

深地層の研究施設計画に関する報告会 2020

4. 幌延深地層研究計画における 必須の課題成果取りまとめと今後の計画

3) 共同研究 成果トピックス (原環センター)

2020年12月1日

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター(原環センター)
地層処分工学技術研究開発部

部長 江守 稔

ご報告内容

1. はじめに（地層処分事業における工学技術の段階的な開発・整備）
2. 工学技術に関する資源エネルギー庁委託事業としての課題設定（マイルストーン）
3. 幌延深地層研究計画を踏まえた原環センターの取組の概要
4. 幌延深地層研究センターにおける原環センターの取組の成果
5. 地下研究施設を活用することで得られる成果と効果
6. 地層処分事業における地下研究施設の役割と期待
7. まとめ
8. おわりに

1. はじめに (地層処分事業における工学技術の段階的な開発・整備)

①人工バリア等の地下構造物の品質・性能の評価

- 【安全機能】 ⇒ 【要件】 ⇒ 【仕様】 へと展開
 - 人工バリアのみならず、他の地下構成要素にも要件や仕様を設定
- ⇒ 個々の構造物が、「期待する時間スケール」において「期待する性能」が発揮されることを評価

②建設・操業 (施工) 技術の開発

- 設計された処分場を構築 (建設・操業・閉鎖) するための技術の開発・整備
 - 候補サイトの多様な地下環境への柔軟性、仕様を満たすための技術・装置に応じた製造・施工プロセス管理や品質保証などへの留意
- ⇒ 多様な技術オプションを整備し、将来の実施主体による技術選択の柔軟性を確保



段階的な処分場開発のプロセスにおいて、精緻化する地質環境情報や安全評価との連携・相互フィードバックを、反復的かつ段階的に進める

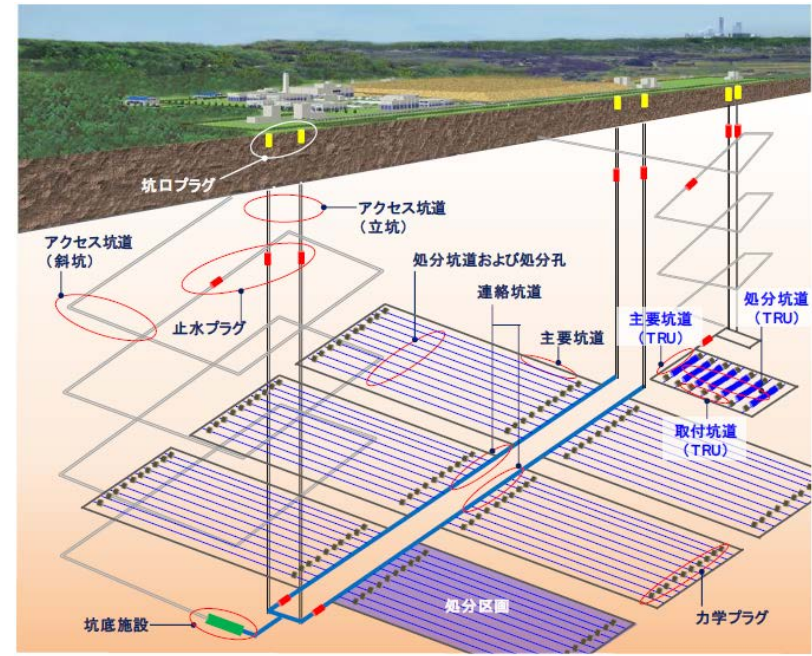
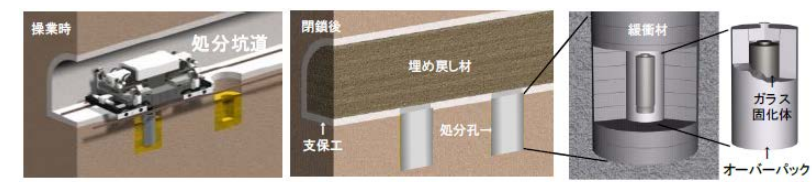


図 4.2-4 地下施設のイメージ



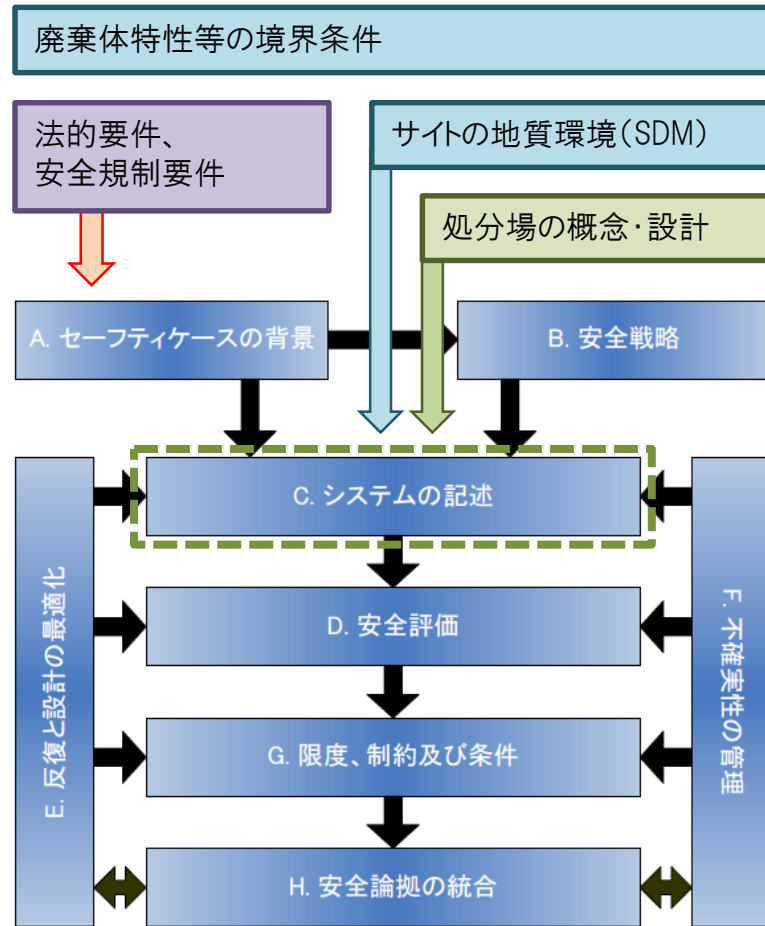
(a) 縦置き・ブロック方式

図 4.2-2 高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリア

【図出典】 NUMO「包括的技術報告書 (レビュー版)」(2018) より

参考1：処分場の段階的な開発プロセス

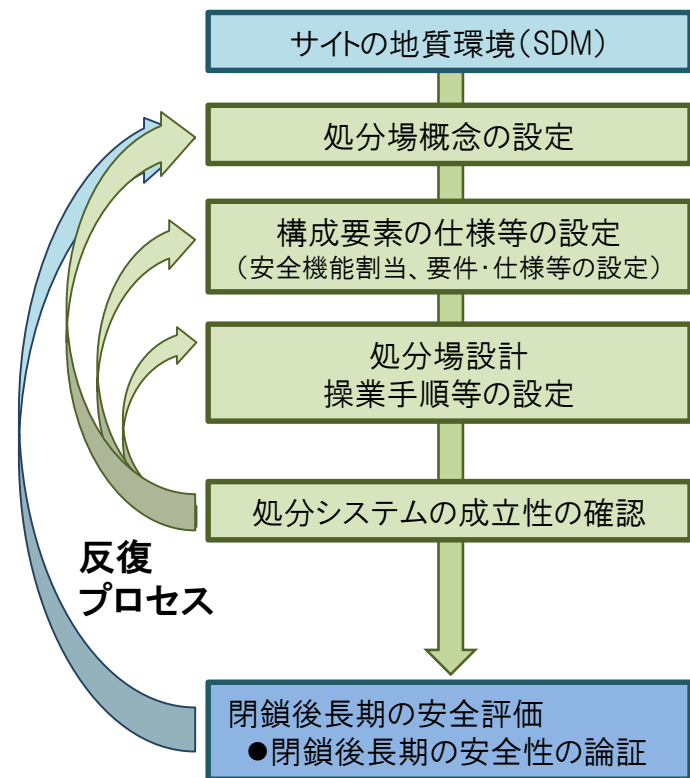
段階的なセーフティケース開発の節目と整合させた 処分システムの反復的开发プロセス



※左図出展：IAEA個別安全指針SSG-23の図を編集

処分場の設計プロセス (反復による最適化プロセス)

最適化の視点例：1)安全性、2)効率性、3)経済性 …



参考2：段階的な開発整備の具体例 ①

製造・施工品質の観点からみた地下構造物（人工バリア）の品質・性能の評価

ステップ1：人工バリアの仕様設定

- オーバーパック
⇒ 炭素鋼、板厚190mm（母材の腐食速度、遮へい、構造強度）
- 緩衝材
⇒ ベントナイト70%/ケイ砂30%（乾燥重量比）、厚さ70cm、乾燥密度1.6Mg/m³（低透水性、力学特性、製作性、など）

ステップ2：適用する製造・施工技術の選定（見直し）

ステップ3：実際の製造・施工に伴う品質や性能への影響の把握

- オーバーパック
⇒ 溶接部は母材と同等の性能を有しているか？
- 緩衝材
⇒ 初期の密度分布、膨潤挙動や密度差の解消は？
残存するすき間の影響、湧水による流出の可能性は？

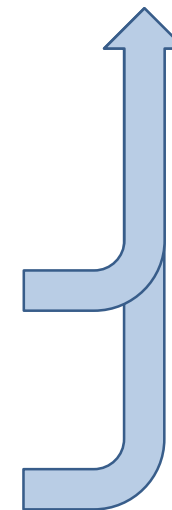
ステップ2 或いはステップ1へ
フィードバック

ステップ3-1：実験室レベルでの試験

- 個別の現象論に展開 ⇒ 試験系に落として評価
- 単純化した試験環境、精緻で定量的な試験、試験点数多

ステップ3-2：実際の地下環境での試験

- 実環境での現象把握、室内試験の妥当性検証

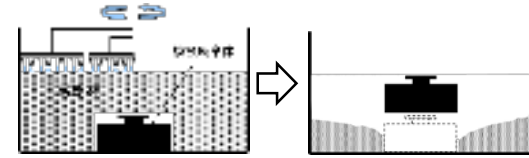


参考2：段階的な開発整備の具体例 ②

建設・操業（施工）技術の開発 ～処分孔竖置き方式に対する回収技術（緩衝材除去技術）の開発例～

ステップ1：作業概念の検討 ⇒ 個別の要素技術の抽出

- 必要となる要素技術の検討・抽出：塩水噴射、スラリー吸引、塩水リユース・・・
- 回収作業ステップの検討：回収・搬出（オーバーパック把持・引上げ・走行）・・・
- 付帯技術：遠隔監視・遠隔操作・・・



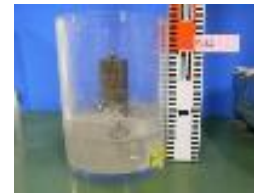
ステップ2：要素技術ごとの検討・開発



塩水の適用性確認試験



塩水濃度噴射方法の検討



小規模の試験様々な条件で試行



実規模大の試験妥当性検証

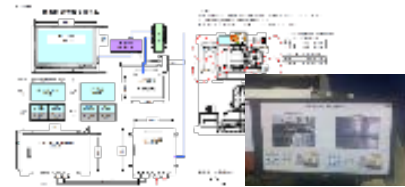
ステップ3：要素技術の結合、システム化



噴射・吸引設備



塩水リユース設備



遠隔操作設備

ステップ4：技術実証

ステップ4-1：地上での実証試験（総合動作確認）



模擬坑道



模擬処分孔



緩衝材の除去試験



ステップ4-2：地下での実証試験

2. 工学技術に関する資源エネルギー庁委託事業としての課題設定（マイルストーン）

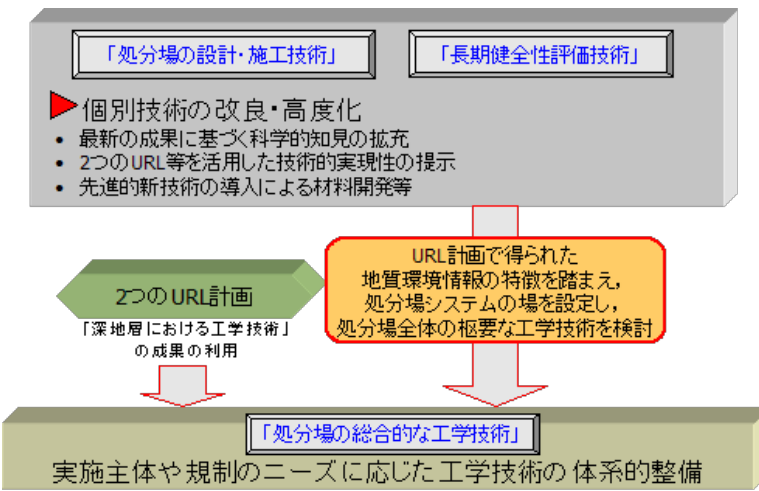
○第2次取りまとめ（1999年）において地層処分の工学技術として以下を取りまとめ※1

- 人工バリアおよび処分施設の基本概念・設計
- 人工バリアの長期健全性評価
- 処分場の建設・操業・閉鎖に関する作業概要（作業内容・手順、工法・装置などの概要）

○上記を踏まえ平成17年に設置した地層処分基盤研究開発調整会議（平成30年より「地層処分研究開発調整会議」）において、基盤研究開発に関する全体計画を取りまとめ※2

- 2000年以降の段階的な研究開発目標を設定（概ね5か年を1フェーズとする3段階）
- 段階的な取組のなかで**実際の地下環境への適用性確認も視野**
- 工学技術分野に関して、3つの大分類の中で細目課題を設定して、開発目標や開発計画を展開（細目課題として「回収技術」や「モニタリング技術」にも言及）
 - 処分場の総合的な工学技術
 - 処分場の設計・施工技術
 - 長期健全性評価技術

分類		分類目標	
フェーズ1	フェーズ2以降	フェーズ2	フェーズ3
-	(1) 処分場の総合的な工学技術	実際の地質環境への適用を考慮した柔軟性のある工学技術の体系化	実際の地質環境への適用性が確認された工学技術全体の体系化
(1)工学技術	(2) 処分場の設計・施工技術	設計・建設技術の 実際の地質環境 への適用性確認と操業・閉鎖技術の整備	処分場の設計・施工技術の 実際の地質環境 への総合的な適用性確認
(2)長期健全性	(3) 長期健全性評価技術	実際の地質環境へ適用可能な 長期健全性評価モデルの整備	実際の地質環境 に対する長期健全性評価モデルの総合的な適用性確認



※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 -”
 ※2：資源エネルギー庁ほか(2006)、“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画”

○資源エネルギー庁では、上記計画に沿って個別課題に関する基盤研究を委託事業として展開



原環センターでは、特に『製造・施工技術オプションの整備』および『人工バリアの健全性評価技術の整備』の観点から、以下の課題に対応

- 操業技術オプションの整備・技術的信頼性の向上に向けた、
 - 製造・施工技術オプションの整備
 - 搬送・定置などの施工関連技術（遠隔操作技術を含む）
 - 緩衝材の製造・施工関連技術
 - オーバーパック溶接・検査技術（溶接部の長期健全性評価を含む）
 - プレハブ式人工バリアモジュール（PEM）の製作技術、など
 - 上記に係る品質管理技術の開発
- 回収技術やモニタリング技術の実証的研究、 など

※資源エネルギー庁委託事業としての具体的な研究内容や成果については、本資料の最後「おわりに」に整理している各事業の成果報告書を参照されたい。

3. 幌延深地層研究計画を踏まえた原環センターの取組の概要

- **日本原子力研究開発機構（JAEA）と原環センターは、「放射性廃棄物の処理、処分等の研究開発に関する協力協定」を2005年（平成17年）に締結**
- **原環センターはJAEAとの協力協定のもと、以下の整合性に留意しつつ、資源エネルギー庁委託事業として幌延深地層研究センターで工学技術分野の研究開発を展開**
 - 日本原子力研究開発機構（JAEA）の改革計画に基づく「地層処分技術に関する研究開発」報告書（平成26年）に示された**必須の課題**（下ボックス参照）
 - 資源エネルギー庁委託事業として展開される工学技術分野の基盤研究開発
 - ・地層処分基盤研究開発調整会議全体計画（平成25～29年度）
 - ・地層処分研究開発に関する全体計画（平成30～令和4年度）

参考：幌延深地層研究計画として示された**必須の課題**のうち、工学技術に関連する2つの課題

- － **実際の地質環境における人工バリアの適用性確認**（人工バリア性能確認試験、オーバーパック腐食試験、物質移行試験）
 - 平成26年度から深度350m調査坑道で実施している人工バリア性能確認試験、オーバーパック腐食試験、物質移行試験を通して、実際の地質環境において、人工バリアや周辺岩盤中での熱-水-応力-化学連成挙動や物質移行現象などを計測・評価する技術の適用性を確認し、「精密調査後半」に必要となる実証試験の技術基盤を確立する。
- － **処分概念オプションの実証**（処分孔等の湧水対策・支保技術などの実証試験、人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験、高温（100℃以上）などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験）
 - 人工バリア設置環境の深度依存性を考慮し、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証し、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計を行うことを支援する技術オプションを提供する。

幌延深地層研究センター-350m調査坑道における原環センターの取組概況

JAEAと以下の協力の枠組みを活用して研究開発を展開

- 両機関で締結している協力協定（JAEA幌延深地層研究センターとの共同研究契約）
- 資源エネルギー庁委託事業の共同受注

主な研究テーマ

- (1) 人工バリア等の健全性評価および無線計測技術の適用性に関する研究
- (2) 搬送定置・回収技術（操業技術）の実証的な研究

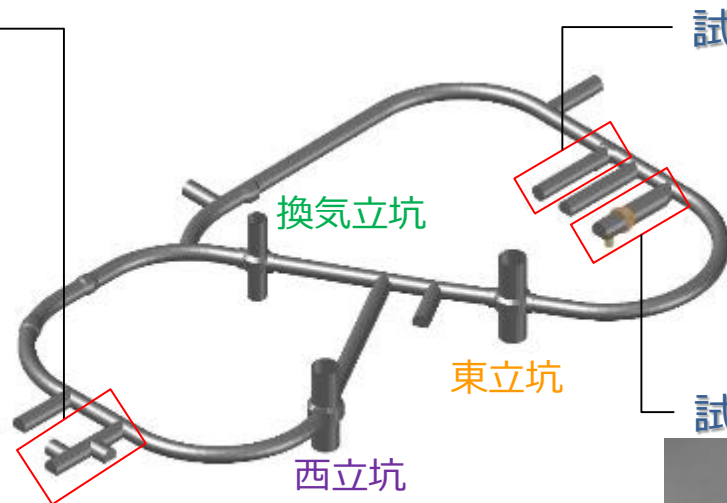
試験坑道 5



オーバーパック溶接部の腐食試験(2013~2017)



緩衝材の流出試験(2014~)



幌延URL地下350m坑道レイアウト

試験坑道 2



地下環境で回収技術の実証試験：
横置き・PEM方式（2015~）

試験坑道 4



小型伝送装置

人工バリア性能確認試験への適用：7体設置（2014~）



4. 幌延深地層研究センターにおける原環センターの取組の成果

(1) 人工バリア等の健全性評価および無線計測技術の適用性に関する研究の成果

⇒ 室内試験で得られた知見等の妥当性の検証、実環境で実際に起こる挙動の把握

オーバーパック溶接部の腐食試験

試験坑道 5、2015~2017



- 室内：** ガラスセル
単純化した溶液 (SSW、SFW)
数センチ四方の小型試験片
試験片点数・条件は多
- 地下：** 岩盤に掘削した試験孔
孔壁からの湧水
実物のオーバーパックの長さ
試験点数 1

得られた成果

- 多重バリア（オーバーパック－緩衝材－岩盤）を再現した環境での腐食現象は、室内試験で対象とした現象で網羅されることを把握。
- 試験体の大きさ、埋設初期の不均一な環境の影響を把握。

⇒ 室内の精緻な試験でデータ拡充

緩衝材の流出試験

試験坑道 5、2014~



- 室内：** アクリルセル
単純化した溶液 (NaCl、など)
十数センチ程度の小型容器
装置底部から上への水の流れ
試験点数・条件は多
- 地下：** 岩盤に掘削した試験孔
原位置地下水／孔壁からの湧水
試験点数 少

得られた成果

- 縦置き方式における緩衝材と周辺境界面で、孔壁からの湧水環境によって流出現象が発生することを確認。
- 上記懸念への工学的対策の有効性が見通しが得られつつある。

⇒ 流出防止の工学的対策の効果の確認に向けた原位置試験を継続中

無線伝送技術

試験坑道 4、2015~

- 既存の多チャンネル送信アンテナ設置例
データ送信器 直径27cm×40cm



出典：坂田電機Wirelessカタログ

- 人工バリア内に設置のため小型化

直径60cm×24cm
設計電池寿命10年



得られた成果

- 土木分野で利用されている無線伝送技術を高度化(小型化) ⇒ 実用化レベル。
- JAEAで実施中に人工バリア性能確認試験に適用中。

⇒ ケーブルレスでの計測を継続中

(2) 搬送定置・回収技術（操業技術）の実証的な研究の成果

① 研究課題としての位置付け

○ 資源エネルギー庁委託事業としての位置付け

- 回収技術の実証的整備（改定された特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針への対応）
- 要求された実証対象概念：処分坑道横置き・PEM方式



※PEM: Prefabricated Engineered barrier system Module
(プレハブ式人工バリアモジュール)

○ 回収作業ステップの予備検討

⇒ **通常の操業作業手順（PEMの搬送・定置）の『逆手順』による回収作業を想定**



○ 操業技術（搬送・定置）を包含した回収技術の実証的整備に向けて研究計画を策定

⇒ 処分技術の信頼性向上 廃棄体定置工程における施工品質の確認も計画

※そもそも回収技術は、通常操業時における異常時の復旧作業（PEMの定置し直しなど）等にも利用される技術



○ 幌延深地層研究計画として示された必須の課題と整合

⇒ **幌延深地層研究センターを原位置技術実証の場として提案**

②技術課題の設定

1) 現時点で有望とされる2つの定置概念に対する操業技術・回収技術の実証的整備

⇒ 処分坑道横置き・PEM方式を対象※として適用技術を実証する

※ 縦置き方式に対応した回収技術（緩衝材除去技術）は実規模スケールでの地上での実証試験を平成26年度に完了済み。

2) 地下環境での操業技術の実証的整備

⇒ 実際の地下環境で地層処分に係る操業・回収が実現可能であることを示す

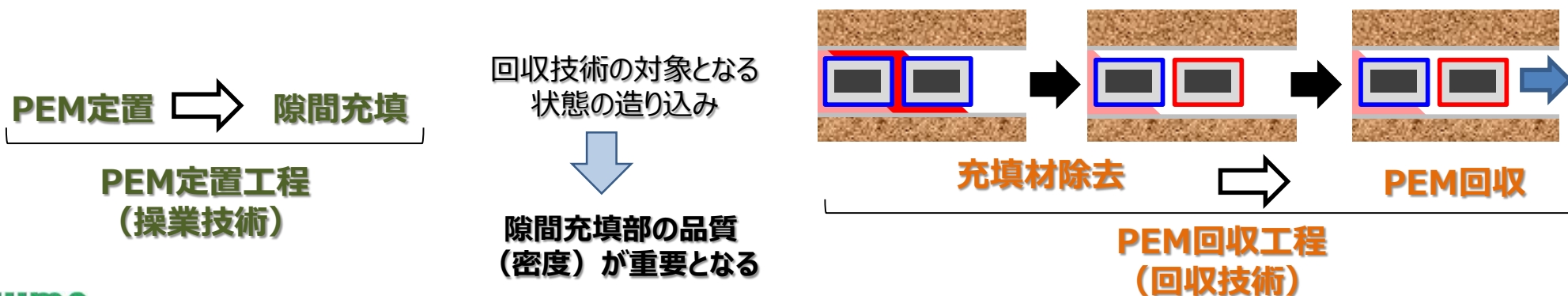
3) 操業・回収技術の適用性評価に資するデータの取得

⇒ 現段階での歩掛りや効率、技術の選定や適用性の更なる向上に資する試験データを取得・整理し、技術選択の根拠情報として整備する



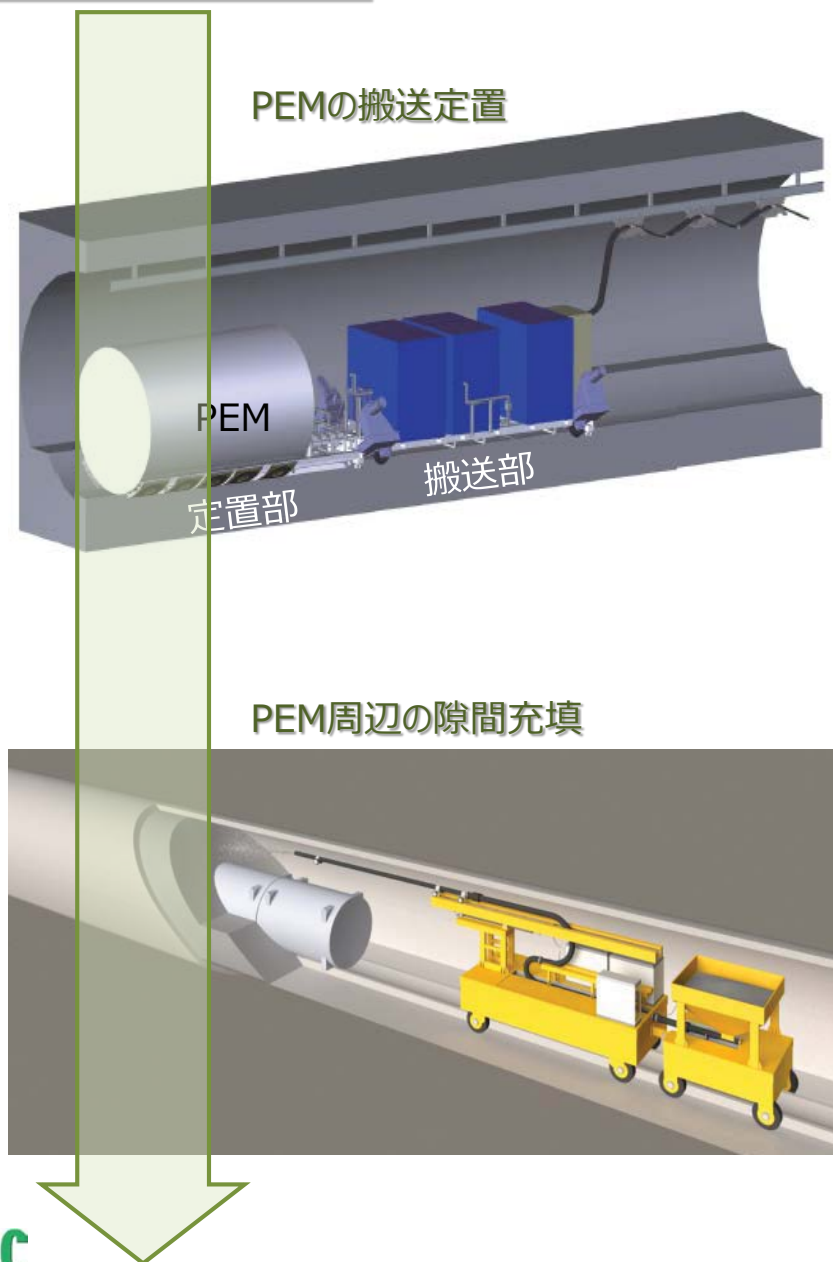
処分坑道横置き・PEM方式の回収作業ステップの検討を経て、本試験の範囲・対象技術を設定

- PEMは健全で把持することが可能⇒PEMごと回収
- 坑口側から1つずつ、定置作業の逆手順で回収

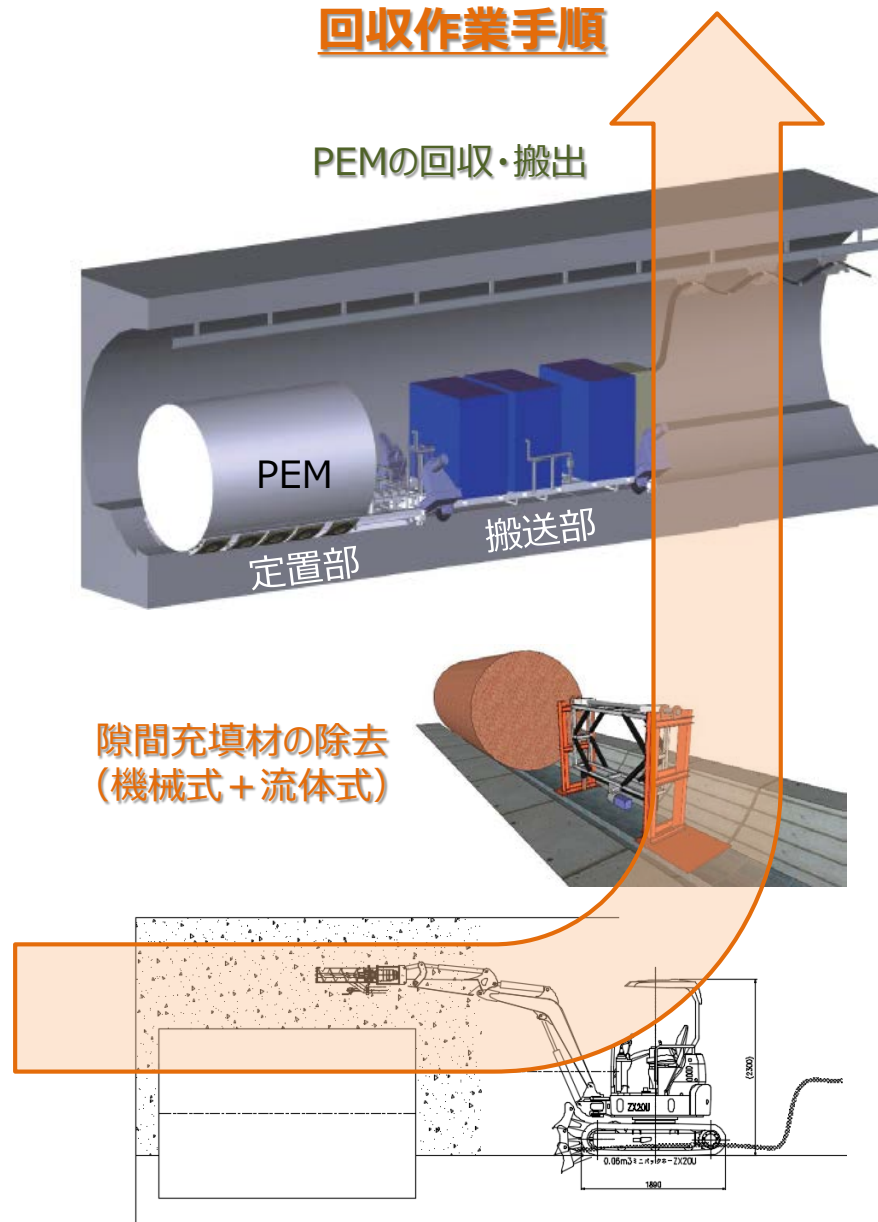


想定した通常の操業作業手順と回収作業手順および中核技術

通常の操業作業手順



回収作業手順



③地下での技術実証に向けた研究開発ステップ

～隙間充填材の除去技術（ウォータージェット）の例～

事前の技術検討

①粘土系材料除去技術の調査

⇒技術選定 ⇒ 本事業での除去対象への適用性検討

②充填材除去工程の検討

⇒装置の概念設計 ⇒ 必要な装置、技術、能力の整理

③中核技術の抽出

⇒ウォータージェットの選択、切削物の吸引方法の検討

地上での要素試験（品質や施工条件の確認・設定）

④要素技術開発（新規製作／汎用機の導入など）

⑤汎用機での要素試験（切削性の確認、ノズル形状の選択など）

⑥地下実証試験用装置の検討

地下での実証試験（地下実環境での技術実証）

⑦実証試験用装置の搬入・セッティング

⑧地下での実証試験の実施

⑨結果の評価（作業性や歩掛り等に関する情報の取得）



- 更なる技術の高度化開発へのフィードバック
- 実施主体による概念設計・技術選択への反映

④得られた成果の抜粋要約

隙間充填技術

スクルー方式 (純ベントナイトペレット充填)
吹付け方式 (ベントナイト混合土)

例) スクリューコンベア方式の充填技術

- ・充填材の検討、充填技術の要素試験
- ・充填装置の設計・製作、地上での確認試験



充填条件と充填部の密度、密度のバラつきの関係
⇒地下での試験時の充填条件の設定

充填材除去技術

PEM近傍 流体的除去 (ウォータージェット)
坑道周辺 機械的除去 (オーガー)

例) 流体的除去 (ウォータージェット: WJ)

- ・充填材に対する高圧水流の効果の調査
- ・WJノズルの種類と除去の状況の確認
- ・除去装置の設計・製作、地上での確認試験



⇒除去に使用するノズルの選定方法
除去箇所に応じたWJによる除去条件の設定

搬送・定置/回収技術

エアベアリング方式の定置装置

- ・PEM搬送・定置装置の設計・製作
- ・重量、走行路面性状がエアベアリングの動作及ぼす影響の確認試験、など



⇒充填材除去後のコンクリート走行面向けの
エアベアリングの運転パラメータの設定

地上
施設での
試験

- ・地上で設定した条件での充填試験

充填材重量と充填部の
体積より、所定の密度
1.37Mg/m³を達成したことを確認



⇒充填材、充填装置、充填プロセスで充填
部の品質を管理する技術を整備

- ・地上で設定した条件での除去試験

WJによる隙間充填
の除去より、PEM -
坑道間の縁切り、回
収装置の動作環境
の構築を確認



⇒回収の要であるPEMを損傷させずに充
填材を除去する技術を整備

- ・実打設面での回収・定置試験

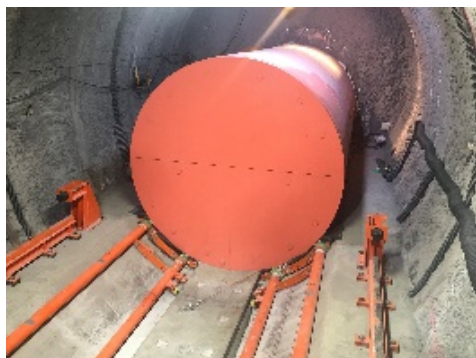
原位置打設コン
リート面における
回収工程へのエア
ベアリングの適用
性を確認



⇒狭隘空間でも大重量廃棄体を搬送
定置・回収が可能な技術オプション

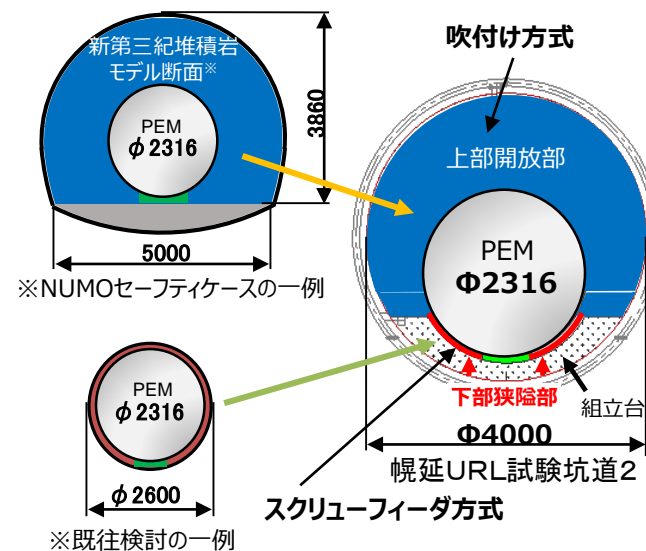
地下
施設での
試験

動画：幌延深地層研究センター350m調査坑道（試験坑道2）における搬送定置・回収技術（操業技術）の実証的研究の成果



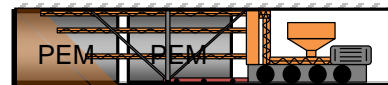
★地下研での研究ならではの工夫のポイントも

■広い空間（上部開放部）



■狭い空間（下部狭隘部）

PEMを搬送・定置しうる最小断面



スクルーフィーダ方式概念図（RWMC）

5. 地下研究施設を活用することで得られる成果と効果

(1) 工学技術の成立性に関する技術的根拠の整備

○段階的な工学技術の開発・整備プロセス

- 実環境での現象理解、室内試験の妥当性検証
- 実環境での操業技術の適用性確認

○地上での試験／地下での試験、それぞれの特徴を生かした試験の組み合わせ

- 地上：試験環境を把握・制御し易い一方で、完全なる地下環境の再現は困難
- 地下：全ての環境条件の把握は困難だが、環境の不確実性を含めた評価は可能

○ジェネリックな地下研究施設での試験

幌延深地層研究センターでの試験で取得した知見、整備した技術

⇒ 今後の更なる信頼性向上に向けて更新・改良される処分概念・設計、ならびに候補サイトの地質環境条件に対して、**柔軟な対応に資するように成果を取りまとめて提示することが重要**

(2) 説明性の向上

○地層処分事業の技術開発状況の説明において、ファクトとして情報提供することが可能。

⇒ 細かな前提条件説明の省略、説明資料の充実、など

机上検討やシミュレーション

- Q. 本当に出来るの？
- A. 実現可能性が評価されています (多くの課題が残されている…)

門型クレーンを応用したPEM搬送・定置装置

- PEM搬送・定置装置は、電気駆動を想定し、ツイストロックでPEMを把持し、持ち上げ移動する装置とした。
- PEMはコンクリート製の台座に定置する概念。
- 残置物量の軽減と回収可能性を容易にするために、レール式ではなく、タイヤ式を採用。
- PEMと坑道壁面の隙間は、ベントナイトを主成分とする埋め戻し材で埋め戻す予定。埋め戻し方法としては、吹き付けベントナイトを想定しているが、ハレット充填も候補である。

台座は搬送定置装置の走行ガイドの役目も果たす。

実規模スケールでの実施

- Q. 本当に出来るの？
- A. 実際にやった例があります。
- Q. 地下ではどうなの？
- A. (色々な説明を交えて) 実現可能性が評価されています。



地下での試験

- Q. 本当に地下で出来るの？
- A. 実際にやった例があります。



文章 ⇒ 模式図 (CG) ⇒ 試験写真 ⇒ 現場写真 ⇒ 動画

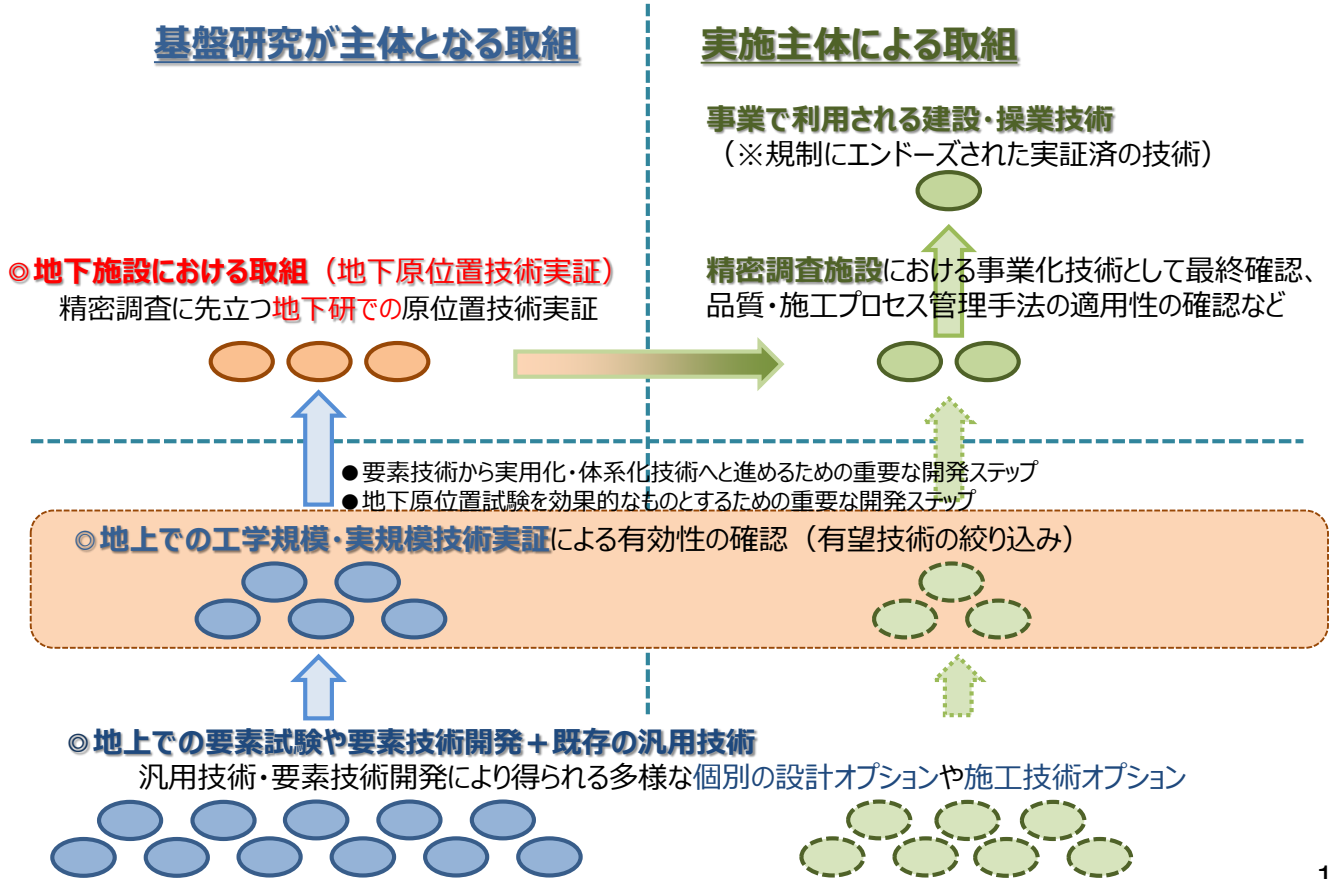
6. 地層処分事業における地下研究施設の役割と期待

(1) 地下研究施設の役割

- **実施主体による3段階の調査への反映（精密調査に先立つ事前の体系技術の整備・実証）**
⇒ 実施主体による精密調査施設での限られた活動期間／限られた地下空間
精密調査施設での重要な工学的活動（品質管理を含む建設・操業技術の適用性の提示）
- **多様な評価項目で合理的に進める『設計および建設・施工技術の最適化』への寄与**
⇒ 柔軟かつ効果的・合理的な最適化（適切な設計・技術オプションの選択）の実施は、多様な設計オプションおよび多様な建設・操業技術オプションを持つことに他ならない



工学技術の段階的な開発プロセスを踏まれば（右図）、**基盤研究開発**ならびに**地下研究施設に期待される役割は重要**



7. まとめ

- 地下研究施設を活用した工学技術の調査研究・開発は、地上施設とともに双方の特徴を活かした計画を策定、段階的な技術開発における重要なステップの一つであり、**地層処分事業の工学技術の成立性に対する技術的根拠の整備に大きく寄与**する。
- 地下研究施設を活用した試験の実施および得られた成果は、地層処分事業の工学技術の整備状況を広く一般に伝える場面において、内容だけではなく**地下で実現可能な技術が存在するというファクトを示すことによって、より信頼性の高い説明に貢献**すると考えられる。
- 地下研究施設を活用した試験を地層処分事業に先駆けて実施し得られた成果は、精密調査段階後半に計画される地下調査施設での原位置試験・実証試験で取り扱う課題を明確にし、**スムーズな精密調査施設の整備計画、試験の遂行に貢献**すると考えられる。

★地下研究施設への期待

- 地下研究施設を活用した地層処分事業の工学技術の整備は、上記のような大きな効果を得ることが出来る。
- また、前述したように地層処分事業を進めるうえで重要な役割を担う。



今後も開かれた地下研究施設として、多くの技術開発の機会提供、多くの機関・技術者の交流の場となることを期待

8. おわりに

本報告は公益財団法人原子力環境整備・資金管理センターが、経済産業省資源エネルギー庁から受託して実施した以下の委託事業の成果の一部をまとめたものです。

平成12～18年度	地層処分技術調査等	遠隔操作技術高度化調査
平成12～18年度	地層処分技術調査等	モニタリング機器技術高度化調査
平成16～18年度	地層処分技術調査等	バリア機能総合調査-人工バリア特性体系化調査-
平成19～24年度	地層処分技術調査等事業	処分システム工学要素技術高度化開発
平成20～21年度	核燃料サイクル関係推進調整等委託費	地層処分実規模設備整備事業
平成22～23年度	原子力施設立地推進調整委託費	地層処分実規模設備整備事業
平成23～26年度	地層処分技術調査等事業	(地層処分回収技術高度化開発)
平成24～25年度	原子力発電設備公聴・広報等事業	地層処分実規模設備整備事業
平成25～29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)
平成26年度	原子力発電設備公聴・広報等事業	地層処分実規模設備運営等事業
平成27～28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：可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発)
平成29～31年度	高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業	(可逆性・回収可能性評価・技術高度化開発)

上記のうち、幌延深地層研究センターで実施した工学技術分野の研究開発成果については、年度毎の幌延深地層研究計画に対応する調査研究成果報告書に整理しています。

(下記のURLから閲覧可能)

https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/disclosure/archive_seika.html

ご清聴ありがとうございました