

RWMC

原環センター
2023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、2023年度にはほぼ終息し、2023年度は、従来通りの調査研究等を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2023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 武 谷 典 昭

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.....	9
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. 地層処分施設施工・操業技術確証試験.....	11
2. ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発.....	21
3. 沿岸部処分システム評価確証技術開発.....	31
4. 核種移行総合評価技術開発.....	35
5. 使用済燃料の多様化を考慮したシナリオ評価.....	37
6. 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.....	39
7. その他の地層処分に関する調査研究.....	40
III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	41
1. 放射性廃棄物海外総合情報調査.....	41
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	43
2-1 事業の全体概要	43
2-2 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理・成果の取りまとめ等 ..	45
2-3 人材育成プログラムの実施・作成.....	51
3. その他の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	54
IV. 国際交流	55
V. 資料	56
1. 講演会、セミナー、研究発表会.....	56
2. 論文投稿、学会発表等	57
3. 刊行物	65
4. ホームページへの海外最新情報の掲載.....	66
5. 委員会一覧	68

1. 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、天然バリアを乱すことなく、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カ年の予定で、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ともに、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。

本事業は、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターと東電設計株式会社の2機関が共同で実施している。5カ年事業の4年目に当たる2023年度は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和5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）」として実施し、当センターでは以下の項目について検討した。

- 大深度3次元初期地圧測定技術の開発
- 地震動観測
- 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

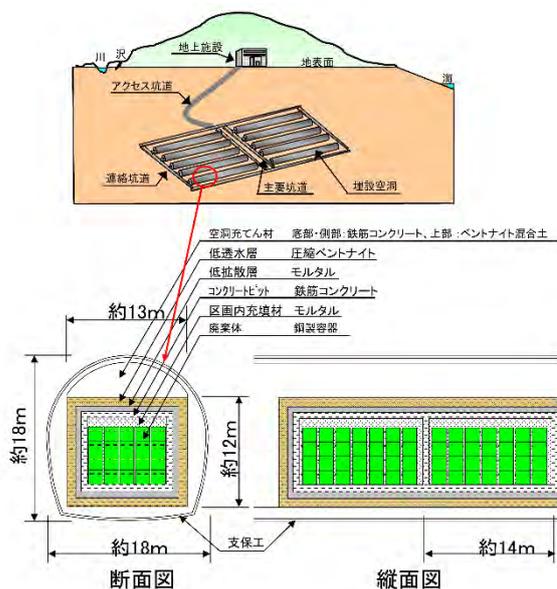


図-1 中深度処分の概念図¹⁾

◇2023年度の成果⁴⁾

(1) 大深度3次元初期地圧測定技術の開発

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、堆積軟岩を対象に、鉛直孔（深度200m程度まで）で、3次元初期地圧を測定することを目的として、応力解放法の一つである円錐孔底ひずみ法と孔壁ひずみ法を応用した「円錐孔壁ひずみ法」

(図-2) の開発を進めている。

2023年度は以下の内容を実施した。

- ・本手法により適した接着剤を選定するための室内試験
- ・応力評価の方法を確立するための感度試験や応力解析の方法の検討
- ・2022年度の試験結果をふまえた、ひずみ計貼付装置や掘削ツール等の製作や改良
- ・改良した測定方法の検証のための室内及び現場での実証試験

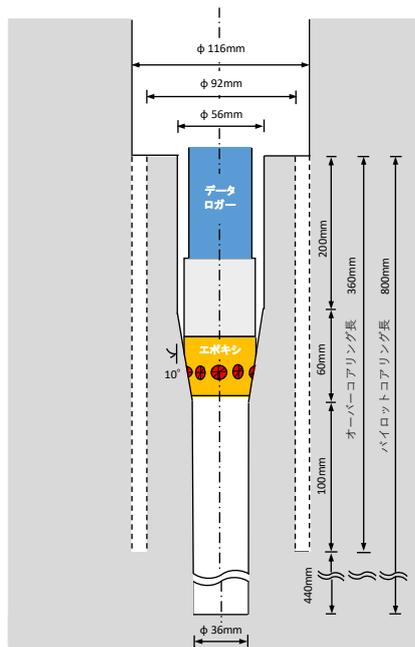


図-2 円錐孔壁ひずみ法の概要図

2022年度に実施した室内試験や現場試験の結果、ストレインセルの岩石や岩盤への接着が不十分であることが判明したため、開発する測定手法により適した接着剤の追加調査を行った。水中で接着でき、硬化後の接着剤の剛性が対象岩盤の剛性に近く、可使時間が1～2時間程度のエポキシ樹脂接着剤を調査したところ、2022年度までに使用していたHIC接着剤や三菱ケミカル社製のヤング率277MPa程度となる配合比のエポキシ樹脂接着剤に加えて、新たに2つの接着剤（コニシ社製のエポキシ樹脂 E205、アルファ工業社製のアルファテック380FX）が候補として抽出された。また、三菱ケミカル社製のエポキシ樹脂接着剤の配合を変えて硬化後のヤング率が異なるものを2種類候補として追加した。再選定試験に用いた接着剤一覧を表-1に示す。

これらの候補接着剤を対象に、岩石への接着試験、接着剤供試体の物性試験、ひずみの測定感度の比較試験、接着剤の硬化特性の確認試験等の結果に基づき、⑤のコニシ社製エポキシ樹脂接着剤（E205）が本測定法の接着剤として最も適していると判断した。

これと並行して、感度試験と応力解析の方法の検討、ひずみ計貼付装置や掘削ツール等の製作や改良を進めた上で、改良した測定方法の検証のための室内及び現場での実証試験を実施した。

室内検証試験では、新たに選定したコニシ社製のエポキシ樹脂接着剤（呼称：コニシ e205）を用いて、大谷石と六ヶ所の軽石凝灰岩の2種類の岩石ブロックを使った室内試験を行い、新たな接着剤の適用性や応力解析結果の妥当性を確認した。

表-1 再選定試験に用いた接着剤一覧

No.	呼称	メーカー	接着剤名	粘性 (mPa・s)	可使時間 (min)	硬化時間 (h)	比重	ヤング率E (MPa)	備考
①	HIC接着剤	Earth Sciences	HIC接着剤	-	20～30	16	1.6	4220	昨年度の室内試験で使用
②	ケミカルE277	三菱ケミカル	エポキシ樹脂 JER-ST	-	40～	24～	1.1	277	昨年度の室内・現場試験で使用。ストレインセルのエポキシ樹脂部分と同じ材料から作製
③	ケミカルE548	同上	同上	-	-	-	1.1	548	接着剤②の混合液の配合比を変えたもの
④	ケミカルE125	同上	同上	-	-	-	1.1	125	同上
⑤	コニシe205	コニシ	エポキシ樹脂 E205	130±20	45±10	24	1.1	1100	コンクリートひび割れ補修や崩壊しやすい岩石試料の充填整形に使用されているもの
⑥	アルファテック	アルファ工業	アルファテック 380FX	550	58	-	1.2	-	硬化物は柔軟性を有しており、動きのあるコンクリートのひび割れ補修に適したものの

現場検証試験は、青森県六ヶ所村の現場フィールドにて、2022年度（試験孔掘削長6m）よりも深い深度で、初期地圧測定に係る一連の作業性の確認と測定したひずみ・算出した応力の妥当性確認を目的に実施した。現場検証試験における現場調査数量を表-2に示す。

現場検証試験の主な手順は以下のとおりである。

- ①孔径116mmでのオールコアボーリング
- ②センタリングガイドケーシング挿入
- ③パイロット孔底に円錐孔壁掘削（孔径56mm～36mm）
- ④孔内洗浄
- ⑤孔内カメラによる孔内観察
- ⑥ひずみ測定器の円錐孔壁への接着
- ⑦孔径116mmでオーバーコリング
- ⑧掘削したコアを観察し、コアの損傷程度を確認
- ⑨コアを用いた感度試験を実施（応力-ひずみ関係の取得）
- ⑩深度を変えて、上記①～⑨を繰り返す

表-2 現場検証試験における現場調査数量

項目	実施数量
	現場試験孔(φ116mm)
試験孔掘削	35.15m×1孔
コア観察、柱状図	35.15m×1孔
ボーリング孔閉塞	なし（裸孔残置、孔口湧水処理）
本応力測定法の検証試験	4箇所
間隙水圧測定	2箇所

2023年度の現場検証試験を通じて、本手法の測定精度の向上と信頼性の向上に向けての技術課題として次のものが抽出された。

- ・解放ひずみの評価方法及び応力解析方法に関する検討の継続
- ・試験深度での接着不良の原因と考えられる湧水影響や接着時の偏芯への対策
- ・ひずみ測定器のデータロガー部分の性能向上（記憶容量、電池容量、収録内容など）
- ・円錐部から36mm孔へと続く部分の岩盤整形の精度向上
- ・センタリングガイドケーシング設置時の116mm

- 孔の孔底でのケーシング内外間の水流の抑制
- ・深部測定に対応するための孔内カメラの先端パーツの耐圧強化
- ・より深い深度での本応力測定法の適用性評価や標準法との応力測定結果の比較
- ・周載荷感度試験方法の改良に関する検討の継続

2024年度は、これらの技術課題の解決を図り、開発中の大深度3次元初期地圧測定技術の完成度を高める予定である。

(2) 地震動観測

地下空洞施設の地震時挙動に関する分析評価に資することを目的として、青森県六ヶ所村の日本原燃株式会社構内にて試験空洞底盤、実規模施設及び地表面に計4台の地震計を設置して、地震動観測を行っている（図-3、図-4）。

- ①試験空洞斜路の底盤上
- ②実規模施設の底部コンクリートピット上
- ③実規模施設の手前部コンクリートピットの上
- ④地表面（①のほぼ直上）

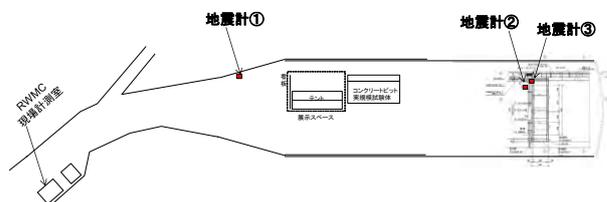


図-3 地下の地震計（①、②、③）の設置位置平面図



図-4 地震計④の設置状況

2023年度は、トリガ値の1Galを超えて記録された表-3に示す13地震の地震動データを取得した。観測された地震動の加速度の最大値は、表-4に示すとおりである。なお、水平の試験空洞軸方向がX、水平の試験空洞軸直角方向がY、鉛直方向がZである。

表-3 データ取得した地震の諸元

No	地震の発生日	震央地名	深さ(km)	マグニチュード	六ヶ所の震度
1	2023年 2月25日	釧路沖	63	6	震度2
2	2023年 3月28日	青森県東方沖	28	6.2	震度3
3	2023年 5月6日	青森県東方沖	56	5.7	震度2
4	2023年 5月11日	日高地方東部	55	5.5	震度1
5	2023年 6月11日	苫小牧沖	136	6.2	震度3
6	2023年 6月17日	青森県東方沖	30	5.7	震度2
7	2023年 6月22日	青森県東方沖	55	4.1	震度1
8	2023年 8月11日	青森県東方沖	28	6.2	震度2
9	2023年 8月23日	岩手県沖	15	4.7	震度1
10	2023年 9月8日	宮城県沖	46	5.4	震度1
11	2023年 10月14日	青森県東方沖	54	4.7	震度2
12	2023年 11月20日	青森県東方沖	52	5.9	震度3
13	2023年 12月28日	青森県東方沖	43	4.5	震度1

表-4 観測された地震動の加速度の最大値

(上からX、Y、Z)

No	地震の発生日	地震計① (Gal)	地震計② (Gal)	地震計③ (Gal)	地震計④ (Gal)
1	2023年 2月25日	2.0	2.4	2.6	11.4
		2.3	2.1	2.2	12.8
		1.5	1.7	1.8	4.8
2	2023年 3月28日	4.8	6.2	6.6	31.8
		6.3	7.6	8.1	30.4
		5.3	3.4	3.5	14.0
3	2023年 5月6日	3.7	4.6	5.4	24.9
		5.2	4.4	4.8	35.6
		3.4	4.7	4.8	17.7
4	2023年 5月11日	1.1	1.3	1.3	6.5
		1.5	1.8	1.8	7.9
		0.7	0.9	0.9	3.2
5	2023年 6月11日	—※1	—※1	—※1	28.6
					28.9
					15.4
6	2023年 6月17日	—※1	—※1	—※1	15.0
					17.0
					6.1
7	2023年 6月22日	—※1	—※1	—※1	7.8
					11.3
					5.3
8	2023年 8月11日	3.7	3.8	3.8	16.2
		4.1	4.5	4.5	18.3
		2.9	2.3	2.4	7.6
9	2023年 8月23日	1.4	1.9	2.0	9.4
		2.2	1.6	1.6	8.4
		1.0	1.1	1.2	3.1
10	2023年 9月8日	1.1	1.1	1.1	3.5
		1.0	0.7	0.7	3.2
		0.6	0.5	0.5	1.3
11	2023年 10月14日	1.7	2.9	3.2	19.6
		2.5	3.0	3.1	38.1
		2.0	2.6	2.7	12.1
12	2023年 11月20日	9.1	2.9	12.1	56.5
		11.9	3.0	14.8	67.8
		8.7	2.6	12.5	33.0
13	2023年 12月28日	0.6	0.8	1.0	4.8
		0.7	1.0	1.1	5.3
		1.4	1.4	1.4	3.6

注記) ※1: データ未取得 (停電の影響)

観測された貴重な地震動データについては、今後、分析評価に活用する予定である。

(3) 技術オプションの検討

技術オプションの検討については、これまで、2020年度の検討では、ALARA (As Low As Reasonably Achievable) を考慮した技術オプション絞り込みのための評価手法について、施設設計の観点から考え方を整理した上で、評価の試行を実施し、評価を進める際の課題を抽出した。また、2021年度の検討では、人工バリアの部材厚さに着目し、線量と費用を評価項目としたオプションの絞り込みを実施した。さらに、2022年度は、現状で広く認識されている中深度処分的人工バリア構成自体が何故妥当なのか、それを説明する場合にはどのような考え方で論理展開するかという視点で、設計プロセスに関する検討を行った。2023年度は、中深度処分に求められる設計プロセス及び設計オプションを明確にするために、これまでの検討成果を整理したうえで、合理的な設計オプションの抽出方法や絞り込み手法について検討することとした。

過年度検討の調査結果より、規制要求では複数の設計オプションを比較し、検討結果を過程(設計プロセス)とともに示すことが要求されており、その際、選定される設計オプションは合理的な範囲で最も優れている必要がある。しかしながら、この要求を満たすためには複数のオプションに対して線量評価などの人工バリア・天然バリアの長期性能に係る解析を実施する必要があり、検討数が膨大となるため検討対象とする全てのオプションに対して詳細かつ精緻な解析・検討・評価を行うことは非現実的である。そのため、本検討では段階的な検討を組み込み、複数の設計オプションから絞り込んだうえで最終的な比較を実施する考え方を示した。過年度検討、国内外の事例に基づき作成した本検討における設計プロセスのフローを図-5に示す。設計プロセスを前半と後半に分割し、概念検討において感度解析や線量評価により2、3のオプションを選定し、選定されたオプションに対して詳細検討を実施する構造とした。また、概念検討において最新技術の調査結果に応じて都度見直しを図る、前半・後半の線量評価において明らかな差異がある場合は見直すなど、場合によっては前

段階へ戻る方針とし、条件変更にも柔軟に対応できるフローとした。本検討では、サイトや廃棄体条件は既知という前提のもと、前半フローに当たる概念検討を実施した。

規制基準で示されている設計プロセスは、ALARA が強く意識されている。過年度の検討では、ALARA の R (Reasonably) を考慮する際に経済性を指標として事例検討を行ったが、2023年度は、設計オプションが有する不確実性や頑健性を評価する方法を試みた。

線量評価における解析モデルの概念図を図-6 に示す。解析モデルは GoldSim⁵⁾ によって作成した。なお、施設浸透水量の設定は、多重円筒モデル及び多重球モデルで近似した。透水係数や拡散係数は、評価対象としたシナリオに基づき、時間変化を想定した。核種移行率の線量への変換は、河川水の飲用のみと単純化した。

設計プロセスを前半・後半に分割し、2023年度は前半にあたる概念検討を対象として、人工バリアの長期安全性に着目した比較評価を新たに実施した。比較評価では ALARA を考慮して、性能面における合理的なオプションについて検討した。簡易的ながらも原子力規制委員会の考え方⁶⁾及び原子力学会標準⁷⁾を参考に複数の状態を設定し、オプションが取り得る被ばく線量値の幅及び状態ごとの線量の分布を求めることで、オプションの有する不確実性や頑健性を評価する際の考え方、具体的な方法、事例検討での評価結果を提示した。評価するポイントにより選定されるオプションが異なるため、オプション選定時は複数の視点から評価し、総合的な観点から良好なオプションを判断することの重要性が浮き彫りとなった。

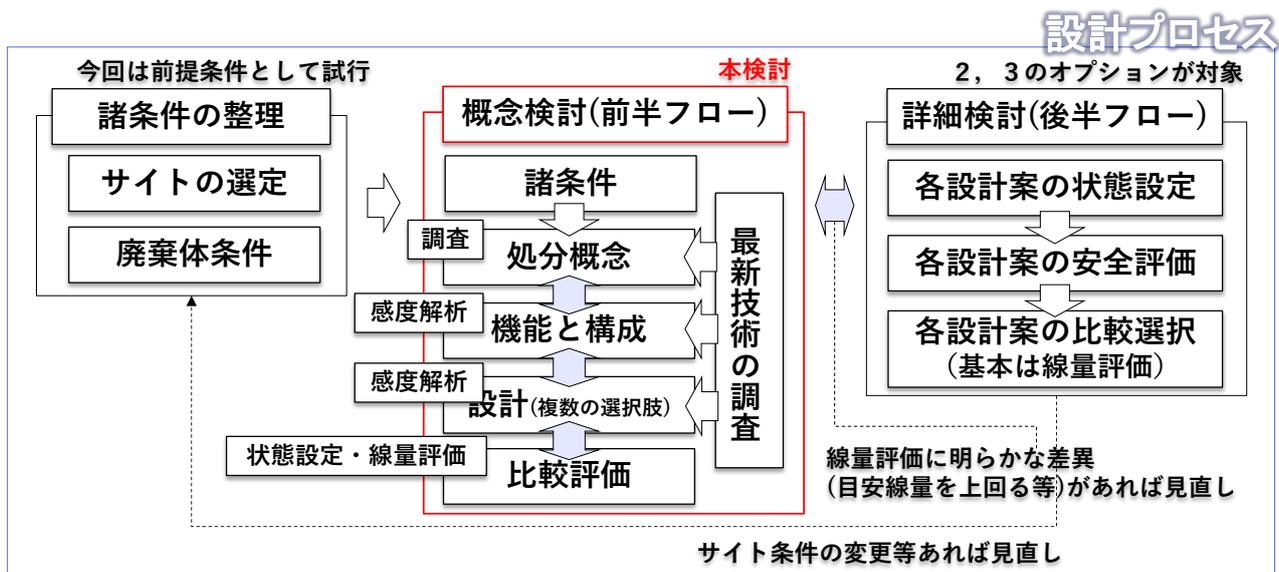


図-5 提案した設計プロセスのフロー及び本検討の位置づけ

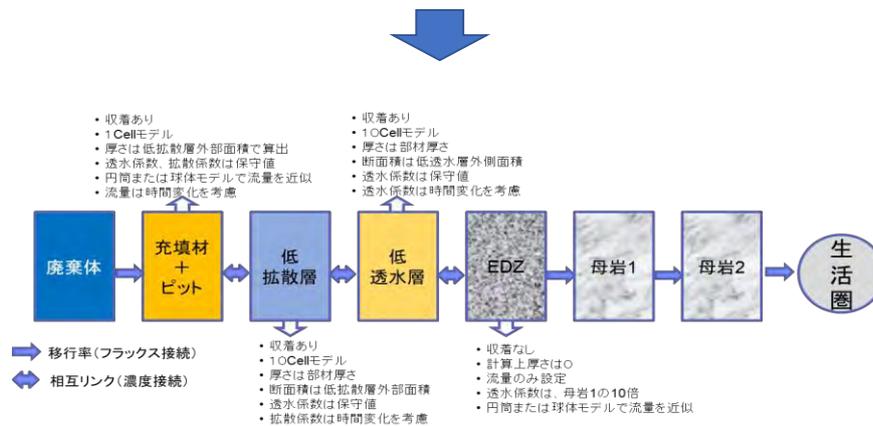
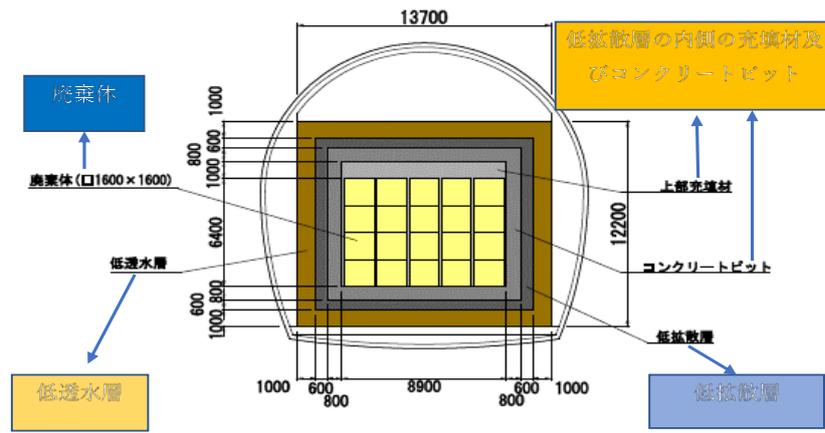


図-6 核種移行解析モデルの概念図

(4) 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

人工バリアに係る技術オプションを検討する上で未知の領域が大きいベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムを知ることは、長期の性能評価の説明性向上及び設計の合理化に大いに貢献する。そこで、2023年度は、2020年度に策定し過年度に一部見直した5ヵ年計画に従い、実験A～実験E（このうち、実験Dは2022年度までに完了）を通じて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。実験Aは最も基本的な情報を得るための室内締固め－透水試験である。実験Bは締固め土の締固め時の乾燥密度と飽和度の違いが透水係数に及ぼす影響を確認するための実験である。実験Cは実体顕微鏡による締固め土の構造観察、実験Eは締固め過程の間隙構造形成プロセスの観察となる。

実験Aから母材に混合した細粒土（珪砂粉、木節粘土、カオリン、ベントナイト）の種類や混合率の違い等が締固め特性と透水特性に及ぼす影

響が、実験Bから締固め時の乾燥密度と飽和度の違いが透水特性に及ぼす影響が、それぞれ実験データとして取得された。実験Cから透水特性を規定する主要な因子の一つと考えられている空隙構造に係る画像データを得た。更に、実験Eからは締固め時の初期含水比の違いに起因する土粒子骨格構造の違いが観察された。

表-5に室内締固め－透水試験の実施状況と今後の実施計画案を示す。2022年度までに取得したものを含めて、これまでに取得したデータを整理・分析した。一例として、実験Aのうち、ベントナイト混合土の1Ec締固め試料を対象とした締固め曲線と透水試験結果を図-7に示す。クニゲルV1混合土の場合、混合率が5%、10%、30%と増加するにつれ、透水係数が一桁ずつ低下、遮水性が混合率に直結していることを示す。また、5%の貧配合混合土も含め、1Ec締固めの条件下では締固め含水比に対する透水係数の変化は非常に小さく、いわば、施工含水比のばらつきに対して安定的な遮水性の発現を確認できる。一方、膨潤性

の低いCa型ベントナイト混合土は、最小透水係数だけで比較すると、同じ混合率のクニゲルV1混合土に対して1オーダー程度大きな透水係数値を示しているものの、締固め含水比の変動に対する変化が非常に大きく、乾燥側締固めでは湿潤側に対して数百倍の透水係数値を示している点が特徴的と言える。

図-8は、非塑性非膨潤性材料（珪砂粉）～低塑性非膨潤性材料（藤森粘土）～高塑性非膨潤性材料（カオリン）～高塑性低膨潤性材料（Ca型ベントナイト）～超高塑性高膨潤性材料（クニゲルV1）の順に特性が変化する細粒分を同一母材（購入砂）に混合した際の透水係数の変化を示したものである。添加する細粒分の混合率を横軸に、1Ec 締固め供試体の最小透水係数を縦軸に取り、添加する細粒分の塑性や膨潤性の有無毎に混合率と最小透水係数の関係を整理した。図中には、非塑性材料の遮水性能の下限ライン（ 10^{-7} m/s）及び実験Bにおいて透水係数の急減（ジャンプ）が生じた遷移領域の概ねの下限値（ 10^{-9} m/s）を併記した。図中には、これら3領域において混合土の土粒子間隙構造にどのような変化が生じているかの想

定を併記している。非塑性材料では土粒子同士が骨格構造を形成し、非塑性の細粒分が母材間隙を充填する構造を取る。透水試験時の水はその残存間隙を浸透し、残存間隙は材料の粒度や締固め密度（間隙比）により決まる。透水係数の遷移領域の上半分（ 10^{-9} m/s以上）の領域では、細粒分ケーキやベントナイトゲルが均一な被膜構造を形成するに至らず、土粒子骨格の残存間隙と被膜が混合した構造を有しており、湿潤側の加水～混合～締固めにより均一な細粒分被膜が面的に形成された瞬間に、一気に透水係数のジャンプが発生するものと想定される。被膜形成は、被膜の原材料（吸水した細粒分ケーキやベントナイトゲル）の総量と締固め時の圧延性により決定され、細粒分の塑性や膨潤性と混合量がこれを左右するのではないかと考えられた。2024年度は、この仮説を検証するために、図の3領域に相当する代表的な細粒土材料と混合率の組合せのもと締固め供試体を作製し、2023年度に試行した顕微鏡観察（表面の湿潤化含む）と画像解析手法により、その妥当性を確認することを通じて、土質系材料の透水メカニズムについて理解を深める予定である。

表-5 室内締固め一透水試験の実施状況と今後の実施計画案（実験A、実験B）

母材	添加する細粒分	混合率	1Ec締固め～透水 (6本)	λ/ε 実験 (12本)	令和6年度	
購入砂	無し	0		○	済	
粒度調整材	無し	0	○	○		
	珪砂粉(0)	30	R5年度実施済	—		
微粒砂（珪砂粉単体）	無し	0	R5年度実施済	—	済	
購入砂	珪砂粉(0)	10	○	○		
		30	R5年度実施済	—		
	藤森粘土(18)	10	R5年度実施済	—		
		30	R5年度実施済	12		12本実施
	木節粘土(47)	10	○	○		
		30	R5年度実施済	—		
微粒カオリン(61)	10	○	○			
	30	R5年度実施済	R5年度実施済			
粒度調整材		30	R5年度実施済	R5年度実施済		
購入砂	Ca型BT (110)	5	R5年度実施済	—	12本実施	
		10	R5年度実施済	12		
		20	R6年度実施予定	—		6本実施
		30	R5年度実施済	12		12本実施
		30	R6年度実施予定	—		6本実施
粒度調整材		30	R6年度実施予定	—	6本実施	
微粒砂（珪砂粉単体）		30	R6年度実施予定	—	6本実施	
購入砂	クニゲルV1(363) : JGS0312	5	R5年度実施済	R5年度1/2実施済 (6本)	残り6本実施	
		10	○	○	済	
		30	○	○		
		20	R6年度後半 (6本)	—		
購入砂	カオリン	20	1EC締固め～コーン試験 (6本)	—	6本実施	
	Ca型BT (110)	20		—		

青：非塑性材料

黄：非膨潤性材料

灰：膨潤性材料

()内は細粒土単体の塑性指数

○：既実施

赤：R5年度実施済

緑：R6年度実施予定

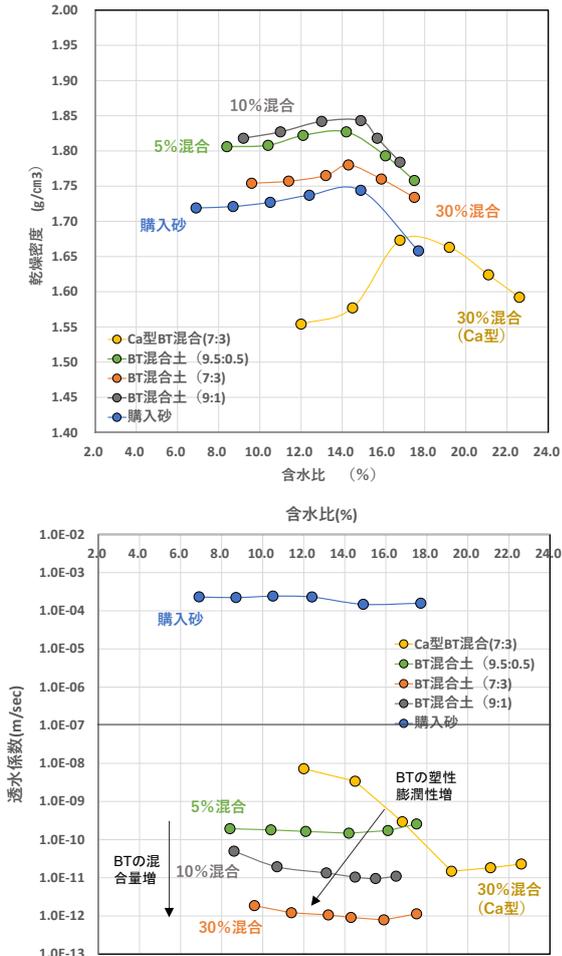
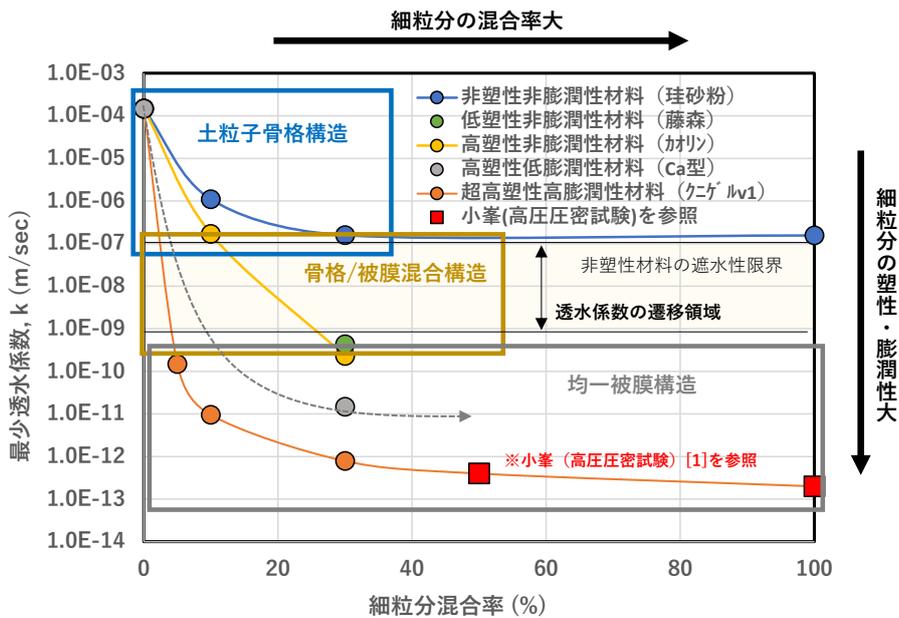


図-7 ベントナイト混合土の1Ec 締めめ-透水試験結果

- 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5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、2024
- 5) GoldSim User's Guide Version 14.0, GoldSim Technology Group LLC, 2021
- 6) 中深度処分の規制基準の背景及び根拠、原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、2022
- 7) 日本原子力学会標準 低レベル放射性廃棄物処分施設の安全評価の実施方法-中深度処分編：2023、日本原子力学会、2023

(低レベル廃棄物処分研究開発部)



※1Ec締めめにおける最小透水係数（湿潤側供試体）でプロット

図-8 非塑性～非膨潤性～膨潤性細粒分混合土における土粒子間隙構造の変化

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廃棄体の乾燥・ハンドリング設備仕様の具体化及び充填必要性検討に関する業務委託

L1廃棄体製作各段階で要求される技術要件を踏まえ、乾燥実証試験及び廃棄物ハンドリング実証試験の試験条件、試験装置仕様等を取りまとめた。また、砂充填の必要性の有無を判断するための技術知見を整理した。その上で、これらの取りまとめ・整理成果の標準への反映について検討を行った。

(2) L2廃棄体の製作検査方法の標準化に関する業務委託（フェーズ3）

L2大型角型廃棄体製作検査標準に規定すべき廃棄体製作方法及び検査方法に関する新知見を取り込み、標準内容の改訂検討を行うとともに、日本原子力学会審議支援などを行った。

(3) 中深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法の基本手順の改定支援業務（2023年度）

日本原子力学会標準「中深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法の基本手順」に対して行われた技術評価の結果を踏まえ、当該標準の改訂検討を行うとともに、学会審議支援を行った。

(4) 安全評価手法の学会標準改定支援業務助勢（2023年度）

浅地中処分施設及び中深度処分施設の安全評価手法の日本原子力学会標準について、それらの改訂作業や学会審議への支援を行った。

(This page(p10) is intentionally kept blank.)

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. 地層処分施設施工・操業技術確証試験

◇事業の概要

地層処分研究開発に関する全体計画（令和5年度～令和9年度）（以下、「全体計画」という。）では、処分場の設計と工学技術に係る取組みに関して、候補サイトの地質環境条件に対して柔軟に処分場の設計を可能とするための設計の詳細化・最適化への準備、段階的な技術実証を通じた建設・操業・閉鎖・回収に関する技術的な信頼性の向上の必要性が示されている¹⁾。

本事業では、設計の詳細化・最適化への準備（とくに設計の最適化を可能とするための技術オプションの整備）への貢献に留意しつつ、主に工学技術の実証的研究への対応として、処分場閉鎖技術の開発、詳細設計・施工技術オプションの開発、廃棄体回収技術の開発、処分場の建設・操業技術の高度化の課題に取り組む。

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5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】（地層処分施設施工・操業技術確証試験）」であり、以下では当センターの成果について報告する²⁾。

◇2023年度の成果²⁾

(1) 処分場閉鎖技術の開発－埋戻し材の設計・施工技術の開発

候補サイトの地質環境や施工環境に応じて埋戻し材の設計仕様や施工方法を柔軟に選択できるように、5ヵ年計画で埋戻し材の施工技術オプションに関する基盤情報、埋戻し材の材料特性データの整備を進める。施工技術オプションの整備では、複数の既存の施工技術（スクリー工法、ブロック工法、斜め転圧工法）について要素試験や工学規模施工試験等を実施し、埋戻し材の施工技術としての成立性を確認するとともに、埋戻し材の設計・施工方法を具体化し、施工可能範囲、達成可能な施工品質、施工速度、利用可能な掘削土の適用範囲等の施工情報を取得する。

また、施工後の品質管理を補完するための計測技術を併せて整備する。材料特性データの整備では、埋戻し材の配合設計のための基盤情報（材料データベース等）を整備するとともに、埋戻し材の性能に影響を及ぼす岩石の成分を確認し、埋戻し材に使用可能な掘削土の適用範囲を示す。なお、埋戻し材には材料調達のし易さ、経済性及び低透水性の確保の観点より、掘削土とベントナイトの混合土を利用することが考えられている³⁾ため、模擬掘削土にコンクリート用碎石・砕砂（JIS A 5005:2020）、ベントナイトにクニゲルV1（クニミネ工業製）を用いたベントナイト混合土を埋戻し材として各試験等を実施した。

○スクリー工法

スクリー工法は、複数本のスクリーフィーダを用いて、埋戻し材を坑道内に充填する工法であり、施工速度が速く、施工管理の省力化が期待できる。但し、スクリー工法で自然含水比の埋戻し材を使用する場合には、施工時の材料分離が埋戻し材の透水係数に及ぼす影響を確認しておく必要がある。そこで、充填後の埋戻し材の材料分離の程度やその傾向を確認するために、模擬掘削土の最大粒径及びスクリー高さをパラメータとした充填要素試験を実施した。

充填要素試験では、模擬掘削土の最大粒径を10、5、2.5mmの3種類とし、ベントナイト混合率を15%とした。また、スクリー高さは1,200、900mmの2ケースとした。試験土槽は幅450mm、奥行4,000mm、高さ1,500mmとし、図-1に示すように右側面には充填状況の確認用にアクリル板、左側面には試料採取窓を設けた。



図-1 土槽の側面

試験土槽の片側よりスクリーで埋戻し材を充填した後に、試料採取窓から採取した試料を用いて粒度試験を実施した。目開き0.425mmふるいの通過質量百分率の平均値からの差分値を用いて作成した粒度の分布図を図-2に示す。スクリーによる充填後の埋戻し材については、

下部に大きい粒径の土粒子が集まる傾向が見られたが、スクリーウの位置が低く、埋戻し材の最大粒径が小さいほど、材料分離の程度を小さくできることがわかった。今後は、材料分離が埋戻し材の透水性に与える影響を確認し、スクリーウ工法における材料・施工仕様の適用範囲を整理する予定である。

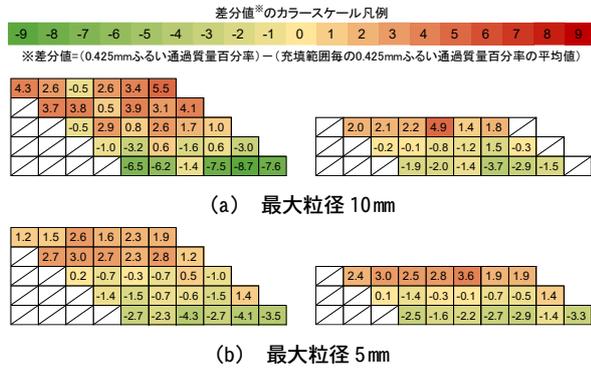


図-2 0.425mm未滿の材料の含有率の分布図
(スクリーウ高さ、左：1,250mm、右：900mm)

また、充填シミュレーションを用いてスクリーウ工法の今後の研究開発を合理的に進めるために、スクリーウフィーダによる充填模型実験とその充填シミュレーション(iGRAF:離散要素法に基づく粉体シミュレーションソフトウェア)を行った(図-3)。充填シミュレーションでは、模型実験で確認された埋戻し材の安息角約45°を保ちながらの充填状況や粒径の大きい土粒子が下部に集まる傾向などが再現できたことから、今後のスクリーウ工法の研究開発に活用できる見通しが得られた。

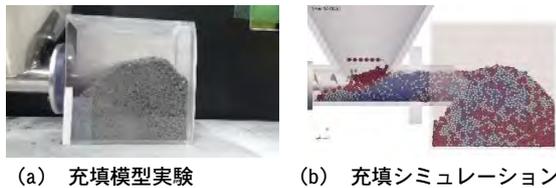


図-3 模型実験と充填シミュレーションの結果の例

○ブロック工法

ブロック工法は、地上の施設で埋戻し材をブロック状に圧縮成型し、そのブロックを地下の坑道に定置して坑道を埋戻す工法であり、ブロック品質の安定性が高く、現地作業や施工管理の負荷を低減できる。また、埋戻し材ブロックと坑壁の隙間やブロック間の隙間は、地下水の浸潤による埋戻し材ブロックの膨潤によって閉塞され、

低透水性が確保されること(自己シール性)が期待できる。

ブロック工法の研究開発では、配合設計(自己シール性含む)、ブロック設計(製作)、施工設計(定置)に関する検討を進めている。その一例として、施工設計のためのブロック定置試験では、既存の装置によるブロック定置の精度等のデータを取得するとともに、地下坑道内での定置作業に必要な定置装置の補助機構等を抽出した。定置試験では、今後の実証的な施工試験を想定して表-1に示す3種類のコンクリート製の模擬ブロックを用いた。また、定置装置には、プッシュ方式のアタッチメント付きフォークリフトを選定した。

表-1 コンクリート製模擬ブロックの仕様

	仕様
ブロックA	寸法:幅918×奥行1,000×高さ500mm、 質量:約1,100kg/個
ブロックB	寸法:幅454×奥行1,000×高さ500mm、 質量:約540kg/個
ブロックC	寸法:幅454×奥行1,000×高さ346mm、 質量:約380kg/個

ブロック定置試験の状況等を図-4に示す。ブロックの定置は予め設定した順序で問題なく行うことができ、選定した定置装置で埋戻し材ブロックと壁面の隙間幅が50mm以内、埋戻し材ブロック間の隙間幅が20mm以内で定置できることを確認した。また、地下の坑道内での埋戻し材ブロックの定置作業に向けて必要な管理項目(例えば、坑壁とブロックの距離、フォークリフト爪の位置、高さ、ブロック先端の高さ、チルト角度など)を抽出した。



図-4 ブロック定置の状況及び定置後のブロック

○斜め転圧工法

斜め転圧工法は、埋戻し材を斜めに撒き出して転圧する工法であり、坑道上半部の埋戻し材の施工技術としての適用が期待できるとともに、掘削

土の適用範囲を広く設定できる。ただし、斜め転圧機械の制約により施工品質（乾燥密度）については、一般的な転圧工法（水平転圧）より低くなる可能性がある。そのため、既存の斜め転圧機械による施工性及び施工品質を確認するために、図-5に示す模擬坑道（高さ5m×幅5mの幌型）における坑道下半部を対象とした施工試験を実施した。埋戻し材の模擬掘削土の最大粒径は20mmとし、ベントナイト混合率は15%とした。転圧機械には、振動バケットを装着した0.07m³級バックホウを用いた（図-6）。また、事前の試験結果から、施工試験における撒出しの傾斜角は35°、材料の含水比は11%とした。



図-5 模擬坑道



図-6 転圧機械

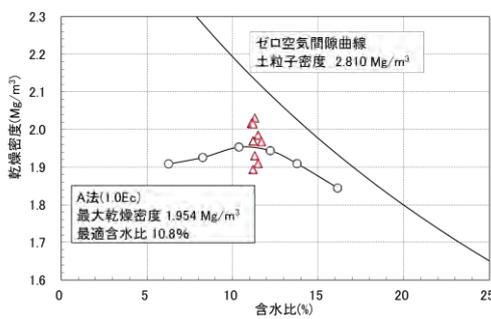


図-7 斜め転圧試験後の乾燥密度

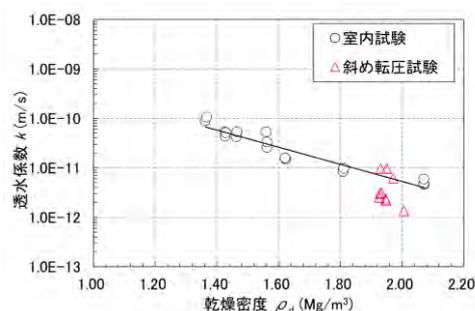


図-8 斜め転圧試験後の乾燥密度と透水係数の関係

施工試験後にサンプリングした供試体を用いて測定した埋戻し材の乾燥密度と透水係数を図-7及び図-8に示す。図-8には室内透水試験の結果も併せて示した。施工試験の結果、乾燥密度は1.89~2.03Mg/m³、透水係数は1.35×10⁻¹²~9.73×

10⁻¹²m/sの範囲であり、斜め転圧工法でも空間的制約のない坑道下半部の施工であれば、一般的な転圧工法と同等の施工品質を得られることがわかった。

○埋戻し材の品質確認技術の高度化

埋戻し材の膨潤挙動を把握するための計測技術として、加熱式光ファイバを用いた分布型温度センシング法（以下、「a-DTS法」という。）及び時間領域反射率測定法（以下、「TDR法」という。）の適用性を確認するための室内試験を実施した。a-DTS法では、加熱と温度測定が可能な光ファイバケーブルを用いて、加熱中の温度変化量からケーブル周囲のみかけの熱伝導率を算出することでケーブル周囲の状態を推定することができる。

試験装置の概要図を図-9に示す。内径85mm、長さ3mの亚克力パイプの内側に直径70mm、長さ100mmの複数の円柱状ブロック（ベントナイトとケイ砂の混合土）を設置した。ブロックのベントナイト混合率は70%と30%の2配合とし、有効粘土密度が同等になるように乾燥密度を調整した。光ファイバ及びTDRケーブルは亚克力パイプの頂部と肩部に2本ずつ設置した。この亚克力パイプ内に注水し、ブロックへの水の浸潤にともなう膨潤により隙間が閉塞する過程を計測した。

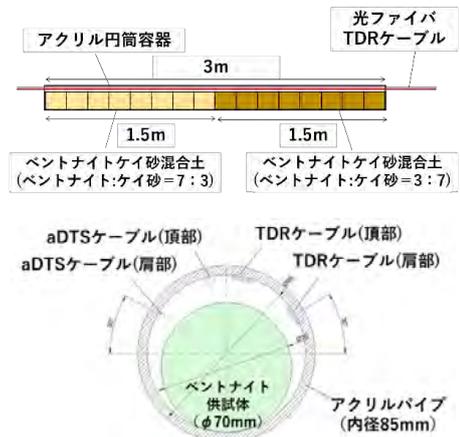


図-9 試験装置の概要図、上)側面図、下)断面図

亚克力パイプ頂部における注水後の時間とみかけの熱伝導率の関係を図-10に、注水前後のTDR波形の時間変化及び試験状況を図-11に示す。図-10から、熱伝導率は注水直後の水の値から急激に低下し、その後、徐々に増加した。この結果は、ケーブル周囲の環境が水から埋戻し材に変化

し、さらに埋戻し材の乾燥密度が増加する状況を定性的に表していると考えられる。また、図-11に示した反射係数の増減、電磁パルス伝播時間の変化から、TDR ケーブルの周囲が空気から水、水から土粒子に置き換わる過程を定性的にとらえることができた。これらの試験結果より、a-DTS 法及び TDR 法を用いることで、埋戻し材の膨潤初期の過程に加えて埋戻し材周囲の水位の上昇量を計測できる可能性があることがわかった。

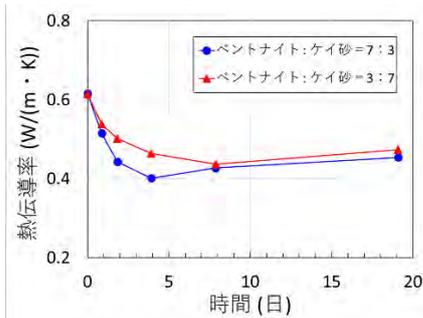


図-10 頂部におけるみかけの熱伝導率の経時変化

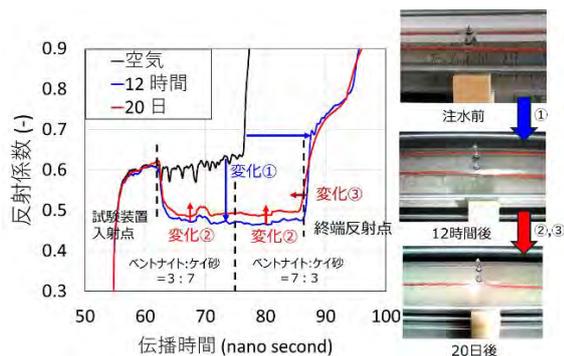


図-11 注水前後の埋戻し材の膨潤過程における TDR 波形の経時変化（天端部）

○材料特性データの整備

掘削土の化学的な変化（例えば、黄鉄鉱の酸化に伴う掘削土の酸性化など）を考慮した掘削土の利用可能性について検討するため、埋戻し材の性能に影響を及ぼす可能性のある掘削土の鉱物組成等について既往文献の調査を実施した。また、埋戻し材の材料特性データの拡充に向け、埋戻し材の膨潤及び透水試験を実施した。

既往文献の調査では、日本国内の岩石等について、ベントナイトに影響を及ぼす可能性のある現象や作用について調査し、埋戻し材のようにベントナイトが貧配合の場合には、間隙水の pH やイオン強度などが透水性に大きな影響を及ぼす可能性があることがわかった。そのため、埋戻し材

の性能に影響を及ぼす主な影響因子を pH、イオン強度、イオン交換及びセメンテーションとして今後の検討を進めることとした。

室内試験では、模擬掘削土の岩種を玄武岩、花崗岩、砂岩及び安山岩の4種類、最大粒径を2.5mmとし、ベントナイト混合率を15wt%とした。含水比は締固め試験の結果から最適含水比に設定した。通水溶液はイオン交換水を用いた。

有効モンモリロナイト密度と平衡膨潤圧の関係を図-12に、有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係を図-13に示す。図-12より、ケイ砂を混合した既往の結果に比べ、玄武岩、花崗岩及び砂岩を混合した場合、膨潤圧が低下する傾向がみられた。また、図-13より、安山岩を混合した場合、玄武岩や砂岩を混合した既往の結果と比べ、透水係数が若干高くなる傾向がみられた。これらの要因については、今後、供試体の固相分析や排水分析を実施して確認する予定である。

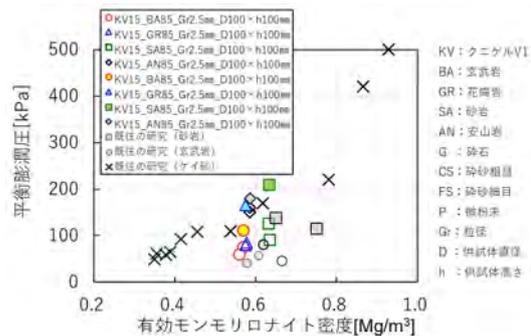


図-12 有効モンモリロナイト密度と平衡膨潤圧の関係

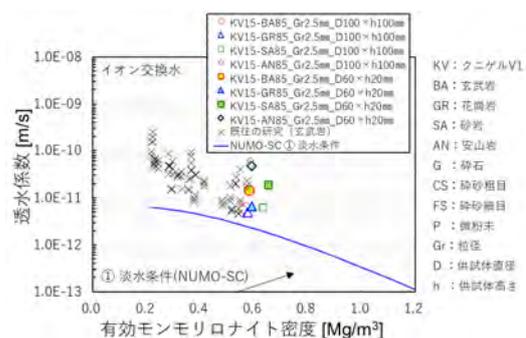


図-13 有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係

(2) 詳細設計・施工技術オプションの開発

設計や施工技術に対して複数のオプション（技術的選択肢）を準備しておくことで、多様な地質環境特性に応じた処分場の設計に柔軟性を与えることができると考えられる。そのため、現行の2つの定置概念（処分孔竖置き方式／処分坑道横

置き・PEM方式) に対する人工バリアの施工技術や回収技術の整備の過程で明らかになった課題を念頭に置き、建設・操業・(回収)・閉鎖の一連の事業段階を考慮した設計オプションの最適化の方法論、及び品質保証体系を整備する。

①横置き・PEM方式

設計・操業技術に関する最適化手法の先行的な検討において、最適化を“複数の設計オプション、或いは、複数の建設・操業技術オプションからの選択における比較評価”と定義し、その比較評価のための13の評価項目(素案)が提示されている⁴⁾。この検討結果を踏まえて、横置き・PEM方式における様々な観点のオプションを例題として最適化を試行しつつ、最適化の方法論の具体化に向けて検討を進める。

横置き・PEM方式のオプションは、PEM自体や地下施設レイアウトなどの設計に係る範囲、PEMの組立や搬送・定置などの操業技術に係るものに大別される。2023年度の検討では、閉鎖後長期の安全性に係るPEMの設計は現行のものとし、搬送・定置技術や操業・回収の作業手順や工程の検討に資する地下施設に着目し、処分区画形状を表現する要素とその選択肢を抽出した上で評価項目(素案)による比較評価を試行した。要素(カッコ内は選択肢)例としては、坑道幅(狭隘/大断面)、坑道連接角度(直角/角度付)、連接部形状(拡幅の有無)などが挙げられる。各要素の選択肢に対し、前述の評価項目ごとの評価指標例や評価の考え方⁴⁾に基づき特徴を記述することで選択肢間の比較評価を行った。さらに、要素を組み合わせることで、ある特徴に特化した処分区画形状(例えば、掘削土量の最小化)を例示した。

今回の最適化の試行は、処分区画の要素に着目し、個々の比較評価の結果を組み合わせることで処分場概念を具体化していく積上げ型の方式である。他方、複数の処分場概念から地質環境に応じて選択する場合や、環境に応じた仕様の詳細化や建設・操業技術の選択など、最適化が求められる場面への対応も必要である。今回の積上げ型に加えて、処分場概念レベルでの最適化を試行し、評価項目の更新、及び方法論の具体化を進めていく。

②縦置き・ブロック方式

処分孔への人工バリアの定置から処分坑道の埋戻しまでの300日程度(新第三紀堆積岩類で284日³⁾)の期間に地下水の浸潤により緩衝材が坑道に膨出し、乾燥密度が低下することでその性能が低下する可能性がある⁵⁾。

そのため、緩衝材の定置後にその上部にキャップ(蓋)を設置し、ロックボルトで固定する方法や坑道天盤で支持する方法が検討されている⁵⁾。しかし、ロックボルトが処分孔周囲の岩盤に損傷を与えること、坑道の埋戻し前に支持材を撤去する必要があることなどの課題がある。NUMOの包括的技術報告書(以下、「NUMO-SC」という。)では、処分孔の湧水対策として防水シートにより緩衝材と湧水の接触を防止する方法³⁾が示されているが、処分坑道を埋め戻す際に防水シートの除去が必要となる。そのため、これらの方法ではなく、緩衝材の簡易的な膨出抑制方法を新たに整備できれば、操業の工程を簡略化することができる。

そこで、緩衝材の膨出に関する研究方針の具体化のための予備調査として、実規模スケールにおける300日間の緩衝材の膨潤変形量を膨潤特性理論評価式^{6),7)}を用いて保守的な条件(図-14右)で算出した。なお、膨潤変形量の計算では、緩衝材を図-14に示す領域A、B及びCに区分し、各領域で地下水の浸潤深さに対して上部方向への一次元の膨潤変形量を求めた。求めた各領域の膨潤変形量を平均化すると膨潤変形高さは、560mm程度であった(図-14)。この結果から、処分坑道の埋戻しまでの期間の緩衝材の膨潤量を考慮し、処分孔内の上部に空間(膨潤変形しろ)を設け、適切な乾燥密度の緩衝材を定置するなどの簡易な方法で緩衝材の膨出を抑制できる可能性があることがわかった。

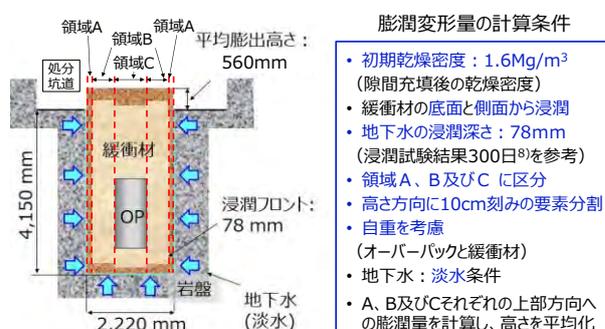


図-14 緩衝材の膨潤変形量の計算結果

上記の膨出抑制方法の具体化に向けて、より現実的な条件で膨潤変形量などを把握するために、緩衝材の飽和プロセスを対象とした弾塑性解析コード DACSAR-I による解析方法⁹⁾について検討した。その結果、本解析手法により緩衝材の膨潤変形量に加えて、地下水の浸潤現象と膨潤に伴う乾燥密度分布を表現できる見通しが得られた。今後は緩衝材の膨出抑制方法の具体化及びその適用性を確認するための試験等の計画策定を進める。

③品質保証体系の整備

第一種廃棄物埋設に関する安全規制では、核燃料物質等による放射線の被ばく管理に関する定期的な評価を実施することが求められている。この評価では、最新の技術的知見を踏まえた性能評価及び安全評価を実施して、規制への適合性を判断することになると考えられる。したがって、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などの情報を取得するための取組が重要となる。

これまでに、地層処分事業が先行する海外における人工バリアを含む地下構成要素の品質保証に類する取組みを参考にして、地下構成要素の品質保証体系の整備の考え方を整理するとともに、品質保証体系を以下の2つのプログラムに切り分けて品質保証体系の素案を整備した¹⁰⁾。

品質管理プログラム：地下構成要素の仕様を満足する製造・施工を実施し、施工品質を把握するための取組

性能確認プログラム：被ばく管理に関する評価に必要な情報を取得するための取組

2023年度は、地下構成要素の品質保証体系の素案の具体化の方針について検討するために、廃棄物埋設に関する法令等を参照して定期的な評価等に関する規制動向について整理するとともに、規制基準が整備されている第二種廃棄物埋設のうちピット処分の事業変更許可申請書における監視及び測定に関する取組み内容を分析した。

上記の事業許可変更申請書には、監視及び測定の設定に関する考え方や具体的な監視測定設備について記載されており、これらの情報を踏まえて、第一種廃棄物埋設における性能確認プログラムの具体化の方針を以下のように設定した。

- 1)監視及び測定の対象とする項目(案)の選定
 - 2)監視及び測定の間隔と場所の分類
 - 3)監視測定装置の整理
 - 4)今後の研究開発課題の整理
- 今後は、上記に示した方針に基づき性能確認プログラムの具体化を進める。

(3)廃棄体回収技術の開発

地層処分事業への可逆性・回収可能性の導入という施策に対する社会の信頼感を高めるため、回収手順や技術の具体化、及び試験による実現性の提示、並びに基本方針に示された回収可能性を維持した場合の影響等についての課題に着実に取り組んでいく必要がある。安全な回収が合理的に継続できる範囲で確保する回収可能性の維持期間の定量化に向け、NUMO-SC に例示された現行の2概念を対象として、廃棄体回収技術の開発、回収可能性の維持に伴う影響の定量化技術の整備に取り組む。

①廃棄体回収技術の開発

定置済みの全ての廃棄体の回収作業に要する時間の定量化、及び回収作業の技術的实现性の提示のため、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(以下、「状態B」という。)からの回収手順の具体化、及び個別作業に必要な技術の整備を行う。

○処分孔縦置き方式の回収技術の高度化

状態Bの処分坑道の力学プラグ及び埋戻し材を撤去して坑道を再開放した後、処分孔内のオーバーパックに機械的な損傷を与えずに緩衝材を除去する方法として、流体的除去技術が候補に挙げられている³⁾。これまでに、塩水を使用した緩衝材除去システムの整備や実規模スケールの実証試験¹¹⁾、ウォータジェット(WJ)方式の採用による作業迅速化と段階的に技術開発を進めてきた¹²⁾。本フェーズでは複数体の廃棄体回収への除去システムの適用性向上に向け、WJ方式に対応した塩水リユース設備の整備に着手した。

塩水リユース設備は緩衝材除去システムの構成要素の一つで、除去生成物であるベントナイトスラリーから噴射水を再生し、固形物である緩衝材成分を系外へ排出する機能を持つ¹¹⁾。スラリー中の浮遊物は塩水中の陽イオンで凝集し、基礎フ

ロックとなって沈降するが、速度は液固比が高いほど遅くなる。WJ方式によるスラリーの濃化、除去作業中の液固比の変動に対して安定且つ迅速に固液分離を行うことは、設備の小型化に寄与し、除去システムの地下環境での適用性向上に繋がる。

この課題に対し、高分子凝集剤を使用した二段凝集に着目し、液固比と添加量の関係、固液分離特性に与える効果を検証した。塩水 WJ方式で緩衝材を除去した際のスラリー液固比の幅を算出し、ジャーテストで各液固比における適量添加量を取得し、沈降試験を実施した。結果、図-15のように沈降が遅い高濃度のスラリーであっても、凝集剤により基礎フロックが集合して粗大フロックが形成され速やかに凝集・沈殿が生じるため、固液分離に要する時間を大幅に短縮できる見通しを得た。

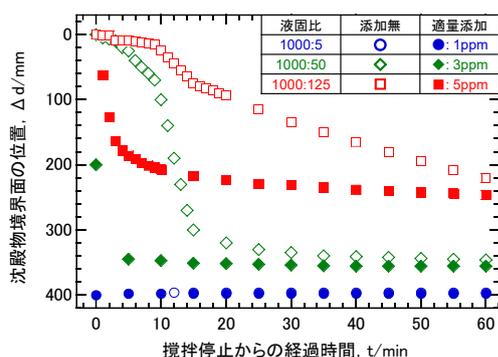


図-15 凝集剤添加による沈降促進効果

今後、沈降試験で取得した沈殿物の液固比、上澄み液の回収率や濁度などのデータも併せ、塩水 WJ 対応のリユース設備を具体化していく。

○処分坑道横置き・PEM方式の回収技術の高度化

状態 B の処分坑道から廃棄体を PEM の形態で回収する際、坑道寄りの隙間充填材を機械的(切削)な方法で除去することが考えられている³⁾。これまでに、PEM を跨ぐ逆 U 字型の除去装置の概念設計を行うとともに、装置前方で隙間充填材を切削・排土する除去ユニットの開発を進めてきた¹²⁾。実際の作業を想定した除去試験において、ポイントアタック型のピックを装着した軟岩用切削装置を使用した結果、高含水比の条件でカッタードラム部に除去生成物が付着し、切削機能が低下する事象が確認された¹²⁾。本フェーズでは、幅広い

含水比の除去生成物を高効率で切削・排土する除去ユニットの開発を行う。

切削機能の低下要因となる除去生成物の付着を抑制するため、解砕原理を点荷重による破碎から薄刃による切断へ変更するとともに、切削片が蓄積しないピック形状と回転軸上への配列を検討した。図-16に粘土用に改良した L 字薄刃型のピック、及びカッタードラムのピック配列例を示す。このカッタードラムを使用し、隙間充填材を模擬した供試体に対して、回転数や送り速度、切削方向などをパラメータとした切削試験を実施し、切削効率や切削片の排出挙動などのデータを取得した。

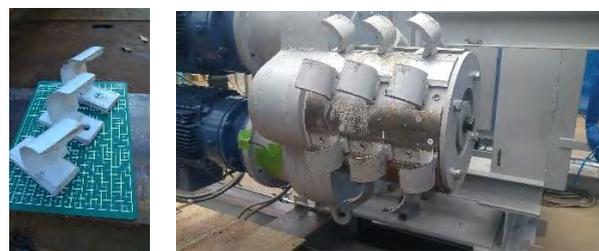


図-16 ピック形状とピック配列の例(ピック数 22 個)

図-17に、ピック数22、回転速度220rpm、送り速度10m/min、下から上方向にアップカットで切削した場合の例を示す。

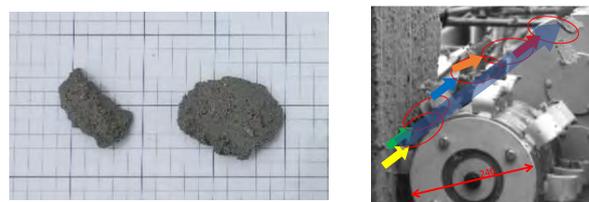


図-17 切削片形状と回転部からの排出方向の例

いずれの試験条件においても、カッタードラム上への除去生成物の付着・蓄積は生じず、切削効率の低下は認められなかった。また、切削片は鱗片状で重量は同一条件内ではほぼ均一であった。さらに、切削片の排出方向はカッタードラムの回転方向、及び移動方向と関係があることを確認した。これらの結果より、機能低下が生じない切削機構の実現、及び切削片の捕集効率を高める排土機構の受け口の具体化の見通しを得た。

今後、改良した切削機構で施工直後の低含水比(16%程度)の供試体についても切削試験を行い、含水比の違いによる切削片の形状や排出方向に

ついでの見解を拡充するとともに、排土機構を含む除去ユニットの構造を具体化していく計画である。

○PEM 回収時の作業安全の確保に係る技術開発

PEM 容器が腐食などにより大きく破損している場合など、回収時に PEM としてハンドリングが困難な場合を想定した廃棄体の回収技術の整備に、本フェーズから着手した。

廃棄体を PEM として回収できない場合、オーバーパックの形態で回収することが考えられている³⁾。回収作業手順の具体化の結果、隙間充填材除去後の PEM に対して、緩衝材の除去やオーバーパックの取出しのための PEM 容器の開封作業が新たな個別作業として抽出された。求められる要件としては、オーバーパックを損傷させないこと、後続作業に必要な広さに開口できること、坑道内の限られた空間・環境に適用できること、現実的な作業時間であること、遠隔操作性などが挙げられる。

開封装置の概念設計に向け、鋼殻切断技術の選定に資する技術情報の取得から着手した。初めに、厚さ3cm程度の炭素鋼の切断実績がある既存技術を調査し、熱切断、流体切断、機械切断の3つの原理に分類した。次に、金属の熔融を伴う熱切断を除く2つの原理から PEM 容器の開封に適用できる見込みがあり、且つ開封装置の具体化の検討に必要な作業姿勢や切断効率などの基礎的なデータの取得が必要な技術として、アブレイシブウォータージェット(AWJ)、ワイヤ・ソー、丸鋸を選択し、開封作業を想定した切断要素試験を行った。

図-18に AWJ による切断要素試験の例を示す。AWJ は研磨剤を加えた超高压噴流で金属を切断する技術であり、PEM 容器内部に噴射水が停留しないよう、PEM 前方から側方へ噴流が出る切断姿勢を想定した。切断部は図-18左に示すような鋼板2枚で緩衝材を挟む形となるため、この部分を再

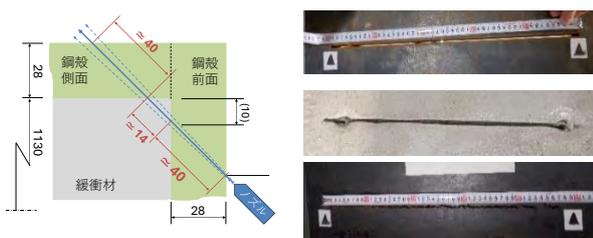


図-18 AWJ による切断位置の模式図、切断後の鋼板外観
(右図上：1枚目表、中：緩衝材、下：2枚目裏)

現した供試体を用意して切断試験を行った。その結果、切断速度0.5m/minで2枚の鋼板を同時に切断できることを確認した。一方で貫通した噴流にエネルギーが残存しており、坑道壁面を損傷させる可能性が示唆された。

ワイヤ・ソーや丸鋸についても同様に、技術に応じた切断姿勢を想定した供試体に対して切断要素試験を行い、切断効率や切断工具の損耗具合、乾式/湿式両方式での火花の発生の有無など、実際の切断作業を見据えた技術情報を取得した。

技術情報調査、及び切断要素試験で取得した知見を踏まえ、一連の回収作業の内容を具体化した。今後、開封時の動作の具体化など、PEM 容器開封作業の装置化に向けた開発を進めていく。

②回収可能性の維持に伴う影響の定量化技術の整備

操業期間中及び閉鎖後長期の双方の安全性が確保されるように設定される回収可能性の維持期間において、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て、前フェーズでは、ストーリーボードを用いて、定量化すべきシナリオ及び定量化手法を整理するとともに、技術課題を取りまとめた¹²⁾。これらを踏まえ、2023年度からの5ヵ年では、処分場の建設から操業、埋戻しに至る迄の期間(全量定置後に速やかに閉鎖措置に至る標準工程)における地下構造物の安定性及び供用性について具体的に定量化する手法の提示を目標とする。

本目標に向けた回収可能性の維持に伴う影響の定量化の流れ、必要な技術及び本年度の成果を図-19に示す。地質環境条件及び地下構造物の仕様に対し、整理したサブシナリオ(処分場構成要素ごとの定量化すべきプロセス)に基づき処分場構成要素ごとの変遷を定量化する。次に、処分場構成要素ごとの変遷結果を統合化して処分場における地下構造物全体の変遷を定量化する。この結果を地下構造物の安定性及び供用性の判定基準に基づいて評価する。この流れに対して、本年度は、「サブシナリオの整理」として、サブシナリオの対象となる要素または区分のプロセスを明らかにする必要があることから、サブシナリオを25個に集約し、サブシナリオを環境条件(温度、水理、力学、化学)と要素や区分の定量化するプロセス及び具体的な定量化項目を整理した。「定

「量化手法の検討」では、集約した環境条件、定量化するプロセスについて、既往の技術レベルの事例及び情報（地下研究施設での試験等も含む）を調査し、適用可能な定量化モデルを抽出した。また、各要素の定量化結果の統合化手法を提示した。「安定性及び供用性の判定基準の検討」では、道路、鉄道及び水路トンネルの劣化状況の判定基準に係る知見を参考に、処分場の地下構造物の安定性及び供用性に係る照査項目（案）を提示するとともに、照査項目の判定基準の設定に向けた考え方を整理した。以上のように、回収可能性の維持に伴う影響について、処分場の地下構造物の安定

性及び供用性の定量化手法の整備に向け、2022年度までに作成したサブシナリオの定量化に必要な手法並びに地下構造物の安定性及び供用性の判定基準に係る情報を整理した。

今後、地下構造物の安定性及び供用性の定量化手法の構築に向け、2023年度に整理したサブシナリオ、定量化手法及び判定基準の見直しを行う。また、開発した定量化手法の検証に活用可能と考えられる劣化調査事例等の調査を行う。そのうえで、定量化モデルや統合化手法を具体化し、個別のプロセスについての試解析を実施していく。

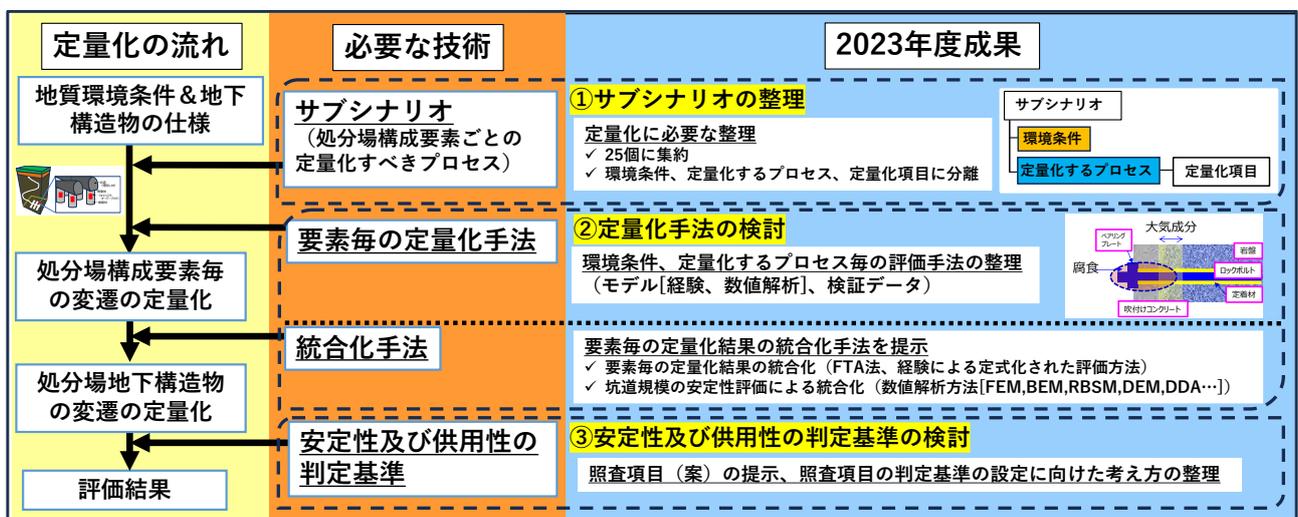


図-19 回収可能性の維持に伴う影響の定量化の流れ、必要な技術及び2023年度の成果

(4) 処分場の建設・操業技術の高度化

処分場の建設・操業においては、作業安全及び放射線安全の確保、ならびに生産年齢人口の減少に伴う将来の労働力不足に対する作業効率化の観点から、全ての作業プロセスにおけるロボティクス及び情報伝達技術（ICT：Information and Communications Technology）の導入、作業の遠隔操作化・自動化による無人化施工の実現性の検討を進める方針が示されている¹⁾。そのため、他分野におけるロボティクス及び情報伝達技術の開発・導入動向を調査し、建設・操業に適用可能な要素技術を整理したうえで遠隔操作・自動化技術の導入のための評価項目（案）を設定するとともに、今後の取組みの方向性を設定した。

調査対象は、土木・建築分野における無人化施工技術、放射線環境下における遠隔操作技術、自動車産業等における自動運転技術に係る公開情報とした。調査結果について、対象技術と今後の

基礎研究としての研究開発の方向性（素案）の概要を以下に示す。

ロボティクス技術（坑道建設技術）：他分野（トンネル建設分野など）で開発された建設技術を地層処分技術（地下施設の建設技術）として活用することが期待できる。そのため、他分野に開発を委ね、引き続き開発動向を調査する。

ロボティクス技術（操業・閉鎖技術）：他分野における要素技術を参照しつつ、改良を加えて地層処分事業の特徴に留意して操業・閉鎖技術へと開発・整備していく必要がある。そのため、ハード技術を主体とした研究開発（ロボティクス技術を加味した要素技術開発、導入し易い概念や設計の開発）への貢献を念頭に、有用なロボティクス技術の抽出と導入する際の技術課題の抽出に向けて、他分野の有用技術に関する詳細な調査を進める。

情報伝達技術：既に存在する技術を活用して、地層処分事業者がニーズや要求事項を踏まえてカスタマイズあるいは開発整備することが効果的である。そのため、今後は、地層処分事業に固有となる事項への対応（膨大なデータや知見のセーフティケースへの統合など）について地層処分事業者等と課題の優先度や役割分担などの協議を進める。

ロボティクス及び情報通信技術の導入の可否を判断するための評価項目（案）については、最適化の方法論に対する考え方⁴⁾を参照し、以下のように設定した。ロボティクスや情報通信技術を導入する意図やメリットの観点による評価項目として、①放射線防護、②設計上の作業環境の制約、③一定の施工品質の確保、④人的リソースの合理化、⑤作業事故リスクの回避を設定した。また、将来の導入検討において留意すべき評価項目として、⑥開発・導入における技術的難しさ、⑦ロボティクスの故障や予期せぬ誤動作からの復旧のしやすさ、⑧開発・導入・運用に係る費用を設定した。

(5) 地層処分実規模試験施設の運営

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処分孔竖置きブロック方式における実物大の人工バリアのカットモデル、幌延深地層研究センターの地下の試験坑道での実証試験で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行った（図-20）。また、来館者の意見や動向を反映し、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に運営を行った。

2023年度の来館者数は5,495人、開館からの累計来館者数75,068人となった。本施設は、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-20 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（令和5年度～令和9年度）、2023.
- 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5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地層処分施設施工・操業技術確認試験報告書、2024.
- 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一適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築一、2021.
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター、地層処分施設設計・操業技術の最適化手法に関する研究、RWMC-TRJ-20001、2021.
- 5) わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性一地層処分研究開発第2次取りまとめ一分冊2、JNC TN14007410-99-02201、1999.
- 6) Komine, H., Ogata, N., New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials, Canadian Geotechnical Journal, vol. 40, No. 2, 2003, pp. 460-475.
- 7) Komine, H., Ogata, N., Predicting Swelling Characteristics of Bentonites, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 130, No. 8, 2004, pp. 818-829.
- 8) 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認技術開発 報告書（第2分冊）、2018.
- 9) 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4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認技術開発平成30年度～令和4年度取りまとめ報告書、2023.
- 10) 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4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地層処分施設閉鎖技術確認試験取りまとめ報告書、2023.
- 11) 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.
- 12) 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4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、2023.

（地層処分工学技術研究開発部）

2. ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発

◇事業の概要

地層処分事業のサイト選定段階における安全評価においては、処分システムの長期変遷等をより現実的に考慮した評価技術が求められる。この実現には、処分施設の建設・操業期間から処分施設閉鎖までの期間とその後の過渡期から数万年以上の長期にわたる期間を対象に、ニアフィールド(NF)を構成する材料間及び諸現象間の相互作用などを考慮したニアフィールドの状態変遷をより実現象に即して評価するための技術開発が必要となる。

本事業では、先行事業「ニアフィールドシステム評価確証技術開発」(原子力機構・原環センター, 2023)¹⁾及び「TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発」(原環センター・原子力機構, 2023)²⁾で得られた成果と抽出された課題を踏まえて、以下のサブプロジェクトを設定した。

- ニアフィールド状態変遷評価技術の高度化
- 熱影響評価技術の高度化
- ガス発生影響低減技術・評価技術の高度化
- 人工バリアの閉じ込め機能の高度化

本事業では、高レベル放射性廃棄物(HLW)とTRU廃棄物の地層処分システムを対象に、過渡期から処分施設閉鎖後長期におけるNFの状態変遷のより

実現象に即した評価技術の構築を目的としながら、前述の4つのサブプロジェクトにおいて、以下を実施する。

- 処分場においてHLWガラス固化体がおかれる状態をより忠実に反映した条件における複数の異なる構成材料からなるニアフィールドの状態変遷の評価
- 廃棄物の発熱による人工バリア性能への影響に対する処分場設計の安全裕度や、緩衝材の制限温度の緩和の可能性などの観点から、100℃超を含む熱影響の評価
- 廃棄物による水の放射線分解等に由来して発生するガスの影響評価やガス発生量低減に向けた固化処理技術の開発
- TRU廃棄物の地層処分の信頼性を担保する人工バリアの閉じ込め機能の高度化

また、本事業の実施にあたっては、HLWとTRU廃棄物のいずれにも共通的な取り扱いが可能と考えられる領域や材料配置を対象とした課題については、成果についても共通的な活用を目指して研究開発を進めるとともに、ニアフィールドの構成材料に期待する核種移行遅延効果などの諸機能に及ぼす影響を評価することを可能とするために、関連事業(「地層処分安全評価確証技術開発(核種移行総合評価技術開発)」)³⁾と連携し、ニアフィールドの状態変遷に関する検討成果を核種移行評価に反映することを図る(図-1)。

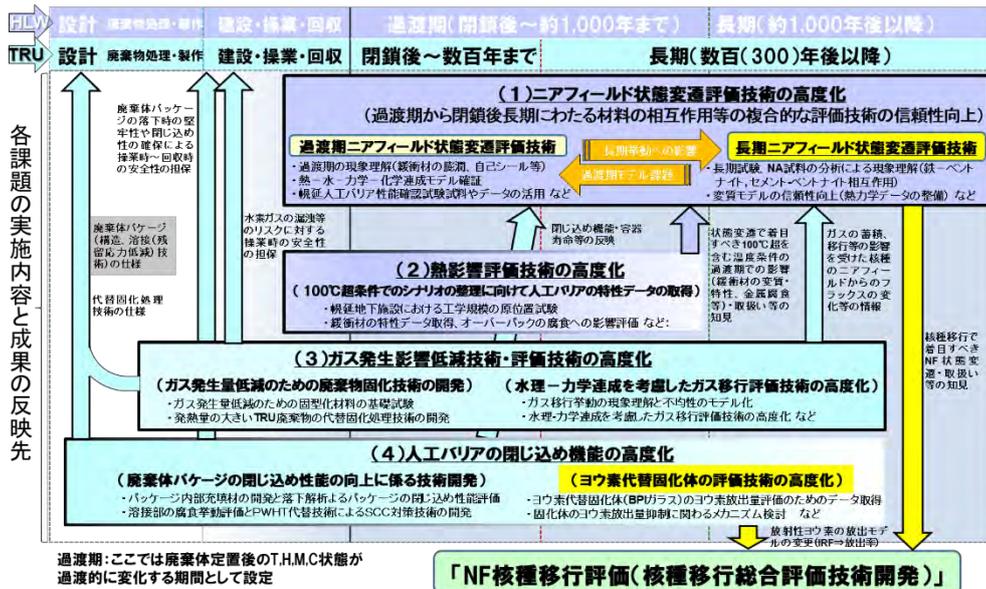


図-1 時間スケールに対する本事業の実施項目と成果の反映先の関係

なお、本事業は、日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター及び電力中央研究所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5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長期環境変遷評価技術開発）」⁴⁾であり、以下では、その成果のうち、当センターで検討した成果について報告する。

(1) 検討項目

当センターでは、本事業の実施項目の内、TRU 廃棄物の処理処分に関する以下の課題について検討する。

- ガス発生影響低減技術・評価技術の高度化
 - 1) ガス発生量低減のための廃棄物固化処理技術の開発
 - 2) 水理-力学連成を考慮したガス移行評価技術の高度化
- 人工バリアの閉じ込め機能の高度化
 - 1) 廃棄体パッケージの閉じ込め性能向上に係る技術開発
 - 2) ヨウ素代替固化体の評価技術の高度化

ガス発生影響低減技術・評価技術の高度化に関しては、TRU 廃棄物近傍の初期のガス発生量が著しい場合に閉鎖前の操業中の安全性への影響が懸念されることに加え、初期の発生量が少ない場合でも、閉鎖後長期における処分場への蓄圧、破過現象に伴う緩衝材等の変形による力学安定性の低下やガスによる汚染水の押出しによる核種移行の加速といったニアフィールドの長期性能への影響が懸念されている。ここでは、放射線分解ガスの発生量を低減させる廃棄物固化処理技術の開発を実施するとともに、より現実的な処分施設へのガス発生による影響評価が可能となるように、水理-力学連成ガス移行評価モデルを高度化する。

人工バリアの閉じ込め機能の高度化に関しては、瞬時放出成分（Instant Release Fraction、以下、IRF という）の影響、あるいは、地質媒体やバリア材移行遅延機能が限定的な陰イオン核種の影響が安全評価上の課題となっている。ここでは、廃棄体パッケージ容器による閉じ込め性の担保により IRF の影響を抑制するために、熱的制

限のある廃棄物に対する適用を考慮しながら、残留応力に起因する応力腐食割れの影響を低減する技術や内部充填材を開発するとともに、操業中の安全性に係る閉じ込め性の担保に向けて、落下時の閉じ込め性を評価するための解析技術を開発する。また、陰イオン核種のうち、IRF でありかつ、バリア材等への収着の見込めないヨウ素 129 への対策として、これまでに開発を進めてきた 10 万年間の閉じ込めを見込める固化体を対象に、その長期的性能の説明性の確保に向けて、ヨウ素放出の現象解明とモデル化に取り組む。

(2) ガス発生影響低減技術・評価技術の高度化

1) ガス発生量低減のための廃棄物固化処理技術の開発

ガス発生量低減のための廃棄物固化処理技術の開発では、TRU 廃棄物のグループ 4H に分類される比較的発熱量の大きい廃棄物を対象に、その代替固化処理において有効なガス発生量低減対策を示すことを目的として、ガス発生量の低減の可能性が高い固型化材料を対象に、固化性能を保ちつつ放射線分解に寄与する水分量を削減する改良を目的とした基礎試験を実施する。さらに、廃棄物の充填固化を想定した工学試験を実施して固化処理への適用性を確認する。

2023 年度は、固型化材料の選定と各固型化材料の固化処理技術の改良やガス発生挙動に係る物性データを取得し、ガス発生量低減化のための改良ポイントを整理した。

① 代替固化処理技術の対象となる固型化材料の選定

発熱量の大きい TRU 廃棄物の代替固化処理技術の開発においては、既存の固化技術を改良して適用可能性を検討することとし、その候補材料を選定した。高発熱性の廃棄物のため熱影響が懸念されるもの、高い表面線量のために放射線分解が懸念されるもの、固化体の製造時のハンドリングや品質管理が難しいものは除き、大型の固化処理プラントの必要がなくセメント固化と同等の設備で固化処理が可能なジオポリマー固化及びセメント固化を対象とすることとした。

これらの二つの固化方法において、各固化処理技術に用いる固型化材料の基本特性に基づき、ガス発生量が低いもの、あるいはガス発生量の低減

のため固化処理技術の改良の方向性が明確な特徴を有している固型化材料を選定し、以下の4種類の固型化材料について、放射線分解ガス低減化のための固化処理技術の改良、ガス発生挙動に係る物性データの取得を実施し、ガス発生量低減化のための改良ポイントを整理した。

ジオポリマー固化

- ・無機添加剤含有ジオポリマー
- ・分散剤添加高炉スラグジオポリマー
- ・乾式ジオポリマー

セメント固化

- ・高強度高緻密コンクリート

②無機添加剤含有ジオポリマー

無機添加剤含有ジオポリマーは、無機添加剤としてホウ酸を添加することで、混練開始から混練物に流動性がなくなるまでの低粘度を維持する時間（可使用時間）を長くできるだけでなく、固化体の水素発生を低くできることから、添加剤や骨材等の配合の検討により固型化材料の更なる改良が期待できる固型化材料である。

EGA-MS 分析から（図-2）、セメント試料は400℃付近で $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が分解することから間隙水は自由水と結合水として存在しているのに対し、ジオポリマー試料は全て自由水であることを確認した。

固化体の照射試験から、無機添加剤としてホウ酸を添加したジオポリマー試料からの水素発生量は、添加していないものより小さくなることが確認できたが、固化体の含水率が高いため水相の直接影響が強くなってしまい、固相からの間接影響によるガス発生量の低減幅は小さかった。

無機添加剤含有ジオポリマーの改良のポイントは、骨材を多孔質の材料に変える等により、中心部からの脱水経路を確保することによる乾燥

効率化や、乾燥処理の速度等の乾燥処理の条件の最適化を図ることによる固化体中の自由水として存在する水相の低減と、無機添加剤の種類や量を調整した軽元素のジオポリマーの配合の検討や、温度や雰囲気制御によるジオポリマーの微細構造（比表面積等）の物性を変化させることによる固相の電子密度の低減である。

③分散剤添加高炉スラグジオポリマー

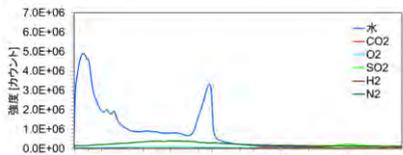
分散剤添加高炉スラグジオポリマーは、粒子分散効果のある混和剤（添加剤）によって硬化前の流動性と保持性を高め、水以外の方法で反応を制御し、混練水の添加量の抑制が可能なることから、放射線分解ガスの低減につながる固化体中の含水率の低下が見込める固型化材料である。

配合を変えた固化体の含水率の測定から、フライアッシュより高炉スラグをより多く配合した試料の方が含水率が低くなる傾向があり、高炉スラグ多配合の含水率は養生期間28日で6～7%であり、28日の養生期間において2～4%程度含水率が低下していることを確認した（図-3）。

機械的強度については、打設後7日間で一軸圧縮強度が10MPa を超えていた。流動性については、フロー試験の結果、混練後30分以上、フロー値150mm 以上の高い流動性を持つものが多い。このことから、流動性や強度には余裕があり、固化体の含水率低減の改良において、これらが大きな障害にはならないことが予測される。

分散剤添加高炉スラグジオポリマーの改良のポイントは、自然乾燥/加温乾燥等の乾燥方法によらず、高炉スラグの配合比を増やすことや混練水を減らすことによる配合の最適化である。

セメント試料



ジオポリマー試料

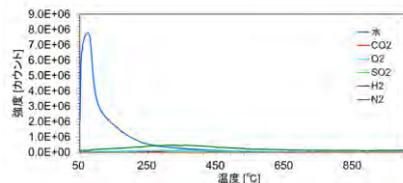


図-2 EGA-MS 分析結果

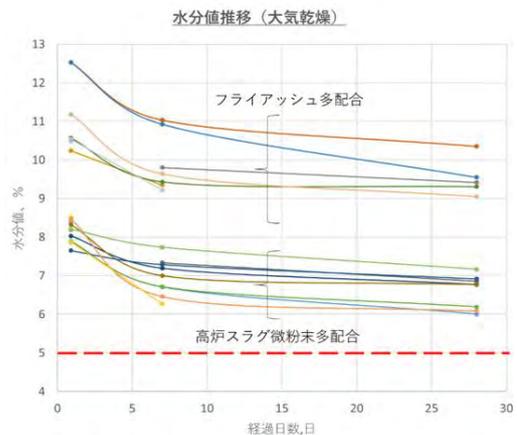


図-3 分散剤添加高炉スラグジオポリマーの水分測定結果

④乾式ジオポリマー

乾式ジオポリマーは、アルカリ刺激剤に水和物を含む粉末を用いることで混練水の必要がないことから、固化体中の含水量の低減が期待できる固型化材料である。

固化体の含水率の測定から、3日間の加熱後大気養生した条件での含水率は養生期間28日で17.6%であり、湿式のジオポリマーと比べると含水率がかかなり高い。また、養生期間は吸湿により含水率が上昇していることを確認した。

乾式ジオポリマーの改良のポイントは、配合に自由度があまりないため、乾燥処理により固化体の含水率を低減させることである。

⑤高強度高緻密コンクリート

高強度高緻密コンクリートは、水和反応に寄与する粉体の量に対する水量が非常に少なく、水結合材比を水和反応の限界付近まで低くしていることで、組織の高緻密化と超高強度に加え、硬化後の自由水量が少なく、乾燥工程を設けなくてもガス発生量の低減が見込めるセメント系の固型化材料である。

固化体の含水率と水和反応について、材齢7日程度までは水和反応が比較的速い速度で進行しており、その後の水和反応はゆっくりと進行しているものと考えられる。また、養生期間の経過に伴う水和の進行により、高強度高緻密コンクリート中の空隙径は小さくなる傾向が認められた。一方で、照射試験から(図-4)、水素ガス発生量は、形状の小さい試料ではOPC系材料の自由水量とガス発生量の相関関係(図-4の点線：令和4年度の相関)に近い値となった。試料サイズの違いによって、水和の進展や水和による構造の緻密化が自由水量や水素ガス発生量に影響している可能性がある。

高強度高緻密コンクリートは、現状でガス発生量が少ないデータが得られていることから、配合の変更や乾燥工程の検討等の基本的な固化処理技術の改良は予定していない。一方、水和挙動や細孔構造の違いがガス発生量に影響している可能性が考えられるが、そのメカニズムが現状では十分解明されていないため、ガス発生量が少ない要因を明らかにして、ガス発生量が少ない固型化材料であることを示すための検討を今後も進める。

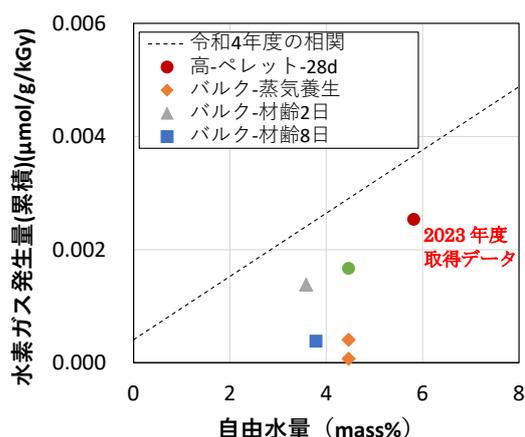


図-4 高強度高緻密コンクリートの水素ガス発生量

2) 水理-力学連成を考慮したガス移行評価技術の高度化

TRU 処分場におけるガスの発生・蓄圧に伴うニアフィールドへの影響が懸念される事項として、廃棄体内の核種が地下水に溶解したものである汚染水が発生ガスの体積分だけ押し出されることによって核種移行が加速すること、蓄圧に伴いベントナイト緩衝材中に汚染水の短絡経路が形成されることが挙げられる。そのため、それらの現象を評価できる水理-力学連成を考慮したガス移行評価モデルを構築し、安全評価の信頼性を向上させることが重要である。

本検討では、より処分場での現象に近い3次元的な影響が観測可能なベントナイトのガス移行モックアップ試験を実施し、緩衝材中のガス移行特性や破過後の自己修復性についてより現象理解を深め、より適切な予測解析モデルの構築を進める。

ガス移行モックアップ試験装置の概念図を図-5に示す。これまでのガス移行モックアップ試験²⁾から、破過の発生方向や排水量には方向による偏りがあること、破過に至った際の有効ガス圧である破過圧は1次元の要素試験より小さな値が観測され、その値は飽和時の緩衝材の膨潤圧相当であることを確認している。モックアップ試験では要素試験と比較すると試験体の拘束によるガス移行経路の制限が少ないことから、ガスは緩衝材中をより軟らかく移行しやすい部分を移行し、有効ガス圧が膨潤圧相当となった時点で緩衝材の端部に到達し破過に至ったと考察している。そのため、処分場においても、膨潤圧相当での破過では緩衝材の大きな変形・破壊には至らず、自己修

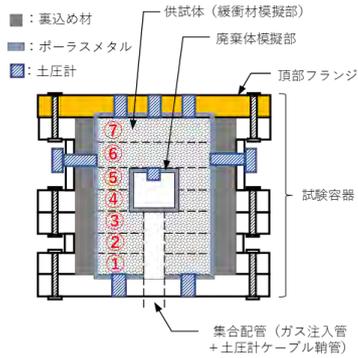


図-5 モックアップ試験装置

復性への影響も小さく短絡経路は閉塞されると推定される。

①ガス注入条件についての予測解析

図-6は過去のモックアップ試験結果⁵⁾の内、試験体からの累積排水量及び気液二相流解析コードであるGETFLOWSによる計算の結果である。

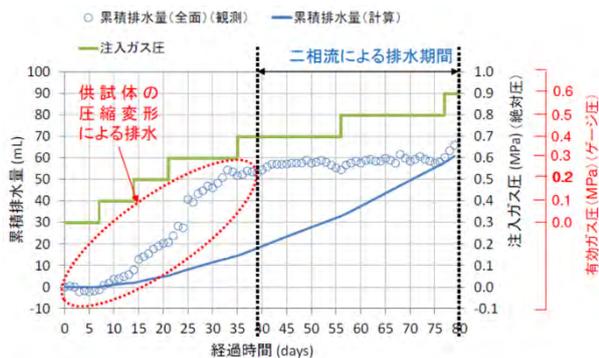


図-6 過去のモックアップ試験の排水量観測結果⁵⁾

ガス移行モックアップ試験のガス注入過程では、ガス圧を一定ペースで昇圧しながら荷重し、飽和した試験体からの排水量等を観測する。赤点線枠内の排水量の卓越は二相流による排水のみではなく、ガスの荷重による圧縮変形に伴う影響によるものが含まれていると考察される。この影響は荷重ガスの昇圧ペースを緩やかにすれば解消されることが考えられる。今後のガス移行モックアップ試験のガス注入過程の実施に向けて、その影響を予測するための解析を実施した。圧縮変形による排水挙動を再現するため、力学連成二相流解析コード CODE_BRIGHT を用いて計算した結果を図-7の点線で示す。

赤点線は試験の再現解析結果であり、青点線はより昇圧ペースを緩やかにした条件での予測解析結果である。力学連成により体積変化を考慮し

たことで試験結果をより再現できている。昇圧ペースを緩やかにした条件における予測解析では、試験開始から見られる排水量の増分が比較的緩やかとなり、ガスの荷重が低減することで変形が抑えられたと考えられる。ガス注入過程において、気液二相流による排水現象の詳細把握を優先する場合には緩やかな昇圧ペースを設定することも重要と考えられる。一方で、処分場においては、蓄圧したガスが一気に荷重される現象も想定され、それに伴う破過圧や排水量への影響も存在すると考えられることから、把握したい現象に応じて試験条件を設定することが重要である。

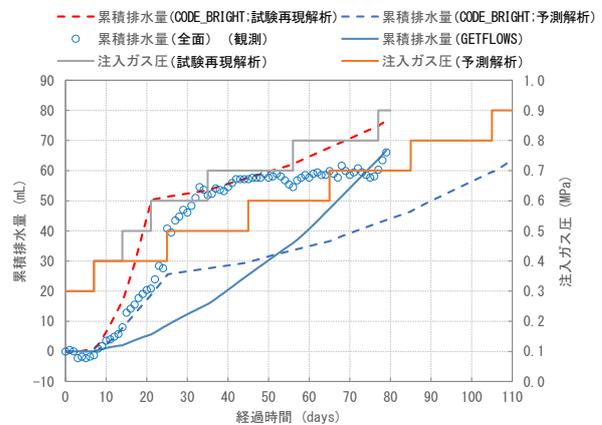


図-7 試験体からの累積排水量の予測解析結果

②試験体の製作及び再冠水過程の実施

ガス移行モックアップ試験の実施に向け、試験体の製作及び試験体を飽和させる再冠水過程を実施した。試験体（緩衝材模擬部：高さ320mm、幅300mm×300mm）の配合は、包括的技術報告書⁶⁾に示された緩衝材仕様 [ベントナイト（クニゲルV1）：ケイ砂（3号と5号ケイ砂を乾燥重量比1：1で混合したもの）＝70wt%：30wt%] とし、全7層（図-5の①～⑦）に分けて圧縮成型した。試験体製作後は試験装置からの加圧注水（0.2MPa）による再冠水過程を実施し、飽和の進展を把握するため注水量と排水量及び膨潤圧を定期的に測定した。

③ガス移行媒体の空隙構造と移行特性評価

物質内の移動性は構成する粒子の形状やサイズに依存することが知られている。ベントナイト緩衝材中のモンモリロナイト及びケイ砂に代表される砂をそれぞれ模した粒子構造（図-8）をモンテカルロ構造解析によって求め、その空隙特性

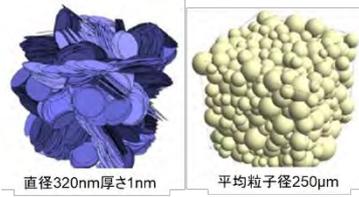


図-8 各粒子構造を模した構造解析モデル

を物理的な解釈に基づいてモデル化し、移行特性を把握する。

球状粒子構造の透過率を予測するために広く用いられている Kozeny-Carman 式（以下、KC 式）は、空隙特性量（有効空隙率、屈曲度、比表面積）を用いて次式で表される。

$$k = \frac{\phi^3}{c\tau^2(1-\phi)^2(S_v)^2} \quad \dots \text{式 (1)}$$

本項目では、砂を模した球状粒子構造について、空隙特性量のうち屈曲度を考察しモデル化を検討した結果を記す。屈曲度は多孔質体中の空隙の曲がり具合を表す無次元量であり、空隙が直線状であれば1、曲がり具合が大きければ1より大きい値を示す。屈曲度に関する先行研究は多数存在し、例えば Zhang ら⁷⁾は空隙率をパラメータとし次のモデル式に従うとしている。

$$\tau = \phi^{-0.5} \quad \dots \text{式 (2)}$$

球状粒子構造の構造解析結果より算出した屈曲度と先行研究における実験結果^{8)~10)}との比較を図-9に示す。屈曲度の算出は Random Walk 法¹¹⁾で実施した。解析結果は実験結果と定量的に一致し、空隙率が0.1以上では1に近い値を示し、空隙率が0.1を下回ると急激に増加する傾向を示す。上記のモデル式（青線）についても各結果と概ね一致していることから、モデル式は屈曲度をよく表していることがわかる。

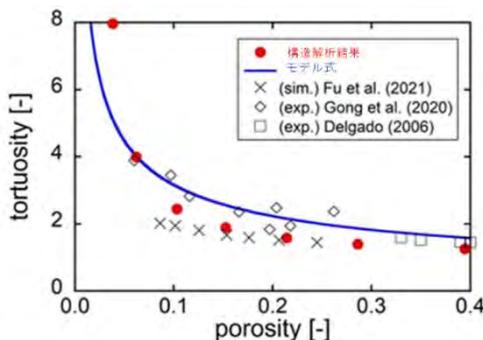


図-9 解析結果、実験結果及びモデル式の比較

(3) 人工バリアの閉じ込め機能の高度化

1) 廃棄体パッケージの閉じ込め性能向上に係る技術開発

TRU 廃棄物処分において廃棄体パッケージは、鋼製容器に複数の廃棄体（ドラム缶やキャニスタ）をセメント系材料等の充填材とともにパッケージ化したのち、地下の処分坑道に搬送・定置される。包括的技術報告書⁶⁾で示された概念では、廃棄体パッケージ自体が人工バリアの閉じ込め機能を担う構成要素の一つであり、処分場の人工バリアの設計にあたっては、閉鎖前及び閉鎖後長期の安全性の観点から、所定の期間、放射性物質の漏えいを防止することが期待されている。

2018年度から2022年度にかけて実施した先行事業では、セメント系パッケージ内充填材から水分の放射線分解により発生する水素ガスを抑制する技術や、廃棄体への熱影響が低減可能な遠隔蓋接合技術の開発に取り組み、図-10に示す耐食性や構造健全性を考慮した実規模の廃棄体パッケージを製作し、工学的成立性を実証した。

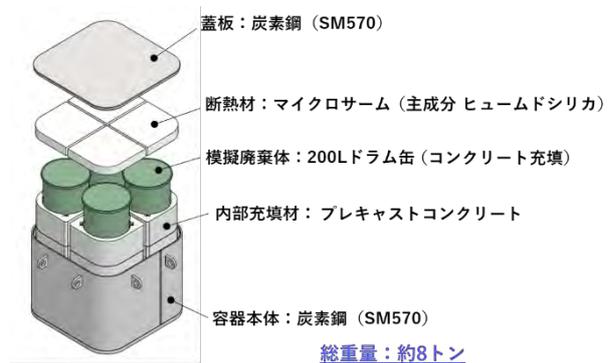


図-10 廃棄体パッケージの概要

本検討では、先行事業では着手できなかった検討課題や、新たな技術開発に取り組むことで、閉じ込め性能の高度化を図り、ひいては地層処分の安全性に対する信頼性の向上に貢献することを目的に、次に挙げる項目を検討する。

- ・ 実規模廃棄体パッケージ溶接部の健全性評価
- ・ 異常事象に対する安全性向上に係る検討
- ・ 後充填方式によるセメント系パッケージ内充填材の開発
- ・ 表面改質による SCC 対策技術の整備

①実規模廃棄体パッケージ溶接部の健全性評価

廃棄体パッケージには、閉鎖後300年程度をめやすとした期間の閉じ込め性能が求められることから、廃棄体パッケージの構造上、最弱部となり得る蓋溶接部について、先行事業で製作した廃棄体パッケージを用いて、実際の製作工程を経た蓋溶接部の健全性を確認するための試験を実施した。

蓋溶接部の各部位から採取した試験片による引張試験の結果を図-11に示す。

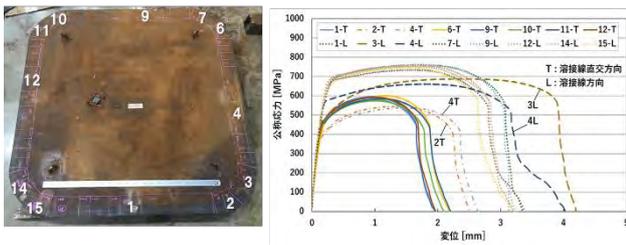


図-11 蓋溶接部の各部位の引張試験結果

この結果から、製作工程の影響を受けた蓋溶接部の機械的性質は、均一ではなく部分的にバラツキが生じていることが示された。今後、詳細な分析を実施し、腐食試験の結果も併せて評価する。

②異常事象に対する安全性向上に係る検討

廃棄体パッケージに求められる閉じ込め性能を維持する期間のうち、閉鎖前の作業時においては、落下事象や火災といった異常事象が発生する可能性が想定されるが、当然、そのような場合においても、安全性の観点から閉じ込め性能を維持しなければならないことから、落下事象を想定した解析を実施した。

解析モデルについては、図-12に示すように、先行事業で製作したプレキャスト方式によるパッケージ内充填材を有する実規模廃棄体パッケージをモデル化し、落下姿勢は、蓋側角部コーナー落下と蓋側辺部落下の2ケースとした。

蓋溶接部に適用する材料モデルについては、均質変形域から破壊を伴う大ひずみ域にわたり広いひずみ速度域の挙動を高精度に表すことができる谷村・三村モデル (T-M2009モデル) を採用し、実規模廃棄体パッケージの蓋溶接部から採取した試験片を用いて高速引張試験を実施して必要なパラメータを取得した。

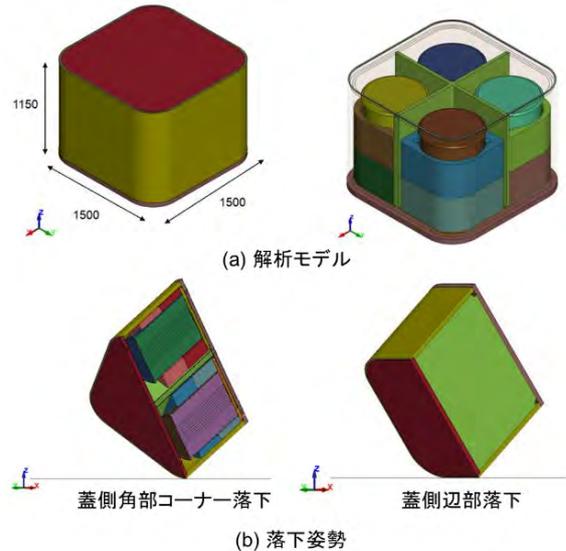


図-12 解析モデルと落下姿勢

今回の解析結果から、延性破壊については、両ケースにおいて、試験結果より得られた母材の破断ひずみと相当塑性ひずみの比は最大でも0.7となり、延性破壊の可能性は低いことが示された。一方、脆性破壊については、図-13に示すように、算出した応力拡大係数から、115.16 MPa√m以上の破壊靱性値を持つ材料が求められることが示された。

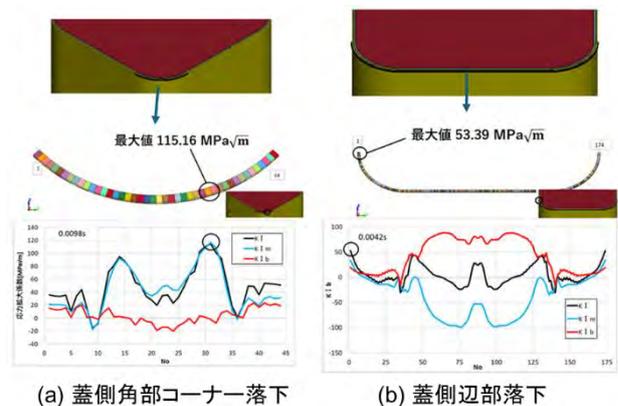


図-13 解析結果

次年度では、引張試験でも軟化傾向が示された熱影響部を解析モデルに反映し、脆性破壊が溶接の縁方向に発生する可能性の検討や、最も不利と想定される落下姿勢、形態の検討、各材料の破壊靱性値の取得と検証が実施する。

③後充填方式によるセメント系パッケージ内充填材の開発

後充填方式の候補材料である高強度高緻密コンクリートの充填性を把握するため、高性能減水剤の添加量をパラメータとしてフロー試験を実施し、流動性と材料分離抵抗性のバランスの良い配合を見出した。この配合で流動障害を設けた模擬試験体による充填性試験を実施し（図-14）、パッケージ内充填材として問題なく使用できる見通しを得た。



図-14 充填性試験の実施状況

④表面改質による SCC 対策技術の整備

廃棄体パッケージが閉鎖後長期の閉じ込め性能を維持するためにも、蓋溶接部の応力腐食割れ（SCC）対策が必要となる。先行事業では、オーバーパックで既に適用可能性が示されている溶接後熱処理（PWHT）について検討し、容器内に断熱材を入れることで廃棄体の熱的制限をクリアし、角型形状の容器に対しても施工可能であることを示した。しかし、さらに熱的制限の厳しい廃棄体を対象にした場合など、PWHT の施工が難しい場合にも対応可能な SCC 対策技術を整備する必要がある。

本事業では、表面改質による残留応力改善技術に着目し、実現性及び有用性の観点から候補技術を絞り施工イメージを提示した。さらに、その付随効果として、実規模廃棄体パッケージの製作で得た留意点を反映でき、かつ、廃棄体パッケージの封入工程（蓋溶接－非破壊検査－残留応力改善）の合理化が図れることを提案した。次年度では、施工に関する情報収集と試験計画の策定の具体化を進める。

2) ヨウ素代替固化体の評価技術の高度化

TRU 廃棄物のうち、廃銀吸着材（再処理施設のオフガスシステムのフィルター材に AgI の形態でヨウ

素¹²⁹（以下、I-129という）が回収された廃棄物）を主な起源とする I-129は、地層処分安全評価において生物圏への影響が大きい核種の一つである⁶⁾。

AgI は還元性雰囲気では易溶性であるため、安全評価においては瞬時放出成分とされることに加え、I-129は人工バリア材や岩盤への取着性が乏しく長半減期（半減期1570万年）であることから、地質媒体の水理特性（透水性、動水勾配など）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、その影響を抑制することが可能な代替技術として、ヨウ素を長期間かけて放出する機能を有する固化体の開発を進め、2022年度までに、廃銀吸着材に工業用アルミナ原料を加えて熱間等方圧加圧法によって固化体を得るHIP固化技術と、廃銀吸着材から乾式脱離したヨウ素を鉛とホウ素を主成分とする低温熔融ガラスの成分としてヨウ素を取り込み、均質に固化する BPI ガラス固化技術について、実用化の可能性を提示した¹²⁾。

2023年度以降は、このうち BPI ガラス固化体（以下、ガラスという）を対象として、これまでに10年を超える浸漬試験によって確認してきた、ガラスの溶解現象の長期的な継続性の説明と、ヨウ素の溶出（ヨウ素の規格化浸出率が時間^{1/2}に比例）挙動のモデル化を実施している。また、特に低塩濃度の浸漬条件で観察される、ガラスの溶解に対してヨウ素の溶出が抑制的となる現象の原因である、ヨウ素を含む2次鉱物の同定と、その長期的な挙動の推定を併せて実施している。

①ガラスの溶解現象の長期的な継続性の説明

2022年度までに、地下水条件とガラスの溶解現象との関係を、図-15に示すように整理した。また、ガラス構造に基づいた各元素間の結合様式の理論解析から、ガラスの骨格を形成する鉛周囲の結合が、ホウ素周囲の結合と比較してイオン結合性が高いこと、ヨウ素は鉛近傍に配位していることなどから、ホウ素の周囲の結合だけが優先的に切断されて溶出するような現象が起きにくいいため、鉛の溶出とヨウ素とホウ素の溶出とは同時かつ調和的に起きるものと推察した¹²⁾。

そこで、2023年度は、このガラスの溶解現象を

確認することを目的に、ヨウ素の溶出がホウ素のそれに対して調和的に生じる条件で555日間浸漬した試験体の、表面に析出する変質層と内部のガラス層との界面近傍の詳細な分析を実施した。

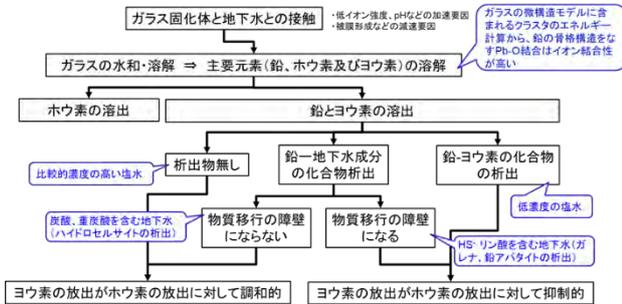


図-15 浸漬液の条件とBPIガラスの溶解現象との関係

図-16に示すように、変質層及びその直下の非晶質層には濃度勾配がなく、内部のガラスの表層で濃度勾配が生じていた。この結果は STXM 法で測定したホウ素の濃度プロファイルでも同様であった。また、内部のガラス層の濃度勾配が生じた領域の厚さに元素間の相違は観られなかった。

このことは、ガラスの主要元素の溶解が調和的に生じることを示す結果であると考えている。

今後、浸漬期間の異なる試験体の非晶質層の厚さ、及び内部のガラス層に生じた濃度勾配の変化等を詳細に分析していくことで、上述のヨウ素の溶出挙動及びその継続性を説明し得るものと考えている。

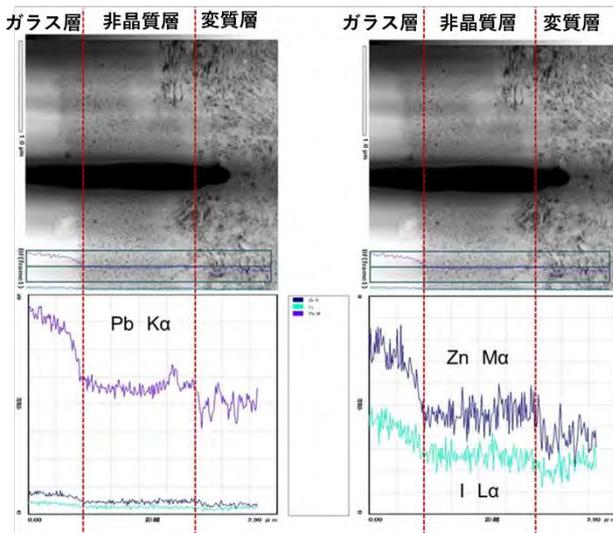


図-16 STEM-EDSによるヨウ素、鉛、亜鉛の線分析の結果

②ヨウ素を含む2次鉱物の同定

図-17に NaCl 濃度が $5 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$ の浸漬液に555日浸漬した後の BPI ガラス表面に生じたヨウ素と鉛を主成分とする球状の2次鉱物の SEM 像を示す。

ガラスの性能を示す上で、長期的な環境変化に伴う、この鉱物の挙動（溶解、分解の可能性の有無とその条件）を明らかにし、ヨウ素の溶出が起きる場合の影響の程度を評価する必要があるため、2023年度はこの鉱物の詳細な分析を実施した。

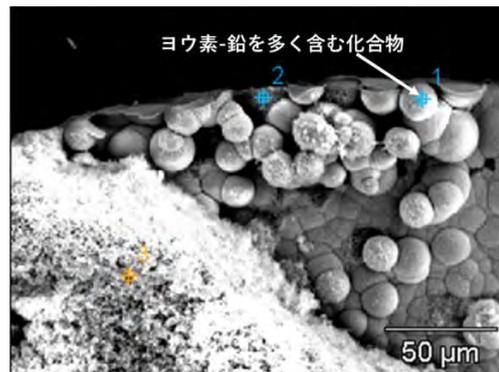


図-17 BPI ガラス表面に析出したヨウ素を含む化合物の SEM 像

図-18にこの球状の2次鉱物のマイクロフォーカスX線回折分析の結果を示す。電子線回折（図-19）で観察された、面間隔約 3.1 \AA 及び同 7 \AA の回折線を含め、塩水への浸漬で観察された鉛の水和酸塩化物（LOCH）では観察されない回折線が観られた。

ヨウ素及び鉛を主成分とすることと、この未同定の回折線とに基づいて、該当する鉱物について探索したところ、未同定の回折線のうちの多くが、2020年に Li らによって報告された $(\text{O}_2\text{Pb}_3)_2(\text{BO}_3)\text{I}^{13)}$ の回折線（図-18に赤線）と一致することが分かった。この鉱物については、結晶構造が明らかにされているが¹³⁾、化学的耐久性や溶解度等については不明である。また、 $d=2.29 \text{ \AA}$ を始めとする未同定の回折線が存在することなど、この相だけがヨウ素の濃集に関わると断定することはできないが、これまでの浸漬試験でのヨウ素、ホウ素、及び鉛の濃度の推移等とあわせて、その長期的な安定性やヨウ素の放出の可能性について検討するとともに、他の鉱物相の可能性についても検討を加えていく必要がある。

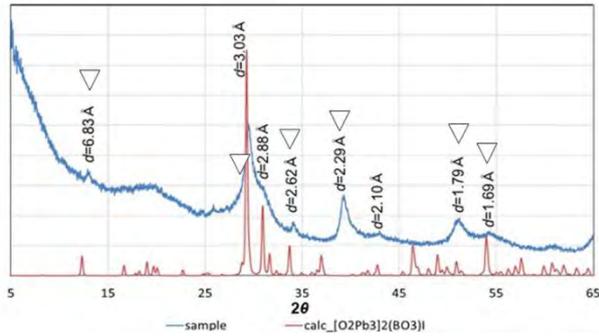


図-18 ガラス表面に析出したヨウ素を含む化合物のマイクロフォーカスX線回折分析の結果
▽：LOCHでは観察されない回折線

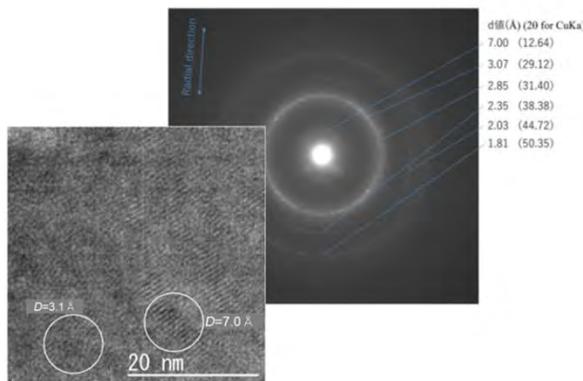


図-19 BPI ガラス表面に析出したヨウ素を含む化合物の電子線回折の結果

- tortuosity factors and effective diffusivities in biofilms, *Wat. Res.*, 28, 2279, 1994
- 8) Fu, J., Thomas, H.R. and Li, G., Tortuosity of porous media: Image analysis and physical simulation, *Earth Sci. Rev.*, 212, 103439, 2021
 - 9) Gong, L., Nie, L. and Xu, Y., Geometrical and topological analysis of pore space in sandstones based on X-ray computed tomography, *Energies*, 13, 3774, 2020
 - 10) Delgado, J.M.P.Q., A simple experimental technique to measure tortuosity in packed beds, *Can. J. of Chem. Eng.*, 84, 651, 2006
 - 11) 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 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
 - 12) 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 4 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、2023
 - 13) Kuan, L., Alimujiang, Y. and Zhi, S., $[O_2Pb_3]_2(BO_3)I$: a new lead borate iodide with $[O_2Pb_3]$ double chains, *Dalton Transactions*, 49, 8985, 2020

(地層処分バリアシステム研究開発部)

- 1) 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 4 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 平成 30 年度～令和 4 年度取りまとめ報告書、2023
- 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 4 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 5 か年成果報告書、2023
- 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、電力中央研究所、量子科学技術研究開発機構、令和 5 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 地層処分安全評価確証技術開発核種移行総合評価技術開発報告書、2024
- 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、電力中央研究所、量子科学技術研究開発機構、令和 5 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 地層処分安全評価確証技術開発ニアフィールド長期環境変遷評価技術報告書、2024
- 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 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
- 6) 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向けたセーフティケースの構築—本編及び付属書、NUMO-TR-20-03, 2021
- 7) Zhang, T.C. and Bishop, P.L., Evaluation of

3. 沿岸部処分システム評価確証技術開発

◇事業の概要

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、沿岸部の特性や技術的対応の可能性についての議論が進められた。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、更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して、沿岸部で想定される種々の地下水条件下でのデータ拡充等と、その方向性が示された²⁾。

そこで、2019年度からの本事業において、当センターでは、処分場建設に伴う浅部と深部の地下水の混合や湧水等への影響を踏まえた処分場の成立性の評価（性能評価）方法の検討を進め、2020年度に水理解析技術や性能評価の手順案をとりまとめた。加えて、既存情報等から我が国の海底下の地下水の水質の幅を整理し、再冠水に至るまでの期間を対象に、処分場の構成材料であるセメント系材料及び緩衝材の沿岸部における地下水の影響を考慮した機能等の変遷に関するデータの取得や、それらの解析手法の検討を実施し、現象理解とそれに基づくデータ拡充や評価手法の整備を進め、2023年度に成果をとりまとめた。

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5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）」の当センターの担当分である。

◇2019年度～2023年度の成果³⁾

(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、各坑道の空洞安定性や止水性を保つ機能を担うことが期待されている。しかし、それらのセメント系材料は、岩盤側からの地下水との接触によって化学変質とそれに伴う力学的特性の変化が懸念されているものの、その現象に関する知見については、

- ・セメント系材料の地下水による化学変質に関するデータはあるが、それに伴う強度変化に関するデータは少ない。
- ・人工海水やそれを希釈した溶液でのデータはあるが、沿岸部の多様な組成に対応するデータは少ない

といった課題に加え、従来、セメント系材料の圧縮強度は全空隙率との関係でモデル化されてきたが、先行事業での試験結果において、混合セメントでは地下水の作用による空隙率の減少がなくてもピッカース硬度の低下があり、全空隙率の変化だけでは整理できないことが示された。

そこで、本事業では、沿岸部特有の地下水環境における支保工及び覆工の設計に資する情報として、セメント系材料の化学変質と力学的特性に関するデータを拡充し体系的にまとめ、解析的な化学変質予測と強度推定の手法を構築することを目的に、図-1に示すアプローチで検討を進めてきた。

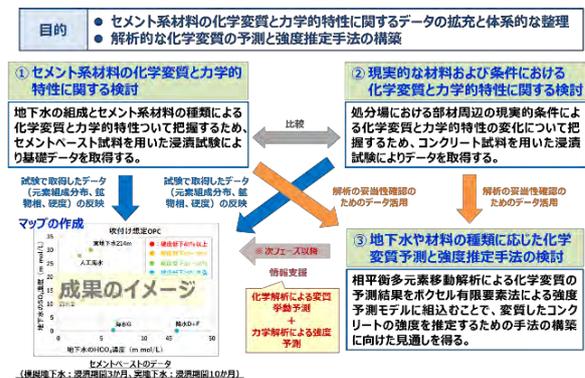


図-1 目的に対するアプローチ

処分場のセメント系材料に対して地下水成分が及ぼす影響の有無について体系的に整理するにあたり、化学変質への影響が考えられる HCO_3^- 及び SO_4^{2-} に着目して、沿岸部の地下水を類型化し、その代表的な組成の模擬地下水に加えボーリングによって得られた地下水を用いて、セメントペースト試料及びコンクリート試料の浸漬試験を実施した。浸漬後、化学変質に関する分析と変質

部の力学的特性に関する試験（ナノインデンテーション法による硬度測定）の結果から、二次鉱物の生成、 SO_4 浸透深さ及びCa溶脱深さなどについて、 HCO_3 濃度と SO_4 濃度を軸にマップ図を作成した。

一例として、セメントペースト試料による浸漬試験結果（模擬地下水：浸漬期間20カ月、実地下水：浸漬期間10カ月）から作成したものを図-2に示す。マップ図では、プロットの色で硬度低下を示し、そこに硬度測定位置の鉱物相情報を、健全部との差異として表示した。

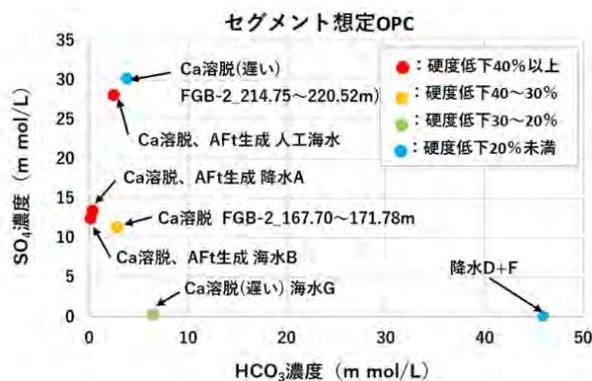


図-2 セメントペーストの地下水組成と硬度の変化の関係

このように、地下水組成と力学的特性の関係を整理することで、例えば、処分場の設計においてサンプリングした地下水組成の特徴が、 SO_4 濃度が高く HCO_3 濃度が著しく低いというような場合には、マップ図から「早期に力学的特性の低下が生じる可能性があるため、化学変質を考慮した支保工の材料選定や部材厚さの検討が必要」というような情報が得られる。

さらに、将来的に地下水との接触により化学変質したコンクリートの強度予測を可能にするため、相平衡多元素移動解析⁴⁾による化学変質予測と非線形ボクセル有限要素法⁵⁾による強度解析を連携させた強度推定手法についても検討を進めてきた。化学変質予測では、外部析出層が生成することで、Mg及びSの浸透が抑制される可能性があることを浸漬試験で確認し、この影響を解析に反映することで海水と接触した実構造物の文献データを再現できる見通しを得た。非線形ボクセル有限要素法による強度解析については、化学変質を反映する前の健全なコンクリートを対象にしたマルチスケール解析を実施し、化学変質をしたセメント系材料の強度予測の解析手法として

の適用性を確認した。

今後、化学変質予測への外部析出層の反映や化学変質した場合の強度予測について検討を進めることで、将来的に支保工の設計情報及び環境条件から沿岸部の地下水と接触したコンクリートの時間的・空間的な化学組成及び力学的特性の変化の予測が可能となる。

(2) 緩衝材の機能変化に係るデータの拡充

再冠水時に緩衝材（ベントナイトとケイ砂の混合土）が発揮する諸特性については、これまで蒸留水や人工海水等を用いた試験を中心に確認されており、それらのデータを基に緩衝材の設計要件が設定されてきた⁶⁾。しかし、沿岸部における地下水の多様な化学組成や幅広いイオン強度を考慮すると、蒸留水や人工海水に加えて、地下水の主要な陽イオンの塩溶液（ NaCl 、 KCl 、 CaCl_2 及び MgCl_2 ）や多様なイオン強度の条件でデータを取得する必要がある。

本事業では、2019年度より、緩衝材の設計要件のうち仕様成立範囲が一番狭い自己シール性に着目して、沿岸部の多様な化学組成の地下水における緩衝材の膨潤率の予測手法の検討を進めてきた。緩衝材の膨潤率は、ベントナイトの主要鉱物であるモンモリロナイトの吸着陽イオン組成に依存することが知られている。そこで、膨潤率の予測に活用する情報として、モンモリロナイトの吸着陽イオン組成を予測する数値解析手法を整備するとともに、塩溶液のイオン強度をパラメータにしてベントナイトの膨潤率を取得し、取得した各データと、上記の解析手法で予測した吸着陽イオン組成とを用いて、多様な化学特性の条件における緩衝材の膨潤率を予測する手法を提示した。

1) 緩衝材のイオン交換反応の予測手法の整備

モンモリロナイトの交換性陽イオンと間隙水の陽イオンとのイオン交換反応を予測する数値解析手法を整備した。この数値解析の入力データとして、(K、 Ca^{2+} 及び Mg^{2+})のNaに対するイオン交換選択係数を設定する必要がある。モンモリロナイトにおけるイオン交換選択係数は、モンモリロナイトの圧縮状態や、溶液のイオン強度に依存する可能性が示唆されている⁷⁾。しかし、既往のイオン交換選択係数は、希薄塩溶液の分散系で取

得られたデータが中心であり⁸⁾、高濃度溶液かつ圧縮状態のモンモリロナイトを対象にイオン交換選択係数を取得した研究は充分ではない。そこで、本研究では、陽イオン交換選択係数の圧縮状態と分散状態の差異や、イオン強度による影響を確認するために、複数のイオン強度 (0.125～0.50M) に調整した NaCl/CaCl₂、NaCl/KCl 及び NaCl/MgCl₂の混合溶液を用いて、カラム試験とバッチ試験をそれぞれ実施し、(K、Ca²⁺及びMg²⁺)のNaに対する陽イオン交換選択係数を取得した。試験より得られたイオン交換選択係数は、イオン強度に関わらず圧縮系の方が分散系よりも大きく、イオン強度が増加するとイオン交換選択係数もわずかに増加する傾向を確認した (図-3)。上記のカラム試験で得られた圧縮系のイオン交換選択係数と既往の分散系のイオン交換選択係数⁸⁾のそれぞれを用いて、ベントナイトとケイ砂の混合土に人工海水を通水した試験を対象にイオン

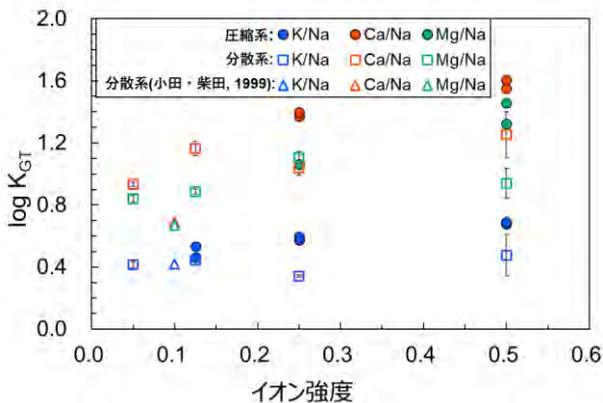


図-3 圧縮系及び分散系で取得したイオン交換選択係数とイオン強度の関係

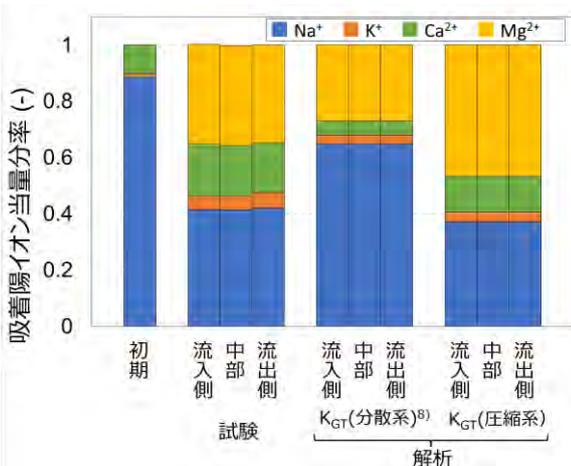


図-4 緩衝材に人工海水を通水した試験の再現解析で得られた吸着陽イオン組成

交換挙動を再現する数値解析を実施した。

解析コードには、飽和・不飽和浸透流、移流分散、イオン交換解析を連成できる Hydrus-1D HP1^{9),10)}を用いた。

圧縮系のイオン交換選択係数を設定した解析で得られた結果は、吸着陽イオン組成をよく再現しており、既往の分散系の選択係数を設定した場合よりも再現性が高いことが分かった (図-4)。

以上より、本研究で得られた圧縮系のイオン交換選択係数を用いて解析することで、沿岸部の地下水における緩衝材の陽イオン交換挙動を予測できる見通しが得られた。

2) 緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握試験

各塩溶液 (NaCl、KCl、CaCl₂及びMgCl₂) におけるイオン強度及び初期有効粘土密度と最大膨潤率の関係及び沿岸部地下水におけるイオン強度と最大膨潤率の関係について、それぞれ膨潤量試験を実施して把握した。

イオン強度と最大膨潤率の関係については、いずれの陽イオン種においても最大膨潤率がイオン強度の平方根に反比例する傾向を確認した。また、イオン強度が0.5以上では、最大膨潤率に通水溶液に含まれるイオン種による差は見られなかったが、イオン強度が0.2以下の範囲では、最大膨潤率がNa⁺イオン > Ca²⁺イオン ≒ Mg²⁺イオン > K⁺イオンの関係を確認した。これは、高イオン強度では、層間への浸透圧が作用しにくいことが要因と考えられた。また、初期有効粘土密度と最大膨潤率の関係を整理した結果、初期有効粘土密度の増加に伴い最大膨潤率も増加するが、イオン種やイオン強度、初期有効粘土密度に応じて、最大膨潤率の増加の割合が異なることがわかった (図-5)。

一方、駿河湾沿岸部の掘削孔から採水したイオン強度の異なる沿岸部地下水を用いて膨潤率を測定した結果 (図-5)、上述の各種塩溶液での陽イオン種の異なる場合の試験結果は、沿岸部地下水の試験結果の傾向と整合することが確認できた。

最大膨潤率の予測方法として、電気二重層理論に基づく Komine and Ogata¹¹⁾と田中・中村¹²⁾が提案する膨潤特性理論評価式 (評価式①¹¹⁾、評価式②¹²⁾)の適用を試みた。その結果、図-6に示す

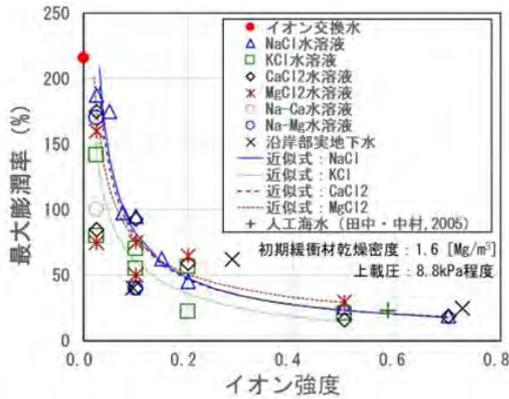


図-5 駿河湾沿岸部の掘削孔から採水した地下水を用いた膨潤量試験の結果

ように、通水液のイオン強度が0.2以下では評価式①を、イオン強度が0.5以上では評価式②を、それぞれ用いることで幅広いイオン強度に対して陽イオン種ごとのイオン強度と最大膨潤率の関係を概ね予測できることがわかった。

さらに、この方法を用いて、駿河湾沿岸の掘削孔から採取した地下水（FGB-2 孔_167.70m～171.78m）に含まれる陽イオン組成を基に、1)の緩衝材のイオン交換反応の予測手法に基づいて算出した層間陽イオンの組成を用いて最大膨潤

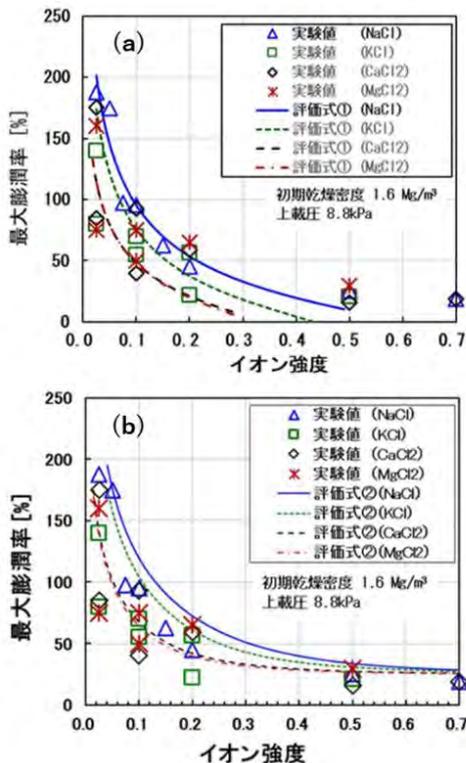


図-6 膨潤特性理論評価式で算出した各陽イオン種におけるイオン強度と最大膨潤率の関係 ((a):評価式①、(b):評価式②、それぞれ実験値と比較)

率を求めたところ、層間陽イオン組成の分析値を用いた場合と同等の値が得られた。このことから、圧縮ベントナイトのイオン交換反応の予測手法で得られた層間陽イオン組成を上記の膨潤特性理論評価式の入力値として用いることで、沿岸部の様々な組成の地下水において緩衝材の膨潤率を予測できる見通しが得られた。

- 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) 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5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証技術開発 成果報告書、2024
- 4) Hosokawa, Y., Yamada, K., Johannesson, B., Nilsson, L.-O.: Development of a multi-species mass transport model for concrete with account to thermodynamic phase equilibriums, Materials and Structures, vol.44, pp.1577-1592, 2011
- 5) Bullard, J. W., Bentz, D., Garboczi, E., Ferraris, C., Martys, N., & Stutzman, P.: Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2009
- 6) 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向けたセーフティケースの構築—、NUMO-TR-20-03、2021
- 7) Tournassat, C., Bizi, M., Braibant, G., Couzet, C., Influence of montmorillonite tactoid size on Na-Ca cation exchange reactions, Journal of Colloid and Interface Science, Vol.364, pp.443-454
- 8) 小田治恵、柴田雅博、ベントナイト-水相互作用の実験とモデル化、JNC TN8400-99-032, 1999
- 9) 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
- 10) 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
- 11) Komine, H., Ogata, N., New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials, Canadian Geotechnical Journal, vol.40, No. 2, 2003, pp.460-475
- 12) 田中幸久、中村邦彦、海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響、土木学会論文集、No. 806/Ⅲ-73、2005、pp.93-111

(地層処分バリアシステム研究開発部)

4. 核種移行総合評価技術開発

◇事業の概要

本事業は、地層処分事業の概要調査から精密調査段階において、実際のサイトの地質環境の特徴や処分システムの長期的な変遷を適切に反映することが可能な先端的な安全評価技術の開発を目的としている。

地層処分対象の廃棄物のうち、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）については、商業炉(BWR)で照射されたハル・エンドピースを用いた10年以上の長期浸漬試験を継続中であり、先行事業の課題として核種溶出挙動の更なる解明と炭素14化学形態評価の必要性が挙げられた。これらの課題解決に向けて、本事業でも「TRU 廃棄物固有の廃棄体からの核種放出挙動評価技術の開発」として原環センターが引き続きハル等廃棄体に係る技術開発を担当している。具体的には、ハル等廃棄体に含まれる炭素14など、安全評価上重要な放射性核種の長期放出挙動評価の過度な保守性低減や信頼性向上に資するため、①調和溶出モデル、②瞬時放出モデル、③炭素14化学形態、④廃棄体モデルの代表性、について、高感度分析や計算科学を駆使して技術開発を行っている。このような安全評価技術を国の基盤研究として開発することは、安全規制に対する基盤情報の強化や多様なステークホルダーに対する地層処分の理解を促進する上で重要である。

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、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、一般財団法人電力中央研究所、及び国立研究開発法人量子科学技術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5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）（核種移行総合評価技術開発）」¹⁾であり、以下では、その成果のうち、当センターで検討した成果について報告する。

◇2023年度の成果¹⁾

(1)調和溶出モデルの評価

ハル等の核種溶出データや腐食データを拡充し、現実的な溶出率の設定や、腐食速度との相互比較による調和溶出モデル（腐食と核種の溶出が調和的に進展するモデル）の妥当性の検証を目的としている。

2023年度は、照射済 BWR ハルの核種インベントリデータ（図-1）を取得するとともに、長期の溶出データを取得した。特に塩素36の加速器質量分析（AMS: Accelerator Mass Spectrometry）によりβ線測定（Pico-β）では定量下限値未満であった浸漬液中の塩素36を初めて定量することができた（表-1）。

また、新たに照射済 PWR ハル・エンドピース分析に向けた試料選定、モックアップ材を用いた浸漬試験片の切り出し方法の検討等を行った（図-2）。

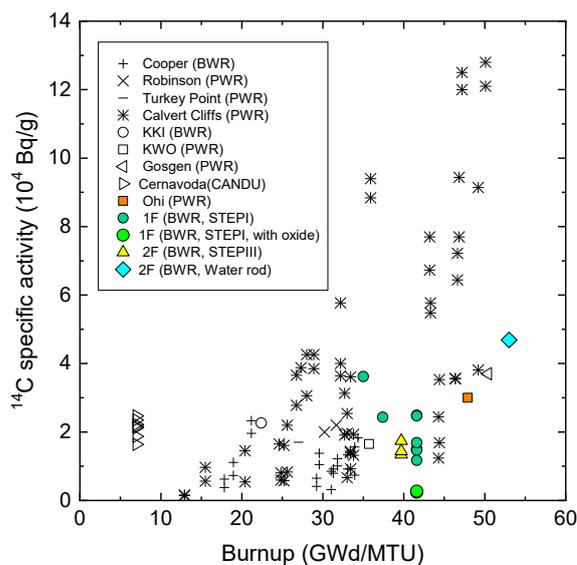


図-1 ハルの炭素14インベントリデータ

表-1 試験片及び浸漬液中の塩素36 (Bq/試料)

	Pico-β 測定	AMS 測定
試験片(ハル)	7.33×10^2	9.20×10^2
浸漬液	ND $< 1.91 \times 10^{-1}$	1.44×10^{-3}

(2)瞬時放出モデルの評価

安全評価において保守的に瞬時放出と想定されているハル酸化膜の溶解特性評価及び瞬時放出率の低減対策技術の開発を目的としている。



図-2 新規PWRノズル(モックアップ材)を用いた浸漬試験片の切り出し方法の検討



図-3 HIP法による酸化膜の閉じ込め技術(金属ZrへのZrO₂の固定及び酸素固溶)

2023年度は、ジルコニア (ZrO₂) の溶解試験を比較的溶解しやすい酸性条件 (粉末試料) で実施し、今後のデータ取得の見込みを得た。瞬時放出低減対策では、粉末冶金法 (HIP: Hot Isostatic Pressing) により酸化膜を金属 Zr とともに閉じ込める技術の適用性を検討し、Zr+ZrO₂焼結体を合成した (図-3)。

(3) 炭素 14 化学形態の評価

ハル等から溶出した極微量の炭素14化学種の実データを AMS で取得するための技術開発や、計算科学的アプローチにより炭素14化学種の生成プロセス解明を目的としている。

2023年度は、AMS により照射済 BWR ハルから浸漬液に溶出した炭素14 (有機・無機) 及び気相中の炭素14を定量した (表-2)。また、炭素化学種の分離 (図-4) から AMS までの一連の操作バックグラウンドを把握し、炭素14の定量下限値を 3.5×10^{-4} (Bq/試料) と評価した。計算科学研究については、既往研究の調査により、炭素14化学種の生成プロセスを解明可能な解析技術を有する研究機関と、計算科学研究の実施体制を構築した。

表-2 試験片、浸漬液及び気相中の炭素 14

	炭素 14 (Bq/試料)	存在割合
試験片(ハル)	11,100	
浸漬液 (有機)	1.55	63.6 %
浸漬液 (無機)	0.884	36.4 %
気相	0.0465	

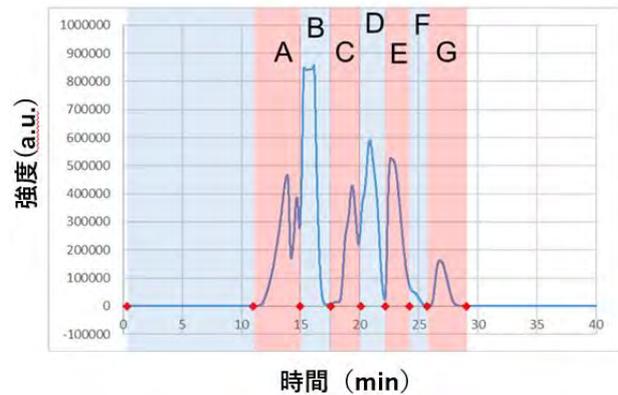


図-4 混合有機化合物の HPLC 分離の一例 (異なる化学形態 A~G への分離)

(4) 廃棄体モデルの代表性の検討

本事業で使用する商業炉で照射された材料 (照射材) の特性や情報を収集・整理し、研究の目的への適合性を確認する必要がある。

先行事業から使用している BWR 照射材 (STEP3) 及び新たに分析評価対象とする PWR 照射材 (STEP2) は、いずれも2000年代前半からの主力燃料であり²⁾、材料組成や燃料要素レベルまでの燃焼度に関する情報が整理されていることから、研究目的に適合した照射材であることを確認した。

- 1) 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、電力中央研究所、量子科学技術研究開発機構、令和 5 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 核種移行総合評価技術開発 成果報告書、2024
- 2) Sakuragi, T., Tanabe, H., Hirose, E., Sakashita, A. and Nishimura, T.: ESTIMATION OF CARBON 14 INVENTORY IN HULL AND END-PIECE WASTES FROM JAPANESE COMMERCIAL REPROCESSING OPERATION, ICM2013-96110, 2013

(FE・BEイノベーション研究部)

5. 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（SF）や再処理条件の多様化を考慮するとともに、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。

我が国においては、SF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後に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を想定している。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ため、高燃焼度化やプルサーマルによるプルトニウムの利用が促進されている。使用済 MOX 燃料(SF-MOX)や高燃焼度の使用済 UO_2 燃料(SF- UO_2)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に比べて不純物（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ノイド（MA）が多く含まれることになる。そのため、再処理やガラス溶融プロセス、ガラス固化体の特性、ガラス固化体の発生本数とそれに伴う処分場面積等に対して影響を与える可能性がある。これらの課題解決のためには、燃料、再処理、ガラス固化、処分まで広範囲に渡って分野を横断する原子力利用のシナリオを適切に設定し、それ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。本事業では、多様な核燃料サイクル条件を考慮したシナリオ（オプションシナリオ）の評価に資する国内外の情報を調査、分析、整理し、それらオプション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。

◇2023年度の成果

2022年度に引き続き、2023年度は高燃焼度のSF- UO_2 およびSF-MOXを対象とした核燃料サイクルオプションの最適化に向けたオプションシナリオ

検討、ガラス固化および地層処分に対する情報調査および影響評価を行った。

(1) 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、既存のSFのみならず、今後の発生量を予測し、それらをガラス固化プロセスに反映させて廃棄物発生量および処分場面積の評価を行った。評価においては、燃焼度や冷却期間等の条件が異なるSFに対し、MA分離の有無等を含めた複数の再処理条件を仮定して詳細に検討した。

(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、SF-MOX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)で検討したオプションシナリオの論拠とした。

(3) パラメータスタディによる地層処分への影響評価

核燃料の種類やサイクル条件の多様化がガラス固化体の特性や地層処分に与える影響について検討した。

① UO_2 /MOX 混合ガラス固化体

MOXガラス固化体の発熱対策のひとつとして、SF-MOXから発生する廃液に対してSF- UO_2 から発生する廃液を混合（希釈）してガラス固化をする方法がある。SF-MOXとSF- UO_2 との混合割合が処分場面積へ与える影響を比較し、技術オプションとしての評価を行った。

② ガラス固化体の溶解速度

ガラス固化体の表面温度上昇に伴い、ガラスの溶解速度も上昇するが、これまでは一定値を適用した安全評価に留まっていた。そこで、表面温度およびそれに依存したガラスの溶解速度の経時変化を考慮した安全評価を行った。核種移行解析によりSFの冷却期間が被ばく線量に与える影響を検討した。

③ 処分地に依存する熱的要素の不確実性

熱に関する処分環境の不確実性には、処分深度、地下水流量・流束、岩盤の種類によって異なる熱伝導率・比熱・密度等がある。また、ガラス固化体の定置方式も処分場の熱的挙動に影響する。これら

のうち、地下水流量およびガラス固化体の定置方式の違いが処分場面積へ与える影響について緩衝材の制限温度に留意して評価した。

本成果は経済産業省資源エネルギー庁「令和5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。

（F E ・ B E イ ノ ベ ー シ ョ ン 研 究 部）

6. 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 核種であるアクチノイドに特に注目し、前者はAgI、I-アパタイトに、後者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・手法を用いた実験や計算科学アプローチにより徹理解する。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ステンレス鋼(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。

本事業は、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。

◇2023年度の成果

(1)ハイブリッド固化体の検討

複数の模擬1次固化体を対象にハイブリッド固化体を作製し、最終的な廃棄体について検討した。固化体サイズの50ml から500ml へのスケールアップにより、SUSマトリクスは健全な状態を保ちながら課題であった均一性が向上し1次固化体をより単分散できる可能性が示されたことから、スケールアップ固化体の製造に見込みを得ることができた。また、セルオートマトン法による固化体からの核種溶出モデルの検討により、SUSの非常に低い腐食速度(0.02 $\mu\text{m}/\text{y}$)から予想されるように核種は長い時間をかけて少しずつ溶出され(コントロールリリース)、半径130mmサイズの溶出期間(固化体寿命)は数百万年スケールになることが示された。また、1次固化体の充填率、分布、溶解速度は一定程度の影響にとどまり、固化体寿命への顕著な影響は確認されなかった。従って、ハイブリッド固化体の寿命は高レベルガラス固化体の寿命7万年やヨウ素を含むTRU廃棄物の技術開発で目標とされている固化体寿命10万年以上を十分に満たす可能性を示すと考えられる。上記知見をもとにI-129やMAを閉じ込め対象とした実際のハイブリッド固化体として、廃棄物充填率10%、直径430mmの円柱状のSUSマトリクス廃棄体を想定し、処分概念の検討や安全評価を行った。

(2)処分概念・安全評価の検討

(1)で提示した廃棄体に対して処分概念及び処分後の安全性について検討した。汚染水処理廃棄物を念頭に易動性のI-129と潜在的毒性の高いMAに着目し、閉鎖後長期の観点での地下水移行シナリオ及び潜在的毒性の観点での人間侵入シナリオについて被ばく線量を評価した結果、いずれの核種・シナリオともに想定される基準以下となった。特に、耐食性の高い金属マトリクスによる閉じ込め(コントロールリリース)が長期安全性に対して効果的であった。

以上により、ハイブリッド固化体は処分後の長期的な安全性に優れた廃棄体であること、また、実規模へのスケールアップに対して均質で健全な固化体の製作できる見込みが得られたことから、2021年度に開始した本研究の最終年度の取りまとめとして、ハイブリッド固化体の社会実装の可能性を提示する当初の目標を達成することができた。

(FE・BEイノベーション研究部)

7. 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) 高安全・核セキュリティ及び低廃棄物処分負荷を同時達成する中小型軽水炉に関する研究

事故耐性燃料の一つであるケイ化物燃料を中小型軽水炉で利用する場合の炉心特性と廃棄物処分を含めた核燃料サイクルの物量評価研究の最終年度として、高安全性（炉心特性、核不拡散性など）、長期運転、回収 U と回収 MA の資源活用を実現する炉心特性を提示するとともに、我が国における本炉運用の将来予測シミュレーションにより、廃棄物処分負荷低減、天然 U 消費量の削減、そして長期運転型炉の国外輸出の潜在能力を提示した。

(2) 金属燃料高速炉の国内導入に向けた乾式再処理の廃棄物に関する検討（2023年度）

金属燃料高速炉使用済燃料について、その核種インベントリ、及び乾式再処理で発生する高レベル放射性廃棄物（ガラス結合ソーダライト固化体の発熱特性と発生量を計算し、得られた結果を基に、処分場閉鎖後長期の安全評価と処分場面積を評価して、既往の処分概念での対応可能性を提示した。

(3) 代替粘土材料を用いた埋戻し材料の小規模施工試験

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、代替粘土材料（非膨潤性粘土材料）の埋戻し材としての適用性の評価に取り組んでいる。

2022年度までの取組をとおして材料としての見通しが得られたことを踏まえ（期待する透水性能が得られる可能性）、代替粘土と模擬掘削土（最大粒径20mm）の混合土を用いて小規模な埋戻し材ブロックの製作性を確認するとともに、地下水の浸潤によるブロックの膨潤時の状態を X 線 CT を活用して確認した。

(4) 緩衝材及び埋戻し材を対象とした再冠水過程の評価

地層処分場の過渡期における性能評価の精度の向上に向けて、再冠水過程における緩衝材と埋戻し材の浸潤状況の把握及び浸透解析の妥当性の確認に資する実験データの整備に取り組んでいる。

本研究では、有孔型 PEM 容器の孔部周辺を模擬した要素試験として、容器と緩衝材間のフィルタ材の種類等をパラメータとした短期の浸潤試験を実施し、フィルタ材ごとの浸潤・膨潤（膨出）現象の経時的な観察及び供試体の浸潤（飽和度）や密度（乾燥密度）分布を把握した。

(5) ガス発生量の低減が可能な廃棄体パッケージ充填材の調査

廃棄体パッケージの内部充填材について、候補となる充填材のガス発生特性の低減目標（目標 G 値）の設定や廃棄体パッケージの製作時の内圧の上昇を抑制するための工学的対策の具体化に必要な検討として、TRU 廃棄物のうち発熱量が大きく放射線量が極めて高いグループ 4H の廃棄物を対象として、パッケージ内充填材及び廃棄物の固型化材からのガス発生量を評価するとともに、そのガス発生量に基づきパッケージ内の内圧を評価した。

(6) 白金族元素（PGM）マネジメントを中心とした核燃料サイクル・ガラス固化に関する研究

核燃料サイクルの全体最適化・分野横断研究として、高レベル放射性廃液から PGM 分離を技術オプションとした MOX 燃料、再処理、MA 分離、ガラス固化、地層処分の影響について概念検討を行った。

(7) 高レベル放射性廃棄物等の安定化・高含有固化技術の研究

高レベル放射性廃液の仮焼体を用いた高含有固化方法について、模擬仮焼体の作製と造粒方法の検討、粉末冶金法を利用した固化体の試作を行った。

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った。また、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「令和5年度放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物海外総合情報調査）」により実施したものである。

◇2023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情報収集と総合的なデータベースの整備

放射性廃棄物処分にに関する具体的活動や計画を有するフィンランド、スウェーデン、フランス、スイス、英国、ドイツ、米国、カナダ等の欧米諸国、ロシア、中国、韓国、台湾等を中心に、各国の処分実施主体などの関係機関を活用するなどして法制度の整備状況、処分場開発の基本計画と体制、資金確保、技術開発、情報提供・広報、処分施設の許認可申請・発給の状況、関連する訴訟などの最新かつ信頼性が高い詳細な情報を収集した。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、地層処分場サイトの段階的な選定プロセスが進行し、具体的な候補地があがっている英国、カナダ、スイス、ドイツ等を中心に、計画受け入れに関わる意思決定プロセス、

地質等の技術面や社会経済影響に関する調査、地域共生策、地元自治体等のステークホルダーとの対話活動・情報提供の取り組み、地域共生策の事例に関する情報を収集した。

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、データベースの維持・管理、改良や機能拡充の課題整理等を実施した。

(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-1）。

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27件掲載した（記事タイトルの一覧は、資料 V-4を参照）。

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（2024年版）』（図-2：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（2024年版）』（図-2：右）の2種類の資料を作成した。

技術情報冊子①（2024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可能な限り避け、諸外国の状況や多

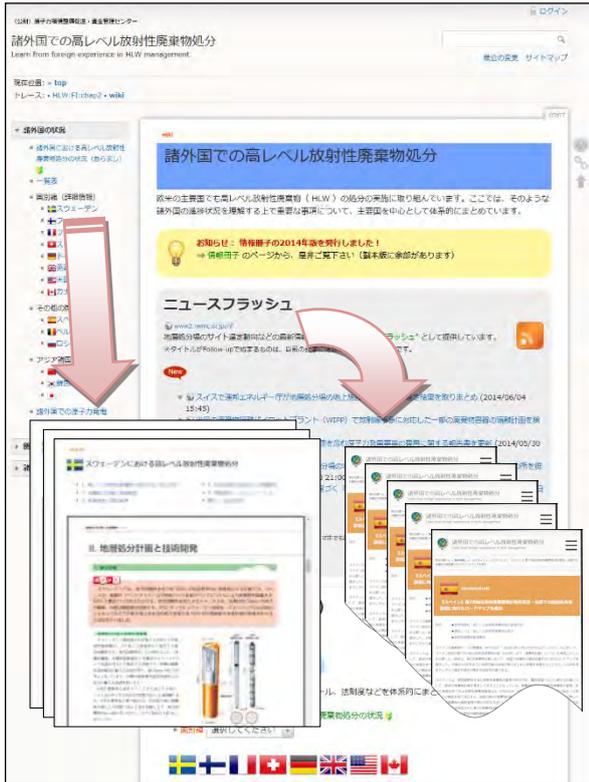


図-1 ウェブサイト「諸外国での高レベル放射性廃棄物処分」の閲覧イメージ
<https://www2.rwmc.or.jp>

様々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。2024年版では、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、2023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（2024年3月発行）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



図-2 2023年度に整備した技術情報冊子

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。

(3) 諸外国における放射性廃棄物のクリアランス及び再利用の実態に関する調査

放射性廃棄物のクリアランス制度が存在し、かつ実際に産業として金属スクラップの処理（溶融等）を実施しているスウェーデン、ドイツ、英国等中心に、クリアランス対象物の材質や量、処理方法と製造物、クリアランス基準値と認可プロセス、クリアランス製造物の流通状況等について情報収集を行い、委託事業報告書に取りまとめるとともに、公開情報については、データベースに登録する情報として整備した。

(4) クリアランス制度の認知や理解に関する調査

これまでにクリアランス物の再利用を進めている福井県において、当該再利用品を用いたクリアランス物の再利用先拡大に向けた取り組みを実施した。また、クリアランス制度の認知や理解に関するアンケート等の調査を実施し、調査結果をもとにした分析を行った。

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター、令和5年度 放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物海外総合情報調査報告書、2024

(技術情報調査部)

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ついては、国や関係機関、処分実施主体等が適切な役割分担のもとで進めていくことが重要である。また、地層処分事業は100年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・先進的な研究開発及び人材育成プログラムの作成を行い、長期的な視点で地層処分事業の推進に貢献できる人材を育成することを目的としている。

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作成・実施

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、大学等の研究機関に委託した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の実施に関する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、2023年度下期から3カ年の研究期間で研究開発テーマを公募し、次の7つの研究開発テーマを選定した。また、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うとともに、2023年度の研究実施内容の取りまとめを行った。

- ①フライアッシュ混合セメントの利用における環境影響物質の溶出と不溶化に関する基礎的研究（研究者：東北大学 関 亜美）
- ②地層処分の地下水質・温度履歴を模擬した環境におけるベントナイト系緩衝材の水分移動特性および膨潤特性の実験的評価（研究者：早稲田大学 阮 坤林）
- ③透過波による岩盤モニタリングを目指した弾性波と地盤の不均質性の関係評価（研究者：京都大学 吉光 奈奈）
- ④地下環境の透水性イメージング・モニタリングに資する岩石物理モデルの構築（研究者：京都大学 澤山 和貴）
- ⑤放射性核種の超長期安定固化に向けた次世代型シンロック固化技術の開発（研究者：岡山理科大学 牧 涼介）
- ⑥分散型台帳技術と機械学習を用いた先進的地層処分場設計スキームの構築（研究者：東京工業大学 岡村 知拓）
- ⑦広域応力場を考慮した流体供給源周辺の応力場のモデル化（研究者：日本原子力研究開発機構 安邊 啓明）

2023年度は研究期間が半年程度であったため、各研究の進捗管理のために評価委員会を年度末に開催し、研究進捗と次年度の研究計画を確認した。

各研究開発テーマと2023年度成果の概要は2-2を参照のこと。

(2) 人材育成プログラムの作成・実施

地層処分事業の着実な遂行に向けては、研究開発分野と地層処分の実施主体ともに、地質学、土木工学や放射線化学等、幅広い専門的な知識を有する人材が必要不可欠である。しかし、現在、このような人材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、研究開発と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・作成を実施することが目的である。

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の実施、人材育成プログラムの更新を繰り返し行い、人材育成プログラムを作成した。

- 地層処分研究開発の俯瞰的な理解を深めるためのセミナーを年間3～4日程度実施した（受講者数としては、20～40名を想定）。具体的には、資源エネルギー庁委託事業に関する報告の聴講と、それに基づき、俯瞰的な視点で地層処分技術開発における課題等をグループ討議等により議論し、理解を深めることを目的とした。
- 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、解決策を立案した。
- 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育成プログラムを作成・改善した。

有識者からの助言を得るため、及び関係機関からの協力を得るため、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、検討を行った。

- 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）

人材育成セミナーでは、資源エネルギー庁委託事業の報告会と報告会に基づいたグループ討議を実施した。グループ討議では、地層処分研究開発への過去及び現在の自身のかかわりを整理したうえで、10年後に必要な研究開発と自身のかかわりを考えグループ内で共有した（図-1）。また、2020年度から作成を開始した教材を完成させるとともに、教材をもとにした動画教材を作成した。実施内容の詳細及び成果概要は2-3を参照のこと。



図-1 人材育成セミナーの様子

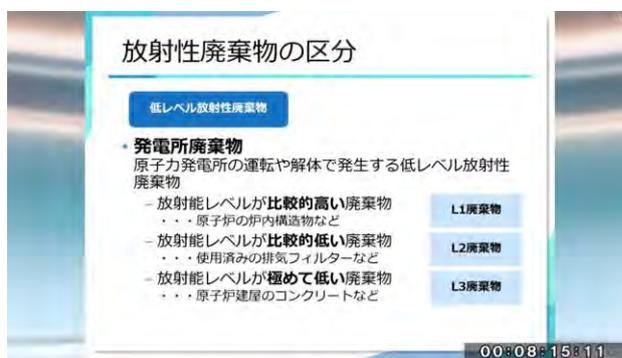


図-2 作成した動画教材

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5年度放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務）」により実施したものである。

（技術情報調査部）

2-2 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理・成果の取りまとめ等

◇2023年度の成果¹⁾

(1)新規研究テーマの選定

2023下期～2026年上期の3ヵ年で実施する、地層処分に係る萌芽的・先進的かつ重要な研究開発テーマを新たに選定した。具体的には、地層処分の技術的信頼性に資する、主に4つの分野（地質環境、工学技術、性能評価、代替オプション）を対象として萌芽的・基礎的研究テーマ及び研究実施者を公募し選定した。選定においては地層処分関連分野の有識者で構成される選考委員会を設置し、当該委員会での書類審査・プレゼン審査を実施した。(2)に選定した7件の研究テーマ・研究実施者、2023年度の研究概要を示す。

(2)進捗管理・成果の取りまとめ等

(1)にて選定した、7件の研究開発テーマについて、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、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2024年3月に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対面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2023年度の成果概要を以下に示す。

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

地層処分場の建設に使用されるセメント系材料の候補の一つにフライアッシュ（以下、FA と呼称）を混合した FA セメントや低アルカリ性セメントの適用が検討されている。一方、FA は、石炭由来の第二種特定有害物質（重金属等）を含有しており、土壤汚染対策法の基準値を超過して溶出する可能性が指摘されている。本研究では、FA が含有する環境影響物質 Cr(VI)、As、Se、F、B（有害5成分）に着目し、FA 単体、及びポルトランドセメント（OPC）や高炉セメント

に FA を混合した FA 混合セメントからの溶出特性を評価するとともに、基準値に対して有意な溶出が認められた成分の不溶化方策を検討する。また、地層処分の安全評価において重要核種とされている Se 及び I を対象として、FA 混合セメントとの相互作用（核種の収着あるいは不溶化などの効果）を検討する。これらの検討により、FA の建設材料としての有効利用において、処分場由来の環境影響物質の溶出が法令基準に対して十分に抑制され、かつ、地層処分システムの性能向上に寄与することを目的とする。

2023年度は、入手したFA 10種の基礎的な化学的性質として、粒径分布、化学組成、6時間溶出試験による溶出液のpH及び各成分の溶出量を評価し、本研究の検討で用いるFA 3種を選定した。その後、選定したFAについて、最大28日間の浸漬実験により、液相中のpH、及び溶存成分の濃度の経時変化を追跡した。さらに、エージング及びCaOを添加することによる不溶化試験を実施した。これに加えて、FAと陰イオン核種であるSe及びIとの相互作用を検討した。

FA 10種の基礎的な化学的性質を調べ、溶出試験での溶出液の pH に着目して3つの試料を本研究で用いる代表試料として選定した。

3種類の FA に対して実施した28日間の浸漬試験における経時変化の結果から、Cr(VI)、As、Se、Bの溶出挙動には pH、Al、Ca、 SO_4^{2-} の溶出挙動との相関が示されたことより、有害成分の濃度変化は主に FA 粒子を構成する Si、Al、Fe 酸化物への吸着及び脱着に加え、pH が11以上で二次的に生成するエトリングサイト (ettringite) への吸着が寄与していることが示唆された。

エージング及び CaO 添加による有害成分不溶化の検討では、不溶化効果は①CaO 添加後エージング（1週間静置養生）の条件で最も大きく、続いて②CaO 添加後1週間振盪養生、③エージングのみの条件の順番となった。CaO 添加による有害成分の不溶化効果の増大については、前述と同様にエトリングサイトの生成が有害成分の固定化に寄与している可能性が示された。

陰イオン収着試験では、I⁻に関してはFAやCaOとの有意な相互作用は認められず、FAによるI⁻収着は期待できないことが示された。一方で1mMの条件での SeO_3^{2-} の収着試験では、収着媒体がFAのみの条件においても液相中の濃度が低下し、

さらに CaO を添加することで CaSeO₃ 生成により顕著な濃度低下が見られた。

今後は、浸漬溶液や温度をパラメータとした浸漬試験や、固相分析、また、 IO_3^- 、 SeO_4^{2-} 、 HSe^- を用いた収着試験の実施が課題である。

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

日本の高レベル放射性廃棄物の地層処分で使用が検討されている緩衝材として、自己シール性、止水性、核種吸着性、応力緩衝性等の特性を有するベントナイトが有力である。ベントナイトの特性は再冠水過程、廃棄体からの温度、沿岸域のサイトの場合は海水成分の地下水などにより影響を受ける可能性がある。本研究では、締固めたベントナイト供試体に温度履歴を与え、淡水及び海水環境を模擬した蒸留水及び人工海水を用いて供試体を飽和させ、供試体の膨潤特性を示す膨潤圧及び水分移動特性を示す水分拡散係数を検討する。その結果をもとに、温度履歴・水質が緩衝材の膨潤特性および水分移動特性に及ぼす影響を確認し、緩衝材の合理的な設計に寄与することを目標とする。

2023年度は、様々な温度履歴を与えたベントナイト試料を準備し、それらに対して膨潤圧の測定と水分拡散試験を行った。膨潤圧については、30日及び60日間の温度履歴を与えた試料を膨潤圧試験装置に装着し、蒸留水または人工海水を供給して、膨潤圧を測定した。水分拡散試験についても同様に、温度履歴を与えた試料を浸潤試験装置に装着し、蒸留水または人工海水を供試体の片側面から供給することにより水分拡散係数を求めた。さらに、水質や温度履歴がベントナイトへの膨潤特性に及ぼす影響を明らかにするために、蒸留水または人工海水を供給し膨潤圧を長期間モニタリングする試験を開始した。

それぞれ60℃、80℃、100℃、150℃の条件で30日間及び60日間の温度履歴を与えた試料を用いて蒸留水または人工海水で飽和させて膨潤圧試験を行った結果、ベントナイトの平衡膨潤圧は温度履歴を与えていない試験結果と同程度となり、温度履歴を与えた影響は限定的であった

(図-1)。また、蒸留水で飽和させた場合の平衡膨潤圧は人工海水で飽和させた平衡膨潤圧より大きい結果となった。

温度履歴を与えたベントナイト試料（径28mm、高さ10mm）を様々な時間（4、8、20、48、240h）で浸潤させた結果、4時間の浸潤時間においては、試料の給水面近くの含水率が高く、給水面からの距離が離れるにつれて減少する傾向を示した。一方で、長い浸潤時間（蒸留水240h、人工海水48、240h）での試験では、給水面とその反対側の部位における含水率は同程度となった。水分拡散係数を算出したところ、人工海水を用いた試験における水分拡散係数が蒸留水を用いた系より大きい結果となった。一方で、様々な温度履歴を与えたベントナイトの水分拡散係数は、温度履歴を与えないベントナイトと同程度であったことから、60日間程度の温度履歴では、ベントナイトの水分拡散に及ぼす影響は限定的であることが示唆された。

膨潤圧の長期モニタリング試験については、異なる温度での膨張圧の長期モニタリング用に設計した膨潤圧装置を新たに整備した。整備した装置を用いて予備試験を行ったところ、膨潤圧を良好に継続して測定できることがわかった。

今後はより長い温度履歴を与えたベントナイトの膨潤圧と水分拡散係数への影響を明らかにすること、および膨潤圧と水分拡散係数に及ぼす蒸留水と人工海水それぞれの影響のメカニズムを明らかにすることが課題である。

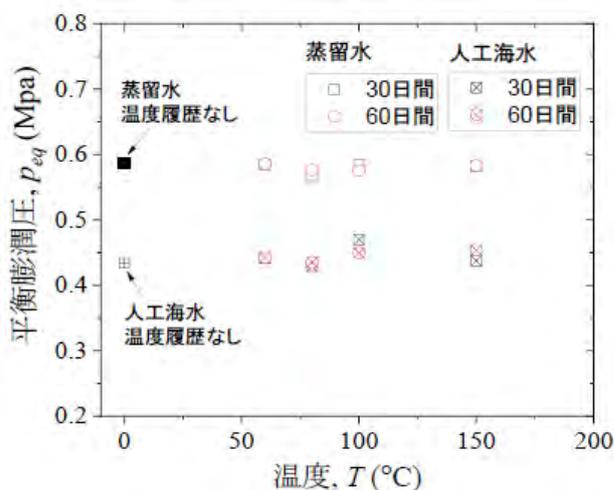


図-1 蒸留水および人工海水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの平衡膨潤圧

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

地層処分ではサイト選定段階や処分場の建設・操業段階で処分場周辺の岩盤の亀裂面等の監視が必要である。弾性波測定では亀裂等の不均質性と弾性波形状の評価において不明点も多い。本研究では、岩盤の薄片観察やCTスキャン等で試料内部の様子を視覚的に把握することができる岩石実験や、地層処分場に近いスケールの現場計測における広帯域計測を通して、透過波と亀裂の関係を吟味し、どのような岩盤の変化が検出可能か評価する。能動的弾性波モニタリングから岩盤情報やその変化を検出することができる場合、透過波の速度・振幅・周波数・形状変化等と岩盤の変化がどのように関連するのか関係性を調べ、変化や亀裂が検出できる場合はそれらを定量的に描像することを目指す。

2023年度は主に実験室における岩石試料を用いた弾性波計測について、試料や機器の準備と一部計測を開始した。また、不均質な部分を含む岩石試料と、均質な試料の弾性波計測の比較を実施するために、試料の選定を行った。選定した岩石試料内の不均質状態を正確に把握するために、円柱形に加工した試料のX線CTスキャン画像を撮影し、CTスキャン画像から、各試料内の空隙や粒子の状態を検討した。また、試料内に弾性波を透過させ、不均質状態の違いが波形にどのように表れるかを調べた。さらに、弾性波の観測結果を理解するために、差分法による弾性波の伝播過程について数値シミュレーションを実施した。

青森県今別町において採取した2種類の安山岩（A01：試料全体にランダムに直径1mmから30mm程度の空隙を含む；A02：大きな空隙は見られず試料全体に2mm程度の空隙が均質に分布）、及びベレア砂岩について、円柱形に加工し、試料内に弾性波を透過させて測定した。その結果、ベレア砂岩では初動、S波、その後の表面波と反射波がはっきりと見えているのに対して、A01やA02では後続相の乱れが大きかった。観測結果から伝播速度を推定し、全観測点における速度の擾乱を観察した結果、ベレア砂岩では各観測点における速度擾乱はほとんどなく透過経路による速度の違いは小さかったが、一方で、A01の経

路ごとの速度擾乱は大きく、試料内部の不均質状態の違いが影響していることが示唆された。

比較的均質媒体に近いベレア砂岩の弾性波の波形を数値シミュレーションした結果、計算波形についてはP波、S波、上下方向へ伝播する表面波などは実測波形と同様に見えるものの、初動到達時刻の上下方向への広がり方や表面波の見え方に実測と異なる点があった。これらの相違の原因解明については今後の課題である。

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

地層処分事業において、候補地の事前評価ならびに閉鎖後の長期安定性を評価するために、地下の流体流動挙動の評価が重要な検討項目の一つとなる。本研究では、地球物理学的探査手法（弾性波探査や電気比抵抗探査）を活用して、岩石物性値と流体流動挙動の直接的な対比を様々なスケールで行うことで、実際の地下環境で得られる観測物性値から目に視えない地下の流体流動挙動の時空間変化を予測可能なモデル（以下、岩石物理モデル）を構築する。また、これらの検討によって事前評価ならびに地上モニタリングの双方への還元を目指す。

2023年度は浸透率・弾性波速度・電気比抵抗を高拘束圧高間隙水圧下で計測可能な実験システムを整備した。また、上記の実験システムで使用する直径1.5インチの円柱状岩石サンプルを成形し、試験環境を整備した。亀裂を有するサンプルについては、表面粗さデータを取得した。上記の岩石サンプルについて、予備試験を行い、浸透率・空隙率・密度・電気比抵抗・P波速度・S波速度を測定した。さらに、亀裂試料の粗さ情報をもとに作成した数値亀裂に関して、空隙率の影響を考慮した数値解析を行った。

高拘束圧高間隙水圧下での同時物性測定装置の整備については、試験条件で拘束圧を最大190MPa、間隙水圧を最大80MPaまで増圧可能なように配管等を整備した。またシリンジポンプによって浸透率と空隙率を、フィードスルーによってP波速度・S波速度・電気比抵抗をそれぞれ同時計測可能なことを確認した。

構築した実験システムで使用する直径1.5インチの円柱状岩石サンプルを成形し、火成岩と溶

岩試料を準備して、浸透率・空隙率・P波速度・S波速度・電気比抵抗を測定する予備試験を行った。空隙水の電気伝導度を変えた比抵抗の測定結果からは、地熱地域安山岩や火山体溶岩のような目に見えて変質が見られる岩石の場合では、流体の電気伝導度が下がった場合に表面伝導の影響がみられたが、流体の電気伝導度が1S/mを超える場合は表面伝導の影響がほとんどないことが示された。また弾性波速度や比抵抗の測定結果を既存の岩石物理モデルと照らし合わせると、今回測定したサンプルの空隙構造はアスペクト比のやや大きいクラック〜チューブ状であることが示唆された。

数値解析については、亀裂を含む岩石の粗さを表面形状測定機で観察し、このフラクタル特性から数値亀裂を造成した数値シミュレーションによって浸透率・P波速度・S波速度・電気比抵抗の変化を推定した。実験結果の知見をもとに、デジタル岩石モデルのマトリックス部分に空隙率を与えた条件で計算を行うと、浸透率-比抵抗や比抵抗-空隙率の変化の傾きが大きく変化することがはじめて明らかとなった。また、弾性波速度と比抵抗の関係は、空隙率に依存せずにパーコレーション閾値と相関していることが示されたことから、これらの物性の同時モニタリングによって浸透率が精度良く求まる可能性が示唆された。

今後は各種岩石の浸透率-比抵抗および浸透率-弾性波速度の相関に係るデータを蓄積し、岩石物理モデルを構築することが課題である。

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

本研究では、使用済燃料の再処理施設から発生する高レベル放射性廃液に含まれる、特に潜在的有害度が高く長期的な発熱源かつ α 核種であるマイナーアクチノイド（MA）を含めたアクチノイド（An）に注目し、多様な放射性核種の超長期安定固化に向けた、ガラス固化体の代替オプションとなり得る可能性がある次世代型シンロックの固化技術の開発を目的とする。さらに、シンロックと天然鉱物について、結晶構造解析及び第一原理計算などの計算科学を併用して結晶安定性評価を実施することで、何十万年

後の廃棄物の状態や安全性を予測できる新しい評価技術の創出を図る。

2023年度は、種々のプロセス（常圧焼成及び放電プラズマ焼結（SPS））により、試薬を用いて模擬 An を含むシンロックを合成し、対象とする核種に応じた化学組成の最適化及び合成手法の目処づけを実施した。また、粉末 X 線回折装置及び顕微的手法を用いて、得られた試料について微構造評価を実施し、得られたデータを合成実験にフィードバックした。さらに、天然鉱物の結晶状態評価に向けて、天然鉱物の結晶構造に関する資料収集を行い、原産地に対応させて構造パラメータ等の情報を整理した。

複雑な結晶構造を有するムラタイト基シンロックについて、従来の電気炉を用いて常圧焼成により合成した。また、簡便な結晶構造であるジルコノライト及びパイロクロア基シンロックについてはSPSによる合成を行った。また、それぞれのシンロックについて、セリウム（Ce）およびユロピウム（Eu）の模擬 An を含む化学組成となるように調整し、合成したシンロックのキャラクタリゼーションを行った。X線回折（XRD）の結果から、 U^{4+} などの4価の An が Zr^{4+} と置換、また Am^{3+} などの3価の An が Mn^{2+} と置換するように化学組成を調整することで、An が固溶したムラタイト基シンロックを合成することが可能ことがわかり、化学組成の最適化および合成手法の目処づけを達成した。SPSで合成したパイロクロア基シンロックでは、Ce置換量の増加に伴う構造の変化（軸長の変化）が顕著に現れることが判明し（図-2）、SPSを用いることで An 固容量の増加が見込まれる結果が得られた。

天然鉱物の結晶状態評価では、天然鉱物の結晶構造に関する資料収集を行い、原産地に対応させて構造パラメータ等の情報を整理した。合成したムラタイト基シンロックの結晶構造と天然のムラタイト鉱物の結晶構造を比較したところ、合成したムラタイトの結晶構造に見られる8配位サイトの金属イオンが天然鉱物には存在しないことが分かった。この8配位サイトのカチオン欠損の原因が長年に渡る劣化・変質であるとするならば、その劣化挙動について結晶学的観点から詳細に検討することで、シンロックの地質学的年代にわたる超長期間の変化を予測できる新しい評価技術につなげられる可能性が示

唆された。

今後も常圧焼成と SPS による固化プロセスが結晶構造と固化体性能に及ぼす影響、さらに核種閉じ込め性能の評価をしていくことが課題である。

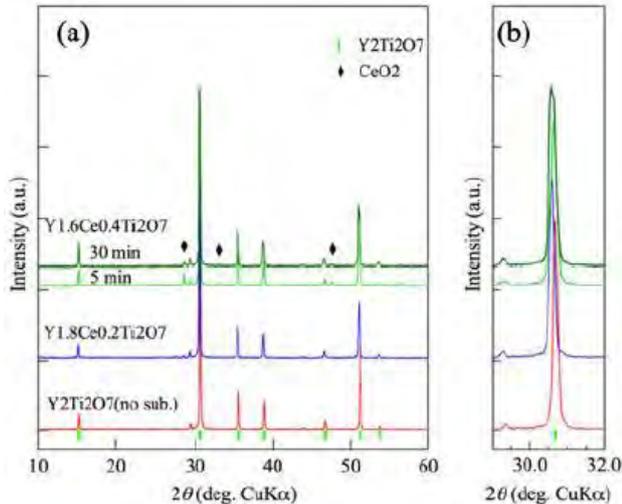


図-2 放電プラズマ焼結 (SPS) を用いて合成した、Ce を置換したパイロクロア基シンロックの X 線回折 (XRD) パターン。赤は無添加、青は Ce10%置換、緑は Ce20%置換を示す。左図中の最強ピーク (右図) は模擬 An 置換が増加するにつれて低角側にシフトし、Ce が固溶していることを示す。

6) 分散型台帳技術と機械学習を用いた先進的地層処分場設計スキームの構築 (研究者: 東京工業大学 岡村 知拓)

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

2023年度は、2024年度以降に動的な核燃料サ

イクルシミュレータ NMB4.0を用いて六ヶ所再処理工場から生じるガラス固化体の発生シナリオを分析するために必要な、ガラス固化体インベントリ評価の為に既設原子炉の運転条件、六ヶ所再処理工場の運転計画等の条件を調査し、それを基に NMB4.0のインプットデータを作成した。

また、2024年度以降に実施する廃棄物データベース構築のために、原子力分野におけるブロックチェーン技術の活用事例や、海外での先行事例等について調査を実施した。その結果、高いセキュリティ性、開発団体の長期サポート見込、開発ノウハウ成熟度、組織間データ管理の柔軟性、モジュール性・スケーラビリティ、秘匿情報管理の観点から、2025年度以降に開発するブロックチェーンを活用した廃棄物データベースには、コンソーシアム型ブロックチェーンを採用することとした。

さらに、処分場全体規模でより効率的に多くの高レベル放射性廃棄物を埋設する方法を検討するために、有限要素法解析ソフトウェアを用いて、従来の地層処分場の熱解析モデルを改良し、多様な発熱特性を有する廃棄物の埋設を考慮した大規模過渡伝熱解析モデルを構築した。大規模過渡伝熱モデルは、第2次取りまとめ¹と包括的技術報告書²に示されたモデルを基本として、それを拡張して構築した。今後は廃棄物発生シナリオの解析で得られる多様な廃棄物インベントリデータを用いて、構築した処分場熱解析モデルの計算を実施することが課題である。

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

地層処分のサイト選定調査において、火山・火成活動の影響範囲の把握に係る調査・評価技術の高度化は重要な課題である。本研究では、広域応力の影響を仮定した新たな流体供給源周辺の応力場モデルを提案し、火成岩脈の貫入方向や火山活動の影響範囲を予測するための理論

¹ 核燃料サイクル開発機構(1999)、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ

² 原子力発電環境整備機構 (2021)、包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—

的枠組みを構築する。また、岩脈群の貫入方位が貫入時の応力場に從うことを利用し、岩脈群の方位分布から貫入時の応力場を推定する逆解析手法を開発することにより、局所応力と広域応力を峻別しながら過去の応力場を推定する手法の開発を目指す。

2023年度は、既存の応力場モデルを基に、水平無限遠で広域応力に収束するような新たな流体供給源周辺の応力場モデルを提案し、数値解析ソフトウェアを用いて先行研究と本研究の応力場モデルを実装して比較検討した。本研究のモデルでは、水平断面、鉛直断面の両方で、球状圧縮源近傍では局所応力の影響が大きく、離れるに從って広域応力の影響が大きくなる結果が示された。また、本研究の応力場モデルでは、広域応力に伴う異方的な応力分布を表現することが可能となり、既存モデルより現実に即した応力場モデルが構築できるようになった。

また、応力逆解析を適用する地質時代の岩脈群を選定するため、逆解析の適用に好ましい条件（流体供給源の存在が示唆される、多数の岩脈の方位データから局所的な応力の空間変化を検出できる）に該当するデータを収集するための文献調査や予察的な野外調査を行った。その結果岐阜県の飛騨金山地域、石川県の金沢市及び白山市、和歌山県白浜町、串本町、兵庫県豊岡市、熊本県天草市などにある岩脈群が逆解析法の適用候補地として可能性があることが分かった。岐阜県の飛騨金山地域では花崗岩岩脈を確認し、貫入方位を測定することができた。また、この地域では露頭状況の変化を加味しても、今後調査を継続することによって多数の岩脈データが取得できる見通しが立った。今後も逆解析法を適用する事例の選定を継続することが課題である。

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター、令和5年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務 報告書、2024

(技術情報調査部)

2-3 人材育成プログラムの実施・作成

◇2023年度の成果¹⁾

人材育成プログラムの実施・作成では、以下の内容を実施した。

- ▶ 人材育成セミナーの実施
- ▶ 地層処分に関するリテラシー育成教材の作成
- ▶ 動画教材（Eラーニング）の作成

以下に、実施した内容に関する成果と今後の課題を示す。

(1) 人材育成セミナーの実施

当センターでは、資源エネルギー庁の委託事業において地層処分事業を研究開発と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開発を2019年度から行っている。

2023年度には、資源エネルギー庁委託事業である地層処分に関する研究開発事業の報告会により地層処分研究開発の全体概要を学んだ後、グループ討議で地層処分研究開発と自身のかかわりをイメージすることを目標・ねらいとした人材育成セミナーを企画した（図-1）。

開催にあたっては、関係機関から受講者（モニター）を募集した結果、14名の受講者を得ることができた。このセミナーは、「地層処分研究開発を知る！～10年後のあなたをイメージする～」とのタイトルで、都内会場において2023年11月6日から8日の日程で開催した。セミナーの開催概要及び受講者へのアンケート結果の一部を以降に示す。

●人材育成セミナーの構成(エネルギー事業報告会+グループ討議で構成)

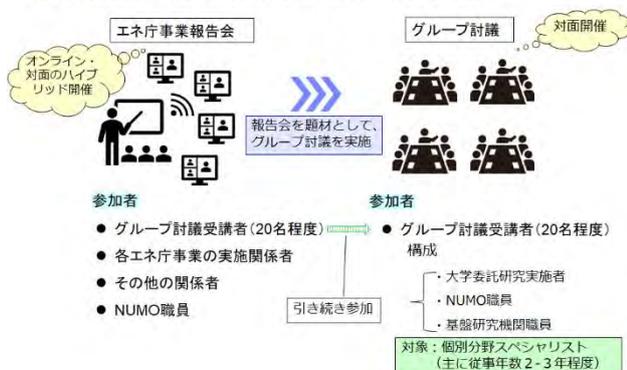


図-1 2023年度人材育成セミナーの構成

1日目と2日目で以下の8事業の報告を聞き、地層処分の研究開発を構成する資源エネルギー庁事業（基盤研究開発）を把握し、NUMOから技術開発の概要説明を受けることで、セミナー受講者が地層処分研究開発の全体像が把握できるような内容とした。また、各事業のキーワードを用いその関連性を図示する発表ふりかえり（図-2）を各グループで行い、各事業の実施内容等に関する受講者の理解向上を図った。

- ▶ 地質環境長期安定性評価技術高度化開発
- ▶ 地層処分施設閉鎖技術確証試験
- ▶ 回収可能性技術高度化開発
- ▶ 沿岸部処分システム評価確証技術開発
- ▶ 岩盤中地下水流動評価技術高度化開発
- ▶ ニアフィールドシステム評価確証技術開発
- ▶ TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発
- ▶ 直接処分等代替処分技術高度化開発

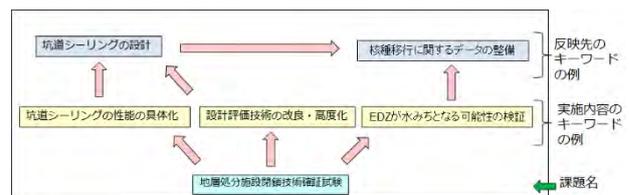


図-2 発表ふりかえりでのキーワードの関連付けモード図（実際のキーワード間の関係性を示したものではない）

3日目のグループ討議では、9分割チャート（図-3）を用いてこれまでの自身と地層処分の研究開発の関わりについて整理し、将来必要な研究課題とその課題に自身がどうかかわることができるのかなどについてグループで意見交換を行った。また、セミナーの最後には受講者の考え・セミナーで感じたことなどを共有する全体ふりかえりを行った。

地層処分研究開発での位置づけ及び事業での反映先	地層処分研究開発での位置づけ及び事業での反映先	地層処分研究開発での位置づけ及び事業での反映先
研究開発テーマ 自身がかかわってきた研究テーマ・課題	研究開発テーマ かかっている研究テーマ・課題	必要な研究開発テーマ 必要な研究開発課題にはどのようなものがあるか
自身とのかかわり 具体的に研究開発の中で自身がかかわってきたこと	自身とのかかわり 具体的に研究開発の中で自身がかかっていること	自身とのかかわり 具体的に自分が貢献できることは何か

図-3 グループ討議で用いた9分割チャート

セミナー開催後のアンケートでは、「地層処分事業に係る研究開発の全体概要が見えてきた」、

「現時点での状況を把握するきっかけになった」、「将来自分がどうすべきか、どのような知識をつけていく必要があるか理解できた」などの回答があった。このことは、今回のセミナー（報告会とグループ討議の組み合わせ）が受講者にとって地層処分研究開発の全体像を知り、自身との関係を知る、また、将来の自身との関係を意識する効果があったことを示しており、当初設定した目標・ねらいは概ね達成されたものと考えられる。

一方で、今回のセミナーでは資源エネルギー庁事業の報告会を人材育成に活用するという企画であったが、アンケート結果からは、報告会の各事業の内容を理解することは難しかったという意見が複数あった。報告会は基本的に各事業の関係者や資源エネルギー庁の他事業、NUMOの専門家を対象とした、各事業の深い内容であったことから、発表ふりかえり（図-2）を行うなどしてセミナー受講者の理解度向上を図ったが、それでもセミナー受講者にとっては理解が難しいものであったと考えられる。このことは、報告会としての側面と人材育成としての側面を両立させることが難しいことを示しており、本事業の目標・ねらいを達成するために人材育成に重点を置く場合には、個別事業の概要をテーマにしたセミナーがより有効であると考えられる。

(2) 地層処分に関するリテラシー育成教材の作成

当センターでは、なぜ地層処分をするのか、どのように地層処分を進めるのか、どのように安全性を示すのか、どのように処分場を受け入れてもらうのかなど、地層処分事業全般について説明できる素養の育成を目的とした「地層処分に関するリテラシー教材」（以下、リテラシー教材）の作成を2020年度から開始し、2022年度に試作版を作成した。作成した試作版は計11章の学習項目に加え、各章の最後に穴埋め問題、○×問題と記述式問題の3種類の確認テストで構成されている。

2023年度は2022年度に作成したリテラシー教材の試作版の最終化を行った。教材の最終化にあたっては、実際のユーザーの意見を反映するため、想定するユーザー層に教材を使用してもらい、改善点や学習効果を確認するユーザーレビューを実施した。

ユーザーレビューでは、レビュー参加者を関係機関や民間企業から募り、合計21名の参加者を

得ることができた。レビューの実施では参加者の負担や必要な時間を考慮し、リテラシー教材のすべてを学習してもらうのではなく、1～5章までを必須とし、6～11章については参加者1名につき2章を割り当て、合計7章分を学習してもらった。レビュー参加者には、教材の学習前後に確認テストを受けてもらい、学習効果を確認した。さらに、学習後のアンケートにより教材に対する意見をもらい、改善点や修正点などを洗い出した。

学習前後の確認テスト結果を比較したところ、すべての章において正答率の平均値が上昇した（図-4）。このことは、リテラシー教材を学習することで、各章の内容の理解が進んだことを示しており、教材の学習効果が高かったと言える。

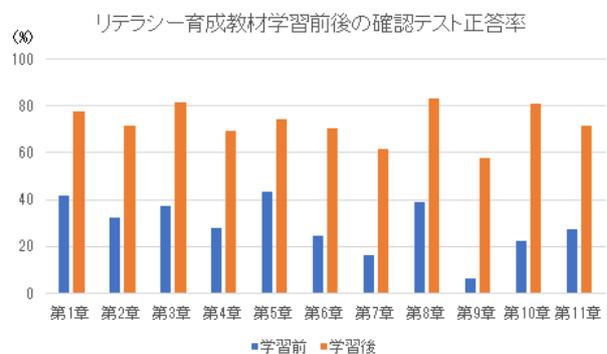


図-4 確認テストの正答率の変化

また、学習後の確認テストでも多くの参加者が間違えた問題については、問題や回答の内容を再検討し修正を行った。そのほか、ユーザーレビューで指摘された改善点を含め、再度全章の内容を確認し、わかりにくい記述や図表などについて差し替えや修正等を行い、リテラシー教材として最終化した（図-5、表-1）。



図-5 リテラシー教材の表紙及び裏表紙

表-1 リテラシー教材の目次構成

はじめに	第6章 地層処分の実現性に関する報告書
序章 学習を始める前に	6.1 地層処分の実現性を示した初期の報告書 6.2 二つの代表的な処分概念 6.3 日本における地層処分の技術の実現性 6.4 日本における地層処分のセーフティケース
第1章 日本における放射性廃棄物の種類と特徴	第7章 NUMO包括的技術報告書-適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築
1.1 核燃料サイクルと放射性廃棄物 1.2 放射性廃棄物の発生源と区分 1.3 放射性廃棄物の種類別発生量 1.4 地層処分の対象となる放射性廃棄物 1.6 日本における最終処分（地層処分）の実施体制	7.1 包括的技術報告書で示されたセーフティケースとその役割 7.2 地層処分に適した地質環境の選定とモデル化 7.3 地層処分場の設計 7.4 処分場の閉鎖後の安全性 7.5 処分場閉鎖後の長期安全性
第2章 放射性廃棄物対策-地層処分選択の背景-	第8章 地層処分の段階的な進め方
2.1 放射能の減衰特性が示唆すること 2.2 高レベル放射性廃棄物管理の倫理的側面 2.3 地層処分の選択 2.4 日本における地層処分選択の経緯 2.5 地層処分の進め方に関する提言	8.1 段階的な進め方の必要性 8.2 段階的な進め方の種類と特徴 8.3 段階的な進め方の導入 8.4 三段階の処分地選定プロセス 8.5 新たな取り組みと科学的特性マップ 8.6 段階的な処分地選定の経緯
第3章 日本における放射性廃棄物の処分形態	第9章 地層処分固有の取り組み
3.1 放射性廃棄物の処分形態 3.2 放射性廃棄物処分に関連施設 3.3 浅地中トロン子処分：L3廃棄物 3.4 浅地中ピット処分：L2廃棄物 3.5 中深度処分：L1廃棄物 3.6 地層処分：HLW、TRU廃棄物	9.1 長期評価に伴う不確実性 9.2 長期の時間枠への対応 9.3 放射線防護原則の地層処分への適用 9.4 閉鎖後の受動的安全性の仕組み 9.5 地層処分におけるモニタリング 9.6 地層処分と環境アセスメント
第4章 地層処分の安全原則と規制-基準類	第10章 地層処分に対する信頼
4.1 地層処分の安全原則 4.2 原子力全般の基本安全原則 4.3 放射性廃棄物処分に係る安全要件 4.4 放射性廃棄物処分へのICRP勧告 4.5 日本の地層処分の安全規制	10.1 信頼感の醸成 10.2 可逆性と回収可能性 10.3 地下研究施設の役割 10.4 ナチュラアナログの役割 10.5 地域とのパートナーシップ
第5章 地層処分の安全確保方策と安全評価	第11章 諸外国における地層処分事業の経緯
5.1 地層処分の長期安全確保原則 5.2 多重バリア概念 5.3 安全評価の考え方と評価手法 5.4 リスク論の考え方による安全評価と評価基準 5.5 最新の安全評価の流れ 5.6 安全評価とセーフティケース 5.7 地層処分に影響を及ぼす自然現象への対応	11.1 各国の地層処分計画 11.2 フィンランド：初期のマイルストーン通りの展開 11.3 スウェーデン：公募方式から申し入れ方式への変更 11.4 フランス：議会の主導による計画の見直し 11.5 スイス：住民投票での否決から国の積極的関与 11.6 英国：地元の主体的参加を尊重 11.7 カナダ：廃棄物処分政策と公衆関与 11.8 米国：政治的なサイト選定が生じた混沌と頓挫

(3) 動画教材（Eラーニング）の作成

(2)で作成したリテラシー教材は、今後地層処分に関する研究開発業務を実施していく人に対して、地層処分に関する広範な知識を身に付けるために作成したものである。教材については、独学で学習することを想定しているが、限られた紙面では伝えきれない内容があり、図表などについても初めて見るだけでは理解しにくいものもある。そのため、リテラシー教材との組み合わせることで学習効果を高めることを目的として、より深掘した内容の動画教材を作成し、図表等についても口頭での補足説明や視覚的に理解できるような工夫をした動画教材の作成を行った。

動画教材の作成にあたり、まずスウェーデンの放射性廃棄物の処分実施主体である SKB 社の子会社である SKB インターナショナル社（以下、SKBI 社）が作成・運営を行っているオンライン学習コース School of Geological Disposal (SGD) のコンセプト、内容及びテーマ構成などの調査を行った。調査結果から動画教材の作成への反映を検討すべき項目として以下を抽出した。

- 受講者レベルに応じたコースの構成（入門編～専門編）
- ニーズに応じた柔軟な内容・構成
- 教育・トレーニングの専門機関との共同開発

- 教材のインタラクティブ性の向上
- 学習のしやすさ、簡潔性
- 受講者の進捗管理方法等
- 汎用性のあるポータル利用

上記のうち、学習のしやすさや受講者の進捗管理機能の追加などのいくつかの項目を反映するものとし、動画教材の作成を行った。作成した動画教材では、リテラシー教材の中で地層処分において基盤となる以下の3つを題材とし、各題材について約30分間の解説を行っている（図-6）。

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

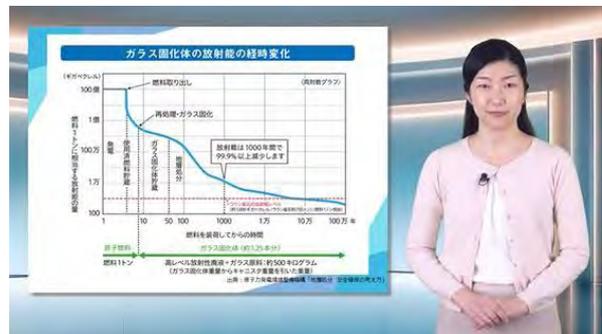


図-6 作成した動画教材の一場面

動画教材は、当センターが作成した解説用スライドを用いて、講師役がスライドの説明を行う形式のものとした。各章の最後に動画を視聴した人が知識を得られたかどうかを確認するための確認テストが受けられるようになっている。

今後の課題として、人材育成セミナーでのリテラシー育成教材や動画教材の活用方法の検討など、各教材それぞれの特性を活かした相乗効果等を生み出す使い方を考えていく必要がある。

- 1) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、令和5年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務 報告書、2024年

(技術情報調査部)

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) 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（2023年度版）」を作成した。

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。

2023年度は、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) 海外機関との情報交換

2023年度には、協力協定を締結しているドイツの連邦放射性廃棄物機関 (BGE) 及び BGE Technology 社との協定の更新時期を迎えたため、BGE Technology 社からの訪問時に、協定の署名

式を行うとともに、情報交換会議を開催した。

また、協定締結機関ではないが、カザフスタンのカザトンプロム社の代表団の訪問があり、我が国の放射性廃棄物処分の状況や原環センターの役割などについて情報提供を行った。

(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

2020年度に国際原子力機関・IAEAの原子力局と締結した核燃料サイクル諸量評価計算コード/NFCSS(Nuclear Fuel Cycle System Simulation)の活用と機能向上に関する実務協定 (Practical Arrangements) に基づき、地層処分場の熱設計手法とサイズ削減について情報交換を行い、評価計算方法などの知見を、IAEA 主催の第4世代原子炉の核燃料サイクルに関する専門家会議で紹介、議論した。またバックエンド領域の負荷計算とその評価法を IAEA 主催の核燃料サイクルシミュレーションウェビナーで講演し、意見交換を行った。これらの成果を基に、NFCSS を用いたクローズドサイクル (ガラス固化体の地層処分) とオープンサイクル (使用済燃料の直接処分) の地層処分場のサイズ評価について IAEA と意見交換を行い、合わせて今後の課題を確認した。

(4) OECD/NEA が事務局を担う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) が事務局を担う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への参加に係る協定が国内外の関係組織の手続きを経て2023年2月に発効した。具体的には、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の3つのタスク (研究大項目) を設定し各タスクのなかで各種の個別研究が展開されている。当センターは、主に工学技術開発の観点から上記の②と③に参画するとともに、合同タスク会合やワークショップをとおしてタスク間および関係組織間との情報交換や研究内容の共有を進めつつ、参加する関係組織とともに研究に取り組んだ。

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回原環センター講演会 「研究施設等廃棄物への取り組み」 仲田 久和 氏（日本原子力研究開発機構 バックエンド統括本部 埋設事業センター 埋設技術開発室 室長）	2023年 6月30日	一般社団法人 日本交通協会 （対面）及び オンライン開催
	第2回原環センター講演会 「地層処分事業における回収可能性が維持された状態とは？ ～技術的アプローチによる維持期間の定義方法について～」 小林 正人（地層処分工学技術研究開発部） 藤田 朝雄（地層処分工学技術研究開発部）	2023年 9月29日	原環センター （対面）及び オンライン開催
	第3回原環センター講演会 「TRU 廃棄物の地層処分におけるヨウ素 129 対策」 大和田 仁（地層処分バリアシステム研究開発部）	2023年10月27日	原環センター （対面）及び 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」 枋山 修 氏（公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問）	2023年 5月19日	京都アカデミア フォーラム in 丸の内
	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」 枋山 修 氏（公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問）	2023年 7月13日	京都アカデミア フォーラム in 丸の内
	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 応用化学科 教授）	2023年11月21日	京都アカデミア フォーラム in 丸の内
研究発表会	2023 年度原環センター研究発表会 1. 研究発表 「TRU 廃棄物の廃棄体パッケージの開発～製作性と閉じ込め性の課題への挑戦～」 藤井 直樹（地層処分バリアシステム研究開発部） 丸山 紀之（地層処分バリアシステム研究開発部） 2. 特別講演 「最終処分の現状と今後の取組について」 下堀 友数 氏（経済産業省 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 放射性廃棄物対策課長）	2023年12月8日	星陵会館ホール （対面）及び オンライン開催

2. 論文投稿、学会発表等

(1)論文

No.	題 目	原環センター著者	掲載誌等
1	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、桜木智史、 浜田涼	International Conference on Radioactive Waste Management: Solutions for a Sustainable Future IAEA-CN-294/193
2	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 -	浜田涼、桜木智史、 朝野英一	International Conference on Radioactive Waste Management: Solutions for a Sustainable Future IAEA-CN-294/204
3	Study on the fast reactor system characteristics in the transition period from Light Water Reactors to Fast Reactor	朝野英一	International Conference on Radioactive Waste Management: Solutions for a Sustainable Future IAEA-CN-294/205
4	Further immobilization of stabilized ALPS sediment phosphate waste with powder metallurgy hot isostatic pressing for Fukushima decommissioning	桜木智史、浜田涼、 針貝美樹、朝野英一	Proceedings of the 2023 30th International Conference on Nuclear Engineering ICONE30-1078
5	Tortuosity of Internal Pore Space in Various Structured Platelet Particles	八木翼	Transport in Porous Media, Volume 148, Published: 23 May 2023 p.535-557
6	Effect of ²⁴¹ Am buildup during spent fuel cooling on decay heat of vitrified high-level waste and post-closure safety assessment	桜木智史、浜田涼、 針貝美樹、朝野英一	MRS Advances, Volume 9, Issue 7, 2024 p.415-419
7	Impact on repository footprint of blending spent mixed oxide fuels with UO ₂ fuels during reprocessing	針貝美樹、桜木智史、 田中真悟、朝野英一	MRS Advances, Volume 9, Issue 7, 2024 p.387-390
8	Determination of Mo-93 inventory in irradiated BWR tie plate using triple quadrupole ICP-MS	田中真悟、植田浩義、 桜木智史	MRS Advances, Volume 9, Issue 7, 2024 p.479-482

(2)学会発表等

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
1	マイクロビーム XAFS を用いた福島第一原子力発電所由来廃棄物のハイブリッド固化体の分析	桜木智史、浜田涼、 針貝美樹、朝野英一	日本分析化学会 第 83 回分析化学討論会 2023/5/20～21
2	Further immobilization of stabilized ALPS sediment phosphate waste with composite waste form by powder metallurgy hot isostatic pressing for Fukushima decommissioning	桜木智史、浜田涼、 針貝美樹、朝野英一	第 30 回原子力工学国際会議 (ICONE30) 2023/5/21～26
3	粘土層の透水性に関する数値解析－非粘土粒子の影響を含む統一的な透水モデルの検討－	八木翼	2023 年度資源・素材学会北海道支部総会および春季講演会 2023/6/10
4	深部堆積軟岩を対象とした新たな応力測定法の開発	広中良和	第 58 回 地盤工学研究発表会 2023/7/11～13
5	In-situ X-ray CT measurement of density distribution and swelling behavior of the buffer material	林大介	The 17th International Symposium on Water-Rock Interaction and the 14th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry in Sendai 2023/8/18～22
6	Long-term glass alteration and clay formation due to reaction with a hyperalkaline groundwater equivalent to low-alkali cement leachate	藤井直樹	The 17th International Symposium on Water-Rock Interaction and the 14th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry in Sendai 2023/8/18～22
7	さまざまな粒子充填層中の空隙特性－粒子形状や巨視的構造が透水性に及ぼす影響－	八木翼	日本混相流学会 混相流シンポジウム 2023 2023/8/24～26
8	Development of Metal Matrix Waste form for Immobilization of Spent ALPS Adsorbents with Power Metallurgy Hot Isostatic Pressing	桜木智史、浜田涼、 針貝美樹、田中真悟、 朝野英一	第 7 回福島第一廃炉国際フォーラム 2023/8/27～28

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
9	Challenge of Novel Hybrid-waste-solidification of Mobile Nuclei Generated in Fukushima Nuclear Power Station and Establishment of Rational Disposal Concept and its Safety Assessment – Summary of the 3-year-project and toward the next step	桜木智史、針貝美樹、朝野英一	第7回福島第一廃炉国際フォーラム 2023/8/27～28
10	福島第一原子力発電所由来の難固定化核種のハイブリッド固化と安全性評価に関する研究(5) 各種放射線の照射挙動と短寿命 RI を用いた検討	桜木智史、針貝美樹、田中真悟、朝野英一	第12回環境放射能除染研究発表会 －除染・減容化・中間貯蔵など福島の環境再生・復興に向けて－ 2023/8/30～31
11	福島第一原子力発電所由来の難固定化核種のハイブリッド固化と安全性評価に関する研究(6) 固化体合成に関わる新展開	桜木智史、針貝美樹、田中真悟、朝野英一	第12回環境放射能除染研究発表会 －除染・減容化・中間貯蔵など福島の環境再生・復興に向けて－ 2023/8/30～31
12	福島第一原子力発電所由来の難固定化核種のハイブリッド固化と安全性評価に関する研究(7) 粉末冶金法による ALPS ヨウ素吸着材の固化	桜木智史、浜田涼、針貝美樹、田中真悟、朝野英一	第12回環境放射能除染研究発表会 －除染・減容化・中間貯蔵など福島の環境再生・復興に向けて－ 2023/8/30～31
13	福島第一原子力発電所由来の難固定化核種のハイブリッド固化と安全性評価に関する研究 (8) マトリクスの溶出特性を考慮したハイブリッド固化体の安全評価	針貝美樹、田中真悟、桜木智史、朝野英一	第12回環境放射能除染研究発表会 －除染・減容化・中間貯蔵など福島の環境再生・復興に向けて－ 2023/8/30～31
14	ムラタイト基シンロック固化体による放射性核種の超長期安定固化	桜木智史、針貝美樹、田中真悟、朝野英一	第12回環境放射能除染研究発表会 －除染・減容化・中間貯蔵など福島の環境再生・復興に向けて－ 2023/8/30～31
15	福島第一原子力発電所由来廃棄物のハイブリッド固化体の顕微 XAFS 分析	桜木智史、針貝美樹、田中真悟、朝野英一	第26回 XAFS 討論会 2023/9/4/～6
16	地層処分における照射済みエンドピースからの核種放出挙動評価 (4) トリプル四重極 ICP-MS を用いた Mo-93 インベントリ評価	田中真悟、植田浩義、桜木智史	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6～8

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
17	地層処分における照射済みエンドピースからの核種放出挙動評価 (5) 加速器質量分析法を用いた C-14 放出率の実験的評価	植田浩義、桜木智史	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6~8
18	地層処分における照射済みエンドピースからの核種放出挙動評価 (6) 照射済みエンドピースの核種分布解析	植田浩義、桜木智史	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6~8
19	TRU 廃棄物の廃棄体パッケージの開発 (5) 廃棄体パッケージ内充填材の設計方法の提案	坂本浩幸、丸山紀之、 藤井直樹、大和田仁	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6~8
20	TRU 廃棄物の廃棄体パッケージの開発 (6) 廃棄体パッケージ内充填材からの水素ガス発生量の評価	坂本浩幸、丸山紀之、 藤井直樹、大和田仁	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6~8
21	TRU 廃棄物処分における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 (1) TRU 廃棄体由来の発生ガス影響評価に係る研究の全体概要	八木翼、神徳敬、 藤井直樹、大和田仁	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6~8
22	TRU 廃棄物処分における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 (2) 小規模モックアップ試験結果の力学連成ガス移行評価モデルへの適用	八木翼、神徳敬、 藤井直樹、大和田仁	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6~8
23	TRU 廃棄物処分における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 (3) 実処分施設を想定したガス発生量導出およびガス移行を考慮した核種移行評価	神徳敬、八木翼、 藤井直樹、大和田仁	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6~8
24	地層処分環境における陰イオン核種の移行遅延に適した無機陰イオン吸着材の選定	大和田仁	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6~8
25	沿岸部の地層処分に於けるセメント系材料の力学的特性に関する研究 沿岸部で想定される地下水成分との相互作用によるセメント系材料の力学的特性変化の整理	坂本浩幸、丸山紀之、 林大介、大和田仁	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6~8
26	金属マトリクスによる放射性ヨウ素固化技術の開発	桜木智史、針貝美樹、 浜田涼、田中真悟、 朝野英一	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6~8
27	中深度処分に係る規制基準の動向を背景とした設計オプションに関するスタディ - (その 1) 検討の目的及び全体概要 -	広中良和	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6~8

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
28	中深度処分に係る規制基準の動向を背景とした設計オプションに関するスタディ ー（その2）予備的線量評価ー	広中良和	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6～8
29	中深度処分に係る規制基準の動向を背景とした設計オプションに関するスタディ ー（その3）設計オプションの抽出及び 絞り込みの考え方の整理ー	広中良和	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6～8
30	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 （11）プロジェクト進捗と、ハイブリッ ド固化マトリクス材料選定について	桜木智史、朝野英一、 針貝美樹	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6～8
31	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 （12）ハイブリッド固化体の合成および 包括的評価	桜木智史、針貝美樹、 田中真悟、朝野英一	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6～8
32	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 （13）ハイブリッド固化体の溶出特性を 考慮した安全評価	針貝美樹、田中真悟、 桜木智史、朝野英一	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6～8
33	キャリアチェンジの難しさと可能性	針貝美樹	日本原子力学会 2023 年秋の大会 2023/9/6～8
34	ベントナイト混合土の遮水性発現メカニ ズムに関する検討（その1） 締固め時の乾燥密度と飽和度が飽和透水 係数に及ぼす影響	広中良和	土木学会 令和5年度全国大会 第78回年次学術講演会 2023/9/11～15
35	ベントナイト混合土の遮水性発現メカニ ズムに関する検討（その2） 実体顕微鏡画像と画像解析による定量的 評価	広中良和	土木学会 令和5年度全国大会 第78回年次学術講演会 2023/9/11～15
36	ベントナイト混合土の遮水性発現メカニ ズムに関する検討（その3） ベントナイト混合試験と一面せん断試験	広中良和	土木学会 令和5年度全国大会 第78回年次学術講演会 2023/9/11～15
37	ベントナイト混合土の遮水性発現メカニ ズムに関する検討（その4） 中性子イメージングによるベントナイト 通水特性の可視化	広中良和	土木学会 令和5年度全国大会 第78回年次学術講演会 2023/9/11～15

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
38	ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムに関する検討（その5） 中性子イメージングによる締固め～透水関係の可視化	広中良和	土木学会 令和5年度全国大会 第78回年次学術講演会 2023/9/11～15
39	水頭差と初期流量が緩衝材の流出挙動に及ぼす影響	林大介、菊池広人、 宇田俊秋	土木学会 令和5年度全国大会 第78回年次学術講演会 2023/9/11～15
40	スクリーフィーダーによる地層処分施設の坑道埋め戻しにおける材料分離の抑制方法の検討	阿部孝行、 川久保政洋、神徳敬	土木学会 令和5年度全国大会 第78回年次学術講演会 2023/9/11～15
41	ベントナイト混合土の鉛直および水平方向への二方向膨潤変形特性の検討	川久保政洋、 阿部孝行、菊池広人	土木学会 令和5年度全国大会 第78回年次学術講演会 2023/9/11～15
42	ベントナイト層の透水性に関する数値解析－砂層，粘土層，混合層を含む統一的な透水モデルの検討－	八木翼	2023年度資源・素材関係学協会合同秋季大会 2023/9/12～14
43	地層処分を考慮した使用済 MOX 燃料由来のガラス固化体の MA 分離と廃棄物充填率に関する検討	桜木智史、浜田涼、 針貝美樹、田中真悟、 朝野英一	第5回放射性廃棄物固化体 討論会 2023/10/6
44	Research on advanced nuclear system and its case study by NFCSS for DGR size reduction	朝野英一	IAEA Webinar/Nuclear Back End Webinar Series 2023/10/18
45	Optimization study of high-level waste repository thermal design by response surface methodology on ANSYS Workbench software	針貝美樹、朝野英一、 桜木智史	16th Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation(16IEMPT) 2023/10/24～27
46	Determination of Mo-93 inventory in irradiated BWR tie plate using triple quadrupole ICP-MS	田中真悟、植田浩義、 桜木智史	47th Scientific Basis for Nuclear Waste Management (SBNWM2023) 2023/11/6～10
47	Effect of ²⁴¹ Am buildup during spent fuel cooling on decay heat of vitrified waste and post-closure safety assessment	桜木智史、浜田涼、 針貝美樹、朝野英一	47th Scientific Basis for Nuclear Waste Management (SBNWM2023) 2023/11/6～10

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
48	Study on the mixed oxide high-level-waste glass: Optimization of waste loading and impact on repository footprint by blending spent UO ₂ fuels	針貝美樹、桜木智史、 浜田涼、朝野英一	47th Scientific Basis for Nuclear Waste Management (SBNWM2023) 2023/11/6～10
49	フィリピンのアルカリ環境下での相互作用に関するナチュラルアナログールソン島サイリー鉱山でのベントナイトの変質－	藤井直樹	NUMO 主催 ナチュラルアナログワーク ショップ 2023/11/28～11/29
50	ガラスの長期安定性に関するナチュラルアナログーパラワン島ナラ地区の高アルカリ環境における火山ガラスの変質と溶解速度－	藤井直樹	NUMO 主催 ナチュラルアナログワーク ショップ 2023/11/28～11/29
51	SM570 溶接材の変形抵抗のひずみ速度依存性	丸山紀之	日本機械学会関西学生会 2023 年度学生員卒業研究発 表講演会 2024/3/14
52	地層処分における照射済みエンドピースからの核種放出挙動評価 (7) 加速器質量分析法を用いた Cl-36 インベントリ評価	田中真悟、桜木智史	日本原子力学会 2024 年春の年会 2024/3/26～3/28
53	地層処分における照射済みエンドピースからの核種放出挙動評価 (8) ¹⁴ C 溶出モデルと安全評価	桜木智史、植田浩義、 田中真悟	日本原子力学会 2024 年春の年会 2024/3/26～3/28

(3)解説・講演等

No.	題 目	著 者	発表先
1	地層処分に関する人材育成プログラムの実施・作成について	徳島秀幸	原子力学会バックエンド部会 第39回バックエンド夏期セミナー 2023年8月
2	フランスの地層処分事業 －検討開始から処分場設置許可申請に至る30年以上の取り組み－	佐原 聡	2023年度 放射性廃棄物処分に関する技術動向調査委員会 2024年2月
3	プロジェクト紹介 沿岸部処分システム 評価確証技術開発	林大介	岩の力学連合会 岩の力学ニュース 2024年2月
4	地層処分事業等の国際的な動向	稲垣裕亮	原子力年鑑 2024 P171-P178 2023年10月

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№146	中深度処分の規制基準策定の経緯と考え方	2023年7月
2	原環センタートピックス№147	研究施設等廃棄物への取り組み	2023年10月
3	原環センタートピックス№148	地層処分事業における回収可能性が維持された状態とは？～技術的アプローチによる維持期間の定義方法について～	2024年1月
4	原環センター2022年度 技術年報		2023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	2023/4/5	《フィンランド》ロヴィーサ原子力発電所において低中レベル放射性廃棄物処分場の操業許可条件の変更を承認
2	2023/4/7	《スウェーデン》SKB 社が短寿命低中レベル放射性廃棄物処分場の拡張部分の建設認可を申請
3	2023/4/17	《フランス》ANDRA が極低レベル放射性廃棄物処分場の容量拡大の許可を申請
4	2023/4/25	追記)《ベルギー》高レベル及び長寿命の放射性廃棄物の地層処分方針を法制化 [2022年12月6日既報]
5	2023/4/27	《米国》エネルギー省 (DOE) が高レベル放射性廃棄物の中間貯蔵施設の同意に基づくサイト選定プロセスを更新
6	2023/4/28	《日本》特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針の改定
7	2023/5/10	追記)《米国》エネルギー省 (DOE) が高レベル放射性廃棄物の中間貯蔵施設の同意に基づくサイト選定プロセスを更新 [2023年4月27日既報]
8	2023/5/29	追記)《スイス》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- [2021年12月24日既報]
9	2023/6/6	《ベルギー》短寿命・低中レベル放射性廃棄物処分場の建設・操業許可が発給
10	2023/6/15	《米国》エネルギー省 (DOE) が使用済燃料の中間貯蔵施設に関する同意に基づくサイト選定プロセスに係る資金提供先を決定
11	2023/6/15	追記)《ドイツ》コンラッド処分場の操業開始の遅延を公表 -2027年前半の操業開始見込み- [2018年3月12日既報]
12	2023/6/27	追記)《フランス》放射性廃棄物管理機関 (ANDRA) が地層処分場 (Cigéo) の設置許可申請書を政府に提出 [2023年1月18日既報]
13	2023/7/11	《英国》ニュークリアウエイストサービス (NWS) が4つの調査エリアのサイト評価に着手
14	2023/7/21	《カナダ》核燃料廃棄物管理機関 (NWMO) による放射性廃棄物の長期管理に関する包括的戦略の取りまとめ
15	2023/8/31	《米国》廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) の有害廃棄物処分に係る許可更新案が公表
16	2023/10/6	《英国》ニュークリアウエイストサービス (NWS) がアラデール調査エリアにおけるサイト選定プロセスの終了を決定
17	2023/10/10	追記)《カナダ》核燃料廃棄物管理機関 (NWMO) による放射性廃棄物の長期管理に関する包括的戦略の取りまとめ [2023年7月21日既報]
18	2023/11/10	追記)《米国》廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) の有害廃棄物処分に係る許可更新案が公表 [2023年8月31日既報]
19	2023/11/24	《フランス》国家評価委員会 (CNE) が第17回評価報告書を公表
20	2023/12/26	《フランス》放射性廃棄物管理機関 (ANDRA) が放射性物質及び放射性廃棄物の国家インベントリレポートの2023年版を公表

No	掲載日	タイトル
21	2024/1/19	《スペイン》第7次総合放射性廃棄物計画を策定－自国での地層処分場設置に向けたロードマップを提示
22	2024/1/22	《カナダ》カナダ原子力安全委員会（CNSC）がチョークリバー研究所における浅地中処分施設（NSDF）の建設を許可
23	2024/1/23	追記)《フィンランド》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〔2022年1月6日既報〕
24	2024/1/30	《米国》廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）で地下処分施設の第11パネルの掘削を開始
25	2024/1/31	《英国》イーストライディングオブヨークシャー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
26	2024/2/19	《スイス》放射性廃棄物処分に関する意識調査：6割を超える人々が地層処分場受け入れに前向きな姿勢
27	2024/2/22	追記)《英国》イーストライディングオブヨークシャー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〔2024年1月31日既報〕
28	2024/3/25	《米国》廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）の処分システムへの代替処分パネルの追加をEPAが評価を実施

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	地層処分施設施工・操業技術確証試験	地層処分施設施工・操業技術確証試験委員会	地層処分における埋戻し材の設計・施工技術の開発、詳細設計・施工技術オプションの開発、廃棄体回収技術の開発、処分場の建設・操業技術の高度化に関する審議
	ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発	ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発委員会	地層処分場の閉鎖後長期の安全性をより現実的に評価し、地質環境条件や設計オプション間の性能の比較を可能とするため、シナリオ構築に必要な処分場閉鎖後における地層処分システムの状態理解を目的に実施する、研究開発及びその成果に関する審議
	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
	核種移行総合評価技術開発	核種移行総合評価技術開発委員会	核種移行総合評価技術開発に関する研究計画、実施方法、結果の評価等の審議
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 2023年度 技術年報

2024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・転載を希望する場合は、
企画部（kikaku@rwmc.or.jp）までお問い合わせください。