

RWMC

原環センター
2018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、2018年度(平成30年度)に実施した調査研究等の内容をご紹介しますとともに、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 高橋 彰

目 次

I. 低レベル放射性廃棄物の処分に関する調査研究.....	1
1. 地下空洞型処分施設機能確認試験.....	1
2. その他の低レベル放射性廃棄物の処分に関する調査研究.....	7
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.....	9
1. ニアフィールドシステム評価確証技術開発.....	9
2. 地層処分施設閉鎖技術確証試験.....	13
3. 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発.....	19
3-1 事業の全体概要	19
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－.....	20
3-3 回収可能性の維持についての検討.....	23
4. 沿岸部処分システム高度化開発.....	27
5. TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発	33
5-1 事業の全体概要	33
5-2 廃棄体パッケージの閉じ込め性能に係る試験と評価.....	35
5-3 陰イオン核種に対する閉じ込め技術の開発.....	41
5-4 廃棄体からの核種溶出モデルの高度化.....	43
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－.....	45
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.....	49
6. ジルカロイハルの HIP 処理によるヨウ素固定化方法の検討.....	55
7. 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.....	56
8. その他の地層処分に関する調査研究.....	57
III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	59
1. 放射性廃棄物海外総合情報調査.....	59
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	61
3. 国際的優良事例の我が国への反映.....	65
4. 諸外国における放射性廃棄物埋設に係るセーフティケースの調査.....	67
5. その他の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	69
IV. 国際交流	71
V. 資料	73
1. 講演会、セミナー、研究発表会.....	73
2. 論文、学会発表等	74
3. 刊行物	82
4. ホームページへの海外最新情報の掲載.....	83
5. 委員会一覧	86

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オーダー程度高い廃棄物が存在する¹⁾。

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70m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、廃棄物の埋設が完了し、地表に繋がる坑道を埋戻した後においても、処分施設の長期的な安定性の見通しを確認するため、埋設終了後の管理期間（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²⁾。

これらを背景とし、本事業は、平成27年度から5年間程度の期間で、平成26年度までに構築した実規模施設も活用し、地下空洞型処分施設の閉鎖後の長期的な管理に資する、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30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。

◇平成30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、モニタリング項目になりうる事象を定量的に評価することが重要である。そこで、解析的検討及び文献調査等により、地下空洞型処分施設で予想される挙動の定量化を行った。表-1に部位と事象ごとの定量化方法を示す。

表-1 定量化方法

部位	事象	定量化方法
廃棄体	発熱	熱・水・力学に着目した解析的検討により定量化する
	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
区画内 充てん材	ひび割れ発生	既往検討成果から収縮量を推定
	化学的変質(Ca 溶出)	化学に着目した解析的検討により定量化する
	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
コンクリートピット	ひび割れ発生	熱・水・力学に着目した解析的検討及び二次元骨組み解析により定量化する
	化学的変質(Ca 溶出)	化学に着目した解析的検討により定量化する
	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
低拡散層	ひび割れ発生	二次元骨組み解析により定量化する
	化学的変質(Ca 溶出等)	化学に着目した解析的検討により定量化する
低透水層	底部低透水層の沈下	熱・水・力学に着目した解析的検討により定量化する
	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
	地下水浸潤による膨潤	熱・水・力学に着目した解析的検討により定量化する
	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により定量化する
空洞内 充てん材 (土質系)	建設・埋設段階の水接触による変状	熱・水・力学に着目した解析的検討により定量化する
	沈下による天端部の空隙発生	閉鎖技術検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	熱・水・力学に着目した解析的検討により定量化する
防水シート 裏面排水	防水シートの機能喪失	熱・水・力学に着目した解析的検討により定量化する
空洞内 充てん材 (セメント系)	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
	化学的変質(Ca 溶出)	化学に着目した解析的検討により定量化する
	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
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、変位発生時期、変位量を同定する
周辺岩盤	地下水の高pH化	化学に着目した解析的検討により定量化する

2) 熱・水・力学に着目した施設挙動解析

解析対象とする時間軸を排水管閉鎖前と後の2期間に区分し、排水管閉鎖前については人工バリ

アの構築等に伴う力学・変位挙動を、排水管閉鎖後については再冠水プロセスにおける施設内の飽和度・温度挙動を、それぞれ予測評価した。

力学・変位挙動解析では、処分空洞内の構成要素を横断面方向に2次元FEMにモデル化した(図-1参照)。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。解析は図-2に示す解析ステップに従い荷重増分法により行った。解析には、応力-ひずみ解析コード CODE_BRIGHT⁴⁾を用いた。

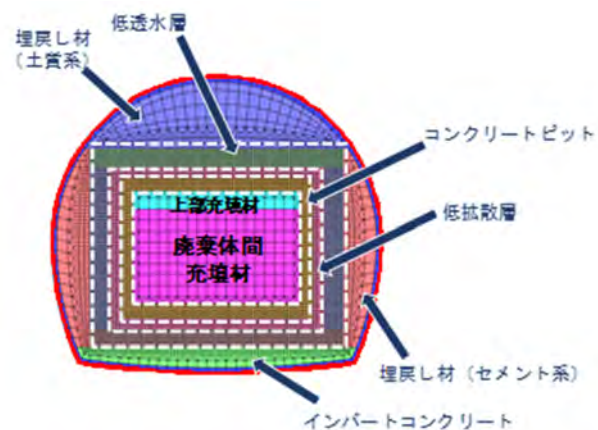


図-1 力学・変位挙動解析モデル

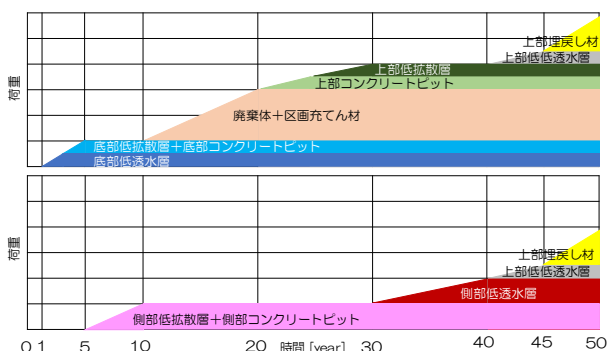


図-2 力学・変位挙動解析の解析ステップ

解析結果として、施工開始から50年までの期間のコンクリートピット底版中央部における変位挙動を図-3に示す。0~20年程度までは底部低透水層が周囲から水分を吸収することにより膨潤することで変形は上向き傾向を示し、それ以降は廃棄体定置及び人工バリア構築に伴う荷重作用により沈下する。

飽和度・温度挙動解析については、過年度⁵⁾から熱物性条件、廃棄体発熱条件及び施工ステップの見直しを図った詳細解析を実施した。解析には、熱-水連成解析コード TOUGH2⁶⁾を用いた。

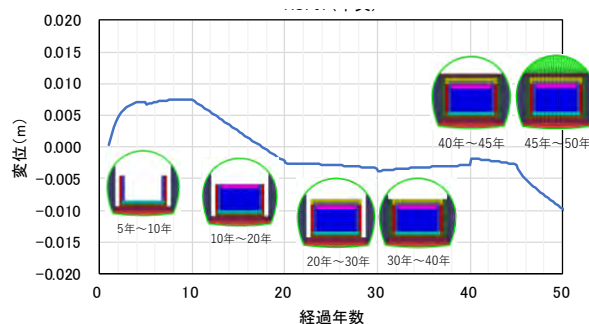


図-3 コンクリートピット底版中央部における変位挙動

3) 化学に着目した施設挙動解析

化学に着目した解析は、近傍ボーリング孔を用いた地下水組成モニタリングにおいて着目すべき分析項目を抽出することを目的としている。平成30年度は、地下水の動水勾配、施設に生じるひび割れ、掘削影響領域(EDZ)、地下水組成等の不確実性を考慮したうえで、モニタリング値に大きく影響を与える条件・パラメータを明らかにするとともに、計測結果の想定範囲(幅)を示すことを目的としてケース・スタディを実施した。

解析ケースを表-2に示す。解析モデルは、処分空洞周辺のFEMメッシュは前年度の解析モデル⁵⁾とほぼ同一であるが、下流側の岩盤は施設中心から500mまでに拡張した(図-4参照)。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.⁷⁾を用いた。

表-2 化学挙動解析の解析ケース

ケース	動水勾配	ひび割れ・隙間	EDZ	岩盤クラック	地下水組成	吹付けコンクリートの初期変質
1	7%	—	—	—	降水系	—
2	0%	—	—	—	降水系	—
3	7%	○	—	—	降水系	—
4	7%	○	○	—	降水系	—
5	7%	○	—	○	降水系	—
6	7%	○	—	—	海水系	—
7	7%	○	—	—	降水系	○

(—: 考慮しない, ○: 考慮する)

解析結果の一例として、ケース1及びケース2における40年後のpH分布を図-5及び図-6に、40年後のNaイオン分布を図-7及び図-8に示す。

動水勾配の影響により、pH 分布や Na イオン分布が下流側にシフトしていることが分かる。

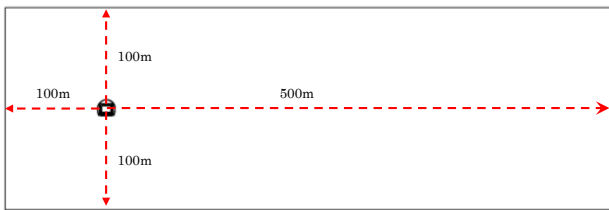


図-4 化学挙動解析の解析領域



図-5 400年後における pH 分布（ケース1）



図-6 400年後における pH 分布（ケース2）

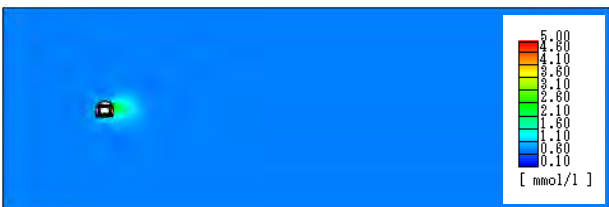


図-7 400年後における Na イオン濃度分布（ケース1）



図-8 400年後における Na イオン濃度分布（ケース2）

(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) 背景

地下空洞型処分施設でのモニタリングは、実績のある既存計測技術を適用することが基本にな

ると考えられるが、その一方で、既存計測技術にはいくつかの課題が指摘されている。小型軽量、長寿命、防爆性、電磁ノイズを受けない、センサー一部に電源不要、測定データの長距離伝送が容易、といった特徴を有する光ファイバセンサー技術が、地下空洞型処分施設でのモニタリングには非常に有効となる可能性が高いと考え、その適用性を検討するためにラボ試験、原位置試験等を実施した。

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、対象構造物との一体性を確保して、対象構造物に生じた変形やひび割れなどに伴う変化を光ファイバセンサーに伝達する必要がある。光ファイバセンサーは、セメント系材料バリア表面に接着剤を用いて固定することを想定しているが、接着剤によるセメント系バリア材料と光ファイバセンサーの付着が長期的に維持されるという保証はない。そこで、接着剤によるセメント系材料バリアへの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。

敷設試験のイメージを図-9 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、光ファイバセンサーを配置することを想定する。低透水層の締め固め時に応じた圧力、またその後の膨潤圧によって、光ファイバセンサーがセメント系材料バリアに押し付けられる。その圧力によって、光ファイバセンサー～セメント系材料バリアの間に摩擦力が発生することにより、セメント系材料バリアの挙動をとらえられるかどうかを確認することとした。

具体的には、コンクリートブロック（幅 10 cm）を二つ並べた上にセンサーケーブルを 2 本設置する。図-10 に示すように、1 本は接着剤で全長固定され、1 本は接着せずに置いただけである。センサーケーブル上には、錘としてのコンクリートブロック（ $10 \times 8 \times 40 \text{ cm}^3$ ）を置いた。段階的にコンクリートブロックの隙間を広げながら、センサーケーブルのひずみ分布を計測した。ひずみ分布計測はレイリー散乱光による計測方式のうち TW-COTDR（Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometry）方式で行った。

試験結果を図-11 に示す。接着されたケーブルでは、隙間の変位量が増えるに従ってひずみが上昇していることがわかる。接着されていないケーブルでは、変位量が 1.0 mm 程度までは変位とひずみに線形性が認められた。接着剤不使用の光ファイバセンサー設置、あるいは、接着剤が効かなくなった状態での、光ファイバセンサーによるひずみ計測の可能性が示唆された。

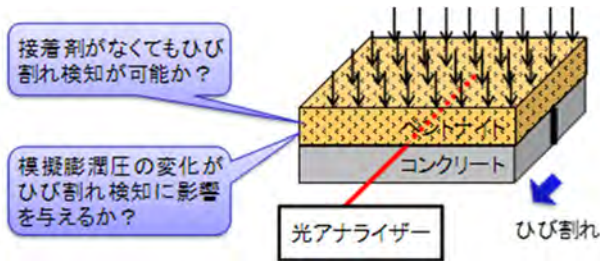


図-9 敷設試験のイメージ



図-10 センサーケーブルの設置

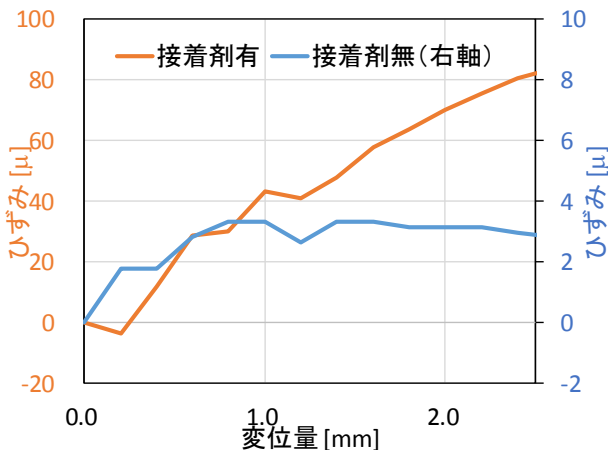


図-11 隙間(変位量)とひずみとの関係

3) 光ファイバセンサーによる圧力計測の検討

光ファイバセンサーによって、ひずみ・温度分布だけでなく圧力分布を計測できれば、低透水層の膨潤圧などのモニタリングに資することができる。そこで、ベントナイトの通水試験を通じて

生じる膨潤圧を用いて光ファイバセンサーに圧力を与える試験を行い、圧力分布計測の可能性を探ることとした。

光ファイバセンサーによる圧力計測試験のイメージを図-12 に示す。本試験は、被覆の異なる二種類の光ファイバセンサーを、ポーラスストーン(通水用)とベントナイト供試体の間に配置し、通水によるベントナイト膨潤が二種類(太径:PVC被覆・外径 900、細径:UV被覆・外径 500 μm)の光ファイバセンサーに与える圧力の差をもとに、その領域の圧力状態をとらえようと試みるものである。ちなみに、本試験環境は、光ファイバ軸方向ひずみと温度は一定と言える環境下にある。通水試験装置を図-13 に示す。ベントナイト供試体部(φ300 mm、高さ 60 mm)の下部に位置するポーラスストーンを経由してベントナイト下面全体から通水される仕組みとなっている。ベントナイト供試体部の上部の加圧板と、反力をとる上板の間にはロードセル(200 kN)を設置して、データロガーにて荷重を計測できるようになっている。バルブからベントナイト供試体へ通水しながら、ロードセル、ポイント型光ファイバ圧力センサー、分布型光ファイバセンサーで定期的なひずみ分布の連続計測を行った。計測はTW-COTDR方式で行った。

ポーラスストーンに固定した太径と細径の分布型光ファイバセンサーを用いてひずみ分布を計測し、この結果に基づき、被覆厚の異なる二種類の光ファイバの差を、ロードセルの結果とともに経時変化として示したのが図-14 である。傾向は異なるものの、両者ともに上昇傾向を示している。また、ロードセルと光ファイバ(二種類の差)の関係を図-15 に示す。膨潤圧が小さい場合(通水初期)にばらつきが見られるものの、光ファイバによって一定の膨潤圧の上昇傾向を把握できることが確認された。

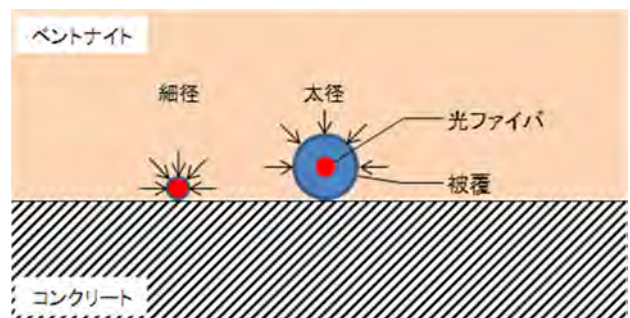


図-12 圧力計測試験のイメージ

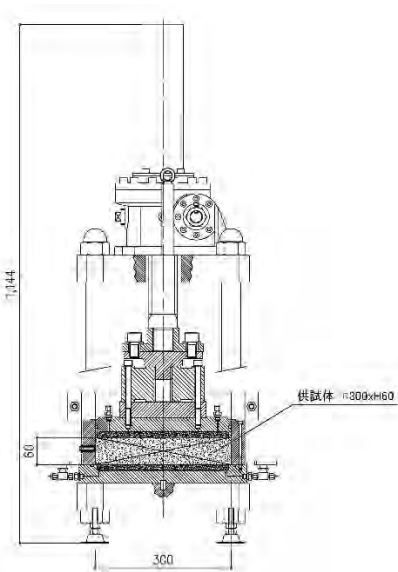


図-13 通水試験装置

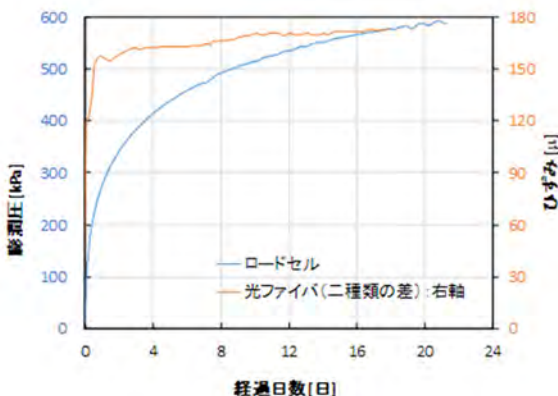


図-14 計測された圧力の経時変化

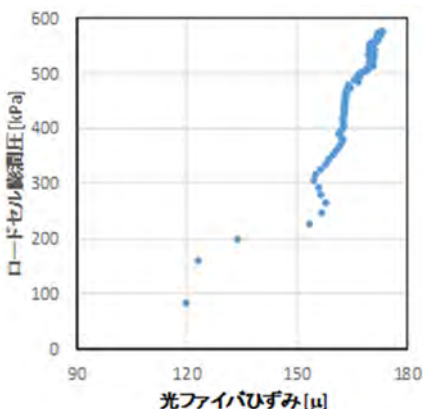


図-15 ロードセルと光ファイバ(二種類の差)の関係

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)、データ処理装置より

構成)により、実規模施設等においてひずみ(ひび割れ)及び温度の連続計測を行う原位置試験を実施した。本計測システムではブリルアン散乱光とともにレイリー散乱光を用いた計測方式も適用可能である。本試験においては、ブリルアン散乱光による計測方式のうち PPP-BOTDA (Pulse Pre-Pump Brillouin Optical Time Domain Analysis) と、レイリー散乱光による計測方式のうち TW-COTDR でひずみ等を計測した。計測対象部位と測定項目を表-3に、計測システムの構成を図-16にそれぞれ示す。

ひずみ分布計測においては、二次被覆と光ファイバが一体化した一芯のセンサーケーブル(OFS社製 C80920、1.8×3.5 mm)を、温度分布計測においては、二次被覆と光ファイバが縁切りされた構造の四芯のセンサーケーブル(OFS社製 CX80766、外径 8.5 mm)を用いた⁵⁾。

表-3 光ファイバセンサーによる計測部位と測定項目

部位	測定項目	割当チャンネル
側部低拡散層	ひずみ	1、2
上部低拡散層	ひずみ	3、4
手前コンクリートピット	ひずみ	5、6
アクセス坑道沿い	温度	7、8

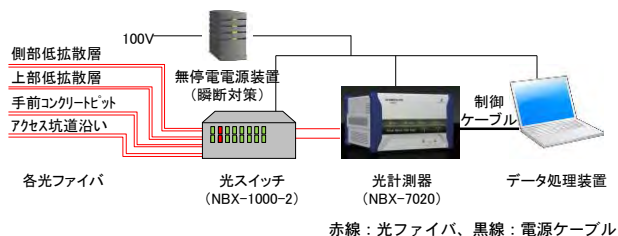


図-16 計測システムの構成

ひずみ計測用光ファイバセンサーは、側部低拡散層、上部低拡散層、手前コンクリートピットのそれぞれ表面に、エポキシ接着剤(スリーエム製 DP-420)を用いて直線部を全線固定した。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。

上部低拡散層表面には 300 mm ピッチで格子状に光ファイバセンサーを設置した。図-17の○印で示す位置に標準パッカーを設置して段階的(STEP1~STEP6)に加圧することで直交方向と斜め方向の2方向にひび割れ(最大ひび割れ幅 0.45 mm)を誘発させ、これに伴うひずみを光ファイバセンサーにて計測した。これに併せて、計測ステ

トップ毎にひび割れの目視観察と、ひずみゲージとパイ型ゲージにより参照データを取得している。

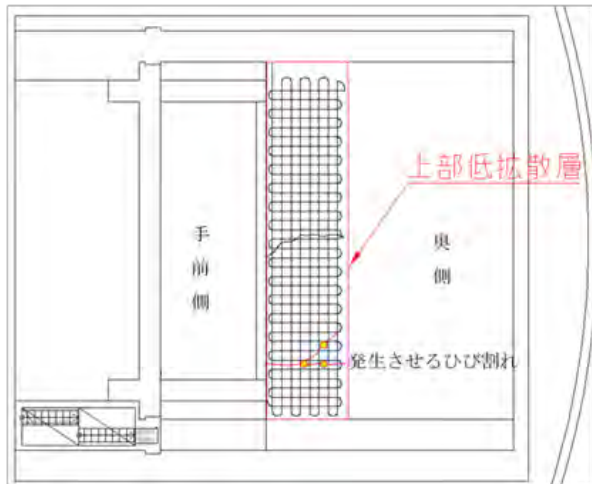


図-17 ひび割れ誘発位置（上部低拡散層）

ひずみゲージ $\epsilon 4$ 、 $\epsilon 5$ 付近（図-18 参照）での STEP1（標準パッカー直近のひずみゲージによる計測ひずみが 50μ 相当）と STEP3（発生した最大ひび割れ幅 0.1 mm 相当）におけるひずみ分布計測結果を図-19、図-20 に示す。ひずみゲージと光ファイバの計測値に差があるところがあるものの、両者は比較的良く一致していた。ブリルアン計測、レイリー計測ともに、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た。

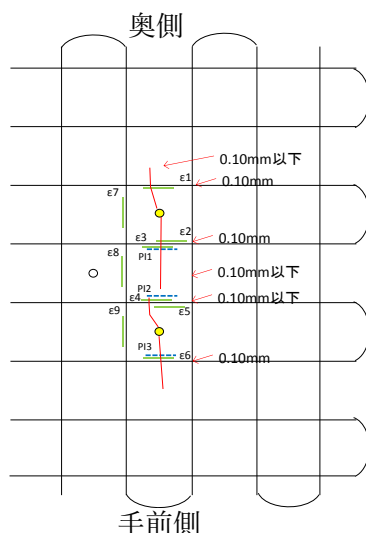


図-18 参照データ取得位置とひび割れ発生状況（STEP3）

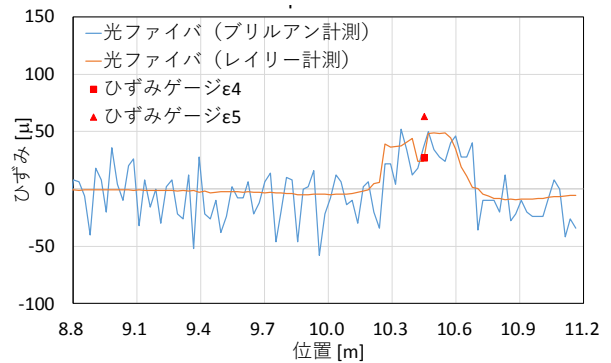


図-19 ひずみ分布計測結果（STEP1）

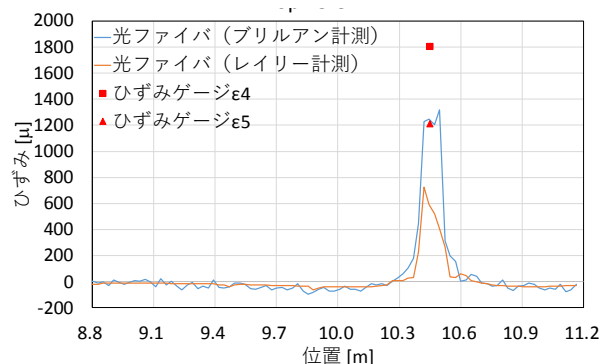


図-20 ひずみ分布計測結果（STEP3）

- 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 30 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、2019
- 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) 原環センター、2017 年度技術年報、2018.10
- 6) <http://esd1.lbl.gov/research/projects/tough/>
- 7) 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

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、附属書等に引用されている廃棄体製作方法等に係る基礎データ等が記載されている文献等を公開と非公開とに分類し、非公開文献等について、公開用の技術図書を作成するために、附属書等において非公開文献等を引用している箇所の記事と、その記事の参考とした非公開文献等における記載内容の整理を実施した。

(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、埋設施設からの要求精度等の比表面積設定検討条件の整理を実施するとともに、評価対象機器の汚染状況や比表面積適用の目的を考慮し、対象廃棄物の比表面積設定方法の検討を実施した。

(6) 地下空洞型処分施設の実施工に必要な技術情報の整備

手引き書の作成に向けて、本年度は、側部低透水層（緩衝材）、上部埋め戻し材、低拡散材、コンクリートピット及び内部充てん材施工に関する整理を実施した。

(This page(p8) is intentionally kept blank.)

II. 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する調査研究

1. 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、オーバーパック、緩衝材、セメント系材料などの人工バリアと、人工バリアの設置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、人工バリアの長期挙動評価や環境変遷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。加えて、わが国の地下環境には一般的に湧水があることが知られており、処分孔内への湧水が廃棄体定置後の人工バリアシステム、特に緩衝材に対して影響を及ぼす可能性が危惧される。

本事業では、複数の異なる構成材料からなるニアフィールドの状態変遷を評価する技術の開発と確証に向けて、各構成材料を対象に評価技術等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。

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運び出される現象であり、緩衝材の定置後に、処分孔内への湧水環境が維持される一定の期間において発生する可能性が危惧される。本事業では、緩衝材の定置後から再冠水に至るまでの期間に着目し、緩衝材の流出を抑制するための工学的対策を具体化するとともに、緩衝材の飽和後の状態を予測するための評価技術を整備し、閉鎖後長期の性能評価や安全評価の初期状態をより確からしく示すことを目的としている。具体的には、以下の2点に取り組むべき課題として設定し、研究開発を進めている。

1) 緩衝材の流出を抑制するための工学的対策
処分孔縦置きブロック方式の処分概念を対象と

して、緩衝材流出に対する実現性のある工学的対策を提示し、その効果を室内、原位置での試験により確認する。

2) 再冠水過程に係る検討

許容可能な一定量の緩衝材の流出を加味した、再冠水後の緩衝材の状態を推定する解析手法を構築（開発）する。また、数十から数百年オーダーの期間と想定される再冠水プロセスに関する解析手法の検証ツールとして、遠心模型試験技術の適用性を検討する。

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（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。

◇平成30年度の成果¹⁾

(1) 検討方針

1) 検討対象とする期間と留意すべき挙動

本研究開発の最終目標は、再冠水後の緩衝材の状態（密度分布）をより確からしく予測することであることから、検討の対象とする期間は緩衝材が再冠水に至るまでの期間となる。

孔内湧水等の水理場の擾乱に伴う緩衝材の流出挙動の観点では、緩衝材の流出は上記期間にわたって一様に生じるのではなく、施工方法や操業過程に伴う原位置の水理環境の変化に依存する。そのため、緩衝材の再冠水プロセスのモデル化においては、操業過程に伴う原位置の水理環境の変遷、水理場の変遷（孔内湧水環境の変化）、水理場の変遷に伴う地下構成要素の機能や性能変化への影響を抑制するための工学的対策、といった事項に留意して検討を進める必要がある。

図-1に示すように、上記期間において緩衝材の流出が懸念される期間は、

① 緩衝材定置～処分坑道埋め戻し前まで

② 処分坑道埋め戻し後～緩衝材飽和まで

の2つに分けられる。特に①の期間では、湧水に伴う地下の水理場の擾乱が顕著となり、緩衝材の流出が最も懸念される期間となる（擾乱を抑制するための工学的対策を施せる時期もこの期間となる）。従って、本事業においては、緩衝材の流出

挙動とその影響範囲の把握、及び場の擾乱を抑制する工学的対策の検討を行う対象期間として、①の期間を念頭に置く。さらに、②の期間についても処分孔から埋め戻した処分坑道内へと湧水が流れる可能性があることから、この期間についても考慮とする。

許容される緩衝材の流出を考慮した（流出抑制対策効果を加味した）再冠水後の緩衝材の状態を示すための解析的な手法の開発では、同期間における緩衝材の浸潤挙動や膨潤による密度の均質化、それらの挙動における廃棄体からの温度の影響などにも留意が必要となる。

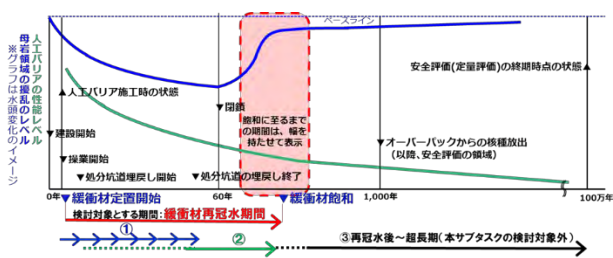


図-1 検討対象とする期間

2) 工学的対策オプションの選定

処分孔縦置きブロック方式の場合、施工面での制約から処分孔における岩盤と緩衝材間に隙間が生じ、この隙間に湧水が流入することにより緩衝材の流出が起こりやすくなると考えられる。そのような事象に対する工学的対策として、次のようなオプションが考えられる。

○湧水処理

- ・ 処分坑道埋め戻しまでの遮水シートの設置²⁾
- ・ 処分孔周辺のグラウト施工²⁾
- ・ 処分坑道埋め戻しまでの処分孔内の強制排水
- ・ 水抜きボーリングの設置

○上蓋設置

○隙間処理: 土質系材料(ベントナイト、ケイ砂、掘削土など)による隙間充填処理

これらの考え得る対策オプションのうち、特に施工性にも留意して、隙間処理による対策を最初の検討対象として、室内試験や原位置試験によりその効果を確認することとした。これまでの研究で行われた、岩盤と緩衝材間の隙間をベントナイトペレットにより充填したケースでは、一定の緩衝材流出抑制の効果が確認されている³⁾。しかし、ベントナイトペレットは、膨潤するの

が非常に早く、湧水が継続する岩盤とブロックの間に均一に充填することを考えると、施工性(充填性)が悪く、施工品質の確保が難しい。ペレットをケイ砂に置き換えることにより、隙間充填の施工性が高まり、さらに緩衝材表面への浸潤環境を単純化・平滑化できる可能性がある(処分場内における多様な湧水環境に依存せずに緩衝材の浸潤、膨潤を進行させることができる)ことから、緩衝材の品質確保や再冠水プロセスのモデル化の観点からも有利である。一方で、これまでにケイ砂充填による流出抑制の効果は確認した例がないことから、室内試験や原位置試験により対策効果を確認しておく必要がある。

以上のような考え方に基づき、2カ年計画で取り組む本事業では、ケイ砂充填による隙間処理を工学的対策オプション(施工オプション)の一つとして選定し、検討を進めることとした。なお、隙間処理オプションの設定は、反復的な開発を行ううえで最初に設定した施工オプションの一つであり、緩衝材の安全機能(期待される初期状態)を満たさないと判断される場合には、更なる工学的対策(他のオプション)を検討することとなる。

3) 再冠水プロセスのモデル化

再冠水後の緩衝材の状態(密度分布)を示すための再冠水プロセスのモデル化に向けて、当センターではこれまでに浸潤速度や残留密度差のモデル化を行ってきた³⁾。本事業における許容される緩衝材の流出量を考慮した再冠水プロセスのモデル化では、緩衝材流出後の緩衝材を初期状態として、その後の飽和に至るまでの緩衝材の挙動を検討する。この2年間では、膨潤による隙間の閉塞挙動に関するモデル化に先行して取り組んだ。緩衝材流出については、膨潤した緩衝材表面から予測される量の緩衝材が失われたと見做すことで、緩衝材流出の影響を加味し、流出の可能性のある期間を経た緩衝材に対して再冠水プロセスのモデル化を進めていく方針とする。

(2) 緩衝材流出現象と工学的対策効果の把握

緩衝材流出の抑制効果を確認するための試験として、“地下坑道における流出試験(以下「原位置試験」という)”と“現象理解と定量データ取得のための室内試験(以下「室内試験」という)”を

実施した。

平成 30 年度には、原位置試験の事前準備として、試験孔の湧水量測定、試験孔の水理試験などの試験環境の確認と試験装置の設計を実施した。図-2 に湧水量の測定結果を、図-3 に次年度に行う試験設備の概要を示す。ベントナイトブロックは試験孔天端直下に設置する。その位置での孔壁からの湧水量の測定結果は 0.3 L/min であった。また、緩衝材（模擬供試体）の上部には膨出を押さえるために蓋を設置する。

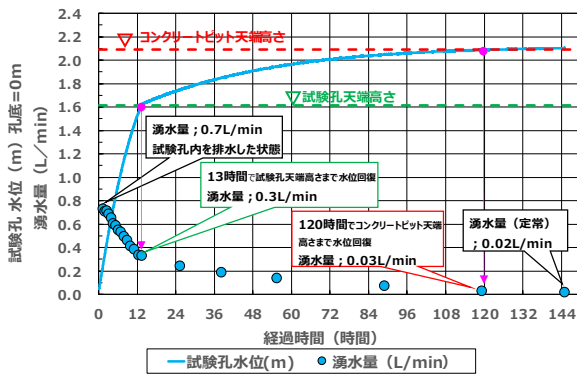


図-2 試験孔の湧水量測定結果

室内試験では、緩衝材の流出量等をより確からしく把握できる、環境条件を制御できるといった特徴があり、工学的対策効果をより定量的に把握できるだけでなく、流出挙動に影響する環境条件などを制御することでその影響の程度の定量化も可能となる。このような特徴を踏まえ、次年度に実施する原位置試験に先立つリファレンス試験として、ケイ砂による隙間充填効果の把握のための試験を実施した。

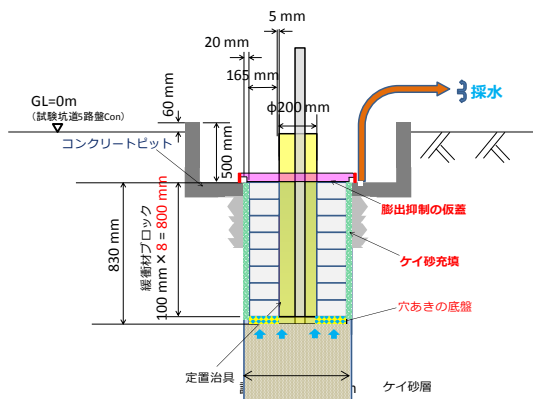


図-3 原位置試験設備の概要

室内試験で得られた総送水量と緩衝材の流出量（乾燥重量）の関係を図-4 に示す。抑制効果を確認

するための試験は、注水量が 0.01 L/min で上部拘束した条件で行った。図中に赤色で示した充填物なしのケースに比べて、隙間に 3 号ケイ砂を充填したケースの緩衝材の流出量は明らかに少なくなっており、ケイ砂充填の効果があったことが示された。今回の試験は約 1 週間の試験であり、今後、さらに時間を長くした場合の流出挙動を把握する必要がある。また、ケイ砂を充填することによる緩衝材流出抑制のメカニズムについても検討していく。

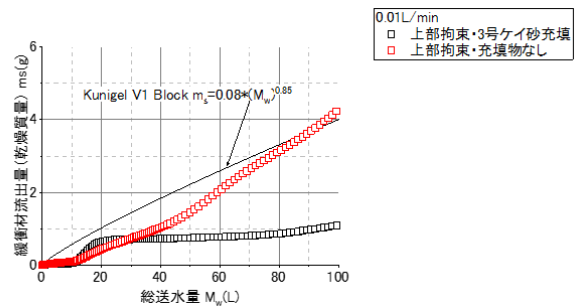


図-4 隙間有りとケイ砂 3 号充填の試験ケースにおける総送水量と緩衝材流出量の関係

(3)再冠水後の緩衝材の状態を予測する解析手法の構築

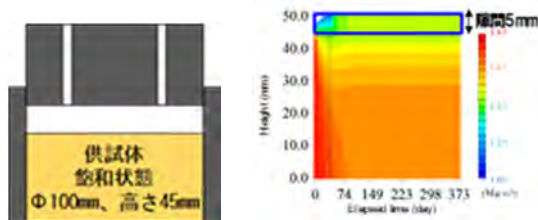
本研究開発では、次の 2 つの課題を設定してモデル化及び解析手法の高度化に取り組んだ

- ・流出現象を考慮した緩衝材の挙動評価手法の開発（以下「解析評価」という）
- ・遠心模型試験による人工バリア再冠水挙動の評価（以下「遠心模型試験」という）

解析評価では緩衝材と孔壁との間に隙間が存在するような状況を念頭に置き（緩衝材の表層の一部が流出するような状況も念頭）、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状態変化プロセスを評価するための解析手法を構築し、同解析手法によるシミュレーションを通して、乾燥密度や応力の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段階的に実施するものとし、実スケールを対象とした解析に先立って、比較検討が可能な室内試験結果が存在する供試体サイズの問題を対象としたシミュレーションを実施した。また、性状変化のメカニズムの理解を容易にするために、平成 30 年度は、緩衝材の間隙が初期から水で満たされた飽和状態にあるという仮定の下、

円筒供試体が軸方向に一次的に膨潤するような解析モデルを設定し、シミュレーションを実施した。

結果を図-5に示す。左図は、解析モデルを示し、右図は隙間を5mmとした場合の乾燥密度分布の変化に係るシミュレーション結果を示している。隙間が埋まるまでの間は表面付近の密度が一旦低くなるが、隙間の閉塞後は膨潤が進んで密度が高くなっていくことが示された。しかし、隙間だった部分の乾燥密度は供試体の下部と同じ密度には至らず、密度の分布を残したまま平衡状態に達した。次年度は、不飽和の状態から浸潤・膨潤する挙動についての解析を行う予定である。また、再冠水プロセスを考えるにあたっては、今後、廃棄体からの熱も考慮した、連成解析の手法についても検討する。



a) 解析モデル b) 乾燥密度分布の例
図-5 解析モデルの概念図と解析結果

遠心模型試験では、緩衝材の再冠水過程を対象とした予測解析手法に関する文献調査と試験による検証を基に、遠心模型試験の適用範囲・妥当性について再整理を行い、数百年オーダーの処分環境の状態予測の検証ツールとしての遠心模型試験技術の有効性の確認を進めた。遠心模型試験では、緩衝材中の水の浸潤距離と経過時間（実物換算時間で数十年程度）の関係を取得し、その結果と既往の室内試験結果（数年程度の浸潤試験）とを比較することにより、緩衝材中の水の浸潤挙動を対象とした加速試験としての遠心模型試験技術の適用性を検討した。

図-6に比較した1G室内試験（加速していない既往の室内試験結果）と遠心模型試験による加速試験の概念図を示す。1G室内試験は、10年程度にわたって含水率を測定して浸潤速度を得たものである³⁾。2つの試験結果の比較を図-7に示す。図より、遠心模型試験による加速試験結果が1G室内試験の傾向を再現できていることが窺える。次年度に加速度を変えた試験を行い、さらに妥当

性についての知見を拡充する予定である。

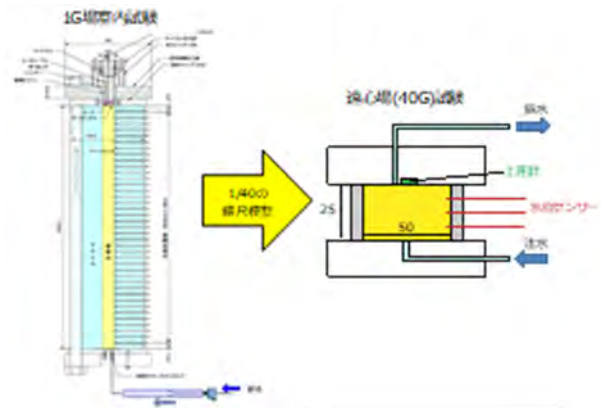


図-6 比較した室内試験と遠心模型試験

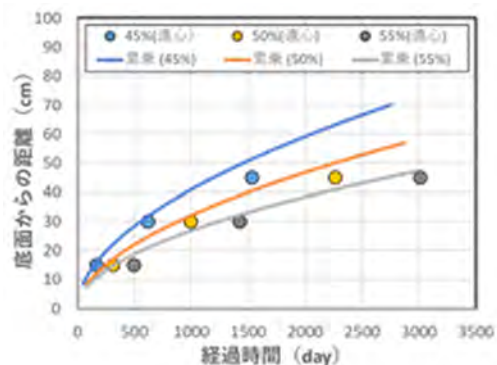


図-7 各飽和度の経過時間と底面からの距離の関係

- 1) 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 ニアフィールドシステム評価確証技術開発 報告書、2019
- 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. <https://sctt.numo.or.jp/GeoCom2/faces/project/view.xhtml>
- 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年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学確証技術開発）人工バリア品質/健全性評価手法の構築(その2)－緩衝材、2018

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～平成34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プラグや埋め戻し材などの坑道シーリング技術について、これまでの設計概念の詳細化や施工技術の成立性の確認に向けて、坑道シーリングが処分場全体の閉じ込め性能に与える影響の評価や湧水を伴う割れ目帯などの様々な地質環境特性を考慮した試験を行うことの重要性が示された¹⁾。これを受けて、本事業では、平成30～31年度の2カ年計画で、坑道や掘削影響領域が水みちとなり地下施設と地上とが直結する物質移行経路となり得る可能性について、室内試験や原位置試験を通じて検証するとともに、多様な地質環境条件を考慮した物質移行経路の分析などを通して坑道シーリングに期待する性能の具体化や設計評価技術の改良・高度化を進める。併せて、施工オプションの整備や品質管理手法の高度化に資する基盤情報を整備する。

本事業の実施項目を表-1に示す。当センターでは、“製作・施工技術に係る品質保証体系の整備”と“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。

表-1 本事業の実施項目

- | |
|------------------------------------|
| (1) 高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発 |
| 1) 製作・施工技術に係る品質保証体系の整備 |
| (2) 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備 |
| 1) 坑道シーリングの設計・評価技術の整備 |
| 2) 坑道シーリング技術の性能確認 |
| 3) 坑道シーリングに関わる施工技術の整備 |

「製作・施工技術に係る品質保証体系の整備」では、人工バリア及び他の地下構成要素の製作・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、地下構成要素の製作・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及び知見やデータ等の体系化に資する基盤情報を整備する。また、地下構成要素の状態把握に関する無線技術を地下環境での適用性確認試験等により高度化するとともに、原位置状態把握

に係る新たな有用技術の導入に向けて、新たな技術の実用化レベルや開発動向を調査する。

「坑道シーリングに関わる施工技術の整備」では、サイト選定プロセスの進展に伴い具体化される地質環境や処分概念に対応可能な埋め戻し材の材料特性データを整備する。また、埋め戻し材の小規模施工試験等を実施して、施工技術に応じた施工プロセス管理手法の構築に資する基盤情報を整備する。

以下に、当センターが担当した高レベル放射性廃棄物に対する人工バリア等の製作・施工技術に係る品質保証体系の整備及び坑道シーリングに関わる施工技術の整備についての内容を示す。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²⁾。

◇平成30年度の成果²⁾

(1) 製作・施工技術に係る品質保証体系の整備

1) 性能確認プログラムの構築に資する諸外国の先行検討動向の調査

人工バリアや他の地下構成要素に対する品質管理やモニタリングを包含する品質保証体系として、「性能確認プログラム」と称される体系的な取り組みが国際的に共有されつつある。このような取り組みについて、諸外国で類似する検討事例やモニタリングに関する国際共同研究における検討動向などの調査を行い、わが国に適用可能な性能確認プログラムの構築に資する技術情報として整理した。調査対象国は、地層処分事業が先行しているスウェーデン、フィンランドに加えてフランス、スイス、カナダとした。

処分事業の進捗状況に応じて検討状況は異なるが、人工バリアや地下構成要素の品質保証体系の構築に向けた取り組みが各国で進められている。処分事業が先行しているスウェーデンとフィンランドでは、品質保証体系を構成する要素の一つである地下構成要素の材料管理や製造・施工プロセス管理手法の整備に向けた取り組みが進められており、材料調達から製造までの各段階で検査を行うことが検討されている。これらの手法の

整備のために、事前の室内試験や地上施設または地下施設での実寸大の施工試験などが実施されている。

また、主要国における操業時のモニタリングプログラムの考え方やモニタリングに関する国際共同研究（MoDeRn2020）における検討動向から、モニタリングの目的として意思決定の支援やセーフティケースに対する信頼感の醸成などが示唆される。スウェーデンでは、安全機能を損なう可能性を懸念して、人工バリアに関する原位置でのモニタリングは実施しない計画であるが、スウェーデン以外の4か国では、パイロット施設などで操業中のモニタリングを実施することが検討されている。但し、規制要件などとも関連するモニタリングの実施場所、対象、計測項目などの詳細は、今後の処分事業の進展に伴い策定される予定である。

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

本年度は、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で実施中の人工バリア性能確認試験における無線伝送実証試験を継続するとともに、深度500mから地表までの伝送を想定した無線伝送システムの概念検討を実施した。

人工バリア性能確認試験における無線伝送実証試験では、平成26年度に無線伝送装置を設置してから約51カ月間、2回/日の頻度で土圧や間隙水圧のデータを収集している。設置した無線伝送システムのバッテリーの設計寿命は10年であり、これまでに大きなトラブルが発生することはなく、4年以上に渡って計測データが収集できている。

深度500mから地表までの無線伝送システムの概念検討では、複数の中継装置（通信距離80m）を用いたケース（ケース1）、中継装置に大型アンテナ（通信距離160m）を接続したケース（ケース2）、中継装置に長距離伝送装置（通信距離500m程度、別電源付き）を接続したケース（ケース3）の3ケースのシステム概念を構築し、信頼性、実現性、開発コスト等について比較検討した。検討結果を表-2に示す。各ケースの評価結果から、深度500mからの無線伝送システムと

しては、現段階ではケース2が適していると考えられる。

今後は、引き続き無線伝送実証試験を継続するとともに、ケース2の無線伝送システムの具体化を進める。

表-2 無線伝送システムの検討結果

	ケース1	ケース2	ケース3
	小型送信機 中継装置	大型アンテナ 中継装置	長距離アンテナ 中継装置
中継段数	6段	3段	1段
信頼性	△	○	○
実現性	◎	○	△
コスト	○	◎	△
総評	○	◎	△
備考	新規開発要素は少ないが、機器台数が多い。	信頼性、コスト面で優位。複数系統化が難しい。	長距離伝送用アンテナ、電源の開発費が高額。

※信頼性：◎信頼性が高い、○中程度、△信頼性が低い
 実現性：◎開発要素が少ない、○中程度、△開発要素が多い
 コスト：◎コストが低い、○中程度、△コストが高い

② 地下環境における無線給電技術の実証試験

これまでの磁界共振結合方式による給電技術の開発成果³⁾を基にして、「複雑な系を想定した設計方法」及び「給電効率・受電電力・受電器の負荷抵抗の関係を考慮したシステム設計」を念頭に、無線給電技術の実証試験に向けた技術課題の検討・抽出を実施した。以下に「複雑な系を想定した設計方法」に関する検討結果について抜粋整理する。

複雑な系を想定した設計方法の検討では、1つの送電器から複数の受電器に同時に給電を行うシステムの設計手順を検討した。設計手順を表-3に示す。表-3に基づいて複雑な系における無線給電システムの試設計を実施し、受電器の負荷抵抗と給電効率の関係を解析により求めた。解析では、送電器及び受電器のコイル直径を370mm、電源の電圧を100Vとし、送受電間距離185mm～740mmにおいて受電器に設置される負荷抵抗を0ohm～300ohmとした時の給電効率と受電電力を求めた。解析結果を図-1に示す。送受電器間距離が長くなると給電効率が低下し、送受電間距離に応じて給電効率が最大になる負荷抵抗が存在することがわかった。この結果から、送受電器のサイズと位置関係に応じて給電効率を推定

することができるようになった。

表-3 複雑な系のシステム設計手順

1	送受電器のサイズや位置関係を設定する
2	送受電器のコイルの自己インダクタンスや相互インダクタンスなどを、試験や解析により示す
3	磁界共振結合の無線給電における等価回路を考える
4	等価回路を回路方程式で示し、給電効率を解析する
5	送受電器のサイズや位置関係と給電効率の位置関係を評価する

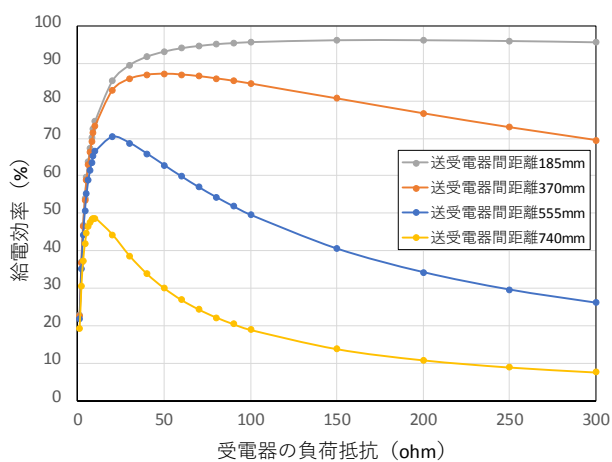


図-1 受電器の負荷抵抗と給電効率の関係

③新たなセンサー技術に関する開発動向の調査

地層処分事業におけるモニタリングに利用できる可能性のある新たなセンサー技術について、国内外の開発動向を調査した。調査対象は、処分事業が進んでいる諸外国、国際共同研究プロジェクト (MoDeRn2020)、国内の中深度処分等における検討動向などを対象とした。

調査の結果から、例えば温度やひずみなどの計測項目に対して多様なセンサーや測定技術の適用性が検討されており、その中で光ファイバーセンサーは、幅広い計測項目(温度、ひずみ、変位、圧力、放射線、pH、水素検知等)に対する適用性が検討されていることがわかった。光ファイバーセンサーは、長期間の耐久性があり、1本の光ファイバーで全長にわたる分布型の計測ができるなどの利点を有しているため、地層処分の操業段階だけではなく、事前の類似環境における実証試験などへの適用も期待できる。

(2)埋め戻し材の特性を踏まえた施工オプションの整備

模擬掘削土を用いた埋め戻し材の材料特性及び特性に影響を及ぼすパラメータの特定ならびに撒き出し転圧工法と吹き付け工法を対象とした施工性等を確認するために、室内試験及び小規模施工試験を行った。

1)埋め戻し材の材料特性試験 (室内試験)

表-4 に示す材料を用いて、材料パラメータ及び締固めエネルギーが埋め戻し材の材料特性に与える影響を確認するために、ベントナイトの種類 (Na 型、Ca 型)、混合率、模擬掘削土の種類 (火成岩、堆積岩など)、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。ここでは、締固め特性に関する結果を示す。

表-4 埋め戻し材の構成材料

材料	種類	仕様	
ベントナイト	Na 型	クニゲル V1	
	Ca 型	クニボンド RW	
模擬掘削土	ケイ砂	三河ケイ砂 3号	
		三河ケイ砂 6号	
	火成岩類	流紋岩	碎石 2005・砕砂
		安山岩	碎石 2005・スクリーングス
		玄武岩	碎石 2005・砕砂
		花崗岩	碎石 2005・砕砂
	堆積岩類	砂岩	碎石 2005・スクリーングス
		凝灰岩	碎石 2005・砕砂
珪藻土		8mm 以下	
泥岩		19mm 以下	

①ベントナイト種類及び混合率等の影響

模擬掘削土にケイ砂 6号を用いた場合の締固め曲線 (ベントナイト種類: Na 型、Ca 型、締固めエネルギー: E_c 、 $2E_c$ 、 $4.5E_c$ 、ベントナイト混合率: 15、30%) を図-2 に示す。

ベントナイト混合率 15%では、締固めエネルギーにかかわらずベントナイト種類が締固め性に与える影響は小さかった。しかし、ベントナイト混合率 30%では、全ての締固めエネルギーにおいて、Na 型に比べて Ca 型の方が最大乾燥密度は小さく、最適含水比は高くなった。また、ベントナイト混合率 15%に比べて、ベントナイト混

合率 30 %では、締固めエネルギーの増加に伴う最大乾燥密度の増加割合についても大きいことがわかる。なお、模擬掘削土に玄武岩、砂岩を用いたケースでもケイ砂 6 号のケースと同様の傾向がみられた。

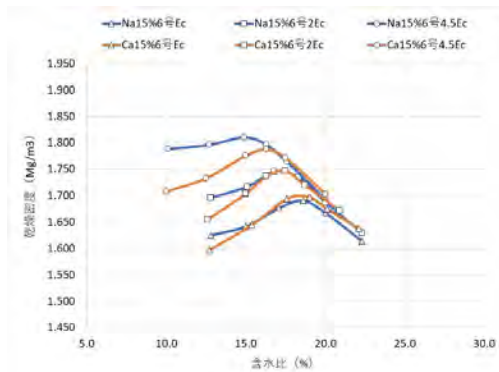


図-2 締固め曲線（ケイ砂 6 号）
（ベントナイト混合率 上図：15%、下図：30%）

模擬掘削土にケイ砂 6 号を用い、締固めエネルギーを 4.5Ec としたときの Na 型及び Ca 型ベントナイトの混合率と最大乾燥密度の関係を図-3 に示す。

Na 型ベントナイトでは混合率の増加に伴い、最大乾燥密度が増加した。一方、Ca 型ベントナイトでは混合率 5 %から 15 %で最大乾燥密度は増加したが、混合率 15 %をピークに、混合率 30 %、50 %では最大乾燥密度が低下した。

以上の結果から、混合率 15 %に比べて 30 %では、締固め特性に対するベントナイトの種類及び締固めエネルギーの影響が大きくなることが確認された。また、ベントナイトの種類により、埋め戻し材の締固め特性（最大乾燥密度）が最大となるベントナイト混合率は異なり、本試験条件においては、Na 型で混合率 50 %、Ca 型で混合率 15 %

の場合に最大乾燥密度が最も高くなることがわかった。

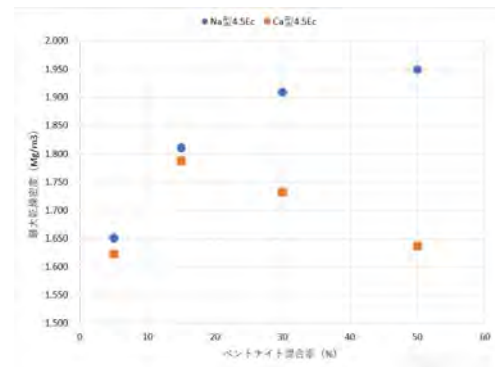


図-3 ベントナイト混合率と最大乾燥密度の関係

② 模擬掘削土の種類の影響

模擬掘削土として火成岩類とケイ砂 6 号及び堆積岩類とケイ砂 6 号を用いた試験ケースの締固め曲線をそれぞれ図-4 及び図-5 に示す。なお、ベントナイトは Na 型、ベントナイト混合率は 15 %、締固めエネルギーは 1Ec である。

図-4 より、本試験で使用した火成岩類を用いた試験ケースでは、全てケイ砂 6 号のケースよりも最大乾燥密度は高かった。一方、図-5 の堆積岩類を用いた試験ケースでは、珪藻土と泥岩を除く試験ケースでケイ砂 6 号の試験ケースよりも最大乾燥密度は高くなった。

珪藻土及び泥岩は、他の岩種と比べて吸水率が高いため岩内部の空隙が多いと考えられる。つまり、珪藻土及び泥岩の最大乾燥密度が他の岩種と比べて低くなったのは、締固めエネルギーの一部が岩の破碎に使われたためと考えられる。これらの岩の破碎の影響については、今後の試験で確認する予定である。

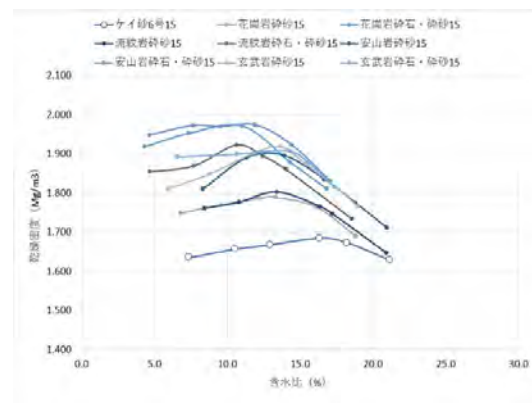


図-4 ケイ砂 6 号及び火成岩類の締固め曲線

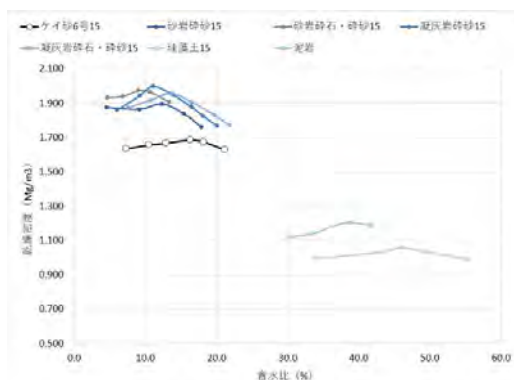


図-5 ケイ砂 6 号及び堆積岩類の締固め曲線

2) 埋め戻し材の小規模施工試験

小規模施工試験では、撒き出し・転圧工法及び吹付け工法を対象として、埋め戻し材の構成材料及び配合の組合せに応じた最適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物性データを取得した。ここでは、撒き出し・転圧工法の結果について以下に示す。

① 施工性

施工試験のケースと試験状況を表-5 及び図-6 に示す。模擬掘削土としてケイ砂 6 号を用い、ベントナイトの種類 (Na 型、Ca 型)、転圧機械 (4 種類)、撒き出し厚さ (100~300 mm) をパラメータとして施工試験を実施した (試験ピット内の幅 1 m×長さ 4 m の区間)。

表-5 施工試験の試験ケース

No.	ベントナイト	模擬掘削土	撒き出し厚さ
A-1-1	クニゲル VI (15%)	ケイ砂 6 号	100
A-1-2			200
A-1-3			300
B-1-1	クニボンド RW (15%)	ケイ砂 6 号	100
B-2-1			(高含水比)
B-1-2			200
B-1-3			300
C-1-1		玄武岩(砕砂)	300
D-1-1	クニゲル VI (15%)	玄武岩(碎石・砕砂)	300
E-1-1		砂岩(砕砂)	300

4 種の転圧機械と締固め度 (施工試験終了時) の関係を図-7 及び図-8 に示す。図-7 は、クニゲル VI 及びクニボンド RW とケイ砂の試験ケース、

図-8 は撒き出し厚さ 300 mm のケース (模擬掘削土の違いによる比較) である。締固め度は、室内で実施した締固め試験結果 (4.5Ec) から算出した。

プレートコンパクタ、バイプロコンパクタ、ハンドガイド振動ローラ、小型振動ローラと施工機械の転圧能力 (締固めエネルギー) が高くなるにつれて締固め度は大きくなった。また、撒き出し厚さ (100, 200, 300 mm) が締固め度に及ぼす影響は小さかったことから、土木分野で一般的に設定される撒き出し厚さ 200~300 mm での施工が可能であることがわかった。



図-6 撒き出し・転圧工法による試験状況

図-7 及び図-8 より、小規模施工試験ではベントナイトの混合率を 15%、模擬掘削土の種類を玄武岩と砂岩に設定したため、室内試験の結果と同様にベントナイト及び模擬掘削土の種類の違いによる締固め度への影響は見られず、小規模施工試験においても、室内試験と同様の傾向が確認された。

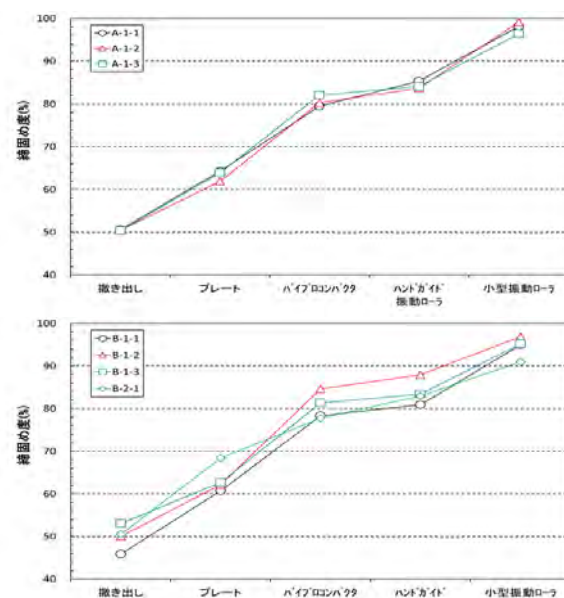


図-7 転圧機械と締固め度の関係

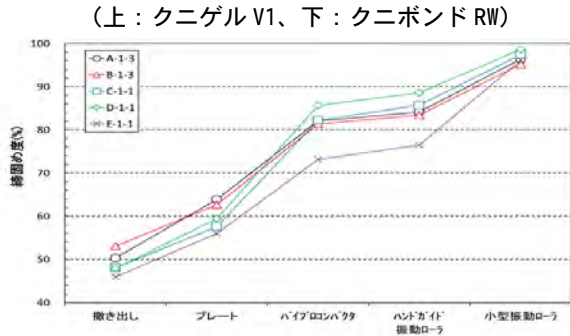


図-8 転圧機械と締固め度の関係
(模擬掘削土の違い)

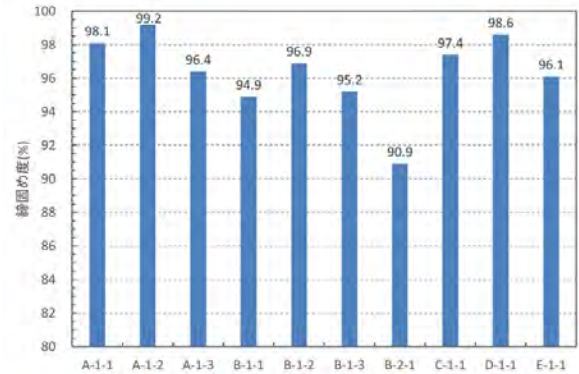


図-9 各試験ケースの施工後の締固め度

②施工試験後の埋め戻し材の品質確認

各試験ケースにおいて小型振動ローラを用いた場合の締固め度を図-9 に示す。今回の試験条件では、設定含水比の高いB-2-1のケースを除いて、小型振動ローラを用いて施工することで、締固め度 95 %以上の密度を達成することが可能であることがわかった

小規模施工試験と室内試験における透水係数と有効モンモリロナイト密度の関係を図-10及び図-11 に示す。図-10 は模擬掘削土にケイ砂を用いたケース、図-11 は玄武岩、砂岩を用いたケースを表している。クニゲル V1 混合土の場合、模擬掘削土がケイ砂6号、玄武岩、砂岩のいずれの場合も、室内成型の供試体と施工試験後に採取した供試体の透水係数に有意な差はみられなかった。一方、クニボンド RW 混合土の場合は、1 点を除いて全て施工試験後の供試体の透水係数の方が室内試験の透水係数より小さかった。Ca 型ベントナイトを用いた貧配合のベントナイト混合土は、膨潤性能が低いため、室内試験における透水セルと供試体とのわずかな隙間が水みちになった可能性や施工試験における品質のばらつきが考えられる。今後は、模擬掘削土として碎石・砕砂を用いたデータを拡充し、得られた結果から埋め戻し材の施工プロセス管理手法の構築に資する基盤情報として整備する。

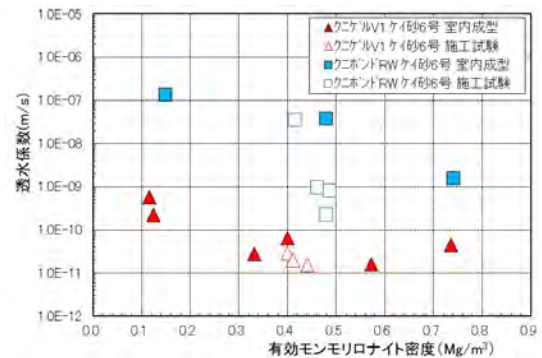


図-10 小規模施工試験と室内試験の透水係数
(ケイ砂)

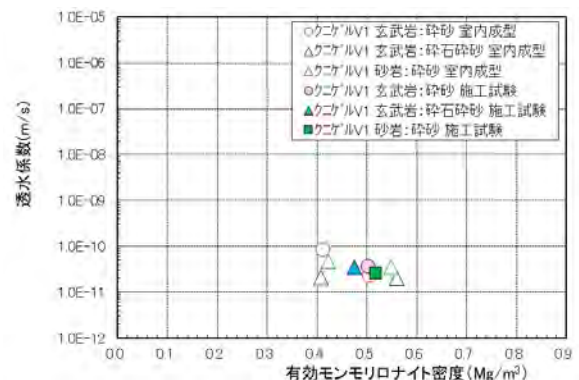


図-11 小規模施工試験と室内試験の透水係数
(玄武岩、砂岩)

- 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～平成 34 年度）、2018
- 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 30 年度 地層処分技術調査等事業 地層処分施設閉鎖技術確認試験 報告書、2019
- 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 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確認技術開発 平成 25 年度～平成 29 年度の取りまとめ報告書、2018

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

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。

このような状況を踏まえ、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。

回収可能性に関連する技術的な取組については、資源エネルギー庁の基盤研究開発として、これまでに次のような調査等事業が進められてきた。

- 地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発）（平成19～24年度）¹⁾
- 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23～26年度）²⁾

これらの事業では、遠隔搬送・定置といった操業技術に関する要素技術開発や地上での適用試験な

どを通して基盤技術としての整備を進めるとともに、一連の回収作業において重要な役割を担う緩衝材除去技術について、塩水を利用した緩衝材除去試験を地上で実施し、その適用性に関する検討を進めてきた。また、資源エネルギー庁の原子力発電施設広聴・広報等事業では（平成20～26年度地層処分実規模設備整備事業）³⁾、これまでの研究開発で整備した人工バリア材料や緩衝材の定置装置等の公開を通して、操業に係る工学技術の理解等に資する実規模施設の整備・運用を行ってきた。

これらの経緯を踏まえ、これまでに開発してきた技術の更なる信頼性の向上に向けて、実際の地下環境での原位置実証試験等を通じた技術の高度化が望まれる。

以上のような背景のもと、平成27年度からの5ヵ年計画で着手した本事業では、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次の取組を進めている。

- ①地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発－実証試験（3-2）
- ②回収可能性の維持についての検討（3-3）

上記のそれぞれについて、次節以降に平成30年度の実施内容や成果を整理する。

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）」により実施したものである⁴⁾。

- 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19～24年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発）報告書、2013
- 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23～26年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連 地層処分回収技術高度化開発）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20～26年度原子力発電施設広聴・広報等事業（地層処分実規模設備整備事業）報告書、2015
- 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（第1分冊）、2019。

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

本事業では、最終処分施設の閉鎖までの廃棄物搬出の可能性（回収可能性）を確保するための回収技術の実証に取り組んでいる。このような取組を通じて、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いる。

現在、わが国で有望とされている2つの定置概念のうち、処分孔縦置き方式に適用する回収技術は既に地上での実規模スケールの技術実証試験を完了している¹⁾。本事業では「処分坑道横置き・PEM方式(※)」を対象としている。

※PEM：Prefabricated Engineered barrier system Module（地上施設で鋼殻に包まれた人工バリアを鋼殻容器ごと地下に搬送して、掘削した処分坑道に定置する方式）

図-1の全体工程に示すように、平成31年度に計画する充填材の除去とPEMの回収試験に向けて、1)搬送・定置技術（逆動線でも回収にも適用）、2)地下環境での隙間充填技術、3)隙間充填材除去技術のそれぞれについて、技術の検討、地上での技術整備と要素試験、地下での実証試験へと段階的な技術開発に取り組んできた。地下環境での実証試験は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。）と共同研究契約を締結し、深度350mの試験坑道2を試験サイトとして選定し、平成29年度までに模擬PEMの設置まで完了した（図-2）。

項目	H27	H28	H29	H30	H31
実証試験計画の検討					
地下実証試験設備					
搬送・定置技術 （回収技術）					
隙間充填技術					
充填材除去技術					
地下での実証試験					
実規模試験施設の活用					

図-1 実証試験の全体工程

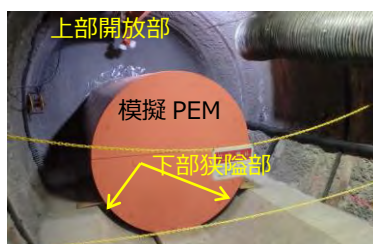


図-2 幌延 URL 試験坑道 2（平成 29 年度末）

◇平成 30 年度の成果²⁾

(1) PEM-坑道間の隙間充填技術

回収作業の前工程である除去技術の対象となる PEM-坑道間の隙間充填材は、PEM の定置後に残される処分坑道内の空間を充填するためのものであり、表-1 のような仕様や施工方式が検討されている³⁾。回収技術の実証試験環境の構築の一環として、隙間充填材の施工品質管理にも留意して整備を進めてきた充填技術を用いて、幌延 URL で充填試験を実施した。

表-1 PEM-坑道間の隙間充填材の仕様

部位	方式	充填材料	目標乾燥密度
上部開放部	吹付け	ベントナイト：ケイ砂＝ 50%：50%（3号と5号等量）	1.6 Mg/m ³ 以上
下部狭隘部	スクリー フィーダー	粒度調整した ベントナイトペレット	1.37 Mg/m ³ 以上

①下部狭隘部への隙間充填試験

図-2に示す幅十数 cm の下部狭隘部にはスクリーフィーダー方式によるペレット充填を適用した。下部狭隘部の充填装置を図-3に示す。平成29年度の地上試験の結果を基に設定した運転条件・施工プロセス（4本のスクリーコンベアそれぞれの回転速度、装置全体の後退速度等）により、地下実証試験を実施した。



図-3 スクリューフィーダー方式の充填装置

図-4に模擬PEMに対するスクリーの配置と充填後の隙間の様子を示す。隙間体積と送り込んだペレットの重量から算出した充填ペレットの乾燥密度は、左側の狭隘部では1.379 Mg/m³、右側の狭隘部では1.402 Mg/m³となり、目標乾燥密度である1.37 Mg/m³を達成した。



図-4 隙間充填装置（左）、充填後の下部狭隘部（右）

②上部開放部への隙間充填試験

図-2に示す上部開放部へのベントナイト混合土の充填工法には吹付け方式を選定した。平成29年度の予備試験（地上試験）の結果を基に設定した運転条件・施工プロセス（吹付け装置のエア量・回転数、吹付け距離等）により、地下実証試験を実施した。試験の様子を図-5に示す。



図-5 隙間充填装置（左）、コアサンプリング（右）

吹付け後に充填部から採取した試料を分析した結果、全体として目標乾燥密度である $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ を達成したことを確認した。一方で、模擬 PEM 周囲の隅角部の一部などでは、目標密度を満足しない部分があることも明らかになった（図-6）。

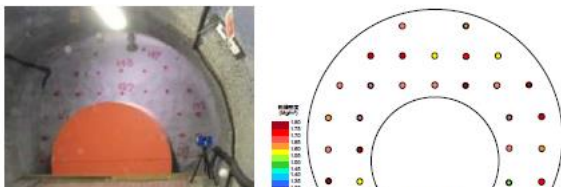


図-6 サンプリングの位置と乾燥密度分布の一例

以上より、処分坑道横置き・PEM方式に適用する隙間充填技術としてスクリーフィーダー方式や吹付け方式を採用する場合、事前に設定した運転条件や施工プロセスを、地下の施工でも同様に適用することで、施工品質の確保と再現が可能であることを確認した。

(2)隙間充填材除去技術

隙間充填材の除去の目的は、定置後に PEM を拘束している充填材からの縁切りと、回収装置の動作環境の構築である。更に、充填材の解砕技術の選定に際しては、PEM 鋼殻に与える影響を避ける必要性に留意した。坑道近傍部は PEM から離れているため、除去効率を重視した“機械的除去方式”を、PEM 近傍及び下部狭隘部は PEM 鋼殻へ与える影響が小さい“流体除去方式”を選定した。解砕物の捕集・撤去については、狭い空間に対して連続的に撤去が可能なバキューム方式とした。

①機械的除去技術の整備

平成29年度に選定したオーガ方式について、除去装置（アタッチメント）を製作し、上部開放部の隙間充填材と同仕様の供試体（乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ 、含水比 16%、 $1\text{m}\times 1\text{m}\times 0.7\text{m}$ ）に対する地上試験を実施した（図-7）。地上試験では、1) 除去装置による切削・吸引捕集の可否、2) 1孔あたりの切削量・時間、3) 連続的な切削の状態等に関する知見を得た。

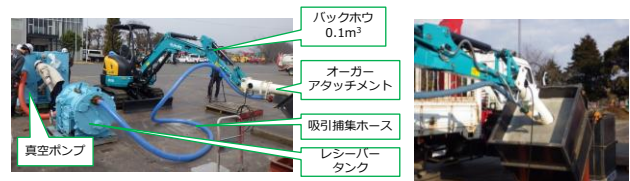


図-7 機械的除去技術に関する地上試験の様子

②流体的除去技術の整備

平成28年度に選定したウォータージェット方式（切削水の運動エネルギーで対象物を粉砕）の除去装置を製作し、地上での要素試験を実施した（図-8）。同試験では、1) 噴射ノズルの選定、2) ノズルの動きの違い（円弧運動、前後運動の組合せ）に応じた充填材の切削状況の確認、3) 地上施設における実寸大の下部狭隘部を除去対象とした地上試験を実施し、地下での除去試験の手順、装置の運転条件を取得した。

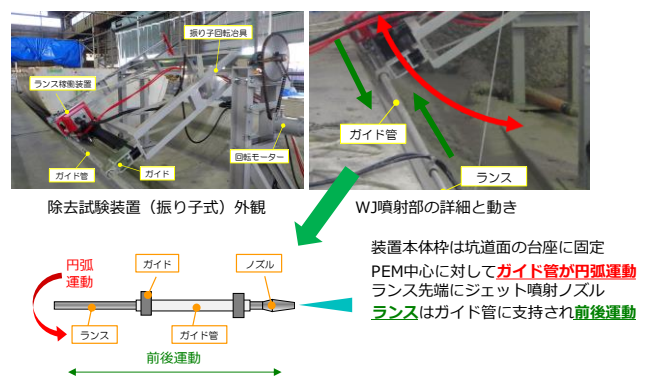


図-8 流体的除去装置

要素試験で取得した条件による充填材の除去は、後述するエアベアリング方式の回収装置が走行可能な条件よりも清浄な走行面を実現できることから（図-9）、除去技術の2つの目的を実現できる見通しを得た。これらの地上試験で得られた知見を基に、平成31年度に実施する地下環境での実証試験の計画を具体化する。



トルネードノズルによる除去後 配管清掃用ノズルによる除去後
 図-9 流体的除去技術による下部狭隘部の除去の様子

(3) 搬送定置・回収技術の実証的整備

本事業では、PEMの回収作業は定置作業の逆動線で行うこととしている。平成29年度までに幌延URL試験坑道2に現場打設したコンクリート面において、4枚のエアベアリングを備えた要素試験装置を使用した走行試験を実施し、実打設面の気泡痕、凹凸や表面粗さ等、鋼製模擬坑道と異なる条件でのエアベアリングの適用性、重量物搬送時の運転パラメーターを取得した。

平成30年度は回収作業を想定した隙間充填材除去後の走行面におけるデータを取得する試験を実施した。PEM下部の狭隘部の除去作業はウォータージェットを使用することから、吸水させたベントナイトを坑道面上に塗布した環境、濡れたコンクリート坑道面環境など、実際の隙間充填材の除去後の走行面の状態を想定して、要素試験装置を使用した走行試験を実施した(図-10)。



図-10 充填材除去後の環境を想定した要素試験の様子
 (左：散水した走行面、右：ベントナイトペースト)

要素試験装置に14.5tの錘を載せ、エアベアリング1枚当たりの分担荷重を実機と同等とし、乾燥コンクリート面、散水した面、ペースト状のベントナイトを塗布した面のそれぞれで取得した牽引力を図-11に示す。今回の要素試験により、幌延URL試験坑道2の実打設面(乾燥コンクリート面)でPEM相当の重量物をエアベアリングで搬送するための供給空気量及び牽引力は共に増加するものの、実際の坑道面にてエアベアリングによるPEMの搬送・定置が可能である見通しを得た。

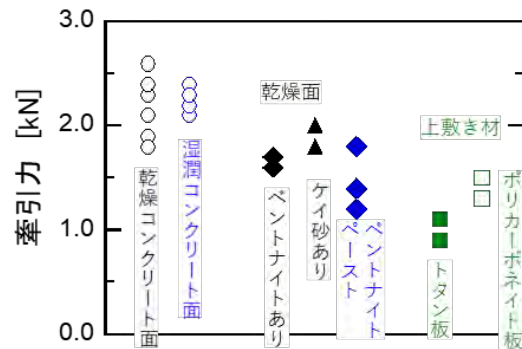


図-11 走行面の性状と牽引力(地上要素試験)

(4) 地層処分実規模試験施設の運営

平成30年度も引き続き、実規模施設の公開、来館者への設備の説明等を実施した。平成30年度は延べ5,384の方が施設を訪れ、平成22年4月の施設開館からの累計は54,619人となった(平成31年3月31日までの集計)。また、「おもしろ科学館2018 in ほろのべ」の開催日(7/21(土)、22(日))に合わせ、緩衝材定置試験を一般公開した。2日間で792名が来館し、来館者は定置装置の運転や緩衝材の止水試験等を体感した。また、施設に常駐する試験員が、来館者からのコメントや質問を来館者記録として来館者の属性と共に記録し、本施設を訪れる来館者の属性や興味・関心事項の傾向を把握した。

- 1) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、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(第2分冊)、2019.4)
- 3) 原子力発電環境整備機構、NUMO-TR-18-03、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

3-3 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、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」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平成25年度より検討に着手しており²⁾、平成27年度からの5ヵ年では、処分場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いる^{3), 4), 5), 6)}。

平成27～28年度には、回収可能性を維持した場合の影響要因の抽出・分析、及び回収可能性の維持に必要な技術の抽出・整理に向けて、二つの候補概念（処分孔縦置き・ブロック方式、処分坑道横置き・PEM方式）を対象として検討を行った^{3), 4)}。また、回収可能性を一定期間維持することに伴う処分場の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、平成27～28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、平成29年度に回収可能性を維持した場合の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（表-1）。

以上の経緯を経て平成29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いる⁵⁾。

平成30年度は、技術検討項目に対して、以下の取組を進めた⁶⁾。

- 安全性への影響の定量的な評価技術の整備に向けた既存技術の整理と課題抽出
- 安全性への影響に関する定量的評価方法の検討
- 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

◇平成30年度の成果

(1)安全性への影響の定量的な評価技術の整備に向けた既存技術の整理と課題抽出

R&R 検討会で整理された安全性への影響に関する「技術検討項目」は表-1の11項目である。

表-1 安全性への影響に関する技術検討項目

番号	定量化に必要な技術検討項目
1	(1)操業中の安全性への影響
2	・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）
3	b. 開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響
4	・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
5	b. 再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響
6	・回収時の廃棄体容器の健全性
7	(2)閉鎖後長期の安全性への影響
8	・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
9	b. 廃棄体からの熱による影響
10	c. 坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響
11	・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

上表に示す技術検討項目ごとに、安全性への影響の意味や指標を整理し、回収維持期間中の状態等の時間変化を考慮して影響を評価できる既存の解析技術の有無やその特徴等の整理を行った。さらに、技術検討項目の定量的評価の実施における課題を抽出し、課題に対する本事業での対応方法等を整理した。その結果、上表の赤字で示した番号1、3、8、9、10、11の6項目は、既往の類似検討事例に乏しく、今後の定量的な評価のために解析技術等の整備が必要であることが明らかとなった。本事業では、特にこの6項目に注力して、評価方法の具体化に向けた検討を進めている。

(2)安全性への影響に関する定量的評価方法の検討

1)技術検討項目に対する影響評価方法の整理

技術検討項目の個々で想定される現象や影響は、複数の現象の相互作用である。従って、上記の6項目について、評価対象として考慮すべき現象や影響を及ぼす可能性のある現象の関連性を整理し、評価手法を一連の評価手順（フロー）として整理しておくことが有益である。整理の一例

として、開放坑道の健全性（空間安定性）に関する評価フローを図-1に示す。

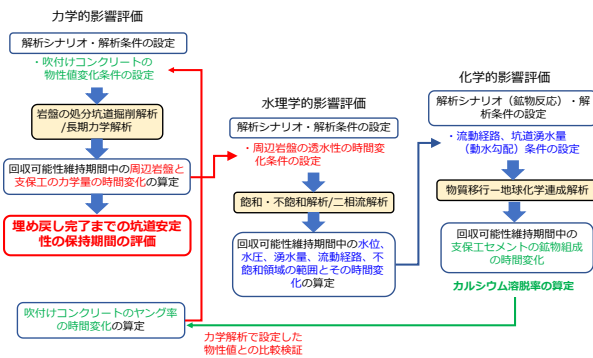


図-1 評価手法のフローの例
「開放坑道の健全性（空間安定性）」

開放坑道の健全性（空間安定性）を定量的に評価するうえで対象となる現象や物理量は、坑道構築の直後から埋め戻しまでの期間における、支保工の健全性（変形等に伴う性能劣化の程度）であると考へた。従って、開放坑道の健全性を支保工の力学的影響の観点から評価することとして、相互に影響を及ぼし合う2つの要素（岩盤及び支保工）の変形量の時間変化（ひずみの進行の程度）を算出することで、坑道の安定性を定量的に評価できると考へた。岩盤の変形は岩盤の持つ物理特性が設定条件（与条件）となるが、支保工の変形は、岩盤からの応力のみならず、セメント系材料の溶脱に伴う強度変化等も考へる必要がある。セメント系材料の溶脱は接触する水を介して起こることから、その水の量と接触時間によって溶脱量を推定できると考へられる。そのため、支保工周辺の湧水量がセメント系材料の溶脱の程度を評価する際の与条件となる。そこで、力学的・水理学的・化学的手法を用いてそれぞれ定量化し、他の評価手法の与条件として値を引き渡すような連成を念頭に置いた評価フローが考へられる。図-1に示したように、力学的手法によって周辺岩盤の透水性の時間変化を、水理学的手法によって流動経路及び坑道湧水量（動水勾配）を、さらに化学的手法によってセメント系材料（支保工）からのカルシウムの溶脱に関する解析を行った。得られる溶脱率から支保工の劣化の進行を見積もり、これを力学解析の与条件として引き渡す。このように、技術検討項目の1つを定量化する際に、複数の現象を対象とした定量化とその結果の

反映が必要となるものもある。

2) 安全性への影響の定量化方法の検討

ここでは、図-1の評価手法のフローに従って、定量化方法の具体的な流れを示す。本年度は水理学的及び化学的影響評価方法の検討を行い、前年度までに整備した力学的影響評価において与条件となる支保工の劣化等のパラメータとしての設定方法を検討した。

処分坑道の支保工の構成材料であるコンクリートには、地下水との接触によるセメント水和物の成分の溶脱、鋼材の腐蝕膨張によるひび割れ、アルカリ骨材反応によるひび割れ、CO₂の浸透による中性化などの劣化現象が起きる。このようなセメント系材料の劣化現象に関する前年度までの検討^{4),5)}では、地下水との接触によるセメント水和物からのカルシウムの溶脱の影響を支保工の剛性の低下として考へし、コンクリートの溶脱特性は既往の研究⁷⁾を参考に設定していた。

本年度の化学的影響評価方法の検討は、物質移行-地球化学連成解析により、高Cl⁻濃度地下水の場合の吹付けコンクリートのカルシウムの減少に関して、表-2に示すケースを対象に実施した。

表-2 解析ケース

ケース名	透水係数 (m/s)	速度論係数	確認事項
	岩盤・支保工	セメント・鉱物	
HC-021	3 × 10 ⁻⁹ (標準)	標準	高Cl地下水による支保工変質
HC-022	3 × 10 ⁻⁹ (低透水)	標準	同 低透水の場合
HC-031	3 × 10 ⁻⁹ (標準)	標準 × 0.1	同 速度論係数小の場合
HC-032	3 × 10 ⁻⁹ (低透水)	標準 × 0.1	低透水かつ速度論係数小の場合

一例として、ケース HC-022 の解析結果を図-2に示す（単位体積当たりのカルシウム量の初期量に対する比率を示す）。初期鉱物と二次鉱物に含まれるカルシウム量の比率の合計と初期量の差が、カルシウムの溶脱率となる。経過時間500年以降、その変化が止まっているが、これは、初期鉱物中の反応に寄与する鉱物が全てなくなり、反応に寄与していないカルシウム鉱物だけが残ったためである。

解析により得られた溶脱率から、既往の実験式等^{8),9)}を適用して推定した吹付けコンクリートのヤング率を図-3に示す。図中の破線は前年度までの力学的影響評価で想定したヤング率の変化であり、ケース HC-022よりは初期の低下速度が

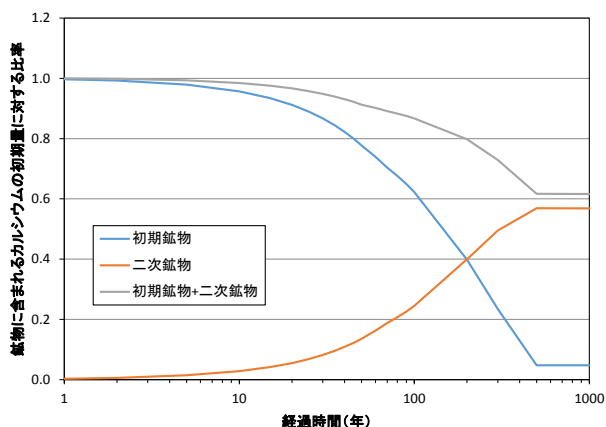


図-2 鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（ケース HC-022）

遅いが、経過時間 200 年程度までは大きく外れた設定ではなかったことがわかった。ただし、初期の強度低下は透水性や地下水組成等の地質環境条件に大きく依存することから、条件設定に注意が必要である。

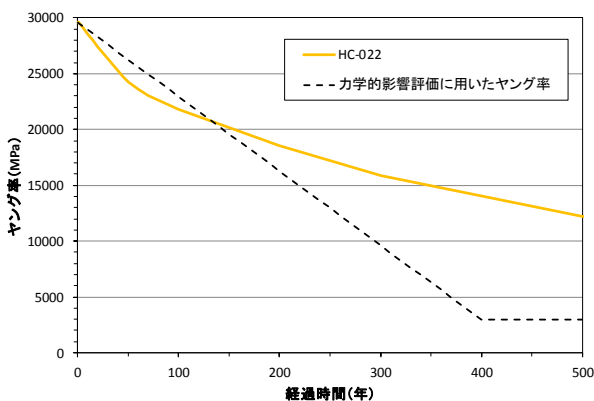


図-3 ケース HC-022 の解析結果から推定したヤング率と力学的影響評価に用いたヤング率の比較

以上、ここでは定量的評価方法に関する多様な検討結果の一例として、図-1 に示す評価手法について紹介した。このような回収可能性を維持した場合の安全性への影響の定量的評価方法に関する検討を通して、定量化における重要なパラメータを抽出するとともに、基本方針で示された課題である施設閉鎖までの管理の在り方の具体化を支援する定量的な情報の提供に貢献できると考える。

(3) 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

R&R 検討会では、OECD/NEA の Reversibility and Retrievability プロジェクトで示された回収可

能性に関する技術的な取組に関する次の 2 つの技術的対応の方向性¹⁰⁾を確認するとともに、我が国でも採用し得る共存可能なものと整理した⁵⁾。

- ・ 技術的アプローチ 1：回収方法（技術・装置）の開発に重点をおくアプローチ
- ・ 技術的アプローチ 2：回収をより容易にするための方法を設計に考慮するアプローチ

R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目⁵⁾には、技術的アプローチ 1 と 2 の双方が包含されている。以下に、技術的アプローチ 2 に対応した「より回収の容易性を高めた処分場の設計開発」に関する平成 30 年度の検討成果について整理する。

1) 回収の容易性を高めることの方考え方及び視点の整理

R&R 検討会では、回収の容易性を示す多様な指標のうち、“廃棄体の回収作業時間”をここでの技術検討における指標として取り上げている。但し、地下施設展開や坑道設計等が確定しないジェネリックな段階では全ての廃棄体の回収に要する時間を定量的に示すことはできないことにも留意して、回収作業時間の短縮に資する設計への考の考え方が次のように示されている⁵⁾。

- ① 回収可能性の維持期間内において、廃棄体へのアクセスを容易にしておく
 - ② 回収可能性の維持期間内において、可能性のある将来の回収作業が容易となるようにしておく
- ここでは、①を“アクセス性”、②を“ハンドリング性”として、回収の容易性向上に係るそれぞれの視点を次のように整理した。

廃棄体への“アクセス性”が高まれば、結果として回収作業時間の短縮が可能である。アクセス性の向上を図るには、次のような要素が考慮事項として挙げられる。

- ・ 処分坑道から廃棄体までのアクセス経路を確保するための作業量の少なさ
- ・ 処分坑道から廃棄体までの物理的な距離

ジェネリックな現段階における本検討では、処分場レイアウト設計は検討の対象外とせざるを得ないことから、ここでのアクセス性とは、主要坑道から先の「処分坑道から廃棄体」までのアクセス性とした。

廃棄体までのアクセスが確保できた後の回収作業を念頭に、そこでの“ハンドリング性”が高まれば、回収作業時間の短縮が可能となる。廃棄

体のハンドリング性の向上を図るには、回収の対象となる廃棄体の「物量」、「重量・形状」、「健全性」さらに回収作業の「動線」や「環境」といった要素が考えられる。「動線」及び「環境」については、主として処分坑道や処分孔に対する「動線」及び「環境」を対象とし、処分場全体のレイアウトにも関与する「動線」、「環境」は検討対象外とした。

2) 回収の容易性を高めるための工夫のポイントの抽出

回収の容易性を高めた代替設計オプションとして考慮する工夫のポイントを検討するため、これまでの国内外で検討された既存の処分概念の調査を行い、上記の回収の容易性向上の視点から工夫のポイントをまとめた。海外の処分概念の調査では、処分場設計を含む技術報告書が公表されている8か国（フランス、米国、スウェーデン、フィンランド、スイス、ベルギー、ドイツ、カナダ）を対象とした。これらの国の中で、回収の容易性を意図して概念を構築している国はフランスのみである。また、海外の処分概念は各国固有の法規制要件や母岩特性等を考慮して構築されていることから、我が国の事業環境や地下環境にそのまま適用できるとは限らないことに留意が

必要である。また、国内でこれまでに検討された処分概念の調査では、2004年以降のNUMOの技術報告書^{11),12)}を対象とした。以上の調査から、回収の容易性の向上に寄与するものと判断した工夫のポイントを、アクセス性とハンドリング性に分けて表-3のように抽出・整理した。

今後、抽出した複数の工夫のポイントを踏まえ、選択・組み合わせならびに適用性の確認を進め、回収の容易性を高めた代替設計オプションの検討を進める。その際、操業中及び閉鎖後長期の安全性を満たす地層処分システムとしての成立性や実現性に留意が必要となる。

表-3 回収の容易性向上の視点からの工夫のポイント例

回収の容易性向上の視点	容易性向上のポイント	工夫のポイント例	
廃棄体までのアクセス性向上	<ul style="list-style-type: none"> 埋め戻し材や緩衝材等の撤去作業量を削減 	<ul style="list-style-type: none"> 埋め戻しをしない(埋め戻しの状態設定) 撤去が容易な材料の使用 小口径定置坑道、小口径処分孔の採用 PEMタイプの一体型廃棄体の使用 温度耐久性を向上させた材料使用による廃棄体の高埋設密度定置 1 処分孔に複数の廃棄体を定置する定置方法の採用 	
	<ul style="list-style-type: none"> 坑道や処分孔の安定性を確保するための作業量を削減 	<ul style="list-style-type: none"> 高耐久性の支保工の設置 高耐久性のケーシングの設置 保守作業、維持管理をしやすい坑道形状の採用 	
廃棄体のハンドリング性向上	物量	<ul style="list-style-type: none"> 1回の回収作業における廃棄体本数を増加 	<ul style="list-style-type: none"> ガラス固化体を複数格納できる容器の使用
	重量と形状	<ul style="list-style-type: none"> 回収対象物の形状を扱いやすくする 	<ul style="list-style-type: none"> 人工バリアの合理化 (PEM の緩衝材厚さの減少など) 金属容器の材質変更 (チタン等) 矩形容器の使用 把持のための治具を取り付けた容器の採用
	健全性	<ul style="list-style-type: none"> 回収対象物の健全性を確保 	<ul style="list-style-type: none"> 高耐久材料の容器の使用 厚くした容器の使用
	動線	<ul style="list-style-type: none"> 回収対象物の動作を削減 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体の定置時と逆動線となる定置方法の採用 大口径の作業坑道と小口径の定置坑道を組み合わせた定置方法の採用
	環境	<ul style="list-style-type: none"> 作業性を高めるための空間を確保 	<ul style="list-style-type: none"> 大口径の定置坑道の採用 大口径の作業坑道と小口径の定置坑道の採用 放射線防護を考えた定置方法の採用

- 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/2015/05/20150522003/20150522003-1.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) 山本修一、佐藤伸、武内邦文、佐々木規行、トンネル型処分施設における人工バリアの長期力学挙動解析、土木学会年次学術講演会講演論文集、仙台、CS05-47、p.261-262、2008
- 8) 西村繭果、棚井憲治、高治和彦、重野義政、下河内隆文、ニアフィールドの長期力学連成解析手法の構築、日本原子力研究開発機構、JAEA-Research 2007-004、2007
- 9) 日本建築学会、鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説、日本建築学会、1992
- 10) OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, Reversibility and Retrieval (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel, NEA/RWM/R(2011)4, Paris, 2011 (full report).
- 11) Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO) : Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments, TR-04-03、2004
- 12) 原子力発電環境整備機構、地層処分事業の安全確保（2010年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－、NUMO-TR-11-01、2011

4. 沿岸部処分システム高度化開発

◇事業の概要

高レベル放射性廃棄物等の地層処分については、平成 27 年 5 月に閣議決定された「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、国は科学的に適性が高いと考えられる地域を提示すること等が示された。これを受けて実施された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地層処分技術ワーキンググループにおける議論が、平成 29 年 4 月にとりまとめられ、好ましい特性が確認できる可能性が相対的に高い地域に関する考え方を示すとともに、沿岸部を“輸送面でも好ましい地域”として整理している^{1),2)}。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、別途設置された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、平成 28 年 8 月のとりまとめでは、“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、併せて技術の高度化に向けて取り組むべき課題とその方向性を示している³⁾。

平成 27 年度に開始した本事業では、上記の背景を踏まえ、沿岸部における処分システムの構築を念頭に、初年度に沿岸部の特性などに関連した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・整理するとともに⁴⁾、並行して進められた研究会にこれらの成果を提供して議論を支援した。本事業で当センターが担当した工学技術の高度化に向けた取組については、研究会で示された技術の高度化に向けて取り組むべき課題とその方向性を踏まえ（研究会で示された課題を表-1 に示す）、平成 28 年度以降の実施項目（大項目）として次の二つを設定し、含まれる個々の課題に関する調査研究計画を具体化したうえで取り組んできた。

- ①人工バリア材料などに関する劣化や変質に関する現象の把握（各種特性などのデータ拡充）
- ②塩水環境下ニアフィールド領域での処分システムの成立性に係わる手法の提示

平成 30 年度は、4 ヶ年計画で取り組んだ当該事業の最終年度であり、最終年度として計画された調査研究業務に加え、4 ヶ年の全体取りまとめを

行った。

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、平成 27 年度から平成 30 年度の 4 ヶ年の全体成果として取りまとめた内容^{4)~7),8)}を整理する。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 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）」により、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、一般財団法人電力中央研究所及び公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターの 4 機関が共同で、沿岸部における地層処分技術に関する 3 つの技術分野の高度化開発（地質環境の調査技術、工学技術、安全評価技術）として実施したものである。

表-1 研究会で示された課題（工学技術分野）

<ul style="list-style-type: none">・オーバーパックの腐食速度に係るデータの拡充・緩衝材の各種特性に係るデータの拡充・セメント系材料の各種特性に係るデータの拡充・グラウト材の各種特性に係るデータの拡充・グラウト注入施工方法及びその長期的耐久性の検討・ニアフィールド領域構成材料に係る各種データの拡充に伴う現象モデルの高度化・処分概念及びそれに必要な総合的評価手法の構築・地上・地下施設の総合的な設計の検討

◇平成 30 年度の全体取りまとめの成果⁸⁾

(1)人工バリア材料などに関する劣化や変質に関する現象の把握－オーバーパッカー

沿岸部で想定される地下水の組成のうち、塩化物イオン(Cl⁻)と重炭酸イオン(HCO₃⁻)の濃度比に着目し、溶液組成が炭素鋼溶接部の腐食の均一性に与える影響を調査した。平成 30 年度は、市販の溶接材料を用いて作製した腐食試験片（以下、「従来材」）、及び溶接部の選択的な腐食を抑制する対策として Ni を添加した改良溶接材料⁹⁾を用いた腐食試験片（以下、「改良材」）を使用した電気化学試験を実施した。

腐食試験は、80 ℃の恒温槽中で蒸留水に NaCl と NaHCO₃ を添加して調整した試験溶液に空気を吹き込んで実施した。試験溶液の組成を表-2 に示す。予め同電位分極試験を実施し、溶液ごとに保持電位を決定した。100 時間の定電位分極後に表面に生成した腐食生成物を除去し、三次元形状測定器で試験片の減肉形状を計測し、各溶液条件における腐食挙動を評価した。

表-2 腐食試験の溶液組成

Run No.	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻ (NaHCO ₃)	[Cl ⁻]/[HCO ₃ ⁻]
	(mol/L)	(mol/L)	(-)
1	6×10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁴	3
2		2.5×10 ⁻³	2×10 ⁻¹
3		2.5×10 ⁻²	2×10 ⁻²
4	2.8×10 ⁻²	2×10 ⁻⁴	2×10 ²
5		2.5×10 ⁻³	1.1×10 ¹
6		2.5×10 ⁻²	1.1
7	5.4×10 ⁻¹	2×10 ⁻⁴	3×10 ³
8		2.5×10 ⁻³	2.2×10 ²
9		2.5×10 ⁻²	2.2×10 ¹

試験後の外観観察の結果、 $[Cl^-]/[HCO_3^-] \geq 10$ では、母材・溶接部ともに全面腐食、 $[Cl^-]/[HCO_3^-] < 10$ では不動態化する傾向を示した。また不動態化する場合、 $[Cl^-]/[HCO_3^-] \geq 0.2$ では母材・溶接部ともに局部的な減肉が発生し、 HCO_3^- 濃度が高くCl⁻濃度が低い $[Cl^-]/[HCO_3^-] < 0.02$ では、設定した保持電位では減肉が認められなかった。

表面形状計測から溶接部の選択腐食の程度をGrooving factor α (=溶接部の最大深さ/全体の平均深さ)を算出した。 α について、腐食促進イオンCl⁻の存在比率($[Cl^-]/[HCO_3^-]$)でプロットしたものを図-1に示す。母材の腐食深さを基準とした場合、 $\alpha \leq 1$ で溶接部の耐食性が母材と同等以上と評価される。今回の溶液組成では、従来材の α_0 は0.8~1.5、改良材の α_1 は0.6~1.1となった。 α_1 と α_0 を比較し、改良材による選択腐食の改善効果の評価した。減肉が認められなかった溶液条件を除き、 α_1 が α_0 を下回る傾向が確認されたことから、本試験で設定した溶液の範囲においてもNi添加による選択腐食の改善手法は有効であると言える。

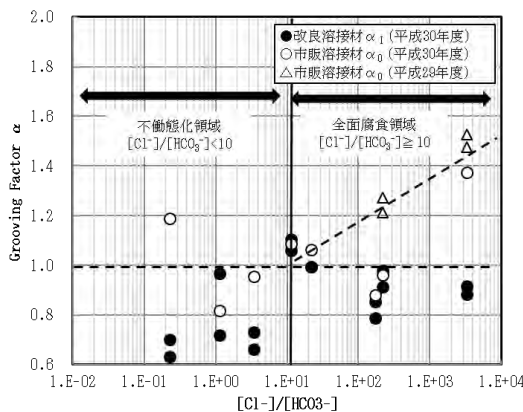


図-1 平均腐食深さに対する溶接部の最大深さの比

(2)人工バリア材料などに関する劣化や変質に関する現象の把握—緩衝材—

沿岸部に高レベル放射性廃棄物処分施設が設置される場合、人工バリアとして設置される緩衝材は海水系の地下水環境下においても求められる機能を発揮しなければならない。多様なイオン組成、イオン強度を持つ海水系地下水環境での適用性をより確からしく評価するためには、これまでに得られた知見やデータをさらに拡充する必要がある。当センターで行ったこれまでの再冠水期間の緩衝材の力学挙動に関する研究では、淡水との比較として、NaCl、CaCl₂の水溶液を使用した試験も一部行っている¹⁰⁾。それらの知見を基に、再冠水期間に考慮すべき事象をまとめたものを表-3に示す。評価対象の事象について、データの有無、影響の大きさにより優先度を検討し、緩衝材流出量、浸潤速度、残留密度分布について、海水系地下水の組成を考慮した条件での試験を行うこととした。以下に主な成果を示す。

表-3 沿岸部の地下水を対象とした場合
考慮すべき事象

影響事象	評価対象	影響因子	既往の研究における知見、緩衝材の性能に対する影響度など
膨潤性能	残留密度分布	施工品質(密度分布)	液種によって残留 密度差が大きくなる 。
		応力履歴	密度差が発生するが、履歴の差は 小さい
	二次元的浸潤	液種によって 残留密度差が大きくなる	
膨潤圧・透水性	膨潤圧・透水性	陽イオン交換・可逆性	膨潤圧に差が生じるが透水性への 影響は小さい
		浸潤速度	液種により飽和度分布の幅が 異なる 液種により浸潤速度が 異なる
流出挙動	緩衝材流出量	地下水流入条件	液種により流出量、水みちの形状が 異なる
	抑制効果	人工注水	イオン強度が高いと効果が 低い 。

1)緩衝材流出現象に陽イオン種が及ぼす影響

緩衝材の流出挙動に対する海水及び海水中の主要な陽イオンの影響の把握に向けて、小型アクリルセルを用いた試験を実施した。供試体はクニゲルV1 70 wt%、ケイ砂 30wt%の混合土を乾燥密度 1.6 Mg/m³に圧縮成形した直径 100 mm、高さ 50 mm のものを用いた。既往の研究(イオン強度を0.5としたNaCl、CaCl₂水溶液)との比較のために、同じイオン強度のKCl、MgCl₂を流速 0.1 L/minで注水した。総注水量と緩衝材の総流出量の関係を既存の成果も含めて図-2に示す。人工海水の

注水結果は NaCl 水溶液と同等の流出量を示し、KCl、MgCl₂ 水溶液の場合の流出量は淡水の場合より低かった。人工海水は Na⁺イオンの濃度が高いため、NaCl 水溶液と同様の挙動であったと考えられる。KCl、MgCl₂ 水溶液を注水したケースでは、ベントナイトが膨潤せず、KCl 水溶液の場合は表面にひび割れが見られ、MgCl₂ 水溶液の場合は鱗片状になっていることがアクリルセルを透して観察された。表面が凝集し、剥離した場合でも塊が大きいため、セル外に排出されず、供試体とセルの隙間部分に留まっていたため、流出量は少なかったと考えられる。

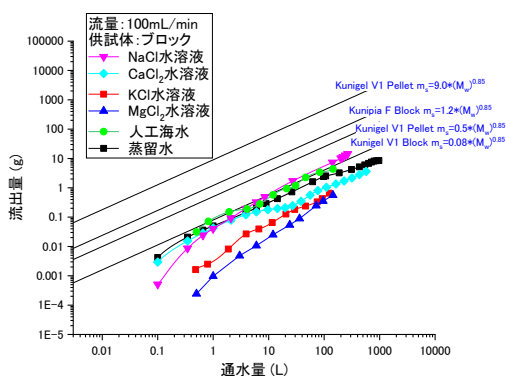


図-2 緩衝材流出に対する液種の影響

2) 塩水系地下水環境が緩衝材の浸潤、膨潤挙動に及ぼす影響

塩水系地下水が緩衝材の浸潤に及ぼす影響を評価するために、人工海水 (ASTM D1141: イオン強度 0.7 程度) と CaCl₂ 水溶液 (イオン強度 0.5) を使用し、材料と乾燥密度は前項と同じとし、直径 50 mm、高さ 300 mm の供試体を用いて一次元浸潤速度を取得した。既往の研究¹⁰⁾で得られた試験結果と併せて図-3 に試験結果を示す。同図より、イオン強度が低い方から、蒸留水 (青線)、NaCl 水溶液 (水色)、人工海水 (赤) の順に浸潤速度が大きくなっている。また、同じイオン強度 (0.5) の NaCl と CaCl₂ 水溶液でも浸潤速度が異なっており、陽イオン種の違いによっても影響に差があることが確認できる。なお、フロントの移動速度はどの液種でも浸潤時間の平方根に比例する結果となった。

さらに、緩衝材の膨潤挙動に対する影響評価のために、人工海水と 1/2 に濃度希釈した人工海水 (1/2 人工海水) を用い、乾燥密度 2.0 と 1.2 Mg/m³ の供試体 (どちらも直径 60 mm、高さ 20 mm) の膨

潤による押し合い試験 (直列膨潤量試験) を実施した。図-4 に示すように、既往の試験結果 (蒸留水とイオン強度 0.5 の NaCl 水溶液)¹⁰⁾ と比較した結果、イオン強度が大きいくほど残留密度差が大きくなった。人工海水と NaCl 水溶液の差はわずかであり、イオン強度のみでなく、イオン種の影響もあると考えられる。

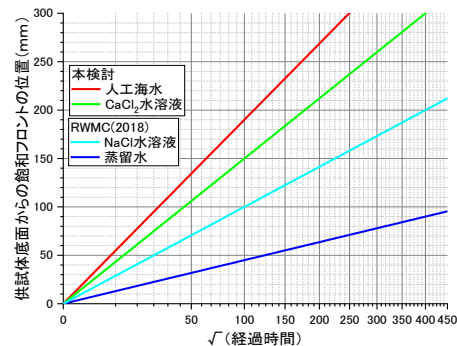


図-3 液種ごとの浸潤フロントの経時変化

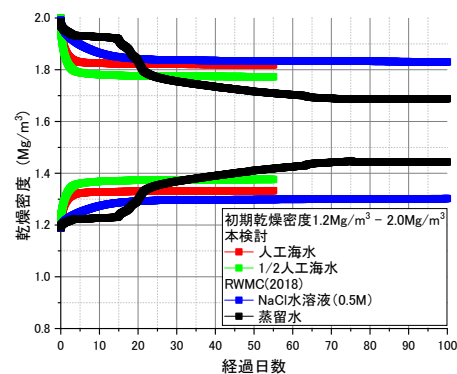


図-4 液種ごとの残留密度差

以上のような結果から、海水系地下水環境では緩衝材の湿潤及び膨潤挙動は、イオン強度の影響を受け、さらに陽イオン種の違いにも影響を受けることがわかった。これらの影響を考慮して、初期の施工仕様を高めておくことで (密度を高めた施工など)¹¹⁾、緩衝材に求められる性能を確保することができると考えられる。そのためには、地下水組成による影響の範囲を把握し、設計に反映することが必要である。

(3) 人工バリア材料などに関する劣化や変質に関する現象の把握—セメント系材料—

セメント系材料は、地下施設の構成要素として、坑道の支保工及びインバート、さらに TRU 廃棄物処分では構造躯体ならびに充填材としての使用が考えられている。沿岸部で想定される地下環

境では、塩分を含む地下水によるセメント系材料の化学変質及び塩化物イオン浸透による鉄筋腐食に伴うひび割れにより、機械的特性が変化する可能性がある。そのため、本事業では、処分場操業期間中の空洞安定性の観点から、セメント系材料の化学変質に伴う強度変化を把握することを目的とした試験を実施して知見やデータを拡充する。平成 30 年度は、以下の内容を実施した。

- 1) バルク試験体（各種セメントペースト）を浸漬し、化学変質への海水成分濃度の影響及び化学変質と機械的特性の関係に係るデータを取得する試験
- 2) 海水成分濃度の異なる地下水環境を想定したセメント系材料への塩化物イオン浸透解析の検討

上記 1) の試験では、セメント系材料の化学的変質が機械的強度に及ぼす影響を把握するため、濃度の異なる人工海水に 14 ヶ月浸漬したバルク試験体の分析を実施した(平成 29 年度には浸漬期間 4 か月で分析を実施)。その結果、浸漬期間 4 か月と 14 か月における化学的変質の傾向は同様で、混合セメント (FAC、BFSC) の方が普通ポルトランドセメント (OPC) より変質の程度が小さかった。また、OPC では人工海水濃度が高いほどセメント系材料の溶解や海水成分浸透の領域の程度が大きい傾向にあった。一方、混合セメント (FAC、BFSC) では OPC より溶解領域が小さく、塩化物イオンの浸透も OPC と異なり 1/10 人工海水に浸漬した試料が最も顕著であった。

図-5 に試料接液面から深さ方向の Ca 濃度分布とビッカース硬度 (以下、硬度) の分析結果の一例を示す。硬度は、カルシウム溶解が進行している部位 (溶脱部) で低下傾向が認められた。また、Ca が溶脱した部分の硬度は、溶脱が多いほど低下が大きく、未溶脱部分と比較して OPC で 1/2 程度、混合セメントで 1/3 程度にそれぞれ低下した。なお、混合セメントの Ca 溶脱部分は、二次鉱物により空隙が充填されていたが、Ca 溶脱による硬度の低下の抑制への寄与は少なかった。一方、溶脱部以外の硬度は浸漬試験の開始前と同等であり、塩化物イオンの浸透の有無、塩素含有量の多少、ならびに浸漬後のアルミネート鉱物相 (モノサルフェート、フリーデル氏塩等) の変化との間に関連は認められなかった。

本試験により、塩水濃度やセメント種類により

化学変質挙動が異なること、それにより強度特性の変化が異なることがわかった。今後は、より現実的な地下水組成や操業から再冠水に至る迄の水理挙動をふまえた試験等により、人工バリアのセメント系材料の強度特性の変遷を評価するための知見を拡充していく必要がある。

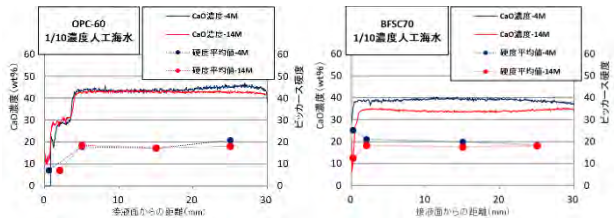


図-5 バルク試験体の接液面からの距離と Ca 濃度及びビッカース硬度の関係

上記 2) のセメント系材料への塩化物イオンの浸透解析に関する検討では、物質移行と化学反応を連成させた相平衡物質移行解析コード^{12), 13)}を適用して実施した。コンクリート 4 種類、塩水濃度 3 種類についての Cl⁻の浸透解析のケーススタディを行い、それぞれのケースについて経過時間と鉄筋腐食限界になる深さの関係を求め、コンクリート中の鋼材腐食によるひび割れの発生予測を行った。本研究では、既往の知見を参考に鋼材腐食発生条件を Cl⁻濃度 1.2 kg/m³¹⁴⁾、[Cl⁻]/[OH⁻]=0.1¹⁵⁾とした。解析結果の一例として、OPC および FAC の場合において、所定の深さが腐食発生限界濃度に到達する時間を予測した結果を図-6 に示す。腐食発生限界濃度に到達する早さは、塩水濃度が高いほど早く、また、セメント種類や配合の影響を受けていることが確認され、吹付けコンクリート (OPC ベース)、OPC、BFSC 及び FAC の順に短い傾向であった。しかし本解析で

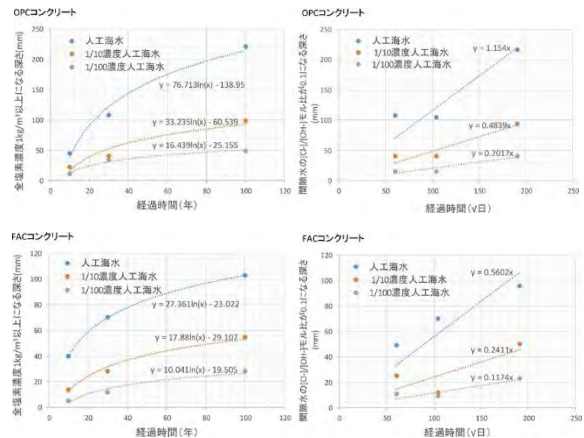


図-6 鋼材腐食予測の解析結果一例 (OPC, FAC)

は、二次鉱物の生成場所が試験結果と異なること、塩水濃度が高いケースにおいてはCl⁻浸透を過大に評価している可能性があることなど、課題も残されており、さらなる検討が必要である。

(4) 塩水環境下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の提示
ニアフィールド領域における地層処分システムの成立性を考える際には、次の二つの観点からその見通しを示す必要がある(図-7)。

- ①閉鎖後長期の安全性を満たす(閉鎖後長期の安全評価の枠内で扱われる取組)
- ②設計・構築する処分場が閉鎖後長期の安全評価の前提となる初期性能を達成する(設計・建設～閉鎖段階におけるエンジニアリングの枠内で扱われる取組)

研究会による課題整理(表-1)を踏まえ、上記②(図-7の緑色の部分)を本事業で取り組むべき課題としている。

本課題については、沿岸部で立地を進めている北欧の先行事例調査⁴⁾の結果より、廃棄体の定置から閉鎖段階における人工バリアの機能発揮に影響する要因のうち、特に湧水による緩衝材の流出挙動に留意する必要性が示された。同挙動が処分システムに与える影響を評価するには、操業から再冠水に至る期間におけるニアフィールド領域の水理状態を知る必要がある。これらを踏まえ、本課題に関する全体計画として以下の実施項目を設定して取り組んだ。

- 1)わが国に適用可能な処分システムの成立性に係る手法の整備
- 2)処分システムの成立性の提示に必要な水理解析体系の整備

これらをより具体的に検討するうえで、候補サイトが特定される前のジェネリックな段階であることに留意し、地質環境モデルや適用する処分システムの構成などの条件を仮設定(地質環境:新第三紀堆積岩、処分概念:堅置き定置方式)した。以下に、これらの取組の主な成果を示す。

実施項目 1)は、過年度に実施した北欧の先行事例調査で得た評価体系及び知見やデータの体系を踏まえ^{16), 17)}、わが国における処分システムの成立性の提示に係る検討フロー案を整備した(図-8)。

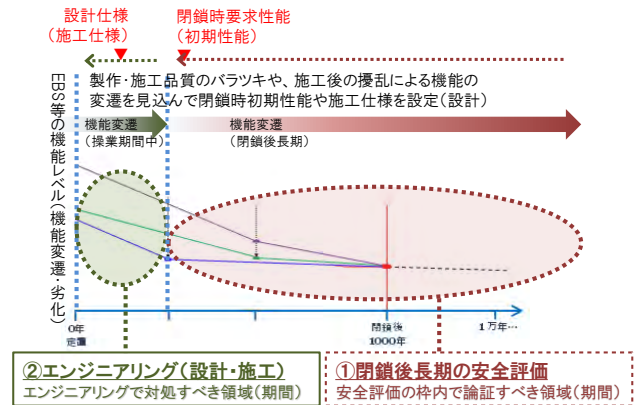


図-7 エンジニアリングの枠内で扱われる処分システムの成立性

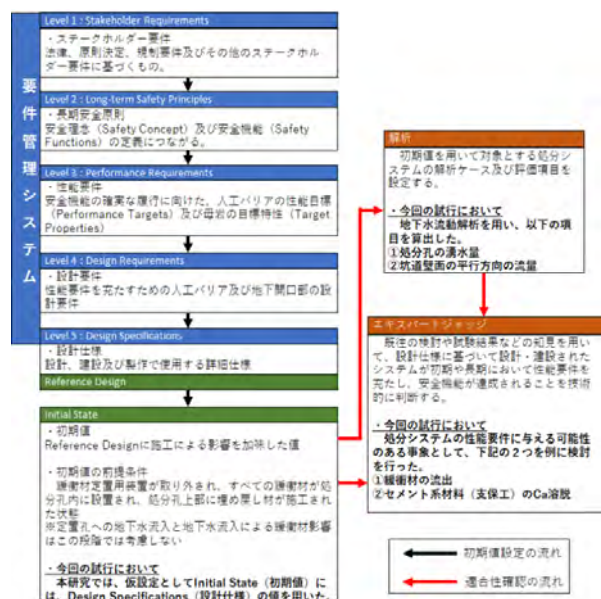


図-8 処分場成立性の提示に係る検討フロー案

実施項目 2)は、原子力発電環境整備機構が整備した地質環境モデル¹¹⁾をベースとして、広域、処分場、ニアフィールドの3つのスケールの水理地質構造モデルを作成した。これらのスケールの異なるモデルは、ネスティング(入れ子)構造になっており、広域からニアフィールドまでの幅広いスケールの水理解析に対応が可能である。さらに、この地質構造モデルには、建設・操業・閉鎖に至る操業期間中の地下施設の展開(地下施設形状の時間変化)を考慮して反映している。このような地質構造モデルを用いて、坑道の状態変化(掘削、埋め戻し)を考慮した水理解析体系を構築し、処分坑道や処分孔の湧水量、ならびにニアフィールド領域の地下水の流速等の水理環境の変化を解析的に把握することが可能となった。

以上の成果を踏まえ、実施項目 1) で得られた成立性の提示に係る検討フローに沿って、本事業で仮設定した処分場の設計仕様⁶⁾、実施項目 2) で整備した水理解析体系ならびに既出の人工バリア材料などに関する劣化や変質に関する知見を組合せて、沿岸部の処分場の成立性に関する一連の評価を試行した。なお、本課題が対象とする評価(②設計・構築する処分場が閉鎖後長期の安全評価の前提となる初期性能を達成する)では、多くの評価すべき個別要素があるが、ここでの試行的な評価では、「緩衝材の流出」と処分場操業中の空洞安定性への影響が懸念される「支保工の劣化(セメント系材料のCa溶脱)」に着目して、施工後から再冠水に至るまでの擾乱過程における影響の程度を評価した。緩衝材の流出については、水理解析から得られた処分孔への湧水量から緩衝材の流出量を推定したところ、流出許容量を下回る結果となった。今回の前提や条件では、緩衝材は設計要件を満足し、処分システムとして成立すると判断された。また、水理解析から得られた支保工裏面の地下水の流速から推定されるセメント系材料のCa溶脱は、既往の浸漬試験の結果に基づく流速と比較したところ、健全部と比較して強度が1/3~1/2に低下する部分が発生する可能性が認識された。但し、水理解析結果が示す水理場と浸漬試験の条件には差異があり、現時点における支保工の変質部の厚さの予測には不確実さが見込まれることから、今後、試験条件等に工夫を加えた試験データの拡充などが望まれる。

以上のような試行的な検討を通して、沿岸部における処分システムの成立性の提示に係る評価手法の適応性の見通しを得た。但し、今回は条件等を限定した試行的な検討である。今後は多様な地質環境ならびに異なる処分概念や定置方式に適用できるように拡張を進め、サイト選定の進展に伴い具体化される地質環境や処分概念への柔軟性を確保するとともに、信頼性の向上に資する個々の評価技術の高度化や知見等の拡充が望まれる。

- 1) 総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会 原子力小委員会地層処分技術ワーキンググループ、科学的有望地の要件・基準に関する地層処分技術WGにおける中間整理、2015
- 2) 総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会 原子

- 力小委員会地層処分技術ワーキンググループ、地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果(地層処分技術WGとりまとめ)、2017
- 3) 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
- 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28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、2017
- 6) 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 沿岸部処分システム高度化開発 報告書、2018
- 7) 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 報告書、2019
- 8) 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
- 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22年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書(第2分冊) -人工バリア品質評価技術の開発-(1/2)、2011
- 10) 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処分システム工学確証技術開発、平成25年度~平成29年度の取りまとめ報告書、2018
- 11) 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
- 12) 細川佳史、山田一夫、Bjorn JOHANNESSON、Lars-Olof NILSSON、熱力学的相平衡を考慮したMulti-species物質移動モデルの構築、コンクリート工学年次論文集、Vol. 29、No. 1pp. 957-962、2007
- 13) 細川佳史、小川彰一、山田一夫、水分・CO₂ガス及び液相化学種の移動と熱力学的相平衡との連成システムによる複合劣化の再現、第65回セメント技術大会講演要旨、pp. 308-309、2011
- 14) 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会、コンクリート標準示方書 耐久性照査型施工編、1999.
- 15) 石田健太、武若耕司、山口明伸、前田 聡、鉄筋腐食発生限界塩化物イオン量の定量評価に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文集、vol. 29、pp. 1065-1070、2007.
- 16) Posiva (2012a)、“Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Synthesis 2012 ”, POSIVA 2012-12, 2012
- 17) Posiva (2012b)、“Rock Suitability Classification, RSC 2012”, POSIVA 2012-24, 2012

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

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。

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⁾。

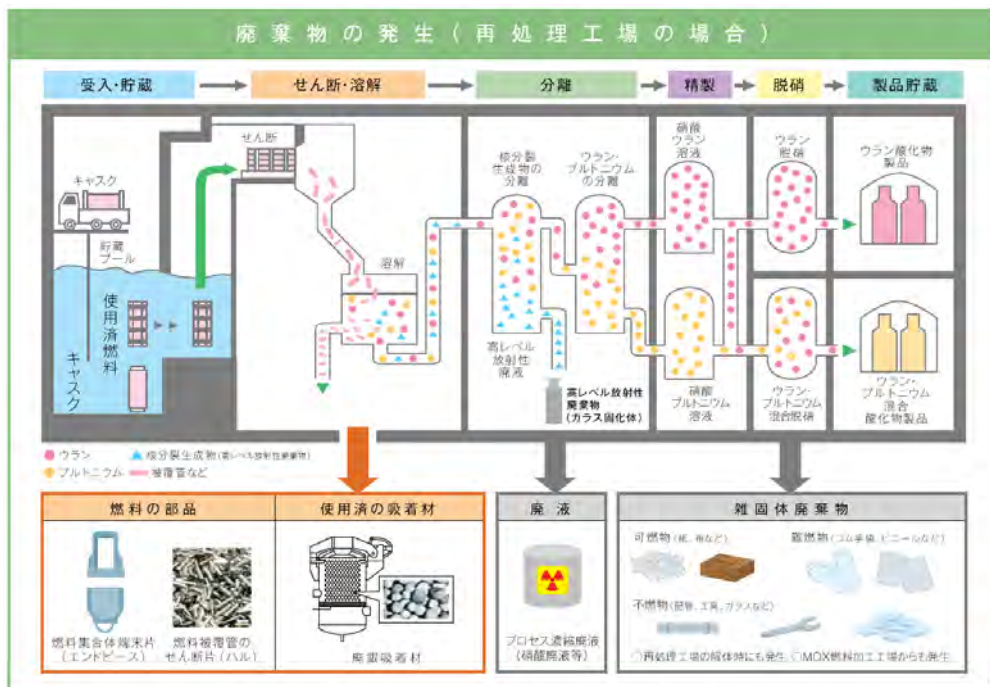
グループ1 廃銀吸着剤：燃料溶解工程等のオフガス系で、主にヨウ素 129 を捕集したフィルター

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

TRU 廃棄物の処分実施にあたっては、高レベル放射性廃棄物の地層処分が開発した技術が一部利用可能であるが、TRU 廃棄物には上述したような、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、多様な形態の廃棄物が存在し、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、地質環境に応じて掘削可能な範囲で大口径の処分坑道に、ド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³⁾。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、セメント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。



出典：総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会放射性廃棄物小委員会報告書（平成18年9月）をもとに作成

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～平成 34 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。

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み、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、多様な形態の廃棄物が存在する 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、廃棄物の処理過程、操業～坑道閉鎖前から閉鎖後長期の安全性まで極めて対象とする時間スケ-

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 ヶ年の事業で取り組む課題を整理した。

平成 30 年度は経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「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—ナチュラ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

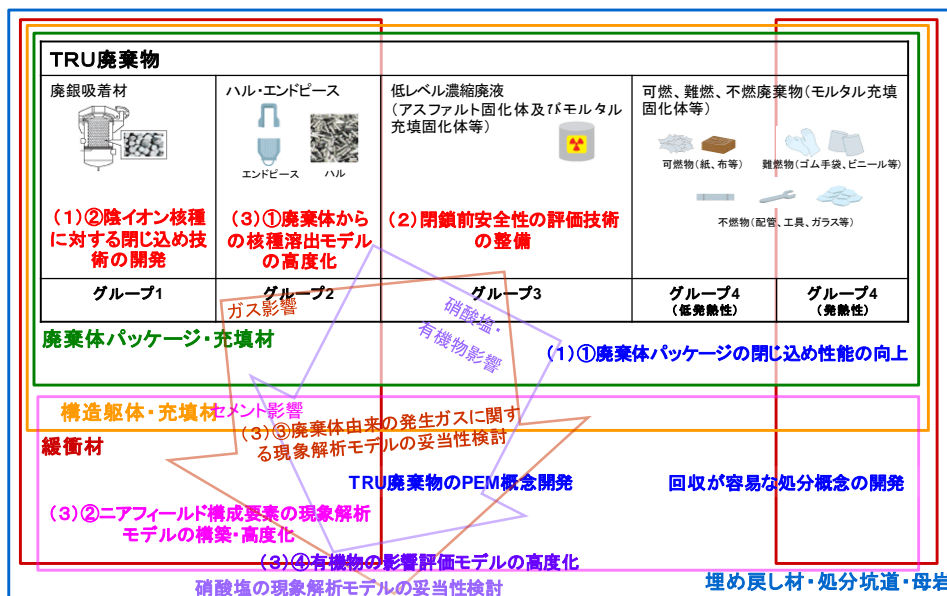


図-2 TRU 廃棄物及び処分場の構成要素と本事業の研究開発項目

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

操業期間中の安全性の向上を目的とした地層処分対象の TRU 廃棄物の廃棄体パッケージについて検討がされ、操業中に加えて閉鎖後 300 年をめやすとした、放射性物質の閉じ込め性能が期待できる廃棄体パッケージの設計仕様が、NUMO 包括的技術報告書レビュー版¹⁾ (以下、NUMO-SC とする) に示された。地層処分研究開発に関する全体計画 (平成 30 年度～平成 34 年度)²⁾ で示されているように、今後、閉じ込め性をもつ設計オプションについて、製作性及び構造健全性に関する実証的な試験等を実施して、工学的な成立性や安全性 (操業時、閉鎖後) 等の向上を図る必要がある。

本事業では、NUMO-SC で示された廃棄体パッケージの設計に関する課題を踏まえ、かつ、設計における設計要件や評価項目を満たすよう検討項目を設定し検討を進めることとし、平成 30 年度より検討を開始した (図-1 参照)。

NUMO-SC の廃棄体パッケージ B (図-2 参照) の工学的成立性を示すために、具体的には以下の 3 項目について検討する。

(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廃棄体パッケージを製作してそれらの技術を実証的に確認する (図-3①参照)。

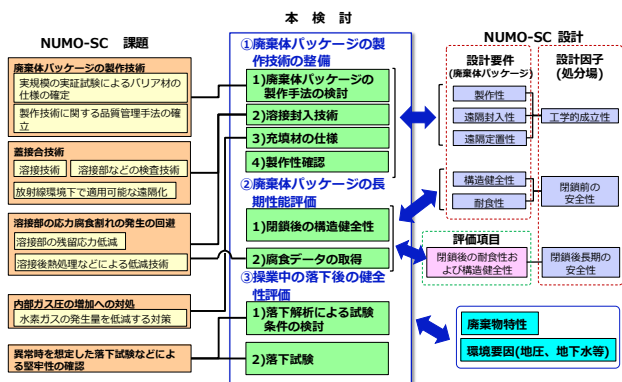


図-1 廃棄体パッケージの設計、課題および本検討項目の関連

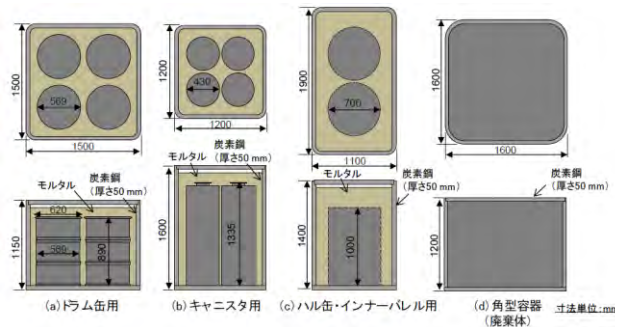


図-2 廃棄体パッケージ B の概略図 1) (容器厚さ 50mm)

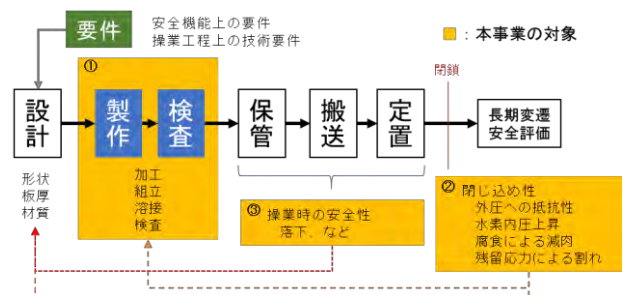


図-3 廃棄体パッケージの実現、および検討項目のイメージ

(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タの取得 (図-3②参照)。

(3) 操業中の落下後の健全性評価

操業期間中の落下事象を対象とした解析及び実証試験 (図-3③参照)。

加えて、廃棄体特性や環境要因等を考慮し、また、検討項目間の連携をとり効率的に進めることとした。なお、本検討では廃棄体パッケージに関する技術を、絞り込まず幅広く蓄積することも考慮して進め、加えて、実施主体である NUMO との連携を図り、ニーズ等を適宜反映して進めることとしている。

◇平成 30 年度の成果³⁾

(1) 廃棄体パッケージの製作技術の整備

検討の対象とする廃棄体パッケージ B 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。

ここでは、製作工程、蓋の溶接方法及び内部充填材の仕様についてそれぞれ具体化を行うこととし、先ず、以下の 1)~4) の各検討項目の目標

を設定した。

- 1) 廃棄体パッケージの製作方法の検討: 廃棄体パッケージの製作技術(溶接技術および内部充填材の仕様等)を統合し、製作工程及び品質管理方法を策定する。平成30年度は、製作工程を机上検討し、課題や留意点を抽出した。
- 2) 廃棄体グループに応じた接合技術の検討: 各廃棄体グループに応じた溶接による接合方法の整備を行う。溶接における容器内部の廃棄体(アスファルト固化体の熱反応暴走対策)、内部充填材(セメント系材料の性能保持のため)の温度上昇の抑制を考慮しつつ検討を進める。応力腐食割れの発生に関して腐食評価手法の検討との連携をとりつつ残留応力低減方法、非破壊検査方法について検討する。平成30年度は、溶接方法の選定、溶接温度の解析を行った。
- 3) 廃棄体パッケージ内充填材の仕様の検討: 放射線分解による水素ガス発生抑制して内圧上昇の低減が可能な内部充填材について、候補となる材料を提示する。内部充填材の施工方法についても検討する。平成30年度は、内部充填材の候補材料の机上での絞り込みと、水素ガスの発生挙動について把握した。
- 4) 製作性の確認: 1)から3)で検討した製作技術について、実規模等の廃棄体パッケージの製作試験の実施により実現性や課題の整理をする。平成30年度の実施事項は1)から3)に注力し、4)は次年度以降の実施とした。
以下に、1)から3)の平成30年度の成果を示す。

1) 廃棄体パッケージの製作方法の検討

廃棄体パッケージの製作方法について、NUMO-SCの仕様を基に製作工程を具体化し、TRU廃棄物特有の制約条件等の影響範囲を確認及び構成要素間の相互影響を考慮して、製作工程の課題を抽出した。廃棄体パッケージの組立て手順を図-4に示す。組立て手順は、内部充填材の水素ガス発生抑制を考慮した乾燥工程を加え、(a)容器内部に廃棄体を設置し、充填材を打設する(後打設)、(b)容器内部に予め充填材を打設し、廃棄体を挿入する(先打設)、(c)製作済みの充填材を容器内に設置し、廃棄体を挿入する(プレキャスト)の3つの手順を具体化した。組立て手順の具体化により、部材間の相互影響に関する以下の課題と留意事項が抽出された。

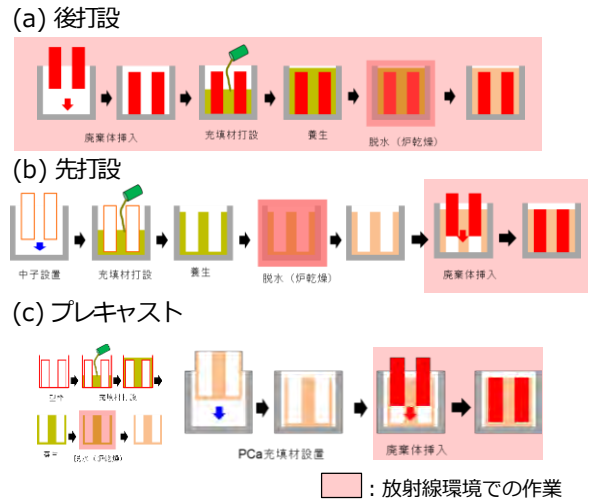


図-4 廃棄体パッケージの組み立て手順

- ・製作性の考慮や構成部材の公差等により、手順(b)と(c)は、内部充填材と廃棄体の間及び廃棄体上部と蓋の間に、手順(c)は容器と内部充填材の間に、全ての手順で内部充填材と蓋の間に隙間が発生する(図-5)。
- ・蓋部の溶接及び溶接部の残留応力の低減のための応力除去焼きなましの熱により、内部充填材の機能低下及び廃棄体の温度上昇によるグループ3のアスファルト固化体の熱暴走が懸念される。
今後は、これらの課題や留意事項について、廃棄体パッケージの機能等への影響を特定し、必要に応じ対策を検討していく必要がある。2)及び3)の検討成果の集約により、製作工程の具体化を進める。

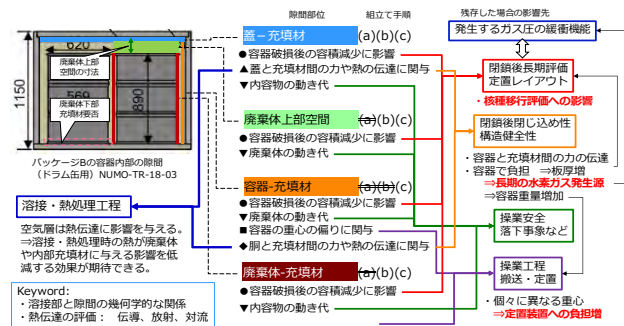


図-5 廃棄体パッケージ内の隙間とその影響の整理

2) 廃棄体グループに応じた接合技術の検討

廃棄体の閉じ込め性と制限温度に対応可能な蓋接合技術について整備を行った。既往の溶接手

法について、TRU 廃棄体パッケージに対する施工性(板厚、溶接深さ、溶接姿勢等)、遠隔操作性、補修等の観点から比較整理表を作成し、容器の蓋接合に適用性の高い溶接手法に関して検討した。

これらの候補となる溶接方法から入熱量の少ないレーザー・アーク・ハイブリッド(LA)溶接の予備試験を行い、その適用性を確認し(図-6)、溶接時の入熱による容器内部の最高到達温度を伝熱解析により簡易的に評価した。モルタルの温度は溶接開始時に400℃程度上昇するが、溶接時と終了後は150℃以下である一方、内部の廃棄体(アスファルト)は最高到達温度がアスファルトの熱反応暴走開始温度(195℃)を下回った(図-7)結果から、溶接作業自体の入熱による容器内部への影響が軽微であり、適切な溶接技術を選定することで、溶接封入が適用可能となる見通しを得た。

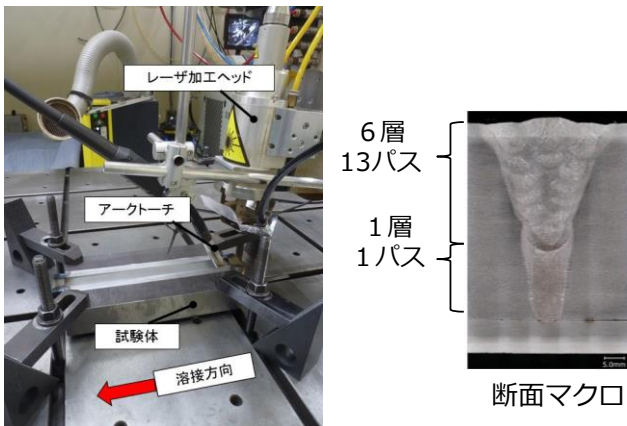


図-6 LA 溶接による予備試験(左図)と断面マクロ観察結果(右図)

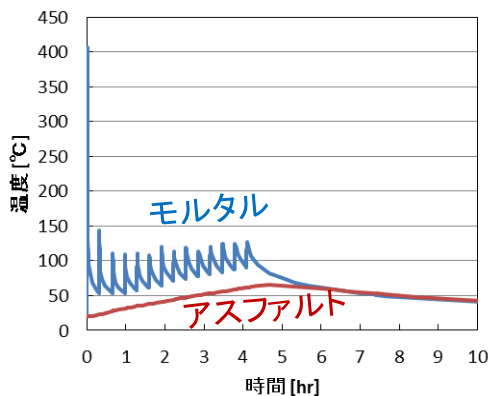


図-7 LA 溶接による内部充填材(モルタル)及びアスファルト固化体の温度履歴の解析結果(モルタルとアスファルト固化体の位置は溶接部に一番近い部位)

今後は、蓋の構造を含めた溶接部の形状の検討、それに対応させた溶接方法、後熱処理(特に応力除去焼きなまし)による熱容器内部の温度上昇の解析による対策の検討を進める必要がある。

3) 廃棄体パッケージ内充填材の仕様の検討

内部充填材の候補材料(砂、モルタル(乾燥無し)、乾燥したコンクリート)を対象に、充填材の性能、物性を評価し、廃棄体グループごとに整理した。その結果、最も適用性が高い事、乾燥により水素ガス発生量を低減出来る事を鑑み、配合設計の対応のしやすさ等から検討した結果、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1次絞り込みをした。

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。セメント種類ごとのセメントペーストからの水素ガス発生量を比較すると、普通ポルトランドセメント(OPC)に比べ高炉セメント(BFSC)は水素ガス発生量が多い等、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(図-8及び図-9)、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(図-10)。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。

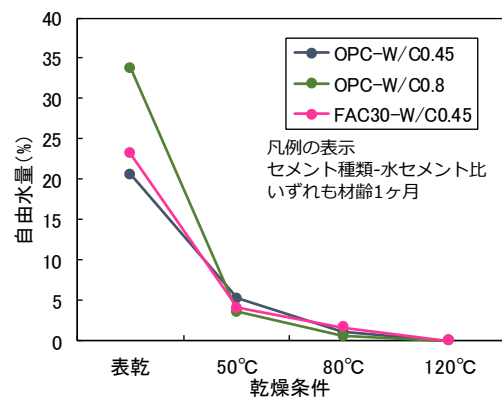


図-8 セメントペーストの乾燥条件と自由水の量の関係 (FAC30:フライアッシュを30%添加したセメント)

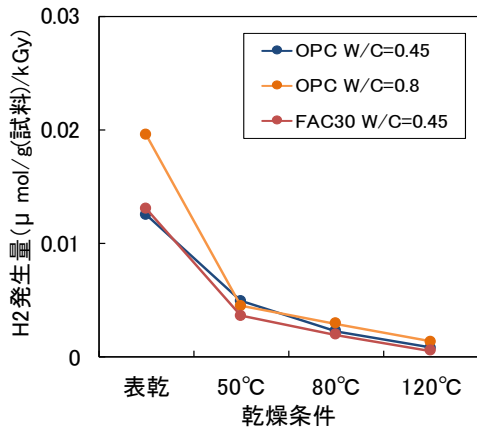


図-9 セメントペーストの乾燥条件と水素ガス発生量

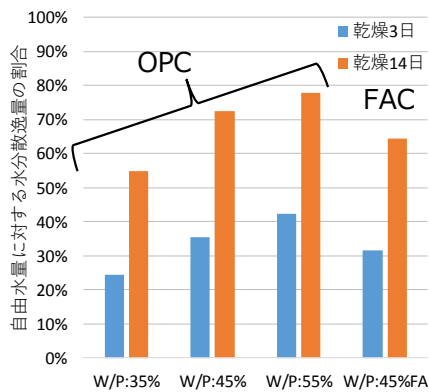


図-10 コンクリート(厚さ 20cm)の 80°C 乾燥における自由水量の低減に関する試験結果(W/P:水粉体比)

今後は、内部充填材に適用が可能なコンクリートについて、施工性や水素ガス量の観点から仕様の具体化を試験等の知見により進めること、水素ガス発生量の抑制手法に関しデータの拡充により実現性を向上させることに取組む必要がある。

(2) 廃棄体パッケージの長期性能評価

廃棄体パッケージの長期性能の評価手法に関して、高レベル放射性廃棄物(HLW)の地層処分におけるオーバーパックの評価手法を参考に、主には炭素鋼を材料とする容器について、構造健全性の観点からの閉鎖後の健全性評価手法及び、TRU 特有の高 pH の地下水環境での腐食評価手法について下記の様に目標を設定し検討を進めることとした。

1) 閉鎖後の健全性評価手法の検討: 閉鎖後の閉じ込め性能を期待する期間(300年をめやすとす

る)の健全性評価手法を構築し、長期健全性を担保する容器の機能に係る技術要件として提供する。平成30年度は、溶接部の破損評価より容器内圧と溶接深さの関係を把握した。

2) 腐食評価手法の検討: 応力腐食(SCC)等の発生要因である溶接残留応力について、工学的対策である後熱処理による応力の低減目標値を破壊力学的観点から見積もるとともに、容器の板厚に付与する腐食代の算出に必要な母材に対応する溶接部のデータを腐食試験で取得する。平成30年度は、文献調査でSCCによる腐食可能性の見積と溶接部の腐食試験を開始した。

以下に、1)から2)に平成30年度の成果を示す。

1) 閉鎖後の健全性評価手法の検討

閉鎖後に廃棄体パッケージは、地圧や静水圧等の外力に加え廃棄体内でのガス発生による内圧も受ける可能性がある。これらの容器に作用する応力を想定し、既往の構造健全性の評価手法⁴⁾やHLWのオーバーパックの評価手法⁵⁾を参考に、TRU 廃棄体パッケージの健全性評価手法案を検討した(図-11)。

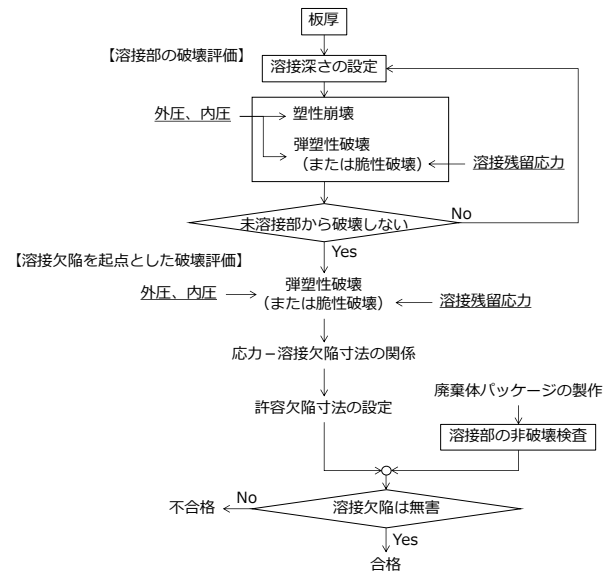


図-11 TRU 廃棄体パッケージの健全性評価手法案

容器の構造健全性に影響する蓋部の接合における溶接深さは、製作の合理化や入熱量の観点からは少ない方が望ましいが、閉鎖後の健全性の評価においては、容器の耐力が低下が懸念される。

そこで、まず、構造健全性の観点から許容できる内圧と溶接深さの関係について脆性破壊を想定した解析により検討した。内圧に対する応力拡大係数 (K 値) が相対的に大きかったはモード I (開口形) の K 値と溶接深さと亀裂先端位置の関係を図-12 (左図) に示す。これらの関係と破壊靱性値 K_{Ic} が与えられれば、ある内圧に対する K 値が K_{Ic} を越えなければ破壊しないと判断されことから、許容内圧を算出し溶接深さととの関係を図-12 (右図) に整理した。一般に、塑性崩壊、弾塑性破壊、脆性破壊の順に許容される荷重は小さくなる。本解析では脆性破壊を考慮したが、より現実的な弾塑性破壊を想定することで、許容荷重は大きくなると考えられ、その弾塑性破壊評価には応力・ひずみ曲線と弾塑性破壊靱性値 (J_{Ic} または $J-R$ 曲線) が必要となる。

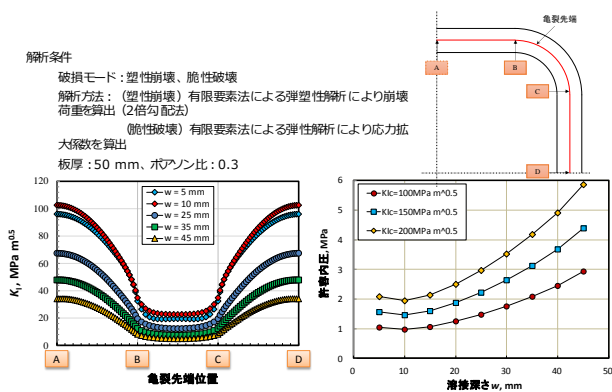


図-12 容器の許容内圧と溶接深さの関係

2) 腐食評価手法の検討

廃棄体パッケージ容器には閉鎖後 300 年程度の閉じ込め性が期待されていることから、1) の構造健全性評価が成立するためには、要求される閉じ込め期間の経過後に構造健全性が確保される容器の板厚が残っていることが前提となる。ここでは、廃棄体パッケージの製作から、処分坑道への定置、処分孔の閉鎖後 300 年程度の間廃棄体パッケージ容器の特に溶接部で生じる腐食挙動について、整理、調査を実施した。

NUMO-SC における廃棄体パッケージの腐食評価では、容器母材について廃棄体パッケージ間のセメント系充填材に近い環境下で 300 年間の平均腐食深さを 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。一方、蓋の接合部では、このような腐食の他に、

溶接による残留応力による応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking、以下、SCC とする) も懸念される。そこで、廃棄体パッケージ容器の腐食現象として、板厚の設定の根拠となる腐食速度や腐食の不均一性の評価と、早期破損の要因となる SCC の可能性について検討した。

まず、NUMO-SC の母材の腐食深さの評価と同様に溶接部を評価できるか、蓋の接合部が同様の腐食形態となるのかを確認することを目的とした浸漬試験について検討し、TRU 廃棄体パッケージの定置環境を考慮したアルカリ条件の試験を開始した (EBW 及び LA : 図-13)。

溶接部の SCC について文献調査から検討した結果、TRU 廃棄体パッケージを定置する環境と炭素鋼の SCC の発生環境とでは、電位-pH の領域が重なる部分があった (図-14)。SCC の潜在的な懸念は否定できないことから、SCC に関する試験方法についても調査し整理した。



図-13 溶接部の腐食に関する浸漬試験用試験片 (左図:試験片を採取した溶接後の LA 溶接試験体、右図:試験片の寸法)

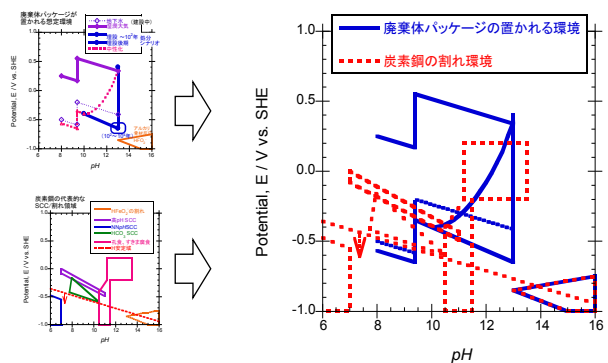


図-14 TRU 廃棄体パッケージ容器環境と炭素鋼 SCC 発生環境の比較

今後は、浸漬試験を継続し溶接部の腐食データを取得し、母材の評価手法との整合を確認していくと共に、SCC の試験に関する具体化を進めていく必要がある。

(3) 操業中の落下後の健全性評価

廃棄体パッケージは操業中の安全性確保の観点から、搬送中に容器が落下した場合でも、その健全性が確保されている必要がある。廃棄体パッケージを製作し実証的に落下後の健全性に関する知見を拡充することは、廃棄体パッケージの信頼性の向上に有用である。そこで、本検討は落下試験の条件及び評価方法についての調査及び落下解析により試験条件を検討し、落下試験により操業中の落下後の容器の健全性を確認し、必要に応じて設計にフィードバックすることを目標に設定した。平成 30 年度は、落下試験における試験条件の設定に資する、原子力関連分野における輸送容器や処分容器の落下試験に関する文献を調査するとともに、落下事象を対象とした予備解析を実施して、容器に対して厳しい落下姿勢を把握した。

落下試験を対象にした文献調査から得られた知見を踏まえ、廃棄体パッケージの落下高さを 8 m と仮定して鉄筋コンクリート製の床面に落下させた予備解析の結果を図-15 に示す。なお、容器は本体、蓋、溶接部及び未溶着部を一体としてモデル化し、脆性破壊で評価した。その結果、廃棄体パッケージの頂点からの落下に比べて辺からの落下の応力拡大係数が大きくなり、溶接部に求められる動的破壊靱性値は $107 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ となった。今後、これらの知見を元に落下解析及び試験条件の検討を進めていく必要がある。

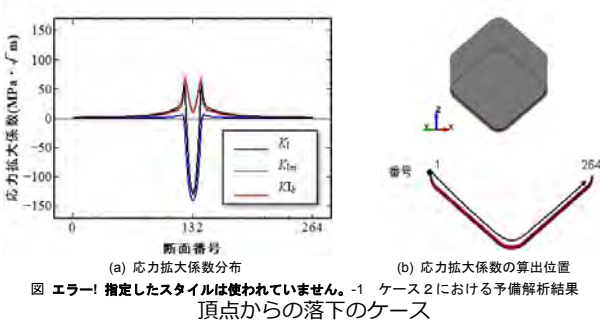
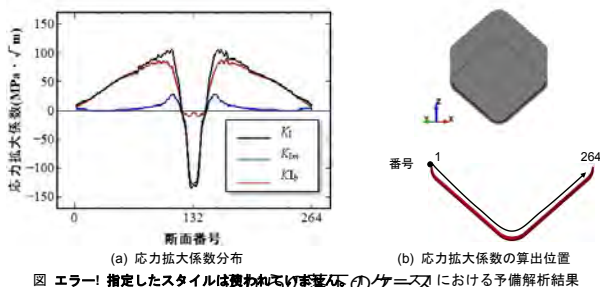


図-15 TRU 廃棄体パッケージの落下解析結果

(4) まとめ

これまでに NUMO-SC で示された、操業中の安全性と閉鎖後 300 年をめやすとして放射性物質の閉じ込め性能が期待できる TRU 廃棄体パッケージについて、製作性や構造健全性に係る事項を実証的な試験により確認するための検討を開始した。現状の課題を整理抽出して検討項目とその目標を設定した。個別の検討項目の平成 30 年度の成果と課題は(1)から(3)に示した。個別の検討項目の課題に加え、構成部材間の取り合い、溶接の熱によるパッケージ内部への影響、SCC の起因と溶接後焼きなましの条件及び溶接深さの設定等の複数の検討項目に跨る課題も抽出され、その一部については検討に着手した。今後はこれらの課題について相互に連携をとりながら検討を進める必要がある。加えて、廃棄体パッケージに関する技術を地層処分のサイト条件や人工バリアの設計に柔軟に対応できるように、絞り込まず幅広く蓄積すること、実施主体である NUMO との連携を図りニーズ等を適宜反映し、今後も地層処分事業に有益な成果が得られるように進める必要がある。

- 1) 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－（レビュー版）、NUMO-TR-18-03、2018。
- 2) 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～平成 34 年度）、2018
- 3) 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に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分にに関する技術開発 報告書、2019
- 4) 一般社団法人日本機械学会、発電用原子力設備規格維持規格、JSME S NA1-2016、2016
- 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に関する技術開発事業 処分システム工学確証技術開発 平成 25 年度～平成 29 年度のとりまとめ報告書、2018

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熔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 固化体においては HS⁻、BPI ガラス固化体においては炭酸イオン)の影響を強く受ける場合を除いて、目標を達成可能な見込みを得ている。一方で、ヨウ素の放出が 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。

◇平成 30 年度の成果⁵⁾

(1)アルミナ HIP 固化技術

アルミナ HIP 固化体の地下水環境での安定性を確認するため、種々の条件下で実施した固化体の浸漬によって得られた浸漬液の分析を実施した。アルミニウム及びヨウ素の濃度から規格化浸出量(NL)を以下の式から求めた。

$$NL = (C/f) / (S/V)$$

ここで、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。

代表的な結果を図-1に示す。アルミニウムのデータで図にプロットが無いものについては、検出下限以下であったことを示す。規格化浸出量はいずれの条件においてもヨウ素がアルミニウムに比べて数桁程度大きい。これは、これまでに得られているデータと整合的であり、固化体中のヨウ素が選択的に溶解・溶出することを示している。溶液中の硫化水素イオン(HS⁻)の濃度が増加すると、ヨウ素の溶出量が明確に増加する。これは、硫化水素イオンによって固化体に含まれるヨウ化銀が硫化銀となり、溶解したヨウ素が放出され

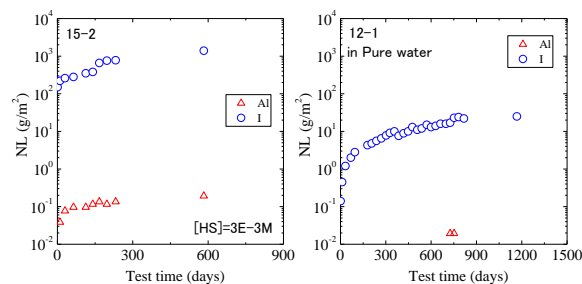


図-1 アルミナ HIP 固化体の浸漬試験におけるアルミニウム及びヨウ素の規格化浸出量(NL)。左)硫化水素イオンの高濃度条件(3.0×10⁻³ M)。右)純水条件

るためと考えられる。なお、硫化水素イオンの含まれていない純水や降水系地下水、ベントナイト平衡水では、ヨウ素の溶出量は極めて少なくなることがわかった。

(2) BPI ガラス固化技術

均質なガラスマトリクスは、核種浸出の抑制やその長期的な挙動評価に有効であり、HLW ガラスと同様に放射性廃棄物の固化方法として期待されている。BPI ガラスの性能を評価するためには、固化体からのヨウ素放出挙動の解明が必要であり、それには BPI ガラスの構造や物理・化学的な特性に関する理解が不可欠である。これまでの検討からガラスの溶解と密接な関係のある変質層の主要成分は、Pb の炭酸水酸化物（ハイドロセルサイト）であることが示されている。

BPI ガラス固化体からのヨウ素浸出特性の評価のため、多様な地下水組成の影響について引き続き検討した。そのうち、特に影響の大きい炭酸イオン濃度については、ハイドロセルサイト以外に、セルサイトが析出し、浸漬期間が長くなると、セルサイトの析出が支配的となり、ガラス成分の浸出量が増加する可能性がある。本年度は 0.07 M NaHCO_3 を添加したベントナイト平衡水に浸漬した試料について 120 日と 600 日の固相分析を行った。図-2 に 600 日浸漬した固化体の固相分析結果を示す。XRD の結果から、ハイドロセルサイト、LDH (layered double-hydroxide) のピークが認められる他に弱いセルサイトのピークと、新たにビスマスの炭酸塩 (bismutite, $\text{Bi}_2\text{O}_2(\text{CO}_3)$) と思われるピークが出現した。ガラスからそぎ落として粉末化した変質層では、セルサイトのピークが強く現れた。表面から見るとセルサイトの大きな結晶とともに、その間には厚さ 0.5 μm 程度の板状結晶と凝集した葉片状結晶が観察された。断面を見るとセルサイトの大型結晶に対応した起伏をもつガラス基板があり、その表面には 30 μm 程度の厚さで微細なハイドロセルサイトが形成されていた。

また、炭酸イオン濃度影響試験において、炭酸イオン濃度にかかわらず、ホウ素とヨウ素は調和的に溶解、浸出した。ヨウ素の浸出量は初期炭酸イオン濃度に依存し増加することから、炭酸イオンはホウ素やヨウ素の浸出を促進するものと考えられる。一方、硫化水素イオン (HS^-) やリン

酸イオンは、炭酸イオンとは逆にホウ素やヨウ素の浸出を抑制するがそのメカニズムは明らかではない。

地球科学計算からは、ガレナ (PbS) やパイロモルファイト ($\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$) の生成が予想されるが、固相分析からは観察されておらず、BPI ガラスの寿命の評価には、BPI ガラスに対する硫黄やリンの影響を明らかにする必要がある。なお、長期浸出試験として、これまでにベントナイト平衡水中での 2002 日の浸漬試験データを取得したが、さらに長期のデータを取得するため浸漬試験を継続しており、2500 日以上浸漬期間が経過している。

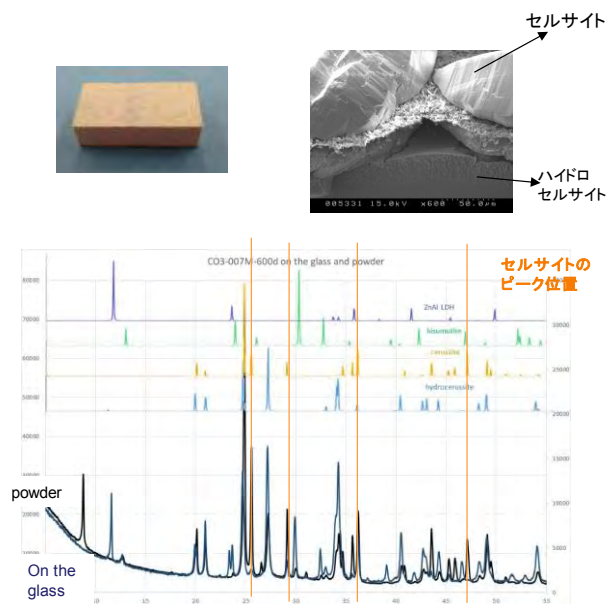


図-2 0.07 M NaHCO_3 を添加したベントナイト平衡水に浸漬した BPI ガラス固化体の固相分析結果 (600 日)

- 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一、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) - ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上一、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

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、平成 16 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（平成 16 年度～平成 18 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（平成 19 年度～平成 24 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²⁾。

フェーズ 3（平成 25 年度～平成 29 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 の化学形態や移行挙動・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。

◇平成 30 年度の成果⁴⁾

(1)ハルの溶出試験

これまでに継続している被覆管の浸漬試験により、長期の核種溶出データの取得を行った。照射済み BWR 燃料被覆管の浸漬試験として、逐次サンプリング試験を継続、ガンマ線放出核種および非放射性元素の浸出データを蓄積した。図-1 に Co-60 の結果を示す。浸漬期間と共に核種溶出量は増加するが、10 年程度経過すると微増であり、浸出速度としては低下傾向となる。また、核種濃度データを未取得であった照射済み被覆管試料を用いて核種インベントリデータを拡充し、過去のデータと比較してほぼ同等の核種濃度であることが確認できた。その際、難測定核種の一種である Cl-36 については検出下限値以下となった。また、中性子スペクトルを従来の 147 群から連続エネルギーに変更した解析モデルにより、ハルの核種インベントリの再評価を実施し、核データライブラリの違いにより解析結果に 1 割程度の差異が現れることを確認した。

(2)ハル等廃棄体中の核種分布の評価

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試料（下部タイプレー

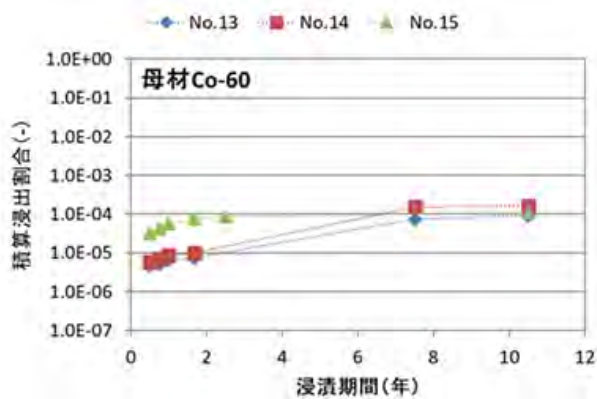


図-1 照射済み燃料被覆管 (BWR) から放出された Co-60 と経時変化

ト)を選定した。選定した試料の性状調査を実施し、試料として取り扱う際の切断方法や表面状態観察、簡易的な放射能濃度測定などを実施した。その結果、下部タイプレートの燃料に近い部分の比放射能は Co-60 で 1.79×10^7 Bq/g と高かった。事前の簡易放射能分布解析では、エンドピース軸方向に放射能分布を確認した。解析結果は分析結果に比べて 1 桁高い値となった (図-2)。そのため、微量金属組成の調査結果の反映や、解析モデルの高度化 (炉心、燃料構造、中性子発生模擬) へ展開し、エンドピースの核種分布の評価を継続する予定である。また、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法およびガンマスキャン法の適用性について検討した。イメージングプレート法では、照射済みエンドピースに含まれる Co-60 からのガンマ線影響を考慮して露光時間を設定し、密封線源及び照射済みエンドピースを用いた試測定により、像が得られる条件の放射能、露光時間の目安を得るとともに、ホットセル内での露光手法について検討した。今後、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。

(3) エンドピースの溶出試験

2018 年度は、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。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。また、下部タイプレート上部材から採

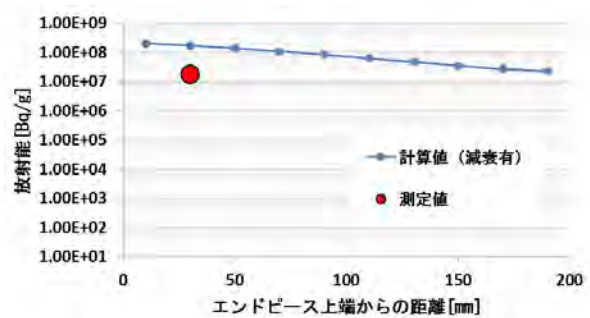


図-2 下部タイプレートの Co-60 の分析結果と軸方向の分布解析結果の比較

取した小試験片のガンマ線分析では、Co-60 の濃度が非常に高く、線量率を支配することがわかった。一方、C-14 濃度の評価については、ステンレス鋼に含まれる窒素不純物の濃度に関する情報や、分析による確認が必要である。今後も、エンドピース試料の準備やステンレス鋼の核種分析方法の検討を進め、それらの成果を用いて、エンドピースの線量、核種の種類や濃度、分布情報に基づきながら、溶出試験のサンプルサイズや形状、その他の条件について整理を行い、具体的な試験計画を策定、溶出試験を実施していく予定である。

- 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一、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 長期放出挙動評価一、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 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

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。そのため、構造材や充填材としてセメント系材料の利用が見込まれる TRU 廃棄物処分施設において、閉鎖後の複数の異なる構成材料からなるニアフィールドの状態変遷を評価するため、セメント系材料と緩衝材の変質に関するデータが取得され、これらを表現できる解析モデルの構築が行われている^{1),2)}。

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)} の利用を見据え、HFSC と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タ取得とモデルの高度化を図るとともに、超長期における緩衝材のアルカリ環境下における長期健全性に対して、ナチュラルアナログ (NA: Natural Analogue、以下、「NA」という) により、長期のアルカリースメクタイト相互作用による反応プロセスに係るデータを取得し、現象理解を図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、アルカリースメクタイト相互作用による長期の反応プロセスを評価するために、アルカリとの相互作用が天然でみられるフィリピンパラワン島において、アルカリ環境下のスメクタイト化に係る反応プロセスに関わるデータを取得し、現象理解を図り、HFSC 相当の pH 条件でのニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化に資する情報として提示する。

◇平成 30 年度の成果⁵⁾

(1) 調査概要

フィリピンではルソン島とパラワン島に蛇紋岩化作用に伴うアルカリ地下水の湧水がみられる大規模なオフィオライトが分布することから、ルソン島北西部及びパラワン島中南部で NA 調査を実施してきた^{1),6)}。

ルソン島北西部の Saile 鉱山の NA⁶⁾ では、天然でのベントナイトとアルカリ地下水との長期にわたる相互作用によって明確な変質層を確認したが、アルカリ変質が生じていても Mg-Fe スメクタイト系粘土鉱物等の二次鉱物によるクロッキングにより変質領域は数 mm に限定され、大部分のベントナイト鉱床が未変質のまま残存していることが確認された。ただし、Saile 鉱山の NA では既にアルカリ地下水の供給が止まっており、相互作用によるアルカリ変質反応の痕跡は観察できるが、過去に浸出していたアルカリ地下水の地球化学特性やその反応時間を明確にできないという課題があった。そのために、現在もなおアルカリ性地下水が流出している候補サイトを探索し、スメクタイト質の堆積物にアルカリ地下水が浸出していることを確認したパラワン島中部の Narra 地区において詳細な調査を実施している。

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アルカリ変質プロセスにおいて不明確な点も多く、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キングのメカニズムなどが NA における課題である。

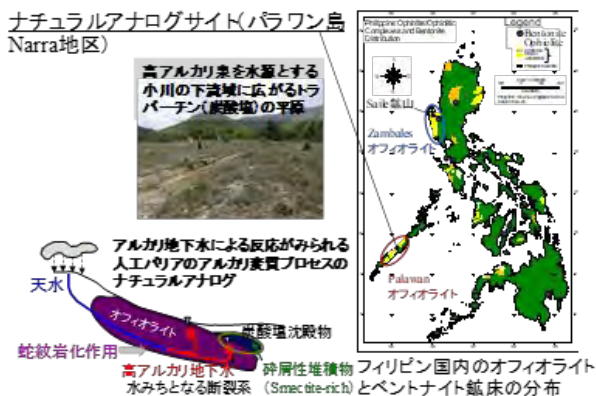


図-1 NA サイト (パラワン島 Narra 地区) の位置と地質環境

平成 30 年度はアルカリ環境下の NA 試料 (堆積年代 (≡アルカリ地下水との反応時間) の異なるスメクタイトに富む碎屑性堆積物) を対象に XRD による鉱物同定及び薄片試料のモード分析 (スメクタイト化率の定量) 等を実施して、アルカリ環境下の反応時間とスメクタイト化率を把握し、スメクタイト生成に係る反応プロセスを評価した。

(2) フィリピンでの天然アナログにおけるアルカリ変質プロセス

アルカリ変質プロセスにおけるスメクタイト化の程度を明らかにするために、パラワン島 Narra 地区のトレンチから採取した試料を対象として、主要構成鉱物の鉱物組み合わせを把握するための X 線回折 (以下、「XRD」という) 分析、及び薄片試料の偏光顕微鏡による鉱物組成・産状 (組織) の観察とモード鉱物の量比の分析を実施した。

XRD では下位の泥質部と上位の砂質部とで明確な差はみられず、いずれの試料もスメクタイトに富む堆積物といえる。これらの試料のうちトレンチ 6 の 2 試料の光学顕微鏡観察を行った結果、いずれの試料でも孔隙の一部を充填する C-S-H とみられる非晶質物質とスメクタイトとの共生関係がみられた (図-2)。

アルカリ地下水環境下でのスメクタイトの形成に係る反応プロセスについては、これまでの観察結果から、図-3 に示すように、高アルカリ地下水との相互作用により、苦鉄質鉱物や蛇紋石、緑泥石が溶解して、Mg、Fe、Si が溶解し、

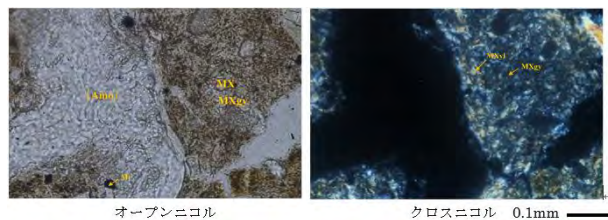


図-2 孔隙を充填する非晶質物質[Amo]と共生するスメクタイト MXyl (PWT06-17-Rh-002: トレンチ 6 下位)

高アルカリ地下水中の Ca、少量の斜長石から溶出する Al によって、スメクタイトの前駆体となる M-S-H が沈殿するとみられる。Fe や Al も容易に取り込むと考えられる M-S-H からは、サポナイト、鉄サポナイト、スチープンサイト等の 3 八面体型のスメクタイトが生成する。また、Fe-rich の 3 八面体型スメクタイトの周囲からノントロナイトが生成する産状も見られる。Fe-H₂O 系の相平衡図からアルカリ地下水の pH11.0~11.5 では、Eh が -0.6[V] (基盤岩の裂隙水である Narra3.1 のアルカリ地下水) ~0.1[V] (現在のトレンチサイトのアルカリ浸出水) の範囲で Fe²⁺ と Fe³⁺ が平衡となる境界があり、酸化還元状態の微妙な違いによって生成する二次鉱物も Fe²⁺ のサポナイトや Fe³⁺ のノントロナイト (この中間組成を示し明確に区別できないスメクタイトもみられる) の違いがでると思われる。

今年度の光学顕微鏡観察では、スメクタイトの前駆体と C-S-H がアルカリ溶液から沈殿したことを裏付ける C-S-H とみられる非晶質物質とスメクタイトと共生関係を確認しており、これは図-3 に示すアルカリ変質プロセスと整合する。

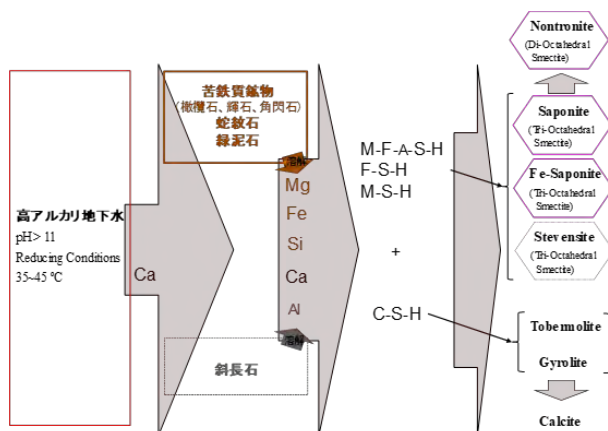


図-3 パラワン島 Narra 地区の苦鉄質碎屑性堆積物中のスメクタイト生成に係る鉱物変遷プロセス

(3) アルカリ環境下の反応時間とスメクタイト化

これまでに把握しているトレンチ底部の碎屑性堆積物中のヒューミンのC-14年代は堆積年代を示す。アルカリ地下水との反応時間は、碎屑性堆積物が堆積した時代からアルカリ地下水が供給され相互作用があったと考えられることから、ヒューミンのC-14年代そのものが反応時間と同等であると考えることができる。

パラワン島 Narra 地区のアルカリ環境下の変質プロセスにおいて、アルカリによりどれくらいの時間スケールでどの程度スメクタイト化が進むのかを、C-14年代測定、XRD 及びモード分析結果から考察した。年代測定を実施したトレンチ底部の試料のC-14年代、同じ層から採取した試料のXRDパターンと $2\theta=5.9^\circ$ 付近のスメクタイトのピークのピーク強度、モード分析によるスメクタイト含有率をまとめて図-4に示す。

これらの分析結果の比較から、反応時間とスメクタイトのピーク強度とは相関がみられ、反応時間が長くなるにつれピーク強度が強くなる傾向が明確にみられる。粘土鉱物の結晶化度は、ピーク強度のみでは評価できないが（低角底面反射のピークの高さと面積（幅）から評価）、ピーク強度との一定の相関があることが言えることから、アルカリとの反応時間が長いほどスメ

クタイトの結晶化は進んでいると考えられる。

一方、このスメクタイトのピーク強度は他の鉱物のピーク強度との対比からスメクタイト含有率とも関連があるが、反応時間とモード分析によるスメクタイト含有率には明確な相関があるとは言えない。T-2(PWT02B-15-C2-2-001)は比較したトレンチで最も反応時間が短く、顕微鏡観察でも空隙等を充填するスメクタイトと共生するC-S-Hが多くみられる。年代測定データがないため明確な堆積年代が不明なT-6上位(PWT06-17-Rh-007)では方解石との共生がみられるが、表層の炭酸塩層の直下の層であることから、T-6上位も反応時間が比較的短いと推測できる（少なくともT-6下位(PWT06-17-Rh-002)の4,008年より短い）。両者のスメクタイトのピーク強度が弱いことは一致しているが、スメクタイト含有率は大きく異なりT-2の28.9%で最も低いのに対して、T-6上位は49.7%でかなりスメクタイト化が進行しているといえる。反応時間が9,000年を超える長い試料においても、T-5(PWT05-15-Rh-010)の44.1%に対して最も反応時間の長いT-3(PWT03-15-C1-004)は30.2%である。また、T-6上位とT-6下位との比較でも、反応時間が長いT-6下位のほうがスメクタイト含有率は低い。

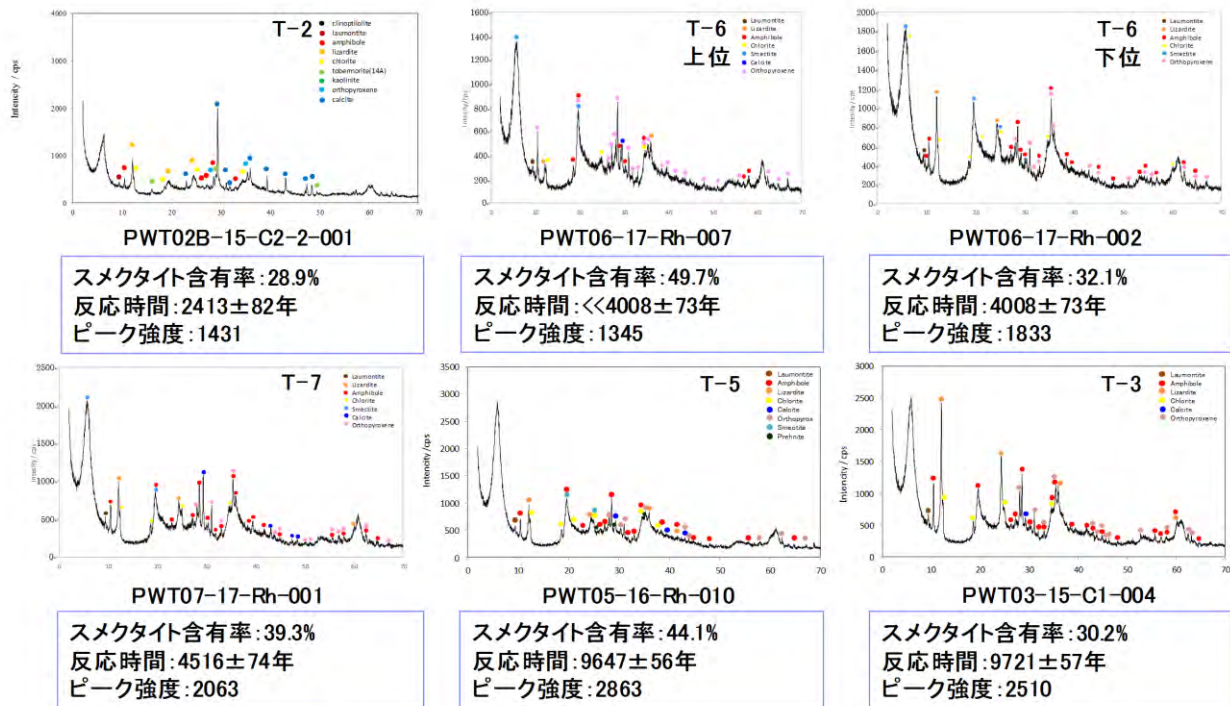


図-4 スメクタイト化と反応時間

これらのことから、スメクタイト化はアルカリとの反応時間だけでそれによる変質領域が進展するとは一概に言えない。アルカリ変質プロセスは、「アルカリプリュームの浸潤・拡散」、「アルカリプリュームによる鉱物の溶解」、「溶出した鉱物の成分を含むアルカリ溶液からの非晶質物質の沈殿・晶出」、「粘土鉱物への結晶化」という一連の物質移行と素過程の反応が組み合わさったものである。顕微鏡観察とモード分析の結果から、岩片の割合が少なく、粒子径の小さい鉱物片サイズの方がよりスメクタイト化しており（T-3は岩片サイズの蛇紋石が多く図 4.2 24の XRD でもそのピーク強度が強い）、アルカリとの反応時間よりも粒子の大きさ、すなわち粒度分布のような物理的状態の影響が大きいことを示している。このことは、「アルカリプリュームの浸潤・拡散」には差がないことから、粒子サイズ等の物理的状態がアルカリ-初生鉱物間の溶解反応に大きく影響し、変質領域の進展や変質速度を律速する要因になることが考えられる。一方、二次鉱物の沈殿・晶出は、鉱物の溶解に依存し、過飽和の条件になれば速やかに生じるものと推察される。その後、時間をかけて結晶化していくことが示されたが、比較的早い段階で（少なくとも反応後2,000年程度経過したものは）スメクタイトといえる状態に成長していると考えられる。

- 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 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、シリカフェウ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 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、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

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、廃棄物に含まれる金属の還元腐食などに起因した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（電気事業連合会／核燃料サイクル開発機構，2005）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）中の移行挙動及び力学挙動を予測し、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となることが示されている。

これまでの検討^{2)~8)}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、平成 29 年度末に地層処分研究開発調整会議（経済産業省）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～平成 34 年度）」⁹⁾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）』¹⁰⁾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、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における処分坑道断面例を図-1 に示す。

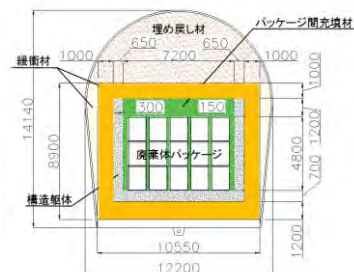


図-1 対象とする TRU 廃棄物処分施設の処分坑道断面例（深成岩、先新第三紀堆積岩類における廃棄物グループ 2 の例）¹⁰⁾

また、表-1 に本事業の 5 か年の実施計画を示す。

表-1 本事業の5か年の実施計画

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、評価手法の検討			
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)	<ul style="list-style-type: none"> モックアップ試験仕様設定、予察解析 	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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 押し出し水量評価
	モックアップ試験計画～再冠水試験・要素試験の実施 (取得済み材料特性データのアップスケーリングの見通しの考察)		ガス移行試験、解析評価、実施設でのガス移行挙動評価 (力学連成ガス移行挙動評価と押し出し水量の評価)
(2) 現実的なガス移行場の環境等の設定に関する検討			
2) 長期変遷を考慮したガス移行場の状態設定評価	<ul style="list-style-type: none"> 変質により生じるガス移行挙動への影響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 	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 化学変質/力学挙動相互連成解析コードの適用性確認(二次元断面) 状態変遷のケーススタディと成果の取りまとめ 物理化学的変遷に伴う緩衝材性能変遷の定量化
	単純系/一次元での化学変質/力学挙動連成解析手法の妥当性評価		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 (ガス発生挙動評価、他)	<ul style="list-style-type: none"> ガス発生挙動の経時的な定量評価のための評価条件の整理 (Gr.2) 	<ul style="list-style-type: none"> 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) 	<ul style="list-style-type: none"> 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
	グループ2を対象としたガス発生挙動の経時的な定量評価 (発生挙動評価の試行と評価手法の妥当性確認)		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)

◇平成 30 年度の成果¹¹⁾

(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、実施設における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加えて必要に応じて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。

2018 年度は、次年度実施予定の再冠水試験に向けて試験に用いる装置の仕様設定と各試験の予察解析を行った。

a. 試験装置の仕様設定

モックアップ試験装置の仕様については、試験の目的 (材料特性パラメータ等のアップスケーリング) を考慮するとともに再冠水試験、ガス移行試験のそれぞれが現実的な試験期間 (概

ね 1 年以内) で実施可能であることが求められる。これまでの要素試験に用いた主なベントナイト供試体の厚さは、図-2に示すとおり 25mm から 50mm であった。また実施設の緩衝材厚さについては図-1 に示すとおり 1000mm から 1200mm となっている。以上を踏まえて供試体寸法を仮設定し、再冠水およびガス移行試験中の挙動の経時変化について、既往の材料特性パラメータを用いた気液二相流解析コード (GETFLOWS) による予備解析を行った結果、要素試験用の供試体厚さの2~5倍程度、実施設の緩衝材厚さの1/10程度を目安とし、図-3 に示すとおり厚さを 100mm (側部、頂部) から 120mm (底部) とした。

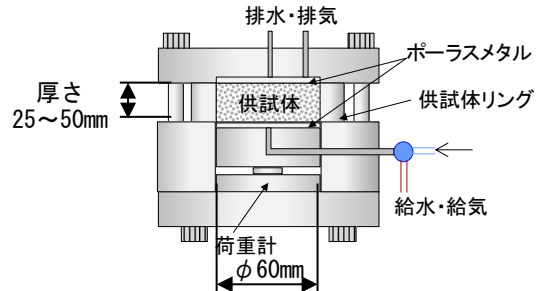


図-2 要素試験供試体イメージ

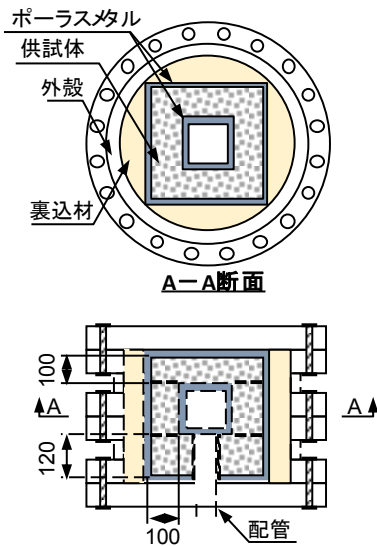


図-3 モックアップ供試体イメージ

また、計測システムについては、再冠水過程およびガス移行過程の二相流特性の把握や飽和の判断に必要なデータ取得のため、再冠水試験中の注水量、注水圧、排水量および全応力の経時変化、ガス移行試験中のガス注入量、ガス注入圧、排気・排水量、および全応力の経時変化を計測するためのシステムを設定した。

再冠水試験およびガス移行試験時の試験装置のシステムイメージを図-4に示す。

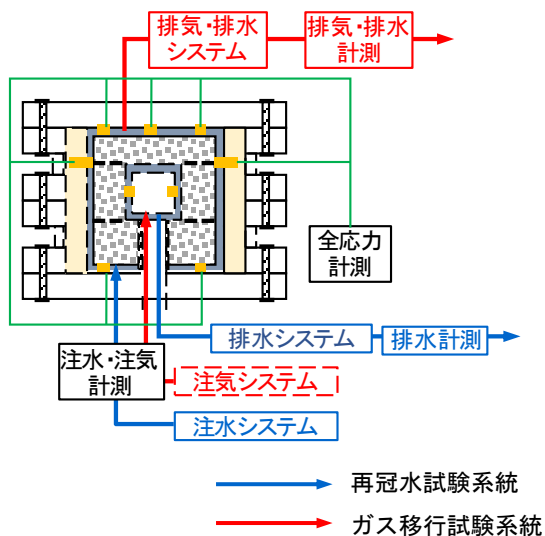


図-4 再冠水・ガス移行試験装置のシステムイメージ

b. 予察解析の実施

予察解析については、各試験条件として注水

圧や注入ガス圧およびそれらの昇圧速度を設定したうえで、試験中に想定される現象（緩衝材の再冠水過程およびガス移行過程で想定される飽和度分布の経時変化や、破過あるいはガス透過の時期等）を、力学連成気液二相流解析コード（Code_Bright）にて、より詳細に予測することにより、試験結果を考察・評価する際の基準とするために実施した。

予察解析より、再冠水過程においては、図-5に示すとおり、試験体の下端部から注入された水は速やか（0.04日）に緩衝材外側のポーラスメタルの間隙を満たし、緩衝材の内側に向けて浸潤フロントが進展し、約65日には飽和に至っていることが予測される結果となった。また、ガス移行過程においては、図-6に示すとおり、試験体内側の下端部から注入されたガスは約12日かけて緩衝材内側のポーラスメタル内の間隙水を排水した後、緩衝材の外側に向けてガス移行フロントが進展し、約120日までに透気に至ることが予測される結果となった。

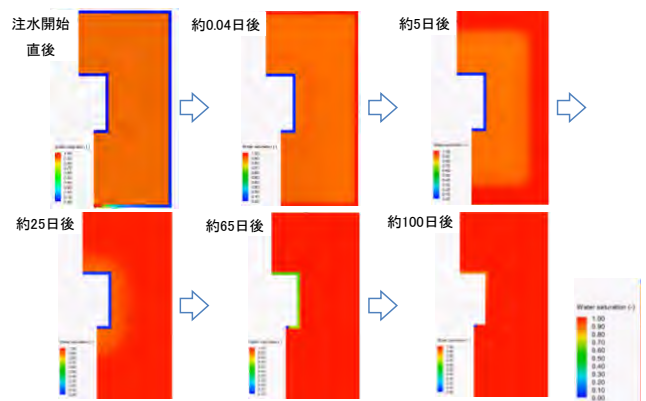


図-5 再冠水過程の飽和度分布の経時変化

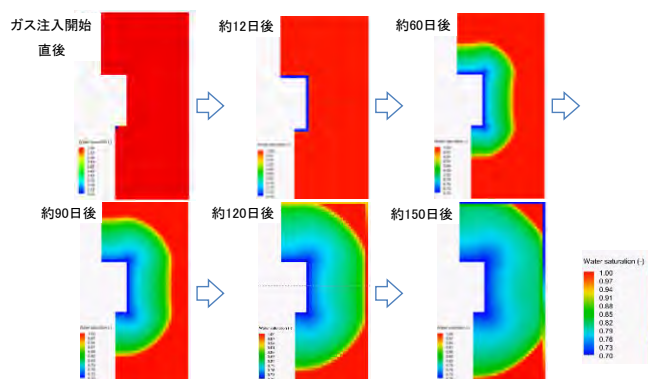


図-6 ガス移行過程の飽和度分布の経時変化

(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、ガス移行挙動評価に反映するための検討および、②ガス移行挙動に直接的に影響を与える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、経時的な定量評価を行うこととしている。

2018年度は、2017年度までの人工バリアの閉鎖後長期の水理・力学・化学(HMC)連成解析の結果⁸⁾から、ガス移行場に生じる事象のうち、ガス移行挙動への影響が予測される事象を整理した。また、人工バリアの長期変質挙動を考慮したガス移行場の状態設定に向け、重要となるベントナイトの化学、力学現象モデルを拡充するための試験を実施するとともに、解析におけるHMC現象の連成手法について検討した。また次年度実施予定のガス発生挙動の定量評価に向けた、評価条件の考え方を整理するとともに成果のイメージを提示した。

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、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、処分場の閉鎖後長期を想定したガス移行場の状態設定を実施することを目的に、以下の内容を実施した。

- 1)閉鎖後長期の人工バリアの状態変遷に関する情報の整理
- 2)緩衝材の化学変質挙動の試験による確認とモデル化
- 3)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
- 4)HMC連成解析の高度化の検討

上記1)では、より確からしいガス移行場の環境を設定した上で核種移行や力学的挙動に対する施設の健全性を評価可能なモデル・解析手法を開発する際の参考とすると共に、今後のガス移行場の状態設定における留意点を見出すために、2017年度までのセメント系材料とベントナイト系材料で構成される人工バリアの2次元断面における閉鎖後長期の化学変質および力学挙

動の連成解析の結果⁸⁾から、ガス移行場の変質により生じる事象のうち、ガス移行挙動への影響が予測される事象を整理した。その結果、空隙率の増加や乾燥密度の低下、モンモリロナイトの溶解やCa型化する部位が発生する可能性がある事など、ガス移行経路に影響を及ぼす事項を整理した。今後は、以上の知見をガス移行評価モデルの開発に活用すると共に、HMC連成解析手法の検討の留意点とする必要がある。

上記2)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、これまでのセメント系材料の溶脱段階のRegion Iでの検討及びモデル化に加え、Region IIにおける二次鉱物の生成現象の試験による確認とモデル化を検討した。試験では反応の初期段階から体積増加が認められると共に、多くの種類の二次鉱物が観察されたことから、反応初期段階において、図-7に示すように複数の反応が同時進行で起きる可能性が示唆された。今後は、Region IIにおける二次鉱物生成のメカニズムを含む挙動について、引き続き試験により確認し、それに基づいたモデル化手法について、簡略化や部分的な詳細化等を検討する必要がある。

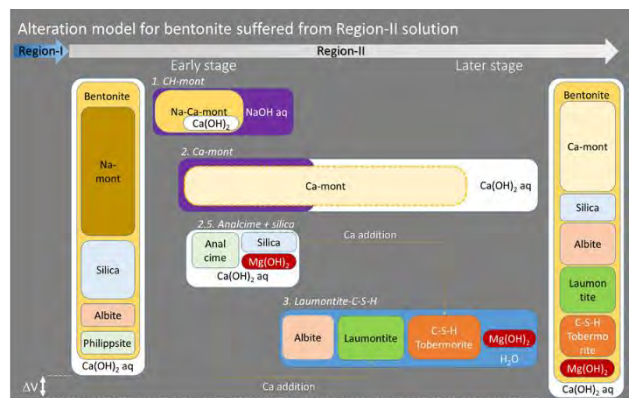


図-7 ベントナイトとRegion II溶液の反応による変質モデル（試験に基づく仮説）

上記3)では、ベントナイト系材料の化学変質に伴う物質移行・力学特性の変化のうち、せん断挙動についてHMC連成解析の力学解析に反映するために、飽和期間を短縮した効率的な三軸 $\bar{C}U$ 試験方法を検討すると共に、ベントナイトのせん断挙動を確認してその挙動のモデル化を検討した。その結果、試験における適切なせん断

速度等の試験条件を把握した。また、ベントナイト系人工バリアの限界状態線と静止土圧係数 (K_0) 線が、乾燥密度と平均有効主応力の対数軸の平面において直線で互いに平行関係にあることが示唆されるなど、限界状態線とベントナイトの乾燥密度及び限界状態線と K_0 の関係に関する知見を得た。今後は、検討した三軸 $\bar{c}\bar{u}$ 試験方法によりベントナイトのせん断挙動に関する知見を拡充すると共に、本検討で得られたモデル化手法の知見に基づき、モンモリロナイト含有率等と限界状態線との関係のモデル化を検討する必要がある。

上記 4) では、昨年度までの HMC 弱連成解析において、化学解析と力学解析で別々の解析コードを用いていたために情報の受渡し頻度が低かった等の課題が抽出されたことから⁸⁾、複数の物理現象の連成解析が可能な解析プログラム (COMSOL Multiphysics[®]) を用い、HMC 連成解析の高度化を検討した。その結果、本解析プログラムについて、単純化した系において、化学解析及び力学解析手法への適用性について基礎的な確認、加えて化学解析－力学解析の連成が実施可能かの確認を行い、人工バリアの状態変遷

に関わる解析手法の構築にあたっての適用性を得た。今後、処分場の人工バリアを再現した解析体系における検証を進めつつ、ガス移行場の状態設定の解析をしていく必要がある。

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うえでインプット情報として必要となるガス発生挙動 (発生時期、発生量) の経時的な定量評価について、より現実的な評価条件を設定したうえで行うこととしている。

今年度は、既往検討事例を参考に、より現実的な評価条件を設定するための考え方を整理するとともに、評価結果のイメージを提示した。

本検討の成果として、表-2 に本検討におけるガス発生挙動の定量評価のための条件設定の考え方を、既往の評価条件からの更新内容とともに整理したものを示す。また、図-8 にはガス発生挙動の評価位置を、廃棄体容器内部、廃棄体パッケージ内部、その他の人工バリア、の 3 箇所と設定した場合の、それぞれの評価位置でのガス発生挙動の評価結果のイメージを示す。

表-2 本検討におけるガス発生挙動の定量評価のための条件設定の考え方

項目	JAEA/FEPC TRU-2 (2005) ¹⁾ NUMO TR10-03 (2010) ¹²⁾	NUMO TR14-03 (2014) ¹³⁾	本検討
インベントリ	実施主体の廃棄物受取後 (t=25y) (TRU-2 4-90) 旧インベントリ (TRU-2 P4-8)	実施主体の廃棄物受取後 (t=25y) 旧インベントリ (TR14-03 P3-21)	廃棄物発生後 (t=0y) 最新のインベントリ
容器 (廃棄体) / パッケージ内でのガス発生量の評価条件	金属腐食においてパッケージ容器が考慮されていない (TRU-2 P4-106) 容器 (廃棄体) / パッケージ容器は閉鎖直後に開口 (TRU-2 P4-132)	金属腐食においてパッケージ容器を考慮容器 (廃棄体) / パッケージ容器は閉鎖後500年で開口 (TR14-03 P6-8)	金属腐食においてパッケージ容器を考慮容器 (廃棄体) / パッケージ容器の寿命 (開口時期) はそれぞれ独立に可変的に設定可能
ガス発生開始	(おそらく) 処分場閉鎖時	実施主体の廃棄物受取時 (t=25y) (TR14-03 P6-8)	廃棄物発生時 (t=0y)
人工バリア構成と形状	TRU-2 当時のもの (TRU-2 P4-9)	レベル3 (TR10-03 P6-24~) 当時のもの (TR14-03 P3-47~)	最新の情報に更新可能 (NUMO-TR-18-03 P4-59, 同付属書4-36など)
水	閉鎖後直ちに開口し、地下水が常に豊富に存在	開口するまでは、廃棄体内部の水のみを消費してガス発生反応が進行	開口するまでは、廃棄体内部の水のみを消費してガス発生反応が進行
パッケージ外での放射線分解によるガス発生の考え方	γ 線による透過効果を考慮していない (透過せず全てパッケージ内での豊富な水の放射線分解に消費)	γ 線による透過効果を考慮していない (透過せず全てパッケージ内での豊富な水の放射線分解に消費)	γ 線による透過効果を考慮 (遮へい計算を実施)
金属の腐食速度	一定の長期腐食速度 (TRU-2 P4-106, 109)	好気性金属腐食ではガスは発生しない。嫌気性金属腐食では、一定の長期腐食速度を考慮 (TR14-03 6-37~) (短期 / 長期腐食速度 SMOGG内蔵データ)	好気性金属腐食ではガスは発生しない。嫌気性金属腐食では、国プロの成果を反映可能 (より現実的な金属腐食速度)
セメント中の水の放射線分解	地下水が常に豊富に存在するとして評価	G値を補正し、セメント中の水として評価 (G値はSMOGG内蔵データ)	廃棄体特性に応じて、セメント中の自由水 / 構造水の違いを考慮して評価 (構造水はガス発生に寄与しない) (電中研報告書L11020参照)
G値	TRU-2 当時のもの (TRU-2 P4-97~107)	更新された設定値 (TR14-03 P6-35) (SMOGG内蔵データ)	更新された設定値 (評価方法に応じて設定値を見直す)
ツール	GAMMON	SMOGG	簡易計算式 (条件変更柔軟に対応)

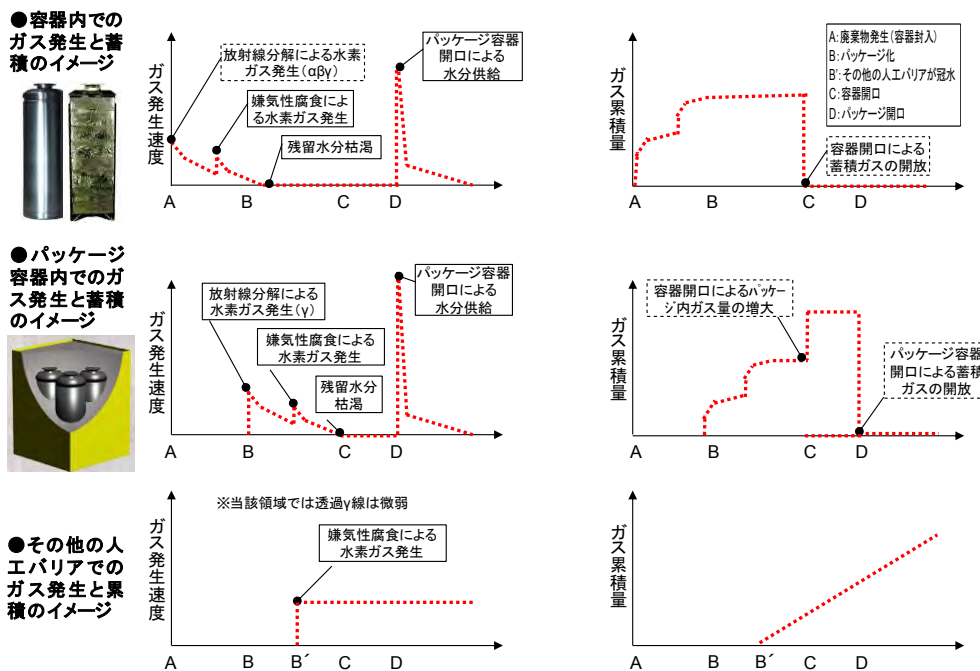


図-8 ガス発生挙動評価結果のイメージ

本検討においては、以上に示した検討成果をもとに、次年度、具体的な評価条件の設定を行い、ガス発生挙動の経時的な定量評価を実施する。

- 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 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) 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～平成 34 年度)、2018
- 10) 原子力発電環境整備機構 包括的技術報告書：わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー レビュー版、NUMO-TR-18-03、2018.11
- 11) 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
- 12) 原子力発電環境整備機構 地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性「処分場の概要」の説明資料、NUMO-TR-10-03、2011
- 13) 原子力発電環境整備機構 地層処分低レベル放射性廃棄物の安全性向上に関する検討ー多様な地質環境においても地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全性と評価の信頼性をより一層高めることができる処分概念の検討ー、NUMO-TR-14-03、2014

6. ジルカロイハルの HIP 処理によるヨウ素固定化方法の検討

◇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、ジルカロイハルの HIP 処理によるヨウ素固定化方法の開発を目的として実施する。そのため、ジルカロイをマトリクスとする固化体の試作等により実用化への見込みを得ることで、将来の経済産業省からの受託事業への提案・R&D 継続に反映させる予定である。なお、被覆管については、資源の有効利用の観点で古くから再利用することが検討されていることから、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。

◇平成 30 年度の成果

HIP 処理のカプセル容器に最適な金属材料について調査・検討した。温度が高すぎると、カプセル材料であるニオブが、ジルコニウムや廃銀吸着材の基材であるアルミニウムと反応し、カプセルの健全性に影響することがわかった。また、これまでに作製した固化体内部のヨウ素や Zr の分布状態や均質性について評価したところ、ヨウ素は固化体の Zr マトリクス中に閉じ込められているものと推察された。これらの結果から、今後製作すべき HIP 固化処理条件として、模擬廃銀吸着材とジルカロイを Nb カプセルに封入し、1300℃程度、175MPa、3 時間として HIP 処理を行うことが良いと考えられた。今後、より詳細な分析によって反応の確認や影響の有無について検討するとともに、ジルカロイハルの形状・サイズ、廃銀吸着材の前処理手法などに着目し、合理的に HIP 処理できる条件を整備する必要がある。また将来的には、ジルコニウム金属中でのヨウ素の挙動や、固化体サイズのスケールアップを試みることで、ジルカロイハルによる固化技術の成立性を見通しを得ることが重要である。さらに、ジルカロイハルを HIP 処理することで、TRU 廃棄物グループ 1 (廃銀吸着材) の安全性向上だけでなく、ハル廃棄物 (グループ 2) そのものの処分の安全性が向上する可能性がある。TRU 廃棄物の処理・処分の合理化や安全性向上のため、ヨウ素対策と合わせた技術開発が求められる。

- 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

7. 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

◇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。平成 29 年度は、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、平成 26 年度からの本事業の成果を日本原子力学会 2018 年春の年会にて報告した。

平成 30 年度は、本研究のまとめとして、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、整理すると共に、平成 29 年度の本事業の成果の一部を日本原子力学会 2019 年春の年会において報告した。

◇平成 30 年度の成果

(1) 地層処分を起点とした燃料サイクルの評価について

放射性廃棄物の処理処分に関する燃料サイクルのプロセス条件に留意した原子力利用シナリオの検討に基づいて、地層処分と密接に関係するガラス固化プロセス、及びその上流に位置する再処理プロセスの各条件と廃棄物の特性との定量的な関係を整理すると共に、今後の燃料サイクル技術の高度化を見据えた放射性廃棄物処理処分における有効な技術選択肢の提示、あるいは原子力システム全体の最適化検討において考慮すべき研究対象領域の全体像を検討した。また、原子力発電の利用形態とそれにより最終的に発生する放射性廃棄物の定量的な関係を把握するための物質諸量評価に有効なモデル計算手法に関しては、再処理以降のバックエンドプロセス評価に関する機能向上が今後重要であることを確認した。

これらの成果を含め、5 年間の本研究を通して、廃棄物管理の視点から関連するプロセスの条件を分野横断的に設定、評価、検討することが重

要であり、それには廃棄物処分における負荷低減の視点と、その効果を定量的に表示する指標、及び原子力利用に関する時間軸を意識したシナリオを持つことの重要性を明らかにした。

(2) 日本原子力学会 2019 年春の年会での研究発表

2018 年春の年会に引き続き、シリーズ発表の一環として、平成 29 年度に実施した本事業の成果の一部を一般セッション/核燃料サイクルと材料/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」

- ・ 分離核種の燃焼を念頭に置いたCBZコードシステムを用いた高速炉燃焼計算
- ・ MAリサイクルを想定した高速炉の廃棄物特性評価
- ・ ガラス固化プロセスにおける廃棄物含有率と処分場の負荷低減
- ・ 横置き方式による廃棄体専有面積削減効果の検討
- ・ MOX燃料におけるMA分離と処分場負荷削減効果の検討

8. 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、燃料ペレットに含まれる不純物元素の定量分析を実施した。また、ハル・エンドピースの放射性核種組成及び含有量の設定のための不純物量の測定計画を策定した。

(This page(p58) is intentionally kept blank.)

III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

1. 放射性廃棄物海外総合情報調査

◇事業の概要

放射性廃棄物（高レベル放射性廃棄物のほか、中・低レベル放射性廃棄物や原子力事故で発生した放射性廃棄物も含む。）の処分に係る技術情報として、国際機関における合意形成文書等の検討・策定状況、欧米やアジアの諸外国における処分政策や制度、研究開発、サイト選定（選定基準を含む）、処分事業・技術評価等の状況、法制度についての情報・データを収集し、原典、背景情報、主要文献の翻訳等から構成される総合的なデータベースとして整備を行うとともに、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。

◇平成30年度の成果¹⁾

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

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

が小さい国々で検討されている国際共同処分の状況に関する情報の収集を行った。

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

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

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



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

(2) 情報の整理・発信・普及

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

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

報を充実させた（図-2）。

上記のウェブサイトにおいては、諸外国における地層処分計画と技術開発、処分事業に関わる制度・実施体制、処分地選定の進め方と地域振興、処分事業の資金確保、安全確保の取り組み・コミュニケーションの観点から最新情報と解説を掲載した。また、『海外情報ニュースフラッシュ』として、諸外国の高レベル放射性廃棄物処分を中心としたニュース記事を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://www.2.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(2019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(2019年版)』(図-3:右)の2種類の資料を作成した。

技術情報冊子①(2019年2月発行)は、諸外国における高レベル放射性廃棄物の地層処分の進

捗状況に関する情報を体系的に整理・解説することにより、地層処分の理解促進に資することを目的とした資料である。誰でも利用できるように難しい表現をできるだけ避け、諸外国の状況や多様な取り組みがわかるように配慮している。具体的には、地層処分概念や施設設計、処分事業の計画や進捗のみならず、法制度、資金確保、サイト選定の進捗や地域振興などの幅広い観点から、当該国での地層処分事業の特徴について解説している。2019年版では、主要8カ国(スウェーデン、フィンランド、フランス、ドイツ、スイス、英国、米国、カナダ)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、2018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(2019年3月発行)の改訂では、欧米8カ国(スウェーデン、フィンランド、フランス、ドイツ、スイス、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 2018年度に整備した技術情報冊子

- 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(平成30年度分)、2019

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。

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）」により実施したものである。

◇平成30年度の成果¹⁾

(1) 処分技術に関連する萌芽的・基礎的な研究開発テーマの選定

平成30年度より3カ年の計画で研究を実施することを前提として、地層処分の技術的信頼性向上に資する、かつ将来実施主体が発展的に技術開発することに資する、主に4つの分野（地質環境、工学技術、性能評価、代替オプション）を対象とした、萌芽的・基礎的な研究テーマ及び研究実施者を公募した。選定においては、地層処分関連分野の専門家・有識者等で構成される選考委員会を設置し、当該委員会での審議により、7件の研究テーマ及び研究実施者を選定した。

(2) 研究開発に関する進捗管理・取りまとめ及び新たな知見の実用化に向けた検討・整理

1) 研究開発に関する進捗管理・取りまとめ
選定した7件の研究テーマの進捗管理等のた

めの評価委員会を設置し、平成30年度の研究開発内容・進捗状況に関する研究実施者による最終報告に基づいて、チェックアンドレビューを行った。その他、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り、進捗管理を行った。

以下に、平成30年度より開始した7件の研究テーマの概要と本年度の成果概要を示す。

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。

平成30年度は、ジオポリマー硬化体の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決定し、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）の測定やヨウ素等の収着特性を検討した。また、作成した試料の微細構造キャラクタリゼーションを、核磁気共鳴法（NMR）と電子プローブマイクロアナライザ（EPMA）により行った。

2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、フロー値、圧縮強度などの物性が大きく異なる結果となった。このことから、ジオポリマー硬化体の作製において適切なメタカオリン選定が重要であることが示唆された。

また、物性発現の違いはメタカオリンの反応性に起因することを明らかにした。さらに微細構造試験結果からアルカリ刺激剤の違いによりジオポリマー硬化体の構造変化が生じている可能性が示唆された。

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：北海道大学 田中真悟）

緩衝材の変質は反応が極めて緩慢であり、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。

平成 30 年度は、析出形態が異なる変質緩衝材試料の調製を目的として、電位勾配下における圧縮モンモリロナイト中でのトレーサーとなるイオンの移流速度及び分散係数を取得した。次に、そのデータを用いて、数値解析により、二次鉱物の析出形態を制御するための電流値やカルシウム等量分率 (X_{Ca})、炭酸イオン、硫酸塩イオンなどの最適な実験条件を選定した。その後、選定した 3 つの初期条件にて、緩衝材に変質鉱物を析出させ、鉱物同定や析出形態の観察を行った。

選定した 3 パターンの初期条件を基に緩衝材試料の変質調整を行ったところ、緩衝材中の硫酸カルシウム ($CaSO_4$)、または炭酸カルシウム ($CaCO_3$) の析出が、範囲、サイズ等、析出形態が異なる結果となり、緩衝材の調製方法を確立することができた。また、X 線回折分析 (XRD) または、二次鉱物の析出形態を電子顕微鏡 (SEM) 及び電子プローブマイクロアナライザ (EPMA) にて観察した結果、 $CaSO_4$ または $CaCO_3$ は Gypsum 及び Calcite として析出していることが確認できた。Gypsum は大きな凝集体を形成し、一方、Calcite は小さな凝集体として形成されており、析出形態が大きく異なる結果となった。この理由としては、溶解度積 (K_{sp}) の違いに由来する過飽和度の違いが核形成と凝集体の成長に影響を及ぼしている可能性が示唆された。

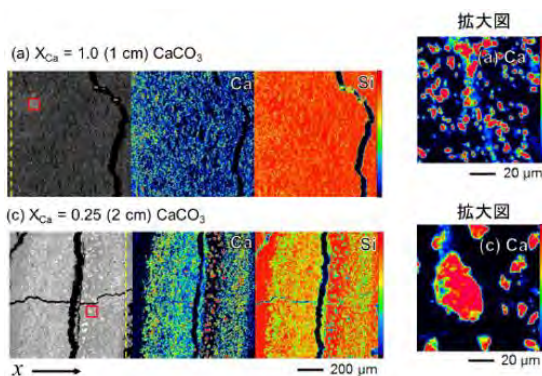


図-1 EPMA による $CaCO_3$ 凝集体の観察結果

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割れ目を形成する要因が隠されていることに着目し、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)を評価する手法の構築することを目的とする。

平成 30 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くパラメータ化と生成温度・年代の決定に着手した。具体的には、土岐花崗岩体中の瑞浪超深地層研究所の割れ目データまた広域ボーリングにより取得した割れ目データを精査し、サンプリング地点を選定した。次に、試料の採取、試料の成形を行い、偏光顕微鏡による光学的な観察から、対象とする変質鉱物を定め、電子顕微鏡観察及び化学分析を行った。

検討の結果、上部高密度割れ目帯の 12 試料と下部低密度割れ目帯の 13 試料、及び温度時間履歴が既知の 15 試料を研究対象として選択した。得られた試料は、観察や分析に資する薄片に成形した。次に、特に緑泥石化に着目し、岩石記載を実施した。変質現象の発達程度のパラメータを取得するために、偏光顕微鏡あるいは電子顕微鏡によって組成像を取得し、初生鉱物(黒雲母)と変質領域(緑泥石)の面積比を画像解析によりパラメータ化した。今後は、緑泥石化に係る変質パラメータのデータの拡充、パラメータと肉眼で観察される割れ目、顕微鏡レベルの割れ目との比較検討が課題である。

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。

平成 30 年度は、文献調査を行い、変形異方性や飽和度の変化に伴う岩石挙動に関する既往検

討を整理し、実験条件や解析条件を決定する。また、既存研究を参考にして乾燥収縮実験を行い、乾燥に伴う変形メカニズムを詳細に観察する。さらに、モンテリ岩盤研究所のボーリング深さの異なる水平孔で、湿度・気圧・温度の計測を常時行い、継続的なデータ取得によって乾燥に伴い変化する岩盤の含水状態を長期に観察する。

文献調査の結果、本研究の主な着目点の一つである異方性の主軸を高精度に特定できる試験方法として、円柱供試体を用いた三軸試験を採用することとした。

田下凝灰岩の円柱供試体を用いて、乾燥収縮実験を行った結果、気乾の条件では、4日程度で飽和度が20~30%まで低下し、8日以降では数%のオーダーまで乾燥が進むことがわかった。また、層理面とその直交方向にコアリングした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、さらに、乾燥収縮時の主ひずみ方向は、飽和度の変化にもなって変化することがわかった。

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、ボーリング孔内の岩盤の応答が、孔外に比べて異なってくることがわかった。これは、岩盤内の透気現象によるものと考えられる。引き続き計測を進めるとともに、計測データから乾燥に伴う不飽和領域の進展を評価する方法を考案していくことが課題である。

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。

平成30年度は、高圧状態を維持した状態で、安定同位体¹³Cでラベルしたメタン及び酸化剤を任意の濃度で添加した後、室温で保存して高圧培養が可能となるように、内部の圧力を調整可能な封圧容器を準備し、高圧培養実験の手法の確立を行った。その後、瑞浪超深地層研究所の地下水を採取し、高圧培養を開始した。また、処分場に持ち込まれる表層環境に生息するメタン酸化古細菌

が地下の化学環境の形成や放射性核種の移行に与える影響についても明らかにするため、地下と表層に生息するメタン酸化古細菌のゲノムの比較を行った。

室内の高圧培養実験については、シャフト付きステンレス製封圧容器の性能試験を行い、圧力を維持しながら高圧容器に地下水を採取することが可能となった。また、酸化剤・メタンの添加や試料の分取が出来る手法を確立した。また、瑞浪超深地層研究所の地下水を採取し、¹³Cメタン及び酸化剤として硫酸の濃度を添加して、高圧培養を開始することが出来た。

メタン酸化古細菌のゲノムの比較の結果、深部地質環境に生息するメタン酸化古細菌は、酸化剤として鉄と硫酸を用いるが、表層環境に生息するメタン酸化古細菌はそれらに加えて硝酸も用いることや窒素固定能が備わっていることが明らかとなった。今後、処分場の埋め戻し後の環境で、培養したメタン酸化古細菌が及ぼす影響についての検討が課題である。

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て、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、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。

平成30年度は、4種類のベントナイト原鉱石（月布産、富岡産、アメリカ（ワイオミング州 Ten Sleep）産、中国（吉林省劉房子）産）を対象に、各種特性のデータベースを構築するための試験を実施した。具体的には、原鉱石試料から膠結作用による固結を保持した不攪乱供試体と、粒径を0.425 mm以下に粉碎・調整し、それを締固めた再構成供試体をそれぞれ作製し、膨潤圧試験、一次元膨潤変形試験及び自己シール性能評価試験を実施した。

4種類の原鉱石の膨潤圧、膨潤変形及び自己シール特性実験の結果、交換性陽イオンとしてナトリウムイオンを主体とする原鉱石において、地質年代が長いほど膨潤圧または膨潤変形が小さく

なる傾向があった。また、月布原鉱石を 0.425mm 以下に粉碎し、締固めて作製した再構成供試体に対して、膨潤圧、膨潤変形及び自己シール特性の実験を行った結果、再構成供試体の膨潤圧は、同条件の原鉱石供試体の膨潤圧と比べて大きくなった。一方で、膨潤変形においては再構成供試体と原鉱石供試体が同様の値に収束した。ただし、今回の試験では原鉱石の膨潤変形率の変動幅が大きくなったため、今後試験数を追加し傾向を確認することが課題である。

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、断層周辺の物質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。

平成 30 年度は、低透水性の断層に囲まれた構造（コンパートメント構造）に着目し、コンパートメント構造を含み、断層ガウジの有無、ダメージゾーンの厚さなどを変化させた仮想的な水理地質モデルを作成した。本モデルを用いて、地下水流動解析と物質移行解析を行った。また、断層周辺試料を用いた元素収着試験として、断層ガウジを含む断層破碎帯の岩石試料を用いた元素収着試験を実施し、また、対象試料の化学組成・鉱物組成分析を行い、収着挙動と試料中に含まれる鉱物組成との関係について調べた。

複数の仮想的なコンパートメント構造を用いた地下水流動解析と物質移行解析を実施した結果、断層ガウジやダメージゾーンの厚さが水頭分布や地下水流動速度に影響を及ぼすことが確認され、ガウジを伴う低透水性の断層に囲まれたコンパートメント構造により、物質移行が抑制されることが確認された。

断層周辺岩石試料を用いて鉱物組成分析を実施した結果、断層ガウジの近傍では黒雲母が変質し、緑泥石や炭酸塩鉱物が含まれることが確認された。また、断層周辺岩石の粉末試料に対して、ユウロピウム (Eu) とセシウム (Cs) の収着実験

を実施した結果、Cs と比較して、Eu の黒雲母への収着が大きく、緑泥石への収着が小さいことが示唆された。ただし、収着挙動を支配する鉱物（ホスト相）は正確に特定されていないため、今後詳細に検討することが課題である。

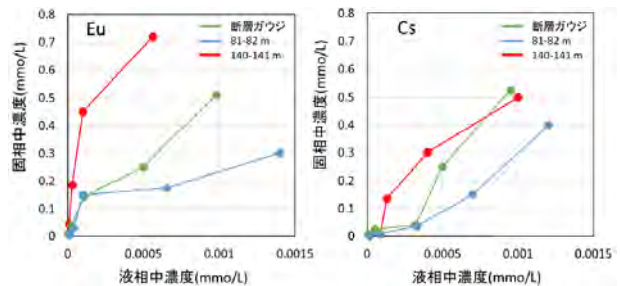


図-2 Eu 及び Cs の岩石粉末試料への収着（赤は変質が少なく黒雲母が多く、その他は変質に伴い黒雲母が少なく緑泥石が多い）

2) 新たな知見の実用化に向けた検討・整理

上記の研究の実施に加えて、本事業では、平成 26 年度からの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）の 4 年間に実施した 5 件の理工系の研究開発の結果に基づき、処分実施主体が将来処分事業を進めるに当たり必要となる技術の実用化に向けた課題や課題解決に向けたアプローチについて検討・整理した。具体的には、平成 26～29 年度に実施された研究開発報告書の内容把握・分析、諸外国の関連する研究開発の調査・分析、専門家へのインタビュー等を通して、実用化に向けた課題の整理、その課題解決に向けた研究開発の展開について整理した。また、上記の検討に資する海外の研究開発に関する文献の翻訳を行った。

- ・ 簡易な岩盤の浸透率、透水係数の推定方法の開発
- ・ 堆積物や炭酸カルシウムによる掘削影響領域の透水性に関する研究
- ・ 緩衝材膨潤挙動への熱影響のメカニズム解明、及び処分施設の長期的な力学挙動解析
- ・ 塩水系環境におけるアクチノイド類似元素の移行挙動
- ・ 原位置試験による亀裂媒体中の核種移行挙動現象の解明

図-3 実用化に向けた課題テーマ

- 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 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 報告書、2019

3. 国際的優良事例の我が国への反映

◇事業の概要

経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）と経済産業省が共催した「地層処分の理解を深める対話活動に関する国際共同ワークショップ」

（2018年11月28日、東京）の成果を基に、国内外向けに国際共同ワークショップで行われた講演から抽出したアドバイスを紹介するパンフレットを作成した。また、国際共同ワークショップで報告された対話活動のほか、他の諸外国における理解促進活動の事例を調査・分析し、取りまとめた。

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年度原子力発電施設広聴・広報等事業（国際的優良事例の我が国への反映）」により実施したものである。

◇平成30年度の成果¹⁾

(1) 国際共同ワークショップのパンフレット作成

「地層処分の理解を深める対話活動に関する国際共同ワークショップ」の講演概要を一般の人々に向けて紹介するパンフレットを作成した。ワークショップでは、NEAのほか、8カ国（ベルギー、カナダ、フランス、韓国、スウェーデン、スイス、イギリス、アメリカ）の処分実施主体等から対話活動に関する講演がなされた。

パンフレット紙面デザインにおいては、講演者の発言を引用する形で、対話活動におけるアドバイスと考えられたメッセージを抽出し、大きな文字でわかりやすく伝えるように工夫した。また、パンフレットを開いたときの印象が読み進めるかどうかを決定する重要な要素であると考え、第一見開きページに「未来の安全のために」と題したヘッドラインを設定し、地層処分を推進していくという確固たるメッセージを表現した。

(2) 地層処分の対話活動事例の整理

「地層処分の理解を深める対話活動に関する国際共同ワークショップ」で得られた諸外国の対話活動の事例を収集するとともに、フィンランド、ドイツ、オーストラリアを含めた海外における対話活動の事例を調査し取りまとめた。収集した事

例を、対話の相手（全国対象とした活動か、特定地域を対象としたものか）、主催・実施者、構成、構成者・参加者、参加者募集方法、対話方式、結果の反映先、対話の狙い、得られた教訓の各要素に分解して整理し、我が国において適用できる可能性が見込まれる活動の方向性を検討した。

また、整理した事例のうち、サイト選定段階にあり、様々な対話活動が行われている、英国及びカナダに焦点を絞って具体的な活動事例の詳細な調査を行い、各事例の概要、特徴、教訓などを整理した。

我が国への適用に関しては、各国の事例を「対話活動の技術に関するもの」、「特定の地域を対象としない活動」（現在の我が国の事業段階で適用可能なもの）、及び「特定地域での活動」（将来的にサイト選定が進んだ段階で適用可能なもの）に分類して、検討を行った。検討した事例の中には、すでに資源エネルギー庁や原子力発電環境整備機構（NUMO）が実施している活動に相当するものがあつたほか、法改正など制度整備の必要性があると考えられるものもあつた。諸外国の市民対話や対話集会の参加者選出においては、全国から無作為抽出する方式を採用している事例があるなど、今後の我が国の活動に参考となる点も明らかとなった。

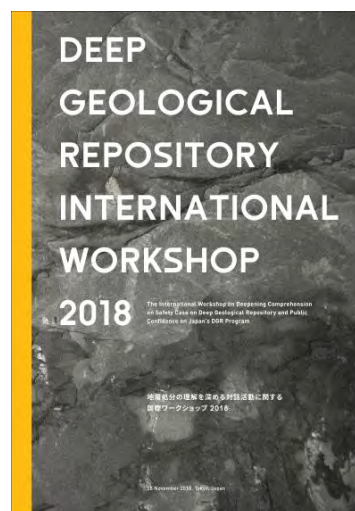


図-1 国際共同ワークショップパンフレット

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30年度 原子力発電施設広聴・広報等事業 国際的優良事例の我が国への反映 報告書、2019

4. 諸外国における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、諸外国におけるセーフティケースに関する要求事項、セーフティケースの内容及びセーフティケースに対する規制機関等のレビューについて、調査・整理等を行った。

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「平成 30 年度原子力発電施設等安全技術対策委託費（諸外国における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。

◇平成 30 年度の成果

(1) 国際機関におけるセーフティケースの最新情報の整理

国際原子力機関（IAEA）及び経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）の文献におけるセーフティケース*に関する記述概要を整理した。また、欧州連合（EU）及び西欧原子力規制者会議（WENRA）が公表した文献におけるセーフティケースに関する要件等を整理した。

(2) 諸外国におけるセーフティケースに係る概要の調査

長半減期の放射性核種が含まれる廃棄物の埋設を対象とした、諸外国のセーフティケースの検討状況と規制機関等によるレビューの状況を把握するため、英国、フランス、スウェーデン、フィンランド及び米国の 5 カ国を対象として、表-1 に示すセーフティケース及びそれに相当する文献を対象として、以下について、調査を行った。

- ・ 規制機関等のセーフティケースに関する要求事項
- ・ 事業者が公開しているセーフティケースに関する文書体系
- ・ 事業者が公開しているセーフティケースの全体を総括した概要

- ・ 規制機関等による事業者のセーフティケースに対するレビューの概要
- ・ 事業者によるセーフティケースの公表や規制機関等によるセーフティケースのレビュー等のセーフティケースに関する事業者及び規制機関等の今後の予定

表-1 調査対象文献

英国	NDA「一般的な条件における環境セーフティケース」(2010)
フランス	ANDRA「地層処分に関する安全オプション書類」(2016) ANDRA「長寿命低レベル放射性廃棄物処分プロジェクト 2015 年段階報告書」(2015)
スウェーデン	SKB 社「使用済燃料処分場の長期安全報告書 (SR-Site)」(2011)
フィンランド	ポシヴァ社「オルキルオトにおける使用済燃料処分に関するセーフティケース (TURVA-2012)」(2012)
米国	DOE「ユッカマウンテン処分場の建設認可に係る許認可申請書:安全解析書 (SAR)」(2008)

2013 年の NEA の報告書で提示されているセーフティケースの構成**と 2010 年に公表した英国の一般的な条件における環境セーフティケースの構成を比較すると、類似性が高いことがわかる（図-1 参照）。

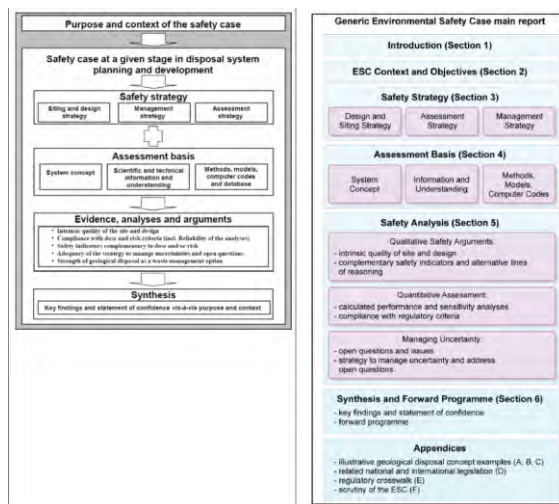


図-1 OECD/NEA（左）と英国（右）のセーフティケースの構成の比較

* IAEA SSR-5 (2012) では、「施設の安全性を立証するための論拠と証拠を集めたもの」としている。

** The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories NEA/RWM/R(2013)1

(3)事業者によるセーフティケースに関する調査
セーフティケースの概要の調査結果に基づき、表-1の5か国の中から英国を選定し、事業者が公表しているセーフティケースに関する詳細な調査を実施した。具体的には、事業者が提出したセーフティケース及びその裏付けとなる情報等を示した下位の文書のうち、埋設施設の閉鎖後の長期評価に関するものを詳しく調査、整理した。

1) 調査対象国の選定理由

英国を選定した理由としては、以下である。

- ・規制要件としてセーフティケースの提示を求めている。
- ・我が国同様、地質環境が特定されていない状態のセーフティケースである。
- ・OECD/NEAが提案した体系に基づいているため、セーフティケースの概念、構成等を理解する上で良い事例であると考えられる。
- ・事業者が2010年に公表したセーフティケースを規制機関がレビューし、2016年に規制機関の勧告等を考慮し改定されたセーフティケースが公表されている。

2) 調査内容

2010年に事業者であるNDA/RWMDが公表した「一般的な条件における閉鎖後安全評価（gPCSA, generic Post-closure Safety Assessment）」の内容を整理した。gPCSAは、地層処分施設（GDF, Geological Disposal Facility）の閉鎖後安全性に関して、英国における一般的な条件に基づき、放射線学的な評価を実施したものである。GDFのサイト及び候補地も見つかっていないため、具体的な地質や水理などに関する情報や具体的な施設設計は存在しないことから、全体的な性能評価（performance assessment）を実施することに大きな意味はないことから、gPCSAでは、いくつかの例を挙げて、将来のサイト候補地として挙げられる場所に関する閉鎖後安全評価を実施する方法について、具体的な説明を行うことを主な目的としている。本調査ではgPCSAの内容を以下の項目について整理した。

- ・英国政府の政策
- ・放射性廃棄物の分類
- ・処分インベントリ
- ・多重バリアシステム

- ・廃棄物パッケージ
- ・地層処分概念の事例
- ・性能評価アプローチ方法
- ・一般的な条件で実施される計算の目的
- ・閉鎖後性能評価における規制面に関する背景情報
- ・システム挙動に関する理解
- ・不確実性の取扱い
- ・閉鎖後性能評価で用いられたアプローチ
- ・評価結果
- ・まとめ

(4)セーフティケースに対する規制機関等のレビューに関する調査

「(3)事業者によるセーフティケースに関する調査」で対象とした英国の2010年に公表されたセーフティケースを構成する「一般的な条件における閉鎖後安全評価」（gPCSA）及び「一般的な条件における環境セーフティケース」（gESC, generic Environmental Safety Case）について、環境規制機関EA及び原子力規制局ONRが合同でレビューした報告書を調査した。

調査結果については、規制機関のレビューコメントが、事業者のセーフティケースのどの項目に対するものか容易に把握できるよう、規制機関のレビューコメントとセーフティケースの項目を対比した表形式に整理した（表-2）。

表-2 規制機関のレビューコメントの整理（抜粋）

大項目	小項目	環境規制機関のレビューコメント	事業者のセーフティケースの項目
gDSSC及びLoC処分可能性評価プロセス	gESCとLoC処分可能性評価プロセスとのつながり	・gDSSCとLoC処分可能性評価プロセスとの間の相互作用を理解したいと望んでいる。このことを理解するために、廃棄物パッケージに関するガイダンスなどの様々な文書を参照しなければならない。gDSSCには、セーフティケースの重要な側面に関する基本的な理解を得る上で十分な情報が含まれていない。(A3-9)	・【gESC】3.1.4 廃棄物パッケージングと廃棄物受入基準 ・【gPCSA】4.5.4 得られた結果の処分可能性プロセスへの適用方法
	廃棄物発生者への助言のためのgESC評価の使用	・処分可能性プロセスの定量的な裏付けに関する証拠がほとんど示されていない。地下水経路に関連する5つのパラメータのうち4つは廃棄物パッケージ特性に関連するものではない。(A3-11) ・残り一つのパラメータである廃棄物パッケージの破損時期について、その根拠が示されていない。(A3-12)	・【gPCSA】5.2 計算方法及びレファレンスケースの選択
	LoC処分可能性評価プロセスと廃棄物受入基準(WAC)の将来の開発との間の調整	・閉鎖後期間における地下水資源及び人間の健康保護を目的として、WACには化学的に有害かつ危険な物質に関する受入基準が含まれると考えているが、gESCでは現状、取り扱われていない。そのため、RWMDは地下水防護に関する法的要件に従い、化学毒性を有しかつ危険な物質に関する一般的な制限を作成するべきである。(A3-16) ・廃棄物パッケージに関する定性的な制約及び制約がどのように導き出されたかをリスト化することで、どのWACが性能要件に基づいているのか明確にすることを推奨する。(A3-17)	・【gESC】5.1.2gPCSA: 定性的な安全面の論拠裏付けとなる証拠
	ESCの基礎となる具体的な廃棄物パッケージ情報の使用	・gESCでは、「英国放射性廃棄物インベントリ」(UKRWI)に記載された放射性核種と、パッケージされた廃棄物の放射性核種に生じる相違に伴う不確実性について、認識されていない。RWMDは、UKRWIの使用から廃棄物パッケージ情報の使用方法まで説明する必要がある。(A3-18)	・【gESC】3.1.4 廃棄物パッケージングと廃棄物受入基準

5. その他の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

その他、以下の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等を行った。

(1) 放射性廃棄物基本情報体系化調査

国内外の放射性廃棄物に係る基本情報を収集して体系的に整理するとともに、収集した情報に基づいて「放射性廃棄物ハンドブック（平成 30 年度版）」を作成した。

(2) 福島第一原子力発電所で発生する廃棄物等の処理処分に関する検討

福島第一原子力発電所の廃炉に向けた研究開発動向に関する調査を実施し、今後の必要となる技術を整理した。

(This page(p70) is intentionally kept blank.)

IV. 国際交流

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

併せて、欧州原子力共同体（EURATOM）、欧州委員会（EC）、経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）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、2018年度には、Posiva solutions, NAGRA, BGE, SKB 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

国	機関名
フランス	放射性廃棄物管理機関（ANDRA）
スイス	放射性廃棄物管理共同組合（NAGRA）
フィンランド	ポシヴァ社（Posiva Oy）/Posiva Solutions 社
スウェーデン	スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）
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	韓国水力原子力株式会社中央研究所（KHNP CRI）
韓国	韓国原子力環境公団（KORAD）
台湾	（財）核能科技協進會（NuSTA）
韓国	韓国原子力研究所（KAERI）
中国	中国核工業集团公司地質・中国ウラン工業株式会社（CNNC/CNUC）



BGE（ドイツ）との協定の更新及び情報交換

(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。

2018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。本共同研究の成果は、順次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) セメント系材料の長期性能評価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 Cebama (Cement-based materials, properties, evolution, barrier functions) プロジェクトに参画した。

Cebama プロジェクトは、セメント系材料の変質及びセメント系材料から他の材料が受ける影響（WP1）、セメント系材料の核種移行抑制効果（WP2）、それらを受けた処分場の化学的変遷の解析（WP3）を対象として研究開発を行うとともに、

得られた成果の普及やこの分野の人材を育成することを目的として、2015年6月にスタートしたプロジェクトである。

当センターは、セメント系材料と他の材料との界面での力学、物質移行挙動の変遷に関する試験（WP1）及びその解析（WP3）について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いる。

最終年度である2018年度は、それまでの各期間の成果を取りまとめ、3月にドイツのカールスルーエで開催された、ファイナルワークショップで、報告した。本プロジェクトは、2019年5月末で終了し、現在、最終報告書の公開に向けた手続を行っている。

本プロジェクトのこれまでの成果は、Cebamaプロジェクトのウェブサイト
(<http://www.cebama.eu>) で公開されている。

(4) 世代を超えた記録、知識及び記憶の保存に関する国際共同研究

OECD/NEAの放射性廃棄物管理委員会（RWMC）では、地層処分に関する記録等の保存に関する取組として、2011年より、世代を超えた記録、知識及び記憶の保存（Preservation of Records, Knowledge & Memory (RK&M) across Generations）イニシアチブ（以下、RK&M イニシアチブ）における検討を実施している。RK&M イニシアチブでは、OECD/NEA参加国における地層処分に関する記録等の保存に関して、様々な時間軸に対応するために、複数のメカニズムや技術を統合し、相互に補完することが必要であるとの考えから、各国の地層処分実施機関、研究機関、公文書保存機関等が協力して課題に取り組んでおり、当センターは2015年より参加している。

本共同研究は2018年4月に終了し、最終報告書が作成されている。なお、共同研究の成果は、順次ウェブサイト

(<https://www.oecd-nea.org/rwm/rkm/>) で公開されている。

V. 資料

1. 講演会、セミナー、研究発表会

	講演会等概要	開催日	会場
講演会	第1回講演会「欧米主要国における高レベル放射性廃棄物処分の進捗状況」 佐原 聡 (技術情報調査プロジェクト)	平成30年6月15日	原環センター
	第2回講演会「放射性廃棄物の地層処分における微生物の影響」 福永 栄 氏 (元 (株) IHI 技術開発本部 環境・化学システム開発部専門部長)	平成30年10月5日	原環センター
	第3回講演会「ベントナイト資源及び工業の現状と将来」 伊藤 雅和 氏 (クニミネ工業 (株) 取締役資源探査部長)	平成31年2月8日	原環センター
セミナー	第1回原環センターセミナー 「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎Ⅰ」 朽山 修 氏 (公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問)	平成30年5月24日	京都大学 東京オフィス
	第2回原環センターセミナー 「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎Ⅱ」 朽山 修 氏 (公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問)	平成30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)	平成30年9月28日	京都大学 東京オフィス
研究発表会	平成30年度原環センター研究発表会 1.研究発表 「原環センターの TRU 廃棄物処理・処分に関する研究開発」 (1) 研究開発のこれまでの成果 大和田 仁 (処分材料調査研究プロジェクト チーフ・プロジェクト・マネジャー) (2) 研究開発の現状と今後の取り組みー人工バリアの長期挙動評価と廃棄体パッケージの研究開発を中心にー 林 大介 (処分材料調査研究プロジェクト プロジェクト・マネジャー) 2.特別講演「都市の統合地震シミュレーションー地震発生、構造物被害、経済回復までー」 堀 宗朗 氏 (東京大学地震研究所 巨大地震津波災害予測研究センター長、海洋研究開発機構 理事補佐・数理学・先端技術研究部門分野長)	平成30年12月14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	Report on corrosion behaviour of stainless steel (D2.12)	桜木智史	CArbon-14 Source Term CAST (D2.12) 7/7/2017
2	Final Report on Zr alloys corrosion studies at RWMC (D3.19)	桜木智史	CArbon-14 Source Term CAST (D3.19) 21/12/2017
3	A resistivity-based approach to determining the rates of groundwater seepage into buffer materials	石井智子、川久保政洋、朝野英一	Geological Society, London, Special Publications, 482
4	A study of methods to prevent piping and erosion in buffer materials intended for a vertical deposition hole at the Horonobe Underground Research Laboratory	城まゆみ、石井智子、朝野英一	Geological Society, London, Special Publications, 482
5	High burn-up operation and MOX burning in LWR; Effects of burn-up and extended cooling period of spent fuel on vitrification and disposal	川久保政洋、朝野英一	Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.55, Issue 10, pp.1130-1140 (2018)
6	Monte Carlo analysis of montmorillonite particle structures and modeling of dissolution rate reduction	林大介	Materials Research Express 6 (2019)
7	高レベル放射性廃棄物処分場の THM 長期挙動評価 (その1) ～境界条件の異なる縮尺モデルによる遠心载荷時間加速試験～	阿部孝行	土木学会 第46回岩盤力学に関するシンポジウム講演集 (ISSN 1880-7623)
8	高レベル放射性廃棄物処分場の THM 長期挙動評価 (その2) ～遠心载荷時間加速試験を対象とした数値解析～	石井智子	土木学会 第46回岩盤力学に関するシンポジウム講演集 (ISSN 1880-7623)
9	Effect of Cs and Sr separation on occupied area reduction in current nuclear energy system and its evaluation by CAERA index	朝野英一	Separation Science and Technology, Published online: 14 Feb 2019.
10	Formation of Fe- and Mg-Rich Smectite under Hyperalkaline Conditions at Narra in Palawan, the Philippines	山川稔、藤井直樹	Minerals, Vol. 8, Issue 4, No.155 (2018)

No.	題 目	原環センター著者	発 表 先
11	Thermal alteration of C-S-H phase in cementitious materials.	林大介、井田雅也、 大和田仁、藤井直樹	In Altmaier, M., Montoya, V., Duro, L. and Valls, A., Eds. Proceedings of the Second Workshop of the HORIZON 2020 CEBAMA Project, KIT Scientific Reports 7752, 67 (2019)
12	H-M-C coupling analysis considering several scenarios of long-term alteration in cement-bentonite systems	大和田仁、林大介	In Altmaier, M., Montoya, V., Duro, L. and Valls, A., Eds. Proceedings of the Second Workshop of the HORIZON 2020 CEBAMA Project, KIT Scientific Reports 7752, 267 (2019)

(2)学会発表等

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
1	坑道湧水量算出における坑道周辺 FEM メッシュ分割影響検討	石井智子、今井政孝、 高本尚彦	日本地下水学会 2018 年春季講演会 2018/5/19
2	Modeling of effective edge surface area of montmorillonite particles	林大介	日本地球惑星科学連合 2018 年大会 2018/5/20～24
3	Application of discrete fracture network model to evaluation of groundwater inflow control around disposal tunnels	石井智子、城まゆみ、 今井政孝	2 nd International Discrete Fracture Network Engineering Conference (DFNE2018) 2018/7/20～22
4	地層処分における再冠水から超長期変 質過程の力学-水理-化学連成解析	林大介	地盤工学会 第 53 回地盤工学研究発表会 2018/7/24～26
5	フィリピン国パラワン島中南部 (Narra 地区) のナチュラルアナログ調査 (1) ～調査サイトの地質環境とナチュラル アナログ～	西村政展、藤井直樹、 山川稔	日本原子力学会バックエン ド部会 第 34 回バックエンド夏期セ ミナー 2018/8/22～24
6	フィリピン国パラワン島中南部 (Narra 地区) のナチュラルアナログ調査 (2) ～アルカリ環境下の変質プロセスとベ ントナイトの長期健全性～	藤井直樹、山川稔、 西村政展	日本原子力学会バックエン ド部会 第 34 回バックエンド夏期セ ミナー 2018/8/22～24
7	廃棄物管理における負荷低減のための 分野横断的な原子力システムの研究	朝野英一	日本原子力学会バックエン ド部会 第 34 回バックエンド夏期セ ミナー 2018/8/22～24
8	TRU 廃棄物処分におけるガス移行連成 挙動評価手法の開発 (その 1) －界面を有する充填材 (モルタル系材 料) のガス移行試験 (その 2) －	古賀和正、大和田仁	土木学会 平成 30 年度全国大会第 73 回年次学術講演会 2018/8/29～31
9	TRU 廃棄物処分におけるガス移行連成 挙動評価手法の開発 (その 2) －TRU 廃棄物処分施設におけるガス移 行モデリングの高度化研究－	古賀和正、大和田仁	土木学会 平成 30 年度全国大会第 73 回年次学術講演会 2018/8/29～31
10	ベントナイトペレットによる PEM 隙間 充填技術の開発	小林正人、城まゆみ	土木学会 平成 30 年度全国大会第 73 回年次学術講演会 2018/8/29～31

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
11	ベントナイト混合土の機械吹付けによる埋戻し施工性確認	蓮井昭則、小林正人	土木学会 平成 30 年度全国大会第 73 回年次学術講演会 2018/8/29～31
12	誘電率計を用いたベントナイト混合土の吹付け密度の測定	蓮井昭則、小林正人	土木学会 平成 30 年度全国大会第 73 回年次学術講演会 2018/8/29～31
13	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について	石井智子、蓮井昭則、 今井政孝、高本尚彦	土木学会 平成 30 年度全国大会第 73 回年次学術講演会 2018/8/29～31
14	中深度処分に対する規制要求とモニタリングの前提条件－地下空洞型処分施設機能確認試験（その 7）－	広中良和、藤原啓司、 田中正人、寺田賢二	土木学会 平成 30 年度全国大会第 73 回年次学術講演会 2018/8/29～31
15	地下空洞型処分施設の機能確認における確認対象項目の抽出－地下空洞型処分施設機能確認試験（その 8）－	広中良和、藤原啓司、 田中正人、寺田賢二	土木学会 平成 30 年度全国大会第 73 回年次学術講演会 2018/8/29～31
16	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(1)－地下空洞型処分施設機能確認試験（その 9）－	広中良和、藤原啓司、 田中正人、寺田賢二	土木学会 平成 30 年度全国大会第 73 回年次学術講演会 2018/8/29～31
17	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(2)－地下空洞型処分施設機能確認試験（その 10）－	広中良和、藤原啓司、 田中正人、寺田賢二	土木学会 平成 30 年度全国大会第 73 回年次学術講演会 2018/8/29～31
18	処分空洞構築時に用いるセメント系材料の化学的変質に関する検討－地下空洞型処分施設機能確認試験（その 11）－	広中良和、藤原啓司、 田中正人、寺田賢二	土木学会 平成 30 年度全国大会第 73 回年次学術講演会 2018/8/29～31
19	実処分施設で実施可能なモニタリング計画の具体化－地下空洞型処分施設機能確認試験（その 12）－	広中良和、藤原啓司、 田中正人、寺田賢二	土木学会 平成 30 年度全国大会第 73 回年次学術講演会 2018/8/29～31
20	地下空洞型処分施設のモニタリングにおける光ファイバセンサーの耐久性評価－地下空洞型処分施設機能確認試験（その 13）－	広中良和、藤原啓司、 田中正人、寺田賢二	土木学会 平成 30 年度全国大会第 73 回年次学術講演会 2018/8/29～31
21	炭素鋼オーバーパック溶接部の地下環境での腐食挙動に関する研究 その 1 試験計画	白瀬光康、小林正人、 川久保政洋	日本原子力学会 2018 年秋の大会 2018/9/5～7

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
22	炭素鋼オーバーパック溶接部の地下環境での腐食挙動に関する研究 その2 工学規模の模擬オーバーパックの腐食挙動	小林正人、川久保政洋、 白瀬光泰	日本原子力学会 2018 年秋の大会 2018/9/5～7
23	炭素鋼オーバーパック溶接部の地下環境での腐食挙動に関する研究 その3 全面腐食挙動に及ぼす緩衝材の膨潤過程の影響	小林正人、川久保政洋	日本原子力学会 2018 年秋の大会 2018/9/5～7
24	炭素鋼オーバーパック溶接部の地下環境での腐食挙動に関する研究 その4 まとめ	小林正人、白瀬光泰、 川久保政洋	日本原子力学会 2018 年秋の大会 2018/9/5～7
25	照射済み BWR 燃料被覆管からの核種放出挙動評価－ (1) 長期浸漬試験と炭素 14 浸出率－	桜木智史	日本原子力学会 2018 年秋の大会 2018/9/5～7
26	照射済み BWR 燃料被覆管からの核種放出挙動評価－ (2) 炭素 14 の化学種および調和腐食モデルの考察－	桜木智史	日本原子力学会 2018 年秋の大会 2018/9/5～7
27	In-situ 交流インピーダンス法によるジルカロイ酸化膜の性状評価	桜木智史	日本原子力学会 2018 年秋の大会 2018/9/5～7
28	フィリピンナチュラルアナログによるベントナイトのアルカリ変質プロセスの考察	藤井直樹、山川稔	日本原子力学会 2018 年秋の大会 2018/9/5～7
29	モルタルの溶脱に伴う拡散係数変化に関する検討 (1) 溶脱試料の物性評価	林大介、井田雅也	日本原子力学会 2018 年秋の大会 2018/9/5～7
30	モルタルの溶脱に伴う拡散係数変化に関する検討 (2) Ca 溶脱後のモルタルの拡散係数予測モデル	井田雅也、林大介	日本原子力学会 2018 年秋の大会 2018/9/5～7
31	Durability Test on Distributed Optical Fiber Sensor for Radioactive Disposal Facility	広中良和	26th International Conference on Optical Fiber Sensors 2018/9/24～28
32	中低温純水中における Zr および Zircaloy-4 の表面酸化物成長挙動	桜木智史	腐食防食学会 第 65 回材料と環境討論会 2018/10/29～31
33	Analytical study on the influence on safety during maintaining retrievability	今井政孝、石井智子、 高本尚彦、江守稔	IGD-TP's Eighth Exchange Forum 2018/12/3～4
34	R&D's on reversibility and retrievability	石井智子、小林正人、 今井政孝、江守稔	IGD-TP's Eighth Exchange Forum 2018/12/3～4

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
35	高レベル放射性廃棄物処分場の THM 長期挙動評価（その 1） ～境界条件の異なる縮尺モデルによる遠心載荷時間加速試験～	阿部孝行	土木学会 第 46 回岩盤力学に関するシンポジウム 2019/1/12～13
36	高レベル放射性廃棄物処分場の THM 長期挙動評価（その 2） ～凝灰岩を対象とした岩石の熱特性，透水特性，力学特性に関するばらつきの評価～	川久保政洋	土木学会 第 46 回岩盤力学に関するシンポジウム 2019/1/12～13
37	高レベル放射性廃棄物処分場の THM 長期挙動評価（その 3） ～遠心載荷時間加速試験を対象とした数値解析～	石井智子	土木学会 第 46 回岩盤力学に関するシンポジウム 2019/1/12～13
38	Autoclave corrosion experiment of Zircaloy-4 at temperatures between 180°C to 270°C	桜木智史、吉田誠司	Waste Management Symposia 2019 2019/3/3～7
39	Effect of temperature on electrochemical properties of Zircaloy-4 oxide by in-situ AC impedance spectroscopy in the temperature range 120°C-180°C	桜木智史、吉田誠司	Waste Management Symposia 2019 2019/3/3～7
40	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 (7) 分離核種の燃焼を念頭に置いた CBZ コードシステムを用いた高速炉燃焼計算	川久保政洋、朝野英一	日本原子力学会 2019 年春の年会 2019/3/20～22
41	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 (8) MA リサイクルを想定した高速炉の廃棄物特性評価	川久保政洋、朝野英一	日本原子力学会 2019 年春の年会 2019/3/20～22
42	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 (9) ガラス固化プロセスにおける廃棄物含有率と処分場の負荷低減	朝野英一、川久保政洋	日本原子力学会 2019 年春の年会 2019/3/20～22
43	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 (10) 横置き方式による廃棄体専有面積削減効果の検討	朝野英一	日本原子力学会 2019 年春の年会 2019/3/20～22

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
44	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 (11) MOX 燃料における MA 分離と処分場負荷削減効果の検討	朝野英一	日本原子力学会 2019 年春の年会 2019/3/20～22
45	炭素鋼製オーバーパックスの脆化予測に関する研究 (1) 炭素鋼の低温照射下での脆化挙動	川久保政洋	日本原子力学会 2019 年春の年会 2019/3/20～22
46	炭素鋼製オーバーパックスの脆化予測に関する研究 (2) 照射脆化予測モデルの構築	川久保政洋	日本原子力学会 2019 年春の年会 2019/3/20～22

(3)解説・講演等

No.	題 目	著 者	発 表 先
1	高レベル廃棄物の地層処分って何？	川久保政洋	日本機械学会 2018 年度年次大会「市民フォーラム」 動力エネルギーシステム部門 震災対応臨時委員会企画 エネルギーについて考える －知って欲しいこと, 知りたいこと－ 2018 年 9 月
2	地層処分事業等の国際的な動向	稲垣裕亮	原子力年鑑 2019 P161-167
3	廃棄物管理における負荷低減のための分野横断的な原子力システムの研究	朝野英一	日本原子力学会バックエンド部会部会誌「バックエンド研究」 Vol.25 No.2
4	国際的な動向	稲垣裕亮	地層処分に関する「平成 30 年度人材育成セミナー」 2019/1/9～11
5	段階的なセーフティケース開発に関する国際機関の提案と諸外国の実践事例	佐原 聡	地層処分に関する「平成 30 年度人材育成セミナー」 2019/1/9～11
6	処分場構成要素の変動挙動	大和田 仁	地層処分に関する「平成 30 年度人材育成セミナー」 2019/1/9～11

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№126	放射性廃棄物の処分と分離変換（その1）	2018年6月
2	原環センタートピックス№127	放射性廃棄物の処分と分離変換（その2）	2018年9月
3	原環センタートピックス№128	放射性廃棄物の地層処分における微生物の影響	2018年12月
4	原環センタートピックス№129	都市の統合地震シミュレーションー地震発生、構造物被害、経済回復までー	2019年3月
5	原環センター2017年度 技術年報		2018年10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。]

	掲載日	タイトル
1	2018/4/2	追記) 米国でエディ・リー・エナジー・アライアンス (ELEA) サイトにおける中間貯蔵施設の建設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〕
2	2018/4/2	カナダ核燃料廃棄物管理機関 (NWMO) が 2018~2022 年の実施計画書を公表
3	2018/4/10	追記) ロシアで地下研究所建設の一般競争入札を公告〔2017年4月27日既報〕
4	2018/4/20	追記) スイスの原子力発電事業者による 2016 年処分費用見積りに対する費用計算の審査と安全面の審査の結果が公表〔2017年12月28日既報〕
5	2018/5/11	追記) 英国で地層処分施設 (GDF) に関する国家政策声明書 (NPS) 案についての公衆協議が開始〔2018年2月5日既報〕
6	2018/5/11	追記) 米国の連邦議会下院で放射性廃棄物政策修正法案の検討を開始〔2017年4月21日既報〕
7	2018/5/14	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〕
8	2018/5/14	追記) 英国で地層処分施設に関する地域社会との協働プロセス案の公衆協議が開始〔2018年2月5日既報〕
9	2018/5/15	追記) 韓国産業通商資源部が「高レベル放射性廃棄物管理基本計画 (案)」を公表〔2016年5月31日既報〕
10	2018/5/17	追記) 米国で 2019 会計年度の予算要求ー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〔2018年2月16日既報〕
11	2018/5/28	追記) 米国で 2019 会計年度の予算要求ー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〔2018年2月16日既報〕
12	2018/5/29	追記) スイスで NAGRA が放射性廃棄物管理プログラム及び研究開発計画を提出〔2016年12月27日既報〕
13	2018/6/4	追記) スウェーデンで放射線安全機関 (SSM) と土地・環境裁判所が使用済燃料最終処分場及びキャニスタ封入施設の建設許可申請に関する政府への意見書を提出〔2018年1月25日既報〕
14	2018/6/4	追記) 米国で 2018 会計年度の予算方針を公表ーユッカマウンテン計画の予算を要求〔2017年3月17日既報〕
15	2018/6/15	追記) 米国でウェスト・コントロール・スペシャリスト (WCS) 社が使用済燃料の中間貯蔵施設の許認可申請書を NRC に提出〔2016年5月3日既報〕
16	2018/6/25	フランスで国家評価委員会 (CNE) が第 12 回評価報告書を公表
17	2018/7/3	米国で放射性廃棄物技術審査委員会 (NWTRB) が性能確認モニタリングと回収可能性に係る報告書を公表
18	2018/7/19	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〕

	掲載日	タイトル
19	2018/7/20	フランスの放射性廃棄物管理機関（ANDRA）が放射性物質及び放射性廃棄物の国家インベントリレポートの2018年版を公表
20	2018/7/27	スペインの集中中間貯蔵施設（ATC）の建設許可審査が中断
21	2018/8/7	追記）英国で地層処分施設（GDF）に関する国家政策声明書（NPS）案についての公衆協議が開始〔2018年2月5日既報〕
22	2018/8/27	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建設の許認可申請の審査を再開
23	2018/8/28	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の実施に向けた許可申請書を提出〔2016年10月3日既報〕
24	2018/9/10	追記）スペインの集中中間貯蔵施設（ATC）の建設許可審査が中断〔2018年7月27日既報〕
25	2018/9/14	追記）韓国産業通商資源部が「高レベル放射性廃棄物管理基本計画（案）」を公表〔2016年5月31日既報〕
26	2018/9/27	追記）米国で2019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〔2018年2月16日既報〕
27	2018/9/28	スイスで規制機関ENSIがサイト選定第3段階におけるボーリング調査に関する関係自治体情報共有グループを設置
28	2018/10/4	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
29	2018/10/16	追記）スウェーデンで放射線安全機関（SSM）と土地・環境裁判所が使用済燃料最終処分場及びキャニスタ封入施設の建設許可申請に関する政府への意見書を提出〔2018年1月25日既報〕
30	2018/10/17	追記）米国でNRCがユッカマウンテン処分場建設についての再開後の安全審査を終了し、残予算の用途を決定〔2016年11月10日既報〕
31	2018/10/26	追記）米国でDOEがクラスCを超える低レベル放射性廃棄物処分の最終環境影響評価書（FEIS）を公表〔2016年2月26日既報〕
32	2018/10/26	カナダ原子力安全委員会（CNSC）が地層処分場のサイト特性調査に関するガイダンス案に対する意見募集を開始
33	2018/10/31	追記）ロシアで初となる低中レベル放射性固体廃棄物の浅地中処分場の操業が開始〔2016年12月16日既報〕
34	2018/11/14	追記）ドイツで新たなサイト選定手続きが開始〔2017年9月7日既報〕
35	2018/11/22	英国で規制機関が地層処分場の一般的な条件でのセーフティケース（2016年版）に対する評価報告書を公表
36	2018/11/28	スイスでサイト選定第2段階が完了－連邦評議会が優先候補の絞り込み結果を承認－
37	2018/11/30	追記）スイスでNAGRAが放射性廃棄物管理プログラム及び研究開発計画を提出〔2016年12月27日既報〕
38	2018/12/19	カナダ原子力安全委員会（CNSC）が規制文章「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
39	2018/12/20	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〕
40	2018/12/28	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

	掲載日	タイトル
41	2019/1/21	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〕
42	2019/1/21	追記) 英国のウェールズ政府が地層処分を高レベル放射性廃棄物等の管理方針として決定-処分の実施プロセス等に関する公開協議を開始〔2015年6月2日既報〕
43	2019/2/6	追記) ベルギー放射性廃棄物・濃縮核分裂性物質管理機関 (ONDRAF/NIRAS) と連邦原子力管理庁 (FANC) が浅地中処分場の建設許可に係る新たなスケジュールを公表〔2015年11月12日既報〕
44	2019/2/12	追記) 米国の廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) で地下施設の採掘活動が再開〔2018年1月19日既報〕
45	2019/3/12	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〕
46	2019/3/12	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
47	2019/3/15	追記) フランスの放射性廃棄物管理機関 (ANDRA) が放射性物質及び放射性廃棄物の固家インベントリレポートの 2018 年版を公表〔2018年7月20日既報〕
48	2019/3/20	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〕
49	2019/3/29	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〕

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・回収可能性調査・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重要核種（ヨウ素 129 及び炭素 14）への対策技術、人工バリアの長期性能の変遷に係る試験・解析等に関する計画、成果等の審議
	沿岸部処分システム高度化開発	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・安全評価に関する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
	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	先進的核燃料サイクル技術の地層処分概念に関する検討委員会	先進的核燃料サイクル技術の地層処分概念への影響等の審議
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	選考委員会	萌芽的・先進的な研究開発テーマの公募に関する審議、応募テーマの選考
		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 2018年度 技術年報

2019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。