2017年秋の大会

バックエンド部会セッション

地層処分セーフティケース —進捗状況—

Safety case for geological disposal of radioactive waste -Current status-

(3) 処分場の設計と工学技術

(3) Repository design and engineering technology

*鈴木覚，山本陽一，野尻慶介，山品和久，後藤考裕，小川祐輔，勝又尚貴，窪田茂

原子力発電環境整備機構（NUMO）

1. はじめに

地層処分事業においては，事業に求められる要件や前提が変化する可能性がある。また，サイト選定の進展に応じて地質環境特性に関する情報が段階的に詳細化される。このため，処分場の母岩となる岩種の特徴を考慮し，人工バリア材料の開発成果といったその時点の最新の科学技術的知見を適宜反映して，処分場の設計を柔軟に行う準備を整えておくことが処分場の実現可能性と安全確保の観点から重要である。NUMO は，閉鎖前および閉鎖後長期の安全性，工学的成立性，回収可能性，経済的合理性などの設計において考慮すべき視点から具体的な設計要件を設定し，これを基軸として，人工バリア，地下施設および地上施設を一貫して取り扱う体系的な設計の方法論を構築してきた。NUMO セーフティケースでは，「第２次取りまとめ」[1]，「第 2 次 TRU レポート」[2]で提示された処分概念を出発点として，検討対象母岩として設定した三つの岩種の地質環境モデルを対象に整備した設計の方法論を適用し，所要の安全機能を有する処分場の設計を試行するとともに，処分場の建設・操業・閉鎖に必要となる工学技術の開発状況について取りまとめている。

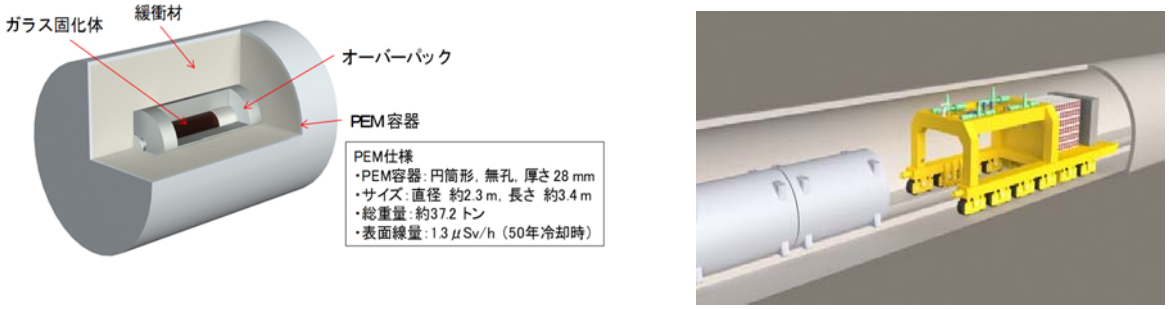
2. 人工バリアの設計

(1) 高レベル放射性廃棄物処分に対する人工バリア

高レベル放射性廃棄物処分の人工バリアの設計では，炭素鋼の腐食試験，放射線影響評価，緩衝材の塩水条件における膨潤性などの最新のデータに基づいて，「第２次取りまとめ」で提示された人工バリアの仕様が余裕をもって設定されていること，および，降水系地下水だけでなく，塩水系地下水の環境にも適用可能であることなどを確認した。このことから，サイト条件によって安全性を最優先としつつ，経済合理性を備えた人工バリアの最適設計の可能性を示した。

設計の柔軟性向上の観点から，特に横置きの処分概念については， PEM 方式について設計を行うとともに操業方法を示した。横置き・PEM 方式は，地上施設にてオーバーパックと緩衝材を鋼製容器内に一体化して地下に搬送する方式であるため（図 1），竪置き・ブロック方式に比べて，人工バリア構築の品質管理が容易であるとともに，処分坑道内における定置作業の効率化や坑道面積の縮小化が図れること，および坑道内の湧水や滴水などの環境に対する適用性が高いといった特徴がある。PEM の質量は約 37,200 kg と重量物であるが，PEM の製作および搬送定置技術の開発が実規模スケールで実施されており，工学的に実現可能であるとの見通しを得ている。

また，竪置き・ブロック方式および横置き・PEM 方式に関する施工技術を対象として廃棄体の回収方法を示し，その技術開発状況についても合わせて示した。



(a) PEM の構成と概略仕様　　(b) PEM の搬送・定置装置のイメージ

図 1 横置き・PEM 方式の技術開発

(2) TRU 廃棄物処分に対する人工バリア

TRU 廃棄物処分については，安全性や操業性をより高めた廃棄体パッケージの新たなオプションを示し，検討を実施した。TRU 廃棄体パッケージは，廃棄体の地下施設への搬送および定置作業を安全かつ効率的に実施するために，複数の廃棄体を容器内に一体化したものであり，鋼製容器と廃棄体，廃棄体間を充填するモルタルから構成される。「第 2 次 TRU レポート」の検討では，厚さ 5 mm の鋼製容器にモルタルを充填し，蓋をつけない構造としていたが，操業中の閉じ込め性をさらに確実なものとするため，厚さ 50 mm の鋼製容器にモルタルを充填し，鋼製の蓋により密閉性を確保した設計オプションを新たに提示した(図 2)。放射線による充填したモルタルからの水素発生に関する新たな知見に基づけば，この厚さで内圧上昇に耐えることが可能である。

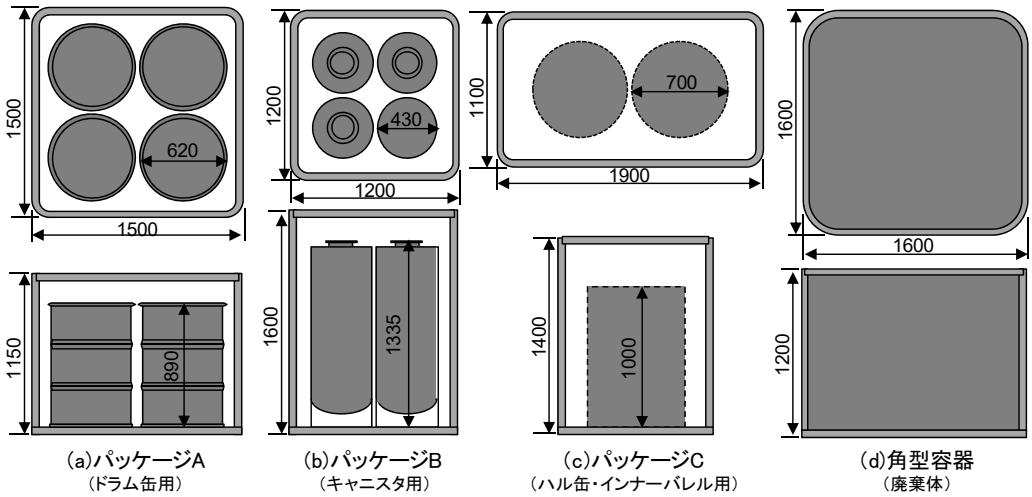


図 2　TRU 廃棄物の廃棄体パッケージ

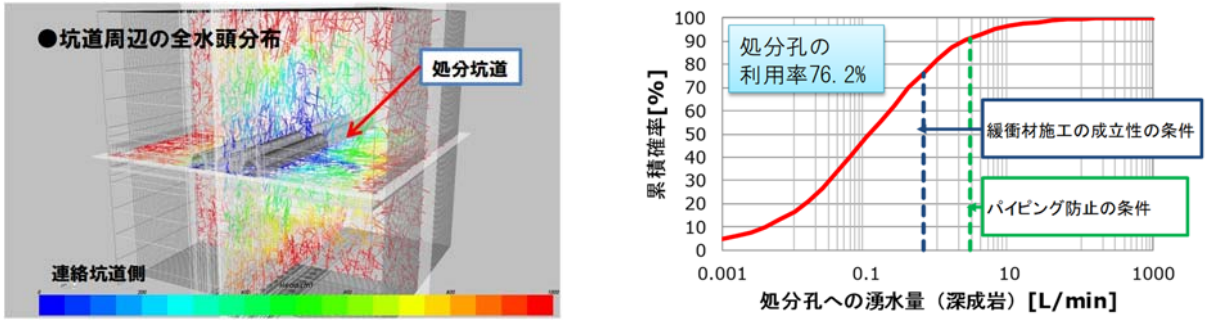
この鋼製容器を対象に，操業期間中のみならず，容器の密閉性が閉鎖後も一定期間期待できるかどうかについて検討した。廃棄体パッケージ間の隙間はモルタルにより充填されることから鋼製容器の表面が不動態化することを想定して，平均腐食速度と孔食係数の関係に基づいて最大腐食深さを評価した。また，地下水圧に対する構造健全性については，蓋部に変形が認められるものの貫通亀裂は生じないことを解析に基づいて示した。以上の検討に基づくと，処分場閉鎖後 500 年程度の期間であれば，鋼製容器により放射性物質の地下水への溶出が生じないようにすることができると考えられる。ただし，応力腐食割れなどの可能性については，溶接部の残留応力を低減するなどの対策などの検討が今後も必要と考えられる。また，長期の閉じ込めが容易となるように，応力集中が発生しにくい円筒型容器を検討するなどの対応も必

要となると考えられる。

3. 地下施設の設計

地下施設の設計に関しては，地質環境モデルで記載される断層や割れ目に対処して処分区画（廃棄体を埋設する処分坑道群からなる一つの区画）のレイアウトを決定する際に考慮する事項を取りまとめた。活断層が分布する場所とその影響範囲は，サイト調査の初期段階において処分場を設置する領域から除外する。活動性は不明であっても，全長が長く破砕帯が発達しているような規模の大きな断層（目安として長さが 10 km 以上）は，水理学的に大きな水みちとなる可能性があるので，活断層と同様に処分場の設置を検討する領域に含まれないようにする。比較的長さが短い断層（目安として長さが 1 km~10 km）の断層は，地下施設の設置を検討する領域に存在する。これらの断層から湧水がある場合には，グラウチングにより湧水量を低減させるなどの対策を講じて坑道を掘削することは可能と考えられる。しかし，処分区画には平行する処分坑道を数多く掘削するため，湧水対策等のコストを抑制する観点から，事前の調査により上述の規模の断層の存在が把握されている領域には処分区画を設置しないこととして，処分区画を配置するという考え方を基本としている。これらの検討に加え，建設・操業を同時並行で進めることを想定して，一般労働安全の観点から換気経路や作業動線が合理的に確保できるかという観点からも，処分区画および連絡坑道，アクセス坑道の配置について設計した。

上述の断層よりも長さが短い断層や岩盤中の割れ目（目安として長さが 1 km 未満）は，処分区画を設置する領域にも分布する可能性がある。これらの断層や割れ目に対しては，必要に応じて湧水対策を講じた上で処分坑道を掘削するが，緩衝材の長期性能を確保可能かという観点から対処方法を判断する。例えば，緩衝材は地下水と接触すると直ちに膨潤が始まるため，遮水対策を合理的な範囲で実施することで緩衝材の品質を損なわずに定置可能であるか，また，湧水により緩衝材が流出しその性能を低下させないか，という観点から評価して判断する必要がある。そこで，岩盤中に存在する多数の割れ目を地質環境情報をもとに確率論的に発生させ，解析により湧水量を算定し，許容湧水量と比較することで処分孔の利用可否を判断する方法を開発した。例えば，竪置き・ブロック方式であれば，処分孔毎に割れ目からの湧水量を算定し，緩衝材の施工の合理的な対策の適用範囲やパイピング・エロージョンによる緩衝材流出量から設定した許容湧水量と比較することで，処分孔の利用率を評価した（図 3）。



(a) 処分坑道周辺の割れ目の分布と全水頭　　(b) 処分孔内湧水量に基づいた利用可否の判定例

図 1　多数の割れ目を有する岩盤中における坑道内湧水量の解析結果の例

以上，現時点における体系的設計手法の基本的考え方について述べたが，設計の検討に必要となる断層や割れ目の分布の情報を集約した地質環境モデルは，サイトにおける地質環境の調査・評価の進展によって段階的に情報が詳細化されることにともない更新される。したがって処分場の設計も，地質環境モデルの更新に柔軟に対応して段階的に更新する。同時に，処分場の敷地面積（フットプリント）やパネル配置，

人工バリア施工などに関する制約をできるだけ緩和するような技術的対策の検討を進めるため，湧水量や緩衝材のエロージョンに関する科学的知見をさらに充実させるとともに，さまざまな制約条件を満たすように人工バリアと地下施設を一体的に最適化するための技術の開発を図る。

4. 地上施設の設計

地上施設の設計では，放射線安全上，最も重要な施設である廃棄体受入・検査・封入施設の設計を実施した。この施設は，処分場に輸送されてきた廃棄物を受け入れ，検査し，オーバーパックあるいは廃棄体パッケージに封入する施設である。放射線遮蔽の機能に関しては，作業内容に応じて同施設内の区域ごとに作業従事者が立ち入る頻度などに基づいて目標となる空間線量を設定し，壁厚さを決定した。設計において考慮した周辺公衆の放射線影響については，「(4)閉鎖前の安全性の評価」において示す。

また，放射性物質の閉じ込め機能については，廃棄体が固化あるいは封入されていることが原則ではあるが，廃棄体の受入時に表面汚染がある場合なども考慮して，負圧管理とした。なお，設計においては，「(4)閉鎖前の安全性の評価」に示す操業期間中のさまざまな異常状態を想定して，それらが発生しても閉じ込め機能が損なわれないように，防火対策や落下防止対策などの必要な安全対策を検討している。このような検討は地下施設の設計においても実施している。

この他，オーバーパックの搬出に関する従来の検討[3]では，同施設の地上から搬出し，別に設けたアクセス斜坑の坑口から地下施設に搬入することを想定していたが，本検討では，安全性や効率性を勘案し，同施設の地下より直接アクセス斜坑に入る方法を示した（図 4）。これにより，封入後の廃棄体を搬送する車両が地上を走行する場合に比べて作業動線を単純化することができた。なお，TRU 廃棄物の場合についても上記と同様の検討を実施して，地上施設の区域ごとに設計を行った。

サイトの特定後は，サイトの地震動の設定などに応じて，耐震性の観点からも設計を実施する。また，沿岸部に地上施設が設置される場合には，津波対策についても原子力発電所の対策例を参考に検討する。

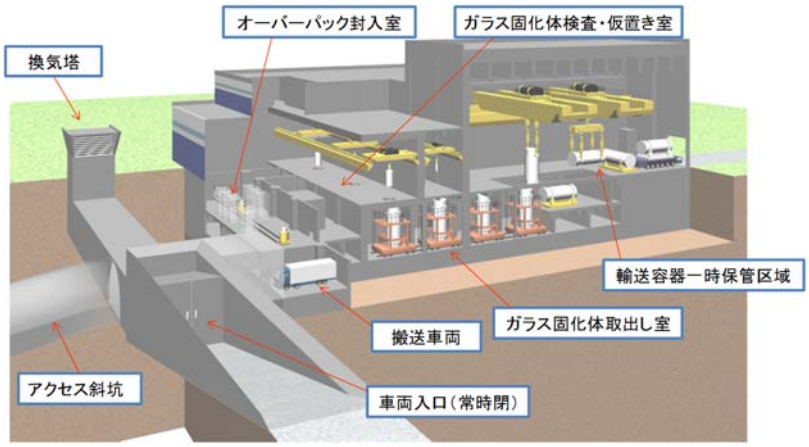


図 2　ガラス固化体受入・検査・封入施設およびアクセス斜坑との接続部の鳥瞰図

5. まとめと包括的技術報告書公表後の技術開発に関する取り組み

以上の検討を通じて，地質環境モデルに応じて所要の安全機能を確保した処分場を構築するための実用的な設計技術，およびこれを実現するための工学的な技術が準備されていることを示した。NUMO セーフティケースでは，さらなる技術開発が必要と判断した項目について，人工バリア，地上施設・地下施設，建設・操業・閉鎖の工学技術，回収技術に分類して取りまとめている。特に処分事業に対する要件，サイトの地質環境特性や社会的条件（敷地面積など）に柔軟に対応して処分場の最適化を可能とするため，安

全性の確保を最優先として現在の設計要件に対する基準を緩和できるような設計オプションと関連技術の充実を図る。具体的には，高レベル放射性廃棄物の処分場に関しては，オーバーパックの金属材料や緩衝材のベントナイトの代替材料の検討，横置き・PEM 方式の高度化，および地下施設の換気・湧水対策の技術開発などに取り組む。また，TRU 廃棄物の処分場に関しては，廃棄体パッケージの改良や回収技術の開発などに取り組む。

参考文献

[1] 核燃料サイクル開発機構（1999）：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－，第 2 分冊，JNC TN1400 99-022.

[2] 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構（2005）：TRU 廃棄物処分技術検討書 －第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013.

[3] 原子力発電環境整備機構（2004）：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性，－「処分場の概要」の説明資料－，NUMO-TR-04-01.

*Satoru Suzuki, Yoichi Yamamoto, Keisuke Nojiri, Kazuhisa Yamashina, Takahiro Goto, Yusuke Ogawa, Naoki Katsumata and Shigeru Kubota, Nuclear Waste Management Organization of Japan