状の緩衝材吸引を避ける水深管理上の課題となるため、次年度の実寸大試験に向けて吸引設備の見直しを図る必要がある。

また、噴射圧の増加に伴う除去の迅速化により使用する水量が減少するため、スラリー状の除去生成物の液固比 (S/L) の上昇が想定される。そこで、塩水リユース設備の改良に必要なスラリーの沈降挙動を把握するための沈降試験を実施し、液固比や噴射する電解質の液種や濃度が沈降速度に与える影響を体系的に把握した。沈降試験では一般土木における濁水処理で使用される凝集剤 (PAC) の導入を試みたが、期待した沈降促進効果は得られなかった。この結果を基に、ベントナイトスラリーの凝集・沈降挙動や2種の凝集剤 (カチオン系及びアニオン系) の使用による沈降促進効果⁴⁾、ならびに実事業での空間的制約や再生水の発生量等を考慮し合理的な設備規模の設定に繋げる。

2) 処分坑道横置き・PEM方式の回収技術の高度化

処分坑道に定置された PEM と坑道間に施工されたベントナイト混合土である隙間充填材を効率的に除去するため、機械的除去技術 (乾式) を選定し、整備を進めている。

第一段階の技術開発として、電動バックホウに取り付けるオーガー方式のアタッチメントを製作し、実寸大の隙間充填材除去試験を幌延深地層研究センターの地下試験坑道にて実施した。この試験によって、隙間充填材の除去に対する機械的除去技術の有効性を確認し、回収作業の技術的な実現性を示した。一方で、この方式では PEM 一体当たりの除去作業に要する時間が約 68 時間と見積もられた⁶⁾。

第二段階の技術開発では、現実的な作業時間内で回収を終えるため、工程上のボトルネックの解消に向けた技術の高度化に着手した。PEM 一体当たりの隙間充填材の除去時間を 5 時間以内とすることを本技術の高度化の目標とした⁷⁾。また、2019 年度に実施した実規模スケールの実証

試験から、機械的除去技術による除去効率がベントナイト混合土である隙間充填材の性状に依存することが示唆された。隙間充填材の性状は、施工時の仕様や回収までの時間経過に伴い変化するため、土質試験等で様々な仕様のベントナイト混合土の性状を把握し、機械的除去装置の適用性に関する検討を行った。

隙間充填材の切削方式として固定断面方式と自由断面方式を対象として、一次元的に切削する要素試験を実施し、粘土系材料の性質の違いが切削挙動に与える影響を把握した。試験結果から、いずれの方式でも切削不能となるような大きな負荷は生じなかったものの、自由断面方式は固定断面方式に比べて除去生成物のサイズが小さいことから (図-4)、後続する排土作業への連携性を念頭に、切削機構には自由断面方式を選択した。自由断面方式の除去生成物の排土方式は、2019 年度の知見からバキュームによる吸引方式を選択した。バキュームの吸引口については、吸引能力に関する確認試験を通して、除去生成物が塊状になりにくく通過しやすい吸引口の仕様・形状を検討した。自由断面方式では、除去生成物は切削方向と反対方向に飛散するため、バキュームの吸引口を適切な位置に配置する必要がある。



図-4 除去生成物の形状 (自由断面掘削方式)

そこで、切削機構と排土機構を組合せた試験装置による切削排土試験を実施し、図-5 に示すように切削面に対して上から下に切削刃が当たり下方から除去生成物が飛散するような動作手順 (ダウンカット) で比較的スムーズに除去生成物が吸引でき、切削と吸引を同時に行う機械的除去が成立する可能性が示唆された。



図-5 切削部の回転方向・切削方向（ダウンカット）

実際の PEM 回収作業では面的に隙間充填材を切削することから、二次元的に切削する面切断確認試験を実施した。試験では、切削機を上下方向、左右方向に移動させ、切削機の回転方向、移動方向と排土位置の関係や切削を伴わない移動（リトラクト）との組合せ等から、切削手順の具体化に資する情報を得た。試験終了時に隙間充填材が切削部に付着（残存）したが、これは除去生成物の行き場がない状態で切削したことが原因であることから、実機の検討では滞りなく排土を行える機構とすることが必要である。

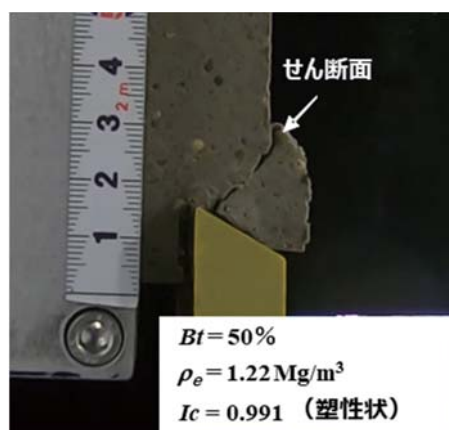
仕様や回収実施時期が特定できない現時点では回収時のベントナイト混合土の性状を特定できないため、前述のように様々な仕様のベントナイト混合土に対して、一般的な土質試験と隙間充填材の切削メカニズムを把握するための切削試験を行い、ベントナイト混合土に対する機械的除去装置の適用性について検討した。

土質試験では、模擬隙間充填材としてベントナイト混合土 3 ケース（ベントナイト配合率：15%、50%、70%、混合土材料：珪砂（3 号・5 号を乾燥重量比 1:1 で混合）とベントナイト配合率 100% の合計 4 ケースを設定した。ベントナイトはクニゲル V1 である。各ケースに対して、乾燥密度等のパラメータは以下のように設定した。乾燥密度は、地下実証試験における隙間充填材の 1.6Mg/m^3 に対して 1.2Mg/m^3 、 2.0Mg/m^3 の 3 通りとした。有効粘土密度は、塩水環境下で低透水性確保の目安となる 0.8Mg/m^3 を下限値として、 1.0Mg/m^3 、 1.2Mg/m^3 の 3 通りとした。含水比は飽和度に換算して設定し、地下研究施設における隙間充填材の飽和度 75% に対して飽和側に 85%、

95% の 3 通りとした。一軸圧縮試験結果から一軸圧縮強度は軟岩系岩盤相当であり、機械的除去装置の適用範囲内であった。

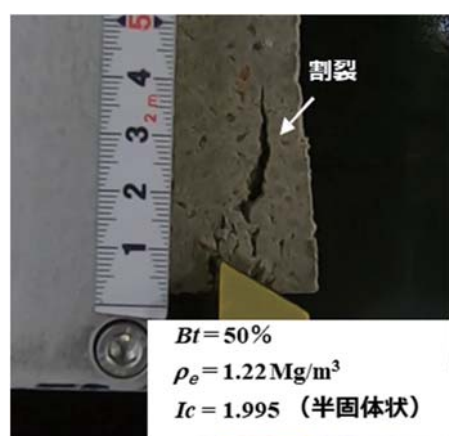
隙間充填材の一次元の切削試験では、前述した土質試験と同様にベントナイト配合率 15、50、70、100% の 4 ケースとし、乾燥密度を $1.2 \sim 2.0\text{Mg/m}^3$ の範囲で設定した。含水比は塑性限界付近の値を含むように設定した。切削試験では、切削パターン（せん断破壊：切削刃面の垂直方向に亀裂が発生（図-6）、割裂破壊：鉛直軸方向に亀裂が発生（図-7））と切削力について整理した。切削パターンの差異については、引張強度や剥離性などの観点からの考察が必要であるが、塑性状の土の引張強度の測定は容易ではなく、今後の課題である。切削力については、塑性状（コンシステンシー指数 < 1 ）、半固体状（コンシステンシー指数 > 1 ）に拘らず、有効粘土密度 1.2Mg/m^3 を境に切削力が上昇した。一方、一軸圧縮試験では半固体状の場合のみ強度が上昇している。切削試験において塑性状でも切削力が上昇したのは、ベントナイト混合土と切削刃間の摩擦力の増加によるものと考えられる。この現象は除去生成物が接触する吸引口や配管に対しても同様に発生する可能性があり、隙間充填材の除去作業では切削機構に加えて、排土機構にも影響すると考えられ、機械的除去装置の適用性を検討する際の重要なパラメータである。

以上の検討結果より、機械的除去装置については、切削時の切削刃の回転方向に対する除去生成物の吸引位置が重要であり、今後は機械的除去装置の動作手順等の具体化及び実証試験を実施する計画である。ベントナイト混合土が機械的除去装置に与える影響については、一軸圧縮強度から、想定される隙間充填材の仕様範囲であれば機械的除去装置の適用範囲と考えられるが、切削パターンや切削面、排土装置との摩擦の影響といった強度以外の観点からも考察が必要であり、引き続き検討を進める。



せん断パターン

図-6 切削試験で確認された切削パターン(1/2)



割裂パターン

図-7 切削試験で確認された切削パターン(2/2)

(2)回収容易性を高めた設計オプションの開発

回収方法の高度化開発で目標時間を達成しても一定の回収作業時間が必要となる。更なる迅速化が期待されるような状況に留意して、回収時間を更に短縮することが可能な詳細設計オプションの開発を進めている。2021年度は、回収の容易性を表す尺度とした回収作業期間（時間）を定量化する手法を検討し、現行の候補概念に対して、回収作業期間を試算した。

定置済みの廃棄体を全量回収する全体工程の設定、並びに全量回収に係る作業期間は、建設・操業時の作業動線・換気経路の考え方である「別区画での同時かつ独立作業の実施」を踏襲して算出する方法を考案した。図-8に処分孔縦置き方式（パネル型6区画）の例を示す。

この工程は“1区画あたりの、再開放期間 \geq 廃棄体回収期間”で成立し、全体の回収作業期間は“1区画あたりの再開放期間 \times （区画数+1）”が最短

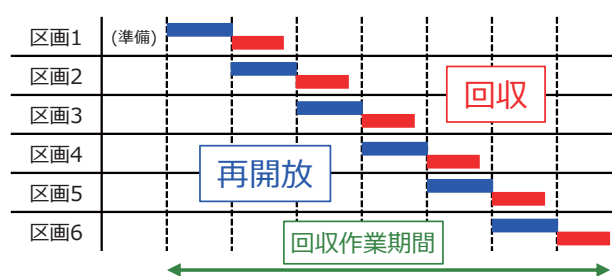


図-8 定置状態から全量回収する作業工程の例

となる。再開放期間は掘削した埋め戻し材（ズリ）を地上まで搬出する立坑の能力に依存すると考えれば、回収作業期間を処分場の設備（立坑）の能力から定量的に見積もることができる。この作業工程の成立条件である“再開放期間 \geq 廃棄体回収期間”を実現するために、(1)で整備した装置単体の能力などを踏まえて、同時稼働する装置の台数や、作業スケジュールを具体化していくことになる。

この試算手法に基づき2つの候補概念を出発点として、回収の容易性を高めた詳細設計オプションの具体化及び実現に向けたオプション間での優先順位付けの検討を行った。

処分孔縦置き方式の場合

処分坑道の再開放期間を短縮する効果的な詳細設計オプションとして、掘削ズリの発生量自体を削減する処分坑道の短尺化が考えられる。現行の候補概念（新第三紀堆積岩類の場合）では、廃棄体定置間隔は処分孔同士の力学的安定性から3D（Dは処分孔直径）と設定されている。孔壁を補強する補助工法などを併用、Dに変更すれば、再開放に要する時間を最大で約1/3に短縮できることになる。なお、定置間隔をD（=2.4m）とした場合の廃棄体からの熱影響は、熱伝達解析により処分場としての成立性を確認済みである⁷⁾。短縮した再開放時間に対応した回収期間については、開発中の緩衝材除去システム（(1)参照）の適用により実現の見通しが得られている。また、回収作業を合理化する方法として、把持部を強化したOPを引抜くことで、緩衝材を除去する範囲を削減することも考えられる。

処分坑道横置き・PEM方式の場合

PEMの外形状を現行の候補概念に合わせた場合、定置方向を現行の候補概念の直列（図-9(a））から並列（図-9(b））にすることで坑道延長は短縮

される。一方で、隙間形状が複雑になり、除去の作業性低下だけではなく、定置時の隙間充填作業への影響も懸念される。そこで、回収時の坑道再開放の工程そのものを省略する図-9(c)のような詳細設計オプションの実現性について検討した。

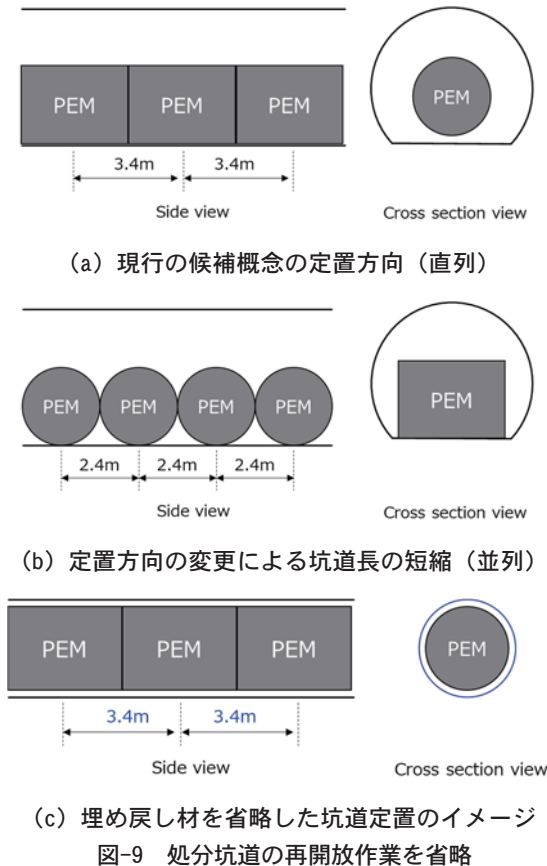


図-9 処分坑道の再開放作業を省略

PEM 周囲の隙間を鋼殻内の緩衝材が膨潤（膨出）して埋めると仮定した場合、緩衝材が要求される乾燥密度を維持できる許容幅はおよそ 9 cm となった（緩衝材の密度が 1.8 Mg/m^3 の場合）^{6), 7)}。ただし、この幅では 2019 年度までに整備したエアベアリング方式が適用できないため、坑道面上を摺動によって移送する方式の技術的成立性を検討した。隙間を充填しない同様の定置概念を採用している ANDRA[®] の事例を参考に、候補摺動部材であるセラミックについて、PEM の重量での成立性を評価した。図-10 は、PEM に摺動部材を 4 つ取り付けた場合の摺動時に作用する主応力の分布の解析例である。強度評価上、窒化珪素を用いたセラミックスで摺動部材が実現できる見通しを得た。今後、狹隘空間での重量物移送技術についての検討・開発を進める。

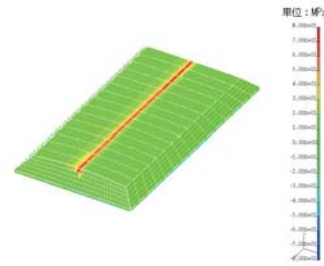


図-10 最大主応力の分布（例：窒化珪素の場合）

(3) 回収可能性維持に伴う影響の定量化手法の整備
回収可能性を維持した場合の操業期間中の安全性及び閉鎖後長期の安全性に与える影響の定量的な評価手法の整備に向けて、NUMO が閉鎖後長期の安全評価に用いているストーリーボード³⁾の整備手法の適用を試みた。

検討の前提として、評価対象岩盤は新第三紀堆積岩類、処分深度は深部環境で還元性環境が想定される 500m とした。処分場の構成は、アクセス立坑、アクセス斜坑、連絡坑道、処分坑道からなるパネル型の処分場（処分孔縦置き方式）を想定した。また、回収可能性維持の状態オプションには、処分坑道を埋め戻して端部にプラグが設置され、アクセス立坑から連絡坑道までが開放している状態をレファレンスとして検討を進めた。

2020 年度までに、回収可能性の維持に伴う安全性への影響の定量化手法の整備に向けたストーリーボードの全体開発計画を作成し、それに基づき、建設・操業の工程分析、国内外の FEP（Features, Events and Processes）データベースの調査、回収可能性の維持に伴う影響を受ける期間や影響が波及する期間のタイムスケール、構成要素、部材、使用材料を含めた空間スケールの把握を行った⁶⁾。

2021 年度は、処分場の建設・操業の期間及び処分場閉鎖から再冠水完了までの期間を対象に、「地下構造物の安定性」及び「供用性」に着目した処分システムの状態変遷に関わる知見を集約したストーリーボードの作成方法（図-11）を提案するとともに、通常の操業手順に沿った第 1 段階のストーリーボードを作成した（図-12）。これを踏まえ、回収可能性維持期間を設けた場合や回収可能性維持の状態オプションが異なる場合について、回収可能性維持期間を設けない場合の工程との違いを提示した。

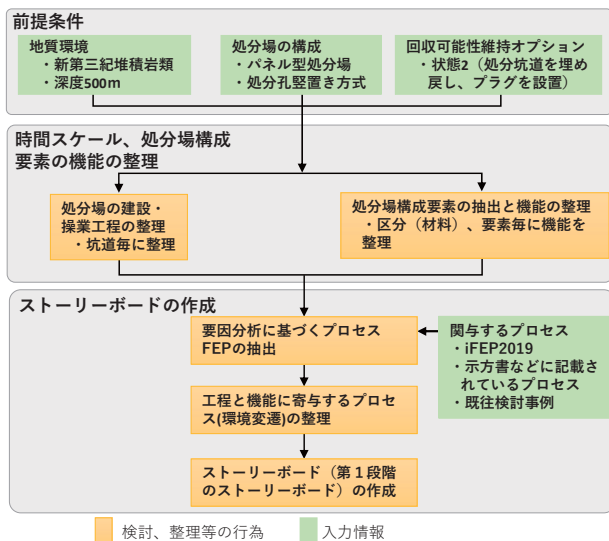


図-11 ストーリーボード検討フロー

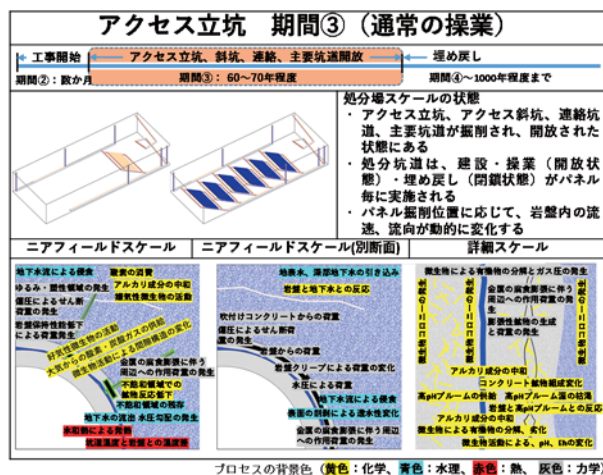


図-12 ストーリーボード例（実際のフォーマット）

ストーリーボードの作成方法及びストーリーボードの作成については、客観性、追跡性並びに透明性を確保する観点から、土木学会、OECD/NEA 等が監修する複数の専門家による議論がなされた資料^{8),9)}を用いるとともに、ストーリーボード作成に際し、判断に至ったプロセスが追跡できるよう処分場構成要素のふるまい（環境変遷）を坑道別、時間別の表として取りまとめた。これらの検討では、取り扱うプロセス分野（化学、水理、熱、力学）に偏りが無いことを確認するとともに、ストーリーボードの整備経験を有する研究者を含めた第三者からの客観的な意見を取り入れた。また、回収可能性維持期間を設けた場合（坑道開放期間の長期化による影響）や回収可能性維持の異なる状態オプションに現

れるプロセスの違いについては、ストーリーボードとともに比較表によって提示することで、網羅的かつ視覚的に表現することができた。以上のように、作成方法とともに第1段階のストーリーボードを提示することができた。

今後、様々な分野専門家との議論に基づき、取り込む事象の優先順位付け等を行い、第1段階のストーリーボードの改善を図る（第2段階のストーリーボード）。さらに、ストーリーボードを使用した専門家の議論を通して、シナリオへの展開や重要な事象の抽出を行い、坑道そのものが機能を喪失するか否かといった処分場構成要素の変遷に係る定量化手法の構築やデータの収集を実施する。

(4) 地層処分実規模試験施設を活用した情報発信

開館当初の2010年から展示している処分孔設置ブロック方式に対応した実物大の人工バリアのカットモデルに加え、幌延深地層研究センターの地下の試験坑道で実証試験として実際に使用した処分坑道横置き・PEM方式を対象とした搬送・定置や回収技術の開発に関わる装置の展示を開始した（図-12）。パネルや映像資料等の補助資料、説明員による案内や説明を行いながら、現行の2つの候補概念に対応した技術や装置の展示を行っている。また、来館者の意見や動向を反映し、本施設内の展示物の配置場所の工夫、ならびにモニタ映像や展示物の更新を行うなど、より理解を深めて頂けるよう運営を行っている。

2021年度の来館者数は2,143人と2021年に引き続き減少傾向が続いた（開館からの累計来館者数65,387人）。新型コロナウイルス感染症対策に伴う行動制限による来館者数の減少や本施設の臨時休館を伴う対応等により、来館者の基本属性等にも影響が見られた。そのため、開館当初から蓄積している対話記録との比較や分析をする際には留意が必要ではあるが、来館者から直接意見を聞くことができる貴重な場として、今後も来館者との対話記録の蓄積を継続して有効に活用していく予定である。また、地層処分事業への関心が高まっていることも踏まえ、発信者側と来館者との双方の視点における情報発信へ繋がるような工夫を検討し、引き続き運営を行っていく。



図-12 施設の展示状況

- 1) 地層処分研究開発調整会議、地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～令和 4 年度）、2020 地層処分研究開発調整会議、地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～令和 4 年度）、2020
- 2) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和 3 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（回収可能性技術高度化開発）報告書、2022
- 3) 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現、NUMO-TR-20-03、2021.2
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 26 年度地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）報告書、2015
- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書、2020
- 6) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和 2 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（回収可能性技術高度化開発）報告書、2021
- 7) ANDRA, DOSSIER D ' OPTIONS TECHNIQUES DE RÉCUPÉRABILITÉ (DORec), 2016 (French only)
- 8) 土木学会、トンネル標準示方書[共通編／山岳工法編]、土木学会 トンネル工学委員会、2016 年度制定、丸善出版、2016
- 9) OECD/NEA、International Features、 Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste Radioactive Waste Management and Decommissioning, NEA/RWM/R (2019)1、July 2019

4. 沿岸部処分システム評価確証技術開発

◇はじめに

高レベル放射性廃棄物等の地層処分について、国は 2017 年 7 月に科学的特性マップを公表し、海岸からの距離が短い範囲を「輸送面でも好ましい」として示している¹⁾。また、このような整理に至る過程で、沿岸部の特性や技術的対応の可能性については、「沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会」（以下、「研究会」）において議論が進められ、2016 年の研究会のとりまとめでは、「今後、技術の高度化に引き続き取り組むことで、さらに信頼性を高めることが重要である」として、技術の高度化に向けて取り組むべき課題とその方向性が示された²⁾。

原子力発電環境整備機構（NUMO）は、2021 年 2 月に公開した包括的技術報告書³⁾の中で、ジェネリックな環境での地層処分の実現性を示しており、第 4 章の処分場の設計と工学技術では、処分場の設計について、所要の安全機能を確保するための設計の考え方に加え、その方法論や想定される建設・操業・閉鎖の手順、及びそれらに適用する技術の工学的な実現性を示した。沿岸部環境に関しては、上述の実現性が海水相当の地下水等を中心として示されていることから、今後、多様な地下水にも対応すべく、データを拡充する必要がある。

2019 年度からの本事業において、当センターでは 2018 年度までの成果^{4),5)}を踏まえ、施設の設計や施工等のエンジニアリングや操業中の安全確保への反映等の観点から、操業中および閉鎖時点で求められる各構成要素の機能の変化に関する定量化や、その対策技術の検討に必要な基礎的な情報を得ることを目的として検討を進めている。具体的には、2018 年度までの沿岸部処分システム高度化開発⁵⁾や既存の情報から得た沿岸部の地下水の水質をもとに、再冠水に至るまでの期間を対象として、セメント系材料や緩衝材の特性変化や機能変化に関するデータ拡充をするとともに、その定量化を試みている。

また、2020 年度までに地質環境の調査技術を用いた沿岸部の広域的なベースライン情報と連携した水理解析によって、処分場建設に伴う浅部地下水と深部地下水の混合や湧水等への影響など、水理場の影響を踏まえた処分場の成立性評価に関す

る手法を整備した^{6),7)}。加えて、上記の個別材料の変質挙動に係る知見を組合せた、再冠水に至る期間を対象とした性能評価手法の基盤整備の検討を実施した^{6),7)}。

なお、本事業は、国立研究開発法人産業技術総合研究所、一般財団法人電力中央研究所及び公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが共同で実施した経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和 3 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（JPJ007597）（沿岸部処分システム評価確証技術開発）」の一部である。

◇2021 年度の成果⁸⁾

(1) セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充

処分場においてセメント系材料は、処分坑道やアクセス坑道の支保工や底盤などの構成部材に使用されることが検討されている³⁾。一方で、セメント系材料は地下水や海水などとの反応により変質することが知られており、主な変質として水和鉱物の溶脱やエトリンガイトのような膨張性の二次鉱物の生成などが想定される⁹⁾。また、それらの影響により、力学的特性や物質移行特性の変化、ひび割れの発生などが起こると考えられる。そのため、沿岸部における処分場の建設・操業から閉鎖後の再冠水に至る期間における処分システムの成立性に関わる空洞安定性などに関する評価のために、沿岸部に特有な地下水化学環境を念頭に置いたセメント系材料の化学変質に伴う力学的特性の変化挙動を把握することが必要である。

2018 年度までの検討では、人工海水やその希釈水へのセメントペースト試料の浸漬試験を実施し、化学変質挙動及び力学的特性に関するデータを取得して知見を整理してきた⁵⁾。その結果、塩水濃度によって、生起する化学反応そのものは変わらないが、溶脱による空隙の増加に加え、二次鉱物の生成による空隙の閉塞などが力学的特性へ影響する可能性があることを確認した。

そこで、2019 年度から 2020 年度にかけて、セメント系材料の配合や地下水の組成から力学的特性の変化を推定するための知見を拡充するために、地下水組成、化学変質挙動と力学的特性に

関する以下の試験を実施して体系的に整理することとした。

- ・セメント系材料の力学特性は、主な硬化・結合成分であるセメントペーストの性状によって支配されている¹⁰⁾ことから、化学変質挙動がセメント系材料の力学的特性に与える影響を把握するための、沿岸部地下水の特徴的な地下水を用いた塊状のセメントペースト試験体の変質試験。
- ・支保工等の構成要素に用いられるコンクリート（セグメント、吹付けなど）を用いた、地下水組成に起因する化学変質挙動が力学的特性に与える影響を把握する試験。

2021 年度は、引き続き試験によるデータの取得を実施した。

1)セメント系材料の化学変質と力学的特性に関する検討

2019 年度に処分場の支保への使用が考えられているセメント系材料について調査し、吹付けコンクリートと覆工コンクリートを想定したセメントペーストを試験用の試料とした⁶⁾。

2021 年度に実施した試験では、セメント系材料の化学変質に影響の大きかった 5 種類の模擬地下水に 3 か月間浸漬した。その結果、 SO_4 濃度が高く HCO_3 濃度が低い模擬地下水では、接液面近傍の化学的変質と力学的特性の低下が観察され、 HCO_3 濃度が高い模擬地下水では試料の変質が進まない傾向であることを確認した。

図-1 に、試験によるセメントペーストの硬度変化及び化学変質の状態と地下水組成の関係を示す。力学的特性を低下させる要因の Mg 濃度と SO_4 濃度を加えた濃度が比較的高い模擬地下水でも、力学的特性の低下を遅延する要因の HCO_3 の濃度が 4 mol/L を超えると化学変質の進展は遅くなった。Mg 濃度と SO_4 濃度の和と HCO_3 の濃度の関係は、化学変質の進展や力学的特性への影響の程度を示す指標になる可能性がある。

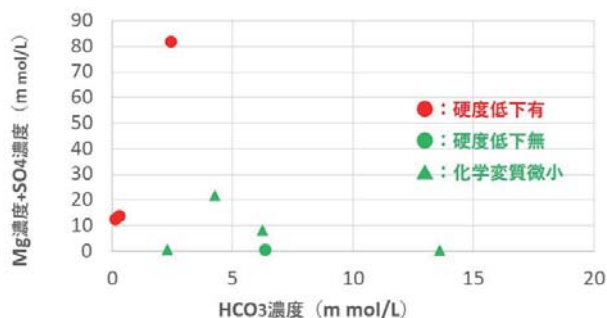


図-1 硬度変化及び化学変質の状態と地下水成分の関係

2)現実的な材料及び条件における化学変質と力学的特性に関する検討

地下水組成の特徴と支保工に使用されるコンクリートの種類が化学変質に与える影響を検討するため、吹付けコンクリートについては動的条件を模擬できるフロースルー試験を、セグメントについてはコンクリートに接触する地下水の流動が比較的遅い条件を模擬できる浸漬試験を、それぞれ実施した。

吹付けコンクリートのフロースルー試験では、コンクリートの表面を $0.12\text{ ml/cm}^2/\text{day}$ の流速で人工海水を 10 か月間流して実施したところ、試験後の試料の外表面には二次鉱物が生成し、表面近傍で Ca の溶脱や Mg の濃集及びエトリンガイトの増加が確認された。同様に、セグメントの浸漬試験でも、人工海水に 10 か月間浸漬した普通ポルトランドセメントの試料に Ca の溶脱や Mg の濃集及びエトリンガイトの増加が確認された。いずれの条件でも Ca の溶脱や Mg の濃集及びエトリンガイトの増加は接液面の近傍のみで力学的特性に大きな変化は確認されていないため、今後も試験を継続して化学変質が進行した試料で力学的特性データを取得する予定である。

(2)緩衝材の機能変化に係るデータの拡充

再冠水時の変質、膨潤、流出等に関する緩衝材（ベントナイトとケイ砂の混合土）の機能変化については、これまで、蒸留水、海水相当のイオン強度を持つ NaCl 溶液及び CaCl_2 溶液を用いた試験によってデータの取得がなされてきた。しかし、沿岸部における多様な地下水組成を踏まえると、イオン強度やイオン種による影響に関するデータは少なく、塩水環境下での緩衝材の機能を予測・評価するためには、これらのデータを拡充・整備する必要がある。

本事業では、地下水中の溶存陽イオンがベントナイトの自己シール性に関わる膨潤性やイオン交換挙動に及ぼす影響について系統的に把握し、多様な塩水環境下での緩衝材の機能を評価するためのデータの拡充として、2019 年度より以下の項目を実施している。

- ・ 緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握試験
- ・ 高イオン強度での圧縮ベントナイト中におけるイオン交換選択性に関する試験
- ・ イオン交換挙動の解析手法に関する検討

1) 緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握試験

2020 年度までに、高イオン強度の陽イオン種における緩衝材の膨潤率の影響を把握するため、海水程度のイオン強度 0.5 の塩化物溶液として NaCl 溶液、KCl 溶液、CaCl₂ 溶液、及び MgCl₂ 溶液の通水溶液を用い、ケイ砂を 30wt% 混合したベントナイト試料について乾燥密度を 1.2Mg/m³、1.6Mg/m³、2.0Mg/m³ の 3 水準とした膨潤量試験を実施した。加えて、イオン強度の影響を把握するため、NaCl 溶液のイオン強度が 0.025 から 0.2 の範囲の 6 水準を対象にした膨潤量試験も実施し、最大膨潤率のデータを拡充した。なお、供試体の直径は 60mm、高さは 5mm であり、上載圧は 10kPa 未満である。

試験の結果、イオン強度 0.5 の各陽イオンの水溶液を通水した場合、最大膨潤率は、緩衝材の乾燥密度が同じであれば、陽イオン種によらずほぼ同等であり、この程度のイオン強度では、イオン種が異なっても最大膨潤率がほぼ同じと見做することができることが分かった。

2021 年度は、Na⁺以外の陽イオン種や複数のイオン種でのイオン強度の影響を検討するため、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺を対象にイオン強度が 0.025、0.1、及び 0.2 に対して、ケイ砂 30wt% 混合のベントナイト試料（乾燥密度 1.6Mg/m³）の 3 水準を対象とした膨潤量試験を実施した。また、主要陽イオン以外の微量の陽イオン及び多種の陰イオンが含まれる場合の影響も含め、試験結果から得られた最大膨潤率の予測の妥当性を確認するため、駿河湾で採取した沿岸部実地下水（深度 168～172m、イオン強度 0.28）を用い、ケイ砂を 30wt% 混合した

ベントナイト試料（乾燥密度 1.6Mg/m³）の 1 水準についても膨潤量試験を実施した。

2021 年度実施した KCl、CaCl₂、MgCl₂、沿岸部実地下水および 2020 年までの成果^{5),7)}も含めた試験結果を図-2 に示す。この図から、陽イオン種によらずイオン強度が 0.2 まで増加するまでの間に膨潤率が急激に低下し、イオン強度が 0.2 以上では変化が小さくなり、最大膨潤率がイオン強度の平方根に反比例する近似式で評価できる可能性が示された。

今後により現実的な複数の溶存陽イオン下での挙動や実地下水等での試験を実施してデータを拡充し、多様な塩水環境下での緩衝材の挙動の評価方法について検討を進める。

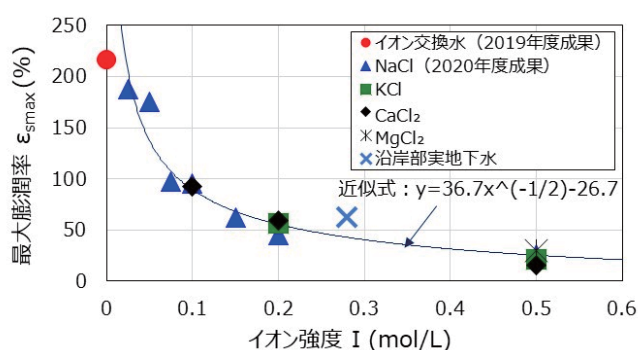


図-2 イオン強度と最大膨潤率の関係

2) 圧縮ベントナイトを用いた高イオン強度でのイオン交換挙動に関する試験

既往のイオン交換選択係数¹¹⁾は、希薄溶液の分散系で取得された値であり、圧縮系かつ高イオン強度でのイオン交換選択係数の知見はこれまでに十分に得られてこなかった。そのため、本試験では、高イオン強度、圧縮系のイオン交換選択係数を取得するために、有効モンモリロナイト乾燥密度 1.00Mg/m³ に圧縮した Na 型モンモリロナイト（クニピア F）に塩溶液を通水する試験を行った。通水溶液は、[KCl、NaCl] の混合溶液とし、イオン強度を 0.25、0.5 の 2 水準に調整した。

通水試験の排水及び固相の分析結果から、圧縮系のモンモリロナイトにおける K⁺の Na⁺に対するイオン交換選択係数を算出した。イオン強度 0.25 及び 0.50 のイオン交換選択係数（2 回の平均値）はそれぞれ 0.59、0.69 であった。この結果から、イオン強度が大きくなるほどイオン交換選択係数も大きくなる傾向が見られ、イオン交換選択係数のイオン強度への依存性が示唆された。

今後は、イオン交換選択係数のイオン強度や圧

縮状態による影響を確認するために、イオン強度をパラメータとした分散系でのイオン交換試験を実施する予定である。また、 Mg^{2+} や Ca^{2+} の Na^+ に対するイオン交換選択係数を取得し、イオン交換反応の予測解析の入力パラメータとして資するようにイオン強度や緩衝材乾燥密度との関係を体系的に整理する予定である。

3) 圧縮ベントナイトにおけるイオン交換挙動の解析方法の検討

2021年度は、2020年度から整備を進めている圧縮系におけるイオン交換反応の予測解析手法の妥当性を確認するために、2020年度に実施したKCl溶液の通水試験⁹⁾を再現する一次元解析を、既往の分散系で取得されたイオン交換選択係数¹²⁾を設定して実施した。解析コードには、飽和・不飽和浸透、溶質の移流・分散、イオン交換反応の連成解析が可能なHP1¹²⁾を含むHYDRUS-1D¹³⁾を使用した。図-3に通水試験及び解析の排水濃度の結果を示す。

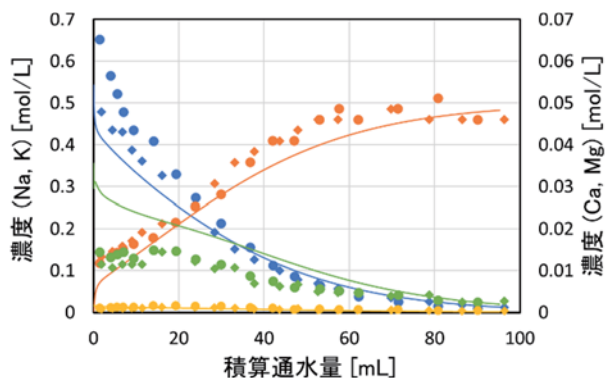


図-3 解析及び通水試験結果（排水濃度）
（イオン強度 0.5mol/L、KCl 溶液の通水試験）

解析結果から、Ca イオン濃度については試験結果と乖離するものの、その他のイオン濃度については概ね通水試験と整合する結果が得られた。

今後は、通水試験結果から得られた圧縮系のイオン交換選択係数を用いて通水試験の再現解析を実施して再現性を確認する。また、沿岸部実地下水の通水試験の再現解析も実施して解析手法の適用性を確認する予定である。

向けたセーフティケースの構築－、NUMO-TR-20-03、2021

- 4) 産業技術総合研究所、日本原子力開発機構、電力中央研究所、原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 27 年度地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書、2016
- 5) 産業技術総合研究所、日本原子力開発機構、電力中央研究所、原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 沿岸部処分システム高度化開発 平成 27 年度～平成 30 年度取りまとめ報告書、2019
- 6) 産業技術総合研究所、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所、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 沿岸部処分システム評価確認技術開発 成果報告書、2020
- 7) 産業技術総合研究所、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所、令和 2 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 沿岸部処分システム評価確認技術開発 成果報告書、2021
- 8) 産業技術総合研究所、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所、令和 3 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 沿岸部処分システム評価確認技術開発 成果報告書、2022
- 9) 土木学会、コンクリートの化学的浸食・溶脱に関する研究の現状、2003
- 10) 根本裕規、榊田佳寛、杉山央、李榮蘭、コンクリート工学年次論文集、セメントの鉱物組成がコンクリート強度発現に及ぼす影響に関する研究、Vol. 33、No. 1、2011
- 11) 核燃料サイクル開発機構、ベントナイト水相互作用の実験とモデル化、JNC TN8400 99-032、1999
- 12) Jacques, D., and J. Šimůnek, Notes on HP1-a software package for simulating variably-saturated water flow, heat transport, solute transport and biogeochemistry in porous media, HP1 Version 2.2, SCK·CEN-BLG-1068, Waste and Disposal, SCK·CEN, Mol, Belgium, pp.113, 2010.
- 13) Šimůnek, J., M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, and M. Th. van Genuchten, The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, 2013

- 1) 資源エネルギー庁、科学的特性マップ、2017
- 2) 沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会、とりまとめ、2016
- 3) 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告書 わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイト選定に

5-2 廃棄体パッケージの閉じ込め性能に係る試験と評価

◇事業の概要

操業中の安全性と閉鎖後 300 年を目安とした放射性物質の閉じ込め性能が期待できる廃棄体パッケージについて、製作性や構造健全性に係る事項を実証的な試験により確認し、工学的成立性、安全性（操業時、閉鎖時）の向上を図る必要がある。

本事業では、これらの廃棄体パッケージに求められる設計要件や評価項目を満たすことを目標に、2018 年度¹⁾より以下の項目について検討している。

①廃棄体パッケージの製作技術の整備

応力腐食割れの原因となる残留応力の低減と廃棄体への熱影響の低減が可能な遠隔蓋接合技術やパッケージ内の充填材に残存する水分の放射線分解による水素ガスの発生を抑制する技術を開発し、実規模廃棄体パッケージを製作することで、それらの技術を実証的に確認する。

②廃棄体パッケージの長期性能評価

処分深度に相当する静水圧や内部ガス圧の増加などを考慮した構造健全性の評価や容器溶接部の腐食データの取得を行う。

③操業中の異常事象に対する廃棄体パッケージの堅牢性の評価

操業期間中の異常事象を対象として、廃棄体パッケージの堅牢性の評価のためのデータを取得する。

2020 年度までに、廃棄体パッケージの製作技術の整備では、廃棄体パッケージ容器の蓋構造について検討し、廃棄体への熱影響の低減を目的に溶接深さなど接合部の形状を見直した。遠隔蓋接合技術については、要素試験及び解析を実施し、内部への熱影響や応力腐食割れを引き起こす要因となる残留応力を低減した溶接方法及び PWHT（溶接後熱処理）の適用性を確認した。また、廃棄体パッケージの内部充填材については、放射線分解によるセメント系材料からの水素ガス発生量に関する試験を実施し、乾燥により水素ガス発生量が低減できることを確認するとともに、想定される製作工程で内部充填材の製作確認試験を実施し、製作方法の条件を整理した。

廃棄体パッケージの長期性能評価では、操業期間中及び閉鎖後数百年程度の閉じ込め性能の評価に必要な腐食に関するデータを取得し、検討した容器の蓋溶接部について破損評価を実施した。

操業中の異常事象に対する廃棄体パッケージの堅牢性の評価では、落下試験条件を定めるための予備解析を実施し、廃棄体パッケージの健全性を評価するための指標について調査した。

これらを踏まえて、2021 年度では以下の内容を実施した。

- (1) 廃棄体パッケージ容器の製作方法の検討
 - ・実規模の製作確認に適用する溶接方法、PWHT、非破壊検査に関する要素試験
 - ・伝熱解析による断熱材の性能確認
- (2) 廃棄体パッケージ内部充填材の仕様の検討
 - ・セメント系材料からの水素ガス発生の抑制方法及び発生量の見積もり方法に反映するための試験データの取得
- (3) 製作確認（実規模）
 - ・廃棄体パッケージの製作技術を実証することを目的とした実規模大廃棄体パッケージの製作
- (4) 廃棄体パッケージ容器溶接部の腐食挙動評価
 - ・2020 年度から継続している電子ビーム（EB）溶接及びレーザ・アークハイブリッド（LAH）溶接部の腐食試験データの取得
 - ・製作確認試験で適用する溶接方法で作製した溶接試験体による腐食試験の実施

なお、ガス発生量の解析結果に基づく廃棄体パッケージ容器の内圧の評価については、ガス発生量とその影響評価に係る検討で実施している。

◇2021 年度の成果²⁾

(1) 廃棄体パッケージ容器の製作方法の検討

2020 年度までの廃棄体パッケージ容器の製作方法に関する検討を踏まえて、実規模廃棄体パッケージの製作では、使用する鋼材を SM490A から SM570 に変更し、さらに蓋構造及び溶接深さについても見直した。これに伴い、溶接方法は TIG 溶接（Tungsten Inert Gas 溶接）を採用した。

残留応力の低減を目的とした PWHT 施工方法の検討では、2020 年度に実施した要素試験で試験

体の直線部の長手方向中央部については目標通りの加熱が可能なことを確認した。そこで、2021年度では図-1 に示すように角部に R 部を有する試験体を用いて試験を実施し、直線部と同等の効果が得られることを確認した。



図-1 PWHT 施工確認試験

蓋溶接部の非破壊検査方法については、2020年度の検討で EMAT (Electromagnetic Acoustic Transducer) の適用性を確認するための試験を実施し、振動子のサイズが 1 インチの EMAT では模擬試験体の人工欠陥の検出が困難であることが分かったが、比較のため実施した接触媒質を用いる通常の超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Testing、以下 UT という) では、小型 (1/2 インチ、1/4 インチ) の探触子で人工欠陥の検出が可能であるという結果が得られた。これを踏まえ、2021 年度では、「蓋上面からの接触媒質を用いたクリーピング波法 (CW 法: Creeping Wave 法)」及び「容器側面側からのフェーズドアレイ法 (PAUT: Phased Array UT)」の 2 種類の UT 手法について、要素試験を実施し比較した結果、探傷面が清浄で、かつ探触子の走査が妨げにならない程度の滑らかさである条件では、PAUT が最も妥当であるという結論を得た。

先述の PWHT 施工による廃棄体への熱影響を低減させるため、2020 年度に図-2 に示すように容器内の廃棄体上部の空隙 (図中の赤枠内) に断熱材を設置することを検討した。2021 年度では、選定した断熱材 (マイクロサーム) による熱影響の低減効果を確認するための伝熱解析を実施した。

伝熱解析の結果を図-3 に示す。今回の解析では、軸対称モデルで、かつ各部材間の接触熱抵抗については節点を共有化し熱抵抗をゼロとした保守側の設定であったが、廃棄体の最高到達温度は 150℃ という結果となり、2020 年度の検討で設

定していた廃棄体の熱的制限値である 195℃ に対して十分な裕度があることを確認した。

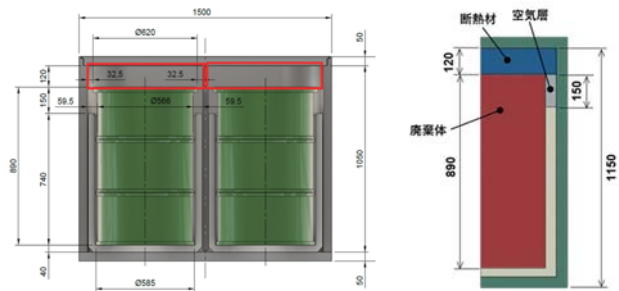


図-2 断熱材の配置位置と解析モデル

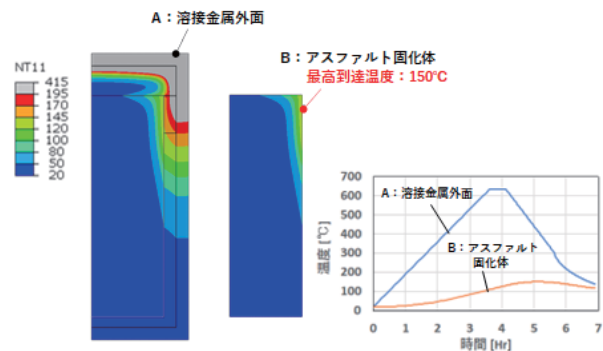


図-3 伝熱解析結果

(2) 廃棄体パッケージ内部充填材の仕様の検討

2021 年度は、2020 年度に製作したコンクリート配合をベースに配合及び自由水量が異なるコンクリート試料を作製し、自由水量と水素ガス発生量の関係を検討するためのデータを取得した。試料はいずれも内部充填材として現在想定している普通ポルトランドセメント (以下 OPC という) とした。また、水和反応の進展により硬化体中の自由水量が極めて少なくなる高強度高緻密コンクリートについても、内部充填材としての適用性を検討することを目的としてデータを取得した。

照射試験は、ラジエ工業株式会社 1 号機 (RIC1) にて実施し、 γ 線の照射条件を試料の吸収線量率 (水換算値) 1 kGy/h、照射時間 5 時間として試料の吸収線量 (水換算値) を 5 kGy とした。また、いずれの試料も室温で γ 線を照射した。照射試験の結果を図-4 に示す。

試験結果から、内部充填材として現在想定している OPC コンクリートは、乾燥により自由水量を低減した水準では、いずれも自由水量に大きな差異が無く水素発生量は同程度の値であった。また、

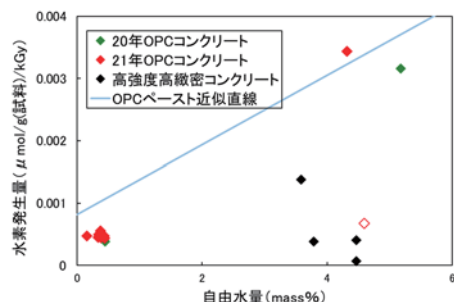


図-4 内部充填材コンクリート中の自由水量と水素ガス発生量の関係

内部充填材の製作条件に関連する項目である水セメント比の違い、金属繊維の有無、養生条件の違いによる水素発生量についても、水素発生量に差異は認められなかった。一方、高強度高緻密コンクリートに関しては、室温で2日間養生したものは、乾燥した OPC コンクリートよりも水素ガス発生量が多いが、材齢8日及び蒸気養生（何れも未乾燥）のものでは、乾燥した OPC コンクリートと同程度の水素ガス発生量であった。この結果は、高強度高緻密コンクリートを内部充填材に使用することで、乾燥工程を省略しても内部充填材からの水素ガス発生を低減できることを示す。

廃棄体パッケージは溶接により密閉されるため、廃棄体パッケージ内部では、水の放射線分解で発生した水素ガスによる圧力上昇に起因するパッケージの変形あるいは破損等が懸念される。

2020年度に実施した吸収線量率と吸収線量を変えた試験結果では、容器内の圧力上昇に吸収線量率の違いによる影響は認められず、圧力上昇は吸収線量に比例していた。採取したガスの分析結果から、容器内圧力の上昇には窒素や酸素の影響はほとんどなく、水素の発生量の増加が支配的であることが確認された。また、圧力の上昇によって水素ガス発生が収束する傾向は認められなかった。

2021年度は、より高い吸収線量の条件で試験を実施し、圧力の上昇に伴い水素ガス発生が一定値に収束するかを検討した。

図-5 及び図-6 に示す試験結果から、常時圧力測定では試料の吸収線量の増加に伴い、試験系の圧力は概ね直線的に上昇する結果が得られた。内圧については、全体的に試料の吸収線量の増加に従い試験容器の内圧は増加し、低線量の領域では主に水素が寄与し、高線量領域においては水素に

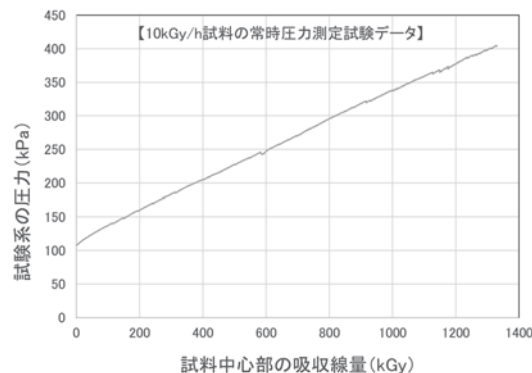


図-5 常時圧力測定における試料中心部の吸収線量と圧力の関係

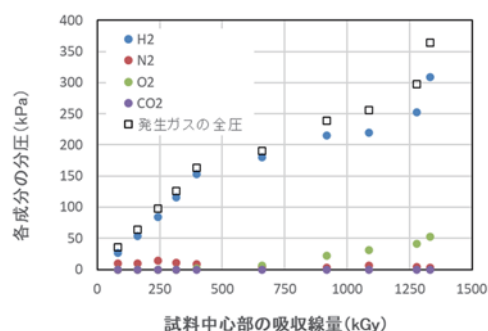


図-6 試料中心部の吸収線量と発生したガス分圧の関係

加えて酸素が寄与していることが確認できたが、水素の発生量が一定値に収束に向かう傾向は明確には認められなかった。

(3) 製作確認（実規模）

2020年度までに実施してきた要素技術の検討を踏まえ、2021年度から実規模廃棄体パッケージの製作確認試験を開始した。

製作するにあたり、容器と内部充填材との部材間に5mmのクリアランスを担保するため、構造図面を作成し基準寸法に対し寸法公差を設定した。なお、2021年度の製作確認では、容器本体の製作及び内部充填材1/4区画分の製作を実施した。実規模廃棄体パッケージ容器本体及び内部充填材の構成部材を図-7に示す。

容器本体の製作では、胴板の曲げ加工、胴板の溶接、胴板と底板の溶接、胴板と十字鋼板（仕切り板＋補強板）の溶接といった各溶接工程において、加工性や溶接による組立性などの技術課題を確認した。

胴板の曲げ加工では、実規模廃棄体パッケージ容器に使用する鋼材がSM570と高強度で、かつ板

厚 50 mm の厚板であるため、曲げ加工にはスプリングバックを考慮した施工を実施した（図-8）。

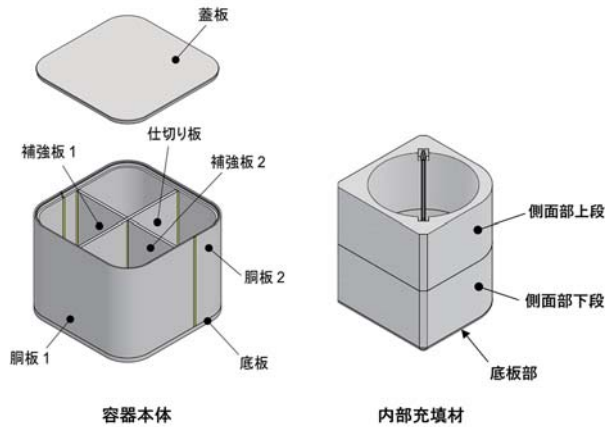


図-7 実規模廃棄体パッケージ容器本体と内部充填材の構成部材

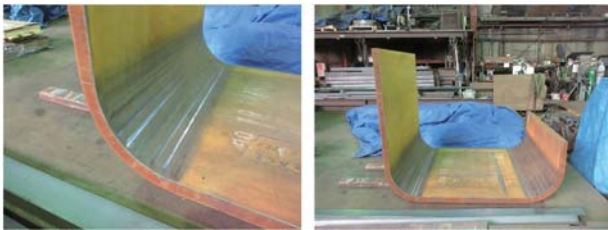


図-8 胴板の曲げ加工

溶接による組立については、溶接による熱ひずみや溶接縮みが懸念され、一般に、円筒形状に比べて角型形状では溶接部の変形は大きい。そのため、胴板の溶接では、図-9 のようにストロングバックや突っ張り棒といった溶接治具を用いるとともに、内面及び外面の溶接による入熱量が均等になるような開先形状の最適化を図ることで、溶接による熱変形を抑制した。



図-9 溶接による変形防止対策をした容器の製作

製作された容器本体は、溶接による残留応力を除去するため PWHT を施したのち寸法測定を実施した。基準寸法は全て公差内であり、組立精度を

確保した製作が可能であることを示した。

実規模パッケージ内充填材の製作については、2020 年度までに検討した製作条件及び施工方法を踏まえ、2021 年度では型枠を製作し実規模試験体の 1/4 区画部分にあたる内部充填材を製作した。

使用材料は、国内で入手できる銘柄とし、配合は表-1 に示すように設定した狭隘部の最小幅（39.5mm）への充填を考慮して粗骨材最大寸法は 13 mm とした。補強材については、鉄筋の適用が困難なことから、直径 0.3 × 15 mm のステンレス短繊維補強材を用いることとした。

表-1 実規模パッケージ内充填材の配合

種類	粗骨材最大寸法 (mm)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	W/C (mass%)	s/a (vol%)	単位量 (kg/m ³)				添加率		
						W	C	S	G	SP	AE [®]	FM
繊維有り	13	18 ± 2.5	4.5 ± 1.5	45.0	43.8	170	378	755	987	C × 0.8 %	1.0A	0.5vol %

注記) ※1.0A=C×0.002%

上記の配合で型枠に打設し、打設後の蒸気養生を経たのち、型枠から外した内部充填材について外観検査及び寸法測定を実施した。側面上段、側面部下段、底板部のいずれの部材も充填不良の箇所はなく仕上がりは良好であり、設定した寸法範囲内（設計寸法 ± 3 mm）で成形できていることを確認した（図-10）。

また、乾燥工程後の吸湿に伴う質量変化については、20℃相対湿度 80 % の室内で 7 日間保管した結果、質量はほぼ一定であり吸湿に伴う質量変化は認められなかった。

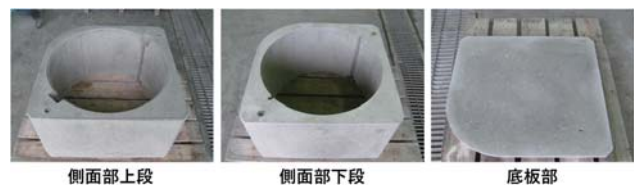


図-10 離型後の外観

(4) 廃棄体パッケージ容器溶接部の腐食挙動評価

廃棄体パッケージに求められる設計要件として構造健全性に加え耐食性が求められている。そのため、蓋の溶接部について腐食挙動やメカニズムを確認し、溶接技術の妥当性とその品質を評価するための浸漬試験を実施している。

2020 年度では、蓋構造に適用する溶接技術の

候補であった LAH 溶接部及び EB 溶接部の腐食データを得るため、鋼材 SM490A で製作した溶接試験体から腐食試験片を作製し、酸化性雰囲気、pH8.5 程度の人工海水（ASTM D1141 相当）及び人工淡水（ $\text{NaCl} : 2.5 \times 10^{-3} \text{ mol}$ と $\text{NaHCO}_3 : 2.5 \times 10^{-3} \text{ mol}$ に純水を加え 1 L とした溶液）の 2 種類の試験溶液条件で浸漬試験（浸漬期間：90 日、360 日）を実施した。試験溶液の温度は既往の報告と比較するため 80℃ とした。試験片は溶接部の断面が評価面になるように試験体の溶接方向に対して直角方向に切り出したものを使用した。なお、図-11 に示すように、令和 2 年度の浸漬試験装置では試験片はホルダーで縦置きに配置している。

2021 年度は、このうち浸漬期間 360 日の試験片を取出し、形状測定及び重量測定を実施した。また、製作確認試験で製作する実規模廃棄体パッケージでは、構造健全性の向上のため使用する鋼材を SM490A から SM570 に変更し、かつ溶接品質の優れた TIG 溶接を採用したことなどの理由から、新たに溶接部の長期健全性を評価するため、2020 年度と同様の試験条件で浸漬試験を開始した。

試験終了後の各試験片の外観（酸洗い後）と形状計測結果を図-12 に示す。

外観及び形状測定の結果から、LAH 試験片に関しては、人工海水の条件ではアーク溶接部の選択的な腐食が確認され、一方、人工淡水の条件ではアーク溶接部以外にも錆こぶ状の腐食生成物に覆われ、選択的な腐食は確認されなかった。

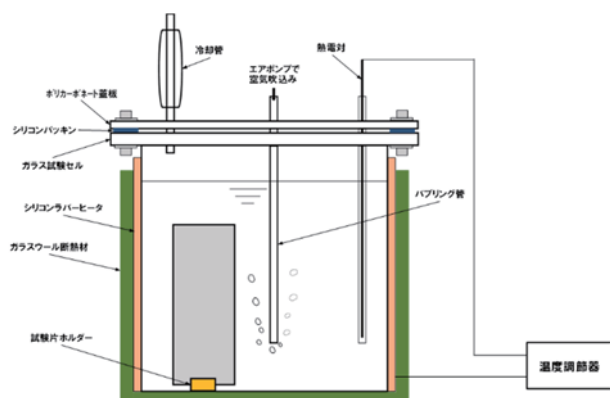


図-11 2020 年度の浸漬試験装置

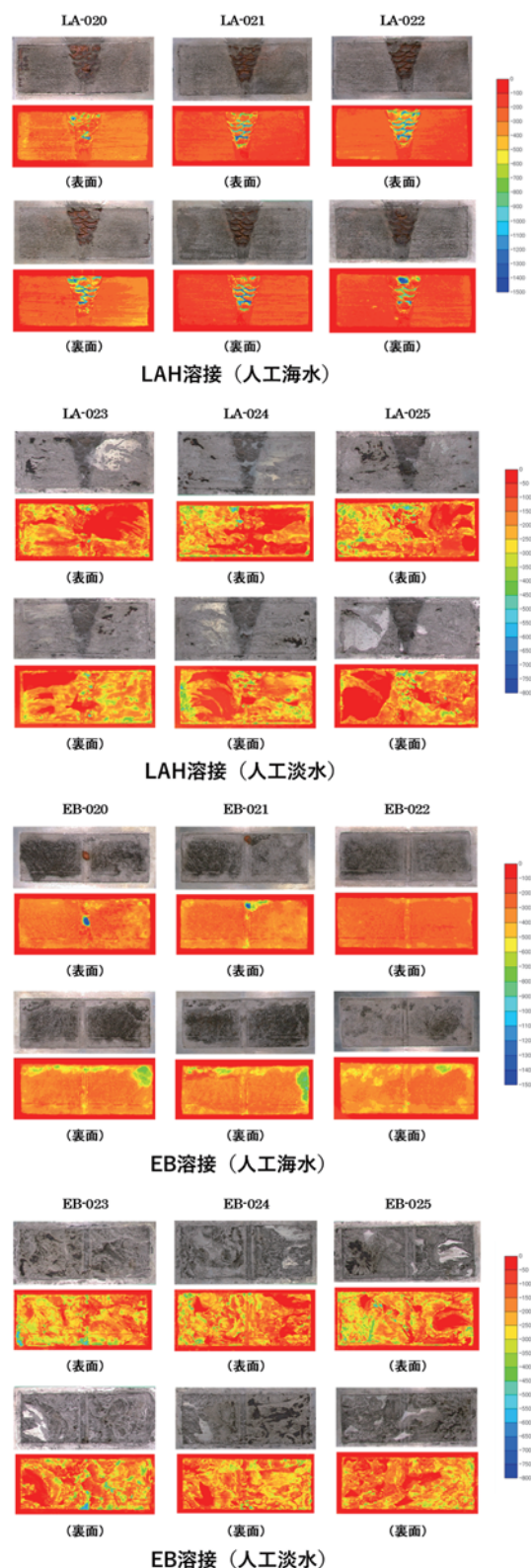


図-12 360 日浸漬試験後の試験片外観（酸洗い後）と形状計測結果

EB 試験片に関しては、人工海水及び人工淡水のどちらの条件においても溶接部の選択的な腐食はなく、人工海水の条件で溶接部の一部に深い腐食孔が発生していた。人工淡水の条件では LAH 試験片の場合と同様、試験片の随所に錆こぶ状の腐食生成物が形成され、その部位での腐食が確認された。

また、重量測定の結果では、表-2 に示すように LAH、EB に関わらず人工海水の条件の方が人工淡水の条件に比べ平均減肉量が大きい傾向であった。これは、人工海水では人工淡水に比して電気伝導率が高いこと、また、人工淡水の条件はいずれの試験片も錆こぶ状の腐食生成物に覆われていたため、腐食生成物の堆積が溶存酸素の拡散障壁となり、堆積後の腐食の進行が抑えられたことなどが要因として挙げられる。

表-2 360 日浸漬試験後の重量測定による平均減肉量

浸漬溶液	LAH試験片			EB試験片		
	No.	減肉量 (mm)	平均 (mm)	No.	減肉量 (mm)	平均 (mm)
人工海水	LA-20	0.273	0.245	EB-20	0.309	0.291
	LA-21	0.233		EB-21	0.308	
	LA-22	0.228		EB-22	0.256	
人工淡水	LA-23	0.164	0.160	EB-23	0.196	0.186
	LA-24	0.149		EB-24	0.179	
	LA-25	0.167		EB-25	0.183	

以上より、2020 年度の浸漬試験では、多層盛溶接部の断面特有の腐食挙動が確認でき、溶接部の長期腐食挙動を評価する上で貴重な知見となった。

2021 年度に新たに開始した浸漬試験では、試験条件は 2020 年度の浸漬試験を踏襲しているが、実規模廃棄体パッケージの定置される状態を模擬するため、試験装置は図-13 に示すように、試験片の評価面を上にした状態で試験セルの底に平置きで配置した。また、試験片の切り出しも 2020 年度のものとは異なり、溶接部上面を評価面とし鏡面研磨は行っていない。そのため、溶接ビード及び圧延時に発錆した酸化被膜（ミルスケール）が付着したままの状態である。

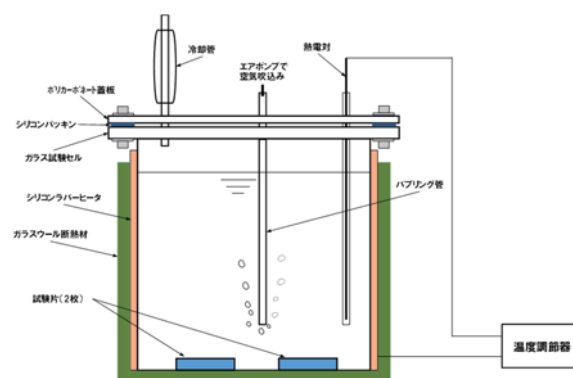


図-13 2021 年度の浸漬試験装置

試験ケースは表-3 に示すように、試験期間 90 日、180 日、360 日とし、重量・三次元形状測定用の試験片の他に、腐食生成物分析用の小試験片を用意した。すでに全ての試験ケースが開始され、試験片の取出し及び分析は 2022 年度に予定している。

表-3 2021 年度の試験ケース

試験溶液	試験片	試験温度	試験期間	試料数
人工海水	SM570 TIG溶接	80℃	90日	・重量・三次元形状測定用×2 ・腐食生成物分析用×2
			180日	
			360日	
人工淡水			90日	
			180日	
			360日	

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発 報告書、2019
- 2) 原子力環境整備促進・資金管理センター、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発 報告書、2020

5-3 陰イオン核種に対する閉じ込め技術の開発

◇事業の概要

TRU 廃棄物の地層処分の安全評価において、ヨウ素 129 (以下、I-129)、塩素 36 (以下、Cl-36)、セレン 79 (以下、Se-79) など、地下深部の還元性雰囲気において陰イオンの形態をとり、かつ長半減期の核種の影響が大きいことが示されている¹⁾。

これらのうち、I-129 は主に再処理施設のオフガス系から、AgI の形態で回収される。

AgI は還元性雰囲気で易溶性であるため、安全評価においては瞬時放出成分とされることに加え、ヨウ素はバリア材や岩盤への収着性が乏しく長半減期であることから、地質媒体の水理特性によって、安全評価における影響の程度が大きく変化する。このような安全評価における不確実性を低減するとともに、その影響を低減するための目標として下記①および②を設定し、HIP 固化技術と、BPI ガラス固化技術に絞り込み、開発を実施している²⁾⁻⁸⁾。

- ① 固化体からのヨウ素放出期間 10 万年以上(特に地質条件が悪い場合でも I-129 からの最大被ばく線量を現行よりも約 1 桁低減可能なヨウ素放出期間に相当)
- ② ヨウ素固定化処理プロセスにおけるヨウ素回収率 95%以上(未回収のヨウ素からの最大被ばく線量を小さくするように設定)

両固化技術ともに、年単位での浸出試験の結果によって、ヨウ素の放出を加速する地下水成分(アルミナ HIP 固化体においては HS^- 、BPI ガラス固化体においては炭酸イオン)の影響を強く受ける場合を除いて、目標を達成可能な見込みを得ている。一方で、ヨウ素が 10 万年という長期間にわたりゆっくりと放出されることを保証するためには、ヨウ素の放出に係る現象を正確に把握するとともに、その現象が継続することを示すこと、及びそのモデル化が必要である。

その他の陰イオン核種に関しても、ヨウ素 129 と同様に長半減期であり且つ地質媒体及び人工バリアにおける移行遅延効果が小さいため、その対策が必要と考えられている。このような核種を対象にした吸着材の探索はこれまでも実施された

が、地層処分における環境特性(酸化還元電位や、pH、温度など)の多様性やその変化に適応できる吸着材の開発には至らなかった⁹⁾。

近年になって、水処理や土壌処理等の分野で、陰イオンを対象とした処理剤が開発され、一部は商品化されている¹⁰⁾ことから、最新の技術に関する調査結果に基づいて、地層処分への適用出来る可能性が考えられた候補材料を対象に吸着試験に着手した。

◇2021 年度の成果¹¹⁾

(1)HIP 固化技術

HIP 固化は廃銀吸着材をマトリクス材料とともに直接 HIP (Hot Isostatic Pressing) 処理して、ヨウ素をマトリクスに AgI の形態で閉じ込める技術である。これまでに、アルミナ HIP 固化体からのヨウ素の放出は、時間の 2 分の 1 乗に対して直線的に増加していくこと、およびその直線の傾きは HS^- 濃度が高い場合により大きくなることが分かっている⁷⁾。このことは、アルミナ HIP 固化体からのヨウ素の放出が、内在する粒界や空隙を通じた地下水の内部への浸透、および AgI の溶解によって生じた I^- の外部への拡散によることを示している。また、図-1 に示すように、浸漬後の固化体内部の未溶出部と溶出部の濃度は大きく異なっており、未溶出部内部のヨウ素濃度はほぼ一様であったことから、 HS^- と AgI との反応は、 HS^- の供給が律速となっているものと考えられた。

これらに加え、これまでに得られた固化体内部の空隙構造及び Ag の存在状態 (HS^- の浸透した領域では AgI が分解し、 Ag_2S が生成している)

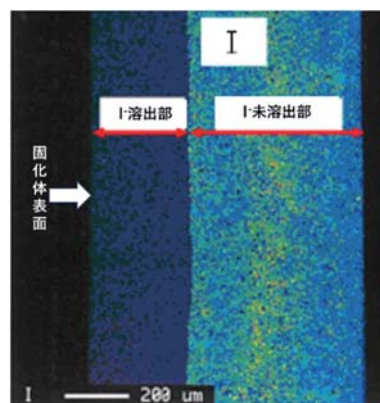


図-1 浸漬試験後のHIP固化体内部のヨウ素濃度分布

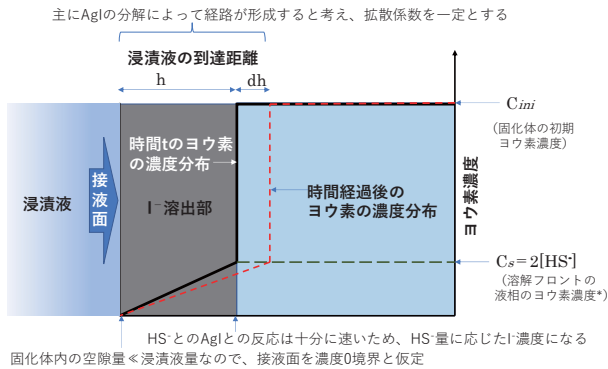


図-2 アルミナHIP固化体のヨウ素放出挙動の現象モデルの模式図

ならびに、ヨウ素の放出トレンドを基に、アルミナ HIP 固化体からのヨウ素放出挙動を、図-2 のようにモデル化した。

この現象モデルに基づけば、時刻 t までのヨウ素放出量 M_t は、式(1)で算出することができる。

$$\frac{M_t}{A} = \sqrt{(2C_{ini} - C_s)D \cdot C_s \cdot t} \quad \dots \text{式 (1)}$$

ここで、 C_{ini} は固化体内部の I⁻ 未溶出部（地下水が到達していない領域）のヨウ素濃度を、 C_s は溶解フロントの液相側のヨウ素濃度を、 A は固化体の接液面積を、 D は拡散係数を、それぞれ示す。

ここで、拡散係数 D を除く各変数は、固化体が置かれた環境条件や固化体の形状から既知であるため、拡散係数 D を求めることが出来れば、時刻 t までのヨウ素の放出量を算出できる。

図-3 はそれぞれの浸漬試験での時刻 t までのヨウ素放出量を、式(1)の右辺に対して両対数でプロットしたものである。

前述の通り、これまでの浸漬試験では、ヨウ素の放出量は時間の $1/2$ 乗に比例することが分かっていることから、この図の各直線の傾きから拡散係数 D を求めることができる。

この図から分かるように、アルミナ固化体内部のヨウ素の拡散係数は、試験条件によらずほぼ一定の値をとることが分かった。

この結果から、算出された拡散係数 D を用いることで、任意の時間までのアルミナ固化体からのヨウ素の放出量の予測が可能となるとともに、接液面積 A がパラメータとなっていることから、固化体のサイズを調整することによって、時間当たりのヨウ素の放出量および固化体の寿命を制御できる可能性を確認した。

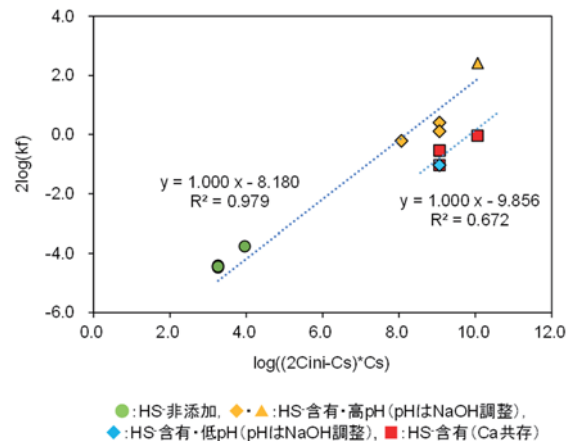


図-3 アルミナHIP固化体のヨウ素放出量と式(1)の右辺との関係

アルミナマトリクスの溶解や AgI の分解に伴う空隙の増加によって、他の条件と比較して大きい拡散係数が算出されることが推測される、高 pH の条件や高 HS^- の条件でも、拡散係数の値が同等の値となる原因については、今後の精査が必要である。

(2)BPI ガラス固化技術

BPI ガラス固化技術は、ヨウ素を鉛とホウ素を主成分とする低温熔融ガラスに均質に固化する技術である。

これまでの研究開発によって均質なガラスの製造に関する基礎的な技術は確立されており、現在のフェーズでは、BPI ガラス固化体（以下、ガラスという）からのヨウ素放出モデルの構築を課題としている⁵⁾。

これまでに、固化体の微構造の分析結果に基づいて構築したガラスの微細構造に対して、800 日までの浸漬試験結果を再現するように設定した各元素間の結合パラメータを用いることで、より長期間のヨウ素の放出挙動をモンテカルロ法によって再現できることがわかっている⁸⁾。

このことは、ガラスの溶解過程および溶解に伴うヨウ素の放出過程が長期的に変化しなければ、将来にわたってヨウ素の放出挙動を再現できる可能性を示している。

ヨウ素の放出過程が長期的に変化しないことを浸漬試験のみで示すことは困難であることから、BPI ガラスの微細構造のうち、ガラスのネットワーク構造を構成する種々の結合の中から、地下水との接触による水和反応によって切断され

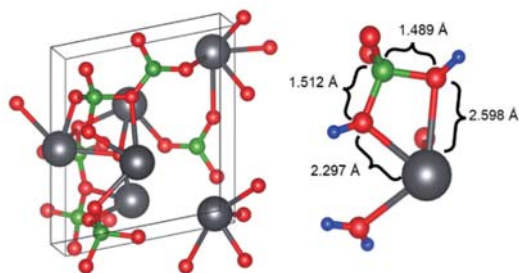


図-4 (Pb₄O)Pb₂B₆O₁₄結晶及び同結晶中のPb4 サイトクラスター

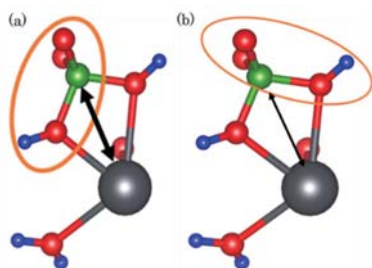


図-5 Pb4 サイトを含む局所構造クラスタの2種類の解離様式(a)及び(b)

やすい(言い換えれば、結合の切断に要するエネルギーが小さい)構造を特定することで、ヨウ素の放出に係るBPIガラスの水和溶解過程の継続性を示すことを試みている。

2021年度は、2020年度までに分子動力学法などによるエネルギー計算に耐えるよう精緻化した、BPIガラスの構造モデル⁸⁾から、種々の配位構造を抽出し、そこに含まれる主要な結合を切断するために必要なエネルギーを計算することで、結合の強弱と切断に要するエネルギーとの関係及び、上述のような水和溶解過程の推定ができる可能性があることを確認した。

解離エネルギーの計算にあたっては、結合の強弱に着目するため、ガラスの構造に含まれる結合距離や角度の大きな分布を考慮する必要が無いことから、BPIガラスに含まれるPb4サイトの配位構造と類似の安定な構造をもつ結晶である、(Pb₄O)Pb₂B₆O₁₄に含まれるPb4サイトのクラスター(図-4)を対象に、結合距離の異なる2種類の解離様式(図-5)における解離エネルギーを計算し、その大小関係と、想定される結合強度の大小関係とを比較した。

図-6は、★印で示したクラスター内の鉛とホウ素との距離を図-5の矢印の方向に引き離す際に必要なエネルギーを図示したものである。

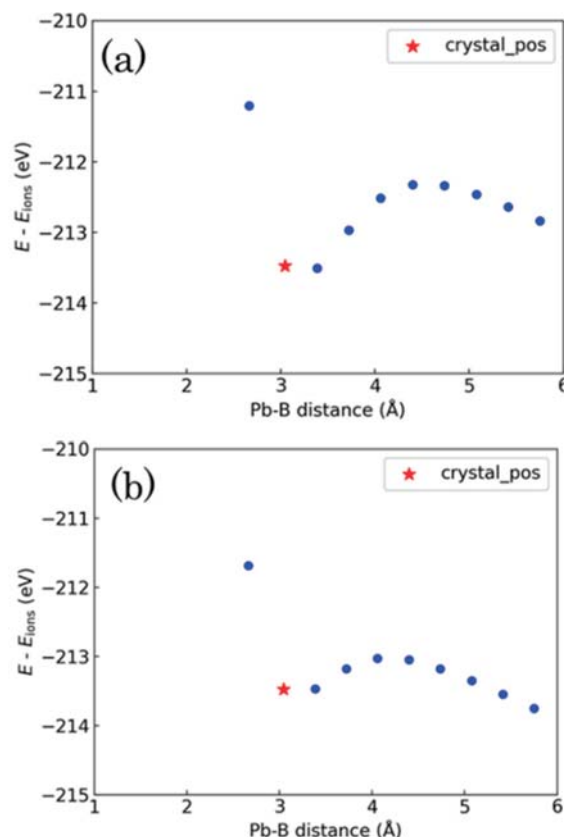


図-6 解離様式(a)及び(b)のPb-B間の距離を変化させたときのエネルギー変化

図から、解離様式(b)は解離様式(a)と比較して、小さいエネルギーで鉛とホウ素との間の距離を引き離すことができ、約4Åの距離まで引き離すと、結合を解離させられることが分かった。

図-4に示すように、解離様式(b)の方が鉛-酸素及び鉛-ホウ素の結合距離が長く、一般的に、同種の結合では、結合距離が長いほど解離しやすいことから、水和エネルギーを比較したものではないことや、エネルギー極小となる反応経路を比較したものではないこと、及び水和反応を伴う過程を評価したものではないことに留意する必要があるが、BPIガラスに含まれる主要な配位構造の結合強度及び、解離エネルギーを比較することによって、解離しやすい構造を特定できる可能性が示されたものと考えている。

今後、BPIガラスのネットワークを構成する主要な結合である、鉛-酸素-鉛、ホウ素-酸素-ホウ素、及び、鉛-酸素-ホウ素の各結合を対象に、上述の留意点を考慮しつつ解離エネルギーを比較することによって、BPIガラスの、水和溶解メカニズムの推定を試みていく。

(3)陰イオン吸着剤

2021 年度は 2020 年度に抽出した候補材料を対象に、主にセメント影響を考慮して、pH をパラメータとした吸着試験を実施し、地層処分への適用可能性を検討した。

吸着試験は、TRU 廃棄物の地層処分の安全評価において高い線量を示す、ヨウ素、塩素、セレン、モリブデンに加え、テクネチウムを模擬したレニウムを対象として実施した。

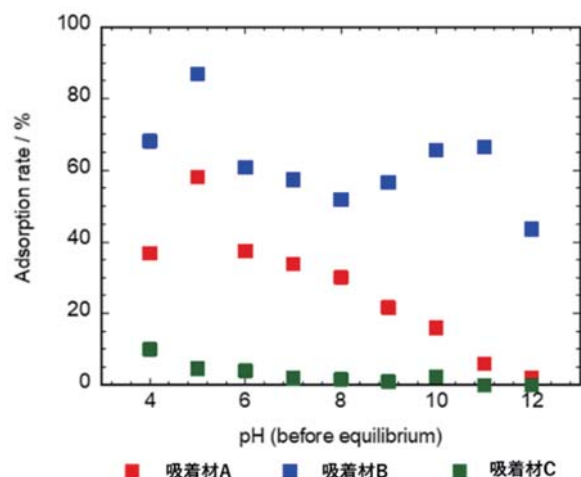


図-7 Se(VI)の吸着率の pH 依存性の例

吸着試験結果の例として、図-7 にセレン酸イオンの吸着平衡試験の結果を示す。

これまでに調査・検討されてきた多くの吸着材では、pH が 10 を超えると陰イオンの吸着率が急激に低下し、低アルカリ性セメントからの浸出液相当の pH=11 前後ではその性能が大きく損なわれることが知られていた。これに対して、今回抽出した吸着材のうち、吸着材 B では、セレン酸に対して pH=11 程度まで高い吸着率を維持することから、例えば低アルカリ性セメントを用いた場合の緩衝材内側での環境であれば適用の可能性が考えられる。

吸着試験の結果を基に、今回抽出した各吸着材の性能を定性的に評価した結果を表-1 に示す。

2021 年度の吸着試験では pH を調整したイオン交換水を用いて実施し、TRU 廃棄物の地層処分想定されるアルカリ環境に適用可能性のある吸着材候補を複数抽出することができた。一方で、TRU 廃棄物の地層処分において溶媒となる施設の間隙水としては、吸着材の適用方法によってセメント系材料からの影響を受けた弱アルカリ性～高アルカリ性の間隙水や、それらが緩衝材を

透過した透過水、また、地下水成分として炭酸塩等を含むものなどを考慮する必要がある。

そのため、各吸着材に適した利用方法を提案するためには、間隙水環境を考慮した吸着試験の実施等による、その適用性の見きわめが必要である。

表-1 各吸着材の性能の定性的評価

	吸着平衡特性					
	Se(VI)	Se(IV)	Re(VII)	Mn(VI)	I	Cl
吸着材A	△～○	○～◎	△～○	○～◎	◎	◎
吸着材B	○～◎	○～◎	△～○	○～◎	○～◎	○～◎
吸着材C	△	◎	△	○～◎	△	△
吸着材D	○～◎	◎	△	◎	△	△
吸着材E	△～○	△～○	△	△	△	△
吸着材F	△～○	○～◎	△	△	△	△
吸着材G	△	○～◎	△	○～◎	△	△

- 1) 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－、NUMO-TR-20-03、2021
- 2) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 16 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査 ヨウ素固定化技術調査報告書、2005
- 3) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 18 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査 ヨウ素固定化技術調査報告書、2007
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 24 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物処分技術ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発－平成 19 年度～平成 24 年度の取りまとめ報告書－、2013
- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター、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 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書（第 1 分冊）－ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上－、2018
- 6) 原子力環境整備促進・資金管理センター、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成 30 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発 報告書、2019
- 7) 原子力環境整備促進・資金管理センター、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成 31 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発 報告書、2020
- 8) 原子力環境整備促進・資金管理センター、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、令和 2 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 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2021
- 9) 地層処分基盤研究開発調整会議、地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～令和 4 年度）、2020
- 10) たとえば <http://www.amec.jp/product/index.html>
- 11) 原子力環境整備促進・資金管理センター、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、2021 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 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2022

5-4 廃棄体からの核種溶出モデルの高度化

◇事業の概要

本事業は、使用済燃料の再処理過程で発生するハル等廃棄体（ジルカロイ製の燃料被覆管であるハル、ステンレス鋼製のエンドピース等を収納した廃棄体）に含まれる炭素 14（以下、C-14）の長期的放出挙動の評価に関する信頼性向上を目的として、2004 年度に開始した。研究は大きく 3 つの項目に分類される。第一に C-14 インベントリの合理的設定方法の検討、第二に放射化金属からの C-14 放出挙動評価、第三に放出挙動評価の補完試験としての金属の腐食速度評価等のコールド試験である。

フェーズ 1（2004 年度～2006 年度）では、ジルカロイやステンレス鋼の諸特性に関わる情報収集等を行い、試験計画の立案を行うとともに、基礎試験を実施し、一部のデータを取得した¹⁾。

フェーズ 2（2007 年度～2012 年度）では、C-14 のインベントリについて、炉型（PWR、BWR）や燃料型式、さらには材料に応じて、詳細にインベントリを評価した。同時に C-14 の分析手法の見直しを行い、BWR の照射済み被覆管を用いた 10 年間にわたる溶出試験を開始した²⁾。

フェーズ 3（2013 年度～2017 年度）では、長期的な C-14 の放出挙動の調査（ジルカロイのホット試験及び長期腐食試験）に加え、ジルカロイの長期腐食モデルの検討、ステンレス鋼の長期腐食モデルの調査、C-14 の化学形態の調査、さらに、欧州の共同研究である CAST (CARbon14 Source Term) プロジェクトへ参画等により国際的な情報共有・調査を実施した³⁾。

現行のフェーズ 4(2018 年度～2022 年度)では、上述の成果や課題を受け、実廃棄物のデータが報告されていないエンドピースの特性評価に注力した研究開発を実施している。特に、従来の検討では、金属廃棄物からの核種溶出は、均一な核種濃度による評価に基づいていることから、エンドピース中の核種分布を評価することを目的とし、詳細な核種分析や解析評価を実施する。さらに、エンドピース（BWR 下部タイプレート）の試料を浸漬させることで核種溶出データを取得する。また、ハルについてもこれまでに継続している溶出試験により、長期の核種溶出データを取得するとともに、

核種分布に関わる諸因子の基礎的検討を実施する。

なお、C-14 に関わる課題として挙げられている内容のうち、金属の腐食挙動、酸化膜からの核種溶出モデル、C-14 の化学形態評価と化学形態に基づいた移行挙動・シナリオ等については、次フェーズ以降の課題と位置づける。

◇2021 年度の成果⁴⁾

(1)核種インベントリの高感度分析

ハル等廃棄体の核種インベントリをより詳細に把握するために、エンドピース試料（照射済み BWR 下部タイプレートから採取）及びハル試料（照射済み BWR STEP-1 燃料あるいは同 STEP-3 燃料の燃料被覆管から採取）に適切な分析手法を適用し、難測定核種の濃度を高感度で分析できるか検討する。C-14 及び Cl-36 を分析対象として、加速器質量分析法（Accelerator Mass Spectrometry、以下 AMS）の適用により、放射線測定による核種分析よりも更に高感度な定量分析が可能となる見込みを得た。AMS としては、東京大学タンDEM 加速器研究施設を利用した⁵⁾。

C-14 放射能濃度について、AMS による定量結果及び液体シンチレーションカウンタ（Liquid Scintillation Counter、以下 LSC）による放射線測定の定量結果を不確かさ範囲（ 2σ ）とともに比較して図-1 に示す。両者は傾き 1 の直線付近に分布し良好な一致を示しており、AMS による分析操作に問題のないことが確認された。エンドピース試料の採取位置 1～3 は図-2 に示すとおりであり、従来の分析で試料を採取した位置の近傍とした。

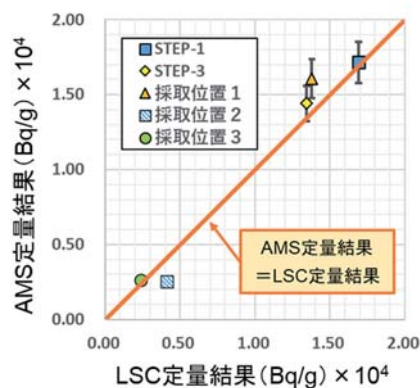


図-1 AMS 及び放射線測定（LSC）による C-14 放射能濃度の比較

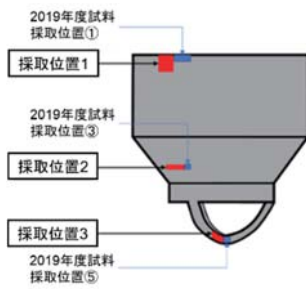


図-2 エンドピース試料の採取位置

AMS 測定用試料については、同位体比 (C-14/C-12 比) がオーバースケールしない適切なレベルとなるように、Dead Carbon (C-14 濃度が極めて低く無視できるレベルの炭素) を添加して同位体希釈している。誤差要因として同位体希釈後に大気からの炭素の混入があった場合、大気よりも低い同位体比での測定では C-14 濃度を上昇させ、大気よりも高い同位体比での測定では C-14 濃度を低下させる誤差となる。図-1 においては、採取位置 2 及び 3 の 2 点は大気より低い同位体比での測定点であり、その他の 3 点は大気より高い同位体比での測定点であるが、採取位置 2 では AMS 定量結果は LSC に対して低い傾向にあり、STEP-3 や採取位置 1 では高い傾向にある。LSC 定量結果を妥当とするなら、これらの誤差は大気からの炭素混入によるものとは逆の傾向であり、大気からの顕著な炭素の混入はなかったことが示唆される。

AMS による Cl-36 放射能濃度測定結果を、Pico-β (プラスチックシンチレータによる β 線検出器) を用いた放射線測定の結果とともに表-1 に示し、同表のうちハル試料についての定量結果を不確かさ範囲 (2σ) とともに比較して図-3 に示す。放射線測定では検出限界以下となったエンドピース試料については、AMS の結果はそれらの検出限界より低い値で定量できており、整合的な結果が得られている。ハル試料の AMS による定量結果は放射線測定と比較して 10~15% 程度低い値となったが、図-3 において不確かさ範囲内ではほぼ傾き 1 の直線上にあり、良好な一致を示している。

表-1 AMS 及び放射線測定 (Pico-β) による Cl-36 放射能濃度の定量結果

		放射能濃度 (AMS)	放射能濃度 (Pico-β)
		Bq/g	Bq/g
ハル	STEP-1	1.00E+02 ± 2.30E+00	1.16E+02 ± 8.80E+00
	STEP-3	1.08E+01 ± 1.94E-01	1.17E+01 ± 9.19E-01
エンドピース	採取位置1	1.81E-02 ± 1.63E-04	< 8.51E-02 (検出限界以下)
	採取位置2	3.69E-03 ± 5.53E-05	< 8.84E-02 (検出限界以下)
	採取位置3	2.70E-03 ± 5.67E-05	< 1.06E-01 (検出限界以下)

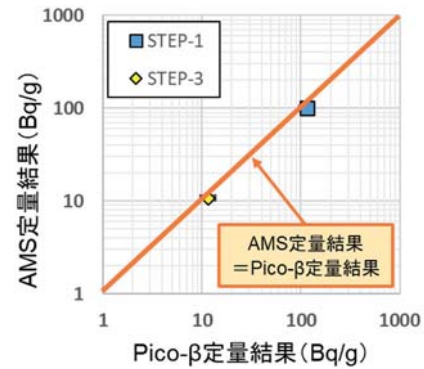


図-3 AMS 及び放射線測定 (Pico-β) による Cl-36 放射能濃度の比較

(2) イメージングプレート法による核種分布の評価

イメージングプレート (Imaging Plate、以下 IP) 法は非破壊かつ短時間で放射能の分布を測定できる技術であることから、比較的簡易にハル・エンドピース中の核種分布評価に適用できる可能性がある。2020 年度までに、高い放射能を持つ大型の実試料の測定に向け、短時間露光を可能にする露光方法を検討し、露光装置を製作した⁶⁾。2021 年度は、同装置を用いて具体的な測定手法について検討することとし、エンドピース (BWR 下部タイププレート) の比較的大きな領域を対象として Co-60 放射能濃度の分布を測定した。作業エリアの被ばく上の許容線量の観点から大型の試料を一括で取り扱うことができないことから、A、B 及び C の 3 つの試料片に分割して個別に測定し、評価時に元の形状を再現することとした。図-4 に試料の採取位置の概観を示す。なお、比較のために、各試料片の端部 (同図中 Ge-1~4) を Ge 半導体検出器による測定 (以下、Ge 測定) の試料として採取した。

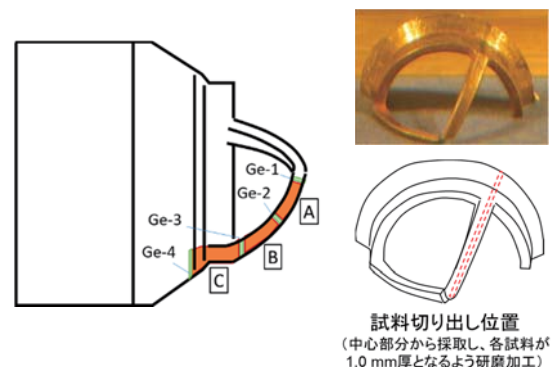


図-4 IP 法試料の採取位置

モンテカルロ粒子輸送計算コード PHITS を用いた解析により試料中の微小領域の放射能と IP 輝度の相関を求め、IP 輝度の二次元分布に対して適用することで輝度の二次元分布から各試料片の放射能濃度分布を取得し、エンドピースの形状が再現されるようにそれらを合成した。図-5 に再現したエンドピースの Co-60 放射能濃度分布を示す。図-4 に示したエンドピースの形状に応じた放射能濃度の分布が得られている。

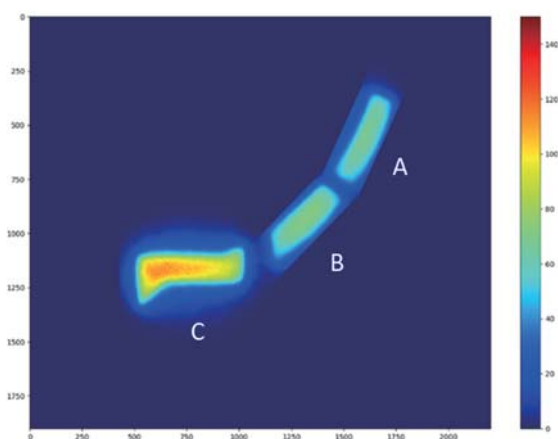


図-5 エンドピース形状に応じた Co-60 放射能濃度分布

図-6 では、IP 測定結果について、エンドピース上端の値を 1 とした放射能濃度（相対値）で従来の試行的な測定や Ge 測定の結果とともにプロットすることで、Co-60 放射能濃度の位置依存性を評価した。試料片 A, B では若干の差異が認められるものの、位置依存性について IP 測定結果は Ge 測定結果の傾向をほぼ再現できている。

平板試料について IP 測定による γ 線核種の放射能濃度分布評価が可能な見通しが得られたが、高線量率の複雑形状物の測定や解析を併用した核種分布評価が今後の課題である。

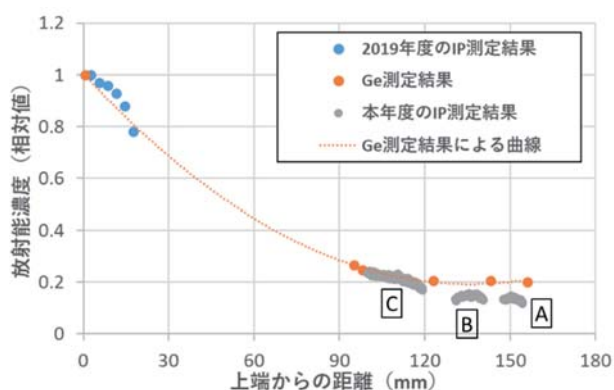


図-6 Co-60 放射能濃度の位置依存性

(3) 解析による核種分布の評価

2020 年度までに、エンドピースの三次元モデル化を実施し、運転履歴を反映させたモンテカルロシミュレーションを用いて核種分布の解析評価を実施した。2021 年度は、親元素の実測値の反映等により、エンドピースの三次元の核種分布の解析精度をさらに向上させた。図-7 にエンドピース上端からの距離に対する C-14 放射能濃度の解析値と分析値を比較した結果を示す。親元素である N（窒素）の濃度について別途実施した分析結果のばらつきを考慮して、最小値、平均値及び最大値とした場合の結果を示している。解析値（N 濃度平均値）／分析値の比は、1.5～3 の範囲にあり、比較的良好な一致を示しているが、親元素のばらつきを考慮しても解析値が分析値より全体的に高い傾向にあり、このような差異の原因となり得る解析条件等の検討が課題である。

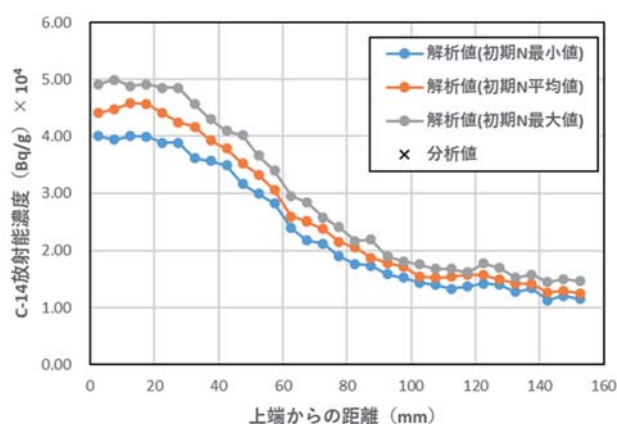


図-7 C-14 放射能濃度解析結果及び分析値

(4) 溶出モデルの検討

エンドピースからの核種溶出モデルを構築するために、これまでに評価したエンドピースの核種分布を反映した金属腐食による核種溶出のモデルについて検討する。溶出量の評価にあたっては、三次元構造における溶出挙動の位置依存性を考慮した三次元溶出モデル（図-8）を作成した。溶出挙動評価は、核種生成量の解析と同様に 1 辺 5 mm の立方体セルの単位で行い、それぞれのセルから腐食に伴って核種が溶出するものとして評価する。放射能濃度の初期値はセルごとに異なる値を持ち、半減期に応じて減衰する。各セルにおいて露出している面が溶出に寄与し、隣接セルにつながる露出していない面からの溶出はない。隣接していたセルが全て腐食した場

合は、新たな露出面となり溶出が開始される。従って、時間に応じて各セルの溶出表面積及び溶出量が変化していく。

腐食の進行に関しては、腐食速度を保守的な一定値 ($0.02 \mu\text{m/y}$)⁷⁾としたケース及び実測値に基づくより現実的な腐食評価式⁸⁾によるケースの2ケースで評価した。なお、均一な腐食による溶出を前提としたが、溶出表面の荒れによる溶出表面積の一時的な増加等、溶出モデルに関する現象論的な詳細検討は今後の課題である。

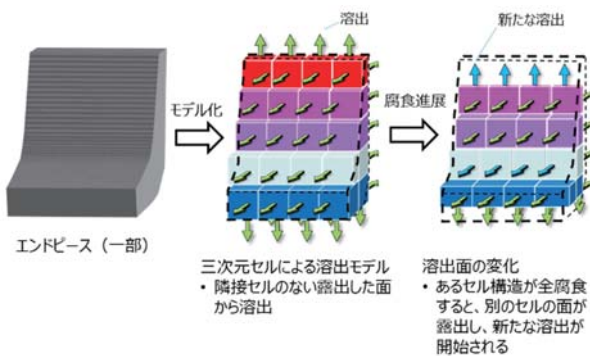


図-8 三次元溶出モデルの概要

図-9に腐食速度一定ケースでのC-14の残留放射能の三次元分布の推移を示す。腐食速度を保守的に高く設定したこのケースでは、構造物全体での放射能低下と並行して構造物の腐食が進む。 7×10^4 年後頃にはエンドピースの側面の構造が完全に消失し、さらに腐食が進むとおよそ 2×10^5 年ですべての構造が消失する。

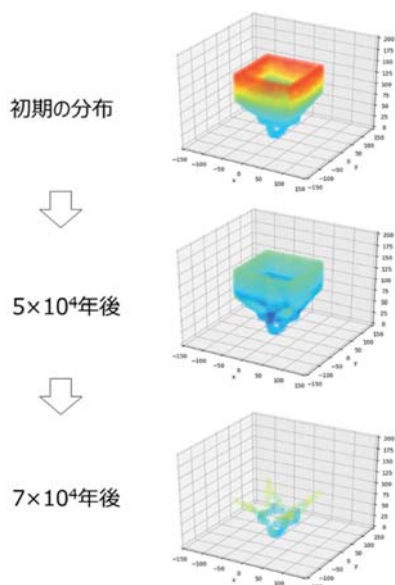


図-9 C-14 残留放射能の三次元分布の推移（腐食速度一定ケース）

図-10にC-14の年あたり溶出放射能及び残留放射能の時間変化を示す。腐食の進行がより速い腐食速度一定ケースでは溶出放射能が大きく、すべての構造が消失するおよそ 2×10^5 年後に全溶出するのに対して、腐食評価式のケースでは溶出放射能が抑制された結果、同時期にも放射能が残留している（全溶出はおよそ 10^7 年後）。腐食速度の保守性の見直しは、C-14に対しては、より高い核種閉じ込め性の評価をもたらしている。

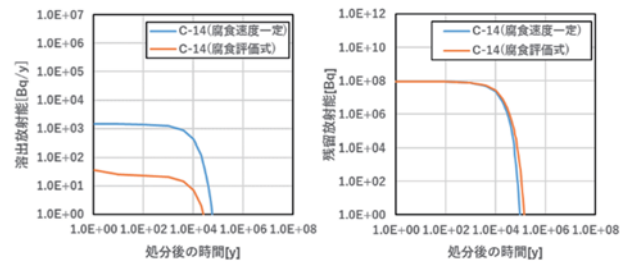


図-10 C-14の溶出放射能及び残留放射能の時間変化

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発報告書（第3分冊）－C-14の放出挙動等に関するデータの取得－、2008
- 2) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 24 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物処分技術ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発－平成 19 年度～平成 24 年度のとりまとめ報告書、2013
- 3) 原子力環境整備促進・資金管理センター、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 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書（第2分冊）－炭素 14 長期放出挙動評価－、2018
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和 3 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 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2022
- 5) 東京大学タンデム加速器研究施設 MALT、加速器紹介、2020、<http://malt.um.u-tokyo.ac.jp/introductionj.html>
- 6) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和 2 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 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2021
- 7) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－、JNC TY1400 2005-013、FEPC TRU-TR2-2005-02、2005
- 8) Sakuragi, T., Yoshida, S., Kato, O. and Tateishi, T.: Study of stainless steel corrosion by hydrogen measurement under deoxygenated, low-temperature and basic repository conditions, Progress in Nuclear Energy 87, pp. 26-31, 2016

5-5 ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化—ナチュラルアナログによる緩衝材の長期安定性の検証—

◇事業の概要

TRU 廃棄物の地層処分施設において、充填材等でセメント系材料を用いた場合にはニアフィールド環境が高アルカリ性となる可能性がある。このような高アルカリ性環境は、ベントナイト緩衝材の物理的・化学的性質を変え、地層処分施設の長期性能に影響を与える可能性がある。そのため、本事業では、高アルカリ性環境の形成を抑制するために普通ポルトランドセメント (OPC) に比べて浸出液の pH が低くなる先進的なセメント系材料の一つとして開発された HFSC (Highly Fly-ash contained Silica-fume Cement)^{1),2)}と緩衝材との相互作用について、ナチュラルアナログ (NA) により、長期挙動の直接的な証拠を取得してアルカリ変質に係る反応プロセスを評価し、現象解析モデルの開発に反映させることを目的とし、平成 30 年度より検討を進めている³⁾。

ベントナイト系緩衝材のアルカリ環境下での長期挙動の NA の調査は、天然でのベントナイトとアルカリ地下水との長期にわたる相互作用によって明確な変質層を確認したフィリピンのルソン島北西部の Saile 鉱山において開始した⁴⁾。この NA では、アルカリ変質が生じていても Mg-Fe に富むスメクタイトなどの二次鉱物によるクロッキングにより変質領域は数 mm に限定され、大部分のベントナイト鉱床が未変質のまま残存していることが確認された。ただし、Saile 鉱山の NA サイトでは既にアルカリ地下水の供給が止まっており、相互作用によるアルカリ変質反応後の痕跡は観察できるが、アルカリ地下水が浸出していた時の環境条件やアルカリとの反応時間も明確でないため、アルカリによる溶解—沈殿—結晶化に至る変質プロセスの評価が困難であった。

そのため、現在もアルカリ性地下水が流出している候補サイトを探索し、苦鉄質の堆積物にアルカリ地下水が浸出し、先の Saile 鉱山の NA でもみられた高アルカリ環境下における二次鉱物としての Fe、Mg に富むスメクタイトの生成を確認したパラワン島中部の Narra 地区を NA サイトとして検討を進め、試料分析により、アルカリ環境

下での変質反応プロセスデータを取得した。これまでの分析結果により、Fe、Mg に富む環境でのアルカリ変質によりスメクタイト系二次鉱物が生成し、これが物質移行やさらなる変質反応を抑制していると考えられる。今後はどのような環境・条件でアルカリ変質によりスメクタイトが生成するのかを明らかにして、処分場の構成部材として持ち込まれる鉄部材からの Fe 成分や海水等から持ち込まれる Mg 成分に富む環境での、HFSC 相当のアルカリとの相互作用が生じる可能性のある人工バリアシステムの現象解析モデルを補完するための NA 情報として取り纏める。

◇2021 年度の成果⁵⁾

(1) 調査概要

フィリピンのパラワン島 Narra 地区の NA はベントナイト層ではなく苦鉄質の碎屑性堆積物が分布し、高アルカリ環境下 (pH > 11) での反応により Mg、Fe に富むスメクタイト (3 八面体型のサポナイトや 2 八面体型のノントロナイト) が生成する環境である。このような高アルカリ環境下における Fe、Mg に富むスメクタイト系二次鉱物の生成は、先の Saile 鉱山のベントナイトのアルカリ変質においてクロッキングした二次鉱物でも確認しており、同様のアルカリ変質プロセスがベントナイトでも生じる可能性が高いことを示している。

これまでに、Fe、Mg に富むスメクタイトが生成するアルカリ環境下での変質プロセスについて、空隙を充填しスメクタイトの前駆体とみられる FMSH 組成の沈殿物を初めて同定し、C-S-H と共生していることを確認した。

2021 年度は、アルカリ環境下のスメクタイト化の生成条件を明らかにするために、パラワン島 Narra 地区ナチュラルアナログサイトで採取した試料の産状観察及び鉱物・化学分析や類似する天然環境や合成実験の事例調査から、アルカリ環境下のスメクタイト化の生成条件に係る鉄成分等の化学成分の影響について評価した。

(2) NA 試料の微細構造の観察

1) NA 試料と分析方法

パラワン島 Narra 地区の NA サイトでの Mg、Fe を含むアルカリ溶液から鉄を含む M-S-H 組成の

沈殿物 (FMSH) を経て Fe、Mg に富むスメクタイトが生成する反応において、一次鉱物等の影響を明らかにするために、二カ所のトレンチ (トレンチ 6 と 7) から採取した試料を対象として、アルカリ変質により生成したスメクタイトや一次鉱物の組織 (性状、共生関係など) や鉱物組成を偏光顕微鏡や EPMA 等で観察・分析するとともに、TEM 及び STEM で観察した。

2) 二次鉱物の微細構造

トレンチ 6 の 2 試料 (PWT06-17-Rh-002、PWT06-17-Rh-C06) について偏光顕微鏡による観察を行った。2 試料とも主要構成鉱物である直方 (斜方) 輝石 (Opx)、蛇紋石 (Spt)、スピネル (Spl) の岩片・鉱物片と、濃褐色～褐色の微細粒子で占められた基質部分で構成されており、トレンチ 7 との間で主要構成鉱物・基質の産状に大きな違いは認められない。蛇紋石特有のメッシュ組織を呈する粒子が広く観察されるが、淡い褐色かつ 1 次の灰色程度の低い干渉色を示す蛇紋石だけでなく、黄褐色～濃褐色かつ高次の干渉色を示す部分が多いことから、元々が蛇紋石だった部分が 3 価の鉄を含むスメクタイトに変質したと考えられ、SEM-EDS による組成分析からもスメクタイト化は支持される。これらスメクタイト化した部分よりもさらに濃い褐色を呈し、ほとんど不透明になっている基質部分 (Nnt) も岩片周囲や岩片間の空隙を充填する形で広く産出している。こちらはノントロナイトの組成を持つ二次生成物だと考えられる。

スメクタイト化しているとみられる FMSH 系二次生成物の化学組成を定量・比較するために、トレンチ 7 の試料も対象として EPMA による定量分析を実施した。FMSH 系二次生成物の化学組成を Fe-Mg-Al 及び Si-(Na+Ca)-(Mg+Fe+Al) の 2 種類の三角ダイアグラムに示す (図-1)。

岩片・鉱物片間を充填している基質部分の二次生成物は Fe に富む傾向にあり、一方で岩片・鉱物片そのものが置換している部分の二次生成物は Mg に富む傾向に分かれている。また、Si-(Na+Ca)-(Mg+Fe+Al) のダイアグラム上では岩片・鉱物片を置換している部分は基質部分と比較して、スメクタイトと比べて Si がやや乏しく、蛇紋石の化学組成に少し近い組成を示す。さらに、変質鉱物片やその基質との界面を含む超薄切片をピンポイントで作成した後、微細組織及び各鉱物の化学組成を TEM 及び STEM によって調べた。

図-2 はトレンチ 7 浅部の PWT07-17-Rh-009 中のコア部分が蛇紋石でリム部分がサポナイト (Sap) に近い組成を示す粒子に着目した、変質鉱物片-基質境界面の TEM による微細構造観察結果である。サポナイト化している部分は、おそらく脱水による収縮に由来すると考えられる隙間が多数空いている一方で、コアの蛇紋石部分は密な見た目を呈する。サポナイト化している部分を高倍率で TEM 観察すると、7.2 Å の層状構造が一部残存していることや、元々の蛇紋石とサポナイトの積層方向が同じ方向に配向する傾向が確認された。

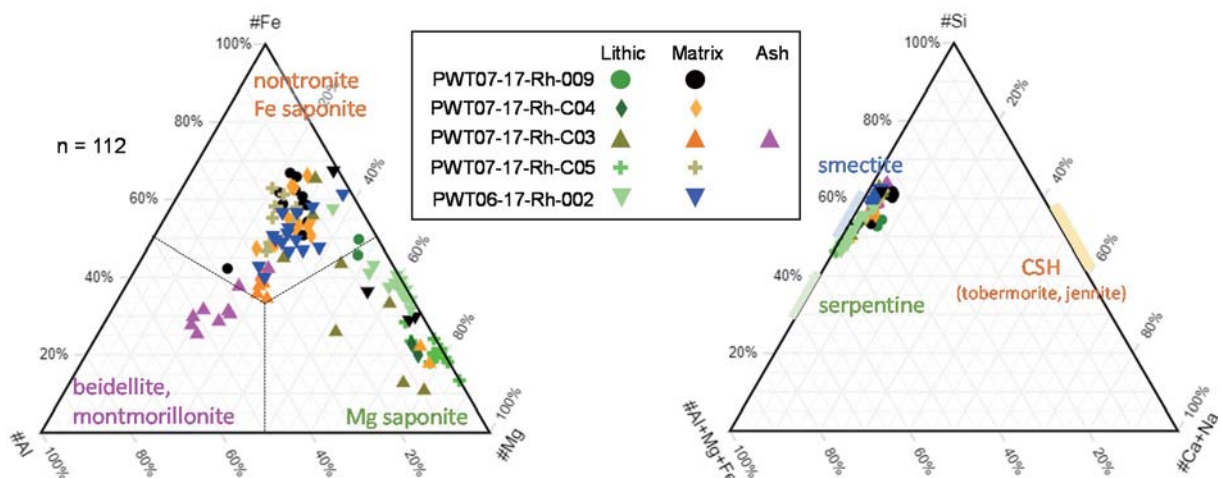


図-1 FMSH 系二次生成物の化学組成

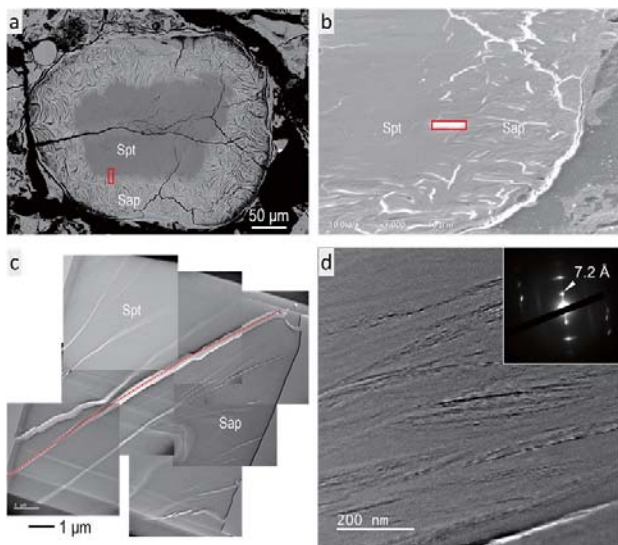


図-2 浅部の試料 (PWT07-17-Rh-009) の蛇紋石-サポナイト境界面の微細構造観察

トレンチ 7 底部の PWT07-17-Rh-C05 についても、同様に変質鉱物片とその周囲に付着している基質の境界面をピンポイントで切り出して観察した。図-3 に変質鉱物片-基質境界面の微細構造観察結果を示す。

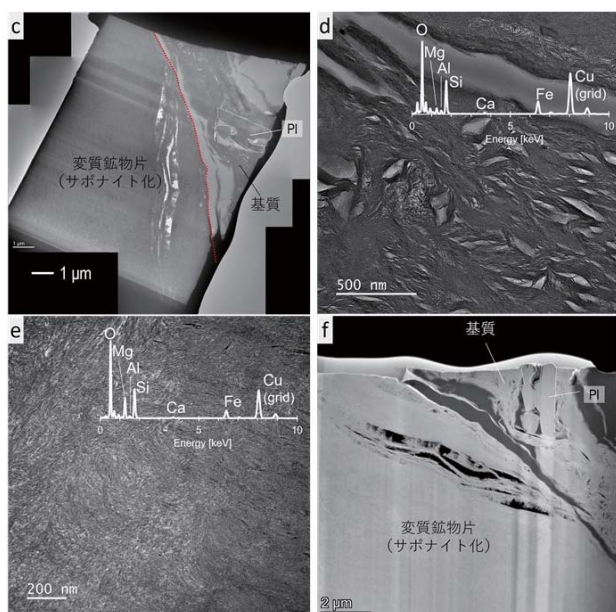


図-3 深部の試料 (PWT07-17-Rh-C05) の変質鉱物片-基質境界面の微細構造観察

この変質鉱物片も、低倍率の観察像では比較的均質な見た目を呈するものの、より高倍率での観察像では繊維状組織が広く分布していることが確認される (図-3(e))。EPMA の結果と同様に、基質側は Fe に富み、変質鉱物片は Mg に富

む傾向を示す。組織の比較をすると、基質部分の二次生成物は 100 nm 程度の厚さのパケットを形成しているのに対して、変質鉱物片中のサポナイト様鉱物は 10-20 nm 程度の厚さしか積層していない。

STEM による元素マップを図-4 に示す。Mg に富む蛇紋石が残存する部分が一部見られ、次いでサポナイト化している変質鉱物片の部分が Mg に富むのに対し、基質部分は相対的に Mg に乏しいことが確認できる。

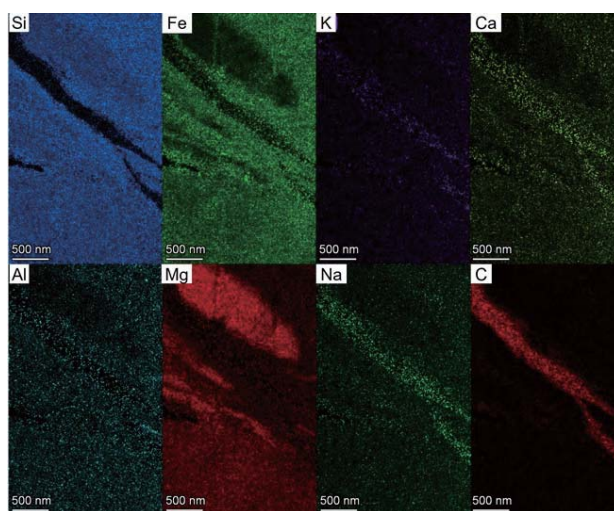
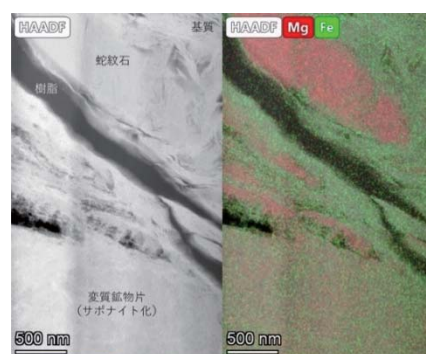


図-4 深部の試料 (PWT07-17-Rh-C05) の変質鉱物片-基質境界面の元素分布

(4) アルカリ変質に関する既存情報の収集・整理

M-S-H を前駆体とするスメクタイトの生成がどのような条件で生じるのかを把握するため、M-S-H やスメクタイトの生成に関連する既存情報として、「自然界における M-S-H または Mg 粘土の生成^{6), 7)}」、「M-S-H の合成試験^{8), 9)}」、及び「Fe、Mg に富むスメクタイトの合成試験^{10), 11)}」に関する文献を対象に調査を実施した。その結果、スメクタイトの生成について以下のように整理できる。

スメクタイト化に反応が進む要因として、

- ・鉄の存在
- ・アルカリ
- ・酸化環境 > 還元環境

を確認した。また、還元環境でサポナイト、酸化環境でノントロナイトが生成する傾向もある。

自然界でのスメクタイトの生成プロセスについては、①溶液⇒沈殿（ネオフォーメーション）と②前駆体の碎屑性鉱物の変換があり、これは Narra 地区の NA では①が岩片間を充填する基質のスメクタイト（ノントロナイト様鉱物）、②が岩片を置き換えているスメクタイト（Mg サポナイト）に相当する。また、スメクタイトの生成経路については、(i) Al 含有 Mg 粘土（サポナイト、パリゴルスカイト）の形成、(ii) Al を含まない Mg 粘土（スチープンサイト、セピオライト、タルク）の形成、(iii) 他の Mg 粘土鉱物からのセピオライトの形成に分けることができるが、NA でみられる二次鉱物の形成もこれらの生成経路で整理でき、(i) Al 含有 Mg 粘土の形成は、ルソン島 Saile 鉱山の NA のベントナイト変質部でみられる三八面体型スメクタイトやキプロスの NA でみられるパリゴルスカイト¹²⁾、(ii) Al を含まない Mg 粘土の形成は、パラワン島 Narra 地区の NA の高 pH、高 Mg/Si 環境で生成するスメクタイトと整理できる。

(5) フィリピン NA におけるアルカリ変質プロセスに係る二次鉱物の形成

パラワン島 Narra 地区の NA サイトで採取した試料の産状観察及び鉱物・化学分析からアルカリ間隙水との相互作用により、岩片・鉱物片を置換する Mg に富むスメクタイト（Mg サポナイト）と隙間を充填する基質として産する Fe に富むスメクタイト（ノントロナイト様鉱物）が二次鉱物として生成しており、以下の特徴をもつ。

- ・岩片・鉱物片を置換する Mg に富むスメクタイトは、蛇紋石の構造を引き継ぎながらサポナイト化が進行。EELS 分析では Fe²⁺とは見られなかったが、この要因としてサンプリング後の酸化の影響が文献から示唆された。
- ・岩石間を充填する基質の Fe に富むスメクタイトは、海水による（酸化の）影響を受けてノントロナイト化が進んだ可能性が示唆される。FMSH は生成環境が異なる（淡水環境で形成）が、基質のスメクタイトの前駆体も同様の反

応（C-S-H との共沈）で沈殿・結晶化が進んだと考えられる。

文献調査の結果も併せて考えると、Narra のサイトでの変質とベントナイトのアルカリ変質では Al の挙動が大きく異なるが、天然での Mg 粘土鉱物の生成経路の観点からも、TRU 廃棄物の処分場環境としても十分ありうる Fe、Mg に富む環境のベントナイトのアルカリ変質において、二次鉱物として Fe、Mg に富むスメクタイトが生成する可能性は十分考えられる。

- 1) 入矢桂史郎、新村亮、久保博、黒木泰貴、人工バリア材の変質に関する研究、動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書、PNC ZJ1201 97-001、1997
- 2) 三原守弘、入矢桂史郎、根山敦史、伊藤勝、シリカフュームを混合したセメントペーストの浸出試験とモデル化、放射性廃棄物研究、3 巻 2 号、pp. 71-79、1997
- 3) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、平成 30 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発報告書、2019
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 24 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 多重バリアの長期安定性に関する基礎情報の収集及び整備 平成 19 年度～24 年度の取りまとめ報告書、2013
- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和 3 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 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書、2022
- 6) Nishiki, Y. et al, Precipitation of magnesium silicate hydrates in natural alkaline surface environments, Clay Science, 24(1), 1-13, 2020
- 7) Pozo, M. et al., An Overview of Authigenic Magnesian Clays, Minerals, 8(11), 520, 2018
- 8) Besselink, R. et al., Mechanism of saponite crystallization from a rapidly formed amorphous intermediate, Crystal Growth & Design, 20(5), 3365-3373, 2020
- 9) Nied, D., Enemark-Rasmussen, K., L'Hopital, E., Skibsted, J., Lothenbach, B., Properties of magnesium silicate hydrates (M-S-H), Cem. Concr. Res., 79, 323-332, 2016
- 10) Gainey, S.R. et al., Clay mineral formation under oxidized conditions and implications for paleoenvironments and organic preservation on Mars, Nature Communications, 8, Article number 1230, 2017
- 11) Sakuma, H., Morida, K., Takahashi, Y., Fukushi, K., Noda, N., Sekine, Y. and Tamura, K.: Synthesis of Ferrian and Ferro-Saponite, Implications for the structure of (Fe, Mg)-smectites synthesized in reduced conditions, American Mineralogist, in press.
- 12) Alexander, W.R. and Milodowski, A.E., Cyprus Natural Analogue Project (CNAP) Phase II Final Report, POSIVA Working Report 2011-08, Posiva, Olkiluoto, Finland, 2011

5-6 廃棄体由来の発生ガスに関する現象解析モデルの妥当性検討

◇事業の概要

TRU 廃棄物の処分場では、廃棄物及びその周辺に存在する水分の放射線分解、廃棄物等の金属の還元性雰囲気での腐食などによる水素ガスの発生や、有機物の分解や微生物の活動によるガスの発生が想定される。ガスの発生による懸念事項として、蓄圧に伴う緩衝材の力学安定性の低下及びガスの移行による施設内汚染水の押出しに伴う核種移行の加速が挙げられている。

このため、第2次 TRU レポート¹⁾では、処分場で生じるガス発生、人工バリア（特に応力場の影響を受ける可能性の高い、粘土系材料が候補となっている緩衝材）中のガス移行挙動、及び力学挙動の予測が必要となることが示されており、そのための連成評価モデルの開発が必要である。

これまでの検討では、緩衝材などの人工バリアを対象とした、気・液の移行特性及び力学特性などの材料特性データの取得を目的とした各種要素試験及びその解析的評価により、力学連成気液二相流解析が可能なモデルを構築してきた^{2)～6)}。

結果として、下記の課題を抽出した。

- ① これまでの各種要素試験で取得した材料特性データ及び評価モデルの実スケールへの適用性の確認
- ② 実スケールにおいてより現実的なガス移行場の環境（ガス発生量、変質など）を設定したうえで、適用性の確認された材料特性データ及び評価モデルを用いたガス影響評価手法の構築
- ③ 最新の人工バリア候補材料に対する材料特性データの拡充

また、2017 年度末に地層処分研究開発調整会議で策定された「地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～令和 4 年度）」⁷⁾では、これまでに実施した各種要素試験とその解析的評価をもとに取得したバリア材のガス移行特性及び力学特性と、それらをもとに構築した現象解析モデルの、実施施設の安全評価への適用性を、処分坑道の小型モックアップ（三次元拡大系供試体）を用いたガス移行試験などにより確認すること、適用性を確認した現象解析モデルを用いた解析評価の試行に

より、核種移行挙動へのガス影響を検討することが示されている。

一方、NUMO の「包括的技術報告書」⁸⁾では、TRU 廃棄物処分の最新のセーフティケースにおいて、人工バリアとして緩衝材を用いる場合、緩衝材の設計要件として、低透水性、自己修復性などが挙げられており、それらの設計要件を満たす仕様とすることで所定の機能が発揮され、核種移行抑制に対する閉鎖後長期の安全性が確保できるとされている。

以上より、本事業では、ガス移行挙動が処分場の性能に及ぼす影響を評価可能な現象モデル及びその現象を再現する解析手法を構築することを目指す。この目標を達成するためには、①自己修復が起きるか否かを評価できること②その後のガス移行挙動を評価できること③緩衝材製作・施工時、及びその後の変質やガス圧の影響によって力学的不均衡が生じたときに発生する緩衝材内の不均一性が、ガス移行に与える影響を評価できること④ガスの移行が施設内の核種の移行に及ぼす影響の程度を評価できることが必要である。

そのために、TRU 廃棄物処分施設における廃棄体由来の発生ガスについて、人工バリアの状態を考慮したより現実的なガス移行場の環境を設定したうえで、核種移行や力学的挙動に対するガス移行挙動の影響を評価可能なモデル・解析手法を構築するための検討を実施する。最新のセーフティケースで対象とする処分坑道断面例を図-1 に示す。また、表-1 に本事業の実施計画を示す。

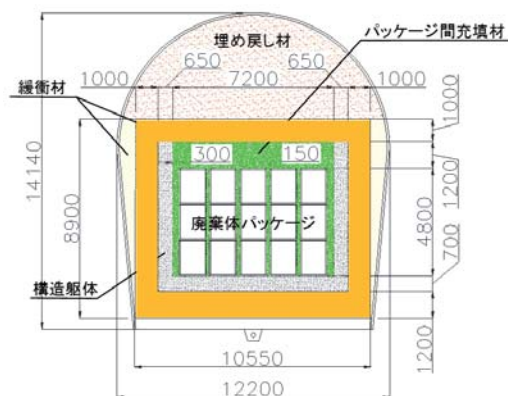


図-1 対象とする TRU 廃棄物処分施設の処分坑道断面例（深成岩、先新第三紀堆積岩類における廃棄物グループ 2 の例）⁸⁾

表-1 本事業の5か年の内後半3か年の実施計画

調査研究項目	令和2年度	令和3年度	令和4年度
■ ガス移行挙動を評価するためのツール、評価手法の検討・構築	1) 処分坑道の力学連成ガス移行評価モデルの高度化（モックアップ試験、他） モックアップガス移行試験、再破過試験、解体調査 再冠水挙動、ガス移行挙動の解析評価（アップスケーリングの適用性確認）	要素試験特性値の評価 力学連成ガス移行挙動評価	成果取りまとめ 移行場の状態変化を考慮したTRU処分施設のガス移行解析
■ より現実的なガス移行場の環境等の設定に関する検討	2) 長期変遷を考慮したガス移行場の状態設定評価 試験データに基づく現象のモデル化および解析手法の適用性確認	化学変質力学挙動相互連成解析コードの適用性確認 人工バリアの状態変遷のケーススタディ	緩衝材性能 ガス移行場への影響評価
3) 核種移行を考慮したガス移行影響評価モデルの構築（ガス発生挙動評価、他）	ガス発生量評価のケーススタディ	ガス移行との連携等によるガス発生量評価 ガス発生／ガス移行／核種移行評価の相互関連の整理	押出し水量 核種移行へのガス影響評価

◇2021年度の成果⁹⁾

(1) ガス移行挙動を評価するためのツール、評価手法の検討

本検討では、前述のとおり、①これまでの各種要素試験等により取得した緩衝材の二相流パラメータ等の材料特性データや評価モデルの、実施設を対象としたガス移行挙動評価への適用性を確認すること（アップスケーリング）、②材料特性データ及び評価モデルを再評価することを目的とし、要素試験から規模を拡大した三次元系の小規模モックアップによる再冠水試験及びガス移行試験とそれらの解析評価を行うこととしている。

2021年度は、2020年度に実施したガス移行試験により破過を経験した供試体を用いた再破過試験と試験終了後試験体の解体調査及び再破過試験結果の解析評価を行った。

1) 小規模モックアップによる再破過試験

処分施設における緩衝材の自己修復性や長期にわたる低透水機能を低下させる可能性のひとつとして、廃棄物由来の発生ガスによる緩衝材

の破過現象に伴う構造変化の残留が想定される。この現象を人工バリアの透過性という観点から調査するため、すでに破過を経験した供試体を再冠水させ再びガスを注入した際の破過前後の挙動を把握するべく、再破過試験を実施した。再破過試験では、試験体の自己修復現象の観察を目的とした、気液二相流特性の把握に必要なデータ（ガス注入量・排出水量・排出ガス量等の経時変化）及び力学特性の把握に必要なデータ（注入ガス圧・有効応力等の経時変化）を取得した。

モックアップ試験装置を用いた、再破過試験のシステムイメージを図-2に示す。

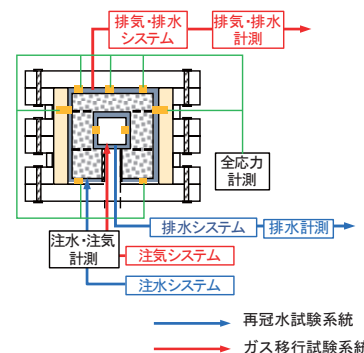


図-2 再破過試験装置のシステムイメージ

ベントナイト媒体中におけるガス移行は、ガス圧、水圧及びベントナイトの膨潤圧の関係により、媒体中へのガス侵入や破過現象に向けての進展が決定されると考えられている。そこで本再破過試験では破過前の挙動をより詳細に観察するために、ガス移行試験の昇圧ペース＋0.1 MPa/週（7 日）に対して、有効ガス圧が 0.3 MPa に到達以後は、＋0.1 MPa/2 週以上（14 日以上）に昇圧ペースを緩めて供試体内側からガス圧を載荷し、ガスの排出（破過）が観測されるまでガス注入を継続した。

図-3 に再破過試験での取得データの内、有効ガス圧（注入ガス圧－背圧）と有効応力（全応力－背圧－有効ガス圧）の経時的な取得データを示す。供試体内側の有効応力の経時変化に着目すると、有効ガス圧が 0.3 MPa に到達した 21 日経過以降に緩やかな漸減傾向が確認できている。この挙動は、「有効ガス圧 > 有効応力」の条件となったことに伴い、有効ガス圧が有効応力に打ち勝って間隙が押し広げられたことに起因するものであると解釈できる。したがって、この時点より緩衝材中へガスが浸入を開始したものと推定できる。

その後、有効ガス圧が 0.6 MPa に到達した 77 日経過以降、供試体内側の有効応力の経時変化が再び増加傾向に転じ、更にその 2 日後（79 日経過後）に有効ガス圧が大きく落ち込んだこと

から、試験体外部と間隙が連結し破過が発生したと考察した。また、この時にある特定方向からのガス及び水の排水量の卓越（急増）が観測され、当該方向より破過が生じたと判断した。破過の発生方向としては 2020 年度ガス移行試験における破過の発生方向と同一方向面からの発生であったが、ガス移行試験と同じ 0.6 MPa のガス圧で再破過したことから、一度目の破過による透過性への致命的な影響は残存せず、再飽和に伴うベントナイトの自己修復が発生したと考える。

また、本モックアップ試験における破過圧に関しては要素試験時¹⁰⁾に観測した破過圧（1.3 MPa）より小さく、これは試験系における体積拘束に起因していると推定される。従来的一次元系要素試験スケールの試験系よりもモックアップ試験系の方が体積拘束の少なさからガスが伝播しやすくなっており、破過圧の低下につながったと考えられる。実処分施設の状況を想定した場合、体積拘束による影響を考慮すると一次元系要素試験スケールの試験系よりもモックアップ試験系から得られた結果の方がより現実的な挙動を示しているものと考えられる。このような体積拘束による破過圧への影響はスケール効果の一つと考えられ、一次元系要素試験スケールの試験系からのみでは得られない知見である。

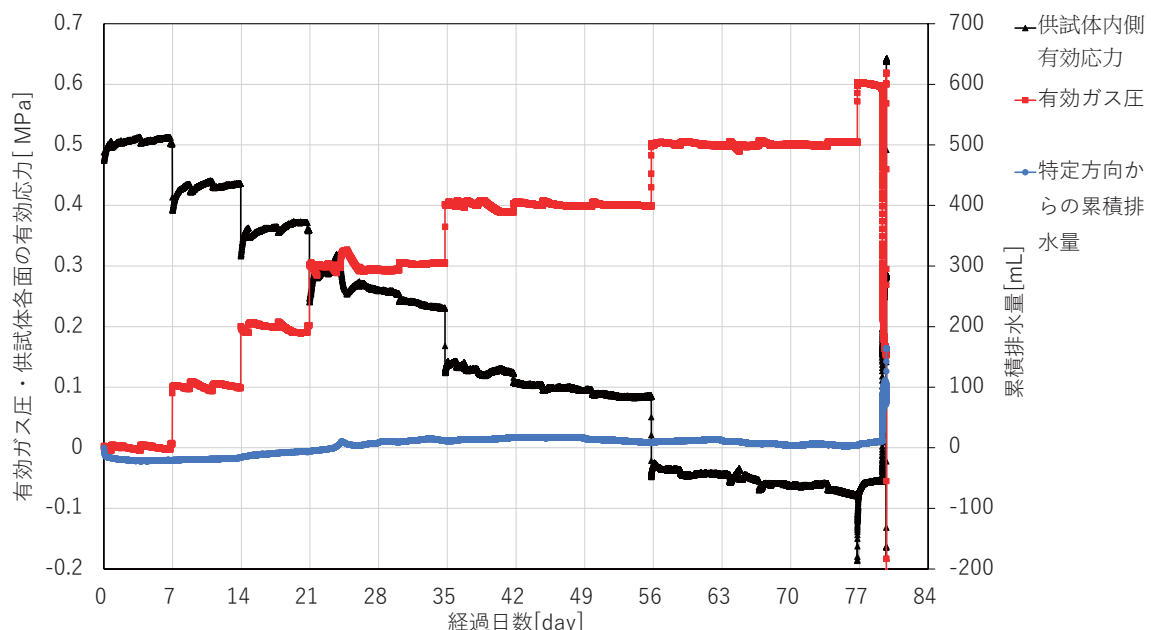


図-3 再破過試験における有効ガス圧及び有効応力の変化

2) 試験体の解体調査

試験終了後の試験体を解体してガスの移行に伴う亀裂や致命的な欠陥等が生じていないかを確認するとともに、試験体から試料を採取し、乾燥密度の測定及び飽和度の分布の算出を実施した。

試験装置の上蓋撤去後の状況を図-4 に示す。目視により亀裂や致命的な欠陥等が生じていないことを確認した。その後、シンウォールサンプラーで試料を採取し、一定の厚さにカットしたのち分析に供した。また、この際に試験体製作時の打ち継ぎ面に相当する部位を確認し、試験体がよく密着した状態であることを確認した。



図-4 上蓋撤去後の状況

ガス移行試験の結果より、試験体の各面間で排水あるいはガス排出量に大きな差が生じたことから、試験体に透過特性の不均質性が内在すると考えられる。そのため、ガス移行に影響する密度及び飽和度を調査することとした。密度に関しては試験体の各部位間で大きな密度差は観測されなかった。採取した試験体のうち、破過現象が観測された左面部及び排水量の多かった前面部を含む図-5 中の B-A-D 断面の飽和度分布に関して調査した結果を図-6 に示す。左面側で前面寄りの B 部で、飽和度が相対的に小さい領域が多く見られることは、ガスの排出挙動や移行特性に関して、主に左面で破過が生じたという再破過試験における評価結果と連動している。頂面での飽和度に関しては左面側よりもさらに小さい。これは重力の影響によるもので、気体は相対的に試験体上方へ、液体は相対的に下方へと移動しやすくなっているのではないかと考察した。

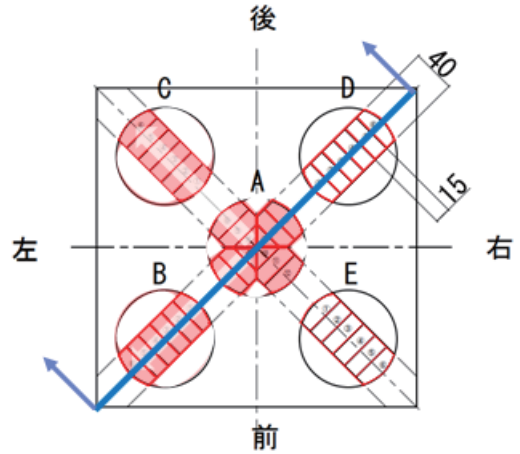


図-5 解体試験体のサンプラーによる採取箇所の模式図

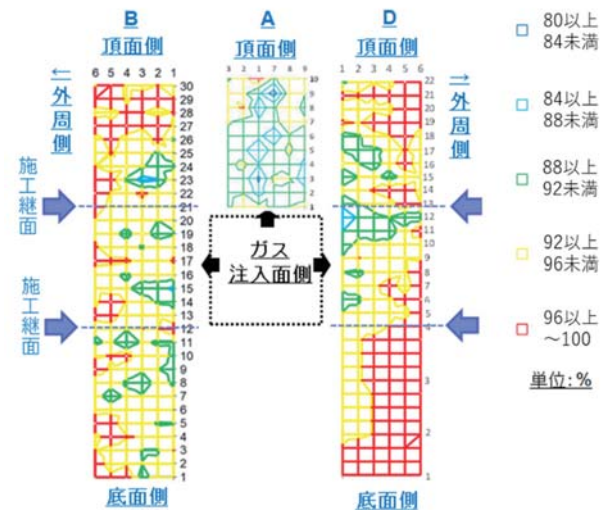


図-6 解体試験体の分析結果より算出した飽和度分布図

3) 再破過試験結果のシミュレーション解析

再破過試験の計測データを用いて、材料パラメータのフィッティングと試験の再現解析を実施した。計測データを各面ごとに測定していること、ガスの注入は中央から放射状に行ったことから、試験体に対してガス注入口を中心に 6 方向の三次元モデルに分割、各エリアは均質と仮定し、それぞれの面からの排水量を表現できる二相流パラメータのフィッティングを先に行い、次に全エリアを統合した三次元モデルによる再現性の評価をおこなった。このような再現解析手法をとった理由は、再破過試験ではガス移行試験同様、各測定面で排水量や排ガス量のばらつきが大きい結果が得られており、このことから試験体内での部分ごとの透過特性に大きな差異があることが示唆されたからである。解

析コードには多相多成分流体を対象とした汎用地圏流体シミュレータ GETFLOWS を用いた。

統合三次元モデルによる再現解析から最終的に同定された二相流パラメータのうち、最も排水量への感度の大きいパラメータである絶対浸透率についてまとめたものを表-2 に、試験体からの累積排水量の再現解析結果を図-7 に示す。表-2 より、試験体内に存在すると考えられる不均質性が各面の絶対浸透率の差異としてパラメータ上に表れた結果となっていることがわかる。また、再現解析結果では試験体からの最終的な累積排水量をよく再現できているのが読み取れる。しかし、この方法では破過が偏向して発生することの評価としては不十分である。また、再現解析結果上において排水が卓越している箇所については再現が不十分であり、これは従来の二相流モデルでは追跡しきれない試験体の圧縮変形による排水の増加がその原因であると考察した。試験体内に存在すると考えられる不均質性や試験体の圧縮変形による排水への影響のいずれも一次元要素試験スケールの試験系からのみでは得られない知見であり、ガス水移行挙動へ影響すると考えられるスケール効果である。これら要素試験から規模を拡大したモックアップ試験結果より得られたスケール効果の表現に関して検討し、処分場における三次元ガス移行挙動を再現できる手法の開発が今後の課題である。

表-2 再破過試験から同定された各面の絶対浸透率[m²]

底面	頂面	前面
9.018×10^{-21}	9.018×10^{-21}	2.141×10^{-19}
後面	左面	右面
9.018×10^{-21}	6.447×10^{-20}	9.018×10^{-21}

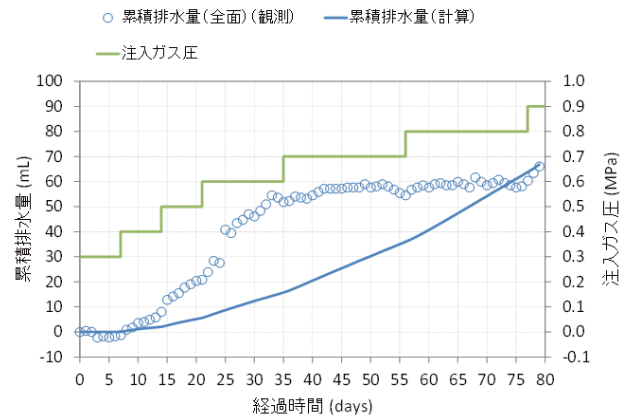


図-7 再破過試験の累積排水量再現解析結果

- 1) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物処分技術検討書 ー第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめー、2005
- 2) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 平成 19 年度～24 年度取りまとめ報告書、2013
- 3) 原子力環境整備促進・資金管理センター、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 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 平成 25 年度～29 年度取りまとめ報告書、2018
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 30 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に 関する技術開発報告書、2019
- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター、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 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2020
- 6) 原子力環境整備促進・資金管理センター、令和 2 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 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2021
- 7) 地層処分基盤研究開発調整会議、地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～令和 4 年度）、2020
- 8) 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告書 わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築ー、NUMO-TR-20-03、2021
- 9) 原子力環境整備促進・資金管理センター、令和 2 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 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2022
- 10) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書(第 2 分冊) ーガス移行挙動の評価ー、2013

6. 廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究

◇事業の概要

核燃料サイクル条件の多様化を念頭に、原子力システムの貢献度と負荷を考慮した廃棄物処分における環境影響の定量的な評価を行うと共に、評価指標の導出を目指すこと、また、高燃焼度化、MOX 燃料利用、使用済燃料貯蔵期間長期化などを念頭に、環境負荷低減への寄与と実現性の視点を含めた現実的な MA 核種分離プロセスを提示すること、さらに、核種分離と連動して MA リサイクルを行う高速炉システムにおける廃棄物特性評価に基づき、多様な前提条件に対応する高速炉燃焼計算モデルを高度化することを目的とした本事業は、文部科学省の令和元年度の公募型研究である国家課題対応型研究開発推進事業の中の原子力システム研究開発事業 JPMXD02 19209423 の助成を受けて実施するものであり、安全基盤技術研究開発と放射性廃棄物減容・有害度低減の 2 つの課題募集分野の内、後者に属し、4 年間の予定で研究を行う^{1),2)}。

原子力利用において放射性廃棄物の管理は不可欠であるが、処分対象となる廃棄物の量と性状は発電及びそれ以降の燃料サイクルの諸条件に依存する。同時に、それは処分場のサイズや長期の放射線安全に影響する。放射性廃棄物の減容・有害度低減に関して核種の分離・変換技術の研究が進められているが、廃棄物処分の負荷低減に向けた現実的、且つ有効な対策を講じるためには、発電から廃棄物処分までの分野横断的な視点からのプロセス評価を行うと共に、その効果を評価する指標を持つことが求められる³⁾。

本事業では、放射性廃棄物の発熱と毒性の点からマイナーアクチノイド(MA)、特にアメリシウム(Am)に着目し、その 70~90% 程度の分離(簡素化 MA 分離)を前提として、地層処分場の小型化(面積削減)の実現に繋がる原子力システムを念頭に、廃棄物処分の環境影響、Am の分離プロセス、及び高速炉の燃焼モデルについて研究を進めている^{4)~8)}。3 年目の成果を以下に示す。

◇2021 年度の成果

(1) 廃棄物処分における環境影響評価研究

① 評価及び評価指標の導出(原環センター)

MOX 燃料由来のガラス固化体のインベントリ計算、処分後の核種移行解析とそれに基づく被ばく線量評価、人間侵入シナリオに基づくボーリングコア観察による被ばく線量評価を実施して、地層処分における発熱と放射線影響(動的と静的)の定量評価を行い、本研究の着眼点である環境負荷低減の実現につながる、70% 及び 90% の簡素化 MA 分離を前提とする核燃料サイクル条件の組合せを提示した。そして前年度 UO₂ 燃料由来のガラス固化体での評価結果と合わせて、廃棄物量(処分場面積)と、動的及び静的放射線影響の 3 つの指標は核燃料サイクル諸条件の多様な組み合わせの下での分野横断的な視点からの廃棄物処分における負荷低減の程度を相対的、定量的に比較、表示するものであることを示した。

② 諸量の評価(東京工業大学)

国際原子力機関(IAEA)が公開している Nuclear Fuel Cycle Simulation System (NFCSS)⁹⁾ コードに核燃料サイクルのバックエンド領域の諸量評価機能を拡張し、使用済燃料の再処理、核種分離、地層処分等多様な処理処分条件に対する核燃料サイクルの諸量評価と高レベル放射性廃棄物の崩壊熱及び放射性毒性の評価が可能な新たな Excel プログラムを開発した。ORIGEN2.2-UPJ コード計算とのベンチマークで 0.5% 未満の誤差(RMSE: Root Mean Square Error)で一致することを確認した。また、得られた評価結果を基に、新型炉導入を前提に、その燃料サイクル諸量と放射性廃棄物の負荷に関する評価を行うために、計算コードの機能向上の方法を調査した。

(2) Am 分離プロセスの工学的設計研究

① 分離メカニズムの検証(東京工業大学)

MA 分離プロセス評価に必要な MA の抽出平衡・速度データについて公開文献・報告書の調査、評価を行い、ミキサーセトラ単段抽出プロセスのフローシートの検証、MA 分離プロセスの規模、求められる工学的要件を検討し、簡素化 MA 分離の場合は抽出速度の影響で分離係数が変動し得るなど工学的な留意点を明らかにした。

② 諸量評価に基づく分離度に対応した分離プロ

セスの構築（日本原子力研究開発機構）

日本原子力研究開発機構が開発した MA 分離プロセスである「SELECT プロセス¹⁰⁾」の MA/RE 相互分離工程について PARC-MA コード¹⁰⁾によるプロセスシミュレーションを行い、Am 回収率 99.9%では抽出・洗浄合わせてミキサセトラー40 段を要するところ、本研究での簡素化 MA 分離としての Am 回収率 70%の条件では、抽出 6 段で MA 純度 50%が得られることを明らかにし、核変換システムへの MA 製品の供給条件と Am 回収率の検討結果から、現実的で合理的な MA 分離プロセスの構築可能性を示した。

(3) 多様な前提条件に対応する高速炉燃焼モデルの高度化（北海道大学）

多様な前提条件のもとでの網羅的な高速炉炉心燃焼計算として、移行期高速炉における新燃料の TRU 組成の変動が炉心・廃棄物特性に与える影響及び希土類元素等の随伴の影響を評価した。また、核燃料組成や運転条件の入力により炉心燃焼計算結果と同等の結果を導出する高速炉炉心燃焼に関する燃焼モデルの高度化（代理モデル）を検討すると共に、これまでに整備してきた高速炉炉心燃焼計算ツールの整備・検証を継続した。

以上に加えて、各研究項目間の連携を深めると共に、燃料サイクル全体を俯瞰した客観的、分野横断的な視点から研究を進めるために、外部評価委員会を設置して研究の進捗と課題を共有すると同時に、炉、燃料サイクル、廃棄物処分にに関する議論を継続して実施した。

disposal- An integrated cross-disciplinary approach to diversifying nuclear fuel cycle conditions , Proc. International Conference on Radioactive Waste Management: Solutions for a sustainable Future, IAEA, November 1-5, 2021

- 7) R. Hamada, H. Asano and T. Sakuragi, Environmental impact of radioactive waste disposal in advanced nuclear energy systems; Radiation impact evaluation of nuclide migration and human intrusion for geological disposal considering nuclear fuel cycle conditions, Proc. International Conference on Radioactive Waste Management: Solutions for a sustainable Future, IAEA, November 1-5, 2021
- 8) H. Kato, G. Chiba and H. Asano, Study on the fast reactor system characteristics in the transition period from LWR to FR, Proc. International Conference on Radioactive Waste Management: Solutions for a sustainable Future, IAEA, November 1-5, 2021
- 9) Nuclear Fuel Cycle Simulation System: Improvements and Applications, IAEA-TECDOC-1864, IAEA, 2019
- 10) BAN, Y., et al., "Minor Actinides Separation by N,N,N',N',N'',N''-Hexaoctyl Nitrilotriacetamide (HONTA) Using Mixer-settler Extractors in a Hot Cell", Solvent Extraction and Ion Exchange, **37** 7, 489 - 499, 2019

- 1) 令和元年度国家課題対応型研究開発推進事業「原子力システム研究開発事業」の公募開始について
https://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/1416513.htm
- 2) 令和元年度「原子力システム研究開発事業」募集要項
https://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/__icsFiles/afieldfile/2019/05/22/1416513_01.pdf
- 3) 21 世紀後半に向けた廃棄物管理の選択肢：Pu 利用推進と環境負荷低減型地層処分にに関する研究、(1)～(6)、日本原子力学会 2018 年春の年会、予稿集 3011～3016
- 4) 廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究、(1)～(4)、日本原子力学会 2021 年春の年会、予稿集 3J01～3J04
- 5) 廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究、(5)～(9)、日本原子力学会 2022 年春の年会、予稿集 1H05～1H09
- 6) H. Asano, R. Hamada, T. Sakuragi et al., Study on advanced nuclear energy system based on the environmental impact of radioactive waste

7. 使用済燃料の多様化を考慮したシナリオ評価

◇事業の概要

本事業は、高レベル放射性廃棄物ガラス固化体の基盤技術開発について、使用済燃料や再処理条件の多様化を考慮すると共に、地層処分を含めた核燃料サイクル全体の合理化を図るためのシナリオを検討し、合理的な技術オプションや課題を抽出することを目的に 2019 年度から開始した。

現在、我が国において、使用済燃料は一定期間冷却後に再処理され、発生する高レベル廃液はガラス固化され地層処分される予定である。現状、六ヶ所再処理工場にて年間約 1,000 本のガラス固化体の製造が想定されている。一方、原子力発電所の稼働に関しては、より効率的な燃料利用の点から、高燃焼度化、プルサーマルによるプルトニウムの利用促進が進められている。高燃焼度燃料や使用済 MOX 燃料から発生する廃液もガラス固化する必要があるが、従来のガラス固化体と比べて不純物（モリブデン、白金族元素等）や長寿命かつ発熱性の高いマイナーアクチニド（MA）が多く含まれる。そのため、再処理やガラス熔融のプロセス、ガラス固化体の特性や発生本数、更には地層処分へ影響する可能性がある。これらの課題は、燃料から再処理、ガラス固化、処分まで幅広い技術分野を横断することから、原子力利用のシナリオを適切に設定し、シナリオに基づいて全体最適化の観点からサイクル諸条件の組合せや関連性を検討することが有効かつ重要と考えられる。従って本事業では、ガラス固化体の地層処分を前提とした多様な核燃料サイクル条件を考慮したシナリオの評価に資する国内外の情報を調査、分析、整理し、シナリオを論拠としてガラス固化体の特性や地層処分への影響について検討するものである。

◇2021 年度の成果

2021 年度は、使用済燃料のうち、プルサーマル利用による MOX 燃料を主な対象とし、ガラス固化及び地層処分に対する影響、課題等について検討した。

(1) シナリオ検討に基づくサイクル条件多様化評価システムの検討

第 6 次エネルギー基本計画に基づいた原子力利用のシナリオについて検討した。そのため、これまでに発生した使用済燃料や今後発生すると予測される使用済燃料の冷却期間等の条件について、特に再処理シナリオを仮定して詳細に検討した。検討結果はガラス固化体の合理的な廃棄物充填率等に活用し、シナリオにおける廃棄物発生量（減容化）、貯蔵量、処分場の評価に反映させた。

(2) 再処理、ガラス固化、地層処分に関する情報調査

国内外における MOX 利用および使用済 MOX 燃料対策に関連した再処理、ガラス固化、地層処分に関する研究開発、事業、政策の状況を調査し、

(1) のシナリオの論拠や蓋然性に反映させた。

(3) パラメータスタディによる核燃料サイクル諸条件や MA 分離等の技術オプションの重要因子の特定・影響

MOX ガラス固化体の発熱低減対策としての MA 分離や UO_2 /MOX 混合を適用させたガラス固化体の地層処分への適合性の観点から、燃焼計算や処分場の熱伝導解析手法を用いた評価を行った。特に、処分場面積を低減させるため、MA 分離と廃棄物充填率の関係を整理し、今後の技術開発課題である MA 分離割合やマトリクスの改良による高充填化の目標・効果について整理した。

(4) 課題の抽出、整理

(3) で検討したガラス固化体の充填率や MA 分離の技術開発目標に対して、地層処分の不確実性や柔軟性の影響について検討した。具体的には、岩盤の熱伝導率や処分深度の分布を考慮した解析を行い、ガラス固化体の発熱量や処分場面積、MA 分離への影響を評価した。

本成果は経済産業省資源エネルギー庁「令和 3 年度放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究事業（JPJ010599）」の一部である。

8. 固化体のハイブリッド化及び処分概念・安全評価に関する検討

◇事業の概要

本研究は、「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」(英知事業)のうち「課題解決型廃炉研究プログラム」として採択された「福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価」(本事業)の一部として実施した。本事業では、福島第一原子力発電所における汚染水処理で発生した2次廃棄物の安定固化や廃棄体化研究に対する、最終処分とその安全評価等、社会実装に関する検討を行う。汚染水処理やデブリ処理で発生する固化が難しく長半減期で低収着性のため長期の被ばく線量を支配するヨウ素(I)と、潜在的有害度が高く長期的な発熱源かつ α 核種であるマイナーアクチノイドを含めたアクチノイドに特に注目し、前者はAgI、I-アパタイト、アクチノイドを模擬した希土類元素(RE)はアパタイトやモナザイトといった鉱物に固化する。これらを1次固化体とし、詳細な合成手法と固化体の構造、物性、浸出性、耐放射線性、表面物性変化等を最新の材料科学の観点・手法を用いた実験、計算アプローチにより徹底理解する。この1次固化体を稠密かつ耐食性に優れ、特性評価モデルに実績を有するSUSやジルカロイといったマトリクス材料中に熱間等方圧加圧法(HIP)等で固定化し、廃棄体をハイブリッド固化体とする。これにより核種の閉じ込めの多重化に加え、安全評価に必要な長期評価モデルの信頼性も向上させた実効性・実用性のある廃棄体とする。1次固化体とマトリクスとの相互作用を理解した上で、マトリクスの耐食性、環境、他の人工バリア構成等を考慮した処分概念を具体化する。潜在的有害度及び核種移行の観点から処分後の被ばく線量評価を行い、安全な廃棄体化手法及び処分方法を構築することを目的とする。以上によりこれから現実的な課題として廃棄体の合理的な処分の社会実装に向けた検討を本事業の目的としている。そのうち、本研究では固化体のハイブリッド化とハイブリッド固化体に適した処分概念の検討、さらに処分後の安全評価の実施を目的とする。

◇2021年度の成果

(1)ハイブリッド固化体の検討

まず、ハイブリッド化に適した金属マトリクス材料の調査を行った。金属マトリクスには耐食性だけではなく、処分の安全評価へ短期間で実装できる材料選定が重要である。そのため、被覆管材料であるジルコニウム合金やエンドピースと呼ばれる構造材に使用されるステンレス鋼を選定した。これらは、物量が多く安全評価の観点からその腐食挙動が重要であることから研究例が多く、その高い耐食性が示されているとともに、地層処分の安全評価において、その腐食速度が実装されている。

次に、予備検討としてリファレンスとなるハイブリッド固化体を試作した。単純なヨウ素化合物のうち一般的な環境において安定性に優れ、また、廃棄物含有率が高いヨウ化銀(AgI)を1次固化体のリファレンスとして用いた。ハイブリッド化するマトリクスは既述のように、ステンレス鋼(SUS)とジルコニウム(Zr)とした。金属粉末とAgI粉末を混合したものを粉末冶金法のひとつである熱間等方圧加圧法(HIP)で固化処理し、ハイブリッド固化体を作製した。SUSマトリクスではインゴット化した金属中にAgIを健全に閉じ込めることができた。一方で、Zrの場合はAgとZrが合金を生成し、Zrマトリクスの健全性が損なわれていた。これはAgI量が多く、かつ、比表面積が大きい粉末試料ではZr-Agの反応が促進されたと考えられることから、AgIを造粒することで解決できる可能性がある。

(2)処分概念・安全評価の検討

放射性ヨウ素等を含む廃棄物処分の参考事例として、TRU廃棄物や中深度処分等の既往の処分技術について調査した。具体的には、地質環境条件、人工バリア構成、核種移行パラメータについて整理した結果、福島由来の廃棄物へ適用できる可能性が示唆された。さらに、公開情報に基づいて福島第一原子力発電所事故時の燃料に含まれるヨウ素量を算出した。ヨウ素をすべてAgIと仮定すると、ハイブリッド固化体(充填率10 wt%)の発生量は約110 dm³と評価することができた。

本成果は文部科学省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業(福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価(JPJA21P21460873))」の一部である。

9. その他の地層処分に関する調査研究

その他、高レベル放射性廃棄物、TRU 廃棄物の地層処分に関する以下の調査研究を行った。

(1) HIP（熱間等方圧加圧）法による TRU 廃棄物の新しい処理・固化技術の研究

ヨウ素を吸着した吸着材（廃銀吸着材）とジルカロイとを熱間等方圧加圧（HIP）処理することによって、ヨウ素の放出を抑制する固化体を製造することを目的に、ジルコニウムの HIP 処理条件について検討し、分析結果から金属マトリクスの緻密化・安定化の確認により、ヨウ素閉じ込め機能を有する固化体作製に見込みを得ることができた。

(2) 多様な核燃料サイクル条件を考慮したバックエンド対策の最適化に関する研究

核燃料サイクルの多様性と地層処分システムの成立性に留意し、サイクル諸条件の変動や多様性に基づいて、選択肢となる技術条件（使用済燃料特性、再処理方法、ガラス固化体特性など）、条件範囲（燃料の燃焼度・冷却特性、再処理での分離回収核種、ガラス固化体の廃棄物含有率・発熱量など）、処分場の負荷影響の検討をとおして、バックエンド対策の最適化に資する技術選択肢について検討を進めた。特に、分離 MA の高速炉利用に伴う課題や廃棄物対策等について検討した。

(3) 代替粘土系材料を用いた埋め戻し材に関する研究

国の基盤研究や原子力発電環境整備機構（NUMO）の技術開発で整備される埋め戻し材の材料特性に係る基盤情報を補完・拡充することを目的として、代替粘土系材料及び模擬掘削土として、碎石・砕砂（深成岩類、堆積岩類）や一般購入土などを用いた混合土の締固め試験と透水試験を実施し、埋め戻し材としての適用性を確認するためのデータを取得して取りまとめた。

(4) 地下の拘束条件下での鉄の腐食膨脹に関する情報収集

地層処分等で想定される、地下での地圧・水圧

や緩衝材の膨潤圧等で拘束され、かつ、周囲の空隙がほとんど無い条件下での鉄系材料の腐食速度に関しては、これまでほとんど取得されてきていないことから、拘束条件下での鉄系材料の腐食について調査し、その影響について再検討することを目的として、文献調査を実施した。その結果、拘束条件下での鉄の腐食に関するデータがほとんどないことを確認した。

(5) TRU 等廃棄物の地層処分実現に向けた研究課題の調査

TRU 等廃棄物の地層処分に関して、多様な地質環境に応じた設計、製造、施工技術の適切かつ迅速なオプション選択及び柔軟性を高めることへの貢献を目的とし、研究課題に資する技術オプションの抽出と情報の整理を行った。

Ⅲ．放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

1．放射性廃棄物海外総合情報調査

◇事業の概要

放射性廃棄物（高レベル放射性廃棄物のほか、中・低レベル放射性廃棄物や原子力事故で発生した放射性廃棄物も含む。）の処分に係る技術情報として、国際機関における合意形成文書等の検討・策定状況、欧米やアジアの諸外国における処分政策や制度、研究開発、サイト選定（選定基準を含む）、処分事業・技術評価等の状況、法制度についての情報・データを収集し、原典、背景情報、主要文献の翻訳等から構成される総合的なデータベースとして整備を行うとともに、収集した情報等に基づいてホームページ、技術情報冊子等を通じて外部に向けて発信し、関係者間での情報共有と知識普及、幅広い国民各層への理解促進を図った。

なお、本事業は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「平成30年度放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物海外総合情報調査）（国庫債務負担行為に係るもの）」により実施したものである。

◇2021年度の成果¹⁾

(1) 諸外国における廃棄物処分の現状に関する海外情報の収集と総合的なデータベースの整備

欧米諸国の高レベル放射性廃棄物等の情報については、フィンランド、スウェーデン、フランス、スイス、英国、米国、カナダ、ドイツ、ベルギー、スペイン、ロシア等を中心に、各国の処分実施主体等からの直接的な情報収集も活用しつつ、法制度の整備状況、サイト選定のプロセス、選定基準、許認可申請・発給の状況、処分技術情報、情報提供・広報、社会的意思決定方策、地域振興方策、資金確保関係、関係する訴訟等の情報を収集した。アジア諸国に関しては、韓国、中国、台湾における放射性廃棄物処分の関連情報として、法制度の整備状況とともに、処分概念、サイト選定等の技術情報、資金確保関連、地域振興方策等の情報を収集した。さらに、原子力発電規模が小さい国々で検討されている国際共同処分の

状況に関する情報の収集を行った。

以上の調査に加えて、その他の個別情報の調査として、海外主要国における放射性廃棄物処分の関連法規制の詳細や、各国関係機関が発行する主要報告書等の調査を行った。

また、国際機関として、経済協力開発機構／原子力機関（OECD／NEA）、国際原子力機関（IAEA）、欧州連合（EU）等を対象とした最新動向を調査した。

以上の調査により得られた情報に加え、関連する法規制文書や関連報告書等をデータベースとして整備するとともに（図-1）、データベースの維持・管理、改良や機能拡充等を実施した。



図-1 データベース管理システムの画面例
（海外機関との情報交換協定等により限定的な利用形態を取っている）

(2) 情報の整理・発信・普及

上記(1)でデータベースとして整備した各種情報等を活用して、国の政策立案に必要な情報の取りまとめを行うとともに、一般への情報提供、関係者間での情報共有、知識普及を目的として、ウェブサイト、技術情報冊子等を整備した。

ウェブサイト「諸外国での高レベル放射性廃棄物処分」(https://www2.rwmc.or.jp)では、諸外国での進捗状況の理解を深めることを目的として、原子力発電の動向や使用済燃料／高レベル放射性廃棄物の発生や貯蔵など、処分前管理に関する情報を充実させた（図-2）。

上記のウェブサイトにおいては、諸外国における地層処分計画と技術開発、処分事業に関わる制度・実施体制、処分地選定の進め方と地域振興、処分事業の資金確保、安全確保の取り組み・コミュニケーションの観点から最新情報と解説を掲載した。また、『海外情報ニュースフラッシュ』として、諸外国の高レベル放射性廃棄物処分を中心としたニュース記事を44件掲載した（記事タイトルの一覧は、資料V-4を参照）。



図-2 ウェブサイト「諸外国での高レベル放射性廃棄物処分」の閲覧イメージ
<https://www2.rwm.or.jp>

技術情報冊子の整備として、①『諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について(2022年版)』(図-3:左)と②『諸外国における放射性廃棄物関連の施設・サイトについて(2022年版)』(図-3:右)の2種類の資料を作成した。

技術情報冊子①(2022年2月発行)は、諸外国における高レベル放射性廃棄物の地層処分の進捗状況に関する情報を体系的に整理・解説することにより、地層処分の理解促進に資することを目

的とした資料である。誰でも利用できるように難しい表現をできるだけ避け、諸外国の状況や多様な取り組みがわかるように配慮している。具体的には、地層処分概念や施設設計、処分事業の計画や進捗のみならず、法制度、資金確保、サイト選定の進捗や地域振興などの幅広い観点から、当該国での地層処分事業の特徴について解説している。2022年版では、主要8カ国(フィンランド、スウェーデン、フランス、スイス、ドイツ、英国、カナダ、米国)の各々を各編とした構成として、また、中国、韓国、ロシアの地層処分に関する動向を短く解説したページを付録としてまとめ、2021年末時点の最新情報を反映して作成した。

技術情報冊子②(2022年3月発行)の改訂では、欧米8カ国(フィンランド、スウェーデン、フランス、スイス、ドイツ、英国、カナダ、米国)に、中国、韓国、ロシアを短く解説したページを加え、低中レベル放射性廃棄物を中心とした放射性廃棄物の管理概要や処分関連施設・サイトの概要に関する情報を最新化した。また、各国における放射性廃棄物の区分、放射性廃棄物処分の方針、処分の実施体制の項目を新たに設けて解説を加え、記載内容を充実させた。

これら2つの冊子のPDF版をウェブサイト「諸外国での高レベル放射性廃棄物処分」に掲載した。



図-3 2021年度に整備した技術情報冊子

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成30年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物海外総合情報調査報告書(2021年度分)、2022

2. 放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務

2-1 事業の全体概要

我が国では、原子力発電の利用に伴って既に放射性廃棄物が発生しており、その処理処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物の地層処分や TRU 廃棄物をはじめとする低レベル放射性廃棄物の処理処分等に係る政策立案や研究開発において、国や関係機関、処分実施主体等の役割分担のもとで進めていくことが重要である。また、地層処分事業は 100 年規模で継続されるものであり、長期にわたる人材の確保・育成が重要となる。

これらの背景を踏まえて、本事業では、高レベル放射性廃棄物の地層処分を中心とした萌芽的・先進的な研究開発を実施するとともに、その結果について処分実施主体が将来処分事業を進めるに当たり必要な技術基盤として整備することを目的としている。なお、本事業は、萌芽的・先進的な研究開発の実施を通じた幅広い分野の研究者・技術者の人材育成に資することを念頭に 2019 年度から 4 カ年で実施しているものであり、2021 年度はその 3 年目にあたる。

具体的な実施内容は、以下の 2 つである。

- 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理・成果の取りまとめ等
- 人材育成プログラムの実施・作成

以降に上記の 2 項目の実施内容の概要を示す。

(1) 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理・成果の取りまとめ等

本事業では、地層処分に関する萌芽的・先進的かつ重要な研究開発テーマについて、大学等の研究機関に委託し実施するための進捗管理と成果の取りまとめや所定の研究開発資金の配賦を実施している。具体的には、2020 年度に選定し、2021 年度から 2 カ年で実施する次の 7 つの研究開発テーマについて、地層処分に係る地質環境、工学技術、安全評価等の専門的な知識を有する委員からなる評価委員会を設置し、研究テーマの実施状況についてチェックアンドレビューを

行った。

- ① 沿岸部に近接して施工された処分パネルの掘削時から操業時までの健全性評価に関する研究（研究者：山口大学 林 久資）
- ② 長期的変質現象を考慮したベントナイト系緩衝材の自己修復性評価手法の構築およびベントナイトの膨潤特性における膠結作用に伴う年代変化の定量評価（研究者：早稲田大学 伊藤 大知）
- ③ 化学的変質によるベントナイトの性能劣化が天然バリアの物性に及ぼす影響評価とそのモデル化（研究者：鳥取大学 河野 勝宣）
- ④ ベントナイトのセメンテーション現象のナチュラルアナログ研究（研究者：北海道大学 菊池 亮佑）
- ⑤ 粘土鉱物におけるアクチノイド系列放射性核種についての吸着・脱離特性および存在状態の解明（研究者：筑波大学 向井 広樹）
- ⑥ 数値解析と実測に基づく結晶質岩体を対象とした亀裂部一岩体基質部の複合的地下水理構造モデルの構築（研究者：京都大学 久保 大樹）
- ⑦ 隆起・侵食の評価技術の高度化：(U-Th)/He 年代測定法の年代標準試料の探求（研究者：日本原子力研究開発機構 福田 将真）

評価委員会については、年 2 回実施し、各委員会において、年間計画（第 2 四半期中に実施）、事業の成果（第 4 四半期中に実施）を確認した。

各研究開発テーマの概要と 2021 年度の成果概要は 2-2 を参照のこと。

(2) 人材育成プログラムの実施・作成

地層処分事業の着実な遂行に向けては、研究開発分野並びに地層処分の実施主体ともに、地質学、土木工学や放射線化学等、幅広い専門的な知識を有する人材（ジェネラリスト）が必要不可欠である。しかし、我が国の当該分野におけるジェネラリストの育成プログラムは存在しない。このため、本事業では、長期にわたる地層処分事業を、研究開発並びに事業実施の両側面から支える人材を育成するプログラムの調査・作成を実施するが目的である。

具体的には、以下の方針などに従い、地層処分

に係る講習会や研修会等の実施、人材育成プログラムの更新を繰り返し行い、4か年の事業実施期間中に、学習資料や学習指導要領のような形式の最終的な人材育成プログラムを作成する。

- 講習会や研修会は年間 3～4 日程度実施すること（受講者数としては、20～40 名を想定）。
- 毎年度、講習会や研修会の結果についてアンケート等により理解度等を把握し、その結果に基づき問題点の洗い出し、解決策を立案すること。
- 上記結果や実施内容に関する有識者委員会からの助言に基づき、個々に専門性を有する受講者に対する最適なジェネラリスト育成プログラムを作成・改善すること。

本事業の初年度であった 2019 年度には、上記方針に従い、以下の機関の有識者からなる「地層処分スキルアップ研究会」を設置し、検討を開始した。

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

また、2019 年度には、「地層処分スキルアップ研究会」での議論に基づき、同研究会の構成機関の講師の派遣等の協力を得たうえで、人材育成セミナーを開催した。同セミナーは、講師を含め約 60 名の参加で、地層処分の主要 3 分野である、地質環境調査、工学技術、安全評価をカバーする講義に、技術コミュニケーションに関する招待講演やグループワークで構成した。

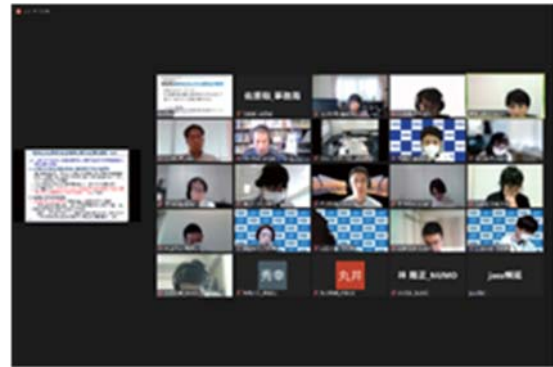


図-1 2021 年度オンラインセミナーの様子

2020 年度は、2019 年度の実施内容を踏まえ、地層処分にかかわる学習者が独学で学ぶことができるような教材の作成を開始するとともに、アクティブラーニング形式を取り入れた、受講者が十数名程度の小規模の人材育成セミナーを開催した。

2021 年度は、2020 年度のセミナーを踏襲し、アクティブラーニング形式でのセミナーをオンライン形式で開催した（図-1）。また、引き続き教材の開発を進めた。

2021 年度の実施内容等の詳細は 2-3 を参照のこと。

なお、本事業は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「平成 31 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務）（国庫債務負担行為に係るもの）」により実施したものである。

2-2 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理・成果のとりまとめ等

◇2021 年度の成果¹⁾

(1)進捗管理・成果のとりまとめ等

2020 年度に選定した 7 件の研究開発テーマについて、2021 年 4 月より 2 ヶ年の予定で研究を開始し、進捗管理と成果の取りまとめや所定の研究開発資金の配賦を実施した。具体的には、大学等の有識者で構成される評価委員会を設置し、2021 年度の研究開発内容・進捗状況に関するチェックアンドレビューを中間報告（9 月）及び最終報告（2 月）の 2 回、オンライン会議形式にて実施した。また、研究実施者との間で電子メールやオンライン会議による意見交換等を行うことによる進捗管理も実施した。

各研究テーマの概要と 2021 年度の成果概要を以下に示す。

①沿岸部に近接して施工された処分パネルの掘削時から操業時までの健全性評価に関する研究（研究者：山口大学 林 久資）

地層処分施設の坑道は閉鎖までに数十年の期間にわたり維持管理が必要であり、また施設が沿岸部に建設された場合は地下水の塩分が影響を及ぼす可能性がある。本研究は、地層処分施設の処分坑道を対象とし、塩水系地下水を伴う空洞内湧水の影響も含めた地下空洞と処分施設の力学的な長期安定性を解明することを目的としている。

2021 年度は、地下坑道と同様の工法で施工・維持管理されている道路トンネルの健全性評価データを収集・分析した。また、坑道施工時の支保工に発生する支保内圧や、支保工が腐食によって劣化した場合に及ぶ影響を明らかにするために、数値解析による坑道掘削解析を実施した。さらに、沿岸海底下で予想される高湿度・塩分環境下における、坑道の支保工の腐食挙動を明らかにするために、坑道での使用が想定されるレールを対象とした恒温恒湿腐食試験を行った。

道路トンネルの健全性評価データ分析については、日本国内で国土交通省などにより詳細に調査されているトンネルから無作為に 52 本抽出し、漏水や外力が発生したトンネルの分析を行った。

火成岩、堆積岩、変成岩の岩種それぞれで 50～60%程度の漏水発生があり、岩種による違いは確認できなかった。トンネルに生じる変形の外力については、67%のトンネルで措置が不要な一方で、33%のトンネルにおいては補修等何らかの対策が必要な状態だった。今後は地質や土被り厚さ等が変形に及ぼす影響について検討することが課題となる。

坑道掘削解析については、幌延深地層研究センター地下 350m 地点の西連絡坑道を模擬したモデルを設定し、坑道掘削による坑道変状を確認した。掘削時の地山の変状については、第 2 次取りまとめの軟岩系岩盤データセットの上限値、平均値、下限値をそれぞれ入力データとして用いた結果、内空変位は下限値を用いた場合が最も大きくなり、上限値の場合が最も小さくなった。また、下限値の変位解析結果が西連絡坑道の掘削時に測定された実際の変位測定結果と近いものとなった。

塩害に関する試験については、2021 年度は予備実験を実施し、レール直上から人工海水噴霧によって付着する塩分量を計測した。その結果、霧吹きを 7 日毎に吹きかけた場合の日平均飛来塩分量が 0.2 mg/dm²/day となることを確認した。また、腐食試験を実施するにあたって、レールの初期質量とさび厚の測定を行い、初期さび厚はレール両端部が大きいことが確認できた。今後は、恒温湿度器内で腐食試験を実施し、レールの減耗量を調べて腐食挙動についての知見を得ることが課題となる。

②長期的変質現象を考慮したベントナイト系緩衝材の自己修復性評価手法の構築及びベントナイトの膨潤特性における膠結作用に伴う年代変化の定量評価（研究者：早稲田大学 伊藤大知）

本研究では、ベントナイト系緩衝材の膠結作用に伴う変質現象をベントナイト鉱床の生成過程の一部とみなし、ベントナイト原鉱石を用いて、緩衝材の膠結作用に伴う変質とそれに伴う特性変化を定量的に評価する。さらに、それらを考慮した緩衝材の自己修復性評価手法を構築・提案することを目的とする。

2021 年度は、新潟県白崎産・新潟県細越産・青森県黒石産の原鉱石について密度やモンモリロ

ナイト含有率等の基本的性質を取得するとともに、不攪乱試料・再構成試料の膨潤圧・膨潤変形実験を行った。また、月布産、及びアメリカ Ten Sleep 産原鉱石の不攪乱試料・再構成試料について高拘束圧の膨潤変形試験を実施し、乾燥密度－拘束圧関係のデータを拡充するとともに、自己修復性評価手法のひな型を構築した。

白崎産・細越産・黒石産のベントナイト原鉱石について、不攪乱試料・再構成試料の膨潤圧試験を行った結果、再構成試料と比較して不攪乱試料の膨潤圧特性は膠結作用の影響により約 1/2 以上低下する結果（図-1）となり、先行研究と同様であった。膨潤変形特性については、特に白崎産・細越産原鉱石の不攪乱試料において一次元膨潤変形率が著しく低くとどまっている傾向が見られた。

高拘束圧の膨潤変形特性については、月布産原鉱石・Ten Sleep 産原鉱石の不攪乱試料・再構成試料を用いて高拘束圧（100・500 kPa）下での膨潤変形量を測定した。その結果をもとに拘束圧－乾燥密度関係として整理し、膨潤圧実験や低拘束圧下の膨潤変形実験結果と比較したところ、拘束条件に依らず不攪乱試料・再構成試料のいずれも拘束圧と乾燥密度の間に一意な関係があることが示された。

自己修復性評価については、これまでに得られた各種膨潤特性実験結果に基づいた拘束圧－乾燥密度関係と、緩衝材の状態変化シナリオ（操業初期→再冠水→膠結作用発生→オーバーパック腐食）を組み合わせることで緩衝材の自己修復性評

価手法の構築を行った。本手法をもとに、拘束圧－乾燥密度データベースの更なる高度化や、より妥当な緩衝材の状態変化シナリオの想定を通して、緩衝材の自己修復性に関する長期的な膠結作用を考慮した設計が可能となる。

③化学的変質によるベントナイトの性能劣化が天然バリアの物性に及ぼす影響評価とそのモデル化（研究者：鳥取大学 河野 勝宣）

地層処分において、岩盤亀裂へのベントナイト系材料の侵入現象により岩盤の透水性などが大きく変化し、長期安定性に影響を与える可能性がある。本研究では、岩盤亀裂へのベントナイト系材料の侵入量を予測し、また、それに対する地下水の化学成分の違いの影響を明らかにする。特にベントナイト系材料の劣化に伴う岩盤亀裂充填性のモデル化を行う。さらに、人工バリアと天然バリアの相互作用関係から、化学的作用によるベントナイトの性能劣化と岩盤の亀裂閉塞による性能向上の関係性を明らかにすることを目的とする。

2021 年度は、締固めたベントナイトを模擬亀裂へ侵入させる膨潤・充填性同時試験を行った。試験においてベントナイト浸漬に用いる溶液を、セメント系材料や沿岸域地下水等を考慮した各種溶液環境条件とし、それらが膨潤や侵入挙動に及ぼす影響を確認した。また、膨潤を伴う緩衝材（ベントナイト）の亀裂への侵入量を予測する解析モデルの構築を行った。さらに、化学的作用を促進させたベントナイトで充填された亀裂を含む岩石の透水試験のための試験装置の作成と予備試験を実施した。

ベントナイト試料の膨潤・充填性同時試験では、浸漬させる溶液の種類によってベントナイトの膨潤圧と侵入距離に違いが見られ、精製水に浸漬させたベントナイトの膨潤圧と侵入距離が最も高く、高アルカリや塩水系溶液の場合は膨潤・侵入距離とも小さくなることが分かった。特に、KOH 水溶液、NaOH 水溶液及び $MgCl_2$ 水溶液については、膨潤圧も大きく低下し、さらに、ほとんど隙間に侵入しなかった。

ベントナイト試料の岩石亀裂充填性のモデル化では、ベントナイトを高粘度の流体と仮定し、先端が閉口した亀裂へ侵入する流体の挙動を対象とした解析モデルを構築した。また、亀裂中は

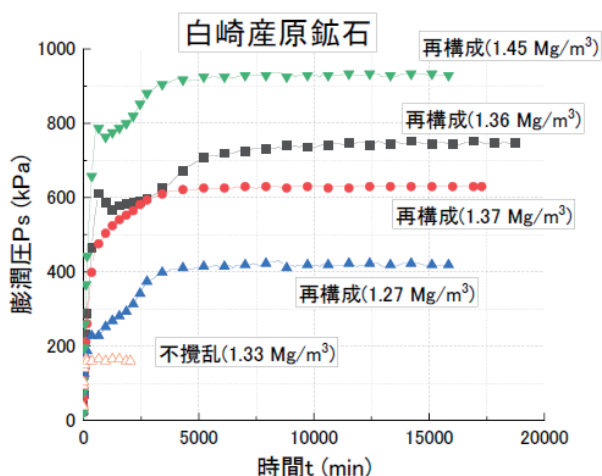


図-1 白崎産原鉱石の膨潤圧の経時変化
（図中の数値は供試体乾燥密度）

高湿度環境を想定し、この環境帯により気固界面のベントナイトの膨潤を固相の封入流体吸収現象と見なして解析モデルに組み込んだ。解析モデルを用いて、膨潤試験実験値の傾向の把握と、ベントナイトの侵入挙動における影響因子の検討を行った結果、ベントナイトの亀裂充填には、浸透による初期段階では膨潤圧及び亀裂幅による影響が支配的であることが示唆された。

岩石の透水試験装置の製作と予備試験では、最初に低透水性岩石供試体に適用できる定水位型透水試験装置を製作し、封圧 1~12 MPa の範囲で稲田花崗岩の透水係数を測定した。その結果、封圧の増加に伴う透水係数の低下傾向が既往研究の結果と類似し、透水係数の値も既往研究と同程度であった。このことから、製作した定水位型透水試験装置は、トランジェントパルス法と同様に低透水性岩石の透水性を評価することが十分可能であり、 10^{-5} m/s~ 10^{-14} m/s の範囲における岩石の透水性を評価することが可能であることが示された。

④ベントナイトのセメンテーション現象のナチュラアナログ研究（研究者：北海道大学 菊池 亮佑）

人工バリアの一つとして考えられているベントナイト緩衝材中に含まれる膨潤性のモンモリロナイト鉱物は、地層処分環境において、粒子同士の固着が進行する現象、すなわちセメンテーションが発生し、膨潤性能に影響を及ぼす可能性が考えられる。本研究では、山形県月布鉱山から得られる複数のベントナイト原鉱石を、長期間天然環境においてセメンテーションを被った緩衝材のアナログ物質としてとらえ、ベントナイト原鉱石のセメンテーション物質の同定とその多様性を調査し、膨潤圧低下といった基本特性に影響を与えるメカニズムやセメンテーションの進行過程について検証を行うことを目的とする。

2021 年度は山形県月布鉱山周辺での野外調査及び試料採取を行い、全岩化学組成や粉末 X 線回折による主要構成鉱物を分析した。また、粉碎前の原鉱石の岩石組織やセメント物質を明らかにするために、走査型電子顕微鏡あるいは透過型電子顕微鏡による観察を行った。さらに、各ベントナイト層が続成作用時に経験した温度や、母岩と

なった火山灰の化学組成などの地球化学的パラメータの推定をするため、微量元素や酸素水素同位体比の分析も行った。

野外調査により、月布鉱山の含ベントナイト褐色硬質頁岩部層のうち、背斜軸を挟んだ 2 地点（梅ノ木田、川向）において主要なベントナイト原鉱石を収集した。採取した試料について、粉末 X 線回折による分析をしたところ、ベントナイトの試料はス멕タイトと石英が主体である一方、長石や沸石、黄鉄鉱などのピークも確認された。

月布ベントナイト鉱床の岩石学的分析及び走査型電子顕微鏡あるいは透過型電子顕微鏡による観察から、原鉱石を固結させている主要なセメント物質はシリカであることが示唆された（図 2）。微粒子状のシリカは、石英が主体で一部アモルファスシリカが確認された。また、シリカ微粒子はモンモリロナイト端面と接合する組織を呈していた。

蛍光 X 線分析により全岩化学組成を求め、続成過程における変質時に移動しないと考えられる微量元素に基づいて、ベントナイトの材料となった火山灰の化学組成の推定を行った結果、梅ノ木田抗側及び川向抗側の一部の層のみが安山岩質に分類されたが、その他のベントナイト及び凝灰岩試料は流紋岩質からデイサイト質のマグマを由来とする火山灰から生成されたと推定された。

経験温度推定のために酸素水素同位体比の測

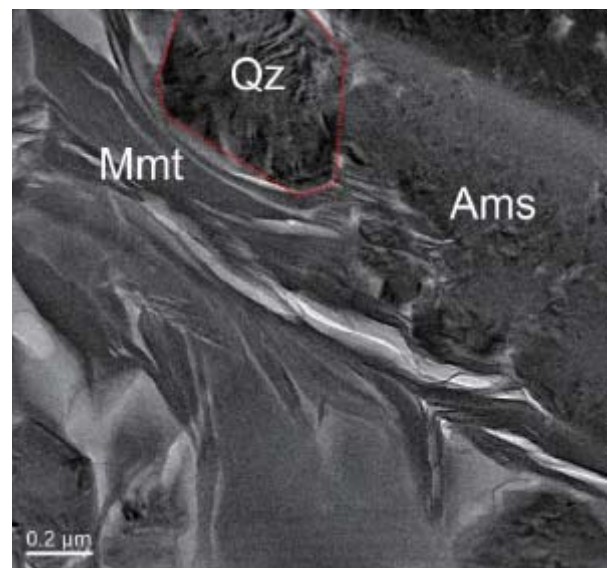


図-2 透過型電子顕微鏡によるモンモリロナイト（Mmt）と微細な石英粒子（Qz）、アモルファスシリカ（Ams）の境界部分における組織像

定を実施し、水素同位体については標準試料やベントナイト試料から安定した同位体比を得られた。一方で、酸素同位体についてはケイ酸塩鉱物からの CO ガスの生成効率が十分でなく、酸素同位体比を得るためには実験手法に改良の余地があることが分かった。

⑤粘土鉱物におけるアクチノイド系列放射性核種についての吸着・脱離特性及び存在状態の解明（研究者：筑波大学 向井 広樹）

高レベル放射性廃棄物の地層処分にに関して、ガラス固化体に含まれている核種の中でアメリカウム (Am-241)、ネプツニウム (Np-237) といった潜在的有害度が高いアクチノイド系列の放射性核種の環境中での挙動に関する既往研究は比較的限られている。本研究ではアクチノイド系列放射性核種の環境中での挙動について理解するため、特に各種の粘土鉱物におけるこれらの元素の吸着・脱離能や存在状態について明らかにすることを目的とする。

2021 年度は、Am のアナログとしてユウロピウム (Eu) を用いて、4 種類の粘土鉱物（雲母、ハイドロバイオタイト、カオリナイト及びモンモリロナイト）に対して Eu 濃度、及び pH を変化させて吸着実験を行った。また、Eu を吸着させた試料に対して脱離試験を行った。さらに、吸着された Eu の存在状態について、電子プローブマイクロアナライザ (EPMA) や走査型、透過型電子顕微鏡 (SEM、TEM) を用いた観察・分析を行った。

各粘土鉱物に対して、Eu 濃度を $10^{-4} \sim 10^{-6}$ M の範囲、また pH3~9 の範囲で吸着実験を行った。その結果、各粘土鉱物に対する Eu 吸着率は pH が高くなるにつれて上昇する傾向となった。また、Eu 濃度が低い試験においては、より高い吸着率を示す結果となった。

Eu の脱離実験においては、黒雲母、ハイドロバイオタイトからほとんど Eu が脱離せず、これらの鉱物において Eu が強く固定されていることが示唆された。一方で、カオリナイトからの Eu 脱離は大きかったため、カオリナイト粒子表面に対しては Eu が弱く吸着していることが示唆された。

Eu が吸着されたハイドロバイオタイト、黒雲母に対して EPMA、TEM による観察・分析を行ったところ、それぞれ粒子の端部付近に Eu が濃集していることがわかった。さらにハイドロバイオタ

イトでは粒子の層間にも一部 Eu が侵入していることが観察された。これらの結果から、鉱物の端部や層間などの吸着サイトにおいて Eu が強く固定されていることが示唆された。

⑥数値解析と実測に基づく結晶質岩体を対象とした亀裂部一岩体基質部の複合的地下水理構造モデルの構築（研究者：京都大学 久保 大樹）

地層処分施設周辺の地下水流動の把握に係る地下水理構造モデルでは、断層や透水性亀裂が重視されるが、長期の時間スケールを対象とする場合に、マイクロクラックや鉱物粒界で生じる岩体基質部の透水性が広域地下水流動に及ぼす影響については不明な点が多い。本研究は、亀裂部と岩体基質部の水理特性を統合した水理構造モデルを構築することを目的とする。特に亀裂構造が重要な要素となる結晶質岩体を対象とし、亀裂モデリング手法の開発と、岩体基質部における透水性の定量化手法を数値解析と実測を通して実施する。

2021 年度は、既存の地球統計学的手法を用いた亀裂シミュレーションプログラム GEOFRAC について、解析時間の短縮や操作性の向上を目的としたコードの改良を行った。また、岩石基質部の透水性の計測に使用するプローブ型浸透率測定器（パーミアメータ）の改良と検証試験を実施し、測定値のばらつきや、試料表面の状態によるガスリークなど測定精度について検討した。さらに、岐阜県瑞浪地域において日本原子力研究開発機構瑞浪超深地層研究所における大深度ボーリング調査で取得された水理試験データとボアホールカメラによる観測亀裂データの整理を行い、その統計的特徴について再検討を行った。

GEOFRAC プログラムについては、計算時間を短縮するようにコード改良を行った。改良後のコードを用いて検証を目的とした解析を実施した。解析では、仮想的に設定したボーリング孔に現れる亀裂データに基づいて GEOFRAC モデルを作成し、発生させる亀裂面や、ボーリング孔の条件を変更することにより、亀裂密度分布と方位分布を求めた。亀裂傾斜に関して検証した結果、亀裂面の方向性とボーリング掘削方向の関係がモデリングの妥当性に大きな影響を与え、傾斜掘削の導入によって改善できることが確かめられた。

プローブ型浸透率測定器の改良については、プ

ローブ先端と試料表面の計測時の密着に際しガスリークが発生しないように加工を行い、また、低透水試料の計測が可能となるようにパーミアメーターの圧力センサを交換した。改良した測定器を用いて土岐花崗岩のボーリングコア試料を用いて計測した結果、間隙率と浸透率の間に明瞭な正の相関関係が確認できた（図3）。

瑞浪地域の水利データの再整理については、全19孔の大深度ボーリング孔で得られている水利試験値（透水係数）とその試験区間の亀裂観測データを分析した。その結果、土岐花崗岩体の透水性は単純な亀裂本数の大小のみで決定されず、亀裂の配向性や性状によって岩体の透水性に与える影響が大きく変化することが示唆された。

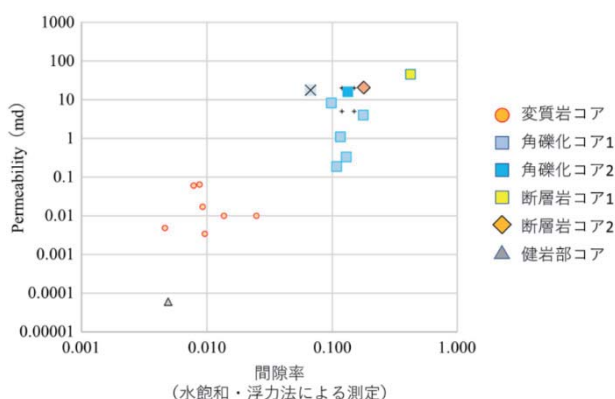


図-3 パーミアメーターによる各種土岐花崗岩の浸透率と間隙率の比較（横軸：間隙率、縦軸：浸透率）

⑦隆起・侵食の評価技術の高度化：(U-Th)/He 年代測定法の年代標準試料の探求（研究者：日本原子力研究開発機構 福田将真）

地層処分において、地質環境の長期安定性の評価は、将来の処分サイトの選定やリスク評価等の観点で重要である。したがって、長期安定性評価に貢献可能な調査手法や評価技術の開発及び高度化が望まれる。特に隆起・侵食評価手法の一つとなりうる熱年代法の内、(U-Th)/He法（以降、He法）は、様々な地質体に対して適用可能であり、閉鎖温度（鉱物中の測定対象元素の出入りがない閉鎖系となった温度）が200℃以下で、従来の手法よりも低温である特徴を持つ。対象となる年代の範囲は数十万年～千万年スケールであり、比較的低温での冷却履歴が推定可能であることから、断層運動や隆起侵食などの温度変化を伴う幅広い地球科学的現象の推定に応用可能である。一方でHe法は年代標準試料が国際的にも未

確立の状態となっている。本研究では、年代標準試料の候補として期待される複数のジルコン試料に対して、He年代分析に基づいて個々の粒子年代のばらつきを定量的に評価することで年代標準試料としての適性を検証し、ジルコンHe法（ZHe法）の年代標準試料の確立を目指す。

2021年度は、年代標準試料の候補となる6試料を選定し、その中から兵庫県北西部の美方郡新温泉町付近に分布する歌長流紋岩とジルコンフィッシュン・トラック（ZFT）法の年代標準試料であるBuluk Tuffの2試料についてZHe年代を分析し、年代標準試料としての適性を定量的に評価した。なお、歌長流紋岩については現地にて試料採取を行った。

試料採取については、現地において2つの岩石試料（TRG04-21、TRG07-21）を採取し、採取した歌長流紋岩試料2つについて、ZHe年代分析に使用するジルコンを分離抽出し、各試料についてそれぞれ1万粒程度のジルコンを得た。

歌長流紋岩2試料（TRG04-21、TRG07-21）とBuluk Tuff試料（1試料）について、ZHe年代測定をした結果、TRG04-21で 2.42 ± 0.13 Ma、TRG07-21で 2.77 ± 0.20 Ma、Buluk tuffで 17.7 ± 1.74 Maの年代値を得た（Maは百万年、また誤差範囲はすべて95%信頼区間を示す）。TRG04-21の年代は、1.9～3.7 Maの範囲で比較的集中しており、データのばらつきの指標となるMSWD（Mean Square of Weighted Deviates）値も5.47と比較的妥当であった。一方で、TRG07-21及びBuluk tuffについては、年代の分布範囲は2.0～5.0 Ma及び10～40 Maと比較的広く、MSWD値はそれぞれ、13.6、20.2とばらつきも大きかった。また、TRG04-21については、既往研究の年代データと整合的であることから標準試料としての潜在性が認められた一方で、TRG07-21とBuluk tuffは広いZHe単粒子年代のばらつきにより、年代標準試料としての適性は低いことが示唆された。今後は候補6試料の内の残り4つの試料のZHe分析及び各試料における単粒子年代のばらつきの原因の究明を目的とした鉱物の化学分析や組織観察を予定している。

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成31年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務 報告書（2021年度分）、2022

2-3 人材育成プログラムの実施・作成

◇2021 年度の成果

2020 年度に、本事業の人材育成プログラム作成について、残りの 3 か年において、以下の 2 つの内容を実施していくこととした。

- 独学のための教材の作成
- アクティブラーニング形式を取り入れた人材育成セミナーの開催

以下に、「独学のための教材の作成」及び「アクティブラーニング形式を取り入れたセミナーの開催」に関する 2021 年度の実施内容をまとめる。

(1) 独学のための教材の作成

地層処分に係る独学のための教材作成については、2020 年度に、以下の 2 種類を検討することとした（教材の名称は 2021 年度に変更）。

①地層処分にに関するリテラシー育成教材（旧地層処分にに関する包括的知識）

なぜ地層処分をするのか、どのように地層処分を進めるのか、どのように安全性を示すのか、どのように処分場を受け入れてもらうのかなど、地層処分事業全般について説明できる素養の育成を目的とした内容

②地層処分にに関するポータル教材（旧地層処分にに関する専門的知識）

地質環境特性、工学技術、安全評価等の地層処分技術に関して、ジェネラリストとして把握しておく重要な専門的知識を抽出した内容

2021 年度は、2020 年度に作成した地層処分にに関するリテラシー育成教材の第 1 案について、有識者等のレビュー結果に基づく改訂を行った。さらに、使用者の学習意欲が継続するようなデザインや内容面での仕組みの検討を行った。レビュー結果に基づく改訂では、11 の学習項目（ジャンル）の構成を見直すとともに、新たに 1 つの学習項目の追加し、合計で 12 の学習項目の構成とした（表-1）。さらに、教材の導入として「はじめに」及び「序章」を作成した。

表-1 2021 年度に見直した結果の教材の学習項目（ジャンル）と狙い

ジャンル	設定の狙い
1. わが国における放射性廃棄物の特徴	わが国で発生する放射性廃棄物の種類とその発生源について理解する
2. わが国における放射性廃棄物の処分形態	わが国で発生する放射性廃棄物の種類に対応した処分形態について学ぶ
3. 高レベル放射性廃棄物対策：地層処分の選択	地層処分が選択されてきた背景と経緯を学ぶ
4. 地層処分の安全原則と規制・標準	地層処分の安全性確保に係る安全原則や規準類について、国内外の報告書報告書の概要を学ぶ
5. 地層処分における安全確保方策	多重バリアシステムの概要、その性能を定量的に評価する安全評価の流れ、安全評価からセーフティケース構築への重点の移行について学ぶ
6. 地層処分の実現性に関する報告書	これまでに公表されてきた国内外の代表的な報告書について、その概要を学ぶ
7. サイト選定に向けたセーフティケース	NUMO が 2021 年に公表した「包括的技術報告書」の内、本編に属する記述概要を学ぶ
8. 地層処分の段階的な進め方	地層処分の段階的な進め方と意思決定に係る国際機関の報告書、わが国での段階的な取り組みについて学ぶ
9. 地層処分固有の取り組み	閉鎖後長期の安全確保に関する、地層処分固有の取り組みについての概要と現状を学ぶ
10. 地層処分に対する信頼感の醸成	科学技術的及び社会的な視点からの信頼感の醸成に関する国内外の取り組みについて学ぶ
11. 地層処分が直面する社会的側面	地層処分の実現のための不可欠である社会的な受け入れについて学ぶ
12. 地層処分計画における各国からの教訓	地層処分計画を進める各国の挫折、計画の凍結、成功例などから得られる教訓について学ぶ

また、作成したリテラシー育成教材の使いやすさ、学習意欲の向上等のための検討を行った。具体的には、学習の到達度を把握できるようにするため、確認テストを作成するとともに、出版社によるデザイン等を見直しを実施した。2022 年度、見直したデザインを教材全体に反映する計画である。さらに、ポータル教材については、案の作成を行った。

(2) 人材育成セミナーの開催

2019 年度に開催した人材育成セミナーから得た教訓等に従い、2020 年度からの 3 か年において、受講者が主体的に参加し受講者間対話が促される講義・グループワークを行うアクティブラーニング形式のセミナーで、テーマを地質環境調査、工学技術、安全評価技術と変え、セミナーとしての成立性、ジェネラリスト育成に対する効果などを比較検討する計画とした。2020 年度は地質環境（地下水）をテーマとして開催した。

2021 年度の人材育成セミナーは、上記の 3 か年で地層処分の 3 つの主要研究分野をカバーする計画の 2 年目にあたるため、テーマを工学技術として開催する方向で検討を開始した。開催場所は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、JAEA）の幌延深地層研究センターの見学を含めるため、北海道稚内市を主会場とすることとした。セミナーのテーマについては、JAEA 等と協議した結果、地下研究施設での研究開発に焦点を当て、「地下研から学ぶ！～データの準備・解釈・伝え方～」とのタイトルで行うこととした。特に、幌延などの地下施設で実際に得られたデータの扱い方や注意点などを知ることで、受講者が今後処分場候補地での調査で実際に行う可能性のあることを体験できるよう設計した。このことは将来の処分事業に役立つ人材の育成につながると考えている。

しかし、最終的に、新型コロナウイルス感染拡大の影響から、セミナーは当初予定した 3 日間の日程を 2 日間に短縮し、2021 年 10 月 11 日から 12 日にオンラインで開催することとなり（図-1）、幌延深地層研究センターの見学は、バーチャルで実施することとなった（図-2）。



図-1 オンライン開催の様子

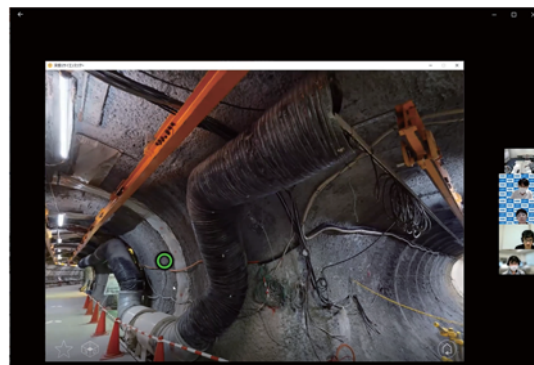


図-2 バーチャル見学の様子

セミナープログラムは、単なる座学だけではなく、演習、グループワークなどを組み合わせたものとした。具体的には、以下の構成で開催した。

- ① 前振り
前振りでは、本事業における人材育成の説明、ジェネラリストの定義・必要性などを説明
- ② アイスブレイク
以降のプログラムに積極的に参加できるよう、自己紹介も兼ね、NUMO 包括的技術報告書のストーリーボードを用い（図-3）、受講者自身の研究テーマ等を紹介

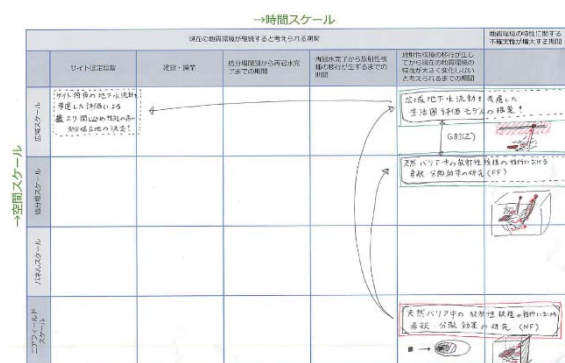


図-3 受講者が記入したストーリーボードの例

- ③ イントロダクション／情報提供
NUMO から包括的技術報告書に関するコミュニケーションについての情報提供、分野間理解のための意見交換を実施
- ④ 座学及び演習、グループワーク
地下研究施設の役割や幌延深地層研究センターのバーチャル見学（図-2）をはじめ、同研究センターで行われている熱-水-応力-化学（THMC）連成解析に関して、実際に取得されるデータやその解釈、モデルの改

良などの研究開発に関する情報提供。座学の中でグループワークや Excel を使った一次元熱伝導解析の演習などを実施

- ⑤ 振り返り（グループワーク）
セミナーの最後に全体の振り返りを行い（図-4）、それぞれの参加者がそれぞれの考えをまとめることを支援

こんなことを教えてほしいかった こんなことを知っていた	やっぱりどうだったのか どういふこともあるのか 知らなかったけど面白かった（興味を持った）	○○をもっと詳しく知りたい ○○についても知りたい	次は是非○○について知りたい／議論したい
	期待していた○○について知れたかった ○○は興味を持てなかった	なぜ興味を持てなかったのか どうすれば興味をもてるのか	

図-4 振り返りに用いたスライド

プログラムの最後で行った振り返りでは、技術者間の対話／分野間連携に関して、用語の受け止め方や暗黙の前提などのコミュニケーション上の留意点や心構えについて有益な示唆を得ることができたといった意見があった。また、今後のセミナーで取り上げて欲しいテーマとしては、天然バリアに着目した地質・工学の連携、文献調査、回収可能性などが挙げられた。

また、受講者アンケートを通じて、地下研究施設の原位置試験でのデータ解析の経験や苦労話は、今後の自身の研究や業務に役立つという回答が多く寄せられており、設定したセミナーのねらいは概ね達成されたと考えられる。一方で、アンケート結果からは、グループワークが講義内容に関する質疑と補足にとどまり、受講者が抱える関心事項の議論を深められなかったという意見も見られた。この原因はオンラインでの意思疎通や対話を盛り上げる難しさもある一方、異なる分野の専門家間でのフリーな気付きを共有する時間を設定するだけでは不十分である点を再認識させられた。アクティブラーニングを成功させるには、グループメンバーで話し合いやすいテーマを明示的に設定し、かつグループでの議論を他グループに向けて発表・共有してもらうという、場づくりの工夫が重要である。グループメンバー間で

のディスカッションを深めるための改善点としては、以下などが考えられる。

- グループメンバーで話し合う具体的なテーマ・課題を与える
- グループでの意見交換・ディスカッションの時間を十分に確保する
- ディスカッションを支援するようにグループに講師（その分野の専門家）が参加する

異なる専門分野を有すグループメンバー間で意見交換・ディスカッションを活発に行うことで、異分野間のコミュニケーションの難しさなどを認識することは、多分野の専門家が協働して進めていく必要のある処分事業において役立つ経験となり、必要な人材の育成につながると考えられる。そのため、2022年度のセミナーにおいては、グループ内でのディスカッションが深められるよう改善を図っていくこととしている。

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 31 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務 報告書（2021 年度分）、2022

3. その他の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

その他、以下の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等を行った。

(1) 規制要件を中心とした海外情報の収集と考え方 の整理

地層処分の安全性に関する事業者の自主的な目標・基準の考え方を整理することを目的として、2020 年度から 3 カ年の計画で、事業化が進んでいる諸外国の規制要件等の情報を収集・整理している。2021 年度は、西欧のフランス及びスイスを対象として、規制要件の変遷を整理しつつ、サイト調査段階で重要度の高い立地要件、処分施設の設計に係る規制要件及び事業者による自主基準等を調査した。また、上記 2 か国を含む 9 か国を対象として、地層処分施設の設計にあたっての人工バリアの性能や施工性に関する要件等について調査を行い、調査により得られた詳細な情報を整理した。

(2) 放射性廃棄物基本情報体系化調査

国内外の放射性廃棄物に係る基本情報を収集して体系的に整理するとともに、収集した情報に基づいて「放射性廃棄物ハンドブック（2021 年度版）」を作成した。

(3) 不確実性を考慮した将来費用の推定手法に関する研究

処分事業の将来費用の推定において、フランスやスウェーデンでは、不確実性を考慮した手法を取り入れており、確率分布の形で費用の幅を推定している事例がある。そのような費用推定方法の基礎的な理解を得るために、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB 社）が採用している「逐次の原則（Successive Principle）」に関する文献を収集して分析した。

(This page(p76) is intentionally kept blank.)

IV. 国際交流

放射性廃棄物の処理処分は、我が国のみならず世界各国共通の課題であり、協力して進めることが重要である。このため原環センターでは、海外の放射性廃棄物処分の研究機関、処分事業実施機関等と包括的な協力協定を締結し、この国際的なネットワークを活用し、放射性廃棄物に関する各国の政策、制度、事業の進捗状況、研究開発動向等に関する情報の収集・交換、研究協力等を行っている。

2021年度は、新型コロナウイルス感染症まん延のため、Web会議を中心として、実施中の研究に関する技術情報の意見交換や新規プロジェクトへの参加の可能性などの情報交換を行った。

(1) 情報交換・研究協力を行っている海外機関

放射性廃棄物管理分野における相互協力に関して、現在までに当センターとの間で協定あるいは覚書を締結している海外機関は下表のとおりである。

表-1 協力協定／情報交換覚書を締結している海外機関

国	機関名
フランス	放射性廃棄物管理機関 (ANDRA)
スイス	放射性廃棄物管理共同組合 (NAGRA)
フィンランド	ポシヴァ社 (Posiva Oy) / Posiva Solutions 社
スウェーデン	スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社 (SKB 社) / SKB インターナショナル社
ドイツ	連邦放射性廃棄物機関 (BGE) / BGE Technology 社
スペイン	放射性廃棄物管理公社 (ENRESA)
ベルギー	ベルギー原子力研究センター (SCK-CEN)
ロシア	ロシア科学アカデミー (RAS)
英国	原子力廃止措置機関 (NDA)
韓国	韓国原子力環境公団 (KORAD)
台湾	(財) 核能科技協進會 (NuSTA)
韓国	韓国原子力研究所 (KAERI)
中国	中国核工業集团公司地質・中国ウラン工業株式会社 (CNNC / CNUC)

(2) スイス グリムゼル試験場での国際共同研究に関する情報収集

スイスの放射性廃棄物管理共同組合

(NAGRA) が運営する、グリムゼル試験場において実施中の国際共同研究の運営委員会 (ISCO) にオンラインで出席し、最新の共同研究の内容および計画に関する情報を収集した。

(3) 核燃料サイクルシミュレーションに関する IAEA との共同作業

廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究(文部科学省原子力システム研究開発事業 JPMXD02 19209423 の助成を受けたもの)における核燃料サイクルの諸量評価に関しては、国際原子力機関/IAEA の公開コード/NFCSS(Nuclear Fuel Cycle System Simulation)を利用して、放射性廃棄物の崩壊熱、放射性毒性、特定核種の分離、処分場での廃棄体専有面積やレイアウト評価などの計算機能の拡張を目指している。2020年度は、同機関原子力局と核燃料サイクルシステムシミュレーション研究に関する実務協定 (Practical Arrangements) を締結し、キックオフ会議を開催 (Web 会議) して機能拡張の手順、核燃料サイクルシナリオの構成、廃棄物処分における負荷評価などについて情報交換を実施した。今後、本協定に基づき計算手法とその結果に関する技術打合せを継続していく。

(4) OECD/NEA が主導する国際共同プロジェクトへの参画

経済協力開発機構／原子力機関 (OECD/NEA) の協力のもと、2023年度より開始が予定される国立研究開発法人日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターの地下研究施設を活用した国際共同プロジェクトでは、①物質移行試験、②処分技術の実証と体系化、③実規模の人工バリアシステム解体試験等の個別研究が計画されている。2021年度には、これらの研究計画の具体化に向けて、OECD/NEA と経済産業省資源エネルギー庁が共同開催したワークショップや各種準備会合に参加し、プロジェクトに参加を検討している国内外の関係組織と情報交換や検討を進めた。

V. 資料

1. 講演会、セミナー、研究発表会

講演会等概要		開催日	会場
講演会	第1回講演会「沿岸部地下水研究の成果と科学的特性マップに対応したデータベースの整理」 丸井 敦尚 氏（国立研究開発法人 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 招聘研究員（元総括研究主幹））	2021年 6月30日	オンライン開催
	第2回講演会「ハル等廃棄体に含まれる炭素 14 等の放射性核種のインベントリと溶出挙動に関する研究開発」 植田 浩義（地層処分バリアシステム研究開発部）	2021年11月10日	オンライン開催
	第3回講演会「「大地変動の時代」に役立つ地球科学としなやかな生き方」 鎌田 浩毅 氏（京都大学レジリエンス実践ユニット特任教授・京都大学名誉教授）	2022年 3月18日	オンライン開催
セミナー	第1回原環センターセミナー 「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎Ⅰ」 朽山 修 氏（公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問）	2021年 6月 3日	オンライン開催
	第2回原環センターセミナー 「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎Ⅱ」 朽山 修 氏（公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問）	2021年 7月21日	オンライン開催
	第3回原環センターセミナー 「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎Ⅲ」 若杉 圭一郎 氏（東海大学 工学部 原子力工学科 教授）	2021年12月14日	対面開催
研究発表会	2021 年度原環センター研究発表会 1.研究発表 (1)「緩衝材の流出現象の理解と施工技術オプションとしての基盤技術の整備」 林 大介（地層処分工学技術研究開発部） (2)「TRU 廃棄物処分場での発生ガスの影響に関する研究」 藤井 直樹、八木 翼（地層処分バリアシステム研究開発部） 2.特別講演 「進化思考で考える地層処分事業の未来」 太刀川 英輔 氏（NOSIGNER 代表/慶應義塾大学特別招聘准教授）	2022年 1月14日	オンライン・対面併用開催

2. 論文投稿、学会発表等

(1)論文投稿

No.	題 目	原環センター著者	掲載誌等
1	Characterization of hardening behavior of carbon steels at low temperature irradiations	川久保政洋	Journal of Nuclear Materials, Vol. 557 (2021) 153270
2	Evaluation of the technical options of radioactive waste management for utilization of MOX fuel: Thermal impact of Minor Actinide separation with geological disposal of high-level waste	朝野英一	Journal of Nuclear Science and Technology, Volume 58, 1123-1133 (2021)
3	放射性廃棄物処分施設モニタリングへの分布型光ファイバセンサ適用に向けた実験的検討	広中良和、藤原啓司、脇寿一、寺田賢二	土木学会論文集 F2 (地下空間研究)、Vol.77、No.1、60-74、2021
4	Dissolution Characteristics of Cement Paste Using Quick Setting Admixture for shotcrete	広中良和	Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.19, 1173-1180, November 2021
5	Formation of natural silicate hydrates by the interaction of alkaline seepage and sediments derived from serpentized ultramafic rocks at Narra in Palawan, the Philippines	藤井直樹	Minerals, 10(8), 719, (2020)
6	Optimal Waste Loading in HLW glass from High Burn-up Spent Fuel for Reduction of Waste Volume and Footprint of Geological Disposal	桜木智史、浜田涼、朝野英一	MRS Advances, Volume 7, 150-154 (2022)
7	Effects of burn-up on heat generation of vitrified waste from spent MOX fuel for geological disposal	浜田涼、桜木智史、朝野英一	MRS Advances, Volume 7, 155-159 (2022)

(2)学会発表等

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
1	Scenario study of optimization of disposal method to reduce the amount of waste and disposal area in MOX fuel use	朝野英一	5 th Technical Workshop on Fuel Cycle Simulation 2021/6/28～7/2
2	緩衝材ブロックの製造管理を想定した X 線 CT 活用に関する基礎検討 ～ケイ砂分布把握の試み～	石井智子、林大介、 八木啓介	第 56 回地盤工学研究発表会 2021/7/12～15
3	フィリピン国サイリーベントナイト鉱山におけるナチュラルアナログ	藤井直樹	放射性廃棄物処分環境における鉄－ベントナイト相互作用に関するシンポジウム 2021/7/16
4	フィリピン国ナラ地区に湧出する高アルカリ泉周辺へのナチュラルアナログ	藤井直樹	放射性廃棄物処分環境における鉄－ベントナイト相互作用に関するシンポジウム 2021/7/16
5	Thermal impact on geological disposal of mixed UO_2 -MOX vitrified waste associated with MOX reprocessing	朝野英一	ICONE28 2021/8/4～6
6	種々の構造を有する円板粒子層中の屈曲度	八木翼	日本混相流学会主催 混相流シンポジウム 2021 2021/8/22～24
7	ベントナイト混合土の締固め後粒子間隙構造の可視化に関する検討	広中良和	土木学会 2021 年度全国大会 第 76 回年次学術講演会 2021/9/8～10
8	緩衝材ブロックの製造管理を想定した X 線 CT 活用に関する基礎検討 ～密度把握・推定の試み～	石井智子、林大介、 八木啓介	土木学会 2021 年度全国大会 第 76 回年次学術講演会 2021/9/8～10
9	埋め戻し材ブロックに関する静的締固め試験	川久保政洋、八木啓介	土木学会 2021 年度全国大会 第 76 回年次学術講演会 2021/9/8～10
10	スクリーフィーダーによる地層処分場坑道埋め戻し技術の開発	川久保政洋、深谷正明	土木学会 2021 年度全国大会 第 76 回年次学術講演会 2021/9/8～10
11	模擬坑道を対象とした地層処分場の埋め戻し材の転圧施工試験	川久保政洋	土木学会 2021 年度全国大会 第 76 回年次学術講演会 2021/9/8～10

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
12	地層処分における埋め戻し材料の締固め性および透水性	川久保政洋	土木学会 2021 年度全国大会 第 76 回年次学術講演会 2021/9/8～10
13	放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究 (88) 使用済 MOX 燃料由来のガラス固化体の発熱量と処分場面積への影響評価	浜田涼、桜木智史、 朝野英一	日本原子力学会 2021 年秋の大会 2021/9/8～10
14	放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究 (89) 使用済 MOX 燃料由来のガラス固化体の MA 分離による発熱低減と高含有化による処分場面積の合理化検討	桜木智史、浜田涼、 朝野英一	日本原子力学会 2021 年秋の大会 2021/9/8～10
15	代替粘土材料を用いた地層処分場の埋め戻し材に関する基礎的研究	川久保政洋	日本原子力学会 2021 年秋の大会 2021/9/8～10
16	鉛ホウ酸塩系ガラスの逆モンテカルロ構造モデルにおける局所構造の再現性評価	桜木智史、大和田仁	学術変革領域研究 (A)「超秩序構造が創造する物性科学」第 2 回成果報告会 2021/9/25～26
17	Optimal Waste Loading in HLW glass from High Burn-up Spent Fuel for Reduction of Waste Volume and Footprint of Geological Disposal	桜木智史、浜田涼、 朝野英一	MRS2021-45th Scientific Basic for Nuclear Waste Management 2021/10/24～29
18	Effects of burn-up on heat generation of vitrified waste from spent MOX fuel for geological disposal	浜田涼、桜木智史、 朝野英一	MRS2021-45th Scientific Basic for Nuclear Waste Management 2021/10/24～29
19	Study on advanced nuclear energy system based on the environmental impact of radioactive waste disposal – An integrated cross-disciplinary approach to diversifying nuclear fuel cycle conditions -	朝野英一、浜田涼、 桜木智史	International Conference on Radioactive Waste Management: Solutions for a Sustainable Future 2021/11/1～5
20	Environmental impact of radioactive waste disposal in advanced nuclear energy systems: Radiation impact evaluation of nuclide migration and human intrusion for geological disposal considering nuclear fuel cycle conditions	朝野英一、桜木智史、 浜田涼	International Conference on Radioactive Waste Management: Solutions for a Sustainable Future 2021/11/1～5

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
21	Study on the fast reactor system characteristics in the transition period from LWR to FR	朝野英一	International Conference on Radioactive Waste Management: Solutions for a Sustainable Future 2021/11/1～5
22	Numerical study on the axial and radial swelling behaviors of unsaturated compacted bentonite	林大介、石井智子	Geomate 2021 2021/11/3～5
23	放射性ヨウ素固定化ガラスの逆モンテカルロ構造モデルにおける局所構造評価	桜木智史、大和田仁	日本セラミックス協会化ガラス部会 第 62 回ガラス及びフォトニクス討論会 2021/11/8
24	ガラス固体化の発熱特性に基づいた廃棄物減容と処分場面積の合理化に対する処分場の設計・地質環境条件に関する考察	浜田涼、桜木智史、朝野英一	第 3 回放射性廃棄物固化体討論会 2022/1/17
25	鉛ホウ酸塩系 RMC ガラスモデル中のヨウ素の局所構造評価	桜木智史、大和田仁	学術変革領域研究 (A)「超秩序構造が創造する物性科学」第 3 回成果報告会 2022/3/5～6
26	鉄筋を介した磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送における効率改善手法	市川恭子、川久保政洋	電子情報通信学会 無線電力伝送研究会 2022/3/7～8
27	堆積軟岩体の水没鉛直井における高精度地圧計測法の開発	広中良和	資源・素材学会 2022 年度春季大会 2022/3/7～9
28	使用済燃料の燃焼条件や冷却期間の予測に基づいた廃棄物特性に関する検討	桜木智史、浜田涼、朝野英一	日本原子力学会 2022 年春の年会 2022/3/16～18
29	温度勾配下におけるジルコニウム合金被覆管中の炭素分布に及ぼす溶存酸素の影響	桜木智史	日本原子力学会 2022 年春の年会 2022/3/16～18
30	廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究 (5) 核燃料サイクル条件多様化に対応する統合的な環境負荷評価	朝野英一、桜木智史、浜田涼	日本原子力学会 2022 年春の年会 2022/3/16～18
31	廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究 (6) 簡素化 MA 分離による MOX 燃料由来のガラス固化体の処分場面積および被ばく線量への影響評価	浜田涼、朝野英一、桜木智史	日本原子力学会 2022 年春の年会 2022/3/16～18

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
32	廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究 (7) NFCSS コードのための放射性廃棄物の環境負荷評価プログラムの開発	朝野英一	日本原子力学会 2022 年春の年会 2022/3/16～18
33	廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究 (8) 簡素化 MA 分離の観点からの既往技術サーベイ	朝野英一、桜木智史、 浜田涼	日本原子力学会 2022 年春の年会 2022/3/16～18
34	廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究 (9) 環境負荷評価を基にした MA 分離プロセスの分離段数低減化の検討	朝野英一、桜木智史、 浜田涼	日本原子力学会 2022 年春の年会 2022/3/16～18

(3)解説・講演等

No.	題 目	著 者	発表先
1	地層処分と可逆性・回収可能性 (R&R) を考える	江守稔	環境情報科学 50 巻 3 号 P53-57
2	地層処分事業等の国際的な動向	稲垣裕亮	原子力年鑑 2022 P170-176

3. 刊行物

No.	刊 行 物 名	主な内容	発 行 日
1	原環センタートピックス№138	原環センターにおける中深度処分に関する研究開発について	2021 年 6 月
2	原環センタートピックス№139	沿岸部地下水研究の成果と科学的特性マップに対応したデータベースの整理	2021 年 9 月
3	原環センタートピックス№140	ハル等廃棄体に含まれる炭素 14 等の放射性核種のインベントリと溶出挙動に関する研究開発	2021 年 12 月
4	原環センタートピックス№141	進化思考で考える地層処分事業の未来	2022 年 3 月
5	原環センター2020 年度 技術年報		2021 年 11 月

4. ホームページへの海外最新情報の掲載

原環センターのウェブサイト「諸外国での高レベル放射性廃棄物処分」(<https://www2.rwmc.or.jp>)において、以下の海外情報ニュースフラッシュ記事を掲載した。

〔各タイトル記事内容は上記の URL にアクセスしてください。〕

No	掲載日	タイトル
1	2021/4/2	追記) 米国でエディ・リー・エナジー・アライアンス (ELEA) サイトにおける中間貯蔵施設の建設・操業に係る環境影響評価が進行〔2020 年 3 月 23 日既報〕
2	2021/4/12	米国の廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) で代替の処分パネルを建設へ
3	2021/5/11	米国で放射性廃棄物技術審査委員会 (NWTRB) が放射性廃棄物管理プログラムを進めるための 6 つの包括的な勧告を示す報告書を公表
4	2021/5/13	フィンランドの使用済燃料処分場の建設状況：ポシヴァ社が処分坑道の掘削を開始
5	2021/5/24	フィンランドで TVO 社が極低レベル放射性廃棄物の地表埋立て処分場を計画
6	2021/6/2	米国で 2022 会計年度の予算要求－使用済燃料中間貯蔵の同意に基づくサイト選定の方針を表明
7	2021/6/15	米国で 2022 会計年度の予算要求－エネルギー省 (DOE) の予算要求に係る詳細資料が公表
8	2021/6/25	フィンランドで研究炉の廃止措置許可が発給－低中レベル放射性廃棄物はロヴィーサで貯蔵・処分へ
9	2021/6/25	中国・甘粛省北山で地下研究所の建設が開始
10	2021/7/2	追記) 米国で 2022 会計年度の予算要求－エネルギー省 (DOE) の予算要求に係る詳細資料が公表〔2021 年 6 月 15 日既報〕
11	2021/7/7	追記) 米国でエディ・リー・エナジー・アライアンス (ELEA) サイトにおける中間貯蔵施設の建設・操業に係る環境影響評価が進行〔2020 年 3 月 23 日既報〕
12	2021/7/13	追記) カナダでチョークリバー研究所における浅地中処分場プロジェクトの環境影響評価手続きのためのパブリックコメントの募集が開始〔2016 年 5 月 26 日既報〕
13	2021/7/26	フランスで国家評価委員会 (CNE) が第 15 回評価報告書を公表
14	2021/7/30	追記) 米国で中間貯蔵パートナーズ (ISP) 社による中間貯蔵施設の建設・操業に係る環境影響評価が進行〔2020 年 5 月 12 日既報〕
15	2021/8/2	米国の連邦議会で 2022 会計年度の放射性廃棄物処分関連の歳出法案を審議
16	2021/8/25	ドイツのサイト区域専門会議がサイト選定手続き第 1 段階における公衆参加の継続を提言
17	2021/9/1	スウェーデン政府が、使用済燃料集中中間貯蔵施設の貯蔵容量引き上げを決定、最終処分場の審査は継続
18	2021/9/13	米国テキサス州で高レベル放射性廃棄物の貯蔵等を禁止する州法が成立
19	2021/9/16	追記) 米国テキサス州で高レベル放射性廃棄物の貯蔵等を禁止する州法が成立〔2021 年 9 月 13 日既報〕
20	2021/9/22	追記) ドイツでサイト選定手続き第 1 段階の中間報告書が公表－地質学的な基準・要件を満たす「サイト区域」を選定－〔2020 年 10 月 2 日既報〕
21	2021/9/27	追記) 米国テキサス州で高レベル放射性廃棄物の貯蔵等を禁止する州法が成立〔2021 年 9 月 13 日既報〕

No	掲載日	タイトル
22	2021/9/30	米国の政府説明責任院（GAO）が民間使用済燃料の処分方策の構築には連邦議会の行動が必要とする報告書を公表
23	2021/10/5	追記）英国カンブリア州のコープランド市が調査エリアの特定に向けてワーキンググループを設置〔2020 年 11 月 9 日既報〕
24	2021/10/7	追記）英国カンブリア州のアラデル市が調査エリアの特定に向けてワーキンググループを設置〔2021 年 1 月 18 日既報〕
25	2021/10/15	米国の廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）で地下処分施設の第 8 パネルの掘削が完了
26	2021/10/18	英国リンカンシャー州が調査エリアの特定に向けてワーキンググループを設置
27	2021/10/22	追記）米国の連邦議会が 2022 会計年度の放射性廃棄物処分関連の歳出法案を審議〔2021 年 8 月 2 日既報〕
28	2021/11/22	英国カンブリア州コープランド市で 2 つのコミュニティパートナーシップが設立へ
29	2021/11/22	追記）米国で 2021 会計年度の予算要求－ユッカマウンテン計画の膠着状態を傍観せずに代替の解決策を開発するとの方針を表明〔2020 年 2 月 12 日既報〕
30	2021/11/25	米国の廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）で処分施設の操業・設備更新が進行－13,000 回の輸送を達成
31	2021/11/29	追記）米国でエネルギー省（DOE）が廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）の 4 度目の適合性再認定申請書を提出〔2019 年 4 月 17 日既報〕
32	2021/12/7	米国でエネルギー省（DOE）が使用済燃料の中間貯蔵施設の同意に基づくサイト選定計画を再始動
33	2021/12/14	カナダの使用済燃料処分場のサイト選定の状況－候補 2 自治体で地上からの調査が進行中
34	2021/12/15	追記）英国カンブリア州コープランド市で 2 つのコミュニティパートナーシップが設立へ〔2021 年 11 月 22 日既報〕
35	2021/12/21	韓国産業通商資源部が「第 2 次高レベル放射性廃棄物管理基本計画（案）」を公表
36	2021/12/24	スウェーデン政府が SKB 社の短寿命低中レベル放射性廃棄物処分場拡張計画を承認
37	2021/12/24	スイスで NAGRA が放射性廃棄物管理プログラムを提出 2022 年には処分場サイトを提案予定
38	2022/1/6	フィンランドでポシヴァ社がオルキルオトでの使用済燃料処分場の操業許可を申請
39	2022/1/7	追記）韓国産業通商資源部が「第 2 次高レベル放射性廃棄物管理基本計画（案）」を公表〔2021 年 12 月 21 日既報〕
40	2022/1/13	米国で放射性廃棄物技術審査委員会（NWTRB）がエネルギー省（DOE）の処分研究プログラムに対する勧告等を公表
41	2022/1/28	英国で 3 例目となるアラデル GDF コミュニティパートナーシップが設立
42	2022/1/31	スウェーデン政府が SKB 社の使用済燃料処分事業計画を承認
43	2022/2/15	追記）英国リンカンシャー州が調査エリアの特定に向けてワーキンググループを設置〔2021 年 10 月 18 日既報〕
44	2022/3/22	スイスのサイト選定第 3 段階におけるボーリング調査が終了

5. 委員会一覧

分野区分	研究件名	委員会名称	審議事項
Ⅰ. 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する調査研究	ニアフィールドシステム評価確証技術開発	ニアフィールドシステム評価確証技術開発委員会	人工バリアとその設置などにより影響を受けると考えられる人工バリア近傍の岩盤とを合わせた領域（ニアフィールド）を対象とした品質/健全性評価手法に関する調査結果等の審議
	回収可能性技術高度化開発	回収可能性技術高度化検討委員会	回収技術の高度化、回収維持の影響の定量化、並びに回収容易性を高めた概念に係る検討、成果等の審議
	地層処分施設閉鎖技術確証試験	地層処分施設閉鎖技術確証試験委員会	処分場の閉鎖後に坑道や掘削影響領域が水みちとなることを防止するための坑道シーリング技術の整備に向けた研究開発等に関する審議
	TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発	TRU 廃棄物処理・処分技術開発検討委員会	TRU 廃棄物の地層処分における人工バリアの閉じ込め機能の向上に関する技術開発、地層処分システムの状態設定のための現象解析モデルの高度化に関する計画、実施方法、成果等の審議
	沿岸部処分システム評価確証技術開発	沿岸部処分システム高度化開発評価委員会	沿岸部固有の環境を踏まえた概要調査段階で必要となる地質環境の調査・工学の技術開発に関する研究計画、実施方法、結果の評価等に関する審議
	廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究	廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究に関する外部評価委員会	廃棄物影響の指標、諸量評価システム、MA 簡素化分離プロセス、高速炉システム等原子力システムを俯瞰した研究に関する審議
Ⅱ. 低レベル放射性廃棄物の処分に関する調査研究	地下空洞型処分調査技術高度化開発	地下空洞型処分調査技術高度化開発検討委員会	地下環境の把握や最適な施設設計を支援するための技術整備に関する審議
Ⅲ. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等	放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務	地層処分スキルアップ研究会	人材育成プログラム・セミナーの内容の検討等
		評価委員会	採択した萌芽的・先進的な研究開発テーマに関する研究計画、研究成果等の審議

原環センター 2021年度 技術年報

2022 年 12 月発行

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター
〒104-0044 東京都中央区明石町 6 番 4 号
ニチレイ明石町ビル 12 階
TEL 03-6264-2111(代表)
FAX 03-5550-9116
URL <https://www.rwmc.or.jp/>

本誌の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、
企画部（kikaku@rwmc.or.jp）までお問い合わせください。