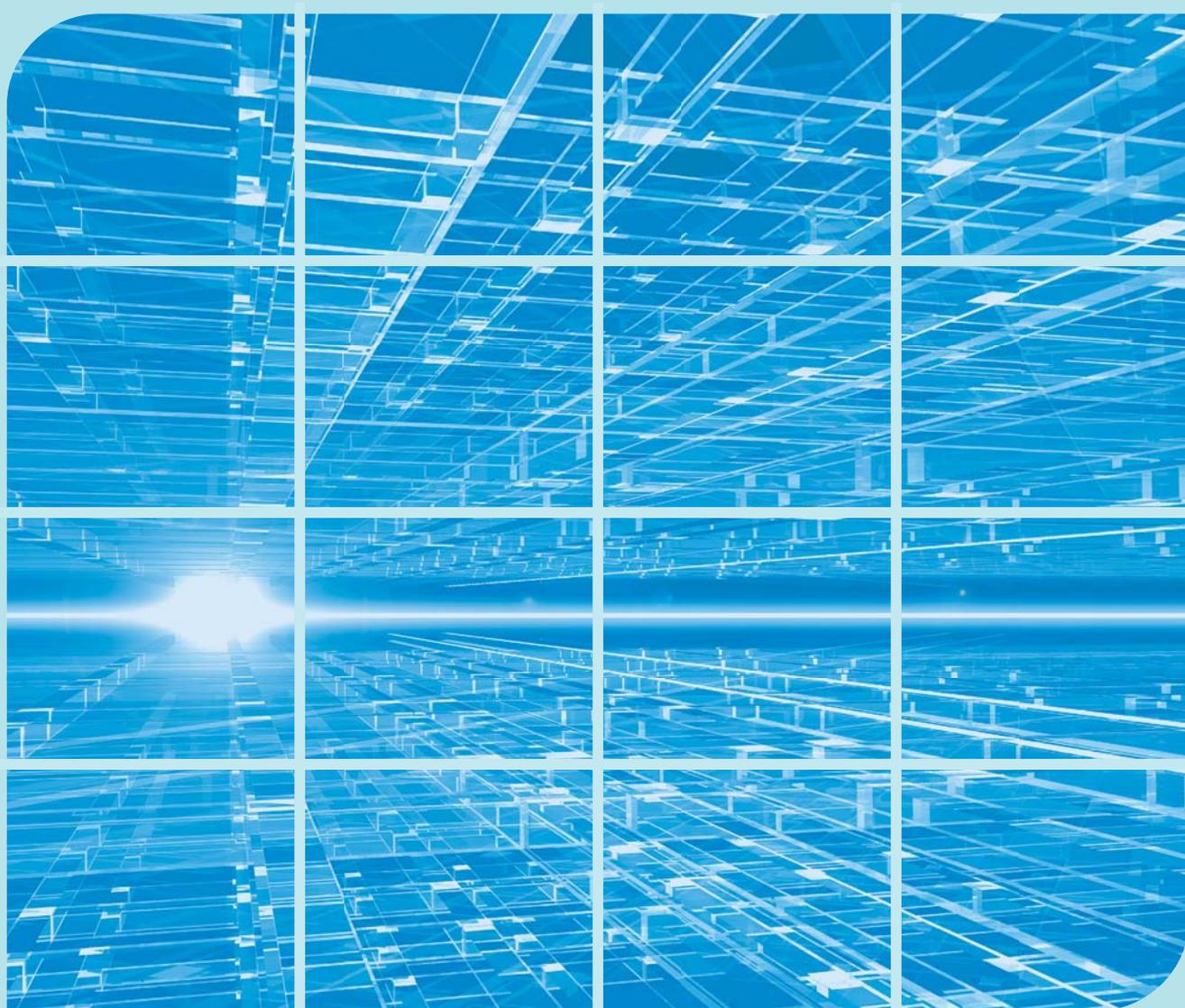


RWMC

原環センター
2024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。

具体的な調査研究活動としては、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注力するとともに、海外の研究機関や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調査・分析し、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。

更に、近年では、放射性廃棄物の処理・処分分野における人材育成プログラムの提供、福島第一原子力発電所の廃炉に向けた技術支援、クリアランス制度の推進に資する海外動向の調査などに取り組んでいます。

このように、原子力技術分野に関わる一員としての当センターの立場や役割を踏まえ、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。

本技術年報では、2024年度に取り組んだ調査研究等の内容を抜粋・要約してご紹介するとともに、国際交流や国際会議・学会等での発表実績など、当センターの一年間の活動状況を取りまとめました。本技術年報を通じて、当センターの活動にご理解を頂くとともに、調査研究成果の直接的なご参照のみならず、更に詳細な成果や技術情報に関するお問い合わせ等の足掛かりとなれば幸いです。

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.....	12
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.....	13
1. 地層処分施設施工・操業技術確証試験.....	13
2. ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発.....	23
3. 沿岸部地質環境調査・処分システム評価統合化技術開発.....	36
4. 核種移行総合評価技術開発.....	40
5. 高線量廃棄物の保管管理方策の検討（令和6年度）業務.....	42
6. その他の地層処分に関する調査研究.....	43
III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	45
1. 放射性廃棄物海外総合情報調査.....	45
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	47
2-1 事業の全体概要	47
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 ..	49
2-3 人材育成プログラムの実施・作成.....	56
3. その他の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	60
IV. 国際交流	61
V. 資料	63
1. 講演会、セミナー、研究発表会.....	63
2. 論文投稿、学会発表等	64
3. 刊行物	70
4. ホームページへの海外最新情報の掲載.....	71
5. 委員会一覧	73

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い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。概念図を図-1に示す。）が検討されてきている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70m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を設計することなどが求められている^{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、初期の設置深度の地圧を、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、地下環境を把握するための技術整備が必要となる。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。

本事業では、これらの中深度処分固有の課題を踏まえ、2020年度からの5ヵ年で、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する、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った。それとともに、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った。

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た。5ヵ年事業の最終年度に当たる2024年度は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和6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。

- 大深度三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

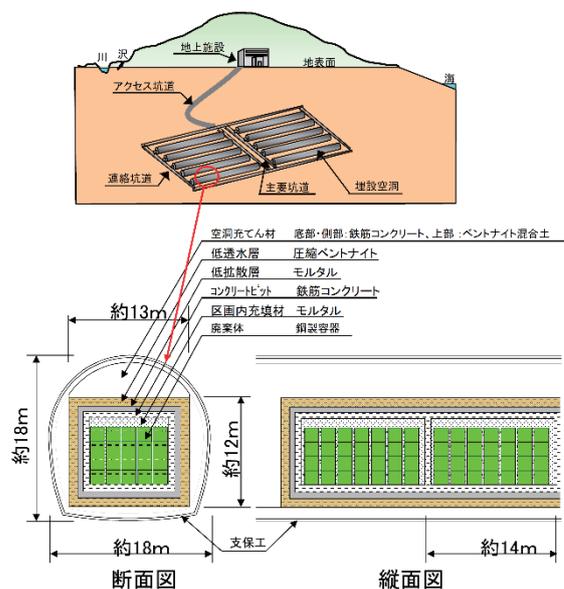


図-1 中深度処分の概念図¹⁾

◇2020年度～2024年度の成果^{4)～8)}

(1) 大深度三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。また、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。したがって、初期地圧の情報は中深度処分施設を最適に設計するうえで不可欠であり、特に施設設置深度での三次元の初期地圧は、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、深度200m程度までの鉛直孔を用いて三次元初期地圧を測定することを目的とし、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）を開発した。開発は、参照データ

の取得及び試験装置の概念設計（2020年度）、基本設計（2021年度）、詳細設計、装置設計・製作及び浅深度現場検証試験（2022年度）、装置改良及び現場検証試験（2023年度）、さらに装置改良、室内検証試験及び大深度現場検証試験（2024年度）というステップで進めた。

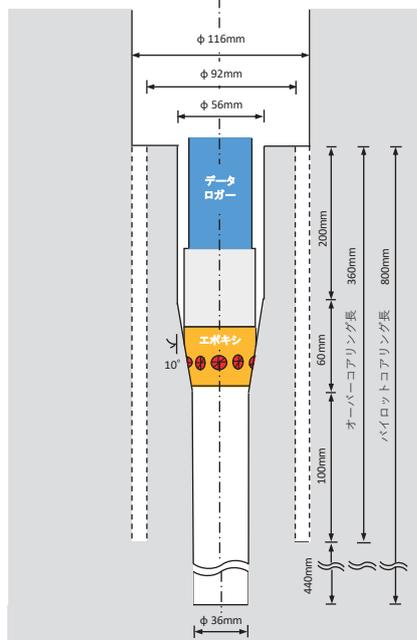


図-2 円錐孔壁ひずみ法の概要図

2022年度及び2023年度に実施した現場検証試験結果を踏まえて装置の改良等を重ね、2024年度は大深度現場検証試験を行った。

大深度現場検証試験は、青森県六ヶ所村のフィールドにて、試験深度95m～98mの区間で砂質軽石凝灰岩層を対象に計3回、初期地圧測定に係る一連の作業性の確認及び測定したひずみと算出した応力の妥当性確認を目的に実施した。

大深度現場検証試験における現場調査数量を表-1に示す。

大深度現場検証試験の主な手順は以下のとおりである（図-3参照）。

- ①孔径116mmでオールコアボーリングを実施
- ②センタリングガイドケーシング挿入、φ56mm孔掘削
- ③パイロット孔底に円錐孔壁（孔径56mm～36mm）を掘削
- ④孔内洗浄
- ⑤孔内カメラによる孔内観察
- ⑥～⑧ひずみ測定器の円錐孔壁への接着
- ⑨孔径116mmでオーバーコリングを実施
- ⑩掘削したコアを観察し、損傷程度を確認したうえで、コアを用いた感度試験を実施（応力-ひずみデータの取得）

深度を変えて、上記①～⑩を繰り返し、感度試験データに基づく応力解析による初期地圧を算出した。

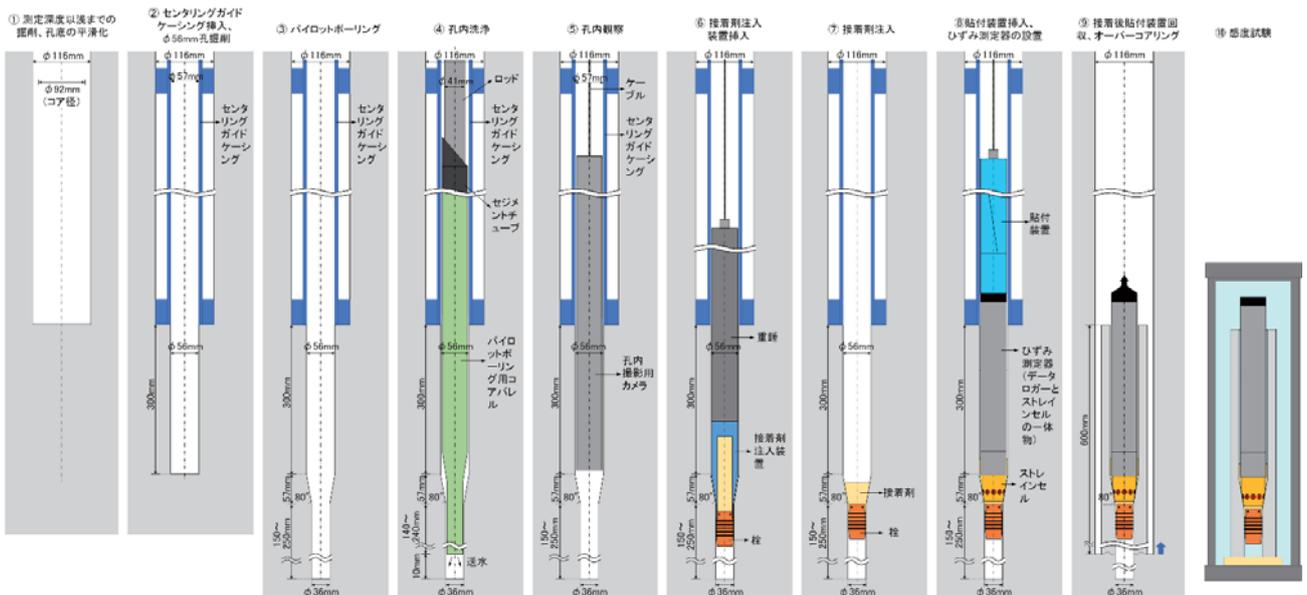


図-3 円錐孔壁ひずみ法の試験手順

表-1 大深度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	98.75m×1孔
コア観察、柱状図	98.75m×1孔
本応力測定法の検証試験	3箇所

2024年度に実施した大深度現場検証試験結果の概要を表-2に示す。

1深度目は、孔径36mmを掘削・洗浄後にコアが回収できなかった。これはコアが痩せたためであった。2深度目以降は、掘削後に洗浄を行わずコアチューブを回収した結果、コアを回収でき、オーバーコアリング前に試験孔壁の割れ目の有無を推定できた。その後、再度コアチューブ

を挿入し孔内洗浄した。3深度目は、ストレインセルを設置する前にデータ収録が止まっていたため、オーバーコアリング・感度試験とも問題なく実施できたが応力評価不能となった。3深度目は、ストレインセルの接着状態が不十分だった。

オーバーコアリングに伴う解放ひずみデータの収録ができた1深度目と2深度目に対して、初期応力評価を実施した。初期応力評価は、感度試験条件、採用するひずみデータ(全8点のデータからの選択)の条件、感度試験から得られる見掛けの弾性定数(Emam)の扱い及びポアソン比の設定の組み合わせでケーススタディとした。初期応力評価結果を表-3、表-4に示す。

接着状態の良い2深度目の有意なゲージを対象として、弾力的な変化を示す水圧载荷条件で、一

表-2 大深度現場検証試験結果の概要

	円錐孔壁部の深度	実施期間	ひずみ測定器	データ収録	試験孔壁整形	試験孔コア回収	接着	オーバーコアリング	感度試験	応力評価
1深度目	96.48m~96.54m	9/10~13	1号機	○	○	△	○	○	○	可能
2深度目	97.40m~97.46m	9/17~20	1号機	○	○	○	○	○	○	可能
3深度目	98.28m~98.34m	9/24~27	2号機	×	○	○	△	-	-	不能

表-3 大深度現場検証試験結果(初期応力評価、1深度目)

	応力解析の解析条件								応力評価結果			
	感度試験		採用するひずみデータ		Emamの取り扱い		ポアソン比の設定		σ_{SH}	σ_{sh}	σ_z	側圧比
	水圧载荷	排水载荷	4~8番	5~7番	3方向独立	θ で代表	0.3	0.4	(MPa)	(MPa)	(MPa)	
1-1	○		○		○		○		4.73	3.31	2.35	2.01
1-2	○		○		○			○	3.49	1.82	2.47	1.41
1-3	○		○			○		○	8.37	4.55	4.43	1.89
1-4	○		○			○		○	6.63	4.01	4.16	1.59
1-5	○			○	○			○	7.40	4.28	3.30	2.24
1-6	○			○	○			○	6.57	3.11	4.49	1.46
1-7		○	○		○			○	6.98	3.30	2.65	2.63
1-8		○	○		○			○	7.85	3.74	4.05	1.93
1-9		○	○			○		○	7.18	3.58	2.95	2.43
1-10		○	○			○		○	7.79	3.92	4.08	1.91
1-11		○		○	○			○	8.41	3.42	2.71	3.10
1-12		○		○	○			○	9.33	3.75	4.33	2.15
【参照データ】2020年度の水圧破碎試験結果(本試験と同岩種、ほぼ同深度)									5.79	3.89	3.76	1.54

表-4 大深度現場検証試験結果(初期応力評価、2深度目)

	応力解析の解析条件								応力評価結果			
	感度試験			採用するひずみデータ	Emamの取り扱い		ポアソン比の設定		σ_{SH}	σ_{sh}	σ_z	側圧比
	水圧载荷	排水载荷	周圧载荷	1、5~8番	3方向独立	θ で代表	0.3	0.4	(MPa)	(MPa)	(MPa)	
2-1	○			○	○			○	5.51	3.01	4.50	1.22
2-2	○			○	○			○	4.80	2.60	2.84	1.69
2-3		○		○	○			○	1.80	1.27	2.51	0.72
2-4		○		○	○			○	2.62	1.58	3.55	0.74
2-5			○	○	○			○	2.09	1.79	1.17	1.79
2-6			○	○	○			○	2.03	1.78	1.02	1.99
【参照データ】2020年度の水圧破碎試験結果(本試験と同岩種、ほぼ同深度)									5.79	3.89	3.76	1.54

軸繰り返し試験で求めたポアソン比 0.3 を用いて応力評価したケース 2-1 が、実施した応力解析結果の中で最も妥当と考えられる。また、解析条件の設定方法を検討することで、評価結果の信頼性の向上が期待できると考えられる。

本開発では、円錐孔壁ひずみ法の理論測定精度の検証を行い、円錐孔壁ひずみ法は円錐孔底ひずみ法より高い理論測定精度を有することを確認した。さらに、測定結果の信頼性及び測定歩留まりの向上を目的として、ひずみの測点ごとにヤング率の校正を可能にする周圧載荷感度試験を考案した。

また、装置の改良、室内検証試験、現場検証試験を重ね、最終年度に新たに開発した円錐孔壁ひずみ法の大深度での検証試験を実施した。開発した手法により一連の測定が実施できることを確認した。湧水がある状態でもストレインセルの接着には成功し解放ひずみのデータも取得できた。

現場検証試験は、3回の測定のうち1回の測定において、既往の別手法（水圧破碎法）による測定結果に近い応力解析結果が得られた。

以上の検討により、円錐孔壁ひずみ法の現場の測定から応力解析までの一連の手順が実施できるようになった。現場環境下での測定では、接着等の影響によるオーバーコアリング及び感度試験時のデータ品質の低下が発生している可能性がある。接着方法や応力評価手法を改善することで、データ品質の向上が可能と考えられる。

(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下記の①から④の計4台の地震計を設置し、地震動を観測した。①から③の地震計の設置位置を図-4に示す。

- 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上
- ④地表面（①のほぼ直上）

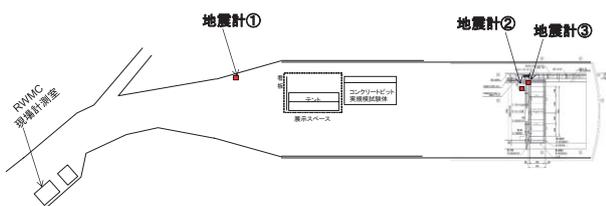


図-4 地下の地震計（①、②、③）の設置位置平面図

2024年度は、トリガ値の1Gal を超えて記録された表-5に示す12件の地震動データを取得した。観測された加速度の最大値は表-6に示すとおりである。なお、水平の試験空洞軸方向を X、同直角方向を Y、鉛直方向を Z とした。

表-5 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	2024年3月3日	青森県東方沖	56	4.8	震度1
2	2024年4月2日	岩手県沿岸北部	71	6	震度3
3	2024年4月4日	福島県沖	44	6.3	震度1
4	2024年8月10日	オホーツク海南部	447	6.7	震度2
5	2024年9月26日	釧路沖	59	5.7	震度1
6	2024年10月18日	岩手県沖	40	5.4	震度2
7	2024年11月16日	陸奥湾	8	4.6	震度2
8	2024年11月20日	陸奥湾	10	5.1	震度3
9	2024年11月21日	陸奥湾	9	4.1	震度1
10	2024年11月24日	岩手県沖	39	5	震度1
11	2025年1月16日	青森県東方沖	53	4.8	震度2
12	2025年2月10日	苫小牧沖	90	5	震度2

表-6 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	2024年3月3日	1.8	2.3	2.6	30.1
		2.4	2.9	3.3	28.4
		2.0	2.1	2.2	10.1
2	2024年4月2日	23.1	22.2	22.7	141.0
		19.2	21.0	24.6	103.2
		14.4	16.9	17.3	54.1
3	2024年4月4日	1.1	1.1	1.1	3.6
		1.6	1.1	1.1	3.3
		1.0	0.9	0.8	1.8
4	2024年8月10日	1.3	1.5	1.5	5.3
		2.1	1.9	2.0	5.7
		1.2	1.2	1.1	2.5
5	2024年9月26日	1.1	1.0	1.0	4.1
		1.3	0.9	1.0	5.1
		0.7	0.8	0.8	2.8
6	2024年10月18日	1.5	2.0	2.1	10.7
		2.6	1.9	2.0	10.5
		1.5	1.3	1.3	4.4
7	2024年11月16日	17.8	16.5	17.4	70.8
		16.1	12.6	13.7	57.0
		10.7	9.7	11.3	62.3
8	2024年11月20日	17.5	12.9	12.8	123.5
		22.5	17.3	17.9	95.4
		15.2	15.2	17.2	66.9
9	2024年11月21日	2.8	2.6	3.1	12.4
		3.0	2.3	2.5	17.2
		3.3	2.8	3.2	9.9
10	2024年11月24日	1.3	1.4	1.5	7.9
		1.5	1.5	1.6	8.8
		2.4	2.4	2.4	6.1
11	2025年1月16日	1.9	1.6	1.5	9.1
		2.4	2.9	3.1	15.4
		1.8	1.5	1.6	4.2
12	2025年2月10日	1.6	1.5	1.8	8.9
		1.5	1.5	1.7	10.2
		1.3	1.8	1.8	4.2

2024年度の取得データのうち、No.7～No.9の3件は内湾である陸奥湾を震源地とする地震で、5カ年の研究期間で初めてであり、震源地のタイプを内湾型とした。内湾型の震源地の深さ位置は陸プレートの内部にあり、内陸型と同じである。内湾型における地表と地下の最大加速度の比較に関して、地震計④と地震計③の比率で海溝型及び内陸型と比較して表-7に示す。内湾型は、Z軸方向の最大加速度の比率が海溝型及び内陸型と比べて大きいことが特徴として認められた。

表-7 データ取得した地震の諸元

震源地のタイプ	地震動の最大加速度の地震計④/地震計③の比率 (震源地のタイプごとの平均)		
	X方向	Y方向	Z方向
海溝型 No. 1, No. 3～No. 6 No. 10～No. 12	6.2	5.8	3.4
内陸型 No. 2	7.3	5.5	4.7
内湾型 No. 7～No. 9	6.7	7.3	8.4

(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、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。その上で、評価の試行を実施し、評価を進める際の課題を抽出した。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。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なぜ妥当なのか、それを説明する場合にはどのような論理で説明するかという視点から、設計プロセスを検討した。2023年度は、絞り込み過程の具体化を図った上で、不確実性や頑健性の絞り込みとしての評価指標の適用性について検討した。最終年度となる2024年度は、それまでの成果を踏まえて見直した設計プロセスフローを提案し、設計プロセスを実施するための具体的な手順の一例を示すことを目的に、そのフローに基づき一気通貫で概念検討をした。

規制基準では複数の設計オプションを比較し、検討結果をその過程（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^{2),9)}。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。過年度に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。

規制基準では、天然バリアのオプション及び人工バリアのオプションを適切に組み合わせた複数の処分システムの中から、より良い処分システムを決定することを要求している²⁾。事業の段階では、事業者が特定した敷地で、地質調査に基づき、埋設地の位置を選定することになるが、現状では事業者も決まっていない状況であることに鑑み、本検討では、天然バリアのオプションは、仮想サイトにおいて深度の候補が二つ（深度100m, 150m）あるとして事例検討を行うこととした。また、廃棄体は電事連の仕様¹⁾を標準とし、廃棄体総数は4万個とした。処分概念については、

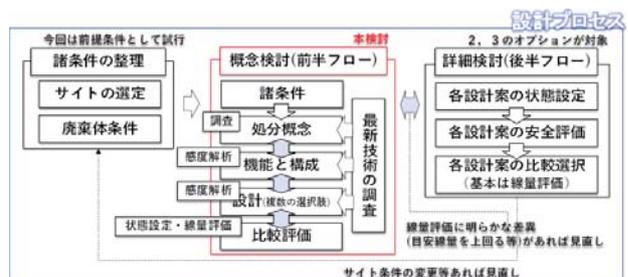


図-5 提案した設計プロセスのフロー及び本検討の位置づけ

電事連より示された設計概念（トンネル内に廃棄体を集積配置する処分概念¹⁾）を事例検討の対象とした。

この前提条件の下で、まず、トンネル仕様の検討を行った。想定する岩盤条件に対して掘削可能なトンネルの最大掘削径を簡易手法で選定し、二つの深度の候補（深度100m、150m）に対して、掘削径をそれぞれ18mと15mに設定した。

人工バリアのオプションについては、様々な感度解析を行い、各パラメータ（低拡散層の部材厚、低透水層の部材厚、低透水層の透水係数、横断面当たりの廃棄体定置数）の核種移行量への感度を基に、効率的に核種移行抑制機能を発揮できるバリア構成を策定した。図-6に線量評価における解析モデルの概念図を示す。なお、後述する設計オプションの比較評価における長期安全性の評価でも、同じモデルを採用した。

また、人工バリアの部材厚の設定では、施工実現性の観点から、最小部材厚を設定することも考慮した。

このようにして策定した表-8に示す設計オプションに対して、長期安全性（人工バリア出口、天然バリア出口の核種移行量）と事業成理性（施工数量、それに基づき算出した建設費）を指標として比較評価を行った。評価結果を表-及び表-に示す。各指標は、ベースオプション（No. 1）を1.0

として、それに対する比率で表示している。比較評価結果を踏まえ、様々な観点から総合的に検討され、最終的な設計は選定される。本検討では、比較評価の評価指標として長期安全性と事業成理性を設定し、複数の観点で設計オプションの絞り込みを試行した。絞り込み結果は表-11に示すとおり、各評価指標の組合せによって、異なる設計オプションが絞り込まれることを確認した。処分概念の設定について、本検討ではトンネル型としたが、今回提示した一連の考え方は処分概念にかかわらず適用可能と考えられる。

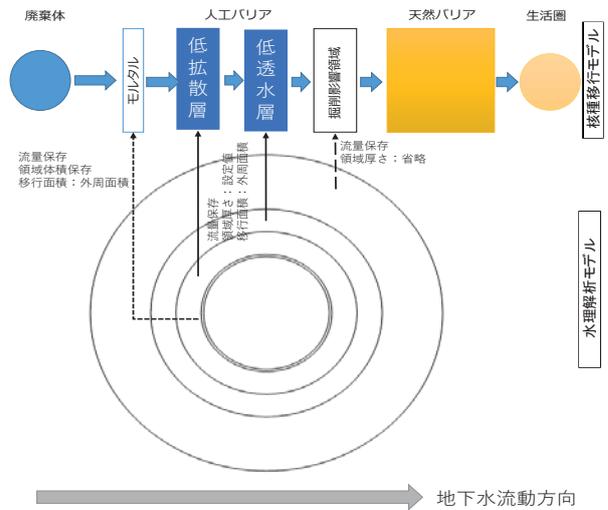


図-6 線量評価における解析モデルの概念図

表-8 設計オプションの仕様

No.	設定深度 (m)	坑道径 (m)	低拡散層部材厚 (m)		低透水層部材厚 (m)		低透水層透水係数 (m/s)	廃棄体定置数 (体/断面)	変更点
			底部	側部	上部	側部			
1	100	18	0.6	0.6	1.0	1.0	3.0E-13	20	ベースケース
2			0.8	0.8	1.0	1.0	3.0E-13	20	低拡散層部材厚を最大
3			1.1	1.1	0.7	0.7	3.0E-13	20	低拡散層部材厚を増加、低透水層部材厚を最小
4			1.2	1.2	1.0	1.0	3.0E-13	16	廃棄体定置数を減少、低拡散層部材厚を最大
5			1.5	1.5	0.7	0.7	3.0E-13	16	廃棄体定置数を減少、低拡散層部材厚を増加、低透水層部材厚を最小
6			1.7	1.7	1.0	1.0	3.0E-13	12	廃棄体定置数を減少、低拡散層部材厚を最大
7			2.0	2.0	0.7	0.7	3.0E-13	12	廃棄体定置数を減少、低拡散層部材厚を増加、低透水層部材厚を最小
8			0.8	0.8	1.0	1.0	3.0E-11	20	低拡散層部材厚を最大、低透水層の透水係数を増加(100倍)
9			0.8	0.8	1.0	1.0	1.0E-10	20	低拡散層部材厚を最大、低透水層の透水係数を増加(L2覆土相当)
10			0.2	0.2	0.3	0.7	3.0E-13	30	廃棄体定置数を増加、各部材厚を最小
11			0.2	0.2	0.3	0.7	3.0E-11	30	廃棄体定置数を増加、各部材厚を最小、低透水層の透水係数を増加(100倍)
12			0.2	0.2	0.3	0.7	1.0E-10	30	廃棄体定置数を増加、各部材厚を最小、低透水層の透水係数を増加(L2覆土相当)
13	150	15	0.6	0.6	0.9	0.9	3.0E-13	12	坑道径・廃棄体定置数を変更、低透水層部材厚を減少
14			0.8	0.8	0.7	0.7	3.0E-13	12	坑道径・廃棄体定置数を変更、低拡散層部材厚を増加、低透水層部材厚を減少
15			0.2	0.2	0.3	0.7	3.0E-13	20	坑道径・廃棄体定置数を変更、各部材厚を最小
16			0.2	0.2	0.3	0.7	3.0E-11	20	坑道径・廃棄体定置数を変更、各部材厚を最小、低透水層の透水係数を増加(100倍)
17			0.2	0.2	0.3	0.7	1.0E-10	20	坑道径・廃棄体定置数を変更、各部材厚を最小、低透水層の透水係数を増加(L2覆土相当)

□ : ベースケースに対して安全性を向上させる方向の設計オプション
 □ : ベースケースに対して合理化を図る方向の設計オプション

表-9 設計オプションの比較評価結果（安全性を向上させる方向のシリーズ）

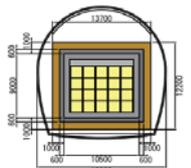
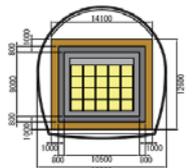
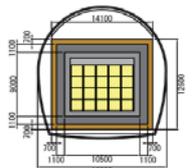
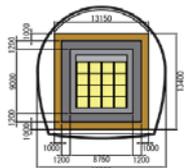
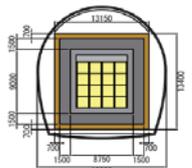
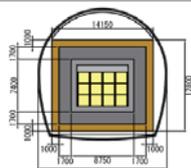
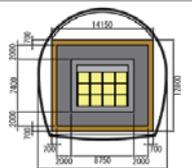
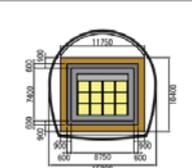
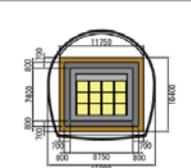
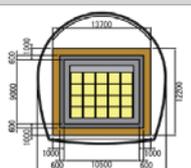
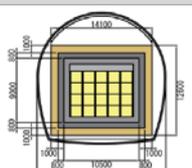
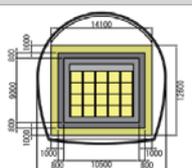
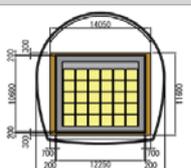
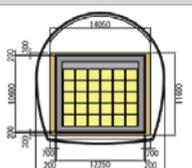
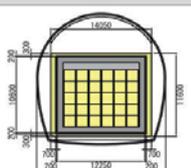
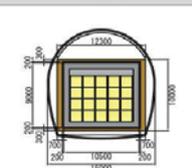
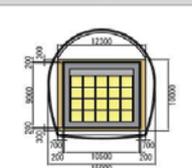
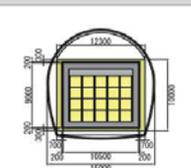
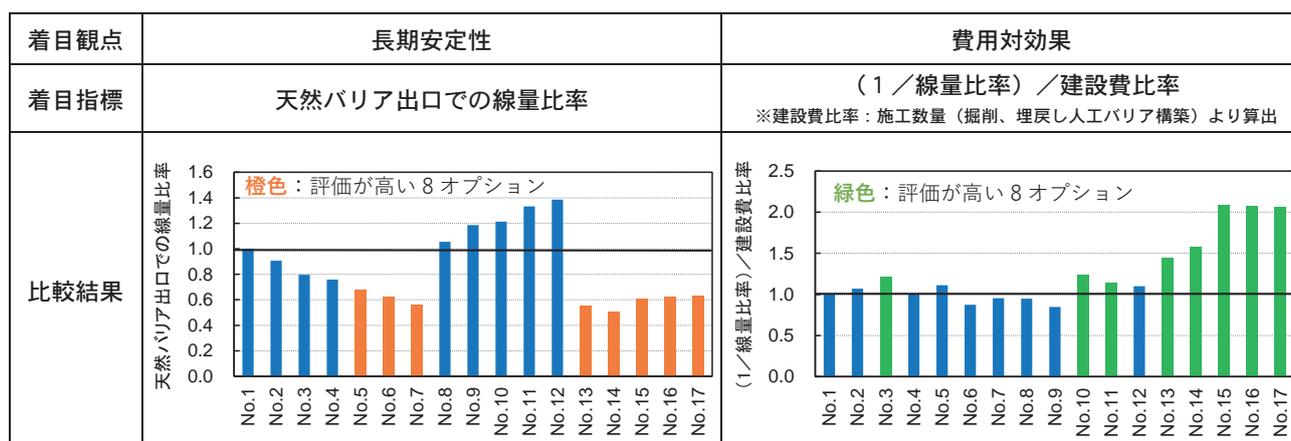
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	
断面図							
概要		・ベースケース	・低拡散層部材厚を最大値に変更	・低拡散層部材厚を増加 ・低透水層部材厚を最小値に変更	・廃棄体定置数を減少 ・低拡散層部材厚を最大値に変更	・廃棄体定置数を減少 ・低拡散層部材厚を増加 ・低透水層部材厚を最小値に変更	
長期安全性	人工バリア出口	1.0	0.8	0.6	0.6	0.5	
	天然バリア出口	1.0	0.9	0.8	0.8	0.7	
事業成立性	施工数量	掘削	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2
		低透水層	1.0	1.0	1.0	1.3	0.9
		低拡散層	1.0	1.4	1.4	2.5	3.1
	建設費	1.0	1.0	1.0	1.3	1.3	
断面図							
概要		・廃棄体定置数を減少 ・低拡散層部材厚を最大値に変更	・廃棄体定置数を減少 ・低拡散層部材厚を増加 ・低透水層部材厚を最小値に変更	・坑道径・廃棄体定置数を変更 ・低透水層部材厚を減少	・坑道径・廃棄体定置数を変更 ・低拡散層部材厚を増加 ・低透水層部材厚を減少		
長期安全性	人工バリア出口	0.4	0.3	1.0	0.8		
	天然バリア出口	0.6	0.6	0.6	0.5		
事業成立性	施工数量	掘削	1.6	1.6	1.2	1.2	
		低透水層	1.8	1.3	1.3	1.3	
		低拡散層	4.6	5.5	1.4	1.4	
	建設費	1.8	1.9	1.3	1.3		

表-10 設計オプションの比較評価結果（合理化を図る方向のシリーズ）

		No. 1	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11	
断面図							
概要		・ベースケース	・低拡散層部材厚を最大値に変更 ・低透水層の透水係数を増加(100倍)	・低拡散層部材厚を最大値に変更 ・低透水層の透水係数を増加(L2覆土相当)	・廃棄体定置数を増加 ・各部材厚を最小値に変更	・廃棄体定置数を増加 ・各部材厚を最小値に変更 ・低透水層の透水係数を増加(100倍)	
長期安全性	人工バリア出口	1.0	1.0	2.0	2.7	7.6	
	天然バリア出口	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	
事業成立性	施工数量	掘削	1.0	1.0	1.0	0.7	0.7
		低透水層	1.0	1.0 (粘土量0.3 [※])	1.0 (粘土量0.1 [※])	0.3	0.3 (粘土量0.1 [※])
		低拡散層	1.0	1.4	1.4	0.3	0.3
	建設費	1.0	1.0	1.0	0.7	0.7	
断面図							
概要		・廃棄体定置数を増加 ・各部材厚を最小値に変更 ・低透水層の透水係数を増加(L2覆土相当)	・坑道径・廃棄体定置数を変更 ・各部材厚を最小値に変更	・坑道径・廃棄体定置数を変更 ・各部材厚を最小値に変更 ・低透水層の透水係数を増加(100倍)	・坑道径・廃棄体定置数を変更 ・各部材厚を最小値に変更 ・低透水層の透水係数を増加(L2覆土相当)		
長期安全性	人工バリア出口	16.4	2.7	6.9	14.7		
	天然バリア出口	1.4	0.6	0.6	0.6		
事業成立性	施工数量	掘削	0.7	0.8	0.8	0.8	
		低透水層	0.3 (粘土量0.04 [※])	0.4	0.4 (粘土量0.1 [※])	0.4 (粘土量0.05 [※])	
		低拡散層	0.3	1.2	1.2	1.2	
	建設費	0.7	0.8	0.8	0.8		

※粘土量: No. 1と比較したベントナイト数量

表-11 設計オプションの絞り込み結果



(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貢献する。ベントナイト混合土などの土質系材料を締固めた場合、乾燥密度が最大となる最適含水比ではなく、それよりやや湿潤側で透水係数が最小となることが実験的事実として知られている¹⁰⁾。このような現象にも着目し、中深度処分を始めとする放射性廃棄物処分における人工バリアの一つに位置づけられるベントナイト混合土の透水特性を深く理解することを目的として、5年間にわたり実験データを取得するとともにその結果を考察した。

本研究では、実験A～実験Eを通じて、土質材料の透水特性に関するデータを取得し、メカニズムの評価を進めた。実験Aは、室内締固め-透水試験であり、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についてのデータを取得した。実験Bは、ベントナイト混合土の透水試験により締固め時の乾燥密度と飽和度が透水特性に及ぼす影響についてのデータを取得した。実験Cでは、実体顕微鏡により締固め土の構造を観察し、透水特性を規定する主要な因子の一つと考えられる空隙構造に係る画像データを取得した。実験Dは、試料への通水時の浸透現象を可視化するため中性子イメージング実験であり、通水時の水の浸透過程の画像データを取得した。実験Eでは、締固め過程における空隙構造形成プロセスを明らかにするため、複数の締固め

時の含水比の条件下で、土粒子骨格構造の違いを観察した。

表-12に5カ年の研究で実施した実験A、Bの実験条件を示す。これまでに取得したデータを整理・分析した結果の一例として、実験Aのうち、細粒分として、膨潤性材料のベントナイトだけでなく非膨潤性材料のカオリン等、非塑性の珪砂粉の細粒分を用いた混合土（母材は細砂）をJIS A 1210:2020のA-c法により1Ec(550kJ/m³のエネルギー)で締固めた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。

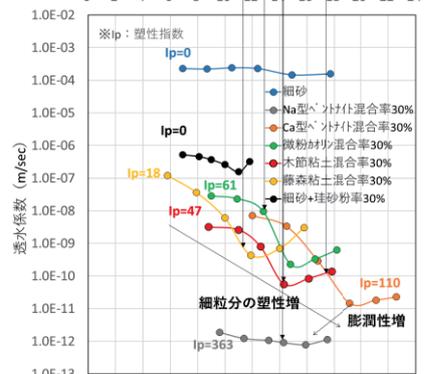
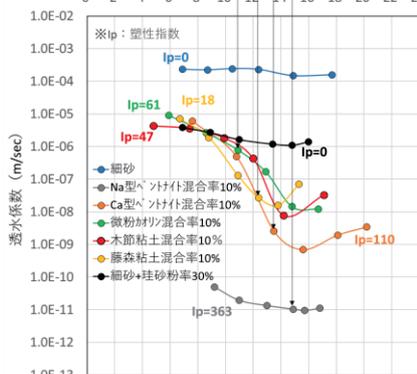
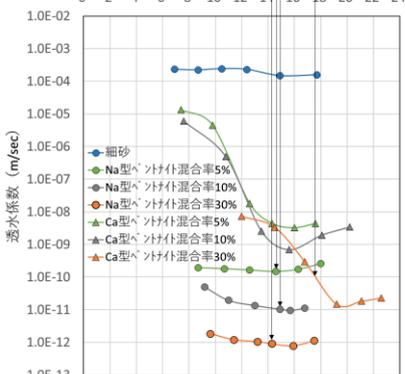
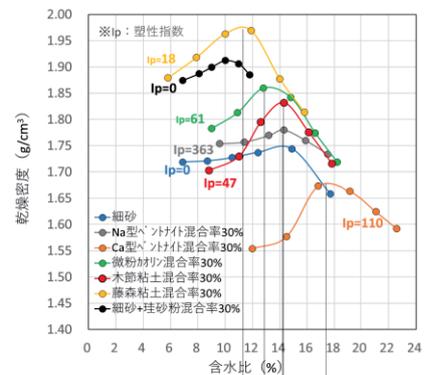
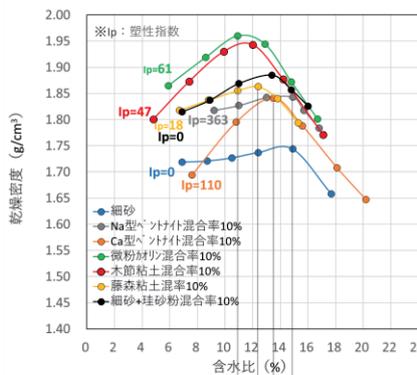
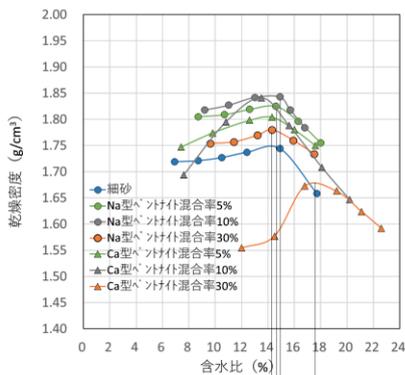
図-7の(a)によれば、Na型ベントナイト混合土の場合、混合率が5%、10%、30%と増加するにつれ、透水係数が1桁ずつ低下し、混合率が遮水性に影響している。また、5%の貧配合混合土も含め、1Ec締固めの条件下では締固め時の含水比に対する透水係数の変化は非常に小さく、締固め時の含水比に依存しない安定した遮水性の発現を確認できる。一方、膨潤性の低いCa型ベントナイト混合土は、最小透水係数を比較すると、同じベントナイト混合率のNa型ベントナイト混合土に対して1桁程度大きな透水係数を示している。また、締固め時の含水比に対する変化が非常に大きく、乾燥側の含水比では湿潤側に対して3桁程度大きい透水係数を示している。図-7の(b)及び(c)によれば、塑性指数(Ip)が大きいほど最小透水係数は小さくなっており、これらの間には一定の相関性が認められる。非塑性の珪砂粉混合土のみ、含水比依存性に変化はない。これ以外の混合土の透水係数の含水比依存性は、母材やNa型ベントナイト混合土と比べて顕著である。混合率の違いは透水係数の値に影響し、細粒分の混合率が多いほど最小透水係

表-12 5カ年の研究で実施した実験A、Bの実験条件一覧

母材	材料		締固め～透水試験		備考
	添加する細粒分	混合率	実験A	実験B	
細砂 (購入砂：母材1)	—	—	○	○	母材単体
	Na型ベントナイト (クニゲルV1) [363]	5%	○	○	JISで再試験を実施
		10%	○	○	
		20%	○	—	
		30%	○	○	
	Ca型ベントナイト (KG-1) [110]	5%	○	—	混合後に養生
		10%	○	○	
		30%	○	○	
		10%・30%	○	—	
	微粉カオリン [61]	10%	○	○	
30%		○	○		
木節粘土 [47]	10%	○	○		
	30%	○	—		
藤森粘土 [18]	10%	○	—		
	30%	○	○		
珪砂粉 [0]	10%	○	○		
	30%	○	—		
微粉砂 (珪砂粉：母材2)	—	—	○	—	母材単体
粒度調整材 (母材3)	—	—	○	○	母材単体
	Ca型ベントナイト	10%	○	—	
	カオリン	30%	○	○	
— (細粒分単体)	Ca型ベントナイト	100%	○	—	含水比3水準で試験を実施
	カオリン	100%	○	—	含水比3水準で試験を実施
	藤森粘土	100%	○	—	含水比3水準で試験を実施
カラーサンド (母材4)	—	—	○	—	母材単体
	Na型ベントナイト	10%	○	—	均一・不均一混合の比較

※ [] 内は塑性指数 (Ip)

- : 非塑性性材料
- : 非膨潤性材料
- : 膨潤性材料



(a) Na型及びCa型ベントナイト混合土

(b) 細粒分10%混合土

(c) 細粒分30%混合土

図-7 非塑性/非膨潤性/低膨潤性/高膨潤性細粒分混合土(母材細砂)の1E_c締固め～透水試験結果

数の値は小さくなる。

5年間にわたる一連の実験の結果を踏まえて、ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムとその形成プロセスを規定すると考えられるベントナイト混合量・加水量・締固め・細粒分特性・母材特性の5つの影響要因が、加水混合→締固め→通水飽和の各プロセスでどのような働きを持ち、結果として遮水性がどのように発現するのかを整理したものを表-13に示す。高膨潤性ベントナイト混合土の高い遮水性能は、加水・混合時に吸水膨潤した団粒塊（吸水によりゲル化したベントナイトが母材をコーティングし、相互連結した塊）の形成に加え、締固めによる団粒塊の扁平化と相互連結による母材間隙の被覆、閉塞、通水・飽和による難透水性ベントナイトゲルの再膨潤により発現すると考えられる。ベントナイト混合率が增加すると、ベントナイトの被膜の面積だけでなく、ベントナイトの三次元的な充填性の増加等により、さらに透水係数が低下するものと考えられる。また、透水試験前の飽和過程でベントナイトの再膨潤とベントナイト

の被膜が進展することでも、膨潤性ベントナイト混合土の安定的な遮水性能をもたらすものと考えられる。

実験A~Eを総合して考案した締固めたベントナイト混合土の透水係数評価式を図-8に示す。また評価式に用いる3つのパラメータ（細粒分被膜面積比、細粒分被膜の透水係数、母材の透水係数）と透水係数に影響を及ぼす5つの影響要因との関係を整理した。細粒分被膜面積比 χ_k は、ベントナイトの混合量、ベントナイトの膨潤量、乾燥密度及び含水比などが影響する。透水係数は、細粒分被膜面積比 χ_k が0となる時母材の透水係数 k_b に一致する。また、細粒分被膜面積比 χ_k が1.0となる時細粒分被膜そのものの透水係数 k_f に一致する。さらに、図-8の右端に示したベントナイト混合土を用いた遮水層構築の実務（設計・施工）の流れ（材料選定→配合設計→初期施工）と5つの影響要因との関係を明確にすることで、遮水性発現メカニズムを踏まえて実務を進めることができ、より効率的で有効な材料選定、配合設計及び現場施工が期待される。

表-13 ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムと形成プロセス

要因	形成過程 (プロセス)	遮水性発現機構 (メカニズム)	影響因子				
			ベントナイト混合量	加水量 (含水比)	締固め (乾燥密度)	ベントナイトの材料特性 ^{※3} (膨潤性/膨脹性)	母材の材料特性 (粒度特性)
素因	加水・混合	団粒塊 ^{※1} の形成	◎ 富配合有利	◎ 湿潤側有利 (ゲルの体積膨脹量大)	—	◎ 高膨潤性有利 (ゲルの体積膨脹形成)	—
主因	締固め	団粒塊の扁平化と相互連結 (難透水性連続被膜の形成と母材残存間隙の閉塞)	◎ 富配合有利	◎ 湿潤側有利 (団粒塊体積とコンシステンシー)	◎ 高密度 (高締固めエネルギー) 有利	◎ (団粒塊体積とコンシステンシー)	◎ (母材骨格の間隙変化量に影響)
		締固め曲線の発現	◎ 締固め機構 ^{※2} /曲線形状に影響	◎ 曲線形状に影響	◎ 締固めエネルギーに依存	◎ 締固め機構/曲線形状に影響	◎ 混合土骨格部の締固め特性に影響
強化要因	通水・飽和	難透水性ベントナイトゲルの再膨潤 (被膜の進展)	◎ 富配合有利 ^{※4}	◎ 湿潤側有利	◎ 高密度有利	◎ 高膨潤性有利	◎ 母材間隙残存時には混合土の透水係数に影響

凡例 ◎:各プロセスの主要因 ○:関連する要因 —:無関係もしくは関係性が不明
 注 ※1 団粒塊:吸水膨潤したベントナイトゲルが母材をコーティングし、相互連結した塊 (100%ベントナイトのダマとは異なる) 透水試験時の難透水性ベントナイトゲル被膜の原料となる
 ※2 締固め機構:膨潤性ベントナイトではTypeA (団粒塊型)、非膨潤性材料TypeC (一般土質材料型)、低/非膨潤性細粒分混合土では中間的なTypeBを取る
 ※3 非膨潤性細粒分混合土では、ベントナイトを細粒分 (粘土・シルト分) に置き換えて考える
 ※4 不飽和締固めの被膜面積が大きいほど、通水・飽和時の再膨潤による難透水性被膜の連続化と母材残存の閉塞が生じやすい

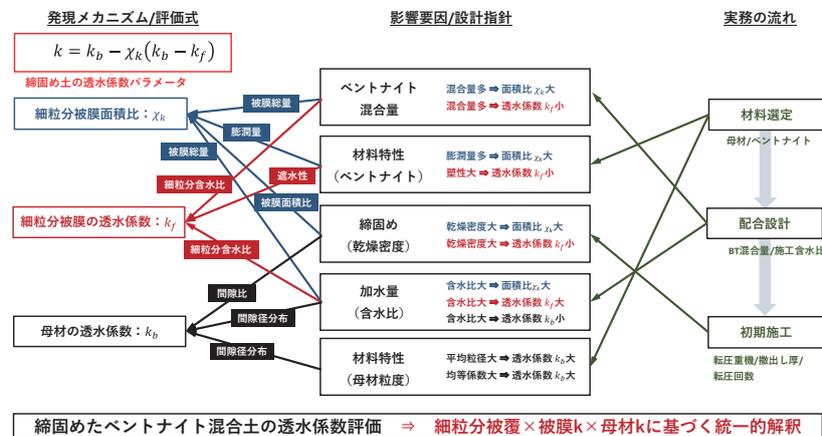


図-8 締固めたベントナイト混合土の透水係数評価式と影響因子/実務要因の関係性

- 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2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、2021
- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター、東電設計株式会社、令和3年度 低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業 地下空洞型処分調査技術高度化開発 報告書、2022
- 6) 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4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、2023
- 7) 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
- 8) 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6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、2025
- 9) 原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、NRA 技術ノート 中深度処分の規制基準の背景及び根拠、NTEN-2022-0001、令和4年8月
- 10) Sakita T., Komine H., Yamada A., Wang H., Goto S.: Influence of bentonite type and production method on hydraulic conductivity of sand-bentonite mixture, E3S Web Conf., 205, 2020

(低レベル廃棄物処分研究開発部)

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) 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4）

原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物のうち、浅地中ピット処分対象廃棄体（大型角型形態）として製作する廃棄体の製作検査方法を規定する標準に反映すべき新知見を取り込み、標準の記載内容の改訂検討を行うとともに、日本原子力学会での審議支援を行った。

(2) 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（2024年度）

原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物のうち、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を規定する標準に対して行われた原子力規制委員会による技術評価の結果を踏まえ、標準の記載内容の改訂検討を行うとともに、日本原子力学会での学会審議支援を行った。

(3) 浅地中処分施設の安全評価手法の改定支援業務助勢（2024年度）

原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物の浅地中処分の安全評価手法を規定する標準に反映すべき新知見を取り込み、標準の記載内容の改訂検討を行うとともに、日本原子力学会での学会審議支援を行った。

II. 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する調査研究

1. 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では、処分場の設計と工学技術に係る取組みとして以下の必要性が示されている¹⁾。

- ・候補サイトの地質環境条件に対して柔軟な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

本事業では、設計の詳細化・最適化への準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6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担当分の成果について報告する²⁾。

◇2024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、埋戻し材の施工技術オプション及び埋戻し材の材料特性データの整備を進めている。

施工技術オプションの整備では、表-1に示すように既存の施工技術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。また、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。さらに、施工後の埋

戻し材の品質管理を補完するための計測技術を整備する。

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を取得するとともに、埋戻し材の性能に影響を及ぼす岩石の特性を把握し、埋戻し材に使用可能な掘削土の適用範囲を明らかにする。

なお、低透水性の確保の観点から、埋戻し材には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⁾。そのため、模擬掘削土にコンクリート用砕石・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試験等を実施した。

表-1 施工技術及び計測技術の概要

技術名	概要
スクリュー工法	複数本のスクリュ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。
ブロック工法	地上の施設でブロック状に圧縮成型した埋戻し材ブロックを坑道に定位置して埋戻す工法であり、ブロックの品質の安定性が高く、原位置作業や施工管理の負荷を低減できる。
斜め転圧工法	埋戻し材を斜めに撒き出して転圧する工法であり、掘削土の適用範囲を広く設定できる。
計測技術	埋戻し材の乾燥密度、埋戻し材と坑道間の隙間検知及び埋戻し材の膨潤過程を対象として、加熱式光ファイバを用いた分布型温度センシング法(a-DTS ^{*1} 法)及びケーブルTDR ^{*2} 法による計測技術を整備。

*1: actively heated fiber-optic Distributed Temperature Sensing

*2: Time Domain Reflectometry

①施工技術オプションの整備

○スクリュー工法

スクリュー工法では自然含水比の埋戻し材を用いるため、施工時に材料が分離する可能性がある。この材料分離が埋戻し材の透水性に及ぼす影響を把握する必要がある。そこで、ベントナイト混合率、模擬掘削土の最大粒径、スクリュー高さをパラメータとして充填要素試験を実施した。また、材料分離が透水係数に及ぼす影響を確認するための室内透水試験を実施した。

充填要素試験では、表-2に示す配合の埋戻し材を用いた。スクリュー高さは、1,250mm及び900mmの2条件とし、試験土槽は幅450mm、奥行4,000mm、高さ1,500mmとした。充填後には、図-1に示すよ

うに、側面に設けた窓と最下部のトレイから試料を採取し、細粒分含有率を測定して材料分離の程度を評価した。

表-2 充填要素試験の配合表

	配合比 (乾燥質量)		
	クニゲル V1 (%)	道路用碎石 (%)	コンクリート用砕砂 (%)
配合 A	15	51	34
配合 B	15	-	85
配合 C	30	42	28
配合 D	30	-	70

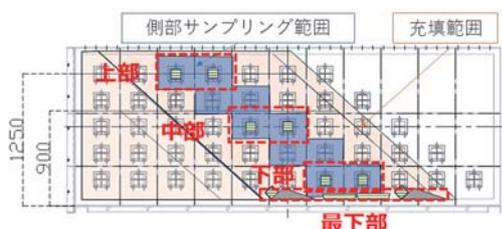


図-1 土槽側面図

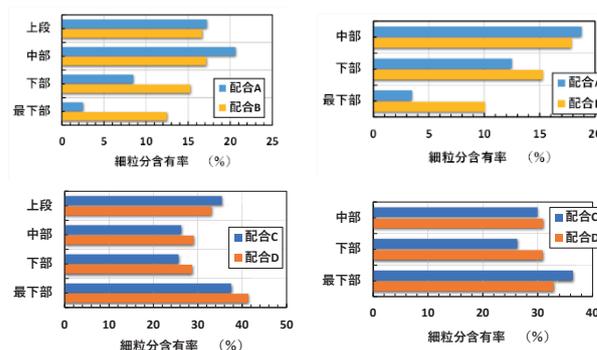
図-2 に各試料の細粒分含有率を示す。ベントナイト混合率 15%の配合 A 及び B では、最下部の細粒分含有率が小さくなる傾向がみられた。この傾向は、碎石を用いた配合 A でスクリュー高さ 1,250mm の条件で最も大きかった。

一方、ベントナイト混合率 30%の配合 C 及び D では、充填範囲の上下の細粒分含有率のばらつきが小さかった。これらの結果から、模擬掘削土の最大粒径を小さくする、ベントナイト混合率を高くする、スクリューの位置を低くすることで材料分離の抑制が可能であることがわかった。

また、室内透水試験の結果、ベントナイト混合率 10%かつ碎石混合率 80%以上の埋戻し材の配合では、透水係数が $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-5}$ m/s であった。つまり、配合 A では最下部において材料分離が生じると低透水性を満足できない可能性があることが示唆された。

今後は、横置き PEM (Prefabricated Engineered Barrier System Module) 方式の狭隘部も対象にした場合の施工性や施工品質について検討を行う予定である。

また、スクリュー工法の今後の研究開発を効率的に進めるため、スクリュー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 : Integrated Granular Flow Simulation Software) を実施した。



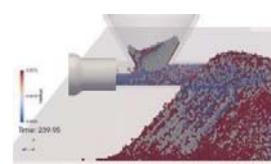
(a) 高さ 1,250mm (b) 高さ 900mm

図-2 細粒分含有率の測定結果

図-3 に示すように、シミュレーションでは模型実験で確認された充填形状や材料分離の傾向を再現することができた。これらの結果は、充填要素試験の結果とも整合しているため、事前にシミュレーションを実施することで充填要素試験の試験条件の範囲を限定できる見通しが得られた。今後は、ベントナイト混合率が高い埋戻し材を対象に充填シミュレーションの適用性を確認する予定である。



(a) 充填模型実験



(b) 充填シミュレーション

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

既存のプレス機により製造可能な埋戻し材ブロックの品質や適用範囲を確認した。また、ブロック工法単体での施工を想定し、坑壁との隙間を充填する自己シール性に関する評価方法について検討した。

ベントナイト混合率 30%の混合土 (碎石・砕砂を含む) を用いて、幅 1,000mm×奥行 1,000mm×高さ 600mm の埋戻し材ブロック (図-4) を試作した。その結果、有効粘土密度及び外観については判定基準を満足し、乾燥密度分布のばらつきに関しては、既往の知見⁴⁾と同程度であったことから、1m 規模の埋戻し材ブロックが製作可能であることを確認した。



(a) 金型の設置状況 (b) 試作した埋戻し材ブロック

図-1 埋戻し材ブロックの製作状況

次に、自己シール性の評価方法について検討するために、二次元自己シール性試験を実施した。試験装置の概略図を図-5 に示す。供試体にはクニゲル V1 と模擬掘削土（コンクリート用砕砂）の混合土を用い、ベントナイトの混合率を 85% とした。供試体は W50mm×D50mm×H50mm の立方体とし、目標有効粘土密度を $1.67\text{Mg}/\text{m}^3$ に設定した。また、膨潤変形試験の結果を踏まえて、供試体の膨潤変形により隙間が閉塞すると予想される隙間体積：供試体体積=1：4（上部、側面の隙間幅を 6mm）となるように試験装置のサイズを設定した。試験用水には蒸留水及び人工海水を使用し、自己シール後の圧力を測定するために装置の 5 力所に圧力計を設置した。

試験開始後の外観観察の結果から、蒸留水条件では 24 時間経過後に隙間が完全に自己シールされた。一方、塩水条件では約 2,000 時間後でも容器上部の角部にわずかな隙間が残った。

試験開始後の発生圧力の経時変化を図-6 に示す。図には、一次元自己シール性試験（隙間体積：供試体体積=1：4）の結果も併せて示した。蒸留水条件及び人工海水条件ともに、2,000 時間程度経過しても圧力が変動していた。この時点では、供試体が飽和していないと考えられるが、二次元自己シール性試験と一次元自己シール性試験の供試体の飽和後における乾燥密度は計算上では同一のため、その発生圧力は概ね同程度になると考えられる。別途実施した試験で取得した発生圧力と透水係数の関係から、一次元自己シール性試験の発生圧力に対応する透水係数は $10^{-11}\text{m}/\text{s}$ オーダーであった。このため、隙間閉塞後の透水係数も同程度であると考えられる。以上の結果から、膨潤変形試験で得られた最大膨潤率に基づき、埋戻し材の配合を適切に設定すれば、二次元形状においても自己シール性を確保できると考えられる。

今後は坑道の形状、ブロックの寸法や配置、塩水環境下を考慮した模型実験等を通じて、実際の

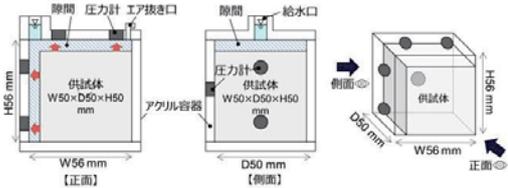
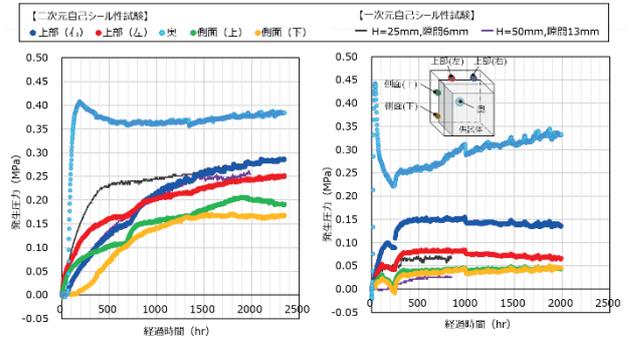


図-5 二次元自己シール性試験装置の概略図



(a) 蒸留水 (b) 人工海水

図-6 自己シール性試験における発生圧力の経時変化

坑道に対して適用可能な埋戻し材ブロックの自己シール性評価手法を整備する必要がある。

○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、加熱式光ファイバによる分布型温度センシング法（a-DTS法）を用いた模型実験を実施した。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。

模型実験装置の概要を図-7 に示す。アクリルパイプ容器（長さ 2m、内径 118mm）に、乾燥密度 $1.68\text{Mg}/\text{m}^3$ に締め固めた埋戻し材ブロック（砕砂 15wt%、ベントナイト 85wt%）を設置した。ブロックは円柱状（直径 100mm、高さ 127mm）とし、ケーブルを設置する空間を確保するために、断面の一部を切欠いた。また、容器壁面からの放熱の影響を避けるため、壁面から 3cm 程度の位置に光ファイバケーブルを設置した。

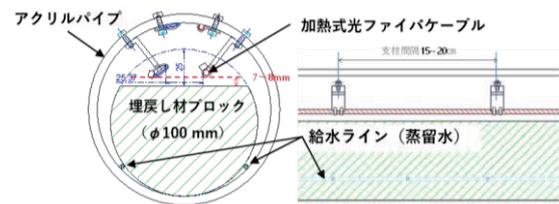
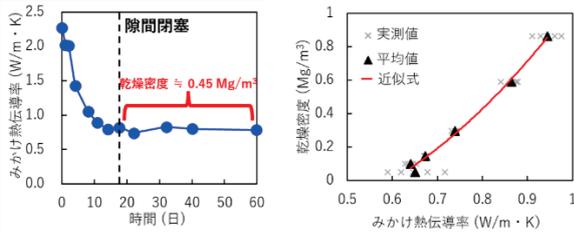


図-7 模型実験装置の概要図

みかけ熱伝導率の経時変化を図-8(a)に示す。みかけ熱伝導率は、隙間が閉塞する過程で減少し、隙間の閉塞後には概ね $0.8\text{W/m}\cdot\text{K}$ で一定になった。この値を図-8(b)に示すみかけ熱伝導率と乾燥密度の関係から換算した乾燥密度は 0.45Mg/m^3 であった。a-DTS 法で推定した乾燥密度の妥当性を確認するためには、模型実験後の解体分析等で測定した乾燥密度の実測値と比較する必要があるが、本手法により埋戻し材の膨潤挙動を把握できる見通しが得られた。



(a) みかけ熱伝導率の経時変化 (b) みかけ熱伝導率と乾燥密度の関係

図-8 a-DTS 法による計測結果

○斜め転圧工法

既存の機械を用いた施工可能範囲と施工性及び施工品質を確認するため、坑道上半部を対象とした施工試験を実施した。また、転圧機械の仕様を設定するための締固め能力の指標について検討した。

埋戻し材には、模擬掘削土にコンクリート用碎石・砕砂（最大粒径 20mm）を用い、ベントナイト混合率は 15%、含水比は 11%とした。転圧機械は、振動バケットを装着した 0.06m^3 クラスのバックホウを使用した（図-9）。振動バケットは正方向と逆方向の 2 ケースで装着し、撒出しの傾斜角は 35° 及び 45° とした。

既存の転圧機械による施工可能範囲を図-10 に示す。バックホウのアームやキャノピーが坑道と干渉するため、天端部及び側壁近傍部の施工が困難であることがわかった。

施工可能範囲における埋戻し材の含水比と乾燥密度の関係を図-11 に示す。図には、これまでに実施した水平転圧⁵⁾と昨年度に実施した斜め転圧の試験結果を併せて示した。施工試験の結果、斜め転圧による乾燥密度は $1.84\sim 2.02\text{Mg/m}^3$ の範囲であり、撒出し角度やバケット方向による乾燥密度の低下はみられなかった。また、採取した供試体を用いた透水試験の結果、透水係数は $1.0\times$



図-9 転圧機械

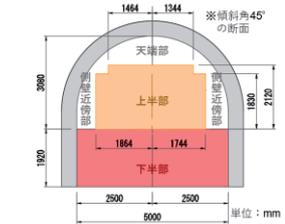


図-10 既存の転圧機械による施工可能範囲の例

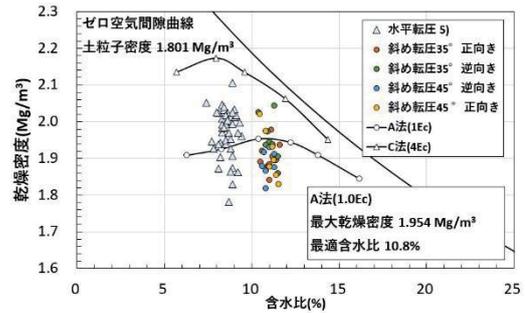


図-11 埋戻し材の含水比と乾燥密度の関係⁵⁾

10^{-12}m/s 程度であり、転圧可能範囲内の施工品質は、水平転圧と同程度であった。

斜め転圧工法の締固め能力の指標として、起振力と機械荷重を合計した転圧力に着目した。既存の転圧機械を用いた要素試験を実施して、機械荷重及び転圧力と乾燥密度の関係を整理した。その結果、機械荷重は転圧箇所によって変化するが、起振力に比べて埋戻し材の乾燥密度への影響が小さいことから、締固め能力の指標として転圧力が有効であると考えられる。

②埋戻し材の材料特性データの整備

埋戻し材の設計に資する材料特性データベースを拡充するため、塩水条件における透水試験を実施した。また、掘削土に含まれる黄鉄鉱の酸化による酸性化などの化学的影響が埋戻し材の特性に及ぼす影響を把握した。

透水試験では、ベントナイト（クニゲル V1）と模擬掘削土（コンクリート用碎石・砕砂、最大粒径 20mm）を混合した埋戻し材を用いた。ベントナイト混合率及び締固め度（密度）をパラメータとして、通水溶液には人工海水を用いた。

有効粘土密度と透水係数の関係を図-12 に示す。人工海水条件下においてはベントナイト混合率に関わらず、有効粘土密度が 1.0Mg/m^3 以上で透水係数のばらつきが小さかった。

約条件（満たすべき条件）、設計変数（調整可能なパラメータ）の3要素で構成される。これを本検討に適用し、目的関数を最適化の評価項目、制約条件を評価指標、設計変数を設計オプションとした。また、複数の評価項目の相対的重要度（重み付け）については、多目的最適設計を適用することが考えられる。

以上のように、設計オプションの最適化の方法論についての検討を進めた。今後、抽出した課題に基づき評価項目の更新を進めるとともに、処分坑道横置き・PEM方式の新たな設計オプション⁷⁾の技術的実現性の提示に向けた技術開発に着手する。

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日程度の期間（新第三紀堆積岩類で284日³⁾）に、地下水の浸潤により緩衝材が坑道内に膨出する可能性がある。この膨出量によっては、緩衝材に要求される乾燥密度が確保できなくなることも考えられる。そのため、緩衝材の膨出（膨潤変形）量の予測方法や膨出抑制方法の具体化を進めた。

緩衝材の膨潤変形に影響を及ぼす要因として考えられる緩衝材と孔壁間の摩擦、オーバーパック等の自重及び地下水組成（淡水及び塩水）を考慮し、膨潤特性理論評価式^{8),9)}を用いて膨潤変形量を計算した。その結果、膨潤変形量は地下水組成により異なるが300~600mmであった。また、DAC SAR-I¹⁰⁾による解析では、摩擦により膨潤変形が抑制される一方で、緩衝材の上端部の外縁部で膨潤変形が大きくなる傾向が見られた（図-15）。これらの計算結果から、緩衝材の膨潤変形量は限定的であり、その抑制対策を検討する上で有益な情報が得られた。

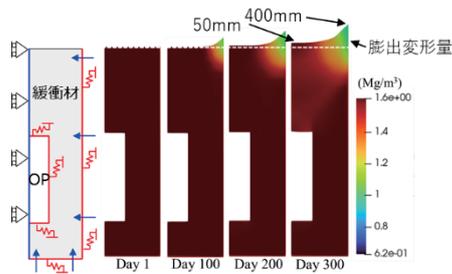


図-15 DAC SAR-I を用いた膨潤変形量の計算結果

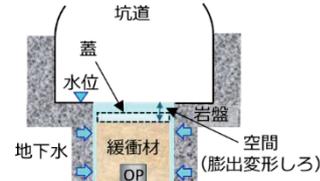


図-16 処分孔内上部の膨潤変形しろ及び蓋のイメージ

緩衝材の膨潤変形量が最大で600mm程度であったことから、原位置で膨潤変形量を管理する方法について検討した結果を図-16に示す。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した後、蓋（緩衝材上端の吸水による低密度化抑制）を設置し、緩衝材の膨潤変形量を計測することにより緩衝材の乾燥密度を管理できると考えられる。また、緩衝材の膨潤変形量を平準化するための蓋の仕様を示し、今後の室内工学規模試験等の計画を取りまとめた。

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、操業期間中に定期的な評価を行い、核燃料物質等による放射線被ばくの管理を確認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および安全評価を実施し、規制への適合性を判断する必要がある。

このため、人工バリアを含む地下構成要素の製作・施工に係る品質や施工後の状態変遷を把握する取組みが重要となる。これまでに、海外の先行事例を参考に品質保証体系の考え方を整理し、以下の2つのプログラムに分けて品質保証体系の素案を整備した⁵⁾。

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

2024年度は、性能確認プログラムの素案の更新に向けた参考情報として、フィンランドの規制基準及び実施主体である Posiva のモニタリングに関する取組状況を調査した。

Posiva のオルキオト・モニタリング・プログラム¹¹⁾の考え方の一部を以下に示す。

- ・モニタリング対象は、岩盤、地下水、人工バリア、表層環境の4つで構成。

- ・人工バリアの変遷は非常に緩慢なため、閉鎖までの期間に有意な変化をとらえることは不可能。
- ・岩盤や地下水のモニタリングにより、人工バリア構成要素が適切な条件にあることを確認。
- ・初期の変遷は室内試験、原位置試験、実規模試験におけるモニタリングで把握。

今後は、岩盤や地下水などのモニタリングに関する海外実施主体の最新の検討状況について調査し、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

地層処分事業は長期にわたることから、可逆性・回収可能性の確保が求められている。そのため、現行の縦置き・ブロック方式と横置き・PEM方式を対象に、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んでいる。

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時間を定量化し、回収作業の技術的実現性を示すために、状態B（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）からの回収手順を具体化し、回収技術の整備を進めた。

② 処分坑道縦置き方式の回収技術の高度化

オーバーパックを損傷せず緩衝材を迅速に除去するため、塩水ウォータージェット（WJ）方式による除去技術の整備を進めている。これまでに、1 処分孔当たり約5時間で緩衝材を除去でき、現実的な時間内で回収作業を実施できる見通しを得た¹²⁾。2024年度は、処分施設の空間的な制約下における除去システムの適用性評価と課題の抽出を行った。

処分坑道内の複数の処分孔に対して連続的に緩衝材を除去するためには、噴射する塩水の供給と除去生成物（ベントナイトスラリー）の排出を遅滞なく行うことが必要である。また、除去位置の変更に対してシステム全体を移動させることが必要である。

そこで、過年度に整備した低圧塩水方式の除去システム¹³⁾と除去試験¹²⁾及び沈降試験の実績¹⁴⁾を参考に、塩水 WJ 方式のシステム構成と設備規模

を具体化した（図-17）。システム前方の噴射吸引設備で処分孔内の緩衝材を除去し、システム後方から噴射水の供給、減容化したスラリーの排出を行う。また、各ユニットは処分坑道断面に収まる既存の機材を遠隔操作式の移動台車（全長11mと仮定）に搭載したものである。その設備規模は全長100m超となるが、システム全体は処分坑道内に収めることができる。

以上のように、塩水 WJ 方式の緩衝材除去システムは現行の処分区画の空間的制約下でも、性能を発揮できる見通しが得られた。今後は、実事業における除去システムの適用性向上に向けた課題に加え、上部埋戻し材除去やオーバーバック回収といった回収作業に適用する他の技術開発を進め、処分孔縦置き方式の回収作業の技術的実現性を示すことが重要である。

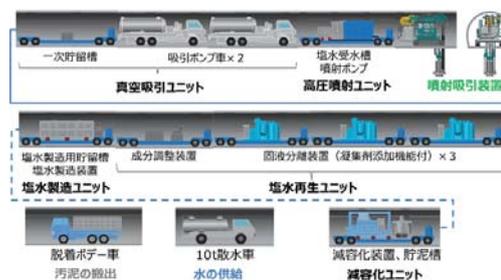


図-17 塩水 WJ 方式のシステム構成

③ 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の形態で回収するため、隙間充填材を機械的な方法（切削）で迅速に除去する装置の整備を進めている。ベントナイト混合土である隙間充填材は高含水比で塑性状になるため、これに対応できるL字薄刃型ピックを開発した¹⁴⁾。

2024年度は、切削性や除去生成物の排出挙動に与える含水比の影響、狭隘空間での連続排出機構の選定に資する切削・排土試験を実施した。吹付施工直後の隙間充填材の含水比は16.5%で¹⁵⁾、塑性限界18.8%よりも低含水側の半固体状である¹⁶⁾。

この含水比の供試体を高含水比と同条件で切削した結果、高含水比と同様に鱗茎片状で排出された。L字薄刃型ピックは幅広い含水比に対応でき、排出挙動も切削条件で管理できることを確認した。また、切削試験で除去生成物の体積が切削前の最大3倍になることが明らかになった。効率的な除去作業のためには、除去生成物の捕集と切

削装置後方への排出が重要である。そのため、切削試験時の除去生成物の軌跡の分析結果から、上後方に備えた開放型ベルトコンベアで補修・排土する方法を選定し、切削条件と捕集率の関係を取得した。図-18 に試験装置の外観を示す。今回の試験条件では、除去生成物の一部はドラムカッターとベルトコンベアの間隙から落下したが、ベルトコンベアによる捕集率は最大で 75%程度であった。

開放型ベルトコンベアは閉塞の恐れがなく、遠隔操作を前提とした装置には有効と考えられる。今後は、落下の要因となるドラムカッターとベルトコンベアの間隙を解消した除去ユニットの構造を具体化することが重要である。

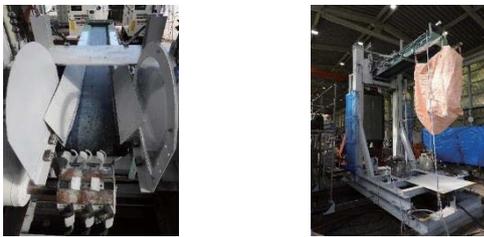


図-18 ベルトコンベア式の排土機構と試験装置

○PEM 回収時の作業安全の確保に係る技術開発

PEM 容器が腐食により大きく破損し、PEM としてのハンドリングが困難になった場合を想定した代替回収技術の整備を進めた。2024 年度は、PEM 容器に相当する厚さ 3cm 程度の炭素鋼の切断実績がある既存技術を調査するとともに、アブレイシブウォータージェット (AWJ)、ワイヤ・ソー、丸鋸の切断要素試験の結果を整理し、PEM 容器の開封装置の概念を具体化した。

まず、PEM 容器の開封位置を前面とした。状態 B の処分坑道では PEM が隙間なく定置されており、オーバーパック回収後に PEM の残部を搬出すれば、次の PEM の前面が露出する。この方法により、廃棄体が無い環境で PEM 側部の隙間充填材を撤去することができる。

前面開封に適用可能な技術は AWJ、丸鋸、ミーリングである。このうち AWJ は PEM 側方から抜ける高圧噴射水を減衰させるための器具を設置できないため除外した。丸鋸による開封装置の概念図を図-19 に示す。丸鋸の切断位置を変えながら複数回切込み、多角形状に開封する。切り離される部位が数百 kg となるため、撤去物を把持する装

置を備えている。

この方法では、開封により鋼殻による遮蔽が失われるため、一連の作業は全て遠隔操作で実施する必要がある。今後は、実際の装置化に向けた技術情報を拡充する必要がある。

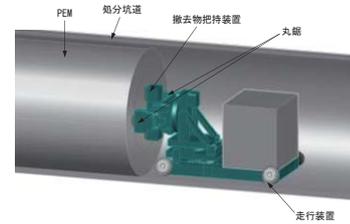


図-19 丸鋸方式の PEM 開封装置の概念図

②回収可能性の維持に伴う影響の定量化技術の整備

回収可能性の維持期間は、操業期間中と閉鎖後長期の安全性を確保できるように設定される。2023 年度からの 5 ヶ年では、回収可能性の維持に関する技術課題¹²⁾を踏まえ、処分場の建設から埋戻しまでの期間（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を定量化する手法の提示を目標とする。

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 2024 年度の成果を図-20 に示す。まず、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。この結果を安定性及び供用性の判定基準に基づいて評価する。

2024 年度は、昨年度までに取りまとめたサブシナリオと定量化手法について、トンネルの専門家へのヒアリングを実施した。ヒアリングの結果を踏まえて見直した主な項目を図-20 の①～⑤に示した。

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、昨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処分場の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。



図-20 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 2024 年度の成果

今後、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構築に向け、本年度に整理した定量化手法を使用して、検証解析を実施するとともに、サブシナリオで示した個別のプロセスについての試解析を実施する。

(4) 処分場の建設・操業技術の高度化

処分場の建設・操業では、作業安全や放射線安全の確保、将来の労働力不足への対応が求められる。そのため、全ての作業プロセスへロボティクス及び ICT 技術を導入する無人化施工の実現性について検討を進める方針が示されている¹⁾。

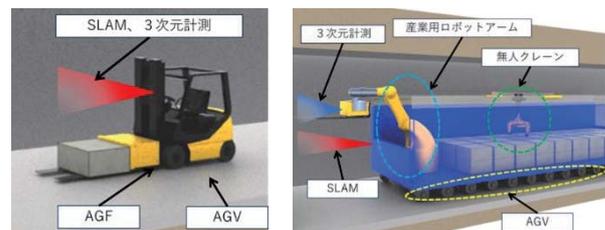
2024 年度は、(1)で検討を進めているブロック工法による埋戻し施工技術を対象に、埋戻し装置の無人化に向けた概念設計を行った。また、2023 年度に設定したロボティクス技術導入の可否を判断するための評価項目を更新した。

埋戻し装置に適用可能なロボティクス要素技術については、わが国の他分野におけるロボティクス要素技術の開発動向を調査し、埋戻し装置の構成単位ごとに整理して表-3 に示す。また、ブロック工法における作業プロセスを分析したうえで、ロボティクス要素技術を適用し、無人化した埋戻し装置の概念設計の結果を図-21 (a)に示す。さらに、作業効率を向上させるために、ブロックをまとめて積換え・運搬することが可能な埋戻し装置についても検討した (図-21 (b))。

ロボティクス要素技術の評価項目については、図-21 に示したオプション 1 とオプション 2 の相対評価及び埋戻しの施工技術オプションの評価項目を踏まえて施工速度の確保などの 4 項目を追加した (表-4)。

表-3 埋戻し装置に適用可能な要素技術

埋戻し装置の構成単位	ロボティクス要素技術
情報取得装置	SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)、三次元計測
管理システム	群制御、BIM/CIM
駆動装置	AGV (Automated Guided Vehicle)
埋戻し材定置装置	産業ロボットアーム、天井クレーン自動運転システム、AGF (Automated Guided Fork)



(a) オプション 1: ブロックを 1 つずつ積換え・搬送
(b) オプション 2: ブロックをまとめて積換え・搬送

図-21 無人化施工可能な埋戻し装置の概念設計

表-4 ロボティクス技術の導入の可否を判断するための評価項目 (案)

分類	評価項目
処分場設計/詳細設計の要件・要求事項	放射線防護 (作業員被ばくの低減)
	設計上の作業環境の制約 (作業スペース小)
	人的リソースの合理化
	作業事故リスクの回避
導入の可否判断に係る事項	開発・導入における技術的難しさ
	開発・導入・運用に係る費用
導入するロボティクス要素技術の要件・要求事項	一定の施工品質の確保
	作業可能範囲の確保
	施工速度の確保
	故障・誤動作からの復旧のし易さ
	メンテナンス性

注) ハイライト部は 2024 年度に追加した項目

(5) 地層処分実規模試験施設の運営

パネルや映像資料を用いた補助資料に加え、説明員による案内を実施して施設の運営を行った。施設内では、現行の2つの候補概念に対応した以下の展示を行っている。

- ・ 処分孔縦置きブロック方式：実物大の人工バリアのカットモデル
- ・ 横置き・PEM方式：幌延深地層研究センターの試験坑道での実証試験で使用した搬送・定置や回収技術に関する装置（図-22）。

また、来館者の意見や動向を踏まえ、施設内の展示物の配置の工夫、モニタ映像や展示物の更新を行うなど、来館者の理解が深まるように運営を行った。2024年度の来館者数は4,967人であり、開館以来の累計来館者数は80,035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であり、今後も対話記録を蓄積して有効に活用していく予定である。さらに、地層処分事業への関心の高まりを踏まえ、発信者と来館者双方の視点に立った情報発信の工夫について検討し、引き続き運営を行っていく。



図-22 施設の展示状況

- 7) 原子力発電環境整備機構：高レベル放射性廃棄物処分における横置き・PEM方式の高度化、NUMO-TR-24-04, 2021.
- 8) 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.
- 9) Komine H., Ogata N., Predicting Swelling Characteristics of Bentonites, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol.130, No.8, 2004, pp.818-829.
- 10) Ito S., Tachibana S., Takeyama T. and Iizuka A., Constitutive model for swelling properties of unsaturated bentonite buffer materials Soil. and Foundations, vol.62, No.4, 101161, 2022.
- 11) Posiva, Olkiluodon monitorointiohjelman-2022, POSIVA 2020-02, 2021.
- 12) 原環センター・原子力機構, 令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分事業（回収可能性技術高度化開発）報告書, 2023.
- 13) 原環センター, 平成26年度地層処分調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）平成23年度～平成26年度総括報告書, 2015.
- 14) 原環センター・原子力機構, 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・操業技術確証試験）報告書, 2024.
- 15) 原環センター・原子力機構, 平成30年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書, 2019.
- 16) 原環センター・原子力機構, 令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分事業（回収可能性技術高度化開発）報告書, 2022.

(地層処分工学技術研究開発部)

- 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6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・操業技術確証試験報告書、2025.
- 3) 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告書：わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築—、NUMO-TR-21-03, 2021.
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成14年度地層処分技術調査等遠隔操作技術高度化調査報告書（2/2）模擬円形ブロック湿潤環境における放置試験（模型試験）、2002.
- 5) 日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、令和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証試験取りまとめ報告書、2023.
- 6) 原子力環境整備促進・資金管理センター、地層処分施設的设计・操業技術の最適化手法に関する研究、RWMC-TRJ-20001, 2021.

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

地層処分事業における今後のサイト選定段階における安全評価においては、実際のサイトの地質環境条件や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、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の処分施設の建設・操業期間及び処分施設閉鎖後直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 NF の状態変遷をより現実的に評価するための技術開発が必要となる。

本事業では、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 を構成する材料間の相互作用などを考慮した NF の状態変遷をより現実的に評価する技術の構築を目的として、処分場において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 NF の状態変遷の評価、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、廃棄体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を実施するとともに、ガス発生量低減に向けた固化処理技術の開発を実施する。

本事業では、上記の背景・目的と先行事業「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、以下のサブプロジェクトを設定して、2023年度より検討を開始している³⁾。

- NF 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

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6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、本事業のうち当センターで検討した内容を報告する。

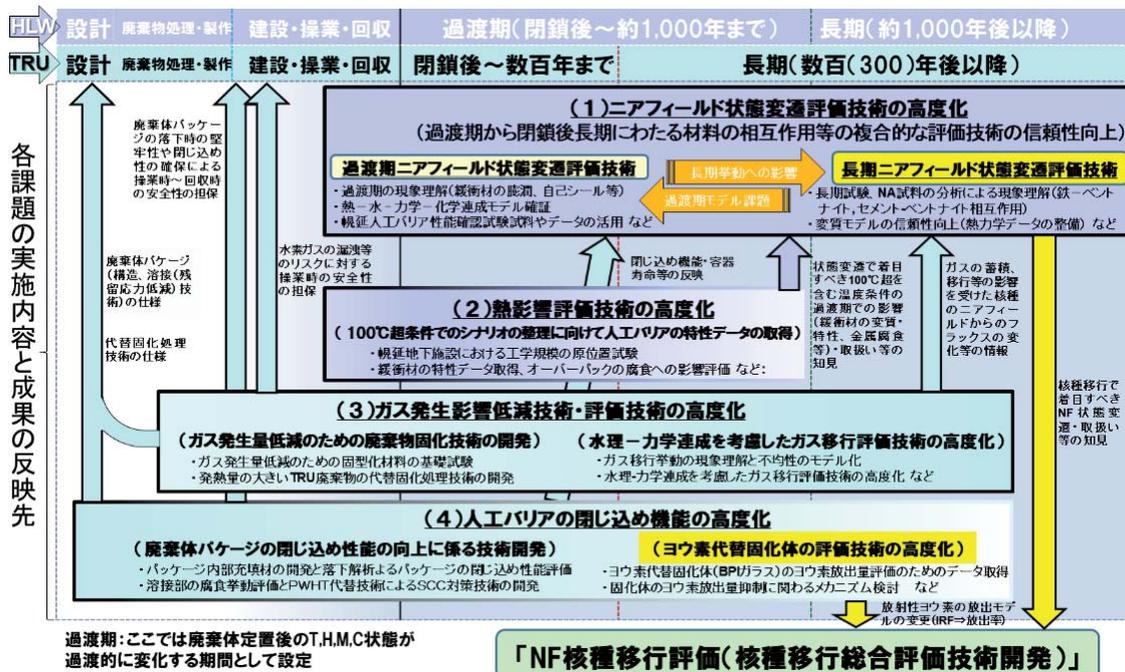


図-1 時間スケールに対する本事業の実施項目と成果の反映先の関係

(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。

- NF 状態変遷評価技術の高度化
 - 1) 緩衝材の膨潤挙動の評価手法の検討
- 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

NF 状態変遷評価技術の高度化に関しては、NF を構成する材料の相互作用等の複合的な評価技術の信頼性向上のための課題の一つとして、2024年度から新たに緩衝材の膨潤挙動の評価手法の検討を行う。本検討では、多様な水質や条件の異なるベントナイトの膨潤特性が評価可能な手法として、熱力学モデル（佐藤，2020）⁵⁾の適用性を検討し、概要調査後の処分場の設計や安全審査における評価技術への適用可能も見据えた評価手法を構築する。その上で、この熱力学的な評価手法を用いてベントナイトの膨潤特性を系統的に整理する。

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作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 NF 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）の影響が短期間に現れること、

ならびに地質媒体やバリア材による移行遅延機能が限定的な陰イオン核種の影響が大きいことが、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、容器による閉じ込め性の担保にむけて、熱的制限のある廃棄物に対しても適用可能な、残留応力に起因する応力腐食割れの影響の低減のための廃棄体パッケージ容器の製作技術や内部充填材の開発、ならびに、閉鎖前の作業時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。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が可能な現象の解明とモデル化とに取り組む。

(2) NF 状態変遷評価技術の高度化

1) 緩衝材の膨潤挙動の評価手法の検討

緩衝材の膨潤圧は NF の力学的安定性、長期のガス移行特性、自己シール性など、多様な安全機能に直接影響を与えるため、多様な環境条件下での膨潤特性を正確に予測できる評価手法の構築が急務である。本研究では、多様な水質や条件の異なるベントナイトの膨潤特性評価に熱力学モデル⁵⁾を適用し、その適用可能性と系統的な整理を目指す。

ベントナイトの熱力学モデルでは、電解質溶液（ α 相）とベントナイト（ β 相）両相間の水の化学ポテンシャルが等しいという原理に基づき、水の活量、相対湿度、相対部分モル Gibbs の自由エネルギーなどの熱力学的指標を用いて膨潤応力を評価することが可能である。2024年度は塩化物イオン溶液による Na 型ベントナイトの膨潤圧への影響を評価した。また、自己シール性に関連する膨潤率について、熱力学モデルに基づき、様々な電解質条件で利用できる評価式を導出した。

Na 型ベントナイトの NaCl, KCl, CaCl₂, MgCl₂ 溶液の各濃度下での膨潤応力の解析結果から、濃度が 1.0M 以下では「Na⁺, K⁺ > Ca²⁺, Mg²⁺」の順で膨潤応力が低下することを確認した。一方、イオン強度（IS）で比較すると「Ca²⁺, Mg²⁺ > Na⁺, K⁺」の順で膨潤応力が低下するという逆転現象が確認された。これは、同じイオン強度でもイオン

の種類によって膨潤応力に及ぼす影響が異なることを示している。

次に、ベントナイトの膨潤変形を定量的に評価するため、熱力学モデルに基づく体積膨潤率（膨潤率）の評価式を導出した。この評価式は、初期のモンモリロナイト部分密度と载荷応力下でのモンモリロナイト部分密度から膨潤率を算出するものであり、純水系だけでなく様々な水質条件にも適用可能である。この膨潤率の評価式を用いて、Na型ベントナイトのモンモリロナイト部分密度に対する各载荷応力下での膨潤率を評価した結果（図-2）、モンモリロナイト部分密度（またはベントナイト乾燥密度）の増加に伴い直線的に増加し、载荷応力の増加に伴い低下する傾向を確認できた。

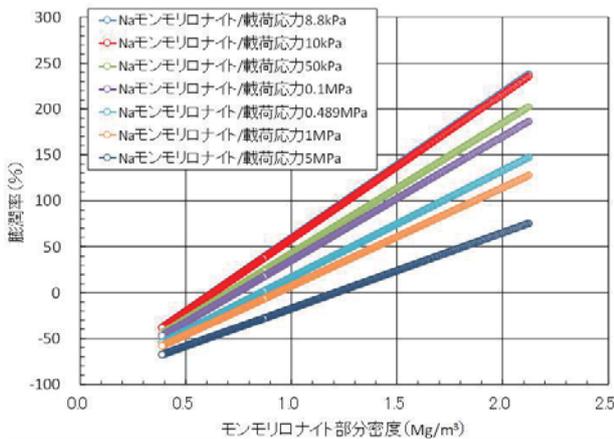


図-2 熱力学的モデルによる解析結果（モンモリロナイト部分密度に対するNa型モンモリロナイトの膨潤率）

今後、閉鎖後長期の処分場のベントナイト膨潤挙動予測ツールとしてモデルを整備するためにクニピアPのデータに基づいている現状のモデルでの低密度領域でのデータのばらつきを改善し、精度の向上を図る必要がある。さらには、室内試験による膨潤挙動データの取得とモデルとの比較・考察を並行して進める必要がある。

(3) 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

発熱量が大きい TRU 廃棄物（グループ4H）を現状のセメント系の固型化材により固化処理した場合、固型化材が直接放射線に曝されるため、放射線分解によるガス発生量が極めて多くなるこ

とが見込まれる。多量のガスの発生は廃棄体パッケージ内の内圧を著しく上昇させ、ガスの漏洩等により作業中の安全性や閉鎖後の長期的な閉じ込め性能に影響を及ぼす懸念がある。そのため、本検討では、ガス発生量の低減の可能性のある固型化材を対象に、TRU 廃棄物（グループ4H）の充填固化処理や均質固化処理を想定した固型化試験により固型化材に求められる要件や、照射試験によりガス発生量低減効果を確認して TRU 廃棄物の固化処理への適用性を確認し、有効なガス発生量の低減対策を示すことを目的とする。

2024年度は、ガス発生量低減の目標値を設定した上で、2023年度に選定した3種類の各固型化材の試験計画に基づき、ガス発生量を低減させるための改良試験を実施し、改良した各固型体についてガス発生特性、流動性及び強度特性に関わるデータを取得した。また、放射線分解による固型体からのガス発生の現象理解に必要なデータを取得した。

① 固型化材の改良とその目標値

ガス発生量の低減の指標となる目標値を設定するため、放射線挙動計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)を用いた解析により、グループ4Hの中でも最も表面線量の高い廃棄物（原燃再処理操業 不燃物I（熔融炉）⁶⁾を対象とした廃棄体パッケージ内の水素ガス発生量を算出した。閉鎖後数百年の閉じ込め性を持つ廃棄体パッケージBの空隙体積とガス発生量からパッケージ容器の内圧を評価し、内圧の限界値に対し40%以上の余裕を確保する条件に基づき、「固化体のG値が0.0041、自由水率4wt%以下」、というガス発生量低減の目安の目標値を設定した。

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、活性フィラーとしてメタカオリン及びシリカフェームを使用し、ホウ酸を無機添加剤とするジオポリマー系材料であり、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。

細骨材の添加と、アルカリ活性剤を Li+Na 型に置換する配合調整による改良試験の結果、ガス発生量の低減効果が確認され、乾燥した一部試料の固化体の G 値は目安の目標値 G 値0.0041 [$\mu\text{mol/gGP/kGy}$]以下、含水率4wt%を達成した(図-3)。

固化体のG値は試料の含水率および固相の細孔径に依存すると考えられている⁷⁾ことから、細孔中に付着する水膜の厚さを比表面積の分析結果に基づき算出し、固相の推定平均原子番号と単位水膜厚あたりの固化体のG値で比較した(図-4)。その結果、骨材無し試料では平均原子番号に対して単位水膜あたりのG値が比例する傾向を確認できた。

改良試験においてG値の低減傾向が見られたLi+Na型については、フロー試験において流動性の低下が見られ、28日養生後の強度においても他の配合で12~51MPaの高い強度を発現したのに対し0.9Mpaであったことから、ガス発生低減に向けた配合のさらなる最適化の必要性が示された。

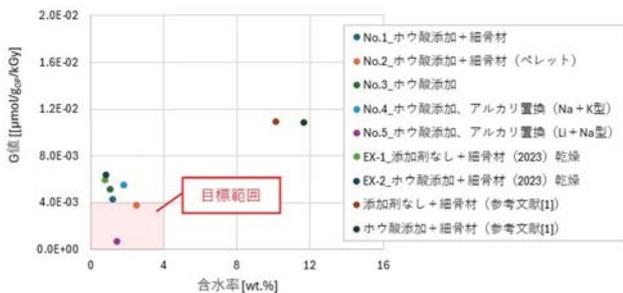


図-3 含水率に対する無機添加剤含有ジオポリマー固化体のG値

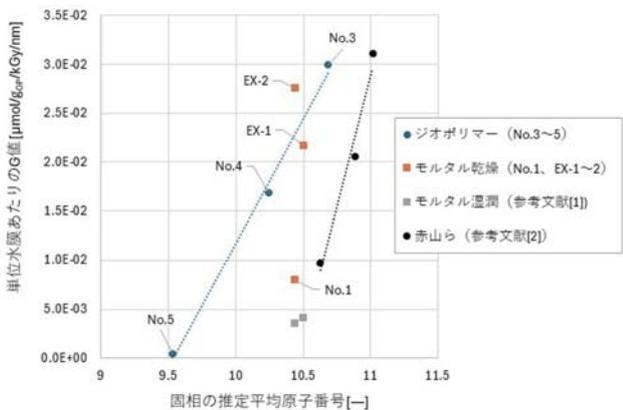


図-4 単位水膜厚あたりの無機添加剤含有ジオポリマー固化体のG値の固相の推定平均原子番号依存性

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、活性ファイラーとして高炉スラグ及びフライアッシュを使用し、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、混練水の添加量の抑制が可能なジオポリマー系材料であり、放射線分解ガスの要因とな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。

フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の混合比を変化させた配合調整による改良試験の結果、フライアッシュ多配合型において7日時点で約3%程度の含水率低減が確認された。さらに、加熱乾燥処理(200℃8h 加熱乾燥及び700℃8h 加熱乾燥)した試料は、G値を目安の目標値近くまで削減できることを確認した。TG-DTA分析から、高炉スラグジオポリマー固化体の間隙水は概ね自由水であるとみられるので、105℃までの加熱でもガス発生に寄与する間隙水の削減が十分可能と考えられる。

流動性(図-5)については、分散剤の効果により多くのケースでフロー値が150mm以上であることを確認し、フライアッシュを粗粒にしても大きな流動性の変化はなかった。28日養生後の強度についても、30Mpa以上であることを確認した。

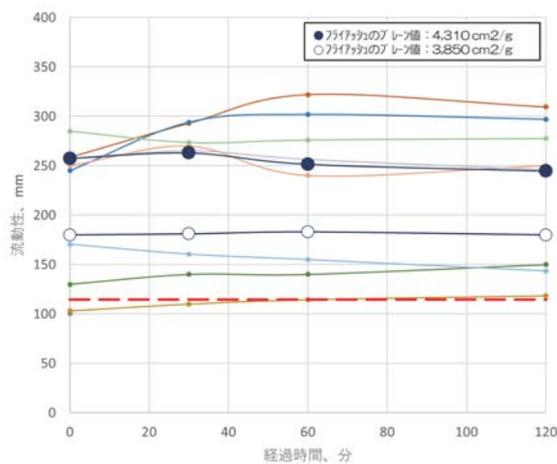


図-5 高炉スラグジオポリマーの流動性(フロー値)測定結果(フライアッシュ多配合型)

④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、一般のコンクリートに比べ水結合材比を限界近くまで低くして、水和反応に寄与しない自由水量も小さく、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。高強度高緻密コンクリートについては配合の自由度がほとんどないこと、バルク試料の固化体のG値が目安の目標値とされるくらい小さいことから、高強度高緻密コンクリートの水和反応やガス発生量への試料サイズの影響を確認した。

水和反応に関わる自由水量及び結合水量については、105℃及び600℃で乾燥条件での重量測定から、ペレット試料(φ6×10mm)およびバルク試料(φ50×100mm)ともに、材齢7日までにほぼ水和反応が進行し、それ以降はごく緩やかに進んでいると考えられ、両試料の水和反応の進行には大きな差異は見られない。TG-DTA分析においても自由水及び結合水の試料サイズによる明確な違いは見られなかった。

Ca(OH)₂のX線回折ピークの比は、ペレット試料では材齢による大きな変化はないのに対して、バルク試料では、材齢の経過とともに小さくなっており、TG-DTAの結果と同様の傾向であった。一方、Ca(OH)₂量は、ペレット試料では材齢の経過による変化は小さいのに対し、バルク試料では材齢の経過とともに減少する傾向が見られた。

空隙構造については、ガス吸着/BET法による比表面積及び5~50nmの空隙量の測定結果から、材齢が長くなるとともに、すなわち水和の進展とともに比表面積及び5~50nmの空隙量が低下する明確な傾向を示したが、試料サイズの違いによる差はなかった。水銀圧入法による細孔径分布の測定からも、ペレット試料及びバルク試料ともに材齢の経過とともに細孔径分布は大きな細孔から小さな細孔に分布が移行することを確認したが、両者の明確な差は見られなかった。

ガス発生特性についても、材齢とサイズの異なる試料を用いてγ線照射試験を実施した(図-6)。

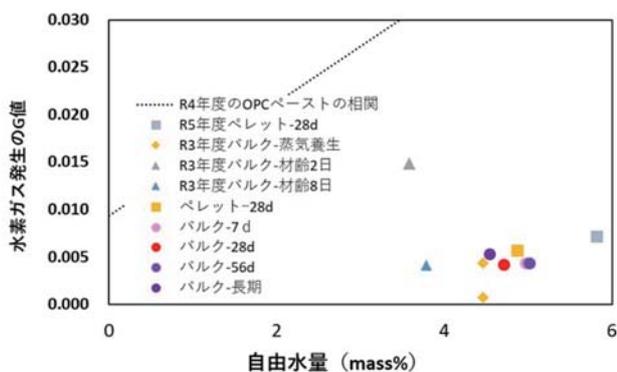


図-6 高強度高緻密コンクリートのG値と自由水量

照射試験の結果から、固化体のG値が0.004~0.005程度と低い値であり、ペレットとバルク試料ではG値に大きな差が見られなかった一方で、粉碎試料ではG値が高くなることが示された。これは、試料の粉碎に伴う微細空隙構造の変化や、水の存在形態への影響がガス発生挙動に大きく影響することを示唆する。

⑤成果と今後の課題

今年度検討した各固型化材のガス発生特性を表-1にまとめる。ジオポリマー系の固型化材は脱水縮重合反応により固化体中の水分が自由水として存在していることから、低温での乾燥処理が可能であり、乾燥処理によって目安の目標G値までガス発生量を低減できることを確認した。

一方、高強度高緻密コンクリートの固化体のG値については、バルク試料とペレット試料での試料サイズによる差は小さかったことから、粉碎試料は自由水のつき方が大きく影響を受けたことがそのG値が高くなった原因であると推察される。また、含水率はジオポリマーに比べ高いにもかかわらず、固化体のG値は0.004~0.005程度であった。

表-1 高強度高緻密コンクリートのG値と自由水量

固型化材	配合条件	養生期間	乾燥条件	試料形状	含水率 [%]	G値 [1/100 eV]
① 無機添加剤含有ジオポリマー	K型: 補骨材あり	28d	なし	粉砕	11.9	0.12
				ペレット(φ5mm)	1.22 (15.4)	0.0043
	K型: 補骨材あり	28d	120℃12~15h	粉砕	2.51 (13.5)	0.0052
				ペレット	1.06 (32.7)	0.0052
Na+K型 (50:50) Li+Na型 (3:5:6:5)	28d	なし	粉砕	1.79 (31.9)	0.0055	
			ペレット	1.44 (40.7)	0.0068	
② 高炉スラグ多配合ジオポリマー	高炉スラグ多配合型	28d	乾燥処理 (長期材齢の含水率相当まで)	粉砕	2.78 (6.0)	0.0390
				ペレット	0.4	0.0104
	フライアッシュ多配合型	7d	200℃8h	粉砕	0.3	0.0039
				ペレット	0.3	0.0074
高炉スラグ多配合型	7d	700℃8h	粉砕	0.4	0.0047	
			ペレット	0.4	0.0047	
③ 高強度高緻密コンクリート	基本配合	7d	なし	粉砕(小粒径) (φ50µm~1.18mm)	3.92	0.0922
				バルク	4.97	0.0044
	基本配合	28d	なし	バルク (φ50mm, H100mm)	4.71	0.0042
				ペレット (φ8mm, H10mm)	4.54	0.0053
		28d		ペレット	4.87	0.0057

今後の課題として、TRU廃棄物(グループ4H)を詳細に分類したガス発生量の解析に基づき目標値を再設定して固型化材の改良を実施することに加え、固化処理における要件を整理した上で、固型化材の適用性確認に必要な固型化試験計画を具体化する必要がある。

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NF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。

本事業では、より処分場での現象に近い3次元の影響が観測可能な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1に示す。これまでのガス移行モックアップ試験の実施²⁾により、破過の発生方向や排水量には方向による偏りが確認され、破過に至るまでのガス圧である破過圧は1次元系の要素試験のもの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った。モックアップ試験では要素試験と比較してガスの载荷方法や試験体の拘束に関する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、载荷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た。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。

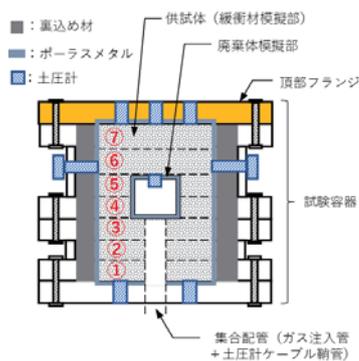


図-7 モックアップ試験装置

①ガス移行モックアップ試験の実施

昨年度、製作および飽和させた供試体に対して段階的に昇圧しながらガスを注入するガス移行モックアップ試験を実施し、破過現象に至るまでの排水現象や供試体の応力状態を観測した。ガス

注入過程の試験条件および手順として、以下のように行った。

- ①飽和供試体に背水圧を载荷 (7日間)
- ②背水圧を維持した状態で供試体内部からガス圧 (背水圧と同値) を载荷
- ③破過現象が観測されるまで7日間あたり 0.1 MPa ごとに昇圧

以上の手順で昇圧を行った結果、有効ガス圧 (= 注入ガス圧 - 背水圧 0.2MPa) を 0.8MPa まで昇圧した5日後に有効ガス圧の急激な減少が観測されたことから、緩衝材の端部に気みち (透気経路) が到達し、破過に至ったと判断した。図-2 に破過現象前後の供試体各面からの排水量を示す。

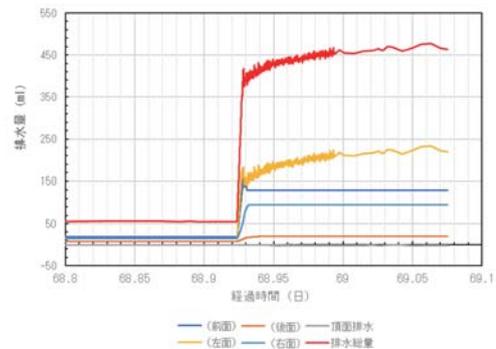


図-8 ガス注入過程の試験結果 (破過前後の排水量)

図-8 より破過直後は各面で排水が卓越するが、左面以外はすぐに排水されなくなったため、破過経路は供試体左面と判断できる。続いて、全土圧と排水量の経時変化から、供試体が破過現象に至るまでの挙動について確認した。有効ガス圧の昇圧に伴い、供試体内にガスが侵入し気みちが形成され、破過に至るまでを観測した。有効ガス圧を①0.0～0.4MPa②0.4～0.6MPa③0.6～0.8MPa④0.8MPaの4区間に分けた全土圧および排水量の経時変化を図-3 および図-4 に示す。①区間では供試体の外側各面の全土圧は上昇傾向であり、排水もほとんど確認されていないことから、供試体が内側から外側に向かって圧迫されており、ガス侵入はわずかであると考えられる。②区間では、供試体からの排水量は増加傾向になる。供試体の全土圧に着目すると、外側の全土圧は低下しているため、供試体内の水がガスに置き換わったことを示している。③区間では、低下傾向が継続しており、形成された気みちが進展し、供試体の端部まで到達していることを示している。④区間では、

内側の全土圧は 1.0MPa まで増加しており、注入ガス圧と同値であるため、破過に至っていることを示している。

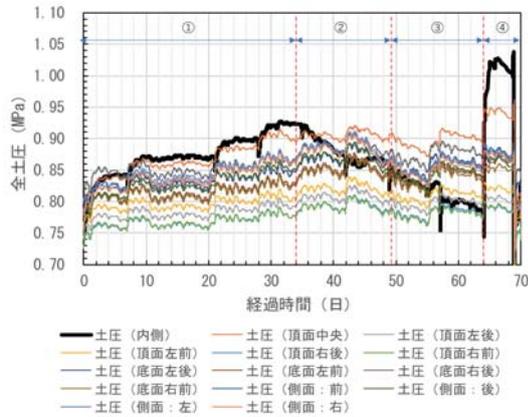


図-9 ガス注入過程の試験結果（全土圧の経時変化）

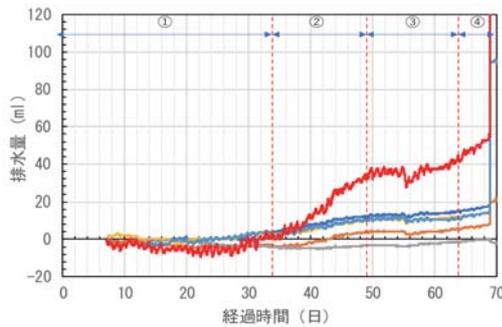


図-10 ガス注入過程の試験結果（排水量の経時変化）

今後は、緩衝材の自己修復機能を確認するため、破過現象を経験した供試体を様々な条件下で再冠水させ、再度ガスを注入する予定である。

②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およびケイ砂に代表される砂をそれぞれ模した粒子構造(図-11)の平衡構造をモンテカルロ構造解析によって求め、その空隙特性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。

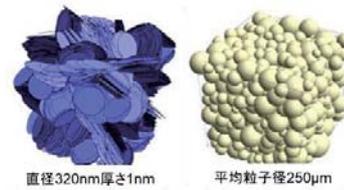


図-11 各粒子構造を模した構造解析モデル

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

前述した解析手法³⁾により、混合体を模した球-円板混合構造に対して、図-12 に示す 3 種類の粒径比 (球直径が円板直径のそれぞれ 1 倍、5 倍、10 倍) を設定して構造解析を行い、異なるサイズの球形粒子を含む混合体の透過率を比較した。

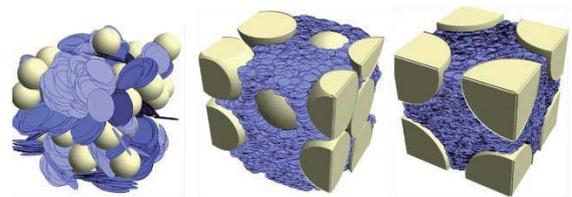


図-12 粒径比の異なる3種類の球-円板混合構造解析モデル

結果として、粒径比が小さいほど高空隙率・高透過率となり、粒径比が大きいほど低空隙率・低透過率を示した。これは粘土と同程度に小さな粒子が混合している場合には、粒子レベルの干渉が発生し粘土粒子の構造変化により空隙が形成され、実験結果は高空隙率・高透過率となると考察した。一方、比較的大きな粒子が混合している場合には、非粘土粒子が流路壁のような役割を果たし、その隙間を粘土粒子が埋めているような構造になり、流体の透過率は粘土部分によって律速され、実験結果は低空隙率、低透過率となる。この結果は、混合体の透過性について調査した様々な先行研究における実験結果とも整合することから、混合体の透過性は混合する粒子のサイズに依存して変化する可能性が示唆された。

今後は、粒径比によるマクロな構造変化への影響についてさらに検討を進め、定量的にモデル化することを目指す。

(4) 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 等廃棄物の地層処分において、人工バリアの構成要素の一つである廃棄体パッケージは、処分場の安全性の観点から、処分場の閉鎖前に加え閉鎖後300年を目安とした期間の閉じ込め性能が求められている³⁾。このため、廃棄体パッケージには、操作性、構造健全性、遠隔封入性、耐食性などの設計要件が設定されているが、製作性については実証的な検証が十分には行われていないのが現状である。

こうした背景を踏まえ、2018年度から2022年度にかけて実施された先行事業では、閉鎖後300年間にわたり閉じ込め性能を維持できる廃棄体パッケージの製作技術の整備を進めるとともに、実規模大のパッケージを実際に製作し、各工程における技術的課題を抽出しながら、その工学的成立性を実証した¹⁾ (図-13)。



図-13 実規模廃棄体パッケージ製作と各工程のポイント

本事業では、先行事業の成果を踏まえ、さらに閉じ込め性能の向上を図るべく、以下の項目について検討を進めている。

- ・ 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
- ・ 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
- ・ 表面改質による SCC 対策技術の整備

① 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

本検討では、2023年度に乾燥工程を必要としない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に取り組み、廃棄体パッケージへの適用に向けた実現性を確認した。2024年度は、後充填方式に加え、先行事業で実証したプレキャスト方式及び技術的に応用可能な先充填方式を含む3つの工法について施工特性を整理し、それぞれの工法の組み合わせにより、多様な製作工程への柔軟な対応が可能であることを示した。

② 実規模廃棄体パッケージ溶接部の健全性評価

閉鎖後に長期間の閉じ込め性能が求められる廃棄体パッケージにおいて、蓋溶接部は最も重要な部位である。このため、先行事業で製作した実規模廃棄体パッケージを解体し、実際の製作工程を経た蓋溶接部を対象に調査を行い、その健全性を評価した。

蓋溶接部の各部位から採取した試験片による引張試験では、熱影響部において軟化が確認され、破断は主に熱影響部と母材の境界付近で発生した。また、硬さ試験においても熱影響部の顕著な硬度低下が見られ、位置によるばらつきも見られた。これらの機械的特性は、事前に実施した溶接試験体による試験結果に比べて10%程度低下していることが確認された。

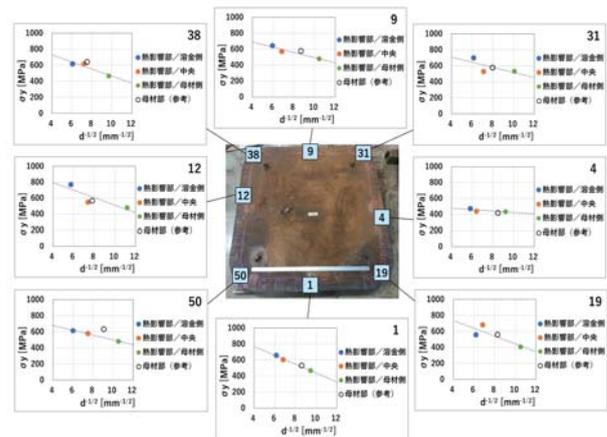


図-14 熱影響部内の各領域における結晶粒径と降伏強度の関係

この原因として、蓋溶接後に実施した溶接後熱処理 (Post Weld Heat Treatment、以下、PWHT という。) の過程で、過度な熱履歴により結晶粒が

粗大化した可能性が懸念された。しかし、熱影響部における結晶粒成長に関する既往研究を踏まえた検討の結果、PWHTによる追加的な結晶粒成長の影響は、実質的に無視できるレベルであることが明らかとなった。さらに、熱影響部内における結晶粒径と降伏強度の関係を分析した結果、母材との境界に近づくほど結晶粒径は小さくなる一方で、降伏強度はむしろ低下傾向を示しており、転位密度の減少や析出物の粗大化といった組織変化が、機械的特性低下の主な要因である可能性が示唆された。

以上のことから、実際の製作工程を経た蓋溶接部では、局所的に強度や硬さの低下傾向が認められたものの、重大な欠陥は確認されておらず、設計上想定された健全性はおおむね確保されていると評価された。ただし、熱影響部における局所的な軟化が長期的な耐久性に与える影響を踏まえ、今後は溶接施工条件およびPWHT条件の最適化に向けた、さらなる評価が必要である。また、設計段階においては、製作による特性の変化を見込んだうえで、実機における機械的特性が試験体で得られた強度試験結果よりも約10%程度低下する可能性を考慮した検討を行うことが有効である。

③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は、閉鎖前の作業時における安全性として、落下や火災などの偶発的な異常事象が発生した場合でも、閉じ込め性能を維持することが求められる。本検討では、クレーンで吊り上げた状態を想定し、高さ8mに相当する位置から落下した場合の安全性評価を実施した。

解析には、先行事業で製作された実規模の廃棄体パッケージ（プレキャスト方式によるパッケージ内充填材を有する）をモデル化し、蓋側角部コーナー落下、蓋側辺部落下、胴部辺部落下、胴部水平落下の4種類の落下姿勢を想定して評価を実施した。その結果、蓋溶接部の変形挙動および応力拡大係数の分析から、最も厳しい条件は蓋側辺部からの落下であることが明らかとなった。この結果を踏まえ、パッケージ内充填材を後充填方式とした解析モデルも新たに作成し、同様に蓋側辺部落下を想定した1ケースを追加して評価を行った（図-15及び図-16）。

蓋溶接部における延性破壊の可能性について

は、接地後の変形が主に圧縮に支配されていたことから、発生リスクは低いと評価された。一方、脆性破壊に関しては、プレキャスト方式における蓋側辺部落下時に最大で138.6 MPa $\cdot\sqrt{m}$ の応力拡大係数が算出され、脆性破壊を回避するためには、それを上回る破壊靱性を有する材料の採用が必要であることが示唆された。しかし、別途実施した破壊靱性試験によって得られた値（参考値）は、この解析で求めた応力拡大係数を十分に上回っていたため、脆性破壊の可能性は低いと判断された。

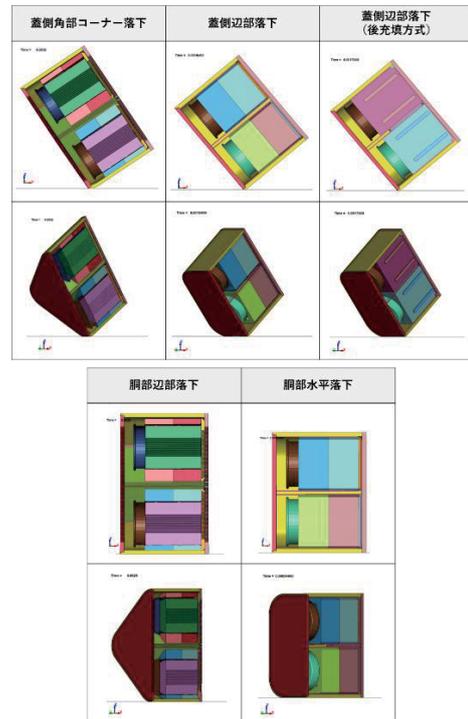


図-15 落下時の最大荷重発生時の変形断面（全体）

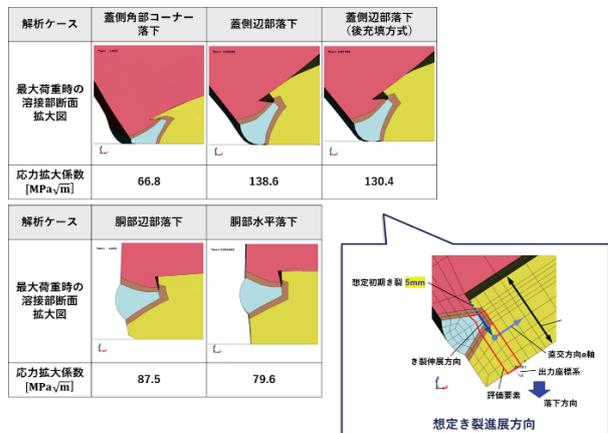


図-16 落下時の最大荷重発生時の変形断面（溶接部拡大）

一方、実規模廃棄体パッケージでは、容器内部のドラム缶及びパッケージ内充填材は、挿入されたままの状態、特に容器に固定されているわけではない。このため、蓋側角部コーナー落下及び蓋側辺部落下のケースでは、図-17 及び図-18 に示すように、落下衝撃により容器内でドラム缶が移動し、容器の蓋板と接触する「2次衝突」の挙動が確認された。

この2次衝突によってドラム缶が延性破壊する可能性は低いものの、衝撃力はそれぞれ 150kN 及び 81kN という高い衝撃力が発生しており、この影響によりドラム缶の蓋が外れるリスクが懸念される。

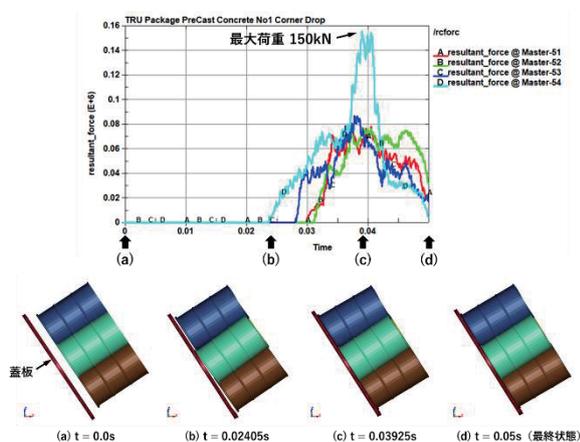


図-17 蓋側角部コーナー落下時の蓋板とドラム缶の接触荷重

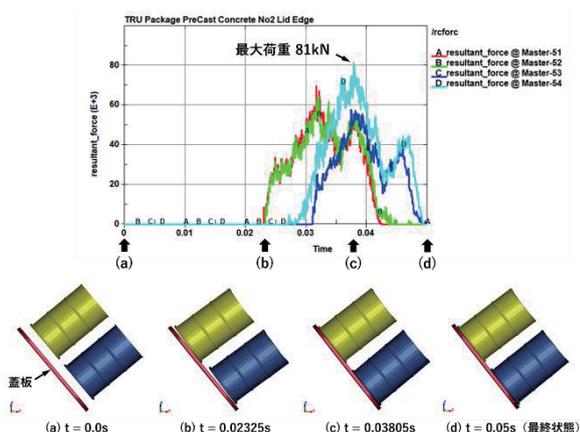


図-18 蓋側辺部落下時の蓋板とドラム缶の接触荷重

安全性およびリスク評価の観点からは、2次衝突によって容器内部でドラム缶の蓋が外れたり損傷したりすることで、廃棄体の粉碎物が内部に飛散し、さらに蓋溶接部が損傷した場合には、こ

れらが容器外へ飛散する可能性も否定できない。このような事象に対しては、今後さらなる試験やシミュレーションによる評価が必要である。

特に、断熱材の粉碎に伴って発生する粉塵の外部拡散リスクは、落下後の迅速な復旧作業を困難にする要因となり、施設全体の安全確保にも影響を及ぼすおそれがある。したがって、本評価結果を踏まえ、今後の設計や運用において適切な対策を講じることが、安全性のさらなる向上に向けて重要である。

④表面改質による SCC 対策技術の整備

閉鎖後、廃棄体パッケージの閉じ込め性能を脅かす要因の一つとして、蓋溶接部における応力腐食割れ (SCC) の発生が挙げられる。この対策としては PWHT があるが、廃棄体の種類によっては熱的制約により適用が困難な場合がある。

本検討では、正面フライス加工と平面バニシング加工を組み合わせた機械的手法による SCC 対策技術の実用化に向けた検討を進めている。

令和 6 年度は、加工条件や応力再分配メカニズム、CNC 加工機による適用性について文献調査等を通じて検討を行い、両加工法の相互作用が応力場に与える影響評価の重要性を明確にした。

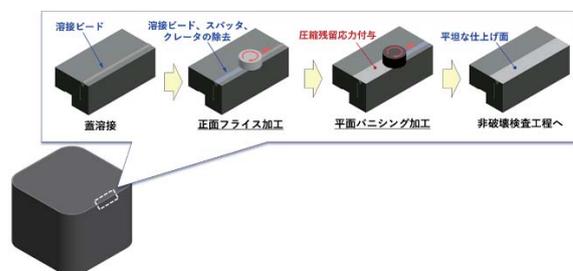


図-19 応力改善加工の施工プロセス

令和 7 年度以降は、実証試験を通じて加工条件の最適化および長期的な性能評価を進め、最終的には廃棄体パッケージの長期健全性と地層処分の安全性向上への貢献を目指す。

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系統のフィルター材に 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、地層処分の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⁾。

還元性雰囲気下では AgI が易溶性であるため、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収着性が乏しく長半減期（半減期1570万年）である。そのため、地質媒体の水理特性（透水性、動水勾配など）によって、I-129の安全評価における影響の程度は大きく変化する。

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ガラス固化技術の、実用化の可能性を提示した⁸⁾。

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、これまでに確認した、ヨウ素の規格化浸出率が（時間）^{1/2}に比例するガラスの溶解現象の長期的な継続性の説明と、その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、ヨウ素を含む二次鉱物（ $(O_2Pb_3)_2(BO_3)I$ ⁹⁾（以下、PbBOI-611相という）の長期的な挙動の推定を実施している。

①ガラスの溶解現象の長期的な継続性の説明

2022年度までに実施した、長期浸漬試験の結果と、ガラスの各元素間の結合様式の理論解析から、ガラスの溶出過程は、鉛の溶出とヨウ素とホウ素の溶出とが同時かつ調和的に起きるものであると推察した⁸⁾。

そこで、2023年度以降は、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長期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ている。

2023年度に変質層及びその直下の非晶質層には濃度勾配がなく、また、その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いことを確認した。

2024年度は、この結果が、ガラスの主要元素の溶解が調和的に生じることを示すものであることを確認する目的で、内部のガラス層の濃度勾配を分析することとした。2023年度と同一の試験体から集束イオンビーム加工（FIB）によってより内部までの試料を切り出し、STEM-EDS分析を行った。その結果、図-20に示す通り内部のガラス層では、各元素の濃度はほぼ一定で、存在比の変化も見られないことが明らかになった。このことは、ガラスを構成する元素ごとの溶解速度に差がなく、ガラス層表面では各成分が調和的に溶解していることを示すものと考えられた。

図-21にベントナイト平衡水に4721日間浸漬したガラス試料の断面のSTEM像を示す。表面で生成するハイドロセルサイト（図ではHCと標記）からなる変質層と内部のガラス層との間の非晶質層の厚さを、試験期間の異なる試料間で比較したところ、点数が少ないため断定することはできないものの、図-22に示すように、浸漬時間と非晶質層の厚さとの間に一定の関係があることが分かった。

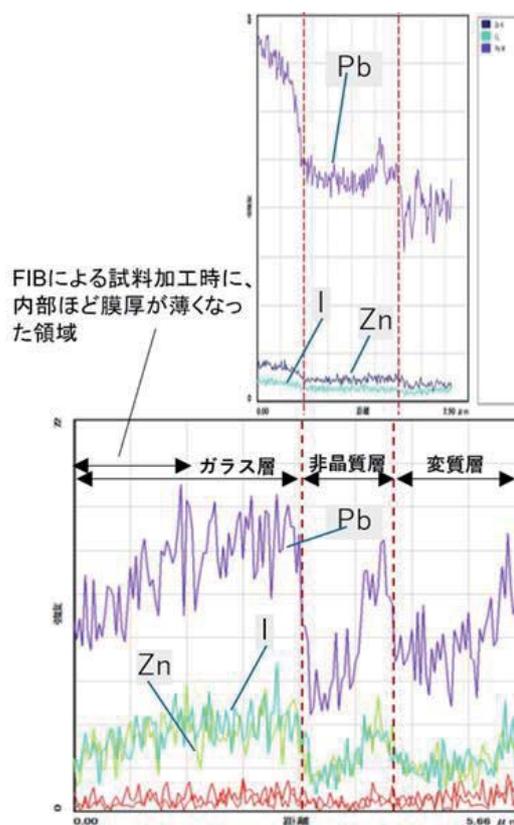


図-20 STEM-EDSによるヨウ素, 鉛, 亜鉛の線分析の結果

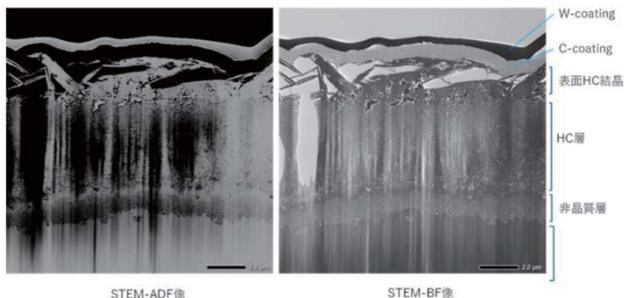


図-21 ベントナイト平衡水に4721日浸漬後のSTEM像（左：明視野，右：暗視野）

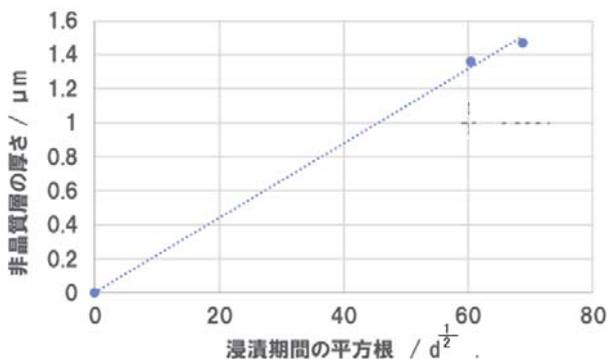


図-22 (時間)^{1/2}に対するSTEM像から算出した非晶質層厚さの関係

②ヨウ素を含む2次鉱物の同定

2023年度までに、浸漬液に含まれるイオンの濃度が極端に低く概ね 10^{-3} mol/l を下回る場合に、ヨウ素と鉛とからなる球状粒子である、PbBOI-611相が析出することを確認した。

この相に固定されるヨウ素量は、液相のイオン濃度が低い場合にガラスから溶出するヨウ素の90%を超えるため、地下水組成の変動などで析出条件が満たされなくなった場合のこの相の挙動によっては、この層からのヨウ素の溶出量がガラスの溶解によるそれを上回り、安全性に影響を及ぼす恐れがある。

そこで、2024年度は、ガラス表面に析出したPbBOI-611相の、ベントナイト平衡水中での挙動について調べることにした。

図-23に、 5×10^{-5} mol/l NaCl 水溶液に371日間浸漬し、表面に形成したPbBOI-611を採取した試験片、及びこの試験片をベントナイト平衡水に7日間再浸漬した後のSEM像を示す。

再浸漬7日後の試料では、球状のPbBOI-611相の表面が荒れた状態になっており、一部では表面に穴の開いたような様子が観察された。図の矢印部の球形粒子をFIBによって切断した断面

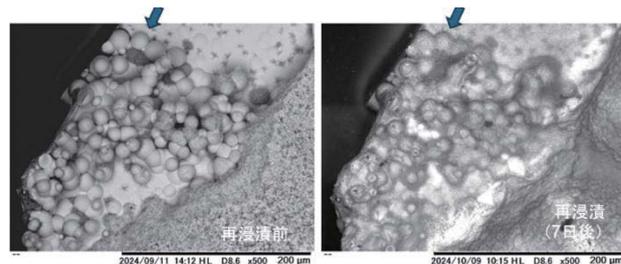


図-23 再浸漬前（左）及び再浸漬7日後（右）の試験体のSEM像

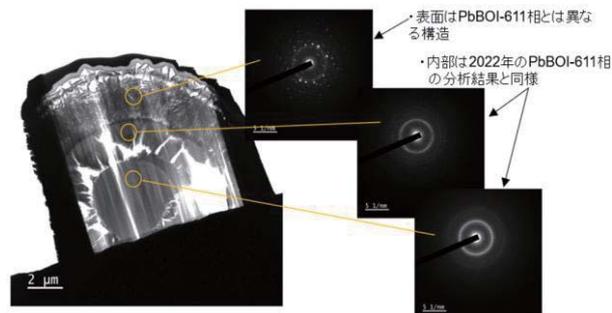


図-24 再浸漬7日後のPbBOI-611粒子断面の電子線回折結果

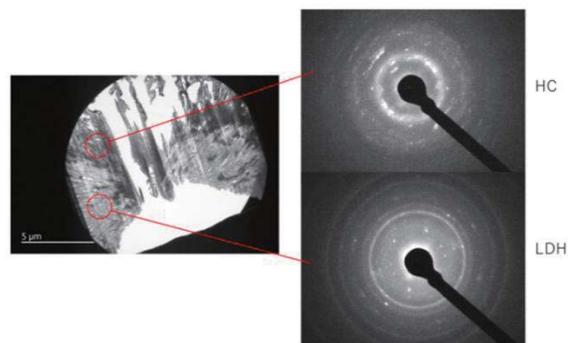


図-25 再浸漬30日後のPbBOI-611粒子断面の電子線回折結果

のSEM像及び電子線回折像を図-23に示す。

ベントナイト平衡水へのガラスの浸漬では、ヨウ素がホウ素のそれに対して調和的に溶出すること及びPbBOI-611相が生成しないことを確認している。

再浸漬の結果、図-24に示すように、球状粒子の表面近傍のPbBOI-611相は変質して別の相が析出していることが分かった。

また、同様の手順で30日間再浸漬した後の球状粒子の断面を分析した結果、PbBOI-611相が消失し、ハイドロセルサイトや層状複水酸化物(LDH)と考えられる相が新たに析出していることが分かった(図-25)。この粒子について、組成像の明度の異なる複数の点をEDSによって分析

したところ、いずれの分析点からもヨウ素のシグナルは検出できなかった（図-26）。

イオン濃度(NaCl 濃度)0.05mMのきわめて希薄な浸漬液への浸漬では、BPI ガラスの溶解が速く、液相での鉛、ホウ素及びヨウ素の濃度が高まった結果として、ヨウ素を濃集する PbBOI-611相が析出するが、液相をこの相の非析出条件であるベントナイト平衡水に交換すると、速やかに分解してハイドロセルサイトを生成することが明らかになった。

この結果は、地下水が極めて希薄な環境ではヨウ素の一部が PbBOI-611層に固定されるが、液

相の濃度が高まる、炭酸成分が供給されるなどの環境の変化が生じた場合、短期間で固定されたヨウ素が放出されることを示している。

従って、処分場の候補地の地下水のイオン濃度が極めて低い場合には、ヨウ素の濃集が起きる可能性と、将来の地下水環境の変化によって濃集したヨウ素が再度放出される可能性を考慮しておくことが必要であるが、そのためには、この相が析出する条件で固定されるヨウ素量の見積りや、この相からの溶出時の影響や、マスバランスの検討が必要である。

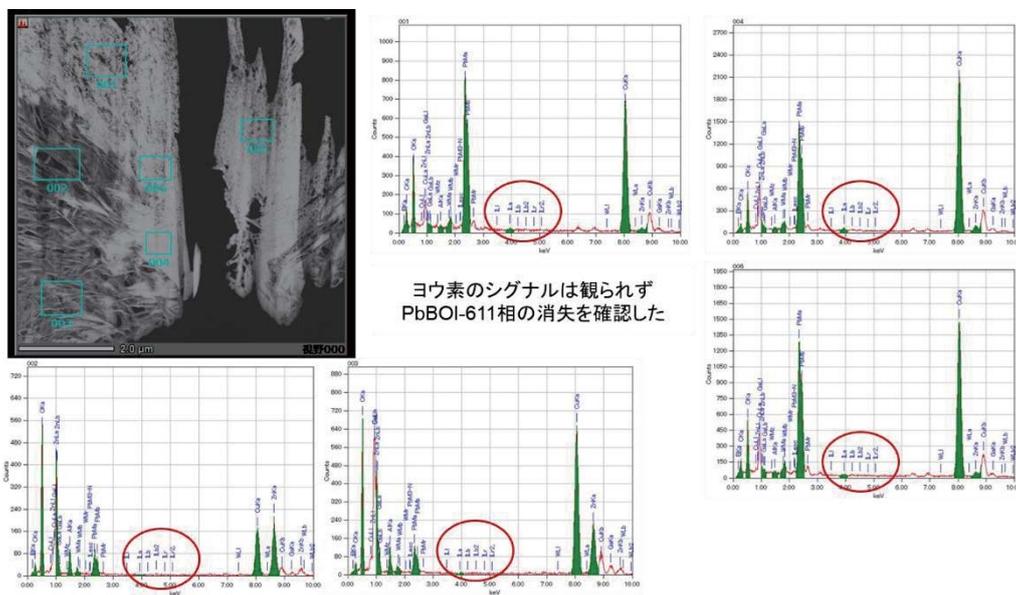


図-26 再浸漬7日後のPbBOI-611粒子断面の電子線回折結果

- 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認技術開発 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 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、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認技術開発 ニアフィールド長期環境変遷評価技術報告書、2024
- 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、令和6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認技術開発 ニアフィールド長期環境変遷評価技術報告書、2025
- 5) 佐藤治夫、地層処分における人工バリアとしての緩衝材の膨潤と熱力学、原子力バックエンド研究、Vol. 27, No. 2, pp.105-114, 2020.
- 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一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) Akayama, R., Matsuyama, K., Yuhara, M., Yamashita, Y., Yamamoto, S., Haruguchi, Y. & Toyohara, M., Fundamental study on hydrogen production by radiation related to material properties of boron-containing geopolymers with reduced water content, J Nucl Sci Technol, Volume 61, 2024 - Issue 12, pp.1567-1581, 2024.
- 8) 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
- 9) Kuan, L., Alimujiang, Y. and Zhi, S., $[O_2Pb_3]_2(BO_3)_2I$: 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)

3. 沿岸部地質環境調査・処分システム評価統合化技術開発

◇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地域」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、さらなる信頼性向上に向けた工学的対策技術に係る高度化の方向性の一つとして、「地上・地下施設の総合的な設計の検討」が示された²⁾。

2024年度から開始した本事業では、沿岸海底下における地下施設の設計に対する実現性の向上、建設・操業の工程等の合理化をはかるための技術的な方策を示すことを目的とし、沿岸海底下での建設・操業の観点から課題等を整理し、代替設計或いは代替建設・操業技術などの対応策の具体化を進める。

なお、本事業は、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、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6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）（沿岸部地質環境調査・処分システム評価統合化技術開発）」であり、本報告は当センターの担当分である。

◇2024年度の成果³⁾

(1)実施概要

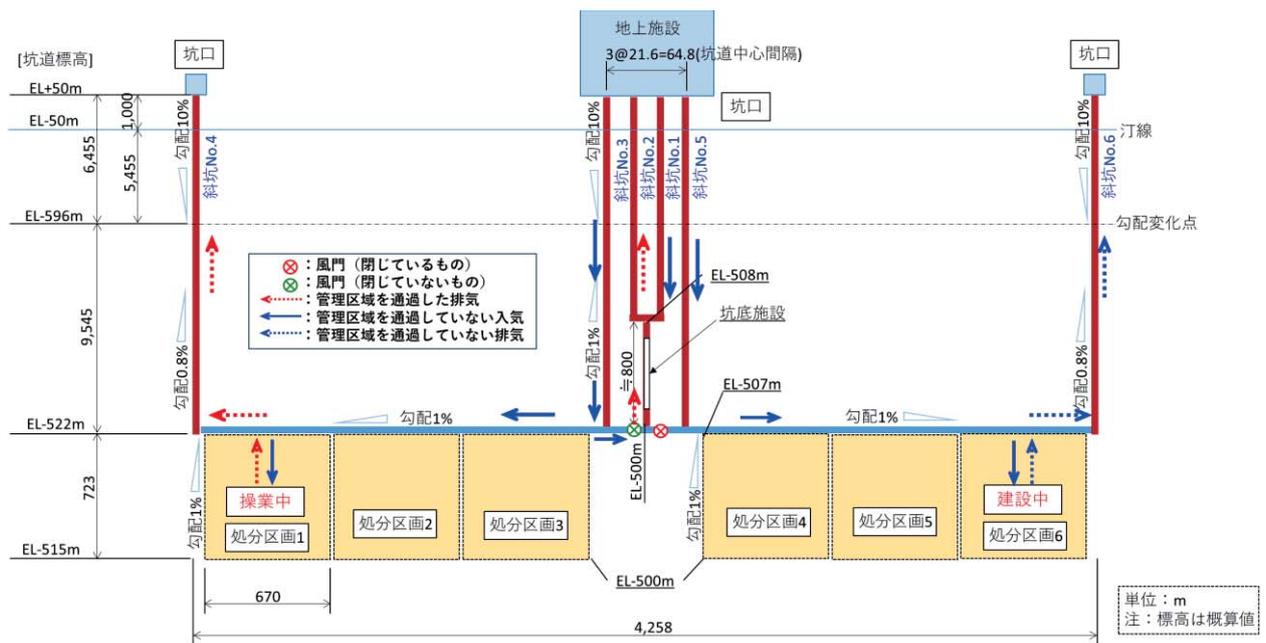
本事業では、上記の課題の整理と対応策の具体化に向けて、以下に示す3つのステップで検討を進める。まず、a)ジェネリックな地質環境を想定した沿岸海底下の処分場の建設・操業における課題や対応策等を整理する。次に、b)沿岸海底下の仮想SDM（Site Descriptive Model）を対

象として、処分場の設計や成立性について検討することにより建設・操業に関する課題や対応策等を具体化する。さらに、c)沿岸海底下における処分場の設計オプションや建設・操業に関する技術オプションを整理する。2024年度は、前述のa)のうち、建設における課題及び対応策を検討した。

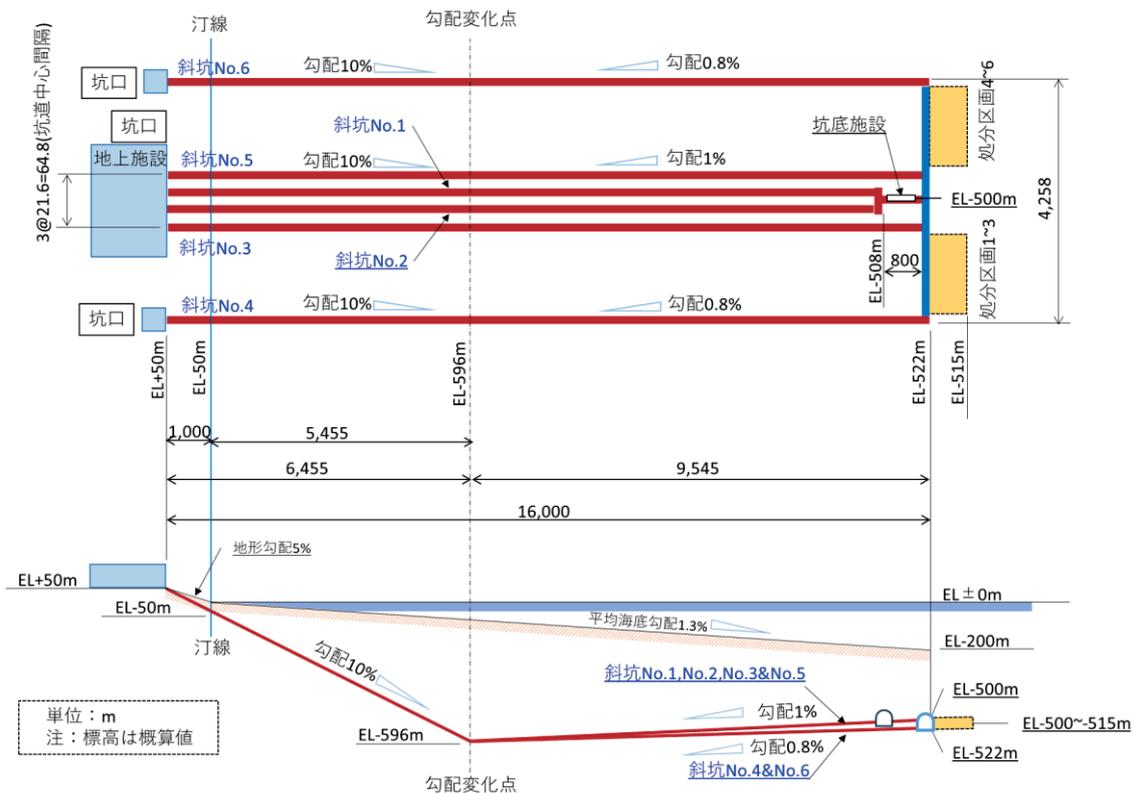
(2)沿岸海底下の地下施設の設計における建設に関わる課題と対応策等の整理

沿岸海底下の地下施設の建設における一般的な課題や対応策等を整理するために、建設期間（アクセス坑道の建設から処分区画の1つ目の掘削完了まで）を算出するとともに、陸域と比較した場合の建設の課題の抽出やその対応策を整理した。地下施設は、NUMOの包括的技術報告書⁴⁾（以下、NUMO-SC）における横置き・PEM（Prefabricated Engineered Barrier System Module）方式を対象としたデッドエンド型の処分区画に基づき、斜坑と水平坑道により陸域の地上施設と接続した。また、研究会における検討を参考とし、まずは海岸線から沖合に15kmの位置に地下施設を設置することとした。課題抽出のために設定した施設の概念図を図-1に示す。NUMO-SCの建設と操業の工程と同様に処分区画1から3と4から6の2つのグループに分け、掘削工程の処分区画（非放射線管理区域）と操業工程の処分区画（放射線管理区域）に対して同時に作業することとし、換気や作業動線の独立性を確保できるレイアウトとした。また、本検討で対象とした建設の期間は、アクセス坑道、坑底施設、連絡坑道及び処分区画の1つ目の掘削完了までとした。なお、これらの設定は、法定要件や事業要件等を整理した結果を基にした。

本検討で得られた沿岸海底下における施設設計の課題、対応策、留意点等をQ（品質）、C（コスト）、D（工期）、S（安全）及びE（環境）に分類して整理した結果を表-1に示す。Dに関しては、アクセス坑道長が16km程度の場合（図-1参照）は、月進60.8m⁵⁾とすると掘削に約22年かかり、建設工程への影響が大きいことがわかった。これに関する対応策としては、掘削手順（上下半分分割施工）や作業工程（掘削する切羽を増やす）、掘削速度の速いTBM工法の適用等が考えられる。表-1のC、S及びEに関する方策としては、アクセス坑道の本数を減らすことが有効である。図-2の



(a) 概要図（建設（掘削）と操業の同時進行のための処分区画と換気の独立区分）



(b) 平面図及び断面図

図-1 課題抽出のための施設設計の概要（海岸線からの地下施設の距離 15km）

スクが高まる可能性があるため、山岳や海底のトンネルの難工事の事例等を調査し、沿岸海底下の地下施設的设计・建設で留意すべき事項や対応策を整理した。

①沿岸海底下で想定される建設時の難工事への対応

- ・山岳トンネルでは、地質調査、設計、施工を順に進める中で施工段階においても地質調査を実施して、設計前の地質調査で把握できなかった地山の状態を確認し、必要に応じて設計を修正して施工する⁶⁾。
- ・青函トンネルの工事の設計前地質調査⁷⁾において、地表や海上からの調査では難工事と関連がある断層や破碎帯を把握できていなかった。現在の調査技術で把握可能かどうかを検討する必要がある。
- ・設計段階でリスクを把握していても、施工時に回避できない山岳トンネルや青函トンネルの工事の事例がある^{7), 8)}。

以上より、地下施設の建設では、トンネル工事のプロセスを参考にし、施工時の地質調査を反映した設計の修正などの考え方を取り入れることにより難工事のリスクを低減することが重要と考えられる。

②沿岸海底下で留意すべき地山条件や事象

沿岸海底下で難工事となる可能性がある地山条件や事象を整理した。沿岸海底下の地質構造は陸域と共通する部分もあると考えられることから、陸域の山岳トンネルの難工事の事例も参考にした。

- ・山岳トンネルで難工事の多い地山条件は、変化の激しい地質、断層、軟弱地山、未固結地山である³⁾。それらが原因となる主な事象は、地山の崩落や大量湧水である³⁾。
- ・青函トンネルの先進導坑と作業坑の工事において、工期に対して影響が大きかった事象は異常出水（原因は、断層や破碎帯、掘削による地山のゆるみ⁷⁾）であり、海水の流入が沿岸海底下特有の事象である。

海岸線付近の地上施設から海底下 300m 以深の地下施設までのアクセス坑道を設置する場合、第四紀の未固結地山が存在する可能性があることや、NUMO-SC では断層がアクセス坑道の設置領域に分布することを許容することから、

掘削時の大量湧水などのリスクを低減するための事前の対策が必要である。

③沿岸海底下における難工事リスク低減策の例

沿岸海底下の地下施設的设计段階における難工事リスク低減策を事例に基づき以下のように整理した。

- ・設計：精密調査段階の地下調査施設の建設時に得られる地山の詳細な情報の活用。
- ・施工計画：前方切羽探査と補助工法等を用いた設計の修正（前方切羽探査や補助工法は、山岳トンネルの技術書^{6), 9)}で整理されている技術を活用）、先進導坑や作業坑から本坑への地質環境情報のフィードバック¹⁰⁾及び情報化施工の活用（施工時の地質調査情報の整理や並行する先行掘削坑道の情報の活用など）。

以上の点を踏まえ、今後は、設計と建設を連携させた対応策の検討も進める予定である。

- 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、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、令和 6 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（沿岸部地質環境調査・処分システム評価統合化技術開発） 調査報告書、2025
- 4) 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－、NUMO-TR-20-01、2021
- 5) 建設物価調査会、国交省土木工事標準積算資料（河川・道路編）令和 6 年度版、2024
- 6) 土木学会、2016 年制定トンネル標準示方書 [共通編]・同解説、[山岳工法編]、同解説、2016
- 7) 鉄道界図書出版、青函トンネル技術のすべて、1986
- 8) 土木研究所、土木地質・地盤リスクに応じたトンネルの補助工法の選定に関する研究、令和 2 年度研究開発プログラム報告書、2021、<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-program/2020/pdf/pro-7-5.pdf>（最終確認 2025. 7. 22）
- 9) 災害科学研究所トンネル調査研究会、トンネル技術者のための地盤調査と地山評価、2017
- 10) 深沢成年、土谷幸彦、服部修一、朝倉俊弘、家田仁、北海道と本州を繋ぐ世界最長の海底トンネル－新たな技術で困難を克服した青函トンネルの建設－、建設コンサルタンツ協会 戦後インフラ整備事業研究会、「インフラ整備 70 年」講演集、vol. 3、pp. 28-35、2021、https://www.jcca.or.jp/infra70n/files/PJNO_16.pdf（最終確認 2025. 7. 22）

（地層処分工学技術研究開発部）

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。

原環センターでは、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）に関する技術開発を担当している。先行事業において、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、本事業でも引き続き「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」として技術開発を継続している。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 6 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。

◇2024 年度の成果¹⁾

(1) 調和溶出モデルの評価

本項目では、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。

2024 年度は、照射済 PWR ハルを用いた溶出試験の一環として詳細なインベントリ評価を行った(図-1)。C1-36 と Co-60 は、2023 年度に評価した BWR ハルと比較して 1 桁から 2 桁程度低いレベルであった。分析に供した PWR ハルは比較的新しい MDA (Mitsubishi Developed Alloy) であり、材料中の不純物濃度が低いためと考えられる。また、MDA は耐食性向上の観点から Nb が含まれ、安定な Nb-93 が放射化して Nb-94 が顕著に生成した。一方で、Nb-94 インベントリを入力として第 2 次 TRU レポート²⁾に準拠した安全評価解析 (GoldSim) を行ったところ、C-14 と比較して Nb-94 が被ばく線量に及ぼす影響は顕著ではないことが分かった。

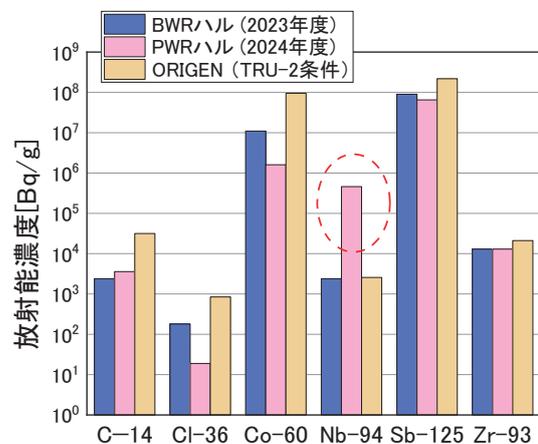


図-1 PWR ハルおよび BWR ハルのインベントリ比較と ORIGEN による放射化計算結果

(2) 瞬時放出モデルの評価

本項目では、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に関する技術開発を目的としている。

2024 年度は、比較的溶解しやすい酸性条件下における粉末ジルコニア (ZrO₂) の溶解試験を継続し、固相試料の比表面積から算出した規格化溶

解量及び溶解速度について考察した。瞬時放出低減対策については、酸化膜を模した ZrO_2 と Zr 金属粉末を混合し、Spark Plasma Sintering (SPS) で焼結固化を試行した (図-2)。その結果、温度 1250°C では局所的に酸素 (ZrO_2) の多い領域が認められるものの、Zr 金属に閉じ込められていることが分かった。また温度の上昇とともに酸素が固溶し、温度 1700°C では ZrO_2 が全て Zr に還元された。このことから、本手法が瞬時放出抑制技術として見込みがあることが示された。

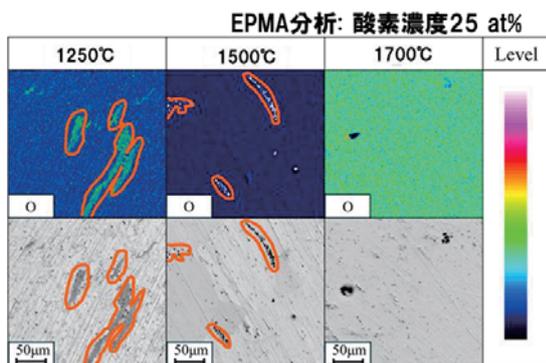


図-2 SPS による ZrO_2 粉末と Zr 粉末の焼結固化

(3) 炭素 14 化学形態の評価

本項目では、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加速器質量分析 (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。

2024 年度は、市販の炭素 14 トレーサ (ギ酸、ホルムアルデヒド、酢酸、エタノール、シュウ酸の 5 種) を用いて極微量 (0.05Bq 以下) の炭素 14 化学種の混合溶液を調製し、高速液体クロマトグラフィー (HPLC) による分離と AMS までの一連の操作による炭素 14 化学種の回収率を評価した (図-3)。その結果、測定誤差やギ酸、ホルムアルデヒド、酢酸の分離性に課題が残るものの、シュウ酸とエタノールについては HPLC と AMS により分離・定量できる可能性が示された。今後は HPLC を実サンプルに適用するとともに、炭素 14 化学種の分離技術の更なる高度化を図る。

計算科学研究については、炭素固溶 Zr 金属モデルを構築し、反応力場 (ReaxFF) として、既往研究³⁾で報告されている反応力場 (ReaxFF) を使用して、反応分子動力学シミュレーションを実施した。その結果、加速条件下 (温度 1500K) では

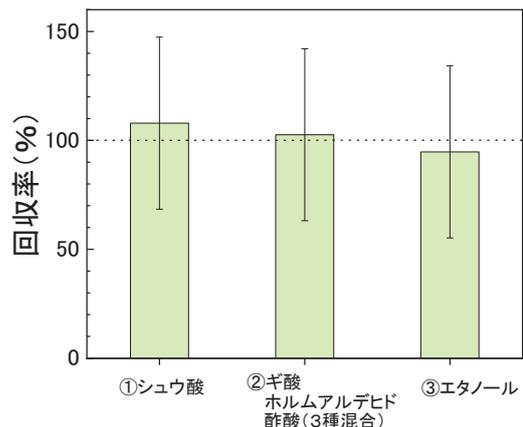


図-3 炭素 14 化学種の回収率 (HPLC と AMS)

あるものの、Zr 金属中の炭素が反応してメタン (CH_4)、メタノール (CH_3OH)、エタノール ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) などが生成した。このように、炭素の拡散と酸素や水素との化学反応を追跡できることから、反応分子動力学シミュレーションがハル・エンドピースから溶出する炭素化学種の生成プロセス検討に有効なことが分かった (図-4)。

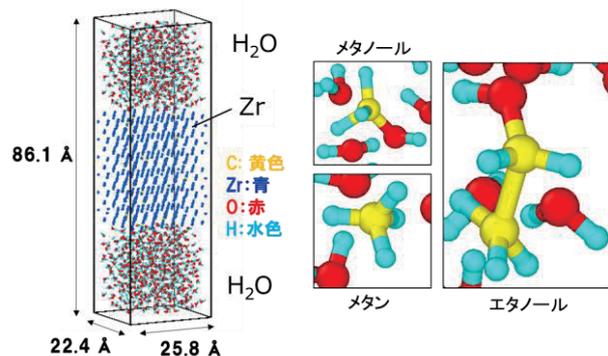


図-4 炭素固溶 Zr 金属モデルと反応分子動力学シミュレーションで認められた炭素化学種の例 (水相)

- 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 6 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) 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構, TRU 廃棄物処分技術検討書-第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005
- 3) Merinov, B.V., Mueller, J.E., van Duin, A.C.T., An, Q., Goddard, W.A.: ReaxFF Reactive Force-Field Modeling of the Triple-Phase Boundary in a Solid Oxide Fuel Cell, *J. Phys. Chem. Lett.* **5**, 4039-4043, (2014)

(FE・BEイノベーション研究部)

5. 高線量廃棄物の保管管理方策の検討 (令和6年度) 業務

◇事業の概要

福島第一原子力発電所(以下、1Fという。)の廃炉に向けた喫緊の課題として、デブリの試験的取り出しに続く段階的な規模拡大等に伴って発生する高線量の廃棄物(以下「高線量廃棄物」という。)への対処に加え、最終処分に至る廃棄物ストリームの具体化に時間を要する可能性に留意した長期の安定保管が期待できる容器(以下「高線量保管容器」という。)の開発が挙げられる。

1Fにおいては、既に焼却処理や減容処理(及びスラッジの安定化処理等)が実践・計画され、10年先を見通した保管・管理計画が具体化されつつある(固体廃棄物貯蔵庫や大型廃棄物保管庫等での保管・管理)。一方、デブリの取り出しを含む1F廃炉の進展に伴い発生する高線量廃棄物に関する高線量保管容器の開発やそのための開発計画は、未だ具体化に至っておらず喫緊の課題であることをふまえ、2024年度は以下の各内容を実施した。

(1) 1Fで発生する固体廃棄物の容器開発に関連する研究成果等の調査

これまでに実施された研究開発の成果等を最大限に活用し、合理的な開発計画を策定するため、1Fの廃炉に係る研究開発実施体制を念頭に公開情報の調査を行い、高線量保管容器の開発に関連する研究開発動向を調査・整理した。

(2) 処分容器の開発に関する国の委託事業等の研究成果の調査

これまでに実施された国の基盤研究の成果を今後の開発計画の立案に役立てるため、1Fの高線量廃棄物と類似性のある廃棄物を扱う地層処分(TRU廃棄物)や中深度処分での処分容器の開発を対象に、これまでに国の委託事業として実施された研究事例の調査を行い、研究対象となった処分容器への要求性能・要件、抽出された課題への対策とその実現性の提示方法、成果として示された設計例や製作技術オプションなどの情報を収集・整理した。

(3) 放射性廃棄物の保管容器や処分容器に関する海外事例の調査

諸外国の処分容器や保管容器の設計の前提条

件、要求性能・要件、設計仕様などの情報を、今後の高線量保管容器の開発における参照事例とすることを目的に、1Fの高線量廃棄物に類似した放射性廃棄物を有する米国、英国、ドイツを対象に加えて仏国を対象に公開情報の調査を行い、放射性廃棄物の保管容器や処分容器に関する設計事例や実用化されている製品等の情報を収集し、包括的に整理した。

◇2024年度の成果

2024年度は、事業の概要で述べた各調査及び整理を実施し、デブリの試験的取り出しに続く段階的な規模拡大等を含む1F廃炉の進展に伴い発生する高線量の廃棄物の長期の安定保管が期待できる容器(高線量保管容器)の開発計画の策定に向けた公開情報に関する予備調査を進め、計画策定において具体化が必要となる開発の前提条件や調整・整合を図るべき1F廃棄物対策に係る他の開発動向(境界条件)を把握することができた。また、処分容器に関する国内外の先行検討事例の公開情報の調査から、高線量保管容器の開発に有益な情報(類似容器の設計事例ならびに健全性評価手法や影響低減・抑止対策など)が存在することが示唆された。更に、調査結果を踏まえ、高線量保管容器の開発における課題(境界条件の設定、健全性評価手法の開発、性能確認・性能保証、等)を抽出した。

一方で、容器開発において境界条件として留意すべき1F廃棄物対策に係る他の開発はオンゴーイングで進められているため、引き続き最新動向の調査、有益な情報について未公開情報も含めた詳細調査が必要である。また、処分容器に関する国内外の先行検討事例については、高線量保管容器の開発への取り込みに向けて更なる有益な情報の詳細調査が必要である。これらの最新動向や詳細調査に基づき、1F廃棄物のため的高線量保管容器の概念設計を進め、実現性の提示に向けた課題を抽出して開発計画(研究開発マイルストーン)を策定する必要があることが明らかになった。

本項の内容は原子力損害賠償・廃炉等支援機構から受託した「高線量廃棄物の保管管理方策の検討(令和6年度)」の成果の一部である。

(廃棄物・材料特性評価プロジェクトチーム)

6. 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) 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、代替粘土材料の埋戻し材としての適用性の評価に取り組んだ。本研究では、埋戻し施工技術のうち、転圧工法とブロック工法への代替粘土材料の適用性及び適用範囲について検討するため、小規模施工試験及び要素試験を実施した。その結果、転圧工法では、代替粘土材料を適切に混合して乾燥密度を確保することで、十分な低透水性を有する埋戻し材を施工できることを確認した。ブロック工法では、ブロックの仕様や使用条件を適切に設定することで、代替粘土材料をブロック材料として使用できることを確認した。また、ブロックの膨潤挙動の確認方法として X 線 CT の適用性を検討した結果、砕砂のみを混合したブロックに対しては特に有効であることがわかった。

(2) 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だ。本研究では、NUMO が検討を進めている改良型 PEM を対象とした有孔型 PEM 容器の一つの孔部に着目し、容器と緩衝材の間に設置するフィルタ材の種類や厚さ等をパラメータとした強度試験及び短期の浸潤試験を実施した。その結果、フィルタ材の選定に関する基盤情報としてフィルタ材の強度と緩衝材の膨潤圧の関係を整理し、適切なフィルタ材を用いることで緩衝材 (ベントナイト) の膨出を抑制できることを確認した。また、浸透解析の妥当性確認のために、供試体中の水分分布 (飽和度) や密度 (乾燥密度) 分布に関するデータを取得した。

(3) TRU 廃棄物の地層処分における陰イオン吸着材の探索及び開発に関する研究

令和 4 年度までに選定した、TRU 廃棄物の地層処分で想定される化学環境 (温度、アルカリ性、還元性雰囲気など) に適用可能と考えられる吸着材を対象に、地下水に含まれる可能性のある妨害成分のうち、硫酸成分及び炭酸成分が吸着材の性能に及ぼす影響とその影響範囲について、バッチ式吸着試験によって確認した。

(4) 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検討し、PGM マネジメントを取り込んだ核燃料サイクルの成立性や廃棄物減容化に関する全体プロセスの評価を行った。

(5) 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い、金属マトリクス of 健全性や仮焼体の閉じ込め性の観点から代替技術としての本技術の適用性の評価を行った。

(6) IAEA との協力協定に基づく革新型炉等の放射性廃棄物管理に向けた核燃料サイクル諸量評価計算コード改良研究

国際原子力機関 (IAEA) の原子力局と核燃料サイクルシステムシミュレーション (NFCSS) 研究に関する実務協定 (Practical Arrangements) を締結し情報交換を行うとともに、新型炉を前提として NFCSS のバックエンド領域の諸量評価計算機能を評価、検討した。

(This page(p44) is intentionally kept blank.)

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6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。

◇2024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に対する理解を深めることを目的として、原子力発電や使用済燃料／高レベル放射性廃棄物の発生・貯蔵、処分の進捗状況、法制度・資金確保に関する情報を整備した。(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34件掲載した（記事タイトルの一覧は、資料V-4を参照）。2024年度に掲載した重要な情報としては、2024年11月にカナダの実施主体の核燃料廃棄物管理機関（NWMO）がワビグーン・レイク・オジブウェイ・ネーション（WLON）及びイグナス・タウンシップ「WLON－イグナスエリア」を使用済燃料の地層処分場の受け入れ地域として選定したこと（<https://www2.rwmc.or.jp/nf/?p=34779>）、並びに同じく11月にスイスの実施主体の放射性廃棄物管理共同組合（NAGRA）が地層処分場プロジェクトに関する最初の許認可手続きとなる「概要承認」の申請書を連邦エネルギー庁（BFE）へ提出し



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/>



図-2 2024年度に整備した技術情報冊子



図-3 技術情報冊子①冒頭の特設ページ

たこと (<https://www2.rwmc.or.jp/nf/?p=34707>) が挙げられる。

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(2025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(2025年版)』(図-2:右)の2種類の資料を作成した。

技術情報冊子①(2025年2月発行)では、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2024年末時点の最新情報を体系的に整理・解説した。冊子冒頭には、①スイスにおける地層処分場プロジェクトの概要承認申請と申請に至るまでの地域での対話活動の事例(図-3:上)、②諸外国における地域での対話活動の事例(図-3:下)を紹介する見開きの特集ページを合計4ページにわたって設けた。

技術情報冊子②(2025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設けて解説を加え、施設・サイトの記載内容の背景情報を充実させた。

これら2つの冊子のPDF版、HTML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」及び原環センターウェブサイト(<https://www.rwmc.or.jp/>)に掲載した。

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター、令和6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、2025

(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年度に選定し、2023年度下期から2026年上期までの3年間で実施する次の7つの研究開発テーマについて、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、2024年度の研究実施内容の取りまとめを行った。チェックアンドレビューは、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実施した。

- 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：東京科学大学 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）

各研究の進捗管理のために評価委員会を年に2回開催し、第1回（10月）では中間報告を、第2回（3月）では2024年度の成果と次年度の研究計画を確認した。

各研究開発テーマと2024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、研究開発機関と地層処分実施主体のいずれにおいても、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。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を目的とした。

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 日程度実施することとした（受講者数としては、20～40 名を想定）。具体的には、主に「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件」を題材としたグループワークや、海外の専門家による講演会の聴講を行い、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、理解を深めた。
- ▶ セミナー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を洗い出し、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、地質環境分野を題材としたグループワークや、海外の専門家による講演会などで構成されるセミナーを 3 日間の日程で開催した。グループワークでは、閉鎖後長期の地質環境に求められる要件（隆起・侵食、熱環境、水理場、力学場、化学場の 5 つ）を取り上げ、処分場のサイトの比較、処分場の設置深度、処分場の設置場所についてグループ内で議論・検討するように設計した（図-1）。これにより、議論を通じて異なる見方・考え方に触れることで、受講者の地層処分技術の視野を広げることに資するようにした。

また、2023 年度に試作版を作成した繰り返し学習可能な動画教材（E ラーニング）について、地層処分に関する解説動画を新たに 2 本作成し、

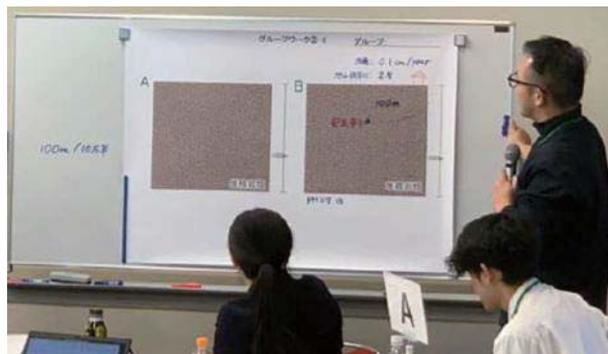


図-1 人材育成セミナーの様子

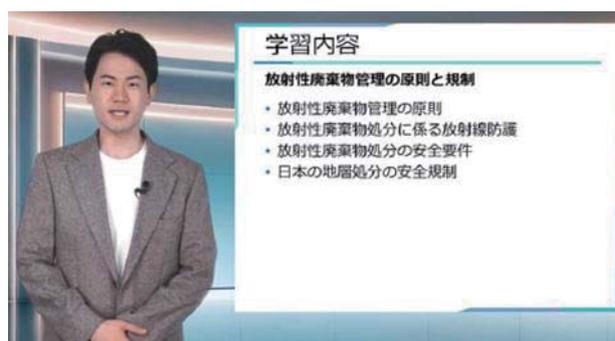


図-2 作成した動画教材

ユーザーレビューの実施を通じて、E ラーニング教材の更新版を作成した（図-2）。実施内容の詳細及び成果概要は 2-3 を参照のこと。

なお、本事業は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和 6 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

◇2024年度の成果¹⁾

(1)進捗管理・成果の取りまとめ等

2023年度に選定し、2023下期～2026年上期の3ヵ年の予定で研究を開始した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中間報告(10月)及び2024年度の成果報告(3月)の2回、オンライン会議形式にて実施した。また、研究実施者との間で電子メールや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2024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の処分場で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。

2024年度は、FAの変質挙動に影響を及ぼすと予想される高アルカリ環境や塩水環境、及び廃棄体熱や地温勾配の影響を想定し、浸漬溶液組成及び温度をパラメータとした浸漬試験を実施した。また、FAと陰イオン核種との相互作用に関する検討として、2023年度に実施した Γ^- 及び SeO_3^{2-} を用いた収着実験に続き、地層処分場周辺における岩盤中の硫酸塩鉱物や水の放射線分解等による局所的な酸化性雰囲気を想定し、 IO_3^- 及び SeO_4^{2-} を用いた収着実験を実施した。さらに、FAを混合したフライアッシュ混合セメント(FAC)の供試体を作成し、FACに対して有害成分の溶出特性を評価するための浸漬試験を行った。

処分場環境における高アルカリ成分や塩水の影響を想定し、NaOH、KOH、 Ca(OH)_2 及びNaCl溶液を用いてFA単体の浸漬試験を行ったところ、NaCl及び Ca(OH)_2 溶液の場合では、有害成分の溶出量が顕著に増大するような挙動はほぼ見られなかった。一方で、100mMの濃度のNaOHまたはKOH溶液を用いた場合は、有害成分の溶出量が土壤汚染対策法に基づく溶出量基準値を上回った。これは100mMの濃度となるNaOHまたはKOH溶液はpHが13まで上昇し、より高アルカリ条件となるため、FAの主要構成鉱物であるシリカやアルミノケイ酸の溶解度増加に伴いFA表面に存在している有害成分も溶出するためであると考えられる。

FAと陰イオン IO_3^- 及び SeO_4^{2-} の相互作用に関しては、FAへの IO_3^- または SeO_4^{2-} の収着試験を実施した。収着試験系としてFAのみの場合と、処分場でのセメント混合を想定してFAにCaOを添加させた場合について検討したところ、 IO_3^- についてはCaOを添加した系で溶液中のヨウ素濃度が検出限界以下となり、また SeO_4^{2-} の場合でもCaOを添加した系において有意に濃度が減少した。このことから、ヨウ素やセレンといった陰イオン核種が、Caが供給される環境においてFA利用により固定化される可能性が示唆された。

FACの浸漬試験については、FAと高炉セメントを混合してFACを作成し、粒径2mm以下の粉末試料を最大28日間、超純水に浸漬した。その結果、前年度実施したFA単体の浸漬試験の結果と比較して、FACからの有害成分の溶出濃度は低くなった。一方で、溶出量基準と比較した場合、As以外のB、F、Se、Cr(VI)は浸漬時間が

経過するにつれて一部が基準値を僅かに超過する結果となった。これらの結果から、地層処分システムにおいて FA を含むセメント系材料を用いた場合に地下水中の有害成分の濃度が基準を超える可能性があることから、今後は混合するセメント材料の種類や配合、養生期間をパラメータとする試験を行うことによって、有害成分の適切な不溶化条件を確立することが課題となる。

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）

我が国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及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。

2024年度は、締固めたクニゲル V1 ベントナイトに異なる温度履歴を与え、150 及び 300 日間養生させた試料を用い、供試体を蒸留水と人工海水で飽和させ、膨潤圧試験と水分拡散試験を実施した。また、膨潤圧試験や水分拡散試験の結果についてメカニズムを探るために、メチレンブルー吸着、X 線回折分析 (XRD)、蛍光 X 線分析 (XRF) 試験を行い、モンモリロナイト含有量、モンモリロナイトの底面間隔の変化及び Si、K、Al の含有量の変化、走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察を行い、温度履歴が及ぼす影響を調べた。これに加えて、2023 年度より開始している、異なる温度 (25、60 及び 80℃) での異なる飽和溶液 (蒸留水及び人工海水) での長期膨潤圧のモニタリングを継続実施した。

異なる温度履歴 (養生温度：60、80、100 及び

150℃) を150日及び300日間与えたベントナイト供試体に対して、膨潤圧試験を実施したところ、およそ50時間以降に達した平衡膨潤圧 (飽和状態での膨潤圧) は、温度履歴を与えていない試料の値とほぼ同じであった。一方で、蒸留水を用いた膨潤試験で得られた膨潤圧は、人工海水を用いた膨潤試験の結果より高くなった (図-1)。同様に、異なる温度履歴を与えたベントナイト供試体に対して水分拡散試験を実施した結果、得られた水分拡散係数は温度履歴を与えていない試料とほぼ同じ結果となった。また、人工海水を用いた場合は、蒸留水を使用した実験系の結果より、水分拡散が大きくなる傾向を示した。また、温度履歴を与えたベントナイトに対して、メチレンブルー吸着量測定、XRD、XRF 分析を行ったところ、メチレンブルー吸着量、モンモリロナイトの底面間隔、あるいは K、Al、Si といった元素濃度は、温度履歴を与えていない試料からほとんど変化がない結果となった。さらに、ベントナイト試料の SEM 観察結果から、人工海水に飽和させた場合には、モンモリロナイトの集合体の形状が変化し、蒸留水を用いた場合と比較して集合体間の距離が短くなっていることが分かった。

これらの結果から、300日間程度、150℃の温度履歴をベントナイトに与えても、ベントナイトに含まれるモンモリロナイトのイライト化といった変質はほとんど生じていないため、膨潤圧、水分拡散係数にほとんど影響しないことが示唆された。人工海水を用いた系では、モンモリロナイトの集合体間の距離が短くなることから、蒸留水を用いた試験と比較して膨潤圧が小さく、水の拡散係数が大きくなることが示唆された。

異なる温度 (25、60 及び 80℃) での蒸留水及び人工海水で飽和させた場合の膨潤圧のモニタリングについては、モニタリングを1年継続した結果、蒸留水の場合、膨潤圧は初期に安定した後、そのまま一定の値が継続したが、人工海水の場合は、膨潤圧は初期に安定した後、減少し続ける傾向を示した。この膨潤圧挙動の違いについてのメカニズムの解明は今後の課題である。

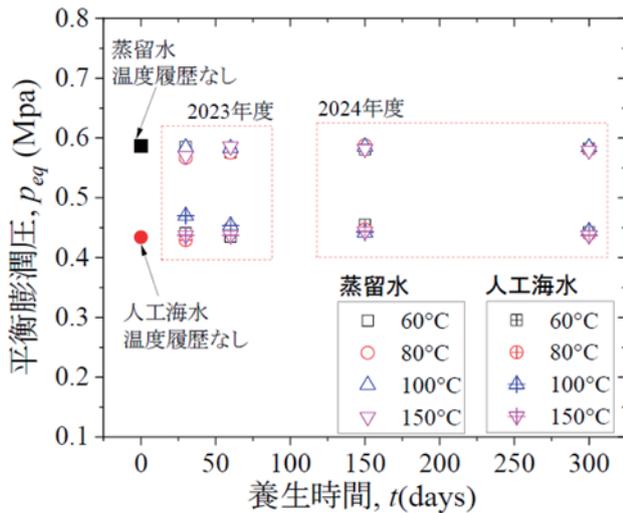


図-1 蒸留水および人工海水で飽和させた温度履歴の異なるベントナイトの平衡膨潤圧

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。

2024年度は、異なる岩石が貫入した試料など、不均質な岩石試料のマイクروسケール空隙の流体浸透挙動を調べるために、蛍光剤を用いた流体浸透試験を実施した。また、空隙が存在する不均質な岩石試料の弾性波試験結果について、数理計算による評価を行った。さらに、実際の地下の不均質状態について評価することを目的として、フィールドにおける弾性波観測試験設備の整備をすすめた。

蛍光剤を用いた流体浸透試験については、片麻岩に花崗岩質の貫入がある花崗岩質片麻岩試

料を用いて、円柱形試料を蛍光液に浸漬し、液体の浸透過程を観察した。その結果、花崗岩質片麻岩の浸透過程において、片麻岩部分と花崗岩部分では浸透速度に違いがあることが明らかとなった一方で、最終的には試料全体に浸透が起こった。顕微鏡観察をした結果、一部の鉱物内に液体が浸透したものの、蛍光剤は大部分が粒子境界に浸透していることが示された。今後はより詳細に微細構造への浸透過程を明らかにすることが課題である。

弾性波の数値シミュレーションについては、空隙のある多孔質安山岩の円柱供試体を対象としてすでに得られている弾性波透過試験の結果を対象として、3次元差分法による波動伝播シミュレーションを実施した。その結果、空隙がない場合、震源から入射した波は、試料の反対の面で反射・変換した実態波が震源方向に戻ってきたが、空隙を含むモデルでは、震源の対面に到達する前に波面の広がりゆがみが生じる様子が観察された。これらの結果から、複数観点で得られた波形から不均質の位置やサイズが推定できる可能性が示唆された。

フィールドにおける弾性波観測試験については、別府エリアで弾性波モニタリングを実施することとし、地震観測網の整備作業を進め、微動観測を開始した。今後、フィールド観測を本格化させ、地下の亀裂と弾性波の関係の理解をすすめることが課題である。

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。

2024年度は、高拘束圧高間隙水圧下で浸透

率・弾性波速度・電気比抵抗を計測可能となるように実験システムを整備・改良をすすめた。また、岩石サンプルを対象として浸透率・空隙率・密度・電気比抵抗・弾性波速度の測定を行った。

高拘束圧高間隙水圧下での浸透率・弾性波速度・電気比抵抗を計測可能な実験システムの整備については、一時的に150MPaの圧力での試験が可能となったが、試験システムの不具合が発生したため、今後も不具合を解消するための実験システムの整備・改良をすることが課題となった。

そのため、浸透率・空隙率・密度・電気比抵抗・弾性波速度の測定については、上記とは別の一軸圧縮試験機を拡張し、浸透率・電気比抵抗・弾性波速度の同時測定が行える実験システムを構築した。亀裂表面の粗い一枚亀裂試料を一軸圧縮試験機で変形させながら、応力変化に伴う浸透率・電気比抵抗・弾性波速度の同時測定を行った。試験には花崗岩、斑レイ岩、及び亀裂面粗さや等方性が制御可能等のメリットを有する紫外線硬化型アクリル樹脂による3Dプリンタ試料を用いた。試験の結果、浸透率は応力の増加に伴って低下することが確認できた。粗さの異なる3Dプリンタ試料の比較により、浸透率は亀裂面が粗いほど高くなることも分かった。また、岩石試料については、花崗岩試料と斑レイ岩試料の浸透率は変化の挙動が異なることが確認された。この理由として、母岩の特性（構成鉱物等）の違いに起因する可能性が考えられる。電気比抵抗については、応力の増加に伴って3種類の試料とも比抵抗が上昇した。粗さの異なる3Dプリンタ試料の比較により、電気比抵抗は亀裂面が粗いほど大きくなることが分かった。P波速度については、応力の増加に伴って3種類の試料とも速度が上昇した。また、P波速度は亀裂面が粗いほど上昇することが分かり、先行研究の報告と整合的であった。さらに、感圧紙を用いた3Dプリンタ試料の接触面積の実測定を行い、接触面積と弾性波速度の相関を調べたところ、接触率が上昇するにつれて弾性波速度も上昇することが明らかとなった。

これらの結果から、電気比抵抗・弾性波速度の同時測定により浸透率を定量的に評価できる可能性が示唆された。ただし、試験では一枚亀

裂を考慮したが、実際の地下構造は複雑な亀裂を有していると考えられるため、今後は、亀裂と物性に関する、より詳細な実験的・数値的研究を進めることで、地下の浸透率の定量的な評価を実現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。

2024年度は、技術的妥当性が高い合成方法にて、試薬からのシンロック合成及び既往の廃棄物を想定した固化プロセスを確立することを目的として、様々な方法によるシンロック合成を行った。合成したシンロックについては粉末X線回折や顕微鏡的手法を用いて微細構造評価を行い、得られたデータを基に合成実験にフィードバックした。さらに合成したシンロックの浸出試験を行い、耐浸出性について評価した。

シンロックの合成については、最初に4価アクチノイド（ U^{4+} など）の模擬元素として4価セリウム（ Ce^{4+} ）を用いたムラタイト基シンロックを合成した。構造解析の結果、得られたシンロックはM3ムラタイト単相であり、6配位の多面体と稜を共有する8配位サイトにCeが存在することが分かった。また、浸出試験を行った結果、極めて優れた耐浸出性を示すことが分かった。次に、ウラン（U）を含有するムラタイト基シンロックを合成し、構造解析を行ったところ、1350℃で合成した場合のムラタイト基シンロックは主にM3ムラタイトが主要な構成相であったが、1300℃で合成した場合はM3ムラタイトの他に中間生成物も多く含まれることが分かった。U

が配位する占有サイトについては Ce のケースと同様であったことから、Ce⁴⁺がおおむね U⁴⁺の模擬をしていることが示された。1300℃で合成したシンロックを対象として浸出試験を行ったところ、溶液中のウラン濃度は検出下限以下であったことから、中間生成物を含むシンロックでも優れた耐浸出性を示すことが明らかとなった。

次に放電プラズマ焼結 (SPS) 法を用いて、簡便かつ迅速なパイロクロア基及びジルコノライト基シンロックの合成を行い、従来の常圧焼成法で合成したシンロックと密度の比較を行った。その結果、SPS を用いて合成したシンロックの密度は、従来の電気炉を用いて作製した試料の密度を大きく上回っており、SPS を用いることで短時間での緻密化が可能であることが明らかになった。

さらに、高レベル放射性廃棄物中に含まれる揮発性核種が揮発しない低温条件でのシンロック合成技術について検討した。市販の硝酸塩試薬を用いて、Self-propagating room temperature (SPRT) 法と呼ばれる反応技術を用いてシンロックを合成した結果、600℃で焼成することで単相のパイロクロアが得られた (図-2)。この技術を用いることで硝酸塩から直接シンロックを合成することができ、乾燥・酸化といった前処理が不要となるほか、600℃という低温で核種を固溶できる可能性が示された。本年度はシンプルな化学組成を有するパイロクロアについて検討したが、今後は様々な結晶相を対象として SPRT 法によるシンロックの合成の検討をすすめることが課題となる。

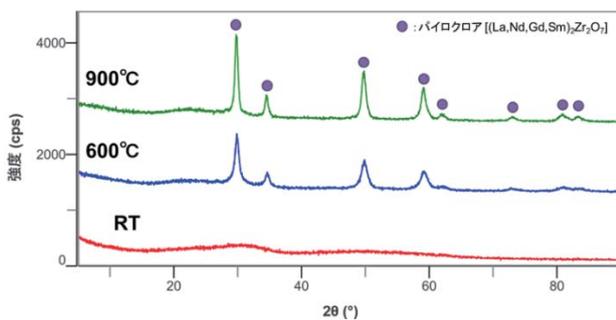


図-2 SPRT 法で合成したパイロクロア基シンロックの XRD パターン。RT (室温) ではアモルファスであるが、600℃焼成で単相パイロクロアが得られている。900℃まで加熱することで結晶性が向上している。

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: 東京科学大学 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。

2024年度は、高レベル放射性廃棄物発生シナリオに関して、昨年度設定した六ヶ所再処理工場からの廃棄物発生シナリオについて評価を実施した。また、高速炉が実用化された際の原子力発電シナリオを調査し、廃棄物発生シナリオを設定した。また、廃棄物データベースの設計の構築に係る取り組みとして、昨年度選定したブロックチェーン基盤を用いて、廃棄物データベース構築の為にブロックチェーンネットワークの設計を行った。さらに、処分場の熱解析モデルの構築に係る取り組みについて、昨年度作成した処分場の大規模過渡伝熱解析モデルを用いて、複数の発熱特性の異なる廃棄体埋設を仮定した際の熱解析を実施した。

高レベル放射性廃棄物発生シナリオの解析については、六ヶ所再処理工場運転シナリオにおいて、再処理される使用済燃料の冷却期間が長期化 (約58%が40年以上冷却) していることを確認した。これにより、ガラス固化体中の核種組成は従来想定と異なり、Am-241の増加及びSr-90、Cs-137の減少が見られた。また、インベントリを考慮したガラス固化体と処分場面積についての評価を行ったところ、廃棄体専有面積と廃棄物含有率の最適化により、従来設定と比較して最大18%の処分場面積削減の可能性が示

された。さらに、諸量評価の不確かさの考え方や妥当性確認について検討し、その一環として諸量評価コード NMB4の検証・妥当性確認を実施した。実際の原子炉サイトにおける使用済燃料貯蔵量とPu保有量を解析により算出し、公開されている実績値と比較した結果、NMB4の妥当性が確認できた。

廃棄物データベースの設計の構築については、セキュリティ性、長期サポート、データ管理の柔軟性等を考慮し、コンソーシアム型ブロックチェーンHyperledger Fabricを基盤とした廃棄物データベースのシステム要件を整理した。長期の地層処分事業を踏まえ、透明性確保、事業遂行の効率向上、廃棄体回収可能性の担保を重視したデータ構造を設計した。NMB4との連携を視野に入れたクラス設計により、廃棄物の物理的形状、核種インベントリ、保管場所等を体系的に管理可能なデータベース基盤を構築した。

処分場の熱解析モデルの構築については、処分坑道20本、1坑道あたり6y体の廃棄体を埋設できる大規模過渡熱解析モデルを構築した。坑道あたりの廃棄体数をパラメータとした最適化検討用モデルの開発や、各廃棄体に個別発熱量を割り当てる処理の自動化機能を実装し、異なる発熱特性を持つ廃棄体の最適配置に向けた解析基盤を整備した。計算リソースの制約が課題として浮上したため、今後はスーパーコンピュータ等の高性能計算環境を活用して伝熱計算の計算負荷に対応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¹）

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従うことを利用し、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。

2024年度は、紀伊半島南西部に分布する中新統田辺層群に貫入した碎屑岩脈を対象に、碎屑岩脈の方位データの収集を行い、流体供給源周辺の応力場の推定を行った。また、推定した区画ごとの応力状態及び区画の位置を基に、この地域の応力場に影響を与えた流体供給源に関するパラメータ及び広域応力に関するパラメータを求めるための応力場逆解析手法について解析ソフトウェアを用いて実装・適用した。さらに、新たな流体供給源周辺の応力場モデルの検証のための事例を選定するために、文献の洗い出しや他研究者からの情報収集、予察的な野外調査を行った。

流体供給源周辺の応力場の推定については、調査対象の和歌山県田辺市の鳥の巣地域において先行研究で得られている碎屑岩脈の方位データがあることから、応力場の把握に必要な周辺地域の岩脈方位データを追加で収集した。収集した方位データは、数10～数100メートル規模の区画ごとに応力逆解析手法を適用し、各区画に働いた応力を推定した。その結果、調査地域の碎屑岩脈の方位分布は、調査地域南部に存在した流体供給源（泥ダイヤピル）に伴う局所応力と、北北東-南南西方向の水平面内最大圧縮軸を持つ広域応力の合成による応力場を反映していることが示唆された。

応力場逆解析手法の実装と適用については、区画ごとに検出された応力状態と区画の位置情報を解析データとして使い、各区画で検出された応力とモデル応力の違いがフィッシャー分布に従うと仮定し、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて逆解析した。その結果、広域応力は、西北西-東南東引張で応力比が中程度の正断層型応力であることが示唆された。流体供給源の位置については、応力場の推定の検討結果と同様に、調査地域南部に存在することを示唆するパラメータ分布が得られた。しかしながら流体供給源の位置や深さについては不確かさが大きいいため、精度を向上させることが今後の課題である。

¹ 2025年4月より産業技術総合研究所に所属

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター、令和 6 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、2025

(技術情報調査部)

2-3 人材育成プログラムの実施・作成

◇2024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
- オンライン学習教材の検討

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。

2024年度の人材育成セミナーは、『『地層処分技術の視野を広げよう！』～国際協力と分野間連携～』とのタイトルで行い、都内会場において2024年11月22日、25日及び26日の3日間で22名の受講者（モニター）が参加した。なお、22日はオンライン、25日と26日は対面形式で実施した。以下に、本セミナーの設計や実施概要について示す。

＜セミナーの設計方法＞

2024年度人材育成セミナーを設計するにあたり、過去に実施した人材育成セミナーへのアンケートを再整理した結果、以下のようにまとめることができた。

- 1つのテーマに着目したグループワーク・ディスカッションを他の分野の専門家と実施することで、処分技術に対する理解や処分技術全体を俯瞰する重要性を意識づけることができおり、これまでのセミナープログラムは概ね目的に沿ったものであった。
- グループワーク・グループディスカッションは他の分野の人でも議論に参加しやすくする工夫が必要と考えられる（e.g. 講義で基礎知識を提供、ファシリテーターとしてテーマに精通した専門家が参加）。
- 1つのテーマを中心として、講義、演習、見学、グループワーク・ディスカッションのそれぞれで関連性を持たせ、セミナー全体としてプログラムを考えることがより効果的と考えられる。
- 地層処分事業との関連性の理解向上のため、地層処分そのものに関する情報を提供することも有効と考えられる。
- 1日のスケジュールが長時間となるセミナー構成の場合は、詰め込み過ぎて受講者が消化不良となる可能性があることから、十分に時間を確保するセッション（グループワーク等）と、必要に応じてコンパクトにして効率的に実施するセッションなどの工夫をすることが有効と考えられる。

これまでのセミナーは処分技術全体を俯瞰する重要性を受講者に意識づけるという点で効果があったと考えるが、上記の意見を取り入れることにより、より効果的なプログラムとなることが可能と考えられる。そのため、2024年度人材育成セミナーは、以下のような実施方針でプログラムを作成することとした。

- これまでと同様に、一つのテーマを取り上げて、アクティブラーニング、特にグループワーク・グループディスカッションなどを通して、処分技術全体を俯瞰する重要性への気づきを得ることを目的とする
- グループワーク・グループディスカッションは他の分野の人でも議論に参加しやすくなるように設計
- 地層処分技術の最もベースとなる安全確保・セーフティケース等の概要について座学・グループワーク等をセミナーの最初に設ける（1～2時間程度）
→その後一つのテーマに基づいた座学・グループワーク等のセミナーを実施するが、セーフティケースなどの処分技術全体を俯瞰することにつながっていることへの気づきを得られるような内容とする（そのテーマで閉じるようにはしない）
- セミナーのスケジュールを詰め込み過ぎないようにする

また、原子力発電環境整備機構（NUMO）は、2024年11月22日に、地層処分に関する技術的な知識やステークホルダーとのコミュニケーションをどのように継承するかなどの持続可能性等をテーマとした、海外の研究者等によるオンライン講演とパネルディスカッションを内容とする講演会を企画していた。

このため、海外の研究者との協働の重要性にも気づきを得ることを目的の一つとして追加し、上記講演会を人材育成セミナーのプログラムの一部とすることとした。

以上のことから、2024年度の人材育成セミナーは、3つの構成要素からなるプログラムとし、セミナーを実施した。

- ① NUMO 講演会
- ② グループワークのための基礎的な知識の提供
- ③ グループワーク

以下に各構成要素の概要とアンケートの結果を示す。

＜セミナーの実施概要＞

① NUMO 講演会

NUMOの講演会を聴講することで、受講者が地層処分分野における国際的な知見の活用や、海外研究者との協働の重要性について気づきを得ることをねらいとした。受講者が講演会の内容をより深く理解できるようにするため、講演会の前に我

が国と諸外国の地層処分動向に関する講義を実施した。さらに、オンラインで参加の講演会であったため、受講者がより真剣に聴講し内容を積極的に理解するよう促すため、以下のテーマで、2日目の対面時にディスカッションを設定した。

- ▶ 地層処分事業の持続可能性について何が重要か
- ▶ 地層処分を進めるために、将来自分ができることは何か

アンケート結果では、海外のサイト選定方針や安全基準の考え方を学べる機会が少ないので、良い機会を得たという意見や、次世代への継承についての難しさや課題が各国で共通していることを感じたなどという意見が得られた。このことから、NUMO 講演会を組み込んだことにより、受講者の地層処分に関する見識について国際的な観点で視野を広げる機会を提供できたと考えている。

②グループワークのための基礎的な知識の提供

本セミナーでは、様々なバックグラウンドを持つ受講生が参加しており、グループワークの効果的な実施のためには、受講者の知識レベルをそろえる必要があることからこのセッションを計画した。具体的には、「なぜ地層処分なのか、どのように安全性を示すかについて」という地層処分の基本的事項について、当センターで作成した動画教材を視聴し、それらの内容についてグループディスカッションを行った。以下が用いた動画教材と教材に基づくグループディスカッションの内容である。

- ▶ 「放射性廃棄物対策：地層処分選択の背景」（グループディスカッション：長期貯蔵の主張に対してどうやって説明するか）
- ▶ 「放射性廃棄物対策：地層処分の安全確保とセーフティケース」（グループディスカッション：地層処分の安全性をどう伝えるか）

さらに、「地質学の基礎」と「地質環境が安全確保に果たす役割」についての講義を行った。

アンケートの結果では、グループワークのための基礎知識を動画教材で学ぶことについて質問したところ、回答者全員が役に立ったと回答した。このことから、受講者への基礎情報の提供手段として動画教材が有効であることが確認された。

また、共通の動画教材で基礎的な情報を提供することで、異なる分野や背景を持つ受講者同士でも、グループワークが円滑に実施できたと考えられる。

③グループワーク

「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件」として、隆起・侵食、熱環境、水理場、力学場、化学場の5つの要件に絞り、グループワークを行う前に各要件についての基礎的な知識を提供するための座学を設け、座学の後にグループワークを実施した。グループワークでは、サイトの比較、処分場の設置深度、処分場の設置場所について検討する内容とした。

アンケート結果では、「閉鎖後長期の地質環境に求められる要件」に関する座学とグループワークには「座学で学んだことをストレートに生かしてグループワークに取り組めた」、「グループ内でサポートしあいながら、座学の内容もお互いに確認しつつ、着実に進められた」、「すべてを関連づけながら議論することがあまりなかったので、自分の専門外のことも学ぶ機会となって楽しかった」など、好意的な意見が多かった。一方で、座学やグループワークについては時間が足りないという意見、受講者間でコミュニケーションをとる時間が足りないという意見もあり、セミナーの構成を継続してブラッシュアップすることが今後の課題と考えられる。



図-1 グループワーク I の設定等

(2) オンライン学習教材の検討

当センターでは、2019年度から2023年度までの事業期間において、下記の2種類の教材作成を進めてきた。

2023年度には、地層処分のリテラシー教材を完成させるとともに、Eラーニング教材の試作版を作成した。2024年度はEラーニング教材の更新版の作成を目的として、「海外での教材活用状況の調査」、「動画教材の追加制作」、「ユーザーレビューに基づく内容の見直し」を実施し、これらの成果を踏まえ、必要な修正を加えた更新版を作成した。

「地層処分のリテラシー育成教材」 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教材
「繰り返し学習が可能な動画教材（Eラーニング）」 解説動画によりより深掘した内容を解説し、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することにより、リテラシー教材と組み合わせることにより学習効果を高めることを目的とした教材

●海外での教材活用状況の調査

海外事例として、スウェーデンの放射性廃棄物処分の実施主体であるスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB社）の子会社であるSKBインターナショナル社（以下、SKBI社）が世界各国の地層処分関係者に対して提供しているオンラインコースの実際の運用の詳細、運用開始後に行った改善点などについての情報収集を行った。情報収集の結果から工程ごとのマニュアルの作成、講座の受講時間や期間、質問セッションの設定、学習管理システムの利用などが、本事業で作成した動画教材を活用する際にも有効であると考えられる。

●動画教材の追加制作

2024年度は「地層処分のリテラシー教材」の中から、基礎的・基盤的となる内容について、新たに以下の2本の動画教材を作成した。

- ▶ 放射性廃棄物管理の原則と規制
- ▶ 地層処分に対する信頼

動画教材については、2023年度に作成した動画と同様に、解説者が画面でスライドを説明する形とし、紹介する内容のスライドを作成した。

●ユーザーレビューに基づく内容の見直し

2024年度に作成した2本の動画に加え、2023年度に作成した以下の3本の動画を合わせて、5本の動画についてユーザーレビューを実施した。

- ▶ 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
- ▶ 地層処分の安全確保策と安全評価

動画教材の改訂のために、ユーザーレビューでは、教材としての学びやすさや使いやすさなどについて意見聴取を行った。ユーザーレビューの対象者は、地層処分に関する業務経験1、2年目程度の若手研究者とし、関係機関や民間企業に参加者の募集を行い、19名の参加者を得ることができた。

参加者には教材の学習前後で各章毎に8問からなる確認テストを受けてもらい、その結果から学習効果の確認をすることとした。さらに、学習後にアンケートに回答してもらい、教材に対する意見をもらい、改善点、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、5本の動画教材を学習することにより、いずれも学習前と比較して学習後の確認テストの正答率（%）が上昇した（図-2参照）。このことから動画が扱っている内容を理解することについて、作成した動画教材は有効であり、一定程度の知識の取得に役立つことが示された。

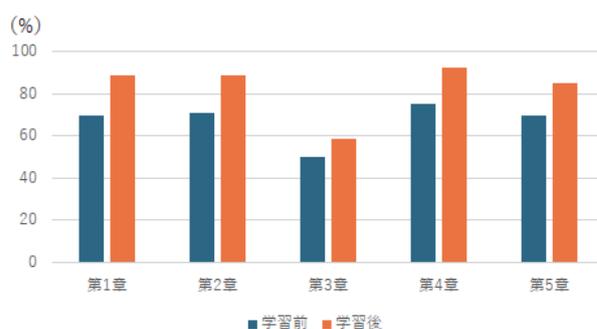


図-2 動画教材の確認テストの正答率比較

アンケート結果からは、動画教材として対象としている内容を理解するうえで有用であるとの意見があった。一方でスライドをナレーターが解説するだけとなっていることから、アニメーションなど動画という媒体を生かした視覚的演出などがあった方が良好とする意見もあった。ユーザーレビューの結果を踏まえ、可能な範囲で動画の修正を行った。諸事情により、すでに撮影した動画の

ナレーション部分を修正することは難しかったため、基本的に動画中で用いているスライドを修正した。ナレーション部分で修正が望ましいと考えられる部分については、今後動画を公開するウェブページにおいて、補足説明を行うこととした。

- 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6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、2025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（2024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。

2024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

2024年度には、協力協定を締結しているフランスの ANDRA 及び韓国の KORAD の協定の更新時期を迎えたため、文書の取り交わしによる協定の更新を行った。また、スイスの NAGRA とバイラテ

会合を行った。さらに、中国の CNNC の下部組織である北京地質研究院 (BRIUG) とバイラテ会合を行うとともに、中国北山地下研究所に関するミニ講演会を開催した。

また、協定締結機関ではないが、フィリピンの原子力研究所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) を3年間延長し、多様な核燃料サイクル条件を考慮したガラス固化体特性に基づく地層処分場の熱設計手法、及び核燃料の種類と使用済燃料再処理の有無を考慮した NFCSS による諸量評価と処分場サイズの算出方法について情報交換を行い、計算方法や条件に関する知見を、IAEA 主催の NFCSS によるコスト評価手法開発に関する専門家会議で紹介、議論した。また 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) の諸量評価計算における原子力発電所運転データと地層処分対象となる廃棄物の発熱特性の関係について IAEA と意見交換、及び今後の課題を協議した。

(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りしてタスク間及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み、2025年3月にフェーズ1の研究開発成果を取りまとめた。また、2025年3月に全参加機関の承認を得てフェーズ2（2025年4月～2029年3月）の研究開発の実施が決定し、当センターは引き続きフェーズ2の研究開発を実施することとした。

V. 資料

1. 講演会、セミナー、研究発表会

	講演会等概要	開催日	会場
講演会	第1回原環センター講演会 「緩衝材の施工技術オプションの整備－緩衝材の流出及び膨出の評価方法に係わる検討－」 菊池 広人 氏（地層処分工学技術研究開発部）	2024年 7月 5日	原環センター（対面）及びオンライン開催
	第2回原環センター講演会 「ベントナイト緩衝材中のガス移行現象の理解と移行解析手法の開発－現状と今後の展望－」 八木 翼（地層処分バリアシステム研究開発部）	2024年 9月 6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 「沿岸部における地層処分の工学技術に関する課題への取り組み」 大和田 仁（地層処分バリアシステム研究開発部） 林 大介（地層処分工学技術研究開発部） 菊池 広人（地層処分工学技術研究開発部）	2024年11月 8日	原環センター（対面）及びオンライン開催
	第4回原環センター講演会 「ハル等廃棄体の核種溶出モデルの高度化と炭素化学形態の評価」 桜木 智史（FE・BE イノベーション研究部） 田中 真悟（FE・BE イノベーション研究部）	2025年 3月28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」 朽山 修 氏（公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問）	2024年 5月17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」 朽山 修 氏（公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問）	2024年 7月19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）	2024年11月19日	京都大学 東京オフィス
研究発表会	2024 年度原環センター研究発表会 1. 研究発表 「地層処分施設的设计・操業技術に関する最適化の考え方」 川久保 政洋（地層処分工学技術研究開発部） 小林 正人（地層処分工学技術研究開発部） 阿部 孝行（地層処分工学技術研究開発部） 2. 特別講演 「放射性廃棄物埋設における安全確保の考え方～世界から学ぶ性能照査の重要性～」 田中 知 氏（東京大学名誉教授）	2024年12月13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	中性子イメージング法の土質系材料への適用性に関する基礎的研究	広中良和	粘土科学 第63巻 第2号、23-32, 2024.8
2	堅置き・ブロック方式における緩衝材の流出量評価手法の検討	菊池広人、宇田俊秋、林大介、江守稔	日本原子力学会 バックエンド部会誌 原子力バックエンド研究 Vol.31, No.1 pp.11-20(2024)

(2)学会発表等

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
1	3次元空間分布モデルによるコンクリートの圧縮強度予測モデルの構築	大和田仁	第78回セメント技術大会 2024/5/15～5/17
2	ベントナイト緩衝材の膨出挙動シミュレーション	林大介、菊池広人、 安田涼	第59回地盤工学研究発表会 2024/7/23～7/26
3	安全性が高く放射性廃棄物発生が少ない小型モジュール原子炉の研究	朝野英一	ちゅうでん サイエンス・フォーラム 2024 2024/8/24
4	TRU廃棄体パッケージの製作技術の成立性確認	丸山紀之	第40回バックエンド夏期セミナー 2024/8/29～8/30
5	Radionuclide Leaching Model for Spent BWR Tie Plate in Geological Disposal: Factors Affecting 14C Leaching and Post-Closure Safety Assessment	桜木智史、植田浩義、 針貝美樹、田中真悟	6th International ATALANTE Conference on Nuclear Chemistry for Sustainable Fuel Cycles 2024/9/1～9/6
6	Distribution of Cl-36 in Spent BWR Tie Plate Determined Using Accelerator Mass Spectrometry	田中真悟、桜木智史、 植田浩義	6th International ATALANTE Conference on Nuclear Chemistry for Sustainable Fuel Cycles 2024/9/1～9/6
7	Numerical Analysis of Fluid Permeability in Compacted Sandstones	八木翼	ISERME2024 2024/9/2～9/3
8	圧蜜された粒子層中の空隙特性と透過率に関する数値解析－Kozency-Carman式の適用性に関する物理的解釈－	八木翼	日本混相流学会 混相流シンポジウム2024 2024/9/4～9/6
9	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（続報）	広中良和	2024年度土木学会全国大会 第79回年次学術講演会 2024/9/5～9/6
10	ベントナイト混合土における初期含水比が空隙構造に与える影響の観察	広中良和	2024年度土木学会全国大会 第79回年次学術講演会 2024/9/5～9/6
11	ベントナイト混合土の締固め過程における空隙構造形成プロセスの観察	広中良和	2024年度土木学会全国大会 第79回年次学術講演会 2024/9/5～9/6
12	DEM解析を用いたベントナイト混合土の締固め過程の再現	広中良和	2024年度土木学会全国大会 第79回年次学術講演会 2024/9/5～9/6

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
13	中深度処分における規制要求を考慮した設計プロセスの整備と試行	広中良和	2024年度土木学会全国大会 第79回年次学術講演会 2024/9/5～9/6
14	地層処分における埋戻し材の施工技術の開発：(その1) 研究開発方針	阿部孝行、川久保政洋	2024年度土木学会全国大会 第79回年次学術講演会 2024/9/5～9/6
15	地層処分における埋戻し材の施工技術の開発：(その2) スクリュー工法－設計パラメータの定量化－	阿部孝行、川久保政洋、 神徳敬	2024年度土木学会全国大会 第79回年次学術講演会 2024/9/5～9/6
16	地層処分における埋戻し材の施工技術の開発：(その3) ブロック工法－埋戻し材ブロックの仕様設定に関する検討－	阿部孝行、川久保政洋、 平治	2024年度土木学会全国大会 第79回年次学術講演会 2024/9/5～9/6
17	地層処分における埋戻し材の施工技術の開発：(その4) 斜め転圧工法－既存機械による施工試験－	阿部孝行、川久保政洋	2024年度土木学会全国大会 第79回年次学術講演会 2024/9/5～9/6
18	ベントナイト混合土を対象とするドラムカッターを用いた機械的切削技術の開発	小林正人、平治	2024年度土木学会全国大会 第79回年次学術講演会 2024/9/5～9/6
19	機械的手法によるベントナイト混合土の切削メカニズムの検討	小林正人、平治	2024年度土木学会全国大会 第79回年次学術講演会 2024/9/5～9/6
20	中深度処分における規制要求を考慮した設計プロセスの検討及び試行 (1)設計プロセスの具体的手順の検討	広中良和	日本原子力学会 2024年秋の大会 2024/9/11～9/13
21	中深度処分における規制要求を考慮した設計プロセスの検討及び試行 (2)比較評価の試行	広中良和	日本原子力学会 2024年秋の大会 2024/9/11～9/13
22	革新的小型ナトリウム冷却高速炉の開発 (21)乾式再処理で発生する高レベル放射性廃棄物の地層処分	桜木智史、朝野英一、 針貝美樹、田中真悟	日本原子力学会 2024年秋の大会 2024/9/11～9/13
23	TRU廃棄物の地層処分への陰イオン吸着材の適用の可能性	大和田仁、植田浩義、 八木翼	日本原子力学会 2024年秋の大会 2024/9/11～9/13
24	PEM方式の代替回収技術の開発 (1)技術開発の概要	小林正人、根本浩史、 川久保政洋	日本原子力学会 2024年秋の大会 2024/9/11～9/13
25	PEM方式の代替回収技術の開発 (2)アブレイシブウォータージェットによるPEM容器の開封の技術的実現性	根本浩史、小林正人、 川久保政洋	日本原子力学会 2024年秋の大会 2024/9/11～9/13

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
26	PEM 方式の代替回収技術の開発 (3)ワイヤ・ソーによる PEM 容器の開封 の技術的実現性	川久保政洋、根本浩史、 小林正人	日本原子力学会 2024 年秋の大会 2024/9/11～9/13
27	緩衝材の塩水による化学影響に関する イオン交換挙動の解析評価方法の検討 (1)ボアソン-ボルツマン方程式による圧 縮ベントナイトの陽イオン交換選択係 数の理論的検討	安田涼、田中真悟、 林大介	日本原子力学会 2024 年秋の大会 2024/9/11～9/13
28	緩衝材の塩水による化学影響に関する イオン交換挙動の解析評価方法の検討 (2) 通水試験の再現解析	安田涼、田中真悟、 林大介	日本原子力学会 2024 年秋の大会 2024/9/11～9/13
29	Effects of ionic strength on cation exchange selectivities of Ca(II), Mg(II), K(I) for Na(II) in compacted and dispersed montmorillonite	安田涼、田中真悟、 林大介、大和田仁	Clay Conference 24 2024/11/25～11/28
30	A study on buffer-material erosion under constant water head confition	林大介、菊池広人	Clay Conference 24 2024/11/25～11/28
31	Changes in swelling pressure distribution on radially swollen bentonite buffer surfaces	林大介、菊池広人、 安田涼	Clay Conference 24 2024/11/25～11/28
32	Numerical investigation of pore characteristics in spherical and platelet particle beds	八木翼	Clay Conference 24 2024/11/25～11/28
33	Numerical analysis of permeability in sphere-platelet mixtures	八木翼	Clay Conference 24 2024/11/25～11/28
34	Study of a new in-situ initial stress measurement method for deep vertical borehole in sedimentary soft rock	広中良和	AGU24 2024/12/9～12/13
35	堆積軟岩体の水没鉛直井に適用可能な高 精度三次元地圧測定法の開発－円錐孔壁 ひずみ法による地圧測定法の提案－	広中良和	第 16 回岩の力学国内シンポ ジウム 2025/1/14～1/16
36	堆積軟岩体の水没鉛直井に適用可能な高 精度三次元地圧測定法の開発－円錐孔壁 ひずみ法の室内検証試験－	広中良和	第 16 回岩の力学国内シンポ ジウム 2025/1/14～1/16
37	堆積軟岩体の水没鉛直井に適用可能な高 精度三次元地圧測定法の開発－円錐孔壁 ひずみ法の現場適用実験－	広中良和	第 16 回岩の力学国内シンポ ジウム 2025/1/14～1/16
38	TRU 廃棄物の廃棄体パッケージの開発 (7)廃棄体パッケージの落下解析	丸山紀之	日本原子力学会 2024 年春の年会 2024/3/26～3/28

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
39	加速器質量分析 (AMS) による照射済み燃料被覆管からの ³⁶ Cl溶出率測定	桜木智史、田中真悟、植田浩義	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	地層処分事業等の国際的な動向	稲垣裕亮	原子力年鑑 2025 P171-P175 2024 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№149	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～	2024年4月
2	原環センタートピックス№150	TRU 廃棄物の地層処分におけるヨウ素 129 対策	2024年7月
3	原環センタートピックス№151	緩衝材の施工技術オプションの整備－緩衝 材の流出及び膨出の評価方法に係わる検討 －	2024年10月
4	原環センター2023年度 技術年報		2024年12月
5	原環センタートピックス№152	ベントナイト緩衝材中のガス移行現象の理 解と移行解析手法の開発 －現状と今後の 展望－	2025年1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	2024/4/10	《カナダ》核燃料廃棄物管理機関（NWMO）が 2024～2028 年の実施計画書を公表
2	2024/4/17	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]
3	2024/5/15	《カナダ》使用済燃料処分場のサイト選定の状況－候補 2 自治体で処分場受け入れに関する協定を締結
4	2024/6/3	《フランス》原子力安全規制機関の再編に関する法律が公布
5	2024/6/6	《英国》放射性物質の管理と廃止措置に関する政策文書を公表
6	2024/6/18	《米国》NRC が低レベル放射性廃棄物の処分に係る連邦規則の改定案を公表
7	2024/6/19	《フランス》地層処分場の設置許可申請書の技術審査の第 1 段階の結果が公表
8	2024/6/24	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]
9	2024/6/27	《韓国》地下研究所サイトの公募開始
10	2024/7/2	《カナダ》カナダ原子力安全委員会（CNSC）が規制文書「REGDOC-1.2.3 許認可申請指針：地層処分場のサイト準備の許認可」を公表
11	2024/7/22	《カナダ》使用済燃料処分場のサイト選定の状況－イグナス・タウンシップ議会がサイト選定プロセスへの参加を継続することを正式に表明
12	2024/7/30	追記)《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 [2023 年 4 月 17 日既報]
13	2024/8/20	追記)《カナダ》使用済燃料処分場のサイト選定の状況－イグナス・タウンシップ議会がサイト選定プロセスへの参加を継続することを正式に表明 [2024 年 7 月 22 日]
14	2024/9/2	《フィンランド》ポシヴァ社が使用済燃料の最終処分場の試運転を開始
15	2024/10/29	《スウェーデン》土地・環境裁判所が環境法典に基づく処分場等の許可発給 - 使用済燃料処分場の準備作業が開始可能に -
16	2024/11/1	《カナダ》使用済燃料処分場のサイト選定の状況－サウスブルース自治体における処分場の受け入れに関する住民投票で賛成の住民が多数となる
17	2024/11/20	《米国》先進原子炉導入促進等を図る ADVANCE 法の公表－使用済燃料等に関する 2 年毎の報告を DOE に義務付け－
18	2024/11/20	追記)《カナダ》使用済燃料処分場のサイト選定の状況－イグナス・タウンシップ議会がサイト選定プロセスへの参加を継続することを正式に表明 [2024 年 7 月 22 日]
19	2024/11/26	《スイス》NAGRA が地層処分場プロジェクトの概要承認申請書を提出
20	2024/11/26	《フランス》国家評価委員会（CNE）が第 18 回評価報告書を公表
21	2024/11/28	《英国》放射性廃棄物処分施設に関する規制ガイダンス草案の意見募集開始

No	掲載日	タイトル
22	2024/11/29	《カナダ》使用済燃料処分場のサイト選定の状況－NWMO がワビゲーン・レイク・オジブウェイ・ネーション（WLON）及びイグナス・タウンシップを処分場の受け入れ地域として選定
23	2024/12/2	追記)《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前に必要な承認を申請〔2023年4月7日〕
24	2024/12/3	追記)《ドイツ》サイト選定手続き第1段階の中間報告書が公表－地質学的な基準・要件を満たす「サイト区域」を選定－〔2020年10月2日〕
25	2024/12/5	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〕
26	2024/12/24	《韓国》地下研究所サイトの立地自治体が決定
27	2025/1/16	《スウェーデン》使用済燃料処分場の建設が開始
28	2025/1/23	《フランス》地層処分場の設置許可申請書の技術審査の第2段階の結果が公表
29	2025/2/5	《英国》地層処分施設のサイト選定における重点エリアを特定
30	2025/2/17	追記)《英国》英国で4例目となるテッドルソープ GDF コミュニティパートナーシップが設立〔2022年7月7日既報〕
31	2025/3/5	《フィンランド》キャニスタ封入施設における試運転が終了
32	2025/3/7	《韓国》高レベル放射性廃棄物管理特別法が成立
33	2025/3/10	《米国》廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）の新換気システム（SSCVS）の試験・試運転段階が完了
34	2025/3/26	《ドイツ》高レベル放射性廃棄物の処分場サイト選定スケジュール短縮の検討

5. 委員会一覧

区分	分野	名称	審議事項
I 調査研究			
1. 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に關する調査研究		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關する審議
		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關する審議
		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・工学の技術開発に關する研究計画、実施方法、結果の評価等に關する審議
		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關する研究計画、実施方法、結果の評価等の審議
2. 低レベル放射性廃棄物の処分に關する調査研究		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關する審議
3. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究		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關する研究計画、研究成果等の審議

原環センター 2024年度 技術年報

2026年1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、
企画室（kikaku@rwmc.or.jp）までお問い合わせください。

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター
Radioactive Waste Management Funding and Research Center

〒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
<https://www.rwmc.or.jp/>