

RWMC

原環センター
2013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 T R U 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。

原子力をめぐる環境は大きく変わりつつありますが、当センターは、原子力技術分野に関わる一員として、厳しい認識に立ち、社会から求められる調査研究や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、2013 年度(平成 25 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.	その他の管理処分に関する調査研究.....	8
II.	放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究.....	9
1.	処分システム工学確証技術開発.....	9
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.....	11
1-2	人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材.....	17
1-3	モニタリング関連技術の整備.....	21
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.....	25
2.	地層処分回収技術高度化開発.....	29
3.	T R U廃棄物処理・処分技術高度化開発.....	35
3-1	ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上.....	35
3-2	炭素 14 長期放出挙動評価.....	37
3-3	ナチュラルアナログ調査.....	39
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.....	43
3-5	ガス移行連成挙動評価手法の開発.....	47
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 ..	51
5.	その他の地層処分に関する調査研究.....	53
III.	放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	55
1.	放射性廃棄物海外総合情報調査.....	55
2.	放射性廃棄物重要基礎技術高度化調査.....	57
3.	放射性廃棄物処分の諸外国の安全規制に係る動向調査.....	59
4.	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 ..	62
5.	放射性廃棄物ナショナルインベントリ構築調査.....	63
6.	セメント系材料への熱影響評価に関する検討.....	65
7.	食品の調理・加工による放射性核種除去率データの整備.....	67
8.	その他の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	71
IV.	放射性廃棄物処分への理解促進.....	73
1.	地層処分実規模設備整備事業.....	73
V.	国際交流	81

VI. 資料	83
1. 講演会・セミナー等	83
2. 論文投稿、学会発表等	84
3. 刊行物	90
4. ホームページへの海外最新情報の掲載.....	91
5. 委員会一覧	95

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証試験

◇事業の概要

本事業は地下50m以深の大断面地下空洞に緩衝材、低拡散材及びコンクリートピットで構成される処分施設（地下空洞型処分施設）を施工するための技術を確証するものである。確証試験は、図-1に示す概念の処分施設を模擬した、我が国初の実規模試験となる。平成17～24年度は、「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構築方法及びバリアの初期性能の確認試験を順次、実施してきた。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試験・検討を始めた。

以下に実施項目と実施年度を記す。

- ・施設形態・人工バリアの要求機能設定、試験全体の基本計画策定（平成17年度）
- ・詳細設計、詳細試験計画策定（平成18年度）
- ・緩衝材施工確認試験（平成19～25年度）
- ・低拡散材施工確認試験（平成20・21・24年度）
- ・コンクリートピット施工確認試験

（平成20・21・24年度）

- ・充填材・上部充填材施工確認試験
（平成21・22・23年度）
- ・側部・底部・奥部埋戻し材施工確認試験
（平成19年度）
- ・上部埋戻し材施工確認試験（平成25年度）

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分について、既存の施工機械を基にした施工方法で充分品質の高いものが構築可能なことを示すとともに、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示す。また、表-1に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。

（報告書）平成25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認試験報告書

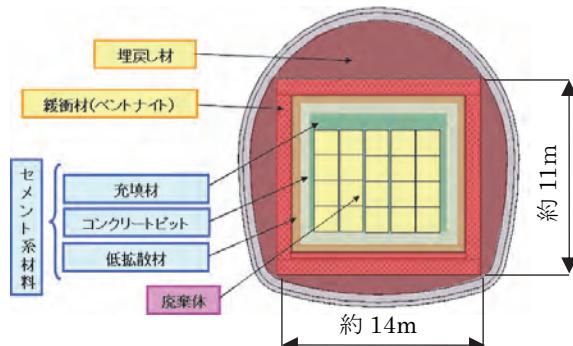


図-1 地下空洞型処分施設の概念図

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：ペントナイト（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 トリチウムの実効拡散係数： 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 上部	材料：鉄筋コンクリート 材料：土質系材料（砂85%、ペントナイト15%）

◇平成25年度の成果

平成25年度は、以下の試験等を実施した。

(1) 上部緩衝材施工確認試験・初期性能確認試験

上部緩衝材の施工箇所は、側部緩衝材との接合部分で上部空間が狭隘で施工断面が鍵状の形状を呈する個所（隅角部）と、上部低拡散材の上部で施工空間が確保されている平坦な個所（平面部）に区分して施工確認試験を実施した。

図-2に上部緩衝材の試験位置図を示す。

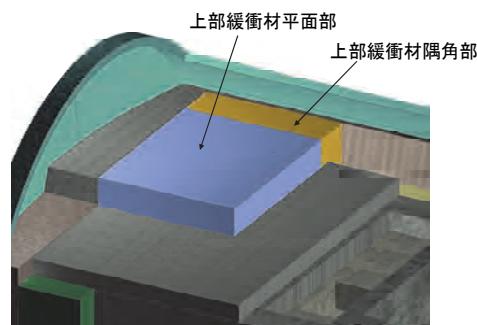


図-2 上部緩衝材試験位置図

1) 上部緩衝材隅角部施工確認試験・初期性能確認試験

隅角部の施工方法は、その上部空間の天井高が低く、転圧機械や吹付けロボット等による施工が難しいことから、人力による吹付け工法を選定した。また、吹付け工法で必然的に発生する跳ね返り材料（以下、リバウンド材と称する）を再利用し、これまでの試験結果に基づき、リバウンド材の含水比の低下量に応じて材料供給量を制御して所定の乾燥密度を達成させる方法により施工し、その施工性、品質等について検討を行った。（図-3 参照）

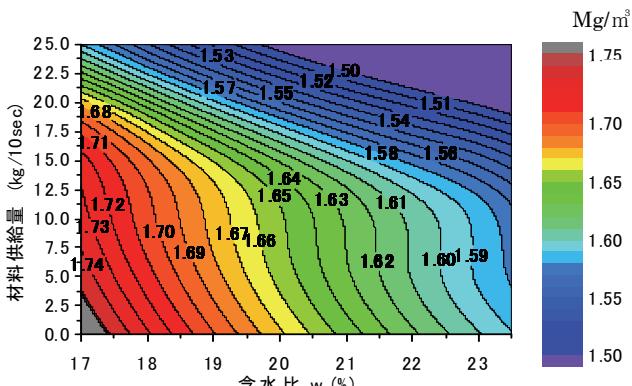


図-3 含水比と材料供給量と乾燥密度の関係

使用材料は破碎したベントナイト原鉱（クニゲル GX、最大粒径 5 mm）を使用し、含水比調整方法は、ミキサを用いた水添加混合方式を採用した。吹付け材料の調整後の含水比は、平均 20.6% であり、含水比の管理基準値 21±2% の範囲内に調整できた。

含水比調整後の材料を用いた吹付け工法により、右側隅角部の最大幅 1.5m、最小幅 1.0m、高さ 1.69m、奥行き 5.25m の、鍵型の範囲を施工し、採用した施工方法の実施設への適用の可能性を検証した。

- ・適用した材料供給システム、リバウンド材回収方式、リバウンド材の含水比低下に応じた吹付け材料供給量の制御等の施工法により、管理目標値の平均乾燥密度 $1.6 \pm 0.1 \text{ Mg/m}^3$ に施工できた。
- ・リバウンド率は、約 37.8% であり、既往試験結果と比較して高い値となった。
- ・リバウンド材を再利用するにあたり、リバウンド材の含水比の低下に合わせて材料供給量を制御する方法により、ばらつきの小さ

い密度管理が出来ることを確認した。

- ・実施設での吹付け量として $1.01 \text{ m}^3/\text{h}$ 程度が可能であることが明らかになった。

以上により、実施設の施工において、今回試験した施工技術・施工方法を用いることにより高品質な緩衝材を構築できることが確認された。

また、透水係数、密度、強度、膨潤特性を把握するため初期性能確認試験を実施した。

- ・一軸圧縮強さ、変形係数は含水比、乾燥密度との関係において既往データとよく整合する傾向を示し、含水比、乾燥密度と一軸圧縮強度、変形係数の関係を取得しておけば、含水比、乾燥密度から緩衝材の一軸圧縮強さ、変形係数を概ね想定できる見込みが確認出来た。
- ・透水係数は、緩衝材に要求される止水性能「透水係数 $5 \times 10^{-13} \text{ m/s}$ 以下」を満足する。
- ・膨潤圧と有効粘土密度の関係から吹付け工法は品質的に異方性がない緩衝材を施工可能であると言える。

2) 上部緩衝材平面部施工確認試験・初期性能確認試験

上部緩衝材平面部の施工では、施工空間が狭隘で大型機械の適用が難しく中型若しくは小型機械の適用が想定されることから、本施工確認試験では小型振動ローラでの施工確認試験を行った。また、撒出しあは上部空間の制約上、人力で実施したが、実施設の施工には小型のフィニッシャーの使用も考えられることから、それを想定した撒出し厚さ（10cm）で、施工性、品質等について検討を行った。

使用材料は破碎したベントナイト原鉱（クニゲル GX、最大粒径 10 mm）を使用し、含水比調整方法は、ミキサを用いた水添加混合法式を採用した。ベントナイトの含水比調整後に小型振動ローラ（車輪幅 850mm）による転圧工法で、上部緩衝材の一部（高さ 1m×幅約 6m×奥行き約 5m、20 層）を施工し、採用した施工方法の実施設への適用性を確認した。また、透水係数、密度、強度、膨潤特性を把握するため初期性能試験を実施した。

- ・2 層分まとめて振動転圧を行う場合と 1 層単位で振動転圧を行う場合の施工後の品質では、1 層単位の施工を行った場合の方が密度のばらつきは小さいことが分かった。

I. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

そこで、1層単位で振動転圧を行うことを基本とし、施工仕様（人力撒出し 10cm、無振動転圧 4Pass、振動転圧 2Pass）で工法を規定し、施工後の品質を確認した。

- ・管理目標値の平均乾燥密度 $1.6 \pm 0.1 \text{Mg/m}^3$ に施工できることを確認した。
- ・仕上り密度のばらつきの幅を把握するため、コアサンプリングを2層単位で実施し、密度を測定した結果、仕上がり密度は $1.62 \sim 1.66 \text{ Mg/m}^3$ の範囲となり、ばらつき幅は 0.04 Mg/m^3 程度と小さくなることが分かった。

図-4 に平面部の施工確認試験の実施状況を示す。



図-4 上部緩衝材平面部施工確認実施状況

初期性能確認試験については、建設・操業時の安全確保性能に係る試験として一軸圧縮試験、三軸圧縮試験を実施し、振動締固め施工で構築した部材の強度特性・変形特性を確認した。

- ・一軸圧縮強度は $671.5 \sim 690.1 \text{kN/m}^2$ で、乾燥密度に依存する傾向が認められた。また、三軸圧縮試験では、粘着力は 452.1kN/m^2 、せん断抵抗角は 2.2° であり、既往の結果に近い値であった。

また、止水性能に関する試験として、透水係数の代替え特性となる乾燥密度を、上部緩衝材から各層約 50mm のコアを採取し、上下方向に 2 分割して測定した。

- ・2 分割したコアによる乾燥密度は上部の平均が 1.654 Mg/m^3 、下部の平均が 1.625 Mg/m^3 と約 0.03 Mg/m^3 程度下部の方が小さくなっているが、全体での平均が 1.640 Mg/m^3 で管理目標値 $1.60 \pm 0.10 \text{ Mg/m}^3$ の範囲にあり、管理基準を満たす結果となった。

(2) 上部埋戻し材練混ぜ試験及び締固め特性試験

1) 上部埋戻し材練混ぜ試験

上部埋戻し材に求められる品質は、現段階では

具体的に定められていない。締固め後の目標透水係数の均質性を確保するため、上部埋戻し材の材料としてベントナイト（クニゲル V1）及び砂を使用して、複数の練混ぜ機械、練混ぜ方法により、配合の異なるベントナイト混合土の材料練混ぜ試験を実施し、練混ぜ後の品質を比較検討し、練混ぜ方法、練混ぜ機械及び材料配合の違いによる混合率、含水比のばらつきの程度を確認した。

試験に用いた練混ぜ機械は、バッチ式としてアイリッヒミキサとパグミル、連続式として自走式土質改良機 (SR-2000G) とミストブレンダーを選定した。練混ぜ機械を図-5 に示す。



図-5 練混ぜ機械

- ・ベントナイト混合土の含水比のばらつきは、連続式で 2~3% であるのに対し、バッチ式のばらつきは小さく 1~2% であった。
- ・ベントナイトの混合率については、バッチ式と連続式の差は見られず、14.9%~15.4% の範囲となり全ての機械で同程度であった。
- ・ベントナイト混合土の粒度分布は、練混ぜ機械による違いは認められなかった。

締固め特性については、各機械で製造した材料の土の突固め試験 (A 法) により得られた結果を室内で練混ぜた材料 (手練り) で得られた締固め曲線と比較した。

- ・砂ベントナイトに関しては、概ね室内で練

混ぜた材料（手練り）で得られた締固め曲線上にあり、練混ぜ機械の違いによる材料の締固め特性に差はなかった。

- ベントナイト混合土の透水係数はすべての試験ケースにおいて、 $1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 以下となり、練混ぜ方法の違いによる透水性に明確な差は認められなかった。

2) 締固め特性試験

締固め特性試験は、複数の機械及び施工法により実施し、品質（仕上り品質のばらつきを含む）及び施工性等の所要の項目についてのデータ収集・確認を行い、ベントナイト混合土の施工への適用性を検討した。

施工方法は、転圧工法と吹付け工法とした。試験に使用する機械は、転圧工法では3種類、吹付け工法では1種類を採用した。ベントナイト混合土は、アイリッヒミキサにより練混ぜた。転圧工法による確認試験は、締固めエネルギーの異なる機械、材料（砂ベントナイト、礫ベントナイト）、撒出し厚さをパラメータとして実施し、品質を確認した。

- 転圧工法による乾燥密度は、全てのケースが締固め曲線（A法）上の上下に $\pm 0.1 \text{ Mg/m}^3$ 程度のばらつきとなった。
- 転圧工法では、締固めエネルギーが大きい機械ほど少ないPass数で締固めでき、締固め度は95%以上であることを確認した。
- 吹付け工法による乾燥密度は、締固め曲線（A法）より 0.1 Mg/m^3 程度低い密度となった。
- 吹付け工法では、締固め度は93.0～96.4%であり、いずれの材料配合でも締固め度は90%以上となることを確認した。
- 吹付け工法のリバウンド率は材料配合によって異なり、材料の最大粒径が大きいほど、リバウンド率が高い結果となった。

(3) 上部埋戻し材施工確認試験・初期性能確認試験

上部埋戻し材は、上部緩衝材の上部にあたり、上部空間が非常に狭隘で、上部・側部がアーチ形の特異形状をした空間の閉鎖を行うことから、使用材料、使用機械、施工方法等を選定し、施工確認試験を実施した。

図-6に上部埋戻し材の試験位置図を示す。

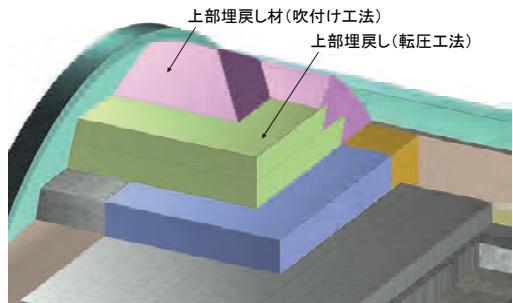


図-6 上部埋戻し材試験位置図

上部埋戻し材の施工確認試験においては施工ヤードの制約上、バイブロコンパクタによる転圧工法と圧力釜式吹付け機による吹付け工法を用いて試験を実施し、施工性、品質等について検討を行った。

使用材料としてベントナイト混合土（クニゲルV1：砂=15:85（重量比））を使用した。埋戻し材の製造は、自走式土質改良機（SR-2000G）を用いた水添加混合方式を採用した。

ベントナイト混合土を撒出し（厚さ20cm：人力）、施工高さを確保できる平面部ではバイブロコンパクタによる転圧工法、天井高が低いアーチ部は吹付け工法により高さ約3m×幅約6m×奥行き約6mを施工し、採用した施工方法の実施設への適用性を確認した。図-7に上部埋戻し材の施工確認試験実施状況を示す。



図-7 上部埋戻し材施工確認試験状況

- 自走式土質改良機にて製造したベントナイト混合土の含水比の平均値は14.6%、設定値14.5%に対するばらつきは-1.9～+2.3%程度で、管理値（3%）以内であった。また、混合率の平均値は14.8%、設定値15.0%に対するばらつきは-1.3～+1.0%程度であった。
- 施工後の締固め度（室内試験A法による最大乾燥密度 1.810 Mg/m^3 に対する施工後の乾燥密度の割合）の平均は、吹付け施工で

I. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

94.9%、転圧施工で95.4%となり、両工法ともほぼ目標値(95.0%)を満足し、工法の違いによる締固め度には大きな違いは無かった。

- 施工後の乾燥密度は、吹付け施工が平均値で 1.718Mg/m^3 、ばらつき幅が 0.161Mg/m^3 、転圧施工が平均値で 1.726Mg/m^3 、ばらつき幅が 0.150Mg/m^3 となり、平均値、ばらつき幅とも大きな差は見られなかった。

図-8に吹付工法及び転圧工法の乾燥密度と締固め度の度数分布図を示す。

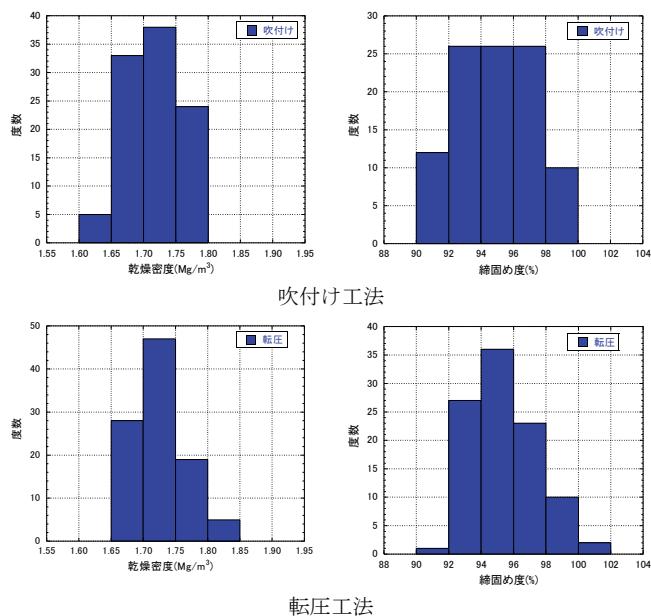


図-8 乾燥密度、締固め度の度数分布図

- 吹付け工法におけるリバウンド率は、約15%程度であった。
- 今回の試験で品質のばらつきの程度が明らかになるとともに、今回採用した2種類の施工方法を組合せることにより、特異形状の空間を埋戻せることを確認した。
- 初期性能試験の結果、埋戻し材の透水係数は、約 $1 \times 10^{-11}\text{m/s}$ 程度の性能が得られ、初期性能として設定した値である $1.0 \times 10^{-8}\text{m/s}$ を満足することが確認された。
- 一軸圧縮強度、内部摩擦角、せん断定数、膨潤力等、今回使用したペントナイト混合土の物性値を把握した。

以上のことから、今回の試験により、適用した転圧工法及び吹付け工法の上部埋戻し材への適用性が把握でき、施工性、品質(乾燥密度のばら

つき等の材料特性・層厚さ等の出来形)、初期性能(透水係数)を確認した。また、既存の施工機械・施工方法を用いて品質の良い上部埋め戻し材が構築出来ることを確認した。

(4) 施設・周辺岩盤挙動計測

平成24年度までに構築した施設と岩盤に設置した計測器及び本年度に上部低拡散材上に新たに設置した計器(土圧計、加速度計)及び地震計を対象にデータを取得し、整理・評価した。

- 土圧計、加速度計のデータ解析結果から上部緩衝材の施工に伴う小型振動ローラの荷重や振動による上部低拡散材への力学的な影響は小さいことを確認した。
- 地震計により地下空洞内の試験施設で比較的小さな地震波を3回観測した。

(5) ベントナイト材料特性測定

本測定では、材料特性の知見が十分に得られていない上部埋戻し材の材料であるベントナイト混合土を対象に、室内成形供試体を用いた吸水に伴う膨潤変形測定試験、圧密非排水三軸圧縮強度試験(CU)、変形特性を求めるための繰り返し三軸試験、圧密試験及び透水試験を実施した。

- 15%混合のベントナイト混合土は、全試験ケース(鉛直載荷圧100、500、1000kPa)で初期状態よりも圧縮されることが確認された。
- ベントナイトの混合率によっては、吸水に伴う変形よりも鉛直圧の載荷による変形の方が、支配的になることが分かった。
- 鉛直圧や給水前の供試体の飽和度により、給水後の挙動が影響することも分かった。
- 再冠水に伴う飽和後の力学特性・圧密特性・透水特性を評価するための試験により、各パラメータの取得ができた。

(6) セメント系材料特性測定

平成24年度に打設した上部低拡散材から採取した供試体を対象に、定常拡散試験等を実施した。また、上部低拡散材等のひび割れ調査を実施した。

- 本年度測定したデータから実効拡散係数は、 $1.3 \times 10^{-13}\text{m}^2/\text{s}$ (暫定値)程度であった。
- 現場施工されたLPC-FA系の低拡散材を用いた拡散係数測定の結果より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 の範囲にあり、平成 24 年度から実施している上部低拡散材の試験についても同様な傾向となる見込みが得られた。

- ・ひび割れ調査の結果、前回調査 (H25. 3. 13) から今回調査 (H26. 2. 14) までの期間中、上部低拡散材及び上部コンクリートピットに、ひび割れ幅の増大、進展、新たなひび割れ等は確認されなかった。

(7) ボーリング孔等の閉鎖技術の検討

ボーリング孔、アクセス坑道等の閉鎖技術に関する、使用材料、施工方法等について既往の研究成果の調査を行った。

- ・ボーリング孔閉塞に関する地層処分以外での要求項目は、帶水層の水質の維持等の環境が主要テーマとなり、セメント系材料での置換工法が用いられている。
- ・アクセス坑道の閉鎖等に関しては、埋戻し材の要求性能は母岩と同程度の透水性と坑道の安定性確保が求められ、使用材料としてはペントナイト系材料が主体となっている。

(8) 巨大地震が地下空洞施設に与える影響検討

上記(4)で設置した地震計の観測データを整理し、応答挙動（加速度等）を分析するとともに、試験施設の地震時の定性的な挙動を検討した。

- ・地震計の観測データを用いた地震応答解析では、試験空洞底盤で観測した地震動を用いて解析用入力地震動を作成し、2 次元 FEM モデルにより時刻歴非線形地震応答解析を実施した。解析に用いた埋設空間周辺の地震応答解析モデルを図-9 に示す。
- ・解析結果と観測した地震動データを比較分析した結果、フーリエスペクトルの傾向が両者ともに類似していることから、本解析モデルが本試験施設の振動数特性を反映していることを確認した。

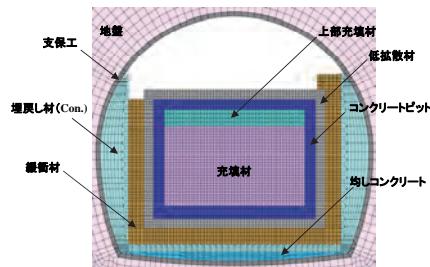


図-9 地震応答解析モデル（処分施設周辺）

また、地震時の施設挙動解析・評価の結果、緩衝材に塑性変形が考慮できる弾塑性モデルを適用した非線形地震応答解析によって、緩衝材の非線形挙動の影響を考慮した地下空洞施設の地震時挙動を検討した。

- ・緩衝材は塑性変形が発生した領域と、残留ひずみについても評価することができ、その結果、地震後の残留変形も少なく、地震後にピットが大きく傾くような状況には至らない結果となった。
- ・低拡散材に発生する最大主応力が引張強度を上回ることはなかったことから、本検討に用いた地震動レベルではひび割れは発生しないものと考えられる。

平成 25 年度末の試験施設の形状及び試験施設の全景を図-10、図-11 にそれぞれ示す。

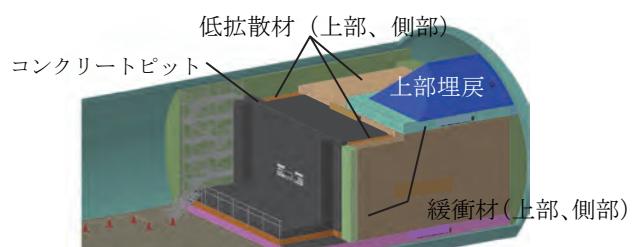


図-10 平成 25 年度末試験施設の形状（鳥瞰図）



図-11 試験施設の全景（平成 25 年度末）

- 1) 電気事業連合会、原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会 第二種廃棄物理設分科会 資料「余裕深度処分の安全確保の考え方」、平成 19 年 11 月 15 日

I. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

2. 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) L1廃棄体の標準的な製作方法及び検査方法の一体化に関する調査

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。

(2) 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。

(3) CI-36 分析マニュアルの有識者検討資料の対応助成業務

事業者が策定する塩素 36 分析マニュアル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。

(4) 学会標準等の新規制基準適合化に関する調査

原子力規制委員会で検討される核燃料施設等の新規制基準が、廃棄物埋設に関する既定の日本原子力学会標準に与える影響について、予備的に検討した。

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

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

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

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って放射性廃棄物が既に発生しており、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（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及び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が整備されてきた。今後、さらなる処分技術の信頼性向上のために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、操業期

間中における自然災害である巨大地震や巨大津波等の操業期間中の安全対策に関する基盤技術の整備も喫緊の課題となっている。

本事業では、上記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・施工技術及び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た。

◇開発項目の相互関係

処分システム工学確証技術開発は以下に示す4つの開発項目から構成される。

- 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
- 2) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材
- 3) モニタリング関連技術の整備
- 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

図-1 に地層処分事業における処分システム工学確証技術開発の位置付け及び各検討課題の関連を示す。人工バリアを構成する要素には、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材がある。人工

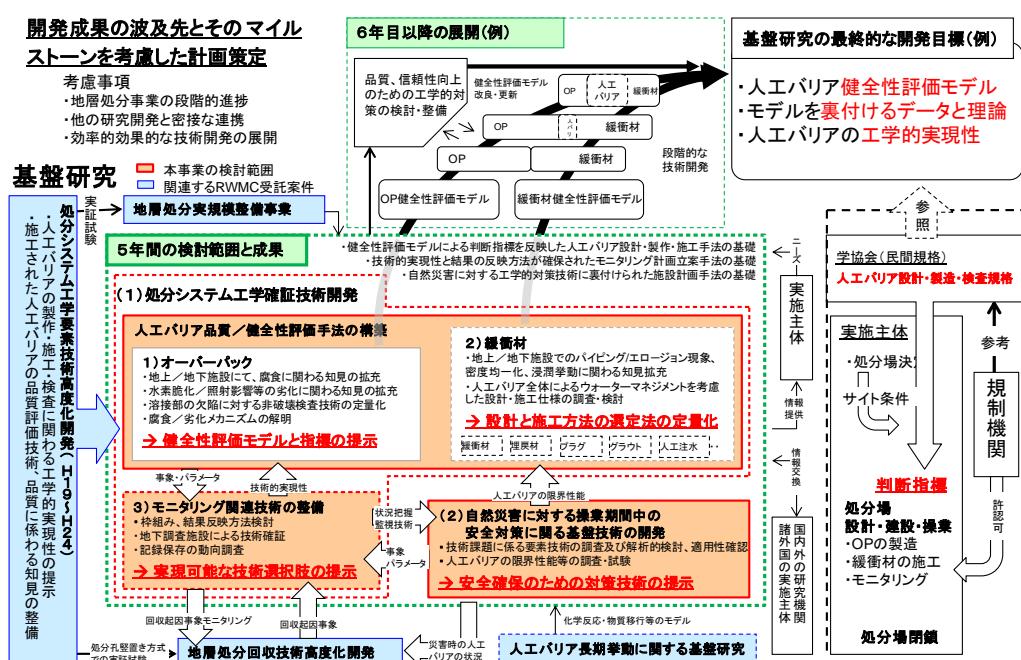


図-1 地層処分事業における本事業の位置付け及び各課題の関係

バリアシステムに要求される機能は、ガラス固化体、オーバーパックまたは緩衝材のそれぞれ単独で成立するものではなく、相互に影響を及ぼし合っている。仮に一つの人工バリア構成要素が機能を満たさなくなれば、人工バリアシステム全体としての機能が損なわれる可能性がある。平成24年度までの人工バリア品質評価技術の開発では、オーバーパックと緩衝材のそれぞれの個別の開発課題について、調査・研究を進めた。平成25年度からは個別課題についてより深い検討も進めつつ、人工バリアという枠組みで期待される機能が発揮されることを評価するための健全性評価手法の構築及び工学的対策の提示に向けた検討を行ない、地層処分事業の安全性、信頼性の向上を図る。

地層処分の人工バリアは一般的な構造物とは異なり、埋設後の検査や必要に応じた補修を行うことが難しい。供用後の検査を必要とせずに人工バリアの健全性を確保するためには、製作・施工の個々のプロセスで品質管理を実施する必要があり、そのための合否判定基準が必要である。前述の健全性評価手法をこの合否判定基準の根拠として、人工バリアの製作・施工から閉鎖後長期健全性評価まで一貫した概念の提示が可能になると考えられる。

人工バリアの健全性評価で必要となる地層処分における種々の環境の条件は、モニタリング技術を用いて把握する必要がある。また、処分場閉鎖

の判断材料の一つとして、処分環境の状態をモニタリングで確認することも必要になると考えられる。そのためには、人工バリア及びモニタリングに関する個別及び両者の境界で生じる課題を抽出し、相互に共有して検討を進める。人工バリアの状態を把握するためには、個々の人工バリアの特性だけでなく、システム全体としての機能に対する影響について検討する必要がある。また、その機能低下等を推定するためには、測定すべきパラメータについての検討や、人工バリアシステムの健全性に影響を及ぼさないモニタリング方法の開発が必要となる。

さらに、処分場操業期間中に自然災害が発生すれば、その影響により人工バリア機能が低下する可能性がある。処分場の安全確保のためには、必要に応じて災害への対策技術を開発し、人工バリアの限界性能について把握しておくことが重要となる。ただし、この安全対策により人工バリアシステムの機能が低下するようなことがあってはならない。

平成25年度は、このような各検討項目間の関連・連携、地層処分事業における本事業の位置付けに留意し、基盤研究の最終的な目標に向けた5ヵ年の開発計画を立案し、それに基づいて調査を実施した。各開発項目の年度ごとの目標を表-1に示す。各開発項目の年度ごとの詳細な開発計画、及び平成25年度の成果を次頁より示す。

表-1 処分システム工学確証技術開発 各開発項目の年度ごとの実施内容及び成果目標

	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 ・材料因子との腐食現象の関係	・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	
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	・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
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	・人工バリア限界性能等に関する知見の整備	・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では、溶接試験、非破壊検査、オーバーパックの溶接部の機械的特性、許容欠陥寸法に対して、既往の知見や原子力発電設備に関する規格・基準により構成された基準を判断指標として評価した。また、人工バリア品質評価技術における溶接部の耐食性は、「地層処分研究開発第 2 次取りまとめ」¹⁾で示された候補材料の腐食シナリオ及び腐食挙動を品質の判断根拠とした。すなわちオーバーパック成立の根拠を他の基準や母材の性能に求めており、オーバーパックという溶接構造物の長期健全性評価に基づいたものではない。このような背景より、今後の工学技術の開発や品質評価にはオーバーパックのために構築された評価手法が必要である。

平成 25 年度からは、これまでの研究開発成果を踏まえて、オーバーパック溶接部の耐食性評価試験、及びオーバーパック材料の機械的性質が長期健全性に及ぼす影響を品質評価に取り入れるための調査・検討を実施する。製作されたオーバーパックが健全であるか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判断指標が必要となる。このような判断指標は、埋設後に生じる可能

性がある損傷事象を防ぐための腐食や構造に関する検討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複雑系におけるオーバーパック溶接部の耐食性評価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。

(報告書)平成 25 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

◇平成 25 年度の成果

(1) 5 カ年の研究計画の策定

人工バリア品質／健全性評価手法－オーバーパックの実施に際しては、実際の処分事業でのニーズを見据え、「人工バリア健全性評価モデル」、「モデルを裏付けるデータと理論」、「人工バリアの工学的実現性」を提示するための 5 カ年の研究計画を策定した。表-1 に策定した研究計画の各年度の実施項目、及び想定成果を示す。平成 25 年度はこの研究計画に基づき、以下に示す項目について検討を実施した。

表-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 5 カ年計画

	H25	H26	H27	H28	H29
①5年間の研究計画立案	課題抽出・整理 全体計画立案		進捗確認、計画更新		
②構造・腐食評価を合わせた健全性評価・判断指標の提示					
i. 健全性評価	詳細計画検討 文献調査	健全性評価モデルの検討・判断指標の提示に向けた要素を提示			
③溶接部耐食性評価試験					
i.単純系・長期的な腐食挙動の把握	長期浸漬試験 維持管理	腐食測定系の妥当性確認	緩衝材と腐食挙動の関係評価	過元性効果遮断浸漬試験評価 10年間の腐食速度、水素濃度	
ii.複雑系での耐食性評価	計画立案、試験体製作、 装置製作、予備試験	試験装置構築 データ取得開始	地下研での腐食試験における センサー類の妥当性確認	試験片寸法が耐食性評価試験結果に及ぼす影響の評価	複雑系における腐食挙動の提示
iii.地下施設を活用した耐食性評価試験		試験装置構築 地下研への設置、試験開始	初期(定置直後)の 腐食率等の取得	再冠水後の腐食挙動取得	再冠水後の腐食挙動取得
iv.メカニズム解明のための腐食試験	詳細計画検討	材料因子(溶接組織) 緩衝材の密度差が電気化学的挙動調査	材料因子(化学成分) の影響調査	溶接組織と化学成分の 耐食性への影響度の比較	材料因子を考慮した溶接技術 への工学的対策の提示
④材料劣化を考慮した品質評価手法の検討					
i. 材料劣化	詳細計画検討	劣化事象の抽出			
ii. 脆化	インペンドリ評価 照射脆化に関する 文献調査	OP 線量評価 照射脆化予測のための方法論の 検討	照射脆化メカニズムの検討	照射脆化メカニズムの検討 脆化量予測手法の検討	照射脆化メカニズムの検討 脆化量予測手法の検討
	水素脆化の課題抽出	ガス移行効率評価の取り込み	水素脆化予測のための方法論の 検討	水素脆化メカニズムの検討	水素脆化メカニズムの検討 脆化量予測手法の検討
⑤非破壊検査による欠陥検出精度の定量化					
i. 非破壊検査精度定量化	欠陥位置・寸法測定 誤差の解説的検討 模擬OP試験体の 溶接欠陥寸法測定	測定精度向上に関する検討 (開口寸法の影響)	測定精度向上に関する検討 近接した欠陥の測定分解能に関する検討	測定精度向上の検討 複数欠陥の検討	複数欠陥のモデル化 検査手順の検討
	・判断指標の抽出 ・健全性評価手法案提示 ・研究開発計画策定	・精度評価に基づく限界欠陥寸 法の提示 ・判断指標に影響する劣化事象 の抽出	・材料劣化を考慮できる 健全性評価手法案の提示	・材料劣化を考慮した品質評価 手法の提案	・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

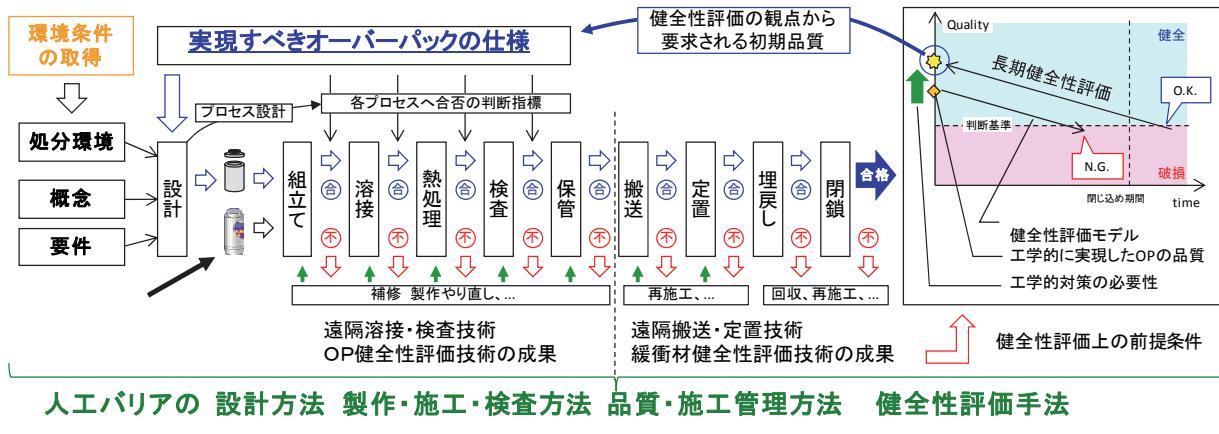


図-1 人工バリアの長期健全性評価手法と製作・施工における品質管理の関係

(2) 健全性評価技術の構築手法の検討

図-1 はオーバーパックの長期健全性評価手法と製作・施工時の品質管理について模式的に示したものである。図中右側に長期健全性評価の模式図を示す。注目する品質を縦軸に取り、その劣化挙動を表す線を健全性評価モデルとした。このモデルは後述する個別開発成果に基づき理論的に構築される。そしてオーバーパックが健全な状態を達成するために、閉じ込め期間経過後に確保すべき品質レベルを健全性評価の判断指標と定義した。この健全性評価手法から人工バリアに要求される初期品質が導き出され、現在の工学技術で実現出来る品質との差を工学的対策が必要な開発課題として抽出される。さらに初期品質が確定するプロセス上の工程を抽出し、その工程の合否を判断するための指標を与えることで、初期品質を製作・施工プロセスで実現することが可能となる。

このために、先ずオーバーパックの安全確保のための要件を整理し、オーバーパックの健全な状態を「所定の期間の閉じ込め機能を有していること」と定義した。全面腐食が成立する材料が設計段階で選定されれば、閉じ込め期間中に耐圧厚さは維持される。そのためオーバーパックに係わる検討項目を腐食評価と構造評価に大別して各々検討し、最終的には腐食と構造を統合した健全性評価手法を構築する計画とした。

(3) 材料劣化に関する検討

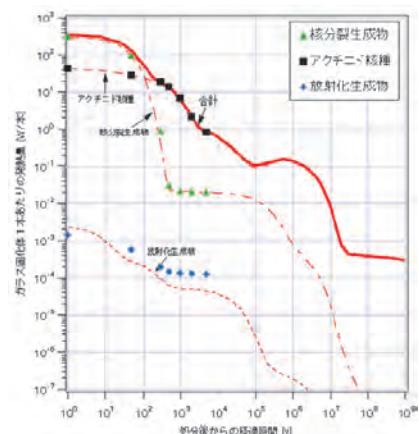
従来のオーバーパックに関する検討及び原子力発電所の高経年化で想定されている材料劣化事象について整理した。その中で、中性子照射及び水素吸収による脆化が、オーバーパックの破壊

抵抗に影響を及ぼす劣化事象の一つとして考えられた。

中性子照射脆化については、原子炉圧力容器を対象とした予測式が提案されているが、オーバーパックの照射条件はその適用範囲外であった。また、脆化量には照射速度依存性があるという報告があり、オーバーパックのように低線量率でも長期間の照射により材料が劣化する可能性がある。そのため、オーバーパックの照射線量率を把握するために、第2次取りまとめにおけるガラス固化体インベントリやオーバーパックの線量計算の解析条件について調査し、再現計算を実施した

(図-2)。そして、今後最新の計算コードを用いてオーバーパックの線量率を調べるための計算条件の妥当性を確認した。

これまでの水素脆化に関する検討では、想定されるオーバーパックの処分環境に対して、候補材中の水素濃度が制限値を下回ることを確認し、埋

図-2 第2次取りまとめ¹⁾と再現計算におけるガラス固化体の発熱量の比較

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

設期間中に水素脆化は生じないことが示された。構造評価の観点からは、水素吸収量と破壊靭性値の低下量の関係や照射脆化と水素脆化が重畠した場合の破壊靭性値の低下などについて検討する必要があることを示した。

(4) 超音波探傷による欠陥測定精度向上に関する検討

オーバーパックへの適用を想定したフェーズドアレイ法(PhA 法)において潜在的に含まれる欠陥高さの測定誤差を超音波シミュレーションにより評価した。図-3 に示すように、欠陥深さ位置が 110 mm より深い範囲では、誤差が概ね ± 1 mm 程度と評価された。また、深さ 190 mm の欠陥に対して、誤差の絶対値が最大で 1.6 mm となる条件があった。ここで評価した高さ測定誤差は、理想的な状態での誤差であり、過去に取得したデータの評価あるいは今後取得するデータの評価において精度目標の参考になる数値と考えられる。

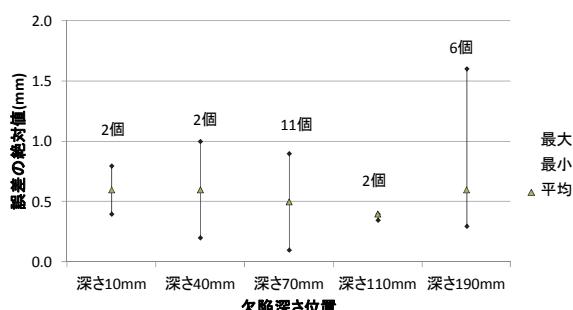


図-3 欠陥深さ位置と測定誤差の関係

断面マクロ調査による実際の測定と PhA 法による欠陥高さの測定値を比較した結果、2 mm より大きい欠陥については全て PhA 法で検出することができた。ただし、欠陥高さの定量性は必ずしも良くはなかった。PhA 法では、欠陥の形状や測定環境等に起因する不確定要素のために誤差が大きくなると考えられた。また、深い位置の欠陥に対する誤差低減策の検討や試験などによる精度の確認を今後検討する必要がある。

(5) 現象理解のための腐食試験

平成 24 年度までの検討では、母材の腐食シナリオに基づいて抽出された現象に対して試験を実施し、溶接部の腐食挙動を評価した。また、溶接部に生じる様々な腐食現象を個別に評価するため、試験環境を単純・均一なものとして腐食試験を実施してきた。しかしながら、実際の地層処分施設は、これらの試験条件と比較して、大きさや環境が異なり、様々な要素が関係する複雑な環境である。そこで実際の地層処分環境における溶接部の腐食挙動を把握、評価するための試験計画を立案した。実施する各試験の位置付けを図-4 に模式的に示す。

単純・均一系での腐食試験は、主に(独)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)}として実施した。オーバーパック溶接部の 5 年間及び 10 年間の腐食挙動及び水素吸収挙動を取得するための還元性雰囲気での浸漬試

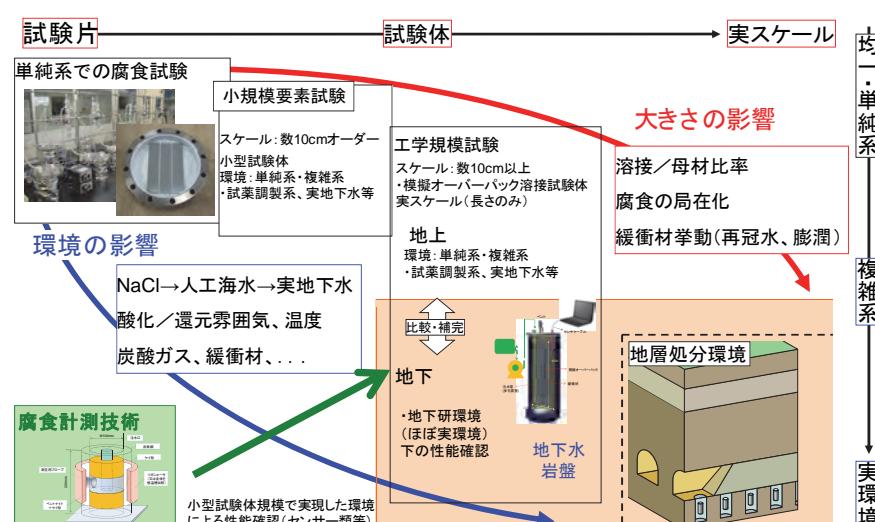


図-4 現象理解のための腐食試験の位置付け

験の維持管理を行なった。応力腐食割れ(SCC)については、緩衝材共存下での割れの発生条件を取得するための定荷重引張試験を実施し、電気化学的に SCC 感受性が高くなる電位条件においても、静的荷重下ではき裂が発生しないことを確認した。さらにオーバーパックの代替材料候補の一つであるチタンについては、低酸素雰囲気セメント平衡水環境における 6 年間の浸漬試験片の分析を実施し、水素ガス等価腐食速度が時間の経過に伴って低下することを確認した。

複雑系での腐食試験は、実験室と地層処分場の間を繋ぐ試験である。地上／地下施設で実施する工学規模試験を軸として、試験体のスケール及び環境因子の影響を評価するための小規模要素試験、ならびに腐食計測技術の妥当性を評価する試験から成り、評価対象を効率良く検討可能な試験計画とした。工学規模試験は、試験体の寸法を実験室での数 cm から 1m 程度に大型化し、緩衝材として厚さ 10cm 程度のブロックを用いることで、実際の緩衝材の浸潤挙動下におけるオーバーパック溶接部の腐食挙動を取得することが目的である。実地下環境における腐食挙動を取得する地下施設での試験（詳細は(7)）と、環境条件を制御して実施する地上施設での試験において、同一の試験設備を構築し、試験結果を比較することで実地下環境における腐食現象を解明する計画とした。

本試験に使用する溶接付き模擬オーバーパックを、これまでの遠隔操作技術高度化開発、人工バリア品質評価技術の成果を反映して製作した。直径 100mm、長さ 1250mm の SFVC1 相当の棒鋼を鍛造により成型し、溶接線を TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接にて付与した（図-5）。ブロック間のすき間や緩衝材浸潤挙動の均一／不均一性が溶接部の腐食挙動に及ぼす影響を評価できる形状とした。

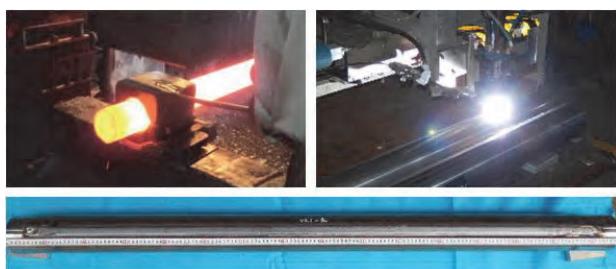


図-5 溶接付き模擬オーバーパックの製作

(6) 腐食メカニズム解明のための腐食試験

地層処分環境にてオーバーパックに危惧される腐食現象を明らかにするために現在実施されている試験の期間は十数年であり、試験期間の妥当性や環境の不確実性という課題がある。そこでオーバーパック溶接部の腐食挙動に係わる現象理解に、メカニズム解明に基づいた腐食現象の論証を加えることにより、長期健全性評価の信頼性向上を図る方策を検討した。そして腐食現象のメカニズム解明のため、材料因子及び環境因子の影響を評価する腐食試験計画を立案した。

材料因子については、溶接手法の違いによる入熱条件や、溶接材料の使用により生じる母材／溶接部の化学成分や金属組織の違いに着目した。金属組織の違いが腐食挙動に及ぼす影響を評価するため、同一化学成分を有し金属組織構成が異なる溶接試験体を製作し、電気化学試験により金属組織ごとの腐食挙動を評価する試験計画を立案した。環境因子についてはオーバーパックが直接接触する緩衝材を対象とし、有効ベントナイト密度、緩衝材の密度、飽和度、厚さなどをパラメータとして、電気化学インピーダンス法で溶液抵抗など基礎的なデータを取得するための試験計画を立案した。

(7) 地下施設での試験

工学規模試験のうち、地下施設で実施する試験については、原子力機構との共同研究^{注2)}として、幌延深地層研究センター（以下、幌延 URL）の地下 350m 調査坑道で実施する計画を立案した。原環センターが実施する試験は、緩衝材ブロックと(5)で示した溶接付き模擬オーバーパックを掘削した試験孔に直接設置し、孔壁からの湧水を利用するものである。一方、原子力機構が実施する試験はコンクリート製の支保を設け、母材の腐食挙動を主に取得する試験である²⁾。両者の試験結果を共有し、実地下環境におけるオーバーパックの腐食挙動の解明を目指す。平成 25 年度は、試験計画に基づき、試験坑道 5 に直径 550mm の試験孔を掘削した（図-6）。

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究



図-6 地下施設での試験孔掘削状況

- 1) 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11年11月
- 2) 独立行政法人日本原子力研究開発機構、幌延深地層研究計画 地下研究施設整備（第Ⅱ期）等事業 要求水準書 改訂版、平成22年8月20日

注1) オーバーパック溶接部の耐食性に関する研究
注2) 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認に関する研究

(This page(p16) is intentionally kept blank.)

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

本開発は、高レベル放射性廃棄物の地層処分の人工バリアに用いられる緩衝材を対象に、製作・施工技術について、深地層の環境を考慮し、品質評価、健全性評価を行うものである。緩衝材については、平成21年度からの検討において緩衝材の製作・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、ベントナイトの成分が流出することを示してきた。

本開発では、第一に、処分環境（湧水量や水質等）を考慮した調査・検討を実施し、緩衝材施工法の選定方法に定量的な評価を加えることを目的としている。第二に、緩衝材の性能劣化事象として懸念されるパイピング／エロージョン現象に対しては、工学的対策の提示に向けた調査・検討を実施する。第三に、上記実施内容で得られる知見を取りまとめ、多様な技術により構築される人工バリアの品質／健全性評価に向け、人工バリア性能を満足する緩衝材の指標の具体化に資することを目的としている。

平成25年度は、緩衝材の品質確認及び品質改善手法の検討等を実施した。具体的には、今後5年間の研究計画を立案し、長期試験を継続とともに、処分環境（湧水量や水質等）を考慮した緩衝材施工法に対する工学的対策を検討した。また、塩水環境におけるパイピング／エロージョン現象の把握と工学的対策及び緩衝材を含む人工バリア全体としての設計・施工仕様に関する検討を実施した。さらに、地下施設を活用した試験計画を策定し、試験孔と設備の一部を施工した。

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。

(報告書)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 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－

◇平成25年度の成果

(1) 研究計画の立案

これまでの検討において、緩衝材ブロック（クニゲルV1 70wt% + ケイ砂 30wt%）を対象として、緩衝材の再冠水挙動について実験を行い、緩衝材の初期の密度分布は膨潤しても均質化せず密度分布が残ることや、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、ベントナイトの成分が流出することを確認した。特に、塩水（0.5M NaCl）がある流量で下部から上部に向かって流入するとケイ砂が分離し、自己修復しない可能性があることを確認した。これは海水起源の地下水環境では、ケイ砂を含まない材料を選定することが有効である可能性を示唆している。

これらの研究成果をもとに平成25年度から平成29年の5カ年の全体研究計画を策定した。緩衝材が地下環境において健全性を維持できることを確証するために、より現実的な処分環境（工学規模、湧水量や水質等）を考慮した研究を行う必要がある。緩衝材の性能劣化事象として懸念されるパイピング／エロージョン現象に対しては、緩衝材の工学的対策として、平成24年度に検討した方法について有効性を評価する。一例として、モンモリロナイトの含有率を99%以上に精製したクニピアFの材料に海水起源の地下水が流入した場合を評価する。さらに、埋め戻し材や、プラグを含む人工バリア全体の性能について調査を行う。

(2) 各試験、検討の概要

本検討において、試験は理想的な系である小規模試験から、単純な系である土槽試験、複雑な系である工学規模試験へのスケールアップを基本としている。

平成25年度は、緩衝材の密度差の残留現象に関する試験において、蒸留水を通水した小規模試験を継続実施する一方、海水系地下水（0.5M NaCl）を通水した場合に施工品質（密度差）が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響を調査した。

また、Caイオンの影響に関する試験であるCa型化速度取得試験では、昨年度まで蒸留水とCaCl₂の液種の通水順序がCa型化速度や、透水係数に与える影響を調査してきたが、最終的にCaCl₂に統一して試験を継続した。

表-1 緩衝材に関する5カ年の全体研究計画

		H25	H26	H27	H28	H29
①5年間の全体研究計画立案		計画立案		進捗確認 計画の変更		
②処分環境（湧水量や水質等）による影響の調査・検討						
i	施工品質（密度分布）の均質化	(0.5/3M CaCl ₂) 溶液の場合：①密度均質化の検討、②応力履歴の検討	0.5M NaCl+0.5/3M CaCl ₂ 溶液場合：①密度均質化の検討、②応力履歴の検討			
ii	施工品質が再冠水に及ぼす影響試験（土槽試験）	①緩衝材ブロックの乾燥密度分布の取得 ②ブロック+ペレット浸潤状況、密度	③塩水環境下における土槽試験			
iii	緩衝材の品質確認及び品質改善手法の検討	e-log P曲線の取得：①1.2Mg/m ³ ～2.0Mg/m ³ までの段階圧密試験、②液性限界程度での段階圧密試験 ①Ca型化の発生時期が膨潤挙動に及ぼす影響の取得、 ②一次元浸潤速度試験の継続 ①間隙空気の移行に関する調査・検討	③塩水環境下でのe-log P曲線の取得、 ④緩衝材膨潤挙動の力学的解釈 ③人工注水効果の確認 ④熱影響を受けた場合の空気の移行に関する調査・検討			
③バイピング／エロージョンに対する工学的対策に関する調査・検討						
i	小規模バイピング試験	①0.5M NaCl溶液の場合のエロージョン量の把握 ②0.5/3M CaCl ₂ の場合のエロージョン量の把握	③1処分孔当たりの許容エロージョン量の範囲設定			
ii	工学規模バイピング試験	①ブロック（流入量、液種） ②ブロック+大小ペレット（流入量、液種）	②ブロック+大小ペレット（流入量、液種） ②ブロック+大小ペレット（流入量、液種）			
iii	地下施設を活用した緩衝材の性能確認	①実地下環境における試験準備 ②現況でエロージョン量計測	③流量制御でエロージョン量計測 ④流量制御でエロージョン量計測	⑤試験結果の評価		
iv	施工技術の高度化による影響度の低減検討（吹付）（体積拘束）	①湧水環境下における吹付け施工試験 （体積拘束効果の確認）	②湧水環境下における現場締固め試験 （体積拘束効果の確認）	③体積拘束効果の評価		
④人工バリア全体としての設計・施工仕様の策定に資する指標の整備						
i	人工バリア全体の設計・施工仕様の策定に関する調査	①前提条件に関する調査・検討 ②人工バリア全体の設計・施工仕様	③地下水環境を考慮した人工バリア	④わが国の人工バリア全体の設計・施工仕様の指標範囲の検討		
ii	埋め戻し材、プラグの要求品質に関する調査・検討	①要求品質に関する調査・検討 ②埋め戻し材、プラグの実規模性能の調査・検討	③地下水環境での埋め戻し材、プラグ設計・施工仕様に関する調査・検討 ④わが国の埋め戻し材、プラグ設計・施工仕様の指標範囲の検討			
iii	人工注水、グラウトの要求品質に関する調査・検討	①要求品質に関する調査・検討 ②ウォーターマネジメント手法に関する調査・検討	③地下水環境での人工注水、グラウトの施工仕様に関する調査・検討 ④わが国の人工注水、グラウトの施工仕様の指標範囲の検討			
各年度の成果目標		・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 ・品質評価／健全性評価手法提案 ・説明性のある長		

緩衝材への地下水の浸潤速度を取得する、長尺ベントナイトの一次元浸潤速度取得試験では、比抵抗と飽和度との関係を乾燥密度ごとに取得し、飽和度と浸潤速度との関係を記述できるようにした。

緩衝材表面近傍の止水性能評価では、海水系地下水を通水した場合の小規模バイピング試験を実施し、蒸留水の場合と比較した。またバイピング・エロージョン現象に対する工学的対策として、人工注水による抑制効果に加え、モンモリロナイトの含有率が高い緩衝材（クニピアF）に海水系地下水を通水した場合の現象を確認した。次に、小規模試験で明らかになった現象が、規模の大きな系でも再現されるかを確認するため、工学規模バイピング・エロージョン試験を実施した。さらにこれらの成果に基づいて工学的対策として閉鎖を早めること、流入量を減らすこと、緩衝材の乾燥密度を高めることを提案した。

土槽試験では、ブロックを解体し、乾燥密度、

飽和度、含水比を測定した。また、ブロックと大粒径ペレットを併用した場合の二次元浸潤土槽試験を行った。また、これまで比抵抗分布で液の浸潤状況を表現していたが、飽和度を用いて浸潤状況を表現できるようにした。

浸潤による間隙空気の移行試験は、上部、下部における膨潤が確認されたことから、これまでの流量制御から10kPaの圧力制御に切り替えて試験を継続した。また、これらに加え施工技術の高度化試験として、湧水がある場合を想定し、吹付け施工後、緩衝材のトップにアクリル製の蓋を設置して、人工給水効果の検証を行った。

また、幌延深地層研究センターの350m坑道における、現地地下水を用いたエロージョン試験のため、試験孔（直径Φ58cm×高さ60cm）を2本掘削した。それぞれの試験孔への地下水の流入量が5.5L/分及び8.0L/分と比較的多かったため、平成26年度はこの状況におけるバイピングエロージョン現象を確認する試験を実施する予定である。

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

以下に具体的な成果をテーマを絞って示す。

(3) 海水系地下水 (0.5M NaCl 水溶液) を通水した場合に施工品質(密度差)が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響

互いに異なる乾燥密度の供試体 ($\rho_d = 1.5/1.7 \text{ Mg/m}^3$, $\rho_d = 1.2/2.0 \text{ Mg/m}^3$, $\rho_d = 1.4/1.8 \text{ Mg/m}^3$) を直列につなぎ 0.5M NaCl 水溶液を通水させ膨潤試験を実施、膨潤量、膨潤圧、乾燥密度について比較した。0.5M NaCl 水溶液の場合、蒸留水の場合に比較して膨潤量が小さく、通水 40 日後の乾燥密度差は、初期の密度差が大きいものほど、蒸留水の場合より大きくなつた (図-1)。

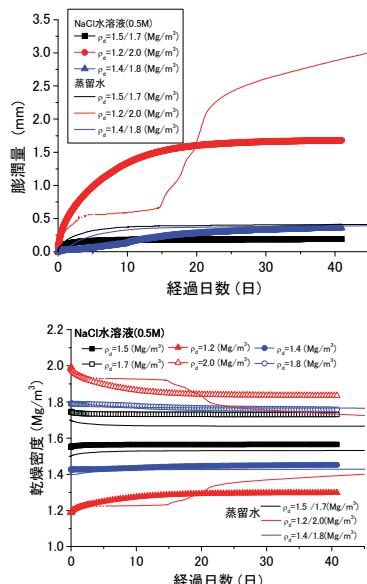


図-1 密度差試験における膨潤量、乾燥密度差の経時変化 (0.5M NaCl 水溶液)

(4) 長尺ベントナイトの 1 次元浸潤速度試験

飽和度が初期値から 1 % 増加した場合を浸潤フロントとして定義した場合、蒸留水のケースではベントナイト下端からの浸潤フロントの高さ d は、 $d = 60t^{0.35}$ で近似された。0.5M NaCl 水溶液の場合は、 $d = 14t^{0.5}$ で近似され、浸潤フロントの進展は蒸留水の場合よりも遅いことが示された (図-2)。

(5) 緩衝材表面近傍の止水性能評価

塩水 0.5M NaCl 水溶液を流量 0.1L/min で通水した場合のパイピングの発生状況は、ブロック供試体(クニゲル V1 70wt%+ケイ砂 30wt%、乾燥密度

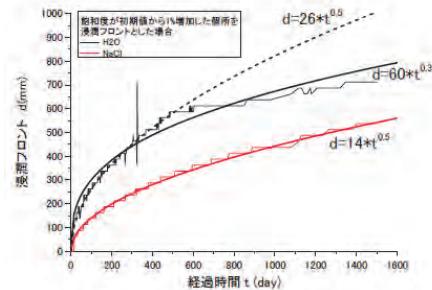


図-2 浸潤フロントの進展状況

1.6 Mg/m^3 の内部に人為的に複数の水みちを設けた場合、蒸留水の場合と同様に水みちがセルとの境界面に 1 本に収斂することを確認した (図-3)。

人工注水試験では、大小ペレットを小規模試験セルに 1/2 断面づつ充填し、事前に蒸留水、塩水で給水し膨潤させた後、それぞれの液種ごとに流量 0.5L/min から 0.001L/min で給水し、送水圧が 3MPa に至るまで作用させてブレイクスルー、パイピング・エロージョン現象の発生を調査した。試験の結果、液種にかかわらず、ブレイクスルー、パイピング・エロージョン現象が抑制できることが示された。人工注水した試料に 0.5L/min で 0.5M NaCl 水溶液を給水した場合の状況を図-4 に、その時の送水圧と総流量と時間の関係を図-5 に示す。



図-3 パイピング発生状況 (小規模試験)

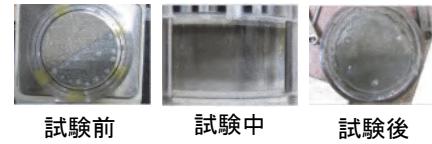


図-4 人工注水試験 0.5L/min NaCl 0.5M

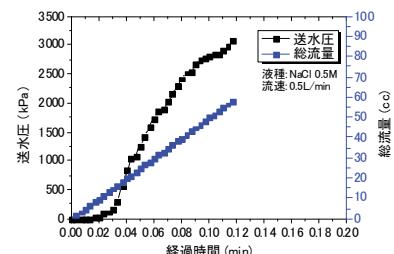


図-5 人工注水した試料に 0.5M NaCl 水溶液を 0.5L/min で給水した場合の送水圧、総流量と時間の関係

モンモリロナイトの含有率が高い緩衝材(クニピアF)に蒸留水を通水した長尺試験の場合、複数あった水みちが1本に収斂するとともに試料上部が浸食され、開始直後1MPaあった膨潤圧が23日目には、0.05MPaに低下した。これに追従するようにパイピングの幅は、15日以降、急激に縮小し、23日以降は水圧が振動しながら増加する傾向にあり、水みちをシールした可能性がある(図-6)。

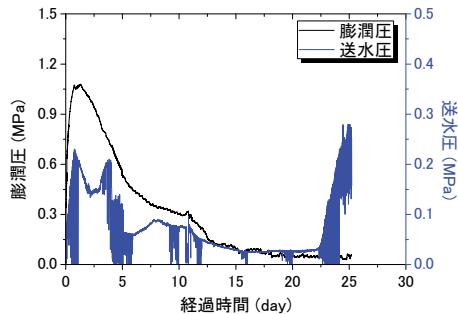


図-6 クニピアFの膨潤圧と通水圧の経時変化

大小粒径ペレットに0.5M NaCl水溶液を通水した小規模試験では、16日目までに2gが流出し、その後は吸光度計では測定できず、系外へのエロージョン量は一定となった(図-7赤下)。これは高イオン濃度のNaCl水溶液によってモンモリロナイトの膨潤が抑制され、水みちに分散せずに沈殿するためであると考えられる。

図-7に示すグラフでは、通水液の種類ごとにグラフの傾きがほぼ等しく、0.5M NaClの場合は、蒸留水の場合よりも勾配が大きい。

工学規模パイピング試験では、膨潤後の乾燥密度 1.6Mg/m^3 、セルとの隙間は3cmとして、Φ56cm×高さ60cmのブロック供試体を製作し、蒸留水を下部から上部に向けて0.1L/minで通水した。パイピング・エロージョンは、最初複数発生したパイピングは1本に収斂すること(図-8)、パイピングは、緩衝材とセルとの界面に発生すること、パイピングが発生した場合の通水圧は約50kPaであり、小規模試験の結果が再現されることが示された。

(6)湧水環境下での吹付け施工試験と人工給水効果の検証

堆積岩を模擬した湧水を想定し、全27箇所の孔から合わせて0.1L/minの湧水を生じさせるCase1と、結晶質岩を模擬した湧水を想定し、3

箇所の孔から合わせて0.1L/minの湧水を生じさせるCase2の計2ケースを行った。吹付け開始後それぞれ100分(Case1)、55分(Case2)後に漏水が発生した。その後、上蓋を設置して体積拘束した後、両者とも200kPa程度に上昇したことを確認した(図-9)。これらの試験結果から、吹付け工法は、湧水環境下においても均質かつ高密度な緩衝材を構築可能であるが、施工中の湧水の完全な止水は困難であること、体積拘束した緩衝材の膨潤により、吹付け施工時に発生したパイピング・エロージョン現象を抑制できる可能性が示された。この抑制効果の向上には、緩衝材全体を効率良く膨潤させることが効果的と考えられる。

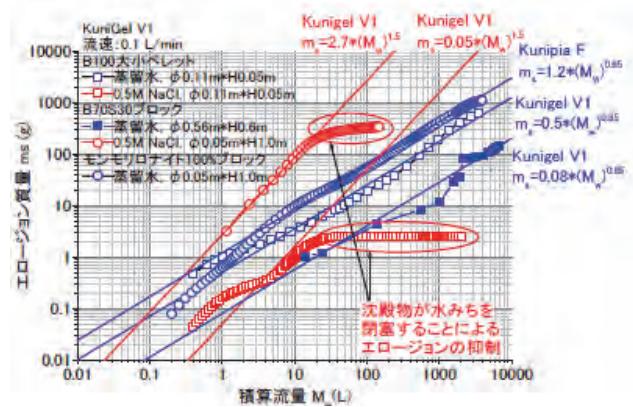


図-7 エロージョン質量と積算流量との関係

赤線：0.5M NaCl水溶液、青線：蒸留水

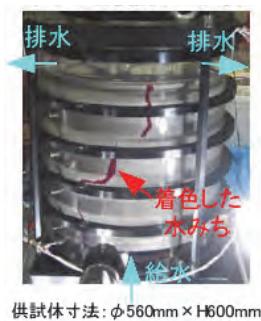


図-8 工学規模試験でのパイピング・エロージョン現象

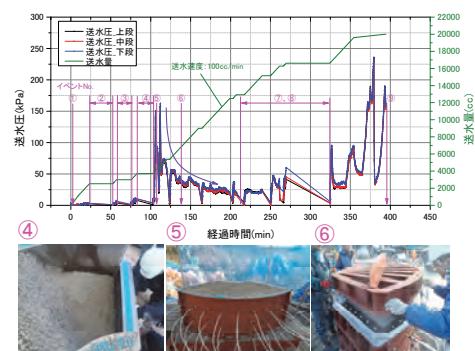


図-9 送水量、送水圧の関係 堆積岩 (Case1)

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

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研究を実施している。モニタリングについては、平成 24 年度までに位置付け及び技術的可能性に係る技術報告書¹⁾を取りまとめるとともにサイト調査前から閉鎖後の各段階を対象にモニタリングの意義や目的について整理した上で、適用可能性のある測定方法を調査し、技術メニュー（データベース）として整備した。

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、課題等の整理、記録保存システムに適用する技術の検討、最新動向の調査を実施しており、平成 14 年度には位置付けと方策に係る技術報告書を取りまとめ、平成 20 年度にはその改訂版²⁾を刊行した。

平成 25 年度は、5 年間の研究計画を立案するとともに、モニタリングの枠組みに関する検討と技術的側面に関する検討、記録保存に関する検討を

実施した。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

(報告書)平成 25 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－

◇平成 25 年度の成果

(1) 研究計画の立案

平成 25 年度から 5 年間のモニタリング関連技術の整備に関する計画を、目的や実施場所、パラメータ、そして結果の反映方法などの枠組みに関する検討と、技術的側面に関する検討に分けて計画した（表-1）。計画にあたっては、平成 24 年度に第 2 フェーズの取りまとめにあたり抽出した課題に加え、原環センターが参画した共同研究である MoDeRn (Monitoring Developments for Safe Repository Operation and Staged Closure) プロジェクト³⁾において抽出した課題を参照した。これに加え、モニタリング結果を含む地層処分に関する様々な記録の保存についても調査計画を示した。

表-1 モニタリング関連技術の整備に関する開発計画

		H25	H26	H27	H28	H29
①5年間の研究計画立案		・計画立案		・進捗確認、計画更新		
②モニタリングの枠組み等の検討	i) 性能確認モニタリングの検討	・詳細計画検討 ・性能確認モニタリングの課題抽出 ・モニタリング結果反映方法の検討 ・MoDeRn成果取りまとめ	・人工バリアの安全機能とFEPによるモニタリンググバラメータの抽出 ・モニタリング結果反映方法の検討	・モニタリング結果のトリガー値設定方法に関する検討 ・IGD-TP 参考による性能確認モニタリングの検討	・人工バリア性能確認モニタリングシステムの例示	・実現可能な人工バリアモニタリング計画の例示
	ii) その他のモニタリングの検討	・詳細計画検討	・操業安全及び回収可能性に係るモニタリングの調査・検討	・回収因事象に係るモニタリングの検討	・制度的管理等に係るモニタリングの調査・検討	・地層処分の信頼性向上に関するモニタリングの役割の提示
	iii) 技術メニューの整備	・詳細計画検討	・技術メニューシステムの検討	・技術メニューシステムの更新	・調査・開発成果の反映	・人工バリアモニタリングシステムの反映
③モニタリングの技術的側面に関する検討	i) 地中無線モニタリング技術の開発	・詳細計画検討 ・中継機等耐圧化検討 ・小型送信機水分計アダプタ開発	・国際 WS 共催 ・ネットワーク化検討	・進捗確認、計画更新 ・改良型中継機製作・試験	・小型送信機耐熱化検討 ・小型送信機耐放射線化検討	・頑健性、冗長性を備えた無線モニタリングシステムの提示
	ii) 電源供給技術等の調査	・課題抽出 ・耐熱性試験	・電磁波による電力供給の基礎試験 ・放射性同位体熱電気変換器の熱影響等の検討	・地中無線装置への新規電源実装方法の検討	・地中無線装置への新規電源実装	・長期モニタリングへの地中無線モニタリング技術適用性の提示
	iii) 地下研等における検証	・中継技術検証 ・モニタリング技術検証準備	・緩衝材・埋戻し材膨潤挙動、水圧モニタリングへの適用性検証 ・坑道埋戻し時のモニタリングへの適用準備	・緩衝材・埋戻し材膨潤挙動、水圧モニタリングへの適用性検証 ・坑道埋戻し時のモニタリングへの適用性検証	・緩衝材・埋戻し材膨潤挙動モニタリングへの適用性検証 ・坑道埋戻し時のモニタリングへの適用性検証	・人工バリア、坑道のモニタリングへの地中無線適用性の提示
④記録保存に関する調査		・詳細計画検討 ・動向調査分析	・OECD/NEA の動向調査・分析	・国内外最新動向の調査・分析	・モニタリングとの関係の整理	・記録保存システム案の提示
各年度の成果目標		・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認	・性能確認モニタリング結果反映方法提案	・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

(2) 地層処分モニタリングの枠組みに関する検討

地層処分における各種のモニタリングについて分類し、特に重点を置くべき処分場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た。検討においては人工バリアを対象とした性能確認モニタリングについて制約条件等を示したうえで、どのような実施方法が有り得るかを考察した。

人工バリアについては、性能確認プログラムの一部としてモニタリングが行なわれるものと考えられる。なお、性能確認プログラムにはモニタリング以外に、室内や地下研究所等で行なわれる各種の試験も含まれ、全ての性能をモニタリングにより確認することはないと想定される。モニタリングにより人工バリアの性能確認を行う際には、モニタリング機器の設置による水みちの形成によりバリア機能を損ねる可能性があり、この可能性を十分に検討し、モニタリングにより得られるデータの重要性と比較してモニタリング対象や方法を決定する必要がある。ここでは、地下特性調査施設、パイロット施設、処分パネルの各箇所で人工バリアの性能確認モニタリングを行う場合について、バリア機能の阻害、地質学的・水理学的な不均一性、放射線影響の観点から比較し、その得失を考察した（表-2）。

また、人工バリアの性能確認に関するモニタリングパラメータについて、緩衝材の再冠水時の挙動を事例として検討を行った。パラメータの選定は、安全機能と技術要件、緩衝材に関する FEP (Features, Events and Processes) の調査、FEP のうち再冠水時に重要なものの選定、これらの FEP に関するパラメータの選定を行った。さらにこのパラメータが技術的観点からモニタリングすることが困難な場合には、間接的にモニタリング可能なパラメータの選定を行った。本検討における FEP は第 2 次取りまとめ⁴⁾のものを用いたが、緩衝材の再冠水時に重要な FEP の選定においては SKB (2010)⁵⁾を参照した。この結果、21 の FEP から 9 の FEP を抽出し、それぞれに対してモニタリングパラメータを検討した。最終的なモニタリングパラメータは現状の技術でモニタリング可能なものとしたため、緩衝材の全圧、間隙水圧、変位、水分、温度、及びサンプリングによる排水中の緩衝材

量とコロイド量となった。

表-2 人工バリアの性能確認モニタリングの実施場所等による比較

モニタリング実施場所	模擬廃棄体近傍の人工バリア	実廃棄体近傍の人工バリア
地下特性調査施設	○：モニタリング機器設置によるバリア性能への影響は、安全面からは考慮しなくて良い。 ×：地質学的・水理学的不均一性への対処が困難、放射線の影響はモニタリング出来ない。	
パイロット施設 (建設された場合)		○：放射線の影響もモニタリング可 ×：モニタリング機器設置によるバリア性能への影響の対処が必要、地質学的・水理学的不均一性への対処が困難。
処分パネル	○：モニタリング機器設置によるバリア性能への影響は、安全面からは考慮しなくて良い。地質学的・水理学的不均一性への対処が可能 ×：放射線の影響はモニタリング出来ない。	○：放射線の影響もモニタリング可、地質学的・水理学的不均一性への対処が可能。 ×：モニタリング機器設置によるバリア性能への影響の対処が必要。

図-1 には、性能確認モニタリングの意味合いを示す。初期のモニタリング結果が許容値を満たしている場合であっても、モニタリング結果を踏まえたモデルの再検討により、モニタリング対象である人工バリアの構成要素が性能を保持すべき期間内に性能を維持できなくなると予測され、かつ処分の安全性に影響を及ぼすと判断された場合は、リスクに対応するために工学的対策や廃棄体の回収等が検討される可能性が出てくる。

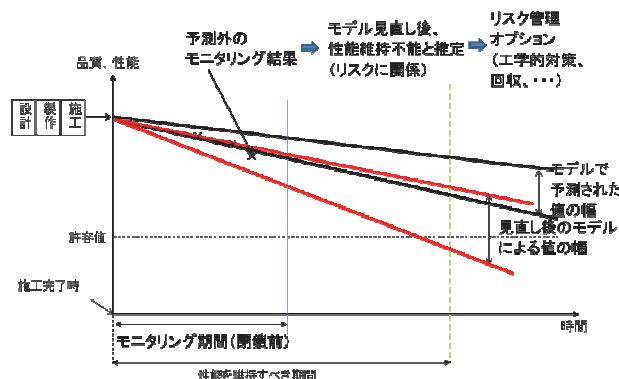


図-1 性能確認モニタリングの意味合い

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

(3) 地層処分モニタリングの技術的側面に関する検討

本検討では先ず、現在のモニタリング技術の概略と課題を示し、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実施した。

処分環境へのセンサの適応に関しては、モニタリング機器の耐圧性、耐食性、耐放射線性という主に材料や製作上の課題と、処分環境で適用できる信頼性・安定性のあるpHセンサの開発の必要性等のより原理的な部分での課題が挙げられる。また、運用上の問題であるモニタリング機器の故障については、MoDeRnプロジェクトにおいてセンサとデータ送信における各種の故障モードと故障検出方法が検討されている⁶⁾。地層処分でのモニタリングにおいては、同一のパラメータの測定に対し、異なった原理により測定する複数のセンサを使用し、同時に全てのセンサが故障しないようにするなど、機器の故障に耐え得る冗長性を確保してデータ取得を確実に行うとともに、各センサの測定値の相互比較や電気的刺激への応答などに基づく自動故障検出システム等の適用を検討すべきであることが指摘されている。

地中無線モニタリング技術については、中継システムの地下研究所における実証試験と耐圧性付与に関する検討、小型地中無線送信装置へのセンサ接続に関する開発、平成26年度の地下研究所における試験の準備、電源に関する検討を実施した。

平成24年度に開発した中継システムについて、日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センター（以下、幌延URL）において、送信機と中継システム間の通信と、中継システムから受信機までの通信からなる中継試験を実施した。小型地中無線送信装置（計測器として間隙水圧計を接続）及び中継システムを深度250mの坑道に設置し、受信機の設置位置を深度250m坑道、深度140m坑道、地表の3箇所に移動して中継試験を実施した。その結果、受信機をいずれの箇所に設置した場合にも送信機からのデータが中継システムにより受信機に送られ、受信されたことを確認した。地中無線の中継システムの成立が確認できたことは、小型地中無線送信装置によ

るモニタリングデータを、同送信装置の通信距離である20数mを越えて遠方に送信することが可能となったことを示し、処分場において坑道が段階的に埋め戻され、無線送信機と受信機間の距離が段階的に長くなる状況においても、埋め戻された部分のモニタリングを可能とする技術の基盤を確立したという意義を持つ。なお、地表に受信機を設置した試験では深度250m坑道に設置した中継システムの直上から水平方向に約200m離れた位置での受信であったため、中継システムと受信機間の距離は約300mであった（図-2）。

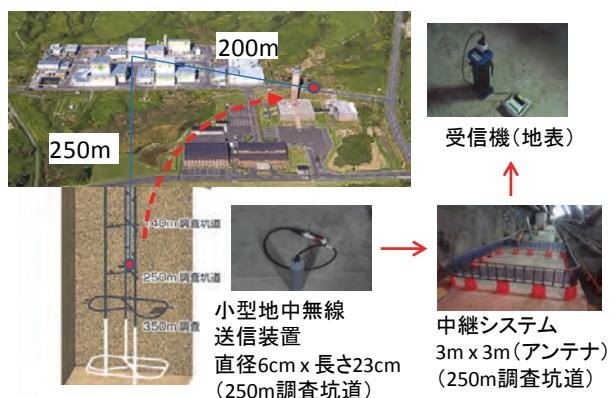


図-2 幌延 URL における地中無線中継試験イメージ図
(地表への中継)

現在、中継システムには外部電源が必要であり、また装置の耐圧性を考慮していない。さらには、中継の回数が1回に限られている。開発目標としている、埋め戻された坑道での利用のためには、これらの課題を克服する必要がある。このため、平成25年度にはまず、装置の耐圧性の確保について検討を行った。検討においては装置を複数の部位に分割し、モジュール化した上で耐圧性を付与するという概念設計を行った。設計した耐圧筐体への荷重に関するFEM解析の結果、10MPaの静水圧がかかった場合でも所定の耐圧性能を確保できることを示した。

小型地中無線送信装置によるモニタリングの適用範囲拡大のため、水分センサの接続アダプタを開発した（図-3）。これにより、緩衝材のモニタリングにて想定されるパラメータである、全圧、間隙水圧、水分（飽和度）、温度が測定可能となり、地中無線技術を用いたモニタリングの実現性が向上した。



図-3 水分センサを接続した小型地中無線送信装置
(全体の長さ : 32cm)

平成26年度には地中無線モニタリング技術の適用性の確認のため、幌延URL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(以下、瑞浪URL)における冠水試験での適用を計画している。平成25年度はこれらの試験のための準備として、人工バリア性能確認試験における地中無線でのモニタリングに関し、周辺の状態(支保部材、センサ、ケーブル設置状況など)を考慮した機器の配置案を検討した。また、冠水試験実施予定箇所の電磁ノイズレベルを確認し、地中無線でのデータ送信が可能であることを確認した。

地中無線技術に関する重要な課題である電源の長寿命化について、各種の電源供給技術の文献調査を実施した。地中無線モニタリング装置に現在用いている電源である、化学反応による一次電池については10~15年の間、電力が供給可能な電池が市販されており、現状で最も現実的な電源といえる。しかしながら、これ以上の期間に亘り電力を供給するためには、放射性同位体熱電気変換器や電磁波による電力供給等の適用を検討すべきであると結論した。

また、現在地中無線送信装置に使用している電源(リチウム系電池)については、廃棄体または模擬廃棄体近傍でのモニタリングを想定し、高温環境での耐久性に関する試験を実施した。この結果、現在使用している電池は高温環境(80~90°C)において、室内温度環境(20°C)と比較して約94%の期間に亘りモニタリングに必要な電力を供給可能であることを確認した。

(4)記録保存に関する調査

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 possibility を検討し、国及び関連機関等が地層処分に対する社会的信頼性の

向上につながる計画を策定する際の判断材料を整備するものである。平成25年度は記録保存に関する制度等の最新動向を調査した。

OECD/NEA-RWMが2009年より実施している記録保存に関するプロジェクトに関して、主要文書の内容を整理した。本プロジェクトは現在進行中であるが、議題となる内容は、制度的管理の一環である記録保存、マーカーモニメント等に加えて、閉鎖までの記録管理について含むこととなる予定であり、今後公開される報告書等の情報は、非常に重要であると考えられる。

また、我が国では平成23年に「公文書管理法」が施行されており、地層処分事業については、直接対象とはされていないものの、社会への説明責任として公益を有する記録は永久保存されることとなっている。このことから、今後、地層処分事業により発生する記録についても対象となる可能性がある。このため、本法施行後に内閣府等により公表された具体的な運用方法についての文書(管理法施行例や運用マニュアル等)に関して、その内容を調査・整理した。

- 1) 原環センター技術報告書「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－」、RWM-TRJ-04003、2004
- 2) 原環センター技術報告書「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－」、RWM-TRJ 08001、2009
- 3) MoDeRn、<http://www.modern-fp7.eu/>
- 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-分冊3 地層処分システムの安全評価、平成11年11月
- 5) SKB、FEP report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-45, 2010
- 6) MoDeRn, Case study report, <http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/>、2013

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。具体的には、処分施設閉鎖前までの処分場操業中における地上／地下施設を含む処分システム及び施工された人工バリアを対象に巨大地震・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、結果及びその影響を想定し、リスク低減に向けての技術開発課題を抽出する。また、抽出した技術開発課題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実施するものである。

平成 25 年度には、上記の目的を 5 カ年で達成可能な調査及び試験に係る研究・試験計画を具体化した。さらに、具体化した計画に基づき、技術課題に係る要素技術についての調査及び解析的検討等を実施することにより、要素技術の適用性を確認した。また、異常状態・事故発生時的人工バリアの限界性能等に係る調査試験を実施した。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

(報告書)平成 25 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 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－

◇平成 25 年度の成果

(1) 研究計画の立案

平成 24 年度の成果に基づき、技術課題として「操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討」、「人工バリアの限界性能等の調査・試験」、「状況把握・監視技術に係る調査・検討」を選定し、今後 5 年間の実施内容の概要と工程を示すとともに、今年度の具体的な実施内容を示した。加えて、「既存類似施設の保安に係わる法令等に基づくアプローチ」、及び「地層処分事業の防災計画の視点からのアプローチ」の新たな視点から地層処分事業の操業安全を検討し、その結果から、「施設計画技術」の検討対象や検討内容・手法の妥当性を確認するとともに、「地層処分事業の防災計画に係る調査・検討」を本開発の新規課題として抽出した。表-1 に以上の技術課題に関する実施内容についての 5 年間の研究計画と各年度の成果目標を示す。

表-1 新たな課題を含めた本開発の 5 年間の研究計画

	H25	H26	H27	H28	H29
① 5 年間の研究計画立案	計画立案		進捗確認・計画更新		
② 「施設計画技術」に係る調査・検討					
i 調査・研究計画	操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討 計画の具体化		H25、26 の成果を踏まえた計画		
ii 調査・解析的検討等の実施	処分パネルにおける火災事象等を想定した調査・検討 検討条件の設定 等	避難シミュレーション、気流解析 等	制約事項に関する解析的検討 等	処分パネルにおける異常状態や事故(冠水や落盤事象など)を想定した調査・検討の継続	
③ 人工バリアの限界性能等の調査・試験					
i 調査・研究計画	熱的性質、キャニスターの腐食性の調査・試験計画の具体化		H25、26 の成果を踏まえた計画		
ii 調査・解析的検討・試験等の実施	熱的性質の調査・試験(火災影響の解析的検討、緩衝材の熱特性試験 等) 塩分影響を考慮(津波被害を想定)したキャニスターの腐食性の調査・検討		火災影響の評価と対策のまとめ 塩分影響の評価と対策のまとめ	人工バリアの力学的性質や水理的性質などに係る調査・試験の実施	
④ 「状況把握・監視技術」に係る調査・検討					
i 調査・研究計画	調査計画の具体化				
ii 調査・検討の実施	異常時の状況把握手順の整理 等	既存技術、使用条件の整理 等	既存技術の地層処分への適用性の調査・検討		
⑤ 防災計画に係る調査・検討			・類似施設等の既存計画の調査・分析 ・防災計画策定に係る課題の検討	・計画の構成や定めるべき事項・骨子の考え方の提示 ・時期区分の設定の考え方の提示	
⑥ 中長期的展望に立つた技術開発試験等の継続的実施			・上記②～⑤の項目についての技術開発試験等の継続 ・救援・救出技術の技術開発成果の取りまとめと適用性の検討 ・自然課題の災害後の人工バリア等の状況や健全性の把握・評価に 係る調査・検討 等		
各年度の成果目標	・検討手法等の適用性の確認 ・研究開発計画策定	・状況把握・監視手順の提示	・火災事象に対する施設計画時の制約事項等の提案	・人工バリア限界性能等に関する知見の整備	・地下施設の操業安全確保のための制約事項等の提案

(2) 操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討

1) 海外の地層処分施設計画等における類似検討の文献調査と本検討への知見の反映

火災事象に対する操業安全確保に係る類似検討事例として、海外の地層処分施設計画等を対象に文献調査を行った結果、フランス（ANDRA）における火災時の煙の流れ方などに関する解析的検討が本検討の参考になることが分かった。また、地下施設の検討・設定や解析条件の検討・設定などの条件設定に資する情報を収集することを目的に、「鉱山、トンネルにおける建設中・供用中の安全対策」及び「原子力関連施設における安全対策」について文献調査を行い、知見を抽出した。

2) 気流解析と避難シミュレーション解析の条件設定

地下施設における火災に対する安全性については、気流解析と避難シミュレーション解析を重ね合わせる手法について検証することとし、これらの解析条件について国内外の既往の文献等に基づいて検討・設定した。

解析対象となる地下施設については、「解析に反映する定置方式」、「処分パネルの形状と配置」、「処分パネルの運用方法」、「処分パネルや坑道の形状・寸法」を図-1に示すように設定した。また、気流解析条件については、「地下施設における風速」、「地下施設における風況場」、「初期の坑内温度と圧力」、「作業員数と配置」、「火災曲線」、「火災発生場所」を設定した。さらに、避難シミュレーション解析については、「避難速度」、「避難人数」、「避難開始時間」、「避難開始位置」を設定した。

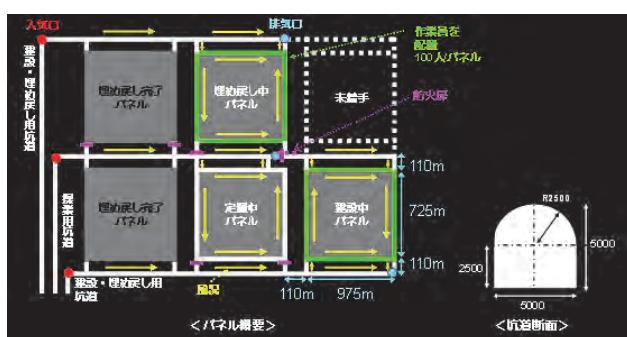


図-1 気流解析条件設定

3) 気流解析と避難シミュレーションの適用性検討のための事前解析の実施

地層処分施設の地下施設を想定した簡易モデルによる事前解析を行い、火災安全の検討への3次元気流解析や避難シミュレーション解析の適用性と、本解析に向けての問題点や課題を抽出した。

気流解析の事前解析の結果、3次元気流解析ソフトウェアにより、平常時の通気状態及び強制通気状態を処分パネル内の各所の風速に条件を設ける手法で表現できることや、火災時の坑道内温度や一酸化炭素濃度の拡散状況を表現できることなどが分かった（図-2）。一方で、「解析モデルの最適化による計算負荷（計算時間）の低減」、「数値解析手法を地下施設に適用した場合の課題等の整理」、「処分パネルの通気方法の整理・検討」などの課題が抽出された。

また、避難シミュレーション解析の事前解析の結果、気流解析の熱や煙の拡散状況に係る解析結果を反映した避難シミュレーションが可能なこと、避難の状況を避難完了率などにより定量的に分析・評価できることなどを確認した（図-3）。

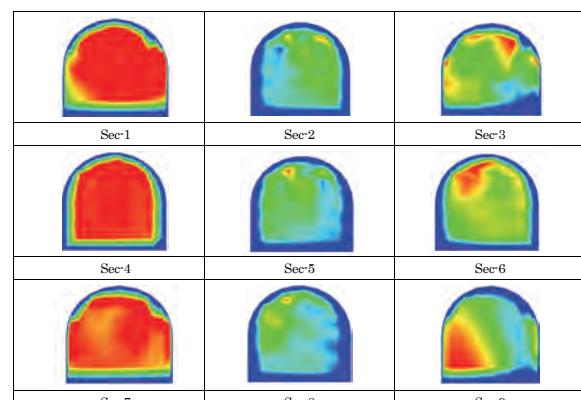


図-2 気流解析イメージ

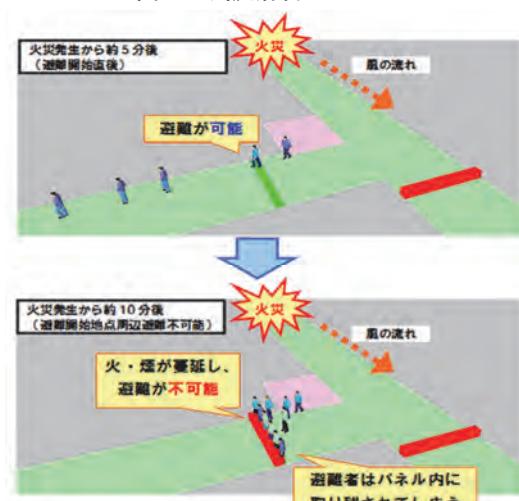


図-3 避難シミュレーションイメージ

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

(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
地層処分場の地上施設を対象として、図-4に示す検討フローに従って火災影響を解析した。

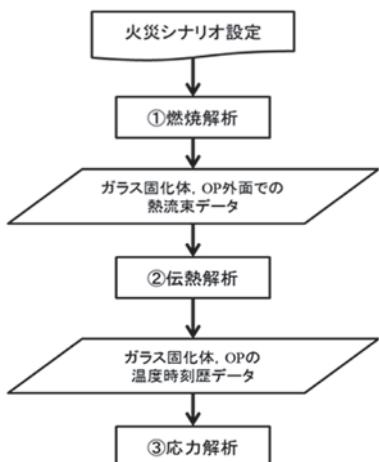


図-4 火災影響評価の解析フロー

火災シナリオでは、図-5に示すようにオーバーパックを収納・検査する室内（縦×横×高さ：4.8m×10m×17m）に、非常用発電機用のディーゼル燃料（30 m³）が流入して火災が発生するというシナリオを設定した。また、燃焼解析では、米国の国立標準技術研究所が開発した解析ソフトウェア Fire Dynamics Simulator (FDS) を用いて設定した火災シナリオに基づいて図-6に示す加熱曲線を求めた。

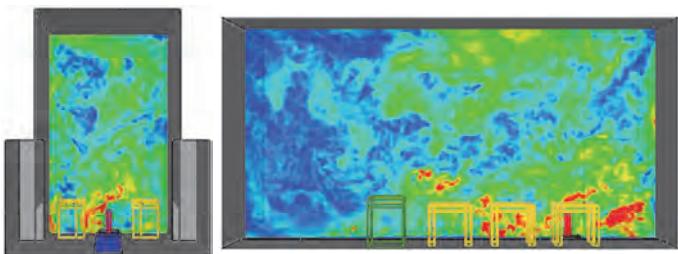


図-5 燃焼解析

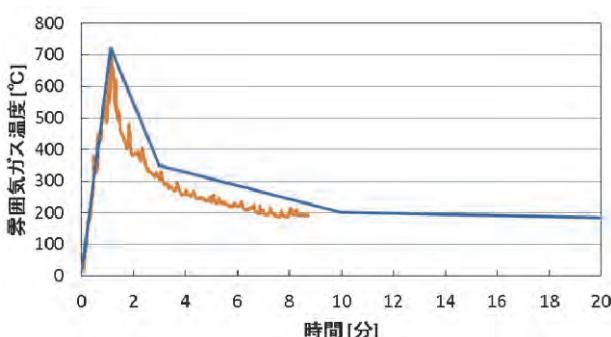


図-6 設定シナリオから求めた加熱曲線

次に、この加熱曲線に基づいて構造解析一般で広く用いられている汎用 FEM コード ABAQUS (Ver. 6-11-1) により伝熱解析及び応力解析を実施し、人工バリア等への火災影響の評価を行った。

火災発生後に同室内へは、ガラス固化体を搬出入するための 3 か所の出入口から限定した酸素が流入する条件（閉鎖空間に近い状態）としたこともあり、全てのディーゼル燃料を燃焼する前に室内の酸素量が低下し、火災発生から約 70 秒で消炎した。

伝熱解析の結果、火災発生から 8.6 分後にガラス固化体の表面が最高温度 (157.7°C) に達した。ガラス固化体のガラスが液状となる転移温度は約 500°C であるため、設定した火災シナリオでは、ガラス固化体の品質に及ぼす影響は小さいと判断した（図-7(左)）。応力解析の結果では、火災発生から 3 分後にキャニスターのスカート付け根部に 150~170MPa の応力が発生したものの、一般的のステンレスの引張強度 (520MPa 以上) と比較し、今回設定した火災シナリオ・解析条件では、キャニスターが破損に至る危険性は小さいと判断した（図-7(右)）。

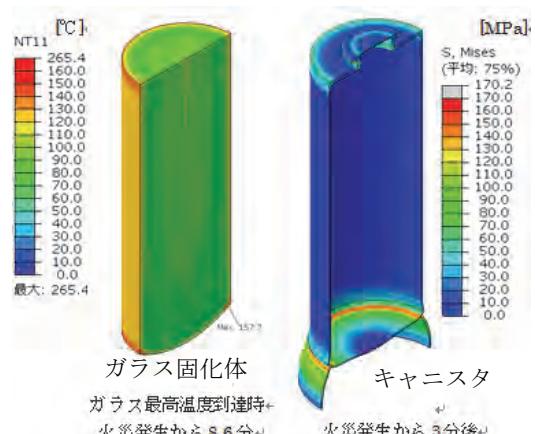


図-7 伝熱解析（左）・応力解析（右）結果例

2) 緩衝材の加熱試験による高温時熱特性の把握

緩衝材の高温時熱特性（熱伝導率・熱拡散率・比熱の関係）を把握するための試験を行った。試験の結果、火災時を想定した高温時（試験温度 500°C と 1000°C）の熱特性（熱伝導率と熱拡散率）は、常温（100°C 以下）の値と比べ、同等もしくは若干高くなる傾向が得られた。本試験で得られた 100°C 以下の熱特性値は第 2 次取りまとめ¹⁾の試験値と整合性がみられ、また、図-8 に示す 2 通りの試験方法で得られた高温時の熱特性値は

図-9に示すとおり同程度であったことから、次年度以降に実施する緩衝材を介した火災影響の解析的検討においては、本試験で得られた熱特性値を使用することとした。



図-8 加熱装置（左）及び加熱実験炉（右）

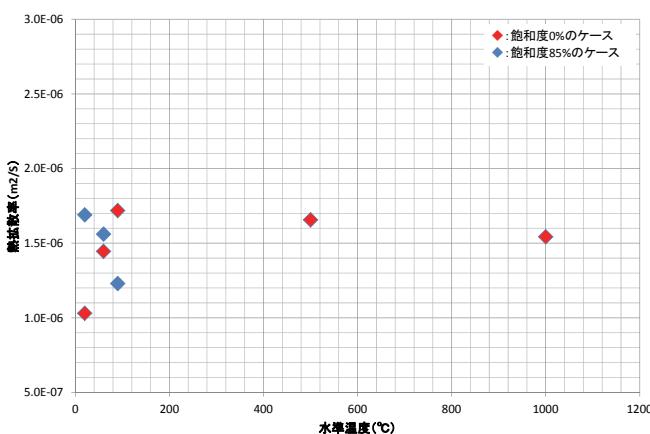


図-9 加熱試験結果例（熱拡散率）

3)津波被害を想定したガラス固化体キャニスターの腐食特性に関する調査

津波被害を受けて復旧までに数か月以上を要する状況を想定し、その間の応力腐食割れ(SCC)などによるガラス固化体キャニスターの破損などの評価に必要な情報を収集することを目的に文献調査を行った。調査の結果、ガラス固化体キャニスターに使用されているステンレス鋼種については、種々の環境条件に対して腐食特性に関する情報・知見が整理されている一方で、地層処分施設が津波被害を受けた場合にガラス固化体キャニスターが置かれる腐食環境の評価や、水の放射線分解による環境の酸化性の高まりを考慮した応力腐食割れ(SCC)感受性の腐食領域図での整理などの課題を抽出した(図-10)。



図-10 津波被害を想定した腐食損傷と今後の課題の整理（模式図）

(4)状況把握・監視技術に係る調査・検討

平成24年度に検討・作成した異常状態や事故時の対策シートについて、状況把握・監視に係る手順（行為）の観点から見直し・整理を行った。具体的には、各対策シートにある応急対策フローに対して状況把握・監視に関連する部分を抽出し、「状況把握・監視手順（行為）」及び「必要な情報」の観点から整理シートを作成した。

次に、状況把握・監視に必要な技術として、放射線環境下に適用できる技術、及び大深度地下に適用できる技術の調査を行い、上述で整理した状況把握・監視手順の整理シートに調査結果を加えてとりまとめた。具体的には、手順の整理シートに、「状況把握・監視のために必要な技術や機器」及び「技術の開発状況や適用事例」を追加し、関連する技術を調査・整理を行った。

- 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－ 分冊2 地層処分の工学技術、第2次取りまとめ、平成11年11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。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。

また、資源エネルギー庁で実施されている基盤研究開発では、操業技術を構成する要素技術の一つとして、回収技術の中核技術である塩水を利用した緩衝材除去技術の適用性が検討された¹⁾。

これらを背景として、本事業は地下環境における高レベル放射性廃棄物の回収技術を整備し、国民の地層処分技術に関する安心感の醸成に資することを目的とし、地下環境で適用可能な回収装置の開発を平成23年度から実施している。平成25年度は以下の内容を実施した。

- (1) 緩衝材除去システムの製作及び機能確認
- (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。

(報告書)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 地層処分回収技術高度化開発

◇平成25年度の成果

(1) 緩衝材除去システムの製作及び機能確認

これまで緩衝材除去システムを構成する噴射・吸引設備、塩水リユース設備、遠隔操作設備の設計・製作を実施してきた。表-1、図-1に緩衝材除去システムの構成を示す。本年度も引き続き、緩衝材除去システムの製作を実施し製作後の動作確認を実施した。

表-1 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
代表的な構成装置(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"> ・固液分離装置 ・塩水成分調整装置 ・塩水供給装置 ・スラリー回収装置 	<ul style="list-style-type: none"> ・操作制御装置 ・操作監視装置

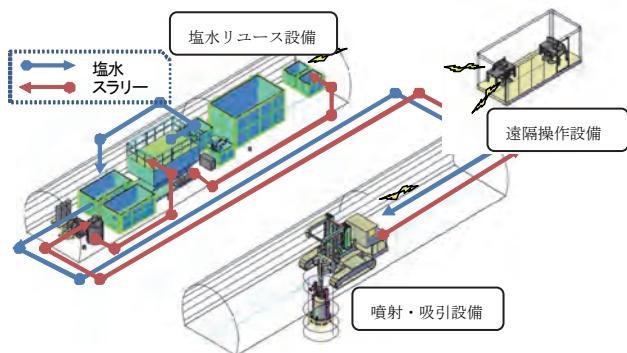


図-1 緩衝材除去システムの構成概念図

1) 油圧ユニット及び走行装置の製作

噴射・吸引設備の構成装置である油圧ユニット及び走行装置をそれぞれ別途製作し、その後図-2に示すとおり組立を実施した。



図-2 油圧ユニットと走行装置の組立状況

油圧ユニットの機能は、以下のとおりとした。

- ①ポンプ吐出量は、噴射・吸引設備の走行速度 1km/h を満たすことを条件とした。
- ②速度調整（微速）及び各装置の組み合わせ動作が出来るようにした。
- ③塩水噴射・スラリー吸引装置の揺動動作は、リミットスイッチを利用して電気回路と併せて反復運動させた。
- ④操作系油圧回路の操作は、油圧パイロット式とした。また、手動操作、無線操作の切替えが出来るようにした。
- ⑤昇降装置の機能は、油圧シリンダ伸縮制御に加えて、自重により下降する「フリー落下制御」が出来るように回路を構成した。また、所要油量が少ないと、他の動作制御より高い精度が求められることから、サブポンプ（最大 7.5L/min）から独立して油圧を供給することとした。

走行装置の機能は、以下のとおりとした。

- ①狭小な坑道内を考慮し 1km/h とした。
- ②最大登坂能力は、坑道内斜路を考慮し、20° 程度とした。
- ③ステアリング力は、重量物（6t）を把持して平坦で片側ステアリングができることとした。
- ④ブレーキ性能は、斜面停止で噴射・吸引設備が保持できることとした。

2) 遠隔操作設備の製作

遠隔操作設備では、緩衝材除去システムの噴射・吸引設備、塩水リユース設備の動作制御及び監視を遠隔により実施する。遠隔操作設備の機能を以下に整理した。

① 噴射・吸引設備

- ・回収対象となる処分孔までの走行装置による移動
- ・処分孔における塩水噴射・スラリー吸引装置の走行装置及び昇降装置による位置出し
- ・塩水噴射・スラリー吸引装置による塩水の噴射とスラリー化した緩衝材の吸引
- ・昇降装置による塩水噴射・スラリー吸引装置の昇降
- ・昇降装置、把持装置によるオーバーパックの把持

② 塩水リユース設備

- ・塩水リユース設備によるスラリーの固液分離

と塩水の調整と循環

さらに、遠隔操作による緩衝材除去システムの動作を安全なものとするため、図-3 に示すような遠隔操作設備のシステム構成とし、遠隔操作設備の製作を行った。

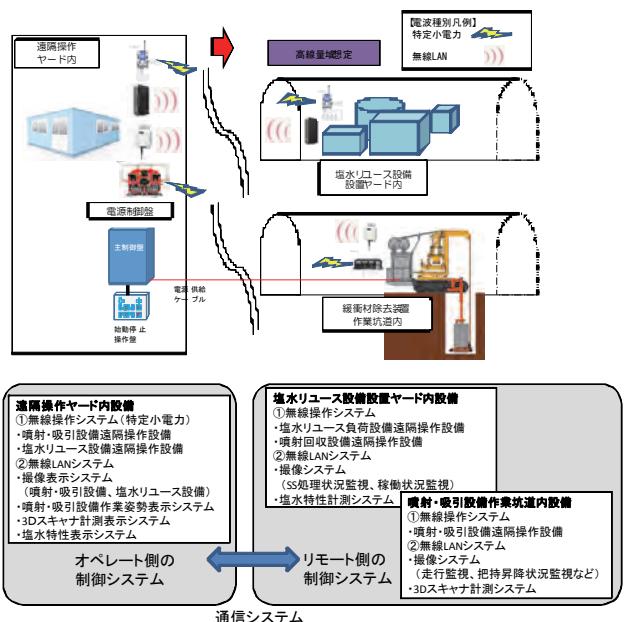


図-3 無線遠隔操作システム構成図

3) 緩衝材除去システムの組立・動作確認

緩衝材除去システムの各設備について組立、設置を実施した。図-4、図-5 にそれぞれ噴射・吸引設備、塩水リユース設備の組立・設置完了状況を示す。噴射・吸引設備には、走行装置、昇降装置等に対する遠隔操作設備の位置監視を行うために 3D スキャニングシステムを導入した。

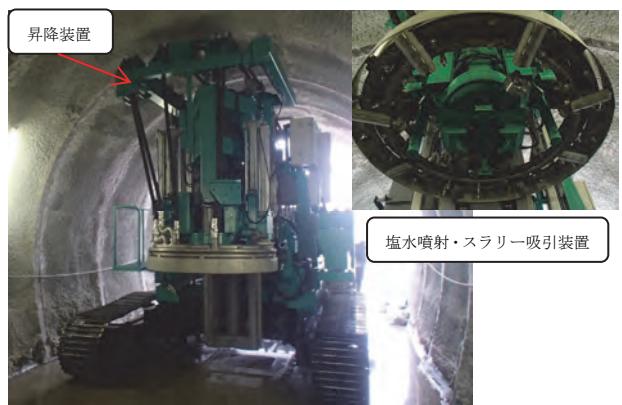


図-4 噴射・吸引設備の組立完了

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究



図-5 塩水リユース設備設置状況

緩衝材除去システムの組立て完了後、各設備について、以下の動作確認を実施し、所定の機能を満足していることを確認した。

①噴射・吸引設備

- ・走行速度及び速度調整による走行が可能であることを確認した。
- ・登坂（20° 斜面）走行が可能であることを確認した。
- ・登坂（20° 斜面）走行中にブレーキ制御が可能であることを確認した。
- ・塩水噴射力、噴射量及びスラリー吸引量を確認した。

②塩水リユース設備

- ・固液分離装置では、所定の処理流量、塩水の浮遊物質濃度（SS 濃度）であることを確認した。

③遠隔操作設備

- ・遠隔により噴射・吸引設備、塩水リユース設備が操作できることを確認した。
- ・操作室から各設備の動作を監視できることを確認した。

4) 緩衝材除去システムの機能確認

緩衝材除去システム全体の機能を確認するため、地上施設に実規模の堅置き方式の模擬処分孔を作製し、処分孔内に緩衝材と模擬廃棄体を定置後、緩衝材除去試験を実施した。

試験は、①緩衝材除去状況（緩衝材除去特性）、②塩水リユース設備の稼働状況（塩水リユース特性）、③遠隔操作による安全性の確認を目的とした。

a) 試験方法

地上に模擬処分坑道（高さ：3,913mm、幅：5,000mm、延長：30m程度）、処分孔（内径：2,596mm、深さ：4,556mm）、緩衝材及び模擬廃棄体を用いた。

試験ケースは、緩衝材除去特性を確認するため、図-6に示すように廃棄体上部（ケース1）と廃棄体側部（ケース2）の緩衝材除去を実施した。

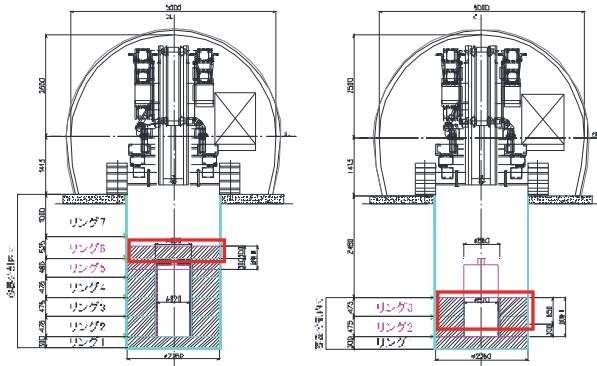


図-6 試験ケースの概念図

b) 試験条件

試験に使用した緩衝材、模擬廃棄体及び試験設備の条件を表-2に示す。また、緩衝材と模擬廃棄体との隙間（幅t=20mm）はペレットを充填（有効ベントナイト密度1.37Mg/m³）後、緩衝材の除去を実施した（図-7）。

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	共通	ベントナイト:ケイ砂=7:3 密度 1.6Mg/m ³ 飽和度 60%程度
	ケース1 (廃棄体上部)	直径 2,260mm 高さ 600mm ^{※1}
	ケース2 (廃棄体下部)	直径 2,260mm 高さ 300mm ^{※1}
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 横向き: 8ノズル×1環 搖動速度 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-7 緩衝材除去試験状況（ケース1）

c) 試験結果

ケース1、ケース2の試験を実施し、その結果から得られた知見を示す。

① 塩水リユース特性

- ・処理前のスラリーのSS濃度は、1,000mg/L～6,000mg/L程度であった。（図-8）
- ・処理した塩水のSS濃度は、ケース1では平均329mg/L（図-8）、ケース2では平均311mg/Lであり、安定した処理ができる事を確認した。
- ・塩水噴射量とスラリー吸引流量は、試験初期はバランスしたもの、緩衝材除去が進み深度が深くなるにつれてスラリー吸引流量が減少した。
- ・リユース塩水の品質として塩分濃度、pHは特に調整することなく安定していた。

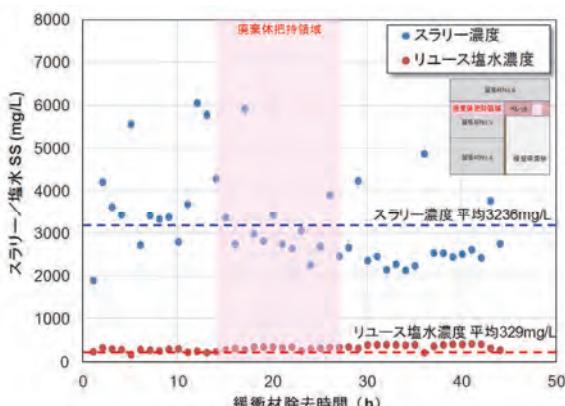


図-8 固液分離設備前後のSS濃度（ケース1）

② 緩衝材除去特性

- ・噴射・吸引設備は、乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ 、飽和度60%程度の緩衝材に対して、下向き噴射（塩分濃度4%、噴射圧力0.6MPa）のみで模擬廃棄体周囲の緩衝材が除去できることを確認した。
- ・塩水リユース設備のSS濃度から推定した緩衝材除去量と、3Dスキャナーから測定した緩衝材除去量は概ね一致し、緩衝材の除去量をSS濃度から推定可能なことが分かった。（図-9）

- ・本試験条件において、模擬廃棄体上部、側部、の緩衝材の除去により緩衝材除去過程を確認した。（図-10）

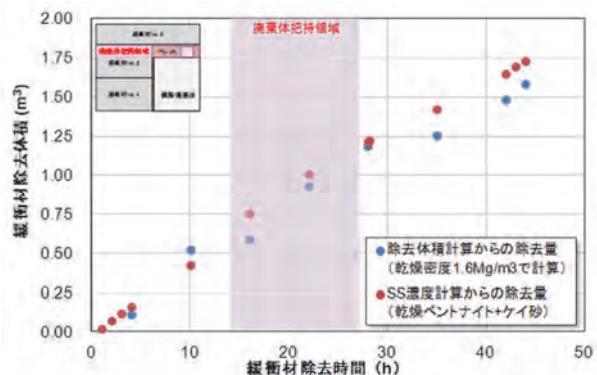


図-9 SS濃度推定除去量と実測除去体積の除去量比較（ケース1）

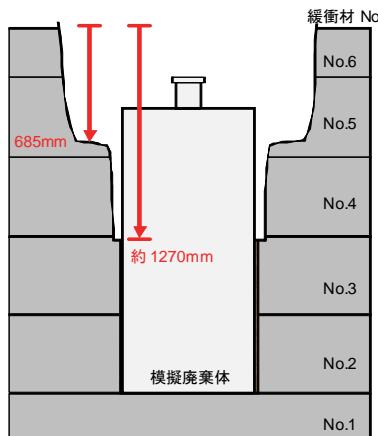


図-10 緩衝材の除去状況（ケース1）

③ 廃棄体の把持・振れ止め機能

- ・試験中、モニターカメラにより模擬廃棄体把持部の位置を確認し、把持装置位置を調整し装置のツメで把持できることを確認した。さらに、模擬廃棄体側部の緩衝材除去時に、模擬廃棄体が振れのない状態であることを確認した。
- ・模擬廃棄体の引上げを実施し、昇降設備の引上げ能力範囲で引上げ可能であることを確認した。

④ 遠隔操作性

- ・遠隔により緩衝材除去時の各設備の動作を制御する事が可能であることを確認した。
- ・緩衝材除去時の動作状況や除去状況に関するデータの取得ができ、試験状況監視が可能であることを確認した。

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

(2) 地下環境での実証試験計画の見直し

地下環境での実証試験計画を見直すため、平成24年度に実施された「緩衝材除去システムの坑道内配置」を基に「地下環境における緩衝材除去試験計画」で、試験設備の配置と試験内容について検討を行った。以下に概要を示す。

1) 緩衝材除去試験設備の配置計画

実証試験計画は、第2次取りまとめにおける堆積岩系岩盤の処分坑道を対象とした。また、緩衝材除去システムの基本的な配置は本年度作製した緩衝材除去システムを基本とした。計画では、遠隔操作設備、塩水リユース設備、噴射・吸引設備を3つの機能ごとに分離し、試験に用いる坑道状況に応じた配置とした（図-1）。

次に、塩水リユース設備と噴射・吸引設備を同坑道内に設置する場合の配置検討を行った。地上に比べ、塩水リユース設備の配置スペースの制約を受けることになるが、図-11に示すように装置や水槽の配置を工夫することにより、緩衝材除去装置（長さ約6m）と合わせて延長25mで設備の設置が可能となった。

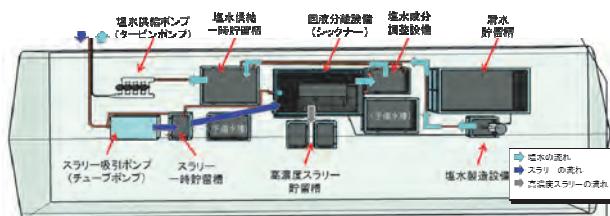


図-11 塩水リユース設備の配置例

2) 緩衝材除去試験計画

試験内容は、地上において実施した機能確認試験と同様なものとし、試験項目、試験方法などを整理した。緩衝材除去システムの各設備に求められる機能を踏まえ、実規模の緩衝材除去試験で取得する情報を抽出するとともにデータ取得方法、試験手順を図-12に整理した。

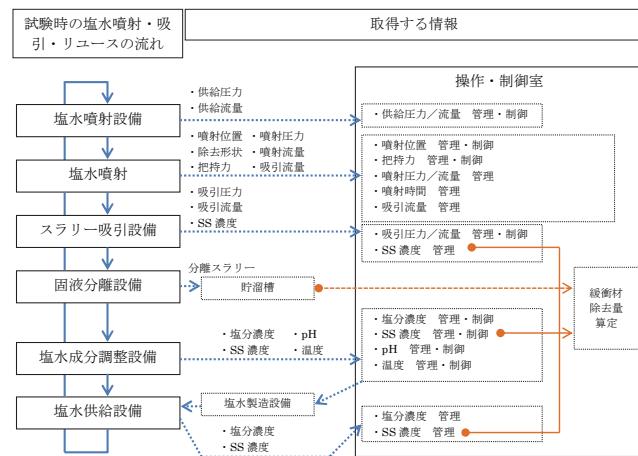


図-12 試験手順

(3) 処分施設における回収維持期間の検討

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実施した。平成25年度は、処分施設を埋め戻さずに一定期間維持することで、処分施設の安全性に及ぼす影響について検討した。

1) 処分施設を埋め戻さない一定期間を維持することによる処分施設の安全性の調査・検討

処分施設の埋め戻しまでの期間の長短が安全性に対する重要な要因であることから、表-3に示す範囲を対象とした。

表-3 検討対象とする範囲

処分施設	処分施設の構成要素
坑道	覆工、支保工、湧水対策工など
人工バリア	ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材
その他	坑道環境、監視設備など

本年度は、周辺岩盤と人工バリアについて、①力学的影響、②水理学的影響、③化学的影響、④熱的影響を検討した。表-4にその結果を示す。

表-4 処分施設の安全性に影響を及ぼす項目

影響項目	周辺岩盤	人工バリア
力学的影響	・経時変化による岩盤剛性の低下 ・支保や覆工の劣化による坑道の耐力低下	・腐食進行による材料の減肉 ・緩衝材変形による密度低下
水理学的影響	・岩盤の劣化による透水性の変化	・湧水による緩衝材の密度低下
化学的な影響	・支保材料など鋼材の腐食	・腐食生成物による緩衝材の劣化 ・水質の変化による腐食速度の変動
熱的な影響	・温度上昇による化学反応の促進	・温度上昇による緩衝材の変質

2)社会資本設備の維持に関する国内外の調査

地層処分関連施設や代表的な地質における地下坑道施設の維持の現状について、以下の①、②の項目について文献調査を実施した。

①国内地層処分類似施設の維持に関する調査²⁾³⁾

- 地下坑道施設の変状はさまざまであり、JR や NEXCO では適切な維持管理を実施し、その機能を保持していた。
- 維持管理のために排水設備や光ファイバーを利用した計測機器など安全上具備すべき施設・機器が必要であることがわかった。
- 原子力施設の定期安全レビュー(PSR)は、中長期的な視点から最大 10 年間を評価対象期間とする保安活動が実施されていた。

②諸外国における回収維持⁴⁾⁵⁾

- 回収維持期間に関して、フランス、米国、スイス、フィンランド、スウェーデン、カナダを調査した。
- 可逆性・回収可能性を法令に規定している国はフランス、米国、スイスの 3ヶ国であった。
- ほとんどの国（フランス以外）は、それぞれの国の背景や諸事情から、回収維持期間について明確な期間を定めていない。
- 処分場を必要以上に長期間、開放したままにしておくことで回収可能性を高めようすると、安全性を低下させる可能性がある、としている。

3) 検討・調査結果から得られた課題とその対策

- 処分施設を一定期間埋め戻さない状態が継続した場合、基本的に安全性を損なう方向の状態変化が進行すると考えられる。
- 不確実性の大きな岩盤内の状態変化は、力学

的・水理学的・化学的・熱的に連成した挙動となり、施設の安全性の観点からその変化を継続的に把握し、図-13 に示すような定期的な維持管理による対策が重要である。

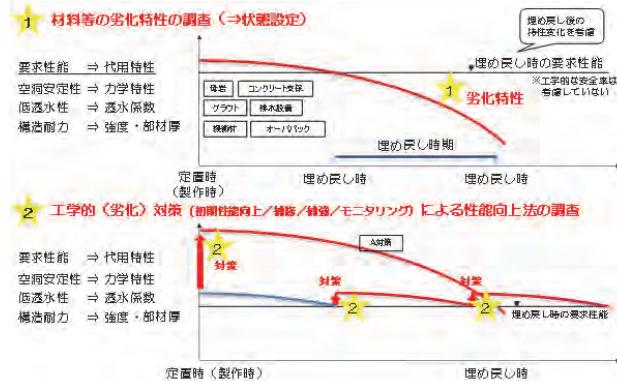


図-13 対策方法のイメージ

以上より、周辺岩盤及び坑道、人工バリアの課題を抽出した。

①周辺岩盤及び坑道における課題

- 覆工及び水圧低減のための排水工に関する適用性及び設計方法の検討
- 更新可能または高耐久性を有する維持管理計測設備の検討

②人工バリアにおける課題

- オーバーパック及び PEM 容器の腐食挙動に関する評価
- 緩衝材の劣化評価
- 人工バリアの温度変化の把握と温度上昇に対する対策
- 人工バリアのモニタリングに関する検討

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、平成23年3月

2) 土木学会編、トンネルの維持管理、2005

3) 定期安全レビュー分科会、原子力発電所の定期安全レビュー実施基準：2009、日本原子力学会、標準委員会、AESJ-SC-P004：2009、2009

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、第2章2-7、平成24年3月

5) NEA R&R プロジェクト：高レベル放射性廃棄物及び使用済燃料の深地層処分のための可逆性と回収可能性（R&R）（2007年～2011年）最終報告書 79-81、83-85、2011

3. TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発

本開発は、TRU 廃棄物の地層処分における重要核種の影響（ヨウ素 129 及び炭素 14 による被ばく線量の低減対策）ならびに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）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、安全評価の信頼性向上させることを目的としている。

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流速等の地質環境条件の影響を受けやすい。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標としている。

本事業では、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 枠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が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に基づき 7 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、5 技術に絞り込んだ。平成 18 年度はこ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った。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。

- ①岩石固化体：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、焼結体としたもの
- ②BPI ガラス固化体：無機イオン交換体 $\text{BiPbO}_2\text{NO}_3$ の NO_3 をヨウ素で置換して BiPbO_2I とし、ガラスフリットと混ぜて溶融固化したもの
- ③セメント固化体：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（Aft）やモノサルフェート（AFm）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作製したもの

これら 3 技術に対し、長期的なヨウ素保持性能評価を実施した。

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を反映させ、今後 5 力年で必要な R&D 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。

（報告書）平成 25 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1分冊）－ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上－

◇平成 25 年度の成果

（1）岩石固化技術

マトリクス溶解に基づくヨウ素放出モデルを構築し、目標とした固化体寿命（10 万年）は達成できると推定した。また、モデルの信頼性を向上させるため、空隙率の低減、緻密化固化体の製造条件の検討を行った。空隙率低減には HIP 前処理で廃銀吸着材の水分量を低減することが重要であり、水分量低減のための加熱高真空処理について条件検討を行った。その結果、 $5 \times 10^{-4}\text{Pa}$, 450°C, 2 時間で前処理を行うことで 4% 程度まで空隙率を低減することに成功した。

この緻密化固化体（空隙率 4.4%）で浸漬試験によりヨウ素放出挙動の評価を行った。高空隙率の固化体に比べてヨウ素保持性能が向上（図-1）した。調和溶解になつてない原因として浸漬初

期に表面や開気孔中の AgI がアルミナの溶解と無関係に溶出している、などの可能性が考えられた。このとき、AgI は硫黄(HS)との反応によりヨウ素を放出して Ag_2S を生成すると見られた(図-2)。 Ag_2S は AgI に比べて密度が大きく、空隙が大きくなることが一因と考えられた。

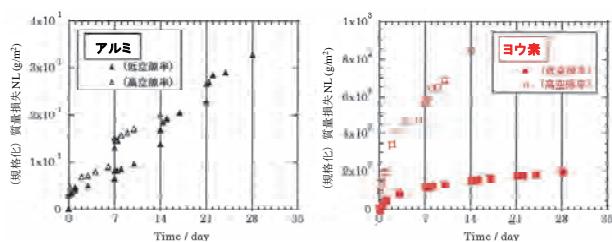


図-1 空隙率による岩石固化体の差異

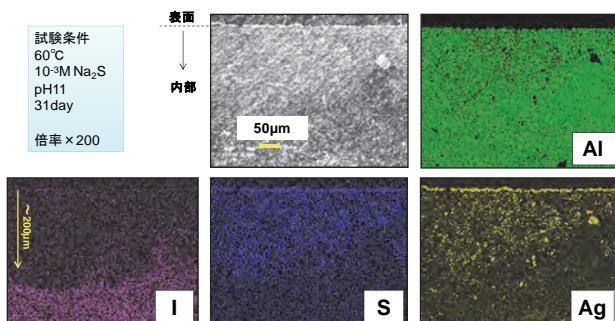


図-2 浸漬後固化体の SEM/EDX 分析

(2) BPI ガラス固化技術

化学構造に関する検討として、BPI ガラスの主要成分(Pb, B 及び O)を含む各種結晶に対して密度汎関数理論計算を行い、原子間ポテンシャル曲線を導出した。2 成分ガラスの逆モンテカルロ(RMC)構造モデルを初期配置として分子動力学シミュレーションを実施し、RMC 構造モデル中に存在するエネルギー的に不利な構造を緩和できた。

ヨウ素保持機構に関しては、ベントナイト平衡水の浸漬試験によって、固化体の変質層が微結晶のハイドロセルサイトから成ることが判明した(図-3)。また、ホウ素、ヨウ素の浸出量は液中の炭酸イオンに影響されると示唆された。

BPI ガラス固化体の X 線 CT 分析では、投影データの補正により密度分布が改善した(図-4)。2.5L ガラス固化体の全領域の 95% が角度-高さ断面平均密度に対して相対密度が $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ 以内であった。

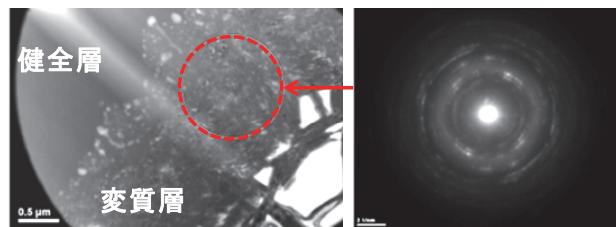
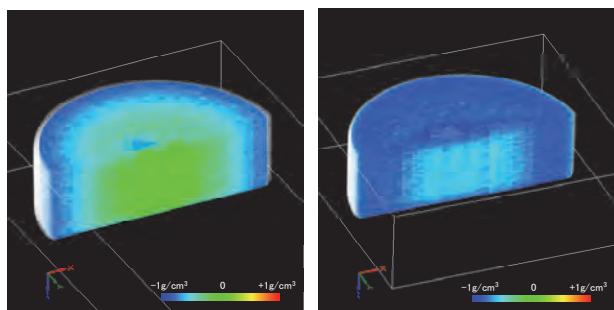


図-3 ベントナイト平衡水 30 日浸漬後の BPI ガラス 固化体の TEM 写真及び電子線回折パターン

図-4 ガラス固化体 3 次元密度分布
(左: 補正前、右: 補正後)

(3) セメント固化技術

構成鉱物に係る熱的影響の評価として各種熱的性質の測定を実施し、水和発熱トレンド、熱伝導率の温度変化、比熱の温度変化を取得した。これらを用いて固化体の温度解析を行い、20L スケール固化体の温度分布の時間変化を測定結果と比較評価した。セメント固化体は極めて大きい発熱速度を反映して短時間で水和が完了しているが、この解析方法を用いて 10~30°C の初期・環境温度を仮定して 200L ドラム缶の温度を推定した結果、最高約 150°C となり(図-5)、固化体寸法が最高到達温度に与える影響は小さいと考えられた。

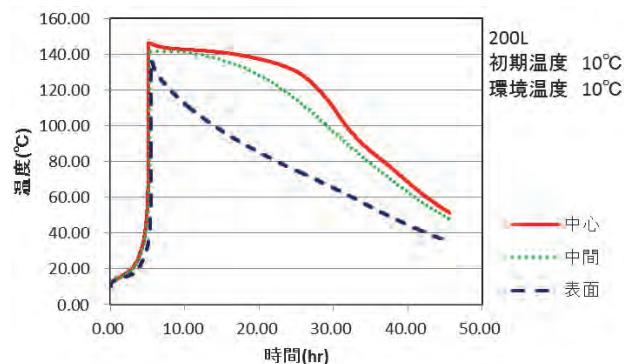


図-5 200L セメント固化体温度分布の時間変化解析結果

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・エンドピースに含まれる 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、第三に上述の補完試験との位置づけとしての金属の腐食速度評価などのコールド試験である。フェーズ 1 に該当する平成 18 年度までに、ハル・エンドピース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。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、インベントリの評価を行うとともに、10 年を目途とした長期試験の開始など、本格的な試験を開始させた。

本年度は、下記に示す項目について調査を実施した。

- ・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
- ・ハル酸化膜からの C-14 放出挙動の調査
- ・C-14 の化学形態の調査

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。

(報告書) 平成 25 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—

◇平成 25 年度の成果

(1) ジルカロイの長期腐食モデルの検討

燃料被覆管(ハル)等の材料であるジルカロイの長期腐食挙動の予測については、地層処分環境となる低温においてジルカロイの腐食は非常に遅いため、低温の腐食試験だけでは、非常に不確実性が大きい。そこで、加速条件となり得る高温での知見の活用を期待し、想定される地層処分環境において被覆管材料を用いた腐食試験を行い、図-1 に示すような腐食式(モデル)の適用性について検討を行った。そのため、高温と同条件である純水中の腐食速度データを取得した。低温域での温度依存性(30~80°C)を水素測定法にて、

中温域(180°C)をオートクレーブ試験によって実施した。また、得られる酸化膜の性状調査を実施した。

中温域の試験では、従来の高温腐食試験における試験方法であるオートクレーブ試験法、及び腐食量を試験前後の重量変化で行う評価方法に倣い、180°C・270°Cの 2 条件で同試験・評価を実施した。その結果、270°C オートクレーブ試験の腐食挙動は、高温腐食式の知見モデルとよく一致し、およそ 1/3 乗則で推移していることから、試験方法の整合性は確認された。

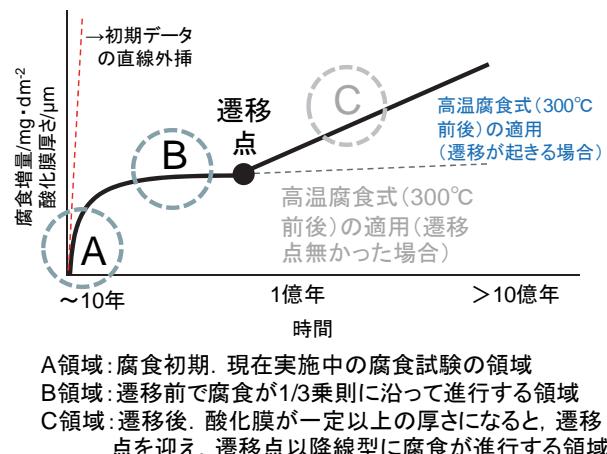


図-1 高温腐食の知見に基づくジルカロイの長期腐食の予測

高温腐食式の適用性の検討においては、放射光 X 線回折の結果より、腐食温度が高く酸化膜が厚い場合(膜厚 100 nm)は、単斜晶と正方晶のジルコニウム酸化物が存在し、160°Cで酸化膜が薄くなると(膜厚 50 nm)、単斜晶よりも正方晶の割合が多くなり、80°Cでは(膜厚 15 nm 以下)では正方晶のみであることが分かった。ラマン分光法においても放射光 X 線回折と同様の結果が得られた。また、TEM 観察と電子線回折により、ジルカロイの酸化膜の金属界面部に近い部位では正方晶(Tetragonal)であり、160°Cで生成した酸化膜表層部は単斜晶(Monoclinic)であることが確認された。

腐食影響因子の検討において、材料影響としてジルカロイ-2、-4 の差違の検討、水素化物による腐食加速や水素化物の安定性について検討した。また、環境影響因子として、地下水組成の影響、pH 影響としてアルカリ溶液(NaOH)における腐食データ等の取得を行った。

さらに、ホット試験により長期の C-14 浸出デ

ータを取得を目的として、照射済みBWR被覆管の長期浸漬試料の一部について分析を行った。

(2)ステンレス鋼の長期腐食モデルの検討

燃料体の端末部（エンドピース）等の材料であるステンレス鋼の長期腐食のモデル化およびモデル確認のための試験計画を立案した。また、そのための予備試験として実施している腐食試験について、試料の一部の分析を行い、腐食生成物（酸化膜）の性状に関する基礎データを取得する。図-2にステンレス鋼の腐食挙動の温度依存性（ガス蓄積試験）の結果を示す。環境温度においては、高い方が腐食速度も速い（80°Cでは30°Cよりも腐食速度が約1桁高い）結果となっている。

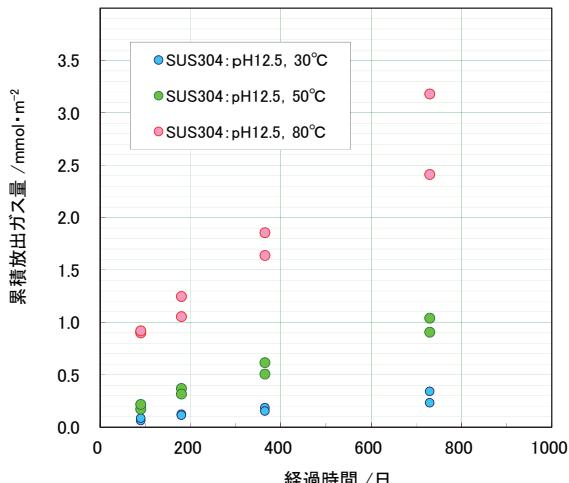


図-2 ステンレス鋼の腐食挙動の温度依存性
(ガス蓄積試験)

(3)ハル酸化膜からのC-14放出挙動の検討

燃料被覆管の表面に存在しハルエンドピース廃棄物に含まれるハル酸化膜に由来する被ばく線量の低減を図ることを目的として、酸化膜からの核種放出挙動を理解し、長期放出を予測するためのモデル化を行った。本年度は、以下の項目を実施した。

- 1) ハル酸化膜の物理・化学特性の調査
- 2) 処分環境におけるハル酸化膜に対する長期C-14放出モデル構築のための課題検討
- 3) 全体計画の策定

その結果、ハル酸化膜からのC-14放出をモデル化するためには、酸化膜の特性についてより詳細な情報・知見が必要であることが分かった。特に、酸化膜からの放出を、ジルコニアの溶解や酸

化膜中の拡散現象から説明するためには、酸化膜中のC-14等の放射性核種の分布や、均一性に関する情報が欠かせないことが分かったが、それらに関する情報を得ることができなかった。

(4)C-14化学形態の調査

金属から放出されるC-14の化学形態の調査として、昨年度提案した質量分析による安定炭素の化学形態分析や放射化学的手法によるC-14分離分画手法について予備試験等（図-3）も踏まえ、実廃棄物への適応性について検討する必要がある。そのため、分析手法の課題について抽出し、それらの対応策について今後の試験計画として検討・策定した。

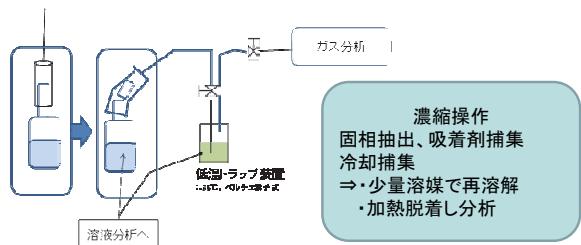


図-3 アンプル開封器と液相・気相サンプリング装置概略図

上記計画に基づき調査を行った結果から、炭素化学形態として、有機化合物としては、比較的低分子化合物のものを中心として、気相種、溶液種など様々な可能性があり、有機酸、アルコール、炭化水素等、さらに多様な可能性があることがわかった。したがって、対象とすべきサンプルは、種々の成分の混合物であると想定されることから、化学形態の分析法として、分光分析法の単独の適用は困難である。適用可能性の高い分析方法は、GCやLC等の分離手段と組み合わせた質量分析法（すなわち、GC-MS、LC-MSその他）であると考えられた。

検証に用いるサンプルは、金属の腐食試験を行っているガラス密封試験のサンプルを用いることが、コンタミネーション影響等を極力避ける目的で有効と考えられた。そこで、分析法確立のための予備検討として、想定されている化学形態の代表的なもののガラス密封試験における生成量を推測し、その値を参考に標準試料を調整し、GC-MS法及びLC-MS法によって分析を行い、定量下限に関する情報を取得した。

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（NA）調査を実施することで、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）の長期健全性について、アルカリ一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、それら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、その長期挙動評価の信頼性向上を目的としている。

平成 24 年度までの検討^①で、過去にアルカリ性地下水との接触が確認できたベントナイト鉱床（フィリピン北西部の Saile 鉱山とその周辺地区：Fossil Type の NA サイト）におけるナチュラルアナログ調査から、ベントナイトの変質が数 mm 程度に限定されていることが確認されるとともに、その長期のアルカリ変質による鉱物変遷シナリオを明らかにし、長期間アルカリ地下水環境下にあってもベントナイトの長期健全性が保たれる可能性を示した。また、現在もアルカリ地下水がベントナイトと接触している（Active Type の NA）可能性が高いサイトの存在も確認され、フィリピン北西部のフィールドが、TRU 廃棄物の地層処分におけるアルカリ一緩衝材反応による緩衝材の長期変遷の評価において多くの有益なデータを取得することが可能な NA サイトであることがわかった。

平成 25 年度は、NA 調査として、(1) 実施計画策定、(2) Active Type の NA サイトの探査、(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。

（報告書）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－

◇平成 25 年度の成果

(1) 実施計画策定

平成 24 年度までの過去にアルカリ地下水と接触していた Fossil Type の NA の調査結果を踏ま

え、フィリピンルソン島北西部の特に現在もベントナイトとアルカリ地下水が接触している Active Type の調査サイトを対象とした、平成 25 年から 5 力年の NA 調査の全体計画を策定した上で、平成 25 年度の実施計画ならびにフィールド調査計画を作成した。

(2) ナチュラルアナログサイトの探査

断裂系に存在するアルカリ地下水の賦存状況と流路となる流動系の分布特性を明らかにすることに主眼を置き、Active Type の NA の候補地としてフィリピン国ルソン島北西部の Bigbiga 地区（図-1 参照）を対象として調査を行った。調査は、地上物理探査から、地下水の地球化学的調査（計測）、それらの一連の調査データ・知見などの総合解析により試錐サイトを選定した後、直接確認するための簡易構造試錐調査を実施した。また、Bigbiga 地区に分布する Aksitero 累層のベントナイトの鉱物学的特性を明らかにするためにトレンチ調査を実施した。

TEM 法（過渡現象電磁探査法）による地上物理探査により（図-1 の LP1～5 が測定した領域）、Bigbiga 候補地区内でアルカリ地下水を湧水している井戸近傍の Aksitero 累層（堆積岩）中の浅層部と深層部であるオフィオライト岩盤岩中に電気伝導度のアノマリーが解析・検出された。合わせて、Well-1 の賦存状況を解析・評価した。これらの結果から、① Well-1 の近傍（DH08）と② アノマリーの東限（測定グリット内の東端ループ計測点）の地点（DH09）を試錐地点として選定した。

トレンチ調査では、Zambales オフィオライト基盤岩まで掘削できなかったが、Aksitero 累層の優勢な堆積岩である石灰岩質泥岩～砂岩の一部に薄層（4～5cm 程度）のベントナイト質の凝灰岩質砂岩が層理面に平行に挟在すること、また、Bigbiga 地区に特徴的な分布をする珪質泥岩が塊状に産状することが確認できた。トレンチの試料はいずれもケイ酸塩鉱物を主成分とし、壁面から採取したベントナイト質凝灰岩質砂岩の薄層を挟在する石灰岩質泥岩～砂岩の化学組成全般については、 SiO_2 と Al_2O_3 成分の間には僅かであるが反比例的な変化が認められる。これはモンモリロナイトのモード組成を反映しているものと考えられる。

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

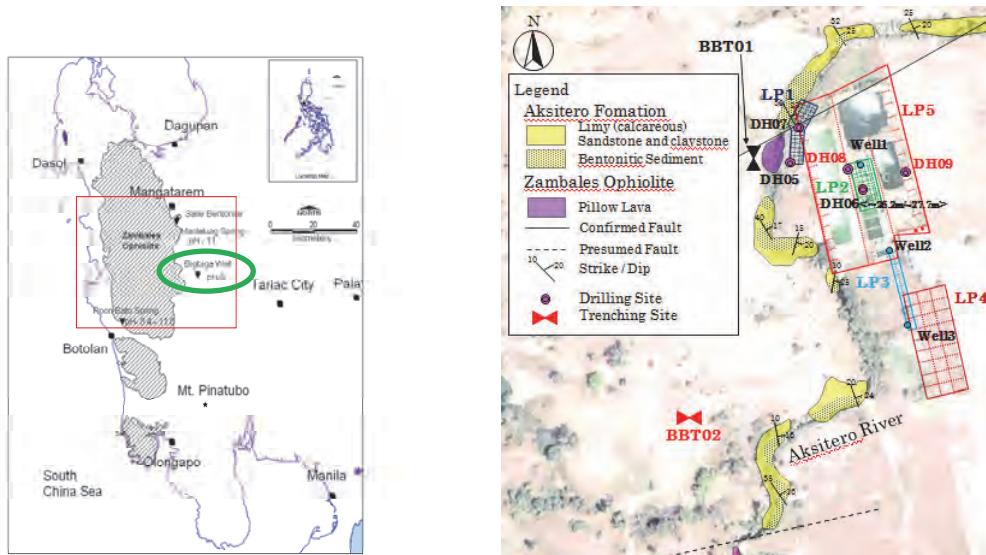


図-1 ナチュラルアナログ調査サイトの位置図(左図)とBigbiga地区のCompilation Map(右図)

Drill Hole Number : DH-08
Location: N 15° 30' 51.9", E 120° 22' 53.0"
Elevation: 107m
Core Size: NQ
Total Footage : 40.54m
Drilling Operation : 2. Nov. 2013 (pm) ~ 7. Nov. 2013 (pm)

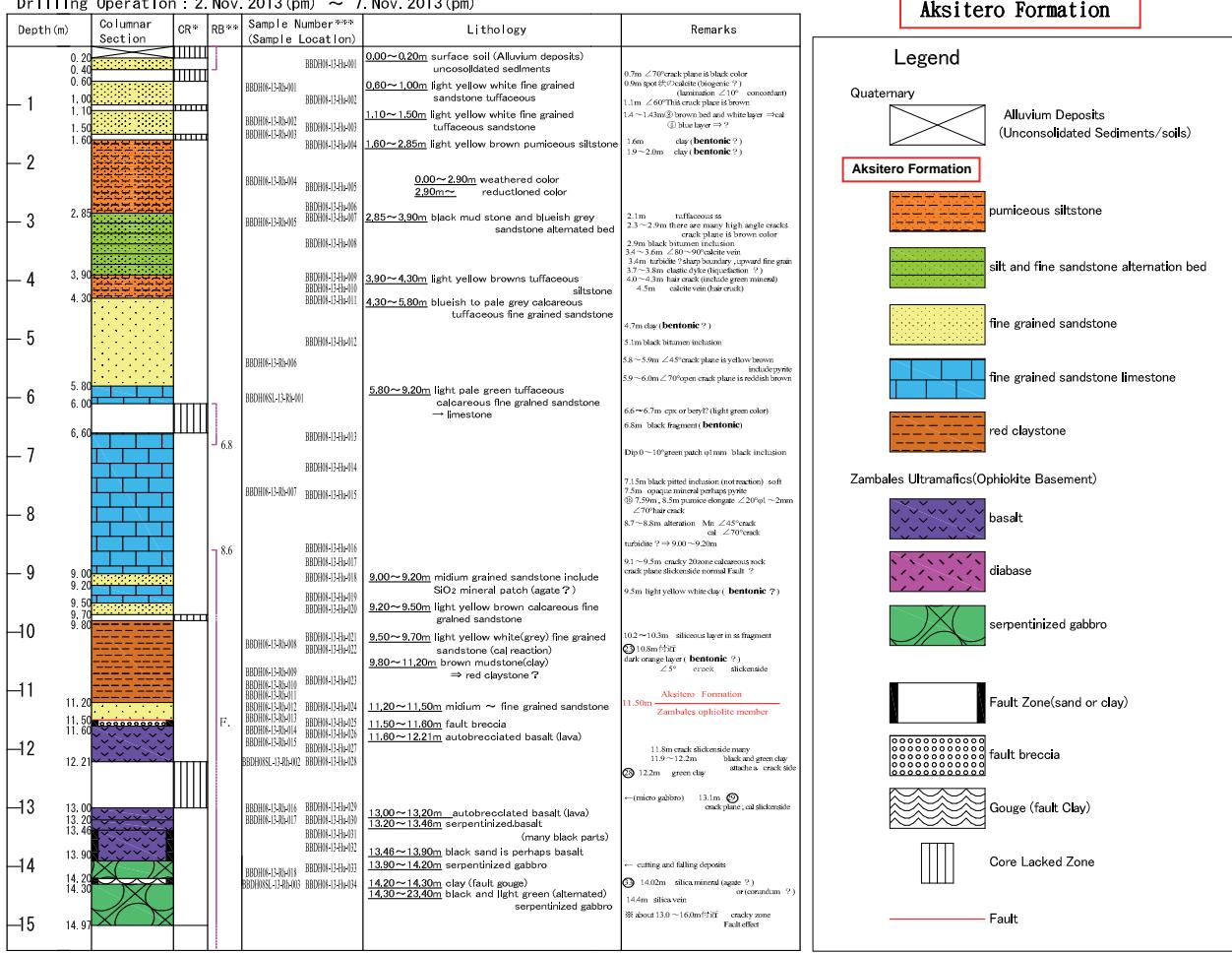


図-2 DH08 柱状図 (0~GL-15m)

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

簡易構造試錐調査では、DH08 の掘削において、掘削深度が 15m を超えるあたりからアルカリ地下水の自噴が観測され、オフィオライト基盤岩中の断裂系を流路として上昇しているアルカリ地下水（掘削水の混入した試錐孔内での pH 計測値：22m 深度-pH9.16 / 39m 深度-pH8.91）がベントナイト質砂岩または泥岩 (Aksitero 累層) と自破碎玄武岩質溶岩または細粒はんれい岩（オフィオライトの上部を構成する火成岩）に浸出していることを確認した。

試錐コアの観察（図-2 参照）及び鉱物・化学分析から、Aksitero 累層を構成する堆積岩は典型的な遠洋性堆積物で、主に遠洋性浮遊性生物の遺骸から形成された石灰質砂岩～泥岩と石灰岩および、島弧火山活動により供給された火山碎屑性堆積物から構成され、しばしば凝灰岩質堆積物を挟在し、ベントナイトの初原物質（出発物質）になっている。このような地質環境下のもと、下部層に斜長石や单斜輝石（普通輝石）および、輝沸石と斜方輝石が集中する傾向がみられる。全体としては、石英、沸石（モルデン沸石）、方解石、2-八面体スメクタイト、不透明鉱物では鉄鉱物として磁鉄鉱、鉄水酸化物、マンガン鉱物としてデントライト、水マンガン鉱、硫化鉱物として極少量の黄鉄鉱、そして火山ガラスが同定されている。これらの鉱物の中で、二次鉱物は、沸石類、Fe-スメクタイト（ノントロナイト質スメクタイト）、Mn-rich 方解石と生物起源の方解石および、燐灰石である。一方、基盤岩であるオフィオライトは、上位から自破碎玄武岩質溶岩－少量の枕状玄武岩－細粒はんれい岩と、これらの塩基性火成岩へ貫入した細粒輝緑岩の岩脈が観察される。しかし、一般的に変質作用によりそれらの塩基性岩のそれぞれの境界が不明瞭な場合が多く、特に深度 25m から 34m 間は変質程度が顕著である。それは恐らく、アルカリ地下水との変質反応が進展したものと示唆される。アルカリ地下水の地球化学的特性については、Bigbiga 地区のアルカリ地下水が他の Zambales オフィオライト地域のアルカリ地下水に比べて、pH が低い、ORP が高い、低 Ca 濃度、高 Mg 濃度という特性は、地下水-岩石（超塩基性岩、玄武岩）との反応の程度が小さく、滞留時間が短いためと考えられる。また、Fe、Mn、微量元素（重金属、REE、Ba、Sr、Cs）

濃度が高いのは、Fe、Mn 水酸化物と炭酸塩粒子の存在が示唆される。

水理地質構造的挙動については、自噴する既存井戸水（Well-1）の流量は、降雨量の季節変化の顕著な影響を受けないことから、このアルカリ地下水は、一般的な涵養・蒸発・浸透過程から考えると、ベントナイトを不透水層として被圧地下水（帶水層）として独立した流動場のもと賦存しているものと考えられる。また、DH08 のアルカリ地下水は、その自噴深度（22.7m）がオフィオライト基盤岩中に賦存し、この基盤岩中の断裂系を流路として上昇したこと（裂か水）、また、アルカリ地下水が、深度約 22m 付近で滞留（貯留）・流動する独立系の水理場と流動系を形成したと思われる要因として、岩脈の貫入の役割が考えられる。それは、元来流動場であった変質自破碎または枕状玄武岩への後期火成岩（細粒輝緑岩または、細粒はんれい岩）の貫入活動（火成活動）により、空間の場の提供を図り、その結果明瞭な水路を形成し、その水路を流動系としたと考えられる。そして、この岩脈は、緻密な岩相・岩質のために「Cap Rock」の役目で不透水層（バリア）として機能したものと考えられる。

(3) 年代測定による反応時間の評価

断裂系充填物に含まれる炭酸塩鉱物（方解石）は高アルカリ地下水が閉塞される最終期に CO₂ に接して形成したと考えられることから、方解石の生成年代から高アルカリ地下水の閉塞時期を推定するために、炭酸塩鉱物の熱ルミネッセンス（TL）特性（炭酸塩の化学組成と発光特性の関連、放射線種による発光特性）の基礎実験によりその特性を把握した上で、蓄積線量を評価式を最適化し、Bigbiga 地区で採取した炭酸塩の年代評価を行う、一連の検討を行った。

炭酸塩鉱物の化学組成と発光特性については、発光量増加に相関を示す元素を明確に特定できていないが、Fe が低ければ発光量が多くなる傾向を示した。一方、Mn、Mg、Sr 濃度が少ないほどピーク数は増える傾向がわかった。また、合成炭酸塩のピークは低く、菱苦土鉱は高いことから、Mg 濃度も TL 特性において注目する必要がある。

α 、 β 、 γ 線それぞれの照射実験を行い、X 線熱ルミネッセンスを基準とした発光感度を評価し、X

線ルミネンスに対する α , β , γ 線それぞれのルミネンスの感度率 (a -x-value, b -x-value, c -x-value) を求めた。そして、得られた感度率を用いて、Bigbiga の炭酸塩鉱物の TL 年代が 10ka から 500ka と評価され、本調査サイトの炭酸塩において TL 年代の適用可能性が確認できた。

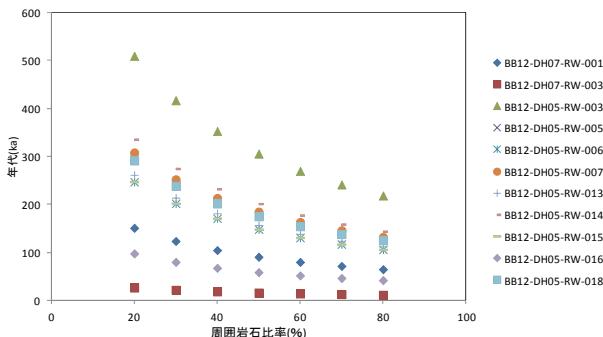


図-3 Bigbiga の DH05 及び DH07 の方解石の TL 年代

(4) 地球化学シミュレーションモデルによる変質解析

フィリピンの Saile 鉱山のトレーニングで確認した、ベントナイトと枕状溶岩の接触部界面でのベントナイトのアルカリ変質（図-4 参照）にともなう鉱物組成の変化とそれによるクロッギングの影響について、地球化学計算コード PHREEQCにおいて、高アルカリ溶液の組成 (Manleluag 温泉保養施設地区の実測値と雨水-かんらん岩の反応によるアルカリ溶液)、鉄鉱物の沈殿の有無、酸化還元電位の変化の有無、ミキシングセル（反応する溶液量の設定値）の大きさと鉄濃度の違いを考慮したケーススタディを実施して、変質解析による検討を行った。

高アルカリ溶液の組成に関しては、界面で観察された鉄鉱物の生成のために、地表で採取して分析した Manleluag 温泉水中の溶存鉄濃度では不十分で、かんらん岩の水和溶解反応による溶存鉄濃度程度が必要であることが明らかとなつた（図-5 参照）。ただし、溶存鉄濃度が十分にあれば、変質ベントナイト内で確認された鉄サポナイトの生成は再現可能であるが、平衡論的な取り扱いではその生成に溶存鉄は消費されてしまい、下流側で確認されているノントロナイトやゲーサイトは飽和に達しないために沈殿しない。そのため、鉄サポナイトの生成を速度論的に取り扱うことによって、その両者の共存が表現できるものと考えられる。

酸化還元電位が変化については、酸化帯を設定したケースでは、3.2 年後に全て針鉄鉱の沈殿で空隙が充填されクロッギングすることが確認された。

また、ミキシングセルの大きさが反応速度、特にモンモリロナイトの溶解速度に大きく影響することが確かめられ、天然現象での取り扱いについてさらに詳細に検討すべきであることが確認できた。

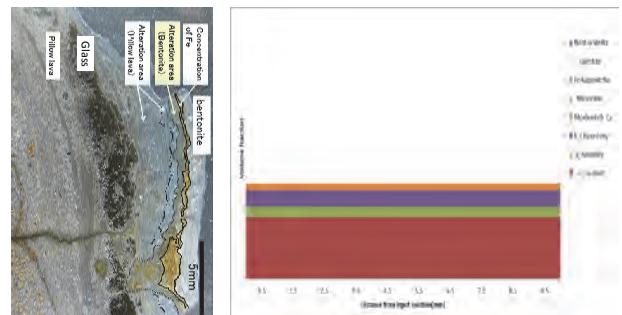


図-4 アルカリ変質した界面の薄片写真（左）と変質解析の初期条件（右）

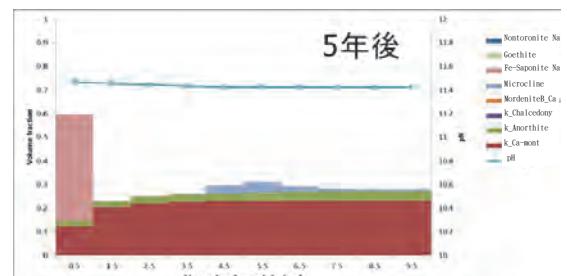


図-5 アルカリ変質による鉄サポナイト及びカリ長石の生成（雨水-カンラン岩の反応によるアルカリ溶液条件）

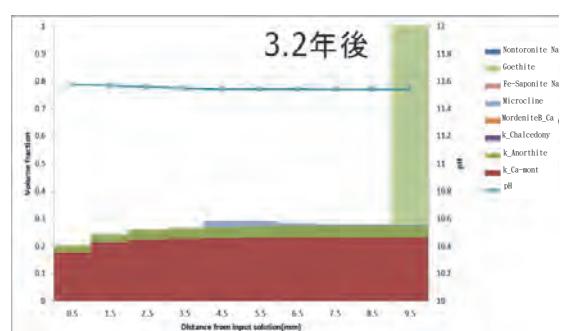


図-6 酸化還元電位の変化にともなう鉄鉱物（針鉄鉱）による変質フロントでのクロッギング

- 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 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理 平成 19 年度～平成 24 年度の取りまとめ報告書、2013 年 3 月

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

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においては、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、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のための今後 5 力年の事業として、「人工バリア材料長期挙動評価」と「人工バリア初期条件の設定」を実施する。前者では、緩衝材(ベントナイト)を対象に、水理-力学-化学 (HMC) 連成挙動及び解析による長期挙動評価の信頼性を高めることを目的とし、確認試験と解析への適応を検討する。一方、後者では、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影響に着目し、解析精度の向上を目的として操業中の熱の影響、施工による初期設定への影響等を検討する。

平成 25 年度は、これらの課題について、予備試験等の調査を行ない、現象の把握とモデル化、長期挙動の評価を行う HMC 解析の手法の検討、加えて初期条件への反映事項の抽出に関する 5 力年の実施計画について検討を行った。

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。

(報告書)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－

◇平成 25 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 になった地下水が接触し化学的な変質が起こる。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。平成 24 年度までの検討²⁾において、多様なセメント種類での溶解変質の解析手法、ベントナイトの変質解析及び力学解析手法を構築し、一次元の化学力学を連成した長期予測解析手法を検討した。その結果、課題として、ベントナイトの変質における主要成分のモンモリロナイトの溶解とそれに伴う二次鉱物の生成による体積変化の現象把握、水理力学挙動への影響把握及びこれらの解析への反映に加え、二次元での解析手法の構築を挙げた。

そこで本年度より、これらの課題を受け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することとした。

緩衝材の化学変質に関する試験では、モンモリロナイトの溶解と二次鉱物の生成による体積変化を直接測定するための予備試験とそれによる二次鉱物としてアナルサイムが生成する場合の体積変化挙動の把握を行った。シリンジ中で試料を変質させ体積変化を測定する手法を適用し、図-1 に示す様に、時間の経過と共にモンモリロナイトの溶解による体積の現象とアナルサイム等二次鉱物の生成による体積減少を確認した。また、干渉計を使用した二次鉱物の生成速度の試験を実施した。今後、その他の二次鉱物についても生成時の挙動を確認し、現象をモデル化していく予定である。

セメントとベントナイトが長期に接触した試料は少なく、この部分で変質により生成する珪酸カルシウム水和物(C-S-H)等の二次鉱物の挙動について分析による把握、解析の検証が必要なため、スイス Nagra の GTS(グリムゼル試験場: Grimsel Test Site) の構造物から、建設後 12 年間の経過

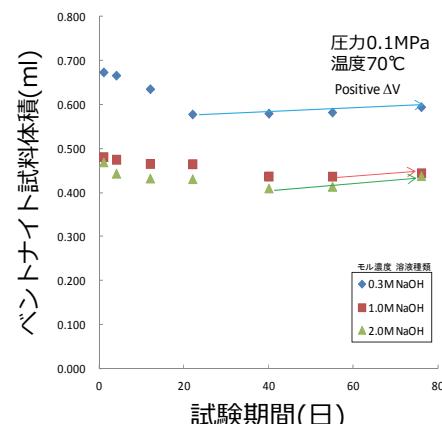


図-1 モンモリロナイトの変質時の体積変化

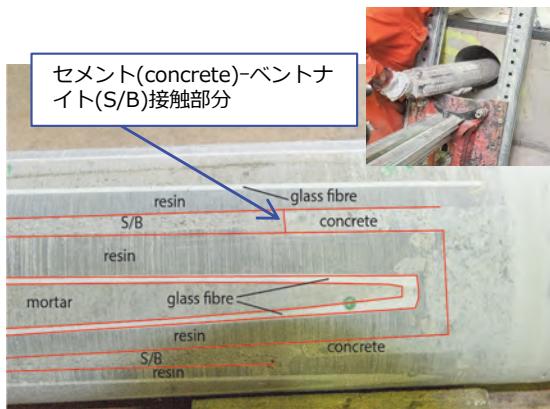


図-2 セメント-ベントナイト接触試料

した試料を採取した(図-2)。加えて、化学変質挙動について、カラムによる現実的な条件での試験、化学変質解析の信頼性向上のための基礎データの整備として、国内産モンモリロナイトの熱力学データを拡充するための特性データを取得した。

緩衝材の力学特性に関する試験では、粉末のアナルサイムをベントナイト試料に混合して、変質で二次鉱物が生成した状態を模擬した試料を作製し、力学水理挙動を確認した。その結果、アナルサイム生成での力学挙動は、これまでの化学変質(モンモリロナイトの減少)による完全飽和線の移動で評価できる(図-3)。水理挙動(透水係数)は、モンモリロナイト含有量で推定可能なことを確認した。なお、排気圧縮試験(負荷)と吸水膨潤(除荷)で挙動が異なることを確認しており、今後データを拡充し、これらの挙動について詳細に確認を進める予定である。その他、緩衝材のせん断変形挙動に関する試験、化学変質に伴う長期力学挙動試験を実施し、長期挙動解析の高度化に有益な知見を取得した。

HMC 連成解析手法の検討では、化学的な挙動の解析手法について検討し、処分場坑道を想定した二次元での長期解析が可能となった(図-4)。加えて、モンモリロナイトの溶解速度の定式化で重要な実効反応表面積を数学的な手法でのモデル化に取り組んだ。モンテカルロシミュレーションを行い、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する。低密度(乾燥密度 0.05Mg/m^3 以下)の積層状態での試験の再現が可能となり(図-5)、今後実用的な乾燥密度(1.6Mg/m^3)での再現を目指し解析手法を検討していく必要がある。

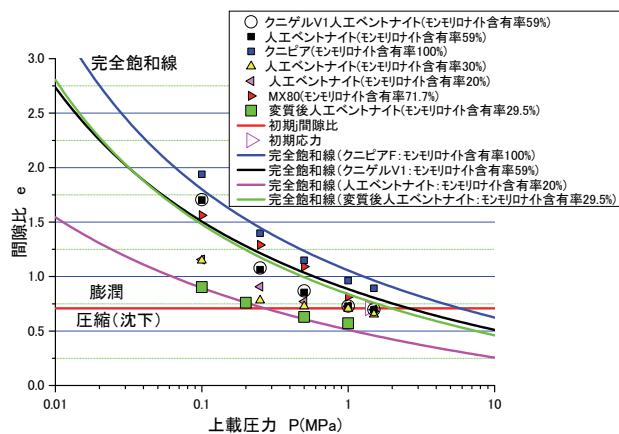


図-3 緩衝材の力学挙動に関する試験結果

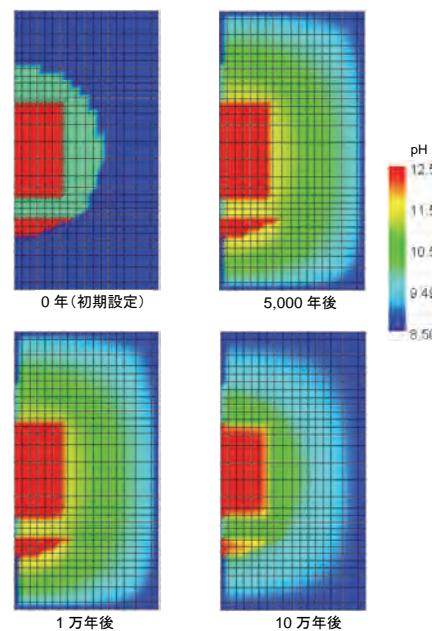


図-4 二次元化学解析結果

力学挙動に関する解析では、これまでに質量保存の点から考慮が難しかった緩衝材の変質を反映した構成モデルを構築した。この構築した構成モデルは、モンモリロナイトの溶解減少による、膨潤圧の減少等の水理力学挙動への影響だけでなく、アナルサイム等(二次鉱物)の生成による固相(緩衝材)体積の増加(図-6)が水理力学挙動への影響を考慮することが出来る。今後、この構成モデルを反映した二次元 FEM 解析を構築し、二次元化学解析との連成手法の検討を進めることで、より実現象に近い人工バリアの長期挙動解析が可能になると考えられる。

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

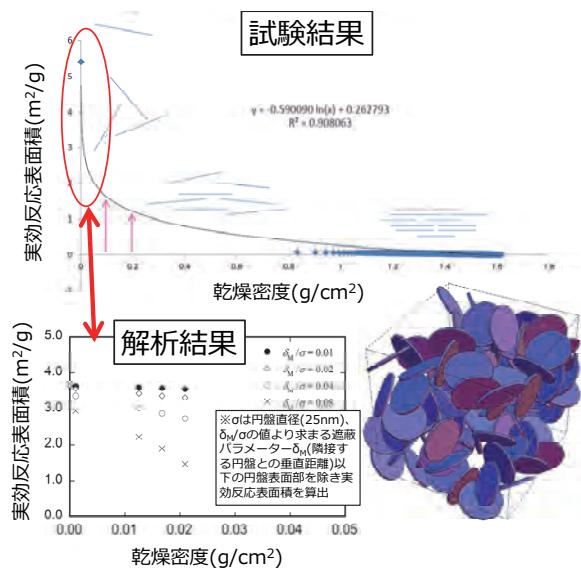


図-5 数学モデルによるモンモリロナイト実効反応表面積の算定手法の検討成果

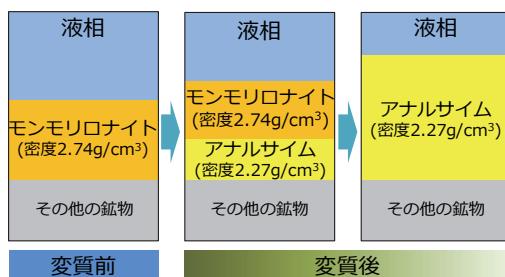


図-6 力学解析モデルで考慮したベントナイトの変質に伴う体積変化挙動の模式図

(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、処分場が建設、操業を経て閉鎖された時点であり、また、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、より正確であることが必要である。セメント系材料の材料特性値(拡散係数、力学特性等の物性値)は、処分場の建設から閉鎖までの期間に放射性廃棄物からの熱による変質を受けること、人工バリアの構造部材の大きさでは、部位の違いによる特性値の変動があることが予想される。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響を考慮する必要がある。本検討では、セメント系材料の初期条件の設定への反映を目的とし、先に述べた、熱影響と部材寸法の影響について検討を行う。加えて、人工バリアの長期性能への影響、初期条件への反映が考えられるセメント系材料のひび割れについての検査手法の検討を行った。

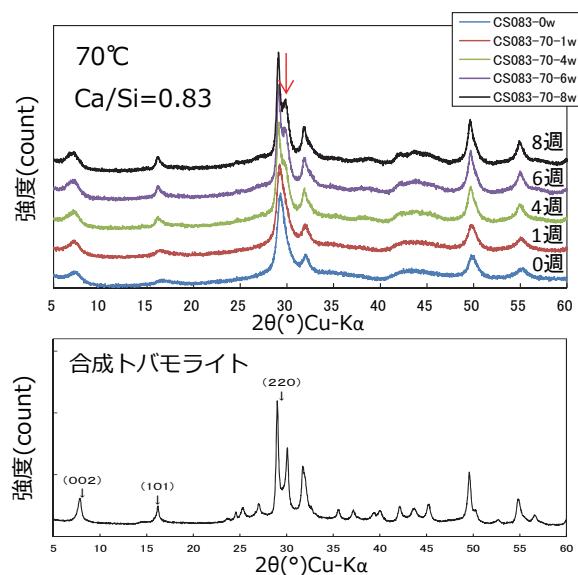


図-7 C-S-H の定温度試験結果(XRD による結晶化の確認)

また、長期挙動解析に必要となる、セメント系材料の物質移行特性モデル(拡散係数の算定手法)の高度化についても検討した。

セメント系材料への熱影響に関しては、平成24年度までの検討により、製造後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)では、TRU処分坑道の制限温度の80°Cより低い温度で、主なセメント水和物であるC-S-Hが結晶化(トバモライト化)することがわかっている。これによる初期条件の鉱物設定や特性値への影響が懸念される。そこで、先ず、C-S-Hの結晶化の条件が明確ではないことから、文献調査及び試験により調査をした。文献調査の結果、結晶化条件として、温度、経過時間、混合セメントに含まれるAlの存在及びC-S-HのCa/Siモル(C/S)比を抽出した。合成C-S-Hを一定温度に保管し、結晶化状態をX線回折(XRD)分析した結果、70°C以上の条件で結晶化の開始を確認した(図-7)。今後試験を継続して結晶化条件を確認していく必要がある。経年コンクリートの分析によれば、C/Sが通常のセメント系材料の1.8より低下しているコンクリートで結晶化を確認した(図-8)。今後、経年コンクリートを詳細に分析しC/S低下原因等の結晶化条件に関わる情報を得ることが出来るものと考えられる。

人工バリアの構造部材の大きさにおける特性値への影響について文献調査を行った。調査の結果、人工バリアでセメント系材料が使用される、構造躯体では、コンクリートの打設方法(1回の

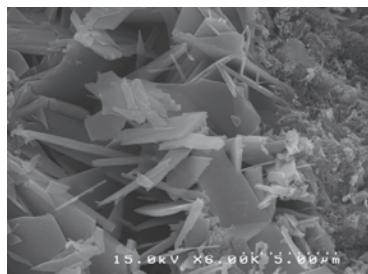


図-8 熱履歴を受けた経年コンクリートで確認したC-S-Hの結晶化状況(SEM観察)

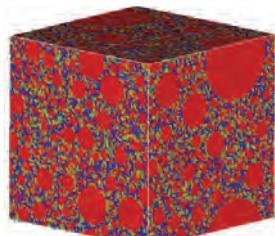


図-9 セメント系材料の骨材を考慮した三次元モデル
(青:骨材、赤:骨材、黄緑:遷移帯)

打設高さ、締固め方法等)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になる可能性、乾燥を受けた場合など養生方法により特性値への影響が抽出された。今後、これらの影響について要素試験等により確認していく必要がある。ひび割れの検査方法について、平成24年度までに、視覚的に検査が難しい部材の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てきた。これまで超音波の減衰により検査の難しかったセメント系材料におけるステップ型パルサ(広帯域周波数)の有効性を確認している。本年度は、検査精度の改善手法を調査し、超音波の集束によるひび割れ検出精度改善、広範囲の概

略検査のためのTOFD法(画像化技術)の適用等の有効な技術を抽出した。今後これらの技術の適用性について検討が必要である。

セメント系材料の物質移行(拡散係数)モデルについては、平成24年度までにセメントペースト(水とセメントから成る、以下ペーストとする)の三次元モデルにてランダムウォーク法で拡散係数を計算する手法を構築した。このモデルをコンクリート、モルタル(ペーストと骨材)へ対応させるために、ペースト、骨材及びこれらの界面の遷移帯を考慮したマルチスケールモデル³⁾(図-9)を適用し、ランダムウォーク法で拡散係数を計算する方法について検討を進めた。今後、計算結果を試験結果で検証し、モデルを構築する計画を策定した。加えて、フライアッシュ等の混合セメントへの対応をするために、OPCと混合セメントで異なるC-S-H部分の拡散係数について、試験結果に基づいてモデル化を行う計画を策定した。

以上の検討より策定した、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5カ年の計画の概要を表-1に示す。

- 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年3月
- 3) Dale P. Bentz, Edward J. Garboczi, and Kenneth A. Snyder, A hard core/soft shell microstructural model for studying percolation and transport in three-dimensional composite media, NIST Internal Report 6265 (1999).

表-1 5カ年の計画: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

項目	H25	H26	H27	H28	H29
人工バリア材料長期挙動評価					
緩衝材の化学に関する確証試験		二次鉱物生成速度/体積変化挙動の試験			
緩衝材化学挙動			現象モデル化		
セメント-ペントナイト相互作用	試料採取	XAFS分析:接触部分の二次鉱物生成挙動把握			
緩衝材の連成解析モデルに関する力学特性に関する試験		化学変質の力学影響試験(Ca型化、モンモリ溶解)			
		化学変質の水理力学影響(二次鉱物生成)/せん断挙動の試験			
HMC連成解析手法の検討		モンモリノサイト溶解速度式の実効反応表面積のモデル化			
化学解析手法		解析基礎データの拡充/化学解析手法の高度化			
力学解析手法	二次元解析				
HMC解析手法	文献調査	二次元HMC弱連成解析	二次元HMC解析手法の構築		
			HMC長期挙動解析		
人工バリア評価の初期条件の設定					
セメント系材料熱影響	文献調査		経年コンクリートの採取と分析(アナログ分析) 結晶化条件に関する試験		
部材寸法(施工方法)の特性値影響	文献調査	要素試験(影響把握)	小規模部材試験による影響把握		
ひび割れ検査手法	予備試験/ 検査手法調査	要素試験(検査手法)	検査手法の最適化		
セメント系材料の物質移行モデル		コンクリート・モルタル、混合セメントへの対応			

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ものである。

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が、その影響の程度を評価するために、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となっている。

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）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、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。

このうち、前フェーズ（平成19～24年度）の検討では、「第2次TRUレポート」で提示された課題解決に資するため、「ガス移行挙動の評価」³⁾の調査研究を行っている。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手法を整備した。しかしその一方で、現実的なガス移行挙動を評価するに際しては、不確実性を有する多くの課題が残された。

従って、今フェーズ（平成25～29年度）の検討では、残された課題の解決を目的として、室内試験によっ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（データ）を拡充していく他、室内試験によって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。

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（異種材料間の接合面/同種材料間の施工継目）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、及びガス移行に係る現実的なシナリオの構築・高度化を推進していくこととした。

このうち平成25年度は、人工バリア構成部材中のガス移行挙動に関する残された課題のうち、材料中の二相流挙動を詳細に把握・理解することを主眼に置き、各種データを室内試験により取得していくこととした。また、これまで構築してきたモデル（理論）による室内試験の現象解明、及びTRU廃棄体の長期変遷による挙動を把握できる解析ツールの高度化と、現実的なガス移行挙動評価のためのシナリオ拡張を検討した。

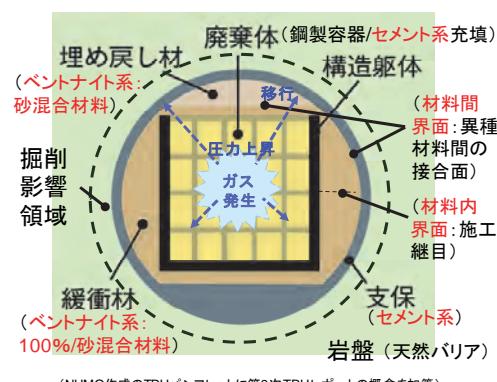


図-1 本事業において対象とするTRU廃棄物処分施設の人工バリア概念図（廃棄物グループ2の例）と人工バリア材料（赤字で表記）^{1)～4)}

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。

（報告書）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—

◇平成25年度の成果

(1) ベントナイト系材料のガス移行に係るデータの拡充

人工バリアシステムのうち、緩衝材（ベントナイト系材料）におけるガス移行現象は、水・ガスの移行に伴う二相流挙動と化学・力学挙動とが連成（例えば、ガス圧作用に伴う変形・力学特性の変化→化学変質や変形に伴う組成・密度変化→密度変化等に伴う透過性・二相流特性の変化等）した複雑な現象になると考えられている。^{1)～4)}

本検討は、上記のうち力学連成二相流挙動（化学的な要因を除く）の理解を目的に、平成19～24年度にわたって実施した「ガス移行挙動の評価 材料試験データの取得」の実施において蓄積された知見を基盤として、ベントナイト緩衝材を対象としたガス移行挙動評価における残された課題の解決に資する知見（データ）の拡充を目的としている。

具体的には、まず緩衝材（ベントナイト系材料）を用いたガス移行試験における現状での課題（異なる材料間や同一材料の内部にて生じる界面のガス移行特性評価や、現実的なガス移行形態の試験系への反映）について、国内外の既往・最新の知見と対比しながら整理を行った。

次に、整理した課題の優先度や準備期間等を考慮し、課題解決に資する具体的なガス移行試験計画を策定することができた。

主な実施成果を1)～3)に示す。

1) ベントナイト緩衝材におけるガス移行挙動に係る材料特性の課題の抽出

平成19～24年度の「ガス移行挙動の評価 材料試験データの取得」³⁾においては、ベントナイト緩衝材中のガス移行に係る特性評価を目的とした試験を行っている。

このうち、小型供試体（高さ50mm以下）を用いて実施したガス移行試験においては、ダイレタンシーの作用（流路拡幅）による破過現象が確認されており、破過現象のメカニズム解明に資する一定の成果が得られている。一方で、大型供試体（高さ200mm）のガス移行試験では、破過の発生は確認されなかった他、試験後の解体/供試体内部の水分分布測定において、ガス注入によって生じた（水分が押し出された）「ガス移行フロント」と考えられる状態が見られた。

このような破過を伴わないガス移行現象に関し、当該現象が人工バリアシステムの性能に影響を与えるか否かを明らかとするには、飽和/ガス移行過程での供試体内部の水理/力学的挙動を詳細に評価し、力学連成二相流挙動としてのガス移行メカニズムを理解・モデル化していく必要性が示唆された。

上記（平成19～24年度）検討において蓄積された知見を基盤として、平成25年度においては、国内外の処分概念に係る知見と照らし合わせながら、ベントナイト系緩衝材材料を用いたガス

移行試験における現状で残された課題を抽出・整理することができた。

具体的には、材料や概念上で考慮すべき課題の他、異なる材料間や同一材料の内部にて生じる界面等、現実的なガス移行形態（ガスの圧力、発生量及び種類）の試験系を考慮した取組みについての課題を抽出した。

2) ベントナイト緩衝材を用いた材料データの取得計画策定

前項にて抽出された課題解決に資する、数年間オーダーにわたるガス移行挙動評価試験の実施計画を策定した。この計画においては、試験装置、対象とする緩衝材材料（配合、概念等を反映させたもの）や供試体の詳細仕様、及び試験における圧力等の諸条件を設定した他、材料中の二相流挙動の詳細な把握・理解のために取得すべきデータ等を選定した。

3) ベントナイト混合材料を用いた不飽和水分特性データの取得

人工バリアシステムのうち緩衝材中のガス移行挙動を把握・理解するためには、力学連成二相流解析が必要であるが、解析において高精度の解を得るために、ベントナイト系材料の材料データ（力学特性パラメータ）を適切に取得する必要がある。このため、平成19～24年度においてはベントナイト100%材料を対象としたデータの取得と蓄積を進めてきた。

平成25年度においては、今後の力学連成解析において必要な材料データのうち、底部緩衝材の材料に想定されているベントナイト/砂混合材料を対象とした、サクション制御試験によって水分特性データ取得することができた。

(2) セメント系材料のガス移行データ取得

本検討では、TRU処分概念におけるガス移行の取扱とこれに重要な役割を果たすセメント系材料の設計についての整理を行い、本検討における設定条件などについて検討した。さらに、レファレンスデータ取得の観点から、人工バリアの構成材料である廃棄体パッケージの充填材として想定されているモルタル材料の気液二相流特性データを取得し、その結果を整理することによって上記解析に必要なモルタルの二相流モデルパラメータを取得することができた。

主な実施成果を1)～3)に示す。

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

1) TRU 廃棄物処分概念におけるセメント系材料についての整理

第 2 次 TRU レポート等を参照し、TRU 処分概念におけるセメント系材料のガス移行に係る設計要件のうち、本検討において対象とすべき設定条件や解決すべき課題について検討・整理することができた。

2) セメント系材料の気液二相流パラメータの取得

人工バリアの構成材料として重要なセメント系材料を対象に、ガス移行（透気）試験による気液二相流パラメータの取得を実施する。本年度においては、今後の研究展開について検討するとともに、そのための参考データ取得という位置付けで、廃棄体パッケージの充填材に想定されているモルタルの気液二相流特性を取得することができた。

3) セメント系材料によるガス移行材料によるガス移行取得データの評価

上記で取得されたデータを評価するため、セメント系材料のガス移行評価に係る既往の検討結果を以下の手順によって整理し、さらに本検討にて得られたデータと比較した結果、互いの整合性を確認することができた。

- a. セメント系材料のガス移行挙動試験データの文献収集（国内外の試験事例）
- b. 収集文献中のデータ整理（実施環境：飽和/不飽和の別、供試体の材料構成とサイズ、その他：データの信頼性等）

(3) ガス移行連成解析ツールの高度化

本検討は、TRU 処分施設のマルチスケール系（人工バリア/天然バリア）のうち主に人工バリアを対象としたガス移行に係る THMCG 連成現象の解明促進を目的としている。

平成 19~24 年度までの検討では、ガス移行挙動との関連性が示唆される変形場（力学場）、化学場との連成現象（THMG、THCG）に着目し、試験データを用いた確証計算等によって現象理解を進めた。また、様々な不確実性が与える影響を評価できる解析ツールと解析手法の高度化を推進した。

平成 25~29 年度の検討においては、ガス移行挙動に係るデータのさらなる蓄積と適用性の向上のため、これまでに構築したガス移行データライブラリのデータ拡充と具体的な利用・再評

価を進めるとともに、国内外の研究機関による成果を含めたデータの蓄積を継続することとした。さらに、より複雑なガス移行挙動の解明に資するモデリング技術の高度化（コンピューティング技術を用いた評価ツールの開発整備と高度化等）を推進していくこととした。

このうち平成 25 年度は、今後達成すべき到達点の設定と具体的な研究計画の策定したうえで、具体的な解析検討を行った。

主な実施成果を 1) ~4) に示す。

1) ガス移行解析ツールの高度化に係る解析検討

本検討では、平成 24 年度の「ガス移行挙動の評価 材料試験データの取得」³⁾の中で実施された、大型供試体（直径 60mm、高さ 200mm）を用いたガス移行試験のガス移行挙動の解明に資するべく、当該試験の再現解析を実施した。

再現解析には以下の 2 つの解析コードを適用し、大型供試体内でのガス移行やその他の挙動について検証した。

- ・ 古典二相流解析コード：GETFLOWS（ベントナイトの空隙の損傷を考慮した圧力依存透過特性モデルを搭載）
- ・ 力学連成二相流解析コード：CODE_BRIGHT（ベントナイトの飽和/不飽和力学特性を考慮した変形依存性透過モデルを搭載）

検証の結果、古典二相流解析では、試験結果と同様に、ガス注入による空隙損傷（破過）が生じない二相流挙動のみによって飽和度が減少した範囲が形成される状況を再現することができた（図-2）。また、力学連成解析では、古典二相流では考慮出来ないような、ベントナイトが注入ガス圧によって注入側から排出側にかけて圧密され変形していく状況を詳細に評価することができた。

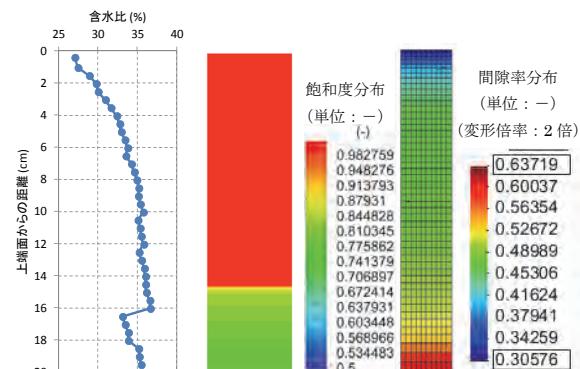


図-2 実験結果（左：含水比分布）と再現解析結果（中：飽和度分布、右：間隙率分布）の比較

2) 解析・モデル化手法の展開に係る課題（連成

挙動評価、不確実性評価等）についての検討

- a. 国内外の最新動向を踏まえた解析手法・モデル化に関する課題の取りまとめと解析手法・モデル化の高度化のための研究計画策定

これまでの検討を通じて得られた課題に対して、国内外の最新の知見を踏まえ、今後の方向性についての検討方針を定めたうえで、今後5年程度で達成すべき到達点を設定し、解析手法・モデル化の高度化に向けた具体的な研究計画を策定した。

研究計画の策定に際しては、年度ごとの到達点（マイルストーン）を定めることができ、最終目標との関連付けを具体化する点に留意した。

- b. TRU 廃棄物処分施設の概念モデルを用いた時系列解析

前項にて整理した課題の解決を目的として、TRU 処分システムを対象とした解析格子モデルを構築し、環境条件や流体成分及び考慮する素過程等を設定したうえで、ガス移行解析を実施した（図-3）。結果として、ガス移行経路の生じる箇所が材料パラメータや解析格子の解像度（格子の大きさ）に依存する可能性が示唆されたため、材料パラメータの不確実性も考慮したガス移行評価を行っていく必要性が示唆された。

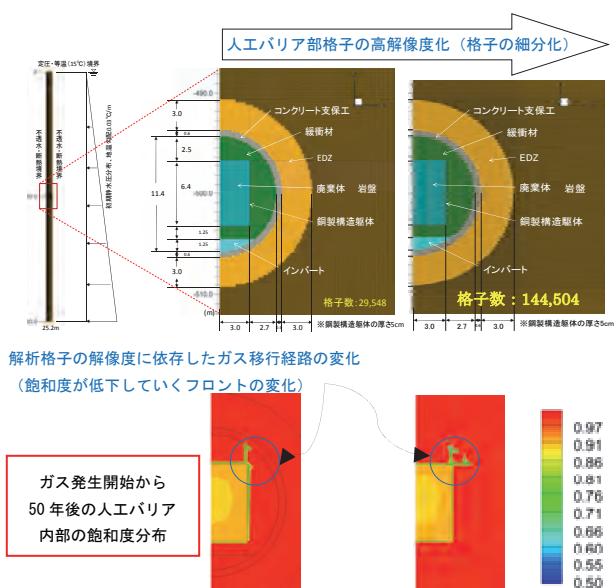


図-3 時系列解析の境界条件（左上）と解析モデル（中上：H19-24 年度、右上：平成 25 年度）及び解析結果（中下：H19-24 年度、右下：平成 25 年度）

(4) ガス移行評価シナリオの拡張

平成 19～24 年度に実施した「ガス移行挙動評価手法に関する検討」においては、TRU 処分概念のうち廃棄物グループ 2 の処分概念を対象としたガス移行シナリオの構築、及びシナリオ評価手法の整備を推進してきた。

平成 25 年度は、上記成果を基盤として、シナリオ及び FEP を拡張するための予備的な検討と位置付け、廃棄物グループ 3 を対象としたシナリオ構築に係る検討を行った。

主な実施成果を 1)～2) に示す。

- 1) TRU 廃棄物処分概念全体を対象としたシナリオの構築と関連する不確実性の特定及び安全評価上の課題抽出

以下、「a」～「c」の手順を経て、廃棄物グループ 3 を対象としたガス移行シナリオを構築するとともに、処分概念のガス影響に係る予備的安全評価に向けての不確実性を特定した上で、安全評価上の技術課題を抽出することができた。

- a. 各グループの特徴の整理及び状態変化表の作成

- b. 統合 FEP の関連図の作成

- c. シナリオ整理シートの作成と見直し

- 2) TRU 廃棄物処分概念に係る人工バリア材料に係る現状の知見の整理

ここでは、まず TRU レポート（一次及び二次）と NUMO その他機関より提示されている TRU 処分概念について、人工バリア材料とガス発生・移行概念の整合性の観点で比較整理した。

そのうえで解決すべき新たな課題を取りまとめ、これまでに整備したシナリオ整理シートに追記することができた。その際、海外における放射性廃棄物処分に係るガス移行対策に係る知見（FORGE プロジェクトにおけるヨーロッパ諸国間でのガス移行問題に係る論点等）を参考とした。

- 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) 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
- 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 19～24 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－、2008～2013 年 3 月
- 4) 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

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

◇事業の概要

わが国においては、使用済燃料の再処理によって発生する高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）等を地層処分する方針としており、そのための技術開発が進められている。一方、平成24年12月の内閣府原子力委員会において、使用済燃料の直接処分（再処理せずにそのまま処分すること）を可能とする技術の必要性は明らかであり、ガラス固化体の処分技術では不足する点を明らかにし、研究開発課題を定め、その解決に向けて取組を着実に進めるべきであるとの見解が示された。

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」は、使用済燃料の直接処分に係る処分施設及び人工バリアの設計・施工に関する技術開発を実施し、使用済燃料の直接処分の技術的可能性の見通しを検討する技術的取りまとめに資することを目的に実施された。

本事業では、上記目的を踏まえ、原子力機構の再委託研究「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」として、使用済燃料の搬送・定置設備の概念設計および封入設備等の地上施設の概念設計を実施した。

◇平成25年度の成果

使用済燃料の直接処分における搬送・定置に関する技術情報の整理を行い、廃棄体の大きさ、重量、放射線量などのガラス固化体との相違点に留意して、搬送・定置設備の概念設計を行い、技術課題を抽出した。

また、処分容器の胴体と蓋の封入に着目し、封入設備の基本的な設備構成を検討し、技術課題を抽出した。

(1) 搬送・定置設備の概念設計

1) 前提条件

原子力機構からの提示に基づき人工バリアの構成は、図-1に示すPWRの使用済燃料集合体4体または2体収容の炭素鋼製の処分容器および緩衝材とし、定置方法は横置き、ブロック定置方式とした。

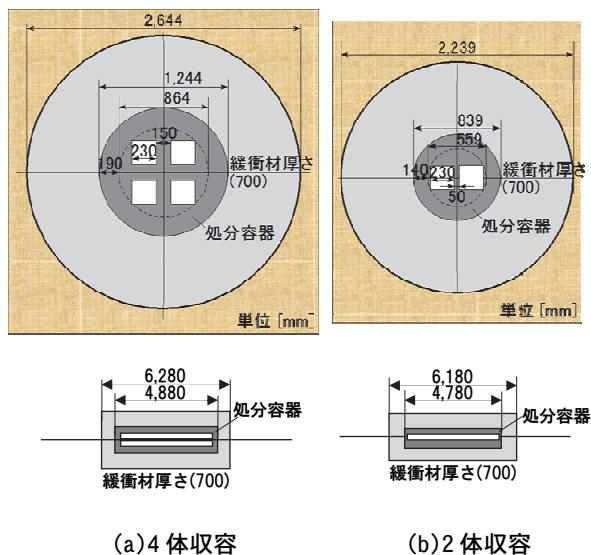


図-1 人工バリアの前提条件
(PWRの使用済燃料集合体)

2) 搬送・定置設備の概念設計

搬送・定置設備は、前提条件、およびガラス固化体と使用済燃料との相違を考慮し、ガラス固化体の処分システムと同様に「アクセス坑道搬送設備」「坑底積替設備」「連絡・主要坑道搬送設備」「処分坑道搬送・定置設備」に分類し、設計要件を設定した。処分坑道での搬送・定置設備の設計要件を表-1に、概念図の例を図-2～3に、抽出した主な技術課題を表-2に示す。

表-1 処分坑道での搬送・定置設備の設計要件

- ・下部緩衝材を定置すべき坑道上に搬送・定置できること。
- ・廃棄体を下部緩衝材上の所定の位置に搬送・定置できること。
- ・上部緩衝材を廃棄体上の所定の位置に搬送・定置できること。
- ・中央操作室からの遠隔自動運転が可能であること。

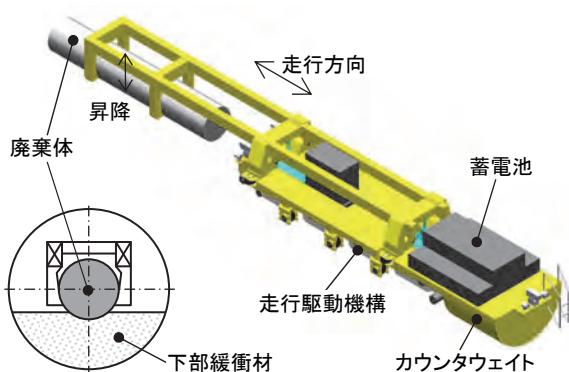


図-2 処分坑道廃棄体搬送・定置装置の概念図の例

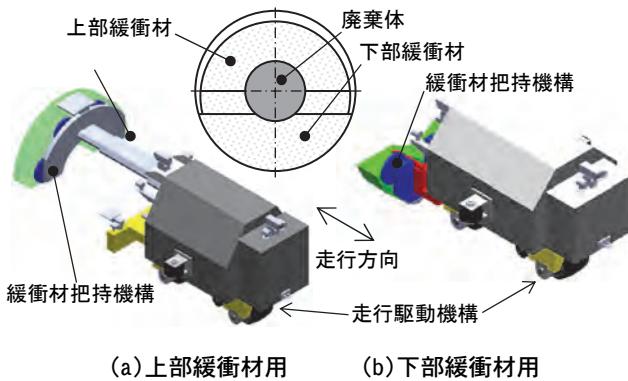


図-3 処分坑道緩衝材搬送・定置装置の概念図の例

表-2 搬送・定置設備の主な技術課題

共通	<ul style="list-style-type: none"> 坑道内での遠隔操作による搬送・定置機能、精度の実証 本年度検討した横置きブロック定置方式は、搬送・定置対象物が廃棄体と分割型緩衝材のため、装置数が多く地下で多くの作業手順が必要となる。今後は上記を踏まえ、搬送・定置対象物が少ないPEM(*)方式等の他方式も検討を行い、比較検討した上で最適な定置方式の選定 操業条件や地下環境での遠隔運転に応じた運転・保守・安全要求事項の抽出と設計への反映
処分坑道搬送・定置設備	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体定置方式について、今後の実規模試験による定置精度等の実証 処分坑道の表面状態変化を考慮した、姿勢制御方式、走行性能の実証 主要坑道と処分坑道の取合い部分の遮へい区画の設定、および遮へい扉と坑道との取合い部の構造の検討

* : Prefabricated Engineered Barrier System Module
地上施設であらかじめ緩衝材と廃棄体を鋼製シェル内に格納し、地下施設へ鋼製シェルを搬送・定置する方式

(2) 地上施設の概念設計

地上施設で重要な工程である封入・検査工程を対象とした。高レベル放射性廃棄物の地層処分の封入(溶接)に関する技術情報に基づき、廃棄体の寸法、構造などの条件を考慮して、封入設備の概念設計を行い、技術課題を抽出した。

高レベル放射性廃棄物の地層処分のオーバーパックと処分容器との材質、基本形状等の比較評価の結果、溶接や検査に関しては要求事項が類似であるため、オーバーパックにおける技術や知見が活用可能と考えられる。設定した設計要件を表-3に示す。オーバーパックの溶接設備の設計例を基に、溶接設備の仕様を、TIG溶接、狭開先、下向き溶接と設定した。溶接設備の概念図を図-4に、抽出した主な技術的課題を表-4に示す。

表-3 封入設備の設計要件

封入溶接	<ul style="list-style-type: none"> 高品質な溶接が可能なこと 処分容器および使用済燃料集合体に有意な熱影響を与えないこと 溶接能率が高いこと 遠隔自動化が可能なこと
溶接検査	<ul style="list-style-type: none"> 信頼性の高い検査が可能であること 遠隔自動化が可能であること

表-4 封入設備の主な技術課題

封入溶接	<ul style="list-style-type: none"> 遠隔実証による遠隔技術の確立 溶接による燃料に対する有意な熱影響がないことの解析評価等による確認 処分容器内蓋の接合方法について要件の設定および接合方法の設定
溶接検査	<ul style="list-style-type: none"> 処分容器の長期健全性の観点からどの程度の欠陥までを検出するかの検討

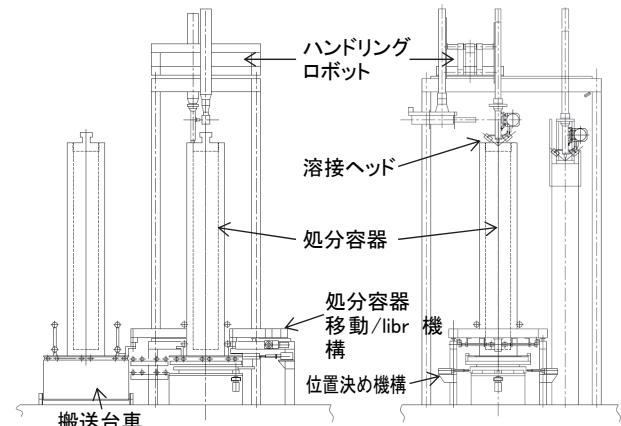


図-4 溶接設備の概念図の例

- 原子力機構、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
(http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rwary/2013/25-11-1.pdf)

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

5. 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) 人工バリア施工技術の選定上の技術課題検討

3 種類ある人工バリア施工技術（豎置き・ブロック方式、横置き・原位置施工方式、横置き・PEM 方式）に関して、工学的実現性と閉鎖後長期安全性について比較評価に必要な技術的論拠を整備し、試験や技術開発が必要な課題を抽出した。また、操業安全性、回収性、経済性の評価項目を検討した。

(2) 第二種特定放射性廃棄物処分受入基準設定のための検討

TRU 廃棄物の地層処分における代替技術である、ヨウ素固定化処理及び硝酸塩の処理について、その適用のために必要な技術開発ロードマップの検討を実施した。

(3) 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

ハル・エンドピースを地層処分する際に必要となる廃棄物情報の整備を目的として、核種組成及び含有量の設定に必要なデータの整理及びその取得計画の策定に向けた検討を実施した。

(This page(p54) 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る。

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。

(報告書)平成 25 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

◇平成 25 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、資金確保関係等の情報を収集・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、各国関係機関が発行する主要報告書等の調査を行った。

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

以上の調査により得られた情報に加え、関連する法規制文書や関連報告書等をデータベースとして整備するとともに(図-1)、データベース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) 調査情報の整理・発信・普及

上記(1)でデータベースとして整備した各種情報を活用して、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 86 件掲載した(記事タイトルの一覧は、資料 VI-5 を参照)。

III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

The screenshot shows the homepage of the website '諸外国での高レベル放射性廃棄物処分' (Disposal of High-Level Radioactive Waste Abroad). It includes a sidebar with a tree diagram of countries, a main menu, and a search bar. The main content area displays a news flash about Canada's disposal site selection process, followed by a detailed report on Canada's disposal site selection process.

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』(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26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ついて、検討されている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することで、理解促進に資するための資料である。平成25年度は、主要8カ国(スウェーデン、フィンランド、フランス、ドイツ、イスラエル、英国、米国、カナダ)の各々を各編とした構成として、また、中国、韓国、ロシアの地層処分に関する動向を短く解説したページ

を付録としてまとめ、平成25年末時点の最新情報を反映して作成した。また、各国での地層処分の実現に向けた歴史・検討経緯を表形式に整理して新たに盛り込んだ。(図-4)。

技術情報冊子②(平成26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25年度に整備した技術情報冊子

各國での地層処分の実現に向けた検討経緯									
国	年	年	年	年	年	年	年	年	年
スウェーデン	1980	1985	1990	1995	2000	2010	2020	2030	2040
フィンランド									
フランス									
ドイツ									
イスラエル									
イギリス									
米国									
カナダ									
中国									
韓国									
ロシア									

図-4 各国での地層処分の実現に向けた検討経緯

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高度化調査

◇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。

このような背景を踏まえ、諸外国における研究開発先行事例等を体系的に把握するとともに、今後の我が国の基盤研究開発の課題を検討することで、技術基盤の整備を図ることを目的として調査を実施した。

調査においては、技術情報の調査と基盤研究課題の抽出として、海外における地層処分や代替処分技術等の最新の研究開発動向を分析し、体系的に整理を行った。これらの調査においては、当センターが有する海外の処分実施主体等との協力関係を活用し、これらの機関からの情報収集も行った。

また、大学等の外部有識者からなる検討委員会を設置し、今後、我が国において解決すべき地層処分の基盤研究開発課題等の検討を行った。

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。

(報告書)平成 25 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高度化調査 報告書

◇平成 25 年度の成果

(1) 地層処分に関する技術情報の調査と基盤研究課題の抽出

欧米諸国の放射性廃棄物の地層処分に関する研究開発に関して、スウェーデン、フィンランド、フランス、イスラエル、米国、英国、ドイツ、スペイン、ベルギー、カナダの 10 カ国を対象として、地層処分に関する研究開発動向の情報を収集・整理した。この調査では、実施主体による研究開発のみならず、他の研究開発機関や大学等によって行われている研究開発も対象とした。特に、各国の地下研究施設で実施している研究開発課

題及び回収可能性に関する研究開発状況に留意して情報を収集・整理した。

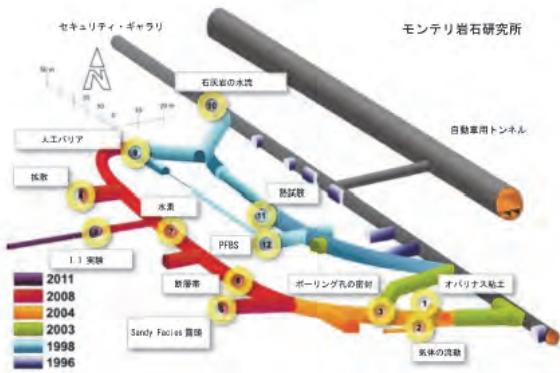


図-1 スイスのモンテリ岩盤研究所のレイアウト

また、上記 10 カ国における、深孔処分や核種分離・変換等の代替処分技術等に関する研究開発動向についての情報を収集・整理した。

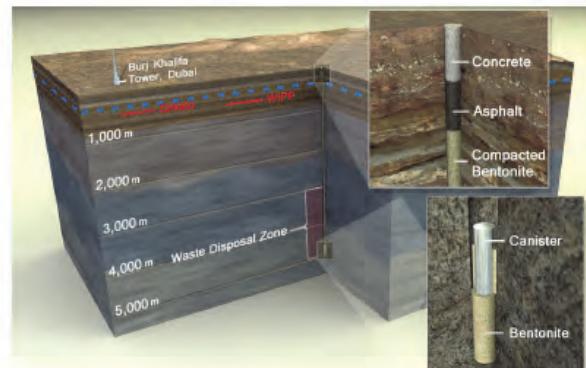


図-2 米国エネルギー省 (DOE) による深孔処分概念図

さらに、地層処分に関する国際共同研究に関する調査として、EURATOM（欧州原子力共同体）の第 7 次枠組み計画で実施されている放射性廃棄物管理に関する国際共同プロジェクト、及び IGD-TP（放射性廃棄物の地層処分の実施に向けた技術プラットフォーム）を取り上げ、これらのプロジェクト等における研究開発課題の検討に関する活動について情報を収集・整理した。



図-3 EURATOM の第 7 次枠組み計画における「地層処分場のモニタリングに関する国際共同研究プロジェクト (MoDeRn プロジェクト)」の全体構成

我が国における地層処分の研究開発課題の検討に関しては、今後、我が国において解決すべき国の基盤研究開発課題等について検討した。具体的には、平成 24 年度に策定された「地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 25～29 年度）」（以下「全体計画」という）に基づいて展開される、地質環境調査評価技術分野、処分場の工学技術分野、性能評価技術分野、使用済燃料の直接処分分野の詳細な研究開発課題に係る研究開発マップの策定に関して、有識者による検討を行うための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 分野で構成）を設置し、審議を行った。各分野別委員会についてはそれぞれ 2～3 回開催し（表-1）、各分野の研究開発課題のレビューを行った。また、親委員会において、複数分野にまたがる課題への対応や検討した研究開発課題の最終確認などを行った。

表-1 親委員会及び分野別委員会の開催状況

分野	開催日時
地質環境	第 1 回分野別委員会（地質環境）：平成 25 年 10 月 22 日
	第 2 回分野別委員会（地質環境）：平成 25 年 11 月 8 日
工学技術	第 1 回分野別委員会（工学技術）：平成 25 年 10 月 17 日
	第 2 回分野別委員会（工学技術）：平成 25 年 11 月 14 日
	第 3 回分野別委員会（工学技術）：平成 26 年 1 月 31 日
性能評価	第 1 回分野別委員会（性能評価）：平成 25 年 10 月 31 日
	第 2 回分野別委員会（性能評価）：平成 25 年 11 月 14 日
	第 3 回分野別委員会（性能評価）：平成 25 年 12 月 27 日
直接処分	第 1 回分野別委員会（直接処分）：平成 25 年 10 月 31 日
	第 2 回分野別委員会（直接処分）：平成 25 年 12 月 5 日
親委員会	第 1 回外部有識者委員会（親委員会）：平成 26 年 3 月 3 日

これらの検討委員会におけるレビュー結果を踏まえ、各分野の研究開発課題の詳細計画や、分野間における課題の関連が俯瞰できるようなマップを含む、「地層処分基盤研究開発に関する全体計画【研究開発マップ】（平成 25 年度～平成 29 年度）」（以下「研究開発マップ」という）の策定に関して、その取りまとめを行うことにより、基盤研究課題を抽出・整理した。

策定された研究開発マップについては、公開可能な電子ファイルとして整備し、平成 24 年度に策定された「地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 25 年度～平成 29 年度）とともに、研究開発マップの印刷製本を行い、関係機関等に配布を行った。

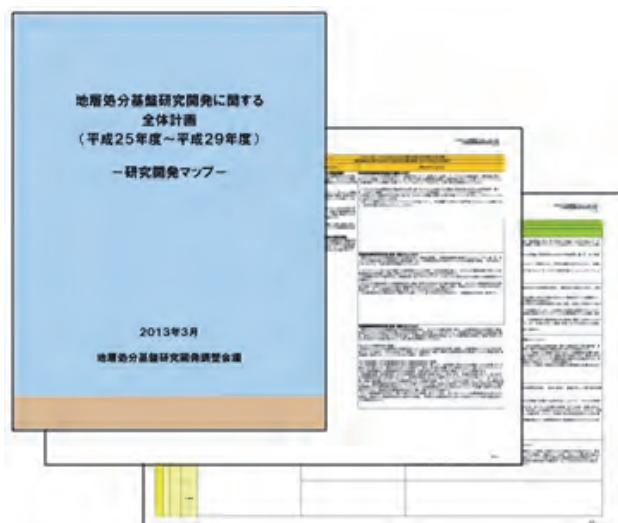


図-4 「地層処分基盤研究開発に関する全体計画【研究開発マップ】（平成 25 年度～平成 29 年度）」（資源エネルギー庁 HP :

http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/docs/library/rprt3/rprt07.pdf）

III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

3. 放射性廃棄物処分の諸外国の安全規制に係る動向調査

◇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、高レベル放射性廃棄物等の地層処分や余裕深度処分等に関する安全規制の枠組み及び安全評価手法、非放射性有害物質の環境影響評価等について、諸外国（具体的には米国、フランス、スウェーデン、フィンランド、スイス、英国、カナダ、ドイツ、ベルギー）、国際原子力機関（IAEA）、経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）及び欧州連合（EU）における検討状況等の調査を行った。

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。

(報告書)平成 25 年度 放射性廃棄物処分の諸外国の安全規制に係る動向調査

◇平成 25 年度の成果

(1) 諸外国における安全規制等に係る最新情報の調査

諸外国の放射性廃棄物処分の安全規制に関する最新情報について、特に高レベル放射性廃棄物処分場のサイト選定の進捗状況、許認可申請などの安全規制に関連する動向を中心に整理を行った。また、諸外国の安全規制に関する情報をより深く理解するため、各国の安全規制体制及び規制機関の概要などについて整理を行った。

(2) 放射性廃棄物処分の長期的な安全性に関する調査

諸外国及び国際機関の放射性廃棄物の地層処分及び余裕深度処分に相当する埋設処分等の長期的な安全性に関する情報、並びにそれらの安全規制における活用状況について調査を行った。

具体的には、安全規制制度の整備及び検討状況に関する最新動向及び長期的な安全性に関する考え方について、主に安全規制関連文書を中心とした調査を行った。調査結果は、諸外国及び国際機関の安全規制制度の整備・検討状況として、長期的な安全性に関する考え方を次の視点で取りまとめるとともに、調査結果と我が国における検

討状況との比較を行い、その相違点等も併せて整理を行った。その例を表-1 に示す。

- ① 立地選定段階における規制側の関与
- ② 評価期間の考え方
- 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
- 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 段階的意意思決定 (定期的な安全レビュー (PSR) の扱いを含む)
- 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)、制度的管理終了の判断等
- ⑫ 能動的な制度管理 (モニタリング・サーベイランスのあり方等)
- ⑬ 受動的な制度管理 (文書・マーカ等の記録の管理等)
- ⑭ 併置処分 (性状の異なる放射性廃棄物を同一の処分場へ埋設する際の相互影響評価を含む)
- ⑮ 暫定保管・長期保管
- ⑯ 損傷燃料・溶融燃料の処理・処分

表-1 我が国と諸外国の検討状況の比較例
(評価期間の考え方)

日本※	処分後数千年のように比較的信頼性の高い評価が可能な期間を相対的に重視し、その期間における実体的防護機能をできるだけ高めておくことにより、それ以降の長期的な防護性能の頑健性を確保するという、技術的に最善の手段を講ずる考え方が検討されている。
米国	環境保護庁 (EPA) が策定し、廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) に適用される 40 CFR Part 191 では、評価期間を 10,000 年に設定している。ユッカマウンテンに適用するために策定された EPA の 40 CFR Part 197、原子力規制委員会 (NRC) の 10 CFR Part 63 では、当初、10,000 年の評価期間が設定されていた。しかし、法律の規定どおりに全米科学アカデミー (NAS) の勧告に基づいていないとの判決を受けて修正を行い、地質学的に安定な期間まで評価期間を延長することとして、その期間は 100 万年で終了すると定義している。

フランス	安全指針では、閉鎖後の安全評価の期間に関して、10,000年以降の期間についても要求しており、対応する判断指標については長期の評価における不確実性を考慮して、10,000年を境に異なる指標・考え方が示されている。なお、指針には最大評価期間は示されていないが、実施主体が2005年に取りまとめた研究成果報告書では、安全評価の計算結果として100万年までの期間について示している。
スウェーデン	使用済燃料または他の長寿命原子力廃棄物の処分場については、十分に予測可能な外的影響を解明するために、リスク解析は少なくとも約10万年、または氷期1サイクルに当たる期間を含むべきである。リスク解析の期間は、最大でも100万年とし、処分場の防護能力の改良可能性についての重要な情報をもたらす限りの期間まで拡張されるべきとしている。

※原子力安全委員会「放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について」（平成16年6月）

(3) 放射性廃棄物の埋設処分に係る安全評価等に関する調査

諸外国の放射性廃棄物の埋設処分に係る最新状況、並びに安全評価の考え方に関する最新の技術情報の調査を行った。また、調査結果と我が国における検討状況との比較を行い、その相違点等も併せて整理を行った。

具体的には、諸外国の処分実施主体が発行する安全評価報告書、許認可申請書などを中心とした調査を行い、次の視点での取りまとめを行った。

- ・ 処分実施主体等による、最新報告書等の取りまとめ動向
- ・ 最新処分概念：処分場の概要、対象廃棄物、安全規制制度の整備状況等
- ・ 安全評価の考え方：安全評価戦略、長期の評価期間を考慮した評価シナリオ区分、評価モデル及び評価パラメータ、不確実性の取扱い、確率論的評価手法及び重大事故事象の評価、並びに品質管理手法等



図-1 諸外国の処分概念例

(4) 制度的管理に係る技術情報調査

放射性廃棄物の地層処分及び余裕深度処分に相当する埋設処分等の制度的管理に係る技術開発動向及び安全規制への適用状況について、諸外国及び国際機関の検討状況等の調査を行った。また、諸外国及び国際機関において、モニタリング技術、回収技術、原位置調査技術のうち、技術開発動向等の情報が得られたものについて整理した。

(5) 放射性廃棄物処分場の操業中の安全規制に関する調査

放射性廃棄物処分場の操業中の安全規制の動向について、諸外国の実施・検討状況等を調査した。処分場の操業段階での規制の関与としては、許認可制度及び施設確認の実施の有無を含めた調査を行うとともに、操業中の規制の関与として、廃棄体検査及び確認等の実施状況などの調査を行った。また、海外訪問調査において、フィンランド及びスウェーデンの処分実施主体及び規制機関から、操業中の処分場で行われている安全規制の状況について聴取を行い、調査結果を取りまとめた。さらに、調査結果と我が国における検討状況との比較を行い、その相違点等も併せて整理を行った。

(6) 非放射性有害物質の環境影響評価等

IAEA の安全基準文書の規定、OECD/NEA の報告書の記述等を踏まえ、放射性廃棄物の埋設処分における非放射性有害物質の評価について、諸外国及び国際機関における環境影響評価の考え方及び検討状況について整理した。調査及び整理した最新情報を踏まえ、平成24年度「放射性廃棄物処分の諸外国の安全規制に係る動向調査」において示された非放射性有害物質の環境影響評価手法の詳細化を行った。詳細化に際しては、平成24年度の調査において示された評価手法の課題なども考慮し、評価手法の具体的な内容についての考え方を整理し、加えて要検討課題を抽出した。これらの要検討課題等について、国内の環境影響評価の専門家などから意見聴取を行った。また、海外訪問調査においては、我が国の専門家らを交え、特にスウェーデンでの非放射性有害物質の環境影響評価の状況について、実施主体等との意見交換会を実施し、調査結果を取りまとめた。これら

III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

の調査結果を踏まえ、我が国における非放射性有害物質の環境影響評価手法の各課題に関する検討結果を取りまとめ、対応方針を示した。

表-2 専門家の意見例

項目	意見の内容
評価対象元素 (スクリーニング 含む)	<ul style="list-style-type: none">・我が国の水道水基準などでの基準値が定められている物質は少ないが、米国の環境保護庁(EPA)の飲料水基準には数百に及ぶ物質が含まれている。・廃棄物処理法では、水に移行しないものは配慮しなくても良いこととなっているため、廃棄物からの有害物質の溶出量のみを考慮しており、例えば、金属中のCrは溶解しにくいため、対象物質とはならない可能性がある。・スクリーニングなどである程度の元素を評価対象から除外する必要はある。・原子力安全での評価方法と産業廃棄物等処分の評価方法では、廃棄体に含まれる元素等の溶出に関する考え方方が大きく異なることがあるため、評価方法の整合性に留意する必要がある。・評価対象元素について再生製品等の環境安全性評価では、水質や土壌の環境基準や、廃棄物処理法等で規制されている有害物質を評価対象としている。・我が国の水道水基準には入っていないが、海外で対象となっているニッケルやバナジウムについては、評価対象として留意しておいた方がよい。・インジウムは、特定化学物質障害予防規則の改正により規制対象となったように、放射性廃棄物処分の際にも留意した方が良いかも知れない。・ドイツやオランダなどでは、再生製品の環境安全性評価は法令において基準が規定されている。・規制対象となっていない物質への対応としては、諸外国での評価対象元素の設定を参考することや廃棄体の内容物の物量と比率を考慮し、評価対象を検討することが挙げられる。

4. 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、原子炉で原子炉内の燃料の溶融、水蒸気爆発に伴う損傷等、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。

これら事故によって発生した放射性物質を含む廃棄物(厳密にはまだ廃棄物となっていないものも含まれるが、ここでは便宜上廃棄物として扱うこととし、以下、事故廃棄物と呼ぶこととする)の処分に向けた技術開発については、東京電力(株)福島第一原子力発電所 1~4 号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ(2014 年 6 月 27 日)に示されたスケジュールによれば、「2021 年度頃を目処に、研究開発により処理・処分の安全性に関する技術的見通しを得る。また、それと並行して制度的措置に必要な検討を行い、処理・処分に関する安全規制や技術基準を明確にする必要がある。」とされており、短期間に事故廃棄物の安定化(処理)に加え、処分方法の検討を進める必要がある。

一方、事故廃棄物の性状に関する情報は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剤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る。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

また、その結果に基づいて、幅広く国内外の技術を抽出し、それらを以下の分類に基づいて、対象技術ごとに整理した。

- ① 固化材、固体化材を用いた固化技術
- ② 溶融固化
- ③ 焼結固化およびそれに準ずる技術
- ④ 貯蔵および処分容器
- ⑤ 脱水固体化
- ⑥ アスファルト固化
- ⑦ 水蒸気改質等による廃棄物特性変換技術
- ⑧ その他

整理にあたっては、まず公開情報(各研究機関、企業が発刊する報告書、WEB サイト、特許公報等)をもとに適用可能性のある技術を洗い出し、十分な情報が得られない技術(特に民間企業の技術)に関しては、個別にプレゼンテーションを依頼するなどして、情報収集を行った。

得られた結果は一覧表ならびに個別シートにとりまとめ、関係機関間で共有した。

今後これらの成果は、原子力学会に設置された「福島第一原子力発電所事故により発生する放射性廃棄物の処理・処分」特別専門委員会で提示された課題の解決のための技術開発の具体化に向けた技術の選定、並びに絞り込みの基礎的情報として活用される。

III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

5. 放射性廃棄物ナショナルインベントリ構築調査

◇事業の概要

放射性廃棄物ナショナルインベントリ（以下ナショナルインベントリ）とは、国家全体の放射性廃棄物の位置、量、特性（物理化学的性状、放射性核種種類・量等）などについて網羅的に取りまとめた目録を言う。フランスをはじめとする諸外国においては、このような国全体の放射性廃棄物の管理情報を持続的に整備することによって、放射性廃棄物の現状の把握や放射性廃棄物管理の課題（貯蔵容量のひっ迫、処分場の必要性、処分方策の定まっていない廃棄物の有無等）を抽出し、効率的に対策を行うことを可能としている。



図-1 フランスのナショナルインベントリ報告書
(http://www.andra.fr/index.php?id=edition_1_1_1&recherche_thematique=6)

現在、我が国では、全体の放射性廃棄物の位置、量、特性などについて網羅的に取りまとめた目録は存在せず、規制機関、放射性廃棄物発生者にこれら目録の管理が委ねられている。同時に、原子力委員会における放射性廃棄物対策の審議や IAEA 放射性廃棄物等安全条約において義務付けられている国別報告書において取りまとめられてはいるものの、その都度、廃棄物発生者から報告を受けて取りまとめが行われている。

このような背景を踏まえ、諸外国において先行して取りまとめられているナショナルインベントリ整備の状況を把握するとともに、今後の我が国のナショナルインベントリ整備のための参考資料とすることを目的として調査を実施した。

調査においては、フランスの放射性廃棄物処分実施主体である放射性廃棄物管理機関（ANDRA）へ同国のナショナルインベントリ整備に関する情報を取りまとめを依頼した。併せて、公開情報をも

とに、フランス、米国、スペイン、スイス及び英国のナショナルインベントリに関する情報の整理を行った。

また、日本における放射性廃棄物の情報管理及び法整備の現状を整理し、我が国において全体的な放射性廃棄物ナショナルインベントリ整備を導入する場合の検討に資する提言を行った。

◇平成 25 年度の成果

(1) 主要国のナショナルインベントリに関する調査

本研究では、公開情報に基づき、フランス、米国、スペイン、スイス及び英国を対象として、ナショナルインベントリに関する情報を収集・整理した（表-1 参照）。情報収集対象は各国において公開されている報告書とした。

表-1 各国の放射性廃棄物ナショナルインベントリ概要

国	作成主体（役割）	主な目的	対象	法規定	定期整備
フランス	ANDRA (処分実施主体)	政策材料 公衆への 情報提供	国内全 ての放 射性廃 棄物	有	3 年ごと に報告書
米国（目的別に複数存在）	DOE (推進官庁) NRC (規制機関)	政策材料 情報整備 規制要件 順守の確 認	同上	有	随時デー タベース に登録
スイス	NAGRA (処分実施 主体)	処分場設 計の参考 資料	同上	有	定期的に 作成
スペイン	ENRESA (処分実施 主体)	政策材料	同上	有	不明
英国	DECC (推進官庁) NDA (処分実施 主体)	政策材料 公衆への 情報提供	同上	有	3 年ごと に報告書

また、以下のようなフランスのナショナルインベントリ整備の情報について詳細に取りまとめた。

- 今日までのナショナルインベントリ作成の背景
- ナショナルインベントリ作成の原則

- データ収集及び管理方法
- 利用状況（ダウンロード回数等）

(2) 我が国の放射性廃棄物情報管理に関する調査
及び提言

海外のナショナルインベントリ整備状況との比較を行うため、我が国で整備されている放射性廃棄物管理の現状整理を行った。具体的には、下記の目録に関する根拠法令等の関連情報を収集・整理した。

① 安全規制が課せられる核燃料物質の種類と数量に関する目録

文部科学省が作成。国内の研究機関に存在する放射性元素に関するデータを集計。核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律 第67条第1項により規定。

② 放射性廃棄物廃棄体情報整備システム

独立行政法人日本原子力研究開発機構（JAEA）が作成。JAEA 所有の施設における放射性廃棄物を対象に整備中。定期整備無し。

③ 原子力施設における放射性廃棄物の管理状況及び放射線業務従事者の線量管理状況について

旧原子力安全・保安院が作成。国内の放射性廃棄物の量及び所在地等が掲載。定期整備。

④ 放射性廃棄物等安全条約に基づく国別報告書中の目録

日本政府が作成。「使用済燃料管理及び放射性廃棄物管理の安全に関する条約」に基づき作成し、国際原子力機関（IAEA）に提出する国別報告書に含まれる放射性廃棄物の目録。

上述した調査結果を考慮し、放射性廃棄物ナショナルインベントリ構築の環境整備と活用の観点から下記の提言を行った。

◆ 放射性廃棄物ナショナルインベントリ構築の環境整備

現在、我が国において各種の放射性廃棄物目録が取りまとめられているが、定期的に整備され網羅性を有した目録は整備されていない。また、そのための法整備も行われていない。こ

のことから「放射性廃棄物ナショナルインベントリ」を我が国で整備するためには、まず、法制度の整備より始める必要があると考えられる。

◆ 放射性廃棄物ナショナルインベントリの活用

フランスでは、ナショナルインベントリが放射性廃棄物政策に対する国民解を得るために資料として活用されている。同様に、我が国においても、構築したナショナルインベントリを公衆へ放射性廃棄物の情報を伝えるための媒体として利用することが可能であると考えられる。

6. セメント系材料への熱影響評価に関する検討

◇事業の概要

セメント系材料は、廃棄物の安定固化、コンクリート容器、容器内および容器間の充填材など、放射性廃棄物の処理および処分に幅広く利用されており、今後事業化される地層処分においても、セメント系材料の利用が考えられている。

セメント系材料には、その処分概念によって、核種の収着、アルカリ維持による核種の溶解の抑制、止水性、低拡散性等の機能が期待されている。また、セメント系材料を地中に埋設した場合には、含まれるアルカリ成分やカルシウムの溶脱により、処分場内の他の材料および周辺の岩盤等のバリア性能に影響を及ぼす。

そのため、セメント系材料を使用した処分施設の性能を評価するためには、セメント系材料の化学的、物理的性質の処分後長期にわたる変化を予測することが必要であり、これまでにも多くの研究が行われてきた。

近年、このような長期挙動の評価結果の妥当性の検証を目的として実施した、長期（打設後 50 年～75 年）材令コンクリートの分析結果から、硬化成分であるケイ酸カルシウム水和物（C-S-H）の Ca/Si モル比の低下およびトバモライトへの結晶化が観察され、とくに、100°C 以下であっても熱影響を受けた場合にこれらが顕著であることが明らかになった。

従来、セメント系材料の熱変質については、Taylor らの研究結果をもとに、処分場内の温度を制限すること（たとえば TRU 廃棄物の地層処分では 80°C 以下）で回避できるものと考えられていたが、上記結果は、比較的低温であっても、C-S-H の結晶化等が起こる可能性があることを示している。

そこで、本検討では、熱影響が発現する温度を特定する方法（従来は一定期間加熱後に急冷し、結晶層を X 線回折（XRD）等で同定する方法がとられていた）として、示差走査熱量計（DSC）を用いた結晶化温度測定、および定温度での結晶成長速度の測定の二つの方法について検討した。また、C-S-H の結晶化によるセメント系材料の化学的、物理的性質への影響を調査した。

◇平成 25 年度の成果

C-S-H の結晶化は、非晶質から結晶質のトバモライトへの構造変化であると考え、検出精度の高い DSC を用いて結晶化温度の検出を試みたが、短周期構造（数 Å 程度）に加え、長周期構造（数 10 Å ～結晶サイズ程度）も似通っているため、C-S-H からトバモライトへの変化によって生じるエネルギー差が非常に小さく、その検出は困難であった。

結晶成長速度の測定による変質温度推定では、Ca 源と Si 源とをトバモライトと同じ組成（Ca/Si モル比 = 0.8）となるように液相／固相の重量比 = 30 とした水中で 80°C および 50°C で保持した後に XRD を測定し、トバモライトに相当する回折ピークの半値幅から、Scherrer の式を用いて結晶子径を算出し、保持時間との関係を整理した。

50°C ではトバモライトに結晶化した際に観察される回折線の分離等がみられず、結晶子径の変化を検出できなかったが、80°C では図に示すとおり、80°C での保持時間（養生日数）が長くなるにつれて、結晶子径の拡大が認められた。この結果から、この方法で各温度での結晶化速度を算出することによって、セメント系材料の熱変質温度を推定できる可能性が示された。

今後、熱変質温度推定のための各温度での同様の結晶化速度取得のほか、Ca/Si モル比の違いによる結晶化温度の変化や、セメント系材料中の C-S-H の結晶化の促進要因であるアルミニウムの固溶の影響についても検討が必要である。

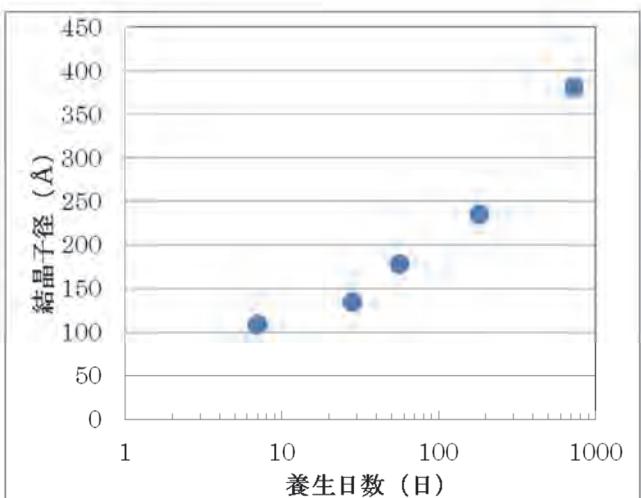


図 C-S-H の結晶化によるトバモライトの
結晶子径の変化（80°C Ca/Si = 0.8）

(This page(p66) is intentionally kept blank.)

III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

7. 食品の調理・加工による放射性核種除去率データの整備

◇事業の概要

当センターではチェルノブイリ原子力発電所事故後に、環境パラメータ・シリーズ第4巻として、当時の国内外のデータをまとめ、「食品の調理・加工による放射性核種の除去率」を刊行した。この中で、食品に含まれる放射性核種が調理・加工により除去され、全量が体内に取り込まれることはないことを広く紹介し、ホームページにおいて、このデータ集を公開していた。

しかし、このデータ集は主に海外のデータに基づいており、日本ではなじみが少ない食品を取り上げられている一方で、日本人が通常に食する食品が含まれていない等、いくつか改善する必要があった。本研究は、このような点を考慮して、福島第一原子力発電所事故後、様々な機関で取得されている調理や加工による放射性セシウムの除去率等のデータを収集・整理して、広く国民が最新のデータとして活用できるように整備することを目的として、平成24年度及び平成25年度の2カ年で実施した。

検討にあたっては、国内の関係機関の研究者で構成される「食品の調理・加工による放射性核種除去率データの整備検討委員会」(内田滋夫主査)において、データ収集を行うとともに、収集したデータの評価等を行った。

このように収集整理したデータは、原環センター技術報告書として取りまとめ、刊行すると共に、電子ファイルをホームページで公開した。

(報告書)RWMC-TRJ-13001-1 食品の調理・加工による放射性核種の除去率－我が国の放射性セシウムの除去率データを中心－【概要】
RWMC-TRJ-13001-2 食品の調理・加工による放射性核種の除去率－我が国の放射性セシウムの除去率データを中心－

◇平成25年度の成果

1. 放射性核種の除去率と移行率について

図-1のように放射性核種を含む材料から調理・加工によってできる食品(材料自体を食べる)については、調理・加工による放射性核種の除去率を定義した。このような除去率を求めることができる調理・加工としては、水洗い、皮むき等に

よる非可食部切除、ゆでる(ただし、ゆで汁は廃棄)、蒸す、焼く、揚げる、精米、小麦製粉・大麦精麦、納豆・豆腐加工等にあてはめることができる。

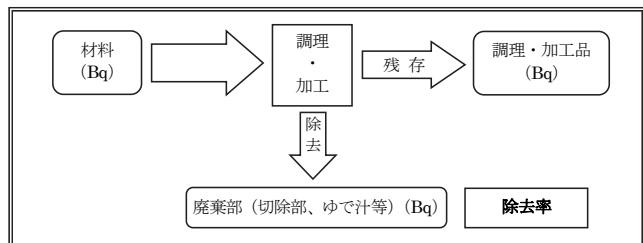


図-1 調理・加工による放射性核種の材料からの除去率

$$\text{除去率}(\%) = \left[1 - \frac{\text{調理・加工後の食品(調理・加工品)中の放射能総量 (Bq)}}{\text{材料中の放射能総量 (Bq)}} \right] \times 100$$

一方、図-2のように放射性核種を含む材料の調理・加工によってできる食品で、材料自体は食べない場合もある。例えば、米と清酒、ブドウとワイン、ウメと梅酒、緑茶葉と緑茶(浸出液)、ナタネとナタネ油がこのような食品にあてはまる。このような食品については、上記のような定義の除去率で調理・加工の効果を評価するのではなく、下式のような材料中の放射能総量と調理・加工品中の放射能総量を百分率で示した移行率で評価した。

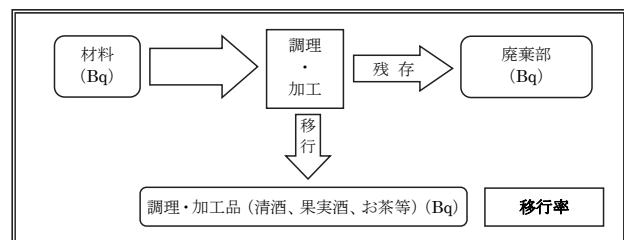


図-2 調理・加工による放射性核種の材料からの移行率

$$\text{移行率}(\%) = \left[1 - \frac{\text{調理・加工品中の放射能総量 (Bq)}}{\text{材料中の放射能総量 (Bq)}} \right] \times 100$$

しかし、多くの人の関心は、調理・加工後の食品にはどの程度の放射性セシウムが含まれているのか、すなわち、どの程度の放射性セシウムが原材料から除去されたのか、ということである。したがって、米と清酒、ブドウとワイン、ウメと梅酒等については、下式で定義する除去率で調

理・加工の効果を示すこととした。

$$\text{除去率 (\%)} = 100 - \text{移行率 (\%)}$$

2. 汚染の経路と除去率

食品の調理・加工による除去率は、食品の汚染の主な経路（図-3）により、その程度が異なることが考えられる。例えば、食品の表面が汚染をした場合には（表面汚染）、表面を水洗いすることで食品中の濃度を低減することができる。しかし、放射性核種が根を通じて土壌から農作物へ吸収されたり（経根吸収）、餌や飲用水を通じて放射性核種が家畜などの内部に取り込まれたりした場合には、放射性核種は食品の表面ではなく内部に分布している（内部汚染）。この場合には、表面を水洗いしたり、取り除いたりしても表面汚染の場合ほどの効果は無く、除去率は低いと考えられる。

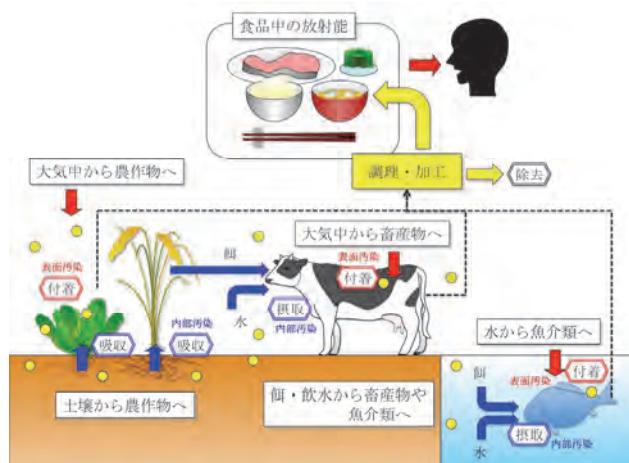


図-3 放射性核種の食品への移行経路

表面汚染は、環境中に放射性核種が放出された直後から放出がなくなるまでの間に観察されるため、調理・加工による除去が有効となるのは比較的短期間の間だけである。一方、放出がなくなり、長半減期核種などが環境中に残存した場合、上述したように、陸上植物では経根吸収により土壌中の放射性核種を植物体内に取り込み、また、畜水産物については、それらの餌となる生物（陸上では植物等、海水中ではプランクトンや小魚等）や水が放射性核種を含む場合には、体内に取り込まれる。この経路では汚染が長期間続くことになる。本研究では、事故後から長期にわたって有用であると考えられる内部に取り込まれた放射性核種の除去に関するデータを主に整備を行った。

3. 内部汚染：放射性セシウムの除去率

(1) 穀類・豆類

図-4に示すように玄米や玄麦中の放射性セシウムのほとんどは、穀粒の外側に分布するぬかやふすまに含まれており、これらの部分は精白米や小麦粉に加工する過程で取り除かれる。

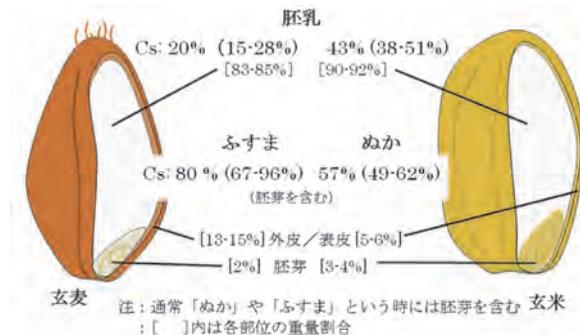


図-4 玄麦及び玄米の構造と放射性セシウムの分布割合

図-5に精米歩合（精米後の重量を玄米の重量で割った値の百分率）と精白米中に残る放射性セシウムの残存割合の関係を示した。精米歩合が減少するにつれて、精白米中に残存する放射性セシウムの割合は減少する。これは米の胚乳よりもぬかに放射性セシウムが多く存在するためである。精米歩合が90-100%の範囲で、精米歩合が下がれば、残存割合が急に減少（除去率は増加）する理由は、精米過程の初期に多くのぬかが除去されるためである。したがって、ぬかがほとんど除去された精白米（通常は精米歩合90-92%）からさらに米を磨いても、放射性セシウムは効率的に除去されない。

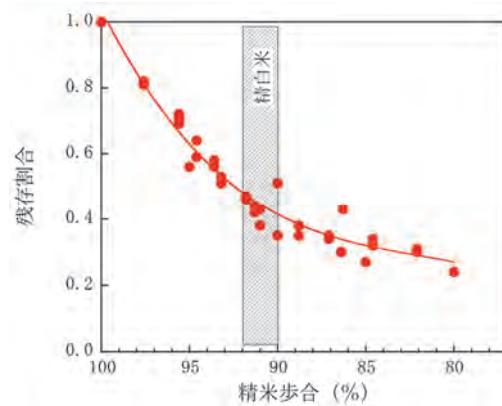


図-5 精米歩合と精白米中に残存する放射性セシウムの割合

小麦については、玄麦を製粉することにより放射性セシウムが72–85%（平均除去率80%）除去された。米の場合と同様に、小麦では外皮であるふすまに放射性セシウムが分布しているためである。製粉した小麦粉から中華麺やうどんを作り、これらをゆでることによる除去率は54–85%であった。したがって、玄麦から製粉し、麺を作り、ゆでるまでの一連の調理・加工の過程で、玄麦に含まれる放射性セシウムの90%以上が除去されることになる。

(2)野菜・果実・種実

図-6にリンゴの構造と放射性セシウムの分布割合を示す。果肉部に75%が分布している。

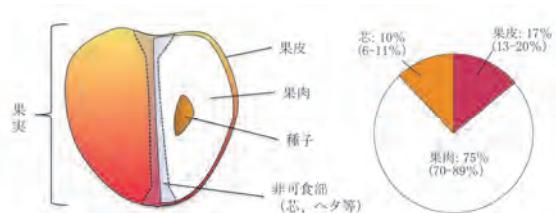


図-6 リンゴの構造と放射性セシウムの分布割合
(カッコ内は分布割合の範囲)

ウメ、モモ、リンゴについては、様々な調理・加工の除去率データが追加された。イチジク、カキ、ビワ、ブルーベリー等の果実についても水洗い、皮むき等のデータが得られた。水洗いによる効果は、内部汚染であるため、ほとんどの果実で0%であった。皮むきによる除去率は、果皮の方が果肉よりも濃度が高い（果肉に対する果皮の濃度は2倍程度）が、果皮／果肉の重量比が小さいリンゴでは17%程度であり、果皮／果肉の重量比がそれより大きいブドウでは約50%であった。果実をシロップ漬け後、加熱することで、一部の放射性セシウムは果実からシロップへ移行するが、果実とともにシロップを利用する場合には、除去効果はなくなる。また、ウメを塩漬けすることで34–43%を除去された。一方、干し柿などドライフルーツの水分を抜くだけの加工では、放射性セシウムは除去されない。

オイルシードであるナタネやエゴマについては、ナタネ油やエゴマ油への放射性セシウムの移行はほとんど無かった。

(3)きのこ類

きのこ類についてもデータが追加された。水戻しにより51–54%、また、ゆでることにより26–45%が除去された。しかし、干しこいたけの水戻しで、水戻しした液をダシとして利用すれば、全体としては除去されないことになる。

(4)飲料等

果実酒、清酒、お茶、搾汁（ジュース）では、一般的に加工後の材料自体を食することはないので、調理・加工品への放射性セシウムの移行率や分布割合から除去率を算出した。

果実酒については、除去率は果実からの放射性セシウムの溶出の程度（移行率）に依存する。すなわち果実に多く残ればそれだけ果実酒への移行は少なくなり、除去率は大きくなる。梅酒へは、放射性セシウムの57–100%が移行するので、除去率は0–43%となった。

清酒については、玄米中の放射性セシウムの大半は精米過程でぬかとして除去されるため、精米歩合70%での除去率が94%であった。

ワインについては、ロゼワインでは38–49%、赤ワインでは21–22%の放射性セシウムが除去された。ロゼワインより赤ワインの除去率が低くなっているのは、赤ワインでは果皮からの抽出がロゼワインよりも多いことが影響している。なお、果粒が小さい醸造用品種を用いた場合には果皮の割合が高くなることから、白ワインでは除去率が高くなると期待される。

緑茶については、緑茶（浸出液）に50–70%が移行するので、除去率は30–50%となった。



図-7 緑茶を浸出時の茶葉からの移行率

麦茶については、麦茶（浸出液）への移行率は、浸出時間とともに、15%から38%へと徐々に上昇する（除去率としては、85%から62%へ下降する。）。

(5) 肉類(牛肉・魚)

肉に関する除去率は、おおむねこれまで海外で報告されているデータの範囲内であった。すなわち、肉をゆでることにより(しゃぶしゃぶのように薄切り肉をゆでた場合)55–69%の除去率が得られた。また肉を煮ることで高い除去率(81–89%)が得られた。しかし、ゆでたり、煮たりする等の調理後、ゆで汁や煮汁も使う場合の除去率は0%になる。なお、焼くよりも、ゆでたり煮たりした方が除去率は高い。

肉を調味液に浸漬した場合には、17–78%の除去率が得られた。調味液への浸漬時間が長い方が除去率は高い。図-8は、調味液A(10%食塩水)と調味液B(醤油と水を1対1の割合で混ぜた液)に浸漬した時の除去率を示している。いずれの調味液においても、浸漬時間が1日程度であれば、除去率は20%程度であるが、1週間では55–75%となつた。

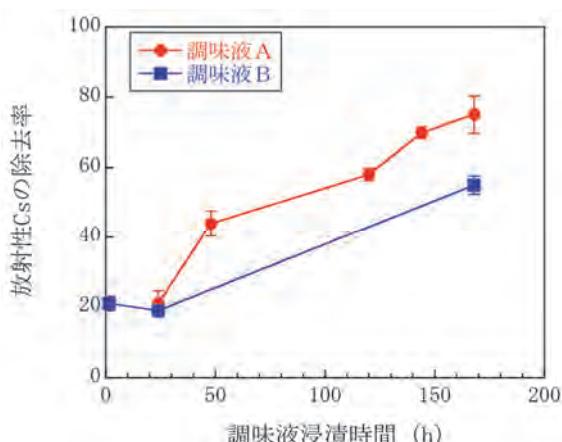


図-8 牛肉を調味液に浸漬した時間と放射性セシウムの除去率

(6) 乳製品

国内のデータがないため、 Chernobyl 原発事故後に採取されたもので、IAEA TecDoc1616¹⁾に記載の数値をまとめた。クリームやバターの分布割合が低いことからもわかるように、放射性セシウムは油脂部分にはあまり移行しない。図-9には、IAEA TecDoc1616に示された数値を入れて作成した各製品への分布割合を示す。

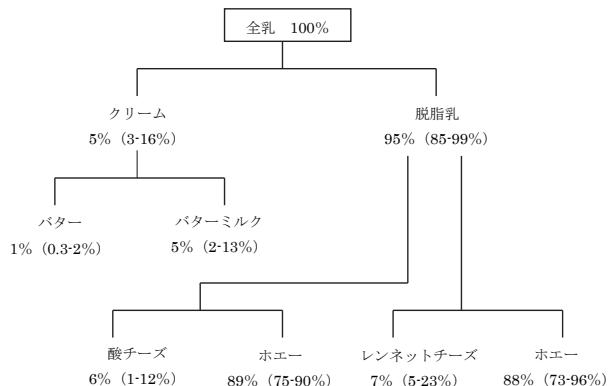


図-9 乳製品の放射性セシウムの分布割合
(カッコ内は分布割合の範囲)

4. カリウムの除去率

放射性セシウムのデータがない場合には、食品に含まれるカリウムの除去率を目安として利用することができる。例えば、玄米を精米し、炊飯した場合の除去率は、放射性セシウムで66–72%、カリウムで75%であり、ほぼ同様の値となる。

- 1) IAEA (2009). "Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments", Technical document No. 1616 (TECDOC-1616), IAEA, Vienna

III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

8. 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25年度版）」を作成した。

(2) 事故廃棄物の処理技術に関する技術調査

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以下の検討を実施した。

- ・ 福島第一原子力発電所構内の廃棄物の処理処分に適用出来る可能性のある技術に関する調査を行った。
- ・ 日本原子力学会特別専門委員会において、今後の情報の共有化を念頭に福島第一原子力発電所構内で発生している廃棄物の情報を取りまとめた。また、研究開発課題を効率的・効果的に解決するために考慮すべき事項を検討し、それを反映した研究開発計画案を示した。

(3) 下水汚泥焼却灰等の放射性物質対策に関する

調査検討

福島第一原子力発電所事故に由来する放射性物質の影響を受けた下水汚泥焼却灰等について、処分の具体化に必要なデータの整備並びに安全性評価検討を行った。

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

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整備事業

◇事業の概要

高レベル放射性廃棄物等の処分地選定に向けた最初の調査段階である文献調査を行う地区について、実施主体である原子力発電環境整備機構（以下、原環機構という）が全国の市町村を対象に公募を行っている。平成40年代後半を目途とする処分開始というスケジュールを踏まえると、早期に文献調査の応募を得て、これを着実に進める必要がある。

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。

このような背景のもと原環センターでは、国民全般の高レベル放射性廃棄物地層処分への理解を深めることを目的に、実規模・実物を基本として（実際の放射性廃棄物は使用しない）、地層処分概念とその工学的な実現性や挙動を実感・体感・理解できる地上設備と深地層研究施設等における地下設備の整備を平成20年度より原子力機構と「地層処分実規模設備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、共同で研究を進めている。

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構という）の第2次取りまとめ¹⁾や、原環機構の公募資料等に示された、我が国の高レベル放射性廃棄物地層処分の概念（多重バリアシステム）、人工バリア材料や処分場の操業に関わる工学的技術等について、実規模・実物を基本とした設備（実際の放射性廃棄物は使用しない）を整備することにより、地層処分概念と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

きる設備を設置する。地上と地下における実規模設備を整備し、これらの設備を用いて工学技術を実証し、その状況を実際に見て体感できるようにする。

人工バリアシステムやその材料については実材料に基づく実規模相当品を提示する。工学技術の実現性として、操業技術、回収技術等を対象とし活用することによりその状況と成果を提示する。

なお、本件は、「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」に該当するもので、実施にあたっては、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25年度は、平成24年度に引き続き、以下の項目を実施した。

1. 地上での設備の整備

(1) 緩衝材定置試験（実証試験）

(2) 施設運営・維持管理（緩衝材可視化試験含む）

2. 地下での設備整備

3. 地層処分へのさらなる理解促進の方策の検討

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。

（報告書）平成25年度 原子力発電施設広聴・広報等事業
地層処分実規模設備整備事業報告書

◇平成25年度の成果

1. 工学技術試験設備の整備

(1) 緩衝材定置試験

1) 試験概要

実物の緩衝材ブロックを用いた緩衝材定置試験（緩衝材ブロック7段定置）を9月2日（月）から6日（金）に行った。また、緩衝材定置（実証）試験をより多くの来館者に見て頂き、同時に来館者に本施設に対する理解を深めてもらうことを目的に、模擬緩衝材ブロック用いた試験を北海道経済産業局が主催した「おもしろ科学館 2013 in ほろのべ」の開催日に併せ、9月7日（土）及び8日（日）に実施した。

2) 実緩衝材ブロック試験内容

実物の緩衝材ブロック用いて実施した試験項目を以下に示す。

① 緩衝材位置決め試験（把持前）

把持前に緩衝材台車上に円形に並べた緩衝材の位置決め方法及び位置決め精度（外観寸法（直径）及び隙間寸法）を確認した。なお、寸法は定置機構実証試験（把持後）の結果と対比するために測定した。

② 緩衝材台車走行実証試験

緩衝材を搭載した緩衝材台車が走行することにより発生すると考えられる衝撃や振動が緩衝材に与える影響を確認した。

③ 把持機構実証試験

緩衝材を8個または、9個を同時に把持する性能を確認した。また、真空把持装置を下降させ把持した緩衝材を模擬処分孔に定置した時の把持装置からの緩衝材切り離し機構の動作確認を確認した。

④ 定置機構実証試験（把持後）

緩衝材を積み重ねた時の定置精度（緩衝材の寸法（直径）及び隙間寸法）を確認した。

3) 試験結果

① 緩衝材位置決め実証試験（把持前）

各回共に試験に支障をきたすような傷等は発生しなかった。

② 緩衝材台車走行実証試験

緩衝材に影響を与えるような衝撃や振動は発生しなかった。また、圧縮空気を供給することにより把持装置からの切り離しがスムーズに行えた。

③ 把持機構実証試験

把持動作中の真空度が設計値の-80kpa以上になっており、把持動作中のテレスコピックの下降速度が計画通りであった。

また振動の発生、緩衝材定置時の有害な衝撃は無かった。

④ 定置機構実証試験（把持後）（図-1）

- 定置位置出し精度：各回共に過年度に実施した模擬緩衝材ブロックと同等の精度に定置出来できた。
- 繰り返し定置精度：有意な段差及び隙間は発生しなかった。

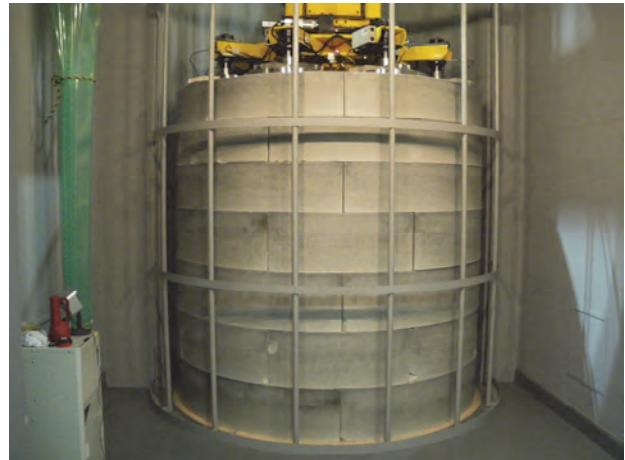


図-1 緩衝材ブロック定置（7段）

4) 模擬緩衝材ブロック試験内容

模擬緩衝材ブロック用いて実施した試験は、1段目から3段目までを予め模擬処分孔に定置した状態で、4段目のみを繰り返し定置した。またこの定置試験を公開した。

試験では、試験毎に運転時間及び吸着時間を測定した。（表-1）

試験は、合計24回実施した（7日（土）12回／8日（日）12回）。なお、2日間の来館者数は、837名であった。（7日：287名／8日：553名）（図-2、3）

表-1 模擬緩衝材定置試験（4段目）
運転記録（2013/9/7）

開始時刻	運転時間（定置）	吸着時間
9:54 AM	288.9 秒	52.1 秒
10:27 AM	289.5 秒	52.5 秒
10:54 AM	290.2 秒	52.8 秒
	模擬緩衝材位置調整	
11:20 AM	289.3 秒	52.3 秒
11:45 AM	288.9 秒	51.7 秒
	模擬緩衝材位置調整	
12:23 PM	289.5 秒	52.0 秒
12:39 PM	288.4 秒	51.2 秒
12:54 PM	288.4 秒	51.1 秒
	模擬緩衝材位置調整	
1:53 PM	289.1 秒	51.8 秒
2:24 PM	288.7 秒	51.5 秒
2:50 PM	288.4 秒	51.3 秒
	模擬緩衝材位置調整	
3:25 PM	289.3 秒	52.0 秒
	模擬緩衝材位置調整	

IV. 放射性廃棄物処分への理解促進



図-2 おもしろ科学館での緩衝材定置試験状況



図-3 おもしろ科学館での緩衝材定置試験状況

2. 設備建屋及び展示物の維持・管理・運営

(1)設備建屋における運営

地層処分実規模試験施設は平成24年度に引き続き一般公開し、常時2名の説明員が来館者への説明や質問に答える体制で対応した。

なお、本施設は、原子力機構幌延深地層研究センター「ゆめ地創館」と連絡通路で結び、一体的な運営を行っている。来館者は「ゆめ地創館」から入館し、深地層研究センターでの試験等成果の展示物を見学した後、本施設にて地層処分で使用される予定のものと同じ仕様の人工バリアや、工学技術に関する試験研究の一端に触れることができる。

(2)広報活動

原環センターウェブサイトでは、施設整備の進捗にあわせて、地層処分実規模試験施設のコンテンツ（図-4）を更新し、施設や展示物の紹介などの各種情報を発信した。また、地層処分実規模試験施設のリーフレット（図-5）を作成し、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、フェリー乗り場、JR駅、高速バス乗り場等に配備し、来館者の増加に向けた取組みを進めた。来館者には、原環センターや経済産業省が作成した各種パンフレット等を配布し、地層処分への理解促進に努めた。



図-4 地層処分実規模試験施設ホームページ
(<http://www.fullscaledemo.rwmc.or.jp/>)

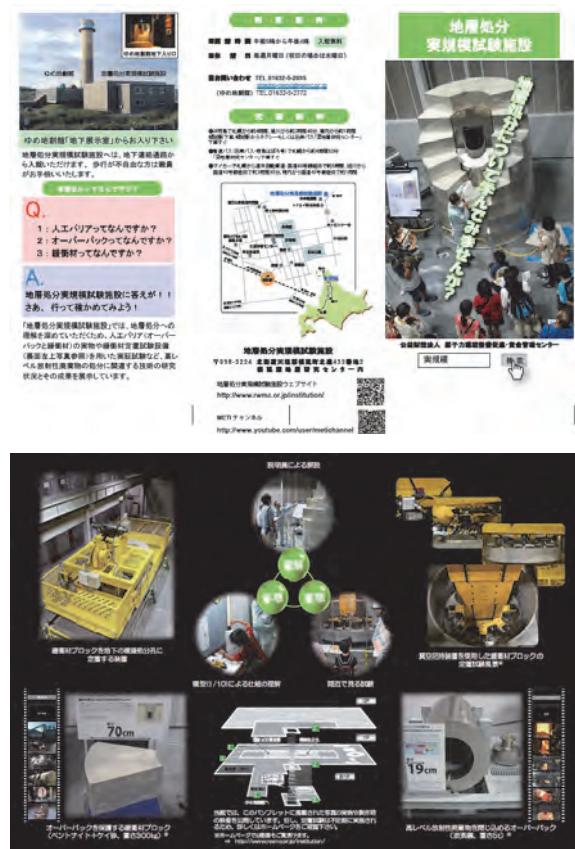


図-5 地層処分実規模試験施設リーフレット
(上段：表面、下段：裏面)

(3) 緩衝材可視化試験

緩衝材の「自己修復性」「自己シール性」の確認のため緩衝材可視化試験装置を利用した緩衝材浸潤試験（以下、浸潤試験）を実施し、緩衝材の隙間閉塞の挙動を確認した。以下に、その概要を示す。

1) 試験方法

昨年度に引き続き緩衝材可視化試験装置（図-6）を使用し、人工的に隙間を設けた供試体に注水を行った。

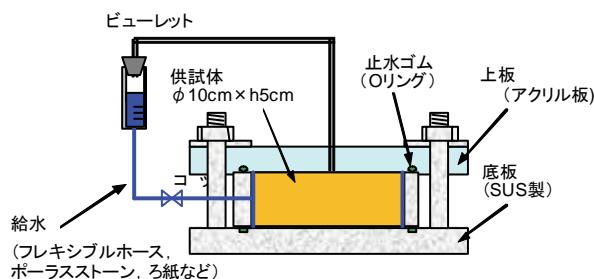


図-6 可視化試験装置の概要

試験は、図-7に示すように「縦方向隙間」と「水平方向隙間」の浸潤試験を実施するために異なる2つの供試体を使用した。各試験の条件を表-3に示す。

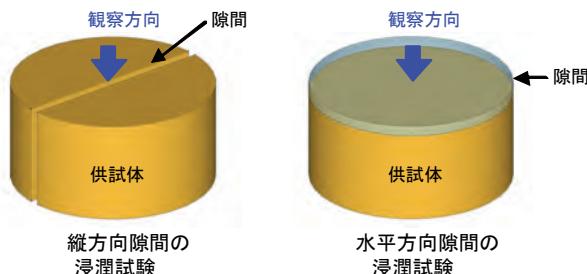


図-7 浸潤試験の概念

表-3 浸潤試験の条件

試験名		乾燥密度 [Mg/m ³]	含水比 (飽和度) [%]	隙間 [mm]
縦方向 隙間の 浸潤試験	試験#12	1.6	13.2 (50)	1
	試験#13	1.8	16.4 (50)	1
	供試体寸法	$\varphi 100\text{mm} \times H50\text{mm}$		
水平方向 隙間の 浸潤試験	水平試験#1	1.6	13.2 (50)	5
	水平試験#2	1.8	16.4 (50)	5
	供試体寸法	$\varphi 100\text{mm} \times H45\text{mm}$		

2) 試験結果

縦方向隙間の浸潤試験状況及び試験結果をそれぞれ図-8、9に示し、以下に得られた知見を示す。

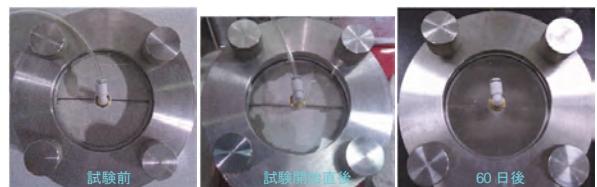


図-8 縦方向隙間の浸潤試験状況（試験#12）

- 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（図-8）。
- 試験開始約60日後には、水の浸潤は供試体全体に及び含水比はほぼ一様になった。含水比は、試験#12で25.2%、試験#13で20.5%となり、いずれも飽和状態となった（図-9）。

IV. 放射性廃棄物処分への理解促進

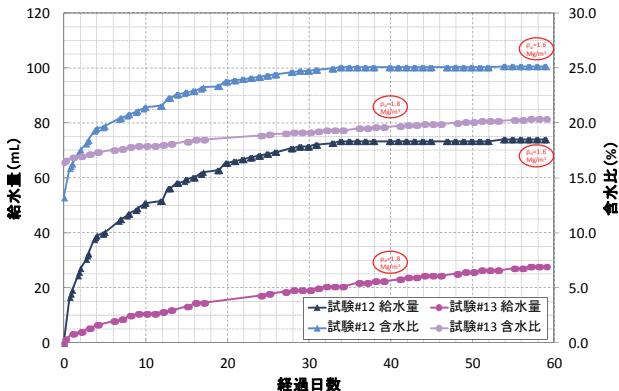


図-9 給水量、含水比の経時変化

次に、水平方向隙間の浸潤試験状況及び試験結果をそれぞれ図-10、11、12に示す。ここで、図-11の含水比分布は、供試体を図のように分割し計測した結果である。また、図-12に示す乾燥密度は、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、試験結果により得られた知見を示す。



図-10 水平方向隙間の浸潤試験状況
(水平試験#1)

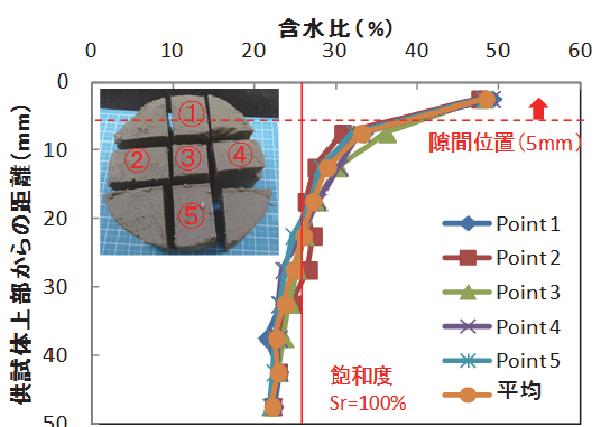


図-11 含水比の深さ方向分布 (水平試験#1)

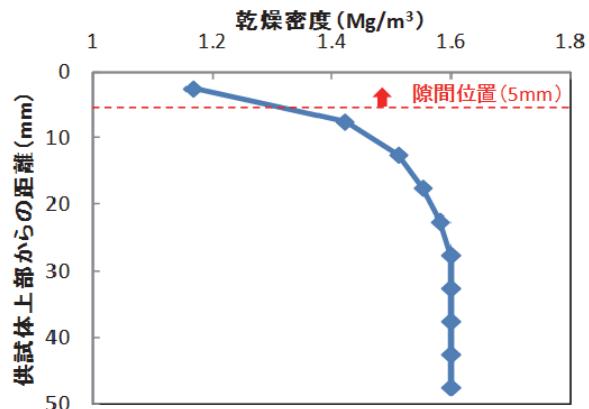


図-12 想定される乾燥密度分布 (水平試験#1)

- ・試験開始後1日で、膨潤した緩衝材で隙間が閉塞されたことを確認した（図-10）。
- ・試験開始約60日後の垂直方向の含水比分布は、上面は飽和していたが下端部は試験開始時と同様であった（図-11）。

3. 地下での設備整備

平成25年度は、原子力機構幌延深地層研究センター地下施設を活用した地下での緩衝材除去試験を想定した実証試験について、必要な試験設備等について試験実施実現性の可否（地下施設内の空間内で設備が設置出来るかどうか等）について検討した。

(1) 緩衝材回収試験の検討

幌延深地層研究センター深度350m調査坑道における試験坑道2を利用し、処分孔堅置き方式を対象とした実規模スケールでの緩衝材除去試験実施に向けた制約条件や留意点などについて検討を行った。

実規模スケールでの緩衝材除去試験に関しては、立坑及び水平坑道の仕様や揚重設備などの制約条件を踏まえた詳細な検討が必要である。第2次取りまとめに準拠した坑道仕様に適することを条件とした場合、深度350m調査坑道及び試験坑道2では、第2次取りまとめの坑道断面より狭隘なため、試験に使用する装置の搬入出だけでなく、装置自体の設置が難しいことがわかった。したがって、地下環境下における実規模の緩衝材除去試験の実施に向けては、装置の設計、あるいは坑道の拡張などを考慮した計画が必要である。

4. さらなる理解促進のための方策検討

①来館者の集客力増加のための方策

- 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」の案内広告を掲載した（図-13）。配布箇所は、稚内空港、フェリー乗り場、高速バス乗り場等稚内市内50箇所。
- 「おもしろ科学館2013 in ほろのべ」の実規模試験施設のラジオCMを製作し、8/31～9/6の期間地元FMラジオ局（FMわっかない）にて、宗谷館内にCMを放送した。
- 旅行雑誌るるぶへ「実規模試験施設」の広告を掲載した。（図-14、15、16）
発行部数は、
 - *るるぶ冬の北海道：道内札幌を中心に30,000部
 - *北海道満喫三ツ星グルメ：道内主要都市レンタカー営業所：70,000部
 - *るるぶ北海道（道北エリア連合：全国で224,000部

②操業技術の理解促進のための方策

- 真空把持機構を簡単に理解できる展示資料として、平成24年度に引き続き1/10人工バリア及び把持装置模型を設置し、来館者に真空把持の仕組みについて体感できるようにしている。（図-17）

③緩衝材の理解促進のための方策

- 緩衝材の膨潤、止水機能を簡単に理解できる緩衝材止水試験を実施し、来館者に緩衝材の膨潤及び止水状況について実際に見てもらえるようにしている。（図-18、19）



図-13 FMわっかない番組表掲載の案内広告



図-14 るるぶ冬の北海道広告掲載

図-15 北海道満喫三ツ星グルメ広告掲載
(るるぶ関連)

図-16 るるぶ北海道（道北エリア連合）広告掲載



図-17 1/10 人工バリア及び把持装置模型



図-18 緩衝材の止水試験の方法

IV. 放射性廃棄物処分への理解促進



図-19 緩衝材止水試験の状況

④幅広い情報発信の方策

- 平成24年度に作成した「実規模試験施設の設置目的、展示物実物の説明をする「プロモーションビデオ」をウェブサイトにて公

開した。また、ゆめ地創館との連絡通路及び実規模試験内で放映中である。

- 平成24年度に引き続き「実規模試験施設」に関する動画を作成し、原環センターウェブサイトに公開した。
 - 「緩衝材搬送・定置試験実施状況動画」
 - 「緩衝材製作工程」
 - 「オーバーパック製作工程」
- なお、この動画は実規模試験施設内でも放映している。

5. 事業の評価

1) 来館者数

平成25年度は5,474人が来館した（表-2）。平成22年4月28日開館以来の延べ来館者数は26,555名となった。

表-2 月別来館者の推移

年月	来館者数			男女別			月計	累計 (H25/4/1~)	2014.3.31現在
	一般	関係者	男	女	子供				
平成25年4月	217	0	123	55	39		217	217	
平成25年5月	447	2	232	151	66		449	666	
平成25年6月	527	3	344	154	32		530	1196	
平成25年7月	632	3	384	210	41		635	1831	
平成25年8月	996	4	506	325	169		1000	2831	
平成25年9月	1272	19	502	360	429		1291	4122	
平成25年10月	559	0	319	148	92		559	4681	
平成25年11月	247	4	175	57	19		251	4932	
平成25年12月	170	0	115	29	26		170	5102	
平成26年1月	66	0	49	13	4		66	5168	
平成26年2月	115	0	98	16	1		115	5283	
平成26年3月	190	1	113	50	28		191	5474	
合計	5438	36	2960	1568	946		—	—	

2) アンケートの実施

ゆめ地創館と協力してアンケートを実施した。(図-20) アンケートの集計結果の一例を図-21に示す。

ゆめ地創館等 ご見学アンケート

本日は、御来館ありがとうございます。深地層の研究等についてのご理解をより深めていただるために、皆様のご意見を反映して行きたいと考えております。つきましては、以下のアンケートへのご協力をお願いします。

アンケートは集計後に廃棄させていただきます。
集計結果につきましては、上記目的のため、外部に発表させていただくことがあります。

【該当する箇所に○をお願いします。】

1 あなたの性別、年代、お住いをお答えください。

性別：・男 性 ・女 性
年 齢：・10代以下 ・20代 ・30代 ・40代 ・50代 ・60代以上
お住い：・幌延町 ・北海道内 ・北海道外

2 ゆめ地創館、地層処分実験施設、地下施設の見学にあたり、お知りになりたかったことをア～クからお選びいただき（複数回答可）、見学後の感想をお答えください。

* 「ア～ク」からお選びください。（複数回答可）

ア 幌延深地層研究センターで行っている調査・研究内容について	1 2 3 4
イ 高レベル放射性廃棄物の地層処分について	1 2 3 4
ウ 核燃料サイクルについて	1 2 3 4
エ 実物大の人工バリアについて	1 2 3 4
オ 実物大の人工バリアを使った試験について	1 2 3 4
カ 深地層の環境について	1 2 3 4
キ 地下施設の現場での研究状況について	1 2 3 4
その他	1 2 3 4

3 その他、要望事項等ありましたら教えてください。

ご協力ありがとうございました。

図-20 アンケート用紙

3) 来館者の感想

来館者の主だった感想を以下に示す。

- 人工バリアについて個人的に説明をして頂いたので理解することが出来ました。展示している物を見学するだけでは理解するのが難しいかもしれません。(多数あり)
- 絶対安全ということは勿論いえますが、現実に処分する必要な廃棄物があり、現状の保管状況と比べると地層処分は相当安全性が高いことは明白ではないかと思います。地下に処分場を設けることを反対する国民は少ないでしょう。どこかが受け入れることが必要なことはどうして理解されないのか。一部の声が大きすぎる。
- 百聞は一見にしかずでメディアに取材で取り上げられているよりも、良く理解が深まった。
- 将来的には処分施設は必要であるので、これだけ安全性などを確保しているのでは非処分が出来たらいいなと思いました。
- 現在ある廃棄物の処分は国内でしなくてはならないでしょうが、こんな大変な処理をしなくてはならない廃棄物を出さない方法、原発を使用しない方が良いと思いました。

- 1) 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11年11月

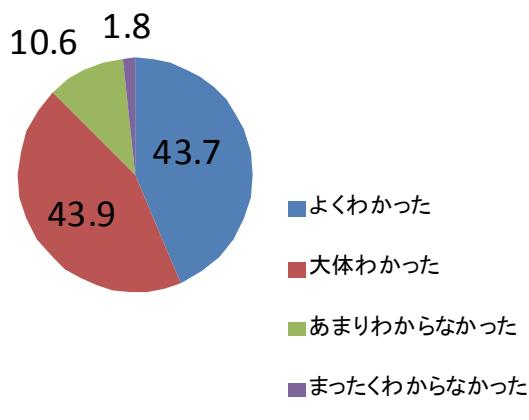


図-21 アンケートの集計結果（一例）

(実物大の人工バリアについて)

V. 國際交流

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、国際原子力機関（IAEA）、経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）、欧州原子力共同体（EURATOM）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 25 年度には、NAGRA、SKB/SKBI、ANDRA 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) 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)への参画

原環センターは、平成 21 年度より EURATOM のモニタリングに関する国際共同研究 MoDeRn プロジェクトに参画し、モニタリングに関する広範な検討と情報収集を実施している。平成 25 年度は、同プロジェクトの取りまとめを実施し、モニタリング戦略に関する報告書を始めとした複数の報告書を公開した。

MoDeRn プロジェクトの成果を受けたモニタリングに関する共同研究が、IGD-TP (Implementing Geological Disposal of Radioactive waste Technology Platform : 放射性廃棄物の地層処分の実施に向けた技術プラットフォーム)において平成 27 年より実施される計画であり、原環センターも引き続き参画する予定である。

(3) EURATOM の炭素のソースタームに関する国際共同研究 CAST (Carbon-14 Source Term)への参画

原環センターは、廃棄物からの C-14 の放出挙動を取り扱う IGD-TP の国際共同研究である、CAST プロジェクト (2013 年度～2017 年度) に参画し、燃料被覆管（ジルカロイ）及びステンレス鋼からの C-14 の放出挙動に関するこれまでの成果を提供するとともに、各参加国のもつこれまでの成果に関する情報を収集した。また、今後の共同研究計画の策定に協力した。

(4) ANDRA との地中無線モニタリング技術に関する共同研究

原環センターは、地層処分に関する中核的なモニタリング技術である地中無線モニタリング技術について、平成 22 年度よりフランス放射性廃棄物管理機関 (ANDRA) と共同研究を実施し、効率的な機器開発と ANDRA のムーズ・オートマルヌ地下研究所（ビュール地下研究所）での実証を行なっている。平成 25 年度はムーズ・オートマルヌ地下研究所における緩衝材の膨潤挙動の継続的モニタリング等を実施した。

(This page(p82) 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「地層処分場のモニタリングに関する国際共同研究 MoDeRn プロジェクトの活動について」 江藤 次郎（処分工学調査研究プロジェクト） 鈴木 圭（処分工学調査研究プロジェクト）	平成25年5月31日	原環センター
	第2回講演会「地下空洞型処分施設の地震応答解析について－地震時の挙動の解析的検討－」 山田 淳夫（L1チーム）	平成25年9月27日	原環センター
	第3回講演会「The SITE - Japan Specific -」（監督 稲垣 美穂子 氏）上映	平成26年1月17日	原環センター
	第4回講演会「地層処分の知識マネジメントに関する考察」 田辺 博三（技術参事）	平成26年3月25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 放射線・廃棄物安全研究所 所長）	平成25年5月21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25年10月17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25年11月14日	東海大学高輪 キャンパス
研究発表会	平成25年度原環センター研究発表会 1. 研究発表 「原環センターの地層処分基盤研究の概要」 浦上 学（常務理事） 「欧米主要国での放射性廃棄物処分事業の動向」 稻垣 裕亮（技術情報調査プロジェクト） 「地層処分の可逆性と回収可能性をめぐる論点」 田辺 博三（技術参事） 2. 特別講演 「今後の原子力利用とバックエンド・放射性廃棄物への取組み」 山名 元 氏（京都大学原子炉実験所 教授）	平成25年12月6日	KDDI 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	Mechanical properties of deteriorated hardened cement paste	大和田仁	International Conference on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures (CONCREEP-9) September 22-25, 2013
2	放射性廃棄物の地下空洞型処分施設に用いる区画内充てん材の施工品質の評価	寺田賢二、秋山吉弘、矢田勤	土木学会 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造) Vol.70 (2014) No.1
3	放射性廃棄物の地下空洞型処分施設に用いるセメント系低拡散層の施工とその品質評価	寺田賢二、秋山吉弘、矢田勤	土木学会 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造) Vol.70 (2014) No.1
4	Plan for Demonstration Test of Closure Technology for Cavern-Type Disposal Facility	山田淳夫、秋山吉弘	Waste Management 2014 Conference Final Proceedings, March 2-6, 2014, Phoenix, Arizona, USA
5	Deteriorated hardened cement paste structure analyzed by XPS and ^{29}Si NMR techniques	大和田仁	Cement and Concrete Research Vol.52, 2013
6	Estimation of Carbon 14 Inventory in Hull and End-piece Wastes from Japanese Commercial Reprocessing Operation	桜木智史、田辺博三	Proceedings of the ASME 2013 15th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management(ICEM2013), September 8-13, 2013, Brussels, Belgium

注) 平成 25 年度に投稿し、平成 26 年 8 月までに刊行されたものも記載

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	The International Philippines Natural Analogue Project (IPNAP) - NA studies for bentonite reaction under hyperalkaline conditions	藤井直樹	第13回 NAWG(Natural Analogue Working Group) ワークショップ、2013/5/12～16
2	地下空洞型処分施設における地震時影響の解析的検討	山田淳夫	土木学会調査研究部門 岩盤力学委員会 大深度地下構造物の耐震性評価に関する研究小委員会、2013/8/9
3	Natural analogue study on long term alteration of bentonite(1)	石井智子、江藤次郎	Goldschmidt 2013, 2013/8/25～30
4	Natural analogue study on long term alteration of bentonite(2)	石井智子、江藤次郎	Goldschmidt 2013, 2013/8/25～30
5	In-situ PSI measurement of analcime growth under hyperalkaline alteration condition	石井智子、大和田仁	Goldschmidt 2013, 2013/8/25～30
6	XAFS analysis of C-S-H formed by cement-bentonite interaction	石井智子、林大介、藤井直樹、大和田仁	Goldschmidt 2013, 2013/8/25～30
7	地中無線モニタリング技術の開発（1）無線送信装置へのセンサ接続及び無線中継システムの開発	江藤次郎、田辺博三、鈴木圭	日本原子力学会 2013年秋の大会、2013/9/3～5
8	地中無線モニタリング技術の開発（2）長距離送信の実現可能性調査	田辺博三、鈴木圭、江藤次郎	日本原子力学会 2013年秋の大会、2013/9/3～5
9	緩衝材の再冠水挙動評価（5）EBS 設計・施工仕様設定のための基盤研究	鈴木圭、朝野英一	日本原子力学会 2013年秋の大会、2013/9/3～5
10	緩衝材の再冠水挙動評価（6）比抵抗計測による再冠水時の緩衝材の飽和度分布の推定	鈴木圭、朝野英一	日本原子力学会 2013年秋の大会、2013/9/3～5
11	緩衝材の再冠水挙動評価（7）緩衝材ブロック、ペレットにおけるパイピング・エロージョンの発生条件とエロージョン量の評価	竹内伸光、鈴木圭、朝野英一	日本原子力学会 2013年秋の大会、2013/9/3～5
12	人工バリアの長期挙動の評価（9）成果の概要	石井智子、林大介、江藤次郎、矢萩良二、藤井直樹、大和田仁	日本原子力学会 2013年秋の大会、2013/9/3～5
13	人工バリアの長期挙動の評価（10）セメント系材料の長期変質挙動の確証試験	林大介、大和田仁	日本原子力学会 2013年秋の大会、2013/9/3～5
14	人工バリアの長期挙動の評価（11）人工バリアの性能評価解析	石井智子、藤井直樹	日本原子力学会 2013年秋の大会、2013/9/3～5

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
15	人工バリアの長期挙動の評価（12） 人工バリア変質を考慮した核種移行解析	石井智子、藤井直樹、大和田仁	日本原子力学会 2013年秋の大会、2013/9/3～5
16	放射性廃棄物のC-14の放出移行に関する研究-(14) ハル・エンドピース中のC-14インベントリの評価	桜木智史、田辺博三	日本原子力学会 2013年秋の大会、2013/9/3～5
17	放射性廃棄物からの炭素14の生成と放出に関する国際共同研究CAST(Carbon Source Term)プロジェクトについて	田辺博三、桜木智史、吉田誠司	日本原子力学会 2013年秋の大会、2013/9/3～5
18	トリチウムトレーサー技術による水素化ジルカロイの腐食挙動の解明	桜木智史	日本原子力学会 2013年秋の大会、2013/9/3～5
19	吹付けによる側部緩衝材施工の高度化	寺田賢二、秋山吉弘、矢田勤	土木学会主催 平成25年度 第68回年次学術講演会、2013/9/4～6
20	地下空洞型処分施設における側部緩衝材を対象とした初期性能確認試験	山田淳夫、秋山吉弘	土木学会主催 平成25年度 第68回年次学術講演会、2013/9/4～6
21	地下空洞型処分施設性能確認試験箇所から採取したペントナイト層の吸水特性と水分拡散係数に及ぼす構造異方性及び施工方法の影響	山田淳夫、秋山吉弘	土木学会主催 平成25年度 第68回年次学術講演会、2013/9/4～6
22	地下空洞型処分施設への地震影響についての基本検討	秋山吉弘、山田淳夫	土木学会主催 平成25年度 第68回年次学術講演会、2013/9/4～6
23	TRU処分におけるガス移行挙動評価シナリオ構築手法の研究（その1）	並木和人、大和田仁	土木学会主催 平成25年度 第68回年次学術講演会、2013/9/4～6
24	TRU処分におけるガス移行挙動評価シナリオ構築手法の研究（その2）	並木和人、大和田仁	土木学会主催 平成25年度 第68回年次学術講演会、2013/9/4～6
25	飽和ペントナイトのガス移行試験 －大型供試体を用いた事例－	並木和人、大和田仁	土木学会主催 平成25年度 第68回年次学術講演会、2013/9/4～6
26	TRU廃棄物処分システムにおけるガス移行長期挙動解析手法の高度化	並木和人、大和田仁	土木学会主催 平成25年度 第68回年次学術講演会、2013/9/4～6
27	圧縮ペントナイトのガス移行時における力学影響検討	並木和人、大和田仁	土木学会主催 平成25年度 第68回年次学術講演会、2013/9/4～6
28	長期的化学変質作用を考慮するためのペントナイト緩衝材の力学モデル化	大和田仁	土木学会主催 平成25年度 第68回年次学術講演会、2013/9/4～6

VI. 資料

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
29	Full-scale demonstration of manufacturing and encapsulation of carbon steel over pack	朝野英一	IAEA,RER/9/103-Training in Radioactive Waste Disposal Technologies in Underground Research Facilities, 2013/9/23~27
30	Full-scale demonstration of buffer manufacturing, and emplacement in vertical and horizontal concepts	朝野英一	IAEA,RER/9/103-Training in Radioactive Waste Disposal Technologies in Underground Research Facilities, 2013/9/23~27
31	炭素鋼オーバーパック溶接金属部の選択的な腐食に及ぼす化学成分に関する検討（第2報）	小林正人、朝野英一	腐食防食協会主催 第60回材料と環境討論会、2013/9/24~26
32	Long Term Corrosion of Zircaloy Hull Waste under Geological Disposal Conditions – Corrosion Correlations, Factors Influencing Corrosion, Corrosion Test Data, and a Preliminary Evaluation	田辺博三、桜木智史、宮川英明、大和田仁、高橋陵太	2013 MRS International Symposium “Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXVII”, 2013/9/29~10/3
33	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	2013 MRS International Symposium “Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXVII”, 2013/9/29~10/3
34	C-14 Release Behavior and Chemical Species from Irradiated Hull Waste under Geological Disposal Conditions	田辺博三、桜木智史	2013 MRS International Symposium “Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXVII”, 2013/9/29~10/3
35	Corrosion Tests of Zircaloy 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	2013 MRS International Symposium “Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXVII”, 2013/9/29~10/3
36	Stainless Steel Corrosion Rate under Geological Disposal Conditions	吉田誠司、田辺博三、桜木智史	2013 MRS International Symposium “Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXVII”, 2013/9/29~10/3
37	Development of Advanced Engineering of the Disposal System for HLW Repository	江藤次郎、小林正人、川久保政洋、朝野英一	The 4th East Asia Forum on Radwaste Management (EAFORM), 2013/10/13~16

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
38	Safety assessment scenario development for gas migration in the TRU disposal concept in Japan	並木和人、大和田仁	The 4th East Asia Forum on Radwaste Management (EAFORM), 2013/10/13～16
39	Consideration on treatment and disposal of secondary wastes generated from treatment of contaminated water	星野国義、田辺博三	第2回京都大学原子炉実験所 原子力安全基盤科学的研究シンポジウム、 2013/11/28
40	ステップパルサーを用いたコンクリートのき裂計測	大和田仁、林大介	第21回超音波による非破壊評価シンポジウム、 2014/1/20～21
41	Application of the Shotclay Method in Construction Involving Backfill and Clay Plugs	鈴木圭	International Conference on the Performance of Engineered Barriers; Backfill,Plugs&Seals, 2014/2/6～7
42	BPIガラス固体化の構造再現に用いる原子間ポテンシャルの構造	桜木智史	日本セラミックス協会 2014年年会、 2014/3/17～19

VI. 資料

(3)解説等

No.	題 目	著 者	発 表 先
1	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 2014、2013年10月
2	放射性廃棄物等安全条約の現状	佐原聰	日本原子力産業協会、原子力年鑑 2014、2013年10月
3	フィンランドの高レベル放射性廃棄物政策は—オルキルオト地層処分場オンカロ建設の今」	田辺博三	月刊「エネルギーレビュー」誌 2013年6月号
4	「高レベル放射性廃棄物地層処分の工学技術－技術開発から理解促進へ－第1回 オーバーパックの溶接と溶接部の健全性評価に関する技術開発」	朝野英一、小林正人	日本原子力学会誌アトモス 2013年7月号
5	「高レベル放射性廃棄物地層処分の工学技術－技術開発から理解促進へ－第2回 緩衝材の作成、搬送、定置と定置後の品質に関する技術開発」	朝野英一、小林正人	日本原子力学会誌アトモス 2013年8月号
6	「高レベル放射性廃棄物地層処分の工学技術－技術開発から理解促進へ－第3回 技術開発成果を利用した理解促進」	朝野英一、斎藤雅彦	日本原子力学会誌アトモス 2013年9月号
7	高レベル放射性廃棄物処分の可逆性と回収可能性 第1回 可逆性と回収可能性はどういうことなのか	田辺博三	日本原子力学会誌アトモス 2013年9月号
8	高レベル放射性廃棄物処分の可逆性と回収可能性 第2回 回収可能性を中心とした各国の検討状況	田辺博三	日本原子力学会誌アトモス 2013年11月号
9	高レベル放射性廃棄物処分の可逆性と回収可能性 第3回 R&R国際会議内容の紹介(その1)	田辺博三	日本原子力学会誌アトモス 2014年1月号
10	高レベル放射性廃棄物処分の可逆性と回収可能性 第4回 R&R国際会議内容の紹介(その2)と、今後への期待	田辺博三	日本原子力学会誌アトモス 2014年2月号
11	放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングに関する国際会議《MoDeRn国際会議》	田辺博三、鈴木圭	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.20 No.1
12	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
13	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

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№106	地層処分場のモニタリングに関する国際共同研究 MoDeRn プロジェクトの活動	2013年 6月
2	原環センタートピックス№107	地下空洞型処分施設の地震応答解析について－地震時の挙動の解析的検討－	2013年 9月
3	原環センタートピックス№108	今後の原子力利用とバックエンド・放射性廃棄物への取組み	2013年 12月
4	原環センタートピックス№109	地層処分の知識マネジメントに関する考察	2014年 3月
5	原環センター技術報告書 RWMC-TRJ-13001-1	食品の調理・加工による放射性核種の除去率－我が国の放射性セシウムの除去率データを中心に－概要	2013年 9月
6	原環センター技術報告書 RWMC-TRJ-13001-2	食品の調理・加工による放射性核種の除去率－我が国の放射性セシウムの除去率データを中心に－	2013年 12月
7	原環センター2012年度 技術年報		2013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。

VI. 資料

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	2013/4/3	カナダ核燃料廃棄物管理機関 (NWMO) が 2012 年の年報と 2013~2017 年の実施計画書を公表
2	2013/4/3	フィンランドの地下特性調査施設 (ONKALO) における研究開発の動向—坑道の掘削状況及び定置装置の試験計画
3	2013/4/10	追記) カナダ核燃料廃棄物管理機関 (NWMO) が 2012 年の年報と 2013~2017 年の実施計画書を公表 [2013 年 4 月 3 日既報]
4	2013/4/12	ドイツで BMU と州などが、発熱性放射性廃棄物処分場の新たなサイト選定手続きを定める法律の制定プロセスなどに合意
5	2013/4/12	米国で 2014 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 6,000 万ドルを要求
6	2013/4/15	追記) 米国で 2014 会計年度の予算要求—高レベル放射性廃棄物の処分に対して 6,000 万ドルを要求 [2013 年 4 月 12 日既報]
7	2013/4/26	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
8	2013/4/26	米国の連邦議会上院の委員会で高レベル放射性廃棄物の管理・処分に係る法案の検討を開始
9	2013/5/1	追記) フランスの放射性廃棄物管理機関 (ANDRA) が地層処分場設置に関する公開討論会の開催を公開討論国家委員会 (CNDP) に付託 [2012 年 10 月 15 日既報]
10	2013/5/15	英国政府がサイト選定プロセスに関する Call for Evidence (根拠に基づく情報提供の照会) を開始
11	2013/5/20	追記) ドイツで BMU と州などが、発熱性放射性廃棄物処分場の新たなサイト選定手続きを定める法律の制定プロセスなどに合意 [2013 年 4 月 12 日既報]
12	2013/5/27	追記) フランスの放射性廃棄物管理機関 (ANDRA) が地層処分場設置に関する公開討論会の開催を公開討論国家委員会 (CNDP) に付託 [2012 年 10 月 15 日既報]
13	2013/5/29	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パブリックコメント期間が終了
14	2013/5/30	追記) フランスの放射性廃棄物管理機関 (ANDRA) が地層処分場設置に関する公開討論会の開催を公開討論国家委員会 (CNDP) に付託 [2012 年 10 月 15 日既報]
15	2013/5/31	フランスの公開討論国家委員会 (CNDP) が公開討論において国民の意見を取り入れる新制度を検討する円卓会議を開催
16	2013/6/5	追記) フランスの公開討論国家委員会 (CNDP) が公開討論において国民の意見を取り入れる新制度を検討する円卓会議を開催 [2013 年 5 月 31 日既報]

	掲載日	タイトル
17	2013/6/6	追記) 米国の連邦議会上院の委員会で高レベル放射性廃棄物の管理・処分に係る法案の検討を開始 [2013年4月26日既報]
18	2013/6/7	追記) フランスの公開討論国家委員会(CNDP)が公開討論において国民の意見を取り入れる新制度を検討する円卓会議を開催 [2013年5月31日既報]
19	2013/6/19	追記) フランスの公開討論国家委員会(CNDP)が公開討論において国民の意見を取り入れる新制度を検討する円卓会議を開催 [2013年5月31日既報]
20	2013/6/27	米国でNRCが「廃棄物保証」規則の改定案などを提示
21	2013/6/28	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
22	2013/6/28	追記) フランスの公開討論国家委員会(CNDP)が公開討論において国民の意見を取り入れる新制度を検討する円卓会議を開催 [2013年5月31日既報]
23	2013/7/1	追記) ドイツでBMUと州などが、発熱性放射性廃棄物処分場の新たなサイト選定手続きを定める法律の制定プロセスなどに合意 [2013年4月12日既報]
24	2013/7/8	追記) ドイツでBMUと州などが、発熱性放射性廃棄物処分場の新たなサイト選定手続きを定める法律の制定プロセスなどに合意 [2013年4月12日既報]
25	2013/7/11	フランスの公開討論国家委員会(CNDP)が放射性廃棄物に係る公開討論の強化策を公表
26	2013/7/23	追記) 米国DOEがクラスCを超える低レベル放射性廃棄物処分のドラフト環境影響評価書(DEIS)を公表 [2011年3月9日既報]
27	2013/8/2	追記) ドイツでBMUと州などが、発熱性放射性廃棄物処分場の新たなサイト選定手続きを定める法律の制定プロセスなどに合意 [2013年4月12日既報]
28	2013/8/6	米国の廃棄物隔離パイロットプラント(WIPP)で廃棄物定置用の新しいパネルの運用を開始
29	2013/8/15	米国の連邦控訴裁判所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の再開を命令
30	2013/9/2	追記) 米国の連邦控訴裁判所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の再開を命令 [2013年8月15日既報]
31	2013/9/6	イスの連邦評議会が放射性廃棄物管理プログラムを承認
32	2013/9/9	追記) フィンランドでボシヴィア社がオルキルオトでの使用済燃料処分場の建設許可を申請 [2013年1月7日既報]
33	2013/9/10	追記) フランスの公開討論国家委員会(CNDP)が放射性廃棄物に係る公開討論の強化策を公表
34	2013/9/13	英国政府が地層処分施設のサイト選定プロセスに関する公開協議を開始
35	2013/9/13	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力所を提案
36	2013/9/17	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]
37	2013/9/24	イスでNAGRAが地層処分場の地上施設の安全性と地下水の保護についての報告書を公表

VI. 資料

	掲載日	タイトル
38	2013/9/24	追記) 英国政府がサイト選定プロセスに関する Call for Evidence (根拠に基づく情報提供の照会) を開始 [2013年5月15日既報]
39	2013/10/2	スウェーデン SKB 社が RD&D プログラム 2013 を公表: 使用済燃料の処分開始を 2029 年に設定
40	2013/10/4	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 力所を提案 [2013年9月13日既報]
41	2013/10/31	追記) 米国の連邦控訴裁判所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の再開を命令 [2013年8月15日既報]
42	2013/11/1	追記) スペインで集中中間貯蔵施設 (ATC) の立地サイトを選定 [2012年1月11日既報]
43	2013/11/12	韓国で使用済燃料公論化委員会が発足
44	2013/11/12	追記) フランスの公開討論国家委員会 (CNDP) が放射性廃棄物に係る公開討論の強化策を公表 [2013年7月11日既報]
45	2013/11/19	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
46	2013/11/20	米連邦控訴裁判所が DOE に対して放射性廃棄物基金への拠出金を徴収しないよう命令
47	2013/11/27	スイスにおける放射性廃棄物処分に関する世論調査結果 (2013年夏実施) を NAGRA が公表
48	2013/11/27	カナダの使用済燃料処分場のサイト選定の状況ー先行 8 地域における第 3 段階第 1 フェーズが完了
49	2013/12/3	フィンランドで原子力に関する新安全指針が発効
50	2013/12/3	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]
51	2013/12/9	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 力所を提案 [2013年9月13日既報]
52	2013/12/11	フランスの原子力安全機関 (ASN)、地層処分プロジェクトの進捗に関する見解書を公表
53	2013/12/12	フランスで国家評価委員会 (CNE) が第 7 回評価報告書を公表
54	2013/12/12	米連邦議会下院が DOE にユッカマウンテン関連の判決等への対応計画の情報を要求
55	2013/12/17	英国の放射性廃棄物管理委員会 (CoRWM) が地層処分施設のサイト選定プロセスの政府改善案に対する見解文書を提出
56	2013/12/18	追記) フランスの公開討論国家委員会 (CNDP) が放射性廃棄物に係る公開討論の強化策を公表 [2013年7月11日既報]
57	2013/12/24	追記) 英国政府がエネルギー法改正案を議会に送付 [2012年12月4日既報]
58	2014/1/7	フィンランドでポシヴァ社がオルキルオトでの使用済燃料処分場の建設許可を申請
59	2014/1/7	追記) 米国における民間での使用済燃料の中間貯蔵施設の計画を巡る動き [2012年10月12日既報]
60	2014/1/15	米国で DOE が「使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の管理・処分戦略」を公表

	掲載日	タイトル
61	2014/1/15	追記) フィンランドで新規原子炉建設と最終処分場の拡大に関する原則決定について経済大臣が提案 [2010年4月27日既報]
62	2014/1/22	追記) カナダでサイト選定プロセスへの関心表明の受付を一時中断 一受け付け済み 21 地域への調査・対応に注力— [2012年10月3日既報]
63	2014/1/22	追記) 米連邦控訴裁判所がDOEに放射性廃棄物基金への拠出金額の妥当性を評価するよう指示 [2012年6月4日既報]
64	2014/1/31	英国のカンブリア州の議決により、コープランド市及びアラデール市でのサイト選定プロセスが次段階に進めないことが決定
65	2014/2/1	追記) 英国カンブリア州の議決により、コープランド市及びアラデール市でのサイト選定プロセスが次段階に進めないことが決定 [2013年1月31日既報]
66	2014/2/1	追記) 米連邦控訴裁判所がDOEに放射性廃棄物基金への拠出金額の妥当性を評価するよう指示 [2012年6月4日既報]
67	2014/2/5	ベルギー放射性廃棄物・濃縮核分裂性物質管理機関(ONDRAF/NIRAS)が浅地中処分場の建設許可申請書を提出
68	2014/2/6	スイスのサイト選定プロセス第2段階の進捗状況—地層処分場の地上インフラに関する地元の見解が2013年前半中に出揃う見通し
69	2014/2/8	スイス連邦原子力安全検査局(ENSI)が安全性の評価関連の3つの文書を公表
70	2014/2/8	追記) フランスの放射性廃棄物管理機関(ANDRA)が地層処分場設置に関する公開討論会の開催を国家討論会委員会(CNDP)に付託 [2012年10月15日既報]
71	2014/2/21	追記) 英国カンブリア州の議決により、コープランド市及びアラデール市でのサイト選定プロセスが次段階に進めないことが決定 [2013年1月31日既報]
72	2014/3/22	英国でヒンクリー・ポイントにおける新規原子炉の建設の計画認可が発給—新たな放射性廃棄物管理等の資金確保制度による計画—
73	2014/3/25	追記) ドイツで連邦政府がアッセⅡ研究鉱山の閉鎖を促進するための法案を策定 [2012年12月18日既報]
74	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	検討事項
1. 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詳細計画及び試験結果に関する検討
	Cl-36 分析マニュアルの有識者検討資料の対応助成業務	Cl-36 分析マニュアルの妥当性に係るレビュー委員会	塩素36分析マニュアルの妥当性の検討
	余裕深度処分埋設核種分析手法の確立に係る委託	余裕深度処分埋設核種分析手法レビュー委員会	余裕深度処分埋設核種の分析手法の妥当性の検討
2. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究	処分システム工学要素技術高度化開発	オーバーパック健全性評価技術検討委員会	オーバーパックの構造と腐食に留意した健全性評価に関する検討
		緩衝材健全性評価技術検討委員会	緩衝材の定置後飽和に至るまでの膨潤挙動に関する検討
		地層処分モニタリングシステム検討委員会	地層処分モニタリングへの適用性の視点に立った技術メニューの整備及び技術調査に関する検討
		操業期間中の安全対策に関する基盤技術検討委員会	自然災害に対する地層処分システムの操業安全を確保するための対策技術に関する検討
	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	地層処分の回収技術に関する検討
	T R U廃棄物処理・処分技術高度化開発	ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上委員会	ヨウ素固定化に関する固定化技術、固化体のヨウ素放出抑制能等に関する検討
		炭素 14 放出挙動検討委員会	放射化金属廃棄物から放出される炭素 14 の放出移行挙動を確証するための試験手法及び評価に関する検討
		ナチュラルアナログ検討委員会	ナチュラルアナログサイトにおける調査手法及び調査結果に関する検討
		人工バリア長期挙動検討委員会	人工バリアの長期性能の評価手法を確証するための技術的事項に関する検討
	ガス移行挙動評価検討委員会	ガス移行挙動評価検討委員会	人工バリアシステム及び周辺岩盤でのガス移行挙動を評価するための技術的事項に関する検討

分野区分	研究件名	委員会名称	検討事項
3. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究	放射性廃棄物重要基礎技術研究調査	「地層処分基盤研究開発調整会議」外部有識者委員会	「地層処分基盤研究開発調整会議」による次期全体計画に係る検討
	食品の調理・加工による放射性核種除去率データの整備	食品の調理・加工による放射性核種除去率データの整備検討委員会	食品の調理・加工による放射性核種除去率データの収集、評価
4. 放射性廃棄物処分への理解促進	地層処分実規模設備整備事業	地層処分実規模設備整備事業検討委員会	地層処分実規模設備整備事業の計画、実施内容等に関する検討

原環センター 2013年度 技術年報

2014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。