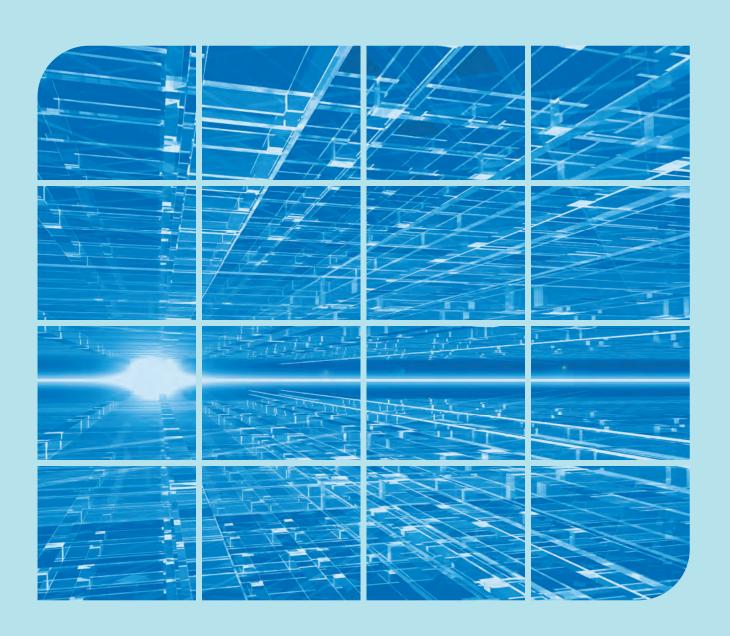
RUM

原環センター

2019年度 技術年報



公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

ごあいさつ

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

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

原子力利用や放射性廃棄物の最終処分に関する様々な議論が行われていますが、当センターは、原子力技術分野に関わる一員としての立場を認識し、社会から求められる調査研究やそれら成果の普及に積極的に取り組んでいます。この技術年報は、2019年度に実施した調査研究等の内容を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たものです。

本技術年報を通じて、当センターの活動をご理解いただければ幸いです。

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター 理事長 髙 橋 彰

目 次

Ι.	低し	·ベル放射性廃棄物の処分に関する調査研究	. 1
	1.	地下空洞型処分施設機能確認試験	. 1
	2.	その他の低レベル放射性廃棄物処分に関する調査研究	. 9
$\mathbb{I}.$	高し	ベル放射性廃棄物等の地層処分に関する調査研究	11
	1.	ニアフィールドシステム評価確証技術開発	11
	2.	地層処分施設閉鎖技術確証試験	15
	3.	可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発	21
		3-1 事業の全体概要	21
		3-2 地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発-実証試験	23
		3-3 回収可能性の維持についての検討	25
	4.	沿岸部処分システム評価確証技術開発	29
	5.	TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発	35
		5-1 事業の全体概要	
		5-2 廃棄体パッケージの閉じ込め性能に係る試験と評価	37
		5-3 陰イオン核種に対する閉じ込め技術の開発	43
		5-4 廃棄体からの核種溶出モデルの高度化	49
		5-5 ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化	
		-ナチュラルアナログによる緩衝材の長期安定性の検証	
		5-6 廃棄体由来の発生ガスに関する現象解析モデルの妥当性検討	
	6.	TO A CONTROL OF THE C	
	7.		65
	8.	HIP (熱間等方圧加圧) 法による TRU 廃棄物の新しい処理・固化技術	
		の研究	67
	9.	多様な核燃料サイクル条件を考慮したバックエンド対策の最適化	
		に関する研究	
		その他の地層処分に関する調査研究	
Ⅲ.		付性廃棄物全般に共通する調査研究等	
	1.	77.77 127827 13 177 1 70 E 111 1KW4122	71
	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	5 0
	0	に関する業務	73
	3.	カナダにおける低・中レベル放射性廃棄物埋設に係るセーフティ	70
	4	ケースの調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
11.7		その他の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等	
IV.		等交流	
٧.		料 講演会、セミナー、研究発表会	
	1.	講演会、セミナー、研究発表会論文、学会発表等	
		調义、字会宪表等	
		刊行物	
		ホームペーンへの海外	
	υ.	女只云 見	90

1. 低レベル放射性廃棄物の処分に関す る調査研究

1. 地下空洞型処分施設機能確認試験

◇事業の概要

原子力発電所等の運転及び解体に伴って発生 する低レベル放射性廃棄物中には、埋設時点の放 射能濃度がコンクリートピット処分対象廃棄物 に比べ2桁程度高い廃棄物が存在する10。

このため、これら廃棄物については、廃棄物と 公衆の離隔距離を確保し、かつ、長期にわたり放 射性物質の移行抑制を図るための処分方法とし て地下 70 m 以深の地下空洞内に圧縮ベントナイ ト等の人工バリアを備えた処分施設(以下、「地 下空洞型処分施設」という。)を設置し、そこに 埋設する方法が検討されてきている。

また、これら廃棄物については、その潜在的な 影響が長期にわたり残存する可能性があるため、 廃止措置の開始までの期間 (300~400 年程度)、 モニタリング等の能動的管理が求められる可能 性がある。

これらを背景とし、本事業は、2015年度から5 ヵ年にわたり、2014年度までに構築した実規模施 設を活用し、地下空洞型処分施設の閉鎖措置まで 並びに閉鎖措置後廃止措置までに取り組むこと が可能なモニタリングの課題に資する、人工バリ アや周辺岩盤の長期にわたる機能確認方法の確 立を目的とした検討を実施するものであり、2019 年度が最終年度となる。

なお、本研究開発は、経済産業省資源エネルギ ー庁の委託事業「平成31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 施設機能確認試験)」により実施したものである。

◇2019 年度の成果 3)

- (1)施設挙動の定量化
- 1) 施設挙動の定量化方法

モニタリング計画を具体的に検討するに当た り、まず、モニタリング候補を網羅的に挙げた 上で、各事象を定量的に評価することとした。 表-1 に部位と事象ごとの定量化方法を示す。 2019 年度は、これらのうち解析的検討による施 設挙動の定量化を実施した。

表-1 定量化方法				
部位	事象	定量化方法		
	発熱	熱・水に着目した解析的検討 (解析コード:TOUGH2) により定量化する		
廃棄体	容器の腐食膨張	既往検討成果、過年度検討成果を調査・整理し、腐食開始時期、腐食量、 膨張量を同定する		
	放射線分解ガス の発生	既往検討成果、原子力学会標準等を 調査し、影響の程度を整理する		
	ひび割れ発生	既往検討成果から収縮量を推定する		
区画内 充てん材	化学的変質(Ca 溶出)	化学に着目した解析的検討(解析コード:LIFE D.N.A.) により定量化する		
	放射線分解ガス の発生	既往検討成果、原子力学会標準等を 調査し、影響の程度を整理する		
	ひび割れ発生	水・力学に着目した解析的検討(解 析コード:CODE_BRIGHT)及び二次元 骨組み解析により定量化する		
コンクリートピッ	化学的変質(Ca 溶出)	化学に着目した解析的検討(解析コード:LIFE D.N.A.) により定量化する		
 -	鉄筋の腐食膨張	既往検討成果、過年度検討成果を調査・整理し、腐食開始時期、腐食量、 膨張量を同定する		
	ひび割れ発生	二次元骨組み解析により定量化する		
低拡散層	化学的変質(Ca 溶出等)	化学に着目した解析的検討(解析コード:LIFE D.N.A.) により定量化する		
	底部低透水層の 沈下	水・力学に着目した解析的検討(解 析コード:CODE_BRIGHT)により定量 化する		
	建設・埋設段階 の水接触による 変状	実規模施設の実績から、建設・埋設 段階における膨潤・流出の発生可能 性を評価する		
低透水層	地下水浸潤による膨潤	水・力学に着目した解析的検討(解 析コード:CODE_BRIGHT)により定量 化する		
	閉鎖後の流出	既往検討成果を調査・整理し、発生 可能性や影響の程度を整理する		
	Ca 型化	化学に着目した解析的検討(解析コード:LIFE D.N.A.) により定量化する		
	建設・埋設段階 の水接触による 変状	水・力学に着目した解析的検討(解析コード: CODE_BRIGHT)により定量 化する		
空洞内 充てん材 (土質系)	沈下による天端 部の空隙発生	閉鎖技術確証試験で施工した埋戻し 材の挙動計測データから空隙発生の 可能性、発生する空隙の大きさを同 定する		
	地下水浸潤による膨潤	水・力学に着目した解析的検討(解 析コード: CODE_BRIGHT)により定量 化する		
防水シート 裏面排水	防水シートの機 能喪失	熱・水に着目した解析的検討(解析 コード: TOUGH2)により定量化する		
	ひび割れ発生	既往検討成果、過年度検討成果を調 査・整理し、影響の程度を整理する		
空洞内 充てん材	化学的変質(Ca 溶出)	化学に着目した解析的検討(解析コード:LIFE D.N.A.) により定量化する		
(セ火ト系)	鉄筋の腐食膨張	既往検討成果、過年度検討成果を調 査・整理し、腐食開始時期、腐食量、 膨張量を同定する		
処分空洞	岩盤クリープに よる変形	試験空洞掘削実績等の既往文献を調 査し、発生時期と変形量を同定する		
周辺岩盤	地下水の高pH化	化学に着目した解析的検討(解析コード:LIFE D.N.A.) により定量化する		

2)熱・水・力学に着目した施設挙動解析

閉鎖措置段階以降の地下水浸潤挙動を確認する指標として、前年度は『温度変化』に着目したが、2019 年度はベントナイト膨潤に伴い生じる『応力変化』に注目し、前年度に実施した解析結果を精査するとともに、モデル化や前提条件の検証を行うための追加解析を実施した。

解析モデルを図-1 に示す。解析用パラメータは、それぞれのバリア材に応じた試験結果及び文献値に基づき設定した。解析には、水-力学連成二相流解析コード CODE BRIGHT ⁴⁾を用いた。

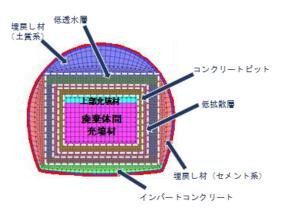


図-1 水-力学連成二相流解析モデル

解析結果の一例として、図-2 に代表点(底部低透水層下面及び側部低透水層外面に設定した各3点の出力点)における全応力と経過時間、飽和度と経過時間、全応力と飽和度の関係を示す。全応力と飽和度の関係から、いずれの出力点位置においても、飽和度が95%を超えると全応力は最大0.2 MPa~1.5 MPa の間で急激に上昇していることがわかる。全応力と飽和度の経時変化に関しては、位置によって有意な差が認められた。

低透水層は締固めにより施工されることから、 その締固めの影響を解析にどのように考慮する か、その影響が解析結果にどの程度影響するか確 認することを目的として、追加解析を実施した。 検討フローと検討内容を以下に示す。

【初期応力状態の設定】

・ 締固められた粘土は OCR が増加し、初期異方性を有する。そのため、初期異方性を与えた初期応力状態を設定する。

【剛性と OCR をパラメータにした検討】

・ 締固め効果によって、密度と OCR のみならず、 強度と剛性の増加も見込まれる。しかし、そ の効果は定量的に把握できていないことか ら、締固め効果として強度と剛性に着目して

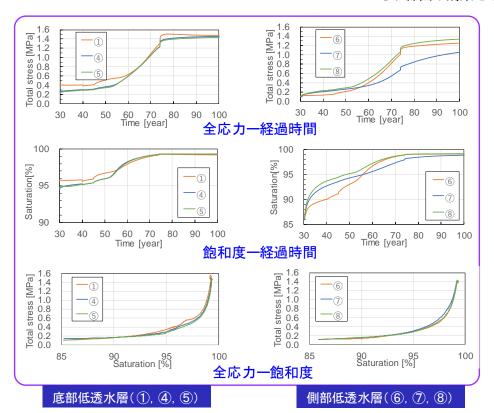
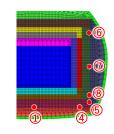


図-2 水-力学連成二相流解析結果



①~⑧は解析結果出力点

検討を実施する。

・単位要素を用いて三軸状態からの一軸圧縮解析を実施する。この時、OCR と膨潤指数 ĸをパラメータとして 10 ケースの解析ケースを設定し、各ケースの有効応力経路と応力ーひずみ関係を算出する。

【異なる解析条件による影響比較検討】

・以上の検討をもとに追加解析ケースを選択し(上記、10ケース中3ケースを選択)、施設全体モデルを用いた解析により、締固め程度が解析結果に与える影響について検討を行う。

施設全体モデルを用いて実施した追加解析結果を基本ケースの結果と比較したところ、解析条件の違いにより、解析結果(施設挙動)が大きく変わり得ることが確認された。特にベントナイトは条件により複雑な挙動を示す材料であるものの、解析に必要とされる試験データが十分とはいえない状況にある。信頼性の高い挙動予測を可能にするために、圧密試験や三軸試験等による更なるデータ取得が、さらに、模型実験等による検証が望まれる。

3)化学に着目した施設挙動解析

化学に着目した 2019 年度の検討では、人工バリアを構成する各部材の物性が施設周辺での各種イオン濃度や pH の分布、並びに経時変化に及ぼす影響を確認すること、さらに、地下水に溶出するイオンの由来を明らかにすることを目的とした。

解析ケースを表-2、表-3に示す。解析領域を図-3に、解析モデル(処分空洞周辺)を図-4に示す。リファレンスとなるケース1の解析用パラメータは、それぞれのバリア材に応じた試験結果及び文献値に基づき設定した。解析には、物質移行解析プログラムLIFE D. N. A. ⁵⁾を用いた。

ケース 1~ケース 4 の結果を比較したところ、施設内では pH、Na イオン、Ca イオンの分布に差異が認められたが、施設周辺の岩盤では、ほぼ変化がなかった。すなわち、人工バリア部材の透水係数や拡散係数が 100 倍になったとしても、また、空洞内充てん材や吹付けコンクリートの物性を変更しても、周辺岩盤におけるイオン組成の分布の変化は限定的である。

表-2 人工バリアの物性値に係る感度解析ケース

ケース	概要
1	リファレンス
2	低透水層、低拡散層、コンクリートピットの拡散係数、透水係数を 10 倍に
3	低透水層、低拡散層、コンクリートピットの拡散係数、透水係数を 100 倍に
4	空洞内充填材(セメント系)の透水係数、拡散係数を LPCFA から OPC 相当にし、吹付けコンクリートの透水係数を大きく

表-3 地下水に溶出するイオンの由来確認解析ケース

ケース	低透水層 低拡散層 コンクリートピット	埋戻し材 (土質系、セ メント系)	吹付けコン クリート	備考
I	0	0	0	ケース 1 と同一
П	0	_	_	
Ш	0	_	0	
IV	_	_	0	
V	0	0	_	

(-:化学的変質を考慮しない、○:化学的変質を考慮する)



図-3 化学挙動解析の解析領域

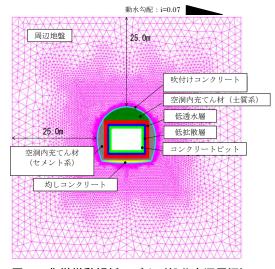


図-4 化学挙動解析モデル(処分空洞周辺)

解析結果の一例として、ケース I 、ケース I 及びケースIVにおける、400 年後の pH 分布を図 -5~図-7 に示す。リファレンスとなるケース I に対して、人工バリア部材のみの化学的変質を 考慮すると、岩盤における pH の上昇がほぼ見ら れない結果となった。また、吹付けコンクリートの化学的変質のみを考慮したケースIVにおける岩盤のpH分布はケースIとほぼ同等となった。ケースI~ケースVの結果を総合的に評価した結果、周辺岩盤の地下水中におけるpHの変化は吹付けコンクリートに含まれるイオンが主であることが明らかとなった。



図-5 400 年後における pH 分布 (ケース I)



図-6 400 年後における pH 分布 (ケースⅡ)



図-7 400 年後における pH 分布 (ケースIV)

- (2) モニタリングへの光ファイバセンサー技術の 適用性検討
- 1) 光ファイバセンサーの耐久性の検討

耐久性の評価に必要なデータを試験的に得ることを目的に、塩分・高 pH・放射線の各環境下において劣化促進を行った。得られたデータをもとに具体的な耐久性評価を直接破断モード、疲労破断モード及び損失増大モードについて検討し(図-8)、モニタリング計画へのフィードバックを試みた。

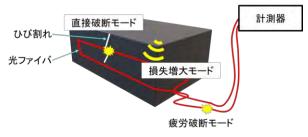


図-8 計測機能を喪失するモード

2) 光ファイバセンサーの敷設方法の検討

光ファイバセンサーによってひずみ分布を計測するためには、対象物との一体性を確保して、対象物に生じた変形を光ファイバセンサーに伝達する必要がある。セメント系材料バリアを計測対象とする場合には、接着剤を用いて光ファイバセンサーを対象物表面に固定することが基本となるが、接着剤による付着が超長期にわたり維持されるとは考えにくい。そこで、接着剤による付着に期待しない光ファイバセンサーの敷設方法を検討するための試験を実施した。敷設試験イメージを図-9に示す。

実験は OFS ケーブルとエンボスケーブルの 2 種類を用いて行った。さらに、エンボスケーブルについては、被覆材の表面粗度の違いによる摩擦力の影響について検討するため、ケーブル表面の凹凸形状を、やすりを用いて加工し、物性値は同一、表面形状のみが異なるケーブルとした。試験では付与する圧力を変えながら試験を行い、摩擦力向上策(凹凸被覆)の効果、隙間開閉の繰返しによる影響などを確認することとした。試験結果の一例として、凹凸形状のよとした。試験結果の一例として、凹凸形状のない光ファイバのひずみ変化を図-10に示す。ある一定の圧力作用下であれば、接着剤を使用しな

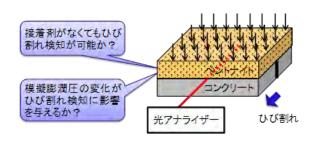


図-9 敷設試験のイメージ

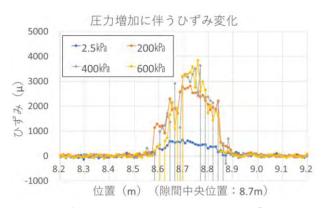


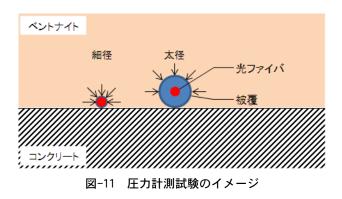
図-10 接着されていない光ファイバのひずみ変化

い場合でもひずみ検知が可能であることが確認された。ただし、光ファイバの被覆材の表面形状の違いによる摩擦力の影響については、今回試験に使用した被覆の凹凸程度では両者の感度に有意な差は認められない結果となり、今後の課題となった。

3) 光ファイバセンサーの圧力計測の検討

ベントナイトを模擬した軟質ゴム材料を介し た加圧方式により圧力を与える試験を行い、光フ ァイバセンサーによる圧力分布計測の可能性に ついて探ることとした。光ファイバセンサーによ る圧力計測方法のイメージを図-11 に示す。低透 水層(ベントナイト)とセメント系材料バリア(コ ンクリート)に挟まれるように、被覆(材料や厚 さなど) が異なる二種類の光ファイバセンサーを 平行に配置することを仮定する。被覆面で受けた 圧力は、被覆を経て内部の光ファイバに伝達され る。その伝達具合は被覆によって異なるため、両 者の光ファイバセンサーの計測結果の差は、ひず みや温度ではなく、圧力によるものと言える。被 覆状態の異なる二種類の光ファイバセンサーに よって、圧力を検知しようとするものである。試 験には、被覆種類の異なる光ファイバセンサーと して、太径ファイバ (PVC 被覆、外径 900 ミクロ ン) と細径ファイバ (UV 被覆、外径 500 ミクロン) の二種類を用意した。

試験で得られた計測値の差から、ひずみ量を算出しグラフ化した結果を図-12に示す。微小ではあるが、圧力増加に伴うひずみの増加を検知している結果となった。ただし、そのひずみの数値は 20μ 程度であり、極めて微小な範囲での変動となり、圧力の定量化とともに今後の更なる課題である。



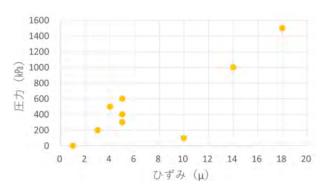


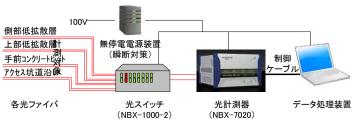
図-12 圧力とひずみの関係

4)光ファイバセンサーによるひずみ、温度の計測 光ファイバセンサーを用いた計測システム(光 ファイバセンサー、光スイッチ、光計測器 (Neubrex 社製 NBX-7020)、データ処理装置から 構成:図-13)により、実規模施設等においてひ ずみ(ひび割れ)及び温度計測を対象とした原位 置試験を実施した。以下に、ひずみ分布計測の一 例として、上部低拡散層を対象とした原位置試験 を紹介する。

光ファイバセンサーが 30cm 間隔の格子状に設置された上部低拡散層 (無筋モルタル)を対象に、標準パッカー工法を適用し施設にひび割れを発生させて、そのときに生じるひずみを光ファイバセンサーで計測した。ひび割れ誘発位置を図-14に示す。参照データ取得のために設置したパイ型ゲージ数は 8、ひずみゲージ数は 125 である。試験では、各計測ステップにおけるパッカーの加圧停止の目安をひずみゲージ及びパイ型ゲージの値をもとに管理した (表-4)。

試験結果の一例として、光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースでの、ひび割れを横断する長軸方向(図-14に示すP14通り)でのSTEP5における光ファイバセンサーによる計測結果と近傍のひずみゲージの計測結果を図-15に示す。

一連の試験結果から、ブリルアン計測 (PPP-BOTDA 方式)、レイリー計測 (TW-COTDR 方式)ともに、目視でひび割れが確認されるより前に、ひずみの局所的な変化をとらえることができること、特に、レイリー計測は微小なひずみ変化をとらえるのに優れており、ひび割れの予兆をとらえられる可能性があることが明らかとなった。



赤線:光ファイバ、黒線:電源ケーブル

図-13 計測システムの構成

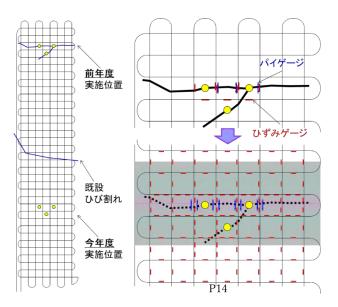


図-14 ひび割れ誘発位置(上部低拡散層)

表-4 計測ステップと加圧停止の目安値

STEP	各 STEP における 加圧停止の目安	標準パッカー の加圧値
0	初期値	0 MPa
1	ひずみゲージの最大値が 10μ	8MPa
2	ひずみゲージの最大値が 20μ	12MPa
3	ひずみゲージの最大値が 50μ	18MPa
4	ひずみゲージの最大値が 100μ	20MPa
5	パイゲージの最大値が 0.05mm	26MPa
6	パイゲージの最大値が 0.10mm	56MPa
7	パッカーの加圧最大値 70MPa	70MPa

(3) モニタリング計画の具体化に資する検討

モニタリングの対象施設、対象施設の形状、 処分場の建設・操業工程などの前提条件を整理 した上で、モニタリング計画の具体的検討を行った。

計測器の設置などモニタリング行為が人工バリア及び天然バリアに及ぼす影響の程度により

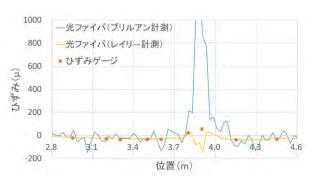


図-15 ひずみ分布計測結果 (STEP5、長軸: P14 通り)

モニタリングの概念が異なってくることが考えられるため、ここではその違いを示すために、分かり易さの観点から表-5 に示す三つに区分してモニタリング計画の具体化に向けた検討を行うこととした。

それぞれの技術の適用性と精度等を考慮し、 既存の計測技術を適用した場合の区分 A、Bに相 当するモニタリング計画と、光ファイバセンサ 一技術を適用した場合の区分 C に相当するモニ タリング計画の例を表-6 に示すとおり提案した。 さらに、それぞれのモニタリング項目について、 いつ・どこで・何を・どのように計測するのか、 加えて、その計測結果をどのように利用するか という観点でモニタリング計画の具体化を図っ た。検討結果の一例として、既存の計測技術を 適用した場合の低拡散層のひび割れを対象とし たモニタリング計画を表-7 に示す。

その一方で、信頼性あるデータがどの程度の 長期間継続して取得できるのか、そのための保 証は何か、設備・機器の更新の問題はクリアさ れるのか否か、計測箇所での測定値の変動から どのように影響事象発生箇所とその発生の程度 を把握できるのかなど、機能確認方法の確立に は、まだ残された課題も多いことも明らかとな った。

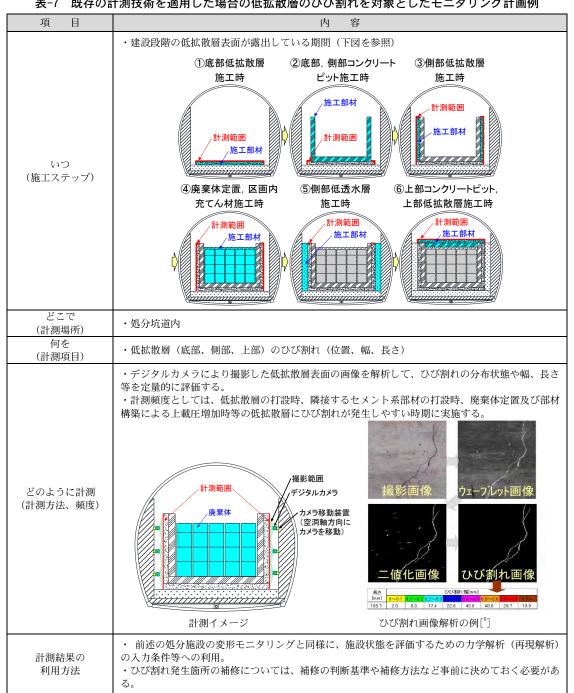
表-5 モニタリング計画の区分

区分	モニタリングの基本方針
A	バリア機能を低下させないことを基本とする
В	修復可僅を条件とし、僅かなバリア機能の低下は許容する
С	僅かなバリア機能の低下を許容する

表-6 モニタリング計画の検討におけるモニタリング項目

計測技術	段階	モニタリング項目	
既存の計測技術 (区分 A、B)	閉鎖措置段階前		
	閉鎖措置段階以降	・ 周辺地下水の水質分析 (ボーリング孔) ・ 地震動計測 (地上のみ)	
光ファイバセンサー技術 (区分 C)	閉鎖措置段階前 及び 閉鎖措置段階以降	・ セメント系材料のひび割れ観測 ・ 温度変化 ・ (膨潤圧を含む)施設内の応力分布	

表-7 既存の計測技術を適用した場合の低拡散層のひび割れを対象としたモニタリング計画例



◇おわりに

2015年度から5ヵ年にわたり実施した低レベル 放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業(地下 空洞型処分施設機能確認試験)が 2019 年度にて 完了した。

発電所廃棄物や TRU 廃棄物(地層処分相当の廃棄物を除く)等の低レベル放射性廃棄物の中深度処分施設の計画、設計や円滑な建設及び操業には、より現実的な条件下で、各種の検討や実証試験等の積み重ねが必要となる。本事業は、こうした状況に鑑み、地下空洞型処分施設の機能確認を主目的とする実証的な試験を行ったものである。

本事業では、大断面の地下空洞における処分施設の主に人工バリアの機能の確認方法の検討及び実証的な試験が主となる。このため、試験の計画にあたっては、低レベル放射性廃棄物等の処分施設の計画・設計・施工・安全評価に関わりのある専門家からなる委員会を設け、幅広く関連する知見や意見等を取り入れて検討を進めた。地下空洞型処分施設を対象とし、ベントナイト系材料やセメント系材料により構成される人工バリアについて、処分施設の閉鎖措置まで並びに閉鎖措置後廃止措置までに取り組むことが可能なモニタリングの課題に資するため、人工バリアや周辺岩盤の長期に亘る機能確認方法の確立を目的として実施した技術開発の成果を取りまとめた。

地下空洞型処分が安全で信頼に足るものとして社会に受け入れられるものとするために本事業の成果が活用され、地下空洞型処分システムが、ステークホルダーにとってより納得のいくものとなることを期待している。

- 1) 電気事業連合会、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、平成 27年2月12日 (平成28年8月23日一部改訂)
- 2) 原子力規制庁、炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え 方について(改定案)、廃炉等に伴う放射性廃棄物の規 制に関する検討チーム第27回会合、参考資料27-2-2、 平成29年11月2日
- 3) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成31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 地下空洞型処分施設機能確認試験報告書、 2020
- 4) Olivella, S., Gens, A., Carrera, J., and Alonso, E.E.: Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media, Engineering Computations, 13(7), 87-112, (1996)

- 5) 横関康祐ほか、水和反応と温度依存性を考慮したセメント系材料のイオン拡散係数予測モデル、土木学会論文集、No. 725/V-58、pp. 131-142、2003
- 6) 国土交通省北海道開発局ホームページ:
- http://www.hkd.mlit.go.jp/ky/jg/gijyutu/ud49g700000 04bv9-att/k 23.pdf

種類ごとに比表面積を設定した。

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中深度処分、 浅地中処分に関する以下の調査研究を行った。

(1)浅地中ピット処分対象廃棄体(ドラム缶)の製作及び検査方法の整備に関する調査 浅地中ピット処分対象廃棄体(ドラム缶形態) 製作方法及び検査方法に関する標準本体及び附属書の原案を作成するとともに、日本原子力学会

標準委員会 LLW 廃棄体等製作·管理分科会審議支

援などを行った。

(2)中深度処分施設の埋設後管理標準及び浅地中 処分施設の施設検査方法標準に関する調査 埋設後管理標準に関して、L1 新規制基準の検

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

(3) 中深度処分の安全評価手法標準の改定に関する調査

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

(4) 浅地中ピット処分対象廃棄体(ドラム缶)の製作及び検査方法 標準制定に必要な基礎データ等の収集・整理並びに公開文献化に関する調査

浅地中ピット処分対象廃棄体(ドラム缶形態) 製作方法及び検査方法に関する標準の制定に当 たって、公開が必要となる廃棄体製作方法等に係 る基礎データ等を体系的にとりまとめ、公開図書 案を作成した。

(5)4号埋設対象廃棄物の比表面積設定委託

4号埋設施設の成立性検討に資するために、対象廃棄物の機器図面情報等を基に 3D-CAD モデルを作成し、CAD システムの機能を用いて、廃棄物



II. 高レベル放射性廃棄物等の地層処分 に関する調査研究

1. ニアフィールドシステム評価確証技術 開発

◇事業の概要

地層処分システムにおいて "ニアフィールド"と称される領域は、人工バリアと、その設置により影響を受けると考えられる近傍の岩盤を言う。ニアフィールドは人工バリアであるオーバーパック(金属)と緩衝材(粘土)、セメント系材料や岩盤など複数の材料から構成されており、それらの劣化・変質や材料間の相互作用などにより環境条件は時間とともに変化し、バリア構成要素の安全機能や核種移行挙動に影響を与える可能性がある。そのため、人工バリアの状態の変化や長期挙動評価、性能を評価する技術の開発とその評価の妥当性確認が重要である。

本事業では、ニアフィールドの状態変遷を評価する技術の開発と確証を目指し、人工バリアの構成材料を対象とした評価技術の研究開発を進めている。その中で当センターは、「緩衝材の流出現象及びその後の再冠水プロセスにおける挙動」に関する研究開発に取り組んでいる。

人工バリアとして緩衝材に期待されている複数の機能は緩衝材の飽和後に発揮されるものであり、緩衝材の長期性能の評価は、完全飽和、密度均一を前提として行われている。しかし、初期の施工時、および飽和までの期間に生じる緩衝材の密度分布は、飽和後にも残留する可能性があることが報告されている¹。緩衝材は水の浸潤に伴い、膨潤圧の発生、透水性の変化などが起こるため、飽和までの期間に最も状態が変化し、隙間などへの先行的な浸潤と膨潤・閉塞など、不均質な浸潤環境の影響も受ける。飽和までの期間に緩衝材の状態がどのように変遷するかを把握し、飽和までにかかる長期間を経た緩衝材の確全性を評価する上で重要である。

また、緩衝材の流出は、緩衝材と処分孔の孔壁 の境界に水みちができ、水みちを介して緩衝材が 処分孔外に運び出される現象である。本事業では、 緩衝材定置直後から再冠水するまでの期間を対象 に、緩衝材の流出挙動を把握し、抑制するための 工学的対策を具体化することと、流出を経て飽和 した後の緩衝材の状態を予測するための評価技術 を整備することを目的としている。

なお、本事業は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(ニアフィールドシステム評価確証技術開発)」により、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構及び公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが共同で実施したものである。

◇2019 年度の成果 1)

(1)研究の目的

本検討は大きく以下の 2 つの項目にわけて検討を進めた。

- 1)緩衝材の流出を抑制するための工学的対策の具体化
- 2)緩衝材の飽和プロセスを対象とした解析手法の構築
- 2つの実施概要の関係を図-1に示す。

1)の工学的対策の具体化には、処分孔竪置きブロック方式の処分概念を対象とし、「ケイ砂による隙間処理」を先行検討対象とした。その効果を確認し、実現性のある工学的対策オプションの1つとしての見通しを示すことを目標とした。2019年度の検討では、処分孔が埋め戻されるまでの期間を対象として、緩衝材の流出挙動とその影響範囲の把握ならびに流出抑制対策の効果を把握するための試験と考察を先行させた。

2)の飽和プロセスを対象とした解析手法については、手法の開発・整備の第1段階として、緩衝材の浸潤・膨潤プロセスに伴う隙間充填挙動に着目し、小型供試体サイズを対象として力学解析によって飽和後の密度分布を示す手法を構築することを目標とした。加えて、解析的手法の検証ツールとしての遠心模型試験技術の適用性を確認するために、緩衝材への水の浸潤挙動を対象として妥当性を確認することとした。

(2)緩衝材の流出を抑制するための工学的対策の具体化

緩衝材流出現象と抑制効果を確認するための 試験として、"現象理解と地下試験の予備的検討

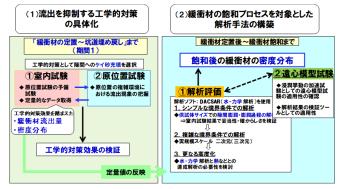


図-1 本事業における各実施内容の関係

のための室内試験(以下「室内試験」という)"と "地下坑道における流出現象の把握試験(以下「原 位置試験」という)"を実施した。

①室内試験

原位置試験で行うケイ砂の隙間充填の試験の予備試験として、小型セルによる2ヵ月程度の試験を実施した。この試験では3号(粒径:2~28mm)、5号(粒径:1~6mm)、3+5号(1:1で混合)の3種類の粒径の異なるケイ砂を用いた。

結果を図-2 に示す。緩衝材の流出量は隙間未充填の場合の方が多く、ケイ砂充填によって流出が抑制された。また、今回の試験条件では、ケイ砂3種類の粒径相違に関わらず、緩衝材流出に対する効果はほぼ同等であった。よって、原位置試験では、施工のし易さから3号ケイ砂を使用することとした。

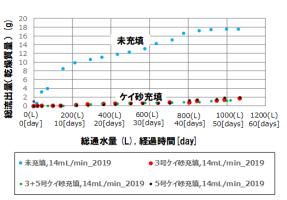


図-2 ケイ砂の粒径を変えた場合の緩衝材流出量

②原位置試験

原位置試験では、幌延深地層研究センター地下 350mの試験坑道に設置した試験孔を使用し、自 然湧水環境において、以下の2つのケース(条件) の流出試験を行い、試験中の湧水量、土圧、緩衝 材の流出量、試験後の緩衝材の密度計測等を行い、 「隙間処理(ケイ砂充填)」による工学的対策の 効果(緩衝材の流出抑制の効果)を確認した。

ケース 1: 緩衝材と孔壁との間に隙間がある状態 ケース 2: 工学的対策として、ケイ砂による隙間 充填を施した状態

原位置試験の試験系を図-3 に示す。この試験系は、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」(レビュー版)²⁾に記載されている竪置き・ブロック方式の寸法仕様を約 1/4 で模擬したものである。

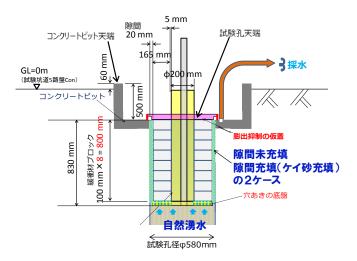


図-3 原位置試験 試験系の概要

原位置試験の結果を表-1、図-4に示す。表-1には、試験期間、総排水量が同条件での両ケースの緩衝材流出量を示した(表中の緑色、橙色箇所)。

試験期間 30日時点の緩衝材の総流出量を両ケースで比較すると、ケイ砂充填のケースでは、総流出量が 558g、未充填のケースでは、約 3100g となり、この期間においては、ケイ砂による隙間処理により、緩衝材の流出量を抑制する効果が見られた。

工学的対策「ケイ砂による隙間処理」の効果を 次のように整理した。

- ・緩衝材の膨潤を抑制し、緩衝材界面の密度低下 領域を減ずる効果
- ・湧水と緩衝材表面との接触面積を小さくする 効果
- ・湧水を緩衝材の周囲のケイ砂層全体に均等に 流すことにより、緩衝材表面に作用する(流速 を起因とする) せん断応力を抑制する効果 処分孔と緩衝材の隙間にケイ砂を充填するこ

とによるこれらの効果により、緩衝材流出量を減らすことができたと考えられる。また、ケイ砂層があることにより、緩衝材が周囲より均等に浸潤する効果もあると考えられ、緩衝材の再冠水後の品質の確保、及び予測モデルの単純化にも寄与する効果も期待できる。

丰_1	=+ 医全 红 田	(緩衝材流出量)
- -	乱频给某	(矮餌材流出軍)

湧水条件	試験ケース	試験期間	総緩衝材 流出量	総排水量	試験終了時 の流出割合 ※1
	ケース1; 工学的対策あり ケイ砂による隙間処理	29⊟*2	558 g	29,000 L	0.2%
自然湧水		約12日	約110 g	(参考) 約7,400 L時点	0.04%
	ケース2;	56⊟	3,325 g	7,444 L	1.1%
備妻·	工学的対策なし 隙間未充填	(参考) 29日時点	約3,100 g	約6,700 L	約1.0%

1995 (1995) m 試験抗道5 試験孔2を使用、自然湧水条件での流出試験 ※1 試験開始時の試験体(緩衝材)の乾燥重量298 kgに対する試験終了時の流出割合 ※2 定置治具の強度と土圧計の計測値を考慮して29日で試験終了とした

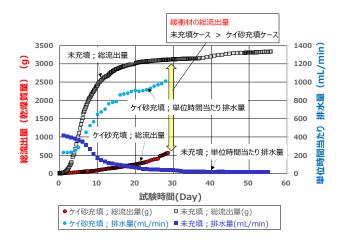


図-4 試験結果(試験期間と流出量の関係)

(3)緩衝材の飽和プロセスを対象とした解析手法の構築

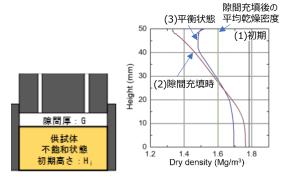
飽和後の緩衝材の状態を予測するための検討として、流出現象を考慮した緩衝材の飽和後の状態予測のための解析手法の整備(以下「解析評価」という)と解析評価の検証データを得る方法として遠心模型試験の検証データ適用性の検討(以下「遠心模型試験」という)を実施した。

①解析評価

解析評価は、ベントナイトを含む緩衝材の飽和 過程(状態変化)をより確からしく予測評価し、 予測された飽和後の状態を長期の性能評価の初 期状態とすることにより、不確実性を低減するこ とを目的とした。緩衝材をブロック方式で定置し た場合には、緩衝材と孔壁との間に隙間が存在す る状態を念頭に置き(緩衝材の界面の一部が流出 により損失する可能性も考慮)、再冠水過程における緩衝材の膨潤による隙間の充填プロセス、及び充填後の平衡状態に至るまでの緩衝材の密度分布や応力分布に関する変化プロセスを評価するための力学解析手法について検討し、同解析手法によるシミュレーションを通して、分布性状が変化するメカニズムの説明を試みた。

解析は単純な系から実スケールを最終目標と して段階的に実施するものとし、今年度は、小型 セルによる試験の供試体サイズの、円筒供試体が 軸方向に膨潤して隙間を充填する過程を対象と した。解析モデルは二次元軸対称条件を仮定し、 円筒供試体の半径方向の一断面とした。解析には、 緩衝材 (ベントナイト) 特有の膨潤挙動を再現で きる塑性膨潤の概念を取入れ、不飽和から飽和へ の連続した支配方程式を適用した土/水連成有 限要素解析手法である DACSAR³⁾を使用した。2018 年度は、メカニズムの理解を容易にするため、緩 衝材が飽和している状態を初期状態としたシミ ュレーションを実施した。その結果、隙間が充填 された後もベントナイトの膨潤が進み、表面付近 が再圧縮されることにより密度が高くなること が解析により示された。しかし、供試体全体が同 じ密度になるまでには至らず、密度差が残留した まま平衡状態に達するという結果が得られた。

2019 年度は、処分孔への緩衝材ブロックの定 置からの過程を対象とし、解析の初期条件を不飽 和の状態とし、浸潤挙動を含めたシミュレーショ ンを実施した。初期状態を密度一定(含水比 10%) とし、隙間部分から緩衝材内部へと水が浸潤し、 隙間が充填され平衡状態に至るまでの密度分布 変化の例を図-5に示す。本検討により、浸潤と膨 潤が同時に生じるプロセスを解析的に示すこと ができた。得られた結果は、2018年度と同様に、 隙間充填後に表面付近が再圧縮される経過が見 られたが、全体が均一にはならず、密度差が残留 したまま平衡に至った。本検討により、ベントナ イト (膨潤性の材料) を対象とした基礎的な解析 手法を構築すると共に、膨潤現象の理解を進める ことが出来た。今後は、試験データによる解析の 妥当性検証、二次元での解析、スケールアップに ついて検討を進めていく予定である。



a) 解析モデル b) 乾燥密度分布の解析結果

図-5 解析モデルの概念図と解析結果

②遠心模型試験

遠心模型試験では、ダルシー則が成立するような緩やかな浸潤現象に対して、1/Nに縮尺した小型模型に重力加速度 G の N倍の遠心加速度を与えた場合に Nの 2 乗の逆数に時間加速して試験結果が得られることが報告されている ⁴⁾。 そのため、緩衝材への水の浸潤の加速試験としての有効性を確認するために、模型縮尺と遠心加速度をパラメータとして緩衝材中の飽和度と経過時間などに関する試験データを取得した。遠心模型試験及び 1G 場試験の概念図を図-6 に示す。

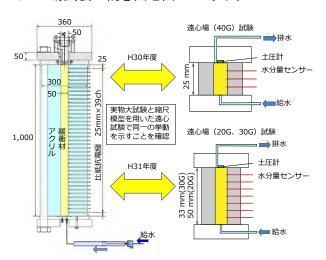


図-6 比較した室内試験と遠心模型試験

20G~40G 場における遠心模型試験結果の一例として、緩衝材中の水の浸潤フロント(飽和度が初期値から1%増加した位置)と時間の関係を図-7に示す。なお、同図には、1G場の室内試験の測定結果と近似曲線を併せて示した。

20G~40G 場試験により、模型の縮尺と遠心力の大きさに依らず概ね一致した結果が得られたことから、緩衝材への水の浸潤については遠心場

の相似則が成立していることが示された。ただし、16 場試験の結果と比較すると、20G~40G 場試験では浸潤速度が遅くなる傾向が見られた。遠心模型試験では、遠心加速度の不均一性や、材料と模型の寸法効果などの試験上の制約がある。そのため、遠心模型試験で16 場試験の結果を完全に再現することは難しかったと考えられる。しかし、16 場試験と遠心模型試験における緩衝材中の水の飽和までの時間の違いを定量的に把握することなどにより、実スケールの緩衝材の飽和時間を推定することができ、再冠水後の人工バリアの状態をより確からしく把握することができると考えられる。

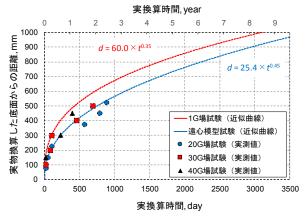


図-7 緩衝材中の水の浸潤位置と時間の関係

また、例えば、1/40の縮小模型で406の遠心加速度で試験を実施した場合には、10日間の試験期間で約40年相当の浸潤試験結果を得ることができ、他の試験方法では得られない期間のデータが得られることから、遠心模型試験は解析結果の妥当性確認のために有効な手段になると考えられる。

- 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, 平成31年度 高レベル放射性廃棄物等 の地層処分に関する技術開発事業 ニアフィールドシ ステム評価確証技術開発報告書,2020
- 2) 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-(レビュー版), 2018.
- 3) Iizuka and Ohta, A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol. 27, No. 3, pp. 71-87, 1987
- 4) 西本, 岡田, 澤田, 遠心力載荷装置を用いた高レベル 放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価(その1)-超 長期遠心載荷岩盤実験装置と遠心力模型試験法の開発 -, 電力中央研究所報告, N10018

2. 地層処分施設閉鎖技術確証試験

◇事業の概要

地層処分研究開発に関する全体計画(平成30年度~令和4年度)では、処分場の閉鎖後に坑道が水みちとなることを防止するための坑道シーリング技術(プラグや埋め戻し材など)について、処分場全体の閉じ込め性能に与える影響の評価や様々な地質環境特性を考慮した試験を行い、設計の詳細化や施工技術の成立性の確認を進める計画である。また、人工バリア等の製作・施工技術に係るモニタリングを含む品質保証体系の整備を進める計画である¹⁾。これを踏まえ、本事業では、処分場の最終閉鎖の判断に資する"製作・施工技術に係る品質保証体系及びモニタリング技術の整備"及び"坑道シーリングに関わる施工技術の整備"に取り組んでいる。

製作・施工技術に係る品質保証体系及びモニタリング技術の整備では、人工バリアを含む人工構造物の製作・施工に係る品質保証体系の構築に向けて、国際共同研究への参画や諸外国の先行検討事例の調査を行い、製作・施工プロセス管理やモニタリングを包含した品質保証体系の全体枠組みの構築に関する考え方を整理した。また、モニタリングに関する共通基盤技術として、地下環境を想定した無線関連技術の適用性試験などを通して、人工構造物の状態把握に係る関連ハード技術の高度化を行うとともに、原位置の状態把握に係る新たな技術の開発動向を調査した。

坑道シーリングに関わる施工技術の整備では、 多様な地質環境条件や処分場設計オプションに柔軟に対応できる"埋め戻し材の材料バリエーション"や"施工技術オプション"の整備に向けて、ベントナイトの種類と混合率及び模擬掘削土の種類と最大粒径などをパラメータとした室内試験及び小規模施工試験等を実施した。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の 委託事業「平成31年度高レベル放射性廃棄物等の 地層処分に関する技術開発事業(地層処分施設閉 鎖技術確証試験)」として、国立研究開発法人日本 原子力研究開発機構及び公益財団法人原子力環境 整備促進・資金管理センターの2機関が共同で実 施したものである²¹。

◇2019 年度の成果 2)

- (1)製作・施工技術に係る品質保証体系及びモニタリング技術の整備
- 1)品質保証及び性能確認の手法や知見の体系化に資する基盤情報の整備

閉鎖後の能動的な管理に依存しない地層処分では、閉鎖時に長期の安全性を担保した地層処分システムが構築されたことを示すことが重要となる。地層処分事業が先行する諸外国では、施設の最終閉鎖の判断に資する取組として、"品質保証"や"モニタリング"ならびにそれらを包含した"性能確認"といった概念が具体化されつつある。そのような動向を踏まえ、本事業では、わが国に適用可能な取組の具体化に向けて、次のような考え方のもとで検討を進めることとしている。

- ○関連する取組を品質保証プログラムと性能確 認プログラムに区別して検討を進める(表-1)
- ○図-1 に示すように、工学的な対応の観点から性能確認プログラムで着目する範囲を再 冠水に至るまでの期間とする

表-1 本事業における品質保証プログラム及び性能確認 プログラムの定義

品質保証プログラム

人工構造物を対象として、一定の施工品質(仕様)を確保 するための取組。製造・施工プロセス管理によるものや施工 物の現物検査等によって品質を確認する。品質保証プログラ ムをとおして得られた構造物の施工後の品質は、その後の人 工構造物の変遷挙動に関する確からしい予測評価のための初 期状態としてのインプット情報となる。

性能確認プログラム

構築した処分システムの変遷挙動に関する、より確からしい評価に資するための情報を得るための取組。品質保証プログラムをとおして得られた構造物の施工後品質に加え、その後の人工構造物の変遷挙動に関する確からしい予測評価のための情報を取得する。性能確認プログラムの対象には、人工構造物と地質環境(ニアフィールド領域の母岩)が含まれ、それらの変遷挙動の把握のために原位置での直接/間接モニタリングや実証試験等が行われる。

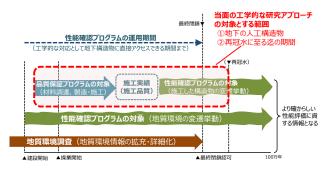


図-1 2つのプログラムの関係と対象範囲

施工品質の確保に係る品質保証プログラムは、 材料調達、地上施設での製造、輸送、施工などの 一連のプロセスが対象となり、その具体化に向け て、事業が先行する北欧(フィンランドやスウェ ーデン)の製造・施工管理手法や他分野における 類似の取組を参考にすることができる。

性能確認プログラムについては、諸外国における先行的な検討事例を踏まえると、次の2つのアプローチ(取組や開発の方向性・方針)が窺える。

- a) 原位置での測定やモニタリングを主体 (米国 やフランスが類似の方向性を指向)
- b)原位置を模擬した環境での試験等を主体(北 欧が類似の方向性を指向)

これらのアプローチは各国の処分概念、地質環境、規制要件等に依存することに留意が必要である。なお、わが国の地層処分に関する安全規制制度は今後具体化が進められるが、最終閉鎖段階までに長期の安全性が確保された処分場が構築されたことを確認するためには、その間のモニタリング活動に一定の役割が期待されることが想定される。以上を踏まえ、性能確認プログラムの当面の研究開発では、上記のa)及びb)の2つの方向性を見据えて取り組む。また、原位置でのモニタリングは品質保証や性能確認プログラムを支援する取組として捉え、今後の安全規制の要求やステークホルダの要望等に留意して必要な研究開発に取り組む。

- 2)地下構成要素の状態把握に係る関連ハード技術の高度化
- ①地下環境における無線伝送技術の実証試験

無線伝送システムの長期運用性を確認するために、2014年12月から日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターで実施中の人工バリア性能確認試験において無線伝送装置の実証試験を継続して実施している。これまでに緩衝材及び埋め戻し材中に設置された土圧計と間隙水圧計を用いて1日に2回計測されたデータを無線伝送装置により週に1回の頻度でデータ取得を実施している。計測期間中に発生する注水停止・再開や注水流量の変化に応じた計測結果が得られており、現在までの約5ヵ年にわたり、大きなトラブルはなく無線でデータ伝送が継続できていることを確認した。

②地下環境における無線給電技術の高度化

モニタリング機器の長期の運用性の向上のための電源の長寿命化に向けて、2018 年度に構築した無線給電装置(磁界共振結合方式)の概念設計方法に基づき、要素試験装置の製作及び設計方法の妥当性確認を行うとともに、地下環境での使用を想定したパッケージング方法について検討した。

送受電コイル共に直径 500 mm、送電距離 500 mm とした要素試験装置と電子負荷装置を用いて気相中におけるコイル間の給電効率が理論値と同等であること(概念設計方法が妥当であること)を確認した。また、土中に埋設することを想定して、気密性や耐水性を考慮したコイルのパッケージング材料としてエポキシ樹脂を選定し、コイルの外径方向の厚さをパラメータとしてコイルのインダクタンスと内部抵抗を測定し、パッケージの厚さが 5~15mm の範囲ならばコイル性能に影響を及ぼさないことを確認した。

③新たなセンサ技術に関する開発動向の調査

品質保証や性能確認のために利用が検討されている新たな計測技術に関する諸外国の動向³³を踏まえ(特に光ファイバセンサに着目して)、Nagra(スイス)やAndra(フランス)及びわが国の中深度処分における研究開発動向を調査した。光ファイバセンサは、埋め戻し材の乾燥密度や中深度処分における低透水層の浸潤後の圧力分布の測定等への適用が期待されているが、測定結果のキャリブレーション方法や光ファイバの設置方法などが課題として挙げられており、現在、室内要素試験等で検討が進められている。

- (2) 埋め戻し材の特性を踏まえた施工オプションの整備
- 1) 埋め戻し材の材料特性データの整備

表-2 及び表-3 に示す材料を用いて、ベントナイトの種類(Na 型、Ca 型)と混合率、模擬掘削土の種類と最大粒径、締固めエネルギーをパラメータとした室内試験を実施し、埋め戻し材の材料特性データ(締固め曲線、膨潤圧、透水係数等)を取得した。

試験結果の一例として、模擬掘削土の岩種と最大乾燥密度、有効モンモリロナイト密度及び透水係数の関係をそれぞれ図-2 及び図-3 に示す。ケ

イ砂6号を用いた埋め戻し材と比べて、玄武岩及び砂岩を用いた埋め戻し材の最大乾燥密度は大きく、泥岩を用いた埋め戻し材の最大乾燥密度は小さかった。泥岩は吸水率が高いことから空隙が多く存在し、岩自体の密度が小さいために泥岩を用いた埋め戻し材の締固め性は悪かったと考えられる。また、Na型の埋め戻し材では、模擬掘削土の最大粒径が大きい場合に、最大乾燥密度及び有効モンモリロナイト密度が高いにもかかわらず、透水係数が大きくなる傾向が見られた。

式 こ 空の人 し 利の 構成 利利					
材料	種類		仕様		
ベント	Na ₹	Đ	クニゲル V1		
ナイト	Ca ½	型	クニボンド RW		
	ケイ	F/l:	三河ケイ砂3号		
	94	11.9	三河ケイ砂 6 号		
模擬 掘削土	火成岩類	流紋岩	砕石 2005・砕砂		
		安山岩	砕石 2005・スクリーニング、ス		
		玄武岩	砕石 2005・砕砂		
		花崗岩	砕石 2005・砕砂		
		砂岩	砕石 2005・スクリーニング、ス		
	堆積岩類	凝灰岩	砕石 2005・砕砂		
	性限有短	珪藻土	8mm 以下		
		泥岩	19㎜ 以下		

表-2 押め戻し材の構成材料

表-3 使用したベントナイトの基本特性(平均値)

	メチレンブルー吸着量	膨潤力	含水比
	mmo1/100g	m1/2g	%
クニゲル V1	85. 0	19. 0	8.7
クニボンド RW	128.0	8.0	14. 3

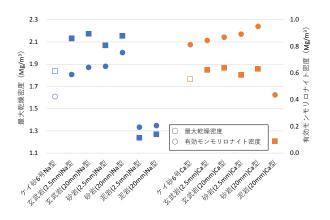


図-2 岩種(玄武岩、砂岩、泥岩)と最大乾燥密度 及び有効モンモリロナイト密度の関係

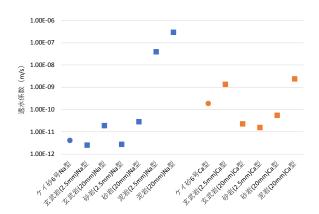


図-3 岩種(玄武岩、砂岩、泥岩)と透水係数の関係

ケイ砂、玄武岩、泥岩を用いた埋め戻し材の有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係を図-4 に示す。埋め戻し材のようにベントナイト混合率が低い範囲では透水係数の測定結果にばらつきがみられたが、最大粒径 20mm 以下の模擬掘削土を含む Na 型、Ca 型の埋め戻し材それぞれについて、有効モンモリロナイト密度が 0.3 Mg/m³ よりも大きい範囲では、有効モンモリロナイト密度と透水係数に概ね相関がみられた。図中の試験数を増やす必要はあるが、掘削土を用いた埋め戻し材の透水係数について品質管理をする場合、有効モンモリロナイト密度が管理指標の一つとして利用できる可能性があると考えられる。

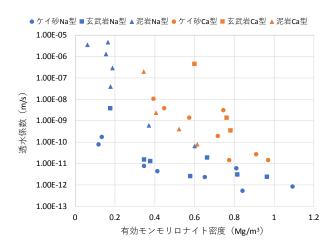


図-4 有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係

本事業で得られた埋め戻し材の材料特性データに基づき、掘削土に砕石・砕砂(玄武岩、泥岩)を用いた場合の埋め戻し材の管理指標(ケイ砂6号を用いた埋め戻し材と比較)の考え方を以下に示す(その関係を図-5に示す)。

- ○吸水率の高い岩種(例:泥岩)を用いた埋め戻し材の締固め性は悪く、有効モンモリロナイト密度が小さい範囲(低締固めエネルギー)では透水性のばらつきが大きかった。
- ○同一の締固めエネルギーの場合、最大粒径が 20 mm の掘削土を用いた Na 型の埋め戻し材の 透水係数は、最大粒径 2.5 mm の掘削土を用い た場合に比べて高くなる傾向にあった。
- ○最大粒径 20 mm 以下の掘削土を含む埋め戻し 材の透水係数と有効モンモリロナイト密度に は概ね相関がみられた。

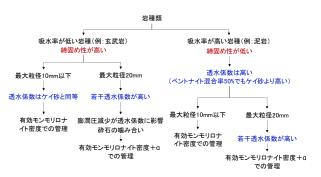


図-5 掘削土混合時の埋め戻し材の管理指標の考え方

2) 埋め戻し材の小規模施工試験

撒き出し・転圧工法及び吹付け工法を先行検討対象として、埋め戻し材の構成材料及び配合の組合せに応じた適切な施工方法について検討し、技術選択に資する施工データ及び施工後の埋め戻し材の物性データを取得した。

①撒き出し・転圧工法

本工法に関する施工試験のケースと試験状況 を表-4 及び図-6 に示す。施工試験では、予備転 圧にプレートコンパクタを用い、本転圧ではハン ドガイド振動ローラーを用いた。

試験結果の一例として、CASE A における埋め戻し材の乾燥密度の測定結果を図-7 に示す。転圧工法において、撒き出し厚さは埋め戻し材の締固め性への影響が大きく、撒き出し厚さが 300 mm の 1~3 層目よりも、撒き出し厚さが 200 mm の 4、5 層目の方が乾燥密度および締固め度は大きくなった。また、採取した試料を通水方向が施工層の鉛直方向と水平方向になるように成型して透水試験を実施した結果、鉛直方向と水平方向の透水係数に有意な差はみられず、おおよそ 1×10⁻¹⁰ m/s 程度の透水係数であった。

表-4 撒き出し・転圧工法による施工試験ケース

	使用材	料	撒き出	施工層
CASE	ベントナイト	模擬掘削土	し厚さ (mm)	数
A	Na 型:15%	玄武岩	300	3
A	(クニゲル V1)	砕石・砕砂	200	2
В	Na 型:15%	玄武岩	300	3
Б	(クニゲル V1)	砕砂	200	2
C	Ca 型:30%	玄武岩	300	3
C	(クニボンド)	砕石・砕砂	200	2
D	Ca 型:30%	玄武岩	300	1
	(クニボンド)	砕砂		



図-6 撒き出し・転圧工法による試験状況



図-7 CASE A 試験結果(撒き出し・転圧工法)

②吹付け工法

埋め戻し材の配合(ベントナイトの種類及び模 擬掘削土の種類と最大粒径)に対して含水比をパ ラメータとして、500×500×200 mm の吹付け箱 (図-8)を使用して小規模施工試験を実施した。 試験ケースを表-5 に示す。



図-8 吹付け工法による試験状況

表-5 5	吹付け工法に。	よる施工試験ケ-	-ス
-------	---------	----------	----

ベント ナイト	模擬掘 削土	最大粒径 (mm)	含水比 (%)	材料供給量 (kg/10sec)
		2.5	Wopt	12. 5
Na 型	玄武岩	5.0	w _{opt} +3.0	15. 0
15%		13	Wopt	7. 5
	砂岩	2.5	Wopt+1.5	15. 0
		2.5	Wopt+3.0	5. 0
Ca 型	玄武岩	5	w _{opt} +3.0	5. 0
30%		13	w _{opt} +3.0	7. 5
	砂岩	2.5	w _{opt} +3.0	5. 0

施工試験後の材料ロス率(ホース内付着率+リバウンド率)を図-9に示す。Na型、Ca型の埋め戻し材ともに、模擬掘削土の最大粒径が13mmのケースでは吹付け施工時に相対的に大きな粒径の砕石が施工面でリバウンドして付着しなかったため、材料ロス率がNa型で56.5%、Ca型で63.0%と大きかった。したがって、吹付け施工に利用可能な模擬掘削土の最大粒径は5mm以下が望ましいと判断した。

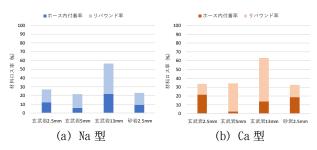


図-9 材料ロス率(吹付け工法)

模擬掘削土に玄武岩(最大粒径 2.5、5 mm)を 用いた試験ケースにおいて、吹付け箱の4カ所の 位置からサンプリングを行い、パラフィン法及び シリコーンオイル法により測定した埋め戻し材 の乾燥密度の一例を図-10に示す。吹付け箱の位 置による乾燥密度のばらつきの範囲は、1.90~ 2.03 Mg/m³程度であった。また、施工試験後にサ ンプリングした供試体を用いて透水試験を実施 した結果、Na型の埋め戻し材の透水係数は1.0× 10⁻¹⁰ m/s 程度であり、室内試験の供試体に比べて 乾燥密度が小さかったにもかかわらず、透水係数 の差は1オーダー程度であった。その原因として は、吹付け時に粒径の大きい砕石がリバウンドし たことにより、吹付け前の材料に比べて吹き付け られた埋め戻し材のベントナイト混合率が相対 的に高くなったためと考えられる。

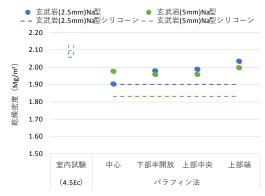


図-10 吹付け工法による埋め戻し材の乾燥密度 (Na 型ベントナイト、混合率: 15%)

③埋め戻し材の小規模施工試験のまとめ

転圧工法では、掘削土の種類及び最大粒径にかかわらず施工が可能であり、吹付け工法では掘削土の最大粒径は5 mm以下であった。また、今回の試験条件では、Na型の埋め戻し材では転圧工法及び吹付け工法ともに1×10⁻¹⁰ m/s 程度の透水係数が確保できる施工が可能であった。小規模施工試験のまとめを表-6に示す。

表-6 小規模施工試験のまとめ

☆ 小院保肥工武衆のよこの				
撒き出し・転圧工法				
使用可能な 掘削土	掘削土の種類、粒径等に関わらず施工することが 可能			
施工後品質	 Na型:1×10⁻¹⁰ m/s 程度 (締固め試験 (A, C 法) より1オーダー程度高い) Ca型:1×10⁻⁶-10⁻⁸ m/s 程度 (締固め試験 (A 法) 程度) 			
施工時の 留意点	・埋め戻し材の物性(乾燥密度)のばらつきが大きい⇒撒き出し厚さによる影響が大きい⇒層毎および層内でのばらつきがある			
	吹付け工法			
使用可能な	掘削土の最大粒径5 m 以下			
掘削土	(最大粒径が大きいと材料ロス率が高い)			
施工後品質	 Na型:1×10⁻¹⁰ m/s 程度 (締固め試験 (A, C 法) より1オーダー程度高い) Ca型:1×10⁻⁹ m/s 程度 (締固め試験 (C 法) 程度) 			
施工時の 留意点	・使用材料の制限がある (材料ロス率や材料分離が大きくなる) ⇒掘削土の粒径が大きい場合 ⇒Ca 型ベントナイトの場合			

3) 埋め戻し材の施工技術オプションの検討

撒き出し・転圧工法及び吹き付け工法以外の埋め戻し材の施工技術オプションの整備に向けて、海外や他分野における埋め戻し材等の施工技術の調査を実施した。その結果、単一工法で坑道全断面の埋め戻しが可能であり、施工速度の速さなどの利点を有する技術としてスクリューフィー

ダエ法を選定して、施工装置の概念設計を実施した。概念設計における前提条件として暫定的に設定した埋め戻し材の仕様を表-7に示す。この仕様に基づいて、施工環境や坑道形状、処分事業のスケジュール例を参考にして施工装置への要求事項を設定し、施工装置の構成や概略寸法などを示した。本工法による施工イメージを図-11に示す。今後は、要素試験により本工法に使用可能な埋め戻し材の配合の確認や機能確認のための段階的な試験等を実施する予定である。

表-7 埋め戻し材の暫定仕様 (スクリューフィーダ方式)

配合			含水比	乾燥 密度	有効粘土 密度
ベント ナイト	クニゲル V1+GX	15%	自然	1. 2	0.28
掘削土	砕石 2005・砕砂	85%	含水比	Mg/m³	Mg/m³

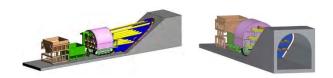


図-11 スクリューフィーダ方式による施工イメージ

4) 埋め戻し材の浸潤挙動予測のためのデータ取得

埋め戻し材の浸潤挙動の予測解析に必要な不飽和特性データを取得するため、Na型及びCa型の埋め戻し材(ベントナイト混合率5%-30%)を対象として加圧板法、サイクロメーター法、蒸気圧法による保水性試験及び透気試験を実施し、水分特性曲線と不飽和透気係数を取得した。

試験結果の一例として、Na 型ベントナイト:ケイ砂 6号=15%:85%における混合土の飽和度と水分ポテンシャルの関係を図-12に示す。図には、van Genuchten モデル (VG モデル)を用いて近似した水分特性曲線を併せて示した。また、透気試験の結果から得られた埋め戻し材の飽和度と浸透率の関係を図-13に示す。ベントナイト混合率が増加すると浸透率は小さく、同じ混合率ではNa 型及び Ca 型ともに同程度の浸透率曲線となった。

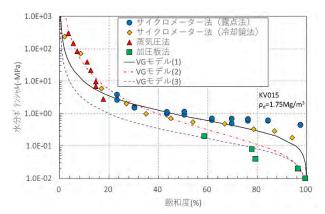


図-12 VG モデルによる水分特性曲線 (クニゲル V1:ケイ砂 6号=15%:85%)

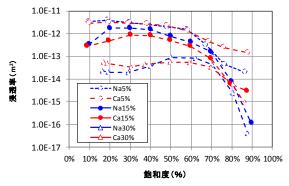


図-13 埋め戻し材の飽和度と浸透率の関係

- 1) 地層処分研究開発調整会議、地層処分研究開発に関する全体計画(平成30年度~令和4年度)、2020
- 2) 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、平成 31 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技 術開発事業 地層処分施設閉鎖技術確証試験 報告書、 2020
- 3) 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、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 地層処分施設閉鎖技術確証試験 報告書、 2019

3. 可逆性・回収可能性調査・技術高度化 開発

3-1 事業の全体概要

(1)本事業の目的

わが国の地層処分事業における可逆性・回収可能性は、国の審議会(総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会放射性廃棄物ワーキンググループ)における議論を経て、平成27年5月に改定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」において次のように定められている。

- ○今後の技術やその他の変化の可能性に柔軟かつ適切に対応する観点から、基本的に最終処分に関する政策や最終処分事業の可逆性を担保することとし、今後より良い処分方法が実用化された場合等に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする。このため、機構は、特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性(回収可能性)を確保するものとする。
- ○最終処分施設を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等について調査研究を進め、最終処分施設の閉鎖までの間の特定放射性廃棄物の管理の在り方を具体化する。

改定された基本方針、及びこれまでの技術開発の成果等を踏まえ、可逆性・回収可能性に関する今後の具体的な運用や研究開発の推進に向けて、更なる議論や検討が必要となる事項(可逆性・回収可能性の意義や確保のあり方等)の整理を行うとともに、回収技術の信頼性の向上や回収可能性の維持に係る技術的な検討を進めていく必要がある。

これらの経緯を踏まえ、本事業は2015年度からの5ヵ年計画として実施した本事業では、地層処分技術や可逆性・回収可能性に関する施策に対する国民の信頼感の醸成に資することを目的として、可逆性・回収可能性の概念や技術の高度化に向けた取組みを進めた。2019年度は本事業の最終年度であることから、計画に基づいて調査研究を進めるとともに、5ヵ年の取りまとめ

を行った。

本事業は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「平成31年度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)」により実施したものである¹¹。

(2)技術的アプローチの具体化に係る技術検討の 枠組みと本事業での展開

可逆性・回収可能性に関する我が国における 今後の具体的な制度の運用や研究開発の推進に 向けて更なる検討が必要と考えられる事項の整 理を目的とし、2015 年度及び 2016 年度に「可逆 性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る 検討会」(以下、「検討会」という。)を設置し、 多面的な検討を実施した。検討会での多面的な 議論の成果は、可逆性・回収可能性の制度として のあり方、回収可能性に関する技術的アプロー チのあり方、当面の進め方と関係組織の役割の 3 つの観点で整理した。

本事業と関連する回収可能性に関する技術的アプローチの具体化においては、採用する技術的アプローチの種類や内容によってトレードオフの関係が異なることから、適切な技術的アプローチを選択するため、これらの関係をより定量的に示していく必要がある。そのような定量的な情報を示していくことで、更なる議論を深めることが可能となる。このような課題認識のもと、定量化に向けた技術的な検討を進めるうえでの出発点となる技術検討項目を具体化した。その際、まずは現時点でトレードオフの関係にあると想定される、"安全性"、"回収の容易性"、

"回収の実施時期(回収可能性の維持期間)"ならびに"費用"の4つの項目を設定した。図-1に技術検討の枠組みを示す。

「1. 安全性への影響」は、一定の確保すべき 安全性のレベルに対してどのような影響がある かということを指す。安全性は、操業期間中の安 全性(回収可能性維持期間中の安全性と回収作 業時の安全性)と、閉鎖後長期の安全性(地層処 分の安全性を支える人工バリアと天然バリアが 対象)に分けて検討する。確保すべき安全性のレ ベルについては、今後整備される安全規制制度 からの要求が、その指標の1つになると考える。 本事業では、検討が進められている処分孔竪置

定量化すべき項目(トレードオフの関係にある4項目)		処分孔竪置き方式		横置き・PEM方式				
		OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3	
	(1)	操業期間中の安全性への影響						
1.安全性への影響		①回収可能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響						
(1)は5つの小項目		②回収作業時の安全性への影響(回収を実施する場合)						
(1)は3.70/小項目	(2)	閉鎖後長期の安全性への影響響						
(2)は6つの小項目		①人工バリアに期待する閉鎖後長期の安全機能への影響					J	
		②天然バリア(母岩)に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響						
2.回収の容易性	(1)	単位ユニットあたりの回収時間(廃棄体1体又は処分坑道1本)						
(回収作業時間) (2)全ての廃棄体回収に係る全体作業時間								
3.最終閉鎖せずに回収可能性を維持できる期間								
4.回収可能性に係る費用								

図-1 回収可能性の維持に関する技術的アプローチの具体化に係る技術検討の枠組み

き方式と処分坑道横置き・PEM 方式の2つの定置概念は基本方針の改定前に構築されたものであり、回収可能性の要件が追加される前の設計概念である。これら2方式に対し、処分坑道が埋め戻され、端部に力学プラグが施工された状態を"回収可能性を維持する状態オプション2"と定義し、種々の回収可能性の維持に伴う影響を定量化する手法の検討を進めた(3-3(1))。

「2. 回収の容易性」は、廃棄体へのアクセス 性、回収作業の技術的な複雑さ、それに要する時 間や費用など、幾つかの次元の異なる指標が想定 される。ここでは回収の容易性を示す指標の1つ として、定量化が可能である"回収作業時間"を 設定した。これに対して、回収方法(技術・装置) の開発に重点をおく、回収をより容易にするため の方法を設計に考慮する、の2つの技術的アプロ ーチで進めた。前者については、検討が進められ ている 2 つの定置概念に対する回収技術の整備 を目的とし、本事業では処分坑道横置き・PEM方 式について、地下環境での操業技術の実証試験を 実施した(3-2)。後者については、2つの定置概 念に対する回収工程の具体的検討を出発点とし て、回収作業を容易にする技術的方策の抽出、そ れらに基づく容易性を高めた代替設計オプショ ンの構築に向けた検討を進めた (3-3(2))。

2019 年度までの成果を含めた本事業の取りま とめを次節以降 3-2、3-3 に示す。 なお、検討会で整理した4つの項目のうち、「3. 最終閉鎖せずに回収可能性を維持できる期間」と 「4. 回収可能性に係る費用」については、他の2 件の検討を踏まえて検討することとし、本事業で は扱わない。

1) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関す る技術開発事業(可逆性・回収可能性調査・技術高度化 開発)平成27年度~平成31年度5ヵ年取りまとめ報 告書、2020

3-2 地下環境での搬送定置・回収技術の高度化 開発-実証試験-

◇事業の概要

地層処分技術や可逆性・回収可能性に関する技術的信頼性及び施策に対する国民の信頼感の醸成に資することを目的として、最終処分施設の最終閉鎖までの廃棄物搬出の可能性(回収可能性)を確保するための技術を対象として、地下研究施設(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、以下「幌延 URL」という)を活用した実証試験を実施した。

処分孔竪置き方式におけるオーバーパック回収 の重要な要素となる緩衝材除去技術については、 既に実規模スケールの実証試験が実施されており 1)、多様な定置概念に対する技術の整備の観点から、 本事業では処分坑道横置き・PEM 方式を対象とし た。また、幌延 URL を試験サイトとした試験では、 実際の地下環境で廃棄体を回収する技術があるこ とを示す技術的実現性の提示、ならびに操業・回 収技術の適用性評価や今後の技術開発課題の明確 化に資するデータの取得を行った。さらに、PEM が定置される坑道形状への柔軟性や隙間充填材の 施工技術の多様性への対応を念頭に、図-1に示す ように PEM 下部に幅十数 cm の狭隘部、上部は大断 面坑道への定置を模擬した狭隘部を設け、それぞ れ、ペレット充填 (100%ベントナイト、1.37Mg/m³)、 吹付け (ケイ砂 50%混合ベントナイト、1.6Mg/m³) 工法によって施工し、この状態を回収作業の初期 状態とした。



図-1 幌延 URL 試験坑道 2 (2018 年度末)

◇2019 年度の成果 2)

(1)隙間充填材の除去技術の実証的整備

隙間充填材の除去技術によって、隙間充填材に よる PEM への拘束力を開放し、その後に回収装置 が動作できる環境を整備する。隙間充填材の除去は、機械的除去技術と流体的除去技術の2種について技術実証を実施した。

機械的除去技術は、PEMに接触して破損させるリスクを回避するため、坑道長手方向の動きで切削するオーガ方式を選定し、切削した充填材を吸引機構で連続的に捕集できるような電動バックホウのアタッチメントとして整備した(図-2)。吹付けで施工した上部開放部に対して除去試験を実施し、直径 20cm の穴多連で切削する場合は下から上方向への削孔が切削物を効率的に吸引捕集できることを確認した(図-3)。一方、充填材の含水比が高くなると粘性が上がり、切削効率の低下や切削物の再団粒化等の影響により、吸引効率が低下する傾向が見られた。



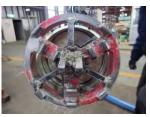


図-2 機械的除去技術 オーガ方式の外観





図-3 除去状況 全景(左)、近景(右)

PEM 近傍の充填材を除去し、その後に回収装置 (エアベアリング装置)が走行可能となるように 坑道等を清浄するため、流体的除去技術には真水 を高圧で噴射するウォータージェット方式 (以下「WJ」という)を選定した。WJ は先端ノズルに よって高圧水の作用を変えることができるため、切削にはトルネードノズル、坑道等の清浄には配管洗浄ノズルを用いた。ベントナイトペレットを 充填した下部狭隘部に対して 2018 年度に実施した予備試験の結果に基づき装置の作動条件を設定し、トルネードノズルによる切削及びスラリー 化した充填材の吸引後、配管清掃ノズル 2 往復で 坑道等を清浄 (残存する充填材を除去)した (図-4、図-5)。





図-4 流体的除去装置の設置状況 (除去前)





図-5 除去状況(左)、除去後の隙間(右)

機械的・流体的除去技術を組み合わせることで、 坑道内に定置された PEM を搬出可能な状態にで きることを確認した。一方、含水比の上昇に伴う 作業性の低下や、除去した充填材(副産物)の効 率的な処理、数十時間にも及ぶ除去時間など、回 収作業をより確実に安全に実施するための課題 に対する継続的な技術開発が望まれる。

(2)搬送定置・回収技術の実証的整備

本事業では定置の逆動線での回収作業を計画し、十数 cm の狭隘な隙間があれば重量物を搬送することができるエアベアリング方式の搬送定置装置を開発し、隙間充填材除去後の坑道内での回収試験に供した。この試験では、現場打設コンクリート面かつ充填材除去後の環境、円形坑道を想定した曲面への適用といった特殊な使用環境における、遠隔操作を考慮した重量物の搬送技術の整備・技術実証を行うことで PEM の回収技術の実現性を提示することとした。

2018 年度までの地上試験や要素試験で取得したエア供給量や走行面(坑道面)の付着物への対応などを踏まえ、エアベアリング方式の搬送定置装置で実際のPEMと同等の重量・形状である模擬PEMの回収に成功した(図-6、図-7)。





図-6 地下試験坑道内での回収作業



図-7 地下実証試験時の遠隔操作実施状況

エアベアリング方式は、狭隘な空間へ対応だけではなく、遠隔操作性やレール等の残置物となる付帯設備が不要となるなど、PEMの搬送定置・回収技術として利点がある。一方、走行面の性状の影響を受けやすく、本試験で取得した走行面の性状(粗度、凹凸、気泡の存在、継ぎ目)に対するエア消費量や牽引力の関係、走行不能となる要因などに係るデータを踏まえ、さらなる技術開発によって適用性や信頼性を高めることが望まれる。

以上より、実際の地下環境における実証試験を通じて PEM 回収の技術的実現性を示した。一方、回収作業時間の観点では、隙間充填材の除去作業が最も時間を要することから、回収の容易性の向上には、隙間充填材の除去技術に着目した高度化開発が効果的と考えられる。

- 1) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 26 年度地層処分技術調査等事業(地層処分回収技 術高度化開発)報告書、2015
- 2) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関す る技術開発事業(可逆性・回収可能性調査・技術高度 化開発) 報告書、2020

3-3 回収可能性の維持についての検討

◇事業の概要

「3.1 事業の全体概要」で述べたように、2015年5月に改定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」¹⁾(以下、「基本方針」)では、最終処分事業における可逆性・回収可能性の確保のために、"最終処分施設を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等に関する調査研究"の実施が要求されている。

回収可能性の維持については、基本方針の改定に先立つ 2013 年度より検討に着手しており 2 、2015 年度からの 5 ヵ年では、処分場の閉鎖前の操業期間中に新たに追加で設けられる可能性のある回収可能性の維持に伴う影響等に関する定量的な評価技術や対策技術の整備に向けた検討を進めてきた $^{3(4)5)6(7)}$ 。

2015、2016年度には、回収可能性の維持に伴う 処分場の安全性への影響要因の抽出・分析、及び 回収可能性の維持に必要となる技術の抽出・整理 に向けて、二つの候補概念(処分孔竪置き方式、 処分坑道横置き・PEM 方式)を対象として検討を 行った 3040。また、安全性への影響に関する定量的 な評価技術の整備に向けて、適用可能な解析的手 法等の検討を進めた4。これと並行して、可逆性・ 回収可能性の意義及び確保の在り方の整理を目的 として、2015、2016年度に「可逆性・回収可能性 の確保に向けた論点整理に係る検討会」(以下、 「R&R 検討会」) を設置して検討を行い、2017 年度 に回収可能性の維持に伴う安全性への影響及び回 収の容易性(回収の作業時間)など、今後定量的 に検討していくべき技術検討項目(以下、「技術検 討項目」)が整理された。

以上の経緯を経て、2017年度からは技術検討項目の個々について、既存の定量化技術や開発動向を把握しつつ、技術の整備に向けた検討を進めてきた⁵⁾⁶⁾。

2019 年度は、技術検討項目に対して以下の取組を行い、事業の5ヵ年の取りまとめとした 7 。

- ○回収可能性の維持に伴う影響を定量化する手 法の整備
- ○回収の容易性を高めた代替設計オプションに 関する検討

◇2019 年度の成果 *)

(1)回収可能性の維持に伴う影響を定量化する手 法の整備

R&R 検討会では、我が国で有望とされている二つの定置概念と回収可能性の維持の状態オプションとの組み合わせ(図-1)を考慮して、回収可能性の維持に伴う安全性への影響の観点から定量化すべき技術検討項目が整理された(表-1)。下表の項目を検討の起点として、回収可能性の維持に伴う影響を定量化する手法の検討・整備を行った。



(a) 処分孔竪置き方式



(b) 処分坑道横置き・PEM 方式

図-1 わが国で有望とされている定置概念と状態オ プションの組み合わせ

表-1 安全性への影響に関する技術検討項目

技術検討項目

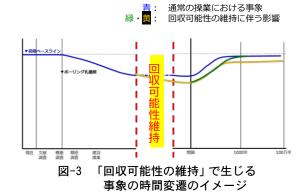
- (1)操業中の安全性への影響
- 開放坑道内の作業空間の安全性
 - a. 開放坑道の健全性(空間安定性)
- b. 開放坑道内(作業空間)への廃棄体からの熱影響
- ・回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性
 - a. 埋め戻した坑道の再利用時の健全性
- b. 再利用する坑道内(作業空間)への廃棄体からの熱影響
- ・回収時の廃棄体容器の健全性
- (2)閉鎖後長期の安全性への影響
- ・回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う人工バリア 等に期待する安全機能への影響
 - a. 開放坑道を介した空気(酸素)の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響
 - b. 廃棄体からの熱による影響
 - c. 坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響
- ・回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う天然バリア (母岩)に期待する安全機能への影響
 - a. 地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度(化学組成の異なる地下水の引き込みの影響
 - b. 開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みに よる母岩側への影響範囲と程度
 - c. ベースライン (建設前の元の地下環境の状態) への回復 過程と回復の程度

1)定量化手法の整備の進め方

建設⇒操業⇒閉鎖と展開する「基本の操業」 において、操業期間中における系の擾乱等が生 じ、これに伴う閉鎖後長期の安全性の評価にお ける地層処分システムの時間的・空間的遷移に ついて、検討が進められている。これを踏まえ、 定置後に新たに追加で設けられる可能性のある 回収可能性の維持期間による影響の定量化手法 の整備における、定量化技術や知見・データ等 との共通点や影響の検討のための整理を行った。 図-2 は「基本の操業」での事業の進展(左図) と状態オプション1で回収可能性を維持する場合 の進展(右図)との関係を整理したものであり、 図-3 は「回収可能性の維持」で生じる事象の時 間変遷をイメージで表したものである。これらの 整理により、「基本の操業」と回収可能性の維持 期間による影響の定量化手法の整備における連 携の可能性を示した。



図-2 「基本の操業」と状態オプションによる回収可能性の維持の関係(状態オプション1の例)



2)定量化手法の整備の例 - 回収時の廃棄体容器の健全性-

表-1 に示す R&R 検討会で具体化した技術検討 項目を定量化する際の状態や時間変遷を表す技 術として、数値解析手法がある。そこで、定量化 手法の整備の方向性を整理するため、技術検討項 目の一つである「回収時の廃棄体(容器)の健全 性」を例に、各数値解析によって示される情報の 位置付けや解析技術の役割を明確化するととも に、項目間の相互関係を整理した。

ここでは、回収作業時の廃棄体容器の健全性について定義するとともに、影響を与える事象や因子の抽出・整理を行った。オーバーパックの健全性として、①閉じ込め性、②遮蔽性、③ハンドリング性の3点を定義した。

上記の整理に基づき、影響を定量化する際の、 実験的アプローチや数値解析的アプローチなど のそれぞれの役割や相互補完等の考え方(重要 性)をまとめ、加えて、他の技術検討項目の関連 も整理した。処分孔竪置き方式の状態オプション 1におけるオーバーパックの腐食量の定量化方法 の構築例を図-4に示す。

今後は、他の技術検討項目についても同様に整備を進めるとともに、閉鎖後長期の安全性の評価における地層処分システムの時間的・空間的遷移と連携を取りつつ、手法の整備を進める必要がある。また、定量化において、実際の条件下で生じる現象についての理解、ならびに実験によるデータの拡充も重要な内容である。定量化手法の整備とともに、定量化の不確実性低減にむけた取り組みも合わせて実施する必要がある。

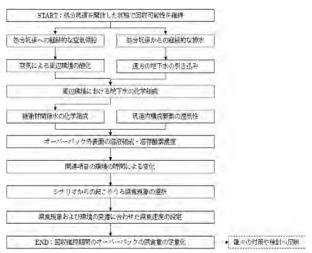


図-4 処分孔竪置き方式のオーバーパックの 腐食挙動の定量化方法

(2)回収の容易性を高めた代替設計オプションに 関する検討

回収をより容易にするための方法を設計に考慮する技術的アプローチとして、回収の容易性を高めた代替設計オプションの構築手法の検討、及び代替設計オプションの最適化に向けた検討の展開方法を整備した。段階的な検討の最初のステップとして、"回収の容易性向上"に着目した代替設計オプションの検討を行った。回収の容易性の指標としては、「回収作業時間」を設定したが、サイトや処分場の設計が具体化されていない現段階に留意して、廃棄体へのアクセス性、回収作業の技術的な容易さ(ハンドリング性)といった視点から検討を進めた。

1)代替設計オプションの構築手法の検討

我が国で有望とされている二つの定置概念に対して、定置状態からの回収作業の工程について具体化し、回収の容易性向上に資する工夫のポイントを抽出した。この工夫のポイントを、概念に固有とならないように一般化して、回収の容易性向上のポイントとして表-2 に整理・統合した。

上記の回収の容易性向上の視点と 7 項目の容易性向上のポイントを出発点として、その実現方法及び工学的方策へと展開した。整理した多様な工学的方策は表-3 の A~U であり、その個々の相互関係を検討した。相互関係は、「独立」、「相反」、「共存」、「融合」、「相乗」の観点から分類・整理し、視認性にも留意してこれらの関係をマトリクス形式で整理した。整理結果をベースに、「相乗」効果の多くなる方策の組合せを抽出し、定置坑道の形状と大きさ、及び廃棄体の形態に係る方策を中心に集約することで、回収の容易性を高めた代替設計オプションの構築手法を提案した。

表-2 回収の容易性向上の視点とポイント

-	X - HWOHOREN TO DEMONSTRATE						
回収の容易性向上の視点		容易性向上のポイント					
でのアク	セス経路を確保す						
セス性向 上	るための作業量の 少なさ	2. 坑道や処分孔の安定性を確保するための作業量を削減					
廃棄体の ハンドリ		3. 一回の回収作業における回収物量の 増加と作業数の低減					
	重量と形状	4. 回収対象物の軽量化・形状の単純化					
上	健全性	5. 回収対象物の健全性を確保					
	動線	6. 回収時の動作と動線の単純化					
	環境	7. 作業性を高めるための空間を確保					

表-3 回収の容易性向上の工学的方策の整理

- A. 隙間充填を必要としない円形小断面坑道定置
- B. 大断面坑道での定置
- C. PEMによる緩衝材とオーバーパックの一体型回収
- D. 緩衝材を残置する回収方式 (OP のみ回収)
- E. 定置坑道の短尺化
- F. 撤去容易なプラグの採用
- G. 高耐久性支保工等の適用
- H. アタッチメントタイプの支保材導入
- I. 複数の廃棄体を格納する容器の採用
- J. 小断面坑道に複数の廃棄体を定置
- K. オーバーパックの軽量化
- L. 緩衝材の軽量化
- M. PEMの軽量化
- N. 矩形 PEM の採用
- 0. 止水機能を有する支保工の採用
- P. 耐腐食性材料の採用
- Q. 容器の厚さを増加
- R. 大断面坑道に廃棄体の集中定置
- S. 回収動作が単純な定置方式と装置の採用
- T. 動作と動線とが単純な定置坑道レイアウト
- U. 大断面作業坑道と小断面定置坑道の組合せ

2)代替設計オプションの最適化に向けた検討の 展開方法の整備

1)で提案した手法に基づき構築した代替設計 オプション案に対し、我が国で有望とされている 二つの定置概念におけるこれまでの技術開発の 経緯も参考としつつ、地層処分システムとしての 成立性や処分場の建設や人工バリアの製作・施工 といった技術的実現性など、そのオプションの実 現性の確認や信頼性の向上に向けた今後の技術 検討の展開方針について整理した。その一環とし て、サイトの地質環境特性への依存性が比較的低 いと考えられる廃棄体からの熱影響について、具 体化した代替設計オプション案に対して先行的 な検討を行い、今後の検討の展開方法を示した。 代替設計オプションの検討は、今後は回収の容易 性という観点のみでなく、事業者が計画している 段階的な処分場設計の開発プロセス(設計の詳細 化や最適化)の中で整合性を確保しつつ検討を進 めていく。

- 1) 経済産業省、"特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針 (平成 27 年 5 月 22 日閣議決定)"、 http://www.meti.go.jp/press/2015/05/20150522003/
 - nttp://www.met1.go.jp/press/2015/05/20150522003/ 20150522003-1.pdf
- 2) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 (地層処分回収 技術高度化開発) 平成 23 年度~平成 26 年度 総括報 告書、2015
- 3) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 27 年度地層処分技術調査等事業(地層処分回収技 術高度化開発)報告書、2016
- 4) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成28年度地層処分技術調査等事業(地層処分回収技

- 術高度化開発)報告書、2017
- 5) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関す る技術開発事業(可逆性・回収可能性調査・技術高度 化開発)報告書、2018
- 6) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成30年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関す る技術開発事業(可逆性・回収可能性調査・技術高度 化開発)報告書、2019
- 7) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関す る技術開発事業(可逆性・回収可能性調査・技術高度 化開発)報告書、2020

4. 沿岸部処分システム評価確証技術開発

◇はじめに

高レベル放射性廃棄物等の地層処分については、国は2017年7月に科学的特性マップを公表し、海岸からの距離が短い範囲を"輸送面でも好ましい"として示している¹⁰。また、このような整理に至る沿岸部の特性や技術的対応の可能性については、沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会(以下、「研究会」)において議論が進められ、2016年の研究会のとりまとめでは、"今後、技術の高度化に引き続き取り組むことで、さらに信頼性を高めることが重要である"と結論付け、技術の高度化に向けて取り組むべき課題とその方向性が示されている²⁰。

原子力発電環境整備機構(NUMO)は 2018 年 11 月に包括的技術報告書レビュー版 ³³を公開し、ジェネリックな環境での地層処分の実現性が示され、第 4 章の処分場の設計と工学技術では、処分場の設計について、所要の安全機能を確保するための設計の考え方や方法論や想定される建設・操業・閉鎖の手順、およびそれらに適用する技術の工学的な実現性が示された。沿岸部環境に関しては、海水相当の地下水等を中心として包括的に実現性が示され、今後、多様な地下水に対応すべく、データの拡充が望まれるものと考えられる。

2015 年度から開始した本事業(沿岸部処分システム高度化開発)では、これまでの地層処分研究開発成果の再整理を行い、再検討が必要な課題などを抽出・整理すると共に⁴⁾、研究会にこれらの成果を提供して議論を支援した。当センターでは、2016 年度以降の3年間において、工学技術の高度化に向け、設計や施工等のエンジニアリングや操業中の安全確保への反映、及び閉鎖後の長期挙動評価への反映の観点から、海水や海水を希釈した塩水等での人工バリア材料(オーバーパック、緩衝材及びセメント系材料)に関する劣化や変質に関する現象の把握と各種特性等のデータを拡充し、総合的な評価方法に関する塩水環境下におけるニアフィールド領域での処分システムの成立性に係る手法を検討し提示した⁵⁾。

2019 年度からの本事業において、当センターではこれまでの成果等も踏まえ、既存情報等による 我が国の沿岸部に賦存する地下水の水質における 坑道建設から再冠水に至るまでの坑道建設に必要な材料の変質機構や材料の特性への影響の定量化とその対策技術に関して、セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充及び緩衝材の機能変化に係るデータの拡充を行う。併せて、処分場建設に伴う浅部地下水と深部地下水の混合や湧水等への影響に係る水理場の影響を踏まえた処分場の成立性評価に関する手法の整備に関し、地質環境の調査技術を用いた沿岸部の広域的なベースライン情報と連携した水理解析による手法の整備、上記の個別材料の変質挙動に係る知見を組合せた、再冠水に至る期間を対象とした性能評価手法の基盤整備を行う。

本事業は、経済産業省資源エネルギー庁の委託 事業「平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層 処分に関する技術開発事業(沿岸部処分システム 評価確証技術開発)」により、国立研究開発法人産 業技術総合研究所、一般財団法人電力中央研究所 及び公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理 センターの3機関が共同で、沿岸部における地層 処分技術に関する2つの技術分野の技術開発(地 質環境の調査技術、工学技術)を実施したもので ある。公益財団法人原子力環境整備促進・資金管 理センターは、一般財団法人電力中央研究所と共 に工学技術を担当した。以下に、当センターが担 当した工学技術の高度化について、2019年度に実 施した内容を示す。

◇2019 年度の成果 60

(1)再冠水に至る期間を対象とした性能評価手法に係る基盤整備

沿岸部での処分場の工学的成立性を示すには、設計・施工を通して構築されるニアフィールド (以下、NF という) 領域での処分システムの成立性を提示することが重要である。これまでに、先 行検討事例であるフィンランド POSIVA 社の評価体系 70 を参考に、わが国の沿岸部における建設から再冠水完了までの NF 領域での処分システムの成立性を示すための手法の素案を提示した 50 。この手法の概要は、以下のとおりである。

- ①処分場が有すべき安全機能を定義する。
- ②安全機能の確実な履行に向けて人工バリア等 が有すべき性能目標を示す。
- ③人工バリア等の性能目標を満たすような設計

仕様を示す。

④処分場位置の地下環境や設計仕様を初期状態 として、性能評価を実施する。

ここで性能評価とは、フィンランド POSIVA 社の "Performance Assessment" ⁷⁾を参考とし、地質環境を含む処分システムの構成要素に関する短期~長期の変遷挙動(状態変化や機能変化)について分析・評価を実施し、性能目標の達成を確認することを示す。

本事業では、前述の④で示した性能評価に着目 し、沿岸部における建設・操業から再冠水に至る 期間を対象とした性能評価の手法を体系化する。

処分システムの構成要素は、建設・操業~再冠水完了の期間に、水理及び化学場の NF 領域での擾乱の影響を受ける。特に、沿岸部では、現降水、氷期降水、現海水、化石海水などの多様な化学組成の地下水が存在している可能性があるため、処分場の位置によっては、坑道の埋め戻しまでの地下水の引き込みにより、NF 領域の化学組成が変化する可能性がある。

これまでに、NUMO が整備した広域、処分場、パネルの3つのスケールの3次元モデルを入れ子構造にした地質環境モデル(SDM)3を参照し、建設・操業~再冠水完了の水理場の擾乱がNF領域での処分システムに与える影響を評価(性能評価)するために、処分孔湧水量等の経時変化を算定する水理解析技術の整備を進めた5。今後は、処分孔湧水の化学組成の影響を受ける性能評価(例えば、緩衝材膨潤挙動)を実施することを鑑み、塩水の化学組成の違いを水理解析に考慮するなどの方策が必要である。また、これまでは、堆積岩系の地質を検討対象としていたが、さらに多様な地質環境等に対応する必要がある。

以上を踏まえ、処分場の性能評価に資することを目的として、沿岸部固有の多様な地質環境や地下水の水質に対応した水理解析技術の整備を行うこととした。

以下に、性能評価手法の体系化及び水理解析技 術の整備の2つの項目として実施した2019年度 の成果を示す。

1)性能評価手法の体系化

わが国の沿岸部における性能評価手法の体系 化に向けて、性能評価にかかる国内外の検討事例 の調査を行い、沿岸部に関連する性能評価手法の 整理を実施し、これらの結果を踏まえて性能評価手法の体系化に向けた実施内容を検討した。

性能評価にかかる検討事例について、沿岸部に処分する国(フィンランド、スウェーデン)と非沿岸部に処分する国(スイス)を調査対象国として選定し、各国における性能評価に係る内容(性能評価の流れ、性能評価項目、評価項目ごとの評価手法)などについてセーフティケース相当文書で対象に調査した。また、わが国の性能評価の現状の把握のため、NUMO包括的技術報告書レビュー版®を調査した。これらの調査結果の概要は、以下のとおりである。

- ・調査した海外事例の性能評価の流れは、図-1 に示すように、前提条件の確認、評価期間の設 定、性能評価項目の選定、評価の実施、評価結 果の記載の 5 つのステップに整理して示すこ とができる。
- ・調査した海外事例の性能評価項目は、主に処分場構成要素の性能に影響があると考えられる現象を対象としている。NUMO 包括的技術報告書レビュー版 ³⁾においても、処分場構成要素の性能に影響があると考えられる現象が整理されている。

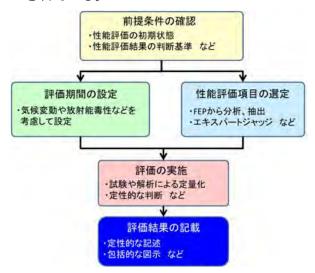


図-1 調査の結果得られた性能評価の流れ

沿岸部に関連する性能評価手法の整理のために、上記の性能評価にかかる国内外の検討事例の調査結果から、沿岸部処分国と非沿岸部処分国の性能評価項目を比較し、性能評価手法の違いを検討した。その結果、沿岸部と非沿岸部の性能評価項目に違いはなく、各性能評価項目の評

価の与条件(評価の上での条件、例えば、性能評価項目「緩衝材の変質」を評価する場合に考慮される「地下水組成」など)の違いとして表現されるものと考えられた。今後は、沿岸部に関連する与条件を、どのような手法や精度に基づき取得・設定しているかを把握する必要があると考えられた。

以上の結果より、わが国における沿岸部の性能評価手順書の体系化に向け、性能評価項目、性能評価項目ごとの評価手法を整備し、これらを通した処分システムの状態変遷の推定の試行を今後実施することとした。

2)水理解析技術の整備

わが国の沿岸部における性能評価を実施する ための水理解析技術の整備に向け、性能評価に必 要な地下水に関する情報を暫定的に抽出し、今 後の水理解析技術に関する検討事項を整理した。 また、予備解析によって沿岸部の水理解析に考 慮すべき要因の影響を検討した。

性能評価に必要な地下水に関する情報を NUMO 包括的技術報告書レビュー版 ³¹付属書 4-14 における緩衝材への影響が懸念される要因をもとに整理し、地下水静水圧、処分孔湧水量、湧水の水質を抽出した。これらを踏まえ、水理解析への塩水の化学組成の考慮について検討し、化学組成の違いを密度の違いとして取り扱い、密度流・移流分散解析を適用して進めることとした。

また、沿岸部の水理解析に考慮すべき要因について予備解析によりその影響を検討した。具体的には、要因として高透水層(薄層、断層)、遠方にある海水より高濃度な化石海水の処分場への引き込みを取りあげ、これらの要因が性能評価に必要な湧水の水質や処分施設湧水量に影響を与えるかについて検討した。その結果、これらの要因は、湧水の水質や処分施設湧水量に影響があるため、本検討の水理解析にこれらの要因を考慮する必要があることが分かった。

今後は、以上の成果をもとに、沿岸部における 処分場に関する、地質環境情報から水理解析、性 能評価への一連の流れに係る水理解析技術の構 築を、試行なども通して進める。加えて、処分場 の設計の観点から地質環境情報のうち性能評価 に重要な事項を抽出する等、地層処分事業の連 携にも役立てる取組みを行う。

(2)セメント系材料の短期的な変質挙動に関する 知見拡充

処分場においてセメント系材料は、処分坑道やアクセス坑道の支保工などの構成部材などに使用されることが検討されている³³。一方で、セメント系材料は地下水や海水などとの反応により変質することが知られており、主な変質として、水和鉱物の溶脱や膨張性の二次鉱物の生成などが想定される¹¹³。また、それらの影響により、機械的特性や物質移行特性の変化、ひび割れの発生などが起こることが考えられる。そのため、沿岸部における処分場の建設・操業~閉鎖後の再冠水に至る期間における処分システムの成立性に関し、空洞安定性などに関する評価のために、沿岸部に特有な地下水化学環境を念頭に置いたセメント系材料の化学変質に伴う機械的強度の変化に関する挙動を把握することが必要である。

本事業では 2018 年度までに、人工海水やその希釈水へのセメントペースト試料の浸漬試験を実施し、化学変質挙動および機械的特性に関するデータを取得して知見を整理してきた⁵⁰。 その結果、塩水の化学組成によって生成二次鉱物などの化学変質挙動が異なること、それにより機械的強度の変化が異なることがわかった。沿岸海底下の地下水化学組成や生じる化学変質挙動によっては強度低下の可能性があることが懸念されるため、これらの地下水の組成によって挙動が異なることを踏まえ知見を拡充、体系的に整理する必要がある。また、現実的な材料 (コンクリート、モルタルなど) 及び条件 (セメント系材料の岩盤との接触部付近での地下水流動など) での知見も必要である。

そこで、ニアフィールド領域の水理解析技術と連携した支保工などのセメント系材料を用いた構造物の機械的強度の評価手法を整備し、沿岸部における処分場の再冠水完了までの空洞安定性などの評価に反映するために、処分場の設計や地下水化学組成などにより機械的強度を推定する手法を提示するための検討を目的に応じ以下の2項目を実施する。

- ・コンクリートやモルタル中の化学変質が主に 起こるセメントペースト試料を用いた、塩水化 学組成による検討
- ・現実的なコンクリート試料を用いた、沿岸部 における現実的な処分場の地下環境条件(セメ

ント系材料と岩盤との接触部付近での地下水 流動など)での検討

2019年度は、文献調査により知見を整理し、その結果に基づいて、溶液の組成、試料の種類、変質試験方法、分析方法等、試験計画について検討した。以下にその主な内容を記す。

1)試験に用いる溶液条件の整理

2018 年度の本事業の地下水の分析結果 ⁵を中心に、日本国内の地下水調査の結果から主要溶存イオンの分析結果を示したヘキサダイヤグラムを用いて、沿岸部の地下水化学組成に関する情報を地下水区分と水質タイプ (現海水の Na-C1 型、現降水の Ca-C1 型等) ごとに分け、それぞれについて、化学変質と機械的強度に関する知見の有無や課題を整理した (表-1)。今後は、整理結果を踏まえ、想定される化学変質等によりさらに地下水を類型化し、試験に用いる溶液条件の選定を進める。

表-1 試験に用いる溶液条件の整理結果

	地下水データの種類	知見の有無	過去の知見または分類の方 法	課題
海水系 地下水 (現海水、 化石海水)	Na-CI型 (人工海水と同等の成分比率、人工海水と同等~1/10 倍濃度)	0	人工海水、 1/10倍希釈人工海水での試 験データ	・吹付けコンクリート 試料を対象としたデー タが不足
	Na-CI型とNa-SO ₄ 型の混合 Na-CI型とNa-HCO ₅ 型の混合 Na-CI型とCa-CI型の混合 Ca-C I 型		各型及び各型の混合の組み 合わせを人工海水の成分比 をと比較して、火ーンを整 を分とそのパターンりとなる ・Ca ・SO4 ・HCO3	人工海水の成分比率と 比較して、Caまたは
	Na-CI型 (人工海水と同等の成分比率、人工海水の1/10~100倍 濃度)	0	1/10倍希釈人工海水、 1/100倍希釈人工海水での試 除データ	・1/10倍と1/100倍希釈 人工海水の間のデータ が不足 ・吹付けコンクリート 試料を対象としたデー タが不足
降水系 地下水 (現降水、 氷期降水)	Na-Ci型とCa-Ci型の混合 Na-Ci型とNa-HCO、型の混合 Na-Ci型、Na-SO、型及びCa-SO、型の混合 Na-Ci型、Na-SO、型及びNa-HCO。型の混合 Na-Ci型、Na-SO、型、Ca-SO、型及びNa-HCO。型の混合 Na-Ci型、Na-HCO。型の混合 Na-SO、型 Na-SO、型、Ca-SO、型及びNa-HCO。型の混合 Na-SO、型、Ca-SO、型及びNa-HCO。型の混合 Na-SO、型、Ca-SO、型及びNa-HCO。型の混合 Na-HCO。型の混合 Na-HCO。型	×		

2)試験に用いる試料の種類

処分場で使用が検討されているセメント系材料を調査し、吹付けコンクリートと覆エコンクリートを抽出した⁵⁾。覆エコンクリートについては主要なトンネル工法の観点からも調査し、シールドコンクリート(セグメント)と現場打設コンクリートを抽出した¹²⁾。よって、試験に用いる試料

は、吹付けコンクリート、シールドコンクリート 及び現場打設コンクリートとした。また、それぞれのコンクリートについて既往のトンネルの施工事例を中心に調査し、普通ポルトランドセメント、フライアッシュセメント、高炉セメントの3種類を使用するセメントとして抽出した。なお、各コンクリートのペースト部分に相当する試料となるようにセメントペースト試料の配合を設定した。

3)変質試験方法

変質試験方法に関して、既往の研究実績や調査をふまえ、以下のように計画を策定した。

セメントペーストを用いた試験では、化学変質 に伴う機械的挙動の関係を確認するために最も 適している塊状試料の浸漬試験を実施する。ただ し、試験期間中の変質領域が狭いことにより、化 学変質に関する情報や化学変質の経時的な変化 等を確認し、変遷過程を予測するためのデータが 不足する場合は、補完するために通水試験(試料 内を溶液を透過させる試験)を実施する。

コンクリート試料を用いた試験は、各コンクリートで処分場における部材周辺の条件に合わせた変質試験方法(フロースルー試験(試料表面に溶液を流す試験)や浸漬試験)で実施する。

4)分析方法

分析方法に関して、既往の研究実績や調査をふまえ、以下のように計画を策定した。本試験では、微小領域の硬度をマイクロビッカース硬度計で測定し、変質に伴う機械的強度の変化を評価する。変質に伴い変化する空隙構造は、機械的特性と関連があることから、機械的強度の推定方法の検討のために取得する。変質領域の鉱物相や組成分布を、EPMA 測定、SEM 像観察、粉末 X 線回折測定により取得する。

今後は、溶液組成、溶液組成と試料種類の組合わせ及び変質試験方法等をさらに最適化して試験を効率的に進め、処分場の成立性の評価のためのデータを整備するとともに、材料や地下水化学組成などの条件が与えられた際に、変質に伴う機械的強度の挙動が予測可能なモデルの作成を進める。このモデルの検討は、試料表面に生成した二次鉱物による変質抑制や強度への影響を考慮しながら、Ca溶脱量と強度の関係で整理を進める。

(3)緩衝材の機能変化に係るデータの拡充

これまでに実施された緩衝材の機能変化に関 するデータ取得において、緩衝材の長期変質だ けでなく、再冠水時の変質、膨潤、流出に関し て、蒸留水、海水相当イオン強度を持つ NaCl 水 溶液および CaCl2水溶液を用いた試験が行われ、 緩衝材の挙動把握がなされている。しかしなが ら、これまではこのような単純系で取得された ものに限られており、海水のように複数のイオン を含む溶液に対する浸潤挙動、密度の均質化、 緩衝材流出挙動等の再冠水時に起こる緩衝材の 力学的変化は確認されていなかった。そのため、 2016~2018 年度に沿岸部における建設から再冠 水完了までの処分場の工学技術に関して、処分 場の構成材料である緩衝材の変質、膨潤、流出 挙動に関するデータ取得を目的に、人工海水、 各種溶存イオン、イオン強度など、沿岸部にお ける地層処分環境の地下水の化学成分に着目し た試験が行われた5。これによりデータが拡充さ れ、イオン種、イオン強度が及ぼす緩衝材の機 能への影響について示したが、系統的な整理が 十分ではないため、塩水系地下水の化学成分の及 ぼす緩衝材の機能への影響を系統的に把握する 必要がある。そこで本事業では、沿岸部に賦存 する地下水の組成を念頭に、溶存陽イオンのベ ントナイトの膨潤性、透水性および化学的変質 への影響を系統的に把握し、多様な塩水系地下 水の組成に対応した緩衝材の挙動を評価するた めの知見を得ることを目的とした。2019年度は、 緩衝材の膨潤率及び透水性のイオン種の影響に 関する試験、高イオン強度でのイオン交換挙動 に関する試験を実施した。以下に主な成果を示 す。

1)緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響 把握試験

本試験では、緩衝材供試体への浸潤溶液をイオン交換水、イオン強度 0.5 の NaCl 溶液、0.5 の KCl 溶液、及び 0.5 の NaCl と KCl の混合溶液 (NaCl と KCl を 1:1 で混合)の 4 通り、緩衝材 乾燥密度を 1.2 Mg/m³、1.6 Mg/m³、2.0 Mg/m³の 3 水準にした全 12 ケースについての最大膨潤率を測定した。なお、緩衝材供試体の直径は 60 mm、高さを 5 mm とし、上載圧は約 8.8 kPa である。

全12ケースの試験結果について、既往の結果

も含め、初期有効粘土乾燥密度と最大膨潤率の関係の図にプロットして整理した(図-2)。

本試験のイオン強度 0.5 の NaCl 溶液、KCl 溶液、NaCl と KCl の混合溶液の結果は、どの緩衝材 乾燥密度においても最大膨潤率の差が小さく、既 往検討の人工海水(イオン強度約 0.7)や幌延地下水(イオン強度約 0.17)の結果と比較しても最大膨潤率の差は小さかった。これらの結果を見る限り、地下水組成が異なってもイオン強度が 0.17以上であると最大膨潤率はほぼ同様な値であることを意味する。今後、沿岸部の多様な地下水組成において膨潤挙動に及ぼす影響を把握する試験(浸潤溶液のイオン強度を 0.5 より小さくした条件の試験や浸潤溶液を MgCl2溶液、CaCl2溶液にした条件にした試験等)を実施してデータの拡充を進める予定である。

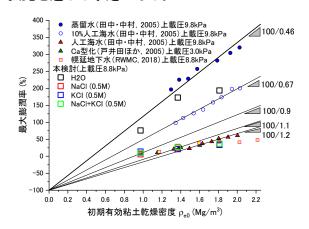


図-2 初期有効粘土乾燥密度と最大膨潤率の関係

2)塩水系地下水成分による緩衝材の透水性に関する給計

本試験では緩衝材乾燥密度を 1.0 Mg/m³とし、通水液を純水(蒸留水)、10 倍希釈海水(10%SW)、2 倍希釈海水(50%SW)及び海水(100%SW)と段階的に濃度を上げて溶液を通水し、流量を測定して透水係数を求めた。また、排出液の Na¹、K¹、Ca²¹、Mg²¹のそれぞれの濃度を測定した。なお、通水液の注入口と排出口の差圧は 2.5MPa とし、緩衝材供試体のサイズは直径 20mm 高さ 10mm とした。通水流量と透水係数の経時変化を図-3 に示す。図-3 より、50%SW までの通水では、通過流量と透水係数には変化がほとんど見られず、100%SWへと切り替えた時に透水係数が急激に上昇したことがわかる。

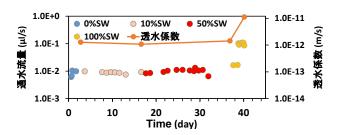


図-3 通水流量と透水係数の経時変化

排出液組成分析では、 K^{\dagger} 、 $Ca^{2\dagger}$ 、 $Mg^{2\dagger}$ の濃度が、通水液よりも低く、 Na^{\dagger} の濃度が通水液よりも高くなった。これは、ベントナイト層間の Na がそれぞれのイオンに交換されたためと考えられる。また、通水液の変更に対し、排出液の Na^{\dagger} 、 K^{\dagger} 、 $Ca^{2\dagger}$ の濃度はよく応答しているが、 $Mg^{2\dagger}$ のみが10%以下の SW において排出液にほぼ存在しなかった。この結果は、 $Mg^{2\dagger}$ のイオン交換率が高いことを示唆する。

透水係数の変化は、イオン強度及びイオン種に よるモンモリロナイトの膨潤性の違いによる影響を受けていると考えられる。今後は、圧縮状態 のベントナイトの層間イオンが水和に与える影響とその結果としての層間距離の検討が必要で ある。

3)高イオン強度でのイオン交換挙動に関する試験

イオン強度を 0.025 から 0.5 まで 5 段階に変化させた NaCl、KCl、MgCl₂、CaCl₂ 単成分系溶液を Na 型モンモリロナイト (クニピア F) と遠沈管内で混合し、25℃で、48 時間のバッチ式試験によりイオン交換させた。イオン交換選択係数は、ICP-AESで分析した溶液の濃度変化から算出する方法と、モンモリロナイトを FESEM-EDS により分析したイオン交換の平衡の前後における固相中の量から算出する方法の 2 通りにより求めた。

上記の 2 通りの方法で求めたイオン交換選択係数は、希薄溶液におけるイオン交換選択係数 ¹³⁾ と比較して小さい値であった(表-2)。 Ca と Mg のイオン交換選択係数の値は、液相の分析と固相の分析の値に違いが大きかったが、これはイオン交換以外の化学反応の影響が含まれていることなどが理由として考えられる。いずれにしても今回得られた値は希薄溶液における値に比較して小さく、イオン強度が高い溶液中ではイオン交換

選択係数が小さいことが示唆された。今後は、より現実的な処分環境(圧縮して緩衝材を使用すること)を想定し、圧縮したベントナイトにおけるイオン交換選択係数の取得を進める予定である。

表-2 イオン交換選択係数(LogKd Cat/Na)の比較

Cation	TRU	本検討	本検討		
	第一次 レポート ¹³⁾	ICP-	FESEM-		
	レポート 13)	AES	EDS		
	(約0.01M)	(0.025≦IS	(0.025≦IS		
		≤ 0.5)	≤ 0.5)		
Na-H	1. 26	_*	-2.540		
Na-K	0.42	-0.776	-0.914		
Na-Ca	0.69	-2. 201	-0.729		
Na-Mg	0.67	-2.081	-1.278		

* Kd の値が負となり、イオン交換選択係数 LogKd 算定不可

- 1) 資源エネルギー庁、科学的特性マップ、2017
- 2) 沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する 研究会、とりまとめ、2016
- 3) 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告書 わが国における安全な地層処分の実現一適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築 レビュー版、NUMO-TR-18-03、2018
- 4) 産業技術総合研究所、日本原子力開発機構、電力中央研究所、原子力環境整備促進・資金管理センター、平成27年度地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書、2016
- 5) 産業技術総合研究所、日本原子力開発機構、電力中央研究所、原子力環境整備促進・資金管理センター、平成30年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 沿岸部処分システム高度化開発 平成27年度~平成30年度取りまとめ報告書、2019
- 6) 産業技術総合研究所、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所、平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 沿岸部処分システム評価確証技術開発 成果報告書、2020
- 7) Posiva, "Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Synthesis 2012" POSIVA 2012-12, 2012
- 8) Posiva, "Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto -Performance Assessment 2012", POSIVA 2012-04, 2012
- 9) SKB, "Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project", SKB TR-11-01, 2011
- 10) Nagra, "Project Opalinus Clay Safety Report: Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste", NTB-02-05, 2002
- 11) 土木学会、コンクリートの化学的浸食・溶脱に関する研究の現状、2003
- 12) 土木学会、2016 年度改訂 トンネル標準示方書[共通編]・同解説[シールド工法編]・同解説、2016
- 13) 核燃料サイクル開発機構、電気事業連合会 TRU 廃棄物 処分概念検討書、JNC-TY1400 2000-001、2000

5. TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発

5-1 事業の全体概要

使用済燃料の再処理等により発生する TRU 廃棄物 (図-1 参照)の中には、放射能レベルが高く地層処分が必要なものがあり、地層処分の対象となるものをその性状に基づいてグループ分けすると、以下の 4 グループに区分される 3。

グループ 1 廃銀吸着剤:燃料溶解工程等のオフガス系で、主にヨウ素 129 を捕集したフィルター

グループ2 ハル・エンドピース:使用済燃料 をせん断、溶解した後に残る金属 部材を圧縮成形したもの

グループ3 濃縮廃液:使用済燃料の溶解液から、ウラン、プルトニウムを抽出する際に発生する低レベル濃縮廃液を固化したもの

グループ4 その他の廃棄物

2015年5月に国の「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」¹⁾が改定され、2017年7月に「科学的特性マップ」²⁾が公表されたことを受けて、地層処分の国民理解や地域理解のための対話活動が進められる中で、これまで高レベル放射性

廃棄物に比べ注目度が低かった TRU 廃棄物の地層 処分の安全性にも一般公衆の関心が高まりつつあり、TRU 廃棄物固有の様々な課題についての取り 組みの重要性はより高まっている。

TRU 廃棄物には、天然バリア等に対する収着性に乏しい放射性のヨウ素や炭素などが多く含有される点、多様な形態の廃棄体が存在し、有機物の分解や金属の腐食等によるガスの発生、硝酸塩の存在や有機物との混在による影響など、高レベル放射性廃棄物とは異なる特徴がある。また、処分を効率的に行う観点から、大口径の処分坑道に下ラム缶やキャニスタ等を数体まとめて収納した容器を集積配置する処分方法が考えられている。そのため、処分坑道の空洞安定性を維持するための支保工や、容器内及び容器間の充填材等に、とめて以上の大系材料を多量に使用するなど、高レベル放射性廃棄物の処分概念と異なる工学的対策を用いた人工バリアにより、長期的な核種移行の抑制が期待されている。

本事業は、このような TRU 廃棄物の処分事業における TRU 廃棄物固有の課題を踏まえ、「地層処分研究開発に関する全体計画 (平成 30 年度~令和4 年度)」に示された、TRU 廃棄物処理・処分に関わる、人工バリアの閉じ込め機能の向上、坑道閉鎖前の安全性の評価に向けた技術開発及び地層処分システムの状態設定のための現象解析モデルの高度化を目的とするものである。



図-1 使用済燃料の再処理工程と発生する TRU 廃棄物 ³⁾

本事業の実施にあたっては、地層処分を支える幅広い科学技術分野の知識を有することを前提として、既往の研究開発等の成果を適切に取り込むとともに、分野横断的な連携及び成果の体系的な統合が必要となる。このため、現在までにTRU廃棄物に関わる研究開発等に従事してきた、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターと国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の2機関が共同で事業に取り組む。各組織に蓄積されている知識、経験等を相互補完的に利用し、かつ融合して、多様な形態の廃棄体が存在するTRU廃棄物に関わる処理・処分技術の課題を網羅し、事業全体としての総合的な高いレベルの成果を創出する。

本事業で検討する研究課題は、前述したように TRU 廃棄物が多様な形態の廃棄体であるがゆえに 図-2 に示すように広範囲にわたる。これに加え、廃棄物の廃棄体化処理過程、埋設操業~坑道閉鎖前の期間、そして坑道閉鎖後の長期の安全性評価期間まで、極めて対象とする時間スケールも異なる。このような様々な課題に対し、平成 30 年度から 2 ヵ年の事業で取り組む課題を整理して、2018 年度 ⁴から検討を進めている。

2019 年度は経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の 地層処分に関する技術開発事業(TRU 廃棄物処 理・処分技術開発)」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。

- ●廃棄体パッケージの閉じ込め性能に係る試験と評価
- 陰イオン核種に対する閉じ込め技術の開発
- 廃棄体からの核種溶出モデルの高度化
- ●ニアフィールド構成要素の現象解析モデル の構築・高度化ーナチュラルアナログによる 緩衝材の長期安定性の検証-
- ●廃棄体由来の発生ガスに関する現象解析モデルの妥当性検討

個別の実施内容及びとりまとめの詳細については、以下(II-5-2 からII-5-6)の各項で述べる。

- 1) 資源エネルギー庁、特定放射性廃棄物の最終処分に関 する基本方針、平成27年5月22日閣議決定、2015
- 2) 資源エネルギー庁、科学的特性マップ、2017
- 3) 資源エネルギー庁 Web Site「放射性廃棄物のホームページ」, http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/tru/tru01.html
- 4) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成 30 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技 術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発報 告書、2019

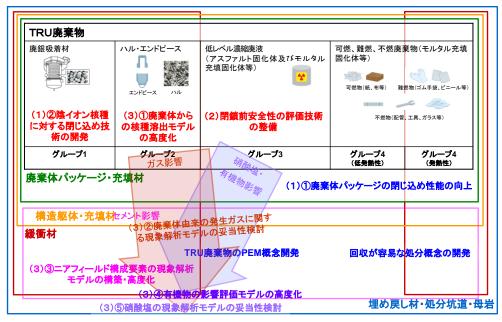


図-2 TRU 廃棄物及び処分場の構成要素と本事業の研究開発項目

5-2 廃棄体パッケージの閉じ込め性能に係る試験と評価

◇事業の概要

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

本事業では、廃棄体特性や環境要因等を考慮し、 廃棄体パッケージの設計に関する課題と設計にお ける設計要件や評価項目を満たすことを考えて、 図-1に示す全体計画において以下の検討項目を設 定して、2018年度¹¹より検討を開始した。

①廃棄体パッケージの製作技術の整備

パッケージ内の充填材に残存する水分の放射 線分解による水素ガスの発生を抑制する技術や 廃棄体への熱影響を低減可能な遠隔蓋接合技術 を開発して、実規模廃棄体パッケージを製作し、 それらの技術を実証的に確認する。

②廃棄体パッケージの長期性能評価

応力腐食割れや内部ガス圧の増加などを考慮 した構造健全性の評価や容器溶接部の腐食デー 夕を取得する。

③操業中の異常事象に対する廃棄体パッケージ の堅牢性の評価

操業期間中の落下事象等の異常事象を対象と した解析や実証試験により、廃棄体パッケージ の健全性を評価する。

事業の後半に予定している実規模廃棄体パッケージを製作するためには、事業の前半で2018年度の検討から抽出された製作技術に関する課題を解決する必要がある。一方で、操業中の異常事象に対する廃棄体パッケージの堅牢性の評価については、実規模廃棄体パッケージ製作後でないと落下試験等による実証的確認が難しいことから、2019年度の検討の対象とはせず、製作技術の整備に注力することとした。これらの条件を踏まえ、2019年度は以下の内容を実施した。

◇2019 年度の成果 2)

(1)廃棄体パッケージ容器の製作方法の検討 検討の対象とする廃棄体パッケージ B³⁾は、図 -2 に示す様に鋼製の容器と蓋、内部充填材(セメ ント系材料等)及び廃棄体で構成される。

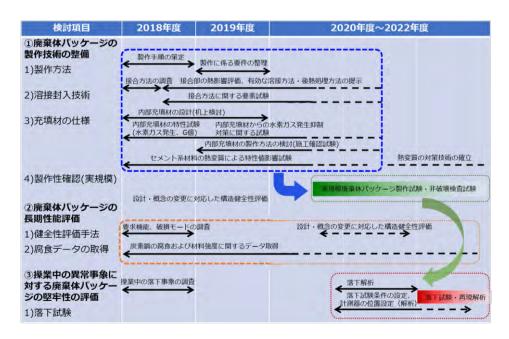


図-1 廃棄体パッケージの設計、課題および本検討項目の関連

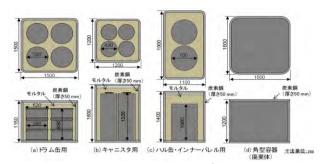


図-2 廃棄体パッケージBの概略図³⁾(容器厚さ 50mmm)

2018 年度検討では、蓋溶接時の入熱、予熱、 及び直後熱について検討し熱的制限に対する施工可能性を確認した。熱的制限に対しては応力除去焼きなまし(以下「SR」という)が最も厳しい条件となることが予想されるため、本年度は SRを含めた蓋溶接施工全体の熱的制限に対する施工可能性を検討した。本検討では、SR の目的である残留応力低減効果について注目し、以下の3点から SR の成立性評価、調査と課題の整理を行った。

- ▶ 熱的制限値に対する評価
- ▶ 応力除去の改善効果
- ▶ 遠隔施工成立性の調査

ここで、SR 時に内部のアスファルト固化体 (最も熱的制限値の厳しい TRU 廃棄物) が熱的制限値 (本項では 195℃ で設定) を超える可能性があることから、基本構造に対する SR 時の伝熱試解析を実施する。そして、明らかに熱的制限値を超える場合は、廃棄体パッケージ B の各構成部品に対して要求される設計要件を見直し、容器構造を再検討する。

以上の検討方針を踏まえて図-3 に本年度の研究フローを示す。

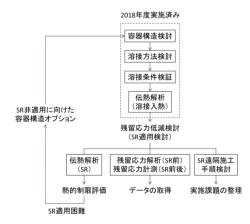


図-3 本年度の研究フロー

1)容器構造検討、溶接方法検討、溶接条件検証

まず、容器板厚 50mm の全厚溶接について、2018 年度の検討結果を踏まえ、容器構造を平蓋構造 (溶接は横向き。図-4 の左図参照)とし、レー ザ・アーク・ハイブリッド (LAH) 溶接の溶接方 法検討及び溶接試験を実施した。

本溶接方法について、横向き姿勢での溶接条件を確立し、溶接時に温度測定した結果、容器内での最高到達温度は340~370℃程度であった。1/4モデル相当の試験体において、ロボットを用いて1パスごとに連続した溶接を実施し(図-4の右図参照)、R部を含め問題なく施工できることを確認した。

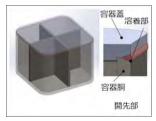




図-4 平蓋構造の容器構造(左)と 1/4 試験体溶接風景(右)

次に、SR 時の伝熱試解析の結果から、全厚溶接の容器構造ではアスファルト固化体の容器には適用困難である可能性が高いと判断し、容器構造を機械接合部 40mm と溶接接合部 10mm で構成する 2 重蓋構造 (溶接は下向き。図-5 の左図参照)とし、溶接方法検討及び溶接試験を実施した。

溶接はウィービングの TIG 溶接を選定し、溶接時に温度測定した結果、容器内での最高到達温度は90~100℃程度であり、2 重蓋構造により温度上昇を抑制する効果が十分得られると評価できた。1/4 モデル相当の試験体において、平蓋構造と同様にロボットを用いて 1 パスごとに連続した溶接を実施し(図-5 の右図参照)、R 部を含め問題なく施工できることを確認した。また、全厚溶接の容器構造(平蓋構造)と比較して溶接時間を削減できることを確認した。

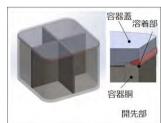




図-5 2 重蓋構造の容器構造(左)と 1/4 試験体溶接風景(右)

2) 伝熱解析 (SR 時)

平蓋構造における SR 時の伝熱解析では熱的制限値 (195℃) を大きく超える結果となった。2 重蓋構造における SR 時の伝熱解析では、平蓋と比較して SR 条件温度は同一だが加熱幅が狭く、保持時間が短いことから固化体の温度も低くなったが、熱的制限値は超える結果となった。いずれの場合も、固化体上方の内部充填材の充填度合いを変えて比較した場合には、内部充填材が隙間なく充填されているケースにおいてアスファルト固化体の温度は最も低くなった。より実態に近い検討のために2重蓋構造に対して3次元解析を実施した結果、アスファルト固化体の温度は低減したが熱的制限値以下にはならなかった(図-6参照)。

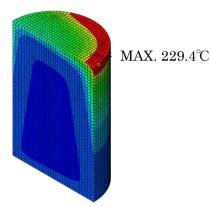


図-6 2 重蓋構造の伝熱解析 (SR 時) 結果

以上の結果から 2 重蓋構造は平蓋構造に比べて SR 適用の可能性が示唆されたが、熱的制限に対する成立性について更なる評価検討が必要であることが分かった。

今後の検討課題として、SR 施工適用に向けて は容器内部への断熱材の配置、2 重蓋外蓋厚さの 低減、熱処理時間・温度の低減などによる固化体 温度低減検討、あるいは残留応力低減に向けた材 料仕様・溶接方法の適用検討が考えられる。

3) 伝熱解析 (溶接入熱) 及び残留応力解析

2 重蓋構造の溶接入熱について、実際の温度計 測データと合わせ込んで伝熱解析を実施し、アス ファルト固化体の熱的制限値に対して十分な裕 度をもっていることを確認した。また、溶接時に 得た温度履歴データを用いて溶接残留応力解析 を実施し、直線部と R 部の残留応力分布には顕著 な差は見当たらず、応力分布として特異な箇所が 無いことを確認した(図-7参照)。

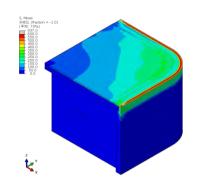


図-7 2 重蓋構造の残留応力解析結果

4)残留応力計測

残留応力計測では 1/4 モデル相当の試験体に対して残留応力計測を実施した(図-8参照)。

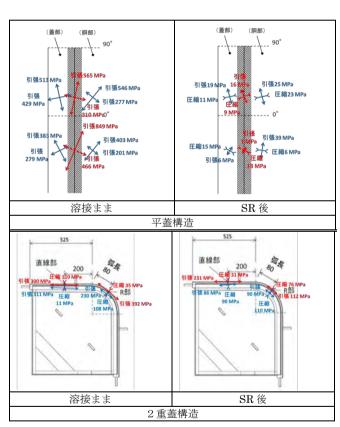


図-8 残留応力計測結果

平蓋構造、2重蓋構造の両方で溶接による残留 応力は直線部と R 部で大差なく溶接線方向に引 張残留応力が発生していることを確認した。SR 実施前後の残留応力値の比較から、設定した SR 条件で初期降伏点以下まで残留応力が低減する ことを確認した。また、SR 実施前の平蓋構造と 2 重蓋構造の残留応力値を比較すると、2 重蓋構造の方が低いことを確認した。ただし、本計測データは表面から深さ 1mm までの範囲であるため、今後は定置後長期の全面腐食により、1mm 以上の深さに位置する表面が露出した場合の考察を実施していくことが望まれる。

5)SR 遠隔施工手順検討

2重蓋構造に対する遠隔製作性を考慮した施工 手順及び構造を検討した。今後、内圧に対する考慮や落下事象対策を含めた内蓋の固定が必要と なった場合には、再度の検討を要するが、遠隔製 作性を考慮した有力な構造案を示すことができた(図-9 参照)。

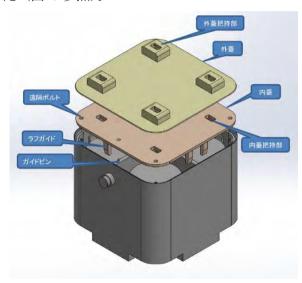


図-9 遠隔施工性を考慮した2重蓋構造の容器構造案

(2) 廃棄体パッケージ内充填材の仕様の検討

2018 年度の検討では、内部充填材の候補材料として、乾燥したコンクリートが廃棄体パッケージ内充填材に有望な材料として絞り込みを行った。また、内部充填材からの水素ガス発生量の抑制対策及び、コンクリートの配合選定に関する知見を得るため、セメント系材料からの水素ガス発生量を放射線照射試験(Co60)により確認した。その結果、セメント種類により水素ガス発生量に違いがあることを確認した。加えて、セメント系材料の乾燥により空隙中の自由水が減少することによる水素ガス量の低減に関しての知見を拡充し、併せて内部充填材を模擬した厚さ 20cm 程度のコンクリートの乾燥による自由水量の低減が可能であることを確認した。これにより、内部充

填材のセメント系材料からの水素ガス発生量を 抑制できる見込みを得た。

2019年度は、内部充填材に適用が可能なコンクリートについて、放射線分解による水素ガスの発生抑制や発生量の見積もり方法(G値)、施工性や製作性に関する試験を行い、知見を拡充した。

1)セメント系材料からの水素ガス発生量に関する検討

セメント系材料からの水素ガスの発生抑制や発生量の見積もり方法に関する知見拡充を目的に、セメント種類や試料中の水分量(乾燥条件)が異なるセメントペースト及びモルタル試料からの水素ガス発生量を放射線照射試験(Co60)により確認した。

試料 1g あたり、単位照射線量当たりの水素ガス発生量と自由水量及び全水分量の関係を図-10に示す(図には 2018 年度の結果も併記)。全水分量は自由水量と結合水量の合計である。水素ガス発生量と自由水量及び全水分量の関係は概ね直線関係が得られ、水素ガス発生には結合水よりも自由水が大きく寄与していると考えられた。また、骨材(細骨材)や化学混和剤が水素ガス発生に及ぼす影響は確認できなかった。

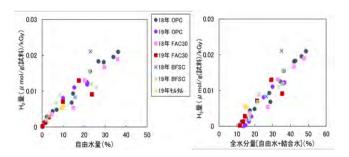


図-10 自由水量と水素ガス発生量(左)及び自由 水量と全水分量(右)の関係

また、試料に対する吸収線量を算出し、試料全体から発生する水素ガスの G 値 $(G_{HZ}(A11))$ を求め、水素ガス発生量の見積もり方法について検討した。自由水量で $G_{HZ}(A11)$ を評価すると、フライアッシュ及び高炉スラグを混合したセメント (以下、FAC 及び BFSC) 試料では、水素ガス発生の算定に誤差が生じる場合があった。全水分 (%) と $(G_{HZ}(A11))$ で評価すると、FAC や BFSC を含めて推定値である近似直線の標準誤差を小さくできることがわかった (図-11)

以上より、水素ガス発生抑制を目的として乾燥させたセメント系材料の自由水量を推定するなどし、比較的簡易な方法で水素ガス生成量を算定できる可能性を得た。今後は、コンクリートでのデータを蓄積し、コンクリートで算定可能であるか検討していく必要がある。

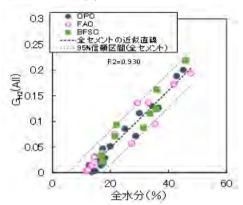


図-11 全水分(%)とGH2(AII)の関係

2)内部充填材の施工性や製作性に関する検討

廃棄体パッケージの組立手順の3ケース(充填材先打設方式、充填材後後打設方式、プレキャスト方式)のうち¹¹、遠隔封入性が求められ、最も厳しい製作条件である後打設方式を想定した組立手順について、高流動コンクリートで暫定配合を設定し、60cm 角試験体(無筋、有筋、繊維補強材による補強の計3体)を試作して施工性を確認した。その結果、高流動コンクリートは後打設方式でも対応可能な十分な施工性を有すること、廃棄体封入容器の格納及び構成容器に収めるために十分な寸法精度を得られることを確認した。





図-12 打設状況(左)と作製した試験体外観(右)

また、乾燥工程時の水分散逸時間を確認するために、作製した 60cm 角試験体及び φ100×200mmの円柱試験体を用いて、乾燥時の質量減少に関するデータ(乾燥温度 80℃、乾燥期間 14 日間)を取得した(図-13)。その結果、水分の散逸は試験体の形状に依存し、今回の試験条件においては、

60cm 角試験体は更なる水分散逸が見込めた。

今後は、想定される製作工程で充填材を製作し、 製作性や施工性を確認して充填材の仕様の具体 化を検討していくとともに、水素ガス発生量の低 減に係る乾燥工程時の、任意の試験体形状、乾燥 条件(期間・温度)における水分散逸量を推定す る手法の検討を進める。

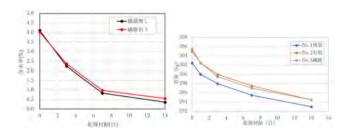


図-13 Φ100×200mm 試験体の乾燥工程における含 水率の経時変化(左)及び60cm 角試験体の乾 燥工程における質量の経時変化(右)

(3)廃棄体パッケージ容器溶接部の腐食挙動評価

廃棄体パッケージの閉鎖後の閉じ込め性の評価では、炭素鋼母材の平均腐食深さが 0.3mm、腐食深さの不均一性を考慮した場合の最大腐食深さを 5.3mm としている。そこで、蓋の溶接部の腐食挙動やメカニズムを確認して、既往の腐食寿命等の長期挙動評価をより信頼性の高いものにすると共に、溶接技術の妥当性とその品質を評価するための知見を整備することを目的とした浸漬試験について検討した。

試験溶液は弱アルカリ性環境の pH=11.0 で調整したものとした。腐食試験に供す試験片は、LAH 溶接試験片と比較のため EBW (電子ビーム) 溶接試験片の2種類とし、試験片の縁から 5mm の部分をマスキングし、試験後の形状計測の基準点とした。

30 日浸漬試験を取り出したところ、マスキング下のすき間腐食が認められた。300 日浸漬試験も確認したところ、同様にマスキング下のすき間腐食が認められたことから、試験を中止した。

そのため、上下端面のマスキング(シリコーン、テフロンテープの2種類)とマスキング無の試験片をEBWおよびLAH試験片で作成し、マスキング試験を実施した。その結果、30日の浸漬試験後に試験片は、総じて、すき間腐食または孔食が発生しており、そこを起点として樹脂状の腐食が進展していた。

今年度のマスキング試験も合わせた検討から、酸化性雰囲気低アルカリ条件での溶接部の全面腐食試験において、マスキング部の局部腐食の防止が難しいことが判明した。条件を再検討した溶接部の腐食試験を今後検討する。

- 1) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成30年 度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開 発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発報告書、 2019
- 2) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成 31 年 度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開 発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発 報告書、 2020
- 3) 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告:わが国に おける安全な地層処分の実現-適切なサイトの選定に 向けたセーフティケースの構築-(レビュー版)、 NUMO-TR-18-03、2018.
- 4) 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構,平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書,2017.

5-3 陰イオン核種に対する閉じ込め技術の開発

◇事業の概要

再処理施設の操業にともない銀吸着材によって回収されるヨウ素 129 (以下、I-129) は、半減期が 1570 万年と長く、また、人工バリア、岩盤等への収着性が低いことから、地表まで移行する時間は地下水流速等の水理環境条件の影響を受け易い。このため、TRU 廃棄物の地層処分の安全評価において、I-129 は被ばく線量への影響が大きい核種である。本事業は、地層処分において I-129 による被ばく線量の低減を可能とし、さらに長期性能評価において不確実性が小さく、さらに経済性にも有効なヨウ素固定化技術を開発し、我が国の幅広い地質環境条件に柔軟に対応することのできる処分技術を提言することを目的としている。

固定化処理技術の開発目標値は、①固化体からのヨウ素放出期間 10万年以上(特に地質条件が悪い場合でも I-129 からの最大被ばく線量を現行よりも約 1 桁低減可能なヨウ素放出期間に相当)、②ヨウ素固定化処理プロセスにおけるヨウ素回収率 95%以上(未回収のヨウ素からの最大被ばく線量を小さくするように設定)、として開発を進めている 1),2),3),4)。

これまでに国内で開発・検討が行われていたヨ ウ素固定化技術(8技術)を対称として、固化体の 基礎的な特性に基づいた上記目標の達成可能性の 観点、および、固化プロセスの工業的な成立性の 観点から順次対象技術を絞り込み、実用化可能と 考えられる代替固化技術として、アルミナ HIP 固 化体及び BPI ガラス固化体を選定した 4。 アルミ ナ HIP 固化体は、アルミナマトリクスにヨウ素 (AgI)を閉じ込める技術であり、廃銀吸着材を直 接 HIP 処理 (Hot Isostatic Pressing) するため、 処理プロセスは比較的簡易であり、マトリクスの 頑健性により固化体性能の処分環境に対する汎用 性が高い。BPI ガラス固化体は、ヨウ素を鉛とホ ウ素を主成分とする低温溶融ガラスに均質に固化 する技術である。この固化体については、高レベ ル放射性廃棄物ガラス固化体の性能評価研究の考 えも取り入れながら、ガラス溶解モデルが検討さ れている。

両固化技術ともに、年単位での浸出試験では、 浸出挙動を把握しており、ヨウ素の放出を加速す る地下水成分(アルミナ HIP 固化体おいては HS、BPI ガラス固化耐においては炭酸イオン)の影響を強く受ける場合を除いて、目標を達成可能な見込みを得ている。一方で、ヨウ素の放出が 10 万年という長期間にわたることを説明するためには、ヨウ素の放出に係る現象を正確に把握するとともに、その現象が継続することを示すこと、及びそのモデル化が必要である。また、上述のヨウ素の放出を加速する地下水成分をはじめ、地下環境で固化体性能に影響を及ぼす可能性のある化学種を対象にその影響範囲の特定が必要である。

◇2019 年度の成果 50

(1)アルミナ HIP 固化技術

これまでの研究開発によって、アルミナ HIP 固化体からのヨウ素の放出は、HS 濃度が高い場合により大きくなることが分かっている。降水系模擬地下水にアルミナ HIP 固化体を浸漬した場合には、初期には徐々にヨウ素が放出されるが、約2年を経過した時点ではヨウ素の放出が頭打ちになっている(図 $^{-1}$ 参照)のに対して、HS 濃度が比較的高い 3×10^{-3} mol/l 及び 3×10^{-4} mol/l の浸漬液に浸漬した場合には、約2年経過後でもヨウ素の規格化浸出量 (NL) が継続的に増加していた(図 $^{-2}$ 参照)。

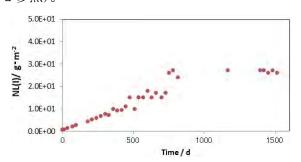


図-1 降水系模擬地下水に HIP 固化体を浸漬し た場合の、ヨウ素の規格化浸出量の変化

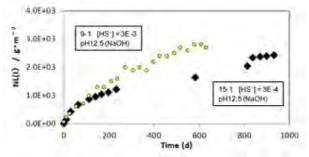


図-2 硫化水素イオンの高濃度条件 (3.0×10⁻¹M 及び 3.0×10⁻³ M) でのヨウ素の規格化浸 出量の変化

ここで規格化浸出量は、NL = (C/f) / (S/V)で表され、C は溶液中の対象元素の濃度、f は固化体中の対象元素の含有率、S は固化体表面積、V は溶液体積である。

図-3 は、模擬廃銀吸着材(以下、吸着材という)を粉砕せずに工業用アルミナを吸着材に対して 9 倍の割合で添加して製造した HIP 固化体のHS 溶液への浸漬後の断面の写真であり、黒色の部分は、試料表面に露出した吸着材に含まれるAgI が反応によって AgsS へと変質したことを示している。また、固化体内部の吸着材であっても、表面の吸着材と接した部分では AgsS の生成が観られた。



図-3 未粉砕の吸着材 10wt%に工業用アルミナ 原料 90wt%を添加して作成した固化体を 硫化水素イオン 3.0×10⁻³ M の浸漬液に 1684 日浸漬した後の試料断面

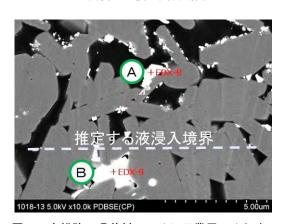


図-4 未粉砕の吸着材 10wt%に工業用アルミナ 原料 90wt%を添加して作成した固化体の 浸漬後の断面の液侵入境界近傍の SEM 像

表-1 図-4に示す測定点 A 及び B の EDX 分析の結果

	元素比(原子数%)			原子数の比	
測定点	S	Αg	- 1	I∕Ag	S/Ag
Α	4.0	7.2		0.0	0.6
В	0.0	24.0	18.9	0.8	0.0

この固化体に含まれる吸着材の黒色に変色した部分と未変色の部分との境界(浸漬液の侵入境界と考えられる)の近傍の SEM 像(図-4) および特性 X 線分析の結果 (表-1) からは、HS を含む浸漬液との反応によって AgI が Ags に変質し、その際の体積変化によって空隙が増加し、あらたな浸漬液の浸入並びにヨウ素の放出経路が形成されることが示された。

図-5 は粉砕した吸着材 50wt%に対して工業用 アルミナ50wt%を添加してHIP固化した固化体を、 Na₂S 溶液で洗浄後に蒸留水に 1687 日間浸漬した 後の断面の SEM 像である。 図の破線 b より下部か ら分かるように、固化体内部は、吸着材を粉砕し たことによって、元々の吸着材が多孔質であった ことに起因する空隙が無くなり、AgI がアルミナ のマトリックスによって囲まれた構造になって いるように見えた。一方、破線aより上側の接液 面近傍の領域では、Na₂S を用いた洗浄によって固 化体表面近傍の AgI が Ag2S に変化 (表-2) し、そ の際の体積収縮によって新たな空隙が生じてい ることが示された。また、破線 a と破線 b の間の 領域では、AgIが Agへと変化している(表-2) が、これは還元鉄による還元性の浸漬液によって AgI が還元されたものと考えられ、この領域でも 体積変化による連通した空隙の生成が見られた。

これらの結果から、蒸留水への浸漬では、AgIの還元による連通した空隙の生成が遅いため、これまでに示してきた浸漬試験の結果では、十分な固化体性能を得られることが示されたのに対し

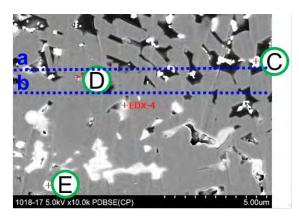


図-5 粉砕した模擬吸着材 10wt%に工業用アルミナ原料 90wt%を添加して作成した固化体の浸漬後の断面の液侵入境界近傍の SEM 像

破線 a: NazS 溶液を用いた初期洗浄の影響領域 破線 b: 蒸留水浸漬により Agl が分解した領域

表-2 図-5 に示す測定点 C, D 及び E の EDX 分析の結果

	元素比(原子数%)			原子数の比	
測定点	S	Αg		l∕Ag	S/Ag
С	2.0	3.6		0.0	0.6
D	0.0	3.8	0.0	0.0	0.0
Е	0.0	1.1	1.5	1.4	1.0

て、硫黄の濃度が高い浸漬液への浸漬では、AgIの分解によって空隙が増加し、その結果浸漬液の侵入経路が形成されて、AgIの分解およびヨウ素の放出が加速されることが明らかになり、2018年度までに実施したセルオートマトン法でのヨウ素放出解析で仮定した放出過程が妥当なものであったことが確認できた。

このように、AgIの分解による連通空隙の生成、とくにアルミナマトリックスにおける粒界の拡大がヨウ素の放出を加速させることが明らかになった。このことから、硫黄をはじめとする、AgIの分解を加速させる成分を含む地下水環境に対しても、高い閉じ込め性能を確保するためには、地下水の浸入領域でのAgIの分解が、連通した空隙の生成に寄与しないよう、固化体の構造やマトリックスそのものを改良することが必要と考えられた。

(2)BPI ガラス固化技術

これまでの研究開発によって均質なガラスの 製造に関する基礎的な技術は確立されており、現 在のフェーズでは、BPI ガラス固化体(以下、ガ ラスという)からのヨウ素の放出が 10 万年とい う長期間にわたることを説明し、ガラスの性能を 評価するためのヨウ素放出モデルの構築を課題 としている。

長期的なヨウ素の浸出挙動に関しては、これまでに、約2000日間の浸漬試験の結果得られたガラスからのヨウ素の放出挙動が継続するものとした場合、pHが11.5を超える高pH環境と、炭酸塩濃度が高い環境を除いて、目標とする10万年間の放出期間を達成できる見通しが示されているが、その放出挙動の継続性を示すためには、ガラス表面の地下水への溶解挙動、溶解した成分の地下水成分との反応による変質層(2次鉱物)の形成、及びそれらを受けたヨウ素の移行挙動をモデル化することが必要である。

図-6 に本開発におけるガラスからのヨウ素放 出挙動のモデル化のアプローチ方法を示す。

ヨウ素放出挙動の把握に関しては、これまでの 検討によって、図-7に示すように、浸漬液に含ま れる成分によって、ホウ素の溶出に対してヨウ素

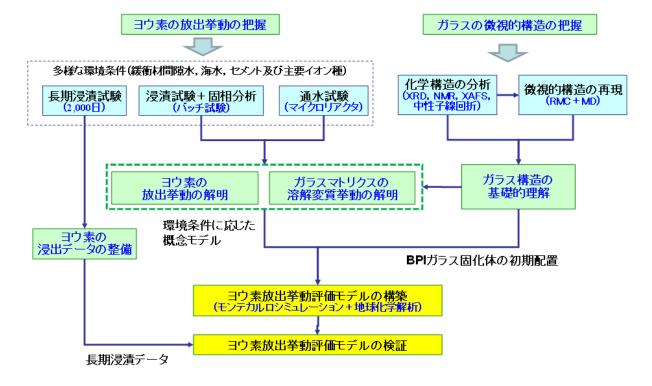


図-6 BPI ガラスのヨウ素放出挙動評価のアプローチ方法

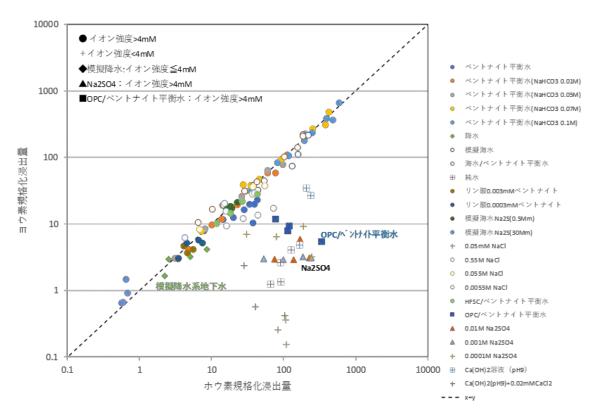


図-7 浸漬試験でのホウ素とヨウ素の規格化浸出量の比較

の放出が抑制的な挙動を示すケースと、ホウ素の溶出に対してヨウ素が調和的に放出されるケースとに大別されることが分かっている ⁶。また、いずれのケースでも、浸漬液の鉛の濃度は検出下限値以下であった。

ホウ素の溶出に対してヨウ素の放出が抑制的な挙動を示すケースでは、ガラスの溶解によってガラス表面に変質層を形成しないか、形成してもごく薄い層のみを形成するグループであり、ホウ素のみが液相に放出された結果、ガラス表面近傍に残存する鉛とヨウ素とが PbI₂ と思われるヨウ素の濃縮層を形成することで、ヨウ素の放出が抑制されると考えられた⁵⁰。

これに対して、ガラスの溶解によってガラス表面に Pb を含む変質鉱物の層 (変質層) を形成し、その層の成長によって Pb が消費されることによって、ヨウ素の放出が抑制されず、結果としてヨウ素とホウ素との規格化浸出量が調和的な挙動を示すと考えられた。これまでにベントナイト平衡水など炭酸イオンを含む浸漬液への浸漬試験では、変質層としてハイドロセルサイト及びセルサイトが生成することが明らかになっている ⁵⁰。また、地球化学計算による解析の結果、ガラスと

の反応によって変質層を形成する可能性として、 リン酸を含む地下水でのパイロモルファイト (Pb₅(PO₄)₃C1) および HS⁻を含む地下水でのガレナ (PbS) の生成が予測されたことから、リン酸及び HS⁻を含む地下水への浸漬試験を実施した。

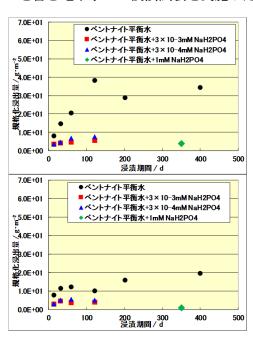


図-8 リン酸を添加したベントナイト平衡水中のホウ素 (上)及びヨウ素(下)の規格化浸出量の経時変化

図-8 に示すように、リン酸を含む浸漬液への浸漬では、ガラス表面の X 線回折(CRD)から、OH-パイロモルファイト (Pb $_5$ (PO $_4$) $_3$ (OH))と水酸アパタイト (Ca $_5$ (PO $_4$) $_3$ OH)との固溶体の析出が確認された。また、ホウ素とヨウ素とが調和的に浸出することが明らかとなったが、その規格化浸出量は、同期間の人工海水への浸漬と比較して小さかった 6 。また、HS-を含む浸漬液への浸漬では、表面にガレナの析出が確認された。また、リン酸を含む溶液への浸漬と同様、ホウ素とヨウ素とが調和的に浸出することが明らかとなったが、その規格化浸出量は、同期間の人工海水への浸漬と比較して小さかった 6 。

何れの場合も、浸漬後のガラス表面の XRD ではガラス基板からのハローパターン及びハイドロセルサイトのピークが観察されており、パイロモルファイトの固溶体やガレナの析出相が薄いものであること、また、ホウ素の浸出量が炭酸イオンのみの影響を受けているケース(模擬海水およびベントナイト平衡水)と比較して小さかったことから、これらの成分による生成物はガラスの溶解に対する障壁として機能しているものと考えられた。

変質層が生成しないケースでは、ヨウ素の放出量はホウ素の溶出量に対して少ないが、ガラスに対して攻撃的な浸漬液(高アルカリや、高イオン強度のケース)では増加すること、および変質層の形成によるガラス表面での Pb の消費によって、ヨウ素の放出がホウ素の溶出に対して調和的な挙動を示すこととを考え合わせると、ヨウ素の放出量は、ガラス表面での変質(ガラスから除去される Pb の量)とガラスの組成(Pb 及びヨウ素の含有量)とから算出できるものと考えられた。

すなわち、実際にはガラスから取り除かれるPb量とヨウ素の量とが調和的であり、変質層を形成するケースでは、ホウ素の溶出によって過剰となるガラス表面近傍のPbが変質層の形成で消費された結果として、ホウ素の溶出とヨウ素の放出とが調和的になったものと考えることができる。

以上の結果から、ガラスと地下水との反応によって、以下の過程を経てヨウ素が放出されるものと考えられた。

① ガラス表面での溶解反応(主にホウ素の溶出)

- (①'ガラス表面からのヨウ素の放出)
- ② ホウ素が溶出した領域での Pb とヨウ素と からなる層の生成
- ③ 変質層の形成・成長による Pb の消費とそ の領域からのヨウ素の放出
- ④ 変質層でのヨウ素の移行
- ⑤ 変質層の成長および状態変化

より長期間にわたるガラスからのヨウ素の放出挙動をモデル化するためには、上記①から⑤の過程をモデル化する必要がある。これらのうち、③以降については、ガラスから放出された成分およびガラス表面の Pb との反応と、その結果生成する変質層の厚さや性状を推定することで、現象論に基づいてモデル化できる可能性がある。

②に関しては、これまでの試験ではその層が極端に薄いことから確認できてはないが、変質層を形成しないケースでのホウ素とヨウ素の放出量の差からその存在を推定することが可能と考えられる。

これまでに、ガラスからのヨウ素の放出挙動に 関しては、XRD, XPS 及び NMR などによって取得し た構造因子(配位構造)をもとにリバースモンテ カルロ法を用いて作成したガラス構造モデルに 対して、ガラスに含まれる各元素間の結合パラメ ータをフィッティングパラメータとして、炭酸イ オンを含むケースでの浸漬試験の結果を、モンテ カルロ法で解析することで再現できることを示 している。

この解析では、上記①に相当するガラスの溶解に関するパラメータをフィッティングしていることから、その根拠、すなわち、ガラスに含まれる各元素間の結合パラメータを算出し、容易に溶解する結合や、水和反応によって容易に切断されない結合を明らかにすることで、モンテカルロ解析で用いたパラメータの妥当性を示すことが、その妥当性を示し、長期間のヨウ素の放出挙動の継続性を述べるために必要である。

ガラスに含まれる各元素間の結合の強度を算出するためには、実験的にはガラスの水和反応のエネルギーを取得する方法が考えられるが、ガラスに於いては個々の結合の状態に幅があること、ガラスの各構成元素の水和が同時に起きる可能性があることなどから、その測定は困難と考えられる。そのため、これまでに取得したガラスの構

造因子を説明できるガラスの構造モデルを構築 し、その構造モデルに基づいて理論的に結合エネ ルギーを算出することによって、上記パラメータ の妥当性を検討することを試みている。

上述のリバースモンテカルロ法を用いて構築したガラス配位構造では、たとえば Pb 対する最近接原子の配位数が幅広い分布を持つ(図-9)など、確率の極めて低い構造を多く含んでおり、結合エネルギーを理論的に計算するには十分な精度を有していなかった。

そこで、ガラスの構造推定に古くから用いられている手法である結合電荷拘束 (Bond Valence Sum、以下 BVS 拘束という)を導入することで、量子計算に耐えうるガラス構造モデルの構築に取り組んでおり、2018 年度には主に 2 成分系の

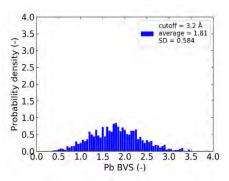
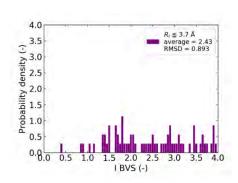


図-9 BVS 拘束を導入していない場合の鉛の配位数の分布



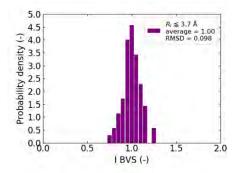


図-10 BVS 拘束の導入前(上)及び導入後(下)の ヨウ素に対する最近接原子の配位数の分布

ガラス組成に対して BVS 拘束を導入することで、各元素の配位構造が、ガラスに含まれる各元素の持つ短距離秩序と同様の配位構造を持つ結晶に近い現実的な範囲に収束することを確認した。2019 年度は、これをガラスに拡張して適用し、量子計算に耐えうるガラス構造モデルを構築した。

図-10 に BVS 拘束の導入前後のヨウ素の配位数分布を、また、得られた配位構造をもとに構築したガラスの微細構造モデルの全体像を図-11 に、それぞれ示す。

今後、構築したガラスの微細構造モデルに基づいて、分子軌道法等によって各原子間の結合の安定性等を検討し、ガラスの溶解解析で用いたパラメータが妥当であることを示し、長期的なヨウ素放出挙動の予測結果の信頼性を確保する計画である。

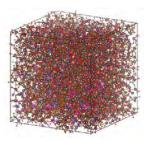


図-11 BVS 拘束を導入して得られた配位構造をもとに 構築したガラスの微細構造モデルの全体像

- 1) 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 16 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調 査 ヨウ素固定化技術調査報告書、2005
- 2) 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 18年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調 査 ヨウ素固定化技術調査報告書、2007
- 3) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成24年度地層処分技術調査等TRU 廃棄物処分技術ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発-平成19年度~ 平成24年度の取りまとめ報告書-、2013
- 4) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開 発 報告書(第1分冊)ーヨウ素 129 対策技術の信頼性 向上ー、2018
- 5) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成30年 度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術 開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発報告 書、2019
- 6) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成 31 年 度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術 開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発 報告 書、2020

5-4 廃棄体からの核種溶出モデルの高度化

◇事業の概要

本事業は、使用済燃料の再処理過程で発生するハル等廃棄体(使用済みジルカロイ被覆管であるハル、ステンレス鋼製のエンドピース等を収納した廃棄体)に含まれる炭素 14(以下、C-14)の長期的放出挙動の評価に関する信頼性向上を目的として、2004年度に開始した。研究は大きく3つの項目に分類される。第一にC-14インベントリの合理的設定方法の検討、第二に放射化金属からのC-14放出挙動評価、第三に放出挙動評価の補完試験としての金属の腐食速度評価などのコールド試験(想定される処分環境温度30℃~80℃での腐食試験)である。

事業を効率よく確実に進めるため、研究フェーズを区切って実施してきた。フェーズ 1 (2004 年度~2006 年度) では、ジルカロイ被覆管やステンレス鋼の諸特性に関わる情報収集等を行い、試験計画の立案を行うとともに、基礎試験を実施し、一部のデータを取得した¹⁾。

フェーズ 2(2007 年度~2012 年度)では、それまで PWR に関してのみ評価例のあった C-14のインベントリについて、炉型 (PWR、BWR)や燃料型式、さらには材料に応じて、詳細にインベントリを評価した。同時に C-14 の分析手法の見直しを行い、 BWR の照射済み被覆管を用いた 10 年間にわたる浸出試験を開始している 20 。

フェーズ 3 (2013 年度~2017 年度) では、長期的な C-14 の放出挙動の調査 (ジルカロイのホット試験及び長期腐食試験) に加え、ジルカロイの長期腐食モデルの検討、ステンレス鋼の長期腐食モデルの調査、C-14 の化学形態の調査、さらに、国際的な情報共有・調査を実施した³⁾。特に、欧州の共同研究である CAST (CArbon14 Source Term) プロジェクトへ参画することで、研究開発を合理的に遂行し、放射化金属や C-14 の安全評価に関わる最新の成果や課題を共有した。

以上のようなこれまでの調査研究では、ハル等 廃棄体において C-14 インベントリの多くを含む ハルに注力した検討を行ってきた。一方、エンド ピースについては、国内にて、これまでに実廃棄 物の分析評価を行った事例がない。そのため、本 事業では、上述の成果や課題を受け、実廃棄物の データが報告されていないエンドピースの特性評価に注力した研究開発を実施する。特に、金属廃棄物からの核種溶出は、核種が金属中に均一に分布していることを前提とした保守的評価に基づいていることから、エンドピース中の核種分布を評価することを目的とし、詳細な核種分析や解析評価を実施する。さらに、エンドピース材の一部を浸漬させることで核種溶出データを取得する。また、ハルについてはこれまでに継続している浸漬試験により、長期の核種溶出データを取得するとともに、核種分布に関わる諸因子の基礎的検討を実施する。

なお、C-14 に関わる課題として挙げられている 内容のうち、金属の腐食挙動、酸化膜からの核種 溶出モデル、C-14 の移行挙動・シナリオ等につい ては、次フェーズ以降の課題と位置づける。

◇2019 年度の成果 4)

(1)ハル等廃棄体中の核種分布の評価

2018 年度に将来的なインベントリ評価および核種溶出挙動評価への適用を目的として照射済みエンドピースの調査を実施し、放射化計算が可能な燃焼履歴や材料情報が入手できるエンドピース試料(下部タイプレート)を選定した 50 。また、選定した試料の性状調査を実施し、簡易的な放射能濃度測定等を行った。 2019 年度は引き続き、エンドピース中の核種分布を評価するための分析や解析を実施した。核種インベントリ分析では、エンドピース試料片を溶解させ、核種の分離操作を行った。得られた 20 0-14、 20 1-36 及び 20 1-37 については検出下限以下であった。

また、エンドピース中の核種分布を解析的に評価するため、モンテカルロ (MCNP) 法を用いた中性子照射量の解析評価および核種生成分布評価について検討した。図-1 に下部タイプレートの幾何学形状を反映した解析モデルを示す。図-2 に中性子が燃料発生領域から均一に発生する条件とした場合の中性子束分布から計算した放射能濃度分布の結果 (Co-60 の例) を示す。なお、この解析では隣接する燃料集合体からの中性子照射も考慮されている。核種の生成量は燃料から

の距離によりほぼ決定され、高さ方向分布は燃料に近いほど高い値となり、燃料から離れるほど低い値を示す。水平方向の分布は中心程高く、両端に近づくほど低くなる傾向があることが示された。今後は燃料の燃焼履歴を適切に反映させる等の高度化を図っていく予定である。

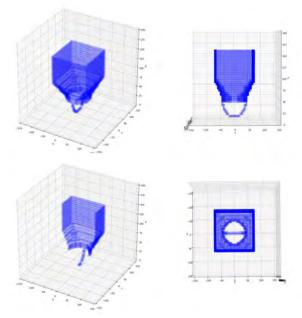


図-1 照射済みエンドピース(下部タイプレート)の3次元幾何学形状解析モデル

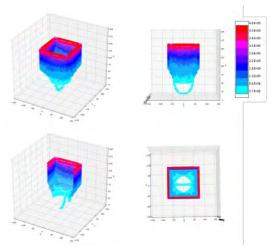


図-2 MCNP を用いた中性子分布解析による照射 済みエンドピース(下部タイプレート) の放射能濃度分布(Co-60)の解析結果

また、2018 年度に引き続き⁵⁰、照射済みエンドピースの核種分布等の特性評価手法として、イメージングプレート (IP) 法の適用性について検討した。2018 年度に照射済みエンドピースを用いた試測定で得られた IP 像を用いて、IP シグナル

の解析方法を検討した。特に、ベータ線とガンマ線の弁別に用いる遮蔽効果と試料の幾何学形状について検討した。今後、Co-60からのガンマ線影響を考慮した露光時間や露光方法等、実サンプルへの適用について更に検討していく予定である。

(2)エンドピースの溶出試験

2018 年度に照射済みエンドピース溶出挙動調 査として、エンドピースの調査と試料選定(下部 タイプレート)を行った5。また、下部タイプレ ートの簡易モデルによる放射能分布解析により、 軸方向に、燃料部から離れるにしたがって放射能 が低下することによる放射能分布があることが わかった。上記の調査結果や情報に基づいて、 2019 年度は溶出試験に供する下部タイプレート の採取位置や量(サイズ)、ステンレス鋼の腐食 速度等について検討するとともに、溶出試験に用 いる容器について耐放射線等の観点からの検討、 試作を行った。2020 年度には下部タイプレート 試料の採取、加工を行い、溶出試験を開始する予 定である。なお、溶出する C-14 の量は非常に僅 かであると推定されるため、2020年度には加速 器質量分析等の高感度な測定技術の導入につい ても検討する予定である。

- 1) 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発報告書(第3 分冊) -C-14 の放出挙動等に関するデータの取得-、 2008
- 2) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成24年度 地層処分技術調査等TRU 廃棄物処分技術 ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発-平成19年度 ~平成24年度のとりまとめ報告書、2013
- 3) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開 発 報告書(第2分冊) - 炭素 14 長期放出挙動評価ー、 2018
- 4) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成31年 度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術 開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発 報告 書、2020
- 5) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成30年 度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術 開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発報告 書、2019

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

◇事業の概要

TRU 廃棄物の地層処分施設において構造材や充填材としてセメント系材料を用いた場合にはニアフィールド環境が高アルカリ性となる可能性がある。高アルカリ性環境は、ベントナイト緩衝材の物理的・化学的性質を変え、その長期性能に影響を与える可能性があるため、ニアフィールドの状態変遷を評価するためのセメント系材料と緩衝材の変質に関するデータ取得や解析モデルの構築が行われている 10.20。

本事業では上記の背景を踏まえ、高アルカリ性 環境の形成を抑制するために、普通ポルトランド セメント (OPC) に比べて浸出液の pH が低くなる 先進的なセメント系材料の一つとして開発され た HFSC (Highly Fly-ash contained Silica-fume Cement) ^{3),4)}について、HFSC を処分施設の建設に 用いた際の地下水との反応挙動や緩衝材との相 互作用による変質挙動の将来予測に必要なデー 夕取得とモデルの高度化を図るとともに、ナチュ ラルアナログ (NA) により、長期挙動の直接的な 証拠を取得して現象理解を図り、ベントナイト系 緩衝材の現象解析モデルに反映するデータや、ア ルカリ環境下でも長期間にわたり機能が損なわ れないことの根拠として活用することを目的と している。HFSC に係る試験とモデルの開発は共同 で事業に取り組んでいる国立研究開発法人日本 原子力研究開発機構で、NAは公益財団法人原子力 環境整備促進・資金管理センターで実施しており、 本稿では NA による緩衝材の長期安定性の検証に ついて報告する。

NAによる緩衝材の長期安定性の検証では、TRU廃棄物処分場の人工バリアシステムを構成するベントナイト系緩衝材の HFSC 使用によるアルカリ環境下での長期挙動のナチュラルアナログによる根拠として示すために、フィリピンパラワン島の Narra 地区ナチュラルアナログ試料の分析により、アルカリ環境下での変質反応プロセス(反応時間とスメクタイト化率、スメクタイト化に係る沈殿→結晶化の生成・進展プロセス)や Fe, Mg イオンの変質反応プロセスへの影響に係るデー

タを拡充して、現象理解を図るとともに、人工バリアシステムの現象解析モデルを補完するための情報として取り纏める。

◇2019 年度の成果 50

(1)調査概要

パラワン島の Narra 地区 (図-1 参照) の NA¹⁾ では、スメクタイト(2八面体型のモンモリロナ イト)を溶解・変質させる高アルカリ環境(pH > 11) がスメクタイト (Mg, Fe に富むスメクタイト (3八面体型のサポナイト、2八面体型のノント ロナイト等)) を生成する環境でもあること、Fe, Mg に富む高アルカリ環境での二次鉱物はゼオラ イトではなく Fe, Mg に富むスメクタイトである こと、Saile 鉱山の NA でみられるアルカリ変質 プロセスと類似性からベントナイトでも同様の 変質プロセスが生じる可能性が高いことが明ら かになった。一方で、現状ではデータの少なさ のため、どの程度スメクタイト化するのか(定 量的な評価)、アルカリ変質における Fe, Mg, Si, Al の影響、スメクタイト系の二次鉱物によるク ロッギングのメカニズムなどが NA における課題

2019 年度は、Mg, Fe を含むアルカリ溶液からマグネシウムケイ酸塩(MSH)組成の沈殿物を経て Fe, Mg に富むスメクタイトが生成するとみられる一連のアルカリ変質プロセスについて、堆積時間(本 NA サイトではアルカリとの反応時間に相当)が明らかにされているパラワン島 Narra地区のトレンチ(図-1)で採取した NA 試料の EPMA及び TEM を用いた観察・分析により、特にスメ

クタイト又はその前駆体と考えられる MSH を対象として組織(性状、共生関係等)や鉱物組成の情報を取得して、変質プロセスにおけるスメクタイト化の生成過程(特に MSH が関与する反応プロセス)について解析した。



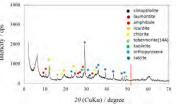


図-1 NA サイト(パラワン島 Narra 地区)のトレンチ調査 位置

(2)ナチュラルアナログ試料とその地質環境

これまでのナチュラルアナログ調査から Fe, Mg の存在する環境でのアルカリ変質プロセスが 明らかになりつつあるが、アルカリ変質による スメクタイト生成が C-S-H を伴う MSH の沈殿か ら生成することの仮説については根拠となるデ ータがまだ十分でないため、アルカリによって 生成する MSH を同定し、MSH がスメクタイト化す る要因を明らかにするために、反応時間が短く スメクタイトあるいはその前駆体とみられる沈 殿物と共生するC-S-Hが多くみられるトレンチ2 から 3 試料、それとの比較のために反応時間の 長いスメクタイトがみられるトレンチ 3 及び 5 からそれぞれ1試料を選定して、バルク分析(XRD 及び XRF)、EPMA 及び TEM による組織(性状、共 生関係等)や鉱物組成について観察・分析する こととした。トレンチ2及びトレンチ3の試料 採取位置、堆積年代、XRD チャートをそれぞれ図 -2、図-3に示す。

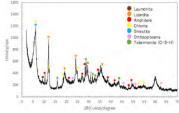




トレンチ2堆積年代:2413±82年

図-2 トレンチ 2 の分析試料のサンプリング位置と堆積 年代及び XRD チャート(#2:PWT02-15-C2-2-001)





トレンチ3堆積年代:9721±57年

図-3 トレンチ 3 の分析試料のサンプリング位置と堆積 年代及び XRD チャート(#4:PWT03-16-C2-001)

(3)NA 試料の微細構造の観察

1) SEM 観察及び EPMA 分析

分析する試料の研磨片を作成し炭素蒸着を行った上で、SEM 及び EPMA による観察・化学組成分析を行った。SEM 及び EPMA の観察結果から求めた鉱物組み合わせを表-1 に示す。

これまでスメクタイトと分類していた空隙を 充填している部分には、Fe や Mg、Al に富み、Ca 成分が多い(CaO として 18wt%程度) ために厳密 なスメクタイトとしての構造式は成立しないも のもあり、これを FMCASH と分類した。 FMSH 系の 二次鉱物として、トレンチ2(#1)にはサポナイ トおよびノントロナイトに分類される部分が C-S-H 脈に沿って観察された。トレンチ 2(#2~ #3) 及びトレンチ 3(#.4) の 3 試料では Ca や C に 非常に富んだ部分 (FMCASH)、細かな岩片を含む 塊状のスメクタイト部 (Massive smectite)、主 に岩片の周囲に沿って存在する葉片状スメクタ イト部 (Foliated smectite) の 3 種類の FMSH 系二次鉱物が見られた。化学組成からサポナイ ト、ノントロナイト、モンモリロナイトの3種 類のスメクタイトが共に存在していることが分 かった。

C-S-H系の二次鉱物は、脈状あるいは粒状組織をもち、いずれも少量のAIを含むトバモライトの化学組成を示した。試料内および試料間で化学組成の変化に乏しいが、試料間での微細構造の違いが顕著だった。図-4 に、C-S-H組成の二次鉱物の微細構造の比較を示す。左から順に結晶度が上昇し、隙間を充填している様子を示す。Ca/Si比については、#3の試料で若干高い傾向が見られるものの、結晶度の上昇に沿って系統的に増加または減少する傾向はなく、Ca/Si比は0.8程度が安定であることが示唆される。

表-1 分析試料の鉱物組み合わせ表

	#1: PWT02- 15-Rh-016	#2: PWT02B- 15-C2-2-001	#3:PWT02B- 15-C2-2-002	#4: PWT03- 16-C2-001	#5 : PWT05-16- Rh-013
Serpentine	0	Δ	Δ	Δ	×
F-M-S-H	Saponite Nontronite	○ · FMCASH · Massive	○ ・FMCASH ・Massive ・Foliated なCSHと細かく混	○ FMCASH Massive Foliated	Saponite Nontronite Montmorillonite
C-S-H (tobermorite)	© 	0	結晶化度の	○ 上昇 □	×
Carbonate	0	×	×	×	×
Lithic	• amphibole • pyroxene • spinel	• amphibole • pyroxene • spinel	· amphibole · pyroxene · spinel	• amphibole pyroxene spinel	· amphibole · pyroxene · spinel
	-016 PWT02: 0tz 10 um C ~ 11 w(% #2 0.77 - 0.80	8-15-C2-2-001 10-10 C - 7-10 w/% Ca/Si ~ 0.80 - 0.82		2-002 PW 10 um 8-10 wf% #4	C=10-11 wt% Ca(S) = 0.79 - 0.84

図-4 C-S-H組成二次鉱物の微細構造の比較

Fe-Mg-Al 及び Si-(Na+Ca)-(Mg+Fe+Al)の 2 種類の三角ダイアグラムで表した FMSH 系の二次鉱物 ((a) FMCASH と(b) 塊状スメクタイト) の化学組成の比較を図-5 及び図-6 にそれぞれ示す。

図-5 の(a)と(b)を比較すると、貫入している 斑レイ岩由来の斜長石を含有し他の試料よりも Al に富むトレンチ 5 (#5saponite)の点を除くと、 塊状スメクタイト部の化学組成はノントロナイトに近い組成で Fe に富む傾向を示す一方で、 FMCASH部ではAl の割合に著しいバラつきが見られる。塊状スメクタイト部については、#5 の大半がノントロナイト、#5 の一部の Al に富んだ点がモンモリロナイトに分類できる。#2~#4 の塊状スメクタイト部は若干 Ca 過多の為、厳密にはスメクタイトとしての構造式は成立しないものの、ノントロナイトに類似した組成である。

図-6 の(a)と(b)の比較では、C-S-H 組成に近いものからスメクタイト組成に近いものまで大きなバラつきを示すため、これらの混合が示唆される。一方、塊状スメクタイト部は小さいバラつきを示す。#2 から#4 については Ca の割合

のばらつきとSi に乏しい傾向を若干示すものの、FMCASH と比べると組成が均質に近く、#5 に類似している。

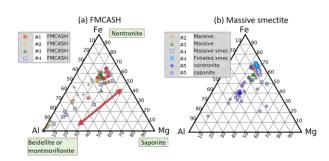


図-5 FMSH 系鉱物の化学組成 (Mg - Fe - AI)

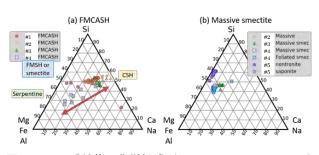


図-6 FMSH 系鉱物の化学組成(Si – Mg+Fe+Al - Ca+Na)

2)TEM 観察

SEM や EPMA による分析から FMCASH とした部分を TEM 観察した。トレンチ 2 の#2 試料の結果を

図-7、トレンチ 3 の#4 試料の結果を図-8 に示す。 #2 では図-7 の(a)に示すように内部に多くの 空隙と筋状の構造、直径 5 μ m 程度の球状粒子

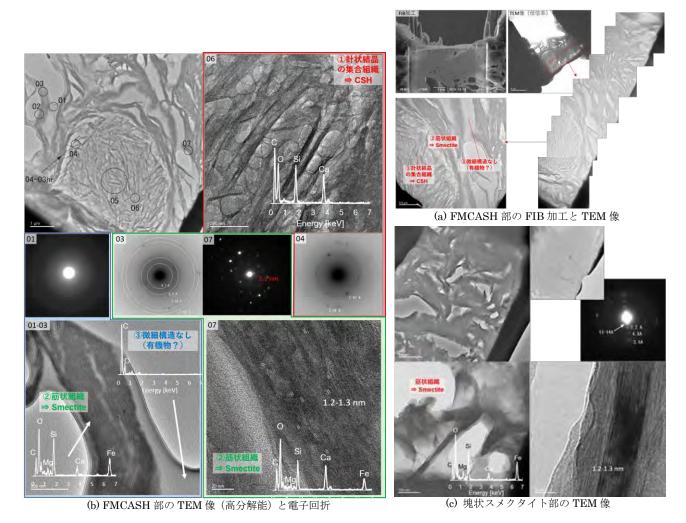


図-7 トンレンチ 2 試料(#2:PWT02-15-C2-2-001)の TEM 観察結果

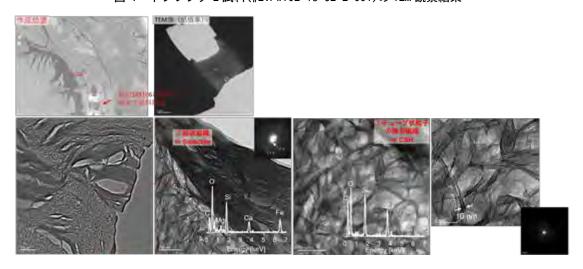


図-8 トンレンチ 3 試料(#4:PWT03-16-C2-001)の葉片状スメクタイト部の TEM 観察結果

を含む様子が観察される。球状粒子の中には細かな針状結晶がランダムな向きに集合しており、SEM や EPMA で見られた C-S-H と類似した構造を持っている。筋状組織はスメクタイト質の低結晶物質とみられ、微細構造が見られない有機物との互層関係が確認できる。

さらに詳細に制限視野電子回折および高分解 能観察を行った結果を図-7の(b)に示す。球状粒 子については、C-S-H の組成であること、電子回 折パターンから複数の単結晶がランダムな向き に存在していることが確認された。筋状の部分 については化学組成から Fe, Mg を含むスメクタ イト(やや Fe 寄りでサポナイトよりもノントロ ナイトに近い)であることが分かった。ただし、 結晶性や結晶方位の揃い方にも場所によって不 均質性があり、非常に弱い回折スポットを示す もの (図-7(b)の "03") と比較的明瞭な回折ス ポットを示すもの(図-7(b)の"04")が見られ た。筋状部分の高分解能観察では1.2 - 1.3 nm 程度のスメクタイト特有の格子縞が見られ、層 構造は真っすぐ平行に伸びているというよりは、 蛇行したり途切れたりしており、スメクタイト としての結晶性が低いことが分かる。結果とし て、#2 試料の FMCASH 部分は、1 相の非晶質物質 ではなく、C-S-Hと低結晶スメクタイト、有機物 が混合した物質だと言える。

図-7 の(c)の塊状のスメクタイト部分は、FMCASH 部分と異なり、FIB で作成した薄膜試料全体が筋状の組織で構成されており、化学組成や電子回折像から試料全体が均質に近いスメクタイトだと考えられる。回折像と格子縞からスメクタイトの積層方向もある程度平行に揃っている様子が確認できることから、同じ試料内でもFMCASH部に比べて塊状のスメクタイト部はより結晶化の進んだスメクタイトと言える。#4 に

は図-8のように葉片状の FMCASH 部がみられ、この葉片状 FMCASH 部分は純粋なスメクタイトとするには Ca 過多の組成を示すこととから C-S-H とスメクタイトの混合が考えられる。また、薄膜全体が、筋状の部分と網目状の部分の二相で構成されていることが確認できる。筋状の部分は化学組成と回折像からスメクタイトだと分かり、網目状の部分は約 10 nm 幅のチューブ状の C-S-H が蛇行しながらランダムな方向に集合した物質だと分かる。

(4)フィリピンの NA におけるアルカリ変質プロセス

EPMA、SEM 及び TEM による鉱物組織観察の結果 から、パラワン島の NA サイトのアルカリ変質プロセスは図-9 のように説明できる。

①はアルカリ変質を受ける前の段階の砕屑性 堆積物でハルツバージャイト由来の岩片や亀裂 を含む様子を表した。その後、Ca に富む高アル カリ地下水が空隙を通りながら反応を起こす段 階は②のように表わせる。蛇紋石や苦鉄質鉱物 の岩片が溶解することにより供給されたSi とCa が結合することで C-S-H が生成され、脈状に析 出する。Caと錯体を形成していた有機物が C-S-H の生成と共に脱離し、有機物が凝集することで 球状粒子が脈周辺に形成される。また、脈沿い にアルカリ地下水が砕屑性の蛇紋石と反応しな がら、溶解した Fe や Mg、Si によって FSH や MSH が生成され、C-S-Hと細かく混合した部分を形成 する。砕屑物が堆積する環境の違いで酸化的な 天水が侵入してくる場合は、③のようにノント ロナイトや炭酸塩が一部で形成される。これが #1 の試料に相当する。②からさらにアルカリ地 下水との反応が継続して進む段階の#4 では④の ように脈中の C-S-H は徐々に結晶度が上昇し、

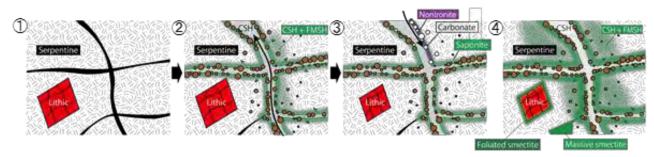


図-9 パラワン島 Narra 地区の NA サイトのアルカリ変質プロセスのモデル図

次第に空隙を完全に埋めるようになる。C-S-H 脈に近い部分では C-S-H と FMSH が混在した FMCASH 部を形成する一方で、脈から離れた部分では塊状スメクタイトや岩片の周囲などに葉片状スメクタイトを形成する。

これまでの検討から、フィリピンのナチュラルアナログのアルカリ変質では、アルカリ溶液中に溶けだした Mg が Si と結合して MSH として空隙等に沈殿し、その際過剰の Ca が Si と結合して-S-H が共沈し、この非晶質の MSH が結晶化してスメクタイト化するというアルカリ変質プロセスを考えていたが、今年度の TEM 分析から、MSH と C-S-H の詳細な産状を確認し、これまでのアルカリから MSH と C-S-H が共沈するという初期の変質プロセスを裏付ける根拠が得られた。ただし、MSH は必ずしもスメクタイトに進展するわけではなく、この反応がどちらに進むかを評価することが重要であり、この NA からそのキーとなる元素が Fe であると考えられる。

パラワン島のNA 試料の分析では、空隙に沈殿しているMSH 様の物質はFe (一部 AI も)を含むFMSH 組成であり、これがスメクタイト化するとさらにFe に富む傾向を示している。このことから、Fe に富むアルカリ環境での変質ではスメクタイト化に進展する可能性が高く、これはベントナイトにおいても十分考えられ、実際、ルソン島 Saile 鉱山のNA において、Fe の存在でFe、Mg に富むスメクタイト(鉄サポナイトやノントロナイト)が二次鉱物として生成している。

- 1) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開 発 平成 25 年度~29 年度取りまとめ報告書、2018
- 2) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技 術開発事業 処分システム評価確証技術開発報告書、 2018
- 3) 入矢桂史郎、新村亮、久保博、黒木泰貴、人工バリア 材の変質に関する研究、動力炉・核燃料開発事業団委 託研究成果報告書、PNC ZJ1201 97-001、1997
- 4) 三原守弘、入矢桂史郎、根山敦史、伊藤勝、シリカフュームを混合したセメントペーストの浸出試験とモデル化、放射性廃棄物研究、3巻2号、pp.71-79、1997
- 5) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成 31 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技 術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発報 告書、2020
- 6) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、

平成 24 年度 放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 多重バリアの長期安定性に関する基礎情報の収集及び整備 平成 19 年度~24 年度の取りまとめ報告書、2013

5-6 廃棄体由来の発生ガスに関する現象解析モデルの妥当性検討

◇事業の概要

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

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

これまでの検討 ^{2)~9)}では、緩衝材などの人工バリアを対象とした、水・ガス移行特性及び力学特性などの材料特性データの取得を目的とした各種要素試験及びその解析的評価により、力学連成気液二相流解析が可能なモデルを構築してきた。 今後の課題としては、

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

などを抽出した。

また、2017年度末に地層処分研究開発調整会議が発行した「地層処分研究開発に関する全体計画(平成30年度~令和4年度)」¹⁰では、これまでに実施した各種要素試験とその解析的評価をもとに取得したバリア材のガス移行特性及び力学特性と、それらをもとに構築した現象解析モデルの、実施設の安全評価への適用性を、処分坑道の小型モックアップ(三次元拡大系供試体)を用いたガス移行試験などにより確認すること、適用性を確

認した現象解析モデルを用いた解析評価の試行により、核種移行挙動へのガス影響を検討することが示されている。

一方、NUMOの「包括的技術報告書(レビュー版)」¹¹⁾では、TRU 廃棄物処分の最新のセーフティケースにおいては、人工バリアとして緩衝材を用いる場合、緩衝材の設計要件として、低透水性、自己修復性などが挙げられており、それらの設計要件を満たす仕様とすることで所定の機能が発揮され、核種移行抑制に対する閉鎖後長期の安全性が確保できるとされている。

以上より、本事業では、最新のセーフティケースにおいて、廃棄体由来の発生ガスの人工バリア内での挙動の解析的評価により、

- ・発生ガスの蓄圧による破過が生じた場合でも、 緩衝材の自己修復機能が発揮されれば、核種 移行に対する緩衝材の閉鎖後長期の安全性が 担保されること(核種移行挙動に対するガス 影響が有意なものではないこと)
- ・再冠水及び発生ガスの蓄積、移行挙動に伴う 緩衝材の変形挙動が人工バリア全体の力学安 定性に有意な影響を及ぼさないこと
- ・廃棄体由来の発生ガスの、緩衝材中の移行挙動が、処分施設における核種移行挙動及び人工バリアの力学安定性に有意な影響を与える 条件

が評価可能なツールを開発することを目的とし、TRU 廃棄物処分施設における廃棄体由来の発生ガスについて、人工バリアの状態を考慮したより現実的なガス移行場の環境を設定したうえで、核種移行や力学的挙動に対するガス移行挙動の影響を評価可能なモデル・解析手法を構築するための検討を実施する。

検討対象とする最新のセーフティケースで対象 とする処分坑道断面例を図-1 に示す。

また、表-1に本事業の5か年の実施計画を示す。

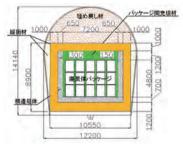


図-1 対象とする TRU 廃棄物処分施設の処分 坑道断面例(深成岩、先新第三紀堆積 岩類における廃棄物グループ 2 の例)¹⁰⁾

表-1 本事業の5か年の実施計画

No distribution of the State of			
調査研究項目	1年目(2018)	2年目(2019)	3年目(2020) ~ 5年目(2022)
(1)ガス移行挙動を	評価するためのツール、評		
1) 処分坑道の力学連成 ガス移行評価モデル の高度化(モック アップ試験、他)	・モックアップ試験仕様設定、予察解析	モックアップ再冠水試験 要素試験 実施設解析モデル構築	成果取りまとめ ・モックアップガス移行試験〜解体調査 ・再冠水挙動、ガス移行挙動の解析評価(アップスケーリングの適用性確認) ・実施設力学連成ガス移行挙動評価 ・押出し水量評価
	モックアップ試験計画~再		ガス移行試験、解析評価、実施設でのガス移行挙動評価 (カ学連成ガス移行挙動評価と押出し水量の評価)
(2)現実的なガス移	行場の環境等の設定に関 ・変質により生じるガス移行挙動への影響	する検討	緩 ガ 押 ・化学変質/力学挙動相互連成解析コード 衝 ス 出
2) 長期変遷を考慮した ガス移行場の状態設 定評価	要因となる現象の整理 ・連成解析手法の高度化のためのガス移行場の化学変質/力学挙動連成解析コード の適用性確認	 ガス移行場の化学変質現象(モンモリロナイト溶解やCa型化)に伴う力学挙動の相互連成解析手法の検討 	の適用性確認(二次元断面) 材 発 し ・状態変遷のケーススタディと成果の取りまとめ 性 生 水 ・物理化学的変遷に伴う緩衝材性能変遷の定量化 量
	単純系/一次元での化学変数 妥当性		二次元断面での解析評価手法、ガス移行場の状態設定 手法の妥当性評価
3) 核種移行を考慮した ガス移行影響評価モ デルの構築(ガス発 生光報で無い	ガス発生学動の経時的な定量評価のため の評価条件の整理(Gr.2)	ガス発生挙動の経時的な定量評価の試行 による評価手法の妥当性確認 (Gr.2)	・ガス発生挙動経時的な定量評価のための評価条件や評価手法のアップデートとGr.2以外のガス発生挙動評価 ・ 核種移行へのガス影響評価
生挙動評価、他)	グループ2を対象としたガス系 (発生挙動評価の試行と		評価条件の更新検討、グループ2以外の発生挙動評価 (より現実的かつ、評価対象を拡大した検討)

◇2019 年度の成果 12)

(1)ガス移行挙動を評価するためのツール、評価 手法の検討

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

2019 年度は、ガス移行試験の実施に向けての試験体の再冠水試験及び緩衝材候補材料の要素試験による物性取得、並びに処分施設の2次元モデルの検討を行った。

a. 小規模モックアップによる再冠水試験

2018 年度製作したモックアップ試験装置へ試験体をセットし、再冠水試験を実施するとともに、後述の要素試験結果と合わせて、既存のベントナイト系材料のパラメータの適用性につい

て検討した。

モックアップ試験装置を用いた、再冠水試験 及び 2020 年度実施予定のガス移行試験のシステ ムイメージを図-2 に示す。

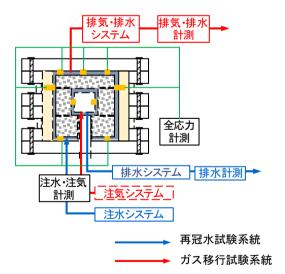


図-2 再冠水・ガス移行試験装置のシステムイメージ

試験体は、ベントナイトとケイ砂を 7:3 で混合したものを飽和度 95%で乾燥密度 1.6Mg/m^3 に圧縮成型したものを、図-3 に示すように、7 層に分割して試験装置内に積み重ねて設置した。

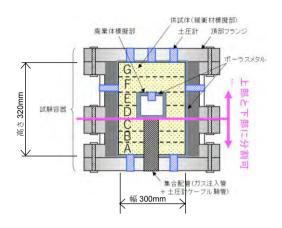


図-3 小規模モックアップ試験体の成型概要

再冠水試験は、①サクションによる自然給水 (約1日)、②加圧注水 (0→0.2Mpa へ昇圧、 約83日間)、③飽和の確認、の順に実施した。 飽和の確認は次の4通りで実施した。

- ・想定膨潤圧との比較による浸潤状態の確認
- ・想定注水量への到達及びその後の注排水量 のバランス確認
- ・予察解析による確認。予察解析の確からし さは、パイロット試験(図-4)により確認
- ・河野・西垣法 ¹³⁾による確認。同法の本試験 への適用性はパイロット試験により確認。
- ・同法による小規模モックアップ試験体の確 認。

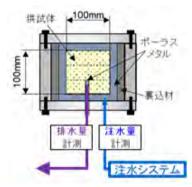


図-4 パイロット試験の概要

b. 要素試験による物性値取得

小規模モックアップ試験材料の二相流特性データの蓄積・拡充を目的とした要素試験を実施した。要素試験の概要を図-5 に示す。得られたデータと解析コード GETFLOWS による再現解析から二相流パラメータを同定した。

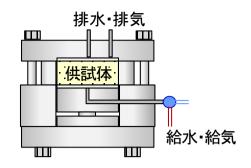


図-5 要素試験概要

要素試験により得られた、ガス注入過程における相対浸透率と水分特性曲線を図-6 に示す。また、本試験で取得した二相流パラメータを既往の研究成果^{2)~9)}と比較し、妥当性を確認した。

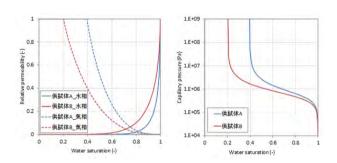


図-6 ガス注入過程の相対浸透率と水分特性曲線

c. 処分坑道を対象とした二次元断面解析モデル の構築

図-1 に示した処分システム概念を対象に、2 次元断面の解析モデルを構築した。解析モデルを図-7 に示す。「包括的技術報告書」¹¹⁾に基づき、坑道離間距離を 45m とし、坑道深さは地表から 1,000m、ガス発生影響が十分小さくなる範囲として地表から 2,000m をモデル化範囲とした。

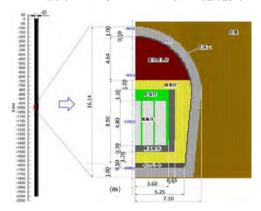


図-7 二次元解析モデル(全体図及び坑道拡大図)

2020 年度は、小規模モックアップ試験におけるガス注入試験の実施および試験結果の 2 次元解析モデルへのアップスケーリングを実施する予定である。

(2)現実的なガス移行場の環境等の設定に関する 検討

本検討では、ガス移行挙動評価に影響を与える事象として、①閉鎖後長期の処分場におけるガス移行場の状態を、セメント系材料から生じる高アルカリ水と緩衝材との接触による化学変質とそれに伴う力学影響の観点から評価してガス移行挙動評価に反映するための検討および、②ガス発生挙動について、最新の知見やより現実的な評価条件を設定して経時的な定量評価を行うこととしている。

2019 年度は、2018 年度までのセメントによるベントナイトの化学変質に伴う二次鉱物の生成のモデル化、力学試験による緩衝材の限界状態のモデル化、弱連成→強連成の HMC (水理-力学-化学) 連成解析の適用性評価及び条件を仮定したガス発生挙動の評価等の成果 ⁹⁾を踏まえ、二次鉱物生成に関する試験データの拡張と現象モデルへの反映、力学試験による緩衝材の限界状態のモデル化の継続、1 次元の人工バリア系での HMC 連成解析の適用性評価及び具体的な条件でのガス発生挙動の経時的な定量評価を実施した。

a. 長期変遷を考慮したガス移行場の状態設定

本検討では、ガス移行解析に適用するための 処分場の閉鎖後長期を想定したガス移行場の状態を HMC 連成解析による人工バリアの長期変遷 の解析結果に基づいて設定することを目的に、 以下の内容を実施した。

- 1)緩衝材の化学変質挙動の試験による確認とモデル化の拡張
- 2)緩衝材の力学挙動(飽和後のせん断挙動)の 試験による確認とモデル化
- 3)強連成による1次元のHMC 連成解析の適用性 の検討

上記 1)では、ベントナイト系材料の化学変質 挙動に重要な二次鉱物の生成に関する挙動や影響を把握し、HMC 連成解析に反映するために、 2018 年度までの化学変質試験結果に 2019 年度 の試験結果を加えた総合評価を実施し、セメン ト系材料の溶脱段階の Region II におけるモンモリロナイトの溶解・変質・透水性の変化及び二次鉱物生成現象のモデル化並びに現象モデルの化学解析への反映手法の検討をおこなった。その結果、モンモリロナイトの溶解により二次鉱物が生成しても透水係数は低下せずに溶液の透過が継続することが判明するとともに、Region II における二次鉱物の生成現象データを拡張して概念モデルを提示し、核形成に必要なエネして概念モデルを提示し、核形成に必要を整理したで表慮した動的平衡定数 LogKでを整理したで、イントナイトの溶解については、その反応表面積つまり緩衝材の密度の影響が大きく、これ験により得られたモンモリロナイトの密度と溶解速度の関係を図-8に示す。

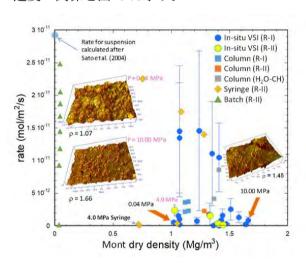


図-8 モンモリロナイトの密度と溶解速度の関係

上記 2)では 2018 年度のモンモリロナイト含有率 59%の試験体による試験結果による検討を拡張するために、含有率 20%で 3 通りの乾燥密度 (1.3、1.6、1.8Mg/m³)の試験体で三軸 CUb (間隙水圧を測定する圧密・非排水)試験を実施し、限界状態線に対するモンモリロナイト含有率の影響を検討した。一例として、乾燥密度1.6Mg/m3の場合の試験結果を図-9に示す。この試験で得られた1.3、1.6、1.8Mg/m3の場合の平均有効主応力とせん断応力の関係を関口太田モデルの降伏曲面にプロットしたものを図-10に示す。この3ケースでは限界状態応力比(傾きM)は1.07、1.28、1.15となり、モンモリロナイト含有率が低い場合は、非膨潤性鉱物の力学挙動が支配的となる可能性を示唆している。

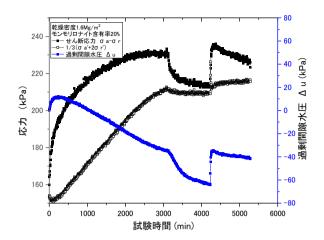


図-9 せん断応力・平均有効応力及び過剰間隙水 圧の経時変化(乾燥密度 1.6Mg/cm³)

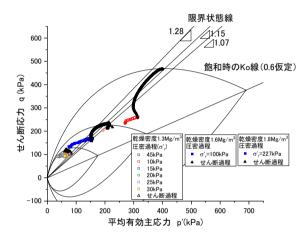


図-10 有効応力経路(乾燥密度 1.3, 1.6, 1.8 Mg/cm³)

前記 3)では、2018 年度の解析コード COMSOLによる化学・力学解析の適用性確認を踏まえ、1次元系~2次元系人工バリアの HMC 連成解析による長期挙動解析への適用性を検討した。1次元のセメントーベントナイト系から力学解析に受け渡すモンモリロナイト含有率、Ca型化率及び間隙比が適切に算出されることを確認した。これを踏まえ2次元モデル(図-11)による解析を実施し、濃度勾配を緩和することで、安定して変数の受け渡しを考慮した連成解析が可能であることを確認した。本ケースでの解析結果の一例を図-12に示す。

また、化学解析については、より複雑な現象を考慮するための確認として、本解析コードによる解析結果と他の解析コード(PHREEQC)によるものを比較して検証を行い、おおむね人工バリアの長期挙動を評価するための解析が可能

であることが確認できた。解析モデル中の濃度 差の大きい境界への対応及びモンモリロナイト の溶解における pH12 以上の場合の解析安定性の 改善が必要であることが明らかとなった。

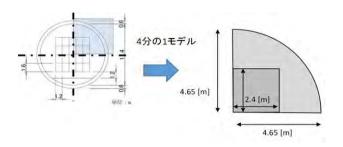


図-11 2次元解析モデル

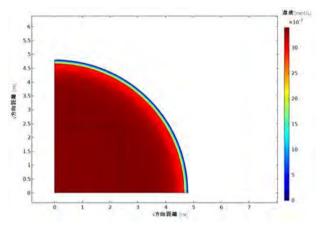


図-12 Ca²⁺イオンの濃度分布(133年後)

b. ガス発生挙動の経時的な定量評価

本検討では、より現実的なガス移行挙動評価を行うためのガス発生挙動(発生時期、発生量)の経時的な定量評価を行うとともに、将来のガス移行評価に基づく核種移行評価に向けての準備を行うこととしている。

2019 年度は 2018 年度提示されたガス発生挙動評価の条件に沿ったケースを設定し、ガス発生挙動の定量評価を実施した。廃棄体及び人工バリアの仕様は、NUMO 包括的技術報告書 111 に沿って設定し、評価期間としては、廃棄体パッケージ化から閉鎖まで 25 年、パッケージ開口まで300 年、ガス発生量評価は 10,000 年までと設定した。ガス発生は、水(モルタル自由水、再冠水後の人工バリアなど)の放射線分解及び金属(廃棄物、キャニスタ、廃棄物パッケージ、躯体鉄筋など)の嫌気性腐食による水素ガスを考慮した。ガス発生に重要な役割を果たす水分の

消費量の評価を実施した結果(モルタルの自由水のキャニスタ内への流入を許容するケース)を図-13 に示す。これによれば、金属腐食による水分の消費量は、放射線分解のものと比較して極めて少ないことがわかる。

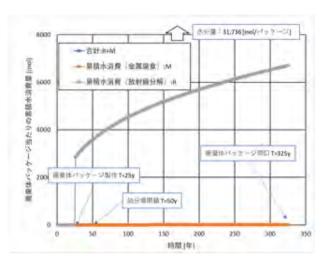


図-13 処分坑道あたりの累積水素ガス発生量

水の放射線分解及び金属の還元性腐食による ガス発生を統合した処分坑道当たりの10,000年 後の累積水素ガス発生量(モルタル自由水流入 許容ケース)を図-14に示す。この結果、水分 の消費量が示すように、金属腐食による発生ガ ス量は、水の放射線分解のものに比較して 1/100になっていたことが判明した。

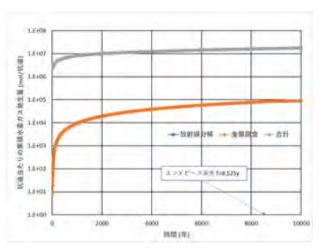


図-14 処分坑道あたりの累積水素ガス発生量

- 1) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄 物処分技術検討書 -第2次 TRU 廃棄物処分研究開発 取りまとめー、2005
- 2) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成24年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物

- 処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 平成 19 年度~24年度取りまとめ報告書、2013
- 3) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成25年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書(第5分冊)ーガス移行連成挙動評価手法の開発ー、2014
- 4) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成26年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書(第5分冊)ーガス移行連成挙動評価手法の開発ー、2015
- 5) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成27年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書(第5分冊)ーガス移行連成挙動評価手法の開発ー、2016
- 6) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成28年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書(第5分冊)ーガス移行連成挙動評価手法の開発ー、2017
- 7) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成29年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書(第5分冊)ーガス移行連成挙動評価手法の開発ー、2018
- 8) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成29年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 平成25年度~29年度取りまとめ報告書、2018
- 9) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成30年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発 報告書、2019
- 10) 地層処分基盤研究開発調整会議、地層処分研究開発に 関する全体計画(平成30年度~令和4年度)、2020
- 11)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の選定に向けたセーフティケースの構築 レビュー版,NUMO-TR-18-03,2018
- 12)公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技 術開発 報告書、2020
- 13)河野 伊一郎・西垣 誠,室内透水試験に関する 2, 3 の考察,土質工学会論文報告集, Vol. 22, No. 4, pp. 181-190, 1982

6. 廃棄物処分の環境影響を基点とした原 子力システム研究

◇事業の概要

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

原子力利用において放射性廃棄物の管理は不可欠であるが、処分対象となる廃棄物の量と性状は発電及びそれ以降の燃料サイクルの諸条件に依存する。同時に、それは処分場のサイズや長期の放射線安全に影響する。放射性廃棄物の減容・有害度低減に関して核種の分離・変換技術の研究が進められているが、廃棄物処分の負荷低減に向けた現実的、且つ有効な対策を講じるためには、発電から廃棄物処分までの分野横断的な視点からのプロセス評価を行うと共に、その効果を評価する指標を持つことが求められる³¹。

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

◇2019 年度の成果

(1) 廃棄物処分における環境影響評価研究

①評価及び評価指標の導出 (原環センター)

廃棄物処分における環境影響を、廃棄物量と放射線影響に着目した環境負荷、及び原子力利用の 貢献度に分類し、既往研究成果を調査、分析した。 ②諸量の評価(東京工業大学)

MA 核種の分離を念頭においた燃料サイクル諸量計算に向けて、国際原子力機関(IAEA)が公開している Nuclear Fuel Cycle Simulation System (NFCSS)コードを対象とし、計算条件と計算コード機能の調査を行い、サイクル条件や廃棄物条件を考慮した諸量計算を試行した。

- (2)Am 分離プロセスの工学的設計研究
- ①分離メカニズムの検証(東京工業大学)

簡素化 MA 分離プロセス評価に必要な技術的知見として、MA-RE (希土類元素)一括回収、及びMA 単離用の抽出剤と抽出のフローシートについて公開論文、研究機関報告書を調査し、簡素化分離の工学的成立性とその場合のフローシートを検討した。

②諸量評価に基づく分離度に対応した分離プロセスの構築(日本原子力研究開発機構)

溶媒抽出に関する既存の計算コードを用いて、 簡素化 MA 分離プロセスの基本構成についてプロ セスシミュレーションを行い、Am 回収率を下げ たケースでの MA/RE 相互分離プロセスの分離段 数を、従来の高回収率ケースと比較した。

(3)多様な前提条件に対応する高速炉燃焼モデル の高度化(北海道大学)

MA 核種のリサイクル評価を行う高速炉の炉心設定、及び燃焼計算の実施のために、燃料の燃焼、使用済燃料の冷却、再処理などに関する入力データを整備した。

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

- 1) 令和元年度国家課題対応型研究開発推進事業「原子力システム研究開発事業」の公募開始についてhttps://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/14165 13.htm
- 2) 令和元年度「原子力システム研究開発事業」募集要項 https://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/__ics

Files/afieldfile/2019/05/22/1416513_01.pdf

3) 21 世紀後半に向けた廃棄物管理の選択肢: Pu 利用推進 と環境負荷低減型地層処分に関する研究、(1)~(6)、 日本原子力学会 2018 年春の年会、予稿集 3011~3016

7. 使用済燃料の多様化を考慮したシナリ オ評価

◇事業の概要

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

現在、我が国において使用済燃料は一定期間冷 却後に再処理され、発生する高レベル廃液はガラ ス固化され地層処分される予定である。現状、六 ヶ所再処理工場にて年間約 1,000 本のガラス固 化体の製造が想定されている。一方、原子力発電 所の稼働に関しては、より効率的な燃料利用の 点からの高燃焼度化、プルサーマルによるプルト ニウムの利用促進が進められている。高燃焼度燃 料や使用済 MOX 燃料から発生する廃液もガラス 固化する必要があるが、従来のガラス固化体に比 べて不純物(Mo、白金族元素等)や長寿命かつ発 熱性の高いマイナーアクチニド (MA) が多く含ま れる。そのため、再処理やガラス溶融のプロセス、 ガラス固化体の特性や発生本数、更には地層処 分へ影響する可能性がある。これらの課題は、燃 料から再処理、ガラス固化、処分まで幅広い技術 分野を横断することから、原子力利用のシナリオ を適切に設定し、シナリオに基づいて全体最適 化の観点からサイクル諸条件の組合せや関連性 を検討することが有効かつ重要と考えられる。従 って本事業では、ガラス固化体の地層処分を前 提とした多様な核燃料サイクル条件を考慮した シナリオの評価に資する国内外の情報を調査、 分析、整理し、シナリオを論拠としてガラス固 化体の特性や地層処分への影響について検討す るものである。

◇2019 年度の成果

2019 年度は、使用済燃料のうち、高燃焼度 UO2 燃料を主な対象とし、ガラス固化及び地層処分に対する影響、課題等について検討した。

(1)シナリオ検討に基づくサイクル条件多様化評 価システムの検討

エネルギー基本計画に基づいた原子力利用のシナリオを検討し、核燃料サイクルの諸条件(燃焼度、使用済燃料の冷却期間等)を抽出した。抽出した条件に基づいて、燃焼計算等による使用済燃料の核種インベントリ、ガラス固化体の発熱率、処分場面積等を評価するシステムを構築した。

(2) 再処理、ガラス固化、地層処分に関する情報調査

フランスを中心に海外における再処理、ガラス固化、地層処分に関する研究開発、事業、政策の状況を調査した。調査結果は(1)のシナリオの論拠や蓋然性として反映させた。

(3)課題の抽出、整理

(1) の評価システムに基づいてガラス固化体 の発熱率や処分場への熱影響を解析評価するこ とで、高燃焼度化によるガラス固化や地層処分 への課題を分析・検討した。ガラス固化体の発 生本数は高燃焼度化により増加するが、ガラス 固化体中の廃棄物含有量を高めることで(高充 填化)、再処理工場の基本計画である年間 1000 本以下に抑制できることがわかった。一方、高 充填化によりガラス固化体の発熱率が増加し、 処分場面積への影響が懸念される。ガラス固化 体 1 体あたりの専有面積は大きくなるものの、 処分場全体の面積は発生本数が減るため必ずし も増大せず、廃棄物含有率 25wt%で最小となる ことから、高燃焼度化による処分場面積への影 響を高充填化によって合理化できる可能性が示 された。ただし、ガラス固化体中の不純物濃度 (Mo、白金族元素) が増加するため、マトリク スの改良や溶融炉の運転技術等のガラス固化技 術の高度化が重要となる。

(4)MOX 燃料利用の情報整備

2020 年度以降に MOX 燃料由来の模擬高レベル 廃液を作製するため、MOX 燃料に関する予備検討 として、模擬廃液組成を決定するための条件、 必要な情報を検討した。また、現在のプルサー マル発電や基本的な MOX 燃料利用の情報を収集 した。この情報に基づいた燃焼計算を次年度に 実施し、模擬廃液作製へ反映させる予定である。

本成果は経済産業省資源エネルギー庁「平成31年度放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究事業」の一部である。

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

◇事業の概要

再処理施設の操業にともない発生する廃銀吸着 材は TRU 廃棄物の地層処分ではグループ1に分類 されている 1)。廃銀吸着材によって回収されるヨ ウ素 129 (以下、I-129) は、半減期が 1570 万年 と長く、人工バリア等への収着性が低いことから、 地層処分の安全評価における重要核種である。当 センターでは、経済産業省からの受託事業におい て、I-129 による被ばく線量の低減の観点からヨ ウ素固定化技術を開発し、我が国の幅広い地質環 境条件に柔軟に対応することのできる技術開発を 行っている 2),3)。しかし、現在のところ実用化が期 待できる固化技術のマトリクスとしては、セラミ ックおよびガラスの2つに限られている。また、 それぞれの固化体は処分環境に対する適性の範囲 があることから、技術オプションの確保、さらに は幅広い環境に適用できる固化技術の開発が期待 される。

一方、ハル・エンドピースは、使用済みのジルカロイ製の被覆管(ハル)等からなる廃棄物である。圧縮処理され処分される予定であり、TRU 廃棄物の地層処分ではグループ 2 に分類されている¹⁾。当センターでは、経済産業省からの受託事業において、処分環境におけるジルカロイの腐食挙動の評価に関する研究開発を実施している^{2)、4)}。

本研究では、グループ1の廃銀吸着材を安全に処分するための代替技術の開発とともに、グループ2(ハル・エンドピース)と材料特性を共有化することで、グループ間の処理方法および安全評価技術開発の合理化も期待できることから、ジループ間の処理方法とから、がらりまである。そのため、ジルカロイハルの HIP 処理によるラウ素 固定化方法 カロイハルの HIP 処理による。そのため、ジルカロイを目的として実施する。そのため、ジルカンとする固化体の見込みを得ることで、将来の経済できる。なお、インをで、経過にして経済である。なお、インをで、経過にして、資源の行力により、金属マトリクスとして活用することから、金属マトリクスとして活用することがら、金属マトリクスとして活用することがら、金属マトリクスとして活用することで、資源・廃棄物有効の活用を図る効果も期待できる。

◇2019 年度の成果

本年度は文献⁵⁾を参考に固化体を試作した。Nb 製のカプセル内に Zr 粉末を封入し、中央にジルカ ロイ被覆管を、さらにその内部に模擬廃銀吸着材 を充填した。1350℃、175MPa、3 時間として HIP 処理を行った。図-1にHIP処理した固化体の断面 を示す。固化体全体は収縮しており、中央の黒色 部分が模擬廃銀吸着材、その周囲が Zr である。目 視による観察では、Zrマトリクスはバルク状の金 属塊に変化し、廃銀吸着材の物理的な閉じ込めに 成功しているようである。今後、詳細な分析によ って Zr 金属のバルク化、空隙等の観点からマトリ クスの健全性や閉じ込め性、さらに廃銀吸着材の 成分やヨウ素との相互作用についても、温度等の 影響について確認していく予定である。また将来 的には、Zr 金属と廃銀吸着材の混合方法、固化体 サイズのスケールアップを試みることで、ジルコ ニウムやジルカロイハルによるヨウ素固化技術の 成立性への見通しを得ることが重要である。



図-1 ジルコニウム HIP 固化体の断面写真

- 1) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物 処分技術検討書 第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ 、2005
- 2) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 24 年度 地層処分技術調査等事業ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発 平成 19 年度~24 年度取りま とめ報告書、2013
- 3) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開 発 報告書(第1分冊)-ヨウ素 129 対策技術の信頼性 向上-、2018
- 4) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開 発 報告書(第2分冊) - 炭素 14 長期放出挙動評価 - 、 2018
- 5) E. R. Vance, D. S. Perera, S. Moricca, Z. Aly, B. D. Begg, J. Nucl. Mater. **341**, 93-96, 2005

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

◇事業の概要

本事業では、放射性廃棄物の処分の観点から、今後の原子力利用の様々な形態について調査を実施している。2018 年度までに、継続的な原子力利用を前提とした燃料サイクル形態と廃棄物量を評価したフランス原子力・代替エネルギー庁(CEA)の2012 年報告書に着目してその内容を調査、分析すると共に、多様な燃料サイクル条件が地層処分に及ぼす影響に関する評価結果に基づき、今後の原子力利用における留意事項を分野横断的視点からのシナリオに基づいて抽出、整理した。また、これまでの成果を日本原子力学会2018年春の年会及び2019 年春の年会にて報告した。

2019 年度は、核燃料サイクルの多様性と地層処分システムの成立性に留意し、燃料に始まるサイクル諸条件の変動と組合せの多様性に基づいて、選択肢となる技術条件、条件範囲、及びそれが最終的に処分場の負荷に及ぼす影響範囲の検討を通して、バックエンド対策の最適化に資する技術選択肢の提示を試みることを目的とした検討を行うと共に、2019 年度の本事業の成果の一部を日本原子力学会 2020 年春の年会等において報告した。

◇2019 年度の成果

(1)燃料サイクルシナリオの検討

再処理、プルトニウム(Pu)、使用済燃料、ガラス固化など、我が国の核燃料サイクルが直面している状況、課題を把握、整理し、2018 年度までの自主調査研究「先進的核燃料サイクル技術の地層処分概念への影響検討」の成果を活用して、廃棄物処分の視点から負荷低減に繋がる核燃料サイクルと地層処分に関する技術オプションシナリオを検討した。特に、Pu 利用に関わる技術課題を提示した。

(2)シナリオに基づく技術選択肢の条件提示

上記、(1)の検討に基づいて、廃棄物処分の負荷低減に有効なバックエンド対策の条件、条件間の関係性を可視化して、候補となり得る選択

肢の技術的条件を整理、提示した。

(3)核燃料サイクルの多様化に関する調査

Pu 利用の推進とそれによる廃棄物管理への影響、効果を検討するために、高速炉を利用するサイクルにおける廃棄物特性を核計算により把握、評価した。

(4)日本原子力学会 2020 年春の年会での研究発表 2018年春の年会および 2019 年春の年会に引き 続き、シリーズ発表の一環として、2019 年度に 実施した本事業の成果の一部を、以下の表題に て一般セッション/放射性廃棄物処理及び放射 性廃棄物と環境のセッションにおいて発表した。

「21 世紀後半に向けた廃棄物管理の選択肢: Pu 利用推進と環境負荷低減型地層処分に関す る研究」

- (12)高速炉サイクルから発生するTRU廃棄物の 特性評価
- (13)軽水炉によるPu利用における廃棄物処理 処分の課題
- (14)使用済MOX燃料の発熱特性と地層処分場の 温度特性への影響
- (15)MOX使用済燃料由来ガラス固化体処分にお けるMA分離効果と発熱特性を考慮した標 準ケースの検討
- (16)MOX燃料を利用する原子力システムにおける廃棄物の負荷評価
- (5)国際会議 Waste Management Symposia 2020 での研究発表

国際会議 WM2020 (2020 年 3 月 7-12 日、米国 アリゾナ州フェニックス) において口頭発表お よびポスター発表を行った。

口頭発表: T. Okamura, H. Asano et al.,
Reduction of the Waste Occupied
Area by Nuclide Separation and
Horizontal Emplacement of Waste
Package

ポスター発表: T. Okamura, H. Asano et al.,
Impact of Combination of
Partitioning and Horizontal
Emplacement of Waste Package on
Foot-print of Geological
Repository

10. その他の地層処分に関する調査研究

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

(1)高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)および ハル等廃棄体の核種インベントリ設定方法等 に係る検討

高レベル放射性廃棄物及びTRU廃棄物の地層処分に必要となる放射性核種組成及び含有量の設定に必要なデータのうち、ハル等廃棄体に含まれる不純物元素の定量分析を実施するとともに、得られた分析値を用いた核種移行解析に基づき、地層処分の安全評価において考慮すべき放射性核種を抽出した。

(2)代替粘土系材料を用いた埋め戻し材に関する 研究

国の基盤研究や NUMO の技術開発で整備される 埋め戻し材の基本特性に係る基盤情報を補完・拡 充することを目的として、代替粘土系材料と模擬 掘削土として砕石・砕砂(深成岩類、堆積岩類) や一般購入土などを用いた混合土の締固め試験 と透水試験を実施し、埋め戻し材としての適用性 を確認するためのデータを取得した。



III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

1. 放射性廃棄物海外総合情報調查

◇事業の概要

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

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

◇2019 年度の成果 10

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

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

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

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



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

(2)情報の整理・発信・普及

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

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

報を充実させた (図-2)。

上記のウェブサイトにおいては、諸外国における地層処分計画と技術開発、処分事業に関わる制度・実施体制、処分地選定の進め方と地域振興、処分事業の資金確保、安全確保の取り組み・コミュニケーションの観点から最新情報と解説を掲載した。また、『海外情報ニュースフラッシュ』として、諸外国の高レベル放射性廃棄物処分を中心としたニュース記事を49件掲載した(記事タイトルの一覧は、資料 V-4 を参照)。



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

技術情報冊子の整備として、①『諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について(2020年版)』(図-3:左)と②『諸外国における放射性廃棄物関連の施設・サイトについて(2020年版)』(図-3:右)の2種類の資料を作成した。

技術情報冊子① (2020年2月発行) は、諸外国 における高レベル放射性廃棄物の地層処分の進 接状況に関する情報を体系的に整理・解説することにより、地層処分の理解促進に資することを目的とした資料である。誰でも利用できるように難しい表現をできるだけ避け、諸外国の状況や多様な取り組みがわかるように配慮している。具体的には、地層処分概念や施設設計、処分事業の計画や進捗のみならず、法制度、資金確保、サイト選定の進捗や地域振興などの幅広い観点から、当該国での地層処分事業の特徴について解説している。2020年版では、主要8カ国(フィンランド、スウェーデン、フランス、スイス、ドイツ、英国、カナダ、米国)の各々を各編とした構成として、カナダ、米国)の各々を各編とした構成として、また、中国、韓国、ロシアの地層処分に関する動向を短く解説したページを付録としてまとめ、2019年末時点の最新情報を反映して作成した。

技術情報冊子② (2020 年 3 月発行)の改訂では、欧米 8 カ国(フィンランド、スウェーデン、フランス、スイス、ドイツ、英国、カナダ、米国)における低中レベル放射性廃棄物を中心とした放射性廃棄物の管理概要や処分関連施設・サイトの概要に関する情報を最新化した。また、各国における放射性廃棄物の区分、放射性廃棄物処分の方針、処分の実施体制の項目を新たに設けて解説を加え、記載内容を充実させた。

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



図-3 2019 年度に整備した技術情報冊子

 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成30年度 放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性 廃棄物海外総合情報調査報告書(2019年度分)、2020

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

◇事業の概要

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長半減期低発熱放射性廃棄物(TRU廃棄物)をはじめとする低レベル放射性廃棄物の処理処分等に係る政策立案や研究開発において、国や関係機関、処分実施主体等の役割分担のもとで進めていくことが重要である。また、地層処分事業は100年規模で継続されるものであり、長期にわたる人材の確保・育成が重要となる。

これらの背景を踏まえて、本調査では、高レベル放射性廃棄物の地層処分を中心とした萌芽的・ 先進的な研究開発を実施するとともに、その結果 について処分実施主体が将来処分事業を進めるに 当たり必要な技術基盤として整備することを目的 としている。

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

◇2019 年度の成果 10

(1) 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理・成果のとりまとめ等

平成 30 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 (放射性廃棄物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)で選定した7件の研究開発テーマに対して、進捗管理と成果の取りまとめや所定の研究開発資金の配賦を実施した。大学等の有識者で構成される評価委員会を設置し、2019年度の研究開発内容・進捗状況に関するチェックアンドレビューを中間報告(9月)及び最終報告(2月)の2回実施した。また、研究実施者との間で電子メールや面談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 2019 年度の成果概要を 以下に示す。 ①ジオポリマー技術による人工バリア構築のための基礎的検討(研究者:北海道大学 胡桃澤 清文)

本研究は、放射性廃棄物処分施設の人工バリアの一部として、ジオポリマー硬化体の適用が可能かどうかの基礎的検討を行う。特に強度などの機械的特性、収着性能、溶出特性、及び物質移動特性について定量的に明らかにすることを目的としている。

2019 年度は、ジオポリマー硬化体の機械的特性や物質移行特性に優れた適切な配合を検討した。メタカオリン及びアルカリ刺激剤の配合条件を検討し、流動性、強度、収着特性に優れた硬化体の作製を行った。作製した硬化体について、機械的特性(圧縮強度、引張強度、弾性係数)を測定するとともに、ヨウ素等の収着特性を検討した。また、作製した試験体のキャラクタリゼーションや、硬化体内部の水分の状態分析や塩化セシウム溶液に浸漬させた拡散試験、さらには透水試験も行った。

3種類のメタカオリン及びアルカリ刺激剤を用いてジオポリマー硬化体を作製し、各種物性試験とその微細構造測定を行ったところ、異なるメタカオリンを用いた場合、圧縮強度などの物性が大きく異なる結果となった。これら物性の違いはメタカオリンの反応性に起因することが示唆された。

圧縮強度と弾性係数の関係は比例関係で表す ことができたことから、圧縮強度測定結果から、 弾性係数の推定が可能であることが示唆された。

また、収着試験、拡散試験を実施した結果、ジオポリマーは陰イオンが収着あるいは浸透せず、陽イオンのみ選択的に収着・浸透する性能を有することが示唆された。

透水試験の結果、ジオポリマー試験体の透水係数はおおよそ 10^{-11} (m/s) であり、同程度の強度を有するセメントモルタルと比較して 2 桁高い値だったことから、ジオポリマーは水の浸透に対する抵抗性が低いことが示唆された。

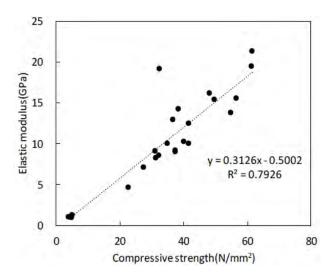


図-1 弾性係数と圧縮強度の関係

②新規析出促進法によるベントナイト緩衝材中の二次鉱物が拡散および透水挙動に与える影響評価(研究者:電力中央研究所 田中真悟)緩衝材の変質は反応が極めて緩慢であるため、現実的な実験期間での緩衝材の長期変質評価が困難であることから、新たな手法により緩衝材に及ぼす二次鉱物の影響を評価する。具体的には、電場により様々な析出形態で二次鉱物を析出させた変質緩衝材を調製し、それを用いた拡散試験及び透水試験から、析出量や析出形態の違いが緩衝材の拡散係数及び透水係数に与える影響を明らかにすることを目的とする。

2019 年度は、事前解析で選定した初期条件において、電場により様々な析出形態で石膏 (CaSO4・2H2O) またはカルサイト (CaCO3) を析出させた変質緩衝材を調製した。二次鉱物が析出した変質緩衝材試料を用いて透過拡散試験を実施し、析出した二次鉱物が核種の拡散に及ぼす影響を調べた。さらに、二次鉱物の析出を予測するための数値解析、及び変質緩衝材中の核種拡散挙動を評価するための数値解析を実施した。

電場によりベントナイト中に鉱物(石膏及びカルサイト)を析出させ、これを用いた透過拡散試験を行った。その結果、再膨潤及び透過拡散試験中に石膏が全て溶解してしまったが、カルサイトは拡散試験後にも十分残留しており、二次鉱物を析出させた条件下で実効拡散係数を取得することができた。これによりカルサイトについて、鉱物析出から拡散係数の取得までの一連の実験手法を確立した。

カルサイト層により拡散係数が局所的に変化した場合を想定し、透過拡散試験から局所的な拡散係数の変化を把握するための手法を解析的に検討した結果、定常状態における試料内部のトレーサーの濃度勾配を調べることで、実効拡散係数の相対的な違いを把握できる可能性があることが分かった。

③結晶質岩形成時に内包された割れ目発生・分布の潜在性の解明(研究者:山形大学 湯口貴史)本研究は、花崗岩体の冷却過程に将来的に割れ目を形成する要因が存在していると考えられることに着目し、岩石学的現象の理解を深め、花崗岩体中の現在の割れ目分布に加えて、将来的な割れ目発生の潜在性(将来的な発現の有無)を評価する手法を構築することを目的とする。

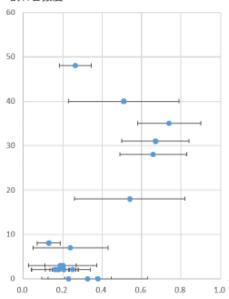
2019 年度は、中部日本の土岐花崗岩体を対象とし、熱水変質現象の岩石記載に基づき、熱水変質パラメータの抽出、熱水変質現象の生成温度・年代の決定を検討し、変質パラメータと岩体の冷却と割れ目データの比較検討を行った。熱水変質パラメータについては、岩石薄片試料の電子顕微鏡組成像の画像解析から、初生的な鉱物と変質領域の面積比を求めることにより変質パラメータを得た。熱水変質現象の生成温度・年代決定に関しては、溶解-沈殿反応で生じるイライト、及び固相反応で生じるカリ長石のカリウム-アルゴン(K-Ar)年代測定を実施した。さらに試料採取領域の温度-時間履歴から温度推定を行った。

熱水変質パラメータの抽出については、斜長石、 及び黒雲母についてそれぞれ顕微鏡組成像の画 像解析を実施し、合計で 18 試料の変質パラメー タを取得した。

熱水変質現象の生成温度・年代決定について検討した結果、黒雲母の緑泥石の生成温度と生成年代はそれぞれ 180-380℃、50-70Ma(百万年)となり、斜長石の固相反応は 62.2±1.4Ma、307-325℃で生じ、溶解-沈殿反応は59.2±1.4Ma、290-305℃で生じることが明らかとなった。この結果は、黒雲母の緑泥石化が生じた温度条件・年代は斜長石の変質の温度条件・年代と整合していることを示唆した。

変質パラメータと岩体の冷却と割れ目データ を比較した結果、割れ目頻度が約40本/5m以下 のケースでは変質パラメータと割れ目頻度につ いて正の相関があった。一方、割れ目頻度が約40本/5mを超えるケースでは、変質パラメータと割れ目頻度の間に相関は無かった。このことから、割れ目頻度が約40本/5mを境に異なるメカニズムが働く可能性が示唆された。





変質パラメータ(黒雲母の緑泥石化)

図-2 変質パラメータとラージスケール割れ目の関係

④飽和度の変化に伴う堆積岩の変形異方性と放射性廃棄物の合理的な埋設方法に関する研究 (研究者:埼玉大学 富樫陽太)

本研究は、掘削による乾燥にともなって不飽和 状態に移行する堆積岩の異方的な力学挙動を詳 細に把握し、異方性を考慮した高レベル放射性 廃棄物の埋設方法へと応用することを目的とす る。そのために、室内試験やスイス・モンテリ岩 盤研究所における現地計測を通して、飽和度に よって変化する堆積岩の変形異方性を詳細に特 定することを試みる。

2019 年度は、堆積岩の変形異方性の程度を把握するため、来待砂岩、幌延泥岩、相模原泥岩の三種類の新第三紀堆積岩試料を用いた三軸試験を実施した。また、飽和度の変化に伴うひずみの進展を検討するために、田下凝灰岩を用いた乾燥収縮実験と湿潤膨張実験を、また、飽和度の変化に伴う力学特性を把握するために、飽和度を変化させた田下凝灰岩供試体の一軸圧縮試験を行った。さらに、スイスのモン・テリ岩盤研究所にお

いて現地調査を行い原位置で不飽和透気・透水現象をモニタリングして、そのパラメータ取得を試みた。

新第三期堆積岩の変形異方性はヤング率の比で 0.83~7.9 倍異なることが分かった。また、異方性の主軸の傾斜方向は概ね層理面に一致することが分かった。

田下凝灰岩の乾燥収縮・湿潤膨張実験の結果、 供試体の三次元のひずみテンソルの応答は、せん 断ひずみを伴い、異方的な応答を示すことがわか った。さらに、乾燥収縮・湿潤膨張時の主ひずみ 方向は、飽和度の変化にともなって変化し、最大 主ひずみ方向は、湿潤状態では層理面に近い方向 であったが、乾燥状態では層理面に直交する方向 となった。飽和度を変化させた田下凝灰岩の一軸 圧縮試験では、飽和度の増加に伴い強度と変形特 性が小さくなることがわかった。

モン・テリ岩盤研究所におけるボーリング孔内の気温・気圧・湿度の計測では、ボーリング孔内の気圧応答が、孔外に比べて遅れていることがわかった。これは、岩盤内の透気現象によるものと考えられるため、非線形熱方程式である透気現象の支配方程式を一次元有限要素法によって解く試みを行った結果、境界条件を適切に設定すれば、現地で測定された遅れ応答を表現できることがわかった。

⑤メタンをエネルギー源とした微生物生態系の 地質環境への影響評価(研究者:東京大学 鈴 木庸平)

本研究は、地下環境を模擬した室内高圧試験により、メタン酸化古細菌による酸化剤の利用選択性や代謝速度、形成される化学環境の評価を行うと共に、酸化剤の代謝反応が放射性核種の移行に与える影響についての知見を得ることを目的とする。

2019 年度は、瑞浪超深地層研究所の地下坑道 内で高圧培養容器に封入した地下水試料を、培養 後に分取し試料の分析を実施した。また、幌延深 地層研究所における高圧培養実験によるメタン 酸化速度の測定についても検討した。さらに、処 分場操業時から埋め戻し直後で想定される環境 を考慮して、常圧付近での培養と、セメントの影 響を受けたアルカリ高カルシウム条件での培養 を行った。 室内の高圧培養実験については、瑞浪超深地層研究所の地下水に、酸化剤として硫酸の他に硝酸、亜硫酸、チオ硫酸、元素状硫黄、三価鉄を用い、メタンガスを封入して高圧培養したところ、元素状硫黄を酸化剤として添加した場合に最も硫化水素が発生したため、メタン酸化の酸化剤としては硫酸ではなく元素状硫黄が重要であることが示唆された。

幌延深地層研究所から採取した地下水を用いたメタン酸化試験では、酸化剤として低結晶性の酸化鉄(フェリハイドライト)を用い、¹³C でラベルしたメタンを高圧培養容器で培養後に、メタン酸化で生成した溶存無機炭素の炭素安定同位体組成を分析した。その結果、フェリハイドライト無添加系でより同位体比が高くなったことから、地下水懸濁物にそもそも含まれていた、地下環境で長期間安定な酸化剤がメタン酸化に用いられている可能性が示唆された。

処分場操業時から埋め戻し直後を想定した常 圧及び高アルカリ条件による培養試験の結果、培 養前後の溶存二価鉄濃度は高圧力条件より常圧 条件で高い濃度で検出された。また高アルカリ条 件では培養前後で二価鉄が検出されたが、これは 鉄の固液分配がアルカリまたは高カルシウム条 件に影響を受けたことが示唆された。

⑥ナチュラルアログ手法による締固めたベントナイトの膨潤特性・自己シール性能の年代変化に関する評価(研究者:早稲田大学 王海龍)本研究は、地質年代が数千万~数億年のベントナイト原鉱石を用いるというナチュラルアナログ研究手法に基づき、締固めたベントナイトの膠結作用による膨潤特性・自己シール性の年代変化を定量的に評価し、放射性廃棄物処分場におけるベントナイト系緩衝材の仕様設計に反映させる手法を提案することを目的とする。

2019 年度は、月布産、中国産、アメリカ産のベントナイト原鉱石試料を粉砕し粒径を調整した粉末試料を作製し、それぞれを締固めて作製した再構成供試体に対して膨潤圧試験、一次元膨潤変形試験を実施した。また、膨潤性能へのセメンテーション物質による抑制影響を調べるために、XRD・膨潤圧連携試験を行った。さらに原鉱石のモンモリロナイト以外の随伴鉱物組成を分析した。

膨潤圧試験の結果、乾燥密度が高くなるにつれて、粒径の大きい(0.850~2 mm)再構成供試体の膨潤圧より粒径の小さい(~0.425mm)供試体の膨潤圧がより高くなる傾向を示した。このことから、乾燥密度が高くなるにつれて、間隙が小さくなり、粒子の有する固結の影響が大きくなることが示唆された。

月布産試料に対してXRD・膨潤圧連携試験を実施した結果、不攪乱供試体の膨潤圧は再構成供試体に比べて低く留った。しかし、同一の含水比の試料について、モンモリロナイト底面間隔のXRDのピークを抽出して比較したところ、モンモリロナイトの結晶層間に存在する水分子の量が再構成試料より不攪乱供試体の方が少ないことを示す結果が得られた。このことから、セメンテーションの影響によりモンモリロナイト層間への水の浸入とそれに伴う膨潤が阻害されうることが実験的に示された。

随伴鉱物組成については、随伴鉱物の洗い出しと XRD 分析による定性評価、及び内部標準法による随伴鉱物の定量評価を実施し、随伴鉱物として石英、カルサイト、斜長石、クリストバライト、ドロマイトが含まれていることが確認できた。また、これらの中でも石英、斜長石の含有割合が高いことが分かった。

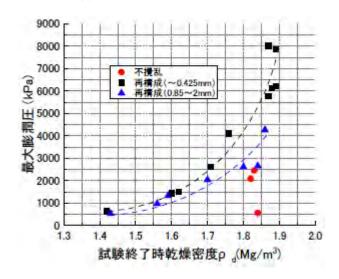


図-3 再構成供試体と不攪乱供試体の試験終了時の供試 体乾燥密度と最大膨潤圧の関係

⑦断層周辺の地下水流動特性および物質移行特性に関する包括的研究(研究者:日本原子力研究開発機構 渡辺勇輔)

本研究は、地下水流動や物質移行を遅延・抑制する構造(バリア)としての断層の機能を把握し、断層周辺の物資移行特性を正確に評価する手法を構築することを目的とする。そのため、断層によって形成されるコンパートメント構造などの地質構造を考慮した地下水流動解析・物質移行解析や、断層活動によって変質した岩石への元素収着試験を実施する。

2019 年度は、平行する 2 枚の断層系で形成されるコンパートメント領域を有する仮想水理地質モデルを用いて、地下水流動解析を行うことにより、断層の有無及びキャップロックが地下水流動に及ぼす影響を検討した。また、地下水流動解析で得られた地下水流動場に基づき、コンパートメント構造内部に埋設廃棄された廃棄体に含まれる放射性核種が移行することを想定した反応輸送解析を実施した。さらに、瑞浪超深地層研究所で採取された断層周辺岩石の鉱物組成分析を行い、また収着試験を実施して元素収着特性を調べた。

地下水流動解析の結果、断層とキャップロック の両方を含む系で解析した場合、ダメージゾーン を有する断層から構成されるコンパートメント 領域でも、地下水流動や物質移行が抑制される可 能性が示された。

断層周辺で粘土鉱物を含有させた系でのセシウム(Cs)の反応輸送解析を実施した結果、低透水性のキャップロックが存在する場合では、粘土鉱物の分布範囲や種類に関わらず、核種の移行がほとんどみられなかった。この理由として、キャップロックにより地下水流動が抑制され、加えて粘土鉱物による収着で移行が抑制されたものと考えられる。

ボーリング試料を X 線回折にて分析を行ったところ、断層部に近い試料では粘土含有率が高くなる傾向が見られた。粉砕した岩石試料を用いてセシウム (Cs)、ユウロピウム (Eu) の収着試験を実施した結果、粘土鉱物が比較的多く存在している断層部などの試料で Cs、Eu がともに粘土鉱物によって収着され、鉱物表面でそれぞれ内圏型表面錯体、外圏型表面錯体を形成していることが示唆された。

2)人材育成プログラムの実施・作成 地層処分の着実な遂行に向けては、研究開発分 野並びに地層処分の実施主体とともに幅広い専門的な知識を有する人材 (ジェネラリスト) が必要不可欠である。ジェネラリストを育成するプログラムの調査・作成を目的とし、その一環として、2019 年度は、地質環境分野、工学技術分野、性能評価分野に係る座学や、地下水流動に関する演習、技術コミュニケーションに係る招待講演、グループディスカッション等の構成による、約60名が参加する3日間の人材育成セミナーを開催した。セミナーの開催にあたっては、事前に地層処分分野の専門家によって構成される研究会を設置し、セミナープログラムの構成を検討した。

また、セミナー参加者からのアンケートの取り まとめ・分析や、有識者によるセミナーに対する 意見聴取等を通じて、次年度以降の人材育成プロ グラムの改善に向けた検討を行った。



図-4 セミナーの様子

1) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成31年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性 廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支 援等に関する業務 報告書(2019年度分)、2020

3. カナダにおける低・中レベル放射性廃棄 物埋設に係るセーフティケースの調査

◇事業の概要

本調査では、我が国の放射性廃棄物埋設に係る 規制基準等の整備に資する諸外国の動向を把握す ることを目的とし、カナダの規制機関による放射 性廃棄物処分施設のセーフティケースに関する要 求事項、低・中レベル放射性廃棄物の地層処分事 業者が公表しているセーフティケースの内容、規 制機関によるセーフティケースのレビュー等につ いて調査・整理を行った。

なお、本事業は、原子力規制委員会原子力規制 庁の委託事業「令和元年度原子力発電施設等安全 技術対策委託費(カナダにおける低・中レベル放 射性廃棄物埋設に係るセーフティケースの調査) 事業」により実施したものである。

◇2019 年度の成果

(1)調査の概要

カナダのオンタリオ・パワージェネレーション 社 (OPG 社) は、同社のブルース原子力発電所敷 地内の地下約 680m の石灰岩層に建設する地層処 分場 (DGR) において、自社が所有する 3 カ所の 原子力発電所から発生した低・中レベル放射性廃 棄物約 20 万 m³ を処分する計画であったが、2020 年 1 月に先住民の投票結果を受け中止している。

本調査では、この地層処分場(DGR)のセーフティケース関連文書について、OPG 社が 2011 年に許認可取得を目的として提出した予備的安全報告書(PSR)を中心として、OPG 社によるセーフティケースの内容と提示方法などを中心に取りまとめた。

OPG 社が提出した PSR 及び「環境影響評価書」(EIS) に対し、カナダ原子力安全委員会 (CNSC) とカナダ環境評価局 (CEAA) は合同評価パネル (JRP) を設置してレビューした。本調査では、このうちセーフティケースのレビュー報告書の概要を取りまとめ、OPG 社のセーフティケースの記載事項とレビューとの対応関係を整理した。

さらに、本調査では PSR のレビューの根拠となった規制文書について、PSR のレビュー後の改定中の文書を含めて調査し、それらの内容を取りま

とめた。

本調査の主な対象文献を表-1に示す。

表-1 主な調査対象文献

種類	文献名等
OPG 社のサ	OPG 社の低・中レベル放射性廃棄物用地層処分場プ
イト準備・建	ロジェクト、予備的安全報告書 (PSR)、2011 年
設の許認可	OPG 社の低・中レベル放射性廃棄物用地層処分場
申請書	プロジェクト、環境影響評価書 (EIS)、2011 年
合同評価パ ネル評価報 告書	「OPG-DGR プロジェクトの長期セーフティケース」、PMD 13-P1.3A、2013年
	規制方針 P-290「放射性廃棄物の管理」、2004 年
	規制指針 G-320「放射性廃棄物管理の長期安全性
	の評価」、2006 年
CNSC による	REGDOC-2.11.1 廃棄物管理 第Ⅲ巻「放射性廃棄
規制文書	物管理の長期安全性の評価」、2018 年
	REGDOC-2.11.1 廃棄物管理 第Ⅲ巻、第2版ドラ
	フト版「放射性廃棄物の長期管理のためのセーフ
	ティケース」、2019年

(2)主な調査結果

1) OPG 社のセーフティケース関連文書の整理

OPG 社は 2011 年 3 月に、カナダ環境アセスメント法に基づく EIS、並びに、原子力安全管理法に基づく、DGR のサイト準備と建設に係る許認可取得のための PSR を提出した。

OPG 社は、PSR の目的を「セーフティケース構築に必要となる情報を記述」することとしており、PSR のスコープには「セーフティケースの作成に必要な情報の説明、さらに DGR が安全に建設、操業、廃止され、DGR により OPG 社の低・中レベル放射性廃棄物が安全に長期管理されることを明瞭に示すセーフティケースの提示が含まれる」としている。また、DGR の全体的な安全目標を「環境または人々の健康及び安全に非合理なリスクを呈することなく、低レベル及び中レベル放射性廃棄物の安全な長期管理を提供することである」とし、これは下記の 4 項目が立証されることで満たされるとしている。

- ①DGR により長期の隔離と閉じ込めが実現している
- ②閉鎖前及び閉鎖後の安全基準が満たされている
- ③DGR システムが頑健(ロバスト)である
- ④DGR の安全な建設、操業、廃止措置が可能である

OPG 社は、DGR の安全性に関する論拠と証拠を詳細に示した上で、その要約を表-2として示している。OPG 社は、これらの論拠により上記の①~ ④の安全目標が達成されている、としている。

表-2 DGR の安全論拠の要約(OPG 社、PSR より引用)

		土間だり支持(ので圧(このの)がが
安全目標への合致条件		論拠の概要
1. DGRは長期の	1-1	DGRは地下深くに設置される
隔離と閉じ込	1-2	DGRは天然バリアによって取り囲まれている
めを提供する	1-3	DGRは安定した拡散支配の深部地下水システムに配
		置される
	1-4	DGRは地震の少ない地域に位置している
	1-5	DGRの開口部は岩盤力学的に安定である
	1-6	天然資源のポテンシャルが低く、人間侵入の確率も
		低い
	1-7	処分場深度での汚染物質の移動度は、化学・水理条
		件によって制限される
	1-8	地下水による処分場の再冠水は極めて緩慢となる。
	1-9	立坑の設計は長期の隔離とDGRの健全性をもたらす
	1-10	廃棄物の放射能は放射性崩壊により時間と共に減少
		する
	1-11	耐食性のある中レベル放射性廃棄物の劣化は極めて
		緩慢である
2. DGRの閉鎖前	2-1	処分場閉鎖前の期間(操業期間)における人間及び
及び閉鎖後の		生物相への影響は、許容基準を下回る
安全基準を満	2-2	通常変遷シナリオでは、人間及び生物相への将来影
たしている		響(閉鎖後)は有意ではない
3. DGRシステム		地質は頑健である
は頑健である	3-2	閉鎖後の破壊的シナリオでさえも、その影響リスク
		は小さい
	3-3	自然の特性によって、汚染物質の放出が遅延される
	3-4	ガスによって生じる圧力は、自然の定常状態の地下
		水圧と均衡するようになる
	3-5	安全評価に大きな裕度がある
	4-1	母岩の強度と岩盤力学的特性は、地下施設の建設及
建設し、操業		び操業に好ましい
し、廃止措置	4-2	DGRを安全に建設し、操業し、廃止措置できるよう
することは可		に、工学的な良好事例や既知の技術を取り入れて設
能である		計されている
	4-3	DGRに類似した施設での力強い操業経験記録がある
	4-4	(廃棄物の) 定置活動を安全に実施する上で、十分
		に確立された操業プログラムと統括体制がある

2) 規制機関によるセーフティケースに対するレビューの整理

OPG 社が提出した予備的安全報告書 (PSR) に対するレビュー報告書の一つである「OPG-DGR プロジェクトの長期セーフティケース」(2013 年 7月)では、長期安全性を保証する上での主要な論点として「安全評価を行う時間枠の選定」と「セーフティケースの開発」を特定している。

安全評価を行う時間枠については、予想される 影響のピークを包含すべきとした上で、DGR のセ ーフティケースの 100 万年というレファレンス 時間枠は、DGR の立地が検討されている地層の約 2億5000万年の安定した地質史に比べれば短く、 安全評価の結果には高い信頼性があるとしている。

セーフティケースについては、その目的を処分 場開発の次の段階へと進む決定を裏付ける安全 論拠を示すものであるとしている。また、DGR プロジェクトの安全論拠を下記の 3 クラスに分類 してレビューを行い、その結論として、DGR プロジェクトは、その閉鎖後において、人間や環境を 適切に防護するであろう十分な証拠を提示していることを確認したとしている。

- ①安全評価に係わるもの
- ②プロジェクト立地に検討されている地圏の特性と関連するもの
- ③処分場と関連するもの

3)長期安全評価及びセーフティケースに関する 規制文書の整理

DGR プロジェクトの PSR 提出時における、高レ ベル (使用済燃料) から低レベルに至る放射性廃 棄物の処分場の長期安全性に関する CNSC による 主要な規制文書は、規制方針 P-290「放射性廃棄 物の管理」(2004年)及び規制指針 G-320「放射 性廃棄物管理の長期安全性の評価」(2006年)で あった。これら2編の規制文書は、CNSCの規制 文書の REGDOC シリーズへの体系化に伴い、2018 年5月にREGDOC-2.11.1 廃棄物管理 第Ⅲ巻「放 射性廃棄物管理の長期安全性の評価しへと、内容 を保ったまま統合された。この REGDOC について は、2019年5月に第2版として、「放射性廃棄物 の長期管理のためのセーフティケース」のドラフ ト版が公開された。第2版ドラフトでは、主な規 制対象を長期安全性の評価から、これを包含する セーフティケース全体へと広げ、セーフティケー スの要件を詳細に規定している。また、構成とセ ーフティケースの定義についても表-3 のように 変化している。このことは、将来の使用済燃料の 地層処分に関する許認可申請におけるレビュー の方向性を示唆しているものと考えられる。

表-3 REGDOC-2.11.1 廃棄物管理 第III巻の現行版及び第 2 版ドラフト版の比較

笠り 貼じココト貼

	現行版	第 2 版ドフノト版
	1. 目的	1. はじめに
	2. 適用範囲	2. CNSC の廃棄物管理枠組み
	3. 関連する法令	3. セーフティケース、安全
構	4. 背景情報	評価、安全解析の定義
成	5. 長期セーフティケースの開発	4. セーフティケースの役割
自	6. 許容基準の定義	と作成
次	7. 長期評価の実施	5. セーフティケースの一般
$\overline{}$	8. 結果の解釈	要件
		6. セーフティケースの構成
		要素
		7. 長期的安全解析
+	セーフティケース:施設の安全性	セーフティケースとは、施設
セー	を立証する論拠と証拠を統合し	の安全性と、適用される全規
フテ	たもの。これには、安全評価を含	制要件の遵守を立証するた
1	めることが通例であるが、典型的	<u>めの、</u> 論拠と証拠の統合的集
ケー	には、安全評価の頑健性及び信頼	合と定義される。セーフティ
ース	性、ならびに安全評価で行われた	ケースには、通常、追加の一
の	仮定に関する情報(証拠と理由付	
定義	けを裏付けることを含む) も含め	
7.4	ることができる。	安全評価が含まれる。

加力

4. 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查

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 (2019 年 度版)」を作成した。

(2)不確実性を考慮した将来費用の推定手法に関する研究

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

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。

併せて、欧州原子力共同体(EURATOM)、欧州委員会(EC)等の国際機関の事業に積極的に協力している。

(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。

これらのうち、2019 年度には、SKB/SKB インターナショナル社、NAGRA との情報交換等を実施した。

表-1 協力協定/情報交換覚書を締結している海外機関

玉	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	中国核工業集団公司地質・中国ウラン工業 株式会社 (CNNC/CNUC)



SKB/SKB インターナショナル社(スウェーデン)との 情報交換

(2)モニタリングに関する国際共同研究

EC の HORIZON2020 の枠組みにおいて EURATOM が実施する IGD-TP (Implementing Geological Disposal of radioactive waste Technology Platform) のプロジェクトである Modern2020 (Development and Demonstration of monitoring strategies and technologies for geological disposal) プロジェクトに参画している。本プロジェクトでは、2020 年代に処分場の建設・操業の開始が見込まれる欧州各国での、操業期間中の処分場でのモニタリング計画の検討に焦点が当てられ、2015 年より検討を実施している。

2019 年度には、当センターは、地中無線モニタリング技術に関する情報提供を行うとともに、欧州でのモニタリングに関する検討状況について情報収集等を行った。また、2019年4月に開催された公開の最終ワークショップにおいて、「地層処分施設閉鎖技術確証試験」にて開発した地中無線中継技術に関する報告を行った。

本共同研究は 2019 年 5 月に終了し、最終報告書が作成されている。なお、本共同研究の成果は、プロジェクトのウェブサイト (http://www.modern2020.eu/) にて公開されている。

(3) 炭素 14 のソースタームに関する国際共同研究 EC の HORIZON2020 の 枠 組 み に お い て EURATOM が実施する IGD-TP の枠組みにおいて 実施された「炭素のソースタームに関する共

同研究 CAST (Carbon-14 Source Term)」プロジェクトに参画し、炭素 14 のインベントリ設定手法や浸漬試験等の成果を提供するとともに、欧州での研究状況の情報収集等を行ってきた。本プロジェクトは 2018 年 1 月に開催された Final Work Shop において、終了したが、その後の残された課題の解決に向けたフォローアップのための会議が開催されている。

2019 年度は、2019 年 7 月に開催された WP2 (炭素鋼) 及び WP3 (ジルカロイ) のフォローアップ会議に参加し欧州での研究状況の情報収集等を行った。

CAST プロジェクトのこれまでの成果は CAST のウェブサイト (http://www.projectcast.eu/) において公開されている。

(4) TRU ワークショップ

TRU 廃棄物の処分に関する課題を共有し、その解決に向けた取り組み状況に関しての情報交換を行う会議体として数年に1度の頻度で開催されるTRU ワークショップに継続的に参加している。

2019 年度は、2020 年 2 月に開催された第 8 回 ワークショップに参加し、我が国の TRU 廃棄物の 地層処分を巡る状況及び当センターで実施中の 研究開発の内容について報告するとともに、欧州 での取り組みの内容についての情報収集を行った。

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
	第1回講演会「英国及びカナダにおける放射性廃棄物処分事業の 進捗と地域対話」 山田 文香、布目 礼子(技術情報調査プロジェクト)	2019年 4月23日	日本交通協会
講演会	第2回講演会「原子力施設の廃止措置と廃棄物管理の課題」 柳原 敏 氏(国立大学法人福井大学 附属国際原子力工学研 究所 特命教授)	2019年 8月 9日	原環センター
	第3回講演会「TRU 廃棄物の地層処分におけるガス移行挙動に 関する研究開発」 (1)これまでの取り組みの流れ 大和田 仁(地層処分バリアシステム研究開発部) (2)ガス移行解析による処分場のガス影響評価」 藤井 直樹(地層処分バリアシステム研究開発部)	2020年 1月24日	原環センター
	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」 – – – – – – – – – – – – – – – – – – –	2019年 6月 4日	京都大学 東京オフィス
セミナー	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」 – – – – – – – – – – – – – – – – – – –	2019年 7月25日	京都大学 東京オフィス
	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」 大江 俊昭 氏(東海大学名誉教授)	2019年10月11日	京都大学 東京オフィス
研究発表会	2019 年度原環センター研究発表会 1.研究発表 「可逆性・回収可能性の維持に伴う技術的対応と性能評価に向けた工学技術の役割」	2019年12月 6日	星陵会館ホール

2. 論文、学会発表等

(1)論文

No.	題目	原環センター著者	発 表 先
1	サクション制御試験に基づくベントナ イト系人工バリア材の不飽和力学特性 と保水特性	大和田仁	土木学会論文集 C (地圏工 学),Vol.75,No.3,p257-272, (2019)
2	吹付けコンクリートの溶解特性に関す る検討	広中良和	コンクリート工学年次論文 集 Vol.41, No.1, p545-550,2019.7
3	Autoclave corrosion experiment of Zircaloy ⁴ at temperatures between 180℃ and 270℃	桜木智史、吉田誠司	Proceedings of the 45th Waste Management 2019 Conference (WM2019), March 3-7, 2019, Phoenix, Arizona, USA
4	Effect of temperature on electrochemical properties of Zircaloy-4 by AC impedance spectroscopy	桜木智史、吉田誠司	Proceedings of the 45th Waste Management 2019 Conference (WM2019), March 3-7, 2019, Phoenix, Arizona, USA
5	Seismic response analysis of the underground cavern type disposal facility	藤原啓司、広中良和	The proceedings of 2019 ROCK DYNAMICS SUMMIT IN OKINAWA, p366-371, 2019.5
6	Cross-sectoral study on nuclear energy system for less-impacted radioactive waste management; Effect of various spent nuclear fuel properties and reprocessing conditions on geological disposal	朝野英一	Proceedings of an International Conference on the Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Learning from the Past, Enabling the Future Vienna, Austria, 24-28 June 2019
7	Reduction of geological disposal area by introducing partitioning technologies under conditions of high burnup operation and high content vitrified waste	朝野英一	Proceedings of an International Conference on the Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Learning from the Past, Enabling the Future Vienna, Austria, 24-28 June 2019

No.	題目	原環センター著者	発 表 先
8	Environmental load reduction of geological repository by minor actinide separation: Utilization of MOX fuel in future fuel cycle system	朝野英一	Proceedings of an International Conference on the Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Learning from the Past, Enabling the Future Vienna, Austria, 24-28 June 2019
9	Existing crack monitoring by distributed optical fiber sensors	藤原啓司、脇寿一、 広中良和	The proceedings of 5th Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, 2019.8
10	Experimental approach for understanding the dynamic behaviors of bentonite buffer piping erosion	石井智子、川久保政洋	The proceedings of ICONE27
11	Instant release fractions for ¹⁴ C, ⁶⁰ Co, and ¹²⁵ Sb from irradiated Zircaloy oxide film	桜木智史	MRS Advances 5(1-2), 9-17 (2020)

(2)学会発表等

No.	題目	原環センター発表者	発表先
1	Development of a wireless relay system for monitoring of geological disposal using low-frequency electromagnetic waves	江藤次郎、川久保政洋	Modern2020 2019/4/9~11
2	Seismic response analysis of the underground cavern type disposal facility	藤原啓司、広中良和	2019 ROCK DYNAMICS SUMMIT IN OKINAWA 2019/5/7 \sim 11
3	セメント硬化体における熱履歴に伴う トバモライト生成条件に係る検討	林大介、井田雅也	第 73 回セメント技術大会 2019/5/8~10
4	Experimental approach for understanding the dynamic behaviors of bentonite buffer piping erosion	石井智子、川久保政洋	ICONE 27 2019/5/19~24
5	重金属ホウ酸塩ガラスの構造モデル化 における BVS 拘束の効果	桜木智史	日本セラミック協会 資源・環境関連材料部会 2019 年度第 1 回資源・環境 関連材料部会討論会 2019/6/20
6	Cross-sectoral study on nuclear energy system for less-impacted radioactive waste management; Effect of various spent nuclear fuel properties and reprocessing conditions on geological disposal	朝野英一	International Conference on the Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Learning from the Past, Enabling the Future 2019/6/24~28
7	Reduction of geological disposal area by introducing partitioning technologies under conditions of high burnup operation and high content vitrified waste	朝野英一	International Conference on the Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Learning from the Past, Enabling the Future 2019/6/24~28
8	Environmental load reduction of geological repository by minor actinide separation: Utilization of MOX fuel in future fuel cycle system	朝野英一	International Conference on the Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Learning from the Past, Enabling the Future 2019/6/24~28
9	Direct observation of zeolite nucleation from compacted bentonite under hyperalkaline condition	林大介、井田雅也	日本地球惑星科学連合 2019 年大会 2019/6/26~30
10	吹付けコンクリートの溶解特性に関す る検討	広中良和	コンクリート工学年次大会 2019 2019/7/10~12

No.	題目	原環センター発表者	発表先
11	隙間充填過程を経たベントナイト緩衝 材の変状シミュレーション	石井智子、今井政孝	地盤工学会 第 54 回地盤工学研究発表会 2019/7/16~18
12	高レベル放射性廃棄物の地層処分 日本および諸外国の取り組みについて	布目礼子	日本原子力文化財団 地層処分事業の理解に向け た選択型学習支援事業 2019/7/26
13	球-円板混合系の平衝構造に関する Monte Carlo 解析 -自己配向とクラスタ形成-	林大介	日本混相流学会 混相流シンポジウム 2019 2019/8/5~7
14	放射性ヨウ素の固定化技術の現状と固 化マトリクスの特性評価	桜木智史、植田浩義、 大和田仁	日本原子力学会バックエン ド部会 第 35 回バックエンド夏期セ ミナー 2019/8/28~30
15	ベントナイトペレットによる PEM 隙間 充填技術の実規模実証試験	小林正人、西村政展	土木学会 2019 年度全国大会 第 74 回年次学術講演会 2019/9/3~5
16	幌延地下 URL におけるベントナイト混合土の原位置機械吹付け施工試験	白瀬光泰、小林正人	土木学会 2019 年度全国大会 第 74 回年次学術講演会 2019/9/3~5
17	ベントナイト系材料を対象とした機械 的除去技術(オーガ方式)の整備	白瀬光泰、小林正人	土木学会 2019 年度全国大会 第 74 回年次学術講演会 2019/9/3~5
18	ベントナイト系材料を対象とした流体 的除去技術(ウォータージェット方式) の整備	小林正人、白瀬光泰	土木学会 2019 年度全国大会 第 74 回年次学術講演会 2019/9/3~5
19	中深度処分における機能確認方法に係る検討の概要 -地下空洞型処分施設機能確認試験(その14)-	広中良和、藤原啓司、 脇寿一、寺田賢二	土木学会 2019 年度全国大会 第 74 回年次学術講演会 2019/9/3~5
20	地下空洞型処分施設におけるモニタリング項目の計測実現性確認(3) -地下空洞型処分施設機能確認試験(その15)-	広中良和、藤原啓司、 脇寿一、寺田賢二	土木学会 2019 年度全国大会 第 74 回年次学術講演会 2019/9/3~5
21	地下空洞型処分施設におけるモニタリング項目の計測実現性確認(4) -地下空洞型処分施設機能確認試験(その16)-	広中良和、藤原啓司、 脇寿一、寺田賢二	土木学会 2019 年度全国大会 第 74 回年次学術講演会 2019/9/3~5

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
22	コア分析に基づく中深度処分施設の吹付けコンクリートの変質に関する検討 一地下空洞型処分施設機能確認試験(その17) -	広中良和、藤原啓司、 脇寿一、寺田賢二	土木学会 2019 年度全国大会 第 74 回年次学術講演会 2019/9/3~5
23	実規模施設での光ファイバセンサーの 適用性検討(長期連続計測) -地下空洞型処分施設機能確認試験(そ の18) -	広中良和、藤原啓司、 脇寿一、寺田賢二	土木学会 2019 年度全国大会 第 74 回年次学術講演会 2019/9/3~5
24	既存計測技術を活用した中深度処分施設における機能確認方法の検討 一地下空洞型処分施設機能確認試験(その19) -	広中良和、藤原啓司、 脇寿一、寺田賢二	土木学会 2019 年度全国大会 第 74 回年次学術講演会 2019/9/3~5
25	光ファイバセンサー技術を活用した中深度処分施設における機能確認方法の検討 -地下空洞型処分施設機能確認試験(その20)-	広中良和、藤原啓司、 脇寿一、寺田賢二	土木学会 2019 年度全国大会 第 74 回年次学術講演会 2019/9/3~5
26	地層処分における照射済みエンドピー スからの核種放出挙動評価-(1)安全評 価における課題と試験計画の概要-	桜木智史、植田浩義	日本原子力学会 2019 年秋の大会 2019/9/11~13
27	地層処分における照射済みエンドピースからの核種放出挙動評価 - (2)照射済みエンドピースの核種インベントリ評価-	桜木智史、植田浩義	日本原子力学会 2019 年秋の大会 2019/9/11~13
28	沿岸部における地層処分のための工学 技術に関する検討 (1)全体概要:課題設定と研究アプロ ーチ	江守稔、川久保政洋、 小林正人、石井智子、 林大介	日本原子力学会 2019 年秋の大会 2019/9/11~13
29	沿岸部における地層処分のための工学 技術に関する検討 (2)炭素鋼溶接部の腐食挙動に及ぼす 溶液組成の影響	小林正人、川久保政洋	日本原子力学会 2019 年秋の大会 2019/9/11~13
30	沿岸部における地層処分のための工学 技術に関する検討 (3)塩水環境下での再冠水期間におけ る緩衝材の挙動	石井智子	日本原子力学会 2019 年秋の大会 2019/9/11~13
31	沿岸部における地層処分のための工学 技術に関する検討 (4)塩水環境下での緩衝材の力学挙動	石井智子	日本原子力学会 2019 年秋の大会 2019/9/11~13
32	沿岸部における地層処分のための工学 技術に関する検討 (5)セメント系材料の塩水による化学 変質挙動および力学特性の変化	林大介、大和田仁	日本原子力学会 2019 年秋の大会 2019/9/11~13

No.	題目	原環センター発表者	発表先
33	沿岸部における地層処分のための工学 技術に関する検討 (6)セメント系材料の化学的変質を伴 う塩水浸透および鋼材腐食の予測手法 の検討	林大介、大和田仁	日本原子力学会 2019 年秋の大会 2019/9/11~13
34	沿岸部における地層処分のための工学 技術に関する検討 (7)建設・操作段階におけるニアフィ ールドの水理モデル化	江守稔、石井智子	日本原子力学会 2019 年秋の大会 2019/9/11~13
35	沿岸部における地層処分のための工学 技術に関する検討 (8)処分システムの成立性の提示に係 る手法の体系化に向けた試行	江守稔、石井智子、 林大介、市川恭子	日本原子力学会 2019 年秋の大会 2019/9/11~13
36	各種セメントペーストを用いた水の放 射線分解による水素ガス生成の検討	林大介、大和田仁	日本原子力学会 2019 年秋の大会 2019/9/11~13
37	原環センターにおける深地層の研究施 設を活用した研究開発について	小林正人	日本原子力学会 2019 秋の大会 2019/9/11~13
38	坑道開放中の不飽和領域の発生に関す る解析的検討	石井智子、髙本尚彦、 今井政孝	日本地下水学会 2019 年秋季講演会 2019/10/10~11
39	The Philippines International Analogue Project: An Overview of the Project	藤井直樹、山川稔、 西村政展	The 16th NAWG Workshop (NAWG-16) 2019/10/14~18
40	Bentonite-alkaline fluid interaction at bentonite deposit in Philippines: pore clogging by secondary precipitates formed from the interaction	藤井直樹、山川稔	The 16th NAWG Workshop (NAWG-16) 2019/10/14~18
41	Mineralogical evolution of Fe-Mg-Si phases under low-temperature, alkaline condition at Narra in Palawan, Philippines	藤井直樹、山川稔	The 16th NAWG Workshop (NAWG-16) 2019/10/14~18
42	Investigation on the instant release fraction for ¹⁴ C, ⁶⁰ Co, and ¹²⁵ Sb from irradiated Zircaloy oxide film	桜木智史	The 43rd Symposium on Scientific Basis for Nuclear Waste Management 2019/10/21~24
43	Effect of BVS constraints on structural modeling of heavy metal borate glasses	桜木智史	The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies 2019/10/27~11/1

No.	題目	原環センター発表者	発表先
44	Consideration of production process about waste package in terms of productivity and quality assurance for long-term integrity	小林正人,川久保政洋	The 7th International Workshop on Long-Term Prediction of Corrosion Damage in Nuclear Waste Systems 2019/11/18~21
45	鉛ホウ酸塩系ガラスの逆モンテカルロ 法構造モデル化における Bond Valence Sum 拘束の有効性	桜木智史、大和田仁	日本セラミックス協会 ガラス部会 第 60 回ガラスおよびフォト ニクス材料討論会 2019/12/4~5
46	高レベル放射性廃棄物の地層処分施設 における回収可能性維持による処分坑 道の力学的影響評価	石井智子、髙本尚彦、 今井政孝	土木学会 第 47 回岩盤力学に関するシ ンポジウム 2020/1/9~11
47	A Study on Monitoring Program in Intermediate Depth Disposal of Low-Level Radioactive Waste	藤原啓司、脇寿一、 広中良和、寺田賢二	Waste Management Symposia 2020 2020/3/8~12
48	Reduction of the Waste Occupied Area by Nuclide Separation and Horizontal Emplacement of the Waste Packages	朝野英一	Waste Management Symposia 2020 2020/3/8~12
49	Impact of Combination of Partitioning and Horizontal Emplacement of Waste Package on Foot-print of Geological Repository	朝野英一	Waste Management Symposia 2020 2020/3/8~12
50	21 世紀後半に向けた廃棄物管理の選択 肢: Pu 利用推進と環境負荷低減型地層 処分に関する研究 (12) 高速炉サイクル から発生する TRU 廃棄物の特性評価	桜木智史、朝野英一	日本原子力学会 2020 年春の年会 2020/3/16~18
51	21 世紀後半に向けた廃棄物管理の選択 肢: Pu 利用推進と環境負荷低減型地層 処分に関する研究 (13) 軽水炉による Pu 利用における廃 棄物処理処分の課題	桜木智史、朝野英一	日本原子力学会 2020 年春の年会 2020/3/16~18
52	21世紀後半に向けた廃棄物管理の選択 肢:Pu利用推進と環境負荷低減型地層 処分に関する研究 (14)使用済 MOX 燃料の発熱特性と地 層処分場の温度特性への影響	朝野英一	日本原子力学会 2020 年春の年会 2020/3/16~18
53	21 世紀後半に向けた廃棄物管理の選択 肢: Pu 利用推進と環境負荷低減型地層 処分に関する研究 (15)MOX 使用済燃料由来ガラス固化 体処分における MA 分離効果と発熱特性 を考慮した標準ケースの検討	朝野英一	日本原子力学会 2020 年春の年会 2020/3/16~18

No.	題目	原環センター発表者	発表先
54	21 世紀後半に向けた廃棄物管理の選択 肢: Pu 利用推進と環境負荷低減型地層 処分に関する研究 (16) MOX 燃料を利用する原子力シス テムにおける廃棄物の負荷評価	朝野英一、桜木智史	日本原子力学会 2020 年春の年会 2020/3/16~18

(3)解説・講演等

No.	題目	著者	発 表 先
1	フィンランド、スウェーデンの地層処分 事情「サイト選定し建設進展へ」	吉田崇宏、佐原聡	エネルギーレビュー Vol.462 2019年7月号
2	フランスの地層処分事情「柔軟性ある処 分方針で実施」	江藤次郎	エネルギーレビュー Vol.462 2019年7月号
3	スイスの地層処分事情「サイト選定プロセスへの早期関与」	山本啓太	エネルギーレビュー Vol.462 2019 年 7 月号
4	地層処分-分野横断的な原子力システム 研究における再処理の役目-	朝野英一	日本原子力学会再処理・リサイクル部会主催 第3回再処理・リサイクル部会・夏期セミナー 2019年8月
5	廃炉国際ワークショップ (FDR2019) を 開催して	植田浩義	日本機械学会誌 2019 年 10 月号(No.1211)
6	放射性廃棄物の地層処分における地中無 線モニタリング技術の研究	江藤次郎	島岡研究室主催 勉強会 2019 年 12 月
7	地層処分事業等の国際的な動向	稲垣裕亮	原子力年鑑 2020 P180-186
8	使用済燃料対策の IAEA 国際会議(教訓を活かす) - 傾向分析と最優秀若手研究者賞受賞-	朝野英一	日本原子力学会誌 ATOMOΣ Vol.62 2020 年 2 月号 P94-P98

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№130	ベントナイト資源及び工業の現状と将来	2019年6月
2	原環センタートピックス№131	英国における放射性廃棄物処分事業の進 捗と地域対話	2019年9月
3	原環センタートピックス№132	原子力施設の廃止措置と廃棄物管理の課 題	2019年12月
4	原環センタートピックス№133	放射性廃棄物処分-不確かさへの挑戦	2020年3月
5	原環センター2018 年度 技術年報		2019年11月

4. ホームページへの海外最新情報の掲載

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

〔各タイトル記事内容は上記の URL にアクセスしてください。〕

No	掲載日	タイトル		
1	2019/4/3	追記)米国で 2020 会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に 係る予算を要求〔2019 年 3 月 12 日既報〕		
2	2019/4/8	カナダ核燃料廃棄物管理機関(NWMO)が 2019~2023 年の実施計画書を公表		
3	2019/4/8	スウェーデンで SKB 社がキャニスタの長期閉じ込め能力に関する補足説明書を政府 に提出		
4	2019/4/11	ベルギーで放射性廃棄物・濃縮核分裂性物質管理機関(ONDRAF/NIRAS)が浅地中処分場の設置に関する環境影響評価報告書案の公開協議を開始		
5	2019/4/16	フランスで 2019~2021 年を対象とした「放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する国家計画」(PNGMDR) に関する公開討論会が開始		
6	2019/4/17	米国でエネルギー省 (DOE)が廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) の4度目の適合性再認定申請書を提出		
7	2019/4/17	スイスで NAGRA がサイト選定第3段階におけるボーリング調査を開始		
8	2019/4/25	米国の連邦議会上院で放射性廃棄物政策修正法案の検討を開始		
9	2019/4/26	26 追記) スウェーデンで SKB 社がキャニスタの長期閉じ込め能力に関する補足説明書 を政府に提出〔2019 年 4 月 8 日既報〕		
10	2019/5/7	追記)米国の連邦議会上院で放射性廃棄物政策修正法案の検討を開始〔2019 年 4 月 25 日既報〕		
11	2019/5/8	フィンランドで実規模実証システム試験が進行中		
12	2019/5/9	追記)米国でエディ・リー・エナジー・アライアンス(ELEA)サイトにおける中間 貯蔵施設の建設に係る許認可申請書をホルテック社が提出〔2017年4月7日 既報〕		
13	2019/5/13	米国で放射性廃棄物技術審査委員会 (NWTRB) が国際的な地下研究所活動等に係るワークショップの資料を公表		
14	2019/5/17	カナダの使用済燃料処分場のサイト選定の状況-カナダ核燃料廃棄物管理機関 (NWMO) がオンタリオ州南部の自治体においてフィールド調査の実施に向けた土地 利用に関する説明を実施		
15	2019/5/21	スイスで NAGRA が地域会議との検討に向けた処分場の地下インフラ配置案を公表		
16	2019/5/22	追記)米国で 2020 会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に 係る予算を要求〔2019 年 3 月 12 日既報〕		
17	2019/5/28	追記 カナダ原子力安全委員会 (CNSC) が規制文書「REGDOC-2.11 廃棄物管理 カナダにおける放射性廃棄物管理及び廃止措置の枠組み」を公表〔2018 年 12 月 19 日既報〕		
18	2019/6/6	韓国で使用済燃料管理政策の見直しが本格化		
19	2019/6/7	追記)英国で放射性廃棄物管理会社(RWM 社)が地層処分施設(GDF)のサイト選定 プロセスを開始〔2018 年 12 月 28 日既報〕		
20	2019/6/24	追記)米国で 2020 会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に 係る予算を要求〔2019 年 3 月 12 日既報〕		

No	掲載日	タイトル
21	2019/6/27	フィンランドの使用済燃料処分場の建設状況:ポシヴァ社がキャニスタ封入施設の 建設を開始
22	2019/6/28	フランスで国家評価委員会 (CNE)が第 13 回評価報告書を公表
23	2019/6/28	追記)スウェーデンで SKB 社が短寿命低中レベル放射性廃棄物処分場の拡張を申請 〔2014 年 12 月 22 日既報〕
24	2019/7/2	追記) フィンランドの使用済燃料処分場の建設状況: ポシヴァ社がキャニスタ封入 施設の建設を開始〔2019 年 6 月 27 日既報〕
25	2019/7/4	追記)フィンランドで使用済燃料処分場の建設を開始〔2016 年 11 月 30 日既報〕
26	2019/7/4	追記)米国でエネルギー省 (DOE)が廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) の4度目 の適合性再認定申請書を提出〔2019年4月17日既報〕
27	2019/7/5	追記)米国でエディ・リー・エナジー・アライアンス (ELEA) サイトにおける中間 貯蔵施設の建設に係る許認可申請書をホルテック社が提出〔2017 年 4 月 7 日 既報〕
28	2019/7/5	追記)米国で NRC が中間貯蔵パートナーズ (ISP) 社による使用済燃料の中間貯蔵施設の許認可申請の審査を再開〔2018年8月27日既報〕
29	2019/7/11	フランスで会計検査院がバックエンドコストに関する評価報告書を公表
30	2019/7/17	英国政府が地層処分施設(GDF)に関する国家政策声明書 (NPS)を英国議会に提出
31	2019/7/19	米国で NRC がクラス C を超える (GTCC) 低レベル放射性廃棄物の処分に係る規制基盤の案を公表
32	2019/7/22	ドイツで処分の安全要件及びサイト選定時の予備的安全評価の要件を定める政令案 が公表
33	2019/8/26	米国でエネルギー省 (DOE)が廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP)のドラフト戦略 計画を公表
34	2019/8/26	追記)米国で NRC が中間貯蔵パートナーズ (ISP) 社による使用済燃料の中間貯蔵施設の許認可申請の審査を再開〔2018 年 8 月 27 日既報〕
35	2019/8/29	追記)フィンランドで使用済燃料処分場の建設を開始〔2016 年 11 月 30 日既報〕
36	2019/9/4	フィンランド・雇用経済省が設置したワーキンググループが放射性廃棄物管理に関する報告書を公表
37	2019/9/17	追記)米国で 2020 会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に 係る予算を要求〔2019 年 3 月 12 日既報〕
38	2019/9/18	追記)フランスのビチューメン(アスファルト)固化体の管理に関する国際レビューが開始〔2018 年 10 月 4 日既報〕
39	2019/9/30	追記)米国でエネルギー省 (DOE)が廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) の 4 度 目の適合性再認定申請書を提出 [2019 年 4 月 17 日既報]
40	2019/9/30	追記) フランスで 2019~2021 年を対象とした「放射性物質及び放射性廃棄物の管理 に関する国家計画」(PNGMDR) に関する公開討論会が開始〔2019 年 4 月 16 日 既報〕
41	2019/10/2	追記)米国で 2020 会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に 係る予算を要求〔2019 年 3 月 12 日既報〕
42	2019/10/2	追記)スウェーデンで SKB 社がキャニスタの長期閉じ込め能力に関する補足説明書 を政府に提出〔2019 年 4 月 8 日既報〕
43	2019/10/4	スイスで規制機関ENSIが地層処分場の長期安全性に関する指針の改訂版の草案を公表

No	掲載日	タイトル		
44	2019/10/7	追記)フランス政府が地層処分プロジェクトに関する透明性強化の方針を公表 〔2018 年 3 月 13 日既報〕		
45	2019/10/9	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を申請 〔2014 年 12 月 22 日既報〕		
46	2019/10/18	追記)英国政府が地層処分施設 (GDF) に関する国家政策声明書 (NPS)を英国議会に 提出〔2019 年 7 月 17 日既報〕		
47	2019/10/24	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を申請 〔2014 年 12 月 22 日既報〕		
48	2019/11/15	スウェーデンで土地・環境裁判所が短寿命低中レベル放射性廃棄物処分場の拡張許 可申請に関する政府への意見書を提出		
49	2019/11/18	追記)韓国で使用済燃料管理政策の見直しが本格化〔2019年6月6日既報〕		
50	2019/11/19	ドイツで社会諮問委員会がサイト選定に向けた勧告を取りまとめ		
51	2019/11/22	スイスで連邦評議会が廃止措置・廃棄物管理基金令改正を閣議決定		
52	2019/11/22	米国の連邦議会で放射性廃棄物政策修正法案の検討を開始		
53	2019/11/26	追記)米国で 2020 会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に 係る予算を要求〔2019 年 3 月 12 日既報〕		
54	2019/11/28	フランスの国家討論委員会が「放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する国家計画」(PNGMDR) に関する公開討論会の成果を取りまとめ		
55	2019/11/29	カナダの使用済燃料処分場のサイト選定の状況-カナダ核燃料廃棄物管理機関 (NWMO) がホーンペイン/マニトウェッジ地域を除外		
56	2019/12/2	追記)米国の連邦議会で放射性廃棄物政策修正法案の検討を開始〔2019 年 11 月 22 日既報〕		
57	2019/12/4	追記)スイスで NAGRA がサイト選定第3段階におけるボーリング調査を開始〔2019 年4月17日既報〕		
58	2019/12/18	ドイツで連邦放射性廃棄物機関(BGE)がサイト選定に関するイベントを開催し、除 外条件等を公衆と議論		
59	2019/12/24	追記)米国で 2020 会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に 係る予算を要求〔2019 年 3 月 12 日既報〕		
60	2020/1/14	英国の原子力廃止措置機関 (NDA)が 2019 年版の放射性廃棄物インベントリ報告書を 公表		
61	2020/1/23	追記)米国で廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) の操業が再開〔2017年1月18 日既報〕		
62	2020/1/27	米国で放射性廃棄物技術審査委員会 (NWTRB) が乾式貯蔵等に係るエネルギー省 (DOE) への勧告・所見を公表		
63	2020/1/29	カナダの使用済燃料処分場のサイト選定の状況-カナダ核燃料廃棄物管理機関 (NWMO) がヒューロン=キンロス・タウンシップを除外		
64	2020/1/30	追記)米国で放射性廃棄物技術審査委員会 (NWTRB) が国際的な地下研究所活動等に 係るワークショップの資料を公表〔2019年5月13日既報〕		
65	2020/2/5	カナダ OPG 社の低・中レベル放射性廃棄物の地層処分場建設プロジェクトが代替サイト検討へ		
66	2020/2/5	追記)米国の廃棄物隔離パイロットプラント(WIPP)で地下施設の掘削活動が再開 〔2018 年 1 月 19 日既報〕		

No	掲載日	タイトル
67	2020/2/12	米国で2021会計年度の予算要求-ユッカマウンテン計画の膠着状態を傍観せずに代替の解決策を開発するとの方針を表明
68	2020/2/25	英国の放射性廃棄物管理会社 (RWM 社) が地層処分施設 (GDF) のサイト評価方法書 を公表
69	2020/2/25	追記)フランスの国家討論委員会が「放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する 国家計画」(PNGMDR) に関する公開討論会の成果を取りまとめ〔2019年11月 28日既報〕
70	2020/2/27	追記)米国で 2021 会計年度の予算要求-ユッカマウンテン計画の膠着状態を傍観 せずに代替の解決策を開発するとの方針を表明〔2020 年 2 月 12 日既報〕
71	2020/3/4	追記)米国で 2021 会計年度の予算要求-ユッカマウンテン計画の膠着状態を傍観 せずに代替の解決策を開発するとの方針を表明〔2020 年 2 月 12 日既報〕
72	2020/3/23	英国でエディ・リー・エナジー・アライアンス (ELEA) サイトにおける中間貯蔵施 設の建設・操業に係る環境影響評価が進行
73	2020/3/31	追記)韓国で使用済燃料管理政策の見直しが本格化〔2019年6月6日既報〕

5. 委員会一覧

分野区分	研究件名	委員会名称	審議事項
I.低レベル放射 性廃棄物の処分 に関する調査研 究	地下空洞型処分施設機能 確認試験	地下空洞型処分施設機 能確認試験検討委員会	人工バリアや周辺岩盤の長期 にわたる機能確認方法の審議
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	ニアフィールドシステム 評価確証技術開発	ニアフィールドシステム評価確証技術開発委 員会	人工バリアとその設置などにより影響を受けると考えられる人工バリア近傍の岩盤とを合わせた領域(ニアフィールド)を対象とした品質/健全性評価手法に関する調査結果等の審議
	可逆性 · 回収可能性調查 · 技術高度化開発	回収可能性調査·技術高 度化検討委員会	地下研での処分坑道横置き・ PEM 方式に対する回収技術の 実証試験、地層処分実規模試 験施設での理解促進活動、回 収維持の影響の定量化、並び に回収容易性を高めた概念に 係る検討、成果等の審議
	地層処分施設閉鎖技術確 証試験	地層処分施設閉鎖技術 確証試験委員会	処分場の閉鎖後に坑道や掘削 影響領域が水みちとなること を防止するための坑道シーリ ング技術の整備に向けた研究 開発等に関する審議
	TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発	TRU 廃棄物処理・処分 技術開発検討委員会	TRU 廃棄物の地層処分における人工バリアの閉じ込み機能の向上に関する技術開発、地層処分システムの状態設定のための現象解析モデルの高度化に関する計画、実施方法、成果等の審議
	沿岸部処分システム評価 確証技術開発	沿岸部処分システム高 度化開発評価委員会	沿岸部固有の環境を踏まえた 概要調査段階で必要となる地 質環境の調査・工学の技術開 発に関する研究計画、実施方 法、結果の評価等に関する審 議
	多様な核燃料サイクル条件を考慮したバックエンド対策の最適化に関する研究	多様な核燃料サイクル 条件を考慮したバック エンド対策の最適化検 討委員会	多様な核燃料サイクル条件の 地層処分、バックエンド対策 等の審議
	廃棄物処分の環境影響を 基点とした原子力システ ム研究	廃棄物処分の環境影響 を基点とした原子力シ ステム研究に関する外 部評価委員会	廃棄物影響の指標、諸量評価 システム、MA 簡素化分離プロ セス、高速炉システム等原子 カシステムを俯瞰した研究に 関する審議

Ⅲ. 放射性廃棄物全 般に共通する調 査研究等	放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務	地層処分スキルアップ 研究会	人材育成プログラム・セミナ 一の内容の検討等
		評価委員会	採択した萌芽的・先進的な研 究開発テーマに関する研究計 画、研究成果等の審議

原環センター 2019年度 技術年報

2020年11月発行

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

〒104-0044 東京都中央区明石町6番4号

ニチレイ明石町ビル 12 階

TEL 03-6264-2111(代表)

FAX 03-5550-9116

URL https://www.rwmc.or.jp/

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