

RWMC

原環センター
2014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発電所等廃棄物を対象とした余裕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。

原子力エネルギーの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、2014年度(平成26年度)に実施した調査研究等の内容をご紹介するとともに、国際交流や国際会議・学会等での発表実績など当センターの一年間の活動状況を取りまとめたものです。本年報を通じて、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.	放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究.....	1
1.	地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験.....	1
2.	諸外国の廃棄物確認技術等に関する調査.....	14
3.	その他の管理処分に関する調査研究.....	16
II.	放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究.....	17
1.	処分システム工学確証技術開発.....	17
1-1	人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック.....	19
1-2	人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材.....	23
1-3	モニタリング関連技術の整備.....	27
1-4	自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発.....	31
2.	地層処分回収技術高度化開発.....	35
3.	T R U廃棄物処理・処分技術高度化開発.....	41
3-1	ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上.....	43
3-2	炭素 14 長期放出挙動評価.....	46
3-3	ナチュラルアナログ調査.....	49
3-4	人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア評価の初期条件の設定.....	56
3-5	ガス移行連成挙動評価手法の開発.....	60
4.	使用済燃料の直接処分に関する技術調査と処分場操業技術の概念構築 (その 2)	64
5.	ハル・エンドピースの地層処分に向けた廃棄物データの整備に関する 研究計画の検討	68
6.	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.....	69
7.	その他の地層処分に関する調査研究.....	71
III.	放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	73
1.	放射性廃棄物海外総合情報調査.....	73
2.	放射性廃棄物重要基礎技術研究調査.....	75
3.	安全規制及び安全基準に係る内外の動向調査.....	79
4.	放射性廃棄物処分の制度的管理に関する調査.....	81
5.	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.....	83
6.	その他の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	84
IV.	放射性廃棄物処分への理解促進.....	85
1.	地層処分実規模設備運営等事業.....	85
V.	国際交流	93

VI. 資料	95
1. 講演会・セミナー等	95
2. 論文投稿、学会発表等	96
3. 刊行物	101
4. ホームページへの海外最新情報の掲載.....	102
5. 委員会一覧	106

I. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

I. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

1. 地下空洞型処分施設閉鎖技術確認試験

◇事業の概要

地下 50m 以深の大断面の地下空洞にコンクリートの処分ピットを構築し、その周囲をベントナイトの緩衝材、モルタルの低拡散材で覆う地下空洞型処分施設は、平成 10 年代中頃から関係する箇所で小規模な試験¹⁾や検討が行われてきた。その中で、平成 17 年度以降、「地下空洞型処分施設性能確認試験」として、人工バリアの主要な部分の施工方法及びバリアの初期性能の確認など諸試験を順次実施し、平成 25 年度からは「地下空洞処分施設閉鎖技術確認試験」として、空洞上部の部材について施工方法及び初期性能の確認などの諸試験を進めてきた。平成 26 年度は、引き続き、施工方法及び初期性能の確認などの諸試験²⁾を実施するとともに、8 ヶ年の成果の取りまとめを行った。

本確認試験は、低レベルの放射性廃棄物の余裕深度処分施設の検討のため、地下の空間を活用し、地下空洞型処分施設の施工技術に関する確認試験を行うものであり、大断面の実環境下での施工確認試験となる。試験の計画・実施に当たっては、発電所廃棄物や長半減期低熱放射性廃棄物（TRU 廃棄物）の余裕深度処分などに關係してきた専門家からなる委員会を立ち上げ、幅広く関連する知見や意見などを取り入れて検討を進めてきた。以下に各年度の実施項目を記す。

平成 17 年度：施設形態・人工バリア要求機能設定、試験全体の基本計画策定

平成 18 年度：詳細設計、詳細試験計画策定

平成 19 年度：大断面の試験空洞において、底部・側部埋戻し材、底部緩衝材（一部）の施工確認試験

平成 20 年度：奥部緩衝材、底部低拡散材、底部・奥部・側部コンクリートピット施工確認試験

平成 21 年度：手前部コンクリートピット、側部低拡散材、充填材、側部緩衝材（吹付け工法）施工確認試験

平成 22 年度：充填材（残部）、側部緩衝材（転圧工法）施工確認試験

平成 23 年度：側部緩衝材（一部）、上部充填材施工確認試験

平成 24 年度：側部緩衝材（一部）、上部コンクリートピット、上部低拡散材の施工確認試験

平成 25 年度：上部緩衝材（一部）、上部埋戻し材（一部）の施工確認試験

平成 26 年度：前年度に引き続き、上部緩衝材（一部）、上部埋戻し材（一部）の施工確認試験

平成 19 年度から実施したこれら一連の施工確認試験において、地下空洞型処分施設としての主要な構造部材について、在来の施工機械を基にした施工方法の組み合わせで充分品質の高いものが構築可能なことを示すと共に、その初期性能を把握することができた。

図-1 に地下空洞型処分施設の概念図を、表-1 には本事業で設定した試験施設の主な仕様、目標性能を示す。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

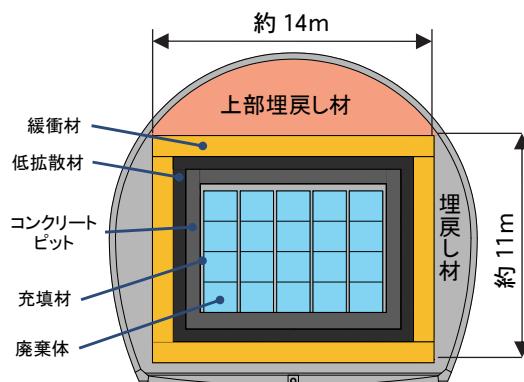


図-1 地下空洞型処分施設の概念図

表-1 試験施設の主な仕様等

主な部位	主な仕様、目標性能
緩衝材	材料：ベントナイト（クニゲル GX） 厚さ：1m 透水係数： 5×10^{-13} m/s
低拡散材	材料：高流動モルタル 厚さ：0.6m トリガムの実効拡散係数： 1×10^{-12} m ² /s
コンクリートピット	材料：鉄筋コンクリート 幅：10.35m、高さ：7.64m、奥行：12.10m 厚さ：底部 0.8m、側・奥・上部 0.7m
充填材・上部充填材	材料：高流動モルタル、高流動コンクリート
埋戻し材	側部・底部、奥部 材料：鉄筋コンクリート
	上部 材料：ベントナイト混合土（砂 85%、ベントナイト 15%）

◇平成 26 年度の成果

平成 26 年度は、上部緩衝材及び上部埋戻し材の施工確認試験・初期性能確認試験、地震による埋設施設への影響評価、品質評価、施設・周辺岩盤挙動に係るデータ取得、ベントナイト・ベントナイト混合土の材料特性に係るデータ取得、セメント系材料の拡散特性に係るデータ取得、上部緩衝材・上部埋戻し材の品質に係るデータ取得等について実施した。

(1) 上部緩衝材施工確認試験・初期性能確認試験

上部緩衝材は、上部がアーチ状に湾曲した非常に狭隘な空間が施工箇所であり、直下には重要な人工バリアである上部低拡散材がある。実施設での施工には、底部緩衝材で適用した大型機械ではなく小型、もしくは中型の施工機械の使用が想定される。

1) 上部緩衝材施工確認試験

施工確認試験は、昨年度の試験結果に基づき施工方法を選定し、施工精度、施工に係る品質のばらつき等についてデータを取集し、検討、評価を加え、転圧工法の上部緩衝材施工への適用性を確認することを目的とする。

施工機械は、施工箇所の直下の部材に与える影響、限られた上部空間や施工ヤードの条件等から、昨年度と同じ小型振動ローラとして、その適用性を確認した。

施工条件の敷均し厚さは、実際の施工での適用が考えられる小型のアスファルトフィニッシャを想定した敷均し厚さ (100mm) とした。上部緩衝材の施工高さを 1.0m として、敷均し厚さ 100mm、仕上り層厚は約 50mm で計 21 層の施工(20 層を施工試験、最後の 1 層を仕上げ層) を実施した。敷均し状況を図-2 に示す。

施工パターンは、昨年度の結果を踏まえて 1 層単位で、敷均し (厚さ 100mm)、予備転圧 (プレートコンパクタ+バイブロコンパクタ)、本転圧 (小型振動ローラ 2Pass) とした。小型振動ローラによる転圧状況を図-3 に示す。

また、小型振動ローラでは転圧ができない端部では、ランマを補助的に使用して本転圧を行った。

小型振動ローラによる施工箇所の施工後の密度は、平均で 1.639 Mg/m^3 と管理目標値 (1.6 ±

0.1 Mg/m^3) を満足し、分布幅は 0.082 Mg/m^3 ($\pm 0.04 \text{ Mg/m}^3$) 程度と小さな値であった。(図-4 参照)



図-2 敷均し状況



図-3 小型振動ローラによる転圧状況

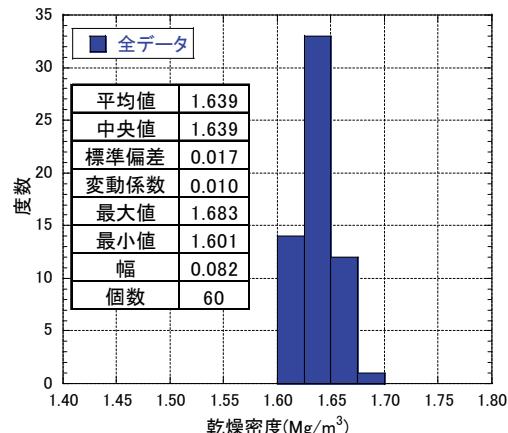


図-4 コア密度の測定結果 (全データ)

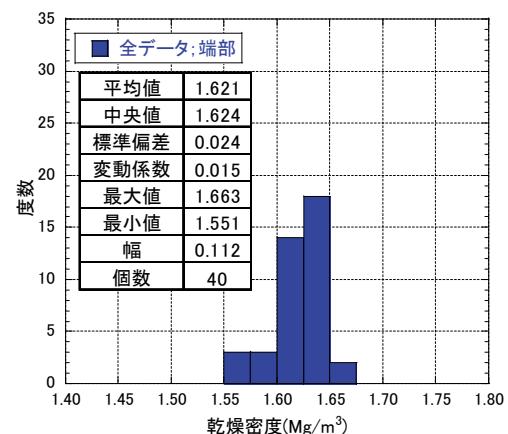


図-5 コア密度の測定結果 (全測定データ ; 端部)

I. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

施工後の密度は昨年度の結果とほとんど変わりないことを確認した。端部（ランマ施工箇所）の平均値 (1.621 Mg/m^3) は小型振動ローラによる仕上り密度より若干小さくなっているが、分布幅は 0.112 Mg/m^3 ($\pm 0.056 \text{ Mg/m}^3$) となり、小型振動ローラより大きい。（図-5 参照）

2) 上部緩衝材初期性能確認試験

緩衝材には「基本安全機能」として閉じ込め及び移行抑制機能が要求されており、その技術要件として透水特性が、また、「操業上の機能」の技術要件として力学特性が挙げられている。実施した初期性能確認試験について以下に示す。

- ① 建設・操業時に安全確保性能確認のための試験：一軸圧縮試験
 - ② 止水性能確認のための試験：透水試験、乾燥密度測定試験
 - ③ 閉鎖後の力学的・科学的安定性の確保性能確認のための試験：膨潤圧測定試験
- なお、サンプリングは 17, 18 層を対象とした。

① 一軸圧縮試験

試験の結果、一軸圧縮強さ (q_u) は 652.5 kN/m^2 ~ 743.9 kN/m^2 の範囲、変形係数 (E_{50}) は $38.3 \sim 49.9 \text{ MN/m}^2$ の範囲であり、それぞれの平均値は一軸圧縮強さ (q_u) が 697.9 kN/m^2 、変形係数 (E_{50}) が 41.6 MN/m^2 であった。

② 乾燥密度測定試験、透水試験

小型振動ローラによる転圧を行った箇所から採取したコアを上下に 2 分割したコア密度の測定結果について室内締固め試験と比較した結果を図-6 に示す。

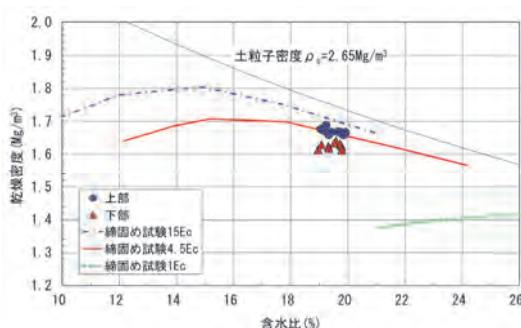


図-6 コア密度測定結果と室内締固め試験の比較

2 分割したコア密度は $1.60 \sim 1.70 \text{ Mg/m}^3$ の範囲

にあり、一層内の上下のコア密度は上部に比べ下部の方が小さくなっている。一方、クニゲル GX の室内締固め試験結果より得られた締固め曲線と比較すると、2 分割コアの密度測定結果は締固めエネルギー 4.5 Ec 程度 ($1 \text{ Ec} \equiv 550 \text{ kJ/m}^3$) の結果となった。

透水試験の結果、透水係数は $1.0 \times 10^{-13} \text{ m/s}$ 程度であることがわかった。

③ 膨潤圧測定試験

供試体の乾燥密度が大きくなるに従い膨潤圧も大きくなる傾向となり、膨潤圧は $1.2 \sim 1.3 \text{ MPa}$ 程度であった。

(2) 上部埋戻し材施工確認試験・初期性能確認試験

上部埋戻し材の施工箇所は、狭隘で天井がアーチ形状の空間であり、そのような箇所に適用可能な施工方法、施工材料、使用機械等の選定・検討を行うことを目的として試験を実施した。平成 26 年度は、平成 25 年度に行った施工確認試験の結果を踏まえ、連続式二軸強制ミキサで製造したベントナイト混合土を使用し、転圧工法と吹付け工法の二つの工法を組み合わせて施工確認試験を実施した。

1) 上部埋戻し材施工確認試験

① ベントナイト混合土の製造

埋戻し材には、ベントナイトと砂を混合したベントナイト混合土を使用した。この混合土の製造は、施工の安定性（混合率、含水比の設定値、製造量等の変動）の向上を目的に、連続式二軸強制ミキサと材料供給機を組み合わせて実施した。（図-7 参照）



図-7 連続式二軸強制ミキサ (GeoTom10)

製造したベントナイト混合土の混合率・含水比は、設定値（混合率 15%、含水比 13.5%）に対し、共に±1.5%程度の範囲で製造することができた。

② 転圧施工

転圧施工は計 16 層実施し、転圧はプレートコンパクタ（60kg）による無振動の予備転圧、バイブロコンパクタ（300kg）による振動を加えた本転圧とした。（図-8 参照）

転圧の回数については、最初の 1～3 層目を対象に以下のパターンで試験を行い、仕上り密度の比較を行い決定することとした。

1 層目：敷均し厚さ 150mm、転圧回数 6 回

2 層目：敷均し厚さ 150mm、転圧回数 4 回

3 層目：敷均し厚さ 200mm、転圧回数 6 回

上記のパターン試験結果から、3 層目の施工条件（敷均し厚さ 200mm、転圧回数 6 回）を基本として、以後の施工確認試験を行った。

本転圧後の乾燥密度、締固め度は、平均乾燥密度で約 $1.69\text{Mg}/\text{m}^3$ 、締固め度で約 93% であった。品質のばらつきは、乾燥密度が $1.65\sim1.76\text{Mg}/\text{m}^3$ 程度、締固め度は 91～97% 程度であった。

③ 吹付け施工

吹付け箇所は、転圧施工ができない上部のアーチ状の空間で、最大高さはセンター部分の 1.98m である。吹付けは人力で行った。（図-9 参照）

今年度は材料含水比を昨年度より下げて最適含水比程度とし、材料分離の一因と考えられた下記の対策を実施した。

- ・ 圧送途中の再加圧を中止した。
- ・ 吹付け機械をピットに近づけて圧送距離を短縮した。

その結果、施工中のホースの閉塞は発生することなく吹付けを行うことができた。しかし、混合率と含水比の吹付け前後の変化については、程度を小さくすることはできたが、完全に抑制することができなかった。

図-10 に施工前後の材料の混合率を示す。吹付け前の材料と吹付け後の材料の混合率にはほとんど変化はない。しかし、リバウンド材の混合率はそれらと比べて低い値となった。原因として、平成 25 年度と同様に吹付け時に材料



図-8 バイブロコンパクタによる本転圧状況



図-9 吹付け施工の状況

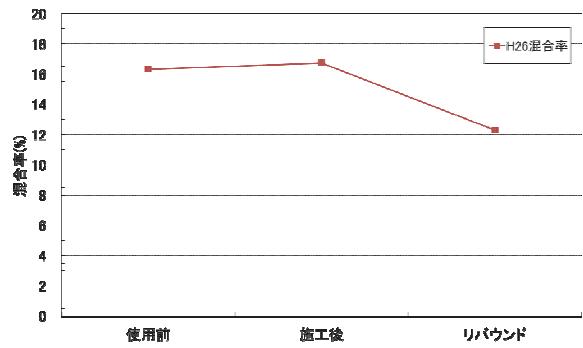


図-10 吹付け施工前後の材料の混合率

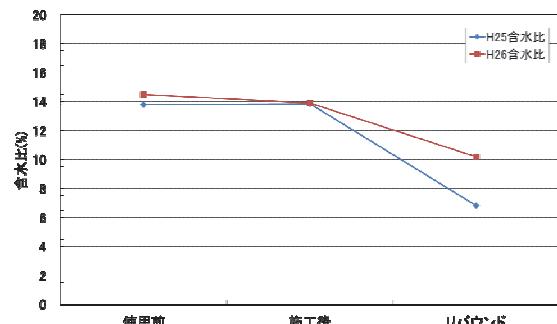


図-11 吹付け施工前後の材料の含水比の変化

分離が発生した結果、吹付け施工箇所の砂分が減少し、ベントナイト混合率が上昇したものと考えられる。

吹付け施工前後のリバウンド材の含水比の

I. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

変化を図-11に示す。施工前に比べてリバウンド材の含水比は低下し、混合率も同様に低下している。しかし、低下の割合は平成25年度に比べて平成26年度の方が小さくなっている、材料分離の割合は低減できたことが分かる。

なお、材料の設定含水比を下げたことによりリバウンド率は上昇すると思われたが、実際には減少する結果となった。これは、含水比の低下によるリバウンド率の上昇よりも材料分離の低減によるリバウンド率の減少の影響の方が大きかったことによるものと考えられる。

図-12に転圧施工、吹付け施工の含水比、乾燥密度の測定結果を示す。吹付け工法の乾燥密度の平均値が 1.694Mg/m^3 、転圧工法が 1.689Mg/m^3 と、吹付け工法の方が乾燥密度は若干高かったが、吹付け工法のベントナイト混合率が高いため、有効粘土乾燥密度を算出すると吹付け工法の平均値が 0.606Mg/m^3 、転圧工法が 0.551Mg/m^3 と、密度差はさらに大きくなる。

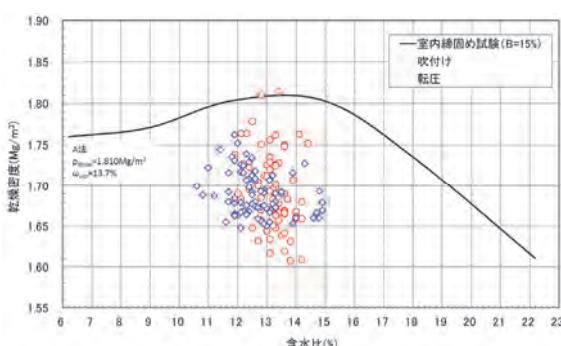


図-12 施工後の乾燥密度と含水比の関係

2) 上部埋戻し材初期性能確認試験

上部埋戻し材の要求機能として、核種の移行抑制としての低透水性、緩衝材の膨潤変形を抑止する力学特性があげられる。

これらの特性を確認するために、初期性能確認試験として下記の試験を行った。以下、測定結果をまとめると。

- ① 低透水性の把握：透水試験及びその代替特性確認のための乾燥密度測定試験
- ② 力学特性の把握：一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、膨潤圧測定試験

- ① 低透水性の把握：乾燥密度測定、透水試験
乾燥密度測定は、吹付け施工箇所及び転圧施工箇所から採取した試料を対象に実施した。

乾燥密度の平均値は転圧施工(1.662Mg/m^3)の方が吹付け施工(1.652Mg/m^3)に比べて若干高くなっているが、密度のばらつきは転圧施工の方がやや大きくなっている。

② 力学特性の把握：一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、膨潤圧試験

現場採取の一軸圧縮強さ(q_u)は $76.6\text{kN/m}^2 \sim 111.1\text{kN/m}^2$ に分布し、変形係数(E_{50})は $4.0 \sim 6.3\text{MN/m}^2$ の範囲であった。一方、室内成型の一軸圧縮強さ(q_u)は $117.7\text{kN/m}^2 \sim 156.6\text{kN/m}^2$ に分布し、変形係数(E_{50})は $16.8 \sim 20.8\text{MN/m}^2$ の範囲であった。

三軸圧縮試験(UU試験)の結果、現場施工箇所の試料では拘束圧の増加に伴い変形係数は増加し、室内成型試料ではベントナイトの混合率が低いほど拘束圧の増加に伴う変形係数の増加量が大きくなっている。また、ベントナイトの混合率と強度との関係では、混合率が低いほど内部摩擦角が大きくなる傾向が確認された。

膨潤圧試験は、現場施工箇所(転圧施工、吹付け施工)から採取した試験の結果、平衡に達した時の膨潤圧は約 0.03MPa 程度であった。一方、ベントナイトの混合率を変化させた試験室で作製した圧縮成形供試体の場合、混合率の高い供試体ほど膨潤圧は高く、ベントナイトの混合率が15%で約 0.05MPa 程度であった。

(3) 施設・周辺岩盤挙動計測

平成26年度は平成25年度に実施した上部緩衝材、上部埋戻し材を空洞横断方向に拡張した。この上部埋戻し材の施工時と施工後の既設部材への影響を検討するため、上部埋戻し材に沈下計、温度計を新たに設置した。(図-13参照)

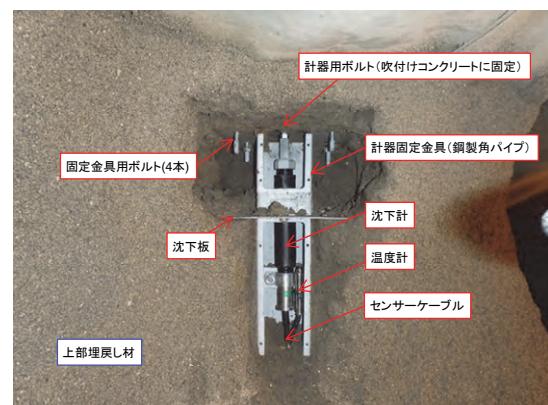


図-13 沈下計、温度計の設置状況

1) 計測データの収集

収集図化の対象となる計器は、昨年度までに設置した既設計器及び今年度新たに設置した計器（631 計器）である。ここでは、今年度新設した沈下計、温湿度計の計測データについて述べる。

① 上部埋戻し材（沈下計、温度計）

計測は上部埋戻し材の吹付け施工再開直前（9/10 8:30）から開始した。その後の施工イベントを表-2 に示す。

表-2 施工イベント

施工日時	施工材料	施工数量
9/10AM	上部埋戻し材(吹付け施工)	4.8t
9/10PM	"	4.8t
9/11AM	"	4.1t
9/25AM	吹付けコンクリート (表面処理用)	5.3t

全計測期間の計測結果を図-14 に示す。計測の結果、上部埋戻し材及び吹付けコンクリートの施工イベントに伴い、沈下は進行し、2月20日の時点で約 5.2mm となっている。施工イベントと変位量の関係を求めるために、変位量の計測結果から変位速度（1 日移動平均）を算出した。（図-15 参照）

期間①の上部埋戻し材吹付け施工再開後は変位速度が大きくなる（最大 1.1mm/day）が、上部埋戻し材吹付け施工が終了した翌日（9/12）には変位速度は約 0.2mm/day まで低減する。その後、期間②の吹付けコンクリート施工（9/25）の前まで変位速度は、約 0.07mm/day まで下がり続け、収束する。期間②の吹付けコンクリート施工時には変位速度が大きくなる（最大 0.17mm/day）が、その後変位速度は収束する。

以上のことから、上部埋戻し材の沈下挙動は施工イベントと関連しており、施工位置が計器位置から離れるほど計器位置の沈下に与える影響が小さくなることが推察される。

（4）地震が地下空洞施設に与える影響の検討

本検討は埋設施設の設計・施工技術等に反映することを目的に、地震動が地下空洞施設に与える影響を検討した。地震計の観測データを整理し、応答挙動（応答加速度、フーリエスペク

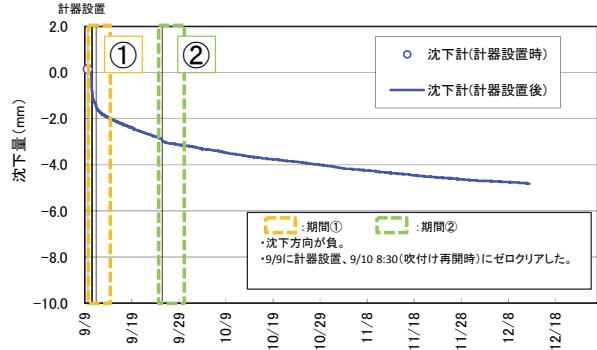


図-14 沈下計測結果（全計測期間）

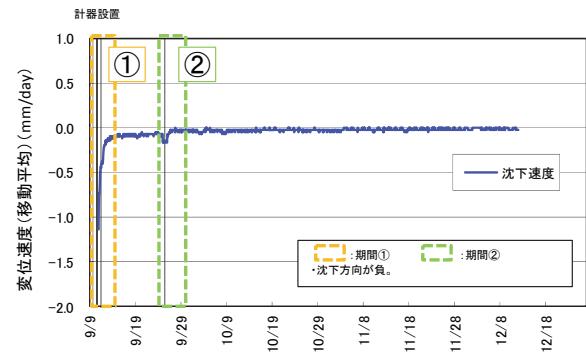


図-15 変位速度（全計測期間）

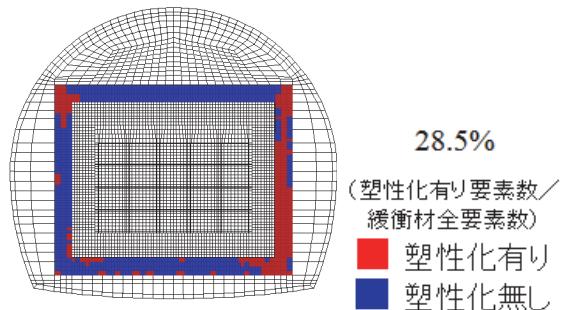


図-16 解析終了時の緩衝材の塑性化状況

トル分析等）を分析するとともに、地震応答解析結果との比較分析から試験施設の地震時の定性的な挙動について検討を行った。

図-16 に緩衝材の塑性化状況を示す。埋戻し直後のケースを対象として、仮想的に設定した検討用地震動を用いて、緩衝材の弾塑性を考慮した非線形地震応答解析を実施した結果、緩衝材の一部がせん断強度に達し塑性化する領域が発生する結果が得られた。

緩衝材が塑性化すると、塑性ひずみの発生（連続体挙動）やせん断帶の発生・進展（不連続体挙動）に伴い、透水性が変化する可能性が考えられるため、解析結果及び既往試験結果に基づ

I. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

いて、地震時の透水性の変化についての分析を行った。その結果、緩衝材の透水係数の増加は最大でも 0.1%程度であることが分かった。

(5) ベントナイト系材料特性測定

本検討は、材料特性に関する知見が十分に得られていない上部埋戻し材のベントナイト混合土について、材料特性の把握を目的とし、不飽和から飽和へ遷移する際の変形特性を把握するため吸水に伴う変形測定試験を、強度特性及び圧密特性を把握するため圧密非排水三軸圧縮試験、段階載荷による圧密試験、長期圧密試験を行った。

吸水に伴う変形測定試験の結果、試験に用いた鉛直圧レベル（500kPa）の荷重が加われば、ベントナイト混合土の場合、圧密現象とともに膨潤現象も同時発生すると考えられ、載荷した鉛直圧とこれらの現象（圧密と膨潤）がバランスすることで変形が発生すると考えられる。

圧密非排水三軸圧縮試験の結果において、昨年度に実施した室内成形供試体では、乾燥密度が高ければ直接、強度に反映され、強度定数（ ϕ' , M' ）も大きくなる相関性が確認されたが、現場施工の供試体を用いた今年度の結果では、室内圧縮成型供試体で得られる強度よりも、現場採取試料で得られる最大主応力と強度定数（ ϕ' , M' ）の方が小さいことが分かった。このことより、室内圧縮成型供試体による試験結果を設計で用いる場合、現場での施工時の強度差を考慮し、裕度を持たせた設計とすることが望ましいと考えらえる。

圧密試験の結果からは、圧縮指数（Cc）、膨張指数（Cs）ともに乾燥密度が大きいほど小さい値を示す傾向が確認された。また、長期圧密試験の結果、二次圧密係数（ α ）は 0.002 であった。

(6) セメント系材料特性測定

拡散抑制が期待される低拡散材について、品質管理方法の信頼性向上を目指し、これまで実施した低拡散材に係わる取得データの拡充を目的に、上部低拡散材の拡散係数及び空隙率（空隙径分布測定等）のデータを継続して取得した。

これまで現場で施工された低拡散材を用いた拡散係数測定の結果、得られた定常状態後の実効拡散係数は $1 \times 10^{-13} \sim 2 \times 10^{-13}$ (m^2/s) の範囲で

あり、平成 24 年度から実施している上部低拡散材についても同様な結果となった。

空隙率測定の結果、上部低拡散材に対する全空隙率は 13.7%～14.4%、連続空隙率は 4.5%～4.6% であった。平成 25 年度の結果（材齢 14 力月）と比べると、材齢 24 力月のものはほとんど変化していない。

ひび割れ調査の結果、対象部材（上部低拡散材、上部コンクリートピット、左側部低拡散材）のひび割れ幅の増大、進展、新たなひび割れの発生が無いことを確認した。

2. 平成 19 年度～平成 26 年度のとりまとめ

◇ 確証試験の目的

発電所廃棄物や長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU 廃棄物）等の低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分は、地下 50m 以深の大断面の地下空洞型処分施設における処分を概念とした検討が行われている。これまで、処分施設の構築・施工技術に関しては、主に地上での小規模要素試験等において基礎的な試験が行われているのみであり、今後の地下空洞型処分施設の設計・施工に当っては、地下環境下での総合的な施工技術の確証試験が必要となる。

本確証試験は、大断面の地下空洞において、人工バリアとしての要求品質の確保と、合理的な施工技術、施工方法の実規模施設への適用性の確証を目的とし、処分施設を模擬した実規模施設における施工試験を実施し、実用的な施工技術の確立に資するものである。

また、本確証試験は、地下空洞型処分施設を対象としており、これまでの試験結果・検討結果に基づいた施工技術の確立と、構築された施設の初期性能を地下空洞内の環境で確認できる。このため、同様の処分施設形態が検討されている発電所廃棄物や TRU 廃棄物等の余裕深度処分に対して人工バリア等の施工技術が現実的に適用可能であると考えられる。本試験で、特に期待される成果を以下に示す。

- 地下空洞内の環境における施工技術の実施工への反映
- 材料配合、施工手順、施工方法及び初期性

- 能に対する知見の実施工への反映
- 実処分施設の建設段階での国の規制に対する挙動計測、モニタリング等の知見の反映

◇確証試験の内容と成果

(1) 緩衝材

余裕深度処分の施設は要求機能に応じた複数の部材で構成されており、廃棄体、コンクリートピット及び低拡散材を包み込むように緩衝材が配置される計画である。

緩衝材の主たる要求機能は建設・操業期間中における閉じ込めと、埋戻し後の移行抑制であり、これらの機能を満たすための低透水性が重要な性能として期待されている。緩衝材の仕様の設定や施工方法の検討を行うにあたり、施工性の確認と低透水性等の性能の確認を行うことが重要である。以下に、本確証試験で明らかになった要点を示す。

- 比較的大量の含水比調整をバッチ式機械で実施した結果、初期含水比にばらつきがある場合でも、材料のグルーピングにより所定の品質で調整可能なことを明らかにした。
- 吹付け工法への適用を想定した凍結混合法（水分を凍らせて粉碎したものをメントナイトと混合した後、常温に戻す含水比調整法）による含水比調整も、水添加混合法と同等の品質が確保できることを確認した。
- 実際の施工空間を模擬した施工試験を通して、施工条件を踏まえた施工機械により、敷均し・転圧の一連の施工試験を行った結果、要求機能を満たした緩衝材が施工できることを明らかにした。
- 底部緩衝材ではアスファルトフィニッシャによる敷均し、大型振動ローラを用いた振動締固めを行い、既存技術を用いた緩衝材の施工実現性を確認した。
- 側部緩衝材では狭隘な環境で施工性を踏まえて開発した材料供給機、敷均し機を用いた施工試験を行い、小型振動ローラによる実環境下での施工が可能であることを確認した。
- 転圧工法では底部・側部・上部緩衝材、

それぞれの部位を対象に、敷均し厚さと転圧回数を管理することにより品質確保が可能であることを確認した。

- 転圧工法で、乾燥密度のばらつきを低減するため、敷均し厚さを薄くすることが有効であることを確認した。
- 吹付け工法を狭隘な空間である底部緩衝材隅角部、側部緩衝材奥部・一般部、上部緩衝材隅角部等に適用し、人力、及びロボットによる施工試験を行った結果、いずれの部位においても所定の品質を満足し、実規模レベルでの施工方法を確立した。
- 吹付け時に発生するリバウンド材料の回収方法、再利用方法を検討し、リバウンド材料とフレッシュ材料の混合により再利用が可能であることを確認し、吹付け工法の効率化を図った。
- 実規模施工への吹付け工法の適用性検討を通して、シリコンオイル法（シリコンオイルを利用したアルキメデスの原理による密度の測定方法）による密度測定や、含水比と材料供給量を制御する密度管理方法の適用性を確認し、吹付け工法による品質・施工管理方法を確立した。
- 実際の地下環境下で施工した緩衝材から採取した試料を用いた初期性能試験を実施した結果、転圧工法、吹付け工法のいずれにおいても必要な初期性能を満足することを確認した。
- 初期性能試験の結果は室内で圧縮整形された供試体を用いた既往試験の結果と同等であることを確認した。この結果から、これまでの室内試験レベルでのデータも実構造物の設計・評価に用いることが可能であることを確認した。
- 挙動計測の結果、底部緩衝材の上載荷重の影響は、概ね上載圧に相当する挙動（土圧、沈下量）であることを確認した。
- 挙動計測において底部緩衝材には上載荷重が要因で過大な土圧、沈下は生じておらず、支持部材としての機能を維持していることを確認した。

I. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

(2) 低拡散材

低拡散材は放射性核種の拡散を抑制すること（拡散抑制）を主たる要求機能とし、低拡散性により、核種移行の遅延を図る部材である。低拡散材は異物による水みちの発生を防ぐため鉄筋や骨材を排し、無筋のモルタル造となってい る。低拡散材には、拡散係数の小さい緻密な材料であること、及び施設全体としての拡散抑制機能が低下しないように、ひび割れの発生やセメントの溶脱を抑制する材料であること等が求められる。

このような確証試験の目的として、実規模の施工試験における出来形やひび割れの発生状況及び初期性能等を確認することで、適用した施工方法の妥当性や成立性の評価、及び要求機能の確証等があげられる。以下に、本確証試験で明らかになった要点を示す。

- 低拡散性、充てん性及びひび割れの制御効果を確保した材料・配合を選定し、実規模試験で構築した部材から採取したコアを用いた定常拡散試験法（室内でトリチウムを用いて測定）を行った結果、拡散係数は $10^{-13}\text{m}^2/\text{s}$ オーダーと極めて低い拡散性（管理目標値 $1.0 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ 以下）の達成を確認した。
- 本試験で採用した低熱ポルトランドセメント、フライアッシュ、石灰石微粉末を使用した高流動モルタルは、良好な流動性を示し、部材の端部まで充てん可能であった。
- 低拡散材に対する型枠は要求機能上、異物による水みちの発生を防ぐため、セパレータを使用しない方法を確立した。
- 打込み時の側圧に関するデータを取得した。打込み時の側圧は、打込み開始から約1時間20分までは液圧で作用し、最大で70kPa程度であった。この知見は、型枠の設計・施工の合理化に向けて活用できるものである。
- ひび割れは低熱ポルトランドセメントや膨張材等の効果によって制御され、低拡散材全体についても、ひび割れ開口部表面積比率が0.01%以下という、高い品質を有していることを確認した。
- 低拡散材に生じたひび割れは、温度、乾

燥及び隣接部材の拘束の影響を受けて発生したものと考えられる。材齢10日程度の水和熱による温度ひび割れは、膨張材等の効果により十分制御されたと考えられる。

- 上部低拡散材において、打ち込み中のミスト散布、再振動、表面締固めバイブレータによる表面仕上げを実施し、ひび割れの低減効果があることを確認した。
- 上部低拡散材において、湿潤養生マットと湿潤保温養生マットで養生した結果、湿潤保温養生マットで養生した部分にひび割れが発生した。養生終了後、発生したひび割れの幅の増大、進展、新たなひび割れの発生は確認されていない。養生マットの使用により、保水効果、水和発熱の急冷抑制効果を確認した。
- 振動計測の結果、底部低拡散材では、上載荷重の影響でひび割れが発生しているが、ひずみ・応力の計測からひび割れは局所的なものと考えられ、底部セメント系部材の健全性は確保されていると評価される。

(3) コンクリートピット

地下空洞型処分施設におけるコンクリートピットは空間・力学安定性を主たる要求機能とし、建設・操業中の安全、作業空間の確保や、自重・外力に対する安定性を確保するものである。その要求機能は通常の土木構造物と同様のものであり、現状の土木分野における構造設計が適用可能である。

このようなコンクリートピットには力学安定性の確保に関わる所定の力学特性を有する材料・配合であること、及び安定性を損なうような欠陥が生じない、均質な部材を構築し、所定の出来形・空間を確保する施工が求められる。

コンクリートピットの確証試験は、力学安定性を満足し、ひび割れの制御効果や緻密さが期待できる材料・配合を選定し、実規模の施工試験を行うこと、適用した施工方法の妥当性や出来形、ひび割れの発生状況及び初期性能を確認すること等により、施工の成立性や要求機能が確保できることの確証を得ることを目的として実施した。

- 選定した配合において、所定の圧縮強度を満足できることを確認した。
- 設計基準強度に達するために必要な積算温度は平均して2,000 (℃・日) 程度、材齢換算では約100日程度であることを確認した。
- 出来形の確保については、各部材の座標計測による出来形管理を実施した。コンクリートピットのいずれの部位（底部、側部、上部）における出来形も規格値内に仕上がり、選定した配合及び施工方法により高い精度で部材の施工が可能であることを確認した。
- 石灰石微粉末の種類や量、環境温度の変化等がフレッシュ性状に与える影響を検討し、それらの変動要因に対しては混和剤添加率で調整が可能であることを確認した。
- ポンプ圧送を前提とした検討を実施した。打込み箇所の数と場所の設定、補助バイブレータの使用、吐出量の調整による流動勾配の調整により、充てん施工が可能であることを確認した。
- 上部コンクリートピットにおいてコンクリート表面の乾燥が原因とされるひび割れの対策とし、打込み中のミスト散布、再振動、表面締固めバイブルータによる表面仕上げを施し、ひび割れの低減効果があることを確認した。また、上部低拡散材と同様に養生マット（湿潤、湿潤保温）で養生し、その保水効果と養生中に発生するセメントの水和熱の急冷抑制効果を確認した。
- 振動計測の結果、底部コンクリートピットの上載荷重の影響は、引張応力が作用するもののその強さは引張強度以下であり、ひずみ増加量は季節変動による温度変化に伴う変動と同程度であることを確認した。
- 振動計測において、側部コンクリートピットの側圧の影響は、隣接部材施工時に引張側に応力は増加するが、全期間を通じて引張応力は引張強度以下であり、同様に、隣接部材施工時にひずみは増加するが、ひずみの増加量は季節変動による

温度変化に伴う変動と同程度であることを確認した。また、これらの変状は、施工終了後、ひずみは残留せずに減少することも確認した。

(4) 充てん材

充てん材は廃棄体を線源とする放射線に対する遮へいと、放射性核種の収着性を主たる要求機能とし、放射線量を合理的な範囲で極力低くすることで核種移行の遅延を図るものである。

充てん材のうち、区画内充てん材は廃棄体間（一部上部）の狭隘な空間を確実に充てんできるよう高流動モルタルを基本とする配合とした。一方、上部充てん材にはより高い遮へい性能が求められることから粗骨材を使用し乾燥単位容積質量を大きくした高流動コンクリートを選定した。充てん材の施工は放射線環境下での作業となり、遠隔操作による無人化施工が前提とされるため、充てん性や流動性が施工上、特に重要な要求事項であった。

充てん材の確証試験は、遮へい性を満足し、施工時の充てん性や流動性が期待できる材料・配合を選定し、実規模の施工試験を行うことにより、適用した施工方法の妥当性や出来形及び初期性能を確認することで、施工の成立性や要求機能が確保できることの確証を目的として実施した。

以下に、試験の主な成果の概要を述べる。

- 遮へい性能に関する管理項目である乾燥単位容積重量について、「コンクリートの乾燥単位容積質量試験方法JASS 5N³」に準拠して試験を行った。選定した配合の材料で必要な単位容積質量を確保できることが確認された。
- ポンプ方式、バケット方式の両打込み方式における充てん性と流動性、セルフレーリング性について検証を行い、選定された充てん材の配合で問題無く充てん可能なことを確認した。
- 無人化施工を模擬した移動式バケットと表面均し装置による仕上げにより、遠隔操作による無人化施工の可能性を確認した。
- 打込み後、区画内充てん材の水分が他部材へ吸収されることで界面に隙間が発生する可能性が高いことを確認した。隙間

I. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

の発生が許される程度により、吸水を抑制するための散水方法を検討する必要がある。

(5) 埋戻し材

上部埋戻し材の狭隘な空間、すなわち、人工バリア（低拡散材・緩衝材）と岩盤との間の空洞や隙間は、地下水の流動に伴う核種移行の経路としないため、隣接する緩衝材をはじめとした人工バリアや空洞の力学的安定性を保つため、また、容易に人が侵入できないようにするために、埋戻す必要がある。

ベントナイト混合土を用いた上部埋戻し材の確証試験は、低透水性、隙間なく施工できる充てん性が期待できる材料・配合を選定し、実規模の施工試験を行うことにより、適用した施工方法の妥当性及び初期性能を確認することで、施工の成立性や要求機能が確保できることの確認を目的として実施した。

以下に、試験の主な成果の概要を述べる。

- 粉末ベントナイトを母材である砂に混合した材料を用いることとし、要求する性能を満足する仕様（混合率、乾燥密度、初期含水比）を室内試験（締固め試験、透水試験）より設定した。
- バッチ式及び連続式の機械を用いてベントナイト混合土の製造に関する試験を実施した結果、いずれの機械でも所定の品質を確保することができることを確認した。
- 製造した混合土の混合率及び含水比の精度をあげるために、緩衝材と同様に混合前の各材料の初期含水比の把握が重要であることを確認した。
- 大型で汎用的な連続式の混合機械を用いて大量の混合土を製造した結果、所定の仕様の混合土を安定的に製造できることを確認した。
- 狹隘空間に適用し得る施工方法として、転圧工法と吹付け工法の組合せによる方法を選定し、その適用性を確認できた。
- 吹付け工法と転圧工法を交互に行うことで、アーチ形状の隅角部を含む狭隘な空間での施工が可能であることを確認した。
- ベントナイトと砂の混合土を使用し、実

規模試験で構築した部材から採取したコアを用いた透水試験の結果、透水係数は 10^{-11} m/s程度で、空洞周辺の原地盤の透水係数（ 10^{-8} m/s程度）よりも低い部材を構築できることを確認した。

- 振動計測の結果、上部埋戻し材の施工が進行するに従い、新たに構築された上部埋戻し材の自重増加により沈下計に5mm程度の変位量が観測された。

(6) 振動計測・地震影響

1) 振動計測

試験施設の施工を開始した平成19年度から、試験施設に温度計やひずみ計等の計測器を設置し、施工時及び施工後の試験施設の振動を計測してきた。また、周辺岩盤には、隙間水圧計及び岩盤変位計を設置して、試験施設構築に伴う振動を計測した。

施工確認試験による人工バリアの構築は段階的に進められる。そのため、試験施設を構成する部材は、その施工により隣接部材に力学的な影響を与えるとともに、後続する部材の施工の影響を受ける。振動計測は、施工時及び施工後の試験施設の力学振動と周辺岩盤への影響を把握すること及び試験施設の健全性の評価を行うこと等を目的とする。

振動計測では、施設構成部材に計測器を設置し、施工中及び施工後の計測を継続して実施した。

また、コンクリートピットや低拡散材等のセメント系部材の打込み時に得られた計測結果を用いて、初期性能（試験施設の建設完了時点の性能）に関するデータを取得した。

試験施設構築に伴う振動については各部材の項で述べたので、ここでは周辺岩盤の振動、坑内環境について述べる。

- 周辺岩盤の変位については、上載荷重の影響を把握するため岩盤変位計を設置し計測した結果、岩盤変位は弾性振動の範囲内にあり、緩みの進展はなく、健全な状態にあることを確認した。
- 試験施設の荷重により生じる周辺岩盤の岩盤変位は、この変位量から推定した岩盤の弾性係数（2,300MPa）と確証試験着手時の検討に採用した弾性係数（2,000MPa）が同程度であることから、

想定範囲内の挙動と言える。

- 周辺岩盤の間隙水圧について、その変動を把握するため間隙水圧計を設置し計測した。その結果、試験期間中の全計測孔での間隙水圧の変動は小さく（水頭差で最大3m程度）、施設構築の周辺岩盤の地下水流动への影響は小さいと考えられる。
- 坑内気温については日平均気温、日最高気温、日最低気温ともに季節変動がみられ、日最高気温は12～2月の冬期間で10℃前後であり、7～8月の夏季期間では20℃前後となっている。

2) 地震影響

一般に地下構造物は耐震性に富む構造物であることが知られている。しかし、過去の地震によるトンネルの被害事例によると、地震の規模が大きく、地震断層面からの距離が近く、地山に何らかの欠陥がある場合等の条件が重なれば、トンネルも地震被害を受ける可能性があり、①坑門、坑口部の被害、②不良地山区間の被害、③断層のずれによる被害の3パターンに分類されている。これまで、大深度の放射性廃棄物処分施設の処分坑道を対象として、周辺地盤及び支保工の力学安定性を評価した事例はあるが、空洞内的人工バリア施設を含めた地下空洞施設の地震影響の検討は報告されていない。

そこで、地震が地下空洞施設の全体挙動や人工バリア部材であるコンクリートピット・低拡散材及び緩衝材に与える影響を把握するために、仮想的に設定した地震動レベルの異なる3つの地震動（解放基盤面での水平方向最大加速度がLv1では250Gal、Lv2では450Gal、Lv3では900Gal）を用いて2次元有限要素法(FEM)による地震応答解析を行った。以下に結果を示す。

- セメント系部材（コンクリートピット、低拡散材）は、Lv3の大きな地震動に対しても、部材（鉄筋及び圧縮縁のコンクリート）の耐力は十分であり、力学安定性が非常に高い結果が得られた。
- 緩衝材は、廃棄体定置前では底部緩衝材の左右端でせん断・引張応力が生じ易く、埋戻し直後では施設全体が周辺岩盤と一体になって挙動するため、廃棄体定置前と比較して、せん断・引張応力が生じる

領域が大きくなり、地震動がLv2以上でその発生が顕著になることがわかった。

また、Lv2の地震動を用いた緩衝材の詳細検討の結果、以下の点を確認した。

- 緩衝材と周辺部材との剥離・すべり及び緩衝材の弾塑性挙動を考慮できるモデルで検討した結果、緩衝材の厚さ方向の残留変化量は最大で0.49mmであり、もとの緩衝材の厚さ（1,000mm）に対して十分に小さいことが分かった。
- 緩衝材が塑性化すると、塑性ひずみの発生（連続体挙動）やせん断帯の発生・進展（不連続体挙動）に伴い、透水性の変化が考えられ、解析結果や既往試験結果に基づき、地震時の透水性の変化について分析を行った。その結果、連続体挙動の範囲では、地震の影響による緩衝材の透水係数の増加は最大でも0.1%程度であり、影響は小さいことがわかった。
- 緩衝材のせん断帯の発生・進展に伴う不連続挙動が透水性に与える影響に関しては、既往文献調査を実施し、定体積条件においては、緩衝材にせん断による低密度帯が生じにくく、仮にせん断帯や隙間が存在しても、再冠水後の飽和状態になれば透水性に与える影響は小さくなることがわかった。

試験施設に地震計を設置し、平成25年10月～平成27年2月の期間で16波の観測地震動を取得した。また、観測データを用いた地震応答解析を実施し、試験施設の地震時挙動を把握した。検討成果及び今後の課題を以下に示す。

- 軟岩中における大規模地下空洞及び実規模大の試験施設の地震動観測を実施した事例は少なく、地震動観測データは、今後の地下空洞施設の地震影響検討において有用なものと考えられる。
- 地震動観測データ及び地震応答解析結果より周辺岩盤の固有振動数（数Hz）と比較して、試験施設の固有振動数が15～20Hz程度と大きい可能性があるという地震時振動特性が推測される。

I. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究



図-17 試験施設の全景（平成 26 年度末）

- 1) 土木学会、第 62 回年次学術講演会、余裕深度処分における側部ベントナイト層の現場施工に関する検討、
2007
- 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 年度管理型処分技術調査等事業 地下空洞型
処分施設閉鎖技術確証試験報告書、2015
- 3) 日本建築学会、建築工事標準仕様書・同解説 JASS5N
原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事、
2001

2. 諸外国の廃棄物確認技術等に関する調査

◇事業の概要

本調査では、余裕深度処分対象廃棄体の廃棄物確認方法の整備及びピット処分対象廃棄体の廃棄物確認方法の高度化に資するために、以下の調査を実施した。

- ・諸外国の廃棄物確認に関する制度の調査
- ・諸外国の廃棄物確認に関する実施方法の調査
- ・諸外国の廃棄物確認技術に関する調査

本調査においては、表-1に示す国・処分場を調査対象とした。

表-1 調査対象国及び処分場

対象国	処分場
アメリカ	バーンウェル処分場(エナジーソリューションズ社)
	クライブ処分場(エナジーソリューションズ社)
	テキサス処分場(ウェースト・コントロール・スペシャリスト社(WCS社))
フィンランド	オルキルオト処分場(テオリスデン・ヴォイマ社(TVO社))
	ロヴィーザ処分場(フォルツム・パワー・アンド・ヒート社(FPH社))
スウェーデン	SFR-1(スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社(SKB社))
フランス	オープ処分場(放射性廃棄物管理機関(ANDRA))
	ラ・マンシュ処分場(ANDRA)
イギリス	ドリッゲ処分場(低レベル放射性廃棄物処分場会社(LLWR社))
韓国	月城処分場(韓国原子力環境公団(KORAD))

なお、本事業は、原子力規制委員会原子力規制庁の委託により実施したものである。

◇平成26年度の成果

(1)諸外国の廃棄物確認に関する制度の調査

表-1に示した調査対象各国における廃棄体に関する規制要件を調査し、廃棄体、検査などの項目ごとに、その規定内容及び該当する法令等を整理した。

また、廃棄物発生者及び埋設事業者が規制要件に基づき整備している文書の種類と内容の調査を実施した。調査結果については、廃棄物フローとの関係を示す図の形式で取りまとめた(図-1)。

さらに、調査対象の各処分場に関する、規制要件及び埋設事業者が定める廃棄物受入基準の関係を調査した。調査結果については、規制項目ごとに規制基準とそれに基づく受入基準が対比できるような表形式で取りまとめた。

(2)諸外国の廃棄物確認に関する実施方法の調査

調査対象の各処分場について、規制機関や埋設事業者の実施する廃棄体確認の手順書や関連資料入手し内容の調査を行った。また、廃棄体確認に関して、確認項目、確認内容、判断基準、確認頻度(全数確認、抜取り確認の別)を規制者によるもの、埋設事業者によるものに整理して取りまとめを行った。

さらに、廃棄物確認において不合格になった廃棄体の扱いの調査、抜取り確認を行っている場合の確認方法、判断基準及び抜取り数の設定根拠について調査し取りまとめた。



図-1 米国 WCS テキサス処分場の MCC
(モジュラーコンクリートキャニスター)

I. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

(3)諸外国の廃棄物確認技術に関する調査

調査対象の処分場について、廃棄物発生者、または、埋設事業者による評価対象核種の種類、当該核種の選定根拠及び核種ごとの放射能濃度評価方法を調査した。また、難測定核種について、スケーリングファクタを用いて評価を行っている場合には、その設定方法を調査した。

また、200L ドラム缶以外の廃棄体容器を使用している処分場について、放射能濃度の非破壊検査の有無を調査し、実施している場合、以下を調査した。

- ・容器内部の放射性物質の充填状態に関する規定の有無。規定内容及び根拠
- ・測定対象核種
- ・測定方法
- ・放射能測定精度

さらに、韓国の月城処分場で行われているX線検査について、検査装置構成、測定性能、及び確認内容、その判断基準について調査した。



図-1 米国クライブ処分場におけるトラックで輸送されてきた放射性廃棄物の受入時検査の様子

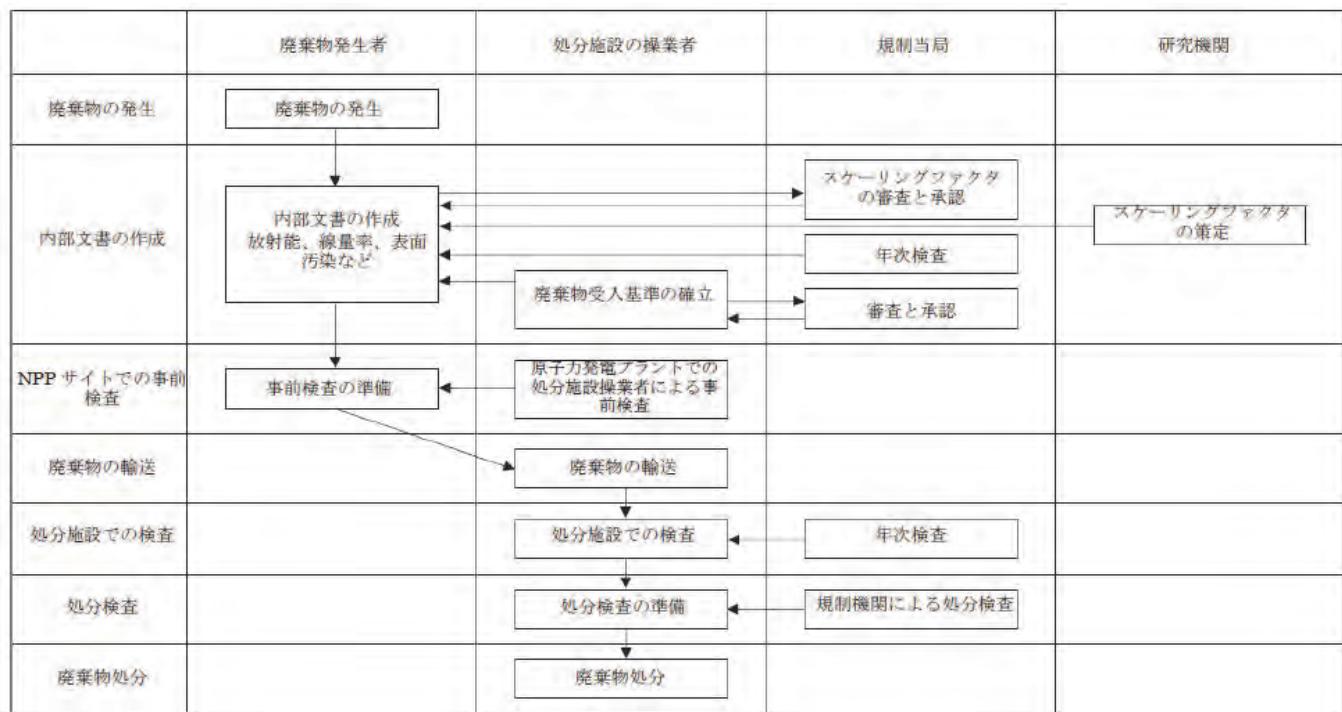


図-1 韓国月城処分場における廃棄物確認のフロー

3. その他の管理処分に関する調査研究

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

(1) 余裕深度処分埋設核種分析手法の確立に係る委託

事業者が検討する余裕深度処分埋設核種の分析手法の妥当性を評価することを目的に、専門家によるレビュー委員会を設置し、運営を行った。また、委員会での審議内容、委員から提案された分析操作上の注意点や改善点等の整理・取りまとめを行った。

(2) L1 廃棄体の標準的な製作方法及び検査方法に関する標準化委託

L1（余裕深度処分）廃棄体の標準的な製作方法及び検査方法の民間規格制定に必要な検討を行い、日本原子力学会での審議に対応した。

(3) 廃止措置における国内外の技術、制度面の相違等に係る調査

諸外国における運転中及び廃止措置に伴う放射性廃棄物の処理処分方法の最新情報を整理した。

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

1. 処分システム工学確証技術開発

◇事業の全体概要

原子力発電の利用に伴って発生する放射性廃棄物のうち高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）については、地層処分に向けた取組が行われており、処分技術の信頼性向上に関する基盤技術の開発が、最終処分のサイト選定プロセスを考慮して段階的に実施されている。

処分場の操業期間中におけるガラス固化体のオーバーパックへの封入・検査技術、オーバーパックの周囲に設置される緩衝材の施工技術、人工バリアのモニタリング技術等の要素技術について、サイト選定の第3段階である精密調査の前半段階（地上からの調査段階）において必要となる基盤技術を整備してきた。今後は、実際の深部地下環境での活用を通して、これらの工学的な要素技術の信頼性を高める必要がある。さらに、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえ、巨大地震、巨大津波等に対する操業期間中の安全対策に係る基盤技術の整備も喫緊の課題となっている。

本事業は、上記の状況を踏まえ処分場の操業期間中における人工バリアの製作・施工技術、モニタリング技術等の工学技術を、地下研究施設を活用して確証していくとともに、自然災害に対する

操業期間中の工学的対策に関する基盤技術の整備を行うことを目的としている¹⁾。

本事業は、人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック、人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材、モニタリング関連技術の整備、自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の4つの研究開発項目で構成されている。

(1) 人工バリアの工学技術に関する開発経緯

原環センターでは平成24年度までに、オーバーパックと緩衝材の製作・施工に関する要素技術の開発を実施した^{2),3)}。オーバーパックについては、封入方法として溶接技術の適用性についての検討を行い、緩衝材については、施工方法及び施工品質についての検討を行った。また、人工バリアの製作・施工時に生じる不均一性が、その品質に及ぼす影響を調べるために、オーバーパック溶接部の腐食試験、再冠水時を対象とした緩衝材の流出や変質などに関する試験を実施した。その結果、溶接金属の組成によっては溶接部での選択的な腐食が生じる可能性があること、地下水の流量によっては緩衝材の流出が生じる可能性があることがわかった。

(2) 人工バリアの健全性を判断するための指標

人工バリアの設計から処分場の閉鎖までの各段階の工程を概略的に図-1に示す。健全な人工バリアとは、設定された安全機能が、要求され

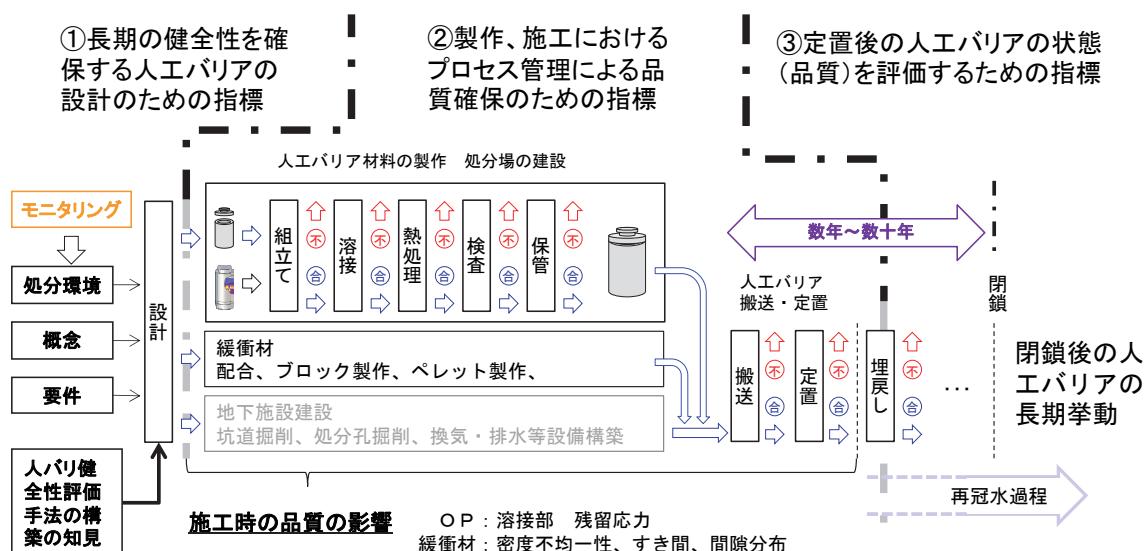


図-1 人工バリアの設計から処分場閉鎖までの各段階の工程

る期間の終了時点まで維持されている状態と考えることができる。製作された人工バリアが健全であることを判断するためには、以下の指標と許容値が必要となる。

指標：人工バリアが安全機能を維持できることを判断するための目印となるもの。

許容値：人工バリアが健全であることを判断するための指標に対する値の範囲。

人工バリアが健全であることを判断するためには、以下の3段階の指標を設定する必要がある。

①長期の健全性を確保する人工バリアの設計のための指標

②製作・施工におけるプロセス管理による品質確保のための指標

③定置後の人工バリアの状態（品質）を評価するための指標

①は、定置後の材料劣化を考慮した上で設定される人工バリアを設計するための指標である。②は、仕様通りの人工バリアが構築されたことを確認するための指標である。③は、定置後の処分環境が、人工バリアの設計条件の範囲内にあることを評価するための指標である。

(3) モニタリングとの関連

現状では、人工バリアの品質／健全性評価の検討は、我が国の代表的な地質環境を対象として実施している。処分サイトが決定した場合には、詳細な環境条件を取得するためのモニタリングを実施することになる。そのため、図-1で示した

操業期間中の各段階で必要な指標に対して、モニタリング項目を抽出し、モニタリング計画を策定することが必要である。

(4) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発

平成24年度に、自然災害を起因とするリスク事象として抽出した技術開発課題から、優先度が高いと判断された①施設計画技術、②人工バリアの限界性能等の調査・試験について検討を実施している。平成26年度は、火災事象に対する安全確保対策の検討、および人工バリアの限界性能等の調査・試験を実施した。

平成25年度に策定した処分システム工学確証技術開発の5カ年の開発目標を表-1に示す。各研究開発項目の内容は、次ページ以降に記載する。

- 1) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成26年度処分システム工学確証技術開発報告書、2015年3月
- 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 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（第1分冊）遠隔操作技術高度化開発、2013年3月
- 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委託費 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（第2分冊）人工バリア品質評価技術の開発、2013年3月

表-1 各開発項目の年度ごとの実施内容及び目標（平成25年度策定）

	H25	H26	H27	H28	H29
1)人工バリア品質／健全性評価手法の構築 オーバーパック	・判断指標の抽出 ・健全性評価モデル案の作成 ・研究開発計画策定	・判断指標に影響する劣化事象の抽出 ・地下施設での腐食試験開始	・破壊評価に基づく限界欠陥寸法の提示 ・材料因子と腐食現象の関係	・材料劣化を考慮した品質評価法の提案	・品質評価／健全性評価手法の提案 ・説明性のある長期健全性判断指標の提示
2)人工バリア品質／健全性評価手法の構築 緩衝材	・緩衝材の品質評価項目の抽出 ・研究開発計画策定	・エロージョンによる性能劣化事象（流入量、液種）の定量化	・ウォーターマネジメント（人工注水、グラウト等）の実施方法・課題の提案	・緩衝材の設計・施工仕様策定に資する指標範囲の提示	・実現可能な技術選択肢による人工バリア等のモニタリング計画の例示
3)モニタリング関連技術の整備	・性能確認モニタリングの課題抽出 ・研究開発計画策定	・操業安全等に関するモニタリングの課題抽出	・地下調査施設による地中無線モニタリング技術の確証	・性能確認モニタリング結果反映方法提案	・人工バリア限界性能等に関する知見の整備
4)自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発	・検討手法等の適用性の確認 ・研究開発計画策定	・火災事象に対する人工バリアの健全性の把握	・火災事象に対する施設計画時の制約事項等の提案	・地下施設の操業安全確保のための制約事項等の提案	

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

1-1 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック

◇事業の概要

平成 24 年度までの遠隔操作技術高度化開発¹⁾では、溶接による封入方法や非破壊検査による溶接欠陥の検出確率について検討を行った。また、人工バリア品質評価技術の開発¹⁾では、溶接部を対象とした腐食試験を実施し、全面腐食および局部腐食に関するデータを取得した。

平成 25 年度からは、これまでの研究開発成果を踏まえた上で、オーバーパックの健全性評価手法の構築に向けた検討を実施する。一般的な構造物は、供用後の検査や補修により、その健全性を確保している。しかし、処分孔定置後に、オーバーパックの検査や補修の実施は想定されていない。そのため、定置前の段階で閉鎖後のオーバーパックが安全機能を発揮することを示す必要がある。

オーバーパックが安全機能を有していることを判断するためには、例えば、溶接部の許容欠陥寸法などの指標が必要となる。このような指標は、定置後に生じる可能性がある破損要因を防止する観点から設定することができると考えられる。そのため、実際の地下深部を想定したオーバーパック溶接部の腐食試験を実施するとともに、材料劣化による機械的特性の変化がオーバーパックの健全性に及ぼす影響について調査・検討を実施する。本年度は、オーバーパック溶接部健全性評価に係わる以下の内容について検討した。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

◇平成 26 年度の成果

平成 26 年度の成果の概要は以下のとおりである²⁾。

(1) オーバーパックの健全性評価手法の構築

オーバーパックの健全性について検討するためには、健全な状態を定義する必要がある。平成 25 年度に、オーバーパックの健全な状態を図-1 のように定義した。オーバーパックには、想定される期間、閉じ込め性を有することが基本要件として要求されている³⁾。つまり、閉じ込め期間が終了するまで、ガラス固化体と地下水の接触を防止している状態が、オーバーパックが健全な状態と定

義することができる。

一般的な構造物の破損要因⁴⁾を表-1 に整理した。構造物の破損モードを静的破壊、動的破壊、その他で分類し、変形様式としては、弾性変形、弾塑性変形に分類した。これらの破損要因のうち、定置後のオーバーパックに生じる可能性のある要因を○印で表中に示した。

オーバーパックは定置後の補修を前提としていることから、オーバーパックの腐食代を設定するためには、全面腐食による腐食量を把握するとともに、応力腐食割れ、局部腐食の発生を防止する必要がある。構造については、崩壊、欠陥を起点とした破壊を防止する必要がある。また、サイト選定期階で活断層を避けるが、必要に応じて、断層運動などに対するオーバーパックの弾塑性破壊について評価する必要があると考えられる。

溶接部の腐食評価については、「第 2 次取りまとめ」で示された腐食シナリオ³⁾に基づいて、研究開発課題を図-2 のように整理した。腐食評価では、オーバーパック定置後に生じる腐食現象を把握するための腐食試験と腐食メカニズムを解明するための腐食試験を実施した。

構造評価については、強度評価と欠陥評価に分

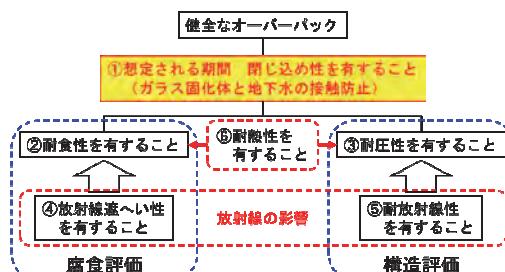


図-1 オーバーパックの健全な状態の定義

表-1 構造物の破損要因

破損モード	変形様式	破損の要因	オーバーパックの破損要因
静的破壊	弾性変形	脆性破壊	×
		応力腐食割れ	○
		延性破壊	×
	弾塑性変形	座屈	×
		崩壊	○
動的破壊	弾性変形	クリープ破壊	×
		弹性破壊	×
	弾塑性変形	高サイクル疲労	×
		弾塑性破壊	○
その他		低サイクル疲労	×
		全面腐食	○
		局部腐食	○
		欠陥を起点とした破壊	○

類し、破壊の駆動力と破壊抵抗の観点から、研究開発課題を図-3 のように整理した。本年度は、溶接部の限界き裂寸法、超音波探傷法による欠陥寸法測定、材料の脆化の検討を実施した。

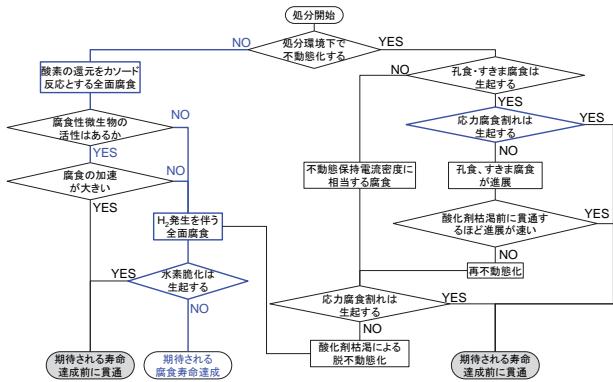


図-2 溶接部の腐食評価に関する研究開発課題の整理

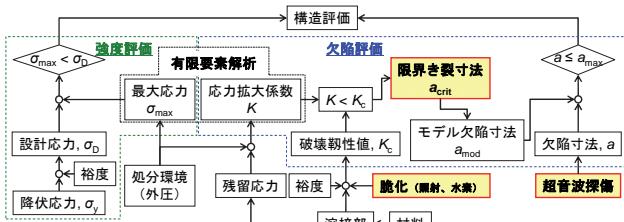


図-3 構造評価に関する研究開発課題の整理

(2) 現象理解のための腐食試験

地下環境における炭素鋼溶接部の腐食挙動を把握するため、以下の3つの異なる大きさの試験体を用いた腐食試験を平成25年度に計画した。
①模擬オーバーパック溶接試験体を用いた腐食試験（工学規模試験）、②数十cm程度の試験体を用いた腐食試験（小規模要素試験）、③数cm程度の試験片を用いた腐食試験（実験室規模試験）。

工学規模試験は、地下施設と地上施設で実施する。地下施設で実施する試験は、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）との共同研究^{注1)}として、幌延深地層研究センター（以下、幌延URL）の地下350m調査坑道で実施している。オーバーパック溶接部腐食試験の概要を図-4に示す。試験孔内の不均一な環境での腐食挙動を広範囲に把握するために、模擬オーバーパック溶接試験体には、円周方向に2カ所の溶接部を長手方向に設けた。試験体の周囲には緩衝材を配置し、緩衝材と試験孔の隙間はケイ砂で充填した。試験装置内には、各種のセンサを設置し、環境条件や腐食

に関する試験データの取得を開始した。また、同様の試験装置を用いて、次年度から開始する地上施設での工学規模試験のための試験条件などを、幌延URLでの試験状況を踏まえて設定した。さらに、腐食計測技術に関する最新のセンサ類についての情報を調査し、それらの有効性を整理した。

小規模要素試験は、工学規模試験の試験データを補完するために、次年度からの実施を予定している。そのための試験装置、試験条件等について分析し、試験ケースの案を提示した。

実験室規模試験は、主に原子力機構との共同研究^{注2)}として実施している。本年度は、低酸素雰囲気下での浸漬試験の維持管理を実施した。低酸素雰囲気の炭素鋼溶接部の浸漬試験は、現在5年及び10年間のデータ取得に向けた試験を実施中である。また、チタンの浸漬試験についても、10年を目標にした浸漬試験を継続して実施している。

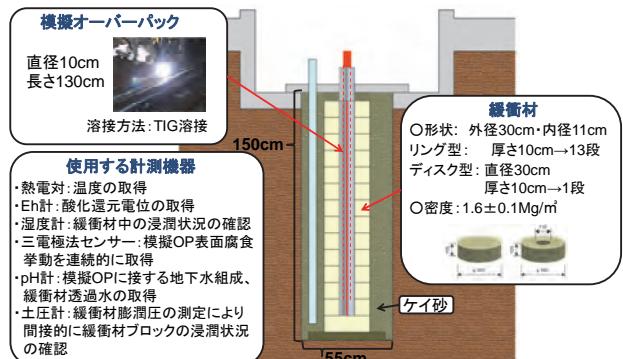


図-4 オーバーパック溶接部腐食試験の概要

(3) 腐食メカニズム解明のための腐食試験

これまでの腐食試験で得られている局部腐食や腐食速度に関するデータは、オーバーパックの寿命に比べると短期間（十数年程度）で取得されている。そのため、腐食メカニズムを明らかにした上で、腐食速度などの長期予測を行うことにより、取得された試験データの信頼性を向上させることができると考えられる。腐食は材料が環境と接する表面で発生することから、腐食メカニズムを明らかにするためには、腐食現象に及ぼす材料因子及び環境因子の影響を調べる必要がある。

腐食現象に及ぼす材料因子の影響を調べるために、炭素鋼溶接部を対象とした腐食試験を実施した。本年度は、溶接時の入熱による金属組織の不均一性が、オーバーパックの腐食挙動に及ぼす影

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

響を調べるために試験を開始した。同一の母材を使用して TIG 溶接と電子ビーム溶接 (EBW) により、金属組織を変化させて化学成分を固定した試験体を作製した。TIG 溶接では、母材と溶接部の成分が同じになるように、母材から作製した溶加棒を使用した。TIG 溶接では繰り返しの入熱があるため、溶接部には原質部と再熱部が形成される。電気化学的手法による加速試験の結果を図-5 に示す。EBW 溶接試験体では、溶接金属全体が均一に腐食する傾向が確認された。繰り返しの入熱を受けた TIG 溶接試験体では、溶接パスに対応するように縞状の腐食が発生し、原質部と再熱部で腐食深さに差が生じた。以上より、金属組織の違いにより、溶接部では選択的な腐食が発生することを確認した。

腐食現象に及ぼす環境因子の影響を調べるために、緩衝材中の腐食試験方法及び緩衝材試料の調製方法や腐食挙動の測定手法を予備的に検討した。溶液中のイオン濃度が比較的高い条件では、緩衝材の膨潤による変形量が小さいため、検討した試験装置で腐食試験のための試料として使用できることを確認した。この緩衝材試料を 2 電極間に挟み、各種の電気化学的パラメータの取得を開始した。また、緩衝材試料を用いずに試験溶液のみのブランク試験からは、溶液抵抗や電荷移動抵抗について妥当な測定結果が得られ、測定システムとしての適用性を確認した。

(4) 溶接部の限界き裂寸法に関する検討

炭素鋼製オーバーパックの落し蓋構造を対象として、溶接部の限界き裂寸法を有限要素解析で求めた。オーバーパックの板厚は、強度層の 110mm とし、溶接部のき裂形状は半楕円の開口き裂とした。オーバーパックに作用する負荷は、「第 2 次取りまとめ」における硬岩系 1,000m の外圧値 10.7MPa と溶接部残留応力 100MPa とした。解析の結果、応力拡大係数に対する外圧の寄与は相対的に小さく、残留応力の寄与が大きくなつた。

現状では、き裂が存在する場合の破壊抵抗値である破壊靭性値が、放射線の照射や水素吸収による脆化によりどの程度低下するか予測することが難しい。そのため、限界き裂寸法と許容残留応力の関係を破壊靭性値ごとに求めて、図-6 に整理した。この図から、破壊靭性値と残留応力が与えられた場合、非破壊検査で検出する必要があるき裂

寸法を推定することができる。ただし、検出すべきき裂寸法には、寸法測定誤差などを考慮して適切な裕度を考慮する必要があると考えられる。

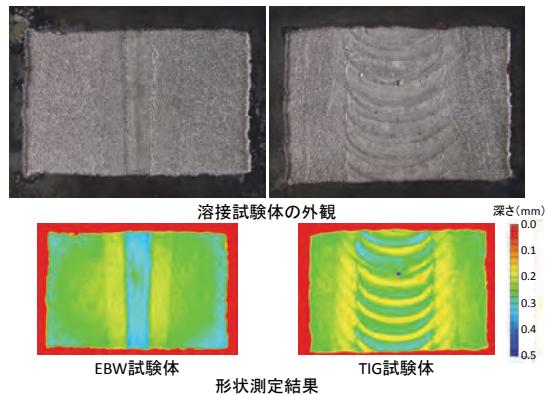


図-5 溶接試験体の腐食試験結果

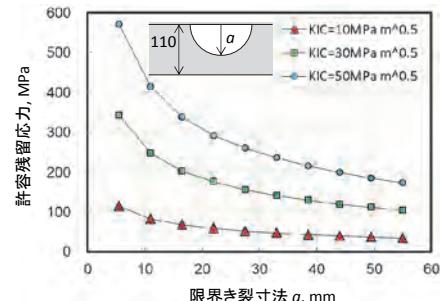


図-6 許容残留応力と限界き裂寸法の関係

(5) 超音波探傷による欠陥寸法定量化

超音波探傷試験により測定される欠陥寸法を定量化することを目的として、フェーズドアレイ法 (PhA 法) による超音波シミュレーションおよび探傷試験を実施した。超音波シミュレーションでは、これまでに実施した溶接試験体の断面観察の結果から得られた欠陥形状を入力条件として与え、欠陥からの超音波の反射波を解析的に調べた。L 字型の欠陥形状で上端が深さ 182mm の位置にある欠陥を対象とした解析結果の例を図-7 に示す。欠陥指示付近の拡大図に示すように、欠陥形状が複雑になると欠陥で反射される超音波の経路が複雑になり、本来の欠陥指示よりも深い位置からの反射波が確認された。これは、欠陥形状が欠陥寸法の測定誤差の要因の一つになることを示している。

また、PhA 法で用いる超音波探触子の開口寸法を 64mm (昨年度までは 16mm と 32mm) として探傷試験を実施し、欠陥深さ位置と測定精度の関係について調べた。その結果、開口寸法を大きくする

ことにより、相対的に深い位置にある欠陥の寸法測定精度が向上することを確認した。

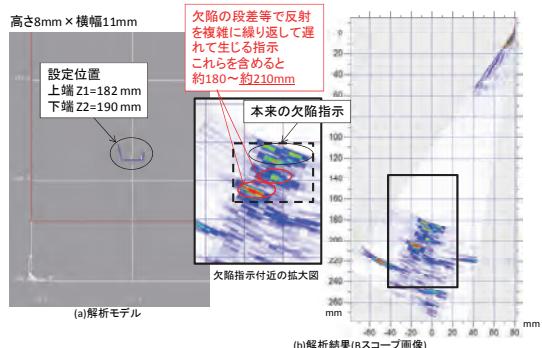


図-7 L字型の欠陥を対象とした解析結果

(6) 材料劣化に関する検討

材料劣化により強度が大きく低下する場合には、閉じ込め期間に達する前にオーバーパックが破損する可能性がある。

オーバーパックの材料強度を低下させる可能性のある材料劣化事象⁵⁾を表-2に整理した。また、原子力発電所で経年劣化管理が必要な事象⁶⁾のうち、材料強度に関係する項目を併せて示した。表-2の中で、疲労やき裂発生・成長については、国内最大級の地震を想定したオーバーパックの応力解析から、定置後のオーバーパックには地震動による大きな応力変化は生じないという結果⁷⁾が得られているため、疲労やき裂発生・成長は生じないと考えられる。そのため、中性子照射及び水素吸収による脆化が、オーバーパックの材料強度に影響を及ぼす要因と考えられる。

中性子による照射脆化は、軽水炉の圧力容器鋼などを対象として予測式が提案されている⁸⁾。しかし、オーバーパックのような低照射速度、低温度の照射条件は、その予測式の適用範囲外である。また、高照射速度に比べて低照射速度の照射では、同じ累積線量でも脆化量が大きくなることが報告されている⁹⁾。低照射速度、長期間の照射損傷は、時間的な制約により実験的に調べることが難しいため、解析などにより損傷量を予測する必要がある。そして、解析で求めた損傷量と材料試験で得られるマクロな材料強度の変化を関連付け、閉じ込め期間終了時点の破壊靭性値の低下量を推定する必要がある。

そのため、最新の燃焼計算コード(Origen2.2-upj、MCNP-5)および核データライブラリ(JENDL4.0、ENDF/B-VI)を用いて、ガラス

固化体からのオーバーパックの照射速度およびはじき出し数を算出した(表-3)。また、はじき出し数から損傷量を予測するための解析モデルの概念検討を実施した。オーバーパックの脆化量を予測するためには、照射により形成される欠陥集合体の核生成過程、照射条件の依存性及び水素の影響を考慮する必要があることを示した。

表-2 材料劣化事象

オーバーパックで想定される材料劣化事象 ⁵⁾	原子力発電所における経年劣化事象(抜粋) ⁶⁾
き裂発生・成長	低サイクル疲労
中性子照射脆化	中性子照射脆化
水素脆化	高サイクル熱疲労

表-3 照射速度とはじき出し数

	中性子線	γ 線
照射速度 [n/cm ² s] (ガラス固化体製造後 50 年)	4.41×10^4	3.01×10^{10}
はじき出し数 [dpa] (処分後 1000 年間の累計)	1.79×10^{-7}	1.97×10^{-5}

- 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 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 平成 19 年度～平成 24 年度の取りまとめ報告書、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 26 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書(第 1 分冊)－人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック、2015
 - 3) 核燃料サイクル開発機構、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次とりまとめ－、1999
 - 4) 例えば、西田、溶接構造物の疲労破壊と疲労強度因子(1)、溶接学会誌、Vol. 62、No. 8、pp. 595–598、1993
 - 5) 三菱重工業株式会社、オーバーパックの構造健全性に関する研究(核燃料サイクル開発機構研究委託内容報告書)、JNC TJ8400 99-050、1999
 - 6) (社)日本原子力学会、日本原子力学会標準 原子力発電所の高経年化対策実施基準：2011(追補 2)、AESJ-SC-P005:2011、2011
 - 7) 山本陽一、鈴木覚、安保英範、藤原啓司：地震動による人工バリアへの影響、原子力バックエンド研究、Vol. 21、No. 2、pp. 101–104、2014
 - 8) (社)日本電気協会、原子炉構造材の監視試験方法、JEAC 4201-2007[2013 年追補版]
 - 9) Y. Nagai et. al., “Kinetics of irradiation-induced Cu precipitation in nuclear reactor pressure vessel steels”, APPLIED PHYSICS LETTERS, Vol. 87, 261920, 2005
- 注 1) 地下施設を利用したオーバーパック・緩衝材の施工品質の確証に関する研究、(2014 年 4 月)
- 注 2) オーバーパック溶接部の耐食性に関する研究、(2014 年 4 月)

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

1-2 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材

◇事業の概要

本事業は、ベントナイト系緩衝材の品質を確保した施工技術、再冠水後の緩衝材の健全性が維持されていることを評価する手法を構築し、緩衝材の流出などに対する工学的対策を提示することを目的としている。平成21年度から継続して研究開発を実施しており、緩衝材の製作・施工技術について小規模試験から実規模試験に至る各種の試験を通じて実現性を示す一方、緩衝材の初期の密度差は膨潤しても均質化せず密度差が残ることや、隙間を有する緩衝材施工において湧水量によってはパイピングが発生し、ベントナイトが流出することを示した¹⁾。

平成26年度は、緩衝材の密度の均質化、浸潤速度、膨潤挙動、化学変質に関する長期試験のデータを継続して取得するとともに、岩盤の割れ目等の緩衝材流出挙動への影響を調べるために、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 帆延深地層研究センター（以下、帆延URL）の地下施設での試験を実施した。また、流出に対する工学的対策として、緩衝材を予め膨潤させる施工方法や、処分孔に不陸を設けるなどの検討を行った。

本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである²⁾。

◇平成 26 年度の成果

(1) 再冠水による緩衝材密度の均質化

平成 21 年度から、緩衝材の再冠水過程におけるベントナイトの膨潤挙動によって密度が均質化されるかどうかを確認するため、密度の異なる緩衝材を用いて試験を実施している。

供試体はクニゲル V1 とケイ砂（3 号と 5 号を等量混合）を 7:3 の割合で混合して用い、乾燥密度は均質になった場合に 1.6 Mg/m^3 となる 2 つの密度の組み合わせで作製した。乾燥密度の組合せは、 $1.5/1.7 \text{ Mg/m}^3$ 、 $1.2/2.0 \text{ Mg/m}^3$ 、 $1.4/1.8 \text{ Mg/m}^3$ の 3 種である。通水液は蒸留水及び海水相当の塩水環境を模擬するために 0.5M NaCl 水溶液を用いた。乾燥密度の異なる供試体を接触させずに、双方の膨潤圧のみを作用させるようにした試験装

置を用いて供試体に通水することにより、密度の時間変化を測定した。

乾燥密度の経時変化（図-1）に示すように、乾燥密度は初期には均質化する方向に変化したが、その後の変化量は小さく、時間の経過とともにその動きは緩慢になった。わずかながら均質化する方向に動いているものの、密度の変化量は小さくなっています。試験前の乾燥密度が 1.2 Mg/m^3 と 2.0 Mg/m^3 の組み合わせで蒸留水を用いた試験では、双方の密度は現在までに 1.45 Mg/m^3 と 1.69 Mg/m^3 になっている。今後膨潤圧が釣り合った状態に達すれば、密度差が残留する可能性がある。また、NaCl 水溶液を通水している試験では、密度は 1.30 Mg/m^3 と 1.84 Mg/m^3 であり、蒸留水での試験より残留密度差は大きいという結果が得られた。

再冠水により密度が均質にならずに密度差が残留するすれば、施工時に許容される密度の幅を把握する必要がある。緩衝材の性能は透水係数で評価されるため、密度から透水係数を得る方法として Kozeny-Carman 則³⁾を適用し、フィッティングカーブを用いて透水係数の算出を試みた。図-2 にその例を示す。図より均質化後の透水係数は、蒸留水では、 10^{-13} m/s オーダーであり、NaCl 水溶液では、 10^{-11} m/s から 10^{-12} m/s 程度であった。仮に、緩衝材に要求される透水係数が $5 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ 以下であるとするとき、地下水が 0.5M 程度の海水系地下水の場合には、再冠水後の密度は 1.63 Mg/m^3 以上でなければならない。このように、ベントナイト乾燥密度と透水係数の関係を用いることで、緩衝材の施工の仕様を、再冠水後の緩衝材の性能を考慮して決定することが可能となる。

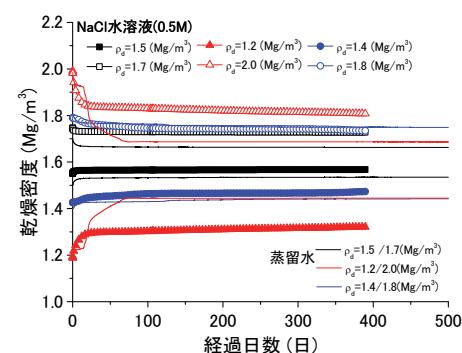


図-1 膨潤に伴う乾燥密度の経時変化

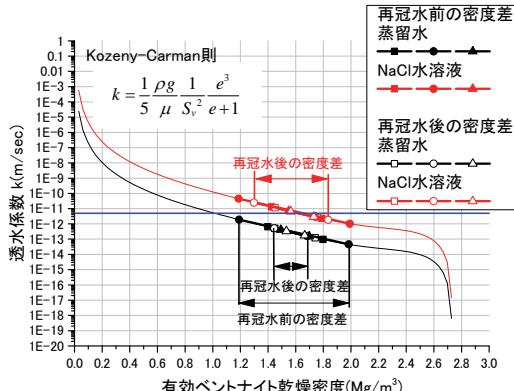


図-2 ベントナイト乾燥密度と透水係数の関係

(2) 緩衝材中の溶液の浸潤速度

本試験は、平成21年度より継続して実施しており、水が浸潤する場合の不飽和領域と飽和領域の境界（浸潤フロント）の移動速度を測定し、これを解析等に反映することにより、再冠水の進行を推定し、人工バリアの長期的な健全性の評価に資することを目的としている。

試験では、蒸留水と0.5M NaCl水溶液を通水した時の緩衝材中の比抵抗値を計測することにより、緩衝材中の飽和度の変化を調べることができる。予備試験により、比抵抗値とベントナイトの飽和度の関係をあらかじめ取得し、比抵抗値から飽和度を算定した。飽和度が95%に達した位置を浸潤フロントとした場合の浸潤フロントの位置d (mm) と経過時間t (day) の関係を図-3に示す。試験結果は、毛細管現象による水の拡散速度の理論式である Washburn の式⁴⁾で近似した。dとtの関係は、蒸留水では $d = 6(t-590)^{0.5}$ 、NaCl水溶液では $d = 11.5(t-80)^{0.5}$ で表すことができ、供試体上部（浸潤距離 $d=1,000$ mm）まで到達する時間は、蒸留水で約78年、NaCl水溶液で約21年と算出された。NaCl水溶液の場合には液中のイオン濃度が高いことにより、モンモリロナイトが凝集するために毛細管現象に寄与する微小な空隙が減少するため、液相の移動距離が小さくなり、とどまる液量が多くなるため、飽和度は高くなると考えられる。そのため、95%飽和時を浸潤フロントとした場合の速度は、蒸留水に比べてNaCl水溶液の方が速くなつたと考えられる。

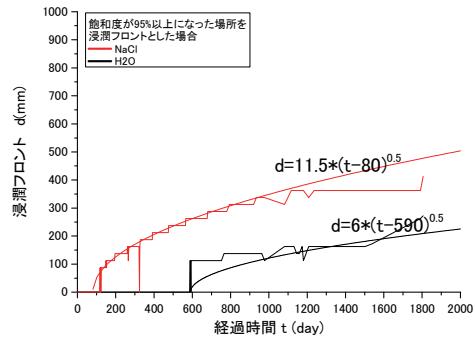


図-3 浸潤フロント (95%) の進展状況

(3) 再冠水時における緩衝材の流出現象

再冠水時の地下水の湧出による緩衝材の流出は、人工バリアの性能を低下させる。そのため、緩衝材の安全機能を確保するためには、流出による性能低下の程度を把握する必要がある。本試験では地下水組成、流量による緩衝材の流出への影響を把握するための試験を行い、さらに流出に対する工学的対策について検討するための試験を実施している。

① 小型セルによる緩衝材流出試験

平成25年度までに、湧水量が大きい場合には、緩衝材に水みちが形成され、ベントナイトの成分が流出することを確認した。また、緩衝材ブロックの施工時の隙間は、通水後の時間の経過とともに膨潤により塞がれるが、最終的には一つの水みちになる傾向が見られた。この流出現象は地下水の組成や流速の影響を受けると考えられるため、本年度は、ベントナイト供試体（クニゲルV1）にイオン強度0.5のCaCl₂水溶液を通水する試験を実施した。これにより、緩衝材の流出に対するCaイオンの影響を調べた。

試験はあらかじめ人工的な複数の水みちを作製した供試体に通水する試験、ベントナイトペレットに通水する試験等、数種類の供試体を用いて行った。あらかじめ水みちを作製した供試体を用いた通水試験（図-4）では、水みちはベントナイトとアクリル容器の界面に発生したが、蒸留水、NaCl水溶液での試験の際に観察されたような水みちが1本に収斂する現象は見られなかった。大小のペレットに通水した試験では、通水後から8日後までは水みちが収斂する様子が確認されたが、16日後には水みちが帶状となつた（図-5）。

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

CaCl_2 水溶液の通水試験では、ベントナイトがCa型化したことにより、膨潤性が低下して水みちをシールしないため、帯状となったと考えられる。

通水液の総流量とベントナイトの流出量の関係を図-6に示す。クニゲルV1の CaCl_2 水溶液を用いた場合の近似直線の勾配は、 NaCl の場合とほぼ同じであった。ただし、 CaCl_2 の方が流出量は多かった。これはCa型化によってベントナイトが塊状になり、沈殿した塊状のベントナイトが目詰まりした後に破過する際に一気に流出したためであると考えられる。



図-4 人工的な水みち作成後（左）、 CaCl_2 水溶液を通水し、水みちが1本に収斂しない状況（右）

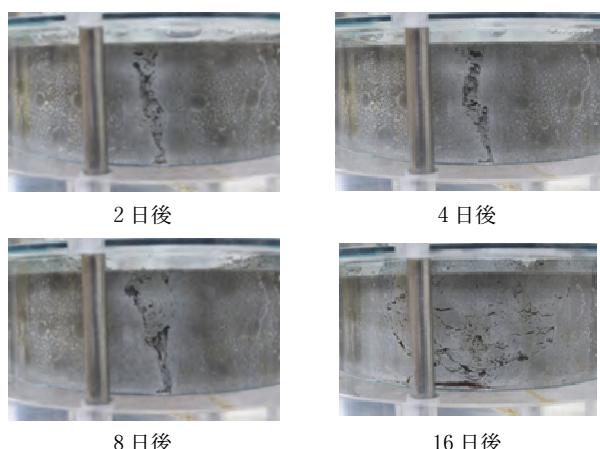


図-5 小大ペレットに0.1L/minで CaCl_2 水溶液を通水した場合の水みちの形成状況

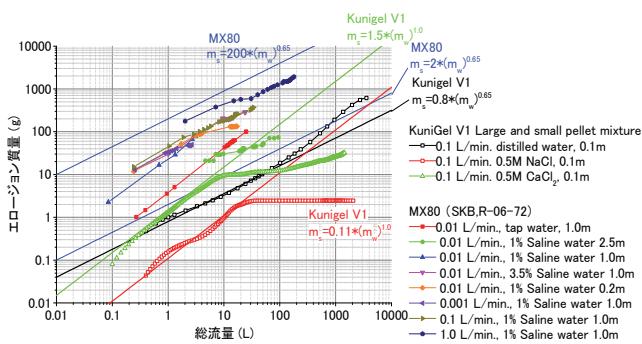


図-6 総流量とベントナイトが流出した質量の関係

②地下水の限界流速の検討

再冠水時における地下水流量の大きさによっては緩衝材の流出量が増大し、緩衝材の性能が維持されなくなる可能性がある。地下水流量と緩衝材流出量の関係を把握し、緩衝材の性能を維持する方策を検討するためには、この関係が、系の大きさ、通水方向、膨潤方向のそれぞれに依存するかどうか、材料に対して一意に決まるか等を確認する必要がある。この流量と流出量の関係が材料特性によるものだとすると、材料特性としての限界流速が存在すると考えられるため、緩衝材に対する地下水の限界流速の確認試験を実施した。使用したベントナイトは(1)と同じである。

緩衝材の定置時に緩衝材側面部から地下水が流出する場合を模擬するために緩衝材を人工的に作った流路の河床部に設置して、様々な流速で通水する試験を行った（図-7）。乾燥密度は1.8 Mg/m^3 と1.6 Mg/m^3 とした。得られた結果から、初期乾燥密度毎に平衡状態の膨潤量と流速の関係を曲線で近似した（図-8）。流速が遅くなるほど、膨潤量の差に対する密度の影響が小さくなつた。これは、流速が遅い方が流出せずに十分にベントナイトが膨潤するためであると考えられる。この近似式で外挿すると、初期乾燥密度1.6 Mg/m^3 の場合が0.40 m/sと算出された。今後、さらに限界流速に関するデータを取得し、流出対策を検討する必要がある。

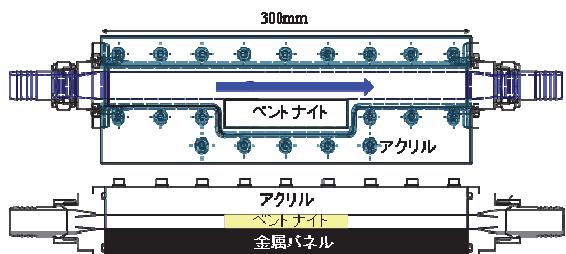


図-7 限界流速確認試験 側面図（上）、平面図（下）

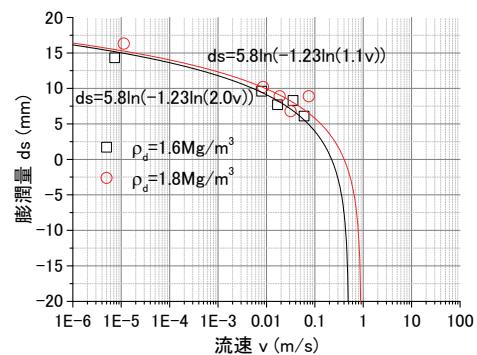


図-8 膨潤量と流速の関係

③工学規模での緩衝材流出試験

小型セルを用いた緩衝材流出試験で、緩衝材とセルの界面に水みちが形成されることが確認された。これを受け、水みちの形成に対する試験体の大きさの影響を把握するため、供試体をスケールアップした試験を行った。試験には、直径 500 mm × 高さ 500 mm の円筒状の緩衝材を用いた。アクリルセルと緩衝材の間には 30 mm の隙間があるため、緩衝材は、膨潤後の平均乾燥密度が 1.6 Mg/m³ 程度になるように作製した。供試体の底面から上面に向かって蒸留水を 0.1 L/min で通水した。

通水後、5 日目および 14 日目における試験状況を図-9 に示す。通水により、緩衝材とセルとの界面に階段状の水みちの形成が観察された。これは、緩衝材の膨潤が一様ではなく、膨潤が早期に発生する場所と遅れて発生する場所が存在し、遅れて膨潤する場所が選択的に水みちとなるためであると考えられる。

また、この試験ケースを対象に、工学的対策の案の一つとして、人工不陸（処分孔内部において人工的に作成する凸部）を取り上げ、その効果を調べた。人工不陸があることによって、先に述べた膨潤が遅れて発生する領域が押しつけられ、水みちの形成を防ぐことが期待できる。図-10 に試験装置の概略図を示す。試験の結果、人工不陸の下側に水みちが形成されても、通水圧の増加により緩衝材を上に押し上げることによって、水みちを塞ぐ効果があることが確認された。



図-9 工学規模試験における水みち形成状況

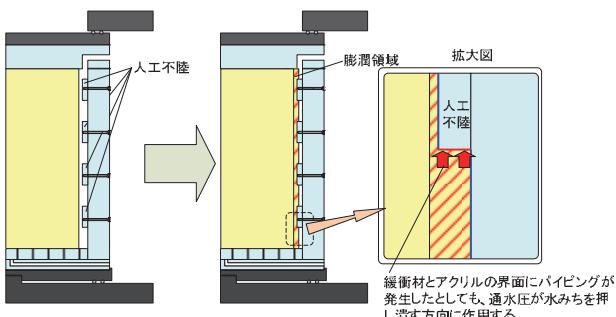


図-10 緩衝材流出対策としての人工不陸

④地下研究施設における緩衝材流出試験

地下環境における緩衝材の流出挙動を調査することを目的として、幌延深地層研究センターの地下 350 m 坑道で緩衝材流出試験を実施した。試験には、高さ 100 mm、乾燥密度 1.6 Mg/m³ の緩衝材ブロックを使用し、それを 6 段積み上げて試験孔に定置した。緩衝材ブロックと試験孔の隙間に直徑 4 mm と 0.3 mm のベントナイトペレットを重量比 1:1 で事前に混合し、自然落下させて充填した。

緩衝材を定置した後、地下水が浸潤することによりベントナイトペレットが膨潤し、緩衝材ブロックと処分孔の隙間が閉塞されることが確認された。しかし、水みちの形成、継続的な緩衝材の流出は観察されなかった。この原因は、試験孔近傍の地下水が試験孔の上部に見られた割れ目を選択的に通過したため、実験室での試験とは異なり、水みちの形成に十分な流量が緩衝材に作用しなかったためであると考えられる。本年度の試験により、地下水環境での緩衝材の膨潤挙動については把握できたため、次年度はこれを踏まえた緩衝材の施工条件を設定し、地下環境での緩衝材の水みちの形成を観察するために十分な流量を確保できるよう、割れ目を塞ぐ等の対策を施した上で、流出挙動について観察を行う予定である。

- 1) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 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 平成 19 年度～平成 24 年度の取りまとめ報告書、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 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 処分システム工学確証技術開発 報告書（第 2 分冊）人工バリア品質／健全性評価手法の構築-緩衝材-、2015
- 3) Ichikawa, Yasuaki, Selvadurai, A.P.S.: Transport Phenomena in Porous Media Aspects of Micro/Macro Behaviour, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 173, 2012
- 4) 小石真純、榑松一彦、ナノテクノロジー時代の含浸技術の基礎と応用、テクノシステム、pp. 79-83, 2007

1-3 モニタリング関連技術の整備

◇事業の概要

本事業では、高レベル放射性廃棄物の地層処分を対象に処分システムの状況等に関わるモニタリングに関する研究と制度的管理の一環である記録保存に関する調査を実施している。モニタリングについては、サイト調査前から閉鎖後の各段階を対象に意義や目的について整理¹⁾した上で、適用可能性のある測定方法を調査し、地層処分モニタリング技術メニュー（以下、技術メニュー）として整備している。一方、記録保存については、地層処分における記録の長期保存に係る要件、課題、方策等の整理²⁾、最新動向の調査を実施している。

平成 26 年度は、平成 25 年度に立案した 5 年間の研究計画の 2 年目として、モニタリングの枠組みと技術的側面に関する検討、記録保存に関する調査及び技術メニューの整備を実施した³⁾。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

◇平成 26 年度の成果

(1) 地層処分モニタリングの枠組みに関する検討

本検討では、地層処分における各種のモニタリングについて分類し、特に処分場操業期間中に実施される閉鎖後の安全性に関するモニタリング（性能確認モニタリング）について検討を実施している。また、平成 26 年度はこれに加え、操業時の安全性に関するモニタリング及び廃棄体（オーバーパック）の回収可能性に関わるモニタリングについて検討を行った。

性能確認モニタリングは、人工バリアの長期健全性に影響を与える外部因子の確認等が含まれ、1-1 のオーバーパックに関する検討及び 1-2 の緩衝材に関する検討における、長期健全性に関する指標と関連するものである。性能確認モニタリングの具体的なパラメータの候補の検討においては、モニタリングの実施が考えられる処分場の操業期間内においてバリア性能に影響を与える事象として、緩衝材と坑道埋め戻し材の再冠水過程（膨潤過程）に着目した検討を行った。検討においてははじめに緩衝材と坑道

埋め戻し材の安全機能、技術要件に影響する FEP (Features, Events and Processes) について、「第 2 次取りまとめ」⁴⁾の FEP と、SKB(2010)⁵⁾において再冠水過程（不飽和フェーズ）にて重要とされた FEP の対比により選定した。次にこれらの FEP に対応するモニタリングパラメータを、既往の技術でモニタリングできること（技術的実現性）を考慮して抽出した。この結果、モニタリングパラメータは緩衝材について全圧、間隙水圧、含水比、温度、変位、排水中の緩衝材量及びコロイド量、坑道埋め戻し材について全圧、間隙水圧、含水比に限定された。

このように、人工バリア内でのモニタリングでは技術的制約により、得られる情報が限定される。このため、幅広い情報を基に人工バリアの性能を確認することを目的とし、人工バリアの性能に影響を与えるニアフィールドの事象をモニタリングし、人工バリアの性能について間接的に情報を得る方法について検討を行った。

ニアフィールドのモニタリングによる人工バリア性能の確認に関する検討では、ニアフィールドの各 FEP の重要性を評価している Posiva(2012)⁶⁾を参照して FEP 内容を整理することで人工バリア性能に影響を与える要因（熱、水理、岩盤力学、化学）を特定し、これらに関連する約 30 種類のモニタリングパラメータの候補を抽出した。なお、坑道での施工が予測されるセメント系材料による影響等については、「TRU 第 2 次取りまとめ」⁷⁾も参照した。次に、国内外の地下研究所での計測、モニタリングの実績等を勘案し、技術的実現性よりパラメータへの絞り込みを行った。ニアフィールドのモニタリングにおいては坑道の埋め戻し前と後で状況が異なるが、埋め戻し前で、モニタリング箇所にアクセス可能な状態では、現場でのセンサによる測定と、サンプリングと室内測定を組み合わせることで、ほぼ全てのモニタリングパラメータの候補がモニタリング可能と推定された。さらに、センサ類で直接計測可能なパラメータのモニタリングシステムについて、技術メニューや、性能確認モニタリングに関する国際共同研究 MoDeRn (Monitoring Developments for Safe Repository Operation and Staged Closure) プロジェクトに参画して地層処分におけるモニタリング技術を取りまとめた報告書⁸⁾（以下、

MoDeRn 技術報告書)に基づいて検討した。最後に、モニタリング結果の反映として、オーバーパック、緩衝材及び埋め戻し材・止水プラグの技術要件⁹⁾ごとのニアフィールドでのモニタリングによる確認項目を示した。これにより、人工バリアの性能確認に果たすニアフィールドのモニタリングの役割を示すことができた。

地層処分場の操業時には、労働安全や放射線安全等の作業員の安全性に関するモニタリングが実施される。本年度は、作業時の安全に関する異常状態や事故等の項目を抽出し、これらの項目に関連するモニタリングに適用可能な技術について、技術メニューや MoDeRn 技術報告書⁸⁾等を対象に調査を行い、計測、モニタリングするパラメータとその方式の例を整理した。その結果、これらのモニタリングは基本的に坑道埋め戻し前のアクセス可能な状態、機器の交換が可能な状態で実施されるものであることから、既存技術にて可能とされた。

廃棄体の回収可能性に関連したモニタリングについては、「回収を実施する際の安全性」及び「一部の廃棄体を回収した際に回収行為が他の廃棄体のバリア性能に与える影響」という観点から検討を実施した。検討対象を処分孔堅置き方式として、処分坑道端部のプラグまでが施工された状態を初期条件とした。廃棄体の回収時には、作業が進むにつれ、プラグ、坑道埋め戻し材、緩衝材が順に除去され、最終的に廃棄体が回収されることを想定した。次に、これらの作業の段階ごとに、坑道やニアフィールド、人工バリアの状態について、力学的影響、水理的影響、化学的影響、熱的影響による変化を整理し、これらの状態変化に関するモニタリングパラメータの候補を抽出した。これらのパラメータは、現場でのセンサによる測定と、サンプリングと室内測定の組み合わせによりモニタリングされるものと想定できた。

(2) 地層処分モニタリングの技術的側面の検討

本検討では先ず、MoDeRn 技術報告書⁸⁾を基にモニタリング技術の現状について、パラメータごとに、現地でのセンサによるモニタリングと、サンプリングと室内分析によるモニタリングに分けて再整理を行い、(1)の検討に反映した。

次にモニタリング実施上の技術的制約事項で

あるモニタリング機器の設置による水みちの形成を制限し得る、地中無線モニタリング技術の開発を昨年度に引き続き実施した。地中無線モニタリング技術を用いることにより、坑道が埋め戻された後も、人工バリアやニアフィールドの状態を把握することが可能となる。

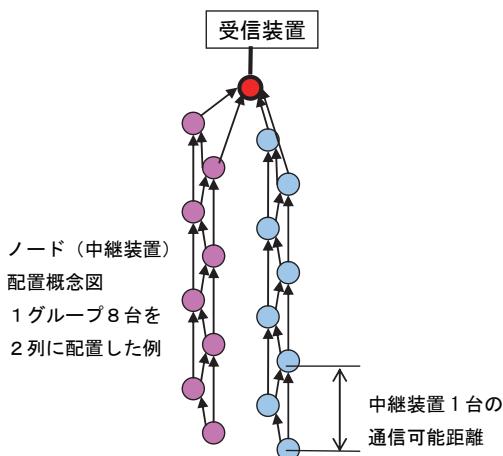
地中無線モニタリング技術の開発に於いては、昨年度抽出した課題を踏まえ、中継システムの多段化の検討、モニタリング装置への長期給電技術に関する検討を実施した。さらに、日本原子力研究開発機構との共同研究として幌延深地層研究センターにおける人工バリア性能確認試験及び瑞浪超深地層研究所における再冠水試験への適用、フランス・ANDRA(放射性廃棄物管理機関)との共同研究として緩衝材膨潤挙動の長期モニタリング、長距離通信試験のための機器製作及びワークショップの開催を実施した。

地中無線中継装置については平成 25 年度までに 1 段の中継のための装置開発と中継通信試験を実施し、通信の成立を確認した。しかしながら地層処分場でのモニタリングへの適用のためには、内部電源での運用と複数段、複数経路での中継等の課題が残されている。地中無線中継装置を地層処分場でのモニタリングに適用する場合、中継装置は坑道埋め戻し材中に設置されるものと予測される。この場合、内部電源での運用が不可欠であるが、これは同時に通信距離の制限を伴うため、中継の多段化が必要となる。また、中継を多段化することで、地層処分施設が段階的に埋め戻され、複数のプラグをまたいでモニタリングデータを送る必要性が生じた場合にも対応可能となる。これに加え、中継の経路を複数設けることにより、一部の中継装置が故障した場合にもモニタリングデータの受信が可能となる(図-1)。本年度は中継の多段化、複数経路化において課題となる、電力消費の低減方法や送受信に用いる時計の同期方法を検討し、基本的な技術的実現性を示した。

地中無線装置を用いた長期モニタリングに必要な電力供給技術については、昨年度の文献調査結果を基に、電磁波による給電技術及び放射性同位体熱電気変換器(以下、RTG)による給電を有力な候補として選定し、これらの技術について検討を行った。なお、現在の地中無線送信装置の電源であるリチウム系一次電池での

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

運用可能期間は約 10 年間である。



電磁波による電力伝送については、緩衝材中に設置された地中無線モニタリング装置への電力供給を想定し、電力供給に優位な手法として磁界共振結合方式を選定するとともに最適な周波数を選定した。その後、緩衝材を媒体とした電力伝送試験を実施し、電力供給が基本的に可能であることを示した。

RTG については、処分坑道に設置した地中無線モニタリング装置の電源として、人工衛星用の既存の RTG を適用した場合を想定し、熱伝搬及び電磁波伝搬に関する解析を実施した。その結果、発電に必要な RTG 内部と設置環境の温度差を確保したうえで、坑道埋め戻し材と無線モニタリング装置に有意な熱影響を与えない発電条件に関する知見を得た。また、金属材料を多用する RTG が地中無線モニタリング装置による通信に有意な影響を与えないための、RTG と無線モニタリング装置間の距離に関する知見を得た。

これらの技術開発に加え、地中無線モニタリング装置の適用性の実証として、日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センターにおける人工バリア性能確認試験の緩衝材及び坑道埋め戻し材中に小型地中無線送信装置を設置し(図-2)、土圧及び間隙水圧のモニタリングを開始した。また、瑞浪超深地層研究所における坑道冠水試験での水圧モニタリングのための装置の設置を行った。

さらに、フランス・ANDRA との共同研究として

緩衝材膨潤挙動の長期モニタリングを継続するとともに、長距離通信試験のための機器製作を実施した。長距離通信試験は平成 27 年度に ANDRA により実施される計画である。また、地中無線モニタリングに関するワークショップを開催し、成果の普及と今後の開発課題に関する検討を行った。



図-2 人工バリア性能確認試験における模擬処分孔中の緩衝材ブロックへの小型地中無線送信装置の設置状況 (左下 : 土圧計、左上及び右上 : 間隙水圧計)

(3) 記録保存に関する調査及び技術メニューの整備

本調査の目的は、高レベル放射性廃棄物の地層処分における記録保存について、その目的、具体的方策及び技術的可能性を検討し、国及び関連機関等が記録保存計画を策定する際の判断材料を整備することである。平成 26 年度は、記録保存に関する技術的進展に関する調査を実施するとともに、平成 25 年度に引き続き OECD/NEA の記録保存に関するプロジェクト (RK&M (Records, Knowledge and Memory : 記録、知識、記憶) プロジェクト) について主要報告書を調査した。また、記録保存に関する既往の調査結果を、モニタリング技術に関する調査結果と同様に技術メニューに収録した。

記録保存に関する技術的進展として、平成 26 年に開発された石英ガラスにブルーレイディスク並みの容量のデータを記録する技術¹⁰⁾について調査し、地層処分への適用可能性については、既往の類似技術¹¹⁾と同様に読み取り装置の維持管理に課題を持つことを示した。

OECD/NEA の RK&M プロジェクトに関し、調査を行った文献は以下のとおりである。

- ・「地層処分場のモニタリング」¹²⁾
- ・「マーカーに関する文献整理」¹³⁾
- ・「津波石碑の考察」¹⁴⁾
- ・「記録の喪失に関する検討」¹⁵⁾

これらの主要報告書のうち「地層処分場のモニタリング」¹²⁾は、地層処分場のモニタリングと「記録、知識、記憶」との関連について検討している。報告書の結論として、地元ステークホルダが、施設におけるモニタリングと「記録、知識、記憶」の保存に関心を持っており、共通理解を実現すべきこと、様々な国々において地元自治体が放射性廃棄物管理プログラムの様々な段階への関与を深めるに伴い「記録、知識、記憶」の保存への関心が高まる傾向にあることが述べられている。さらに、モニタリングと「記録、知識、記憶」の保存を包含する概念的枠組みとして「監視（oversight）」を挙げた上で、監視の組織化や推移に関する決定に関するステークホルダとの議論の必要性を述べている。

「マーカーに関する文献整理」¹³⁾では、処分場への侵入に関する動機の分析等を行い、マーカー単独での処分場への侵入阻止は困難であるとの結論に達している。また、「津波石碑の考察」¹⁴⁾では、日本の津波に関する石碑をマーカーのアナログとして検討し、石碑の寿命（最長で千年）は、類似の時間スケールにわたるマーカーの残存可能性を例証していること、目に見えるマーカーは記憶の保持に寄与するが、警戒機能が失われた歴史的物体になる可能性があることを述べている。

「記録の喪失に関する検討」¹⁵⁾では、埋立地、有害廃棄物の工業用地、処分サイトの事例を対象に情報の喪失に係る調査・整理を行い、喪失要因の特定を行っている。

上記のOECD/NEAの報告書¹²⁾に示されるように、記録保存はモニタリングとの関連を有する。本年度はこのような事項を勘案し、既往の記録保存に関する調査結果を技術メニューに収録した。収録内容は以下のとおりである。

- ・長期的な記録の保存事例
- ・保存時期の設定
- ・保存技術の選定
- ・記録区分（階層）の設定
- ・背景情報の抽出
- ・記録の分散・配置の方法

- ・永続的な記録保管庫や媒体の設置
- ・媒体等の耐久性
- ・媒体等の配置の方法
- ・情報の階層化
- ・情報の表示形式（文字・図・シンボル）
- ・記録保存の方策（記録保存システムの導出経緯等）

- 1) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、地層処分にかかるモニタリングの研究－位置付け及び技術的可能性－、RWMC-TRJ-04003、2004
- 2) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、地層処分にかかる記録保存の研究－位置付け・方策・技術的可能性－、RWMC-TRJ 08001、2009
- 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26年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書（第3分冊）－モニタリング関連技術の整備－、2015
- 4) 核燃料サイクル開発機構、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ、1999
- 5) SKB. FEP report for the safety assessment SR-Site, TR-10-45, 2010
- 6) Posiva, Monitoring at Olkiluoto-a Programme for the Period Before Repository Operation, 2012-01, 2012
- 7) 電気事業連合会／核燃料サイクル開発機構、TRU廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ－ JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005
- 8) MoDeRn, State of Art Report on Monitoring Technology, <http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/>, 2013
- 9) 原子力発電環境整備機構 (NUMO)、処分場の安全機能と技術要件、NUMO-TR-10-11, 2011
- 10) 株式会社日立製作所、石英ガラスの内部にブルーレイディスクTM並みの記録密度でデジタルデータの記録・再生に成功、<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2014/10/1020a.pdf>、2014
- 11) 株式会社日立製作所、石英ガラスの内部にCD並み容量のデジタルデータを記録・再生する技術を開発、<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2012/09/0924.pdf>、2012
- 12) OECD/NEA, Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) across Generations: Monitoring of Geological Disposal Facilities: Technical and Social Aspects, <http://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2014/rwm-r2014-2.pdf>, 2014
- 13) OECD/NEA, Literature Survey on Markers and Memory Preservation for Deep Geological Repositories, Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations (RK&M), <https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2013/rwm-r2013-5.pdf>, 2013
- 14) OECD/NEA, Markers - Reflections on Intergenerational Warnings in the Form of Japanese Tsunami Stones, Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations, <https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2014/rwm-r2014-4.pdf>, 2014
- 15) OECD/NEA, Loss of Information, Records, Knowledge and Memory - Key Factors in the History of Conventional Waste Disposal, Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations, <https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2014/rwm-r2014-3.pdf>, 2014

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

1-4 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発

◇事業の概要

本事業は、地層処分システムに関わる巨大地震、津波等の対策技術を開発し、大規模な自然災害に対する処分システムの安全性確保に資することを目的とする。平成24年度においては、巨大地震・津波に代表される大規模な自然災害を原因とするリスク事象及びその影響を想定し、リスク低減に向かた7つの技術開発課題を抽出した¹⁾。抽出した技術開発課題から優先度が高いと考えた「施設計画技術」、「人工バリアの限界性能等の調査・試験」に対して工学的視点で検討を行い、対策技術に関わる技術調査や適用性確認試験等を平成25年度～平成29年度に実施するものである。

平成25年度における「施設計画技術」の検討では、災害による火災に着目し、簡易モデルによる火災解析、避難シミュレーションを実施し、評価手法の適用性を検討した。「人工バリアの限界性能等の調査・試験」では、地上施設で火災が発生した場合の人工バリアへの影響（温度、塑性ひずみなど）について解析を行った。解析において必要となる高温時の緩衝材の熱特性データについて実験により取得した。一方、津波に伴う海水によるステンレスの腐食については、既存文献の調査を実施した²⁾。

平成26年度においては、平成25年度の成果を踏まえ、操業安全を考慮した技術要件の調査・検討、火災事象に対する安全確保対策の検討及び人工バリアの限界性能等の調査・試験を実施した³⁾。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

◇平成26年度の成果

(1) 操業安全を考慮した技術要件の調査・検討

1) 操業期間中の安全確保と技術要件

実施主体である原子力発電環境整備機構(NUO)の操業期間中の安全確保の考え方⁴⁾を踏まえた上で、放射線安全と一般労働安全の確保に向けた安全対策の対象となる技術要件を整理した。

2) 放射線安全の確保に向けた対策の動向

技術要件の整理を受け、第二種廃棄物埋設施設設や地層処分施設と同様にガラス固化体を扱う施設である再処理施設の関係法令とともに最新の情報として福島第一原子力発電所の事故以降に施行された再処理施設、第二種廃棄物埋設施設の新規制基準における放射線安全に関する考え方について整理した。

3) 一般労働安全の確保に向けた安全対策の検討

操業期間中の地層処分施設における一般労働安全の確保に関する技術要件に対して過年度までに整理した技術開発課題との関連を整理した。

さらに、一般労働安全に係る安全確保の検討にあたり、平常時、災害発生時それぞれの対応の流れを把握するが必要である。図-1に火災発生を想定した安全を確保の流れを示す。

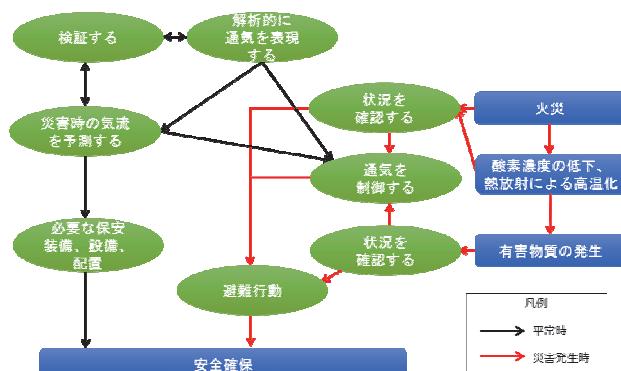


図-1 火災発生時の安全確保の流れ

また、東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波による甚大な被害発生を契機に、原子力発電所を抱える自治体において原子力災害に伴う公衆安全に係る防災計画が策定されつつある。このことから、一般労働安全の確保に資する情報として原子力防災に関する法令等を整理するとともに、原子力災害特有の対策や事業者から行政に対する対応と初期対応段階における緊急防護措置について調査・整理を行った。

4) 安全対策技術の考え方と評価方法に対する考察

地層処分システムの空間的なスケール(処分場、坑道、人工バリアなど)ごとに安全対策の考え方を整理した。さらに、安全対策技術を選択する際に必要となる評価方法について、一般的な施設における安全性の捉え方を踏まえ、客観的に判断する方法について整理するとともに、自然災害に対

する影響を確認する方法の一つとしてシミュレーションの活用及び必要性を提示した。さらに、国内での地層処分施設建設の実施事例がなく、予期しない事象が起きることも考えられるため、Plan (計画) → Do (実行) → Check (評価) → Action (改善) の 4 つの段階 (PDCA サイクル手法) を継続的に実施し、施設の安全性を高めていくことが重要である。

(2)火災事象に対する安全確保対策の検討

1)通気解析に関わる数値解析技術の検討

地層処分施設における火災による煙や熱などの流れを検討するにあたっては、通気をより正確に解析することが重要である。そのため、通気解析の根幹となる流体の力学特性である物質の運動を表現する支配方程式や数値解析技術（離散化法）について整理・検討を行った。支配方程式については坑道の総延長が長く、合流部が多いことから、壁面摩擦や粘性を考慮したナビエ・ストークスの式を用いることとした。離散化法については、粗いメッシュでも質量の保存則等が成り立ち易いことを踏まえ、有限体積法を用いることとした。

2)地層処分施設の解析条件の設定

地層処分施設の形状・寸法等については、「第 2 次取りまとめ」⁵⁾を踏まえて設定し、通気解析及び火災影響評価を行うにあたって必要となる風量（風速）、坑内温度、酸素濃度、二酸化炭素濃度の閾値については、労働安全衛生規則、換気技術指針⁶⁾などを参考とした。

また、「第 2 次取りまとめ」では建設中パネル、操業パネル、埋戻しパネルの各パネルには立坑が 2 本以上存在することになっている。その立坑を入気・排気用の坑道とすることにより、パネル毎に独立して通気が確保されると仮定した。通気解析の対象となるパネルについては、掘削中の坑道や作業員の有無を考慮し、風量が多く必要な建設中パネルとした（図-2）。

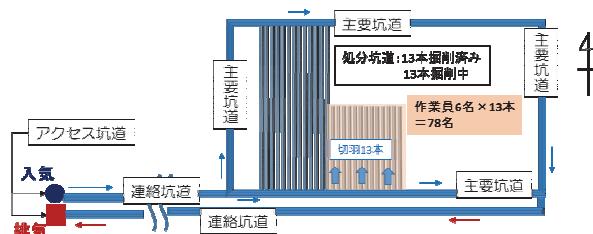


図-2 建設中パネルと作業員の配置イメージ

建設中パネルのモデル化にあたっては、全てを 3 次元モデル化すると膨大な計算格子数となり、計算時間がかかることから、気流の乱れが小さい区間を 1 次元モデル化して併用することにより計算負荷を抑えた。

3)解析の実施

図-3 に示す手順に従い、火災事象に対する検討した。

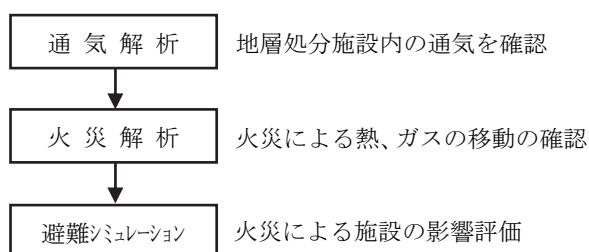


図-3 火災事象における検討の流れ

作業員の安全確保から全ての坑道に通気を確保する条件で通気解析を実施したところ、分岐後の坑道において風量を確保できないことが分かった。そこで、分岐部に局所ファンを設置して通気を強制的に変えることとした。具体的には、掘削中の処分坑道は、局所ファンを設置して通気し、掘削済みの処分坑道はダクト等で繋いで過大な風量にならないように設定して通気解析を行った。

また、切羽付近での火災を想定した解析を実施したところ、比重が軽い一酸化炭素 (CO) は、発火から 120 秒後までは坑道上部で拡散し（図-4）、180 秒後に下部に拡がり、坑道断面全体で拡散する結果となった。また、熱の拡散については、CO の拡散速度より速く、900 秒後でも坑道上部で熱が広がっている結果となった（図-5）。



図-4 処分坑道内における火災解析結果 (CO)



図-5 処分坑道内における火災解析結果 (温度)

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

避難シミュレーションでは、処分坑道に各 6 名の作業員を配置し、門扉などの障害物を想定したところ、図-6 に示すように作業員の避難速度の低下や避難完了の遅れが生じる結果となった。これにより、火災解析を避難シミュレーションと組み合わせる手法により障害物や安全対策の効果に対して定量的に評価（見える化）できることを確認した。

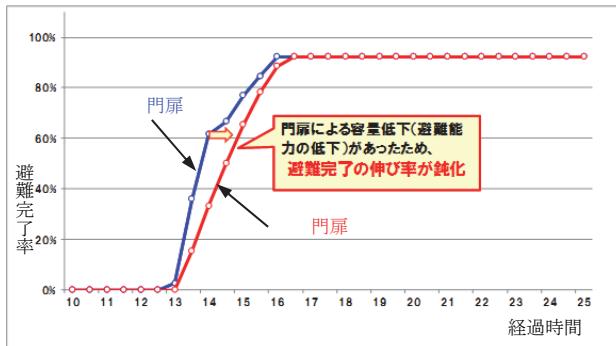


図-6 避難シミュレーションによる解析結果

(3) 人工バリアの限界性能等の調査・試験

1) 人工バリアの熱応力解析による火災影響の検討

昨年度の地上施設での火災解析を踏まえ、地下施設で火災が発生した場合の人工バリアの影響について検討を行った（図-7）。

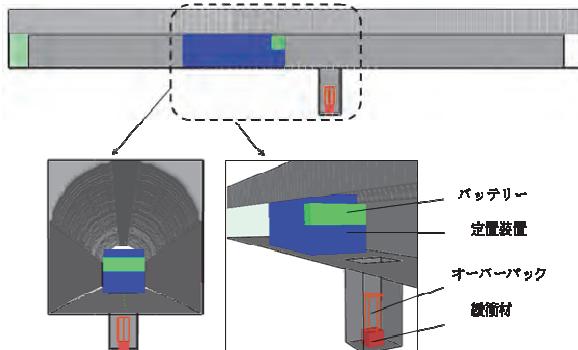


図-7 地下施設における火災影響

検討手順としては、シナリオ設定、火災曲線の解析、伝熱解析、応力解析の順に実施し、人工バリアの応力分布等を求めて検討を行った。

シナリオ設定では、オーバーパック定置直後に搬送・定置装置のバッテリーパックが燃焼すると仮定し、風速 0.5m/s と 2.0m/s に対する発熱曲線を設定した。しかしながら、火災解析結果による発熱量は、風速を高く設定した 2.0m/s の場合でも図-8 に示すように発熱曲線の最大値を 20MW ほど下回る 80MW であった。原因是、昨年度の地上

施設での火災解析でも確認できたように、多量の燃料に対して局所的に酸素が足りず、燃料が燃焼することなく流出したことが考えられる。すなわち、坑道の断面積や風量を抑えることが、火災に対する減災対策になることが分かった。

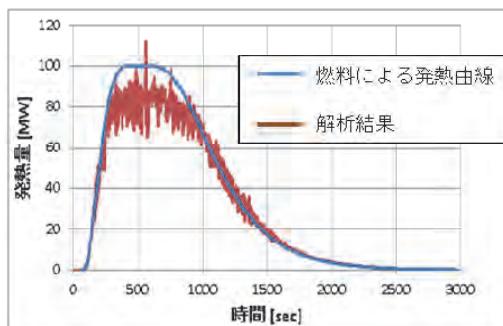


図-8 発熱曲線と火災解析曲線

伝熱解析では、火災によるオーバーパックへの入熱は蓋上面からが主であるため、伝熱解析ではオーバーパック蓋上部の温度上昇が顕著である結果となった。特に、蓋上部において局所的に 1,000°C 超となる部位が見られた。また、1,000°C 超の最高温度到達時におけるオーバーパックの胴部の温度は、上部近傍の領域を除くと 200°C 以下であり、内部のガラスの温度上昇は約 1.5°C にとどまった。

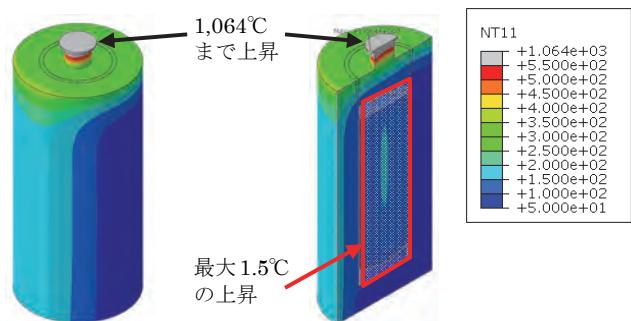


図-9 火災発生後最高温度到達時（1,440 秒後）の温度分布（単位：°C）

応力解析では、温度分布に伴って生じる熱応力の発生が胴部にもみられるが、火災が鎮火して時間が経過するにつれて、蓋部近傍を除いて初期応力分布に近い状態に戻る結果となった。

2) 地上施設で火災発生を想定したガラス固化体キャニスターの特性データの取得

実験で取得した SUS304L の物性値（0.2%耐力、ヤング率、線膨張係数）と平成 25 年度の火災解析

において 600°C 以下の物性値を基に外挿した値とを比較した結果、ヤング率と線膨張係数に大きな差は見られなかった（図-10）。0.2%耐力については、実験で取得した値の方が、外挿した値よりも大きい結果となった。平成 25 年度の解析は、実験で取得した応力より小さい値の降伏条件（安全側）で解析した結果であり、塑性ひずみが小さかったことから、再解析する必要はないと判断した。

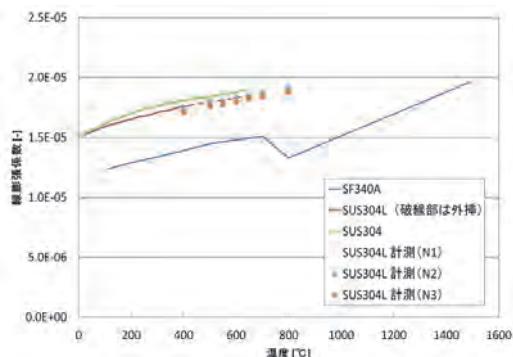


図-10 SUS304L の物性値（線膨張係数）

3) 津波に伴うガラス固化体キャニスターの腐食環境（温度）条件設定に関する整理

平成 25 年度の海水等によるステンレスの腐食に関する文献調査を踏まえ、地層処分施設におけるガラス固化体キャニスター周辺の環境条件について解析、検討を行った。解析に用いたシナリオは、図-11 に示すように地上施設でガラス固化体を仮置き中に津波の被害を受け、ガラス固化体キャニスターの半分の高さまで海水が浸漬したと想定した。

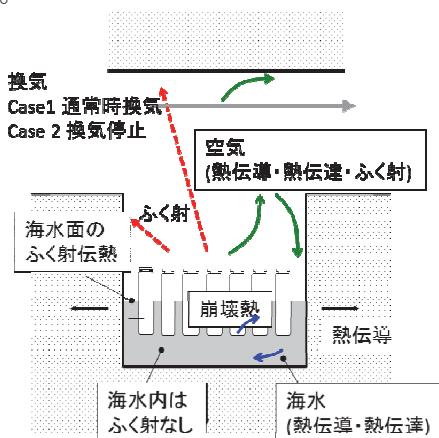


図-11 浸漬後モデルの概念図

解析では、ガラス固化体キャニスター上部で海洋性湿潤大気環境になる一方、崩壊熱によって 25°C

の海水が $50\sim80^{\circ}\text{C}$ 程度まで加熱されるとともに酸化性が強まる可能性と想定した条件でのガラス固化体のキャニスターは、浸漬した約 400 時間後に応力腐食割れ (SCC) の発生が示された。

平成 25 年度、平成 26 年度における火災事象を中心とした解析、検討結果を以下に整理した。

「施設計画技術」の検討では、作業員の安全確保の観点から火災解析と避難シミュレーションを組み合わせることにより安全対策の効果に対して定量的に評価できることを確認した。

通気解析では、分合流部等の複雑な通気をより正確に解析可能な 3 次元解析で実施したところ、分岐部において局所ファンを設置して通気を確保する必要がある。また、火災解析では、作業員の安全確保の観点から換気設備を動かす条件としたが、電源喪失による換気設備の停止時の安全対策についても検討する必要がある。

「人工バリアの限界性能等の調査・試験」では、地上施設、地下施設での火災を想定した人工バリアへの影響評価手法を提示するとともに、解析を実施した。また、解析に必要となる高温時の熱特性・力学的特性データを実験により取得した。解析結果からは、想定以上の酸素が供給されなければ、人工バリアへ大きな影響を与えないことが分かった。今後は、平成 25 年度に作成した 5 力年計画を踏まえ、津波・落盤等の災害による人工バリアへの影響を検討するために必要なデータの取得、整備を図る。

- 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 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、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 25 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（第 4 分冊）自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発、2014
- 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 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 処分システム工学確証技術開発（第 4 分冊）自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発、2015
- 4) 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）、NUMO-TR-11-01、平成 23 年 9 月
- 5) 核燃料サイクル開発機構、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－、平成 11 年 11 月
- 6) 建設業労働災害防止協会、新版・ずい道等建設工事における換気技術指針（換気技術の設計および粉塵等の測定）、平成 24 年 3 月

2. 地層処分回収技術高度化開発

◇事業の概要

高レベル放射性廃棄物地層処分における廃棄体の回収可能性に関して、平成 18 年 9 月に取りまとめられた「放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制制度のあり方について」(総合資源エネルギー調査会原子力安全部会廃棄物安全小委員会) では、基本的に廃棄体を回収するような事態が生ずることはないと考えられるとしながらも、処分場閉鎖までの間は廃棄体の回収可能性を維持することが必要であると記されている。また、平成 24 年 12 月 25 日に原子力委員会が発表した「今後の原子力研究開発の在り方について(見解)」において、回収可能性の合理的な担保のあり方に関する研究開発を継続的に進めることが重要である、と記されている。なお、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」では、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、と記されている。

また、資源エネルギー庁の基盤研究開発では、回収技術の中核技術を塩水を利用した緩衝材除去技術とし、その適用性が検討された¹⁾。

本事業は、地下環境で適用可能な回収装置の開発を表 1 に示すスケジュールに即して、平成 23 年度から実施している。本年度は、事業の最終年度として以下の内容を実施した²⁾。

- (1) 緩衝材除去システムの改良及び総合動作確認
- (2) 地下環境での実証試験計画の見直し
- (3) 処分施設における回収維持期間の検討

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

◇平成 26 年度の成果

(1) 緩衝材除去システムの改良及び総合動作確認

本年度は、事業の最終年度であり、平成 25 年度までに製作した緩衝材除去システムの課題を基にシステム改良後、総合動作確認試験によりシステムの操作性、成立性を確認した。図-1、表-2 に緩衝材除去システムの構成を示す。

表-1 事業の全体スケジュール

	平成 23 年度	平 24 年度	平 25 年度	平 26 年度
実証試験 地下実証試験計画	策定	見直し	見直し	見直し
装置開発 (緩衝材除去システム) 装置開発計画	策定	見直し		まとめ
装置の設計・製作	設計	製作	組立	改良
機能確認試験(地上)			↔	
総合動作確認試験(地上)				↔
回収維持期間の検討			↔	↔

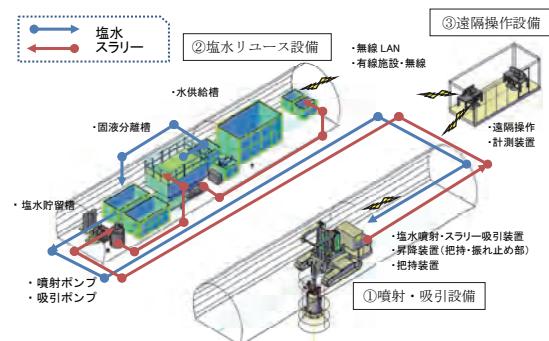


図-1 緩衝材除去システムの構成

表-2 緩衝材除去システムの構成

緩衝材除去システム			
構成設備	噴射・吸引設備	塩水リユース設備	遠隔操作設備
構成装置(機能)	<ul style="list-style-type: none"> ・油圧ユニット ・走行装置 ・昇降装置 ・把持装置 ・塩水噴射・スラリー吸引装置 	<ul style="list-style-type: none"> ・吸引ポンプ ・噴射ポンプ ・一時回収槽 ・固液分離槽 ・成分調整槽 ・水供給槽 ・塩水補給槽 ・塩水貯留槽 ・緊急貯留槽 	<ul style="list-style-type: none"> ・操作制御装置 ・操作監視装置

1) 緩衝材除去システムの改良

平成 25 年度の動作確認の結果、緩衝材除去時の噴射・吸引量のバランスを一時的に維持できなかった。そのため、塩水噴射・スラリー吸引装置の吸引ホースを径 $\phi 50$ 、 $\phi 40$ から径 $\phi 80$ に交換し、ホース材質を補強コード入り耐圧ホースとした。また、ホース径の拡張によるホース巻き取り装置の改良、搖動トルクの改良も併せて実施した。(図-3)

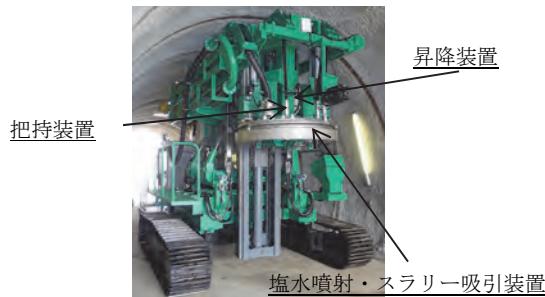


図-3 噴射・吸引設備

2) 緩衝材除去システムの総合動作確認

改良後のシステムの総合動作確認として、①緩衝材除去（緩衝材除去特性）、②塩水リユース設備の稼働（塩水リユース特性）、③遠隔操作によるシステム制御・監視を実施した。

a) 試験方法

地上に第2次取りまとめに示された処分坑道及び処分孔を模擬した施設を準備し、模擬処分孔（内径：2,596mm、深さ：4,556mm）に実物大の緩衝材及び模擬廃棄体を設置し、処分孔堅置き方式による緩衝材除去試験を実施した。

試験は、図-4に示すように廃棄体上部～廃棄体側部までの緩衝材除去を実施した。

b) 試験条件

試験に使用した緩衝材、模擬廃棄体及び緩衝材除去条件を表-2に示す。また、緩衝材と模擬廃棄体の隙間（幅t=20mm）にはペレットを充填（有効ペントナイト密度1.37Mg/m³）した。この状態から緩衝材除去を開始した。

c) 試験結果

試験から得られた知見を以下に示す。試験結果は、改良効果を確認するために平成25年度の緩衝材除去試験結果と比較した。

① 緩衝材除去特性

- 模擬廃棄体周囲の緩衝材（乾燥密度1.6Mg/m³、飽和度60%程度）を除去できることを確認した。（図-5）
- 平成26年度は除去深度による速度低下はなく、噴射・吸引機能の改良効果を確認した。（表-3）
- 模擬廃棄体周囲の緩衝材除去に約77時間を要した。（図-6）

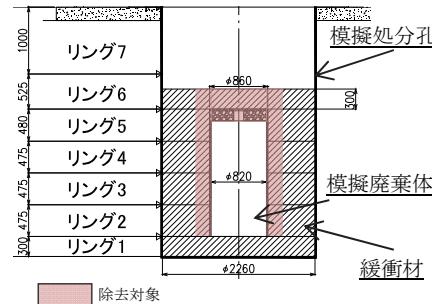


図-4 緩衝材除去対象エリア

表-2 試験条件

項目	試験条件
模擬廃棄体	直径 820mm 高さ 1,730mm 重量 約6.1t
緩衝材	ペントナイト：ケイ砂=7:3 密度 1.6Mg/m ³ 飽和度 60%程度 直径 2,260mm 合計高さ 3,130m
隙間充填 (模擬廃棄体～ 緩衝材)	ペントナイト 100% 密度 1.37Mg/m ³ 形状 20mm級, 4mm級, 1mm級, 0.3mm級
塩水噴射条件	噴射圧力 0.6MPa±0.5% 噴射流量 15m ³ /h ノズル径 φ2.2mm ノズル数 下向き:16ノズル×2環 振動速度 1cm/sec
スラリー吸引条件	吸引流量 15m ³ /h以上 (噴射流量×1.5倍以上)



図-5 緩衝材除去試験状況

表-3 緩衝材除去速度

除去深度 (除去部位)	平均除去速度(mm/h)	
	平成25年度	平成26年度
0～300mm (円盤状緩衝材部位)	22.3	16.2
300～475mm (リング状+上部ペレット)	14.2	17.1
475～1,970mm付近 (リング状+側部ペレット部位)	12.7	22.9

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

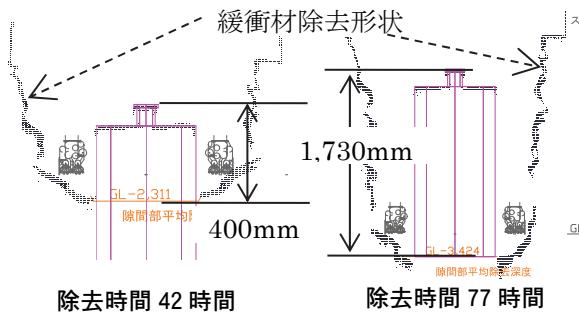


図-6 緩衝材除去形状と除去深度 (3D スキャナデータ)

② 塩水リユース特性

- スラリー吸引流量は塩水噴射流量を上回り、噴射・吸引機能の改良効果を確認した。
- 処理したスラリーの浮遊物質濃度(SS濃度)は平均 298mg/L であり塩水としてリユースするには十分な濃度であった。(図-7)

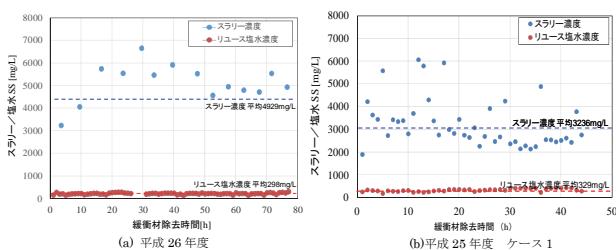


図-7 固液分離設備前後のSS濃度

③ 遠隔操作性

- 固液分離槽のスラリーの固液分離機能、リユースのSS濃度、塩分濃度、pH等性状を遠隔操作設備内で監視できることを確認した。
- 模擬廃棄体の引き上げを実施し、昇降装置の引き上げ能力範囲で引き上げ可能なことを確認した。

以上、上記①、②、③の結果から、遠隔操作(制御・監視)により、実物大の緩衝材を除去し、模擬廃棄体を引き上げることができるシステムを開発した。

3) 異なる特性をもつ緩衝材への緩衝材除去システムの適用性

廃棄体が緩衝材から受ける抵抗力以上の力で廃棄体引き上げを行えば、廃棄体を回収できるので、本事業では、廃棄体引き上げ時に作用する抵抗力の把握を目的とした要素試験を実施した。

廃棄体に作用すると考えられる抵抗力として、

- ① 緩衝材と廃棄体側面間に発生する表面摩擦力
- ② 廃棄体底部に発生する負圧

のうち、①の緩衝材と廃棄体側面間に発生する表面摩擦力を検討した。

表面摩擦力は、(i) 緩衝材と廃棄体の隙間にペレットを充填する施工方式と(ii) 廃棄体定置後に緩衝材と廃棄体の隙間が発生しない施工方式、により異なると考えられる。そこで、要素試験では(i)と(ii)の表面摩擦力を把握するために、以下に示す試験体を用いた引き抜き試験を実施した。

a) 試験方法

引き抜き試験では、上記(i)と(ii)の状態を再現した引き抜き試験用試験体タイプA、試験タイプBを用意した(図-8)。各試験体に使用する材料仕様を表-4に示す。

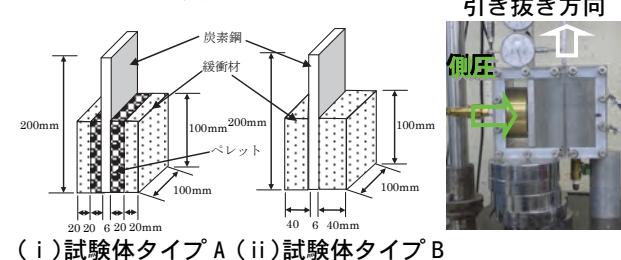


図-8 引き抜き試験の試験体及び試験状況

表-4 試験体に使用する材料仕様

	仕様	備考
ペレット	0.3mm級ペレット、4mm級ペレット	緩衝材除去試験と同等仕様
緩衝材	クニゲルV1 70wt%、ケイ砂3号 15wt%、ケイ砂5号 15wt%	緩衝材除去試験と同等仕様
模擬廃棄体 (炭素鋼)	SFVC1 (JIS G 3202)	

b) 試験条件

各試験の条件を表-5に示す。試験体は、人工バリア定置直後を想定した。各試験体には、0.05、0.15、0.30、0.60MPaの側圧を作成させ、引き抜き時の引き抜き力を計測した。(図-8)

表-5 試験条件

試験条件	試験体タイプ A		試験体タイプ B
	ペレット	緩衝材	緩衝材
乾燥密度	1.37 Mg/m ³	1.60 Mg/m ³	1.60 Mg/m ³
含水比 (飽和度)	5~10% [※] (30~55%)	20~23% (85~90%)	20~23% (85~90%)
試験体に作用させる側圧	0.05、0.15、0.30、0.60 MPa		
引き抜き速度	0.2mm/min		

c) 試験結果

図-9 に各試験体の最大表面摩擦力と側圧の関係を示す。側圧が小さい場合、試験体タイプAが試験体タイプBよりも表面摩擦力が低い値を示した。一方で、側圧が大きくなると表面摩擦力の差は生じなかつた。

以上の結果から、人工バリア定置直後の比較的膨潤圧などの側圧が発生していない状態では、廃棄体と緩衝材の隙間にペレットを充填している方が、廃棄体回収時の引き抜く力が小さく、廃棄体回収に有効と推定された。

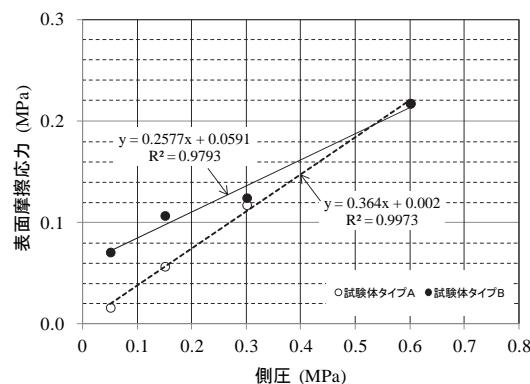


図-9 表面摩擦応力（最大値）と側圧の関係

(2) 地下環境での実証試験計画の見直し

緩衝材除去システムを用いて、地下環境で緩衝材除去試験の実証試験を行うための試験計画の検討として、以下の3項目を実施した。

- ①実証試験に必要な装置、設備の調査・検討
 - ②実証試験に必要な試験坑道の断面、延長の検討
 - ③実証試験に必要な試験坑道の基本設計

本検討では、図-10に示す幌延深地層研究センターの「深度350m調査坑道、試験坑道2（坑道断面 $\phi 4,000\text{mm}$ 、坑道延長25m）」を地下環境と設定し、緩衝材除去試験に必要となる設備、坑道断面等の検討を実施した。



図-10 幌延深地層研究センターの深度 350m 調査坑道⁶⁾

1) 実証試験に必要な設備の調査・検討

前記(1)、(2)で実施した緩衝材除去試験を試験坑道2で実施するために必要なインフラ設備を調査・検討し、必要なインフラ設備を明らかにした。

- ・ 緩衝材除去システムを稼働するためには、深度 350m 調査坑道内に、電気容量 100V 4kw、200V 48kw、400V 22kw の電気設備が必要となる。
 - ・ 試験坑道 2 内の換気設備として送気管 ϕ 200、排気管 ϕ 300 が必要となる。

また、東立坑から試験坑道2へ緩衝材除去システムを運搬する場合、「噴射・吸引設備」を分割運搬する必要がある。

2) 実証試験に必要な試験坑道の断面、延長の検討

緩衝材除去システムの「噴射・吸引設備」、「塩水リユース設備」を試験坑道2内へ配置する検討を実施した。検討の結果、図-11に示すように、緩衝材除去試験の実施のために必要な坑道断面、延長を明らかにした。

- ・ 試験坑道 2 を「第 2 次取りまとめ」の堆積岩系断面へ拡幅する。
 - ・ 噴射・吸引設備、塩水リユース設備を配置するため、既設延長 L=25m に対して、9.5m の掘削延長（新規掘削）を行い、坑道延長を 34m とする。
 - ・ 塩水リユース設備を試験坑道 2 に搬入するため、試験坑道入口部は、両端を 1,500mm 程度拡幅する。
 - ・ 分割運搬した ((2)、1) の検討結果) 噴射・吸引設備を組み立てるため、幅 5,000mm、高さ 6,981mm（インバート上面から天端）、延長 7,490mm の組立エリアを設ける。

3) 実証試験に必要な試験坑道の基本設計

(2)、2) で検討した坑道形状(図-11)について、支保工設計を実施した。支保工設計の検討断面は、最大断面となる噴射・吸引設備の組立エリア(Case1)と最大拡幅断面となる坑道入口(Case2)とした。(図-11)

支保工設計の検討方法として、既存の幌延地下施設の支保設計の考え方を踏襲し、岩盤の応力-ひずみ関係は弾完全塑性モデルを採用し、2次元平面ひずみの条件下において解析を行った。

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

解析により、試験坑道2に必要な支保工の仕様を明らかにした。

- ・組立エリアは、吹付けコンクリートのコンクリート強度を $f'ck=36N/mm^2$ 、厚さを 30cm、鋼製支保工は高規格(HT590) HH-200 とする。
- ・坑道入口は、吹付けコンクリートのコンクリート強度を $f'ck=36N/mm^2$ 、厚さを 20cm、鋼製支保工は高規格支保工 HH-154 とする。

(3) 処分施設における回収維持期間の検討

平成 25 年度より、処分施設を完全に埋め戻さずに、廃棄体を回収するための維持期間について検討を開始した。本年度は、表-7 に示す定置方式とその坑道状態を設定し、以下の 4 項目を実施した。

- ① 処分施設を一定期間埋め戻さない場合に人工バリア性能に及ぼす影響の定量的評価（以下、人工バリア性能に及ぼす影響の定量的評価）
- ② ①の結果を基に処分施設の状態の検討及び回収維持期間の例示（以下、回収維持期間の例示）
- ③ ②の結果に対する処分施設の維持管理方策の検討（以下、処分施設の維持管理方策の検討）
- ④ ①～③の検討結果から残される課題の整理（以下、残される課題の整理）

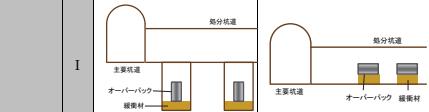
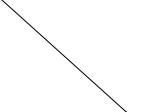
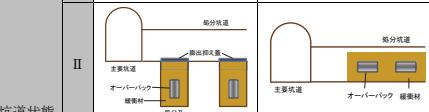
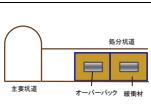
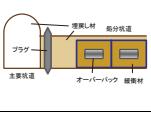
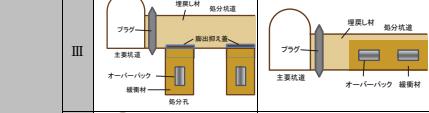
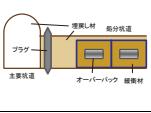
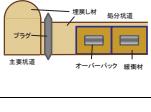
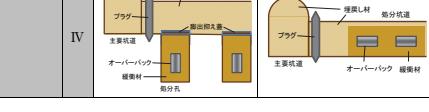
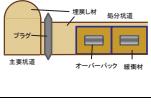
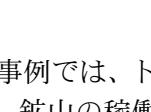
1) 人工バリア性能に及ぼす影響の定量的評価

表-7 に示す坑道状態 I～II に対して、処分坑道内の温度について解析を実施し、廃棄体の発熱による坑道内の温度履歴、最高温度を把握した。また、既往文献の調査により、セメント系材料による地下水への影響等を調査し、地下水の水質（降水系・海水系、pH など）について整理した。

以上の解析、文献調査結果から得られた坑道内

の温度及び地下水水質を用いて、オーバーパックに対する腐食影響、緩衝材の流出量を定量的に評価した。

表-7 検討対象の定置方式及び坑道状態

		処分孔堅置き定置方式	処分孔横置き定置方式	処分孔横置き定置方式 (PEM)
坑道状態	I			
	II			
	III			
	IV			

2) 回収維持期間の例示

我が国におけるトンネル、鉱山の事例では、トンネル供用期間は最大で 70 年程度、鉱山の稼働期間は最大 150 年程度であることから、処分施設を一定期間埋め戻さず人工バリア性能を維持する期間（回収維持期間）の例示として、これらの期間が目安となると考えられる。

3) 処分施設の維持管理方策の検討

処分施設の維持管理方策として、一般的なトンネルの維持管理を例とし、坑道状態 I～III（表-7）の場合に必要な方策を示した。

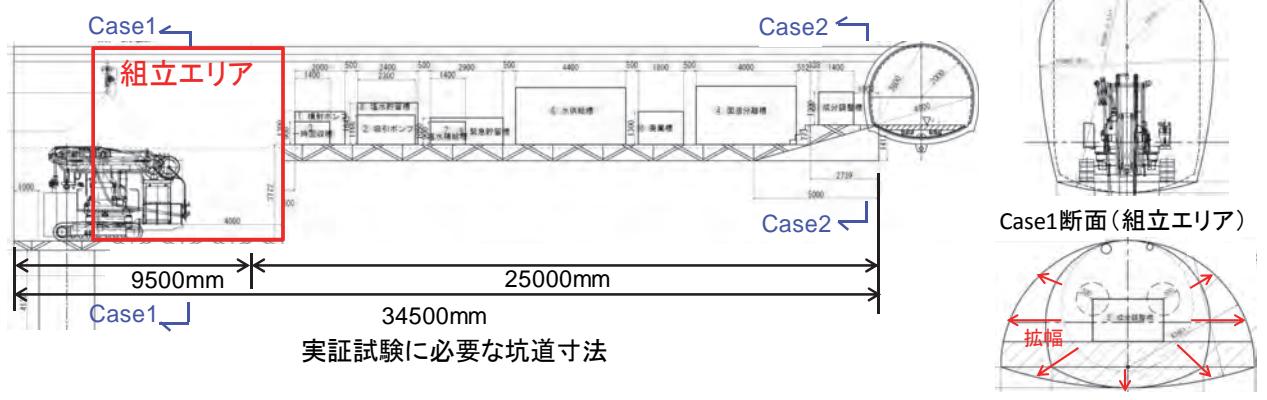


図-11 緩衝材除去試験に必要な坑道断面

- ・人工バリア性能を維持できるようになるまで作業段階を進める（「第2次取りまとめ」の想定する作業段階）。
- ・人工バリア性能を低下させないように坑道環境を維持管理する。特に、坑道を埋め戻さない状態は、湧水対策が必須となる。

4) 残される課題の整理

前記(3)の1)～3)の検討結果から残された課題を以下のとおり整理した。

- ・処分坑道を埋め戻さず維持すると、廃棄体の発熱により緩衝材が高温環境下に曝される。この高温による人工バリア性能の影響を検証するため、緩衝材の高温環境下における長期挙動を含めた特性試験を通して、人工バリア性能への影響を把握する必要がある。
- ・処分孔及び処分坑道を埋め戻さないによる緩衝材の変質やオーバーパックの腐食への影響を検討するためには、坑道の埋戻しを前提とした人工バリアの設計に対する考え方を整理する必要がある。
- ・処分施設の維持管理は、計画、点検(調査)、対策工、記録などを総合して考える必要があり、別途、処分システム工学確証技術開発で検討されているモニタリングなどの成果を合わせた検討が必要である。

- 1) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、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処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第1分冊）遠隔操作技術高度化開発、2012
- 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）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25年度地層処分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、2014
- 4) 核燃料サイクル開発機構、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処理処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－分冊2 地層処分の工学技術、JNC TN1400 99-022、1999
- 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23年度地層処分技術調査等（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、2013
- 6) 花室孝弘、幌延深地層研究計画：平成25年度調査研究成果報告、JAEA-Review 2014-039、2014

3. TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発

◇事業の全体概要

本開発は、再処理工場および混合酸化物燃料の加工施設から発生する放射性廃棄物（TRU 廃棄物）の地層処分における人工バリア材の特性（ベントナイト系緩衝材・セメント系材料における長期にわたる複合的事象の評価）ならびに重要核種の影響（ヨウ素 129 及び炭素 14 による被ばく線量の低減対策）について、特に長期評価の信頼性確保の観点から、これまでに明らかになった課題を解決し、安全評価の信頼性を向上させることを目的としている。

TRU 廃棄物は、図-1 に示すように、使用済燃料の再処理によってガラス固化体（高レベル廃棄物、以下 HLW という）を製造する際に発生する種々の廃棄物であり¹⁾、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²⁾。

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 廃棄物の地層処分では、効率的に処分を行う観点から、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ー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²⁾（図-2）。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、容器内および容器間の充填材等に、大量のセメント系材料の使用が考えられている。また、核種の移行抑制を期待して、ベントナイト系材料を緩衝材として使用することも考えられている²⁾。

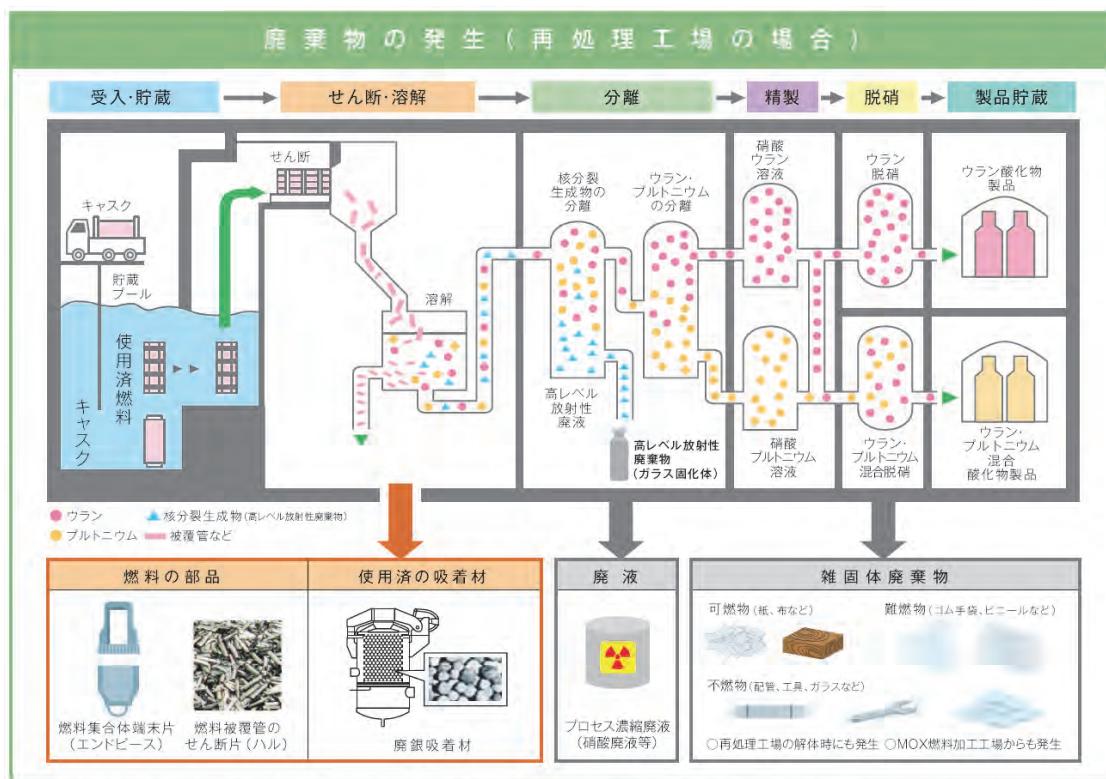


図-1 使用済燃料の再処理工程と発生するTRU廃棄物¹⁾

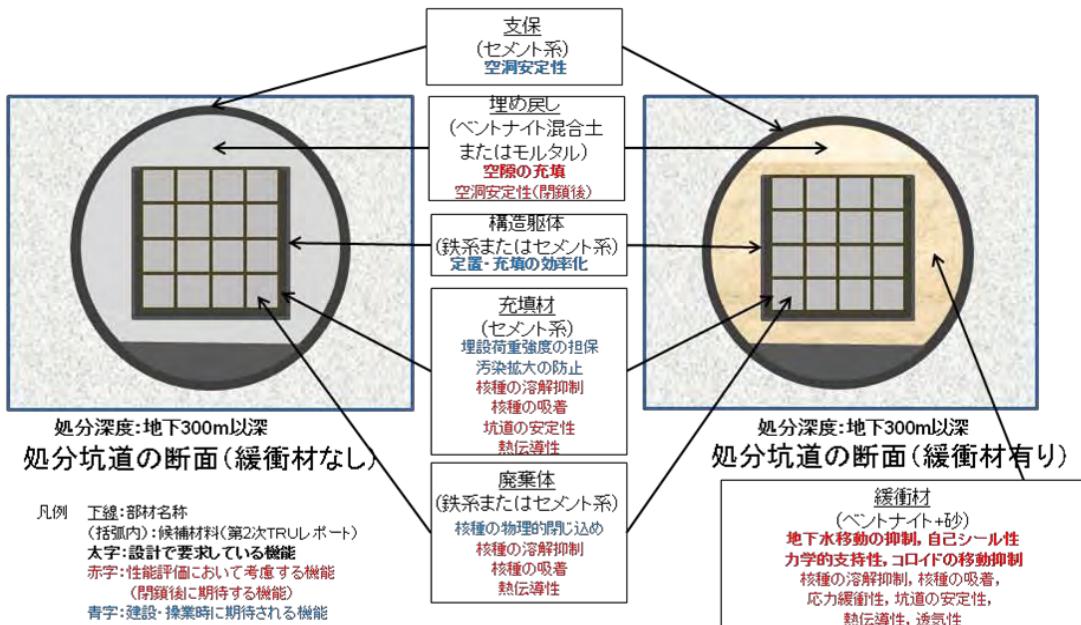
図-2 第2次TRUレポート²⁾で示された処分坑道の断面と各部材に期待する機能の例

図-2に示すように、処分坑道内に設置された各人工バリアのうち、充填材等に用いられるセメント系材料及び緩衝材及び埋め戻し材に用いられるベントナイト系材料には、閉鎖後の長期にわたる核種の移行抑制に関する機能が期待されている²⁾。

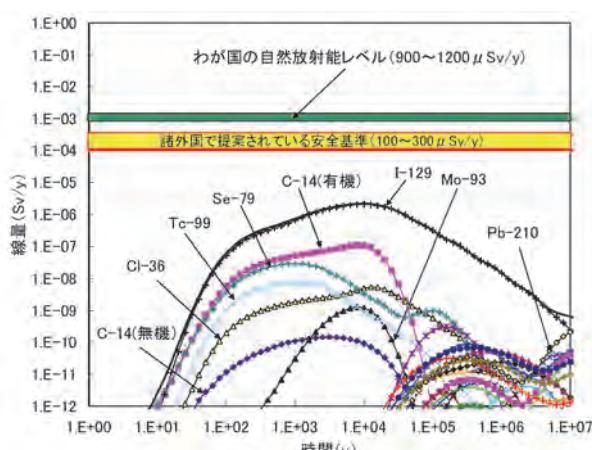
これら人工バリア材料の性能は、地下水や廃棄体成分等との反応による化学的な変質によって変化するため、長期にわたる人工バリア材料の化学的変質について信頼性高く予測し、その安全度を示すことが必要である。加えて、ベントナイト系材料の密度変化に伴う水理特性及びガス移行特性の変化や、各バリア材料の収着性の変化など上述の材料間の相互作用によって生じる性能の変化について、ナチュラルアナログ等も活用して、予

測する必要がある。

また、図-3に示すように、TRU廃棄物の地層処分において、影響線量を支配する核種はヨウ素129及び有機形態の炭素14である。これらは地質媒体や人工バリア材への収着性が極めて低く、人工バリアおよび天然バリアに於ける移行遅延効果を見込めないため、十分な減衰効果を得ることが難しい。そのため、その影響低減には、固化体の性能や廃棄物からの放出過程の現実的な評価等、廃棄物からの放出を低く出来る技術や信頼性の高い放出データの蓄積ならびに放出モデルの構築が必要となる。

当センターは、TRU廃棄物の安全評価の信頼性を高めることを目的として、前述のような人工バリア材料の長期的な変遷とその影響に関する評価技術の構築・改良を進めるとともに、ヨウ素129の影響低減対策としてヨウ素を長期間保持する固化体の開発を、炭素14の影響低減対策として、グループ2の放射化金属に含まれる炭素14の放出過程の現実的な評価を、それぞれ実施している。

以下に個別の実施内容について述べる。

図-3 第2次TRUレポートのレファレンスベースに於ける線量評価結果²⁾

- 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
- 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年9月

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

3-1 ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上

◇事業の概要

再処理施設の操業に伴い、ヨウ素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 1,570 万年と長く、また、人工バリアや岩盤等への収着性が低いことから、地表まで移行するまでの時間は地下水水流速等の地質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、地質環境条件によっては被ばく線量に大きな影響を及ぼす放射性核種となる。

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が可能であり、さらに長期性能評価において不確実性が小さく、経済性の観点から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。

天然バリア及び人工バリアへの収着性による移行遅延効果が十分期待できない I-129 の影響を低減するために、本事業では、固化体によってヨウ素を固定化する技術を開発することとし、固定化処理技術の開発目標値を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できるだけ小さくするように設定）、として開発を進めている。平成 12 年度に実施した国内のヨウ素固定化処理技術の調査結果¹⁾に基づき 7 つの技術について開発計画を策定し、開発を進めた。平成 16 年度にはヨウ素放出抑制能力と処理プロセスの成立性を中心に評価を行い²⁾、5 つの技術に絞り込んだ。平成 18 年度はそれまで検討を行った各固化体のヨウ素放出期間及び固定化処理プロセスの成立性について、より詳細な検討を行い³⁾、平成 19 年度には、目標とした 10 万年のヨウ素放出を見込める環境条件を提示するとともにヨウ素回収率を 95% 以上とする目処が得られた技術を以下の 3 つに絞り込んだ⁴⁾。

①アルミナ固化技術：使用済みのヨウ素吸着材（以下、廃銀吸着材）を熱間等方圧加圧（HIP）処理し、焼結体とする技術

- ②BPI ガラス固化技術：無機イオン交換体 BiPbO₂N₀₃ の N₀₃ をヨウ素で置換して BiPbO₂I とし、ガラスフリットと混ぜて溶融固化する技術
- ③セメント固化技術：廃銀吸着材から脱離させたヨウ素をヨウ素酸溶液とし、アルミナセメントにヨウ素の収着性の高いセメント水和鉱物であるエトリンガイト（Af_t）やモノサルフェート（Af_m）を生成させる目的で二水石膏を加えたセメントとともに混練し固化体を作製する技術

これら 3 つの技術に対し、固化体長期評価モデルの確立や信頼性確保のための検討を実施した⁵⁾。

また、上記技術開発は、平成 19 年度より平成 24 年度までの 6 力年にわたる本事業の取りまとめの結果⁶⁾を反映させ、今後 5 力年で必要な研究開発計画を策定した後に実施した。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

◇平成 26 年度の成果

(1) アルミナ固化技術

ヨウ素閉じ込め性をより高めるため、廃銀吸着材に焼結性の高い α-アルミナ試薬を添加して固化体を作製した。このアルミナ混合固化体で浸漬試験を行ったところ、ヨウ素の規格化浸出量が低下し、これまでの固化体よりもヨウ素閉じ込め性を向上させることができた。

ヨウ素の溶解速度は時間とともに低下（図-1）し、反応物の拡散移行過程または移行経路の形成過程に支配されると考えられた。

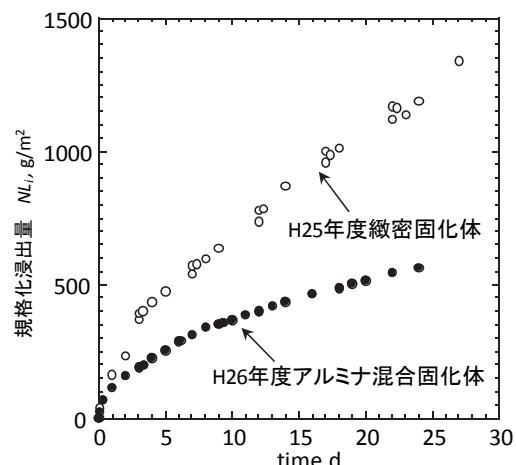


図-1 アルミナ混合固化体のヨウ素規格化浸出量

このとき、アルミの規格化浸出量もこれまでの固化体より低下していく、アルミニナ結晶粒界の状態がヨウ素閉じ込め性に影響すると考えられた。

このように、 α -アルミニナ結晶を成長させてヨウ化銀を取り囲ませる方法が有効と考えられた(図-2)。今後、このアルミニナ混合固化体を主に用いて評価していく。

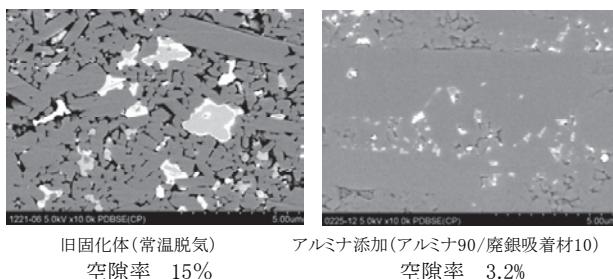


図-2 アルミニナ固化体の内部構造 (SEM, 1万倍)

(2) BPI ガラス固化技術

多様な環境条件のひとつとして、炭酸イオンがガラス溶解及びヨウ素放出挙動に与える影響を評価した。ベントナイト平衡水+0.01MNaHCO₃溶液では主にハイドロセルサイトで変質層が構成され、ベントナイト平衡水+0.1MNaHCO₃溶液になると、さらにセルサイト ($PbCO_3$) のピークも認められた。この変質層の表面にはZnとAlを主成分とする炭酸塩が析出していた。

BPI ガラスの化学構造の詳細検討として、化学構造モデル精緻化のため、少量成分のビスマスや亜鉛の配位環境を J-PARC/MLF BL20 (iMATERIA) を用いた中性子回析に基づき、中性子構造因子を導出して、局所構造に関する情報を取得した。

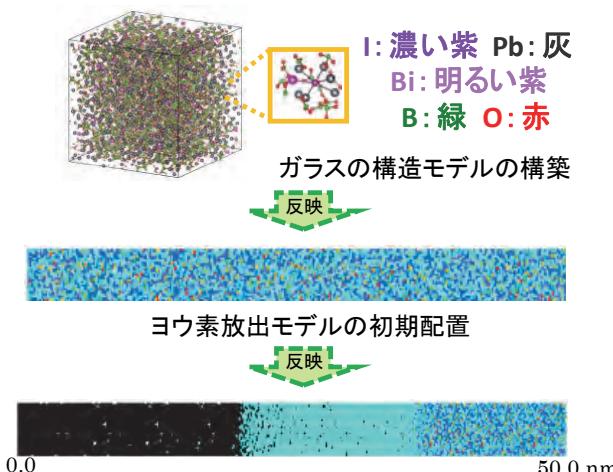


図-3 BPI ガラス固化体のモンテカルロ法による溶解シミュレーション

このようにして求めた化学構造モデルを、モンテカルロ法によるガラス溶解シミュレーションの初期配置に反映させることができた(図-3)。これにより予備的な計算ではあるものの、長期浸漬試験結果を再現する見通しを得た。

(3)セメント固化技術

実規模サイズ (200 L)へのスケールアップを念頭に、熱的影響評価として固化体の温度分布の検討、鉱物組成の検討を行った。

温度分布の検討として硬化反応時の温度変化を取得した。型枠材質の影響は小さく、固化体規模が小さいほど最高温度が低いことを確認した。

また、0.2 Lと200 Lの固化体サイズによって形成する鉱物組成に顕著な違いが無い(図-4)こともわかった。一方、ヨウ素が取り込まれる鉱物相が固化体サイズによって異なり、実規模固化体作製における課題が明確になった。

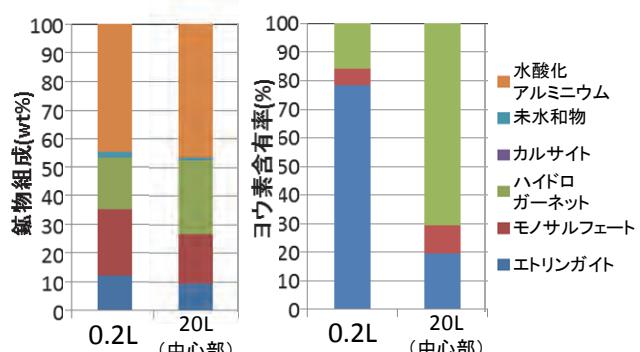


図-4 セメント固化体の鉱物相とヨウ素含有率

(4)技術選定の検討・準備

技術選定に向けた考え方や必要な評価項目など適宜整理し、必要な研究開発について抽出することを目的として、処分事業者及び再処理事業者に対して各技術の現状について説明し、課題や事業者としてのニーズを抽出し、現状の技術課題についてコンセンサスを得られた。今後必要な技術課題として実廃銀吸着材の分析や、固化体の性能を保証するための方策の検討がさらに必要であった。今後の事業化のスケジュール等を考慮し、技術選定のための要件について各技術の特性も踏まえ具体的に検討していく。

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

- 1) 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 12 年度地層処分経済性向上調査 地層処分システム開発調査報告書、2001
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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 1 分冊）－ヨウ素固定化処理技術開発－、2008
- 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 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 1 分冊）－ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上－、2015
- 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 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物処分技術 ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発－平成 19 年度～平成 24 年度の取りまとめ報告書－、2013

3-2 炭素 14 長期放出挙動評価

◇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（ジルカロイ被覆管）・エンドピース（ステンレス鋼）に含まれる炭素 14(以下、C-14)の長期的放出挙動の評価の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°C～80°C での腐食試験）である。

事業開始以来、事業を効率よくかつ確実に前に進めるという観点から研究フェーズを区切って実施してきた。フェーズ 1 に該当する平成 16 年から平成 18 年度までに、ジルカロイ被覆管・ステンレス鋼の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 に該当する平成 19 年度から平成 24 年度までに、それまで PWR を代表として評価されていた C-14 のインベントリについて、炉型 (PWR、BWR) や燃料型式、さらに材料毎の詳細なインベントリを初めて評価した。同時に C-14 の分析手法の見直しを行い、極めて低い濃度の C-14 の分析手法を確立させ、照射済み被覆管から放出される C-14 を定量することが可能となったことにより、BWR の照射済み被覆管を用いた、10 年間の浸出試験計画をスタートした²⁾。

また、長期にわたる C-14 の放出挙動を評価するために、ジルカロイ被覆管の短期的な腐食挙動に加え、長期の腐食挙動を把握する必要があったため、想定される処分環境での腐食試験を実施し、その試験により得られた腐食速度や酸化膜の性状等を基に、処分環境での腐食挙動と加速的な条件と考えられる高温（300°C 前後、炉外）条件での腐食挙動とを比較した。それらが類似していれば数十年に及ぶ高温条件での知見の蓄積により得られた経験的な腐食挙動や腐食式の想定される処分環境への適用が可能となり長期的な腐食挙動予測の信頼性を高めることができると期待できる。従って、本事業では、ジルカロイについては、高温での試験等の結果を基に構築された腐食モデルの地層処分へ

の適用性について今後も検討を進め、提案した長期予測の腐食式に基づく腐食モデルの構築に取り組むこととした。また、ステンレス鋼や瞬時放出とされている酸化膜からの C-14 の放出についても、ジルカロイの腐食による C-14 の放出に次いで優先度は高く、核種浸出の長期予測モデルの構築と、照射済み金属を対象とした試験を含めたデータ取得による確認を実施することとした²⁾。

これらフェーズ 2 の成果を踏まえ、平成 25 年度からフェーズ 3 として、長期的な C-14 の放出挙動の調査（ホット試験および長期腐食試験）に加え、下記に示す項目についても調査を実施している³⁾。

- ・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
- ・国際的な情報共有・調査

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。平成 26 年に実施した項目についてその成果を以下に示す⁴⁾。

◇平成 26 年度の成果

(1) ジルカロイの長期腐食モデルの検討

平成 26 年度は、ジルカロイの長期腐食モデルの検討のため、腐食速度へ影響を与える因子について試験を実施した。その結果、データの蓄積が行え、高温の炉外試験に基づくジルカロイ腐食式の想定される処分環境温度への適用について検討を進めることができた。なお、腐食速度へ影響を与える因子については、フェーズ 2 で検討が行われており²⁾、フェーズ 3 では、抽出された因子の中で影響度の大きいものから評価を行っている。今回対象とした因子は、処分環境における液性の違い、表面状態の違いによるものであり、以下に結果を示す。

ガラス製密封容器内で、30°C の純水にジルカロイを 2 年間浸漬させ、腐食試験後の容器内の水素ガス濃度およびジルカロイ試料の水素濃度分析を実施した。その結果、水素ガス濃度から算出した放出水素ガス等価腐食速度及び、吸収された水素量から求めた水素吸収等価腐食速度はそれぞれ $2 \sim 3 \times 10^{-4} \mu\text{m}/\text{y}$ 及び約 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\text{y}$ 、水素吸収率は約 90～95%、被膜厚さは約 8～10nm という結果を得た。また、地下水に含まれる成分が腐食に及ぼす影響を調べるため、イオン交換水及び降水系模擬地下水を NaOH を用いて pH=12 に調整

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

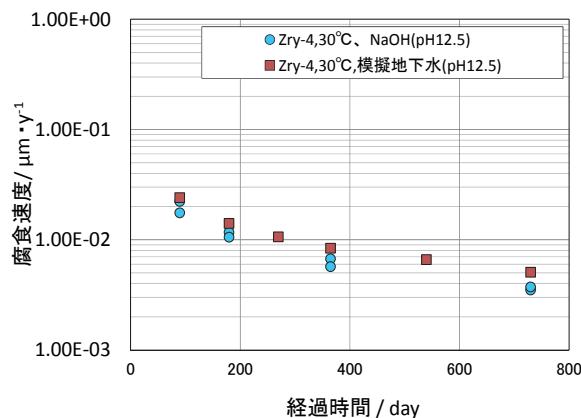


図-1 ジルカロイの等価腐食速度に及ぼす模擬地下水の影響

した液を用いた同様の試験を行ったところ、図-1に示すように等価腐食速度に大きな違いは見られなかった。

表面粗さの影響を調べる目的で、#200 及び #2000 の研磨紙で表面仕上げを行った試験片を 6 ヶ月間浸漬した時点での水素ガス発生速度および水素吸収率を測定した結果、顕著な差異は認められず、表面の粗さが腐食速度に及ぼす影響は小さいことが示された。

次に、高温での試験等の結果を基に構築された腐食モデルの処分環境温度（30°C～80°C）への適用について検討を進めるため、そのメカニズムが同じであるか確認する目的で、中間の温度と処分環境温度で純水での腐食試験を行い、腐食挙動を高温腐食でのそれと比較した。その結果、試験温度 270°C の腐食増量の挙動はおおよそ 1/3 乗則に則っており、過去の知見データ（Hillner の高温腐食式）⁵⁾とも整合性のある挙動を得られた。同時に、影響因子の一つである水素吸収について調べた結果、図-2 に示されるように試験温度 270°C で積算試験時間の増加に伴い、水素量がわずかに増加していた。一方、試験温度 180°C、210°C では水素量の増加は見られなかった。

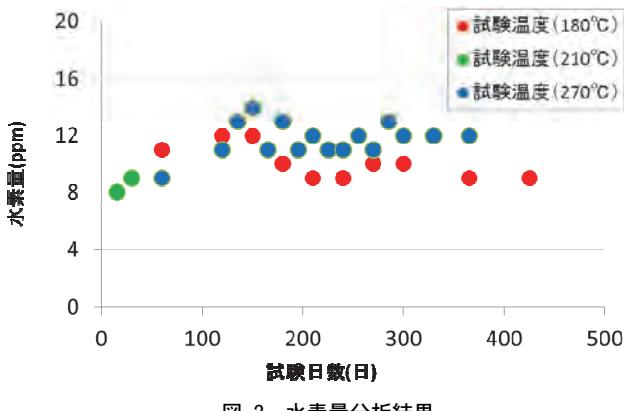


図-2 水素量分析結果

さらに、腐食に影響を与える因子と考えられる放射線の照射について本年度は、平成 19 年度に浸漬した酸化膜付照射済み被覆管(STEP I)1 試料の C-14 浸出データを取得した。その成果により、腐食速度へ与える影響について検討を行った。

(2) ステンレス鋼の長期腐食モデルの検討

本年度まで実施してきたステンレス鋼の腐食試験結果⁶⁾から、現時点では図-3 に示すように、埋設初期はステンレス鋼中のイオンが表面に形成した不働態皮膜を超えて移動して電気化学的な反応により被膜が成長すると考えられる。不働態皮膜は、環境中での溶存酸素濃度、温度、pH などの環境に応じて、平衡となる厚さまで成長するが、それ以降は溶出したイオンの溶液中での溶解度に応じて析出した（水）酸化物が不働態皮膜上に堆積することで皮膜が成長するモデルが考えられる。なお、この部分の皮膜成長速度の例として、現時点では 30°C、pH12.5 での実験値からおおよそ 1nm/年程度という値が得られている。以上より、ステンレス鋼からの C-14 の放出挙動について、長期予測のためのモデルを検討するための基礎を構築できた。

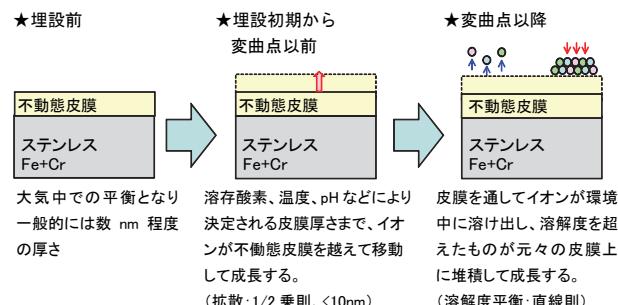


図-3 ステンレス鋼の不働態皮膜成長モデル

(3) 炭素化学形態の調査

アンプル試験の試料アンプルと四重極型質量分析計 (QMS) を直結させるサンプリング・分析システムを構築した(図-4)。直結することにより、アンプル試験における汚染を抑制することができ、メタン、エタン等はバックグラウンドの低減が実現し、有機ガス成分の微量分析が可能なことを確認した。これにより、C-14の化学形態の調査、把握を行うためのシステムを作ることできた。ただし、今回の試験では水素発生量から換算した炭素溶出量の方が生成側の炭素総量より少なかつたなどの問題点があり、対策等を検討する必要があることが確認された。

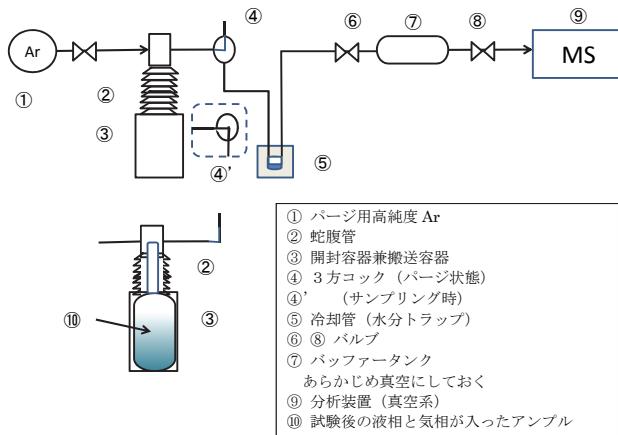


図-4 大気非開放サンプリング装置（概念図）

- 1) 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発報告書（第 3 分冊）－C-14 の放出挙動等に関するデータの取得－、2008
- 2) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 24 年度 地層処分技術調査等 TRU 廃棄物処分技術 ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発－平成 19 年度～平成 24 年度のとりまとめ報告書、2013
- 3) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 25 年度 地層処分技術調査等－放射化金属廃棄物中の C-14 の放出挙動評価－報告書（第 3 分冊）、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 廃棄物処分技術 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－、2015
- 5) E. Hillner, E. G. Franklin, J. E. Smee, Long-term Corrosion of Zircaloy before and after Irradiation., Journal of Nuclear Materials 278, 334–345, 2000
- 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 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 2 分冊）－炭素 14 長期放出挙動評価－、2014

3-3 ナチュラルアナログ調査

◇事業の概要

本事業は、ナチュラルアナログ（以下、NA）調査を実施することで、アルカリ緩衝材反応による緩衝材の長期変遷に関する直接的な根拠となるデータを取得し、フィールドデータと解析モデルを活用したアルカリ変質現象の解釈に基づき、TRU 廃棄物処分における人工バリア性能評価に係るセメント系材料の影響による人工バリア（ベントナイト）の長期健全性評価の信頼性向上を図ることを目的としている¹⁾。

平成 24 年度まで調査を実施した過去のアルカリ性地下水との反応が確認できたフィリピンの Saile 鉱山の NA (“Fossil Type” の NA)²⁾に対して、平成 25 年度から 5 年の計画で、アルカリ地下水の地球化学特性とその反応時間がより明確になり、また室内実験との対比も可能な過渡的なアルカリ変質現象の観察が可能な場として、現在もアルカリ地下水がベントナイト層に浸出しているフィリピンの (“Active Type” の) NA サイトにおける調査を実施する。

平成 26 年度は、平成 25 年度までの調査結果³⁾を踏まえ、(1) Bigbiga 地区 (Saile 鉱山と同様に Zambales オフィオライトの西端のサイト) の調査 (NA サイトの探査、NA サイト成立性の評価及びアルカリ環境下でのベントナイトの長期変質プロセス、(2) 新規の NA 候補サイト (Palawan 及び Pinatubo : 図-1 参照) の概査、(3) 年代測定による反応時間の評価、(4) 地球化学シミュレーションモデルによる変質解析、について検討した。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

◇平成 26 年度の成果

(1)Bigbiga 地区の調査

1) NA サイトの探査

Bigbiga 地区においては、平成 25 年度までの調査結果及び地質調査に基づき、Well-1(DH08) 以外でアルカリ地下水が確認されている井戸 (Well-3) の近傍で試錐孔 (DH10) を掘削して、試錐調査を実施した (図-2 参照)。

Aksitero 累層 (海洋性堆積物) と Zambales オ

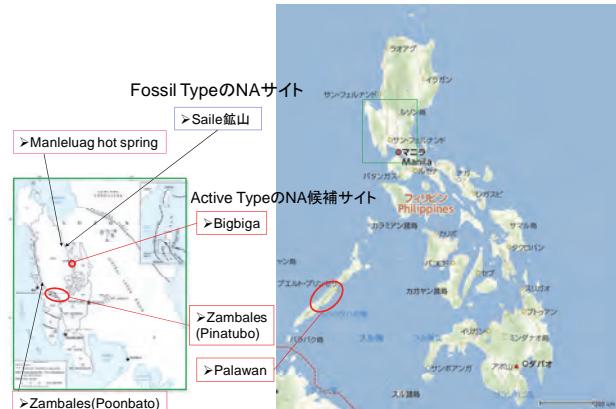


図-1 NA 調査サイトの位置図

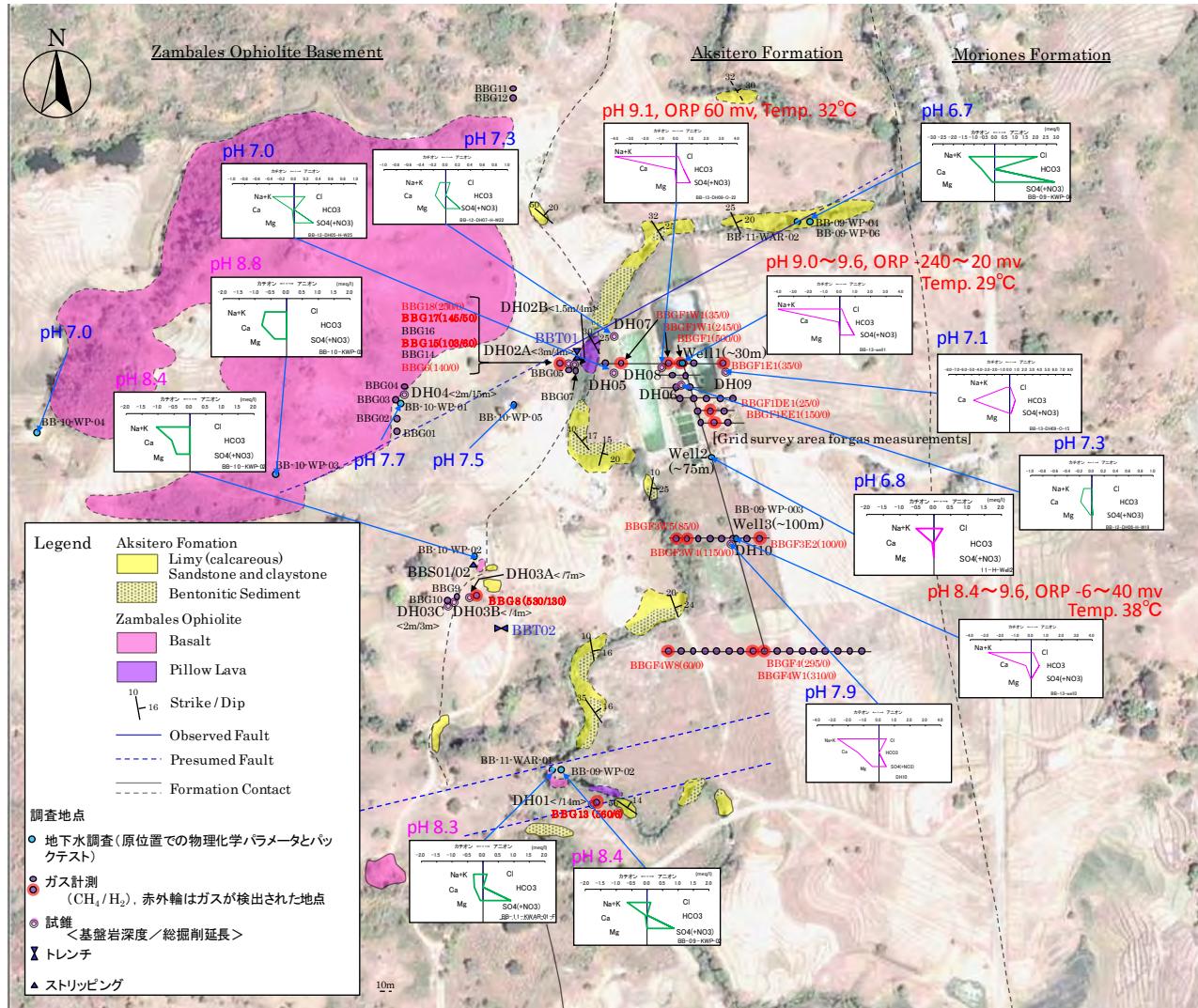
フィオライトの基盤岩である安山岩質溶岩 (Pillow Basalt) とは深度 34.3 m で接していた。

DH08 孔の基盤深度が 11.5 m であるのに比べ、DH10 孔周辺ではステップフォルトにより基盤深度が深いため、堆積する石灰岩質層が厚い。Aksitero 累層の岩質／岩相は浅部から順に砂岩泥岩互層、石灰質砂岩 (一部凝灰質)、泥岩 (粘土質) である。また、38.0～39.0 m に断裂系 (割れ目集中帯) が存在する。基盤岩上の Aksitero 累層のスメクタイトを含む泥岩 (粘土質) は DH08 孔でも同様に見られた。

DH10 孔の地下水は、掘削位置が Well-3 (pH8.9) 近傍で 100 m 近くまで試錐調査を実施したが、アルカリ性の地下水にはあたらなかった。ただし、揚水試験から DH10 孔の表層水の流入の影響が大きかったことを加味すると、この地点での基盤岩だけでなく直上の堆積層までアルカリ地下水が流動していた可能性がある (なお、Bigbiga でのベントナイトの変質については 3) に記載)。

2) NA サイト成立性の評価

これまでの調査結果を踏まえ、Bigbiga 地区を対象にした Active Type の NA サイトとしての成立性を評価した。Active Type の NA サイトとしての具体的な成立要件 (要素) は、①アルカリ地下水が pH 11 程度の高アルカリ地下水であること、緩衝材の候補材料の一つであるベントナイトのアナログとすれば、鉱物組成としては、②モンモリロナイトに富むベントナイト層またはベントナイト質堆積物が存在すること、アルカリ地下水の流路としての断層・亀裂の性状と

図-2 平成 26 年度までの調査結果に基づく Bigbiga 地区の Compilation Map¹⁾

しては、③アルカリ地下水の流路となり得るオフィオライト基盤岩中の断層・亀裂がアルカリ地下水の形成・貯留場からベントナイト層へ直接連結していることである。

①アルカリ地下水の賦存については、当地での最高 pH は、既存井戸(Well-1)の湧水地下水における pH9.0~9.6 の範囲であり、還元環境を示す。このアルカリ地下水は、Zambales オフィオライトと地下水との相互作用により形成される⁴⁾。これまでの地下水調査から、Manleluag の裂か水は pH10.1 (母岩は細粒斑れい岩)、Poonbato の裂か水は、pH 11.7 (母岩はかんらん岩)、そして、Bigbiga の裂か水は、pH 9.6 (母岩は枕状玄武岩または自破碎玄武岩) である。より高い pH の地下水の形成はより母岩の塩基性度が大きくなる必要があり、Bigbiga 地区でのアルカリ地下水形

成場の母岩が、枕状玄武岩または、自破碎玄武岩であることから、①の要件である高アルカリ地下水の賦存の可能性は低いと考えられる。

②モンモリロナイトに富むベントナイト層またはベントナイト質堆積物の存在については、ベントナイト形成の原岩となる Aksitero 累層を構成する凝灰岩質層の存在環境が地質環境条件となる。これまでの地表調査等により、凝灰岩質堆積物は、Bigbiga 地区で広く分布している石灰質砂岩・シルト岩・泥岩層中に挟在して分布しているが、薄層で、ベントナイト化が顕著でない。基盤岩の直上にある安山岩起源で、淡褐色の凝灰岩質砂岩には、相対的にモンモリロナイトが多いが、薄層である。このモンモリロナイト形成の程度は、ベントナイトを形成する原岩の組成に依存するためであると考えられる。

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

Bigbiga 地区では、石英安山岩起源の凝灰岩質層が多い傾向にあるため、対象地層としてのベントナイト層あるいは、ベントナイト質堆積物の更なる分布の可能性は低いと考えられる。

③アルカリ地下水の流路となり得る断層・亀裂については、Bigbiga のアルカリ地下水が裂か水であることから、断層・亀裂を通路として湧水していることが明らかである。しかし、このアルカリ地下水の流路となっている断裂系（割れ目集中帯）の性状については、DH08 孔のみで確認されているが、ベントナイト質堆積物とのコンタクトを判定できる断裂系（割れ目集中帯）の性状を目視確認出来ていない。また、①と②が同時成立する露頭（コンタクト部）が唯一基盤岩直上に限定されるため、そのコンタクト部が、より深部になることが懸念される。

以上のように、Bigbiga 地区を NA サイトとしてこれらの 3 つの成立要件のもと検討した結果、これらの成立要件がより満足される可能性は低いものと評価し、フィールドでの調査は今年度で終了することとした。

3) アルカリ環境下でのベントナイトの長期変質プロセス

Bigbiga 地区の試錐孔 DH08 及び試錐孔 DH10 から採取したそれぞれのコア試料からは、アルカリ地下水がベントナイト質の粘土岩に作用していたと考えられることから、低アルカリが長期間ベントナイト質堆積層に作用する現象を自然界で適切に抽出可能な NA として、詳細な鉱物学的・鉱物化学的特性の観察・分析にもとづくアルカリ変質反応の地球化学的プロセスを考察した。

低アルカリ性地下水は、基盤岩である Zambales オフィオライト（基盤岩）と天水起源の降雨水との相互作用により形成された裂か水で、その流动場は、図-3 のように基盤岩と Aksitro 累層が断層で接している断裂系（割れ目集中帯）とその近傍である。水質は、 $\text{Na}^+(\text{K}^+)$ (Ca^{2+}) - HCO_3^- タイプで若干の Cl^- と SO_4^{2-} （化石海水の影響）を含み、pH は $9 < \text{pH} < 10$ である。

このような環境下でのベントナイト質堆積物中のモンモリロナイトの低アルカリ性地下水と

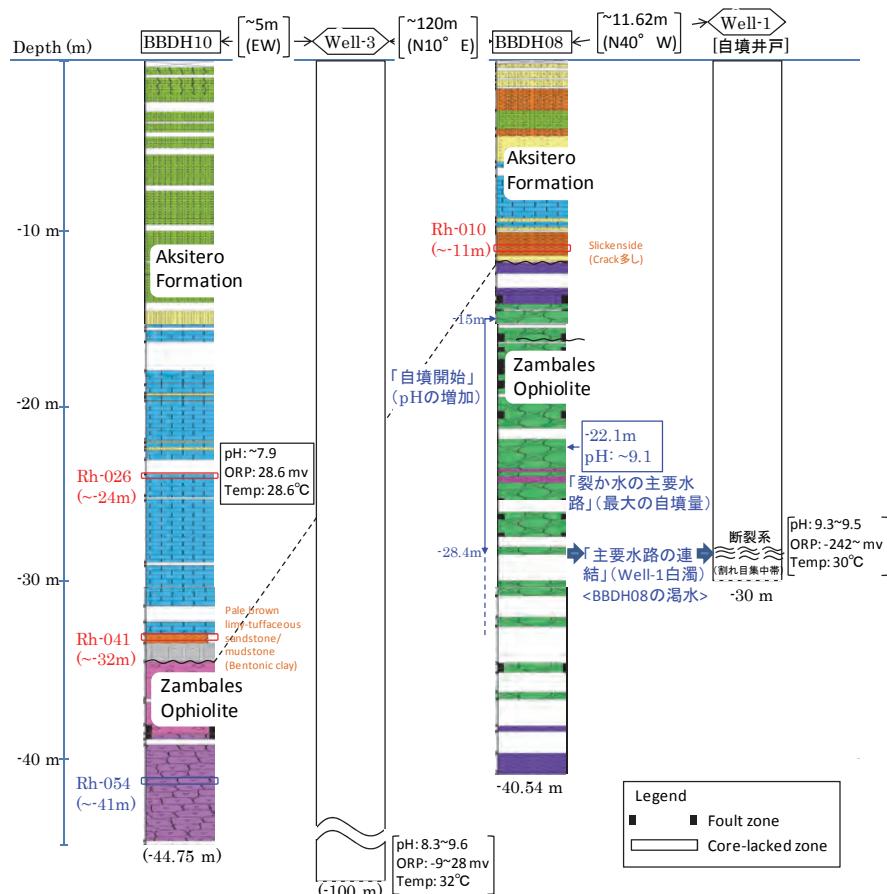


図-3 Bigbiga 地区の二次元水理地質構造概念モデル

の変質反応をまとめると図-4 のようになる。この低アルカリ変質反応は、Saile ベントナイト－沸石（モルデン沸石を生産）鉱床の周辺部のトレンチ内で観察された、拡散支配場での物質移動と（アルカリ性地下水($10 < \text{pH} < 11$)との）変質反応による変質鉱物の生成に関する地球化学的プロセスである”Fossil Type” の NA と類似している。Bigbiga の NA では、時間スケールは明確でないが、低アルカリ条件でも長期の相互作用ではモンモリロナイトがアルカリ変質す

る事例が観察された。ただし、変質の程度やもともとのベントナイトの鉱物組成や物理条件については、このサイトではデータの取得が十分できないため、この事例だけをもって、処分場での低アルカリ環境下のベントナイトの変質が問題となるとは言えない。このような条件を明らかにするためにも、ベントナイトの鉱物組成や物理状態の空間的な変化を把握することができるトレンチ調査が可能な別のサイトでの調査が重要である。

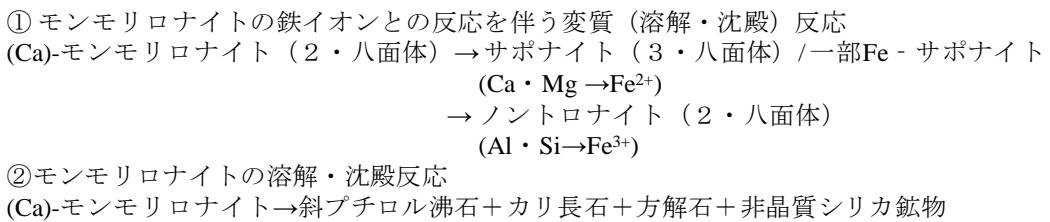


図-4 Bigbiga 地区の低アルカリ環境下の変質反応

(2) 新規の NA 候補サイトの概査

1) Palawan 島中・南部地区

Palawan 島中・南部地区における調査では、オフィオライト中の断層または亀裂に伴う高 pH ($10 < \text{pH} < 12$) のアルカリ地下水の湧水を複数個所 (Narra 地区及び St. Lucia 温泉) で確認した (図-5 参照)。これらのアルカリ地下水はほとんどの表層附近の湧水であるが (降雨による希釈の影響大)、pH と温度が高く、酸化還元電位が低く (還元性)、総じて Mg^{2+} 濃度が低く、 Ca^{2+} 濃度が高い蛇紋岩化作用に伴うアルカリ地下水の典型的な特徴を示す。また、岩石・鉱物学的にも、Palawan オフィオライトは、Zambales オフィオライトと比較してより塩基性であることから、蛇紋岩作用が顕著であり、測定したような高アルカリ地下水が形成される十分な環境であることがいえる。

Na^+ と Cl^- 濃度は明確に pH と負の相関を示すことから、アルカリ湧水サイトによって海水 (または化石海水) の影響を受けていることが考えられ、St. Lucia が最もその影響が強い。 Ca^{2+} 濃度と pH の正の相関はアルカリ地下水の形成過程で Ca^{2+} により pH が上昇したためであり、また、 Si 濃度と pH の負の相関はオフィオライト基盤岩の塩基性を示しているためであり、それぞれオフィオライト中の超塩基性岩と天水との水-岩

石反応である蛇紋岩化作用による高 pH のアルカリ地下水の生成環境であることを示している。また、Zambales オフィオライトのアルカリ地下水 (Poonbato) との比較では、 Ca^{2+} より Na^+ 濃度の方が高い点は異なるが、Narrar 3-1 も海水影響があることも考慮すると、フィオライト基盤岩中で生成されたアルカリ地下水の組成は比較的近いものと推測される。

高アルカリ地下水の湧出部に良く発達する石灰華 (Travertine) の下位に粘土や土壤などが観察され、その粘土質土壤試料はほとんどが方解石からなるものであったが、Zambales オフィオライトでは XRD で明確なピークが見られなかつた蛇紋石や一部水滑石 (Brucite)、霰石 (Aragonite) を同定した。しかしながら、Narrar 地区の高アルカリ泉の近傍では、ベントナイトの NA サイトとなり得るスメクタイトを含む凝灰質堆積物の明瞭な露頭は確認できなかった。

以上の結果から、Palawan 島中・南部地区では高 pH ($10 < \text{pH} < 12$) のアルカリ地下水が現在も湧出し、“Active Type” の NA サイトの重要な要件の一つ ((1)2) で示した①) を満たす有望な候補サイトを確認できた。

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

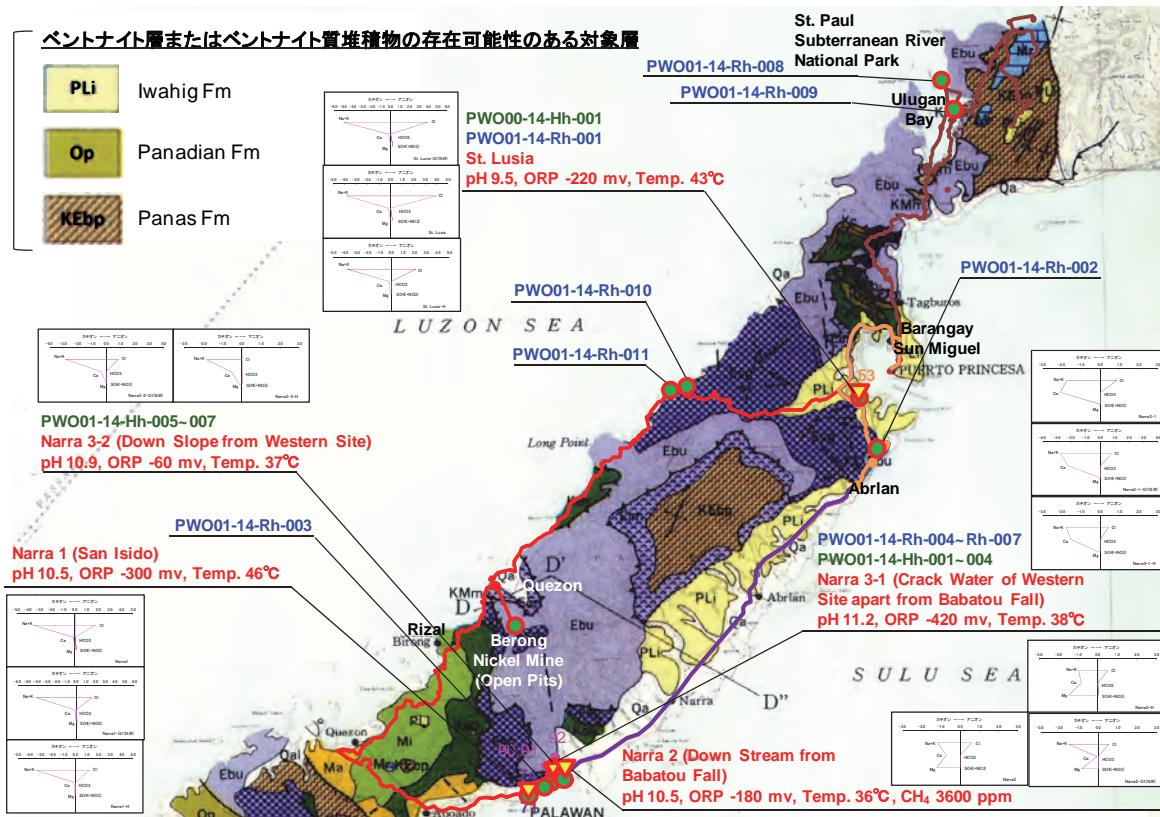


図-5 Palawan島中・南部地区的地質図と地下水調査結果（黄色下三角：採水地点、緑丸：岩石試料採取地点）

2) Pinatubo 地区

Pinatubo 山の火山活動により、噴出・流出・堆積した火山碎屑性堆積物が、Zambales オフィオライト複合岩体に近接または、直接コンタクトする露頭が分布する可能性が考えられることから、Pinatubo 地区において Zambales オフィオライトの断裂系に伴う高アルカリ湧水を対象にした地球化学的調査と、湧水が賦存する母岩の岩石鉱物学的調査などによる概査を実施した。

しかし、雨期の増水により、沢沿いに観察される断裂系に随伴する高アルカリ湧水箇所は水没して未確認となった。また、火山碎屑性堆積物の露頭についても、増水のため踏査できなかった。

3) 今後のフィールド調査の課題

以上の調査結果や文献調査などから、“Active Type” の NA サイトとしての検討については、現状での相対的評価のための判断程度を表-1 に示す。高アルカリ性地下水が確認された Palawan 島を “Active Type” のポテンシャルサイトの対象として、高アルカリ湧水周辺でのトレンチ調

査などを実施し、モンモリロナイトを多く含むベントナイト層またはベントナイト質堆積物の分布に関する十分なデータ・知見などを取得することが必要である。

(3) 年代測定による反応時間の評価

方解石の生成年代から高アルカリ地下水が流出していた時期を推定することを目的として、炭酸塩鉱物の熱ルミネッセンス (TL) 法による年代測定の精度向上や適用可能性 (鉱物の産状等) の範囲を探るために、Bigbiga 地区の炭酸塩鉱物について、その化学組成が TL 発行特性に及ぼす影響を把握し、それを補正した TL 年代の算出に関する検討を実施した。

Bigbiga の試錐コア (DH05 孔) の方解石の熱ルミネッセンス年代は、従来の方法より蓄積線量から算出した結果 (10ka～500ka)、同じ層準でも最大で 400ka の違いがある。これまで検討から、放射性元素濃度が同じであってもルミネッセンスを生じさせる効率が炭酸塩の化学組成に依存するため、蓄積線量の違いをもたらした可能性がある。そこで、各試料独自のルミネッ

表-1 NA サイトの地質・地下水の地球化学的特性

調査サイト		ルソン島		パラワン島
		Sailor鉱山周辺	Bigbiga地区	Palawan島の中央部・南部地区 (Narra地区)
NAタイプ		Fossil Type	Active Type	
1. 地質	基盤岩		Zambales Ophiolite [44~45Ma*]	
	定置	タイプ	上部地殻・沈み込み帯	
			海底地殻	
2. 地下水 (湧水)	対象層	始新世(Eocene)		中国(南部)の大陸地殻
		Aksitero累層(遠洋性堆積物)	火山碎屑物・火砂流堆積物・ 降下火砕堆積物(鮮新世) Tarlac累層(中新世・中世)	Panadian累層(鮮新世) Panas累層(始新世)
	賦存状況	ペントナイト層 (Sailorペントナイト・沸石鉱床)	淡褐色石灰質・凝 灰質砂岩・泥岩	遠洋性堆積物(一部ターピタイト) 泥岩・シルト岩、一部凝灰質砂岩 堆積物
		裂縫水(温水の湧出:オフィオライト・地下水の相互作用)		
3. 水理 (水質)	pH	Manleluag Springs(低温)	湧水井戸 (低温)	Loob Banga Creek (低温)
		~11	~9.3	~11.7
	水質	Mg ²⁺ , Cl ⁻ が低く、Ca ²⁺ が高い		Mg ²⁺ が低く、Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ がやや高く、Na ⁺ が高い
		Ca ²⁺ -OH型	Na ⁺ (Ca ²⁺) - HCO ₃ ⁻ 型	Ca ²⁺ -OH型
4. 地下水 (母岩)	母岩	細粒斑レイ岩	枕状玄武岩質溶岩 (自破碎玄武岩質 溶岩)	超塩基性岩(かん らん岩・ダナイト・ハ ルツバージャイト)
				超塩基性岩(かんらん岩・ダナイト・斑 れい岩)・枕状玄武岩
	サイトの 成立性	①高アルカリ 地下水の 存在 (pH10~11)	○	×
		②対象地層 の分布	◎	○
	③高アルカリ 地下水の 流路(断裂 系の存在)	◎	◎	◎
		④コントクト の確認 (①, ②, ③ の会合部)	△	△

【相対的評価のための判断程度】◎(十分満足する), ○(満足する), ○(今年度未調査、今後の課題), △(現時点での判断が難しい), ×(満足しない)

センス効率の算出から、TL 年代を再評価した。その結果、天然試料分析により得られている化学組成を考慮した TL 年代は(Fe 濃度・LA- ICP-MS 基準は除くと)、RW-003(98~104ka; 図-6 参照) > RW-015(29~34ka) ≥ RW-016 (25~33ka) と評価された。

一方、これらの産状観察から、初生的な特徴を持つ方解石が多い RW-003 が最も古く、RW-015 と RW-016 の比較では、ゼオライトと方解石の産状から RW-015 の方解石がゼオライトよりも先に晶出した産状を示すのに対し、RW-016 の方解石は後に晶出した産状を示すことから、RW-015 のほうがより古いと考えられる。したがって、これらの鉱物学的な産状は定性的には TL 年代と一致するといえる。

この Bigbiga 地区の炭酸塩の TL 年代とアルカリ地下水がペントナイト質の Aksitero 層群に作用した時間との関係について、Aksitero 累層の堆積年代は 23~29Ma であるのに対し、その炭酸塩の TL 年代は 14~181ka であり、方解石の産状観察

から脈状の方解石や溶解・再結晶した痕跡が多くみられることから、この年代のギャップは二次的に溶解・再結晶した方解石の年代を示していると思われる。変質に要した時間との関連は明らかにできないが、少なくとも 100 万年オーダーの形成年代をもつ方解石なら TL は検出されないため、堆積後初期に形成したと考えられる炭酸塩の生成年代ではないことは確かである。

TL 年代測定手法については、数 ka の誤差を含む方解石の TL 年代から石灰質堆積層の相対的な

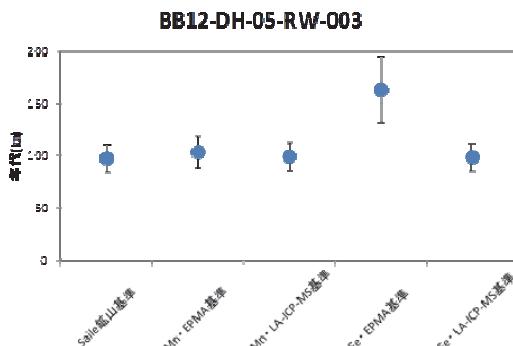


図-6 Bigbiga の RW003 の方解石の TL 年代

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

年代差の評価が可能であるというこれまでの検討結果から、現状の手法でも NA の時間スケールの推定に適用可能であるといえる。ただし、TL 年代値については、試料の化学組成に基づくルミネッセンス効率を適用した評価の方が真値に近いと考えられ、化学組成と TL 特性との関係は引き続き検討が必要である。

(4) 地球化学シミュレーションモデルによる変質解析

フィリピン国ルソン島西部の Saile ベントナイト・ゼオライト鉱山のトレーナー調査で観察された NA では、地球化学シミュレーションモデルにおいて現在得られている反応輸送モデルや構成式、熱力学的データベースで説明可能かどうかの検証に値する空間的な情報が得られている。そこで、この NA で観察されたベントナイト一枕状溶岩界面の鉱物の溶解や沈殿により変化する鉱物の共存状態の進化過程を再現することを目的として、地球化学計算コード PHREEQC⁵⁾による変質解析を実施した。

本年度は、昨年度までの検討成果を踏まえ、ベントナイトに含まれる一次鉱物であるモンモリロナイトや玉髓、灰長石、方解石の溶解だけでなく、力ギを握る二次鉱物のカリ長石と Fe-サポナイトの溶解・沈殿を速度論的に取り扱い、計算を実施した。

カリ長石の生成については、生成を平衡論で取り扱った系で生成が認められたが（図-7）、生成を速度論で取り扱った系では、60 年という反応期間では生成が認められず、数百年程度までその傾向は変わらなかった。また、カリ長石の溶解を平衡論と速度論で取り扱った系を比較すると、その分布の広がりに違いが認められ、平衡論で取り扱った系では、その分布が時間の経過とともに下流側に移動していた。しかし、少なくとも反応期間で 550 年まではカリ長石が消滅することはなかった。

鉄サポナイトの生成については、溶存鉄濃度の高い溶液条件において、生成を平衡論で取り扱った系で鉄サポナイト生成が認められたが

（図-7）、生成を速度論で取り扱った系では、60 年の反応期間では生成が認められなかった。溶存鉄はより下流側でのクロッギングやノントロナイト生成に消費されることが予想されるが、

これは上流側での鉄サポナイト生成の速度論に左右される。

以上の検討結果からは、変質ベントナイト中で生成する二次鉱物（カリ長石、鉄サポナイト、沸石）の鉱物組み合わせを再現するために、それらの二次鉱物の生成は平衡論的、溶解は速度論的に取り扱う必要性が示唆された。ただし、本質的にはベントナイトのアルカリ変質反応については、反応に寄与するアルカリ溶液の①拡散速度と②鉱物の溶解・生成（沈殿）の反応速度の大きさによって平衡論と速度論の取り扱いが決まるものと考えられる。したがって、NA における拡散速度を評価し、これと生成する鉱物の反応速度との関係を明らかにし、変質解析への適用を検討することが、本検討での重要な課題であると考えられる。

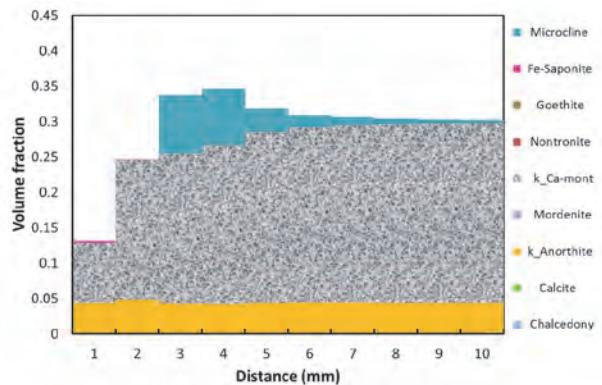


図-7 カリ長石・鉄サポナイトの生成を平衡論で扱ったケースの 60 年後のベントナイトの鉱物組成

- 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 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書（第 3 分冊）－ナチュラルアナログ調査－、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 24 年度 放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 多重バリアの長期安定性に関する基礎情報の収集及び整備 平成 19 年度～24 年度の取りまとめ報告書、2013
- 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 3 分冊）－ナチュラルアナログ調査－、2014
- 4) 藤井直樹、山川稔、鹿園直建、佐藤努、フィリピン国・ルソン島北西部に分布するザンバレスオフィオライトで生成されたアルカリ溶液との反応によって変質されたベントナイトの地球化学的・鉱物化学的特性、地質学雑誌、120(10), 361-375, 2014
- 5) Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J., User's guide to PHREEQC (version 2) - a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, USGS Water-resour. Inv. Rep., 99-4259, 1999

3-4 人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア評価の初期条件の設定

◇事業の概要

再処理工場、MOX 燃料加工工場等から発生する TRU 廃棄物の地層処分における人工バリアシステムでは、セメント系材料とベントナイト系材料の併用が検討されている¹⁾。これらの材料は、地下水や各バリア材料からの浸出成分との作用により長期的には変質し、人工バリアの特性に変化をもたらす可能性がある。そのため、これらの材料の地下環境での長期的変化の人工バリアの性能への影響を評価し、人工バリアの成立性の説明や設計、施工への反映をすることが必要である。

本事業では、平成 19 年度より平成 24 年度までに実施した事業の成果及び抽出された課題²⁾に基づき、TRU 廃棄物の地層処分における人工バリアの長期挙動評価を目的として、平成 25 年度より 5 力年の計画で「人工バリア材料長期挙動評価」及び「人工バリア初期条件の設定」に関する調査研究を実施している³⁾。本事業の実施概要を図-1 に示す。「人工バリア材料長期挙動評価」では、緩衝材(ベントナイト)を対象に、水理－力学－化学

(HMC) 連成挙動及び数値解析による長期挙動評価の信頼性を高めることを目的に、確証試験と数値解析への適応を検討する。一方、「人工バリア初期条件の設定」では、セメント系材料の長期挙動評価への初期条件の設定及びその影響に着目し、解析精度の向上を目的に、操業中の熱の影響、施工による初期設定への影響等を検討する。

このうち、平成 26 年度は、平成 25 年度に策定した実施計画及びこれまでの成果をもとに、現象把握とモデル化、HMC 解析の手法の検討、加えて初期条件への反映事項について検討を行った⁴⁾。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

◇平成 26 年度の成果

(1) 人工バリア材料長期挙動評価

人工バリアに使用されるベントナイトは、セメント成分が溶解することにより高 pH になった地下水の接触により化学的に変質する。化学的な変質は力学的な人工バリアの状態に影響を及ぼし、これらは相互に影響を及ぼし合う¹⁾(図-2 参照)。平成 24 年度までに、これらの現象を人工バリアの長期挙動評価へ考慮するために、化学解析、力学解析及び 1 次元での化学力学弱連成解析手法を構築した²⁾。

これらの現象をより忠実に人工バリアの長期挙動評価に反映するには、ベントナイトの主要成分であるモンモリロナイトの溶解に加え、それに伴う二次鉱物の生成及び体積変化などの現象及びこれらが水理力学挙動に及ぼす影響の把握と評価解析への反映、並びに解析手法の 2 次元化などが必要である。平成 25 年度から、これらの点に関して、①緩衝材(ベントナイト)の化学変質に関する試験、②緩衝材の力学特性に関する試験及び③HMC 連成解析手法の検討を実施している²⁾。

「①緩衝材の化学変質に関する試験」では、平成 25 年度に実施した、アルカリによるモンモリロナイトのゼオライト化において二次鉱物としてアナルサイムが生成するケースの体積変化挙動の検討に加え、平成 26 年度はクリノブチロライト生成ケースを検討した。体積変化挙動の試験

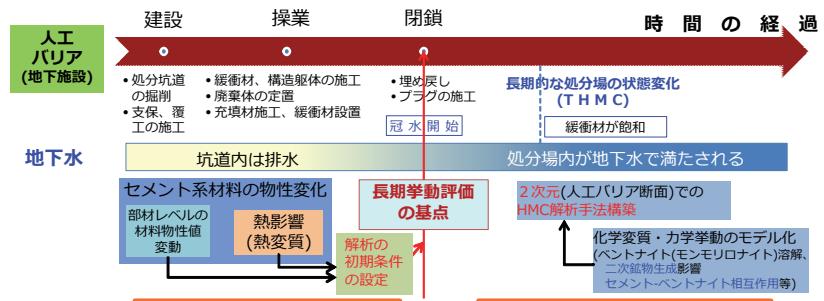


図-1 人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア初期条件の設定の実施概要

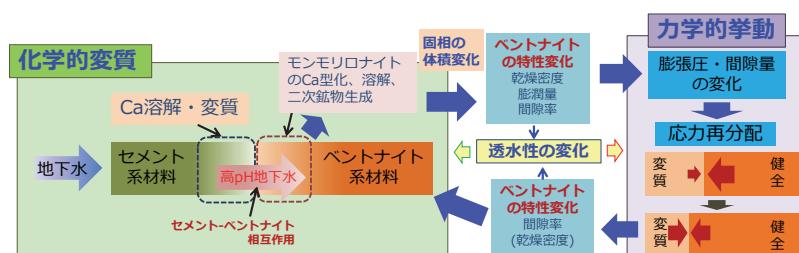


図-2 人工バリア材料の相互影響と性能との関係

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

は、実環境を考慮して、ベントナイトの圧密状態、温度、圧力の影響にも着目し、図-3 の模式図に示すようにシリング中で試料を変質させ体積変化を測定した。その結果、圧力の作用した高圧条件(5MPa)において、試験開始後初期の体積減少とその後の時間の経過に伴う体積増加を確認した。また、試験後のベントナイト試料にはクリノブチロライトの生成が認められた(図-3)。一方、モンモリロナイト試料の試験では、体積増加が認められなかった。これらの違いより、二次鉱物生成へのベントナイトに含まれる石英の溶解の影響が考えられる。今後、これらの現象を体系的に把握してモデル化し、化学解析へ反映する予定である。

セメントとベントナイトの接触部分で生成する珪酸カルシウム水和物(C-S-H)は、ベントナイトの変質を抑制する可能性がある。これに関して現実的な条件での挙動の把握と化学解析の検証を目的とし、Nagra(放射性廃棄物管理協同組合、スイス)の GTS(Grimseil Test Site:グリムゼル試験場)の構造物から採取した、建設後 12 年間を経過した試料³⁾の分析を開始し、XAFS(X 線吸収微細構造)分析により、C-S-H の生成を確認した。また、7 年間 60°C で浸漬したセメント-ベントナイト接触試料の分析より、モンモリロナイトのイオン型は長期的にはカリウム型化よりもカルシウム型化が卓越し、これまでの化学解析結果との整合を確認した。

「②緩衝材の力学特性に関する試験」では、ベントナイトの圧密変形(完全飽和線)に関して、二次鉱物としてアナルサイムが生成した場合の力学挙動に関する試験データを拡充してモデル化の検討を行った。図-4 に示す様にベントナイトが変質してアナルサイムが生成する場合におい

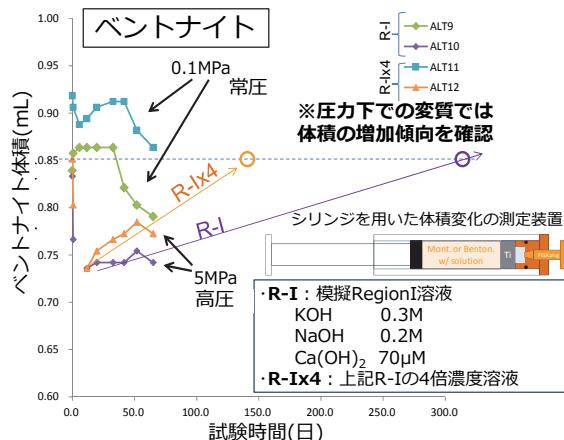


図-3 ベントナイトの変質時の体積変化(温度 70°C)

ても、平成 24 年度までのモデル²⁾と同様に圧密変形の挙動は完全飽和線(正規圧密曲線)の移動で説明できると考えられた。また、二次鉱物生成は間隙を充填するため、完全飽和線の移動は少ないと考えられた。これらの結果より二次鉱物生成を土粒子密度の変化ととらえ、平成 24 年度までに構築した力学挙動のモデル²⁾の拡張し、試験データとの整合を確認した。今後、試験データを拡充してモデルを検証し、信頼性を高める必要がある。加えて、ベントナイトの膨潤特性及びせん断変形の特性について試験による把握を進めた。今後、変質に伴う挙動の変化を考慮したモデルを構築、力学解析に反映する予定である。

「③HMC 連成解析手法の検討」では、化学解析手法の高度化及び 2 次元の HMC 連成解析手法に関する検討を行った。

化学解析の高度化としては、モンモリロナイトの溶解速度式の実効反応表面積に関して、平成 24 年度までに試験で確認した乾燥密度の増加に伴う溶解速度の低下をモンモリロナイト粒子同士のマスキングによることを説明するために、数学的な手法でのモデル化を検討した。モンテカルロシミュレーションで円盤状粒子の積層の平衡状態を計算し、その状態の実効反応表面積を算出した。平成 25 年度の検討による乾燥密度 0.05Mg/m³以下での積層状態の再現³⁾に加え、平成 26 年度は、1.2Mg/m³程度までの現実的な乾燥密度での再現ができ、実効反応表面積の定式化をした(図-5)。この定式化の結果を用いた長期の化学解析結果は、従来の実効反応表面積(7m²/g)のケースと比較してモンモリロナイトの溶解量が減り、長期評価の不確実性を低減した(図-6)。

同じく化学解析の高度化に関し、セメント系材

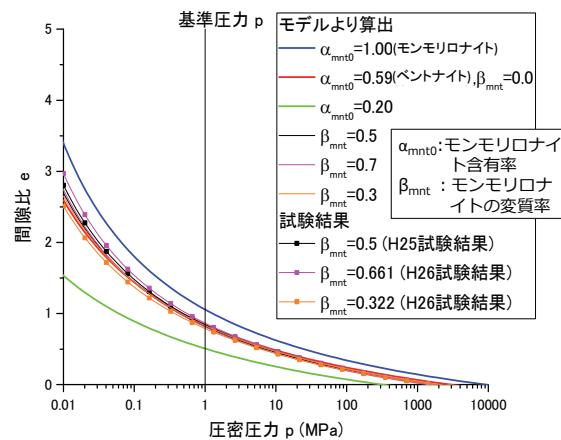


図-4 緩衝材の力学挙動に関する試験結果

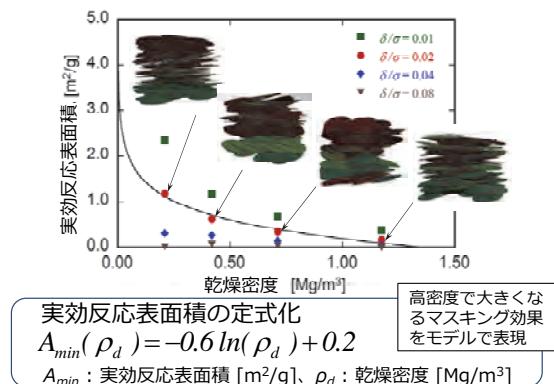


図-5 圧密下のモンモリロナイト実効反応表面積の定式化

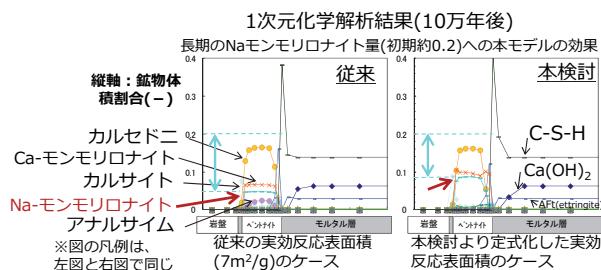


図-6 長期化学解析における本検討での定式化の効果

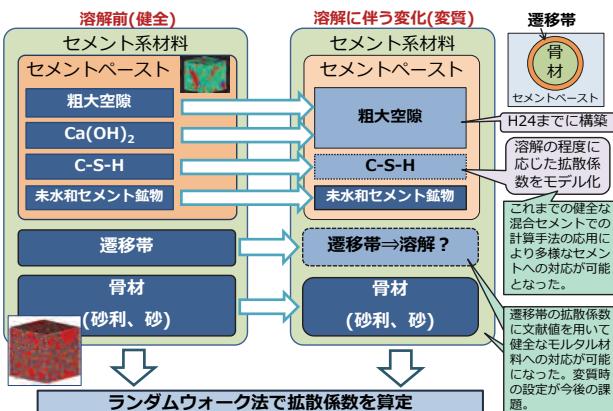


図-7 セメント系材料の拡散係数モデルの概要

料の変質に伴う物質移行特性(拡散係数)変化のモデルを、現実的な材料に適応させるための検討を行った。構成要素と各々の変質挙動を考慮した3次元モデルとランダムウォーク法による手法²⁾を、図-7に示す様にマルチスケールモデル等の適用によるモデルの拡張について検討し、モデル化の見通しを得た。今後試験データによる検証を行う。これにより、セメント系材料の初期物性値を取得すれば、変質試料の拡散試験を行わずに様々な変質段階の拡散係数を得ることが可能となる。

HMC連成解析手法に関する検討では、2次元で

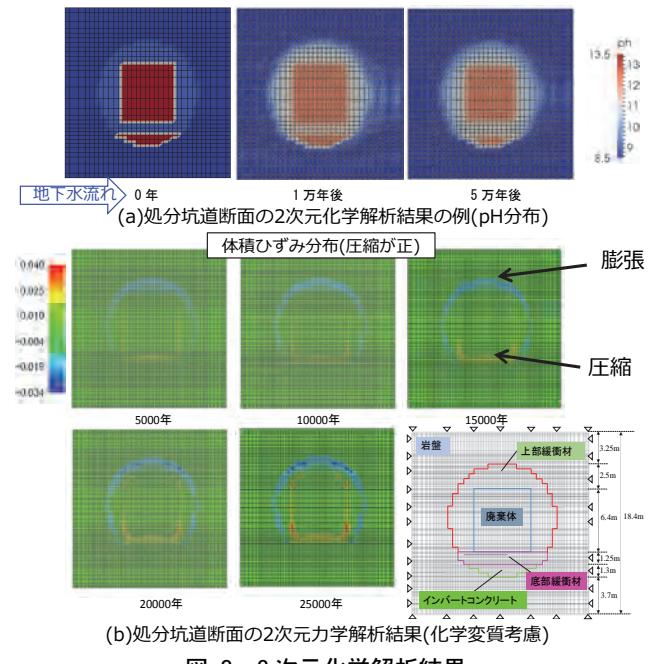


図-8 2次元化学解析結果

の力学解析と化学解析の弱連成手法について検討した。力学解析には、平成25年度に構築したベントナイトの化学変質やそれに伴う固相量の変化に対応可能な構成モデル³⁾を2次元FEM化した土/水連成有限要素プログラムDACSAR-BAを使用した。化学解析には、地球化学・物質移動連成解析コードPHREEQC-TRANSを使用した。図-8に人工バリア断面での長期化学解析結果と力学解析結果を考慮した長期力学解析結果を示す。底部緩衝材はセメントの影響による化学変質を受けやすく、それにより圧縮方向の体積ひずみが発生する点等の緩衝材の長期力学挙動の評価への化学変質の影響の考慮が可能になった。今後は、化学解析と力学解析の弱連成のためのデータ受け渡し手法の検討及び化学変質及び力学挙動のモデル化の成果の反映を行ない、長期解析手法を構築し、これを用いた人工バリアの長期挙動評価により、その成立性や設計・施工への反映事項を抽出していく予定である。

(2) 人工バリア評価の初期条件の設定

人工バリアの長期挙動評価の解析の起点は、図-1に示す様に処分場が建設、操業を経て閉鎖された時点である。解析の起点における材料特性値等の初期条件は、長期の解析結果に影響を及ぼすため、より正確な設定が必要である。そのため、解析の初期条件は、従来用いられてきた材料自体の特性に関する情報に加え、建設や閉鎖までの影

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

響を考慮する必要がある。本検討では、セメント系材料の材料特性値(拡散係数、力学特性等の物理値)で予想される、処分場の閉鎖までの放射性廃棄物の熱による変質の影響及び人工バリアのセメント系材料の部材の大きさでの、部位の違いによる特性値の変動について検討し、長期の解析の初期条件の設定に考慮すべき事項を提示する。加えて、人工バリアの長期性能、初期条件等への影響が考えられるセメント系材料のひび割れに関する非破壊検査手法について検討する。

セメント系材料の熱変質は、熱履歴によるC-S-Hの結晶化(トバモライト化)によるもので、これまでに建設後80年程度の熱履歴を受けたコンクリート(経年コンクリート)試料により確認している²⁾。この結晶化により、セメント浸出水のpHの低下が期待される一方、材料特性値の変化が懸念される。また、平成25年度から開始した合成C-S-Hを一定温度に保管する定温度試験で、TRU処分坑道の制限温度の80℃より低い温度でC-S-Hの結晶化を確認した。そのため、先ず、結晶化条件を明らかにする必要がある。平成26年度は、合成C-S-Hの定温度試験より、C-S-HのCa/Siモル比(C/S)がトバモライトの組成の0.83程度、温度が50℃以上等の結晶化条件を把握した(図-9)。加えて、より現実的な普通ポルトランドセメント(OPC)を水和後に石英型SiO₂(骨材を模擬)と共に粉末化した試料で定温度試験を開始し、C-S-Hの結晶化の傾向を確認した。今後、定温度試験を継続して確認する必要があるが、熱の影響により骨材等から溶解したSiがC-S-Hへ供給されてC/Sが0.83程度に低下し、結晶(トバモライト)化したと考えられる。なお、結晶化の材料特性値への影響は少ないとされるが、80℃以下では結晶化が起こらないとして制限温度を設定した¹⁾ため、セメント系材料の結晶化による材料特性値の変化について検討し、初期条件の設定方法の提示に加え、人工バリアの性能への影響を明らかにし、必要に応じ対策等を検討する必要がある。

人工バリアのセメント系材料の部材における特性値の変動は、平成25年度の文献調査により、コンクリートの打設方法による部位毎の特性値の違い、打ち継ぎ、打ち重ね部分が地下水の選択的流路となる場合及び乾燥を受けた場合等の養生状態と関連があることがわかっている³⁾。平成26年度は、このうち打設方法及び養生方法の影響に

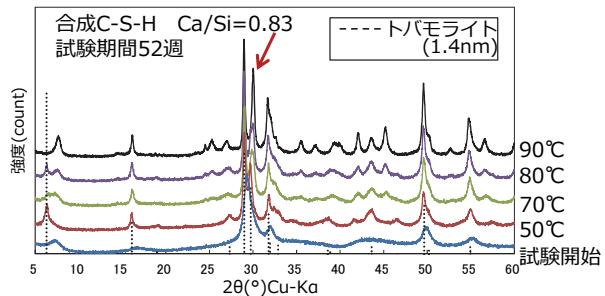


図-9 合成C-S-Hの定温度試験結果(XRDでの結晶化確認)

ついて、それぞれ要素試験で検討した。打設方法に関して高流動コンクリートを用いた水平部材(長さ6m)及び垂直部材(高さ1m)の施工試験で空隙率、拡散係数及び圧縮強度の変動は少ないと、また、養生状態で拡散係数が変動するがそれと相関のある空隙特性で変動を把握できることを確認し、初期条件、施工等への反映事項が得られた。

セメント系材料のひび割れの非破壊検査手法については、視覚的な検査が難しい部材の内部及び裏面側のひび割れを超音波法により検査する手法を検討した。セメント系材料の様に超音波が減衰しやすい材料に有効なステップ型パルサ(広帯域周波数)を適用し、平成25年度までに、緻密で超音波が伝播しやすい高強度高緻密コンクリート(圧縮強度200MPa)でその有効性を確認し、加えて、検査手法の構築のために必要な要素技術とその課題を抽出した²⁾³⁾。平成26年度は、抽出した要素技術である、ひび割れ検出精度を高める超音波集束技術及び広範囲の検査のためのTOFD法(画像化技術)の有効性を確認した。なお、人工バリアのセメント系材料のうち超音波伝播特性が比較的良好な高強度コンクリート(圧縮強度60MPa)において、本手法を用いても超音波伝播時の減衰が大きく、検査に支障があるため、減衰を改善する方策の検討が必要である。

- 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年9月
- 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(第4分冊)－人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア初期条件の設定－、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(第4分冊)－人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア初期条件の設定－、2015

3-5 ガス移行連成挙動評価手法の開発

◇事業の概要

本事業では、「第2次TRUレポート」¹⁾で提示されたガス移行挙動評価の課題や、「TRU廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画」²⁾で提示された課題のうち、ガス発生影響評価に関する課題の解決を目指す。

具体的な課題として、処分施設内で構造材や廃棄体に含まれる金属の腐食等によって発生するガスが内部で蓄圧されること等により、人工バリアの長期安全性に影響を及ぼす可能性がある。その影響の程度を評価するために、ベントナイト系緩衝材中の力学連成を伴うガス移行を考慮した評価モデルの開発、掘削影響領域を含むニアフィールド全体におけるガス移行評価モデルの開発等が必要である。

図-1に、本事業において対象とするTRU廃棄物処分施設の人工バリア概念（廃棄物グループ2の例）^{1) 3)}と人工バリア材料（赤字で表記）を示す。

本事業では、上記のうち人工バリア（ベントナイト系/セメント系材料）の課題解決に係る「ガス移行連成挙動の評価手法」を開発・整備して人工バリア性能への影響評価を行い、その上で人工バリアの健全性を示すことを目標としている。

なお、「TRU廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画」²⁾では、地層処分の事業化フェーズである国の基盤研究開発を、サイト選定プロセスを考慮し段階的に成果を反映させることを念頭に置き、フェーズ1～3として定義しているが、本事業においても当該計画に沿う形で検討を進めた。

このうち、フェーズ2（平成19～24年度）に対応した検討では、「第2次TRUレポート」で提示された課題の解決に資するため、「ガス移行挙動の評価」⁴⁾の調査研究を行った。具体的には、人工バリアのうちベントナイト緩衝材中のガスの移行挙動解明に向けて、水とガスの透過性及び力学特性データの取得やガス移行解析モデルの構築／高度化を推進した他、人工バリアの周辺岩盤を含むガス移行挙動を評価するためのシナリオ構築、及びシナリオ評価手法を整備した⁴⁾。しかし、その一方で、現実的なガス移行挙動を評価するには、

不確実性を有する多くの課題が残された。

これを踏まえ、フェーズ3（平成25～29年度）^{4) 5) 6)}に対応した検討では、残された課題の解決を目的として、ベントナイト系緩衝材のみならず、セメント系材料中におけるガス移行挙動の不確実性の把握・理解に係る知見（室内試験によるデータ取得）を拡充していく他、把握されたガス移行挙動の素過程（現象）の理解とモデル化を進めつつ、試験結果を再現できる解析・評価手法の信頼性向上を図っていくこととした^{4) 5) 6)}。

また、材料単体のみならず、人工バリア内のガス移行経路になることが懸念される材料界面（異種材料間/同種材料間）を考慮した複合システムとしてのガス移行連成挙動の評価手法の高度化、及び多様な処分概念への対応に向けたシナリオ・FEP（Features, Events and Processes）の拡張と、より現実的なガス移行評価シナリオの構築に向けた検討を推進していくこととした^{4) 5) 6)}。

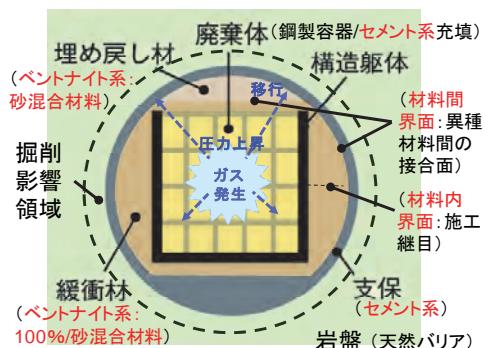


図-1 本事業において対象とするTRU廃棄物処分施設の人工バリア概念図（廃棄物グループ2の例）と人工バリア材料（赤字で表記）^{1) 3)}

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

◇平成26年度の成果

平成26年度の成果の概要は以下のとおりである⁶⁾

(1) ガス移行評価シナリオの拡張

ガス移行評価シナリオやFEPを拡張するための新たな検討として、前フェーズ（平成19～24年度）の成果（処分施設内から比較的多くのガス発生が懸念される廃棄物グループ2の処分概念を対象に構築したシナリオ及びシナリオ構築・評価手法）を用いることで、平成25年度はグループ3を対象としたシナリオを構築した⁵⁾。

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

平成 26 年度は、新たにグループ 1 と 4 を対象としたシナリオを構築するとともに、これまでに構築したシナリオ（グループ 2 と 3 が対象）に統合させた。その一方で、より現実的な評価シナリオの構築や評価手法の整備には根拠の拡充が必要であるが、その根拠の一つであるガス発生に係る最新の知見を取り纏めることで、統合したシナリオにおける不確実性を低減させた。

(2) ガス移行連成解析ツールの高度化

平成 25 年度に策定した実施計画⁵⁾に基づき、ガス移行シナリオの根拠の拡充や評価手法の整備に必要なガス移行モデルの検証や解析手法の整備を進めるため、既存の解析ツールの高度化を図った。

その成果として、ガス移行シナリオで想定するようなベントナイト緩衝材中やセメント系材料中において気液二相流が主体となる（特に緩衝材中で大破過^{*}等が生じない）条件下でのガス移行試験によって取得された実測データ（後述の(3)『ベントナイト系材料及びセメント系材料のガス移行に係るデータの拡充』での成果）が、予め実施した予察解析結果と概ね整合することを確認できた。特に、ベントナイト中のガス移行メカニズムの詳細な把握を目的として、複数条件で実施した予察解析のうち、力学連成二相流解析コード（CODE_BRIGHT）と解析モデル（供試体の 2 次元軸対象半断面モデル、図-2）による予察結果（Case2 CODE_BRIGHT）は、供試体中のガス移行に伴う排水挙動の実測データ（供試体 No.1）を良く再現できている（図-3）。

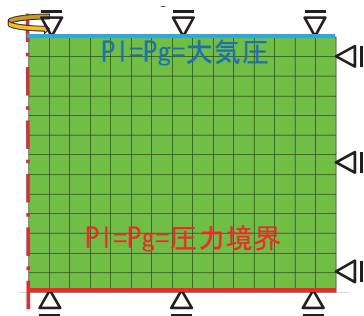


図-2 力学連成二相流解析モデル（供試体の 2 次元軸対象半断面モデル）と境界条件（PI は水圧、Pg はガス圧を示しており、それぞれガス注入時と等価な圧力値を設定）

*『ガス圧上昇中にガスの排出量が急激に増大する現象』⁷⁾

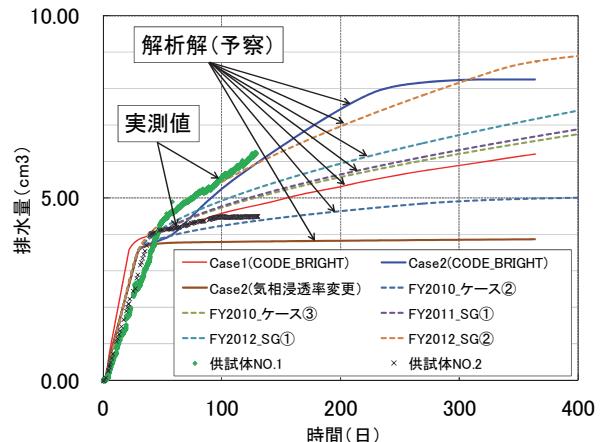


図-3 取得データと予察解析結果の比較（左：累積排水量の経時変化）の一例

なお、予察解析では前フェーズ（平成 19～24 年度）までに検証してきた古典気液二相流および力学連成二相流モデル（構成則）・パラメータ（二相流特性値）を用いたが、前記のように試験データを概ね再現可能なことが検証できたことで、当該モデルの信頼性や妥当性を向上させた。

(3) ベントナイト系材料及びセメント系材料のガス移行に係るデータの拡充

平成 25 年度に策定した実施計画⁵⁾に基づき、ガス移行シナリオで想定する現象の理解や不確実性の低減、ガス移行モデルの検証のため、前フェーズ（平成 19～24 年度）で取得されたガス移行に係わるデータ（特に緩衝材中の大破過が生じる際の挙動に着目したもの）をさらに拡充／充実させていくこと（前フェーズで取得した以外のデータの取得）を目的として、緩衝材（ベントナイト）やセメント系材料（モルタル）中において気液二相流が主体となる（特に緩衝材中で大破過等が生じない）ことを想定した条件でのガス移行試験を実施した^{5) 6)}。

特に、ベントナイトを対象とした成果として、前述の「(2) ガス移行連成解析ツールの高度化」で述べた通り、取得されたデータ（気液二相流挙動）はガス移行モデルによって概ね再現できているが（図-3）、フェーズ 2 までの検討⁴⁾では不明確であったガス移行試験中における供試体内部の力学挙動との関連を明らかにするために、予察解析結果のうち「Case2 CODE_BRIGHT」の平均有効

応力分布の経時変化(図-4)および間隙率分布の経時変化(図-5)に着目することとした。

図-4より、供試体底部(ガス注入側)の平均有効応力がガス注入開始の約30.5日後より低下している。これは、供試体内へのガス浸入に伴う間隙ガス圧の上昇により生じた現象であると解釈でき、図-3で見られるような同時期付近における排水挙動(供試体No.1の実測データ)の変曲点として捉えられることとも整合する。その後は気液二相流によるガス移行に伴い、有効応力低下のフロントが供試体のガス注入側から排水側に向けて進展していく、透気に至る(ガス注入開始から約365日後)ものと予測される。

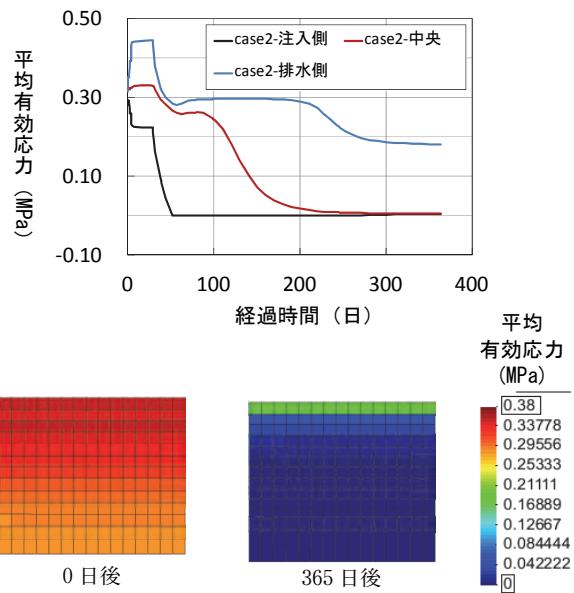


図-4 力学連成二相流解析結果の一例(供試体内の平均有効応力分布の経時変化)

また、図-5より、供試体底部(ガス注入側)の間隙率が約30.5日後のガス浸入に伴って一時的に低下するが、その後は上昇に転じている。これは、供試体底部からのガス圧によって押されて一時的に収縮するが、間隙ガス圧の上昇により間隙が押し広げられることによる変形現象であると解釈でき、同じく図-3で見られるような同時期付近における排水挙動(供試体No.1の実測データ)の変曲点として捉えられることとも整合する。その後は供試体底部の間隙率上昇(体積膨張)に伴って排水側の間隙率が低下しながら(圧縮されながら)気液二相流によるガス移行が進展していく、透気に至る(ガス注入開始から約365日後)ことが同様に予測される。

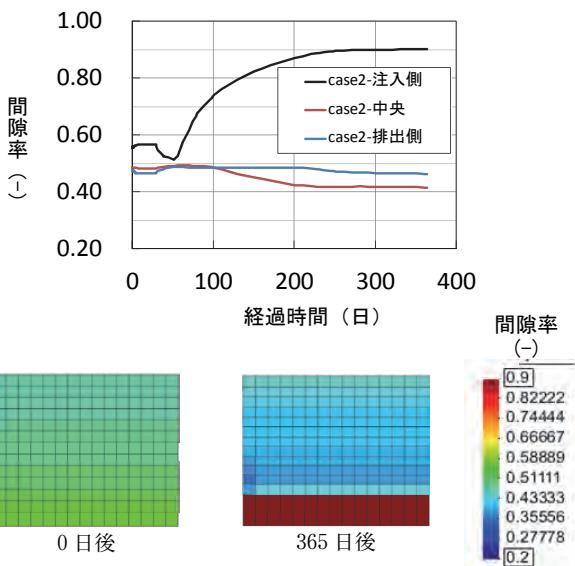


図-5 力学連成二相流解析結果の一例(供試体内の間隙率分布の経時変化)

ここで、図-6に示すような供試体内飽和度の経時変化に着目すると、供試体底部(ガス注入側)の飽和度が約30.5日後のガス浸入に伴って低下し始めている。これは、間隙水の押し出しによる現象であると解釈でき、同じく図-3で見られるような同時期付近における排水挙動(供試体No.1の実測データ)の変曲点として捉えられることとも整合する。その後は気液二相流によるガス移行に伴い、飽和度低下のフロントが供試体のガス注入側から排水側に向けて進展していく、透気に至る(ガス注入開始から約365日後)ことが同様に予測される。

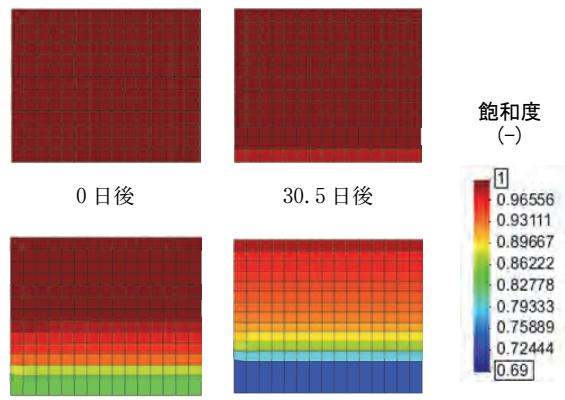


図-6 力学連成二相流解析結果の一例(供試体内の飽和度分布の経時変化)

ただし、飽和度分布の予察解析結果については、

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

継続試験中（平成 27 年 3 月 31 日現在）のガス注入試験の終了後に実施する供試体の解体調査（ガス注入開始から 365 日後を予定）によって実測値を取得し、比較検証する必要がある。

なお、ベントナイト中におけるガス・水の透過性は、飽和度の変化（サクションの変化）に伴って変化するが、特にガスの透過性（相対浸透率： K_{rg} ）は、図-7（力学連成二相流解析で設定した二相流パラメータ、 K_{rg} ：注ガス過程）のように飽和度の低下（サクションの上昇）に伴って非線形に上昇しながら変化していく。

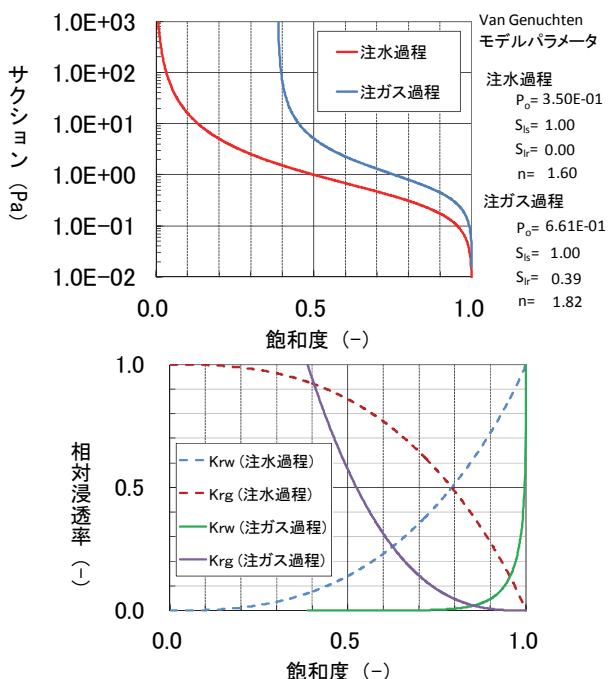


図-7 力学連成二相流解析で設定した二相流特性値（前フェーズの検討：平成 19～24 年度に検証済みの二相流パラメータ）

以上から、特にベントナイト中のガス移行現象は、気液二相流挙動（飽和度やサクションに依存して透過性が変化するガス・水の移行挙動）と力学挙動（応力の変化や変形挙動）とが連成（ガス圧作用に伴う間隙率変化／変形等→変形等に伴う飽和度変化等→飽和度変化等に伴う透過性の変化等）する複雑かつ非線形な挙動として解釈可能であることが示唆された。

一方で、上記のような緩衝材中のガス移行挙動の把握・理解に資する、力学連成二相流解析における高精度の解を得るために、ベントナイト系材料の特性（力学特性パラメータ）を適切に取得・同定する必要がある。このため、前

フェーズで取得対象としたベントナイト 100% 材料の特性データの他、処分材料の多様性に対応するべく、平成 25 年度以降は底部緩衝材に想定されているベントナイト・砂混合材料を検討対象に加え、データを拡充していくこととした^{5) 6)}。

平成 25 年度は、体積一定（ひずみ拘束）下のサクション制御試験により、サクションと飽和度の関係を取得した⁵⁾。

平成 26 年度は、一定応力下のサクション（飽和度）制御試験により、膨潤（吸水飽和）・収縮（ガス移行による押し出し脱水）過程における詳細な材料挙動を把握したとともに、材料特性に係わるデータを取得・同定した（図-8）。

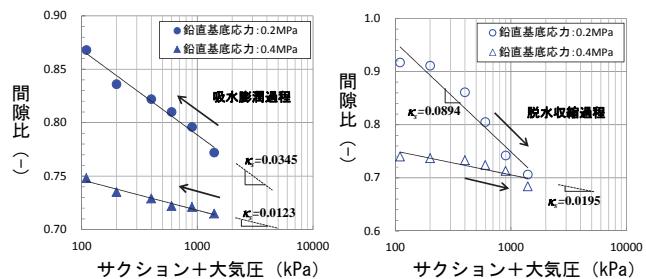


図-8 ベントナイト・砂混合材料の吸水（サクション低下）過程における膨潤挙動（左、膨潤指数 κ_s ）と脱水（サクション増加）過程における収縮挙動（右、収縮指数 κ_s ）

- 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 年 9 月
- 地層処分基盤研究開発調整会議、地層処分基盤研究に関する全体計画【研究開発マップ】（平成 25 年度～平成 29 年度）、2014 年 3 月
- 原子力発電環境整備機構、地層処分を行う低レベル放射性廃棄物（TRU 廃棄物）について、2008 年 4 月
- 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
- 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)－ガス移行連成挙動評価手法の開発－、2014
- 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)－ガス移行連成挙動評価手法の開発－、2015
- 一般財団法人電力中央研究所、処分施設条件を考慮した締め固めたベントナイトのガス移行特性評価 電力中央研究所報告、2012

4. 使用済燃料の直接処分に関する技術調査と処分場操業関連技術の概念構築(その2)

◇事業の概要

日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)が、経済産業省資源エネルギー庁から受託した「平成26年度地層処分技術調査等事業(使用済燃料直接処分技術開発)」では、わが国において使用済燃料の直接処分が技術的な合理性をもって実現できることを示すため、わが国の地質環境条件や使用済燃料の特性を踏まえ、処分場施設の設計・性能評価技術の開発¹⁾を実施している。そのうち、原環センターが原子力機構から受託した「使用済燃料の直接処分に関する技術調査と処分場操業関連技術の概念構築(その2)」では、上記を踏まえ、搬送・定置設備と封入設備の技術オプションの体系的整理を行い、その成果を用いた概念設計を実施した。

◇平成26年度の成果

人工バリアを地上施設から処分坑道(処分孔)まで搬送し、定置を行う搬送・定置設備は、人工バリアの形状、寸法、質量などに加えて、豎置きと横置きの定置方式、地質環境などの様々な条件を前提として設計される。その概念設計の前段階として、搬送・定置設備を構成する技術を幅広く抽出し、技術オプションとして体系的に整理した。技術オプションの整理結果を活用してPEM(Prefabricated Engineered barrier system Module)方式の搬送・定置設備の概念設計を行い、実現可能性を評価した。処分施設の設計フローを図-1に示す。本委託では封入設備の概念検討も実施したが、本報では搬送・定置設備の検討成果について記載する。

(1) 技術オプションの体系的整理

1) 装置構成・機能による技術オプションの体系化

既存の技術開発、概念設計の検討成果の設備の役割、ハンドリングフローなど²⁾³⁾から、地下施設のアクセス坑道～処分坑道(処分孔)における搬送・定置設備を構成する装置を表-1に示すように分類した。そして、装置を構成する機能

に対して、物流・交通など地層処分以外の産業も対象に含めて、適用候補となる技術を技術オプションとして抽出した。一例として⑯の処分坑道の廃棄体搬送・定置装置の技術オプションを表-2に示す。なお、PEM方式の装置については、廃棄体の装置分類に含むものとした。但し、搬送物を区別するためPEM搬送・定置装置等と呼称することとした。

2) 技術オプションの特徴整理

抽出した各技術オプションの技術の概要、特徴、地層処分に関わるニーズ・モチベーション、

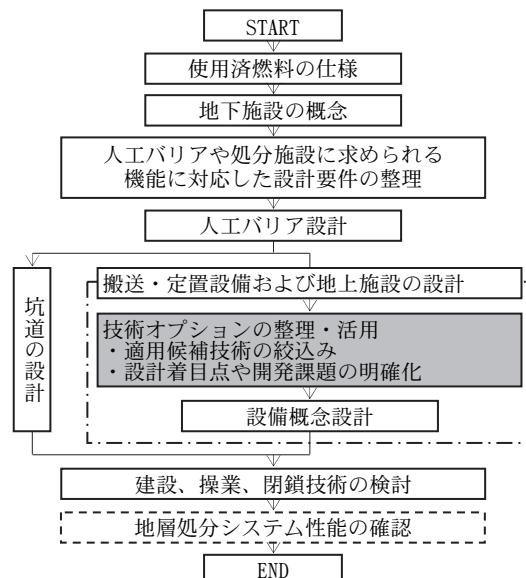


図-1 処分施設の設計フロー

表-1 搬送・定置設備の構成装置

区分	装置の種類
地下施設	①廃棄体搬送装置 ②緩衝材搬送装置 ③隙間充填材搬送装置 ④廃棄体搬送装置 ⑤緩衝材搬送装置 ⑥隙間充填材搬送装置 ⑦廃棄体積替え装置 ⑧廃棄体傾転装置 ⑨緩衝材積替え装置 ⑩緩衝材傾転装置 ⑪隙間充填材積替え装置
	⑫廃棄体搬送装置 ⑬緩衝材搬送装置 ⑭隙間充填材搬送装置 ⑮廃棄体積替え装置 ⑯緩衝材積替え装置 ⑰隙間充填材積替え装置
	⑱廃棄体搬送・定置装置 ⑲緩衝材搬送・定置装置 ⑳緩衝材原位置締固め装置 ㉑隙間充填材搬送装置・充填装置

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

表-2 技術オプション(処分坑道廃棄体搬送・定置装置)

機能		技術オプション
走行機能	軌条式	鉄レール
		タイヤ
	無軌条式	タイヤ
		クローラ
走行(駆動)機能		電動機-バッテリ 電動機-架線給電 電動機-ケーブルリール 内燃機関
把持機能	押込み 把持部吊り下ろし 片持ち吊り下ろし 真空吸引 電磁石 エアペアリング ウォーターベアリング フォーク ベルトコンベア	
	ワイヤ+ワインチ 油圧シリンダ エアペアリング ウォーターベアリング	
	傾転機能	
	機械式傾転／油圧式傾転	

課題/留意点を1件1葉の書式に整理した。そして、技術オプションを共通の視点で客観的に比較評価できるよう、原子力発電環境整備機構(以下、原環機構)の処分概念・技術オプションの特徴比較の視点の設計因子⁴⁾を参考に、表-3に示す搬送・定置設備に関わる技術オプションの特徴を整理する視点と具体的内容について設定した。表-3に示した特徴整理の視点と具体的な内容により、各技術オプションの特徴整理を行った。特徴整理においては、搬送・定置設備の前提条件に対する技術オプションの有効性が評価できるよう、特定の条件を設けずに全体をできるだけ網羅するよう広く調査した。

(2) PEM方式の搬送・定置設備の概念検討

平成25年度に設定された人工バリアのレファレンスケース(PWR使用済燃料集合体2体収容)²⁾を対象とし、技術オプションの整理結果を用いて、処分坑道PEM搬送・定置装置の概念検討を行った。

表-3 搬送・定置設備に関わる技術オプションの特徴整理の視点と具体的な内容

設計因子		搬送・定置設備の特徴整理の視点	特徴整理の視点の具体的な内容
閉鎖後長期の安定性	人工バリアの長期安定性	・ニアフィールドにおける残置物と人工バリアとの相互作用	・発生する残置物の種類(コンクリート、金属など)、量
		・遮へいの有無	・廃棄体や装置の遮へいによる作業領域の非管理区域化の可否(廃棄体表面で2mSv/h、表面から1mの位置で100μSv/hの基準値への適合により判定)
	操作安全性	・放射線による装置への影響の可能性	・廃棄体からの放射線による影響とその大きさ(装置や材料の劣化、および故障、誤動作の発生)
		・装置稼働時の作業環境 ・装置による災害の危険性	・振動騒音、排気ガスの発生の有無 ・装置に起因する火災、爆発、衝突、積荷の落下等の災害発生の可能性
工学的成立性/品質保証	工程	・装置の作業速度・作業時間	・装置が役割を發揮するために必要となる速度や時間(搬送機能の場合は搬送速度、昇降・定置機能の場合は作業あたりの時間など)
		・搬送定置装置の適用範囲 定置方式、緩衝材、坑道種類、処分深度	・定位方式(堅固定き、横置きなど)への適応性 ・緩衝材の形状や方式(ブロック方式、一体型方式など)への適応性 ・各坑道(立坑、斜坑、水平坑道)への適応性 ・広範囲の処分深度への適応性
		・定置装置稼動部の空間的制約	・装置の大きさ、および作業時の作業範囲の大きさ(それぞれ坑道断面の大きさや形状への影響を含む)
		・緩衝材搬送・定置、廃棄体搬送・定置装置の能力 性能、遠隔操作性、作業精度、作業時の振動	・性能(必要とする機能を発揮するための能力) 例) 対象物(形状、寸法、重量、材質)の搬送・定置能力/斜坑の登坂能力 ・遠隔操作、自動運転に関する実績 ・作業精度(走行機能では停止精度、昇降・定置機能では定置精度など) ・作業時に対象物に発生する振動や衝撃の大きさ
	技術開発の進展	・技術レベルおよび課題の難易度	・基準を設けて技術レベルと難易度を判定 技術レベル: 実用(他分野で十分実績がある)レベル、実証実験レベル、基礎(要素)実験レベル、机上検討レベルで分類 課題難易度: 實現性に影響する重要な課題の数および課題対策の方法や技術の難易度を評価
		・搬送・定置の作業量	・上記の工程因子にて評価
	地下環境への適応性	・想定される地下環境条件への適用性 ・閉鎖狭隘空間、坑内温度・湿度・湧水・路盤	・坑道内付帯物の設置要否と設置内容(装置以外の空間確保の必要性) ・装置稼動に対し、坑道内温度や廃棄体の表面温度、処分容器表面温度などの温度が及ぼす影響と制約 ・装置稼動に対し、坑道内温度(ほぼ温度100%)が及ぼす影響と制約 ・坑道上部からの湧水への適応性(適用可能な湧水量) ・坑道内の路盤の段差や起伏に対する適応性
		・操業作業の地質環境条件の不確実性に対する柔軟性 ・操業条件(1日当たりの定置廃棄体数)の変化に対する柔軟性 ・故障時の重大災害に対する信頼性	・装置稼働に必要な坑道底部岩盤の地耐力 ・様々な作業速度および作業時間設定に対する柔軟性 ・動力停止時の事故・トラブルの発生可能性(装置の暴走や搬送物の落下・転倒など)
		・搬送・定置後の再移動のしやすさ	・搬送・定置作業の逆工程による廃棄体回収の成立性
		・ステークホルダーの受容性	・技術レベルも設けて判定 技術レベル: 実用レベル(他分野で十分実績がある)、実証実験レベル、基礎(要素)実験レベル、机上検討レベル

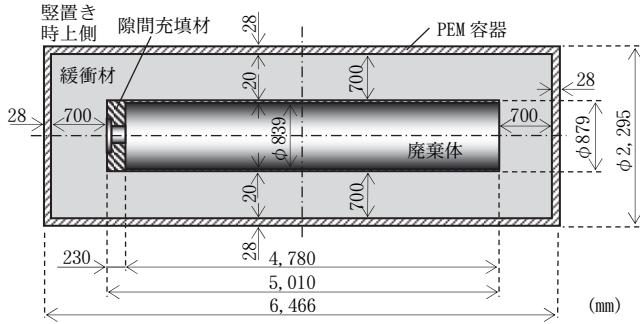


図-2 PEM の概念図

なお、定置方式は横置き方式を対象とした。

ガラス固化体を3体収納するPEM(PEM容器の長さがレファレンスケースと類似)の検討例⁵⁾を参考に、PEM容器について図-2のとおり設定した。

廃棄体、緩衝材およびPEM容器をモデル化した遮へい計算により、線量当量率がPEM容器表面で $23\mu\text{Sv}/\text{h}$ ($2\text{mSv}/\text{h}$ 以下)、PEM容器表面から 1m 位置で $9.9\mu\text{Sv}/\text{h}$ ($100\mu\text{Sv}/\text{h}$ 以下)となり、輸送の基準を参照して設定した基準値(()内の数値)以下となることを確認した。そのため、表-3に示す「操業安全性／放射線安全」の「遮へいの有無」の視点について搬送・定置設備への遮へい体の設置は不要とした。

搬送・定置設備の前提条件を平成25年度報告書²⁾等から設定し、機能毎に技術オプションの有効性を評価する指標を設定した。

技術オプションの利害得失による体系的整理結果と、設定した技術オプションの有効性の評価指標をもとに、処分坑道PEM搬送・定置装置の把持機能、走行機能、走行(駆動)機能および昇降・定置機能の技術オプションの評価を行い、

「指標を満たさない」の項目がない技術オプションを各機能に利用できる候補技術として抽出した。一例として、把持機能の技術オプションの有効性評価結果を表-4に、各機能の候補技術抽出結果を表-5に示す。次に、表-5の下線を付した平成25年度の廃棄体搬送・定置装置概念²⁾と類似する技術を設定し、処分坑道PEM搬送・定置装置の概念を検討した。表-6に概略仕様、図-3に概念図を示す。有効性評価における各項目の重み付けや、候補技術の絞込み方法については今後の課題である。

最後に、技術オプションの有効性の評価をもとに、処分坑道PEM搬送・定置装置に対する実現可能性を評価する指標を設定し、技術オプションの

整理結果を活用して、概念検討した処分坑道PEM搬送・定置装置の実現可能性評価を行った。処分坑道PEM搬送・定置装置の実現可能性の評価結果および主な技術開発課題を表-7に示す。

表-4 把持機能の技術オプションの有効性評価

有効性評価項目 (設計因子)	技術オプション							
	押し込み	把持部吊り下ろし	片持ち吊り下ろし	真空吸引	電磁石	エアベアリング	ウォーターベアリング	ベルトコンベア
閉鎖後 長期の 安定性	○	○	○	○	○	○	○	○
	○	○	○	△	△	△	△	○
	○	○	○	○	○	○	○	×
操作安 全性	○	○	○	○	○	○	○	○
	○	○	○	○	○	○	○	○
一般労働安全	△	△	△	△	△	△	△	△
	△	△	△	△	△	△	△	△
工学的 の成立性 /品質 保証	△	○	○	×	△	○	○	▲
	○	○	○	△	○	○	○	○
	○	○	○	○	○	○	○	○
	○	○	○	○	○	○	○	○
	○	△	△	△	△	○	○	△
	○	○	○	○	○	○	○	○
	△	△	△	△	△	△	△	△
	○	○	○	○	△	○	○	△
	○	○	○	○	○	○	○	○
技術開発の進 展	△	△	△	△	△	○	△	△
	△	△	△	△	△	○	○	△
地下環境への 適応性	○	○	○	○	○	○	○	×
	○	○	○	△	○	○	○	○
	○	○	○	△	○	○	○	△
工学的信頼性	△	△	△	×	×	△	△	△
	△	△	△	×	×	△	△	△
回収可能性	△	△	△	○	△	○	△	△
	△	△	△	○	△	○	△	▲

○：指標を満たす。△：条件付きで指標を満たすものの検証が必要。

▲：搬送のみ指標を満たし、定置には別技術が必要。×：指標を満たさない。

表-5 処分坑道PEM搬送・定置装置の候補技術

機能	技術オプションから抽出された候補技術
把持機能	把持部吊り下ろし、エアベアリング、ウォーターベアリング
走行機能	無軌条-タイヤ、無軌条-クローラ
走行(駆動)機能	バッテリ+電動機、ケーブルリール+電動機、内燃機関
昇降・定置機能	ワイヤ+ウィンチ、油圧シリンダ、エアベアリング、ウォーターベアリング

表-6 処分坑道PEM搬送・定置装置の概略仕様

項目	概略仕様
外形寸法	高さ約3.5m×幅約3.5m×長さ約14.5m
装置質量	100～150ton
搭載質量	165～215ton (処分坑道PEM搬送・定置装置+PEM)
走行速度	約1km/hr(約16.7m/min)
走行方式	タイヤ(無軌条)
給電方式	バッテリ+電動機
把持方式	把持部吊り下ろし
昇降・定置方式	ワイヤ+ウィンチ
監視方式	ITV(industrial television)カメラ方式

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

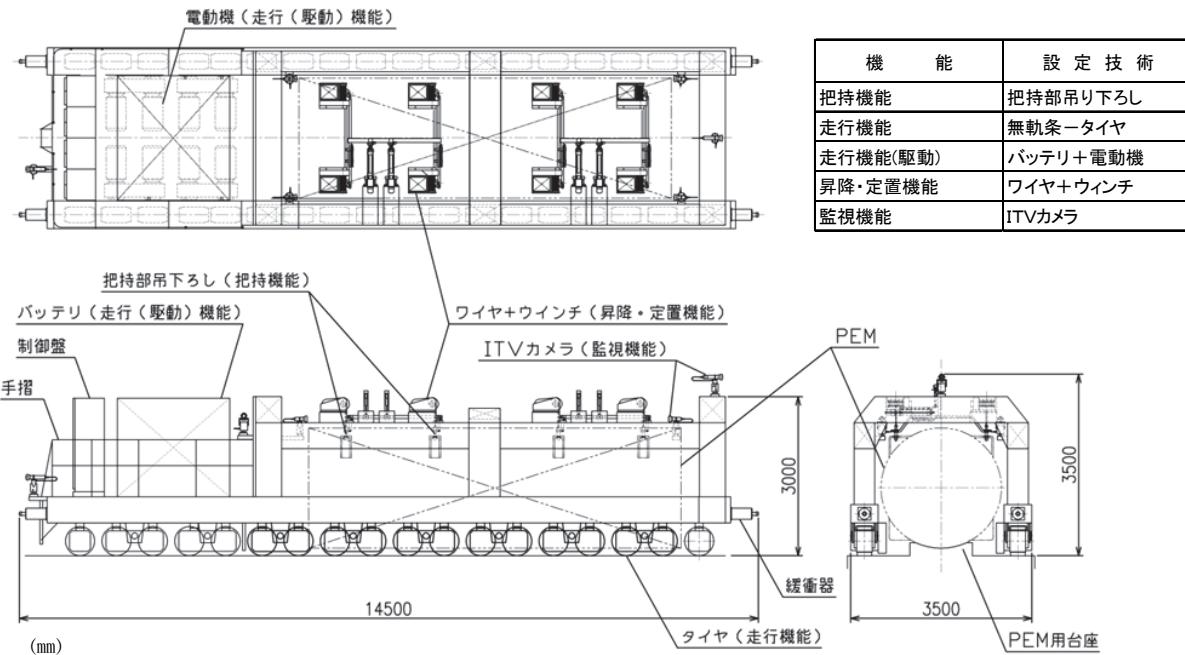


図-3 処分坑道 PEM 搬送・定置装置の概念図

表-7 処分坑道 PEM 搬送・定置装置の実現可能性の評価結果

設計因子	処分坑道 PEM 搬送・定置装置の実現可能性の評価の指標	処分坑道 PEM 搬送・定置装置の実現可能性の評価結果	主な技術開発課題
閉鎖後長期の安定性	人工バリアの長期安定性	・残置物がないこと	・残置物は発生しない
操業安全性	放射線安全	・遮へい機能は不要	・遮へい機能はなし
		・放射線による著しい劣化や誤動作の可能性が低い、または対策ができること	・タイヤなど有機材料・部品に対する放射線劣化の検証が必要
工学的成立性/品質保証	一般労働安全	・労働安全衛生法を順守できること	・振動騒音、排ガスは法規制を順守可
		・装置に起因する火災、爆発、衝突、積荷の落下等の災害防止の対策ができること	・トンネル建設工事等での実績から、防災の対策あり
工学的成立性/品質保証	工程	・搬送速度は 1km/h 以上を確保できること	・走行機能は搬送速度を確保できる。 作業時間はシステムの検討が必要。 ○
		・横置き定置方式に適用できること	・横置き定置できる昇降・把持機能である
	定置作業性	・緩衝材の種類は PEM 方式	・PEM 方式のため評価対象外
		・水平坑道(処分坑道)で作業できること	・水平坑道で作業できる
		・深度 1,000m で作業できること	・深度 1,000m で作業できる
		・内空断面高さ 5m、幅 5m の幌型坑道で作業できること	・装置概寸: 高さ 3.5m、幅 3.5m、作業時の作業範囲の拡大なし
		・対象物の PEM 容器が取り扱えること	・能力を有した装置を設計対応可能
		・遠隔操作、自動運転の実績があること	・既存技術はあるが、地下坑道での実証が必要 ○
		・定位精度は 10cm 以内	・昇降・定位のガイド機構の検討が必要
		・振動・衝撃は 10G 以内	・ダンパー等で抑制可能である
	技術開発の進展	・実用レベルあるいは実証実験レベルであること	・個々の機能は実用レベル、機能を組み合わせたシステムの検証が必要
	効率性(物流)	・上記「工程」と同じ	・「工程」にて評価
工学的信頼性	地下環境への適応性	・付帯設備がないこと、少ないこと	・付帯設備はない
		・坑内温度 45°C で作業できること	・坑内温度 45°C で作業できる
		・坑内湿度 100% で作業できること	・坑内湿度 100% で作業できる
		・滴水程度で作業できること	・滴水で作業できる
		・段差 ±2cm で作業が可能なこと	・作業可能である
社会経済的側面		・路盤の地耐力への対応ができる(一軸圧縮強度 50~100MPa)	・車輪数の設計などで対応可能
		・1 日 5~10 体の定置への柔軟性があること	・走行機能は搬送速度の柔軟性を持つ。 作業時間はシステムの検討が必要。
		・故障時の重大災害に対する対策がとれること	・対策はとれるが、対象物の健全性評価は必要
回収可能性	・再移動(逆工程)が可能なこと	・再移動(逆工程)はできる	
社会経済的側面	・上記「技術の進展」と同じ	・「技術の進展」にて評価	

- 日本原子力研究開発機構、平成 26 年度地層処分技術調査等事業使用済燃料直接処分技術開発報告書、2015
- 日本原子力研究開発機構、平成 25 年度地層処分技術調査等事業使用済燃料直接処分技術開発報告書、2014
- 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遠隔操業技術高度化

調査報告書参考資料(技術メニュー)、遠隔溶接・検査 遠隔ハンドリング・定置技術、2005

- 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
- 中島均他、PEM システムの基本形の検討(その 2 人工バリア一体型モジュールの検討)、土木学会第 68 回年次学術講演会(平成 25 年 9 月), CS11-056

5. ハル・エンドピースの地層処分に向けた廃棄物データの整備に関する研究計画の検討

◇事業の概要

ハル・エンドピースは使用済燃料の再処理工程で、燃料棒の裁断及び核燃料の溶解工程から排出されるジルカロイ製の被覆管及びインコネル製の支持バネ等と、燃料棒の上下に接合されていたステンレス鋼製のエンドピースからなる廃棄物であり、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⁾。

ハル・エンドピースに含まれる放射性核種のうち、特に処分後の影響が大きい核種は、ジルカロイ及び炭素鋼に含まれる非放射性の窒素及び炭素の放射化によって生成した炭素 14 である²⁾。

当センターでは、II.3-2 で述べたとおり、経済産業省からの受託事業において、TRU 廃棄物の地層処分の安全評価の信頼性向上を目的として、ハル・エンドピースに含まれる炭素 14 のインベントリ評価、ならびに放出挙動のモデル化及び評価を実施してきた²⁾³⁾。

一方で、廃棄物の処分に向けては、廃棄物に含まれる放射性核種の総量（インベントリ）の推定や、廃棄物の受け入れ等に必要な廃棄体確認等が必要となる核種濃度の推定・設定等のために、今後、炭素 14 以外の放射性核種に対するデータ取得が必要となるものと考えられる。

そこで、本検討では、これまでに実施した炭素 14 のインベントリ設定方法を参考しつつ、その他の核種のインベントリに関するデータ取得の手法及び計画について検討することとした。

このような検討には、対象とする被覆管及びステンレス鋼等に含まれる添加元素や不純物等に関するデータや、放射化計算を実施するための運転履歴に対するデータなど、材料メーカーや電力会社等が所有するデータを用いる必要がある。そのため、本検討においてはそのようなデータを収集するための体制及び収集方法について検討を開始した。

今後、データ取得体制及びその収集法法に基づいて、廃棄物データの整備に関する研究計画を立案していく。

- 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 年 9 月
- 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 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（第 2 分冊）－炭素 14 長期放出挙動評価－、2014

6. 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

我が国の原子力政策の基本方針として、高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けた取組の抜本強化、使用済燃料の貯蔵能力の拡大、放射性廃棄物の減容化・有害度低減のための技術開発、再処理やプルサーマル等の推進などがエネルギー基本計画で示されている¹⁾。そのため、今後は、これまでとは異なる特性を有する放射性廃棄物が生じることが考えられる。HLW 第2次取りまとめでは、45 Gwd/THM の UO₂ 使用済燃料を再処理する過程で発生する高レベル放射性廃液をガラスで固化したガラス固化体をリファレンスケースとして、その発熱量に基づく処分場の温度解析により、地層処分場の概念設計が実施された。そして、人工バリアおよび天然バリア中の核種移行解析などにより、地層処分の成立性が示されている²⁾。

本事業では、原子力エネルギーの継続利用の観点から現行の地層処分概念に対して、燃料の高燃焼度化、核燃料サイクルにおける分離変換技術の導入など、今後の発電側の条件や先進的なサイクル技術などの導入を見込んだ場合の地層処分概念の成立性への影響について、最新の知見を調査して検討を行い、今後の研究開発課題を整理することを目的としている。初年度となる平成26年度は、以下の項目について調査、検討を実施した。

- ①国内における既往の研究成果の調査、整理
- ②検討の条件、前提の整理
- ③地層処分概念成立性の検討

◇平成26年度の成果

(1) 国内における既往の研究成果の調査

今後発生する放射性廃棄物の特性を把握するために、高燃焼度 UO₂ 燃料、MOX 燃料の利用にともない発生する使用済燃料の放射能及び再処理後に発生するガラス固化体の発熱量について公開文献を基に調査した。また、これらの使用済燃料に対する再処理方法、ガラス固化技術、核燃料サイクルにおける分離技術、高速増殖炉（FBR）や加速器駆動核変換システム（ADS）を用いた核変換技術などの先進的技術について、国の委員会

や研究機関などの報告書から、研究開発の現状及び将来の展望について調査した。

(2) 検討の条件、前提の整理

今後の原子力エネルギーの利用状況を俯瞰しながら、放射性廃棄物が地層処分概念へおよぼす影響を検討する上で前提となる条件を整理した。

現行の地層処分概念では、PWR の UO₂ 使用済燃料（燃焼度 45 Gwd/THM）を 4 年間冷却し、再処理の過程で発生する高レベル廃液をガラス固化して 50 年間貯蔵したガラス固化体を対象としている²⁾。しかし、現時点では 4 年の冷却期間を超える使用済燃料が多く存在している。また、燃料の高燃焼度化も進められており、将来 70 Gwd/THM 程度まで UO₂ 燃料および MOX 燃料の燃焼度を向上させることが検討されている。さらに、放射性廃棄物の減容化・有害度低減を含めた FBR や ADS の研究開発も進められている¹⁾。

UO₂ および MOX の使用済燃料の再処理方法については、PUREX 法だけでなく、他の再処理方法についても研究開発が行われている³⁾。また、日本原燃では、ガラス固化体中心温度の設計目標値は 500°C に設定されており⁴⁾、高レベル廃液の分析値のばらつきやプロセス運転上の変動を考慮して、ガラス固化体の発熱量は 2.3 kW/本を目標として管理されている⁵⁾。しかし、UO₂ 燃料や MOX 燃料では、燃焼度の増加にともない発熱量が増加する。また、相対的に Pu の燃焼が多くなるため、²³⁵U と ²³⁹Pu の核分裂収率の違いにより使用済燃料中の FP に含まれる白金族元素や Mo 量が増加する⁶⁾。再処理にともない発生する高レベル廃液中の白金族元素や Mo の濃度が高くなると、液体供給式直接通電型セラミック溶融炉（LFCM）でのガラス固化に技術的な課題が生じることが報告されており⁷⁾、高燃焼度燃料などのガラス固化には、高周波電磁誘導加熱方式による金属製溶融炉（AVM）やコールドクルーシブル誘導加熱炉（CCIM）が有効になると考えられる。

原子力発電、核燃料サイクル、地層処分に関する前提条件を把握するために、核燃料サイクル－地層処分の関連を図-1 に整理した。

(3) 地層処分概念成立性の検討

現状の地層処分概念では、50 年間貯蔵したガラス固化体の発熱量が 350 W/本程度になること

から、緩衝材の性能を損なうような変質が生じないとされる制限温度（100°C）を下回るように、廃棄体1体あたりの専有面積が確保されている²⁾。高燃焼度 UO₂燃料や MOX 燃料では、Am や Cm などの MA の発生量が多くなる⁶⁾。MA の増加は、ガラス固化体の発熱を長期化させる要因となる。そのため、再処理時の MA の分離などが有効になると考えられる。また、これらの廃棄物を地層処分で受け入れるための方法として、ガラス固化体の貯蔵期間の延長や廃棄体の離間距離の拡張などが考えられる。

- 1) 経済産業省、エネルギー基本計画、2014
- 2) 核燃料サイクル開発機構、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次とりまとめ、1999

- 3) 高速増殖炉サイクル実証プロセス研究会、核燃料サイクル分野の今後の展開について【技術的論点整理】、第28回原子力委員会資料第1-1号、(2009).
- 4) 日本原燃、特定廃棄物管理施設のガラス固化体貯蔵建屋B棟及び再処理施設においてガラス固化体を貯蔵する類似の冷却構造を有する設備における崩壊熱の除去解析の再評価結果報告書(平成17年1月28日)、2005
- 5) 日本原燃、ガラス固化体の製品品質について、http://www.iae.or.jp/wp/wp-content/uploads/2014/09/cycle_201308/03_attachment/attachment_10_r.pdf
- 6) Y. Inagaki, et al., LWR High Burn-Up Operation and MOX Introduction; Fuel Cycle Performance from the Viewpoint of Waste Management, JNST, Vol. 46, Issue 7, pp. 677-689 (2009).
- 7) 日本原子力学会再処理・リサイクル部会、ポジションステートメント「ガラス固化技術」、AESJ-PS019 r0、2012

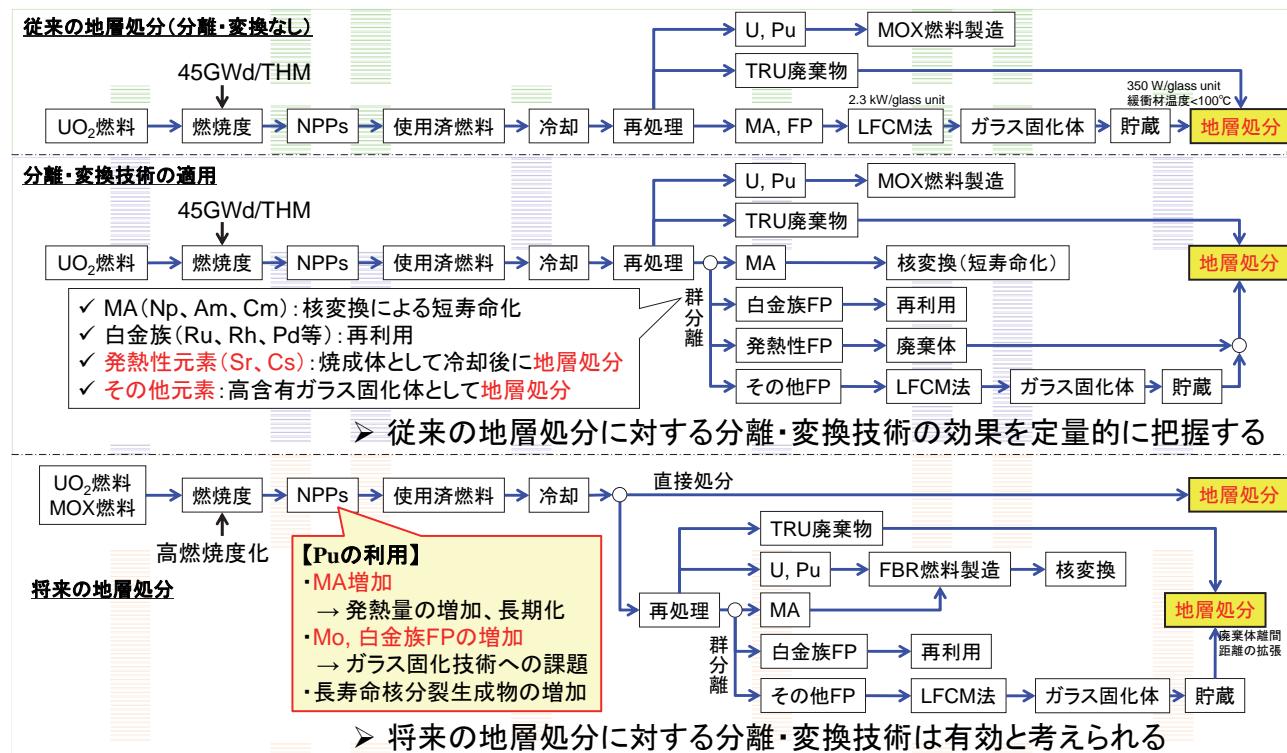


図-1 核燃料サイクル-地層処分関連図（概略版）

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

7. その他の地層処分に関する調査研究

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

(1) 操業期間中の回収可能性に関する技術的検討

高レベル放射性廃棄物の横置き PEM 方式を対象として、回収技術の適用性に関する調査と操業期間中の事故時の回収と復旧に関する検討を行うとともに、回収維持に伴う閉鎖後長期の安全性に関する調査を行った。

操業期間中において廃棄体の回収が実現可能であることの技術的論拠を整備すると共に、廃棄体の落下等の事故が発生した際の回収方法について検討を行った。また、回収維持に伴う閉鎖後長期安全性に関して、操業期間中の坑道開放による水位変化と回復過程を追跡する水理解析体系を構築した。

(This page(p72) is intentionally kept blank.)

III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

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

高レベル放射性廃棄物等の地層処分を中心として、海外における政策、処分事業の実施状況及び処分技術情報、研究開発の現状、処分技術評価の関連情報等の情報・データを収集・分析し、処分技術関連情報等の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¹⁾。

なお、本事業は、経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

◇平成 26 年度の成果

(1) 海外情報の収集・分析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、イスラエル、英國、米国、ドイツ、スペイン、ベルギー、カナダを対象として、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、立地活動や許認可申請・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、資金確保関連等の情報を収集・分析した。また、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・分析した。

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)、データベース管理システムの実行環境及び開発環境のバージョンアップ対応や機能拡充を実施した。



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) 諸外国における廃棄物処分の最新動向に関する調査・分析

地層処分以外の処分オプション（核種分離・変換、超深孔処分）、暫定保管、回収可能性及び使用済燃料の直接処分等に関連する、諸外国の考え方や取り組み、それに至る背景情報を収集し、取りまとめた。

(3) 調査情報の整理・発信・普及

上記(1)、(2)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」(<http://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 75 件掲載した(記事タイトルの一覧は、資料 VI-5 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
<http://www2.rwmc.or.jp>

技術情報冊子の整備として、①『諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について（2015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』(図-3:右) の2種類の資料を作成した。

技術情報冊子①(平成27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。2015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、英國、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、平成26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(平成27年3月発行)は、欧米主要国の地下研究所、処分場候補サイトなどを訪問、視察を企画・検討する際の補助的な資料と活用してもらうことを意図したものである。訪問先として注目される地下研究所、高レベル放射性廃棄物処分場の候補サイト、中間貯蔵施設、放射性廃棄物処分場などの所在地、施設概要のほか、見学方法、問い合わせ先などの情報を最新化してまとめた。

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 平成26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26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、2015

III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

2. 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査

◇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）を初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先進的な研究開発を実施するとともに、今後の我が国の基盤研究開発の課題を検討することで、処分実施主体が将来処分事業を進めるにあたって必要となる技術基盤の整備を図ることを目的とした。

調査においては、処分技術に関連する先進的な研究開発テーマ及び研究実施者を公募により選定し、当該テーマに関する研究開発を実施するとともに、研究の実施に係る進捗管理や成果のとりまとめを行った¹⁾。

なお、本事業は、経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

◇平成 26 年度の成果

(1) 処分技術に関連する先進的な研究開発テーマの選定

平成 26 年度より 4 カ年の計画で研究を実施することを前提として、基礎的な研究ではあるものの、国で実施する政策や事業に関連あるいは反映できると考えられる、5つの分野（地質環境、工学技術、性能評価、直接処分、及び社会的な課題解決に関する分野）を対象とした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定委員会を設置し、当該委員会での審議により、6 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

選定した 6 件の研究テーマの進捗管理等のための検討委員会（親委員会及び分野別委員会（地

質環境、工学技術、性能評価、直接処分の 4 分野））を設置し、平成 26 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。

また、上記の検討委員会によるチェックアンドレビューの他に、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 26 年度より開始した 6 件の研究テーマの概要と本年度の成果概要を示す。

①断層周辺の地下水流动特性および物質移行特性に関する包括的研究（研究者：京都大学 柏谷公希）

本研究は、断層周辺の地下水流动及び物質移行における断層のパスあるいはバリアとしての機能を明らかにすること、さらに、断層の地下水流动および物質移行におけるパス、バリアとしての機能を評価するための手法を構築することを目的としている。

平成 26 年度は、研究対象となる断層を選定するため、文献調査を行った。その結果、独立行政法人日本原子力研究開発機構瑞浪超深地層研究所の主立坑断層²⁾を主要な研究対象として研究を実施することとした。

また、近年、地下水の環境トレーサーとして用いられている六フッ化硫黄（SF₆）の分析を行うために、分析前処理装置を作製し、分析のためのプロトコールを整備した。

②岩石き裂の治癒作用を利用した不連続面のバリア性能向上に関する研究（研究者：鳥取大学 奈良禎太）

岩盤内では、き裂や空隙のネットワークが流体の流路となるため、遮蔽性が大きくなるためには、き裂の進展が防がれるとともに、き裂や空隙を閉塞させるプロセスが重要となる。本研究では破壊力学試験と透水試験により、岩石内の節理や断層の遮蔽性（バリア性能）の特性を調査する。

平成 26 年度は、破壊力学及び透水試験を行う環境を整備し、予備試験を実施した。破壊力学試験では、ダブルトーション法による測定を 1~2 週間程度連続で行うことにより、長期連続測定によるき裂進展データを取得できる環境を整備した。大島花崗岩を試料として用いた予備試験では、

従来よりも低いき裂進展速度の測定に成功し、応力拡大係数とき裂進展速度の関係が取得可能であることを確認した。

透水試験については、稻田花崗岩を試料として、トランジエントパルス法による予備試験を行い、透水係数に関するデータが取得可能であることを確認した。

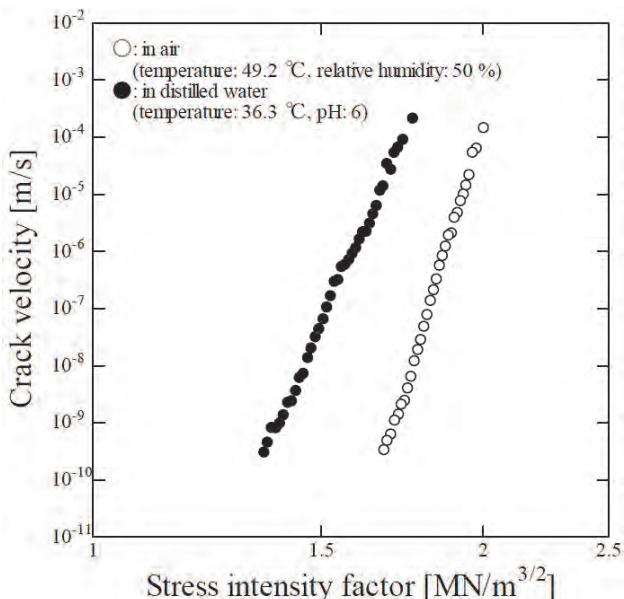


図-1 大気中・水中双方の環境下で得られた大島花崗岩でのき裂進展速度と応力拡大係数の関係

③天然バリアと人工バリアの力学特性を考慮した放射性廃棄物処分施設の長期的な力学挙動予測システムの開発（研究者：福島高専 金澤伸一）

本研究は、処分施設の建設から閉鎖までの期間に着目し、岩盤とベントナイト緩衝材の力学特性を考慮できるモデルを組み込んだ、熱／土／水／空気連成有限要素解析を実施し、建設から供用までの力学挙動を連続して解くことで、岩盤とベントナイト緩衝材の長期的（数十万年オーダー）な力学的相互作用を把握することを目的とする。さらに、解析条件の選定や解析結果の評価方法までの一連の流れを整備し、処分施設の長期的力学挙動の予測システムを開発することを目標とする。

平成 26 年度は、ベントナイトに関する温度変化の影響を考慮した膨潤量・膨潤圧試験、温度変化を考慮した圧密試験、温度変化による一軸強度データを取得するための試験環境の整備を行った。

解析シミュレータの開発・高度化については、地下空洞の安定性を確認するための有限要素（FEM）解析のために、FEM 解析コードにコンプライアンス可変型構成式である大久保モデル³⁾を組み込んだ。また、開発した解析コードの検証として、一軸圧縮試験解析を行い、プログラムが正しく計算されていることを確認した。

④硝酸塩影響評価のための高イオン強度下におけるアクチノイドの溶液化学的研究（研究者：京都大学 小林大志）

本研究では、TRU 廃棄物に含まれる硝酸塩が処分施設内や近傍においてアクチノイドの移行挙動に与える影響を定量的に評価するため、高濃度硝酸ナトリウム溶液中でのアクチノイドの錯生成、酸化還元、コロイド挙動について検討するとともに、反応に関わる熱力学データを取得する。また、高イオン強度下でのアクチノイドの熱力学モデルを提案し、硝酸塩影響下でのアクチノイドの化学的挙動の理解及びその定量的評価につなげることを目的とする。

平成 26 年度は、高イオン強度下での 4 価アクチノイドの錯生成反応に関する文献の調査を行い、これまでの知見を整理した。4 価のトリウム (Th)、プルトニウム (Pu) 及びアクチノイドの類似元素であるジルコニウム (Zr) について、硝酸錯体及び炭酸錯体の熱力学データに関する調査を行い、4 価金属と硝酸イオンの錯生成反応については、地下水条件下（中性～アルカリ性 pH）では硝酸錯体の寄与は低下するが、イオン相互作用係数が寄与することが報告されていた⁴⁾。また、炭酸イオンとの錯体形成では、Zr、Th、Pu の種類によって異なる炭酸錯体化学種が報告されていること、一方で、高イオン強度における実験値は不足しており、これらの熱力学データが必要であることが考えられた。さらに 4 価金属の加水分解反応のデータから、4 価水酸化物コロイド種の挙動について、熱力学的な解釈が可能であることが示唆された。

また、高イオン強度下での実験・測定に向けた予備実験として、高濃度の NaNO_3 及び NaCl 溶液下での pH 測定及び酸化還元電位 (Eh) 測定を行い、pH については実測値から水素イオン濃度 (pHc) を決定するための換算係数を、各イオン強度において求めた。Eh については、安定な酸化剤、還

III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

元剤の組み合わせであるフェリシアンーフェロシアン系 ($\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}/\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$) の Eh 値を低濃度から高濃度までの NaNO_3 及び NaCl 溶液下で測定した。その結果、Eh 値のイオン強度依存性が特異イオン相互作用理論(SIT)によるモデルにより良く再現できた。

⑤地層処分の性能評価の精緻化を目指した薄片状雲母を用いた核種の収着メカニズムに関する基礎的研究（研究者：東北大学 千田太詩）

本研究は、雲母の異方性が核種収着挙動に与える影響について基礎的知見を取得し、核種移行評価への反映方法を併せて提示することにより、天然バリア中の核種移行評価(地層処分システムの性能評価)に資することを目的とする。具体的には、雲母が有する異方性が核種収着挙動に与える影響について基礎的知見を取得する。さらに、取得データをもとにした拡散・収着を考慮した二次元数値解析を実施するとともに、雲母薄片への核種収着に重要な因子を整理し、核種移行評価への反映手法を提示する。

平成 26 年度は、黒雲母薄片及び緑泥石を用いたユウロピウム(Eu)の収着試験に着手した。黒雲母薄片を用いた Eu(III)の収着試験では、試験開始後に水溶液中の Eu 濃度が急激に減少したが、その後減少は緩やかになった。試験結果から、固相表面に Eu(III)が収着した後に、カリウム(K)とのイオン交換を伴いながら層間内部へ Eu が収着及び拡散が進行するメカニズムが考えられた。既往研究では粉碎した黒雲母試料に多量に存在する断口部への速やかな核種収着が観察されたのみである⁵⁾のに対し、本研究で試験を行った薄片状試料対しては収着と拡散という二つの過程が存在すると考えられ、花崗岩表面に断口部が露出する確率が高い黒雲母には更なる核種遅延効果が期待できる可能性が示唆された。

また、収着試験後の黒雲母薄片を用いた蛍光分析及び二次イオン質量分析(SIMS)について、本研究の収着試験条件における黒雲母薄片内の Eu の拡散挙動観察に適した分析条件の設定を行った。

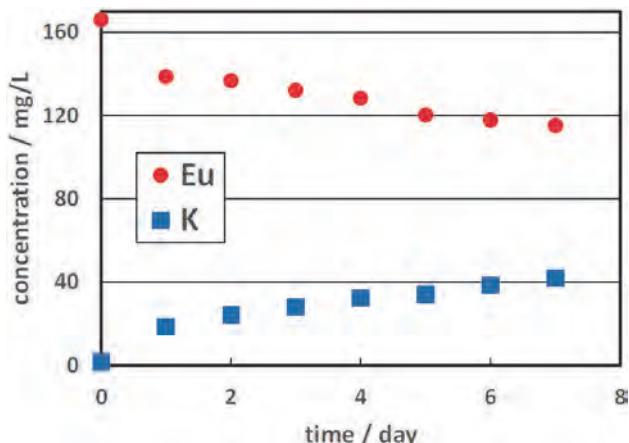


図-2 黒雲母薄片に対する Eu(III)収着と K 溶出の経時変化

⑥高レベル放射性廃棄物処分に関わるアジェンダ・セッティング（政策課題設定）の基礎的研究（研究者：東京大学 小松崎俊作）

本研究は、処分事業に対する国民・社会の理解促進と信頼性向上をはかる上での前提条件となるアジェンダ・セッティング（政策課題設定）についての研究を通じて、社会的意意思決定に関する研究の効率的な進展に貢献し、処分事業の社会的側面に関する理解を深めることを最終目標とする。そのために、(i) 高レベル放射性廃棄物処分のためのアジェンダが設定されるための要因を抽出し、(ii) 我が国における高レベル放射性廃棄物処分のために有効なアジェンダ・セッティングのあり方を提示することを目的とする。

平成 26 年度は、既存の様々な分野における事例について政治過程分析を行い、アジェンダ・セッティングが起こる要因を抽出し、アジェンダ・セッティングの類型化を試みた。医師不足、郵政民営化、ドイツのシュレーダー政権下における脱原発の決定等のアジェンダ・セッティングが行われた事例を 10 例選定し、次に、それぞれの事例についてその政策過程を分析し、アジェンダ・セッティングの類型化と事例を分類した。類型化（仮説）した結果から、放射性廃棄物処分に関するアジェンダ・セッティングは、官僚ないし専門家が、当該政策課題とは離れた領域における小さな政策による波及効果で起こすことを目指すというオプションが提示された。

また、以前に実施されたアンケート調査のデータについて社会心理学的分析を行い、東日本

大震災ならびに福島第一原子力発電所事故が高レベル放射性廃棄物処分政策や原子力政策に対するステークホルダーの態度に与えた影響を分析した。高レベル放射性廃棄物処分施設受け入れへの態度の変化については、震災後に一時受け入れに好意的に転じていた態度が、震災2年後では一転して大幅に低下（否定的に変化）していた。また、被害規模の認知は事故後に有意に上昇した後は変化せず、また、原子力発電のメリットと従来考えられていた経済性認知は継続して低下し続けていた。このような原子力関連施設に対する認識が、高レベル放射性廃棄物処分施設受け入れへの態度において否定的な結果につながっていることが示唆された。

- 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（国庫債務負担行為に係るもの）報告書（平成26年度分）、2015
- 2) 鶴田忠彦他、超深地層研究所計画 主立坑断層を対象としたボーリング調査結果報告書 JAEA-Technology 2012-001、2012年3月
- 3) 大久保誠介他、非線形粘弾性モデルによる坑道変形のシミュレーション、日本鉱業学会誌、Vol.103, No.5、1987
- 4) Rand, R., Fuger, J., Grenthe, I., Neck, V., Rai, D.: Chemical Thermodynamics of Thorium, In: Chemical Thermodynamics (Eds.: F. J. Mompean et al.) Vol. 11, Elsevier, North-Holland, Amsterdam, 2009
- 5) 原子力安全研究協会、岩石と核種の相互作用に関する調査研究(III), PNC-TJ 114 84-01, 1984

III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

3. 安全規制及び安全基準に係る内外の動向調査

◇事業の概要

本調査では、我が国の放射性廃棄物処分に係る安全規制体系の整備に資するため、放射性廃棄物処分に関する安全規制の枠組み及び安全評価手法、廃棄物の管理と処分のあり方等について、諸外国における動向の調査を行った。

本調査においては、以下の国及び国際機関等を調査対象とした。

表-1 調査対象国及び国際機関

スウェーデン	スイス	スペイン	国際原子力機関 (IAEA)
フィンランド	カナダ	ベルギー	経済協力開発機構／原子力機関 (OECD/NEA)
米国	英国	中国	国際放射線防護委員会 (ICRP)
フランス	ドイツ	韓国	欧州連合 (EU)

なお、本事業は、原子力規制委員会原子力規制庁の委託により実施したものである。

◇平成 26 年度の成果

(1) 諸外国における安全規制等に関わる最新情報の調査・整理

調査対象国、及び調査対象国国際機関等に関する放射性廃棄物の処分等についての最新知見等を調査し整理した。

具体的には、平成 25 年度及び平成 26 年度に公表された規制関連情報、対象国の実施主体等の取りまとめた報告書、許認可申請書などを中心に調査し、以下に示す事項について、規制での取扱いの状況、事業者の取組状況、状況に至る背景及び過程に関して進捗が見られるものについて整理を行った。

- ① 立地選定段階における規制側の関与（法的根拠の有無、法的根拠が無い場合の関与のよりどころ等）
- ② 評価期間の考え方（安全機能、各バリア要素との関係も含む）

- ③ 処分場の最適化と BAT（利用可能な最善の技術）
- ④ 人間活動の影響（人間侵入、人為事象シナリオ）
- ⑤ 長期に係る線量・リスク基準・代替指標と解釈・信頼性・根拠
- ⑥ 性能評価・安全評価における不確実性の取扱い
- ⑦ セーフティケースの内容とレビュー
- ⑧ 社会・ステークホルダーとのコミュニケーション
- ⑨ 定期的な安全レビュー（PSR）の取扱い、結果の反映方針
- ⑩ 可逆性と回収可能性
- ⑪ 許認可終了後の制度的管理（管理の方法、主体、管理終了の判断等）
- ⑫ 能動的な制度的管理（モニタリング・サーベイランスのあり方等）
- ⑬ 受動的な制度的管理（文書・マーカ等の記録の管理等）
- ⑭ 環境影響評価並びにヒト及び動植物への放射線学的影響評価
- ⑮ 処分場の操業時における放射線事象等の異常事例について、異常の概要、原因、事業者及び規制者の対応等の情報
- ⑯ その他、特記すべき動向

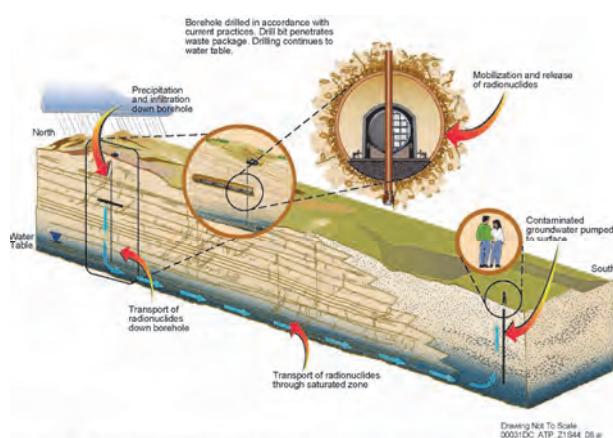


Figure 4-196. Conceptualization of Human Intrusion Scenario in the TSPA-SR Model

図-1 米国ユッカマウンテン処分場の性能評価での人間侵入シナリオ（様式化）

(2) 放射性廃棄物の処分における管理の考え方の整理

放射性廃棄物の取扱いとして、暫定保管及び

III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

長期保管（以下「長期保管等」という。）に関して、(1)に示した対象国等の情報について次の視点で調査した（例：表-1）。

- 長期保管等について検討の際に考慮された概念
- オプション（地上、浅地下、深地下）
- 長期管理等が有効とされた時間スケール
- 処分と比較したメリット・デメリット
- 処分、または長期管理等を選択した経緯や議論の経過等

また、放射性廃棄物処分の廃棄体の定置後に考慮が必要となる、閉鎖や能動的な制度的管理の終了の判断、処分の終了に伴う管理主体の移動のタイミングと判断の考え方等に係る情報を調査した。

表-1 英国で検討された長期管理オプション

1. 貯蔵（a.長期中間貯蔵、b.永久貯蔵）	9. 沈み込み帯への処分
2. 短寿命放射性廃棄物の浅地中処分	10. 宇宙処分
3. 地層処分	11. 希釀及び分散
4. 段階的地層処分	12. 分離及び核種変換
5. 直接注入による処分	13. プルトニウム及びウランの原子炉での燃焼
6. 海洋処分	14. 廃棄物を減容するための焼却
7. 海洋底下処分	15. 炉で金属を溶融して減容
8. 氷床処分	

(3) 海外現地調査

(1)及び(2)の調査について、海外現地調査を行い、放射性廃棄物処分実施主体、規制機関等から聞き取り調査を実施するとともに、放射性廃棄物処分関連施設を訪問し情報収集を行った。

本年度の調査においては、次の国、機関、及び関連施設を対象に訪問調査を行った。

①スウェーデン

- ・スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB社）
- ・放射線安全機関（SSM）

②スイス

- ・放射性廃棄物管理共同組合（NAGRA）
- ・連邦原子力安全検査局（ENSI）

③フランス

- ・放射性廃棄物管理機関（ANDRA）
- ・原子力安全機関（ASN）
- ・ビュール地下研究所

なお、海外訪問調査等の機会を活用し、(1)及び(2)の調査結果について、内容の確認も実施した。



図-2 スウェーデン放射線安全機関（SSM）による許認可申請書の審査計画

III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

4. 放射性廃棄物処分の制度的管理に関する調査

◇事業の概要

本調査では、我が国第一種廃棄物埋設の事業（地層処分）及び第二種廃棄物埋設の事業（余裕深度処分）における制度的管理、可逆性及び回収可能性、人間侵入シナリオの考え方等に関する技術的知見の整備を目的として、諸外国の現状を調査、整理した。

本調査では、以下の国及び国際機関等を調査対象とした。

- ・スウェーデン
- ・フィンランド
- ・米国
- ・フランス
- ・スイス
- ・英国
- ・ドイツ
- ・スペイン
- ・チェコ
- ・ノルウェー
- ・国際原子力機関（IAEA）
- ・経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA）
- ・欧州連合（EU）

なお、本事業は、原子力規制委員会原子力規制庁の委託により実施したものである。

◇平成 26 年度の成果

(1) 制度的管理に関する調査

調査対象国、国際機関等における放射性廃棄物処分の制度的管理に関して、規制要件、計画・実施されている能動的な制度的管理及び受動的な制度的管理の調査を実施した。

能動的な制度的管理については、監視項目（モニタリング・サーベイランスの項目）、監視期間、監視地点、監視で取得する情報の判断、保存及び活用先を調査した。また、受動的な制度的管理については、文書・マーカ等による記録保存の考え方、その考え方に基づいた制度設計、管理が保証可能な期間等を調査し報告した（例：図-1）。

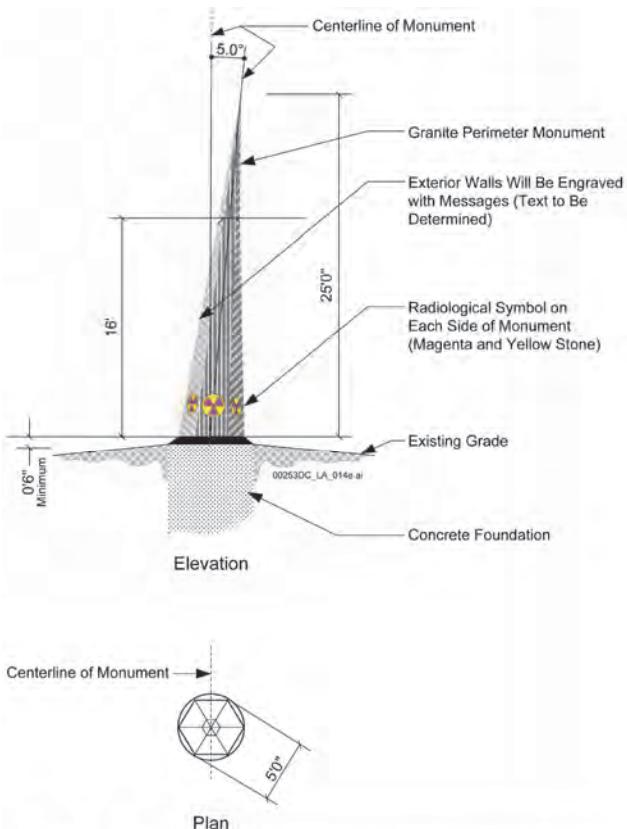


Figure 5.8-4. Site Perimeter Monuments and Postclosure Controlled Area Markers

図-1 米国ユッカマウンテンでのサイト外辺部モニュメント及び閉鎖後管理エリア標識

(2) 可逆性及び回収可能性に関する調査

調査対象国、国際機関等における放射性廃棄物処分の可逆性及び回収可能性について、規制要件、それらの考え方に基づく安全設計への反映状況、回収技術の検討状況を調査した。また、我が国第二種廃棄物埋設の事業における操業段階及び保全段階に当たる期間における可逆性及び回収可能性についての考え方を取りまとめた。

(3) フランスにおける放射性廃棄物の管理に関する調査

フランスにおいては、1991年に法律が施行され、長寿命廃棄物に関する研究方針が明示された。この方針では、長寿命廃棄物の選別から処分に至るまでの廃棄物管理の一連のプロセスを考慮した3つの方針（核種分離・変換、地層処分、コンディショニングと長期貯蔵）で研究を進めることとされ、この方針に従い研究が進められてきた。

本調査では、これら3つの方針のうち、「コン

「ディショニングと長期貯蔵」に関する研究成果を整理するとともに、最終的な放射性廃棄物の管理方法を決定するに至るまでの経過情報や研究段階ごとの判断、3つの放射性廃棄物の管理方法ごとのシナリオ及び管理期間についても整理を行った。

(4) 我が国の事業の廃止に相当する行為の判断に関する調査

我が国の廃棄物埋設事業の廃止に相当する行為の判断について、調査対象の諸外国の規制要件、具体的な規制項目及びその基準、実施主体の廃止措置計画を調査した。調査に当たっては、実施主体や規制機関が決定に至った、議論の内容や根拠などの背景情報についても可能な限り調査した。

(5) 人間侵入シナリオの考え方に関する調査

国際原子力機関（IAEA）において実施されている、人間侵入シナリオに関するプロジェクト HIDRA（Human Intrusion in the context of Disposal of Radioactive Waste）において、人間侵入シナリオがどのように考えられているのかを公開情報に基づき取りまとめた（例：図-2）。

また、HIDRA プロジェクトにおける議論のベー

スとなる調査対象国、国際機関等の事例を整理した。各国の事例については、人間侵入の開始時期と管理期間の関係、想定されている人間侵入シナリオの内容（例：図-3）をはじめ、検討開始からの議論の内容、最終的な結論に至った経緯についても調査した。

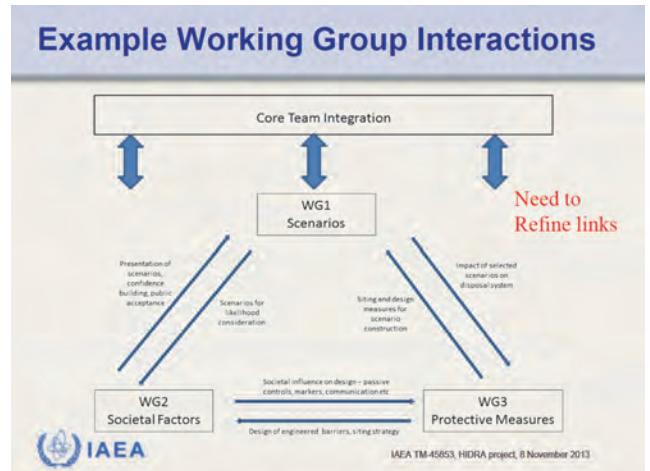


図-2 HIDRA プロジェクトのワーキンググループの相関図

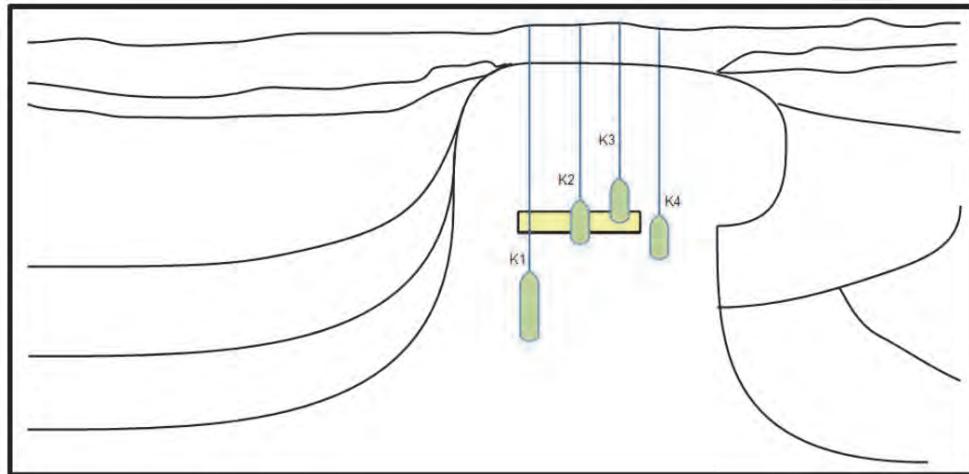


図-3 ドイツ、ゴアレーベンにおける予備的安全評価における人間侵入シナリオ「地下空洞施設の建設」

III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

5. 福島第一原子力発電所事故で発生する廃棄物等の処理処分に関する検討

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災によって発生した津波によって、東京電力福島第一原子力発電所（以下福島第一発電所という）では、原子炉内の燃料の溶融、水素爆発に伴う損傷等、甚大な被害が発生した。その結果、初期に原子炉の冷却のため投入された海水等による多量の塩分を含む汚染水や、その汚染水を処理する目的で使用された吸着材等、多岐にわたる廃棄物が現在も発生し続けている。これら廃棄物は、事故によりコントロールできない状態で発生したものであり、破損した燃料に由来した放射性核種を含んでいることや、事故直後の炉心冷却に用いた海水の成分を含む可能性があること、汚染のレベルが多岐にわたりその物量も大きいこと等、従来の原子力発電所で発生する放射性廃棄物とは異なる特徴がある。

事故当初は、廃棄物に関する情報が極めて限られており、また、汚染水の処理等で発生する吸着材や安定化材に含まれる放射性核種の種類、量に関する分析結果も限られているなど、廃棄物の処理・処分の方策を特定の技術に基づいて検討していくことは困難であった。そのため、適用可能性

のある技術について幅広く調査し、その特徴、適用範囲などを基に、次第に明らかになる事故廃棄物の性状にあわせて順次絞り込みを実施し、最終的に実用化の可能性のある技術を選定することが有効と考えられた。

この考え方に基づき、当センターでは、平成23年度から国内外の処理技術について、以下の各観点から幅広く調査してきた。

- ① 原子力発電所での廃棄物処理において実績のある技術 およびそれから派生した技術
 - ② 国内外の研究機関で、放射性廃棄物の処理・処分への適用が検討された実績のある技術
 - ③ 塩分を含む廃棄物の固化について国内外で発表された技術

その結果は、図-1に示すように処理技術の特徴を基に、対象とする廃棄物（ゼオライト、スラッジ、燃料デブリなど）ごとに、溶融固化、マトリックス固化、容器収納等のグループにまとめた「取りまとめ表」と、個別の処理技術の詳細を記述した「個別技術調査表」として取りまとめた。

これらの成果は、東京電力ならびに日本原子力研究開発機構と情報共有され、処理技術のデータベース化にも利用されている。

— 廣角及窄角顯微處理技術在動物研究上 —

1. まとめ

対象腐敗物	状況	試験技術名称	概要	出典/参考文献
セオライト	保管容器 40 巻、 10E14BV/ ml オーダー	①-0、 セメント固化。 ①-1、 セメント固化。 ①-2、 セメント固化。 ②-1、 ジオポリマー固化	実験所の低レベル放射性廃棄物の固化処理に実績大。レフアレンジとして指載。 モルス・スケーン凍分場の廃の廻し、フラグ用のsoft concreteは該水系地下水環境では不適だが、その他のセメントを複数出来る可能性あり。 アルカリラグスセメントを用いて固める。イドラ・ラミネシングまたはアワドラム・スキシングのどちらでも耐応可能。 ジオポリマー（無機アルミニウム配合剤）により固化。放射性廃棄物実験室ではラジカルの固化は実験室規模で実施。	日本、 CDEI 日本、 日本、 PNS(トグル -)
		②-2 *、 無水固化。	粒状の放射性廃棄物をアルミニウムアート适合剤からなるパイングで固めしるに当たり、固化材中の水分を除去して水素発生を防止する「無水固化」を利用。	スマス
		②-3、 水ガラス固化。	水ガラスと硫酸ナトリウムを主成分とする粉末状の水硬性材料である。低レベル放射性廃棄物（ホウ酸ソーダ、硫酸ソーダ、硫酸等）の固化材料として使用されている。セメント固化が難しい廃棄物に使用される。	太平洋
		②-4 金属マトリックス (ビロード)固化	ペルギー-ECMに於けるPatent DE691261内の実証設備用に用いられた技術。キャニスター内でホウ酸ガラス(ビロード)と鉛を温めし、鉛膏を溶解する熱処理法。図はその VIBROSETT ブロックとする。熱伝導性が極めて高く、廃熱量の高い廃棄物パッケージや高レベル廃棄物の固化に適しているといわれている。	DWK
		②-5、 ジオポリマー	浄水場のスラッシュラン山路路のジオポリマー固化について、試験	B.P.S.I

③ 处理技術の取りまとめ表の例

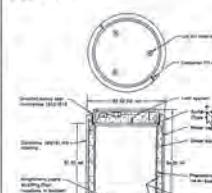
会社 調査対象会社名		調査項目	結果
企業	今立 東芝ほか	機器構成名：HDG(High Intensity Discharge)	概要：TBDの供給小形炉心システム EPIKOR II の過分電流、コンクリート側で最も小さな 300 年間の安全性、(耐震性)を確保。Portland で販売された。EPIKOR II ライナーを固化処理しないで、複数の Part E の Class C 関係としてオーバーパックすることによって、荷重遮断分場で分けるためが開拓された。この関係性は正確である。
		放射性廃棄物適用有無：TBD で実現。	
インバータ分離機器・換気装置	・A ・B ・C	原理フロー	
今立 東芝ほか	・A ・B ・C		耐食パリアとして内側にポリエチレンの隔離ライナー、フェノール樹脂ゴムゴムライナーを配置。外側アルミニウムにより腐食の化学活性を低減する。また、EPIKOR II 密着部から発生するガスを逃すためのバントシステムが配置されている。
イン国内放射性廃棄物品質管理 部	・D ・E ・F		EPIKOR II 密着部から発生するガスを逃すためのバントシステムが配置されている。
ヒックサ神経	・A ・B ・C		EPIKOR II 以上とベント熱で蓄積されるガスまでを吸収できる緩衝機能を有する。
コンサルタント	・A ・B ・C	原理フローの説明：	逆へ、能動的ディファクター（9 段階）で、操作するには十分ではないが、事例などは 10 段階である。EPIKOR II を取扱した経験は、78 時間である。
ドイツ原子炉燃焼処理会社	・D ・E ・F	物理条件（温度、圧力、空気量、DE、良質化燃料粒子尺寸など）：	蓄積部の厚さは 160cm、蓄積容積は 279
		試験、コヨーティ等：	c m、内径には 280cm、外径には 155cm が想えられる。
		溶融化：(化成ベース)：	
		固形化方法 (系統)、一時貯蔵装置、空気導入、ガス吸収、核物排出量、成分溶出率など：	
		分離装置としての実証試験を実施するため、ベント熱交換器、薄下限流量、ビン式過濾器、リーケー試験等の評定試験が実施されている。	
		NuG の存在状況：	
		技術、医療の問題：	
		NaCl 回路の腐食性環境への影響傾向性：	
		耐熱性、耐塗装性、水素ガス生成抑制性、封止性：	
		出典：	
Engineering GmbH		・Sato	
		EPICO b. 個別技術の調査表の例	led web

図-1 廃棄物処理技術の調査表の例

III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究

6. 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26年度版）」を作成した。

(2) 学会による研究開発課題の検討（原子力事故廃棄物）

福島第一原子力発電所構内の廃棄物の処理処分に向けて、日本原子力学会特別専門委員会において、以下の検討を行い、その成果をまとめた。

- ・今後の廃棄物の処分に向けた処理、処分概念の検討等において必要となる、重要核種（評価対象核種）の選定方法

IV. 放射性廃棄物処分への理解促進

IV. 放射性廃棄物処分への理解促進

1. 地層処分実規模設備運営等事業

◇事業の概要

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の報告書中間取りまとめ「～最終処分事業を推進するための取組の強化策について～」(平成19年11月1日)において、『国は、深地層の研究施設等を活用して、国民が最終処分事業の概念や安全性を体感できるような設備を整備し、国民全般や最終処分事業に関心を示した地域の関係住民に対する広報に用いれば、理解を促進することができる。このような観点も盛り込んだ形で研究開発を進めるべきである。』としている。

資源エネルギー庁の基盤研究開発では、平成20年度から平成25年度に「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）」を実施した¹⁾。上記事業は、実規模・実物（実際の放射性廃棄物は使用しない）を基本とし、人工バリア材（緩衝材）の定置技術、人工バリア材等処分場の操業に係る工学技術の実現性を検証する地上実規模施設である「地層処分実規模試験施設」の整備を実施した。

具体的には、「第2次取りまとめ」²⁾や原子力発電環境整備機構の公募資料等に示された我が国の地層処分の概念（多重バリアシステム）、人工バリア材料等の処分場の操業に関する工学的技術について、実規模・実物を基本とした施設（実際の放射性廃棄物は使用しない）を運営・維持管理し、その工学的な実現性及び人工バリア（緩衝

材）の挙動等を実感・理解できる試験及び広報活動を実施した（図-1、図-2）。

本事業は、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構という）と「地層処分実規模設備運営等事業における工学技術に関する研究」に係る共同研究契約及び施設・設備の共用に係る覚書を締結して実施した。

本事業は、原子力機構が策定した「深地層研究所（仮称）計画（平成10年10月）」の「地層処分研究開発」と「透明性の確保」に該当し、実施に当たって、平成12年11月に北海道、幌延町及び原子力機構（当時核燃料サイクル機構）が締結した「幌延町における深地層の研究に関する協定書」を遵守した。

平成26年度は、「原子力発電施設広聴・広報等事業（地層処分実規模設備運営等事業）」として、上記の地層処分実規模試験施設（以下、施設）を運営（一般公開）及び維持管理を実施することで、国民が高レベル放射性廃棄物地層処分（以下、地層処分）の安全確保の考え方、その実現性及び地層処分に使用される材料の性質等を実感・体感し、地層処分に関する理解を深めることを目的とし、以下の項目を実施した³⁾。

1. 施設の運営（一般公開）・維持管理

- (1) 運営（一般公開）・維持管理
- (2) 緩衝材定置試験
- (3) 緩衝材可視化試験

2. 施設を利用した地層処分へのさらなる理解促進のための方策検討

※なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。



図-1 展示状況その1



図-2 展示状況その2

◇平成 26 年度の成果

1. 施設の運営・維持管理

(1) 運営（一般公開）・維持管理

1) 展示物の維持管理

施設内では、図-1、図-2 に示す実物の人工バリア（放射性破棄物は使用しない）であるオーバーパック・緩衝材、緩衝材定置装置及び緩衝材可視化試験装置等の維持管理を実施した。

2) 施設の運営（一般公開）

施設の一般公開対応として、施設訪問者に対して、説明員を常時 2 名配置し、説明マニュアルを基に、本事業及び地層処分の概要、施設目的の説明を実施した。一般公開は、以下に示すように、隣接する幌延深地層研究センター「ゆめ地創館」（原子力機構運営）と合わせて実施した。

・開館時間 9:00～16:00

・休館日 毎週月曜日（休館日が祝日または振替休日の場合は水曜日）

年末年始（12月29日～1月3日）

平成 26 年度の施設訪問者数（平成 27 年 3 月 31 日）を表-1、図-3 に示す。施設訪問者は、6,100 人であり、平成 22 年 4 月 28 日の一般公開以来の施設訪問者は延べ 32,655 人となった。

表-1 施設訪問者推移その 1

年月	来館者数		男女別			月計 (H26/4/1-)	累計 (H26/4/1-)	備考
	一般	顕微鏡	男	女	子供			
平成26年4月	260	5	150	85	30	265	265	毎週月曜休館
平成26年5月	595	7	304	186	112	602	867	毎週月曜休館
平成26年6月	557	4	337	174	50	561	1428	毎週月曜休館
平成26年7月	785	0	496	220	69	785	2213	毎週月曜休館
平成26年8月	1103	0	545	333	225	1103	3316	毎週月曜休館
平成26年9月	1512	1	664	391	458	1513	4829	毎週月曜休館
平成26年10月	549	2	338	154	59	551	5380	毎週月曜休館
平成26年11月	287	3	199	57	34	290	5670	毎週月曜休館
平成26年12月	130	0	51	31	48	130	5800	毎週月曜休館
平成27年1月	86	1	58	12	17	87	5887	毎週月曜休館
平成27年2月	89	1	70	15	5	90	5977	毎週月曜休館
平成27年3月	122	1	79	27	17	123	6100	毎週月曜休館
合計	6075	25	3291	1685	1124		6100	

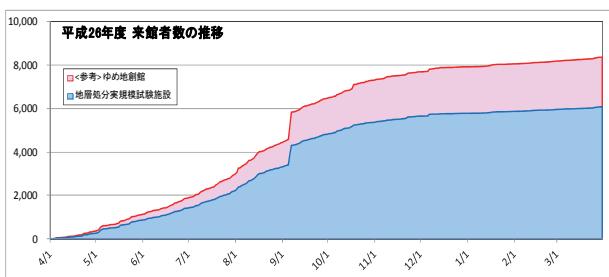


図-3 施設訪問者推移その 2

また、平成 26 年度の施設訪問者数を平成 25 年度の施設訪問者数と比較すると、

・年度累計施設訪問者数

地層処分実規模試験施設 6,100 人（平成 25 年度 5,474 人）

参考：ゆめ地創館 8,380 人（平成 25 年度 7,548 人）

となった。施設訪問者が増加した理由として、団体見学の申し込み件数が増加、地元地域配布（FM わっかない番組表）広告の効果、旅行広報誌「るるぶ」等広告の効果が考えられる。

3) 施設の維持管理

施設内は、温度管理、湿度計測を実施し、施設訪問者が見学できる環境を整えた。計測箇所は以下の通り。

- ・1階人工バリアカットモデル裏側（南側）
- ・1階緩衝材製作ビデオ放映箇所近傍（西側）
- ・地下階及び事務所外壁

施設の点検は、エレベーター、天井クレーン、受電設備及び消防設備について法令に基づく点検を実施した。

(2) 緩衝材定置試験

緩衝材定置装置を用いた緩衝材定置試験をより多くの施設訪問者に見て頂き、同時に施設訪問者に本施設に対する理解を深めてもらうことを目的に、北海道経済産業局が主催した「おもしろ科学館 2014 in ほろのべ」の開催日に併せ、9月 6 日（土）及び 7 日（日）に実施した。

試験では、1段目から 3 段目までの緩衝材を予め模擬処分孔に定置し、4段目のみを繰り返し真空把持装置による定置する試験を公開した。試験回数は、合計 22 回実施した。（6 日（土）11 回／7 日（日）11 回）



図-4 おもしろ科学館での緩衝材定置試験状況

IV. 放射性廃棄物処分への理解促進

9月6日（土）、7日（日）2日間の施設訪問者数は、905名であった。（6日：480名／7日：425名）

なお、この施設訪問者数は平成22年度開館以降の「おもしろ科学館」で最大であった。

(3) 緩衝材可視化試験

緩衝材の技術要件うち「緩衝材の隙間」に関する事項と考えられる「自己修復性」、「自己シール性」について、緩衝材可視化試験状況の展示を実施することとした。

緩衝材可視化試験では、隙間における緩衝材挙動を観察できるように供試体の上端面に隙間を設け、この水平方向の隙間の浸潤による隙間の閉塞がどのような緩衝材の挙動（膨潤、流出・侵入など）によるものかを確かめることを目的とした（図-5）。

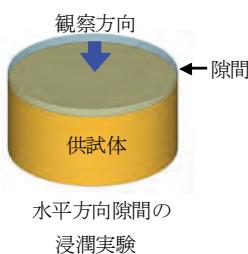


図-5 隙間にに対する可視化試験の考え方

1) 試験方法

水平方向の隙間の浸潤を対象とした緩衝材可視化試験の概要を図-6に示す。緩衝材を設置したモールドを水中に投入し、アクリル板にあけられた孔を通じて緩衝材上面に設けた隙間に注水し試験を開始した。水の浸潤状況及び隙間の状況は供試体上面から観察した。供試体中心にダイヤルゲージを設置し、緩衝材の膨潤による鉛直変位を測定した。

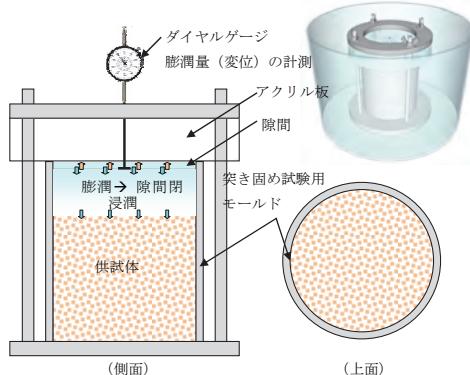


図-6 緩衝材可視化試験装置の概要

試験ケースを表-2に示す。表中のEX1、EX2は平成25年度に設置したものである。

試験ケースは、EX1～Case2までが初期の乾燥密度が 1.6Mg/m^3 、Case3～6は 1.8Mg/m^3 とした。緩衝材供試体上面の隙間はすべてのケースで 1.0cm とした。なお、緩衝材供試体の材料は、ベントナイト：ケイ砂=7:3の重量比で混合したものを使用した。

表-2 試験ケース

試験ケース	EX1	EX2	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
乾燥密度 ρ_{d0} (Mg/m^3)	1.6	1.6	1.6	1.6	1.8	1.8	1.8	1.8
含水比 w_0 (%)	12.6	12.6	12.6	20.2	9.13	9.13	14.61	14.61
飽和度 Sr (%)	50	50	50	80	50	50	80	80
隙間 (cm)					1.0			
設置期間 (日)	102	102	47	47	48	131	180	96

2) 試験結果

試験状況及び緩衝材上面の経時変化を図-7、図-8に示し、以下に得られた知見を示す。



図-7 水平方向隙間の浸潤試験状況 (Case3)

- 試験開始後、緩衝材に水が接触するとすぐに膨潤し隙間の閉塞が始まった。
- 変位量は、飽和度によらず乾燥密度 1.6Mg/m^3 は試験開始から19日程度、密度 1.8Mg/m^3 は11日程度で収束し、乾燥密度の違いにより8日程度の差が生じた。

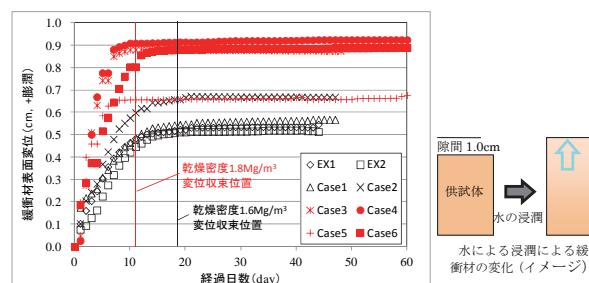


図-8 緩衝材供試体の変位 (膨潤)

次に、各試験ケースにより得られた供試体の深さと含水比、乾燥密度の関係を図-9、図-10に示す。図-9の横軸は、試験によって得られた含水比 w_i を試験ケースの初期含水比 w_0 で除して基準化したものであり、図-10の横軸は試験によって得られた乾燥密度 ρ_{di} を初期乾燥密度 ρ_{d0} で除して基準化したものである。また、乾燥密度は、飽和度100%以上のデータは飽和度を100%とし、含水比・土粒子密度から再計算し想定した密度である。以下、得られた知見を示す。

- ・含水比は、各試験ケースとともに緩衝材上部（隙間を埋めた緩衝材）が最も高くなつた。
- ・隙間から最も離れた供試体下部は試験開始時点の含水比とほぼ同じであつた。
- ・乾燥密度は、隙間の膨潤挙動により供試体上部が各試験ケースとも最も密度が低くなつた。
- ・供試体の乾燥密度は上部のみ密度低下が生じ、下端部は試験開始時からあまり変化が生じなかつた。

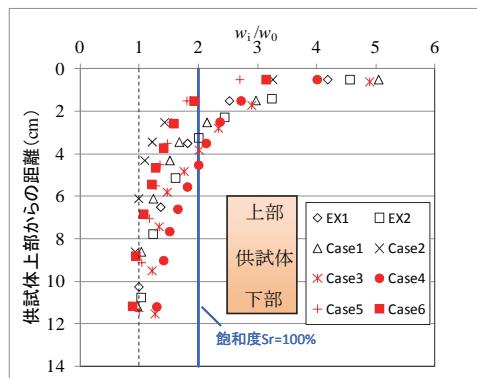


図-9 含水比の深さ方向分布

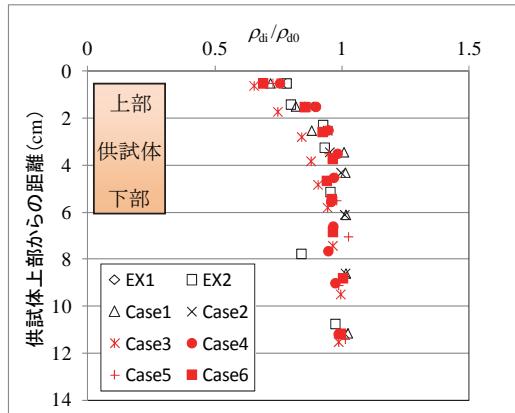


図-10 乾燥密度の深さ方向分布

2. 施設を利用した地層処分へのさらなる理解促進の方策検討

地層処分のさらなる理解促進のため、(1) 施設訪問者の集客力増加のための広報活動、(2) 体験実験、(3) アンケート調査を実施した。

(1) 広報活動

(a) 原環センターのホームページ(HP)への掲載

原環センターのHPに、地層処分実規模試験施設用HPを掲載し、施設内のコンテンツについて情報発信を実施した。以下に、HPのアクセス数を示す。

地層処分実規模試験施設HP^{*1}のアクセス数^{*2}

平成26年4月1日～平成27年1月31日：

訪問者数1,861、訪問数3,551

当センターのHPのアクセス数：

訪問者数14,368、訪問数38,936

*1 : <http://www.fullscaledemo.rwmc.or.jp>

*2 : 訪問数は、訪問者が最初の閲覧から24時間以内に再度閲覧を行った場合の数値

施設HPでは、「実規模試験施設の設置目的」、「展示物」や「緩衝材搬送・定置試験実施状況」、「緩衝材製作工程」、「オーバーパック製作工程」の動画などを公開中。



図-11 地層処分実規模試験施設 HP

IV. 放射性廃棄物処分への理解促進

(b) 広報物配布による活動

地層処分実規模試験施設のリーフレット（図-12、13）及び「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について」（経済産業省資源エネルギー庁発行2014年2月）を施設内に配備した。リーフレットは、幌延町トナカイ観光牧場、豊富温泉宿泊施設、各電力会社の原子力発電所PR館及び稚内市内の空港、JR駅などに配備した。

また、その他の活動として、以下に示すとおり一般紙等を使用した広報活動を実施した。



図-12 地層処分実規模試験施設リーフレット（表面）



図-13 地層処分実規模試験施設リーフレット（裏面）

- 地元FMラジオ局（FMわっかない）の番組表に「実規模試験施設」の案内広告を掲載（図-14）。配布箇所は、稚内空港、フェリー乗り場、等稚内市内50箇所、5,000部。
- 「おもしろ科学館2014 in ほろのべ」の実規模試験施設のラジオCMを製作し、8/30～9/5の期間地元FMラジオ局（FMわっかない）にて、宗谷管内にCMを放送した。

- るるぶ冬の北海道（発行：JTBパブリッシング、図-15）平成26年10月に北海道にて37,000部掲載。
- るるぶFREE 富良野・旭山動物園（発行：JTBパブリッシング、図-16）平成26年7月に旭川市内レンタカーカー会社、宿泊施設及び観光施設に70,000部設置。
- 北海道新聞広告特集チラシるるぶ夏のグルメ&行楽決定版（発行：北海道新聞、図-17）平成26年7月12日に札幌市内にて370,000部を配布。



図-14 FMわっかない番組表掲載の案内広告



図-15 るるぶ冬の北海道広告掲載



図-16 るるぶFREE 広告



図-17 北海道新聞折り込みチラシ広告

(2) 体験実験

緩衝材定置装置では、緩衝材の把持方法として真空吸引方式である真空把持装置を採用している。施設では、1/10人工バリア及び真空把持装置模型（図-18）を設置し、施設訪問者に真空把持の仕組みについて体験できるようにしている。

また、緩衝材の膨潤、止水機能を簡単に理解できる参加型緩衝材止水試験を実施し、施設訪問者に緩衝材の膨潤、止水状況を実際に見てもらえるようにしている。（図-19、20）



図-18 1/10 人工バリア及び把持装置模型

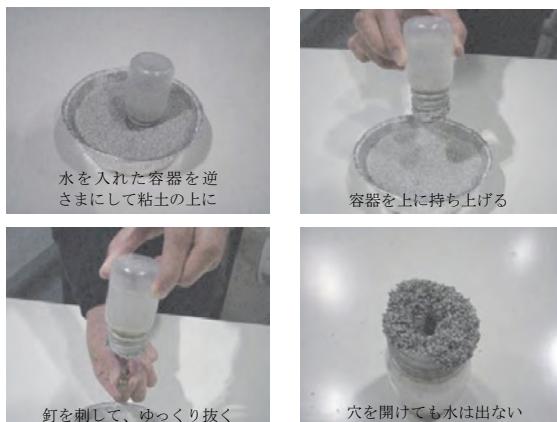


図-19 緩衝材の止水試験の方法



図-20 緩衝材止水の体験試験の状況

(3) アンケート調査の実施

ゆめ地創館と協力してアンケート調査を実施した。（図-21、図-22）アンケートの集計結果の一例を図-23に示す。アンケートの回答は、2,651名（回収率43.5%、総施設訪問者数：6,100名／回答数：2,651名）に協力頂いた。

ゆめ地創館等 ご見学アンケート

本日は、当センターへのご見学に誠にありがとうございます。ありがとうございました。

アンケート結果は、参考にさせていただきます。

アンケート結果は、施設へお伝えさせていただきます。

施設へお越しください。外見に興味があることありますのでご丁寧ください。

【担当する施設の□に△印をお書きください】

1 あなたの年齢、年代、性別をお書きください。
性別： 男性 女性
年齢： □10代未満 □20代 □30代 □40代 □50代 □60代以上
性別： □北海道内 □北海道外

2 当施設について、何で知りましたか。
□インターネット □TV/ラジオ □地図/パンフレット □その他の（手書き） □広報誌 □知人の紹介
□道の駅
□その他の（手書き）

3 ゆめ地創館 地震発生実験模擬試験施設、地下施設の見学後のご感想をお聞かせください。

① 検証深地盤研究センターで行っている調査・研究内容について
□良くわかった □大体わかった □あまりわからなかった □全くわからなかった

② 地震発生について
□良くわかった □大体わかった □あまりわからなかった □全くわからなかった

③ 高レベル放射性廃棄物について
□良くわかった □大体わかった □あまりわからなかった □全くわからなかった

④ 実物大の人工バリアについて
□良くわかった □大体わかった □あまりわからなかった □全くわからなかった

⑤ 実物大の人工バリアを使った試験について
□良くわかった □大体わかった □あまりわからなかった □全くわからなかった

地下施設のご見学を体験された方にどうがいします。

⑥ 実際に地下施設に入れてみて、地下施設について
□良くわかった □大体わかった □あまりわからなかった □全くわからなかった

図-21 アンケート用紙その1

「地震発生」についてお聞かせください。

⑦ 日本では、高レベル放射性廃棄物を国内の地層中に処分（地震発生）する計画があることをご存じですか？

□知っていた □何なく（少し）知っていた □知らない

⑧ 高レベル放射性廃棄物の処分が必要な理由についてどう感じましたか？

□少し □多少、必要 □あまり必要ではない □不要 □わからない

⑨ 高レベル放射性廃棄物の処分方法として、地震発生が進していると思いますか？

□進んでいる □進していない □わからない

⑩ 地震発生の安全性についてどう感じましたか？

□安全 □多少、安全 □多少、不安 □不安 □わからない

⑪ 1. なぜ、「多少、不安」「不安」で地震発生された方は、地震発生の安全性について何を心配とされていますか？（複数回答可）

□地下水の漏洩 □地盤変動（地震、火山等） □地盤の劣化 □他の（下の欄にご記入ください）

□ガラス固化体の健全性 □力がられない □その他（下の欄にご記入ください）

⑫ 地震発生を行なう上で技術的な課題は何だと思いますか？（複数回答可）

□地下水の漏洩 □地盤変動（地震、火山等） □地盤の劣化 □他の（下の欄にご記入ください）

□ガラス固化体の健全性 □力がられない □その他（下の欄にご記入ください）

⑬ その他の、わからなかった点、疑問点、知りたいこと、不安な点、ご意見、ご要望ありましたらお聞かせください。

ご協力ありがとうございました。

図-22 アンケート用紙その2

IV. 放射性廃棄物処分への理解促進

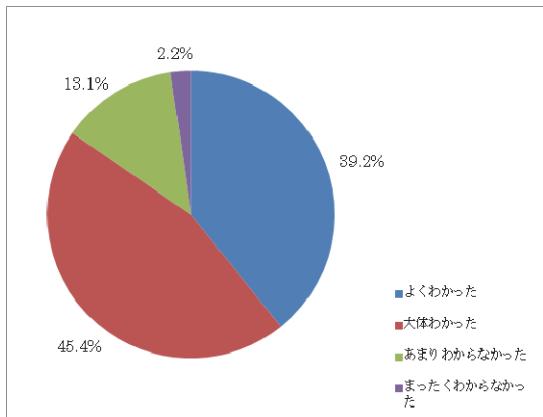


図-23 アンケートの集計結果（一例）
(実物大の人工バリアについて)

次に、施設訪問者の主だった感想の概要を以下に示す。

- せっかくこの様な施設が幌延にあるのだから、学校などが子供達に見学する機会を作り、見学した方がいいと思う。
- これだけの設備なので、定置装置を活用した実験を広く周知できると効果的ではないか。
- 半減期が数万年と言う物もあるのに対してオーバーパックは1,000年でいいのか？何故1,000年なのかを詳しく表記した方がいいと思う。子供や余り知識のない人達には良いのかもしれないが、全体的に物足りない。パネル等もう少し詳しくした方が良いと思う。
- 処分はすごく難しい問題でどうにかしなければならない。処分は必要なのは分かっているが、現実としては自分の所には来て欲しくないと言うのが本音だろう。
- 以前来た時に比べて広くて見やすくなった。原子力の事について、勉強するのに展示物など見られて解りやすい。
- 原発は電気料金が安いと言われていたけれど、処分費用の事を考えると決して安くないのではないかと思う。処分地も処分方法が確立されてないので原発を再稼働させようとしているのは間違っている。
- 大間や、福島原発などで原子力に対する拒否反応などある人もいるが、この施設に来て、色々な研究をして考えられていたことが解り勉強になった。他の施設も行った事があるが一番良かった。

- 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25年度地層処分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、2014
- 2) 核燃料サイクル開発機構、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次とりまとめ、平成26年11月
- 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26年度地層処分原子力発電施設広聴・広報等事業地層処分実規模設備運営等事業報告書、2015

(This page(p92) is intentionally kept blank.)

V. 國際交流

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の政策、制度、事業の進捗状況、研究開発動向等に関する情報の収集・交換、研究協力等を行っている。

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

(1) 情報交換・研究協力を実施している海外機関

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、或いは、覚書を締結している海外機関は次表のとおりである。

下表のうち、平成 26 年度には、NAGRA、SKB/SKBI、DBE と情報交換等を実施した。

表-1 当センターが協力協定（覚書）を締結している海外機関一覧

国	機関名
フィンランド	ボシヴァ社 (Posiva Oy)
スウェーデン	スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社 /SKB インターナショナル社 (SKB/SKBI)
フランス	放射性廃棄物管理機関 (ANDRA)
ドイツ	ドイツ廃棄物処分施設建設・運転会社 /DBE テクノロジー社 (DBE/DBE Technology)
スイス	放射性廃棄物管理共同組合 (NAGRA)
ベルギー	ベルギー原子力研究センター (SCK·CEN)
スペイン	放射性廃棄物管理公社 (ENRESA)
英国	原子力廃止措置機関 (NDA)
ロシア	ロシア科学アカデミー (RAS)
韓国	韓国原子力研究所 (KAERI)
	韓国水力・原子力株式会社中央研究所 (KHNP/CRI)
	韓国原子力環境公団 (KORAD)
中国	中国核工業集団公司地質・鉱山局 (CNNC/DGM)
台湾	(財)核能科技協進會 (NuSTA)

(2) 炭素のソースタームに関する国際共同研究

EC の 2013 年までの研究開発の枠組みである FP7 のもと、欧州原子力共同体 (EURATOM) の IGD-TP (Implementing Geological Disposal Technology Platform) のプロジェクトとして実施されている「炭素のソースタームに関する共同研究 CAST(Carbon-14 Source Term)」に参画し、炭素 14 のインベントリ設定手法や浸漬試験等の成果を提供するとともに、欧州での研究状況の情報収集等を行った。これらの成果は CAST の Web Site <http://www.projectcast.eu/> において各ワークパッケージ (WP) の年度報告書として公開されている。

(3) モニタリングに関する国際共同研究

平成 25 年度まで参画した、EURATOM の「モニタリングに関する国際共同研究 MoDeRn (Monitoring Developments for Safe Repository Operation and Staged Closure)」プロジェクトの後継として、EC の HORIZON2020 の枠組みにおいて EURATOM が実施する IGD-TP のプロジェクトである MoDeRn2020 (Development and Demonstration of monitoring strategies and technologies for geological disposal) プロジェクトへの参画の準備及び手続きとして、欧州委員会に提出する Deliverable の準備、Grant Agreement への押印の手続き等を行った。原環センターは本共同研究に於いて、欧州の処分実施主体によるモニタリング計画のレビュー及び地中無線モニタリング技術に関する情報交換等を実施する予定である。

(4) 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 のプロジェクトである CEBAMA (Cement-based materials, properties, evolution, barrier functions) プロジェクトで実施する、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) への参画の準備及び手続きとして、欧州委員会に提出する Deliverable の準備、Grant Agreement への押印の手続き等を行った。

(This page(p94) is intentionally kept blank.)

VI. 資料

VI. 資料

1. 講演会・セミナー等

	講演会等概要	開催日	会場
講演会	第1回講演会「地層処分の5W1H－その考え方の進展－」 朽山 修 氏（公益財団法人原子力安全研究協会 処分システム安全研究所 所長）	平成26年6月13日	原環センター
	第2回講演会「処分容器の健全性評価における金属工学的アプローチ」 小林 正人（処分工学調査研究プロジェクト）	平成26年10月17日	原環センター
	第3回講演会「ベントナイトの遮水性能の正しい認識と誤解の払拭」 小峯 秀雄 氏（早稲田大学理工学術院 創造理工学部 社会環境工学科 教授）	平成27年1月28日	原環センター
	第4回講演会「欧米主要国での放射性廃棄物処分事業の進捗状況」 稻垣 裕亮（技術情報調査プロジェクト）	平成27年3月26日	日本交通協会
セミナー	第1回原環センターセミナー「放射性廃棄物最終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 処分システム安全研究所 所長）	平成26年5月23日	京都大学 東京オフィス
	第2回原環センターセミナー「放射性廃棄物最終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 処分システム安全研究所 所長）	平成26年10月16日	京都大学 東京オフィス
	第3回原環センターセミナー「放射性廃棄物最終処分の安全評価の基礎Ⅲ」 大江 俊昭 氏（東海大学工学部原子力工学科 教授）	平成26年11月20日	東海大学高輪 キャンパス
研究発表会	平成26年度原環センター研究発表会 1. 研究発表 「原環センターの調査研究活動の概要」 浦上 学（常務理事） 「地層処分における緩衝材の品質－水との付き合い方－」 江藤 次郎（処分工学調査研究プロジェクト） 「TRU廃棄物地層処分における固体化の機能－ヨウ素129・炭素14の放出挙動を例に－」 桜木 智史（処分材料調査研究プロジェクト） 2. 特別講演 「エネルギー政策の動向と高レベル放射性廃棄物問題」 山地 憲治 氏（公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）理事・研究所長 東京大学名誉教授）	平成26年12月9日	星陵会館 ホール

2. 論文投稿、学会発表等

(1) 論文投稿

No.	題 目	原環センター著者	発 表 先
1	フィリピン国・ルソン島北西部に分布するザンバレスオフィオライトで生成されたアルカリ溶液との反応によって変質されたペントナイトの地球化学的・鉱物化学的特性	藤井直樹、山川稔	日本地質学会 地質学雑誌 第120巻第10号(通巻1429巻) 2014年10月
2	Consideration on treatment and disposal of secondary wastes generated from treatment of contaminated water	田辺博三、星野国義	Springer, Nuclear Back-end and Transmutation Technology for Waste Disposal: Beyond the Fukushima Accident 2014年11月
3	Long Term Corrosion of Zircaloy Hull Waste under Geological Disposal Conditions –Corrosion Correlations, Factors Influencing Corrosion Test Data, and a Preliminary Evaluation	田辺博三、桜木智史、大和田仁	Material Research Society Symposium Proceedings vol.1665, Scientific Basis of Nuclear Waste management XXXVII, 2014
4	Improvement of C-14 Measurements for Inventory and Leaching Rate for Hull Waste, and Separation of the Organic Compound for Chemical Species Identification	田辺博三、桜木智史	Material Research Society Symposium Proceedings vol.1665, Scientific Basis of Nuclear Waste management XXXVII, 2014
5	C-14 Release Behavior and Chemical Species from Irradiated Hull Waste under Geological Disposal Conditions	田辺博三、桜木智史	Material Research Society Symposium Proceedings vol.1665, Scientific Basis of Nuclear Waste management XXXVII, 2014
6	Corrosion Tests of Ziracaloy Hull Waste to confirm applicability of corrosion model and to evaluate influence factors on corrosion rate under Geological Disposal Conditions	田辺博三、桜木智史	Material Research Society Symposium Proceedings vol.1665, Scientific Basis of Nuclear Waste management XXXVII, 2014
7	A method of measuring the specific surface area of bentonite for evaluation of the hydraulic performance of bentonite engineered barriers	大和田仁、石井智子	Proceedings of International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro, Vol.2, 2014

VI. 資料

(2)学会発表等

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
1	低レベル放射性廃棄物処分における埋戻し材に関する材料特性評価試験について（その2）	山田淳夫、秋山吉弘	地盤工学会 第49回地盤工学研究発表会 2014/7/15～17
2	放射性廃棄物処分容器の構造健全性に関する研究（健全性評価に対する考え方）	川久保政洋、 小林正人、朝野英一	日本機械学会 M&M2014 材料力学カンファレンス 2014/7/19～21
3	Geochemical influence of hyperalkaline groundwater on bentonite in Zambalesophiolite of the Philippines	藤井直樹、山川稔	AOGS(Asia Oceania Geosciences Society)11th Annual Meeting 2014/7/28～8/1
4	オーバーパックの健全性評価手法に関する研究 ①溶接構造物としての健全性評価の考え方	川久保政洋、 小林正人、朝野英一	日本原子力学会バックエンド部会 第30回バックエンド夏期セミナー 2014/8/6～7
5	オーバーパックの健全性評価手法に関する研究 ②健全性評価に対する腐食試験の考え方	中山真理子、 川久保政洋、 小林正人、朝野英一	日本原子力学会バックエンド部会 第30回バックエンド夏期セミナー 2014/8/6～7
6	Process Development of Synthetic Rock Technique for Immobilization of Iodine	桜木智史、吉田誠司	The 15th IUMRS-International Conference in Asia(IUMRS-ICA 2014) 2014/8/24～30
7	Microscopic Structural Analysis of Lead Borate-Based Glass	桜木智史	The 15th IUMRS-International Conference in Asia(IUMRS-ICA 2014) 2014/8/24～30
8	Iodine Release Behavior from Iodine-Immobilized Cement Solid under Geological Disposal Conditions	桜木智史、大和田仁	The 15th IUMRS-International Conference in Asia(IUMRS-ICA 2014) 2014/8/24～30
9	Corrosion behavior of Stainless Steel by Continuous Hydrogen Measurement under Deoxidized, Low-temperature and High-pH Condition	桜木智史、吉田誠司	The 15th IUMRS-International Conference in Asia(IUMRS-ICA 2014) 2014/8/24～30
10	The measurement method of specific surface area of bentonite for evaluation of hydraulic performance of bentonite engineered barrier	石井智子、大和田仁	International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro(IS-Cambridge2014) 2014/9/1～3

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
11	地中無線モニタリング技術の開発（3） 無線中継システムの原位置試験	江藤次郎、鈴木圭、 田辺博三	日本原子力学会 2014年秋の大会 2014/9/8～10
12	緩衝材の再冠水挙動評価（8） パイピング・エロージョン現象の実験的 検討研究	鈴木圭、竹内伸光、 朝野英一	日本原子力学会 2014年秋の大会 2014/9/8～10
13	緩衝材の再冠水挙動評価（9） 処分概念におけるパイピング・エロージ ョンの考え方	鈴木圭、竹内伸光、 江藤次郎、朝野英一	日本原子力学会 2014年秋の大会 2014/9/8～10
14	自然災害に対する地層処分場の安全対 策 －人工バリアの火災影響評価手法の検 討－	山川浩光、朝野英一	日本原子力学会 2014年秋の大会 2014/9/8～10
15	地下空洞型処分施設における上部埋戻 し材の施工確認試験（その1） －施工性の確認－	山田淳夫、秋山吉弘	土木学会 平成26年度全国大会 第69回年次学術講演会 2014/9/10～12
16	地下空洞型処分施設における上部埋戻 し材の施工確認試験（その2） －施工後の品質と確認－	山田淳夫、秋山吉弘	土木学会 平成26年度全国大会 第69回年次学術講演会 2014/9/10～12
17	狭小な坑道内のアーチ部におけるベン トナイト混合土吹付け量管理への3次元 計測技術の適用性について	山田淳夫、秋山吉弘	土木学会 平成26年度全国大会 第69回年次学術講演会 2014/9/10～12
18	連続式練混ぜ機械によるベントナイト 混合土の練混ぜ試験	山田淳夫、秋山吉弘	土木学会 平成26年度全国大会 第69回年次学術講演会 2014/9/10～12
19	地下空洞型処分施設への地震影響につ いての基本検討（その2）	山田淳夫、秋山吉弘	土木学会 平成26年度全国大会 第69回年次学術講演会 2014/9/10～12
20	圧縮ベントナイト（大型供試体）のガス 移行時における力学影響検討	古賀和正、大和田仁	土木学会 平成26年度全国大会 第69回年次学術講演会 2014/9/10～12
21	TRU廃棄物処理におけるガス移行挙動 評価シナリオ構築	古賀和正、大和田仁	土木学会 平成26年度全国大会 第69回年次学術講演会 2014/9/10～12
22	湧水が緩衝材の施工に及ぼす影響とそ の対策に関する一考察	朝野英一、鈴木圭、 竹内伸光	土木学会主催 平成26年度全国大会 第69回年次学術講演会 2014/9/10～12

VI. 資料

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
23	鉛ホウ酸塩系ガラスの原子間ポテンシャルを利用したRMC構造の改良	桜木智史	日本セラミックス協会 第27回秋季シンポジウム 2014/9/9~11
24	フィリピン国・ルソン島北西部に分布するベントナイトのアルカリ変質反応による地球化学的・鉱物学的特性	山川稔、藤井直樹	日本地質学会 第121年学術大会 2014/9/13~15
25	Experimental investigations of piping phenomena by saline water in bentonite based buffer materials for HLW repository	鈴木圭、朝野英一、江藤次郎、竹内伸光	MECC14 2014/9/16~19
26	Effects of pH and hydrosulfide ion on the iodine release behavior from the Synthetic Rock	桜木智史、吉田誠司	2014 MRS Fall Meeting and Exhibit "Symposium EE: Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXVIII" 2014/11/30~12/5
27	炭素鋼オーバーパックの耐食性に対する溶接封入の影響	小林正人、中山真理子、川久保政洋、朝野英一	日本原子力学会 2015年春の年会 2015/3/20~22
28	人工バリアの健全性評価手法に関する研究—地下研を活用した試験計画の概要—	中山真理子、小林正人、川久保政洋、鈴木圭、江藤次郎、朝野英一	日本原子力学会 2015年春の年会 2015/3/20~22

(3)解説等

No.	題 目	著 者	発 表 先
1	Details of experimental design,especially pore water composition,operating conditions,availability of analytical techniques for non-irradiated Zircaloy and stainless steel.	桜木智史	CAST project D3.5 Annual progress Report-Year1 2014年9月
2	地層処分事業等の国際的な動向	稻垣裕亮	日本原子力産業協会、原子力年鑑 2015、2014年10月
3	日本原子力学会 2014 年春の年会 バックエンド部会セッション 「SEEN-AESJ joint session on “Waste Management”」参加報告	吉田崇宏	日本原子力学会バックエンド部会 原子力バックエンド研究 Vol.21 No.1 2014年12月
4	高レベル放射性廃棄物地層処分に関する工学技術の開発状況について	江藤次郎、小林正人、川久保政洋、朝野英一	日本原子力学会バックエンド部会 原子力バックエンド研究 Vol.21 No.1 2014年12月
5	日本の TRU 廃棄物処分における安全評価のためのガス移行シナリオの構築	並木和人、大和田仁	日本原子力学会バックエンド部会 原子力バックエンド研究 Vol.21 No.1 2014年12月
6	IGD-TP 主催 Geodisposal 2014 国際会議 参加報告	田辺博三	日本原子力学会バックエンド部会 原子力バックエンド研究 Vol.21 No.2 2014年12月

VII. 資料

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№110	地層処分の 5W1H－その考え方の進展－ (その 1)	2014 年 6 月
2	原環センタートピックス№111	地層処分の 5W1H－その考え方の進展－ (その 2)	2014 年 9 月
3	原環センタートピックス№112	エネルギー政策の動向と高レベル放射性廃棄物問題	2014 年 12 月
4	原環センタートピックス№113	処分容器の健全性評価における金属工学的アプローチ	2015 年 3 月
5	原環センター2013 年度 技術年報		2014 年 11 月

上記の刊行物は、原環センターホームページのライブラリー <http://www.rwmc.or.jp/library/> からご覧いただけます。

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」(<http://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	2014/4/4	追記) 米国の廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) で放射線事象などが発生 [2014年2月25日既報]
2	2014/4/8	英国における処分関連組織の動き－放射性廃棄物管理局 (RWMD) と原子力規制局 (ONR) が新組織に移行
3	2014/4/8	カナダの使用済燃料処分場のサイト選定の状況－先行地域で第3段階第2フェーズを開始
4	2014/4/8	追記) 米国で NRC が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の審査活動状況等を公表 [2014年2月3日既報]
5	2014/4/11	追記) 米国で NRC が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の審査再開の実施事項を決定 [2013年11月19日既報]
6	2014/4/14	スウェーデンで SSM が使用済燃料の処分に関する世論調査結果を公表
7	2014/4/24	ドイツでサイト選定法に基づく「高レベル放射性廃棄物処分委員会」が設置
8	2014/4/24	スイスの連邦エネルギー庁が地層処分場のサイト選定スケジュールを改訂
9	2014/4/25	米国で DOE が廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) の放射線事象に関する初めての事故調査報告書を公表
10	2014/5/9	フィンランドの地下特性調査施設 (ONKALO) の建設状況－立坑の掘削が完了
11	2014/5/13	フランスの放射性廃棄物管理機関 (ANDRA) が公開討論会の総括報告書公表を受け、地層処分プロジェクトの継続に関する今後の方針を決定
12	2014/5/16	追記) 米国 DOE が連邦議会に拠出金額をゼロにする提案を提出 [2013年11月20日既報]
13	2014/5/19	追記) スイスで NAGRA が地層処分場の地上施設の設置区域の絞り込みの結果として最初の1カ所を提案 [2013年9月13日既報]
14	2014/5/22	追記) ドイツでサイト選定法に基づく「高レベル放射性廃棄物処分委員会」が設置 [2014年4月24日既報]
15	2014/5/26	追記) ドイツでサイト選定法に基づく「高レベル放射性廃棄物処分委員会」が設置 [2014年4月24日既報]
16	2014/5/28	追記) スイスで NAGRA が地層処分場の地上施設の設置区域の絞り込みの結果として最初の1カ所を提案 [2013年9月13日既報]
17	2014/5/30	フランス会計検査院が放射性廃棄物管理を含む原子力発電事業の費用に関する報告書を更新
18	2014/6/4	米国の廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) で放射線事象に対応した一部の廃棄物容器の隔離計画を検討

VI. 資料

	掲載日	タイトル
19	2014/6/4	スイスで連邦エネルギー庁が地層処分場の地上施設の設置区域の選定結果を取りまとめ
20	2014/6/17	フランスで国家評価委員会（CNE）が第8回評価報告書を公表
21	2014/6/24	カナダの使用済燃料処分場のサイト選定の状況－オンタリオ州ニピゴン・タウンシップが選定 プロセスからの撤退を決定
22	2014/6/30	追記) フィンランドで放射線・原子力安全センター（STUK）が建設許可申請書に対する安全審査の第一段階完了を公表〔2013年4月26日既報〕
23	2014/7/2	スウェーデンの規制当局が原子力廃棄物基金への2015年拠出単価の試算値を公表
24	2014/7/4	スイス連邦評議会が廃止措置・廃棄物管理基金令改正案を閣議決定
25	2014/7/4	追記) 韓国で中・低レベル放射性廃棄物処分場の竣工予定を2014年6月に再変更〔2012年1月24日既報〕
26	2014/7/17	追記) 米国で2015会計年度の予算要求－高レベル放射性廃棄物処分関連に対して7,900万ドルを要求〔2014年3月13日既報〕
27	2014/7/28	追記) 米国で2015会計年度の予算要求－高レベル放射性廃棄物処分関連に対して7,900万ドルを要求〔2014年3月13日既報〕
28	2014/7/28	追記) 米国でNRCが「廃棄物保証」規則の改定案などを提示〔2013年6月27日既報〕
29	2014/8/1	英国政府が地層処分施設の新たなサイト選定プロセス等を示した白書を公表
30	2014/8/4	ドイツで連邦政府とニーダーザクセン州がゴアーベン・サイトの維持管理方針に関して合意
31	2014/8/21	カナダの使用済燃料処分場のサイト選定の状況－オンタリオ州セントラルヒューロン自治体で第3段階第1フェーズを開始
32	2014/8/26	ドイツ「高レベル放射性廃棄物処分委員会」の第2回会議事録が公開
33	2014/8/26	韓国で使用済燃料公論化委員会が「使用済燃料管理方策に関する課題及び検討意見書」を受領
34	2014/8/28	米国でNRCが使用済燃料の継続貯蔵に関する連邦規則を承認
35	2014/9/2	追記) 米国でNRCが使用済燃料の継続貯蔵に関する連邦規則を承認〔2014年8月28日既報〕
36	2014/9/5	ドイツで放射性廃棄物処分に関する新たな規制機関である連邦放射性廃棄物処分庁（BfE）が活動を開始
37	2014/9/8	スイスでENSIが地球科学的調査を実施せずに予備的安全評価が可能と判断
38	2014/9/22	追記) 米国で2015会計年度の予算要求－高レベル放射性廃棄物処分関連に対して7,900万ドルを要求〔2014年3月13日既報〕
39	2014/9/22	追記) 米国でNRCが使用済燃料の継続貯蔵に関する連邦規則を承認〔2014年8月28日既報〕
40	2014/9/26	追記) ドイツ「高レベル放射性廃棄物処分委員会」の第2回会議事録が公開〔2014年8月26日既報〕
41	2014/10/2	米国の廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）で操業の再開に向けた復旧計画を公表

	掲載日	タイトル
42	2014/10/2	追記) 米国で DOE が廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) に係る適合性再認定申請書を提出 [2014 年 3 月 27 日既報]
43	2014/10/14	追記) 米国で DOE が廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) に係る適合性再認定申請書を提出 [2014 年 3 月 27 日既報]
44	2014/10/15	追記) スウェーデンの規制当局が原子力廃棄物基金への 2015 年拠出単価の試算値を公表 [2014 年 7 月 2 日既報]
45	2014/10/20	米国で NRC がユッカマウンテン処分場の安全性評価報告 (SER) 第 3 分冊「閉鎖後の処分場の安全性」を公表
46	2014/10/20	追記) 英国政府が海外起源の使用済燃料等の代替管理方針案に関する公開協議を開始 [2014 年 3 月 13 日既報]
47	2014/10/22	英国の原子力廃止措置機関 (NDA) の放射性廃棄物管理会社 (RWM) が地質学的スクリーニングに関する技術イベントの報告書を公表
48	2014/11/25	カナダ OPG 社の低・中レベル放射性廃棄物の地層処分場プロジェクトに関する意見収集が終了
49	2014/12/1	イスイスで連邦エネルギー庁が地層処分場が与える社会影響・経済影響・環境影響に関する調査の最終結果を公表
50	2014/12/10	カナダの使用済燃料処分場のサイト選定の状況—オンタリオ州ブルース郡内の 5 地域での第 3 段階第 1 フェーズの調査が完了
51	2014/12/15	追記) 韓国で中・低レベル放射性廃棄物処分場の竣工予定を 2014 年 6 月に再変更
52	2014/12/15	追記) 米国で 2015 会計年度の予算要求—高レベル放射性廃棄物処分関連に対して 7,900 万ドルを要求 [2014 年 3 月 13 日既報]
53	2014/12/22	米国で NRC がユッカマウンテン処分場の安全性評価報告 (SER) 第 4 分冊「管理上及びプログラム上の要求事項」を公表
54	2014/12/22	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
55	2014/12/22	フランスで地層処分場の閉鎖技術の安全性に関する規制機関等の見解が発表
56	2014/12/22	追記) スウェーデンの規制当局が原子力廃棄物基金への 2015 年拠出単価の試算値を公表 [2014 年 7 月 2 日既報]
57	2014/12/22	追記) 米国で DOE が廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) に係る適合性再認定申請書を提出 [2014 年 3 月 27 日既報]
58	2015/1/27	カナダの使用済燃料処分場のサイト選定の状況—オンタリオ州北部の 6 地域で第 3 段階第 1 フェーズの調査が完了
59	2015/1/30	米国で NRC によるユッカマウンテン処分場の安全性評価報告 (SER) の全 5 分冊が完成
60	2015/1/30	米国テキサス州で使用済燃料の中間貯蔵施設の建設計画を地元自治体が承認
61	2015/2/3	スウェーデン SKB 社が使用済燃料のキャニスター封入施設の建設許可申請の補足書を提出
62	2015/2/3	米国で 2016 会計年度の予算要求—高レベル放射性廃棄物処分関連に対して 1 億 836 万ドルを要求
63	2015/2/10	イスイスで NAGRA が地層処分場のサイト選定プロセス第 2 段階での絞り込み結果を公表

VI. 資料

	掲載日	タイトル
64	2015/2/10	原子力安全機関（ASN）が地層処分事業における「可逆性」に対する見解を表明
65	2015/2/10	米国でウェースト・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の意向通知をNRCに提出
66	2015/2/12	追記) 米国でウェースト・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の意向通知をNRCに提出〔2015年2月10日既報〕
67	2015/2/16	フィンランドで放射線・原子力安全センター（STUK）が使用済燃料処分場の建設許可申請書に対する安全審査の結果を公表
68	2015/3/5	カナダの使用済燃料処分場のサイト選定の状況－2 地域がサイト選定プロセスから除外
69	2015/3/5	追記) 米国でNRCによるユッカマウンテン処分場の安全性評価報告（SER）の全5分冊が完成〔2015年1月30日既報〕
70	2015/3/13	追記) 米国でNRCによるユッカマウンテン処分場の安全性評価報告（SER）の全5分冊が完成〔2015年1月30日既報〕
71	2015/3/19	追記) 米国の連邦議会上院で「2013年放射性廃棄物管理法」の法案が提出〔2013年6月28日既報〕
72	2015/3/24	米国でネバダ州選出の連邦議会下院議員がユッカマウンテン処分場について議論を呼び掛け
73	2014/3/26	追記) 米国で2013会計年度の予算要求－「使用済燃料処分等プログラム」（UFD）に対して約6,000万ドル要求〔2012年2月15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. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究	地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験	地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験検討委員会	原位置での確証試験の計画、試験結果の審議
II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究	処分システム工学確証技術開発	処分システム工学確証技術検討委員会	人工バリア品質/健全性評価手法、モニタリング関連技術、自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する調査結果等の審議
	地層処分回収技術高度化開発	地層処分回収技術高度化開発検討委員会	緩衝材除去技術開発の成果、回収維持期間、実証試験計画の調査結果等の審議
	TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発	TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発検討委員会	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
	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. 放射性廃棄物一般に共通する調査研究等	放射性廃棄物重要基礎技術研究調査	選定委員会	公募した処分技術に関する研究開発テーマ及び研究実施者の選定
		検討委員会	採択した研究開発テーマに関する研究計画、研究成果の審議

原環センター 2014年度 技術年報

2015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
〒104-0052 東京都中央区月島一丁目15番7号
パシフィックマークス月島8階

TEL 03-3534-4511（代表）

FAX 03-3534-4567

URL <http://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、
企画部にお問い合わせください。