平成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・回収可能性調査・技術高度化開発

平成２７年度～平成３１年度
５ヵ年取りまとめ報告書

２０２０年３月

公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター

本報告書は、経済産業省からの委託研究として、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した、平成２７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・回収可能性調査・技術高度化開発）の成果を取りまとめたものです。

目　次

第 1 章　　緒言 1-1
1.1　事業の概要 1-1
1.1.1　事業名 1-1
1.1.2　事業目的 1-1
1.2　可逆性・回収可能性に係わる技術課題の整理 1-2
1.2.1　検討会における検討の背景と目的 1-2
1.2.2　検討会で得られた成果と開発課題 1-3
1.2.3　回収可能性に係わる技術検討のフレームワークと進め方 1-8
1.3　本事業における課題設定 1-9
1.3.1　地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発（技術的アプローチ①） 1-9
1.3.2　回収可能性の維持に伴う影響の定量化手法の整備（技術アプローチ②－１） 1-9
1.3.3　回収の容易性を高めた代替設計オプションの検討（技術的アプローチ②－１） . 1-9
第 2 章　　地下環境での実証試験の成果の要約 2-1
2.1　地下環境での実証試験 2-1
2.1.1　地下環境での回収技術の実証試験の計画 2-1
2.2　隙間充填技術の実証的整備 2-18
2.2.1　目的と課題の設定 2-18
2.2.2　隙間充填技術の実証的整備の進め方 2-18
2.2.3　下部狭隘部の隙間充填技術の実証的整備 2-19
2.2.4　上部開放部の隙間充填技術の実証的整備 2-38
2.3　隙間充填材除去技術の実証的整備 2-53
2.3.1　除去技術の整備目標と開発整備の進め方 2-53
2.3.2　除去技術の研究アプローチ 2-53
2.3.3　機械的除去技術の実証的整備 2-58
2.3.4　流体的除去技術の実証的整備 2-66
2.3.5　実証試験成果を踏まえた隙間充填材除去技術の拡張・展開の可能性 2-80
2.4　搬送定置・回収技術の実証的整備 2-84
2.4.1　搬送定置・回収技術の研究アプローチ 2-84
2.4.2　得られた成果の概要 2-87
2.5　まとめ 2-99
2.5.1　隙間充填技術の実証的整備 2-99
2.5.2　隙間充填材除去技術の実証的整備 2-99
2.5.3　搬送定置・回収技術の実証的整備 2-99
第 3 章　　回収可能性の維持の影響の定量化手法の整備 3-1
3.1　可逆性・回収可能性に係わる技術課題の整理 3-1

3.1.1　安全性への影響の定量化 3-1
3.1.2　定量化手法の整備の進め方 3-2
3.2　回収時の廃棄体容器の健全性に関する定量化方法の整備 3-7
3.2.1　定量化手法の整備の方針 3-7
3.2.2　定量化の対象の抽出 3-7
3.2.3　地層処分環境における金属材料の腐食 3-15
3.2.4　緩衝材の浸潤 3-4
3.2.5　回収時の廃棄体容器の健全性の評価手法のまとめ 3-5
3.3　回収可能性の維持に伴う影響の定量化手法の整備まとめ 3-6
第 4 章　回収の容易性向上の検討 4-1
4.1　目的と方針 4-1
4.1.1　検討の目的 4-1
4.1.2　検討の方針 4-1
4.1.3　検討の進め方と検討項目 4-2
4.2　本年度までの検討の成果 4-2
4.2.1　回収の容易性を高めた代替設計オプションを開発するためのポイントの整理 4-3
4.2.2　回収の容易性向上を図る方策の検討と整理 4-6
4.2.3　工学的方策の選択と組合せによる代替設計オプション案の構築 4-8
4.2.4　代替設計オプションの実現性の検討および今後の展開 4-10
第 5 章　結言 5-1
5.1　本事業における成果 5-1
5.1.1　地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発（技術的アプローチ①） 5-2
5.1.2　回収可能性の維持に伴う影響の定量化手法の整備（技術アプローチ②－１） 5-3
5.1.3　回収の容易性を高めた代替設計オプションの検討（技術的アプローチ②－１） . 5-4

図　目　次

図 1.2.1-1 可逆性・回収可能性のある地層処分の具体的なプロセス 1-3
図 1.2.2-1　回収方法の開発例（処分孔竪置き方式の緩衝材除去システム）[1] 1-4
図 1.2.2-2　わが国で有望とされている定置概念と状態オプションの組み合わせ 1-5
図 1.3.3-1　本事業における技術検討項目の設定 1-10
図 2.1.1-1　処分孔竪置き定置方式を対象とした緩衝材除去試験の様子 [5] 2-2
図 2.1.1-2　横置き定置方式　塩水による緩衝材除去試験の様子[9] 2-3
図 2.1.1-3　定置概念ごとの技術開発状況（※事業開始時） 2-4
図 2.1.1-4　横置き・PEM 方式の回収可能性維持の状態オプション 2-6
図 2.1.1-5　処分坑道－主要坑道間のプラグの撤去 2-7
図 2.1.1-6　坑道埋め戻し材の除去（廃棄体から離れた部分） 2-7
図 2.1.1-7　隙間充填材の除去（処分坑道内） 2-8
図 2.1.1-8　定置場所から処分坑道外への PEM の搬送 2-8
図 2.1.1-9　横置き・PEM 方式の回収作業の工程 2-9
図 2.1.1-10　大断面坑道 2-10
図 2.1.1-11　狭隘断面坑道 2-10
図 2.1.1-12　対象となる模擬 PEM の外形寸法[8] 2-11
図 2.1.1-13　PEM - 坑道間の隙間充填技術 2-11
図 2.1.1-14　PEM の搬送・定置技術 2-12
図 2.1.1-15　PEM の回収技術（定置の逆動線） 2-12
図 2.1.1-16　横置き・PEM 方式の定置／回収作業における本事業対象技術の位置付け 2-13
図 2.1.1-17　本事業での実証試験サイトの整備の基本的考え方 2-14
図 2.1.1-18　幌延 URL 試験坑道 2[11] 2-14
図 2.1.1-19　試験坑道 2 の寸法 2-15
図 2.1.1-20　整備前後の試験坑道 2 の様子[12] 2-15
図 2.1.1-21　模擬 PEM と試験坑道 2 妻壁間に配した疑似 PEM[12] 2-16
図 2.2.3-1　　幌延 URL 試験坑道 2 坑道断面(下部狭隘部充填箇所) 2-20
図 2.2.3-2　スクリューフィーダ方式による充填時のかさ密度に対する特性要因図 2-21
図 2.2.3-3　有効粘土密度 1.37Mg/m^3 を満足する充填率と充填材料粒子密度の関係 2-22
図 2.2.3-4　模擬土槽とスクリューフィーダ配置 2-25
図 2.2.3-5　初期充填、移動充填、後充填　イメージ 2-26
図 2.2.3-6　模擬土槽　上面からのサンプリング位置 2-26
図 2.2.3-7　ステップ 4 実施状況 2-27
図 2.2.3-8　下部狭隘部の隙間充填装置配置イメージ（試験坑道 2） 2-29
図 2.2.3-9　充填試験実施状況 2-29
図 2.2.3-10　地下実証試験における実充填容積 2-30
図 2.2.3-11　充填対象断面のうち下部狭隘部へのスクリューフィーダ配置状況 2-33

図 2.2.3-12　充填材圧密による押し戻し力と自重等による反力の作用のイメージ..... 2-34
図 2.2.3-13　大断面へのスクリューフィーダ方式の適用例 2-35
図 2.2.3-14　別方式による初期充填のイメージ 2-36
図 2.2.4-1　吹付け方式における隙間充填技術　特性要因図..... 2-39
図 2.2.4-2　横置き・PEM 方式における吹付け充填装置の概念設計例..... 2-39
図 2.2.4-3　吹付け方式による上部開放部の充填技術　整備手順 2-40
図 2.2.4-4　幌延 URL 試験坑道 2 上部開放部の充填範囲図..... 2-42
図 2.2.4-5　上部開放部の隙間充填に係る全体設備・機械配置..... 2-43
図 2.2.4-6　伸縮アーム式吹付け機械（MINIMEC）の仕様..... 2-43
図 2.2.4-7　吹付け機（ニードガン）の仕様 2-44
図 2.2.4-8　ジェクター（JT75S-5）の仕様..... 2-44
図 2.2.4-9　地下実証試験の吹付け状況 2-44
図 2.2.4-10　要素試験、地上試験、地下実証試験の乾燥密度結果 2-47
図 2.2.4-11　地下実証試験結果 乾燥密度の低い箇所の例（コアサンプリング）(1/2) 2-48
図 2.2.4-12　地下実証試験結果　吹付け場所による乾燥密度..... 2-48
図 2.2.4-13　地下実証試験結果 乾燥密度の低い箇所の例（コアサンプリング）(2/2) 2-48
図 2.3.2-1　除去工程に影響を与える要因「除去対象物」「空間」「除去技術」の相関 2-54
図 2.3.2-2　除去技術に関する作業を分割・具体化した概念図..... 2-55
図 2.3.2-3　地下実証試験における各々の除去技術の対象領域　試験坑道 2 断面図..... 2-56
図 2.3.2-4　流体を使用した充填材への除去技術の整理の一例..... 2-57
図 2.3.3-1　横置き・PEM 方式における機械的除去装置の概念設計例..... 2-58
図 2.3.3-2　地下実証試験に使用する機械的除去装置 オーガ方式の設計検討 2-59
図 2.3.3-3　機械的除去技術の整備手順 2-59
図 2.3.3-4　地上予備試験　説明図..... 2-60
図 2.3.3-5　製作したオーガアタッチメント 2-60
図 2.3.3-6　地上での予備試験の状況 2-60
図 2.3.3-7　機械的除去技術の地下実証試験　説明図　試験坑道 2 縦断図..... 2-61
図 2.3.3-8　機械的除去装置の配置平面図..... 2-62
図 2.3.3-9　地下実証試験　機械的除去装置 2-62
図 2.3.3-10　用語の説明　模式図 2-62
図 2.3.3-11　オーガアタッチメント　さや管なし..... 2-63
図 2.3.3-12　オーガの除去手順による作業性の確認　説明図..... 2-65
図 2.3.3-13　PEM 近傍部および坑道際での除去状況 2-65
図 2.3.4-1　横置き・PEM 方式における流体的除去装置の概念設計例..... 2-67
図 2.3.4-2　地下実証試験に使用する流体的除去装置 ウォータージェット方式の設計検討 2-67
図 2.3.4-3　流体的除去技術の整備手順 2-68
図 2.3.4-4　要素試験状況 2-69

図 2.3.4-5　地上試験ヤード 2-70
図 2.3.4-6　地上試験ヤードにおける下部狭隘部への除去対象物の充填 2-70
図 2.3.4-7　流体的除去装置の基本動作　説明図 2-71
図 2.3.4-8　流体的除去装置の各部名称等　説明図 2-71
図 2.3.4-9　各ノズルの特徴等　一覧 2-72
図 2.3.4-10　高圧水発生装置を搭載した車両、強力吸引車および吸引口 2-72
図 2.3.4-11　地上試験時の資機材配置図の全体平面図 2-73
図 2.3.4-12　半 PEM 最奥部の除去状況 2-76
図 2.3.4-13　流体的除去手順 2-76
図 2.3.4-14　機械的除去装置の配置平面図 2-77
図 2.3.4-15　地下実証試験　流体的除去 除去手順毎の除去程度 2-78
図 2.3.4-16　流体的除去完了後　コンクリート坑道面　地上試験、地下実証試験の比較 2-79
図 2.3.4-17　上部開放部に対するトルネードノズルによる除去 2-80
図 2.4.1-1　エアベアリングの作動原理 2-85
図 2.4.1-2　エアベアリング方式による PEM 回収動作概要図（定置動作は逆同線） 2-86
図 2.4.2-1　定置・回収装置　外観 2-88
図 2.4.2-2　要素試験装置　外観 2-89
図 2.4.2-3　地下実証試験時の遠隔操作実施状況 2-92
図 2.4.2-4　スタックパターン 1 のイメージ図 2-93
図 2.4.2-5　地上検証試験及び地下実証試験における表面計測結果 2-94
図 2.4.2-6　台座損傷対策案（定置部の拘束方法の変更） 2-97
図 3.1.2-1　わが国で有望とされている定置概念と状態オプションの組み合わせ 3-2
図 3.1.2-2　「基本の操業」と状態オプションによる回収可能性の維持の関係 3-3
図 3.1.2-3　基本の操業で生じる事象の時間変遷のイメージ 3-4
図 3.1.2-4　「回収可能性の維持」で生じる事象の時間変遷のイメージ 3-5
図 3.2.2-1　竪置き定置方式を対象とした緩衝材除去試験の様子 3-8
図 3.2.2-2　処分坑道横置き・PEM 方式を対象とした PEM の回収試験の様子 3-8
図 3.2.2-3　横置き定置方式を対象とした塩水による緩衝材除去試験 3-9
図 3.2.2-4　オーバーパックの閉じ込め性に係る因子の整理 3-10
図 3.2.2-5　遮蔽性に係る因子の整理 3-12
図 3.2.2-6　PEM 容器の製作検討の例　左：半割れ方式　右：鋼殻リング方式 3-13
図 3.2.2-7　鋼殻リングの構造（No.6 リング） 3-13
図 3.2.3-1　炭素鋼オーバーパック溶接部の腐食因果時系列系統図 3-16
図 3.2.3-2　オーバーパックの腐食に影響する環境因子 3-17
図 3.2.3-3　わが国で有望とされている定置概念と状態オプションの組み合わせ 3-18
図 3.2.3-4　炭素鋼の腐食挙動評価における、間隙水の化学組成の検討イメージ 3-1
図 3.2.3-5　ベントナイト系材料の化学的緩衝作用 3-3
図 3.2.5-1　処分孔竪置き方式のオーバーパックの腐食挙動の定量化方法 3-5

図 4.2.1-1　竪置き・ブロック方式における処分場の状態と回収作業の大工程と中工程... 4-3
図 4.2.1-2　中工程 B-1 : 力学プラグの撤去における小工程ごとの時間短縮に向けた作業上の留意点・課題および工夫のポイント 4-4
図 4.2.2-1　“容易性向上のポイント 1. プラグ、埋め戻し材、充填材、緩衝材の撤去作業量を削減”から展開した工学的方策および手段の例 4-6
図 4.2.2-2　容易性向上のポイントから展開した工学的方策の集約 4-7
図 4.2.2-3　回収の容易性を向上させる方策の相互関係の分析結果 4-8
図 4.2.3-1　代替設計オプションの概要と具体的なイメージのまとめ 4-9
図 4.2.4-1　提案する代替設計オプションの整備の過程 4-10
図 4.2.4-1　本事業における技術開発成果のイメージ 5-1

表　目　次

表 1.2.2-1 回収の容易性を設計に考慮する際の多様な方法の例 1-5
表 1.2.3-1　回収可能性の維持に関する技術的アプローチの具体化に係る技術検討の枠組み 1-8
表 2.2.3-1　各影響要因に関連する影響因子の検討結果 2-21
表 2.2.3-2　ブリケッティングによる造粒ペレットの粒子密度 2-23
表 2.2.3-3　ロールプレスによる造粒ペレット（シート状）の粒子密度 2-23
表 2.2.3-4　地上での段階的な技術実証の目的、実施条件および成果の概要 2-24
表 2.2.3-5　ステップ３　試験実施手順 2-25
表 2.2.3-6　ステップ４　試験結果の概要 2-27
表 2.2.3-7　充填試験結果整理表：4-2（T-1～T-3）バルク 2-27
表 2.2.3-8　ステップ４試験ケース 4-2 の施工条件と実績 2-28
表 2.2.3-9　地下充填実証試験の施工条件 2-28
表 2.2.3-10　地下実証試験結果 2-30
表 2.2.3-11　地下実証試験結果とステップ４の結果との比較 2-30
表 2.2.4-1　「かさ密度（乾燥密度)」に影響を与える要因・因子の整理 2-38
表 2.2.4-2　ベントナイト混合土の仕様および吹付け機の運転条件等 2-41
表 2.2.4-3　段階的な技術実証の成果概要 2-41
表 2.2.4-4　3 種類の計測手法の乾燥密度結果（地上試験、地下実証試験） 2-45
表 2.2.4-5　要素試験、地上試験、地下実証試験での団粒材除去率 2-45
表 2.2.4-6　要素試験、地上試験、地下実証試験でのリバンウンド率 2-46
表 2.2.4-7　要素試験、地上試験、地下実証試験での施工速度 2-47
表 2.3.2-1　本研究における機械的除去技術の選定検討 2-56
表 2.3.3-1　除去対象とする隙間充填材（充填時の目標乾燥密度および設定含水比） 2-58
表 2.3.3-2　機械的除去装置の運転条件 2-61
表 2.3.3-3　アースオーガによるほぐしの施工速度 2-63
表 2.3.3-4　真空吸引装置よる撤去（吸引）の施工速度 2-64
表 2.3.3-5　オーガの除去手順による施工効率の比較結果 2-65
表 2.3.4-1　除去対象とする隙間充填材（充填時の目標乾燥密度および設定含水比） 2-66
表 2.3.4-2　供試体作製条件 2-69
表 2.3.4-3　除去装置の仕様 2-71
表 2.3.4-4　使用機械一覧 2-72
表 2.3.4-5　ノズルの種類と切削性・掻き出し性 2-74
表 2.3.4-6　除去装置の円弧状移動速度 2-74
表 2.4.1-1　定置・回収装置の整備方針 2-85
表 2.4.1-2　定置・回収装置の設計条件 2-86
表 2.4.1-3　本事業における搬送定置・回収技術の整備計画 2-87

表 2.4.2-1　鋼製坑道試験における押引力及び摩擦係数 2-89
表 2.4.2-2　地下要素試験における目標浮上量、重量及び圧力と走行可否の関係 2-89
表 2.4.2-3　地下要素試験における荷重・浮上量・走行面に対する供給空気流量・圧力 . 2-90
表 2.4.2-4　地上検証試験における路面別の押引力（摩擦係数）と鋼製面との比較 2-91
表 2.4.2-5　地下実証試験における浮上量、流量及び圧力 2-91
表 3.1.1-1　回収可能性の維持に関する技術的アプローチの具体化に係る技術検討の枠組み 3-1
表 3.2.3-1　回収可能性の維持期間中の金属材料の腐食環境 3-19
表 4.1.1-1　回収の容易性を設計に考慮する際の多様な方法の例[1] 4-1
表 4.2.1-1　回収の容易性向上の視点と容易性向上のポイント 4-5
表 4.2.1-2　竪置き･ブロック方式の小工程から抽出された工夫のポイントに対応する容易性向上のポイントの整理 4-5

第1章　緒言

1.1　　事業の概要

1.1.1　事業名

本報告書は以下の５ヵ年の事業成果を取りまとめたものである。

平成２７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２８年度地層処分技術調査等事業（可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）

平成２９年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）

平成３０年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）

平成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・回収可能性調査・技術高度化開発）

1.1.2　事業目的

我が国において、これまでの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に係る研究開発については、国、関係研究開発機関ならびに実施主体等が、それぞれの役割分担を踏まえつつ、密接な連携の下で、基盤研究開発を着実に進めていくことが重要である。

平成２６年４月のエネルギー基本計画においては、高レベル放射性廃棄物の問題の解決に向けた取組の抜本強化として、「地層処分を前提に取組を進めつつ、可逆性・回収可能性を担保し、今後より良い処分方法が実用化された場合に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする。」、「処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等について調査・研究を進め、処分場閉鎖までの間の高レベル放射性廃棄物の管理の在り方を具体化する。」との方針が示された。

また、平成２６年５月の総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会放射性廃棄物ＷＧ（以下、「廃棄物ＷＧ」という）においても、「最終処分に向けた取組を進める上では、数世代にも及ぶ長期的な事業であることから、可逆性・回収可能性を担保し、将来世代も含めて最終処分に関する意思決定も見直せる仕組みとすることが不可欠」と示されている。諸外国においては、我が国に先行して可逆性・回収可能性を担保したプロセスへの見直しが検討・導入されつつあり、我が国においても最終処分における可逆性・回収可能性の意義や具体的な確保のあり方、必要な技術に関する検討が必要である。

処分場の操業や回収などに係る工学技術については、これまでに資源エネルギー庁での基盤研究開発（具体的には平成１９年から２４年まで実施した地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発）及び、平成２５年から２６年まで実施した地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発））において、操業における中核技術として、遠隔搬送・定置に関する技術調査や要素試験ならびに地上での適用試験などを通して、地質環境条件や様々な処分概念への対応を見据えた基盤技術としての整備が進め

られてきた。また、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の１つである塩水を利用した緩衝材除去技術について、地上での緩衝材除去試験をとおして適用性の検討が実施されてきた[1]。さらに、人工バリア材料や処分場の操業に係る工学技術の実現性、操業技術、回収技術等を対象とした人工バリア材料等を用いた実規模試験施設を資源エネルギー庁の委託事業（具体的には、平成２０年から２５年まで実施した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））において整備してきた[2]。これまでの開発経緯を踏まえた回収技術の高度化という観点では、今後、実際の地下環境での搬送定置・回収技術に関する原位置試験をとおした処分場の操業に関連する工学技術の整備・実証が必要である。

これらを背景として、本事業では、これまで開発してきた搬送定置・回収技術に関する、地下環境における適用性の確認およびそれに向けた技術の実証的な整備を通じて、国民の地層処分技術に関する更なる安心感の醸成を図るとともに、我が国の最終処分政策への反映に向けて、可逆性・回収可能性の概念や技術の整備を進める。

1.2　可逆性・回収可能性に係わる技術課題の整理

平成２７年度及び平成２８年度に「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会」（以下、「検討会」という。）を設置し、多面的な検討を実施した。可逆性・回収可能性に関する我が国における今後の具体的な制度の運用や研究開発の推進に向けて更なる検討が必要と考えられる事項を整理した[3]。

1.2.1　検討会における検討の背景と目的

廃棄物ＷＧにおける中間とりまとめ（２０１４年５月）[4]では、“可逆性・回収可能性が適切に担保されるのであれば、現世代として地層処分に向けた取組を進めることは、最も適切な対処方策である”、“数世代にも及ぶ長期的な事業であることから、可逆性・回収可能性を担保し、将来世代も含めて最終処分に関する意思決定を見直せる仕組みとすることが不可欠”との見解が示された。この中間取りまとめにおいて、「処分場閉鎖を行う時期は、処分場を閉鎖せずに安全に管理可能な期間がどの程度であるか調査研究を行った上で、その範囲内で、地元の意向等も踏まえ、決定・見直しをする」と示されており、回収可能性の維持期間の決定に資する技術情報を提供するため、回収可能性の維持に伴う影響の定量化が必要とされている。

こうした議論を踏まえ、２０１５年５月に改定された基本方針は、地層処分事業における可逆性・回収可能性について、次のように示している[5]。

> ○今後の技術やその他の変化の可能性に柔軟かつ適切に対応する観点から、基本的に最終処分に関する政策や最終処分事業の可逆性を担保することとし、今後より良い処分方法が実用化された場合等に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする。このため、機構（原子力発電環境整備機構）は、特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性（回収可能性）を確保するものとする。
>
> （「第４　特定放射性廃棄物の最終処分の実施に関する事項」からの抜粋）

○最終処分施設を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等について調査研究を進め、最終処分施設の閉鎖までの間の特定放射性廃棄物の管理の在り方を具体化する。
（「第５　特定放射性廃棄物の最終処分に係る技術の開発に関する事項」からの抜粋）

以上のように、我が国の地層処分事業の段階的な進め方において、安全性の確保を前提とした処分施設の閉鎖段階までの回収可能性の確保及び政策や事業に関する可逆性の担保が位置付けられたところであるが、我が国における今後の具体的な制度の運用や研究開発の推進に向けて更なる検討が必要と考えられる事項（論点）について整理しておくことは重要であるとの認識から本検討会において議論を進めた。

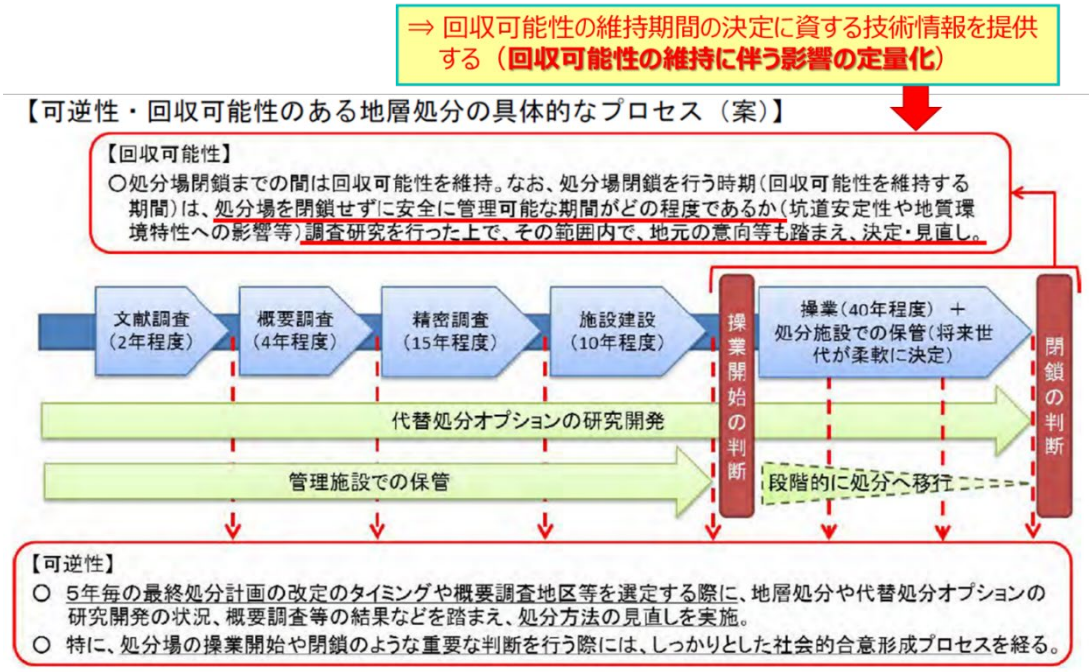


図 1.2.1-1 可逆性・回収可能性のある地層処分の具体的なプロセス
（廃棄物 WG 中間取りまとめ）

1.2.2　検討会で得られた成果と開発課題

検討会での多面的な議論の成果は、可逆性・回収可能性の制度としてのあり方、回収可能性に関する技術的アプローチのあり方、当面の進め方と関係組織の役割の３つの観点で整理した。本項では、本事業と関連する回収可能性に関する技術的アプローチの観点から整理した結果を紹介する。

(1)　回収可能性に関する技術的アプローチの考え方

経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）が主導したプロジェクト（以下、「R&R プロジェクト」という）の議論をとおして、地層処分が有する特徴や概念に対して、“閉鎖後の一定期間までは回収が技術的に可能である”との国際的な共通認識がある。そのような認識のもと、回収の実現性に関する議論が回収の容易性に関する議論へと帰結する可能性が示唆されるとと

もに 、回収可能性の実現性を示しいくうえでの２つの技術的な取組の方向性（戦略）が示されている[6]。

“処分場開発を進める中で、回収可能性に関する戦略的な意思決定を行う必要がある。つまり、処分場の設計は変更せずに回収方法の開発に重点をおくのか、或いは回収を容易にするために設計変更に重点をおくのかという点である（A strategic decision is needed during the repository development process as to whether efforts in this area should be focused on retrieval methodologies from an unmodified repository design, or on modifications to the design in order to facilitate later retrieval”

上記の“回収可能性に関する戦略”とは、地層処分が持つ安全確保の基本概念（受動的に安全な状態への速やかな移行）に対して、新たに追加された回収可能性の確保という要求への技術的な対応の方向性を示すものである。ここではこれを“技術的アプローチ”と称し、上述した国際的に共有されている考え方を踏まえると、今後、我が国でも採用し得るものとして、次の２つの共存可能な技術的アプローチが存在し得る。

1)　技術的アプローチ１：回収方法（技術･装置）の開発に重点をおくアプローチ

本アプローチは、処分場の設計の種類や内容を問わず、図 1.2.2-1 に示すような回収実施の際に必要となる回収方法（技術・装置）を開発しておくアプローチである。例えば、受動的に安全な状態への速やかな移行を前提とした処分場の設計開発を先行させてきたスウェーデンやフィンランドがこれに相当する取組を進めてきたと言える。

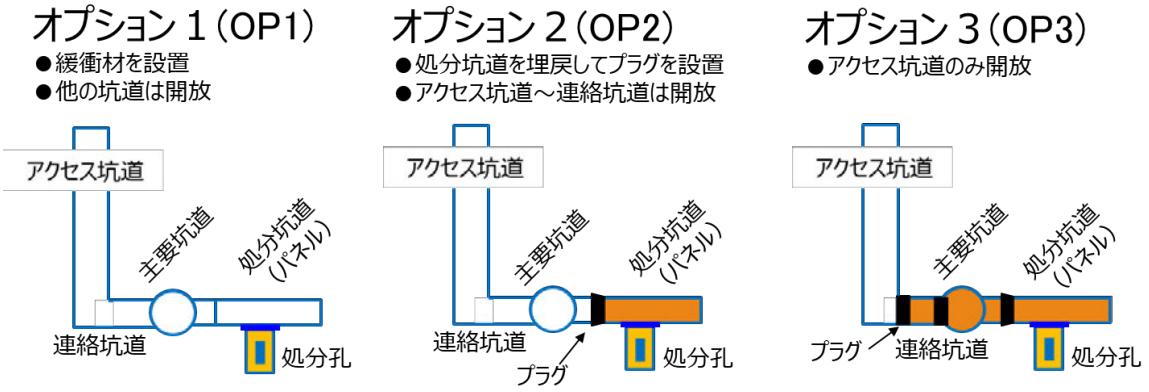
図 1.2.2-1　回収方法の開発例（処分孔竪置き方式の緩衝材除去システム）[1]

2)　技術的アプローチ２：回収をより容易にするための方法を設計に考慮するアプローチ

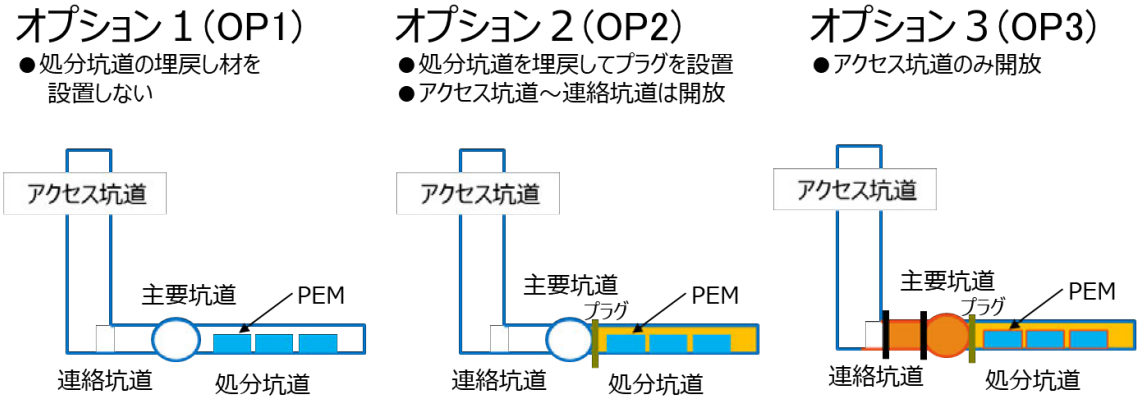
本アプローチは、回収をより容易にするための方法や程度との関係で、表 1.2.2-1 に示すような多様な考え方や方法が想定される。例えば、回収の容易性を坑道の埋め戻し状態の工夫によって考慮する方法の例を図 1.2.2-2 に示す。同図は、施設の最終閉鎖までの回収可能性の維持期間内において想定し得る埋め戻し状態の種類を概念的に示すものである。例えば、坑道が埋め戻されていない状態オプション１では、廃棄体までのアクセス性の観点では、回収時に坑道の再掘削が不要となるため、回収がより容易となることが示唆される。

表 1.2.2-1 回収の容易性を設計に考慮する際の多様な方法の例

設計への考慮の考え方	設計への考慮の方法の例（操業手順の設定等を含む）
①回収可能性の維持期間内において、廃棄体へのアクセスを容易にしておく ②回収可能性の維持期間内において、可能性のある将来の回収作業が容易となるようにしておく	○回収の容易性を坑道の埋め戻し状態を工夫することで考慮する（廃棄体を完全に埋め戻さない設計など：図 1.2.2-2） ○操業手順を工夫する ○回収時に解体・破壊しやすい地下構造物を導入する（材料選定の工夫など） ○回収の容易性を念頭に置いたレイアウトや坑道寸法設計、定置方法を工夫する、など



処分孔竪置き方式



処分坑道横置き・PEM 方式

図 1.2.2-2　わが国で有望とされている定置概念と状態オプションの組み合わせ

(2)　我が国における回収可能性に関する技術的アプローチのあり方

我が国では、例えば本事業のように、基本方針で示されている回収可能性を維持した場合の影響等に関する調査研究や回収技術の開発が進められているところである。今後、候補サイトの地質環境の具体化に併せて、処分場の設計とともに回収可能性に関する技術的アプローチを具体化していく必要がある。(1)に示した回収可能性に関する技術的アプローチの考え方や特徴を踏まえると、今後、我が国で採用し得る技術的アプローチについて次のように考えられる。

✧　２つの技術的アプローチが共存可能なものであることから、これらを効果的に組合せて進めることができる。特に、表 1.2.2-1 に示すような多様な方法が想定される技術的アプローチ２については、今後の事業展開に伴う設計開発の進展や社会のニーズに留意しつつ、これらの導入の可否に関する検討を進めていくことが望ましい。これについては、今後、候補サイトの地質環境条件の具体化に伴い、様々な考え方が出てくることが想定される。ただし、これらの採用し得る技術的アプローチの種類や内容に応じて、技術的に留意すべき事項が異なる。例えば、図 1.2.2-2 に示すような処分概念オプションや坑道の埋め戻し状態よって、技術的に留意すべき事項は異なる。

✧　OECD/NEA の R&R プロジェクトで示された国際的な共通理解から示唆されるように、回収可能性を維持することに対して、安全性、回収の容易性、回収の実施時期（回収可能性の維持期間）や費用などの間で、トレードオフの関係が存在し得る。これらの関係は、採用する技術的アプローチの種類や内容によって異なる。適切な技術的アプローチを選択するためには、これらの関係をより定量的に示していく必要がある。

以上のような考え方を踏まえ、今後、我が国における回収可能性に関する技術的アプローチの具体化を行い、技術的な取組を進めていく必要がある。その際、特に回収をより容易にするための方法を設計に考慮する際には、事業進展に伴い最適化される処分場設計の開発プロセスのなかで整合性を確保するだけでなく、可逆性・回収可能性に関する社会のニーズの変化への対応などに留意しつつ、柔軟に進めていく必要がある。

(3)　回収可能性に係るトレードオフに対する定量化すべき情報の整理

前述した技術的アプローチの具体化においては、採用する技術的アプローチの種類や内容によってトレードオフの関係が異なることから、適切な技術的アプローチを選択するためには、これらの関係をより定量的に示していく必要がある。そのような定量的な情報を示していくことで、更なる議論を深めることが可能となる。

このような課題認識のもと、定量化に向けた技術的な検討を進めるうえでの出発点となる技術検討項目を具体化した。その際、まずは現時点でトレードオフの関係にあると想定される、“安全性”、“回収の容易性”、“回収の実施時期（回収可能性の維持期間）”ならびに“費用”の４つの項目を設定する。既に述べたように、これらは国際的な共通理解から示唆されている項目である。

1)　安全性への影響

安全性への影響とは、一定の確保すべき安全性のレベルに対してどのような影響があるかということを指す。確保すべき安全性のレベルについては、今後整備される安全規制制度からの要求が、その指標の１つになると考える。安全性は、操業期間中の安全性と、閉鎖後長期の安全性の２つの視点に分けることができる。更に、前者は回収可能性維持期間中の安全性と回収作業時の安全性に、後者は地層処分の安全性を支える人工バリアと天然バリアに分けることで、対象や事象、課題の位置付けを明確にすることができる。

2)　回収の容易性（回収作業時間）

回収の容易性を示すものとして、廃棄体へのアクセス性、回収作業の技術的な複雑さ、それに要する時間や費用など、幾つかの次元の異なる指標が想定される。ここでは回収の容易性を示す指標の１つとして、定量化が可能である“回収作業時間”を設定する（回収費用については、それを包含する回収可能性に係る費用として、下記 4）の“回収可能性に係る費用”として設定する)。回収作業時間は、単位ユニットあたりの回収時間と、全ての廃棄体回収に係る全体作業時間の２つに細分できる。例えば、複数の坑道での並行した回収作業の実施や回収作業時の地下の共用施設の利用など、その合理的な回収作業を考える場合に両者は単純比例の関係ではないことに注意が必要である。

3)　新たに追加で設けられる可能性のある回収可能性の維持期間

国際的な共通理解では、“回収の実施時期”がトレードオフに関係する項目の１つとして示唆されている。基本方針で示された課題である施設閉鎖までの管理のあり方の具体化との関係から、これを“新たに追加で設けられる可能性のある回収可能性の維持期間”と読み替える。今後、候補サイトの地質環境条件等が与えられ、反復的な設計開発プロセスを進めるなかで、上記の安全性への影響（特に閉鎖後長期の安全性への影響）に関する技術検討を通して、“安全性に有意な影響を及ぼさない期間”として定量化する。

4)　回収可能性に係る費用

回収可能性に係る費用は、操業期間中の回収可能性の維持に要する費用と、回収実施が決定された場合の回収作業に要する費用で構成される。上記 1)から 3)の技術検討を含め、今後の事業進展に伴って最適化・具体化される処分場の設計に基づき定量化する。

費用はトレードオフの関係にある項目の１つであるととともに、将来の可逆性・回収可能性の実行に係る費用負担のあり方に関する議論を深めるためにも、その定量化が必要となる。

(4)　定量化に必要となる技術検討項目の具体化

今後の技術的アプローチの具体化に必要となる定量的な情報を想定し、それらの定量化に必要となる技術検討項目を具体化した。ここでの技術検討項目は例示であり、今後の事業の進展に伴い具体化される処分概念や設計、或いは今後の技術の進展に伴う変化の可能性を踏まえた、現時点で想定される処分概念オプションに基づく整理の結果である。よって、今後の更なる議

論や技術検討を進める上での“**検討のベース**”という位置で付けであることに留意されたい。

1.2.3　回収可能性に係わる技術検討のフレームワークと進め方

(1)　技術検討のフレームワーク

1.2.2(4)で具体化した回収可能性の維持に係る技術検討項目を、図 1.2.2-2 に示す２つの定置概念、３つの維持の状態オプションに対してマトリクッス形式で整理したものを表 1.2.3-1 に示す。同表の白抜き部分に定量的な情報を与えていくことで個々のトレードオフの関係を具体化でき、今後採用し得る技術的アプローチに関する総合的な比較評価が可能となる。

表 1.2.3-1　回収可能性の維持に関する技術的アプローチの具体化に係る技術検討の枠組み

定量化すべき情報		回収可能性の維持に関する技術的アプローチ（図 1.2.2-2）					
		処分孔竪置き方式			処分坑道横置き・PEM 方式		
		OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3
1.安全性への影響	(1)操業期間中の安全性への影響						
	①回収可能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響						
	②回収作業時の安全性への影響（回収を実施する場合）						
	(2)閉鎖後長期の安全性への影響 回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合の、人工バリアや天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響						
2.回収の容易性（回収作業時間）	(1)単位ユニットあたりの回収時間（廃棄体1体又は処分坑道1本）						
	(2)全ての廃棄体回収に係る全体作業時間						
3.最終閉鎖せずに回収可能性を維持できる期間							
4.回収可能性に係る費用							

同表には更に、定量化すべき情報の個々に対応する形で、定量化に必要となる技術検討項目を例示している。これらの項目は、今後の検討や調査研究の進捗に応じて、更なる議論や必要な見直しが行われる。

表 1.2.3-1 のような整理は、今後の技術的な検討の出発点として、当面の課題である回収可能性に関する技術的アプローチの具体化を念頭において整理したものであるが、将来の判断等の場面でも共通的に利用できる評価の枠組みの基盤を提供するものである。また、同表に例示した定量化に必要となる技術検討項目に基づき、今後必要となる研究開発課題の抽出や計画立案が可能となる。このような考えのもと、同表の整理を、回収可能性の維持に関する技術的アプローチの具体化に係る技術検討の枠組みを示す“技術検討のフレームワーク”（以下、「フレームワーク」という）と位置付け、今後の更なる議論や技術検討を進めるうえでの検討のベー

スとして活用されることを期待する。また、今後整備される安全規制との関係を含めて、ここで示したフレームワークは、事業推進や安全規制を問わず、可逆性・回収可能性を導入した地層処分事業を今後進めていくうえでの共通的な基盤と考える。

1.3 本事業における課題設定

「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会」で検討・整理した、我が国における可逆性・回収可能性に対する技術的アプローチに基づき、本事業の課題を以下のように設定した。図 1.3.3-1 に本事業における技術検討項目の位置付けを示す。

1.3.1 地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発（技術的アプローチ①）

我が国では竪置き方式と横置き・PEM 方式の２つの定置概念が有望とされ、様々な技術開発が進められている。竪置き方式については、ブロック方式の緩衝材の定置技術からオーバーパックの回収に関連する緩衝材の除去技術まで、実規模スケールでの技術の実証試験が地上で実施されている。一方、横置き・PEM 方式については、定置装置についてはエアベアリング方式の要素試験が実施され、隙間充填については小型の模擬土槽を用いたペレット充填時の充填率・密度計測にとどまっている。

本事業では多様な定置概念・方式に対する操業技術の検討・整備を目的とし、横置き・PEM 方式について、PEM の搬送・定置技術、PEM - 坑道間の隙間充填技術、隙間充填材の除去技術、PEM の回収技術を技術開発の対象とする。さらに、実際の地下環境における技術の適用性や、地下特有の課題の抽出も考慮し、実規模スケールでの地下環境で実証を実施する。

回収作業の技術の範囲は、坑道の再掘削、定置場所から地上までの搬出、その後の廃棄体の扱い方の在り方まで多岐にわたるが、本事業では、回収作業のポイントとなる定置場所から処分坑道外への搬出の範囲を扱う。

1.3.2 回収可能性の維持に伴う影響の定量化手法の整備（技術アプローチ②－１）

回収可能性の維持に伴う影響の設計上の考慮が無い、現行の竪置き方式、横置き・PEM 方式について、回収可能性を維持に伴う影響を定量化する手法の検討・整備を行う。課題の設定は、検討会で整理されたトレードオフの関係にあるもののうち、操業期間中の作業安全や閉鎖後長期の安全性に係わるものを対象とする。定量化する項目は 1.2.2(4)にて具体化したものを検討の起点とする。なお、定量化項目に含まれる「c. 操業段階に適用する技術の具体化」は、技術的アプローチ①で扱うものとして、検討対象から除外した。

1.3.3 回収の容易性を高めた代替設計オプションの検討（技術的アプローチ②－１）

表 1.2.2-1 に整理した回収の容易性を設計に考慮する際の多様な方法の例のうち、坑道の埋戻し状態の工夫以外の観点による回収容易性を高めた代替設計オプションの検討を行う。

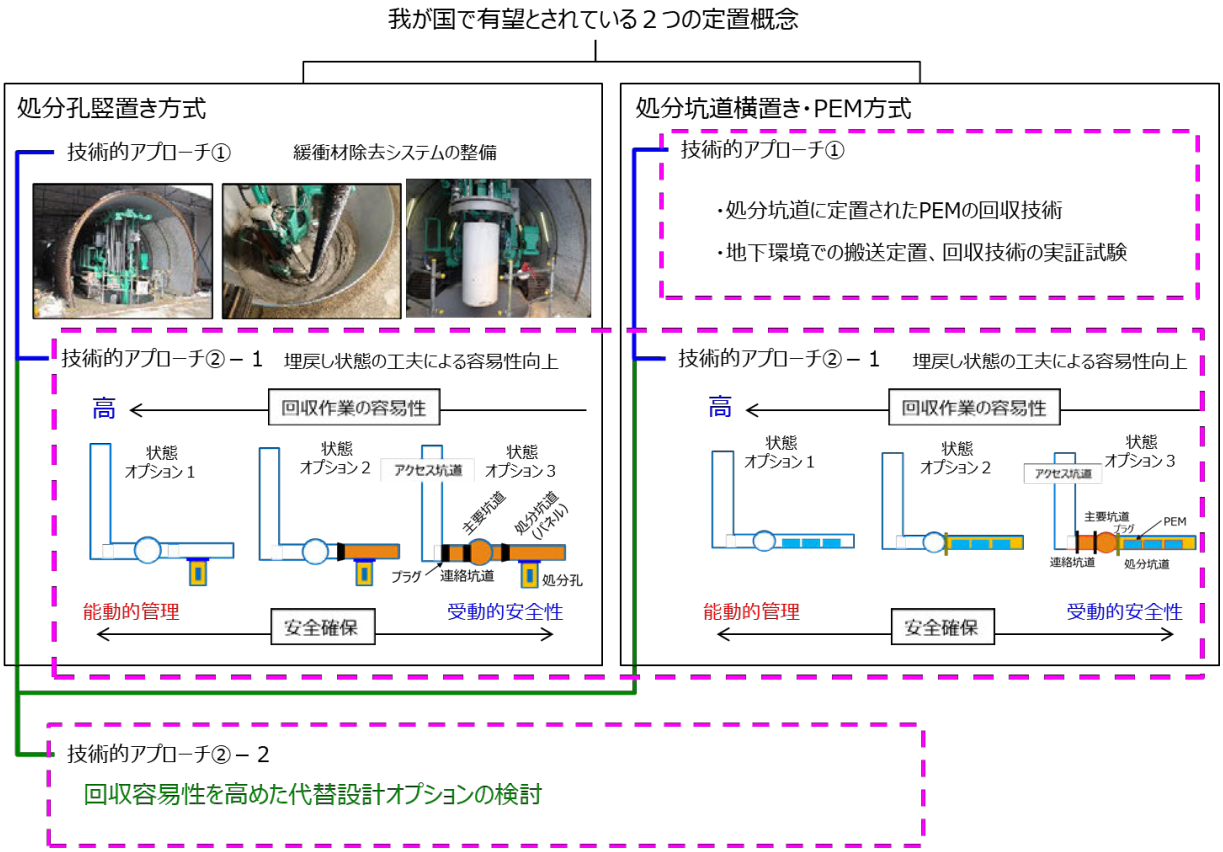


図 1.3.3-1　本事業における技術検討項目の設定

第 1 章　参考文献

[1]　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 26 年度地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）平成 23 年度～平成 26 年度　総括報告書，2015.

[2]　原子力環境整備促進・資金管理センター：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、2014.

[3]　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書（別冊）可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理について、2018.

[4]　総合資源エネルギー調査会 : 放射性廃棄物 WG 中間取りまとめ、総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会放射性廃棄物ワーキンググループ、2014.

[5]　特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（改定）

[6]　OECD/NEA：Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel Final Report of the NEA R&R Project、2011.

[7]　原子力発電環境整備機構：包括的技術報告，わが国における安全な地層処分の実現
－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－（レビュー版）【本編・付属書】、NUMO-TR-18-03，2018.

第2章　地下環境での実証試験の成果の要約

本章では我が国で有望とされている２つの定置概念に対して、回収方法（技術･装置）の開発に重点をおく技術アプローチよる検討および実証試験の成果をまとめたものである。

2.1　地下環境での実証試験

2.1.1　地下環境での回収技術の実証試験の計画

高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る工学技術として、地層処分施設の建設に関わる技術、地上施設での人工バリアの製作技術、地下施設への廃棄体の定置技術や緩衝材の施工技術、定置後の坑道の埋戻し技術などが挙げられる。本事業では、最終処分施設の閉鎖までの廃棄物搬出の可能性（回収可能性）を確保するための技術を対象として、地下研究施設を活用した実証試験を通じて、地層処分技術や可逆性・回収可能性に関する施策に対する国民の信頼感の醸成に資することを目的としている。本節では試験の位置付けや前提条件等を整理する。

(1)　実証試験の計画策定における方針

地下環境での搬送定置・回収技術の実証試験計画の策定に際し、成果として以下の３項目に留意した。

1)　多様な定置概念に対する技術の実証的整備

わが国における高レベル放射性廃棄物の地層処分では、処分坑道に掘削された処分孔に人工バリアを定置する処分孔竪置き方式と、処分坑道に横向きに人工バリアを定置する処分坑道横置き方式の 2 種類が有望な定置概念として検討されている。また、人工バリアについては、オーバーパックと緩衝材（様々な施工技術が検討されている）を地下に搬入して原位置で施工する方法と、地上施設で予め組立てる方法（Pre-fabricated Engineered barrier system Module、以下「PEM」という）など、多様な定置概念・方式に対する操業技術の検討や技術開発が行われている。回収技術についても、多様な定置概念・方式に対して整備を行う。

2)　地下環境での操業技術の実証的整備

実際の処分事業では定置作業や回収作業は地下環境で実施される。実際の地下環境で地層処分に係る操業・回収技術が実施できることを示す。

3)　操業・回収技術の適用性評価に資するデータの取得

本事業では、上述した目的の達成に加え、将来の地層処分事業（特定されるサイトでの処分場の操業）で適用される技術の開発整備に資するために、上記の 1)2)を客観的な事実に基づいて示すこととする。特に、本事業で仮定した条件の影響、現段階における技術の選定や適用性の向上に資する試験データ及び設定根拠ならびに開発技術の効率など、実証試験に至る各種の取組の成果の整理に留意する。

(2)　これまでの技術整備の状況の整理および技術開発の対象の設定

高レベル放射性廃棄物の廃棄体はガラス固化体であるが、地上施設で金属製容器であるオーバーパックに封入された形態での扱いとなる。人工バリアの構築法としてオーバーパック及び緩衝材をそれぞれ地下に搬入して地下で組み立てる方式と、地上施設で予め人工バリアとして組立てた PEM（Pre-fabricated Engineered barrier system Module）を地下に搬入・定置する方式が検討されている。わが国では、処分孔竪置き方式と処分坑道横置き・PEM 方式の２つが現時点で有望な定置概念とされており、これらを対象とした様々な技術検討が進められている[2]。本項では実証試験の対象とする定置方式を抽出するため、高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る技術開発の状況を整理した。

1)　竪置き方式に関わる技術開発の状況

処分坑道から下方に掘削された処分孔内への緩衝材の施工技術として、ブロック方式、吹付け方式、原位置締固め方式などが検討されている。このうちブロック方式については、「地層処分実規模施設整備事業」において真空把持機構を有する緩衝材定置装置の開発、実物の緩衝材ブロックを用いた実規模スケールでの定置試験を行い、竪置き・ブロック方式の技術的実現性を実証的に示した[3]。本方式に対する回収技術の一つに、処分孔内に緩衝材とともに定置されたオーバーパックを電解質溶液による緩衝材の崩壊効果を利用して回収する方式がある[4]。本方式は、オーバーパックに損傷を与えずに周囲の緩衝材を除去するものであり、噴射吸引設備、塩水リユース設備、遠隔操作設備から構成される。それらの設備一式は、緩衝材除去システムとして開発され、地上施設における実規模スケールでの緩衝材の除去という技術実証をとおして、その技術的実現性を示した[5]。図 2.1.1-1 に地上施設で実施した実規模スケールでの緩衝材除去試験の様子を示す。

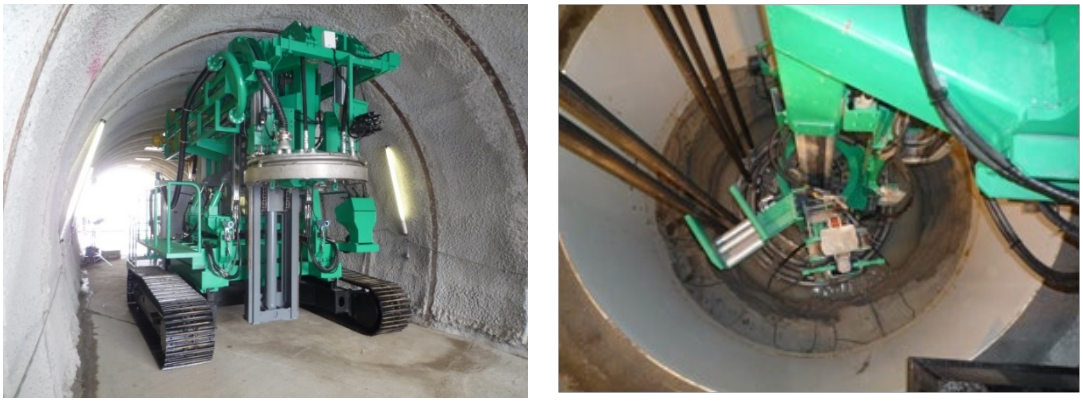


図 2.1.1-1　処分孔竪置き定置方式を対象とした緩衝材除去試験の様子 [5]

2)　横置き方式に関わる技術開発の状況

処分坑道に人工バリアを定置する横置き方式については、その施工技術として、スクリューフィーダー方式によるペレット充填による緩衝材の施工試験[6]やブロックの組立試験などがこれまでに実施されている[7]。これらの取組をとおして認識された課題（例えば、横向き姿勢での人工バリアの定置作業における品質管理の難しさなど）への対処方法の一つとして、PEM

方式による人工バリアの定置技術の開発が進められた[7][8]。PEM 方式では作業空間（厚壁との隙間）が狭くなる可能性に留意して、エアベアリング方式による定置技術[8]や、定置後に残された狭隘な隙間への大小真球ペレットによる充填技術[7]など、PEM 方式に対する定置作業に関連する要素技術の開発が進められた。

横置き方式に対する回収技術については、竪置き・ブロック方式と同様に緩衝材を除去してオーバーパックを回収する方式の要素試験が実施されている[9]。竪置き・ブロック方式と作業姿勢が横向きという点で異なるが、ハンドリング及びオーバーパックを拘束する緩衝材の除去手順等を除けば、基本となる緩衝材の除去技術は同じである。図 2.1.1-2 に横置き方式での塩水による緩衝材の除去試験の様子を示す。PEM に対してこの方式を適用する場合には、PEM 外殻容器を切開し内部の緩衝材を除去した後にオーバーパックを回収し、残存した外殻容器を撤去するという回収工程になる。一方で、廃棄体を PEM の形態で（外殻容器ごと）回収するための技術については、本事業の開始段階では未整備であった。

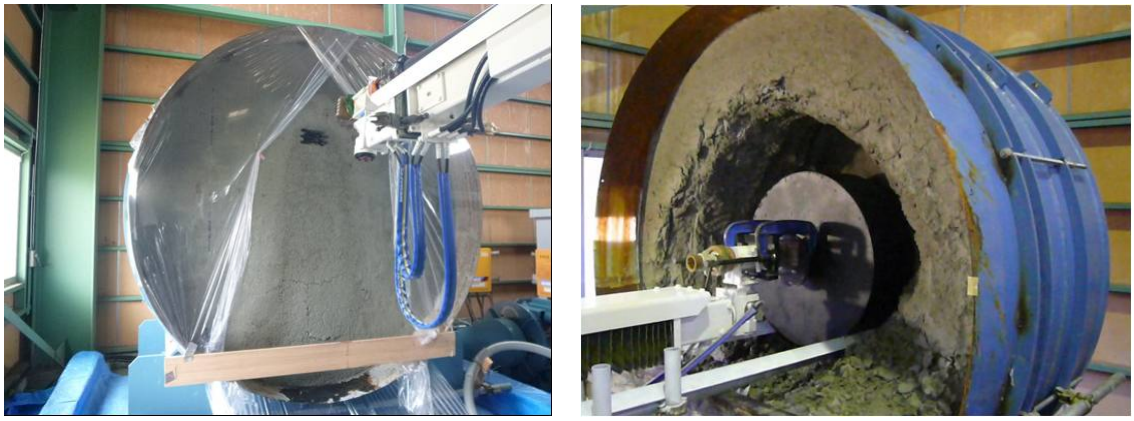


図 2.1.1-2　横置き定置方式　塩水による緩衝材除去試験の様子[9]

3)　本事業で実証試験の対象とする廃棄体の形態

これまでの技術開発状況を図 2.1.1-3 に概念的に示した。竪置き方式については、ブロック方式の緩衝材の定置技術からオーバーパックの回収に関連する緩衝材の除去技術まで、実規模スケールでの技術の実証試験が地上で実施されている。一方、横置き方式については、地上での要素技術の整備に留まっている。横置き・PEM 方式で PEM の形態で回収する場合、PEM - 坑道間の隙間充填材の除去技術、重量物である PEM の搬出技術が必要となる（図中では定置装置を使用した逆動線での回収作業を示している）。

高レベル放射性廃棄物の 2 種類の定置方式への対応、回収時の廃棄体の形態の違いなど、回収に係る技術オプションを整備する（選択肢を増やし選択の柔軟性を高めておく）という観点から、本事業では横置き・PEM 方式での PEM の形態での回収技術を技術開発の対象とした。

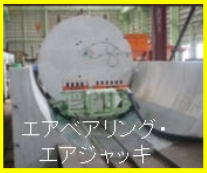
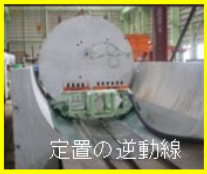
<table>
<tr><th rowspan="2">処分概念</th><th colspan="4">操業に必要な技術</th></tr>
<tr><th>搬送定置</th><th>隙間充填</th><th>緩衝材除去</th><th>回収</th></tr>
<tr><td>竪置き方式</td><td>
緩衝材定置設備</td><td>充填装置</td><td>
緩衝材除去装置</td><td>
廃棄体引上げ機構</td></tr>
<tr><td>横置き方式</td><td> 
エアベアリング・
エアジャッキ</td><td>充填装置
 </td><td>充填材除去装置</td><td> 
定置の逆動線</td></tr>
</table>

図 2.1.1-3　定置概念ごとの技術開発状況（※事業開始時）

(3)　前提条件の整理～本事業で対象とする回収技術～

回収技術の開発整備に際して、対象とする技術の特定に向けて、工程の範囲や実際の回収する場面を想定（仮定）する必要がある。PEM の形態での回収技術の開発整備に先立ち、このような前提条件を整理し、本事業における課題と仮定や前提、ならびに成果目標と計画展開等の明確化を図った。

1)　回収作業に係る技術と整備の範囲

国際的な共通理解として、回収（Retrieval）とは“廃棄物を取り出す行為”であり、回収可能性（Retrievability）とは“原則として、処分場に定置された廃棄物あるいは廃棄物パッケージ全体を取り出す能力を意味する”と定義されている[1]。このように、回収技術そのものは、回収の動機に因らず、定置された廃棄物（廃棄体）を取り出すために必要な技術を指すことから、広義な意味での回収技術の整備は、定置位置済みの廃棄体の取出しから、特定の場所（例えば地上の保管施設など）への移動までに要する工程の検討および構成する技術や装置などが対象となる。一方で、特定の場所へ移動した以降は、例えば新たに選択される代替管理方策に向けた措置などに応じて対応が検討される。また、原位置で回収した廃棄体の地下から地上までの搬出工程（作業動線）は、基本的に地上施設から地下の定置箇所までの搬送・定置工程と同様なものとなる。これらの搬送・定置に必要な技術は、既に操業技術の開発の一環として整備されていることから、本事業では“処分坑道内での回収工程”を検討の対象とした。

2)　PEM の健全性や状態設定

a 廃棄体の健全性

廃棄体を PEM の形態で回収するためには、PEM が構造的に健全であり、回収作業時に装置でのハンドリングに耐えうる状態であることが求められる。なお、PEM の定置後から回収実施までの期間中に PEM の外殻容器に生じる事象や回収時の廃棄体の健全性については、「回収可能性の維持の影響の定量化手法の整備」として別途検討を進めている。

b 坑道内の PEM の定置状態

処分坑道内での PEM の定置作業および隙間充填材の施工は適切に行われたものとし、処分坑道内の台座に定置された PEM は、回収時にも同じ位置にあるものと仮定する。

c 隙間充填材の浸潤状況

坑道壁面からの湧水や地温などの原位置の地下環境は、後述する地下実証試験サイトである試験坑道 2 の環境をそのまま利用する。湧水や地温などにより除去対象となる隙間充填材の含水比の変化や、それらが除去工程に及ぼす影響、坑内湧水量が回収作業に及ぼす影響などは、各技術と環境との境界問題として整理しておくとともに、要素試験等で影響の見通しを得ておく。なお、充填技術については、充填場所の状態の不確かさを軽減するため湧水状態は考慮しないこととした。

d 廃棄体からの影響

高レベル放射性廃棄物の廃棄体であるガラス固化体からは、熱と放射線が放出されるため、回収技術はこれらの影響下でも目的を果たすことが求められる。また、廃棄体からの熱などは、定置後から回収直前までの周辺環境の状態変遷にも影響を及ぼす。本事業で計画する実証試験では、実廃棄体は扱わない予定であるため、これらの影響は今回の検討からは除外するが、装置の耐放射線性や高温多湿下での動作保証、遠隔監視などの課題として整理しておく。

3) 全量回収

回収を実施する際の動機や目的に応じて、廃棄体 1 体だけの回収や複数の廃棄体の回収など、その範囲は様々であるが、本事業では基本方針の意図を踏まえ、処分場に定置した全ての廃棄体を回収（全量回収）することを前提として回収技術の開発整備を行う。全量回収に必要な技術は、部分回収にも適用が可能である。

4) 回収の動機に対する対応

2015 年 5 月に改定された『特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針』（以下「基本方針」という）では、回収可能性の導入の意図として、今後の技術その他の変化の可能性への柔軟かつ適切な対応、ならびに、今後より良い処分方法が実用化された場合等に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにすることが挙げられている。このような意図（動機）で回収が実施される場合には、回収の対象となる廃棄体（及び地下の構造物）は、管理された製造・施工のもとで品質が確保されたものであり、前記 2)に示したような状態設定を想定することができる。

一方で、安全性の観点から、人工バリア等の品質や性能に係る問題あるいは定置作業における何らかの不具合の発生時への是正処置としての回収の実行が考えられる。このような是正処置としての回収技術は、不具合の内容や回収対象の位置や健全性などに関する予期せぬ状態など、多様な状況を念頭においた回収技術が必要となる。但し、現在の段階（候補サイト及び適応させる処分場概念や設計が具体化していない段階）において、あらゆる事象を想定して技術を整備することには限界がある。

本事業では、前者の想定環境下における全量回収を念頭に回収技術の開発整備を進めるが、今後の候補サイトおよび概念や設計の具体化とともに、操業期間中に生じうる不具合の想定（シナリオ）を具体化していくことで、開発整備すべき回収技術に期待される機能や適用範囲を明確にすることができる。後者（安全性の観点）については、このような事業進展に応じて、必要な回収技術に関する開発整備を進めていくことが効果的である。

(4)　処分坑道横置き・PEM 方式に適用可能な回収技術の具体化

処分坑道に定置された PEM の回収技術の開発整備に向けて、坑道内に PEM が定置された状態からの回収工程について、その概念検討を行い必要な技術の抽出を行った。

1)　回収可能性維持の状態オプション

本事業で別途検討した「回収可能性の維持の影響の定量化手法の整備」において、処分坑道横置き・PEM 方式に対する回収可能性の維持状態を図 2.1.1-4 に示すように 3 つの状態オプションを設定している。

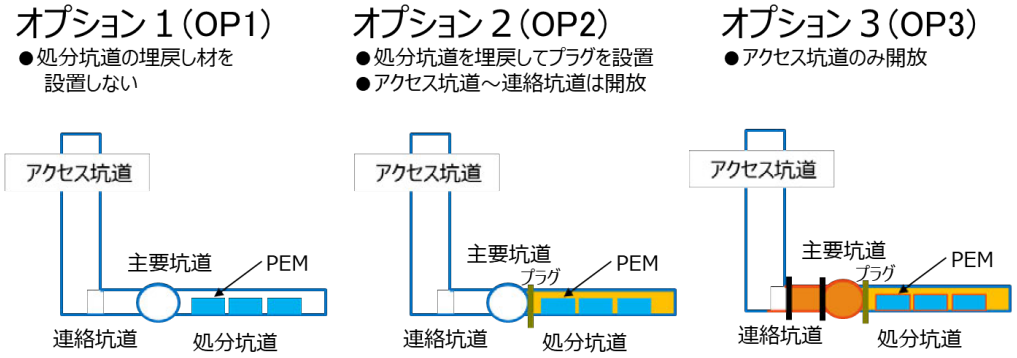


図 2.1.1-4　横置き・PEM 方式の回収可能性維持の状態オプション

a 状態オプション 1（OP1）からの PEM の回収作業

処分坑道の埋戻しが行われていない状態である。PEM を拘束する埋め戻し材（隙間充填材）の除去の必要がなく、定置装置を逆動線で稼働させることで PEM の回収作業が可能となる。ただし、PEM の定置と隙間充填が PEM を 1 体定置するごとに行うような定置工程が採用される場合には、状態オプション 1 は検討の対象から外れることとなる（そのような状態で維持されることはない）。

b 状態オプション 2（OP2）からの PEM の回収作業

処分坑道内の PEM - 坑道間に隙間充填材が施工され、処分坑道端部にプラグが設置された状態である。この状態からの PEM の回収では、最初にプラグの撤去、その後に隙間充填材の除去が必要になる。

c 状態オプション 3（OP3）からの PEM の回収作業

アスセス坑道以外は埋め戻された状態である。この状態からの PEM の回収では、まず、各坑道間のプラグや埋め戻し材の除去が必要になる。

埋め戻された状態から PEM までのアクセス性は OP3<OP2<OP1 の順で向上し、作業の手数が減少する。

2)　PEM の回収作業に関する工程と必要な技術

PEM の回収までの主な作業を抽出した。前記 1)に示した状態オプションに応じて回収作業の手数は変わるが、必要となる主要な（中核となる）技術は共通しており、プラグの撤去、埋め戻し材の除去（処分坑道以外）、隙間充填材の除去、PEM の搬出である。

a プラグの撤去

処分坑道－主要坑道間、主要坑道－連絡坑道間などに設置されたプラグを撤去する場合、コンクリートプラグは通常の解体作業に使用するブレーカ、ラインドリリングなどが適用できる。廃棄体からの距離があり作業環境は非放射線環境下となるため、一般土木の解体技術が適用できることから、本事業での開発整備（実証試験）の対象から除外した。

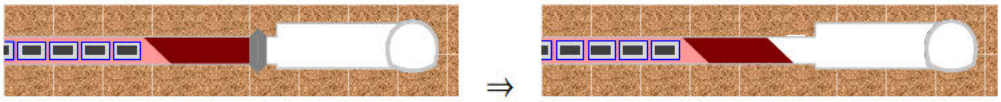


図 2.1.1-5　処分坑道－主要坑道間のプラグの撤去

b 埋め戻し材の除去

プラグを撤去した後、坑道内に施工された埋め戻し材を除去する（図 2.1.1-6）。埋め戻し材は坑道掘削土にベントナイトを混合した材料が検討されており、通常の掘削技術が適用できる。廃棄体近傍以外は非放射線環境下であること、処分坑道内の埋め戻し材の除去でも PEM が定置されている部分より手前の掘削作業では PEM を傷付けるおそれがないことから、一般土木の掘削技術が適用できるため、本事業での実証試験の対象から除外した。

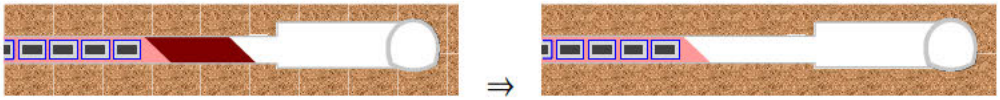


図 2.1.1-6　坑道埋め戻し材の除去（廃棄体から離れた部分）

c 隙間充填材の除去

処分坑道内で PEM - 坑道間に施工された隙間充填材を除去する技術である（図 2.1.1-7）。本技術（装置）により、回収対象の PEM を拘束する隙間充填材を除去するとともに、後工程の回収装置の動作環境を整える。PEM 近傍での作業となることから、除去技術には放射線防護の観点からの遠隔操作化や除去作業が廃棄体に悪影響を与えないことが求められる。ベントナイト系充填材に対する除去技術について、SKB で検討された事例があり、「機械的除去」、「流体的除去」、「熱的除去」ならびに「電気的除去」について、除去の作業性、副産物の発生と処理、廃棄体への潜在的な危険性などの 7 つの観点で比較検討が行われている[10]。ベントナイト系充填材は配合比、密度、含水比でその特性が変わるため、除去対象となる充填材の性状は、除去試験の評価において重要なものとなる。

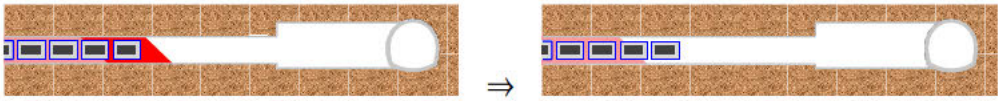


図 2.1.1-7　隙間充填材の除去（処分坑道内）

d PEM の回収

充填材を除去した後の PEM の回収作業では、処分坑道内に進入した回収装置が PEM を把持し、処分坑道から搬出する（図 2.1.1-8）。回収方法として、定置装置を逆動線で使用して行う方法と、回収専用装置によって行う方法が考えられる。また廃棄体を内包した PEM を取り扱うため、放射線防護の観点から遠隔操作化や PEM へ与える影響が少ない把持方法が求められる。

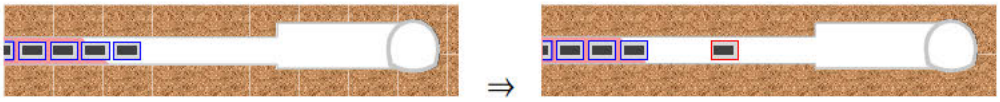


図 2.1.1-8　定置場所から処分坑道外への PEM の搬送

e PEM の地上までの搬出技術

「d PEM の回収」は定置位置から処分坑道外への搬出までの技術である。回収した PEM は主要坑道→連絡坑道→アクセス坑道を経て、地上の特定の場所（保管場所など）まで搬出される。この工程については、(3)1)で整理したように本事業における検討から除外する。

f その他の技術

本事業では開発整備（実証試験）の対象から除外したが、PEM の回収をより安全で確実な作業とすることに資する付帯的な技術を以下に挙げる。

・　坑道安定性の診断技術

埋め戻し材や隙間充填材を除去した際に、坑道が作業環境としての安全性を確保しているかを確認する技術である。「回収可能性の維持の影響の定量化手法の整備」において各状態オプションによる機能の変遷挙動に関する定量化手法の検討が進められているが、実際の現場で安全性を確認するための診断技術があれば回収作業の安全性が高まると考えられる。

・　PEM の健全性診断技術

PEM を回収する際、PEM が搬出作業に耐え得る強度を有しているかを確認する技術である。坑道安定性と同様に、回収可能性の維持の検討では維持期間中の鋼製容器（PEM 外殻容器）の腐食による劣化の定量化手法の検討が進められている。特に鋼殻リング方式の場合、腐食による単純な鋼殻の板厚の減少だけではなく、鋼殻リング同士の結合部分が搬出に耐えることができるかなど、実際の現場での PEM の健全性を確認するための診断技術があれば回収作業の安全性が高めることができる。PEM の健全性が損なわれていると判断された場合には、図 2.1.1-2 に示したように、鋼殻内の緩衝材を除去し、オーバーパックの形態で回収することになる。

3)　開発整備（実証試験）の対象技術

前述 2)において横置き・PEM 方式の状態オプションから抽出した回収技術について、状態オプション 2 からの回収工程を図 2.1.1-9 に模式図に示す。

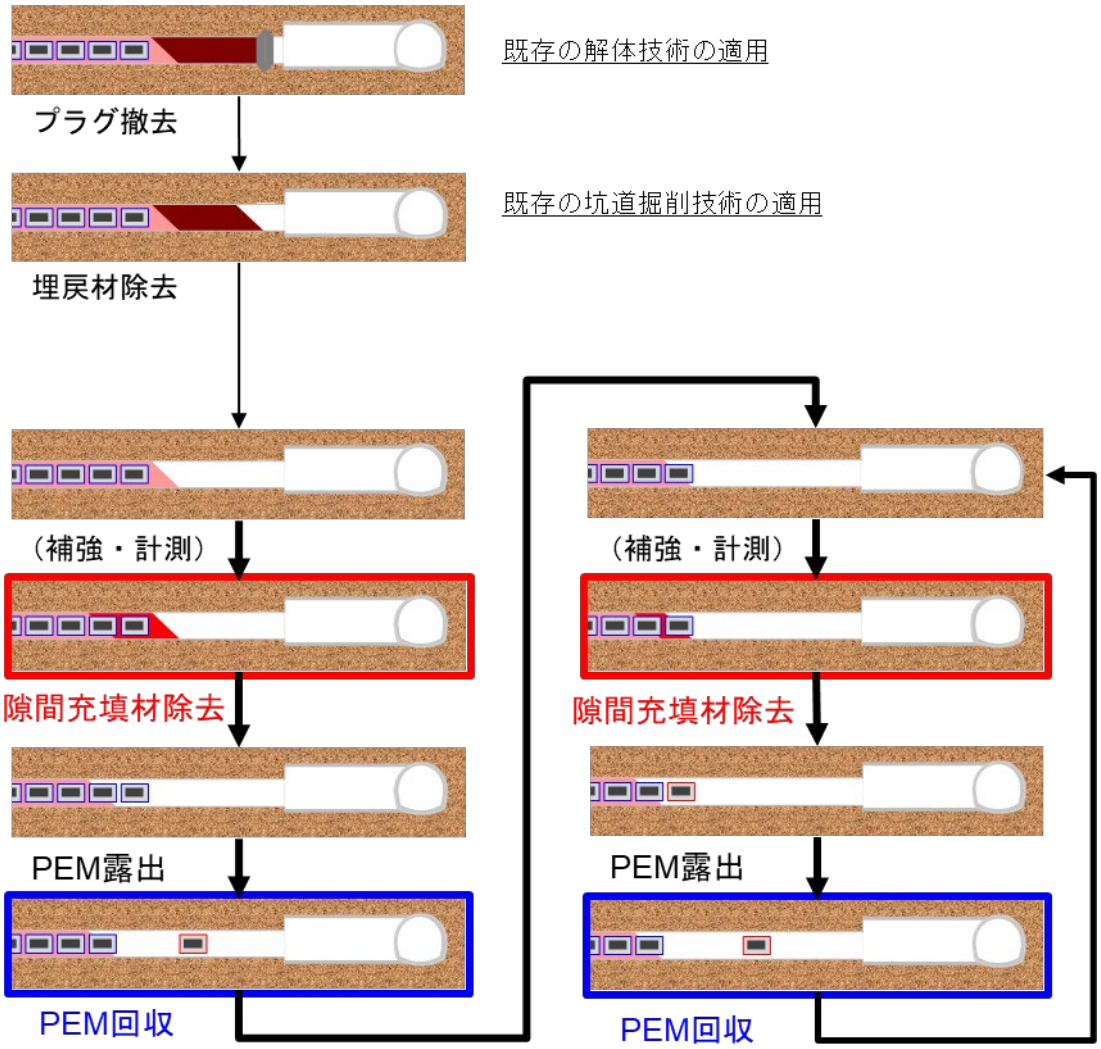


図 2.1.1-9　横置き・PEM 方式の回収作業の工程

プラグと充填材を除去した後、手前側の PEM を覆う隙間充填材を除去する。PEM の露出後に、回収装置によって PEM を処分坑道外へ搬出する。これで PEM1 体の回収が完了する。2 体目以降も同様の工程を繰り返すことで処分坑道 1 本分の PEM の回収を行うことができる。この工程は回収可能性の維持期間中の状態オプションに依存しない回収工程である。

以上の回収工程を念頭に置き、実証試験の対象とする PEM の回収技術として「隙間充填材の除去技術」と「PEM の搬出技術」を抽出した。

(5)　実証試験計画の具体化

既述のように、横置き・PEM 方式における PEM の回収に必要な技術として、隙間充填材の除去技術と PEM の回収技術（処分坑道外へ搬出技術）を抽出した。地下環境での実証試験の実施に必要な技術（装置）の開発整備の内容と各技術の開発目標について以下に整理した。

1)　横置き・PEM 方式の詳細

各技術の開発目標を設定するため、わが国で検討された横置き・PEM 方式の概念を示す。これらの概念を前提として技術開発を進め、横置き・PEM 方式の技術的実現性を示す。

a 大断面坑道（図 2.1.1-10 を参照）に定置された PEM

門型クレーンを使用して PEM を処分坑道内定置する。処分坑道の広さは定置装置が可動できるように建築限界から設定されている。PEM と坑道間の隙間は、ベントナイトに掘削ズリを 50%配合した混合土を吹付け方式で施工することで充填される。

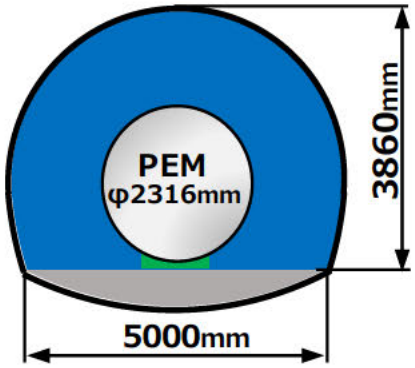


図 2.1.1-10　大断面坑道

b 狭隘断面坑道（図 2.1.1-11 を参照）に定置された PEM

人工バリアの製作・施工性の向上および品質確保の観点から、横置き方式を PEM 方式に拡張したものであり、現在の大断面坑道の前身の概念である。現在考えられている坑道断面よりも小さく、図 2.1.1-3 に示したように、エアベアリング方式による搬送・定置技術と純ベントナイトペレットによる隙間充填技術により施工する。

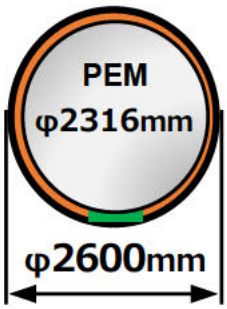


図 2.1.1-11　狭隘断面坑道

c 回収対象の PEM

PEM の製作技術については、半割れ方式[7]と鋼殻リング方式[8]について、実規模スケールでの組立試験が既に実施されている。本事業では鋼殻リング方式の PEM を回収の対象とした。図 2.1.1-12 に鋼殻リング方式の PEM の内部構造と外径寸法を示す。この PEM の総重量は 36.5t である。

本事業では定置後の PEM 内部の人工バリア（緩衝材やオーバーパック）の挙動や、オーバーパックからの発熱の影響は考慮しておらず、PEM としての重量、形状、寸法、重心位置のみを再現した模擬 PEM を製作し試験に供した。

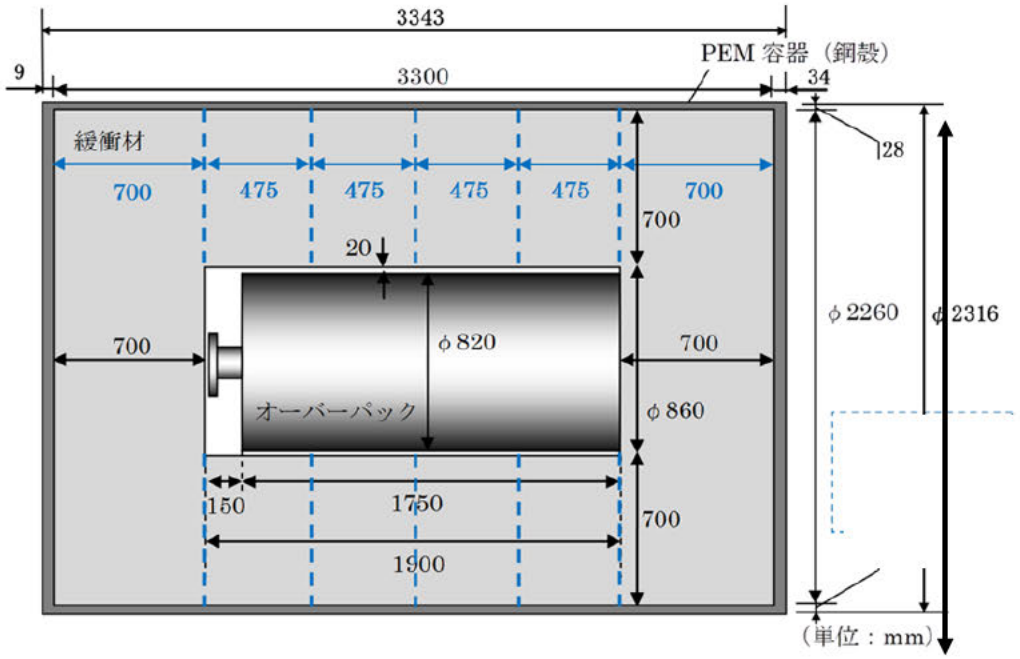


図 2.1.1-12　対象となる模擬 PEM の外形寸法[8]

2)　開発整備対象とする技術の整理

a 隙間充填技術（除去技術の対象となる隙間充填材の施工技術）

PEM の回収の第一工程は、PEM - 坑道間に施工された隙間充填材の除去である。PEM - 坑道間の隙間充填材は、鋼殻内部の緩衝材の膨出による密度低下や、処分坑道が卓越した水みちとなることを防止するために施工される。除去技術の試験の評価では、除去対象となる隙間充填材が現在想定されている設計仕様を満足するものであることが望ましい。そのため、操業技術の一つではあるものの、PEM-坑道間の隙間充填技術についても本事業における開発整備（実証試験）の対象とした。前記 1)で述べたように、坑道断面形状に応じた隙間充填技術として、吹付けによるベントナイト混合土の施工と純ベントナイトペレットの充填の２つが検討されており、本事業では双方の技術を整備（実証試験）の対象とした。

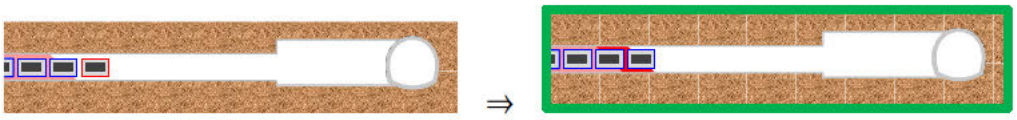


図 2.1.1-13　PEM - 坑道間の隙間充填技術

b PEM の搬送定置技術（回収技術）

「(4)2)d PEM の回収」で述べたように、PEM の回収は定置装置を逆動線で使用して行う方法と、回収専用の装置で行う方法が考えられる。

30 トンを超える重量物である PEM の搬送・定置技術（図 2.1.1-14 を参照）の検討・開発は、エアベアリング方式の定置装置による PCa（プレキャスト）コンクリート製の模擬坑道での実寸大 PEM の定置要素試験を地上において実施済である[8]。この定置装置を PEM の回収装置に採用することで、既往の知見を活用し新規の技術開発要素を削減するとともに、エアベアリング方式の定置技術の地下環境での適用性評価も可能となることから、回収専用装置ではなく定置・回収装置を実証対象とし、定置の逆動線で PEM の回収技術（図 2.1.1-15 を参照）を整備することとした。

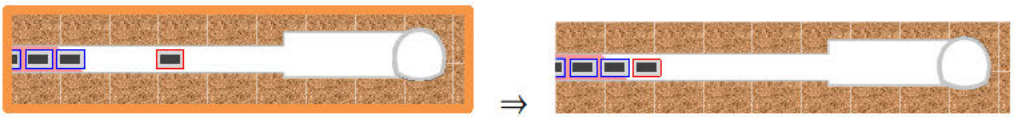


図 2.1.1-14　PEM の搬送・定置技術

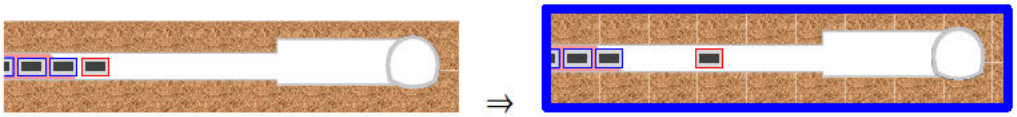


図 2.1.1-15　PEM の回収技術（定置の逆動線）

c 横置き・PEM 方式の操業技術の整理

開発整備（実証試験）の対象とした、回収作業を担う「隙間充填材の除去技術」と「PEM の回収技術」および「隙間充填技術」と「PEM の定置技術」の 4 つの技術を、横置き・PEM 方式の定置作業ならびに回収作業に分けて整理したものを図 2.1.1-16 に示す。

今回抽出した 4 つの技術は、横置き・PEM 方式の操業工程のうち、処分坑道内での定置／回収作業を網羅しており、図 2.1.1-3 に示した横置き・PEM 方式に関わる操業技術の実証が可能な計画とした。

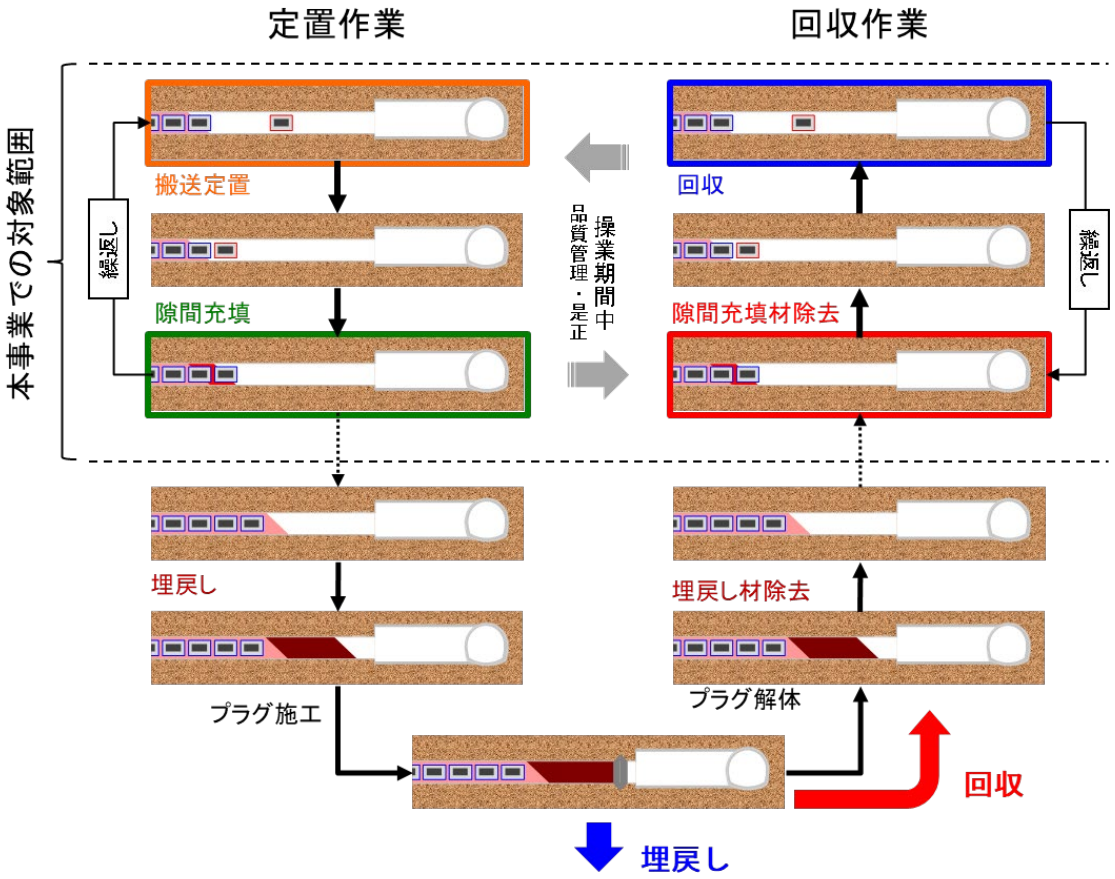


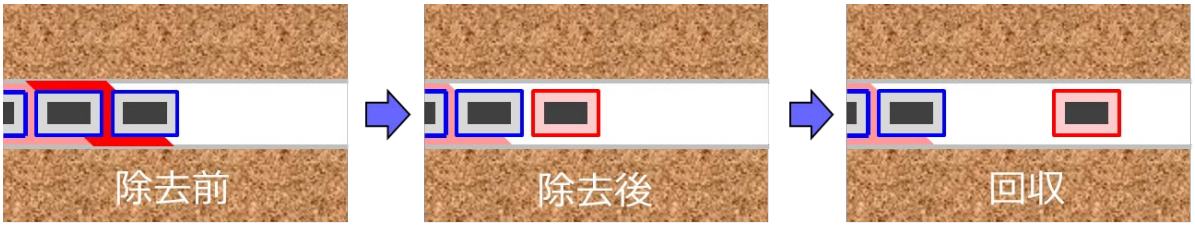
図 2.1.1-16　横置き・PEM 方式の定置／回収作業における本事業対象技術の位置付け

3)　地下実証試験サイトと試験坑道の整備

a 実証試験に必要な状態設定

横置き・PEM 方式において、処分坑道内に連続的に定置された PEM の回収作業は図 2.1.1-9 に示したように、坑口側の PEM を一体ずつ回収する作業の繰返しとなる。回収試験の状態を作るのは図 2.1.1-16 に示したように PEM を一体定置し隙間を充填する作業を繰返すものとした。この繰り返される部分が試験可能なこと、一体できれば定置作業も回収作業も繰返し作業となることから、地下での実証試験サイトの整備方針を以下の様に設定し、図 2.1.1-17 のように処分坑道を整備することにした。

・　隙間充填／充填材除去技術に対して、大断面、狭隘断面の試験が可能となること。
・　坑道内に連続的に定置される PEM の手前側一体を扱うこと。



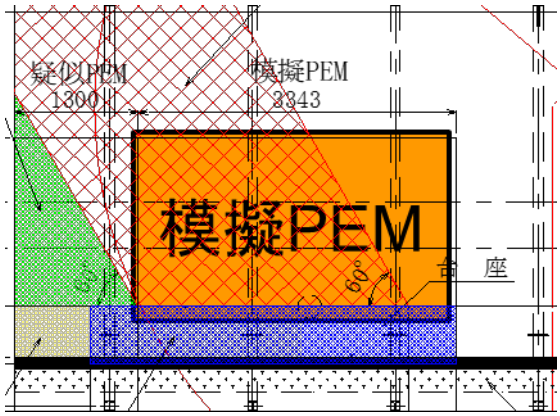


図 2.1.1-17　本事業での実証試験サイトの整備の基本的考え方

b 地下実証サイトの整備

地下実証試験の場所は、国立研究開発法人　日本原子力研究開発機構（以下「JAEA」という）幌延深地層研究センター（以下「幌延 URL」という）の深度 350m に位置する試験坑道を試験の目的に合わせて整備した（図 2.1.1-18）。

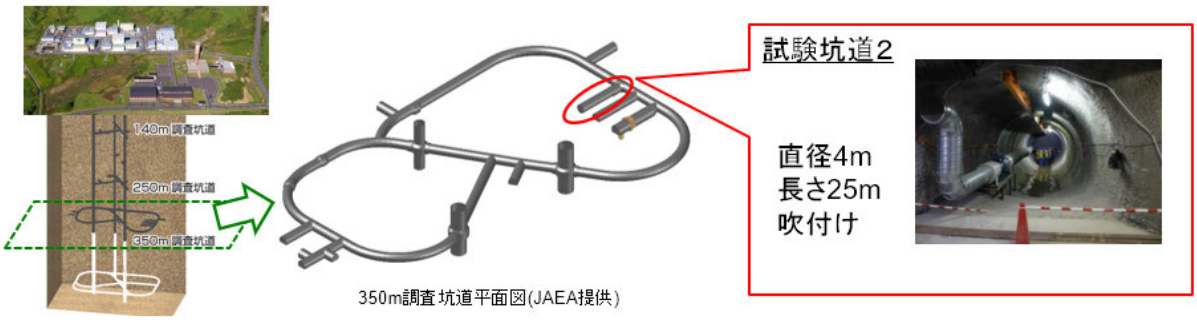


図 2.1.1-18　幌延 URL 試験坑道 2[11]

試験坑道 2 は周回坑道からの全長が 25m、直径 4m（内径）の円形断面である。この坑道に対して、定置、充填、除去、回収の全てに**大断面**と**狭隘断面**の試験ができるようにするため、試験坑道内に「組立台」と「作業台」から成る試験用の架台を構築した[15]。組立台は場所打ちコンクリートで施工し、組立台上に幅 700mm×高さ 110mm×長さ約 20m の台座（コンクリート製 2 次製品）を設置した。作業台は、機器類の設置や資機材等の一時仮置きが可能な構造とした。上記内容を含めた、幌延 URL 試験坑道 2 の整備イメージを図 2.1.1-19 に示す。

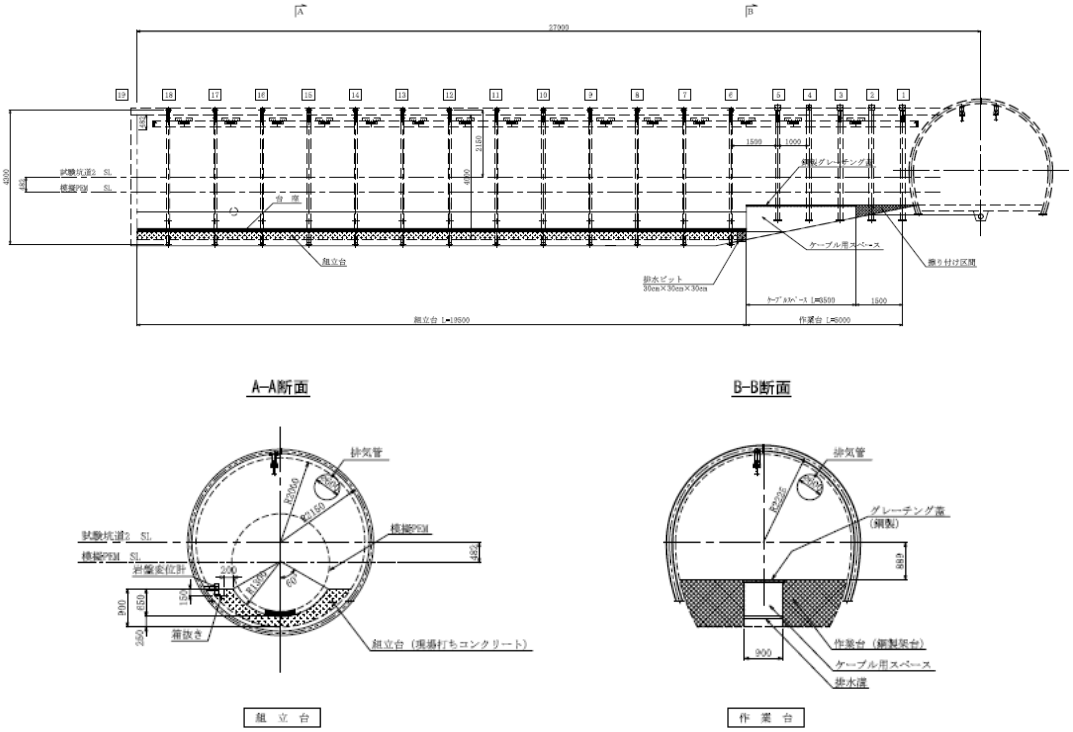


図 2.1.1-19　試験坑道 2 の寸法

整備前後の試験坑道 2 の様子を図 2.1.1-20 に示す。整備後の試験坑道 2 の断面形状のうち、下部の組立台の部分は直径 2.6m の円形坑道底部、上部の直径 4m の試験坑道 2 のままの部分は大断面坑道に相当する。

図 2.1.1-20　整備前後の試験坑道 2 の様子[12]

本事業では定置後の PEM 内部の人工バリアの挙動や、オーバーパックからの発熱の影響は考慮していないため、重量、形状、寸法、重心位置のみを再現した模擬 PEM を製作し試験に供した。図 2.1.1-21 に試験坑道 2 に定置した模擬 PEM を示す。模擬 PEM は分割して地下に搬入し、試験坑道内で組み立てた[12]。試験坑道 2 の吹付けコンクリート、組立台、および施工予定の隙間充填材のいずれも灰色であること、明るい色は記録撮影時に白飛びするため、PEM は試験記録の都合から暖色系の色で塗装した。

図 2.1.1-21　模擬 PEM と試験坑道 2 妻壁間に配した疑似 PEM[12]

処分坑道内に隙間なく連続的に定置される PEM を模擬するため、模擬 PEM－坑道妻壁の間に模擬 PEM と同一寸法の疑似 PEM を設置した（図 2.1.1-12）。疑似 PEM は模擬 PEM より一つ奥側に定置された PEM を模擬するものである。擬似 PEM は回収・定置試験の対象ではないため、簡易な構造（発泡スチロール製）とし、表面を模擬 PEM と同一色で塗装した。

(6)　実施内容と各技術の課題設定の考え方

計画策定に関わる種々の条件の整理、本事業で実施する試験の内容、各技術の実証試験の計画の具体化に関する方針を以下に整理する。具体的な試験内容や詳細な試験条件は後述の各節を参照されたい。

1)　地下環境での実証試験の内容

地下環境での処分坑道横置き方式・PEM 方式の回収実証試験では、幌延 URL 地下 350m に位置する試験坑道 2 に整備した地下実証試験サイトにおいて、坑道側の模擬 PEM 一体を回収することする。

a 隙間充填技術の実証的整備

回収作業の第一工程である隙間充填材の除去試験の対象物を構築するため、処分坑道２に定置した模擬 PEM と坑道間に隙間充填材を施工する。PEM 下部の狭隘部は基盤研究の成果を活用し、緩衝材相当の有効ベントナイト密度を目標として、充填材料および充填方式を選定する。PEM 上部の開放部は、NUMO の技術検討を反映し、ベントナイトに掘削ズリを混合したベントナイト混合土を吹付方式で施工する。除去技術の試験結果の評価で必要となる充填部の密度や配合比などの性状に関わるデータを取得する。さらに、本試験を通して隙間充填作業における品質・施工管理の妥当性の評価に資する知見を整備する。

b 隙間充填材除去技術の実証的整備

PEM を回収するために PEM－坑道間に施工された隙間充填材の除去技術を整備する。充填

工程の目的として、回収作業のため PEM を拘束する隙間充填材の除去による縁切り、ならびに後続の回収作業（定置位置から処分坑道外への搬出作業）時の作業環境の実現の２点を設定した。除去技術は廃棄体を内包する PEM 本体への影響を最小限に抑えつつ作業効率にも着目し、機械的除去技術と流体的除去技術を除去部位に応じて組合せるものとする。具体的な技術選定においては、SKB の技術検討や処分孔竪置き方式の緩衝材除去システムの開発といった先行事例に留意する。

c PEM の回収技術の実証的整理

操業における PEM の搬送・定置装置を使用した、逆動線での回収作業を計画した。試験坑道 2 の PEM の上部には空間があり、NUMO が検討中の門型クレーン方式の搬送・定置装置も適用可能であると考えられるが、今後の処分場の設計に柔軟性を確保することに留意して、坑道断面寸法の低減にもつながるよう、これまでの基盤研究で技術開発が進められてきたエアベアリング方式による搬送・定置装置を選定する。本技術は既に実規模スケールでの要素試験が地上で完了していることから、遠隔操作化を考慮したシステムとしての装置の整備を目標とした。さらに、地下に施工された実際の坑道内での回収作業に適用するため、坑道の性状や隙間充填材の除去後の環境での技術の適用性の評価に資するデータの取得も試験の目標に設定する。

2.2　隙間充填技術の実証的整備

2.2.1　目的と課題の設定

隙間充填材技術に関する研究の目的は、①除去対象の充填材料や隙間の状態を設定したうえで、除去対象を適切な品質で構築すること、および、②除去対象を適切な品質で構築するための施工技術および施工条件（充填の手順や充填装置の運転条件）の設定手法を構築し、隙間形状等の条件が異なる場合にも、同様の技術や手法を用いることで適切な隙間充填施工が可能であることの見通しを得ることである。

上記の目的に対し、本研究の実証試験における課題として、以下の 2 つを設定した。

1）地上での予備試験により、所定の充填品質とその再現性を確保しうる施工条件の設定手法を検討・構築し、構築した手法に基づいて設定した施工条件を適用することで、地下においても所定の充填品質が再現できることを実証する。

2）技術実証の進め方や実証試験による取得データを分析することで、実機に向けた今後の研究課題と今後具体化される処分場設計への拡張性を示す。

なお、下部狭隘部において除去対象として構築する充填部の品質は、2.1.1(6)1)a に示したとおり、緩衝材相当の有効ベントナイト密度 1.37Mg/m^3 を目標値として、充填材料や充填方式を選定して技術の実証を行うこととした。また、上部狭隘部においても 2.1.1(6)1)a に示したとおり、NUMO の技術検討を反映し、ベントナイトと掘削ズリを 1：1 で混合したベントナイト混合土（本検討では掘削ズリの代わりにケイ砂を使用する）を、吹付方式により乾燥密度 1.6Mg/m^3 かつ有効粘土密度 1.1Mg/m^3 となるように施工するための技術実証を行うこととした。

2.2.2　隙間充填技術の実証的整備の進め方

(1)　実証対象とする技術、検討項目の設定

標記の技術と検討項目の設定に先立ち、まず隙間充填材に求められる機能を設定するとともに、機能を満足することを確認するための品質管理項目として「乾燥密度」を指標として定めた。続いて、サイト条件に因らず普遍的と考えらえる隙間充填工程の中から必要となる技術とその順序を整理し、達成すべき目標品質に影響を与える因子を抽出し、抽出した因子を含む特性要因図を作成することで、本研究の実証試験で検討すべき項目を明確にすることとした。

(2)　充填技術の実証試験

手戻りなく効率的に技術実証を進めるため、段階的な技術の整備を行った。まず、目標とする品質を達成するための充填装置の仕様や充填方法等を、要素試験をとおして検討する。続いてこれらの要素技術を結合した充填装置を開発し、開発した充填装置を用いた総合動作確認を地上施設にて実施する。

これらの要素試験、地上での総合動作試験により、目標とする品質を達成する充填装置の運転条件や手順を事前に構築したうえで、地下環境において同運転条件・手順に基づいた実証試験を行い、試験結果の再現性を確認することで、一連の検討の妥当性を確認した。

(3)　実証試験の成果の分析と拡張・展開

前述した実証試験に至る取組の成果を踏まえ、今後の技術開発への課題の抽出および、サイトの環境ならびに概念や設計の違いを見据えた、技術の拡張性に関する検討を行った。

2.2.3　下部狭隘部の隙間充填技術の実証的整備

(1)　実証対象の設定と可視化

横置き・PEM 方式の施工フローでは、隙間充填に関連する工程として、大きくは『充填材製造、輸送・保管工程』と『充填施工工程』に分類される。

『充填材製造、輸送・保管工程』では、①充填材の加工・製造技術、②積込み・運搬技術、③保管技術等が求められ、これらは『充填材料の品質に関わる技術』として整理され、充填品質への影響因子のひとつとなる。

また、『充填施工工程』では、④充填材を充填装置に供給・貯蔵するための技術、⑤充填装置を移動させるための技術、その充填装置を用いて⑥充填材を所定の箇所に所定の品質で充填するための技術、および⑦管理区域内での施工を可能とする遠隔操作技術が求められ、このうち充填品質への影響因子となる技術としては⑥充填材を所定の箇所に所定の品質で充填するための技術が挙げられる。これは充填率向上のための『装置や充填方法に関わる技術』として整理され、同じく充填品質への影響要因のひとつとなる。

これらの充填品質への影響要因となる技術は、充填場所の形状や壁面の状況（坑道表面の仕上がりや湧水状態等）を考慮してその管理手法や施工方法、装置仕様を検討・設定する必要があることから、『充填場所の状態』についても直接／間接的な充填品質への影響因子のひとつとして加えられる。

本検討では、充填品質確保のための技術実証アプローチとして、これらの主たる 3 つの影響因子に対して、関連する実証項目を可視化するための検討により特性要因図を整理し、それに基づいて技術実証を段階的に実施することとした。

1)　充填場所による影響

充填場所においては、先に示したように、充填場所の形状や壁面の状態が直接／間接的に充填品質への影響因子となる。

既に述べたように、本検討では幌延 URL 試験坑道 2 に整備した組立台と PEM および PEM 台座によって形成される弧長約 900mm、幅約 110mm～130mm 程度の隙間が対象となる。

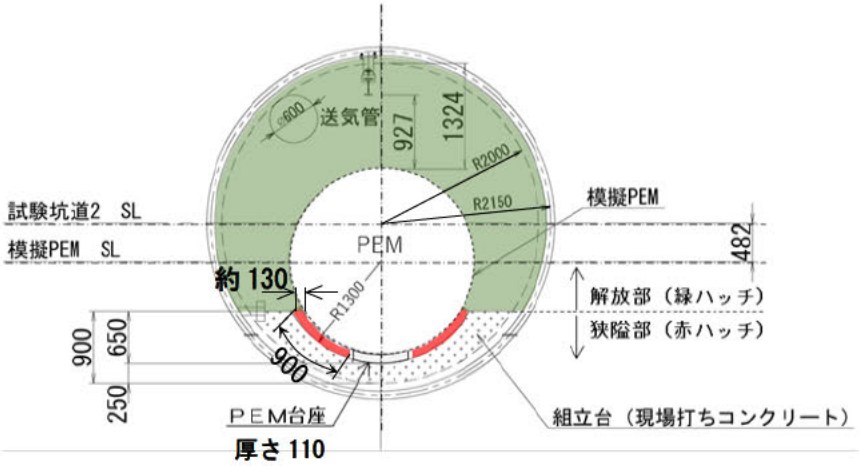


図 2.2.3-1　　幌延 URL 試験坑道 2 坑道断面(下部狭隘部充填箇所)

2)　充填材料の品質による影響の整理

充填材の材料としての品質は、製造時の粒子密度や形状、それらに影響を与える原材料の配合や高密度化（造粒）方法、粒度調整等に加え、輸送・保管時の自重よる圧密や結露などが影響因子となる。

3)　充填装置・充填方法による影響の整理

国内外の既往検討事例（例えば[6]他）によれば、現時点でベントナイト系材料の充填の試みがなされている施工方式としては、吹付け方式、空気圧送方式、ベルトコンベア方式及びスクリューフィーダ方式等が挙げられる。これらのうち、狭隘部への適用性が高く隅角部等未充填の生じやすい箇所への材料の送り込み性能を有する方式であること、材料特性の変化への影響が比較的小さく定量供給が可能であり充填品質（充填量）の管理が比較的容易な方式であることから、下部狭隘部の隙間充填技術の実証的整備では、スクリューフィーダ方式を採用した。

スクリューフィーダには様々なスクリュー形状のものがあるが、その中からそれぞれの特性を比較検討し、一般的な軸あり板状スクリューと軸なしのコイルスクリューによる移送性能確認試験を実施した。その結果に基づき、移送効率のより高い一般的な軸ありの板状スクリュータイプを採用することとした。

移送性能や充填品質への影響因子としては、スクリューピッチやスクリュー回転数、複数のスクリューフィーダを用いる場合はその配置や稼働割合、充填済み充填材の流動抑制や材料分離抑制効果を有する付加装置の配置等を挙げ、実証対象とすることとした。

4)　特性要因図の整理

以上の充填品質への 3 つの影響要因とそれぞれに関連する影響因子に関する検討結果を表 2.2.3-1 に整理した。同整理に基づいて得た、スクリューフィーダ方式による充填時のかさ密度に対する特性要因図を図 2.2.3-2 に示す。

表 2.2.3-1　各影響要因に関連する影響因子の検討結果

品質管理対象		要　因		因　子		
かさ密度	透水係数 膨潤圧	①充填場所の状態状態による影響	充填場所の状態	隙間形状	壁面形状寸法	
					PEM 形状寸法	
					PEM 台座形状寸法	
				壁面状態	表面粗さ	
					濡れ・湧水	
		②充填材の品質による影響	充填材の品質	充填材仕様	造粒方法	ブリケッティング法 打錠法・・・・
					材料混合	ベントナイト
						ケイ砂等
						水（加水）
					粒度調整	造粒体種類
						混練方法
				輸送時	材料分離	
					自重による圧縮	
				貯蔵時	自重による圧縮	
		③装置・充填方法による影響	装置・充填方法	充填量の制御	スクリュー回転数	
					運転時間	
				充填材流動の制御	付加層装置（抑止板）の配置	
				充填範囲の分担	スクリュー配置	
					スクリュー回転数比	

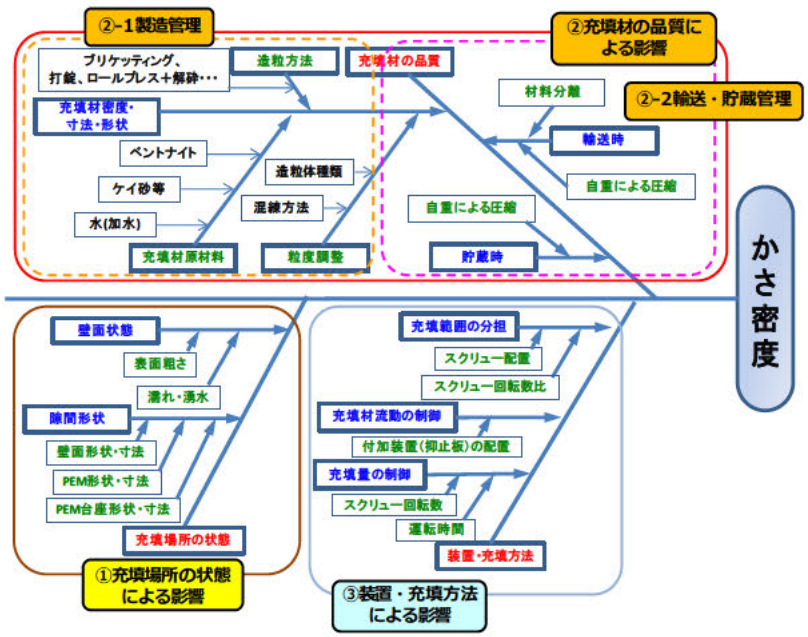


図 2.2.3-2　スクリューフィーダ方式による充填時のかさ密度に対する特性要因図

(2)　段階的な技術実証

スクリューフィーダ方式に関する品質管理では、未充填部が生じない充填方法、充填部の体積に対する充填質量から求められる全体の充填密度（かさ密度）と、充填密度のバラつき（密度分布）が重要となる。

本検討においては、充填施工条件（充填の手順や充填装置の運転条件）を定められた手法により設定し施工することで、充填品質に関わる項目の管理が可能であることを示すことを目的としている。このため、地上での予備試験により、所定の充填品質とその再現性を確保しうる施工条件の設定手法を検討・構築し、同手法に基づいて設定した施工条件を適用することで地下においても所定の充填品質が再現できることを実証することとした。

以下に、充填材料の製造方法と、施工条件の設定手法を構築するため装置・充填方法に関する実証対象（影響因子）を段階的に設定して実施した、地上での予備試験および地下での実証試験の結果について要約する。

1)　地上での予備試験

a 充填材料の製造方法に関する検討

本検討では、狭隘部には緩衝材相当の有効粘土（ベントナイト）密度（1.37Mg/m³）の充填品質が求められることから、充填率の自由度が比較的大きい 100%ベントナイトの充填材料を用いることとした。製造方法としてはブリケッティングによる造粒＋解砕（ペレット充填材 A)、ロールプレスによる造粒（シート状）＋解砕（ペレット充填材 B)、の２とおりの製造方法を採用し充填材の製造試験を実施した。その結果、どちらの製造方法においても現実的な充填率の確保によって目標の充填品質を満たしうる粒子密度（図 2.2.3-3 黒破線の範囲）までの高密度化が可能であり、解砕後の粒度分布を Fuller-Thompson 曲線により管理することで、充填後、所定のかさ密度を確保することが可能なことを確認した（表 2.2.3-2、表 2.2.3-3 参照)。

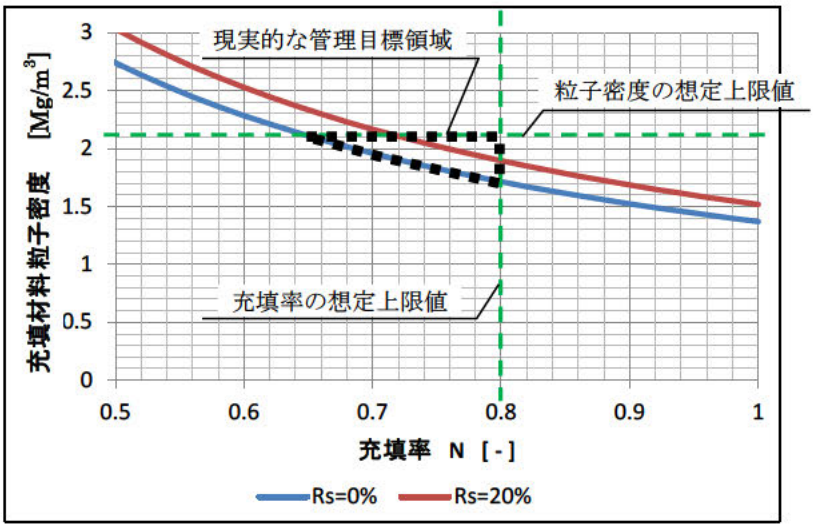


図 2.2.3-3　有効粘土密度 1.37Mg/m³ を満足する充填率と充填材料粒子密度の関係

表 2.2.3-2　ブリケッティングによる造粒ペレットの粒子密度

ケース No.	含水比(%)	湿潤密度(Mg/m^3)	乾燥密度(Mg/m^3)
1	8.51	2.241	2.065
2	8.36	2.216	2.045
3	8.20	2.217	2.043
4	8.35	2.216	2.046
5	7.37	2.207	2.044

表 2.2.3-3　ロールプレスによる造粒ペレット（シート状）の粒子密度

項目				平均
含水比 %	8.5	8.5	8.5	8.5
湿潤密度 Mg/m^3	2.14	2.10	2.19	2.14
乾燥密度 Mg/m^3	1.97	1.94	2.02	1.98

b 施工条件設定手法を構築するための装置・充填方法に関する検討

(a)　地上での予備試験の概要

地下での実証試験に先立ち、地上においてステップ０からステップ４までの段階的な予備試験を実施した。

ステップ０ではスクリューピッチやスクリュー回転数、材料供給口等の適切な設計のための予備試験を実施し、ステップ１では、ステップ２以降の試験での充填量管理をスクリュー回転数と運転時間で管理するためのスクリューフィーダの移送性能と、移送前後で充填材性状に顕著な変化がないことを確認した。また、ステップ２および３では、隙間形状を模擬した土槽を用いて、複数のスクリューフィーダを用いる際の、個々のスクリューフィーダの配置や隙間形状に対するスクリュー回転方向、充填量分担や充填量を管理する運転時間の設定等、目標のかさ密度を効率的に達成するための施工条件の設定を段階的に実施した。

ステップ４では、ステップ３までで設定したそれらの施工条件によって地下実証試験と同様の物理的環境で模擬土槽への充填を実施し、目標のかさ密度を安定的に達成できることを確認することで、施工条件設定手法を構築した。

地上で実施した予備試験の実施内容と成果の概要を表 2.2.3-4 に示す。

表 2.2.3-4　地上での段階的な技術実証の目的、実施条件および成果の概要

段階	主たる目的	試験パラメータ	移送、充填材料	成果の概要
地上での予備試験 ステップ0	スクリューフィーダの基本仕様（径、充填長、スクリューピッチ等）設計のための検討	・スクリューピッチ 2 種(70mm、140mm) ・スクリュー回転数 3 種(33.6rpm、25.5rpm、16.8rpm) ・充填材供給口形状	クニゲル GX 含水比:9.6% 初期湿潤かさ密度（参考値）：1.236Mg/m³	各パラメータの組み合わせによりそれぞれのケースでの移送性能への影響を確認した結果、以下を得た。 ・ 直径 90mm×7m のスクリューフィーダで移送が可能である ・ スクリュー回転数と移送性能は比例関係にある（設定した移送性能（乾燥質量で 3.2kg/min）は達成可能（乾燥質量で 10.5kg/min を確認） ・ スクリューピッチは 140mm と比較し 70mm の移送性能が高い ・ 材料供給口形状は Φ90mm の場合、50 ㎜×90 ㎜以上であれば移送性能は変わらない
地上での予備試験 ステップ1	スクリューフィーダの移送性能、移送前後の材料性状変化の確認	・スクリュー回転数 3 種(33.6rpm、25.5rpm、16.8rpm)	ペレット充填材 B 含水比:8.8% 初期湿潤かさ密度（参考値）：1.361Mg/m³	スクリュー回転数と移送性能の関係を 2 段階の回転数で確認し、ステップ 3 およびステップ 4 実施の際の単位時間当たりの設定移送量を以下のとおり設定した。 ・ 33.6rpm のとき 12.5kg/min（乾燥質量で 11.5kg/min） ・ 16.8rpm のとき 6.25kg/min（乾燥質量で 5.7kg/min） また、移送前後において、ペレット充填材の粒度分布等の性状に顕著な変化がないことを確認した。
地上での予備試験 ステップ2	充填率を高めるための設計仕様の具体化（スクリュー回転数、スクリュー回転方向、抑止板の充填品質への影響確認、および設定したスクリュー配置の妥当性確認）	・スクリュー回転数 3 種(33.6rpm、25.5rpm、16.8rpm) ・スクリュー回転方向 ・抑止板の有無	ペレット充填材 A 含水比:8.4% 初期湿潤かさ密度（参考値）：1.421Mg/m³	各パラメータの組み合わせによりそれぞれのケースでの充填品質への影響を確認した結果、以下を得た。 ・ スクリュー回転数の違いは、充填品質に大きな影響を与えない ・ スクリュー回転方向の違いは、充填品質に大きな影響を与えない。ただし、装置や PEM に対する物理的作用を考慮した場合、左隙間には右回転、右隙間には左回転が優位となる ・ 抑止板は充填品質に顕著な影響は与えないが、充填材の流動の自由度を制限するため目視では粒度分布の変化が小さいと見られた。また、抑止性能を向上すればバルクのかさ密度管理にも寄与する ・ 各試験ケースの実施により、設定した上下段各スクリュー配置の妥当性を確認した。
地上での予備試験 ステップ3	下部狭隘部の隙間形状に対して適切な充填品質を確保できる施工条件、施工条件設定手法の構築	・上段スクリュー回転数 ・下段スクリュー回転数 ・スクリューフィーダ移動速度	ペレット充填材 B（ステップ 1 と同じ）	各パラメータの組み合わせによりそれぞれのケースでの充填品質への影響を確認した結果、以下の条件にて良好な充填品質を得た。 ・初期充填：31.9kg（200mm 区間対象、上段 14.7kg、下段 17.2kg、設定充填率 101～102%相当） ・ 移動充填：上段 21rpm（7.8kg/min、乾燥質量で 7.2kg/min） 下段 24.5rpm（9.1kg/min、乾燥質量で 8.4kg/min） 移動 99.8mm/min（設定充填率 107.2%相当） ・後充填　：30sec（8.46kg 相当）
地上での予備試験 ステップ4	幌延 URL 試験坑道 2 と同等の物理環境での作業性、およびステップ 3 にて設定した施工条件での充填品質の再現性の確認と施工条件の改善	・初期充填量 ・スクリューフィーダ移動速度 ・後充填量	ペレット充填材 B（ステップ 1 と同じ）	ステップ 3 の成果を受けて、一部施工条件を調整し、数ケースで充填品質を確認した結果、以下の条件（試験ケース 4-2T-2）にて良好な充填品質を得るとともに充填品質の再現性を確認した。 ・初期充填：左右隙間各 36.4kg（200mm 区間対象、上段 19.3kg、下段 17.2kg、設定充填率 115～116%） ・移動充填：左右上段 21rpm（ステップ 3 と同じ） 左右下段 24.5rpm（ステップ 3 と同じ） 移動 95.4mm/min（設定充填率 112～113%相当） ・後充填　：44sec（左右各 12.4kg 相当）

(b)　地下実証試験における施工条件設定の基礎となる予備試験ステップ４の実施内容と成果

ステップ４ではステップ３までの予備試験で設定した上下段スクリューフィーダのスクリュー回転数を基準として充填品質の再現性確認を行うとともに、幌延 URL 試験坑道 2 での地下実証試験時の条件設定を設定するため、初期充填量、スクリューフィーダの移動速度、後充填量をパラメータとして試験ケースを設定し、より高い充填品質を確保するための施工条件を検討した。

試験に用いた充填場所の模擬土槽とスクリューフィーダの配置を図 2.2.3-4 に示す。

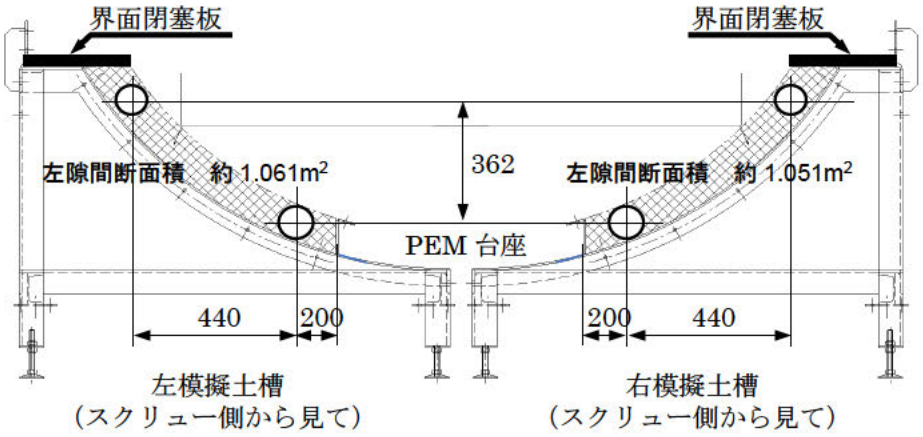


図 2.2.3-4　模擬土槽とスクリューフィーダ配置

試験の実施手順を表 2.2.3-5 に示す。

表 2.2.3-5　ステップ３　試験実施手順

試験実施手順	
①	下段スクリュー回転数を設定する
②	スクリューフィーダ移動速度を設定する
③	スクリューフィーダ移動停止の状態で、上下段スクリューにより妻板～仕切り板間を満たすまで充填する（初期充填）
④	充填架台を移動させながら隙間充填を行う（移動充填）
⑤	付加装置（抑止板）が模擬土槽端部まできたら充填架台の移動を停止した状態で充填を行う（後充填）※適宜実施
⑥	模擬土槽より試料採取し、必要な分析を行う
⑦	模擬土槽内の全部の加工充填材の重量を測定し、バルク密度を算出する。
⑧	①～⑦を繰り返す

初期充填、移動充填、後充填の実施イメージを図 2.2.3-5 に示す。

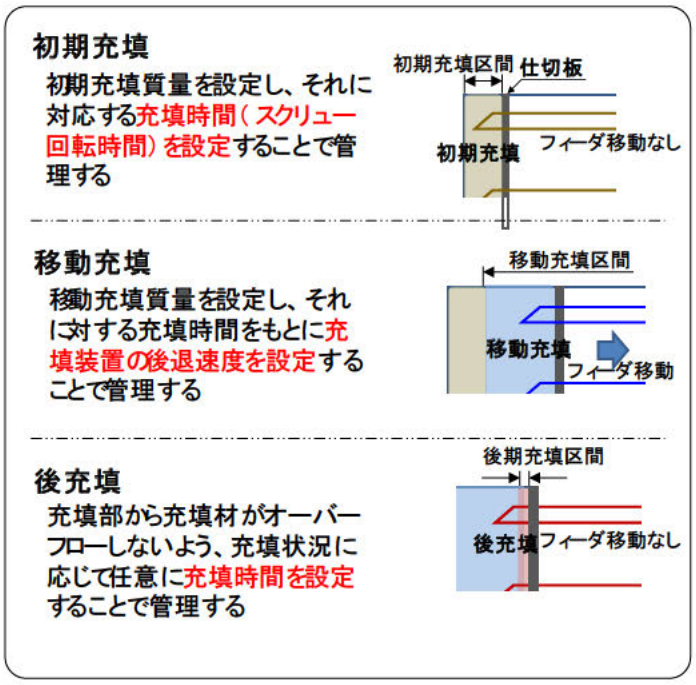


図 2.2.3-5　初期充填、移動充填、後充填　イメージ

充填品質確認のため、充填試験実施後に充填質量と模擬土槽の体積からバルクのかさ密度を測定するとともに、模擬土槽上面のサンプリング窓から充填材を採取し、部位ごとの密度分布を取得する。片側 16 か所の合計 32 か所から容積既知のシンウォールサンプラーによりサンプリングし、かさ密度を測定する。

図 2.2.3-6 に模擬土槽とサンプリング位置を、にステップ 4 の実施状況を示す。

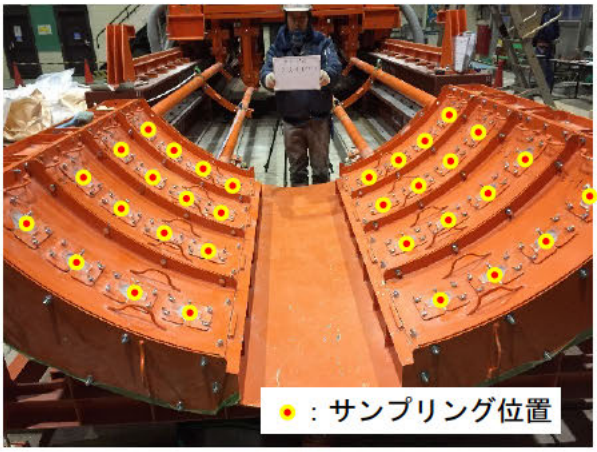


図 2.2.3-6　模擬土槽　上面からのサンプリング位置

図 2.2.3-7　ステップ 4 実施状況

上記の試験手順で実施したステップ 4 の試験ケースおよび試験結果の概要を表 2.2.3-6 に、試験結果整理表を表 2.2.3-7 に示す。

表 2.2.3-6　ステップ 4　試験結果の概要

試験ケース		単位時間当たり移送量 kg/min（括弧内はスクリュー回転数）				設定初期充填（kg）		移動充填		後充填 kg	結果概要	
								フィーダ設定移動速度	設計充填量		土槽充填かさ密度（乾燥） Mg/m³	充填率（1.37Mg/m³に対し） %
	左右	上段	下段	合計	上段	下段	mm/min	kg/m			
4-1　T-1	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	14.7	17.2	99.8	169.5	8.5	1.354	98.8
	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	14.7	17.2		169.5	8.5	1.373	100.2
4-1　T-3	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	22.5	17.2	99.8	169.5	8.5	1.357	99.1
	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	22.5	17.2		169.5	8.5	1.374	100.3
4-2　T-1	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	95.4	177.3	8.5	1.368	99.9
	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2		177.3	8.5	1.378	100.6
4-2　T-2	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	95.4	177.3	12.4	1.360	99.3
	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2		177.3	12.4	1.374	100.3
4-2　T-3	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	95.4	177.3	7.6	1.362	99.4
	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2		177.3	7.6	1.387	101.3

表 2.2.3-7　充填試験結果整理表：4-2（T-1～T-3）バルク

試験ケース	4-2（T-3）		4-2（T-2）		4-2（T-1）		4-1（T-3）		4-1（T-1）	
土槽配置	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右
土槽所要充填質量（kg）	314.34	311.35	312.28	308.69	311.81	308.84	311.33	308 37	311.33	308.37
土槽実充填質量（kg）	312.55	315.28	310.09	309.37	311.35	310.57	308.25	309 36	308.25	309.36
土槽充填容積（m^3）	0.2109	0.2089	0.2095	0.2071	0.2092	0.2072	0.2089	0 2069	0.2089	0.2069
土槽充填湿潤かさ密度（Mg/ m^3）	1.482	1 510	1.480	1.494	1.488	1.499	1.476	1.495	1.476	1.495
土槽充填乾燥かさ密度（Mg/m3）	1.362	1 387	1.360	1.373	1.368	1.378	1.357	1.374	1.357	1.374
土槽充填率（%）	99.4	101 3	99.3	100.2	99.9	100.6	99.0	100.3	99.0	100.3
所要密度以上のサンプル数	2/12	6/16	7/16	6/16	7/16	6/16	4/16	5/16	4/16	5/16

表 2.2.3-7 および表 2.2.3-7 より、左土槽が右土槽と比較して 1%程度低い充填率となっている。これは、左右同一の施工条件に対し、単位長さ当たりの土槽容積が、右：1.051m³/m、左 1.061m³/m であったことが影響していると推定されたことから、地下実証試験では充填箇所の左右それぞれの隙間形状に合わせて施工条件を設定することとした。

また、土槽全体としての充填率については試験ケース 4-1 シリーズと試験ケース 4-2 シリーズでの顕著な差は見られなかったが、サンプリング試料個別の充填密度に着目すると、試験ケース 4-2 シリーズの施工条件のほうが、相対的に適切であると思われたことから、地下実証試験における施工条件は、試験ケース 4.2 シリーズの施工条件に基づいて設定することとした。

2)　地下実証試験

地上試験結果に基づいて設定した施工条件と、設定した施工条件での実証試験結果について示す。

a 施工条件の設定

地下実証試験における施工条件は、地上予備試験ステップ 4 の結果（表 2.2.3-8）から、概ね最適とされた試験ケース 4-2（後充填量設定 T-1～T-3）で適用性を確認した施工条件設定手法に基づき、充填場所の隙間の状態（形状や湧水環境等）を事前に調査したうえで、充填場所に合わせて設定した。表 2.2.3-9 に地下実証試験に際して設定した施工条件（装置の運転条件）を示す。

表 2.2.3-8　ステップ 4 試験ケース 4-2 の施工条件と実績

試験ケース	左右	狭隘部断面積 (m^2)	充填材含水比 8.8%の場合の単位長あたりの所要充填質量 (kg/m)	スクリュー回転速度および比率設定（kg/min）			初期充填（20cm）				移動充填			後充填		実充填かさ密度（乾燥）(Mg/m^3)	充填率（1.37に対し）(%)
							充填時間設定(sec)		初期充填設定充填質量 (kg/20cm)		移動充填設定充填質量 (kg/m)		移動速度設定 (mm/min)	充填時間 (sec)	設計充填質量 (kg)		
				上段	下段	合計	上段	下段		設計に対する割増率		設計に対する割増率					
4-2 T-1	左	0.1061	158.1	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	15%	177.3	12%	95.3	30	8.5	1.368	99.9
	右	0.1051	156.7	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	16%	177.3	13%		30	8.5	1.378	100.6
4-2 T-2	左	0.1061	158.1	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	15%	177.3	12%	95.3	44	12.4	1.360	99.3
	右	0.1051	156.7	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	16%	177.3	13%		44	12.4	1.374	100.3
4-2 T-3	左	0.1061	158.1	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	15%	177.3	12%	95.3	27	7.6	1.362	99.4
	右	0.1051	156.7	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	16%	177.3	13%		27	7.6	1.387	101.3

表 2.2.3-9　地下充填実証試験の施工条件

試験ケース	左右	狭隘部断面積 A (m^2)	充填材含水比 6.5%の場合の単位長あたりの所要充填質量 Wo (kg/m)	スクリュー回転速度および比率設定（kg/min）			初期充填（22cm）				移動充填			後充填		実充填かさ密度（乾燥）(Mg/m^3)	充填率（1.37に対し）(%)
							充填時間設定(sec)		初期充填設定充填質量 Wi (kg/20cm)		移動充填設定充填質量 Wm (kg/m)		移動速度設定値 S (mm/min)	充填時間 (sec)	設計充填質量 (kg)		
				上段 su	下段 sl	合計	上段	下段		設計に対する割増率		設計に対する割増率					
地下充填実証	左	0.1058	154.4	7.57	8.84	16.41	164	125	39.2	15.5%	173.7	12.5%	94.5	44	12.0		
	右	0.1068	155.8	7.65	8.92	16.57	164	125	39.6		175.3			44	12.2		

b 地下実証試験実施状況

図 2.2.3-8 に幌延 URL における実証試験場所（試験坑道 2）での、下部狭隘部の隙間充填装置の配置イメージを、に実際の実施状況を示す。

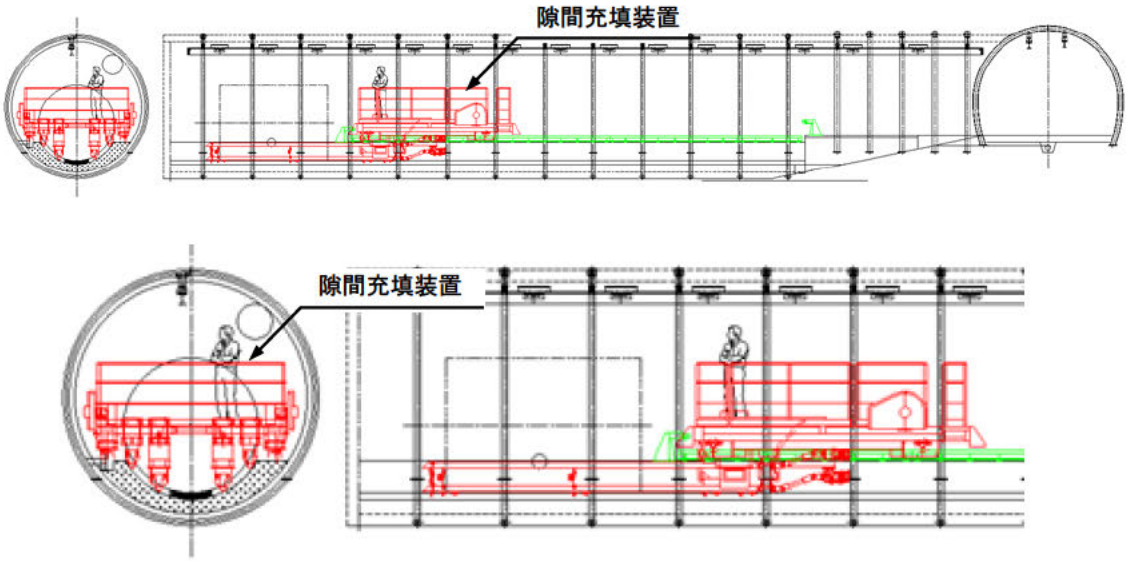


図 2.2.3-8　下部狭隘部の隙間充填装置配置イメージ（試験坑道 2）

充填装置全景（充填架台から）　　充填装置全景（PEM 側から）

図 2.2.3-9　充填試験実施状況

c 試験結果の整理

(a)　充填容積の確認

充填対象となる狭隘部の容積は、左隙間：約 0.3538m³、右隙間：約 0.3571m³ であった。ただし、実際の充填延長は、約 3cm のオーバーランにより、3.373m となったため、充填容積はそれぞれ左：約 0.3570m³、右：約 0.3603m³ となった（図 2.2.3-10 参照）。

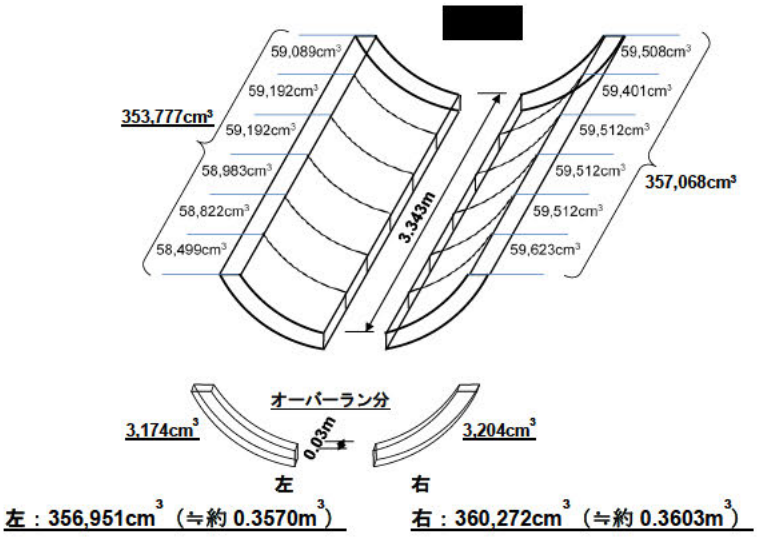


図 2.2.3-10　地下実証試験における実充填容積

(b)　充填品質確認

地下実証試験の結果を表 2.2.3-10 に、ステップ４の試験結果との比較を表 2.2.3-11 に示す。下部狭隘部のかさ密度は、左右とも管理値である 1.37Mg/m³ を満たす結果であり、かつステップ４の結果を上回る充填品質を得た。このことから、地下実証試験では密度分布を実測できないが、表 2.2.3-7 に示したステップ４の密度分布（表中の所用密度以上のサンプル数を参照）以上の結果が得られていると推定された。以上より、地上予備試験結果をもとに設定した施工条件による充填施工を行うことで、充填品質の確保と再現が可能であることを実証した。

表 2.2.3-10　地下実証試験結果

管理項目		左狭隘部	右狭隘部
全投入質量(Mg)		0.7925	0.8412
残存質量(Mg)		0.2687	0.3036
実充填質量(Mg)		0.5238	0.5376
充填容積(m³)		0.3538	0.3571
下部狭隘部かさ密度(Mg/m³)	湿潤	1.467	1.492
	乾燥	1.378	1.401

表 2.2.3-11　地下実証試験結果とステップ４の結果との比較

試験ケース	左右	狭隘部断面積 A (m²)	充填材含水比 8.8%の場合の単位長あたりの所要充填質量 Wo (kg/m)	スクリュー回転速度および比率設定 (kg/min)			初期充填（20cm）				移動充填			後充填		実充填かさ密度（乾燥）(Mg/m³)	充填率（1.37に対し）(%)
							充填時間設定(sec)		初期充填設定充填質量 Wi (kg/20cm)		移動充填設定充填質量 Wm (kg/m)		移動速度設定値 S (mm/min)	充填時間 (sec)	設計充填質量 (kg)		
				上段 su	下段 sl	合計	上段	下段		設計に対する割増率		設計に対する割増率					
4-2 T-2	左	0.1061	158.1	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	15%	177.3	12.1%	95.3	44	12.4	1.360	99.3
	右	0.1051	156.7	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	16%	177.3	13.1%		44	12.4	1.374	100.3
試験ケース	左右	狭隘部断面積 A (m²)	充填材含水比 6.5%の場合の単位長あたりの所要充填質量 Wo (kg/m)	スクリュー回転速度および比率設定 (kg/min)			初期充填（22cm）				移動充填			後充填		実充填かさ密度（乾燥）(Mg/m³)	充填率（1.37に対し）(%)
							充填時間設定(sec)		初期充填設定充填質量 Wi (kg/20cm)		移動充填設定充填質量 Wm (kg/m)		移動速度設定値 S (mm/min)	充填時間 (sec)	設計充填質量 (kg)		
				上段 su	下段 sl	合計	上段	下段		設計に対する割増率		設計に対する割増率					
地下充填実証	左	0.1058	154.4	7.57	8.84	16.41	164	125	39.2	15.5%	173.7	12.5%	94.5	44	12.0	1.378	100.6%
	右	0.1068	155.8	7.65	8.92	16.57	164	125	39.6		175.3			44	12.2	1.401	102.3%

(3)　実証試験成果の分析と拡張・展開

1)　充填場所の状態による影響

a 実証成果の整理・分析

今回の実証対象とした充填場所は幌延 URL の直径 4m の試験坑道 2 であり、NUMO のセーフティケースで例示された比較的大きな坑道断面（図 2.1.1-10）と、既往の基盤研究で提示された PEM を定置しうる最小の坑道断面（図 2.1.1-11）の２つの概念に対応したものである。

このうち既往の基盤研究で提示された坑道断面と PEM 間に生じる隙間を対象とした技術実証が下部狭隘部で実施されたものである。

隙間形状や状態に対する充填率を向上させるための対策としては、湧水対策による乾燥状態の維持や表面の状態を一定品質に保つことなどが考えられる。しかし、隙間形状や状態については、基本的には充填材や施工方法を検討するための与条件と位置づけられる。

よって、充填場所の状態に対しては、充填材や施工方法で充填率確保のための対応を検討することが現実的となる。

例えば、既往の基盤研究における概念では、図 2.1.1-11 のとおり坑道断面全周に隙間（φ2600mm の処分坑道とφ2316mm の PEM によって形成されるリング状の隙間）が生じることになるが、本実証試験で対象とした隙間は、図 2.2.3-1 に示すとおり PEM 下面に生じる部分のみであり、充填対象の隙間断面積は既往の基盤研究の概念における隙間の 20%程度であった。これに対してスクリュー4 本で充填を行ったものであり、同程度の所要時間で施工を行うためには、スクリュー本数は 5 倍の 20 本必要となる。ただし、その妥当性については、施工場所による施工装置規模等の制約条件やその他の施工条件等を考慮して検討することが必要となる。

施工場所への対応については、後述の『2.2.3(3)2)　装置・充填方法による影響』で述べる。

b 実証成果の拡張・展開

(a)　隙間形状について

隙間は、坑道断面（円形、馬蹄形、三心円等）と円形（PEM 断面）の組み合わせにより生じるものであり、比較的単純な形状となる。この場合、極端に狭い隙間でなく、かつ排水溝や PEM 鋼殻容器の表面の凹凸、部分的な障害物や残置物などがない場合は、スクリューフィーダの規模と配置の調整によって未充填無く施工することは可能と考えられる。また、既往の基盤研究での処分坑道に生じる隙間（図 2.1.1-11 参照）は想定される最小のものであり、隙間形状がこれと比較して大きくなる場合は、装置規模の大型化が必要となる反面、空間的な裕度が増すこととなり、装置の配置や装置仕様をアップグレードすることによる剛性の向上などの効果が期待できる。

ここで、スクリュー配置や規模、充填分担範囲（個別スクリューの回転数）は隙間形状に応じて設定する必要があるため、実際に充填対象となる隙間に対する実証試験が必要となる。また、今回の技術実証では PEM と PEM の間に空間を設けるような定置概念は想定していないため、改めて実証の必要がある。これはスクリューフィーダ方式に限らず、その他のあらゆる充填方式で生じる課題となる。

以上より、未充填部をなくし、充填率を向上させるための充填場所への対策としては、隙間

断面形状や PEM の配置を単純化すること、処分坑道断面に対して極端に狭い隙間（110mm 未満）が生じない PEM 配置とすること、そのうえで隙間形状に合わせた実証試験により施工条件を設定することが効果的といえる。

(b)　壁面状態について

処分坑道表面の仕上げ状態、湧水の有無などが充填品質への影響要因として挙げられる。実証試験においては、坑道面はコンクリート、PEM 面は鋼製を想定した。例えば坑道面が吹付け仕上げのみの場合や、母岩のままの場合には充填材の流動性に影響を与える可能性があるため、それぞれの坑道面を想定した実証試験により施工条件を設定する必要がある。

湧水環境については、隙間への充填によって充填材の含水状態が製造時の管理された状態から変化するため、充填材の隙間内での流動性に影響を与えることとなる。今回の実証試験では湧水による充填率への影響については確認していないため、その影響度合いを定量的に推測することはできないが、一定量の湧水が想定される場合は、その想定される湧水量による充填品質への影響を実証試験によって確認したうえで、施工条件を設定する必要がある。

(c)　熱環境および放射線環境への対応について

今回の検討では、廃棄体からの熱および放射線による施工条件や充填品質への影響評価については対象外としたが、充填施工に際しては、安全衛生上および放射線安全上、遠隔操作による施工が望ましいことから、先に示したとおり遠隔操作技術の開発が必要となる。

遠隔操作による施工では、無線装置やカメラモニター、PC 等、半導体製品を用いるケースが多いことから、これらに対する放射線防護が求められる。また、PEM の発熱による周辺温度の上昇も懸念されるため、施工場所の温度環境を考慮した適切な装置を選定する必要がある。

以上から、施工装置および周辺機器の適切な選定と防護を踏まえた遠隔操作技術の開発が、充填施工技術のシステムとしての適用性や成立性を高めるための今後の重要な課題といえる。

2)　装置・充填方法による影響

a 実証成果の整理・分析

(a)　充填範囲の分担（スクリュー配置およびスクリュー回転数）について

既往の基盤研究における概念では、坑道断面全周に隙間が生じることになる。本実証試験は、PEM 下面に生じる隙間（下部狭隘部）を充填対象としたものであり、坑道断面全周に生じる隙間の約 20%程度に対してスクリュー4 本による充填を行い、充填品質の確認を行ったものである。

この実証試験結果を参考に既往の基盤研究における処分坑道全周の隙間への所要のスクリューフィーダ本数の設定の例としては、以下のとおりである。

実証試験と同程度の所要時間（坑道長約 100mm/min）で充填施工を行うには 5 倍の 20 本のスクリューフィーダで充填を行うこととなる。

しかし、スクリュー1 本に求められる移送性能を 3.2kg/min（5 本のスクリューを用いて、1 日に PEM1 体分の充填を完了させる場合の移送性能）とすれば、本実証試験ではその 2.2～2.6

倍程度（ステップ３および４において乾燥質量で 7.2～8.4kg/min、湿潤質量で 7.8～9.1kg/min）の設定での充填品質を確認しており、2 本あれば最低限の施工効率はおおむね満足する。また、8～9 本あればスクリュー20 本×3.2kg/min と同等の施工効率を得ることができることとなる。

但し、本数が少なくなると充填材の押し込み効果が不均質となり、目標のかさ密度を達成できない可能性が否定できない。本実証試験でのスクリュー配置の観点から本数を設定すると、図 2.2.3-11 に示すとおり半径方向の配置間隔が約 27° ごととなっており、坑道全周で 12～13 本程度が得られる。または弧長約 900mm に対し 2 本のスクリューであることから弧長約 7,000mm に対しては 15～16 本程度が得られる。

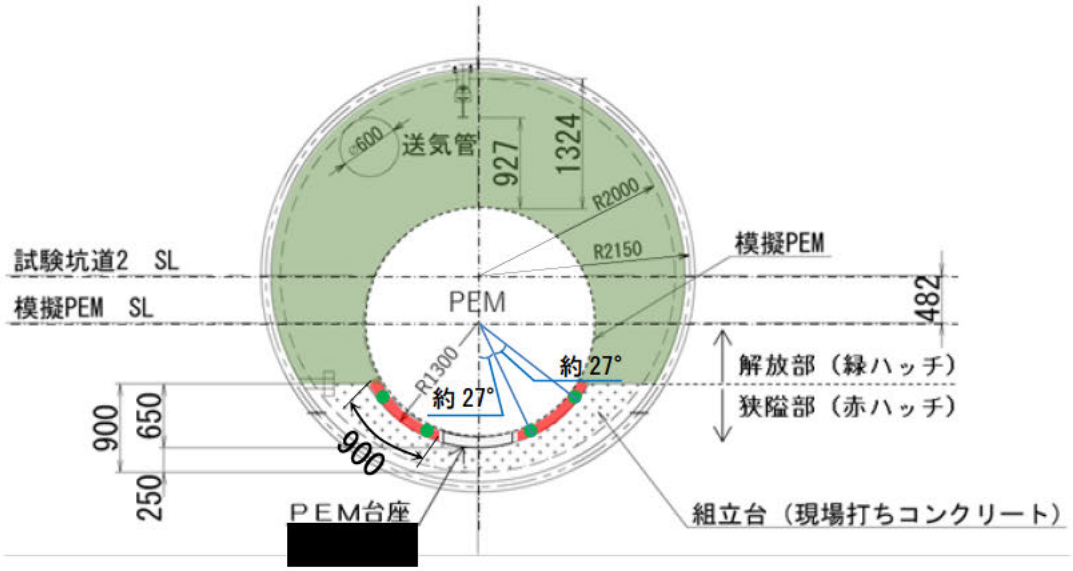


図 2.2.3-11　充填対象断面のうち下部狭隘部へのスクリューフィーダ配置状況

今回の実証成果を既往の基盤研究で提示された坑道断面に生じる隙間に適用する場合、スクリュー回転数（すなわち単位時間当たりの充填量）は充填品質に影響しないことから、所用のスクリューフィーダ本数に合わせた個別のスクリュー回転の設定（充填分担の設定）で対応することが可能となる。

ここで、スクリューから排出された充填材料の隙間内での流動や押し込み効果は、それぞれのスクリューフィーダの配置とそれに伴うスクリュー回転数の設定（分担範囲の隙間形状）に依存することとなる。

また、高さ方向に複数のスクリューフィーダを配置する場合、充填材落下時の材料分離の懸念も生じるため、スクリュー先端部を既設充填材に挿入状態とするまでの初期充填の手順についても検討しなければならない。

以上より、本実証試験と同様に、模擬土槽等によりスクリューフィーダの配置を想定した充填予備試験（当該スクリューでは未充填が形成される箇所の確認試験）を実施し、使用するスクリューフィーダ本数および各スクリューフィーダの配置を仮設定したうえで、それぞれのスクリュー回転数と全スクリューフィーダ統一の移動速度に加え、初期充填の手順をパラメータとした実証試験により、適切な施工条件を設定する作業が必要となる。

その他の重要な課題としては、スクリュー本数と配置によって、その後方設備の仕様が大きく異なることが挙げられる。また、スクリューフィーダ方式による充填品質の管理上、スクリューフィーダへの充填材料供給量を安定的に保持しなければならいため、各スクリューへの充填材の分配機構を有する後方設備が、スクリューフィーダ本体を含め充填対象となる処分坑道内に適切に配置できるかが検討課題として重要となる。

なお、今回の地上および地下での実証試験では、設定した充填条件により充填箇所全体に対して所定の充填密度を確保できることを確認したが、地下実証試験の施工条件の基本とした地上予備試験のステップ 4 のうち試験ケース 4-2 における局所的な密度測定の結果より、片側隙間 16 か所のサンプルに対して 9 ないし 10 か所で所定の充填密度に達しない部分があることも分かっている（表 2.2.3-7 参照）。傾向としてはスクリュー近傍で比較的高密度となり、スクリューとスクリューの間で比較的低密度となることが分かっている。よって配置検討については、目標とする管理値をどこに対して設定するか（ある一定区間に対してか、すべてのサンプル箇所に対してか）についても検討が必要である。

(b)　充填後の充填材流動の制御

本実証試験では、スクリュー先端付近への抑止板の設置により、隙間充填後の充填材の流動方向を安息角なりに堆積することのないように制御することで、材料分離の抑制、充填品質の向上を図った。また、本実証試験では、充填対象の断面が左右 2 か所に分割され、先に述べたとおり、既往の基盤研究の概念における隙間と比較すると小さく（20%程度）、かつ隙間自体の高低差も図 2.2.3-4 のとおり比較的小さいことが分かる。

同様の抑止板を既往の基盤研究の隙間形状に適用する場合、隙間断面積から抑止板の面積規模は実証試験時の約 5 倍必要となる。

抑止板を配置した場合、隙間充填装置が充填材の圧密に対して受け止める押し戻し力は、抑止板のない場合と比較して大きくなる。地下実証試験ではスクリューフィーダの移動をレール方式で行っており、隙間充填時の反力は隙間充填装置の自重と装置搭載の充填材量（合計約 10ton）に対するレール（□50×50 角鋼）と鉄車輪の摩擦力のみであった（図 2.2.3-12 参照）。

既往の基盤研究の隙間形状に対して抑止板を設置し、かつスクリューフィーダの移動をレール方式（同等程度の摩擦係数と仮定）とする場合、実証試験と同等程度の充填品質を得るためには、充填装置側の自重を概ね 50t 程度とするか、他の反力を検討する必要がある。

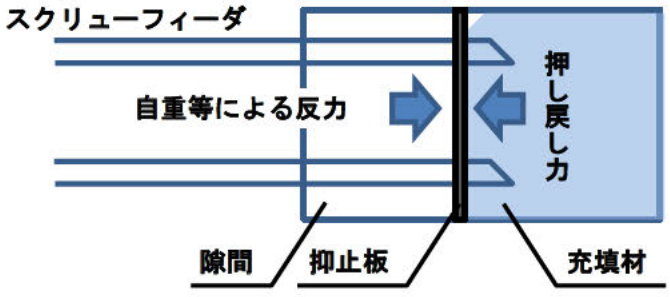


図 2.2.3-12　充填材圧密による押し戻し力と自重等による反力の作用のイメージ

(c)　充填量の制御

本実証試験において充填量を決定するのは、初期充填、後充填においては充填時間（スクリューを回転させる時間）の設定であり、移動充填においてはスクリューフィーダ移動速度の設定である。また、これらの設定において、所要の充填量に対しどの程度の割増率（表 2.2.3-9 参照）を見込むかによって充填後の品質を管理することとした。割増率は、設計上の単位時間当たりの移送量（移送性能）にロスが生じることを見込んで設定するものであり、地上での予備試験結果から経験的に設定した値である。移送性能のロスの原因としては、スクリュー先端の充填材の高密度化による排出障害（単位時間当たりの設定量が充填されない）、反力不足による押し込み効果の低下（スクリューフィーダ移動速度が設定より早くなる）が考えられた。

今回の実証試験では割増率の設定を対策としたが、反力不足の場合効果が不安定になる可能性もあることから、本質的な対策としては前項(b) にも関連するが、カウンターウェイト等による装置自重の増加やストッパー機構などによる反力の増大と、スクリュー剛性の向上が挙げられ、これらに関する調査が今後の課題となる。

b 実証成果の拡張・展開

不特定の隙間条件に対しても、今回の実証試験で明らかになったすべての課題が適用される。

充填範囲の分担については、既往の基盤研究での隙間に対しては、全てのスクリューを同一仕様としたが、不特定の隙間条件に対しては、上記の実証成果の整理・分析で示した課題に加え、先にも述べたとおり隙間の形状や大きさによりスクリューフィーダの仕様をアレンジする必要が生じる場合がある。例えば NUMO セーフティケースの一例（図 2.1.1-10 参照）のように充填対象の比較的大きな断面にスクリューフィーダ方式を適用する場合は、図 2.2.3-13 に示すように施工効率の観点からスクリューサイズ（径）を大きくすることで施工効率を確保しつつ、未充填が生じる可能性のある個所が狭隘な場合は、小さなスクリューを配置するなどの対応が効果的といえる。

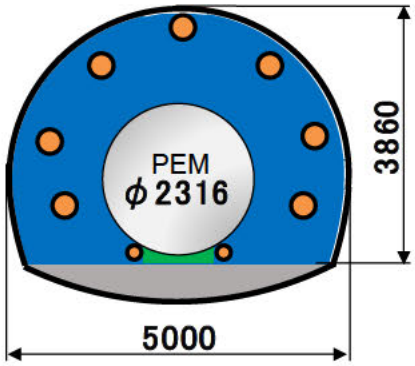


図 2.2.3-13　大断面へのスクリューフィーダ方式の適用例

また、高さ方向のスクリュー配置が高い位置となる場合、落下時の材料分離が促進される懸念への対策として、初期充填の手順に、別の充填方式を組み合わせるなどの対応も検討の対象となり得る（図 2.2.3-14）。

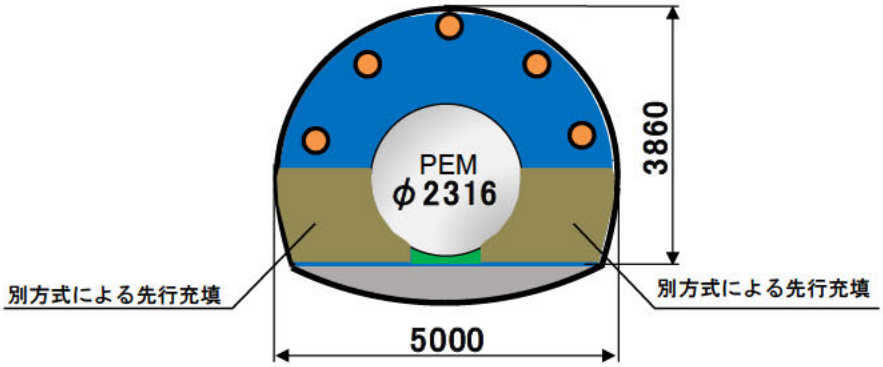


図 2.2.3-14　別方式による初期充填のイメージ

充填材流動制御に関しては、特に大断面に対する抑止板の配置となり、押し戻し力が非常に大きくなることから、より慎重な反力の設計が求められる。あるいは抑止板による対応ではなく、充填材料そのものの品質向上やペレット形状の工夫で対応を図る方向にシフトする必要性についても検討課題となり得る（大断面の場合、同一形状のペレットであっても狭隘断面への適用と比較して充填率が向上するため）。

充填量の制御については、スクリューフィーダ方式においては断面形状に関わらず上記の実証成果の整理・分析で示した課題が適用される。

3)　充填材の品質による影響

a 実証成果の整理・分析

(a)　充填材密度・寸法・形状について

本実証試験で使用した充填材料は、Na 型ベントナイト 100%のものをブリケッティング製法またはロールプレス製法によって高密度化後に解砕し、細粒分を添加するなどして粒度調整したものである。

本実証試験においては、スクリューフィーダの規模（トラフ内径約 90mm かつトラフ内クリアランス約 28mm）に対して高密度化後の形状（ブリケッティング製法：20mm×30mm、ロールプレス製法：厚さ 10mm のシート状）が比較的小さく暫定的な管理目標としてより細粒分の多いふたつの Fuller-Thompson 曲線（最大粒径 7±2mm）に収まる解砕・粒調材料を効率よく製造できるロールプレス製法によるペレット充填材 B を主として使用した。

既往の基盤研究の断面形状における隙間の幅（110～174mm 程度）は、本実証試験で対象とした隙間の幅（110～130mm 程度）とほぼ同程度であり、充填に用いるスクリューフィーダの仕様も同等程度のものとなる。この場合、スクリューフィーダによる移送前後で、ペレット充填材の粒度分布に顕著な変化がなく、表 2.2.3-10 のとおり所定の充填密度（かさ密度）が得られることを確認しており、既往の基盤研究の隙間に対しても今回のロールプレス製法を基本としたペレット充填材 B とスクリューフィーダ方式の組み合わせが適用可能であると思われる。

なお、有効粘土密度 1.37Mg/m³ を満足するための充填材料の粒子密度については、図 2.2.3-3 に示すとおりであり、現実的に製造可能な範囲（図中の現実的な管理目標領域）が限られてい

るため、今回製造したペレット粒子密度である 2Mg/m^3 程度から大きな改良を見込むことは難しいが、さらなる高密度化についての検討も求められる。

(b)　輸送・貯蔵管理について

今回の地下実証試験に向けて製造した充填材料は 3,000kg であり、これを 25kg 袋に分割封入し（総数 120 袋）、製造元（福岡県）より実証試験を行う幌延深地層研究センター敷地内へ輸送し、地上建屋内で数日間保管し、実証試験に使用した。

比較的少量の充填材に対しては、以上のような輸送、保管で分品質を維持できることを確認しており、既往の基盤研究の隙間にあっては、PEM1 体あたりの充填量として約 4.5m^3（すなわち、乾燥質量で約 6,200kg）となり、今回の実証試験での地理扱い量とは大きく違わないことから、同様の管理で品質の維持は可能と思われる。ただし、無人化施工や機械化施工による隙間充填装置への充填材料の供給を考慮した場合、効率化を図るためフレコンパックやサイロ等による輸送、保管等が想定される。この場合においても、自重による圧密や材料どうしの固着、気温変動による結露や乾燥等に対する対策の検討が必要となる。

b 実証成果の拡張・展開

(a)　充填材密度・寸法・形状について

今回最密充填のための粒度分布の管理値設定として、Fuller-Thompson 曲線を活用したが、Fuller-Thompson 曲線は、一般的に以下の式で定義されており、材料の最大粒径と、乗数により求められる（乗数は材料の種類や状態により経験的に求められるものであり、定まった値はない)。

$$P=(d/D)^{X}$$

ここで、d がふるい目の大きさ、D が粉粒体の最大粒径、X が材料の種類や状態により経験的に求められる乗数であり、P がふるい目 d の通過百分率となる。

一般に、高密度化後の解砕品であっても解砕後の粒径が小さくなるにつれて、粒子間の拘束が開放され、粒子密度が低下する傾向となる。よって、隙間が大断面となり、それに応じてスクリューフィーダの仕様（口径など）が大規模になる場合、粒度分布のうち最大粒径を大きく設定することができ、高密度化した比較的大粒径のペレットを多く含む粒度分布の充填材を充填することに、より高い充填密度が得られる可能性が高くなる。

(b)　輸送・貯蔵管理について

隙間断面が大きくなり、PEM1 体当たりの充填量が大幅に増加する場合にあっても、今回の実証試験時の輸送・保管管理についての整理・分析で示したとおり、無人化施工や機械化施工による隙間充填装置への充填材料の供給を考慮した場合の効率化や品質維持を図るための大規模輸送、大規模補間、あるいは現地製造等の可能性を含め検討する必要がある。

2.2.4　上部開放部の隙間充填技術の実証的整備

(1)　地下実証試験で対象とする充填場所

地下実証試験で充填の対象とする場所は、幌延 URL 試験坑道 2 である。本項では上部開放部を対象とした充填技術の実証について示す。

(2)　充填方式（吹付け方式）の選定

本研究では、上部開放部の充填技術として「吹付け方式」を選択し、隙間充填材として、ベントナイト混合土を使用することとした。

吹付け方式の隙間充填材として使用するベントナイト混合土は、含水比の調整が可能であり、次工程である隙間充填材の除去技術の除去対象として適切であること、また、幌延 URL 試験坑道 2 には、吹付け装置を配置する作業空間が確保できることを踏まえ、吹付け方式によるベントナイト混合土の隙間充填技術を選択した。

なお、上部開放部の隙間充填材（ベントナイト混合土）の施工品質目標は、NUMO 包括的技術報告書（レビュー版）[2]を参考に、ベントナイト：ケイ砂＝50%：50%の配合とし、かさ密度(dry bulk density)の同意として乾燥密度(dry density) 1.6Mg/m^3(有効粘土密度 1.15Mg/m^3)と設定した。

(3)　吹付け方式に係る施工品質目標への影響要因の検討

1)　品質に影響を及ぼす要因・因子の整理

一般的に充填の方式に因らず、「かさ密度（乾燥密度)」に影響を与える主な要因は、①充填場所の状態と②装置や充填方法および③充填材料の品質の項目であり、各々の要因に対し関連する因子が含まれる。上部開放部の吹付け方式による充填に対し、「かさ密度（乾燥密度）に影響を及ぼすと考えられる要因及び因子の関係を表 2.2.4-1、図 2.2.4-1 に整理して示す。

表 2.2.4-1　「かさ密度（乾燥密度)」に影響を与える要因・因子の整理

品質管理指標	要　因	因　子	
かさ密度 （乾燥密度）	①充填場所の状態 による影響	隙間形状	坑道形状・寸法
			PEM 形状寸法
		壁面状態	表面粗さ
			湧水状態（湧水量、温湿度）
	②装置・充填方法 による影響	装置の運転条件 （パラメータ）	材料供給速度 （吹付け機の回転数）
			吐出エアー流量
			吹付け角度
			吹付け距離
			ノズル形状
		吹付け方法・手順	吹付け順序
			リバウンド材処理
		原材料	ベントナイト
			混合する掘削土
			水（加水）
	③充填材の品質 による影響	充填材の締固め性	配合比、含水比、密度
		充填材の製造	混合方法、材料分離・団粒化
		貯蔵・輸送	材料分離、圧縮
		充填後の品質確認手法	直接的、間接的計測手法

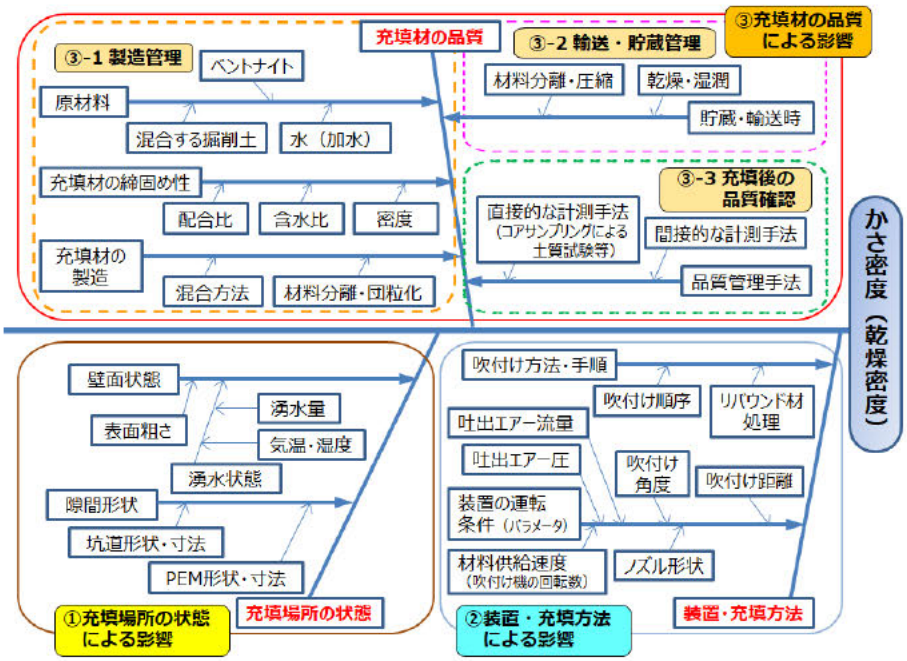


図 2.2.4-1　吹付け方式における隙間充填技術　特性要因図

(4)　中核技術の抽出

本研究では、実際の処分事業を想定した吹付け充填装置の概念設計例（図 2.2.4-2）を検討し、現時点で実証しておくべき中核技術を抽出し、段階的な技術の整備を実施した。

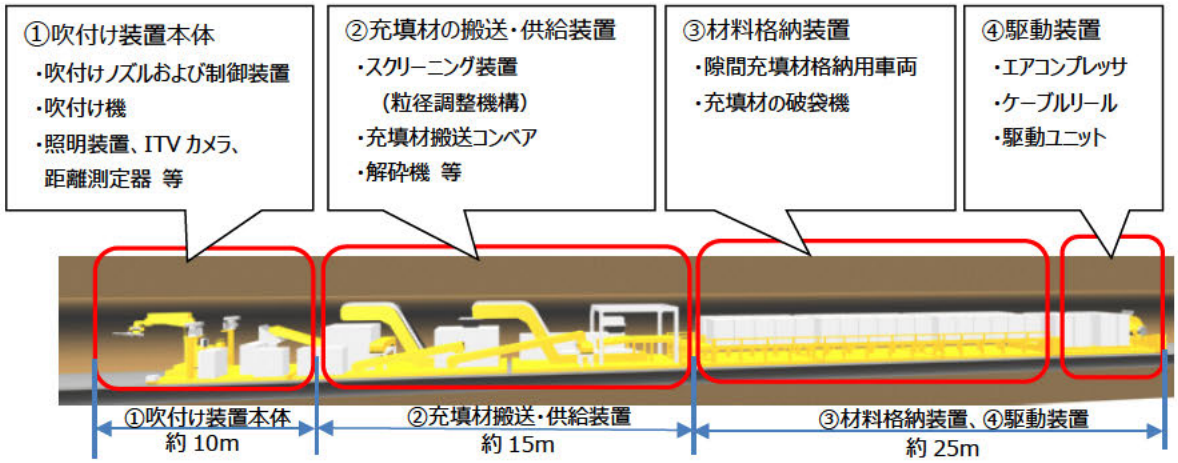


図 2.2.4-2　横置き・PEM 方式における吹付け充填装置の概念設計例

上記のような充填装置のうち、中核となる技術として装置先端部の「吹付け装置本体」から「吹付けノズルおよび制御装置、吹付け機」を整備対象とした。なお、これらの技術の整備に際し、本研究では、「汎用的な機械」を用いた場合の技術実証として、乾燥密度等のデータ取得を行った。

(5)　吹付け方式による上部開放部の充填技術の整備手順

図 2.2.4-1 に示した通り、吹付け方式による充填後の目標乾燥密度を達成するために重要となる主な要因は、①充填場所の状態、②装置や充填方法および③充填材料の品質となる。今回の地下実証試験の場所は、幌延 URL 試験坑道 2 であり、①充填場所の状態のうち、隙間形状や壁面状態などの因子は与条件となる。また、③充填材の品質のうち、原材料については、NUMO 包括的技術報告書（レビュー版）[2]を参考に、設定した条件（ベントナイト：ケイ砂=50%：50%）となる。さらに、2.2.4(4)に示した通り、本研究では、吹付け方式の中核となる技術として、装置先端部の「吹付け装置本体」の部分を技術の整備対象とすることから、地下実証試験の前提条件として、「吹付け装置本体」には品質の確保された充填材（ベントナイト混合土）が供されることとし、③充填材の品質のうち、輸送・貯蔵の因子は、本研究では対象外とした。

以上より本研究では、②装置・充填方法による乾燥密度への影響因子（吹付け装置の運転条件（パラメータ）、未充填部が生じない吹付け方法・手順）を重点項目とし、技術の整備に取り組んだ。本研究の吹付け方式の充填技術の整備手順を図 2.2.4-3 に示す。

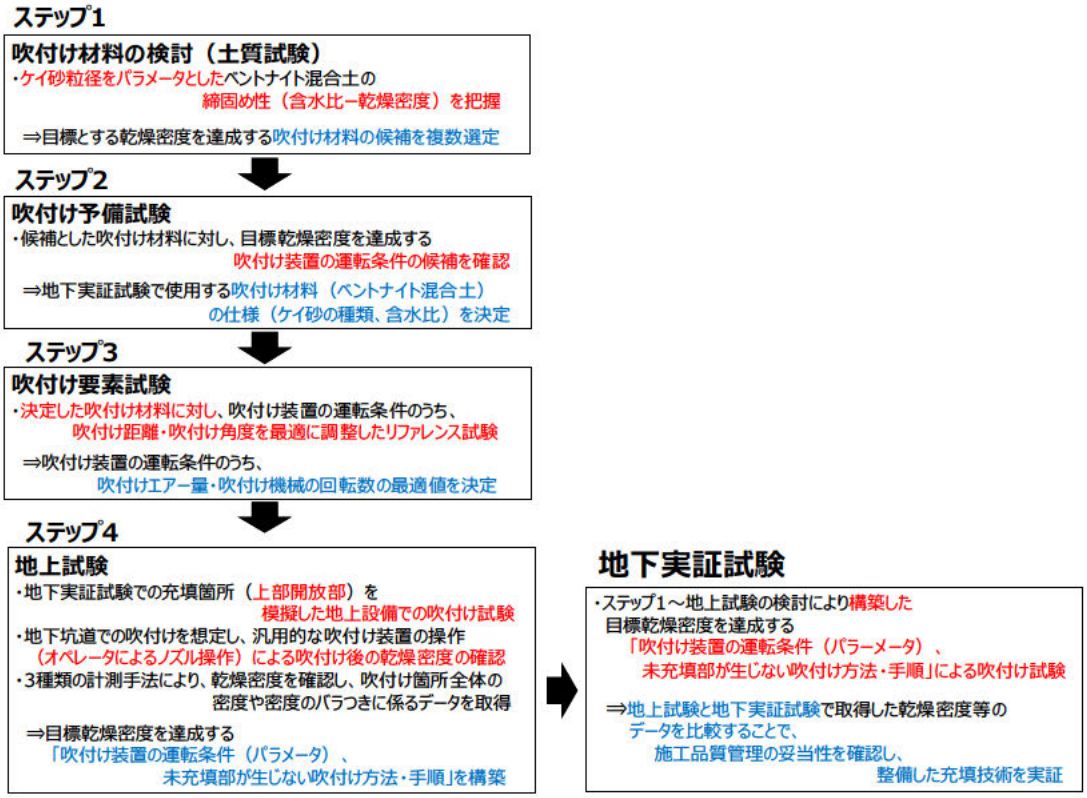


図 2.2.4-3　吹付け方式による上部開放部の充填技術　整備手順

(6)　吹付け方式　充填技術の段階的な整備

図 2.2.4-3 に示した整備手順により、地下実証試験に先立つ地上での予備試験によって、目標乾燥密度の達成が可能となる「吹付け装置の運転条件（パラメータ）」を設定した（表 2.2.4-2）。

また、段階的な技術実証において実施した一連の試験の成果を表 2.2.4-3 に要約する。

表 2.2.4-2　ベントナイト混合土の仕様および吹付け機の運転条件等

使用材料		ベントナイト（Na 型ベントナイト、クニゲル V1）
		ケイ砂（3 号+5 号）（1：1 で混合）
		水道水（幌延 URL では工事用水）
配合比		ベントナイト：ケイ砂（3 号+5 号）＝50%：50%
製造時含水比		15.8%（最適含水比）
充填後の目標乾燥密度		1.6Mg/m^3
吹付け機の運転条件	エアー量	10～12 m^3/min
	回転数	5rpm
	吐出圧	0.7MPa
吹付け方法	吹付け距離	（目標）1m 程度
	吹付け角度	（目標）吹付け面と吹付けノズルの角度を垂直
	吹付け機械の操作	伸縮アーム式吹付け機械（汎用機械）を使用し吹付けノズル等をオペレータが操作

表 2.2.4-3　段階的な技術実証の成果概要

段階	主たる目的	試験パラメータ等	成果の概要
土質試験ステップ 1	与条件である吹付け材料の仕様（配合比 ベントナイト：ケイ砂＝50%：50%）に対し、目標乾燥密度 1.6Mg/m^3 を達成する吹付け材料 ベントナイト混合土の締固め性能について検討（土質試験）	・ベントナイト混合土に配合するケイ砂の種類 ・締固めエネルギー	・ベントナイト（Na 型ベントナイト；クニゲル V1）に混合するケイ砂の種類を 3 種類（3 号、5 号、3+5 号）とし、ベントナイト混合土の締固め曲線を 1Ec、2Ec、4Ec で取得 ・締固めエネルギー2Ec において、ケイ砂種類 3 号+5 号を配合したベントナイト混合土では、最適含水比 15.8%、最大乾燥密度 1.69Mg/m^3 の結果を取得 ・いずれのケイ砂の種類においても、締固めエネルギー2Ec 以上で、目標乾燥密度(1.6Mg/m^3)の達成を確認
吹付け予備試験ステップ 2	土質試験で選定した複数の材料仕様に対し、ノズル閉塞の有無、連続的な吹付けの可否 目標乾燥密度を達成する吹付け装置の運転条件の見込み・候補を確認し、ベントナイト混合土の仕様を決定	・ベントナイト混合土の含水比 ・ベントナイト混合土に配合するケイ砂の種類 ・吹付け装置の運転条件 吹付け機の回転数、吹付け距離、角度は固定	・ベントナイト混合土に配合するケイ砂を、3 号、5 号、3+5 号の 3 種類とし、ベントナイト混合土の製造時の含水比（目標）を、最適含水比（Wopt）、Wopt－5%、Wopt－2.5%とし、吹付け予備試験を実施 ・目標乾燥密度（1.6Mg/m^3）を達成する吹付け装置の運転条件の候補として、吹付け機の回転数（5rpm）、吹付け距離（1m）、吹付け角度（90 度）を確認 ・ベントナイト混合土（配合比 ベントナイト：ケイ砂＝50%：50%）に配合するケイ砂の種類を 3 号+5 号、ベントナイト混合土の製造時の含水比を最適含水比（15.8%）と決定
吹付け要素試験ステップ 3	決定したベントナイト混合土の仕様に対し、吹付け装置の運転条件の最適値を設定し、目標乾燥密度を確認するリファレンス試験を実施、併せて、施工速度、リバンウンド率のデータを取得	・吹付け装置の運転条件として エアー量 4 条件、回転数を 3 条件 ・吹付け距離は 1m 程度、吹付け角度は 90 度とし最適値で固定	・吹付け装置のエアー量 4 条件（9、10、12、18m^3/min）、回転数 3 条件（3、5、8rpm）とし、吹付け距離および吹付け付け角度については最適値（1m、90 度）で固定し、吹付け要素試験を実施 ・エアー量 9 m^3/min のケースでは、吹付け時の付着が弱く、乾燥密度のバラつきを考慮した際に平均乾燥密度が目標を下回る可能性があり ・エアー量 18m^3/min のケースでは、目標乾燥密度に対し、+0.15~0.24Mg/m^3 と十分に超える乾燥密度を得たがややオーバースペックであり、リバウンド量が増加 ・回転数は最も高密度となる 5rpm を採用 ・目標乾燥密度 1.60Mg/m^3 以上を達成する最適な吹付け機の運転条件として、エアー量 10～12 m^3/min、回転数 5rpm を設定
地上試験ステップ 4	地下坑道の形状を実寸大で模擬した地上設備にて、汎用的な吹付け機械（伸縮アーム式吹付け機械）を使用し、オペレータのノズル操作により目標乾燥密度を達成する吹付け手順等の施工品質管理手法を確認	・吹付け装置の運転条件として エアー量 10～12m^3/min 回転数 5rpm ・オペレータのノズル操作により、目標値として 吹付け距離は 1m 程度 吹付け角度は 90 度	・伸縮アーム式吹付け機械による模擬坑道への吹付けでは、コアサンプリング試料による平均の乾燥密度が、1.61Mg/m^3 となり、目標乾燥密度 1.6 Mg/m^3 を満足 ・一方で、吹付けノズルを吹付け面に対し、垂直に保つことが難しい箇所（例えば模擬 PEM 側部）も一部あり、リバウンド率の増加や局所的に密度が低くなる結果を取得 ・標準的なオペレータのノズル操作、吹付け手順により、模擬坑道内で未充填部を生じることなく、充填が可能であることを確認

(7)　地下実証試験

幌延 URL における上部開放部の隙間充填技術の実証試験では、地上試験までに決定したベントナイト混合土の仕様および吹付け機の運転条件（表 2.2.4-2）に則り、伸縮アーム式の吹付け機械による吹付け充填を実施した。図 2.2.4-4 に幌延 URL 試験坑道 2 上部開放部の充填範囲図を示す。

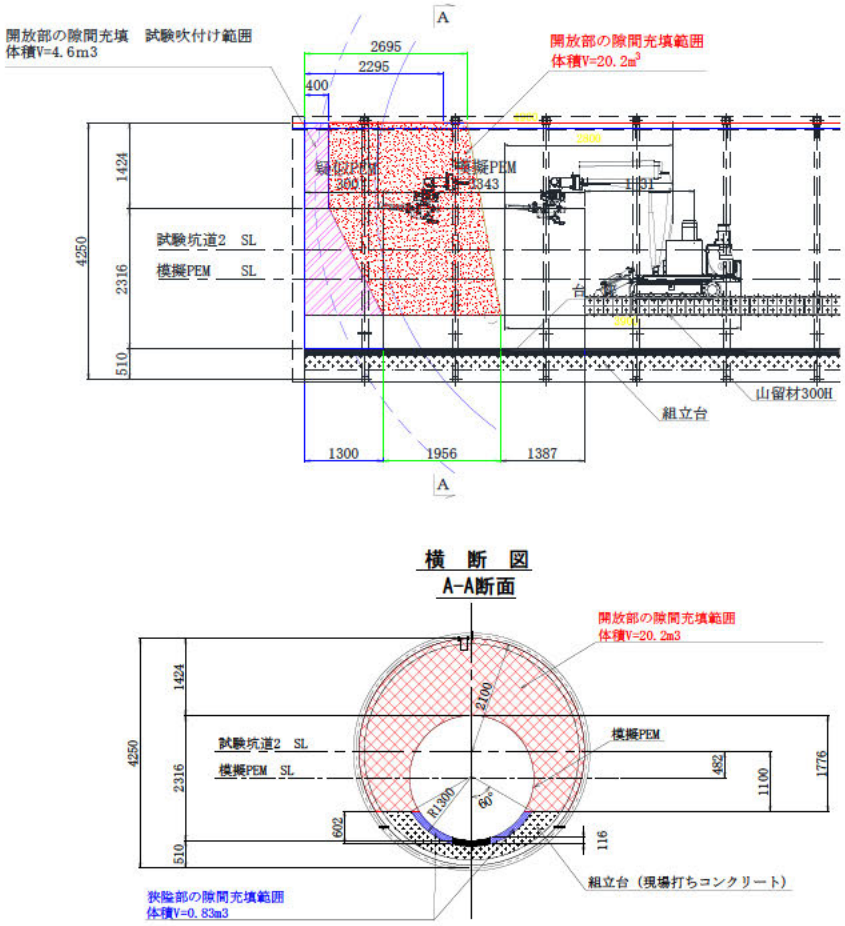


図 2.2.4-4　幌延 URL 試験坑道 2 上部開放部の充填範囲図

吹付け材のベントナイト混合土は、幌延 URL の地上建屋内に、製造プラントを仮設して、強制二軸ミキサにより材料を製造（混合）した。ベントナイト混合土の製造後、地下での試験を開始するまでの期間は、ベントナイト混合土をフレコンに収納して保管した。

地下実証試験では、地上試験と同様にコアサンプリングおよび誘電率計測から算出した乾燥密度、3 次元計測器を用いて計測した充填体積と充填材重量から求めた乾燥密度を取得し、目標の乾燥密度 1.60Mg/m³ に対するバラつき等の情報を整理した。また、回収したリバウンド材の重量計測から、吹付け量に対するリバウンド率を算出した。

a 全体設備

図 2.2.4-5 に上部開放部の隙間充填に係る全体設備の機械配置を示す。地上にベントナイト混合土の製造設備を設置し、ベントナイト混合土の製造・ふるい・一時保管を行った。地下には、吹付け設備を設置し、伸縮アーム付き吹付け機械および吹付機による充填を実施した。

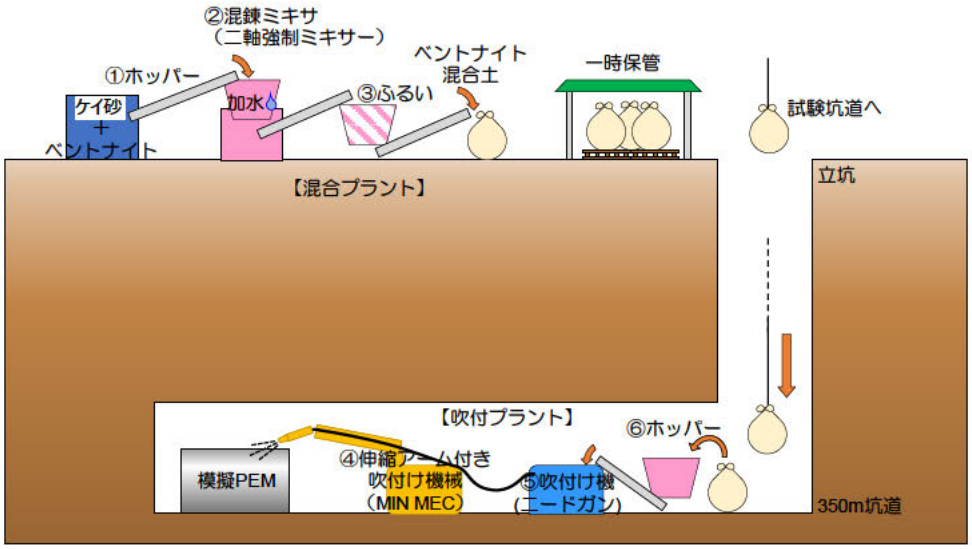


図 2.2.4-5　上部開放部の隙間充填に係る全体設備・機械配置

試験坑道 2 の吹付け作業で使用した吹付け装置は、地上試験で用いた装置と同じである。

汎用的な吹付け機である、伸縮アーム式吹付け機械（MINIMEC、図 2.2.4-6）、吹付け機（ニードガン、図 2.2.4-7）、リバンウンド材の回収には圧縮空気を原動エネルギーとする粉体の搬送装置である長距離空気搬送機（ジェクター、図 2.2.4-8）を使用した。

項目	用途・仕様	外観
伸縮ブーム延長	2100mm	
ノズル回転	360°	
ノズル傾き	180°	
ブーム回転	110°	
ブーム到達範囲	横：6400mm 垂直：8000mm	
ブーム油圧システム	電気-油圧：7.5kW/50Hz/1450rpm	

図 2.2.4-6　伸縮アーム式吹付け機械（MINIMEC）の仕様

項目	用途・仕様	外観
メーカー	AGC プライプリコ	
ホース内径	63.5mm	
最大骨材寸法	15mm	
所要空気圧	0.74MPa	
回転数	5～16.5rpm	
吐出量	20m³/h （ホース 20m,0.74MPa 時）	
備考；上記はメーカカタログ値（標準的な性能）		

図 2.2.4-7　吹付け機（ニードガン）の仕様

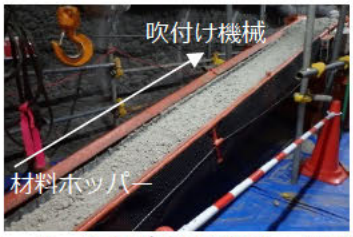
項目	用途・仕様	外観
吸引内径	75mm	
排出内径	125mm	
全長	1010mm	
幅	280mm	
重量	25kg	
材質	SUS304	

図 2.2.4-8　ジェクター（JT75S-5）の仕様

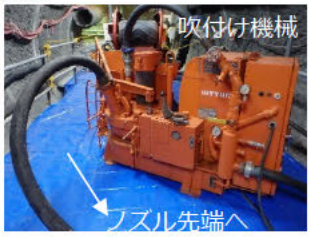
b 試験結果

吹付け機の運転条件は、地上試験時と同様（表 2.2.4-2）である。地下実証試験の吹付け状況を図 2.2.4-9 に示す。

充填材の材料ホッパーへの供給



材料ホッパーから吹付け機械への材料供給



吹付け機械からノズル先端への材料圧送

ノズル先端部

伸縮アーム式吹付け機械による
吹付け状況

図 2.2.4-9　地下実証試験の吹付け状況

◆吹付け後の乾燥密度

3 種類の計測手法（コアサンプリング、誘電率計測、3 次元計測）から算出した乾燥密度の結果を地上試験の結果と併せて、表 2.2.4-4 に示す。地下実証試験において、3 種類の方法により平均の乾燥密度を算出した結果、コアサンプリングによる乾燥密度（1.66Mg/m³）＞誘電率計測による乾燥密度（1.55Mg/m³）＞3 次元計測による乾燥密度（1.49Mg/m³）、となる傾向を得た。この傾向は、地上試験、地下実証試験ともに同様である。

表 2.2.4-4　3 種類の計測手法の乾燥密度結果（地上試験、地下実証試験）

	コアサンプリング		誘電率計測		3Dスキャナ計測	
	地上 実証試験	地下 実証試験	地上 実証試験	地下 実証試験	地上 実証試験	地下 実証試験
平均乾燥密度 (Mg/m^3)	**1.61**	**1.66**	**1.58**	**1.55**	**1.41**	**1.49**
標準偏差(Mg/m^3)	0.05	0.08	0.13	0.09	0.10	0.09
中央値(Mg/m^3)	1.62	1.67	1.61	1.57	1.39	1.53
範囲 (Mg/m^3)	**0.27**	**0.43**	**0.62**	**0.66**	**0.22**	**0.26**
最大値(Mg/m^3)	1.70	1.83	1.74	1.78	1.54	1.59
最小値(Mg/m^3)	1.44	1.39	1.12	1.12	1.32	1.33
標本数	64	147	190	588	4	8

◆団粒材除去率、リバウンド率

ベントナイト混合土の製造過程（混合過程）で生じる団粒材（ベントナイト混合土が団粒化した材料）は、ホースやノズルの閉塞の原因となり得る。そこで、製造したベントナイト混合土を、ベルトコンベアで吹付け機に運搬するまでの間で、目開き 3cm のふるい装置で団粒材を除去した。ここで、材料ロスに係るデータの一つの指標として、団粒材の除去率を以下の式で算出した。

$$\text{団粒材の除去率（\%）} = \frac{\text{団粒材の除去量}}{\text{混合用ミキサへの材料投入量}} \times 100$$

地下実証試験の結果と共に、ステップ 3 吹付け要素試験、ステップ 4 地上試験の団粒材除去率の結果のまとめを表 2.2.4-6 に示す。

表 2.2.4-5　要素試験、地上試験、地下実証試験での団粒材除去率

	団粒材除去率	混合方法
ステップ 3 要素試験	33.7 %	混合方法 改善前
ステップ 4 地上試験	27.9 %	
地下実証試験	17.6 %	混合方法 改善後

	要素試験	地上試験	地下実証試験
平均団粒材除去率（%）	**33.7**	**27.9**	**17.6**
標準偏差（%）	4.7	7.0	2.2
中央値（%）	34.2	27.8	17.7
範囲（%）	9.8	23.3	18.4
最大値（%）	38.1	42.0	28.5
最小値（%）	28.3	18.8	10.1
標本数	4	19	224

ステップ 3 4 におけるベントナイト混合土の混合では、混合時間を長くすると団粒化が促進される傾向が確認できたことから、混合方法の見直しを行い、団粒化の抑制を試みた。

具体的には、加水後のベントナイト混合土の混合時間を短縮することで、団粒材の発生を低減できることを確認できた。なお、団粒材の発生には、混合用ミキサの仕様（種類、撹拌力）、材料の投入順序・周辺環境等にも起因すると考えられることから、これらを総合的に管理することが重要となる。

◆リバウンド率

地下実証試験の結果と共に、ステップ 3 吹付け要素試験、ステップ 4 地上試験のリバウンド率（＝リバウンド材の重量（捕集重量+ホース内残土重量）／ノズル吐出重量）の結果のまとめを表 2.2.4-6 に示す。

表 2.2.4-6　要素試験、地上試験、地下実証試験でのリバンウンド率

	リバウンド率	コンプレッサの吐出エアー量	吹付け機の回転数	吹付けノズルから吹付け面との距離および角度
要素試験	25.4 %	10 m³/min	5 rpm	距離；1 m 程度 角度；90 度 要素試験；吹付けノズルを上記の距離・角度に固定 地上試験、地下実証試験；ノズルをオペレータが操作
	37.3 %	12 m³/min		
地上試験	23.0 %	10～12 m³/min		
地下実証試験	33.0 %			

一般的にリバウンド率を低下させるためには、常に吹付けノズルを吹付け面に対し垂直とすることが重要であることが既往の検討[17]において示されている。

地下実証試験でのリバウンド率は、33%となり、地上試験でのリバウンド率 23%に比べ約10%増加した。地下実証試験では坑道内という狭隘な施工空間での作業のため、オペレータのノズル操作に依存する運転条件（吹付け距離、吹付け角度）の精度が地上試験に比べ低下した原因と考えられる。

吹付け距離、角度を最適（設定値）に調整（固定）した要素試験では、エアー量が 12m³/min の条件ではリバウンド率 37.3%となり、エアー量を 10m³/min に下げた条件ではリバウンド率が 25.4%と 10%程度、低下した。これらの結果より、リバウンド率への影響要因として、エアー量も重要な一要因であると考えられる。

◆施工速度（単位時間当たり吹付け重量）

地下実証試験結果と共に、ステップ 3 吹付け要素試験、ステップ 4 地上試験の吹付けの施工速度の結果のまとめを表 2.2.4-7 に示す。

表 2.2.4-7　要素試験、地上試験、地下実証試験での施工速度

	出来形重量	施工に係る総時間	吹付け時間	施工速度※	吹付け速度※	備考
要素試験	260~370kg	No Data	6 分～6 分 30 秒	No Data	2.6～3.4 Mg/hr	出来形、時間は累計値
地上試験	11 Mg	12 時間	3 時間	0.9 Mg/hr	3.7 Mg/hr	
地下実証試験	38 Mg	29 時間	15 時間	1.3 Mg/hr	2.5 Mg/hr	

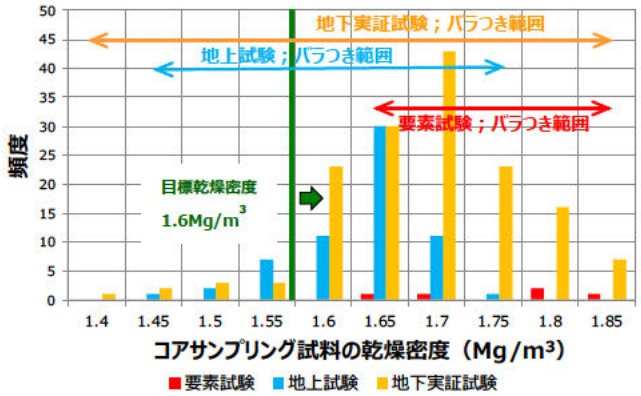
※施工速度は出来形重量（吹付けにより付着した重量）を施工に係る総時間で除した値であり、施工に係る総時間は品質確認に係る時間は除き、ベントナイト混合土の団粒材除去時間、吹付け時間、リバウンド材の捕集時間を含む。吹付け速度は出来形重量を吹付け時間で除した値である。

地下実証試験における吹付け速度（単位時間当たりの吹付け重量）は、2.5Mg/m³ となった。参考として、地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験の成果[18]では、上部埋め戻し材（配合；ベントナイト（クニゲル V1）:砂=15%：85%、目標乾燥密度；1.63Mg/m³（締固めエネルギー1Ec の最大乾燥密度の 90%））の吹付け速度が 2.28Mg/m³ との結果が記載されており、配合や目標乾燥密度が異なるものの、同程度の吹付け速度の結果となった。

c 地下実証試験 まとめ

◆吹付け方式による充填 施工条件（吹付け機械の運転条件・方法）の設定と乾燥密度

地上試験等で確認・設定した吹付け方式による充填に係る施工条件の設定（吹付け機械の運転条件・方法）に基づき、吹付け方式による地下実証試験を実施した。その結果、コアサンプリングによる乾燥密度の平均値は 1.66 Mg/m³、ばらつきは 1.4～1.8 Mg/m³ と目標の乾燥密度 1.6Mg/m³ に対し±0.2 Mg/m³ 程度となる結果を得た。この結果は、地上試験におけるコアサンプリングによる乾燥密度の平均値 1.61 Mg/m³（ばらつき 1.4～1.7 Mg/m³）と同程度の結果となった（図 2.2.4-10）。



	要素試験	地上試験	地下実証試験
平均乾燥密度 (Mg/m³)	1.72	1.61	1.66
標準偏差(Mg/m³)	0.08	0.05	0.08
中央値(Mg/m³)	1.76	1.62	1.67
範囲 (Mg/m³)	0.20	0.27	0.43
最大値(Mg/m³)	1.81	1.70	1.83
最小値(Mg/m³)	1.61	1.44	1.39
標本数	5	63	147

図 2.2.4-10　要素試験、地上試験、地下実証試験の乾燥密度結果

一方で、PEM 側部の下端部などの狭隘な隅角部へ吹付けを行う場合や、比較的広い吹付け箇所においても障害物がある場合など、ノズル操作の精度に影響を生じる場合には、乾燥密度が目標を下回る結果を得た（図 2.2.4-11、図 2.2.4-12）。

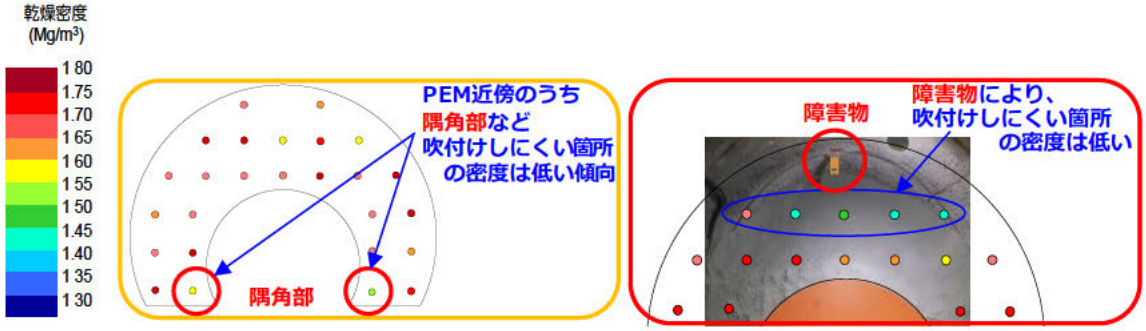
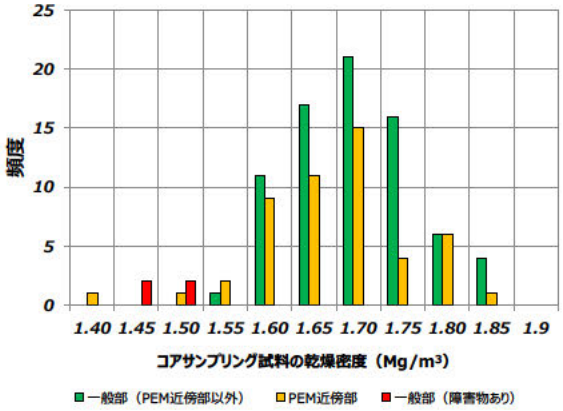


図 2.2.4-11　地下実証試験結果 乾燥密度の低い箇所の例（コアサンプリング）(1/2)



	一般部	PEM 近傍部	一般部 (障害物あり)
平均乾燥密度 (Mg/m³)	1.68	1.65	1.45
標準偏差(Mg/m³)	0.07	0.08	0.02
中央値(Mg/m³)	1.67	1.66	1.45
範囲 (Mg/m³)	0.31	0.41	0.06
最大値(Mg/m³)	1.83	1.81	1.48
最小値(Mg/m³)	1.52	1.39	1.42
標本数	93	50	4

図 2.2.4-12　地下実証試験結果　吹付け場所による乾燥密度

更に、PEM 鋼殻に対し直接ベントナイト混合土を吹付けた場合には、付着しにくく、跳ね返り（リバウンド）が多く生じたため、付着および締固めが十分ではなく低密度の箇所が生じた。

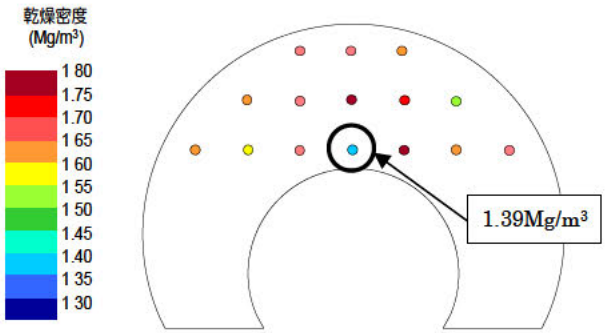


図 2.2.4-13　地下実証試験結果 乾燥密度の低い箇所の例（コアサンプリング）(2/2)

◆隙間充填材（ベントナイト混合土）の製造時の含水比

強制二軸ミキサにより混合・製造したベントナイト混合土について、製造時の平均含水比は 15.6%、標準偏差 0.7%となった。試験期間中（8 日間）の全ての製造日で、含水比の管理値の 15.8%±2.0%以内に収まる結果を得たことから、含水比に関して、安定した品質を確保したベ

ントナイト混合土の製造がなされたと考えられる。

◆吹付け後の含水比

吹付け後のベントナイト混合土の平均含水比は約 17.0%となり、製造後の含水比の平均値 15.6%に比べて約 1.5%程度、含水比が上昇する結果となった。地下実証試験では、製造（混合）したベントナイト混合土を当日中に吹付け材料として使用しているが、地下環境での湿気の吸収、フレコン内での水分のなじみによる含水比の上昇の可能性などが考えられる。

◆隙間充填材（ベントナイト混合土）の製造時の配合率

強制二軸ミキサにより混合・製造したベントナイト混合土の配合率の平均は 43.0%、バラつきの範囲は 35.3～53.8%となり、設定値 50%に比べてベントナイト配合率が低い値となり、バラつきの範囲がやや広い結果となった。この原因は、製造時の加水方法による影響が考えられた。地上試験では、人力によりジョウロを使用し目視確認しつつ加水・混合を実施したが、地下実証試験では製造数量が多いことから、位置を固定したシャワーホースによる自動計量による加水を行った。位置を固定したシャワーホースによる加水方法は、多量の材料を混合する際に効率的ではあるが、一方、局所的に加水される場合があり、その結果、ベントナイトを多く含む団粒材が生じる場合があり、この団粒材をふるいにより除去したことから、製造後のベントナイト配合率がやや設定値よりも低い値となったと考えられる。

◆吹付け後の配合率

吹付け後のベントナイト混合土の配合率は、平均では約 47.2%となり、製造後の配合率の平均値 43.0%に比べて平均で約 4.2%上昇した。この結果は、リバンウンド材に砂分が多く含まれたことが要因と考えられる。なお、ベントナイト混合土の吹付け施工のリバウンド材には、分離した砂分が多く含まれることが、既往研究でも報告[17]されており、同様の結果となった。

◆吹付け後のリバウンド率

吹付け後のリバウンド率（＝リバウンド材の重量（捕集重量+ホース内残土重量）／ノズル吐出重量）は 33%となり、地上でのリバウンド率 23%に比べ約 10%増加した。地上試験と地下実証試験との隙間形状の若干の違い、地下の坑道内という狭隘かつ作業空間に制限（空頭制限など）のある条件下での吹付けのため、オペレータのノズル操作に依存する運転条件（吹付け距離、吹付け角度）の精度が地上試験に比べ低下したことなどが影響したものと考えられる。

◆施工速度（施工効率）

吹付け速度（単位時間当たりの吹付け重量）は、2.48Mg/m^3 となった。参考として、地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験の成果[18]では、上部埋め戻し材（配合；ベントナイト（クニゲル V1）:砂=15%：85%、目標乾燥密度；1.63Mg/m^3（締固めエネルギー1Ec の最大乾燥密度の 90%)）の吹付け速度が 2.28Mg/m^3 との結果が記載されており、配合や目標乾燥密度が異なるものの、同程度の吹付け速度の結果となった。また、圧縮空気を原動エネルギーとする粉体搬送装置 ジェクターを用いたリバウンド材の捕集効率は、1.88Mg/m^3 となった。

(8)　実証試験成果を踏まえた充填技術（吹付け方式）の拡張・展開の可能性

本事業で整備した上部開放部（大断面）に対する吹付け方式による隙間充填技術については、「地上で事前に設定した施工条件（吹付け機械の運転条件・方法）」を地下環境で再現することで、地下環境においても地上と同等の乾燥密度（平均値）を達成することが確認できた。併せて、本充填技術を構成する個々の要素技術に関する試験をとおして、各技術の適用範囲や性能レベルを確認した。

一方で、実証試験における稼働環境である地下の原位置環境（坑道壁面からの湧水、地温など）は、試験坑道 2 の環境をそのまま利用することを前提としたことから、充填する場所や形状は与条件となり、選定した技術も与条件を満たすものでしかない。将来の実際の技術の適用場面（幅広い原位置環境や多様な隙間充填材の仕様）を踏まえると、それらのバリエーションへの適用性をさらに高めていく必要がある。以下に、その様な適用場面への柔軟性や技術としての拡張性について考察した結果を要約する。

技術としての拡張性（実用技術としての品質（乾燥密度）の再現性や適用性）

○施工条件の設定による目標乾燥密度の再現性の確保と適用性

地上で事前に設定した施工条件（吹付け機械の運転条件・方法）に基づき地下実証試験を行い、目標とした乾燥密度 1.6Mg/m^3 を達成することができた（実証試験の実測平均値は 1.66 Mg/m^3）。この結果は、地上試験におけるコアサンプリングによる乾燥密度の平均値 1.61 Mg/m^3 と同程度であり、バラツキの範囲も同様であった。

この試験実績から、吹付け方式について、以下の項目（施工条件）を適切に管理することによって目標とする乾燥密度の再現性を確保できる可能性がある。

・装置の運転条件：エアー量、回転数、吐出圧

・施工（吹付け）条件：吹付け距離、吹付け角度

実証試験における地下の坑道壁面の状態（にじむ程度の湧水条件）に対して、標準的なオペレータのノズル操作による吹付けを行い、未充填部を生じることなく充填が可能であることを確認し、平均の乾燥密度は目標乾燥密度を達成したことから、吹付け方式は指定された品質管理（施工プロセス管理）の適用性が優れているといえる。

以上のような技術としての優位性が期待できる一方で、今回の実証試験に向けた技術の開発整備が与条件（充填する場所や隙間充填材）を前提としたことに伴い、技術としての適用性や拡張性の面で残された課題もある。今後、以下のような課題に対して着実に取り組むことで、技術としての優位性ならびに実現性や信頼性を高めていくことが可能となる。

実現性や信頼性の向上に向けた課題

今回の実証試験で与条件とした環境や隙間充填材は、以下のように限定的なものである。

・試験坑道 2 の湧水環境が限定的（壁面からの湧水はにじむ程度）

・試験坑道 2（PEM の形状や台座を含む）は、1 つの仮定した物理形状でしかない

・上部開放部の隙間充填材の仕様は、NUMO 包括的技術報告書（レビュー版）[2]を参考に設

定したベントナイト混合土(ベントナイト:ケイ砂＝50%:50%の配合、乾燥密度 1.6Mg/m^3)の 1 種類

今後、施工環境や隙間充填材の多様なバリエーションに対する技術の適用性に加え、吹付け方式の効率性や施工プロセス管理手法の高度化に係るデータや知見を拡充する必要がある。そのような知見を得ることで、改善に向けた技術の高度化に係るポイントや課題が明確となり、効果的な技術開発へのフィードバックが可能となる。このような反復的な開発プロセスにより技術としての実現性や信頼性を高めていくことができる。

以上のような課題や高度化に向けた取り組みの例として、次のようなことが挙げられる。

◆多様な形状への適用性（吹付け距離や角度の管理精度の向上）

地下実証試験の成果から、PEM 側部の下端部などの狭隘な隅角部へ吹付けを行う場合や、比較的広い吹付け箇所においても障害物がある場合など、ノズル操作の精度に影響を生じる場合には、目標とした乾燥密度が達成できない場面もあった。

例えば、吹付け対象箇所の自動計測や、それに応じた吹付け距離や吹付け角度の制御システムの導入といった高度化を進めることで、施工品質の向上を図ることができる。

また、吹付け工法は、現時点で最も多様な形状への適用性が高いと想定される。その点で、吹付け工法は他の充填技術を補完する技術としての優位性も高い。

◆PEM 鋼製容器に対する付着性の向上

PEM 鋼殻に対して直接ベントナイト混合土を吹付けた場合には、付着しにくくリバウンド量も増え、付着および締固めが十分ではない低密度の箇所が生じた。

吹付けノズルの精緻な操作・管理とともに、吹付け材（ベントナイト混合土）の PEM 鋼殻への付着性を向上させる吹付け手順の工夫などが望まれる。

◆多様な地下環境条件（例えば、湧水環境）に対する吹付け技術の適用限界の見極め

既往研究[19]では、緩衝材を吹付けにより施工する実験において、0.1L/min の面状湧水環境を設定した場合の結果として、「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、施工中における湧水の完全止水は困難である」、「吹付け施工中から緩衝材の体積拘束作業間において、緩衝材に水みちが発生した」等の事例が確認できる。

このようなことから、ベントナイト系材料を用いた吹付け技術について多様な環境条件（例えば、湧水環境）に対する技術の適用限界について、更なる知見の拡充が望まれる。

◆遠隔化・無人化施工技術

近年の動向として、土木分野でのコンクリート吹付け作業の自動化への取り組みが進められている。遠隔化や無人化に向けた装置のオートマチック化は、上述した幾つかの課題（吹付け距離や角度の管理精度の向上）への対処を包含する。

このような技術の高度化は、安定した施工品質の確保に加え、材料ロスの低減（リバンウド率の低下）や放射線防護対策としての対応の観点からも期待される。

◆多様な材料や要求仕様への適用性・柔軟性の向上

本事業では、吹付け充填の材料として、ケイ砂とベントナイトを 50%：50%で混合したベントナイト混合土を使用した場合の成果を示したが、今後は、多様な材料仕様に対し、適用性を有する吹付け技術の開発が必要となる。吹付け装置の工夫、改良および運転条件の最適化により、ある仕様範囲の材料に対する吹付けが可能となるが、例えば、掘削土を使用する場合の最大粒径に対する吹付け技術（装置）の適用限界など、知見の更なる拡充が望まれる。

◆その他に期待される技術の高度化

・リバウンド材の捕集作業の効率化：吹付け方式では、材料のリバンウンドが生じる。リバウンド材の捕集は、所定量の吹付けを実施したあと、一旦、作業を中止して、吸引装置等で捕集することが一般的であるが、吹付け作業と同時にリバウンド材の捕集が可能となる技術の開発、高度化などを進めることで、施工効率の向上に資すると考えられる。
・リバウンド材の再利用：材料ロスの低減の観点から、リバウンド材の再利用を可能とする技術があれば、より合理的な充填作業を達成することができる。本技術の開発では、併せて、充填材としての管理項目（例えば、配合率、含水比など）に対して再利用の判断に資する基準等の整備も必要となる。
・充填材の製造方法の高度化・規定化：強制二軸ミキサを用いた製造（混合）方法では、団粒材が多く生じたことから、地下実証に向けて混合方法を改善し、団粒材の除去率を低減した。しかし、混合時の加水が、一様にベントナイトに行きわたらない等の不均一性を原因に、ケイ砂とベントナイトの混合が完全には均等とならず、ベントナイトの団粒材が残存し、局所的な混ぜむらが生じる可能性があることから、本技術の高度化が期待される。

2.3　隙間充填材除去技術の実証的整備

2.3.1　除去技術の整備目標と開発整備の進め方

前節 2.2 で述べたように、地下実証試験で除去対象とする隙間充填材は次の 2 種類である。

・下部狭隘部に充填されたベントナイト 100%のペレット
（充填時の目標乾燥密 1.37 Mg/m^3、含水比約 7%）

・上部開放部に充填されたベントナイト混合土
（ベントナイト : ケイ砂＝50% : 50%、充填時の目標乾燥密度 1.60 Mg/m^3、含水比約 16%）

上記の PEM 周囲に施工された隙間充填材を対象とした除去技術に求められる機能は次の 2 つである。また、既に述べたように、除去技術の選定に際しては PEM 外殻容器に損傷等を与えないことに加え、将来の技術拡張に留意して隙間充填材の連続的な除去作業ができることを技術選択の要件とした。

・PEM と PEM を拘束する隙間充填材との縁切り

・PEM の回収装置（後続する回収作業）が要求する動作環境の実現

横置き・PEM 方式に対する回収技術については、処分孔竪置き方式と同様に緩衝材を除去してオーバーパックを回収する方式の要素技術が既に実証されている[9]。一方で、PEM 形態のままで（外殻容器ごと）回収する除去技術については、本事業の開始段階では未整備であったことから（2.1.1(2)2)）、本事業における除去技術の開発整備では、実際の地下環境で隙間充填材の除去が実施できることを示すことを第 1 の目標とする（地下の実証試験をとおして技術の適用性を確認する）。併せて、除去技術を構成する個々の技術に関する要素試験（地上での予備試験）をとおして、各技術の適用範囲や性能レベルを確認するとともに、将来の実用技術としての拡張性等に関する分析を行った。

2.3.2　除去技術の研究アプローチ

(1)　除去工程に影響を与える主要因の整理

除去技術の整備に関する研究のアプローチとして、まず、除去工程の効率（ここではその指標を「回収作業時間」とする）に影響を与えることが想定された次の 3 つの要因について、それぞれの相関を整理した（図 2.3.2-1）。

・除去場所

・除去対象物」

・除去技術

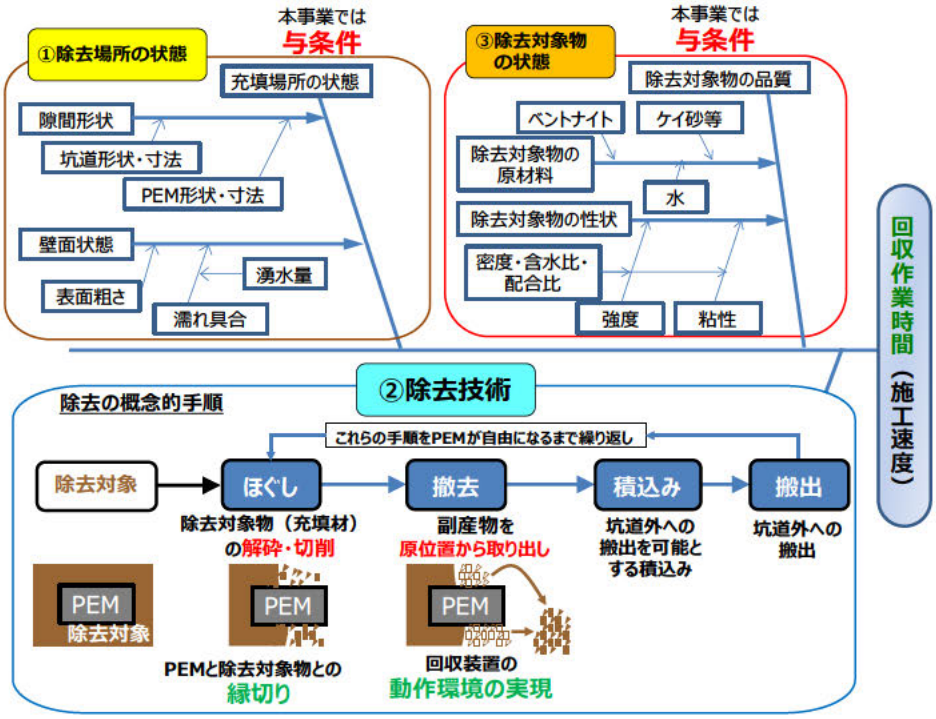


図 2.3.2-1　除去工程に影響を与える要因「除去対象物」「空間」「除去技術」の相関

1)　除去場所

除去対象の場所や形状は、将来的には設計結果に、本事業（実証試験）では実証試験を行う場所および PEM や隙間充填領域に係る設定であり、除去技術の観点からは与条件となる。本事業では既に述べたように、実証試験を合理的なものとするために（1 度の実証試験で複数の技術実証を可能とするために）、下部狭隘部は狭隘な坑道に PEM を定置した場合を、上部開放部は大断面坑道に PEM を定置した場合をそれぞれ想定し、2 つの各々の坑道断面に対する隙間充填材の除去技術を整備対象とした。

下部狭隘部と上部開放部の境界には、各々の領域を区分するための鉄板を設置している。坑道壁面からの湧水や地温などの地下環境は試験坑道 2 の環境条件をそのまま利用することとした。除去対象物については、前節 2.3 のとおりである（下部狭隘部；ベントナイト 100%のペレット、上部開放部；ベントナイト：ケイ砂＝50%：50%の混合土）。

2)　除去技術

隙間充填材の除去技術に関する作業を図 2.3.2-2 のようにブレークダウンした。除去作業は、「ほぐし」、「撤去」、「積込み」、「搬出」の 4 つの工程で構成され、除去作業に係る時間は、これらの 4 つの工程のうち最も遅いものが律速となる。また、前工程の行為が、後工程の効率に影響を与えることもある。

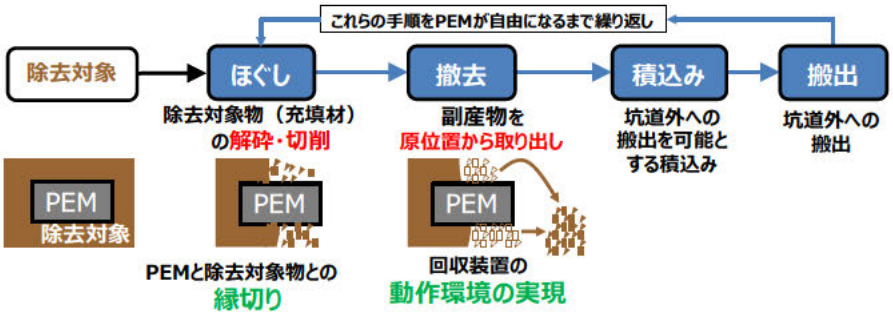


図 2.3.2-2　除去技術に関する作業を分割・具体化した概念図

前述したように、隙間充填材の除去技術に対する要求機能として、PEM を拘束する隙間充填材との縁切り、及び後続する PEM の回収装置が要求する動作環境の実現の 2 点を設定している。ここで、縁切りとは上図の“ほぐし”、回収装置の作業環境の実現は“撤去”が該当する。本事業では、この 2 つの工程に係る技術を除去の中核技術と捉え、技術の開発整備を実施した。図 2.3.2-2 に示す 4 つの工程について以下に整理する。

ほぐし

PEM と処分坑道との隙間に固着した隙間充填材を解砕し、隙間から取り出せる状態にする工程である。この工程によって、PEM と隙間充填材との縁切りが行われる。

撤去

ほぐした隙間充填材は解砕された状態（副産物）になり、PEM と坑道との隙間または PEM 手前側などにこぼれた後、原位置に残存する。この副産物を「原位置から取り出す工程」が撤去工程である。副産物を原位置から撤去することで、隙間充填材が充填されていた隙間に空間が生まれるとともに、充填箇所の清掃がなされる。本工程を経て、PEM を取り出す装置を動作させることが可能な作業環境が構築される。

積込み

撤去した副産物を、坑道外へ搬出する工程である。副産物が固形状の場合は搬出用のベッセルへの積込み、液状の場合はタンク等への積込みが本工程に該当する。副産物の形態によっては、搬出用のベッセル等に積み込むための運搬装置の先端部（ベルトコンベアのホッパー、圧送ポンプ吸入口）への供給工程となる。

搬出

積込み工程を終えた副産物を処分坑道の外へ搬出する工程となる。副産物を積載した車両、またはベルトコンベヤや圧送管による連続的な搬出も含まれる。ただし、本事業では処分坑道内における PEM の回収作業を対象としており（2.1.1(3)）、これ以降の工程は、一般土木分野における土質材料の移送手段の適用が可能であるため開発整備の対象外とした。

(2)　選定した除去技術

「PEM を拘束する隙間充填材の除去（縁切り）」、「PEM の回収装置が要求する動作環境の実現」を要求機能として設定した隙間充填材の除去に係る技術として、本事業では次の 2 つの方式（技術）を選定した。

・機械的除去技術（オーガ方式）

・流体的除去技術 ウォータージェット

なお、技術の選定に際し、PEM に損傷等の影響を与えない技術、連続的に隙間充填材の除去が可能となる技術であることを考慮した。具体的には、除去の対象に応じて以下の技術を適用することとした（図 2.3.2-3）。

・PEM から離れた部分（上部開放部のうち PEM 近傍を除く部分）：機械的除去技術であるオーガ方式

・PEM 近傍部（下部狭隘部および上部開放部のうち PEM 近傍部）：流体的除去技術であるウォータージェット方式

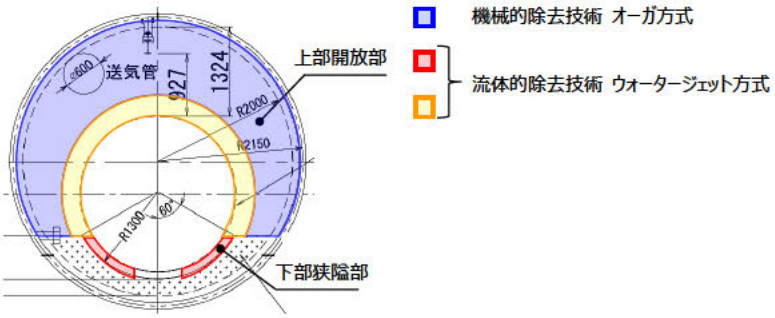


図 2.3.2-3　地下実証試験における各々の除去技術の対象領域　試験坑道 2 断面図

1)　機械的除去技術であるオーガ方式の選定

オーガ方式は、スクリューの回転力を用いて除去対象物の“ほぐし”と“撤去”を同時に実施可能な除去技術である。既存の土木工学分野での掘削技術を活用することで、効率の良い除去を見込むことができる。また、除去作業時のオーガの動線（動作）は、基本的に処分坑道長手方向となることから、PEM に接触して鋼殻を損傷させるという潜在的な危険性を低減できる点も選定理由の 1 つである。更に、スクリュー後方にほぐされた副産物の吸引装置を設置することにより、連続的に回収する機構とすることができる。

機械的除去技術の選定に際して、一般の土木分野の掘削技術を参考に、オーガ方式とその他の方式の長所・短所を整理し検討した結果を表 2.3.2-1 に示す。

表 2.3.2-1　本研究における機械的除去技術の選定検討

技術名	隙間充填材の除去に対する長所、短所	除去技術としての評価
バケット方式	バケット内に粘土分が付着し、除去力が低下 大きな作業範囲が必要	△
ブレーカ方式	対象が柔らかいため、隙間充填材に穴が開くのみで、ほぐす効果は小さい	×
シングルヘッダ方式	ヘッダーに粘土分が付着し、除去力が低下	△
オーガ方式	スクリューの回転によるほぐしと撤去の効果が見込める	○

2)　流体的除去技術であるウォータージェット方式の選定

ウォータージェット方式は、高圧噴射する流体の力により、除去対象物を解砕・除去する方式である。狭隘な箇所への除去にも適用が可能な技術であり、機械的除去に比べ PEM 鋼殻を損傷させる危険性がより少ない技術である。流動化させた除去物を吸引装置により連続的に回収する機構とすることで、高圧噴射による流体の力による「ほぐし」、吸引装置による「撤去」を同時に実施に実施することが可能である。

本事業では以下の点を考慮して、ウォータージェット方式で利用する流体に「真水」を用いることとした。

◆既往の研究において（処分孔竪置きブロック方式）、オーバーパック周辺の緩衝材に対して電解質溶液（塩水）の浸漬作用を利用した除去技術の成果が得られている（[5]）

◆竪置き・ブロック方式と比較すると、横置き・PEM 方式では使用水（塩水）を貯留しにくく、浸漬作用（化学的作用等）を期待しにくい

◆塩水スラリー方式とは異なる除去技術のオプションを整備することで、塩水が利用出来ない場合など、将来の実施の使用の場面で技術選択の柔軟性を高めることができる

◆塩水が利用出来ない系に対する除去技術オプションを整備しておくこと

なお、既往の研究[5]において、除去水の再利用の技術（緩衝材除去システムの構成技術うち塩水リユース設備）が整備されている。この技術は、ウォータージェット方式にも適用が可能であるが、本事業では、「切削後の副産物の減容化処理や、切削水の再利用」の技術については、整備の対象外としている。

以上のような技術選択に至る検討フローを、使用水の特性や除去対象への作用に着目して、図 2.3.2-4 に整理する。

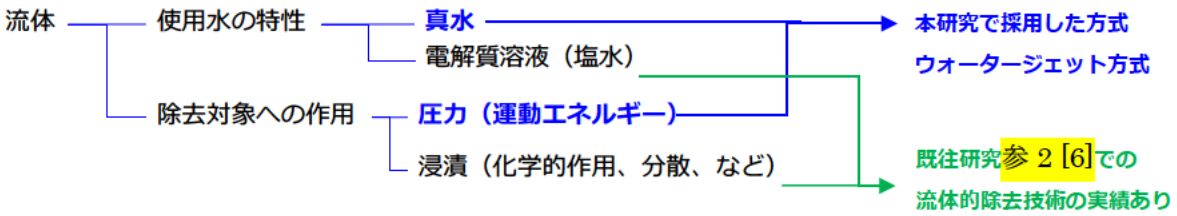


図 2.3.2-4　流体を使用した充填材への除去技術の整理の一例

3)　坑道形状を踏まえた除去技術の組合せ

地下実証試験では、前記 1)及び 2)の技術（装置）を上部開放部及び下部狭隘部のそれぞれに適用して（組み合わせて）、実施する計画とした。

2.3.3　機械的除去技術の実証的整備

(1)　除去対象とする隙間充填材

地下実証試験において、機械的除去技術の適用対象とする箇所は、模擬 PEM 外周部であり、除去対象物の隙間充填材は吹付け方式により充填されたベントナイト混合土(表 2.3.3-1)である。既に述べたように、機械的除去技術としてオーガ方式を選定しており、オーガによりほぐした副産物はスクリュー後方に設置した吸引装置により連続的に回収する機構とした。

表 2.3.3-1　除去対象とする隙間充填材（充填時の目標乾燥密度および設定含水比）

対象部位	充填材料	目標 乾燥密度	設定 含水比
上部開放部 (PEM 近傍を除く)	ベントナイト混合土 (ベントナイト：ケイ砂＝ 50%：50%)	乾燥密度 1.60 Mg/m^3 (有効粘土密度 1.15Mg/m^3)	16%

(2)　中核技術の抽出

本事業における技術の開発整備では、実際の処分事業を想定した機械的除去装置の概念設計例（図 2.3.3-1）を検討し、現時点で実証しておくべき中核技術を抽出し、段階的な技術の開発整備に取り組んだ。

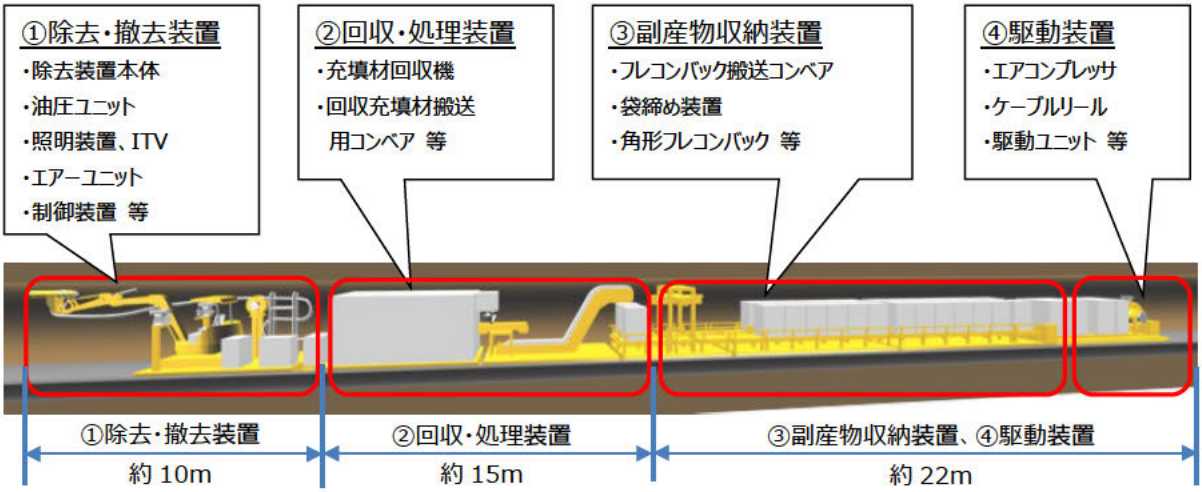
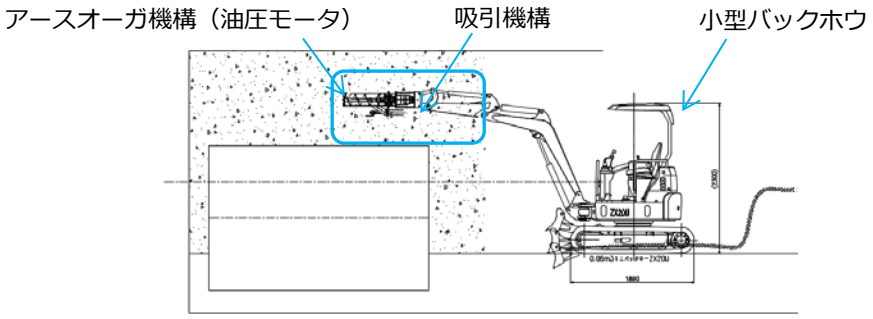


図 2.3.3-1　横置き・PEM 方式における機械的除去装置の概念設計例

上図に示した概念設計例のうち装置先端部の「除去・撤去装置」に関する技術を中核となる技術として実証の対象とし、アースオーガと吸引機構の部分に着目して、地下実証試験に使用する除去装置の設計検討を実施した（図 2.3.3-2）。なお、オーガと吸引以外の機構は、汎用的な機械を活用することとした。



アースオーガ機構と吸引機構の詳細

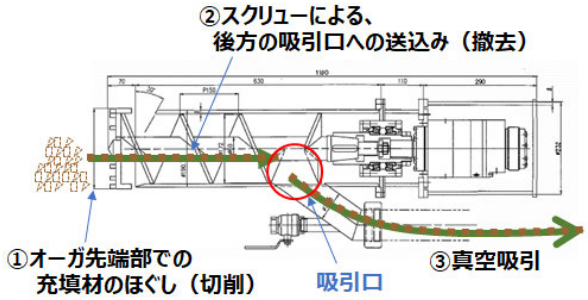


図 2.3.3-2　地下実証試験に使用する機械的除去装置 オーガ方式の設計検討

(3)　機械的除去技術の整備手順

図 2.3.3-3 に機械的除去技術の整備手順を示す。除去する場所と対象物は与条件として、前述した机上検討において、機械的除去技術の選定および中核技術の抽出等ならびに除去装置の概念設計を行い、地上での予備試験を経て、地下実証試験を実施した。

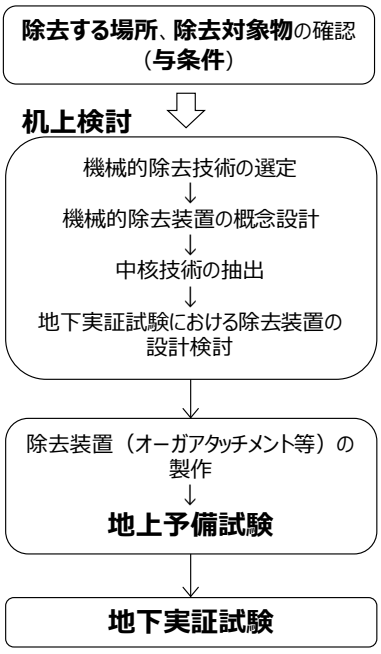
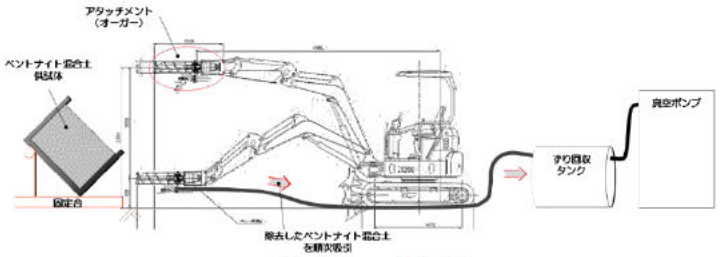


図 2.3.3-3　機械的除去技術の整備手順

(4)　地上での予備試験

上部開放部の隙間充填材と同仕様の供試体（乾燥密度 1.6Mg/m³，含水比 16%、1m×1m×0.7m）を地上試験ヤードに準備し、製作したオーガアタッチメントを装備した機械的除去装置による地上での予備試験を実施した（図 2.3.3-4）。製作したオーガアタッチメント（図 2.3.3-5）は、回転する先端のビットによりベントナイト混合土をほぐし（切削・解砕）、スクリューによりアタッチメント後方へ副産物を移動・撤去する。アタッチメント後方部に接続されたホースを介し、真空吸引により回収用タンクへ副産物を移動・撤去する。地上での予備試験では、製作したオーガアタッチメントの機能と副産物の吸引捕集の可否を確認した。



予備試験の全体図

機械的除去装置　全体

図 2.3.3-4　地上予備試験　説明図

側面

先端面

内部のオーガスクリュー

オーガアタッチメント

図 2.3.3-5　製作したオーガアタッチメント

地上での予備試験（図 2.3.3-6）では、供試体の中央部の切削・捕集（直径 200mm・深さ 300mm，切削量 0.006m³）に対し、約 1 分で除去（ほぐし・撤去）が可能であった。また、連続的な吸引捕集においても、装置の一部の改良の結果、オーガ内・吸引ホース内の閉塞は発生せず、吸引捕集が可能であった。

除去の様子

除去後の形状

図 2.3.3-6　地上での予備試験の状況

(5)　地下での実証試験

1)　試験概要

オーガ方式の機械的除去装置を使用し、上部開放部の隙間充填材（ベントナイト混合土）のうち、模擬 PEM 近傍 30cm 程度を除いた範囲について、「模擬 PEM と周辺充填材との縁切り」を目的とした地下での実証試験を実施した。実証試験では、オーガによるほぐし能力、吸引装置による撤去能力等の施工効率や、切削方向・手順など、設定した除去工程による作業性の確認、機械的除去が可能な範囲（PEM との必要離隔）などのデータを取得した。

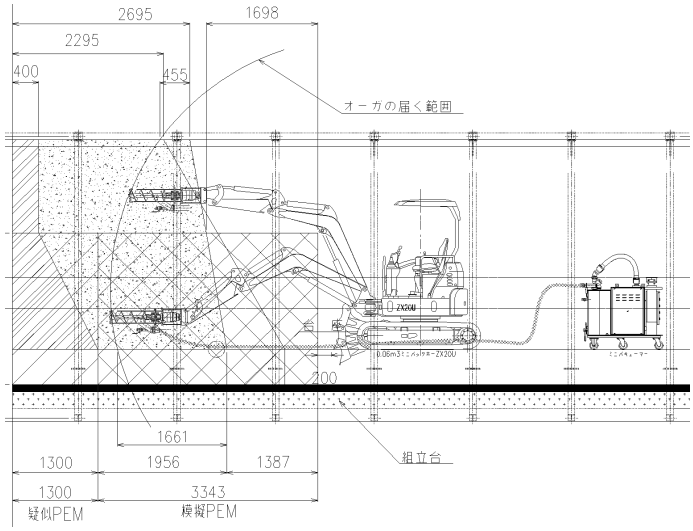


図 2.3.3-7　機械的除去技術の地下実証試験　説明図　試験坑道 2 縦断図

2)　機械的除去装置の運転条件と装置構成

吹付け方式により充填したベントナイト混合土（ベントナイト：ケイ砂＝50：50　充填時の目標乾燥密度 1.6Mg/m³、設定含水比 15.8%）である除去対象物に対する機械的除去装置の運転条件を表 2.3.3-2 に示す。

表 2.3.3-2　機械的除去装置の運転条件

項目	設定値	備考
オーガ回転数	36rpm	機械側で設定
オーガ挿入速度	―	オペレータのアーム操作に依存

地下での実証試験における機械的除去装置の平面配置図と概観を図 2.3.3-8 及び図 2.3.3-9 に示す。模擬 PEM 手前にオーガアタッチメントを取り付けた小型バックホウを配置し、その後方に回収タンク・バキューム（真空吸引装置）を設置した。吸引した除去物は回収タンクに一時的に保管され、適宜フレコンに封入して地上へ運搬した。

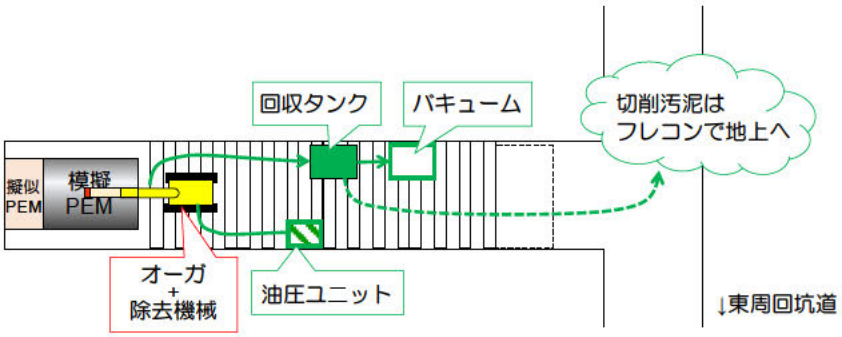
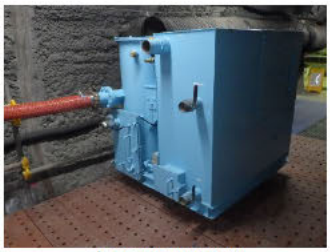


図 2.3.3-8　機械的除去装置の配置平面図

オーガ先端部

除去機械

回収タンク



真空吸引装置

油圧ユニット

試験状況

図 2.3.3-9　地下実証試験　機械的除去装置

3)　地下での実証試験結果

以下に実証試験の結果を要約整理する。ここで用いる用語や表現は、以下のとおりである（図 2.3.3-10）。

・切削量：オーガによるほぐし量（＝オーガ捕集量+こぼれ量）

・オーガ捕集量：オーガでほぐし、スクリューで吸引口まで搬送・捕集した量

・こぼれ量：オーガでほぐしたが、スクリュー内に取り込まれずに落下した量

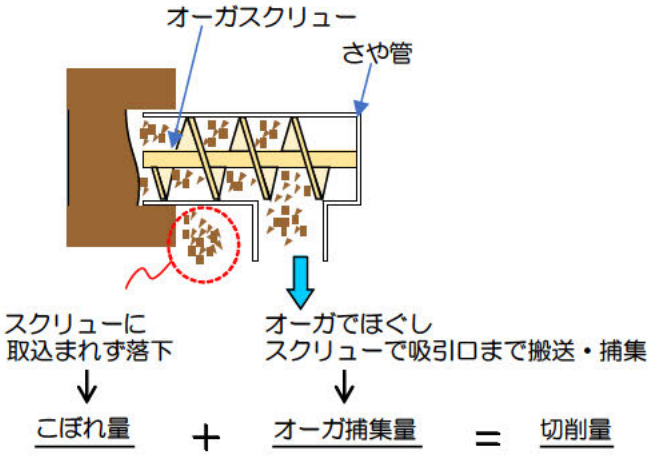


図 2.3.3-10　用語の説明　模式図

a 施工速度

● アースオーガによるほぐし（切削）の施工速度

製作したオーガアタッチメントは、オーガ先端部の回転による除去対象物の「ほぐし」とスクリューの回転による副産物の「撤去」を連続的に行う装置である。ほぐしと撤去を連続的に行う場合の施工効率と、ほぐし単体での施工効率を調査するため、オーガアタッチメントの“さや管”がある場合とない場合について、施工効率（単位時間当たりの切削量など）の違いを調査した（表 2.3.3-3）。

・さや管あり：ほぐしと撤去を連続的に行う機構

・さや管なし：オーガ先端部の回転によるほぐし単体の機構（図 2.3.3-11）

表 2.3.3-3　アースオーガによるほぐしの施工速度

	切削量 (kg/min)	オーガ捕集量 (kg/min)	こぼれ量 (kg/min)	除去対象物含水比 (%)
さや管ありのオーガ	2.3	1.4	0.9	16.2
	5.8	2.5	3.3	11.5
さや管なしのオーガ	5.5	—	—	16.2

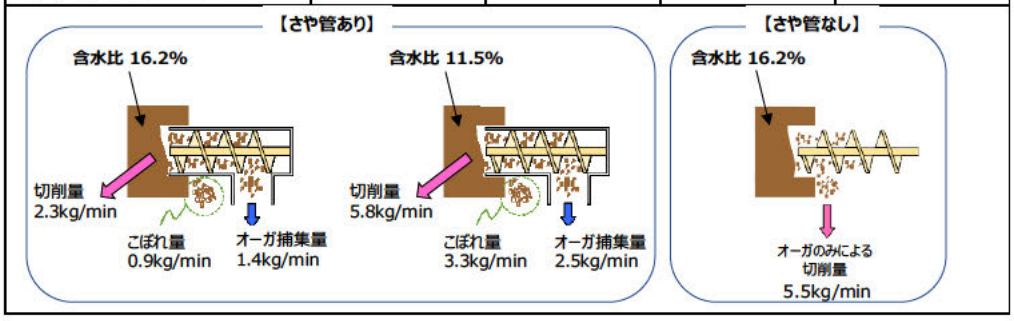


図 2.3.3-11　オーガアタッチメント　さや管なし

除去対象物の含水比が 16.2%の場合に、さや管のあり、なしで切削量を比較すると、さや管ありの場合は 2.3kg/min となり、さや管なしの場合の 5.8kg/min よりも施工効率が低下する結果となった。この結果より、オーガ先端部でのほぐしの能力に対し、後続のスクリューによる撤去能力が更に必要であるなど、各能力に対し最適な調整が必要であると考えられる。

また、さや管ありの場合に、材料含水比が 16.2%では切削量が 2.3kg/min、材料含水比が 11.5%では、5.8kg/min となり、材料含水比が低い場合に、切削効率が向上する結果となった。ただし、含水比が低い場合は、オーガ捕集量よりもこぼれ量が多い点に留意が必要となる。

● 真空吸引装置による撤去（吸引）の施工速度

ほぐされた副産物（ベントナイト混合土）の含水比を与条件として、真空吸引による撤去（吸引）の施工効率（単位時間当たりの吸引量）を調査した（表 2.3.3-4）。本調査では、オーガアタッチメントに接続するバキュームホースを使用し、ホースの吸引口から直接、副産物（ベントナイト混合土）を吸引した。撤去（吸引）量は、除去対象物が 15.4%の場合に 57kg/min、9.8%の場合に 72kg/min となり、オーガアタッチメントのほぐし（切削）能力に比べ、十分な能力である。

表 2.3.3-4　真空吸引装置よる撤去（吸引）の施工速度

除去対象物 含水比（%）	撤去（吸引）量 （kg/min）	備考
15.4	57	吹付け方式による充填時の含水比条件
9.8	72	上記より低含水比の条件

撤去（吸引）能力確認の様子

回収タンク内の様子

b 切削方向・手順などの除去手順による作業性

図 2.3.3-12 に示すような 3 孔×3 孔の範囲を除去する手順として、左から右へ横方向への 3 孔切削を下方向へ重ねた場合（ケース①）と、上方向へ重ねた場合（ケース②）の作業性を比較した。両者を比較した結果、単位時間あたりの切削量に顕著な差は生じなかった（表 2.3.3-5）。一方、切削方向を上から下とした場合（ケース①）は切削物が作業床上にこぼれるが、下から上の場合（ケース②）は切削済の下側の孔が上側の切削物を受け止めるため、吸引方式による切削物の捕集の観点では有利となる傾向がある。

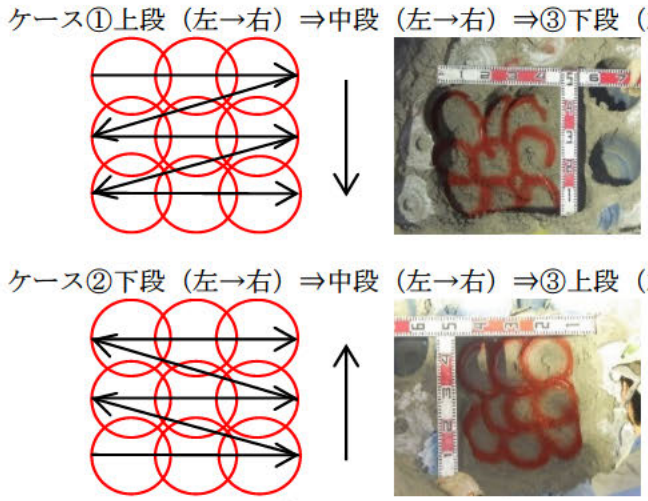


図 2.3.3-12　オーガの除去手順による作業性の確認　説明図

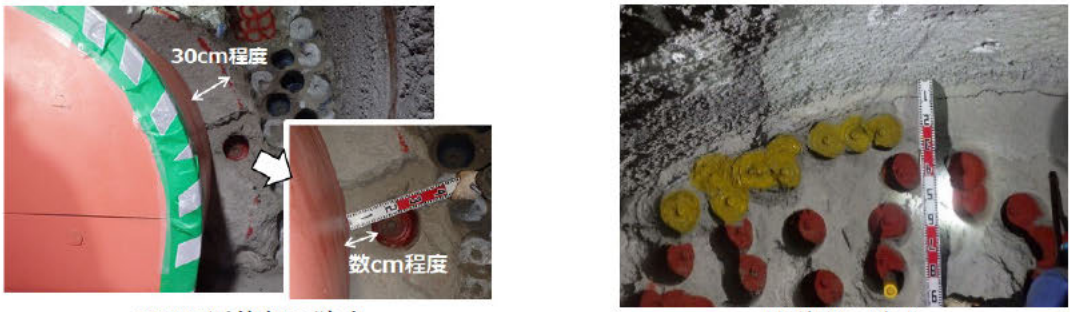
表 2.3.3-5　オーガの除去手順による施工効率の比較結果

	切削量 (kg/min)	オーガ 捕集量（kg）	こぼれ量 (kg)	除去対象物 含水比（%）
ケース①	2.1	81	38	16.2
ケース②	2.5	80	26	16.2
備考；両ケースとも、さや管ありのオーガアタッチメントを使用				

c 機械的除去が可能な範囲（PEM との必要離隔）

今回製作したオーガアタッチメントを装備した機械的除去装置を用いた場合に、必要となる PEM との離隔距離や坑道際の除去における必要な離隔距離、すなわち、除去装置の除去可能範囲を調査するため、PEM 近傍部および坑道際での除去を試みた。

図 2.3.3-13 に PEM 近傍部および坑道際での除去状況を示す。慎重に位置合わせを実施した結果ではあるが、PEM 近傍部および坑道際の除去について、数 cm 程度の離隔で除去が可能であった。



PEM 近傍部の除去　　坑道際の除去

図 2.3.3-13　PEM 近傍部および坑道際での除去状況

本事業では、実証試験における搬入寸法等の制限により、機械的除去装置のベースマシンとして小型バックホウを採用している。そのため、ベースマシンの反力（安定性）が十分とは言えず、オーガアタッチメントの切削位置合わせの際に、若干のブレや切削時の横滑りが発生し

た。一方で、慎重なアーム操作により、PEM から数 cm 程度の離隔での除去が可能であった。この結果から、ベースマシンの安定性が確保できる機構への高度化や位置決めが容易となるマニュピレーターを使用する等の工夫により、PEM の更に近傍部まで、機械的除去を適用できる可能性がある。

4)　地下実証試験結果のまとめ

オーガ方式の機械的除去装置を使用し、上部開放部の隙間充填材（ベントナイト混合土）のうち、模擬 PEM 近傍 30cm 程度を除いた範囲について、模擬 PEM と周辺充填材との縁切りを目的とした地下実証試験を実施した。オーガによるほぐし能力、吸引装置による撤去能力等の施工効率や、切削方向・順番などの除去手順による作業性の確認、機械的除去が可能な範囲（PEM との必要離隔）などのデータを取得した。

2.3.4　流体的除去技術の実証的整備

(1)　除去対象とする隙間充填材

地下での実証試験における流体的除去技術の適用対象は下部狭隘部および模擬 PEM 周囲 300mm 以内の近傍部である。下部狭隘部の隙間充填材はスクリューフィーダ方式により充填されたベントナイト 100%のベントナイトペレットであり、上部開放部の隙間充填材は吹付け方式で充填されたベントナイト混合土である（下表）。

表 2.3.4-1　除去対象とする隙間充填材（充填時の目標乾燥密度および設定含水比）

対象部位	充填材料	目標乾燥密度	設定含水比
下部狭隘部	ベントナイトペレット (ベントナイト 100%)	乾燥密度 1.37 Mg/m^3 以上 (有効粘土密度 1.37Mg/m^3)	約 7%
上部開放部 (PEM 近傍)	ベントナイト混合土 (配合比；ベントナイト：ケイ砂＝50：50)	乾燥密度 1.60 Mg/m^3 (有効粘土密度 1.15Mg/m^3)	約 16%

(2)　中核技術の抽出

既に述べたように（2.4.2 項）、本事業では流体的除去技術としてウォータージェット方式を選定した。本方式は、高圧噴射（ウォータージェット）による流体の力で、除去物を切削・解砕（ほぐし）するものであり、切削した副産物は吸引装置により連続的に回収する機構とした。

図 2.3.4-1 に示す実際の処分事業を想定した全体装置の概念設計例のうち、装置先端部の「除去・撤去装置」を流体的除去技術の中核技術として抽出し（実証試験の対象）、ウォータージェットと吸引装置に着目して、地下実証試験に使用する除去・撤去装置の設計検討を進めた（図 2.3.4-2）。なお、ウォータージェットと吸引装置以外の部分は、汎用的な措置を活用することとしている。

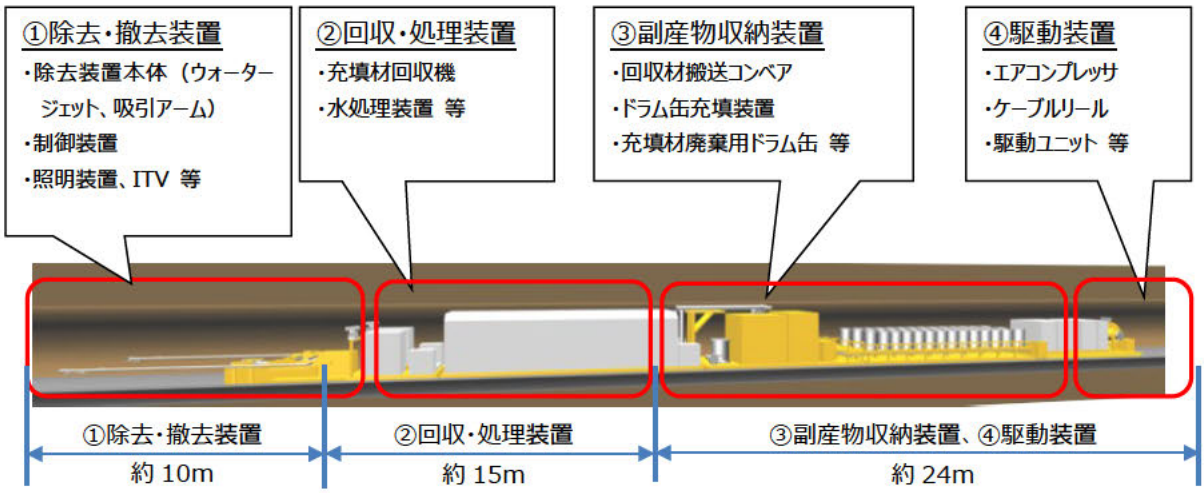


図 2.3.4-1　横置き・PEM 方式における流体的除去装置の概念設計例

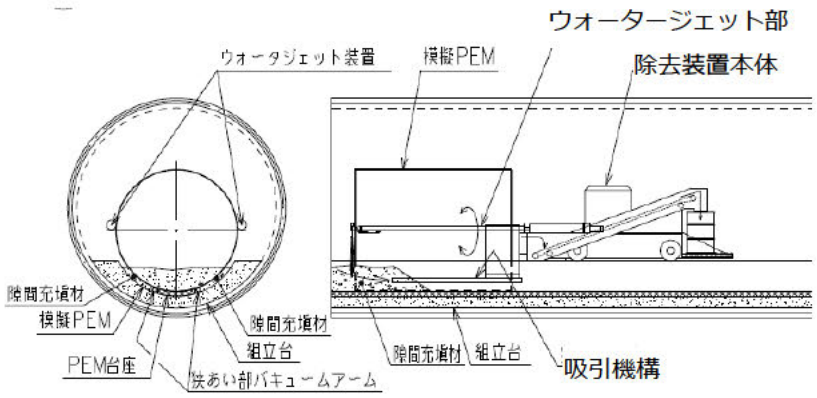


図 2.3.4-2　地下実証試験に使用する流体的除去装置 ウォータージェット方式の設計検討

(3)　流体的除去技術の整備手順

図 2.3.4-3 に流体的除去技術の整備手順を示す。除去する場所と除去対象物については与条件とし、机上検討（流体的除去技術の選定、除去装置の概念設計、中核技術の抽出）および地上での予備試験を経て、幌延 URL 地下 350m 試験坑道 2 における地下での実証試験を実施した。

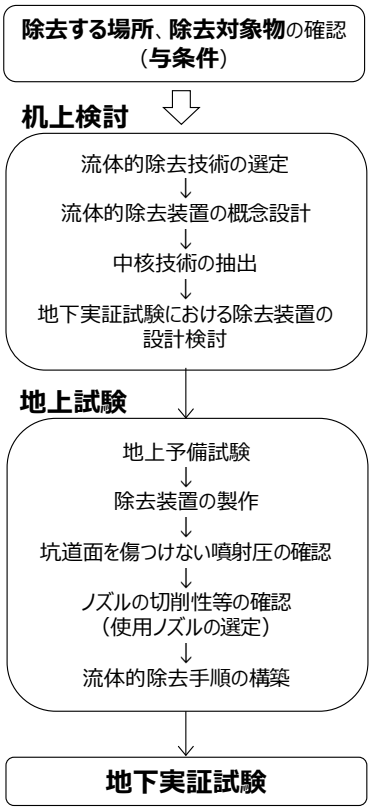


図 2.3.4-3　流体的除去技術の整備手順

(4)　地上での予備試験

流体的除去技術であるウォータージェット方式に関する地下での実証試験に向けて、ベントナイト系材料に対するウォータージェットの切削性、除去の見込みを確認するため、予備試験（地上での要素試験および実規模試験）を実施した。

1)　要素試験

a 除去対象とした供試体

要素試験で除去対象とした供試体を表 2.3.4-2 に示す。供試体のサイズは直径 30cm×高さ 10cm 程度の円柱状とし鋼製のモールドを使用して成型した。

表 2.3.4-2　供試体作製条件

材料	乾燥密度	含水比	飽和度	備考
粉体ベントナイト	1.37Mg/m^3 程度	15～20%	45%程度	クニゲル V1
		35%程度	95%程度	
ベントナイトペレット		7～9%	74%程度	ブリケッティング法で製作したペレット：クニゲル GX＝70%:30%
破砕ベントナイトペレット			75%程度	ブリケッティング法で製作したペレットを破砕したペレット

b 使用機械

要素試験では、高圧ポンプ、発電機等のユニット一式が荷台に搭載された高圧洗浄車の設備を利用した。洗浄車より作業位置まで耐圧チューブで高圧水を導き、手持ち式のノズルから高圧水が噴射される機構である。なお、高圧洗浄車の最大能力は、30MPa、120L/min である。

c 噴射方法

供試体は鋼製容器のままで試験に供し、ノズル先端と供試体の距離は約 30cm、供試体面に対し垂直に高圧水（水道水）が入射するようにした。また、噴射圧には、一般的にコンクリートを傷つけず切削する噴射圧として採用されることの多い 20MPa を設定した。

d 試験結果

噴射圧 20MPa で、直射ノズル先端と供試体の距離を 30cm とした場合の切削試験の状況を一例として図 2.3.4-4 に示す。なお、供試体は、粉体ベントナイト（クニゲル V1）を突き固めたものである（含水比 15～20%、飽和度 45%程度、乾燥密度 1.37mg/m^3 程度）。試験の結果、20MPa の噴射圧で充填材の切削が可能であり、ハンドガンを動かすことで鋼製モールド内の充填材を剥ぎ取ることが可能であることを確認した。

切削前

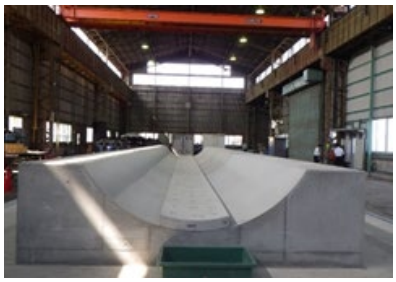
切削状況

切削後

図 2.3.4-4　要素試験状況

2)　実規模試験

上記の要素試験を経て、試験坑道 2 の下部狭隘部を実寸大で模擬した地上試験ヤード（図 2.3.4-5）において、製作した流体的除去装置による隙間充填材の除去試験（実規模試験）を実施した。本実規模試験では、噴射形態の異なる 4 種類のノズルを準備し、コンクリート（モルタル）坑道面への影響の有無、ノズルの種類による切削性、ノズルワークの設定に基づく地下実証試験に向けた除去手順の確認・構築を行った。



地上試験ヤード

半 PEM※設置

※PEM の下半部の寸法形状を模擬した PEM

図 2.3.4-5　地上試験ヤード

a 除去対象物

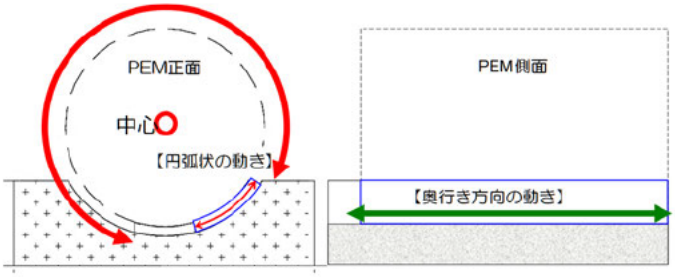
除去対象物の充填材には、Na 型粒状ベントナイト（クニゲル GX、5mm 以下）を使用し、材料含水比 8%、乾燥密度は 1.08～1.19Mg/m^3 となるように所定の隙間に充填した（図 2.3.4-6）。予備試験、要素試験の結果から、噴射圧 20MPa の高圧水での流体的除去において、地下実証試験における下部狭隘部の隙間充填材（ベントナイトペレット、乾燥密度 1.37Mg/m^3、含水比約 7%）への切削能力は十分であると判断し、本充填材を下部狭隘部の隙間充填材の代替とした。

図 2.3.4-6　地上試験ヤードにおける下部狭隘部への除去対象物の充填

b 使用機械

◆製作した流体的除去装置

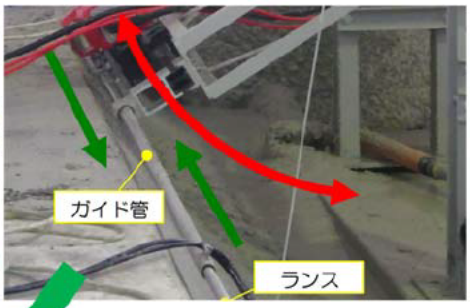
地上での実規模試験では、地下での実証試験に使用することを目的に製作した流体的除去装置を使用した。本除去装置は、図 2.3.4-7 に示すように狭隘部の円弧状の動きおよび PEM 奥行き方向へのノズルの動きの 2 つの動作により除去を行ことが可能な機構である。PEM 奥行方向へのノズルの動作については、ガイド管の内部でランスを前後に稼働できる仕組みとしている。本流体的除去装置に関する装置概要と仕様を図 2.3.4-8 及び表 2.3.4-3 に示す。



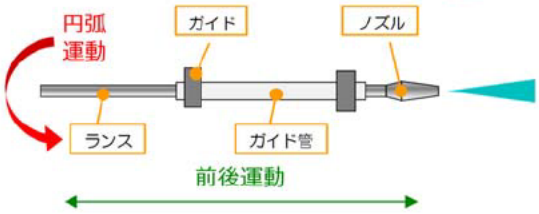
PEMと同心円の円弧運動　奥行（坑道長手）方向の動き

図 2.3.4-7　流体的除去装置の基本動作　説明図

除去試験装置（振り子式）外観



WJ噴射部の詳細と動き



装置本体枠は坑道面の台座に固定
PEM中心に対して**ガイド管が円弧運動**
ランス先端にジェット噴射ノズル
ランスはガイド管に支持され**前後運動**

図 2.3.4-8　流体的除去装置の各部名称等　説明図

表 2.3.4-3　除去装置の仕様

項目	仕様
重量	約 250 kg
必要電気容量	三相 200V，90W×3 台
モータ駆動速度	5cm/min
水圧適用範囲	70MPa

◆ノズル

除去装置に取り付けて使用するノズルについて、噴射形態の異なる 4 種類のノズル（直射、扇、トルネード、配管清掃用）を用意した。図 2.3.4-9 に各ノズルの特徴等の一覧を示す。なお、同図には各ノズルの、「噴射圧 20MP`a 時の使用水量」、「坑道面への影響」について、要素試験によって得られた結果を併せて示す。

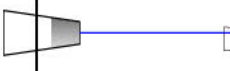
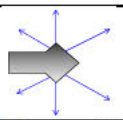
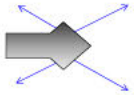
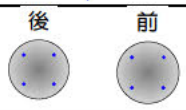
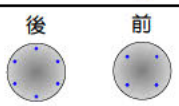
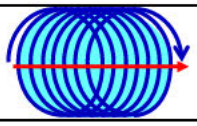
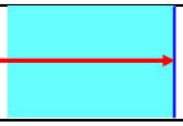
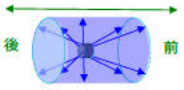
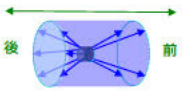
ノズル種類	直射	トルネード	扇射	配管清掃用① 前後横 3 方向	配管清掃用② 前後 2 方向
写真					
切削形状					
切削断面					
切削軌跡					
(20MPa 時) 使用水量	54L/min	30L/min	20L/min	74L/min	74L/min
坑道面への影響	長手方向へのウォータージェット噴射の場合 噴射圧 20MPa まで坑道面を傷つけない			噴射圧 20Pa で坑道面への若干の傷がつく	噴射圧 20MPa まで坑道面を傷付けない

図 2.3.4-9　各ノズルの特徴等　一覧

◆その他の使用機械

高圧水発生装置、強力吸引車など、その他の使用機械の一覧を表 2.3.4-4 に示し、高圧水発生装置を搭載した車両および強力吸引車及び吸引口の写真を図 2.3.4-10 に示す。

表 2.3.4-4　使用機械一覧

項目	用途・仕様
高圧洗浄車 （高圧水発生装置を搭載）	最大噴射圧：90MPa エンジン駆動（軽油） 最大水量：120L/min 程度
固定式ハンドランスガン ハンドガン式直射ノズル	噴射流量：54L/min 程度
強力吸引車	吸引口径 3 インチ（約 76mm） 風量 45m3/min、真空度：-96kPa（-720mmHg）

高圧水発生装置を搭載した高圧洗浄車

強力吸引車および吸引口

図 2.3.4-10　高圧水発生装置を搭載した車両、強力吸引車および吸引口

◆資機材の配置

地上試験における資機材の配置図を図 2.3.4-11 に示す。

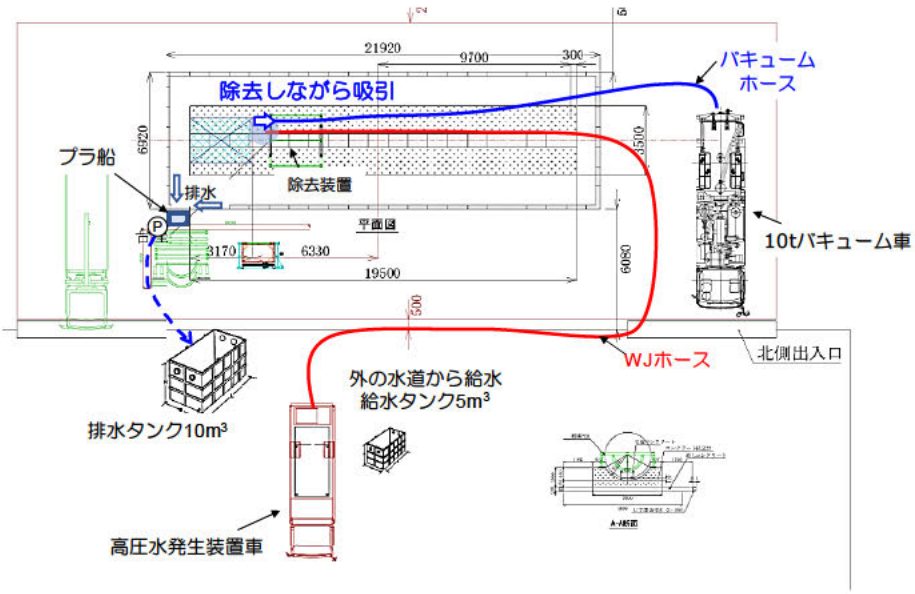


図 2.3.4-11　地上試験時の資機材配置図の全体平面図

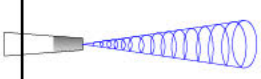
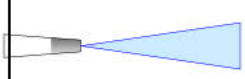
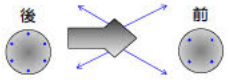
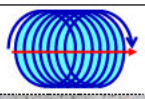
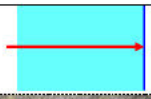
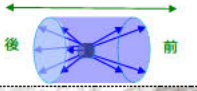
c 試験結果

◆ノズルの種類と切削性・掻き出し性の確認

図 2.3.4-9 に示したノズルの種類（配管清掃用①は除く）を対象に、切削性および切削した副産物の掻き出し具合（掻き出し性）を確認した。なお、噴射圧は要素試験（坑道面を傷つけない 20MPa）と同じとした。

表 2.3.4-5 に整理した試験結果を踏まえ、PEM と坑道間との縁切りを目的とした除去対象物の切削・解砕（ほぐし）には、トルネードノズルを採用することとした。また、回収装置が必要とする動作環境の実現（坑道面の清掃・仕上げ）には、下部狭隘部に残置した副産物（トルネードノズルで切削した隙間充填材）の後方への掻き出し性が高い、配管清掃用ノズルを採用することとした。

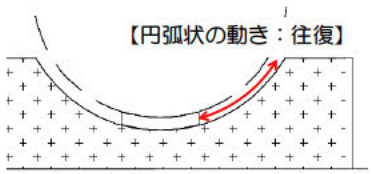
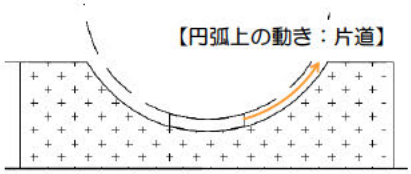
表 2.3.4-5　ノズルの種類と切削性・掻き出し性

	直射ノズル	トルネードノズル	扇射ノズル	配管清掃用ノズル②
噴射形態				
切削形状				
状況写真				
離隔	5cm	40cm	30cm	—
切削性	・対象物を線状に切削 ・奥行き方向に穿孔 ・円弧運動では、切削・解砕は困難	・対象物を面状に切削 ・離隔の調整により、切削幅の調整可能 ・切削性は十分	・離隔の調整により、切削幅の調整可能 ・水圧が分散し切削性は弱い	・切削性を有しない
掻き出し性	・なし	・手前へやや掻き出されるが、掻き出し性はなし	・前方噴射のみのため、掻き出し性は、配管清掃用ノズルに比べ低い	・前方噴射の加水効果に加え、後方噴射で掻き出し性が高い
評価	・今回の実証試験では、使用せず	・PEM と坑道間の除去対象物の「縁切り」を目的に実証試験に使用	・今回の実証試験では、使用せず	・「回収装置の動作環境の実現」として坑道面の清掃・仕上げを目的に実証試験に使用

◆流体的除去手順の構築

図 2.3.4-8 に示した流体的除去装置は、円弧方向の移動速度が搭載モータにより制御（速度固定）され、今回の装置では円弧方向の移動に往復 17 秒を要する設定である（表 2.3.4-6）。奥行方向のノズルの移動速度については調整が可能な構造であるため、奥行方向のノズル移動速度をパラメータ（試験条件）として、最適な除去手順の構築に向けた試験を実施した。使用するノズルは、上述したようにトルネードノズルと配管清掃用ノズルである。

表 2.3.4-6　除去装置の円弧状移動速度

	17 秒／往復（上止 2 秒、下止 3 秒）	6 秒／片道
円弧方向のノズル移動速度		

トルネードノズルの前進速度について、2 種類（10cm/min、5cm/min）とした除去試験を実施した結果、10cm/min では除去対象とする充填材の流動化に対してノズルの前進速度が速くなりノズルが充填材に突き刺さる事象や、充填材の流動化が不十分でバキュームで吸引捕集ができない事象等が発生した。一方 5cm/min では、ノズルの充填材への接触や回収ホース内の閉塞などがなく、連続的にバキュームによる吸引捕集が可能であった。

ベントナイト（クニゲル V1）の液性限界 416%に着目し、トルネードノズルの前進速度における含水比を試算すると、前進速度 5cm/min の場合では充填材の含水比は 484%となり、ベントナイト（クニゲル V1）の液性限界以上となる。一方、前進速度 10cm/min の場合では、含水比 246%となり、ベントナイト（クニゲル V1）の液性限界以下となる。

以上の試験結果や試算から、吸引除去の観点（バキュームへの閉塞無しの連続的な吸引捕集の観点）からは、トルネードノズルの前進速度を 5cm/min とすることが適切であると判断した。また、除去開始時（ノズル前進前）に予め除去対象物を流動化させるため、トルネードノズルの前進動作の前に、円弧状移動のみを 5 分間行うことで、スムーズな除去が可能となった。

トルネードノズル（5cm/min）による前進除去後の走行面の状態、配管清掃用ノズルによる坑道面の仕上げ状況（1 往復後、2 往復後）を図 2.3.4-12 に示す。これらの結果から、トルネードによる前進除去により、充填材の解砕・大まかな除去は可能であり PEM-坑道間の充填材の縁切りが達成できていると判断できる。一方、走行面および半 PEM への副産物の付着が多量に残る結果となり、回収装置の動作環境構築の観点からは、トルネードノズルによる除去のみでは、不十分な坑道面の状態であると考えられた。トルネードノズルによる除去後に、配管清掃用ノズルによる除去を 2 往復行うことにより、残留物がほぼ全て除去できることが確認され、本事業の搬送定置装置の動作環境の実現に十分な坑道面の状態までの除去が達成できた。これらの試験を踏まえて構築した流体的除去の手順を図 2.3.4-13 に示す。

構築した手順に基づき下部狭隘部（片側）の除去を行う場合、除去に要する時間は約 165 分であり、使用水量は約 9,000 L である。ノズルの交換などの段取り替えを含めると、片側の除去時間は 3 時間程度となる見通しを得た。

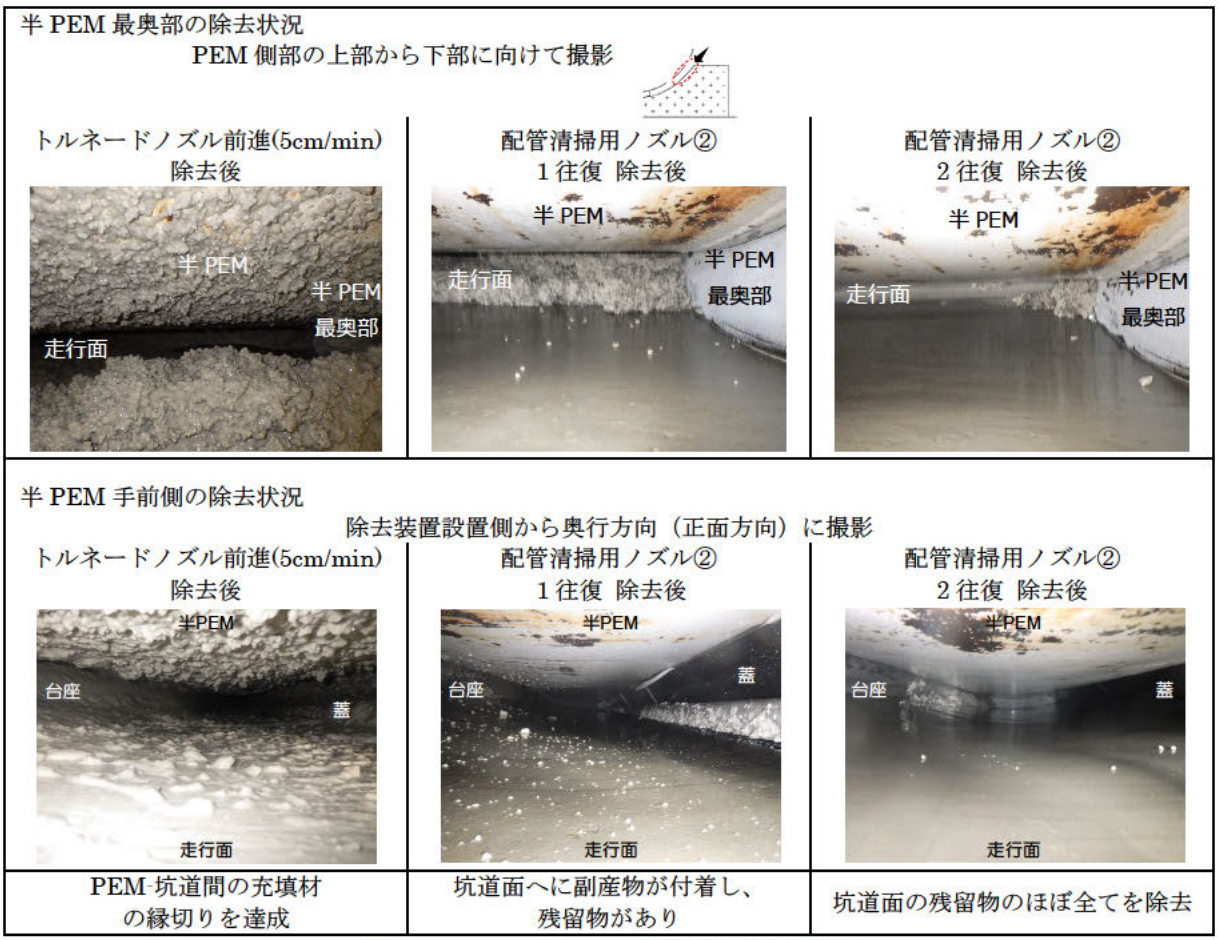


図 2.3.4-12　半 PEM 最奥部の除去状況

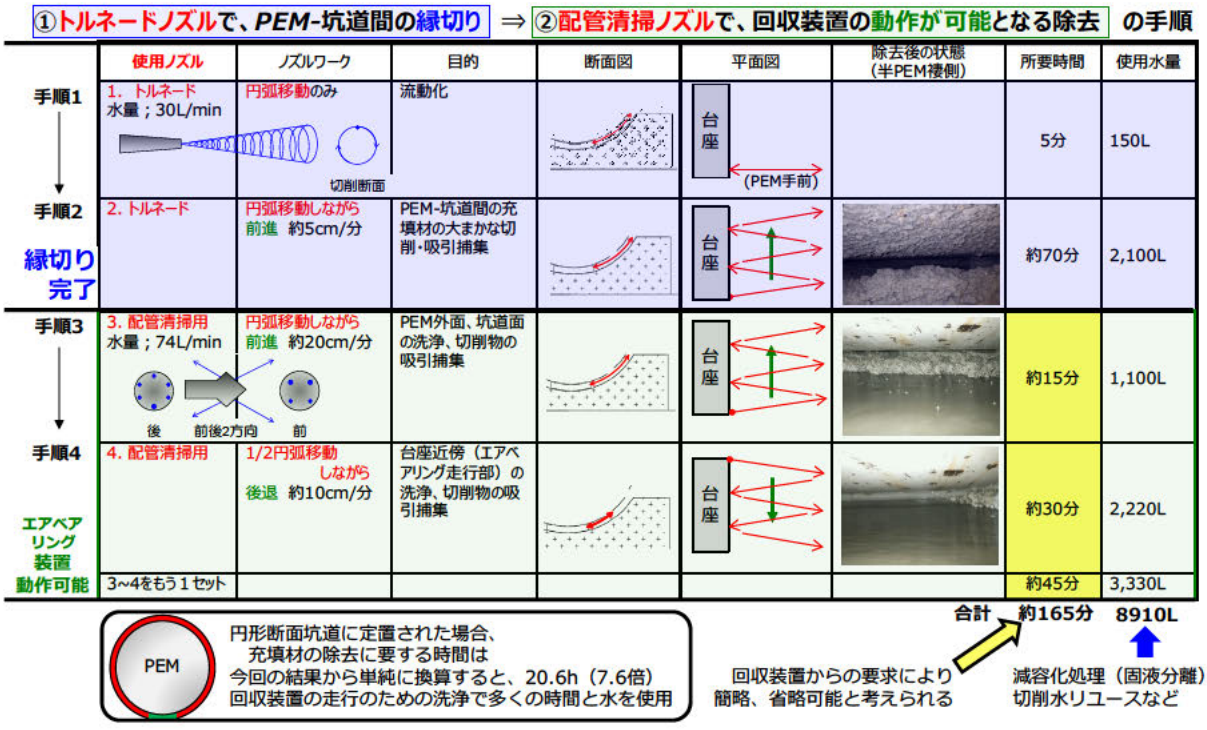


図 2.3.4-13　流体的除去手順

3)　地上での予備試験のまとめ

噴射形態の異なる複数のノズルを準備し、コンクリート（モルタル）坑道面への影響の有無、ノズルの種類による切削性、地下実証試験に向けた除去手順の確認・構築を行った。これらの試験結果を以下に要約する。

・コンクリート（モルタル）坑道面に対して影響（損傷）を与えない噴射圧として 20MPa を確認するとともに、20MPa の噴射圧時の使用水量を確認した。
・ノズルの違いによる切削性・掻き出し性を確認し、PEM と隙間充填材との縁切り（切削・解砕）にはトルネードノズルを、回収装置が必要とする動作環境の実現（坑道面の清掃・仕上げ）には配管清掃用ノズルを選定した。
・選定したノズル及び製作した除去装置を用いた除去試験により流体的除去手順を構築した。

(5)　地下での実証試験

1)　試験概要

下記機能を有するウォータージェット方式の流体的除去技術について、地下の原位置環境での適用性や実現性を確認することを目的として、地下での実証試験を実施した。

・模擬 PEM と隙間充填材との縁切り
・PEM の回収装置が要求する動作環境の実現

具体的には、地上での予備試験で構築した施工条件の設定（除去装置の運転条件・方法）に基づき、地下での実証試験を行い、除去の程度や除去に係る作業時間の再現性等を確認した。

地下での実証試験における除去対象物および流体的除去装置の稼働条件は、前述した地上での実規模試験と同様である。

2)　流体的除去装置の配置と手順

図 2.3.4-14 に地下実証試験における流体的除去装置の平面配置を示す。除去装置本体、高圧水発生装置および強力吸引装置を地下 350m の試験坑道 2 およびその周囲に設置して除去試験を実施した。試験の手順は図 2.3.4-15 のとおりである。

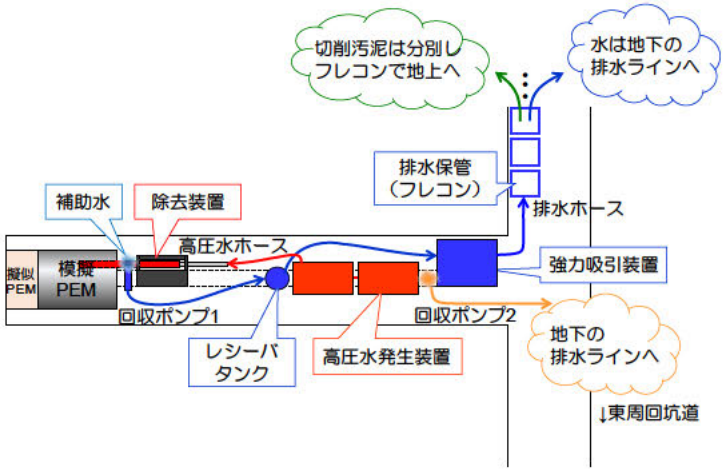


図 2.3.4-14　機械的除去装置の配置平面図

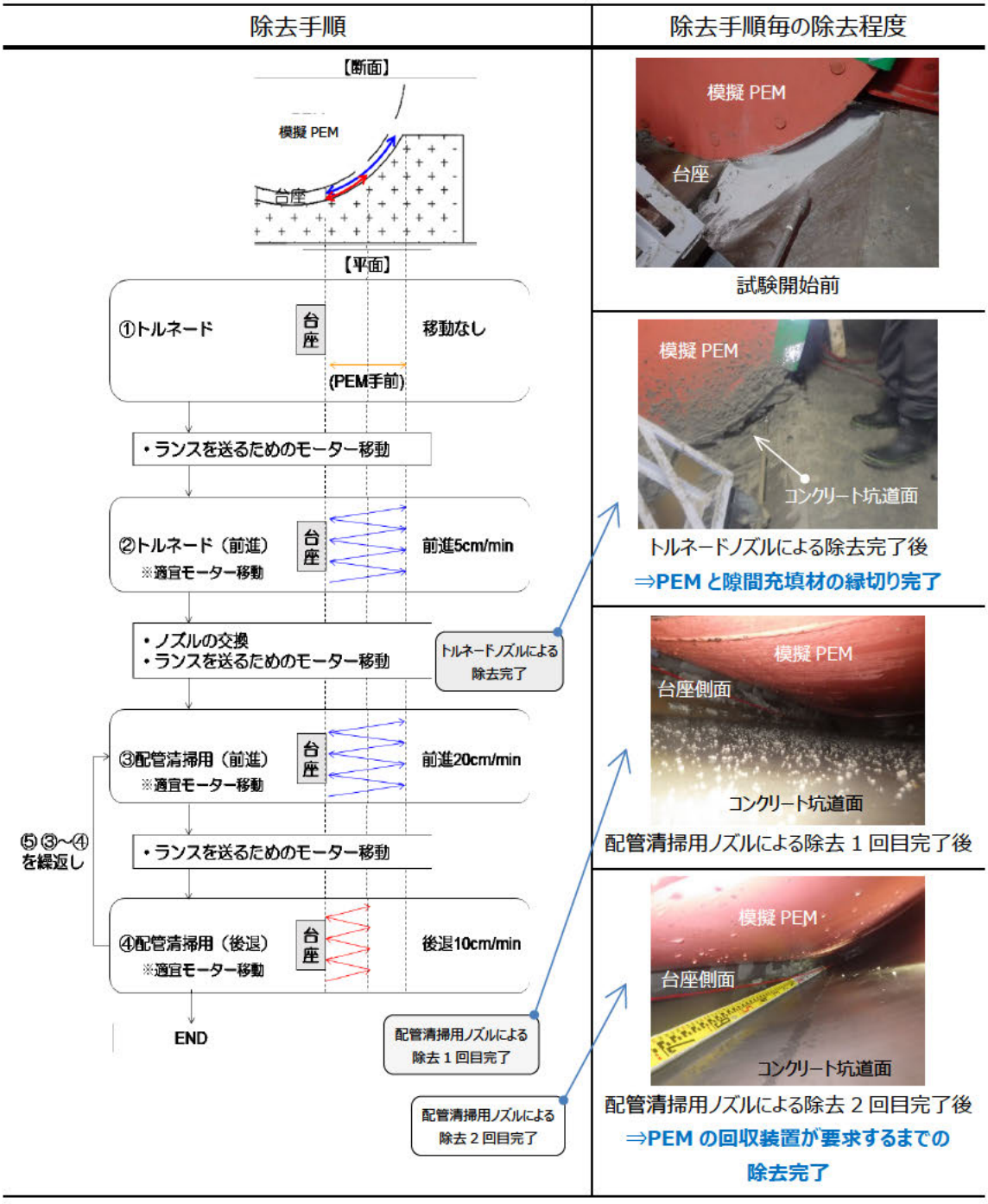


図 2.3.4-15　地下実証試験　流体的除去 除去手順毎の除去程度

3)　実証試験結果１（下部狭隘部の除去）

下部狭隘部の隙間充填材を対象とした流体的除去試験の結果を図 2.3.4-15 に示す。除去工程（手順）ごとの除去の程度は地上試験とほぼ同程度であった。同図から、トルネードノズルによる除去により PEM と隙間充填材の縁切りが完了し、配管清掃用ノズルによる 2 回の除去工程により PEM 回収装置の動作環境に必要となるまでのコンクリート坑道面の除去が完了した。

図 2.3.4-16 は、地上試験と地下実証試験の除去後（配管清掃用ノズルによる 2 回目完了後）の状況写真を抜粋して比較したものである。同図のように、地上での試験をとおして構築した施工条件等を地下の実証環境で再現することで、地上での試験と同程度に除去が可能となるこ

とを確認した。

また、地下での実証試験（除去）に要した時間は、2 時間 43 分であり、地上での実規模試験における除去時間（2 時間 45 分）とほぼ同じ時間で除去を完了した。

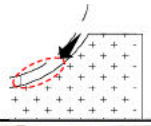
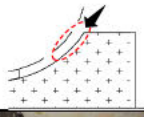
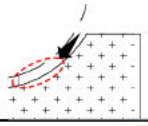
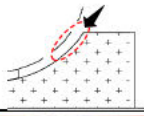
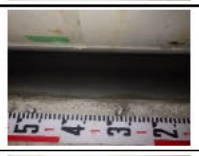
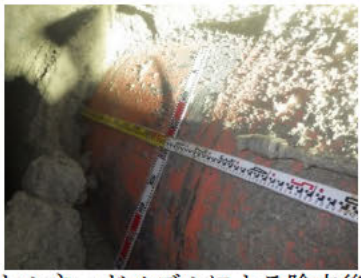
	地上試験		地下実証試験	
撮影位置 説明図				
PEM 手前端 からの距離 300～320cm				
240～270cm				
180～210cm				
120～150cm				
60～90cm				
0～30cm PEM 手前端				

図 2.3.4-16　流体的除去完了後　コンクリート坑道面　地上試験、地下実証試験の比較

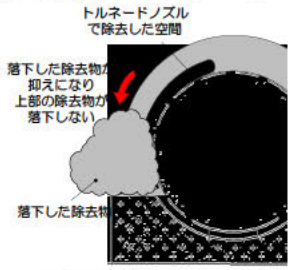
4)　実証試験結果 2（上部開放部の除去）

機械的除去後の上部開放部に残された厚さ 30cm 程度の隙間充填材に対して、トルネードノズルによる除去を試みた（図 2.3.4-17）。ノズルの位置、対象物との離隔を適切に管理することで、開放空間に対する隙間充填材の切削・解砕にも適用できる見込みを得たが、その後の副産物の撤去作業をより合理的に実施するための運転条件等の検討は本事業の対象外とした。

トルネードノズルによる除去状況



トルネードノズルによる除去後



除去後の説明図

図 2.3.4-17　上部開放部に対するトルネードノズルによる除去

5)　地下での実証試験のまとめ

下部狭隘部に充填されたベントナイトペレットの除去については、隙間と同程度の幅を切削可能なトルネードノズルを用いることで隙間充填材を切削・解砕し、さらに切削した副産物の流動化を目的とした加水を行うことで、連続的な除去（切削・解砕・吸引・捕集）および、「回収作業のため PEM を拘束する隙間充填材との縁切り」を達成した。以下に、得られた成果を要約整理する。

○トルネードノズルによる切削・解砕後に、広い範囲の洗浄能力を有する配管清掃用ノズルを用いて下部狭隘部に残存した副産物を掻き出すとともに流動化した副産物を吸引・捕集することで、PEM の回収装置が要求する動作環境の実現を達成した。この結果から、除去技術の開発整備の目的である、実際の地下環境で隙間充填材の除去が実施できることを示すことができた。

○地上での試験で構築した施工条件や手順を地下での実証試験に適用することで、地上と同程度の除去程度、除去時間となることが確認できた。このことから、ウォータージェット方式による流体的除去技術は、構築した施工条件や手順を適切に管理することで、再現性の高い除去技術となり得ることを確認した。

○一方、PEM 近傍部の開放空間に対する隙間充填材の除去に対しても、ウォータージェット方式の流体的除去技術を適用できる見込みを得た。その後の副産物の撤去作業をより合理的に実施するための運転条件等に関する更なる検討（最適化）が望まれる。

2.3.5　実証試験成果を踏まえた隙間充填材除去技術の拡張・展開の可能性

以上のように、本事業で開発整備した隙間充填材除去技術（機械的除去技術として選定したオーガ方式、流体的除去技術として選定したウォータージェット方式）によって、本事業の第 1 の目的である「実際の地下環境で、隙間充填材の除去」を達成することを確認するとともに、除去技術を構成する個々の技術に関する要素試験（地上での予備試験）をとおして、各技術の適用範

囲や性能レベルを確認した。

一方で、実証試験で前提とした稼働環境である地下の原位置環境（坑道壁面からの湧水、地温など）は試験坑道 2 の環境をそのまま利用することを前提としたことから、除去する場所や除去対象物は与条件となり、選定した技術も与条件を満たすものでしかない。将来の実際の技術の適用場面（幅広い原位置環境や除去対象物の多様な状態）を踏まえると、それらのバリエーションへの適用性を更に高めていく必要がある。以下に、その様な適用場面への柔軟性や技術としての拡張性について考察した結果を要約する。

技術としての拡張性（実用技術としての適用性の拡大や除去効率の向上など）

○オーガ（機械的除去技術）の操作精度の向上（除去効率の向上）

今回の実証試験では、実証試験サイトの制約により、小型バックホウにオーガタッチメントを取り付け、オペレータの操作により位置合わせや制御を行った。慎重な作業により数 cm 単位でのオーガの操作が可能であったが、更なる機械化による操作精度の向上が期待できる。結果として、PEM 近傍や坑道近傍での適用性を高めることができ、除去効率の向上を見込むことができる。

○オーガ（機械的除去技術）の大型化による除去効率の向上

上記と同様に、実証試験サイトの制約（小型バックホウを使う）により、オーガタッチメントの大きさが制約された。それに伴い、スクリューのサイズや回転数、更には吸引装置による撤去装置の能力も制約を受けた。使用環境や反力に応じて、オーガタッチメントの据え付け装置を高度化することで、オーガや周辺装置を大型化することで除去効率の向上を見込むことができる。

○ウォータージェット（流体的除去技術）の適用性

今回の実証試験では、ウォータージェットの水圧を 20MPa で固定して他の運転条件や手順の具体化を行った。20MPa の水圧は、コンクリートを傷つけない噴射圧として一般的に採用されるものであるが、更なる水圧の増加とともに切削能力の向上が見込まれ、切削・解砕用途としてのウォータージェットの拡張性や形状に対する適用性は高い。

以上のような技術としての拡張性が期待できる一方で、今回の実証試験に向けた技術の開発整備が与条件（除去する場所や除去対象物）を前提としたことに伴い、技術としての適用性や拡張性の面で残された課題もある。今後、以下のような課題に対して着実に取り組むことで、技術としての実現性や信頼性を高めていく必要がある。

実現性や信頼性の向上に向けた課題

今回の実証試験で与条件とした環境や除去対象物は、以下ように限定的なものである。

・試験坑道 2 の湧水環境が限定的（壁面からの湧水はにじむ程度）
・試験坑道 2（PEM の形状や台座を含む）は 1 つの仮定した物理形状でしかない
・上記の環境条件のもと、除去対象物である隙間充填材は施工直後の状態（含水比は小さいままであり、浸潤に伴う対象物の高粘性化等に伴う除去作業効率の低下）

今後、環境や除去対象物の多様なバリエーションに対する技術の適用性や効率性に係るデータや知見を拡充する必要がある。そのような知見を得ることで、改善に向けた技術の高度化に係るポイントや課題が明確となり、効果的な技術開発へのフィードバックが可能となる。このような反復的な開発プロセスにより技術としての実現性や信頼性を高めていくことができる。

以上のような課題や高度化に向けた取組の例として、次のようなことが挙げられる。

○機械的除去技術に関する課題の例

◆オーガ先端部の高度化

より効率的なほぐし技術の拡張・展開として、特に高含水比な状態で粘性が増したベントナイト混合土に対する、オーガ先端面の高度化検討（例えば、ビットの形状寸法、開口率など）が必要となる。既往の土木分野の知見（例えば、都市シールドのカッターフェイス形状）や、金属用刃物の設計などを参考に、粘土系材料のほぐし（切削）技術の拡充を図ることで、施工効率向上に資すると考えられる。

◆オーガアタッチメントへの位置決めが容易となるマニピュレーターの搭載

オーガアタッチメントの位置決めが容易となるマニピュレーターを搭載する除去装置を使用することで、位置精度の向上や、位置決め時間の短縮に寄与し、PEM 近傍部までの機械的除去や切削間隔を適切に管理した除去が可能となることで施工の効率化が期待できる。

◆オーガ長を可変式とした除去装置、オーガの多連化、径の拡大した除去装置

本事業では切削深さ約 30cm のオーガアタッチメントを使用したが、オーガ長を可変式とすることで、坑道奥行方向に対する除去が可能となり施工の効率化が期待できる。また、オーガの多連化、径の拡大化等の装置の改良・工夫も同様に施工効率の向上に資する。

◆副産物の性状に応じた撤去技術の最適化

本研究で製作したオーガアタッチメントでは、オーガによる除去対象物のほぐし（切削）の際に、ほぐした副産物が壁面からこぼれる量が多く、スクリューによる効率的な撤去という点では、改良の余地がある。また、さや管内のスクリューを介し、後方へ副産物を移送する際に、副産物が団粒化しスクリュー内で閉塞する事象が生じた。副産物の撤去技術の効率化に向けて、ほぐし技術の高効率化とともに、ほぐしの後工程となる「撤去」の効率向上に資する技術開発が望まれる。具体的には、オーガ内のスクリューの回転による撤去技術の高度化だけでなく、ベルトコンベア等の他の移送装置の組合せなど、複数の撤去機構・技術の比較や組合せやなど、副産物の性状に応じた撤去技術の最適化の検討が望まれる。

○流体的除去技術に関する課題の例

◆形状や除去対象物の性状に併せた技術や稼働条件の最適化

将来の地下構成要素の設計（形状や材質）や除去対象物の性状に応じて、より合理的な除去効率の達成に向けた知見の拡充が望まれる。例えば、材料を傷つけない範囲内でより効率

的な除去が達成可能な最適水圧やそれに応じた作業手順の最適化など、これらに資する試験データの拡充が必要となる。最適化においては、除去の後続作業となる回収技術（装置）が必要とする走行面の状態にも留意が必要であるとともに、本目的に沿った専用ノズルの開発や高度化といったことも視野に入れることが望まれる。

◆ほぐした除去対象物の回収技術の高度化

本事業では、バキュームを用いて連続的な吸引捕集を可能としたが、ウォータージェット方式による流体的除去では、吸引・捕集が作業の律速となり得ることから、除去作業の効率化には、より効率的な吸引方式の技術（例えば、塩水によるベントナイトのスラリー化を併用した吸引方式など）の開発・高度化が望まれる。

◆その他の課題

本事業では開発整備の対象外としたが、より効率的な除去作業の実現には、実際の処分場設計（地上までのアクセスルートを含む坑道展開や幾何形状など）を踏まえた、除去対象物の積込み・搬出に関連する技術の開発整備や最適化が必要となる。

2.4　搬送定置・回収技術の実証的整備

2.4.1　搬送定置・回収技術の研究アプローチ

(1)　PEM の定置技術（回収技術）

2.1.1(5)2)b で述べたように、エアベアリング方式の搬送・定置技術（図 2.1.1-14 を参照。以下に再掲）を PEM の回収装置に採用することで、既往の成果を活用し新規の技術開発要素を削減するとともに、エアベアリング方式の搬送・定置技術の地下環境での適用性評価も可能となることから、回収専用装置ではなく定置・回収装置を実証対象とし、定置の逆動線で PEM の回収技術（図 2.1.1-15 を参照。以下に再掲）を整備する方針とした。

以下に(2)対象とする搬送定置・回収技術、(3)本事業における課題設定と開発整備方針を記載する。

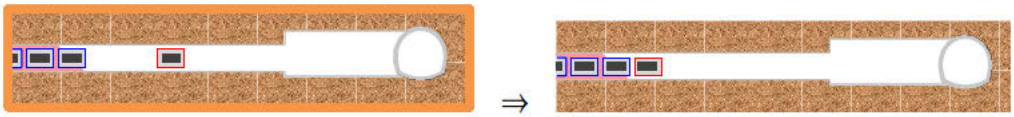


図 2.1.1-14　PEM の搬送・定置技術図 2.1.1-14　PEM の搬送・定置技術（再掲）

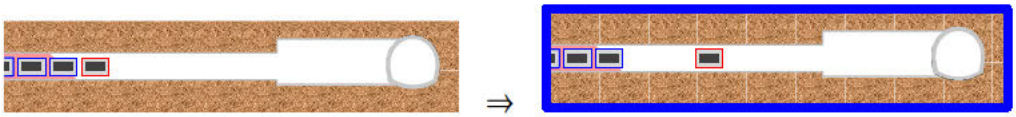


図 2.1.1-15　PEM の回収技術（定置の逆動線）（再掲）

(2)　対象とする搬送定置・回収技術に対する要求事項と選定した技術（エアベアリング方式）

本事業で開発整備する搬送定置・回収技術は、将来の処分坑道設計への適用を考慮して、以下を満足させるものとした。

① 大重量物である PEM を処分坑道内で搬送定置及び回収できる
② PEM 外径と同程度の円形小断面の坑道に適用できる
③ 遠隔で操作できる

これらを満足する搬送定置・回収技術として、PEM の昇降に空圧支持機構を用いた“エアベアリング方式”を選定した。エアベアリングの基本原理を図 2.4.1-1 に示す。エアベアリング方式は、空気圧により重量物を浮上させて移動させる方式であり、浮上時に床面とエアベアリング間に薄い空気膜を形成することで摩擦抵抗を軽減させ、水平方向への搬送を容易にする。

これまでに実施された技術開発の成果として、エアベアリング方式が曲率のある鋼製面や PCa コンクリート面において PEM の搬送が可能であることが要素試験等によって確認されているが、表面の凹凸や目地の大きさの程度によっては必要な性能が発揮できない場面もあり、不整地な設置面に対して、エアが突き抜ける隙間は無くかつ段差は 1 mm 以内といった制約条件、あるいはベアリングの設置面に上敷材の設置といった対策の必要性が当時の知見として整理されている[13]。

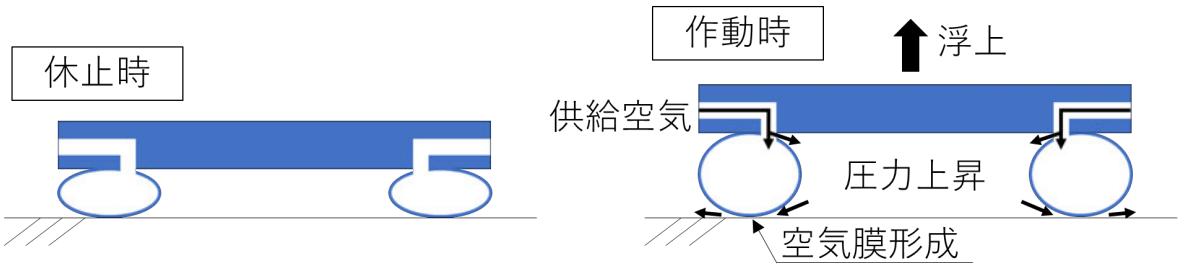


図 2.4.1-1　エアベアリングの作動原理

(3)　本事業における課題設定と開発整備方針

本事業では、PEM の搬送定置・回収技術を地下環境（試験坑道 2）で実証することを第 1 の目的としている。本事業のエアベアリング方式に関する開発整備の方針は、要素試験等によって適用性の見通しが得られている PEM の搬送定置技術を回収技術として適用し、遠隔性を加味した搬送定置・回収技術を実際の地下環境において実証することとした。

上述したように、エアベアリング方式は走行面の凹凸等に性能が左右される技術であり、これまで、目地を補修した PCa コンクリート面や上敷材を設置した面での走行を前提としていた。しかし、走行面の凹凸等への適用性を高めることにより、今後の処分事業（将来の処分場設計／処分坑道設計）への適用性を高めることができる。そこで、本事業におけるエアベアリング方式に関する課題を以下のように設定した。

- 表面の凹凸及び曲率のある打設コンクリート面において PEM の搬送定置を可能とする
- 原位置の走行面に関する一定の環境条件（表面の湿潤状態や充填材の残留）を許容する
- PEM の搬送定置・回収に係る遠隔での機械操作を可能とする

上記の設定課題に対する対応方針として、以下に「定置・回収装置の整備方針」と「搬送定置・回収技術の整備計画」に分けて整理する。

1)　定置・回収装置の整備方針

設定課題に対応可能な搬送定置・回収技術として、以下の取組（開発工程）のもとでエアベアリング方式の定置・回収装置を整備する。（表 2.4.1-1 参照）

(a) 昇降機能、走行機能及び遠隔機能の実証
(b) 定置動作の逆動作での回収動作の実施（図 2.4.1-2 参照）
(c) PEM 径と同程度の円形小断面での走行（表 2.4.1-2 参照）
(d) PEM の投影面積範囲内のエアベアリング配置
(e) 台座の走行ガイドとしての利用
(f) 検出器及びカメラの設置による遠隔操作の実現
(g) 試験坑道 2 へ搬入可能な寸法・重量（地下実証試験実施のための制限：表 2.4.1-2 参照）

表 2.4.1-1　定置・回収装置の整備方針

項目	整備方針
機能	(a) 昇降機能、走行機能及び遠隔機能の実証
基本動作	(b) 定置動作の逆動作での回収動作の実施
対象坑道	(c) PEM 径と同程度の円形小断面での走行
昇降機能	(d) PEM の投影面積範囲内のエアベアリング配置
走行機能	(e) 台座の走行ガイドとしての利用
遠隔機能	(f) 検出器及びカメラの設置による遠隔操作の実現
その他の制約 （本業務特有）	(g) 試験坑道 2 への搬入可能な寸法・重量

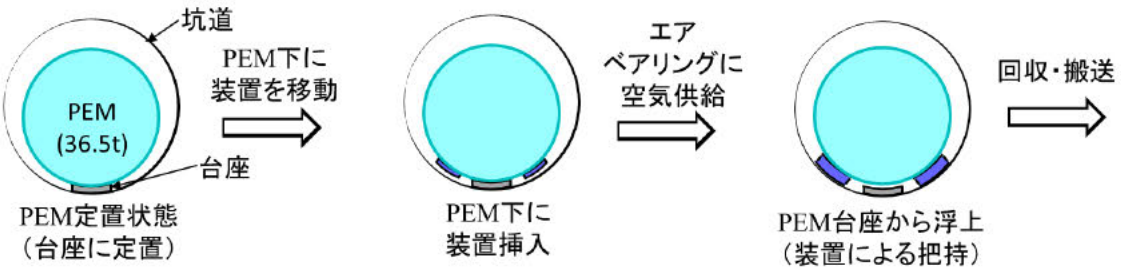


図 2.4.1-2　エアベアリング方式による PEM 回収動作概要図（定置動作は逆同線）

表 2.4.1-2　定置・回収装置の設計条件

項目	設計条件
積載対象物	PEM（重量：36.5 ton、径Φ2316 mm、長さ 3343 mm）
寸法制約	定置部高さ：台座高さ（110 mm）以下 装置全体高さ：試験坑道寸法（Φ2600 mm）以下 装置全体長さ：10 m 以下
走行面形状	R1300mm の曲面／台座（高さ 110 mm×幅 700 mm）
走行面性状	打設コンクリート面／残留充填材（散水・充填材）
その他の制約 （本業務特有）	重量：2 ton 未満（分割可）、 寸法：1800 mm×2050 mm 未満（分割可）

2)　搬送定置・回収技術の整備計画

前述した整備方針を踏まえ、以下のように開発整備を計画する。（表 2.4.1-3 参照）

- 前述した整備方針に基づき定置・回収装置を設計・製作する。
- 製作した定置・回収装置が定置装置として適切に機能すること（定置・回収装置の設計の妥当性）を確認するため、曲率のある鋼製模擬坑道を準備し、定置・回収装置で PEM を搬送定置する試験（以下「鋼製坑道試験」という）を実施する。
- 回収時の坑道状態を以下のように想定した試験により、PEM 回収時の走行面における定置・回収装置の走行性について確認する。

a 流体的除去を想定して、走行面が濡れている状態

b 充填材が除去し切れずに、走行面に充填材が残留している状態

c コンクリート面が定置時より劣化して、き裂等が発生している状態

- 上記の想定した坑道状態について、試験坑道 2 では走行面の坑道状態を様々に設定することが困難なことから、試験坑道 2 と同形状及び同工法（コンクリート後打設）となる地上模擬坑道を整備する。整備した地上模擬坑道において、回収時の坑道状態を以下のように設定した試験（以下「地上検証試験」という）を行い、PEM 回収時の走行面における定置・回収装置の走行性について確認する。

  a 走行面が濡れている状態として、散水状態

  b 走行面に充填材が残留している状態として、充填材除去後を模擬した充填材残留面

  c き裂等が発生している状態に対し、既往の研究成果で走行できないことを確認済であることから、上敷き材を敷設した状態

- ただし、上記 c の「き裂等のある状態」については、曲率のある打設コンクリート面での走行性について再検証する。そこで、エアベアリング性能に係る縮小モデルの要素試験装置を準備し、試験坑道 2 のき裂等の有無に対するエアベアリングの走行性を確認する試験（以下に「地下要素試験」という）を実施する。（地上模擬坑道の準備の関係上、「地下要素試験」を「地上検証試験」の前に実施する。）
- 最後に、地下環境において、遠隔操作により搬送定置・回収が可能であることを実証する試験（以下「地下実証試験」という）を実施する。
- 試験で取得したデータ及び発生した事象を評価することで、定置・回収装置としてのエアベアリング方式の適用性について評価する。
- エアベアリング方式の適用性の評価に基づき実機に向けた拡張性と課題について整理する。

表 2.4.1-3　本事業における搬送定置・回収技術の整備計画

試験等	実施項目	章番号
装置設計製作	定置・回収装置の設計製作	5.3.1
鋼製坑道試験	定置・回収装置の性能の確認	5.3.2
地下要素試験	打設コンクリート面における走行性の確認	5.3.3
地上検証試験	回収時の状態を想定した走行面における走行性の確認	5.3.4
地下実証試験	地下環境における遠隔操作による搬送定置・回収の実証	5.3.5
適用性評価	エアベアリング方式の定置・回収装置への適用性も評価	5.4
研究課題と将来拡張性	実機に向けた研究課題と将来拡張性の提示	5.5

2.4.2　得られた成果の概要

搬送定置・回収技術に関する開発整備から地下での実証試験に至る取組をとおして得られた成果の概要を以下に整理する。

(1)　定置・回収装置の設計・製作（詳細は 5.3.1 項を参照）

「定置・回収装置の整備方針」に基づき、エアベアリング方式の定置・回収装置を設計・製作した。定置・回収装置は、PEM を昇降させる「定置部」、装置の走行を担う「搬送部」、遠隔操作を実現する「制御部」で構成する。

定置部の設計では主にエアベアリングの数、仕様及び必要空気量について、搬送部の設計では主に走行駆動機構について、また、制御部の設計では主に遠隔操作に必要な検出器の選定・配置及びシステム化について検討した。これらの検討をとおして具体化した設計に基づき、定置・回収装置を製作した（図 2.4.2-1 を参照）。

図 2.4.2-1　定置・回収装置　外観

(2)　定置・回収装置の妥当性確認（鋼製坑道試験）（詳細は 5.3.2 項を参照）

鋼製坑道試験により、定置・回収装置に付与した昇降性、走行性及び遠隔操作性について、以下のとおり定置装置として機能することを確認した。

- 昇降性 : 鋼製模擬坑道に対して、コンプレッサ流量変動による PEM 搬送時の浮上量の変動は小さく、安定して浮上を維持でき、浮上・着床時に PEM の損傷や異音がなかったことから、PEM の搬送定置・回収に必要となる昇降性（浮上、浮上維持及び着床）を有していると判断できた。
- 走行性 : 鋼製の曲面に対し、平面適用時と同等の摩擦係数（表 2.4.2-1 を参照）で PEM を搬送でき、エアベアリングが曲面に対して適切に作動していると判断できた。ただし、瞬間的に押引力が上昇する目地等への対応は、許容すべき目地の大きさなど、今後さらなる検討が必要である。
- 遠隔操作性：装置の稼働時の姿勢検出や前方の障害物検出など、目的に合わせてカメラや検出器を定置・回収装置の各所に設置することで、離れた場所からも装置及び周囲の状態を把握し、搬送定置・回収作業の一連の作業ができることを確認した。また、異常時における装置の救援について、供給空気を停止し PEM を台座に仮置きして無負荷状態にすることができることを確認した。

表 2.4.2-1　鋼製坑道試験における押引力及び摩擦係数

押引力[kN]	定置部総重量[kN]	摩擦係数(※)	カタログ値（参考）
1.7	366.5 （37.4 ton = 0.9 ton（定置・回収装置重量）+36.5 ton（PEM 重量））	0.005	0.001～0.007 （平面床走行時）

※：（摩擦係数）＝（速度安定区間の押引力 [kN]）÷（定置部総重量 [kN]）とした。

(3)　地下試験坑道での要素試験（地下要素試験）（詳細は 5.3.3 項を参照）

縮小モデルとなる要素試験装置（図 2.4.2-2 を参照）を用いた地下試験坑道における要素試験によって以下の知見を得た。また、以下のとおりエアベアリングへの供給空気を増加させることで、き裂部や表面気泡のある打設コンクリート面上でも、定置・回収装置が昇降及び走行できる見通しを得た。

目標浮上量が約 40 mm の設定では、き裂部や表面気泡部でエアベアリングがスタックし走行不能となったが、目標浮上量を約 55 mm となるように供給空気を増加させた結果、き裂部及び表面気泡部等の凹部を含む全コンクリート走行面で走行可能となり、所定重量（エアベアリング 1 枚当たりに掛かる重量）の搬送が可能であることを確認した（表 2.4.2-2 を参照）。

- き裂部分や表面気泡がないコンクリート走行面において、また、き裂部や表面気泡部のある走行面でも供給空気を増加させることで、所定重量を安定して上昇、浮上維持、下降できることを確認した。
- 定置・回収装置への反映事項：地下要素試験の結果、定置・回収装置に必要な供給空気流量は 35.1 Nm^3/min（＝23.4 Nm^3/min（表 2.4.2-3 を参照）×1.5）と見積った。搭載コンプレッサでは不足するため、別途コンプレッサを設置し不足分を補って対応する。

図 2.4.2-2　要素試験装置　外観

表 2.4.2-2　地下要素試験における目標浮上量、重量及び圧力と走行可否の関係

目標浮上量[mm]	40			55		
重量[ton]/枚	0.71	1.71	3.74	0.71	1.71	3.74
圧力 max[MPa]/枚	0.057	0.14	0.28	**0.078**	**0.18**	**0.37**
走行可	0	1	1(※)	4	4	4
走行不可	4	3	0(※)	0	0	0

※：大重量でスタックすると危険なため、１回のみ実施。

表 2.4.2-3　地下要素試験における荷重・浮上量・走行面に対する供給空気流量・圧力
（黒枠内の数値を、定置・回収装置での供給空気流量の算出に用いる）

装置	荷重/枚 [ton]	目標浮上量 [mm]	鋼製面			打設コンクリート面		
			全流量 [Nm^3/min]	流量/枚 [Nm^3/min]	圧力 [MPa]	全流量 [Nm^3/min]	流量/枚 [Nm^3/min]	圧力 [MPa]
要素試験装置	3.74 (※1)	40	―	―	―	5.04	1.26	0.27
		55	―	―	―	9.33	2.34	0.34
定置・回収装置	3.74 (※2)	40	12.3	1.23	0.27	―	―	(0.27)
		55	―	―	―	(Q)※3	(q) ※3	(0.34)

※1：ウエイト重量(14.125)に要素試験装置重量(0.83)を加えた値をエアベアリング枚数(4)で割った値
※2：PEM 重量(36.5)に定置・回収装置重量(0.9)を加えた値をエアベアリング枚数(10)で割った値
※3：1.26≒1.23 より(q)は 2.34 Nm^3/min、(Q)は 23.4 Nm^3/min 程度になると考える。

(4)　充填材除去後の走行面での走行性の確認（地上検証試験）（詳細は 5.3.4 項を参照）

地下要素試験での結果を反映させて供給空気を増加させた定置・回収装置を使用した作動確認時において、台座の損傷を確認したため定置・回収装置を改良した。地上検証試験では、回収時に想定される路面環境（散水面・充填材残留面・上敷き材面）を模擬し、定置・回収装置に付与した昇降性、走行性及び遠隔操作性について、以下のとおり確認した。

- 昇降性及び走行性： PEM 重量が 16.2 ton～36.5 ton の範囲において、PEM の搬送定置・回収の一連の動作（浮上、浮上維持、走行、所定位置に定置、着床）を実施できることを確認した。また、打設コンクリート面における回収時に想定される路面環境（散水面・充填材残留面（流体的除去後を模擬）・上敷き材面）でも、PEM を搬送できることを確認した。ただし、残留充填材が捲れて堆積し、走行抵抗も増加した。検出した押引力（装置の摩擦抵抗に相当）の大小関係は以下であり、走行面環境が悪い場合、上敷き材の敷設が有効な対策であることを確認した。
  （鋼製面 <）上敷き材面 ＜ 乾燥面 ＜ 散水面 ＜充填材残留面（表 2.4.2-4 参照）
- 遠隔操作性：残留充填材のある状態及び散水状態での走行試験により、検出器によるインターロック機能及びカメラ監視にて、定置・回収装置を遠隔で操作できることを確認した。

表 2.4.2-4　地上検証試験における路面別の押引力（摩擦係数）と鋼製面との比較

走行面	押引力 [kN] （摩擦係数）		鋼製面との比較倍率 （鋼製面：1.7 kN）	
	モルタル 仕上げ面	打設コンクリ ート面	モルタル 仕上げ面	打設コンクリ ート面
乾燥面	5.15 （0.014）	8.40 （0.023）	3.0 倍	4.9 倍
散水面	6.35 （0.017）	9.66 （0.026）	3.7 倍	5.7 倍
充填材残留面 （ベントナイト）	6.96 （0.019）	10.71 （0.029）	4.1 倍	6.3 倍
上敷き材面	5.57（※） （0.015）	3.57 （0.010）	3.3 倍	2.1 倍

※台座損傷の影響を受けたと考えられる。

※：（摩擦係数）＝（速度安定区間の押引力 [kN]）÷（定置部総重量（366.5）[kN]）とした。

(5)　地下環境での搬送定置・回収技術の実証（地下実証試験）（詳細は 5.3.5 項を参照）

幌延 URL 試験坑道 2 で充填材除去後の地下環境において、以下のとおり遠隔操作による PEM の搬送定置・回収作業を円滑に実施できることを実証した。

- 昇降性及び走行性：地下要素試験及び地上検証試験で検討・設定した運転条件で、PEM の定置・回収作業を実施できることを確認した（表 2.4.2-5 を参照）。ただし、今回の試験では装置改良により緩和したが、台座の損傷などの可能性に留意して、将来の実機では機器の調整や対策（損傷防止対策など）が必要となる場合があり得る。
- 遠隔操作性：地下環境においても、検出器によるインターロック機能及びカメラ映像による監視のもと、操作者一人、監視者一人の計二人で負担なく遠隔操作による PEM の搬送定置・回収作業が実施できることを確認した（図 2.4.2-3 を参照）。

表 2.4.2-5　地下実証試験における浮上量、流量及び圧力

RUN-No.	項目	平均浮上量 (mm)	平均流量 (Nm^3/min)	平均圧力 (MPa)
RUN-01	回収／36.5ton	53.2	19.2	0.32
RUN-02	定置／36.5ton	53.1	19.3	0.32

図 2.4.2-3　地下実証試験時の遠隔操作実施状況

(6)　エアベアリング方式の適用性の評価（詳細は 5.4 項を参照）

これまでの試験結果に基づき、エアベアリング方式について、以下の技術目標、

・目標①　大重量物である PEM を搬送定置及び回収できる技術

・目標②　PEM 径と同程度の円形小断面の坑道に適用できる技術

・目標③　遠隔で操作できる技術

に対する次の設定課題について評価した。

・設定課題①　凹凸面及び曲率面への対応

・設定課題②　走行面の残留物などへの対応

・設定課題③　遠隔操作への対応

昇降性の評価では目標①②に対する設定課題①について、走行性の評価では目標①②に対する設定課題②について、遠隔操作性の評価では目標③に対する設定課題③について評価した。

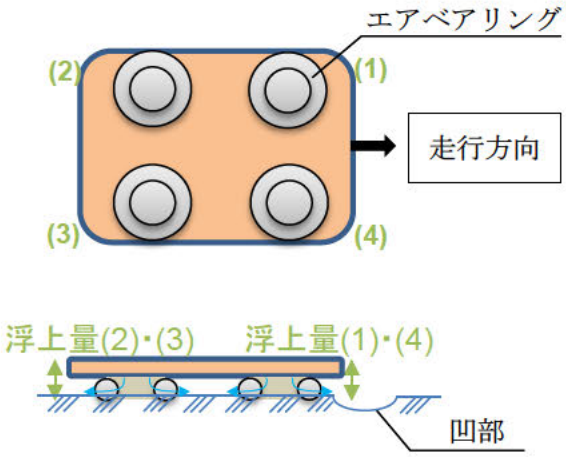
また、将来の原位置環境として想定される環境条件（放射線環境・高温環境）に対するエアベアリング方式の適用性や拡張性についても評価した。

1)　昇降性の評価

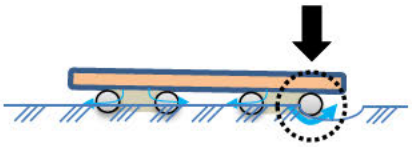
エアベアリング方式の定置・回収装置は、設定した曲率面において、今回の試験で用いた実機相当の 36.5 ton の PEM を搬送でき、安定的に上昇、浮上維持、下降できることから、昇降性の観点において、エアベアリング方式は PEM の定置・回収装置として適用が可能である。

ただし、き裂などのある走行面における走行不可（スタック）となる事象（図 2.4.2-4 を参照）を避けるためには、エアベアリングへの流量の制御、あるいは走行面の凹凸を一定の範囲内に抑えるといったことが有効であるが、これが困難な場合に備え、装置側にも尤度を持った設計や対策装置等の具備などの柔軟性を備えることが望まれる。例えば、エアベアリングの摩耗・損傷を抑制するために、ベアリングそのものの耐久性を向上させる、台座の損傷防止対策

を講じる等の対応が考えられる。

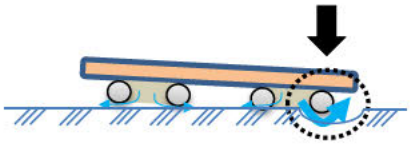


0. 要素試験装置イメージ



1. 凹部での走行イメージ

漏れ流量：増加
↓
圧力：低下
供給空気流量：増加
↓
浮上量：下降



2. スタックイメージ

浮上量：さらに下降
↓
スタック

図 2.4.2-4　スタックパターン１のイメージ図

2)　走行性の評価

エアベアリング方式の定置・回収装置は、打設コンクリート面における回収時に想定される路面環境（散水面・充填材残留面・上敷き材面）でも、設定した走行速度で PEM を搬送できることを確認した。また、上記の走行面において、エアベアリングの機能である摩擦抵抗の低減効果（エアベアリングの材料であるクロロプレンゴムと坑道との摩擦係数（0.5~1.3）（図 2.4.2-5 参照）と比べて一桁以上低い値となる）が得られることを確認した。

よって、走行性の観点において、エアベアリング方式は PEM の定置・回収装置として適用が可能である。ただし、隙間充填材の残留面での走行では、残留充填材が捲れて堆積し、走行抵抗が増加したことから、少なくとも回収対象の PEM までの走行路面を可能な範囲で事前に清浄しておくことが望ましい。また、将来の実機においては、回収作業の効率に影響する走行速度や排水勾配等に応じて、装置の駆動力を増強しなければならない可能性もある。なお、処分坑道内に連続して定置される PEM の離間距離が短い場合には、PEM 同士の接触を回避させる工夫も必要となる。

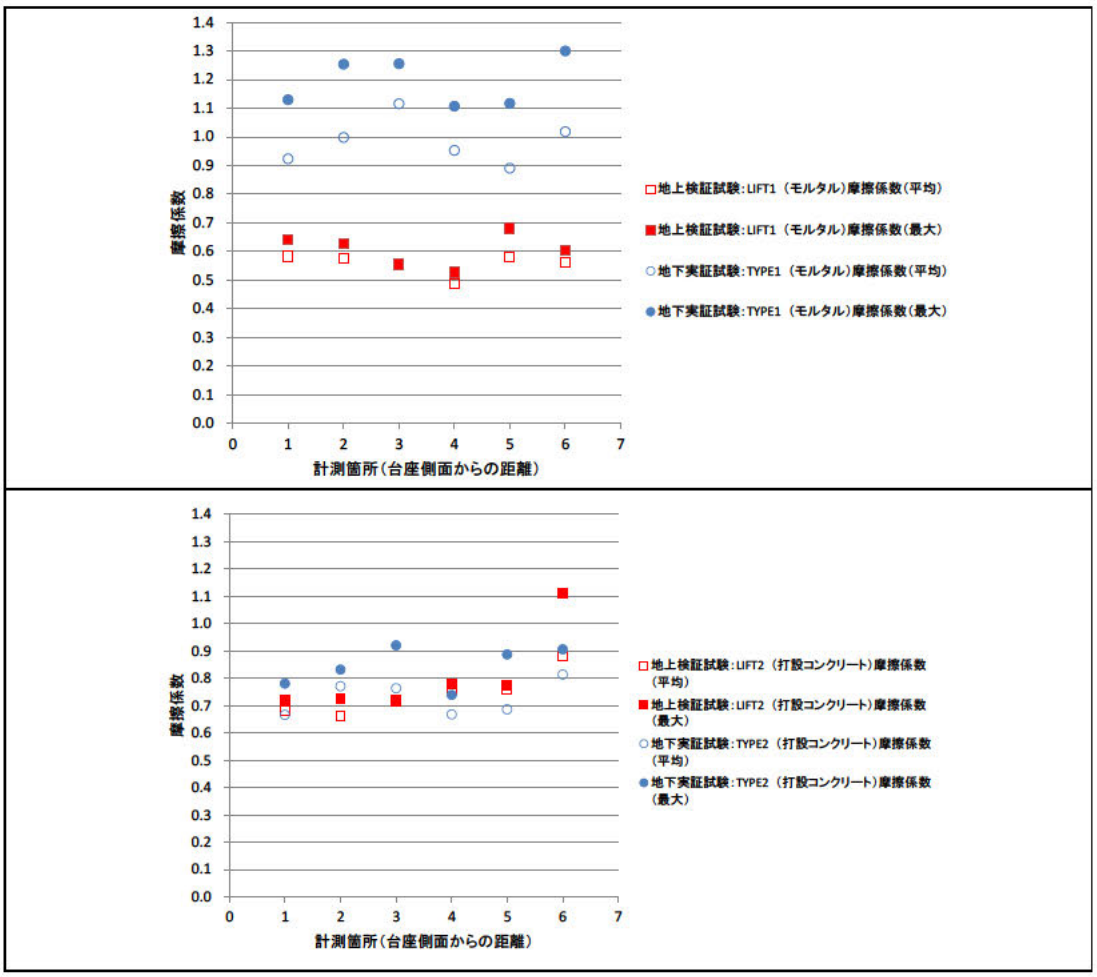


図 2.4.2-5　地上検証試験及び地下実証試験における表面計測結果
（材料の摩擦係数のみ抜粋。上段はモルタル面／下段は打設コンクリート面）

3)　遠隔操作性の評価

エアベアリング方式の定置・回収装置が、遠隔操作で安全に稼働させることができた。また、装置の浮上時にエアベアリングへの供給空気を停止させることで、PEM を台座に着床でき、PEM 荷重から装置を解放して、救援できる状態になることを確認した。以上より、エアベアリング方式の PEM の定置・回収装置に対して、遠隔操作化が可能と評価できる。

なお、装置や台座の異常やエアベアリングの劣化等を判断するための情報の１つとして動作音の活用が考え得る。定置・回収装置に集音マイクを取付けて動作音を取得することで、更なる安全性の向上が期待できる。

4)　環境条件への評価

a 放射線環境に対する評価

現在想定されている操業段階における PEM の表面線量率は、定置・回収装置に耐放射線性を考慮するレベルではないと考える。ただし、本事業では、回収可能性の維持期間中に PEM の健全性が確保されていることを前提としているが、今回の前提とは異なる状況への対応（何らかの理由で、OP が露出しているような場合など）の必要性や、今後の人工バリアの設計進捗に

より PEM が縮小化するような場合には、装置が稼働する作業空間の線量率が高くなる可能性が考えられる。このような場合には、装置に使用する部品（特にカメラ及び検出器）について、必要な耐放射線性を有するものを選定し、耐放射線性を持たせることが困難な部品（制御盤及びコンプレッサ等）については、遮へい体の設置や容易に交換可能な構造とする等の検討が必要となる。

b 高温環境に対する評価

地下環境（地温勾配）PEM や坑道換気等の設計、ならびに廃棄体の特性や定位置時期にも依存するが、装置が稼働する場の温度には、ある程度の幅が想定される。実機では、換気効果や定置・回収装置等の機械類からの発生熱等も考慮して、環境温度を明確にしたうえで、適切な部品を選定する必要がある。

(7) 実機に向けた研究課題と将来拡張性（詳細は 5.5 項を参照）

これまでに整理したように、本事業で搬送定置・回収技術として導入したエアベアリング方式には、次のような利点がある。

- 将来の処分坑道や PEM のスリム化（PEM と坑壁の間がさらに狭隘空間化）に対して、ベアリング方式は柔軟性が高い（スリム化等に伴う処分費用の合理化などへの寄与が期待できる）
- コンパクトな装置および小さな押印力で、現在の 30 トンを超える PEM（重量物）の移送が可能
- PEM を下から持ち上げる機構であり、つり上げ式のクレーンのような機構と比較して事故リスクが低い（エア供給等が以上停止した場合でもベアリング装置が PEM から離れる受動的な安全機能を有しており、機器の異常のリカバリー性が高い）

但し、上記の利点の反面、次のような課題も認識された。

- コンクリート製台座の設置や走行面の仕上げなど、今回のエアベアリング技術の導入において、稼働面（処分坑道や底盤インバート等）への要求事項が存在
- 今回のゴム製ベアリングには耐久性に課題が存在
- 今回のゴム製ベアリングでは、そのサイズの制約から浮上可能量に限界が存在

本事業ではゴム製ベアリングに市販品（汎用品）を導入したため、サイズや耐久性の面で上記のような制約があったが、将来の処分坑道や PEM の設計に最適化されたベアリングが導入でき、上記の課題が緩和されれば、上記の利点を得ることができる可能性がある。その意味で、今回導入したエアベアリング技術は将来の設計のバリエーションや合理化対策への対応などに対する適用性や拡張性の高さが期待できるといえる。

また、上記のようなエアベアリング方式に関する技術の高度化に伴う将来の事業への適用性や拡張性とは別に、本事業における技術の開発整備の前提や地下実証試験サイトの固有（限定的）の条件の下で実施した各種の試験をとおして、個別の課題や高度化のポイントも示唆されている。以下に本事業で開発整備した装置をベースとした改良や高度化のポイントなどについ

て、各種の試験から示唆された２つの視点（台座の損傷防止対策、昇降性の確保及びエアベアリングの耐久性向上）から整理する。

1)　台座の損傷防止対策について

本事業では、走行ガイドとして利用したコンクリート製の台座が損傷した。

この台座は、PEM 下の狭隘空間を充填材で充填し易くするように設置したもの（[8]）であり、本事業で設置した台座は「隙間充填材除去技術の実証的整備」のとおり上記の目的を満足するものであった。しかし、本台座の仕様（強度等）は、走行ガイド用として設定したものではなく、本事業での仕様のまま適用すると、エアベアリング方式に限らず、台座を走行ガイドとして利用する各種装置の走行時に、本事業での台座損傷と同様の事象が発生すると考えられる。本事象の対策案として、台座を走行ガイドとして利用せずに、レール等を設置する案も考えられるが、レール等が残置物となることから本案は処分事業に適さないと考える。また、他の対策案として、装置に操舵機能を追加することも考えられるが、万が一、操舵機能に不具合が生じると、装置の救援が困難となる。そのため、操舵機能を追加することなく現状のとおり台座を走行ガイドとして利用し、かつ、損傷させない対策を考えることが望ましい。

この対策として台座に鋭角部を作らずに台座強度を高くする等が考えられるが、コンクリート強度の向上には上限がある。そこで、台座強度の向上以外の対策について、台座損傷の発生場所である PEM 昇降部及び台座目地部への対策を検討した。

a PEM 昇降部への対策

(a)　定置部ガイドローラの構造変更

定置部ガイドローラの構造について、以下の変更を実施する。

・損傷の発生し易い台座上方部に荷重を掛けないよう、台座とガイドローラとの接点を極力下方とするべく、ガイドローラの設置位置を下方に変更する。
・台座に掛かる荷重を分散させるため、台座との接触面積を増加させるよう、ガイドローラの幅を広くする。
・台座に掛かる荷重を分散させるため、ガイドローラを十分に幅を持たせた自己潤滑性樹脂製の追従パッドに変更する。

(b)　台座形状の変更

台座の壁面形状を鉛直から走行面に垂直に変更することで、昇降時に台座に力を与えない。

(c)　定置部の拘束方法の変更

上記の台座形状の変更に併せ、定置部を走行面の垂直方向に上昇させる構造とする。そこで、定置部の拘束方法を変更し、走行面に垂直方向に上昇できるようにする（図 2.4.2-6 を参照）。なお、本変更により装置が左右に振れなくなるため、安定走行にも寄与すると考える。

b 台座目地部への対策

本事業では、施工性の観点から、1 m 長さの台座ブロックを工場で製作し、それをアンカーで設置することで、台座を設置した。そのため、台座ブロックと台座ブロックに１m ごとに目

地部が発生し、この目地部に損傷が確認された。

これに対し、台座を型枠による連続打設等の施工とする等により、目地を極力削減することが可能と考える。また、前述した定置部ガイドローラの構造変更により、目地部の損傷も抑制できると考える。

なお、前述した定置部の拘束方法の変更により、台座と台座両脇の定置部ガイドローラとが常時接触することになるため、台座壁面の形状を精度良く管理する必要がある。

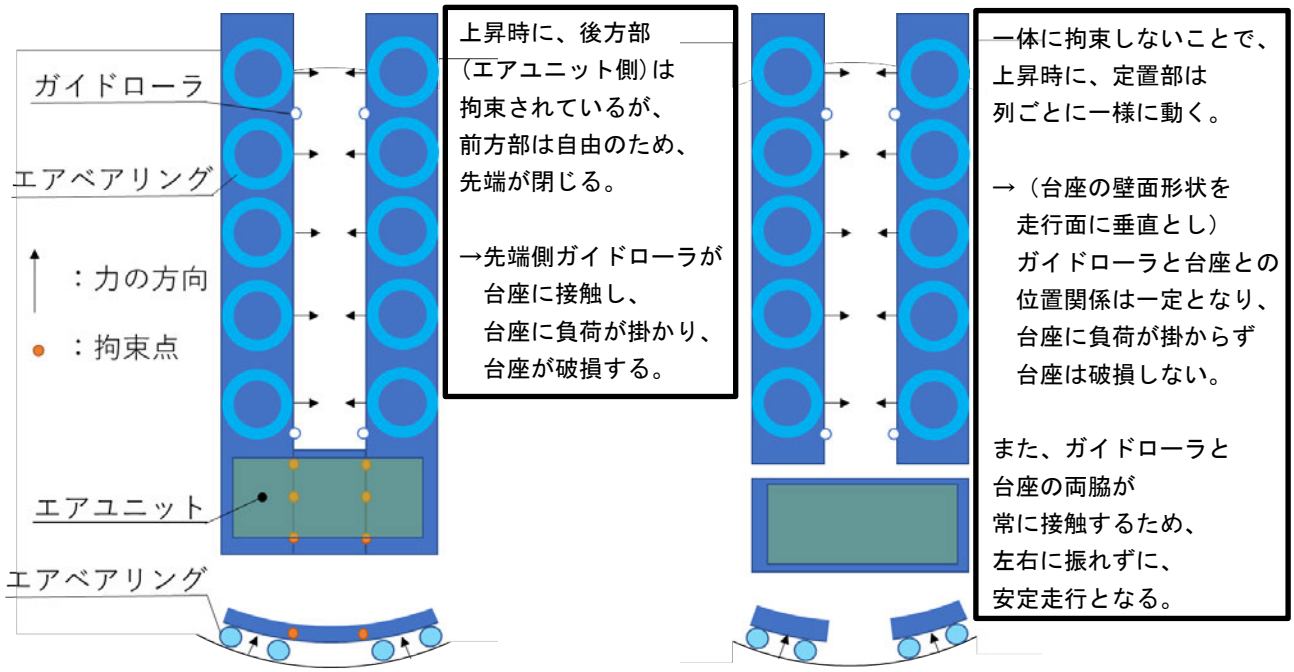


図 2.4.2-6　台座損傷対策案（定置部の拘束方法の変更）

2)　昇降性の確保及びエアベアリングの耐久性向上について

定置・回収装置は、走行不可（スタック）事象を防止し、エアベアリングへの供給空気量を抑制して、昇降性を確保することが必要である。さらに、エアベアリングの摩耗・損傷を抑制して耐久性を向上させることが望ましい。これらの対策として、走行面の凹凸を一定の範囲内（突き抜ける隙間は無し、かつ段差は 1 mm 以内）に抑えることが有効と考えられる。しかし、これが困難な場合に備え、装置側に対策を講じることが望ましいことから、以下の対策を検討した。

a 上敷き材の設置

走行面に上敷き材を設置することで、昇降性を確保させるとともに、エアベアリングの摩耗・損傷を抑制させて耐久性を向上できる。

ただし、巻き取り装置等が別途必要となるため、定置工程では実施可能だが、充填材除去後の回収工程については、工程が煩雑となることから現実的ではないと考える。

b 凹部通過時のエアベアリングの一時休止

目地等の凹部通過時に凹部直上のエアベアリングだけを一時休止することで、昇降性を確

保するとともに、エアベアリングが凹部に引っ掛かることなく摩耗・損傷を防止して耐久性を向上させることができると考える。本対策は、エアベアリングの設置枚数を増加することにより実現可能であり、自動化のため試走等で事前に記憶する必要がある。

c エアベアリング機構の改善

(a) エアベアリング（別系統供給）の開発

上昇用と空気膜形成用の供給空気を別系統としたエアベアリングを開発するとともに、装置全体で余剰能力を確保する。なお、エアベアリングの摩耗・損傷は発生すると考えられ、凹凸部通過時の安定走行のための工夫が必要となる。

(b) 空気漏れ抑制エアベアリングの開発

底面に多数の小孔を有する自己潤滑性樹脂の膜を取付ける等、隙間や段差時の凹部通過時に空気漏れを抑制するエアベアリングを開発する。これにより、エアベアリングの摩耗・損傷も抑制されると考えられる。

ただし、本事業で使用したエアベアリングよりも耐荷重能力が低下すると考えられ、設置枚数を増加させる等の対応を検討する必要がある。

3) 将来拡張性

エアベアリング方式の定置・回収装置は、前項の台座損傷防止対策を実施したうえで、定置工程及び回収工程に対して、（現在の PEM 仕様の場合）以下の対策を実施することで、本事業で確認した課題を解決できると考える。

定置工程（凹部位置を試走等で事前に記憶）:

・エアベアリングを 12 枚設置し、目地等の凹部直上の物は一時休止する。

・または、回収工程の装置と同仕様とする。

回収工程（き裂の発生及び進展の可能性を考慮）:

・空気漏れ抑制エアベアリングを多数設置する。

（・エアベアリング（別系統供給）を 12 枚設置し、目地等の凹部直上の物は一時休止する。）

これらの対策の実施により、エアベアリング方式の定置・回収装置は、レール等の残置物を発生させずに遠隔操作性（特に救援）を確保でき、以下の厳しい走行環境においても PEM を定置及び回収できると言える。

・PEM と同径程度の狭い円形坑道面

・鋼製面、PCa コンクリート面、コンクリート打設面

・充填材除去後の走行面

・目地等の凹部のある走行面

・回収維持期間に状態悪化（き裂の発生及び進展）する走行面

よって、本事業で研究開発したエアベアリング技術は、かなりの幅の処分坑道設計に対して適用でき、将来拡張性の高い技術と言える。

今後、エアベアリング技術の実機適用に向けて、上記の対策について詳細検討、要素試験及び実証試験等により効果を確認することが望まれる。

2.5　まとめ

2.5.1　隙間充填技術の実証的整備

整備した PEM-坑道間の隙間充填材の施工技術を用いて、試験坑道 2 で下部狭隘部へのスクリューフィーダ―方式によるペレット充填試験、上部開放部への吹付け方式によるベントナイト混合土充填試験を実施した。下部狭隘部の品質（密度）は充填部の容積と送り込んだペレット重量からのかさ密度の算出、上部開放部の品質はコアサンプリングや吹付け法面の三次元計測などによる配合比や密度分布の取得などで評価し、各部位で設定した密度の達成や施工品質のばらつきについての知見を取得した。地下で実施した隙間充填の実証試験の成果、及び地下実証試験までに地上で段階的に実施した技術開発の成果を、試験項目の考え方、地上での試験の位置付け、隙間充填部の品質管理などの観点から取りまとめるとともに、今後の技術開発課題を整理した。

2.5.2　隙間充填材除去技術の実証的整備

PEM の回収作業の前段となる PEM - 坑道間の隙間充填材の除去技術の整備を継続して進めた。除去作業による PEM の損傷の影響から、PEM 近傍は流体的除去技術であるウォータージェット方式、PEM から離れた部分は機械的除去技術であるオーガ方式を選定し、地下での実証試験に向けた整備を進めた。ウォータージェット方式については、PEM 周囲に沿ってノズルを動かすことが可能な除去装置を製作し、ノズルの種類や充填部への吹付け方法を変えた地上での予備試験を実施し、地下での充填材の除去試験に適用する装置の運転パラメータを整備した。オーガ方式については、小型バックホウ用のアタッチメントを製作し、吹付け箇所を再現した土槽を使用した切削性確認のための予備試験を実施した。整備した機械的除去技術、流体的除去技術を用いて、地下環境での隙間充填材の除去技術の実証試験を実施した。地下で実施した隙間充填材の実証試験の成果、及び地下実証試験までに地上で段階的に実施した技術開発の成果を、試験項目の考え方、地上での試験の位置付けなどの観点から取りまとめるとともに、除去技術の今後の技術開発課題を整理した。

2.5.3　搬送定置・回収技術の実証的整備

狭隘な空間でも重量物の搬送が可能なエアベアリングを採用した定置・回収装置の整備を進めた。一般産業では平滑な走行面に対して適用事例のあるエアベアリングによる搬送技術を、地下での曲率のある打設コンクリート面かつ隙間充填材除去後の回収時の環境に適用するため、実証試験装置の製作、地下環境でのエアベアリングの要素試験を行い、エアベアリングの走行特性に係るデータの拡充及び実証試験装置への反映、地上に構築した模擬コンクリート坑道面を用いた回収時の環境を模擬した検証試験を実施し、PEM の回収時における走行特性を確認し、遠隔操作に必要な各種設定項目を検証した。整備したエアベアリング方式の定置・回収技術を用いて、地下環境での PEM 回収及び定置の実証試験を遠隔操作にて実施した。地下での実証試験の成果、及び地下実証試験までに地上で段階的に実施した技術開発の成果を、試験項目の考え方、地上での試験の位置付けなどの観点から取りまとめるとともに、今後の技術開発課題を整理した。

第２章　参考文献

[1] OECD/NEA：Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel Final Report of the NEA R&R Project，2011.

[2] 原子力発電環境整備機構：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－（レビュー版）【本編・付属書】、NUMO-TR-18-03，2016.

[3] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 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，2013.

[4] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 20 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，2009.

[5] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 26 年度地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）平成 23 年度～平成 26 年度　総括報告書，2015.

[6] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 16 年度地層処分技術調査等　遠隔操作技術高度化調査　報告書(2/2)，2006.

[7] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 年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），2008.

[8] 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，2011.

[9] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業　高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム工学要素技術高度化開発 報告（第 1 分冊）遠隔操作技術高度化開発，2013.

[10] SKB：Techniques for freeing deposited canisters Final report、SKB-TR-00-15、2000.

[11] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構：ホームページ、https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/status/kouji/shisetsuseibi_kouji.html.

[12] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 28 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業　可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書，2017.

[13] 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，2012.

[14] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 18 年度地層処分技術調査等　遠隔操作技術高度化調査　報告書，2017.

[15] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 28 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業　可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書，2017..

[16] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業　可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書，2018.

[17] 原子力環境整備促進・資金管理センター：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証試験 報告書，2014.
[18] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 26 年度管理型処分技術調査等事業地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験 平成 19 年度～平成 26 年度の取りまとめ報告書，2015.
[19] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書 （第 2 分冊），2015.
[20] NUMO セーフティケースに関する外部専門家ワークショップ、(3)処分場の設計と工学技術、2016.9.23
[21] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業　可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書(別冊) 可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理について，2018.

第3章　回収可能性の維持の影響の定量化手法の整備

3.1　可逆性・回収可能性に係わる技術課題の整理

3.1.1　安全性への影響の定量化

平成２７年度及び平成２８年度「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会」（以下、「検討会」という。）で整理した、我が国における回収可能性の維持に関する技術アプローチの具体化に係る技術検討の枠組みを表 1.2.3-1 に示す [1]。これは、今後の技術的な検討の出発点として、当面の課題である回収可能性に関する技術的アプローチの具体化を念頭において整理したものである。検討会では、定量化すべき情報の個々に対応する形で、定量化に必要となる技術検討項目を例示している。

本章では、この表に示された「１．安全性への影響」について、地層処分の閉鎖前の操業期間中に新たに追加で設けられる可能性のある回収可能性の維持期間に伴う影響を定量化する手法の整備について報告する。

表 3.1.1-1　回収可能性の維持に関する技術的アプローチの具体化に係る技術検討の枠組み

定量化すべき情報		回収可能性の維持に関する技術的アプローチ					
		処分孔竪置き方式			処分坑道横置き・PEM 方式		
		OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3
1.安全性への影響	(1)操業期間中の安全性への影響						
	①回収可能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響						
	②回収作業時の安全性への影響（回収を実施する場合）						
	(2)閉鎖後長期の安全性への影響 回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合の、人工バリアや天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響						
2.回収の容易性（回収作業時間）	(1) 単位ユニットあたりの回収時間（廃棄体1体又は処分坑道1本）						
	(2) 全ての廃棄体回収に係る全体作業時間						
3.最終閉鎖せずに回収可能性を維持できる期間							
4.回収可能性に係る費用							

3.1.2　定量化手法の整備の進め方

基本方針で導入された回収可能性を維持することに関して、安全性や費用などの間でトレードオフの関係が存在し得る。回収可能性に係る技術的対応の考え方や採用する技術的アプローチの種類や内容など、その選択に応じてトレードオフの関係は変化し、適切な技術的アプローチを選択するには、これらのトレードオフの関係を定量的に評価することが望まれる。

本事業では、現時点でトレードオフの関係にあると想定される、“安全性”、“回収の容易性”、“回収の実施時期（回収可能性の維持期間）”ならびに“費用”の４つの項目のうち、“安全性”に着目して、新たに追加で設けられる可能性のある回収可能性の維持期間に伴う影響を定量化する手法の整備を目的とする。現時点で有望とされる２つの概念をベースとして、その定置概念と回収の容易性の観点から設定した回収可能性の維持期間中の状態オプションとの組み合わせを図 3.1.2-1 に示す。

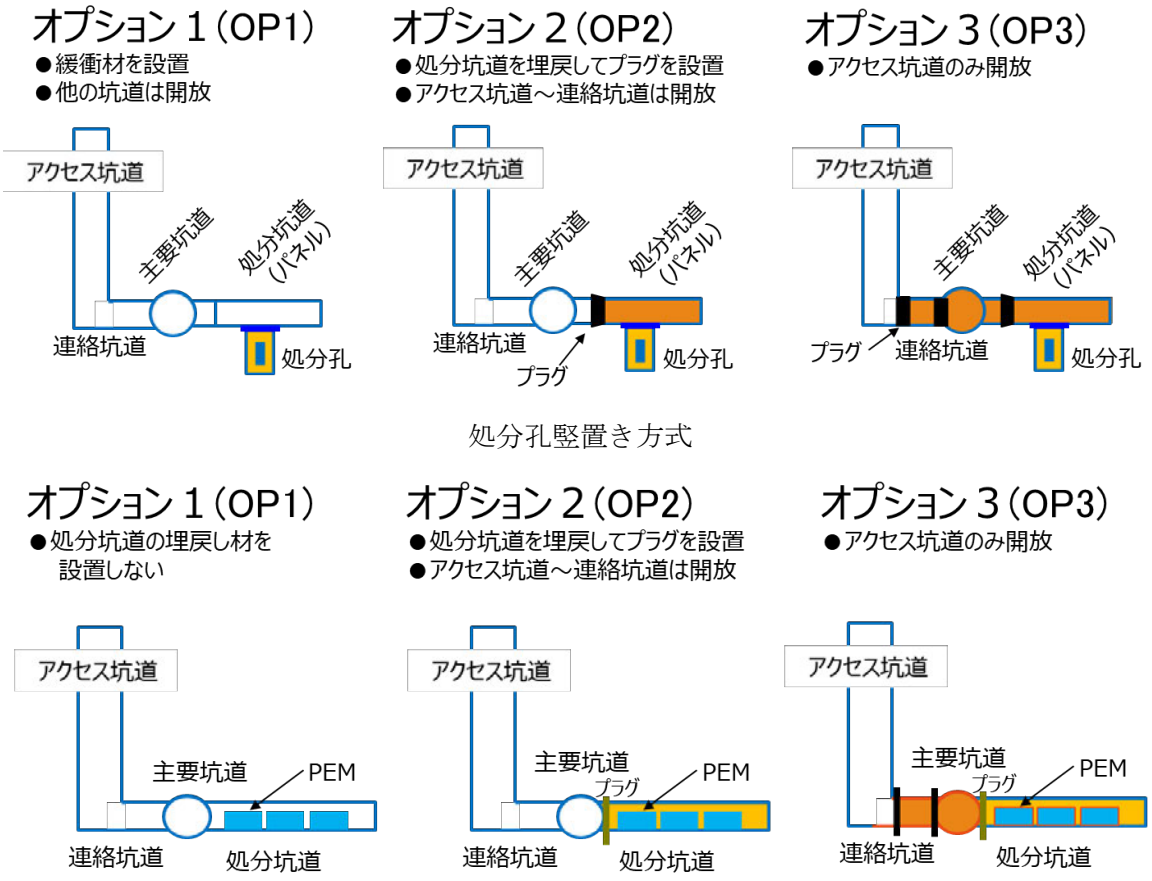


図 3.1.2-1　わが国で有望とされている定置概念と状態オプションの組み合わせ

(1)　回収可能性の維持に伴う影響の具体化

検討会での整理では、現在我が国で有望とされている処分孔竪置き方式、処分坑道横置き・PEM 方式の２つの定置概念をベースとして、安全性への影響の観点から定量化すべき項目およびその設定の考え方を例示している。定量化手法の整備では、例示された項目や考え方を再確

認し、必要な見直しなどを加えたうえで、本検討の出発点として具体化する。検討会で“例示”とされていたものを、検討の出発点として参照できるレベルに具体化するプロセスを経ることで、項目の定量化を構成する要素が明示的なものとなり、影響への各要素の寄与度の判断、新たな知見の導入、第３者による定量化手法の妥当性の検証などが可能となる。

(2)　“回収可能性の維持に伴う影響の定量化“の再定義

国際的な共通理解では、“回収の実施時期”がトレードオフに関係する項目の１つとして示唆されている。改定された基本方針で示された課題である施設閉鎖までの管理のあり方の具体化との関係から、これを“新たに追加で設けられる可能性のある回収可能性の維持期間”（以下、「回収可能性の維持期間」という）と読み替える。

地層処分とは、地下深部の地層が本来持っている「物質を閉じ込める力」を利用し、地下深部の地層に高レベル放射性廃棄物を埋設し、人間の生活環境に影響を及ぼさないように長期にわたって安全・確実に隔離し閉じ込める方法を指す。地層処分施設は、処分場の建設（坑道の掘削）、処分坑道内への廃棄体の定置、処分坑道の埋戻し、操業の進展に伴って坑道が埋め戻されていき、施設の最終閉鎖の判断の後にアクセス坑道が埋め戻されて閉鎖に至る。この流れを「基本の操業」と定義すると、図 3.1.2-2 に示した３つの状態オプションで回収可能性を維持する場合の工程は図 3.1.2-2 右図のようになる。３つの状態オプションは、地層処分事業の進展に伴って坑道が埋め戻されていく基本の操業のある段階に、新たに追加で設けられる可能性のある維持期間において、その状態が維持される。

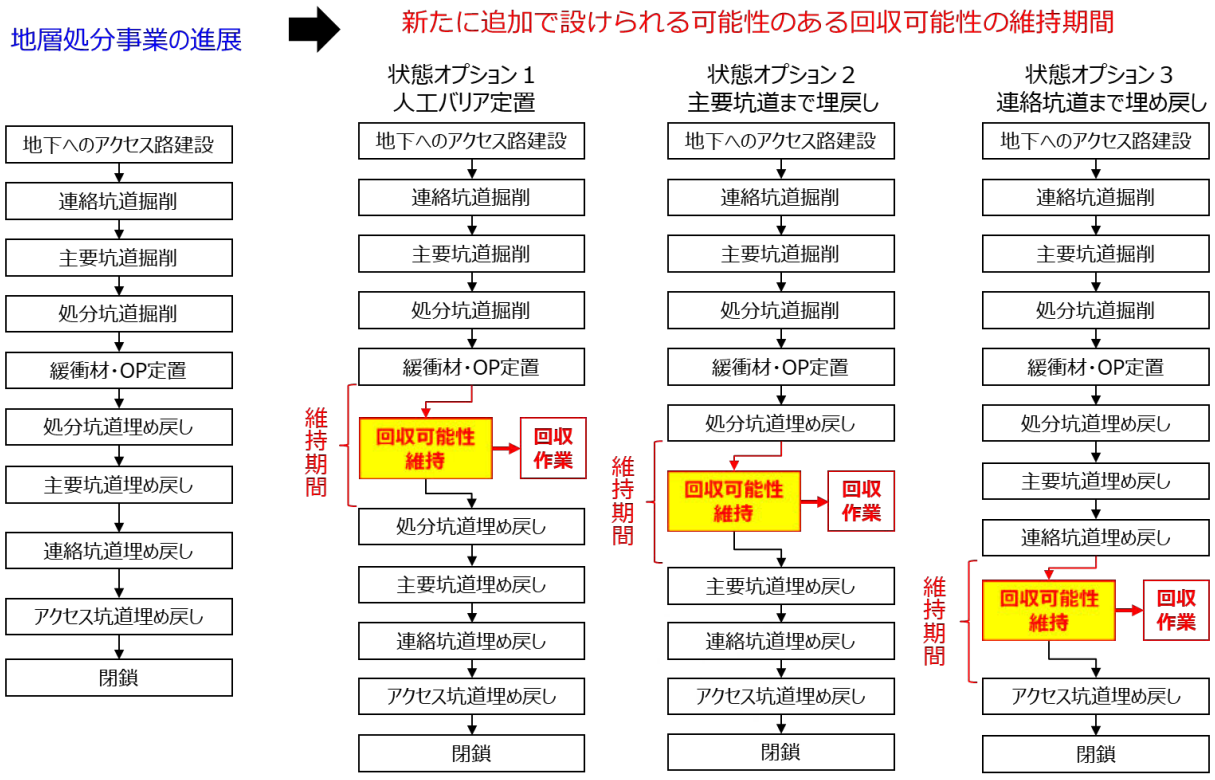


図 3.1.2-2　「基本の操業」と状態オプションによる回収可能性の維持の関係

基本の操業においても、処分場の建設、坑道内の換気、孔内湧水の排水などの行為により、本来の地下環境に対して何らかの擾乱を与える。基本の操業で生じる事象の時間変遷を図 3.1.2-3 に模式的に示す。この模式図は横軸に処分事業の進展に対応する時間の経過、縦軸に着目した内容（例えば、ニアフィールドの水理場の水頭変化や地下構成要素の状態や機能の変遷など）を充てている。ボーリング等による地上からの調査開始時点から変遷が始まり、処分場の閉鎖により当初の状態に戻っていくと考えられる。このように、坑道の掘削や排水、換気などの行為が、操業期間中に地下環境へ与える擾乱や生じる事象に与える影響は、基本の操業における閉鎖後長期の性能評価の初期条件となる。

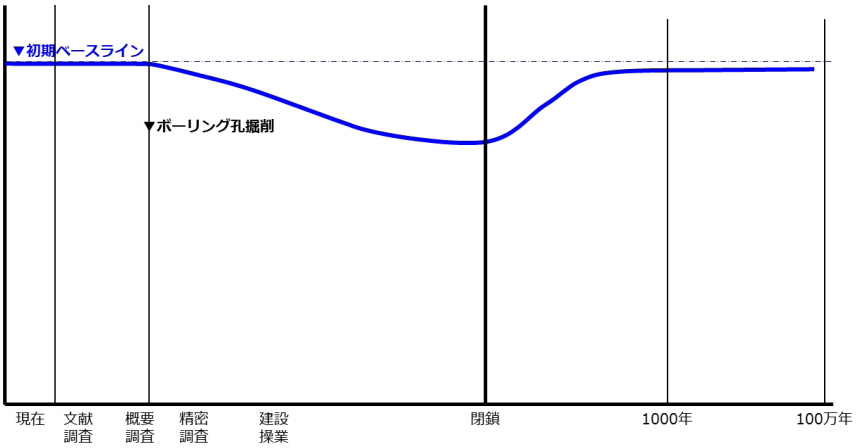


図 3.1.2-3　基本の操業で生じる事象の時間変遷のイメージ

図 3.1.2-3 の基本の操業における事象の時間変遷を基本として、図 3.1.2-2 に示す回収可能性の維持期間の設定を反映させた場合を図 3.1.2-4 に示す。図中には回収可能性の維持に伴う影響を３色の線で模式的に示した。

青色線は基本の操業と同じ時間変遷を示している。回収可能性の維持期間を設けてもこのような変遷となる場合、長期挙動評価の初期条件となる閉鎖時の状態や、閉鎖後の挙動が基本の操業と同じであること示しており、回収可能性の維持に伴う影響がないことを意味する。

橙色線は回収可能性の維持に伴い何らかの影響を受け、閉鎖時の長期挙動評価の初期条件が変化、さらにその影響が長期に亘ることを示している。ただし青色線との差が地層処分場の長期安全に対して有意なものであるかを意味している訳ではないことに注意を要する。

緑色線は、閉鎖時の初期条件は橙色線と同様に基本の操業と異なるが、その後の変遷が基本の操業のそれと同じになることを示している。

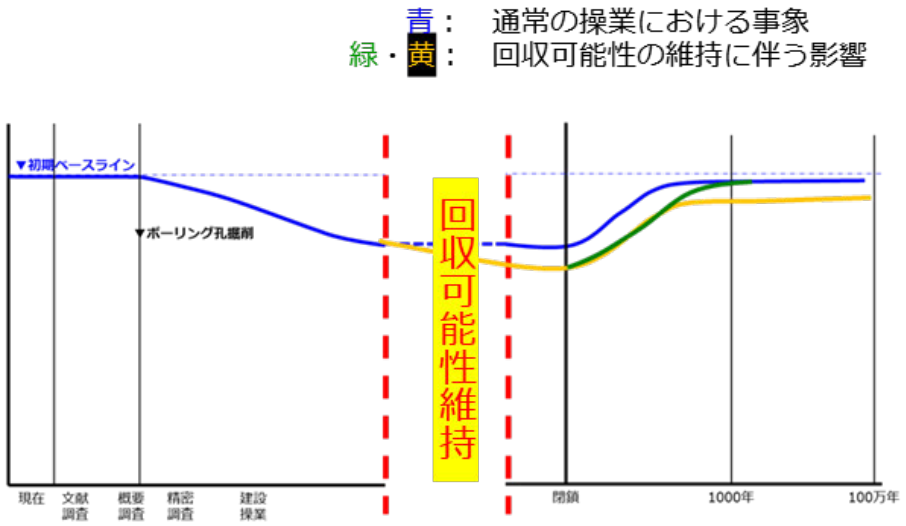


図 3.1.2-4　「回収可能性の維持」で生じる事象の時間変遷のイメージ

高レベル放射性廃棄物の廃棄体である 4 万本のガラス固化体を定置する地下施設は、廃棄体からの熱影響などを考慮して設計され、パネル型やデッドエンド型といったレイアウトが検討されている。パネル型の場合、6 枚の処分パネルの建設と操業（処分坑道への廃棄体の定置）は動線や換気経路が交差しない様に工夫された状態で同時に行うことが検討されており、通常の操業においても建設・操業から閉鎖まで 50 年以上かかる計画である。すなわち「通常の操業」においても、建設時期の異なる坑道や、定置時期が異なる廃棄体など、閉鎖の段階までの状態変遷が異なる状態が存在し、事業の初期に建設・操業されたパネルは、最終パネルの埋戻しまでの数十年間、その状態で管理されていることになる。

このように、回収可能性の維持に伴う影響は、基本の操業における状態変遷と共通する部分が多い。処分場の閉鎖後、再冠水後の状態変化が定量化できれば、長期の性能評価や安全評価の初期状態として引き渡すことができ、回収可能性の維持に伴う影響（処分システムの成立性への影響）を、最終的に安全評価の判断指標（線量基準など）との比較で論じることができる。

(3)　閉鎖後長期の安全評価

閉鎖後長期の安全評価では、対象とする母岩や廃棄物の種類、廃棄物定置方式のオプションを組み合わせた種々の処分場の振舞い（シナリオ）を、時間軸と空間スケールを用いて表したストーリーボード（及び FEP データベース）を活用して整備し、建設・操業を経て閉鎖された時点の地層処分システムの状態）が時間・空間的にどのように変遷するか、またそれに応じて放射性核種はどのように移行するのかを論じている。回収可能性の維持に伴う事象は、その影響の程度の違いはあれども基本の操業と共通する部分が多く、回収可能性を維持した後に閉鎖の判断がなされれば、処分場は埋め戻され多重バリアシステムから成る本来の地層処分システムに移行する。よって、現状の処分概念との整合を取りつつ、回収可能性の維持期間中の状態オプションに応じた安全性への影響を定量化するには、このストーリーボードを活用することが効果的であると考えられる。

(4)　先行的な検討

現在、我が国で有望とされている２つの定置概念に対して、安全評価上基本シナリオとなるストーリーボードが整備されつつある。本事業では、回収可能性の維持期間に伴う影響に対して、(1)～(3)に留意しつつ定量化する手法を先行的に検討した。

次節に検討の具体例として、回収時の廃棄体容器の健全性に関する検討結果を整理する。

3.2　回収時の廃棄体容器の健全性に関する定量化方法の整備

3.2.1　定量化手法の整備の方針

「回収時の廃棄体の健全性」は、我が国で有望とされている処分孔竪置き方式と処分坑道横置き・PEM 方式の２つの定置概念における「操業期間中の安全性に対する影響」として R&R 検討会において検討の出発点として提示されたものであり、本項目に対する視点と考え方は、以下の様に例示されている。

回収装置による把持・取り出しの際には、廃棄体容器に一定の機械強度が要求されることから、廃棄体容器の健全性に関する評価や検討を行う（回収維持期間中の埋め戻し状態に応じた容器の劣化状態など）

「回収時の廃棄体の健全性」を定量化する手法の整備は、先ず 3.1.2 で述べた、維持に伴う影響の具体化から着手し、現状のオーバーパックの健全性評価手法を基にして、各状態オプションにおける廃棄体容器の健全性の検討を行った。本検討では各状態オプションで生じる事象について、抽出の段階ではその影響の大小による優先度に基づく除外を行っていない。そのため、現状の地層処分事業での技術検討では省かれた事象も取り上げている場合がある。このように一旦取り上げた後に、検討の前提条件や影響への寄与度の低さなどを考慮して除外することで、基本の操業では関与しないが、新たに追加で回収可能性の維持期間を設けた場合や回収作業時にのみ影響が顕在化する事象の抽出漏れを低減するとともに、検討の経緯を残すことで、本事業で整備する定量化手法自体の妥当性評価や将来的な拡張性を確保する。

3.2.2　定量化の対象の抽出

(1)　定置作業における廃棄体の形態

高レベル放射性廃棄物の地層処分は、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材から構成される人工バリアを、天然バリアである 300m 以深の岩盤中に埋設する多重バリアシステムを基本とする概念である。廃棄体であるガラス固化体は地上施設で金属製のオーバーパックに封入される。人工バリアを地下に定置する方式として、オーバーパックと緩衝材をそれぞれ搬入して地下で組み立てる方式と、地上施設で予め人工バリアシステムとして容器内に組立てた後に地下施設に搬送し定置する PEM（Prefabricated Engineered Barrier System Module）方式があり、わが国では前者に相当する処分孔竪置き方式と、後者に相当する処分坑道横置き・PEM 方式が有望な定置概念として検討されている [2]。このように、定置工程において廃棄体はオーバーパックと PEM の 2 形態で扱われることになり、オーバーパック把持部や PEM の強度と、把持や搬送などのハンドリング技術の整合が設計・製作時に担保される。

(2)　回収技術の整備例と回収作業時の廃棄体の形態

回収工程は、地下処分坑道に定置された廃棄体を定置場所から搬出する行為であり、廃棄体はオーバーパック、または PEM の形態で扱われるものと考える。以下に、これまでに検討・整備された回収技術の整備例を示す。

1)　処分孔竪置き方式

緩衝材中に埋設されたオーバーパックを回収するためには、オーバーパックに影響を与えずに周囲の緩衝材を除去する必要がある。処分孔竪置き定置方式において、処分孔内の緩衝材をオーバーパックに影響を与えずに除去する技術として、塩水を利用した緩衝材除去技術が整備されている [3]。地上で実施した実規模スケールの緩衝材除去試験の様子を図 3.2.2-1 に示す。

図 3.2.2-1　竪置き定置方式を対象とした緩衝材除去試験の様子

2)　処分坑道横置き・PEM 方式

処分坑道横置き・PEM 方式の回収に対する技術開発は、処分坑道に埋め戻された状態からの PEM の回収を想定した地下環境での実証試験を、隙間充填材の除去と処分坑道外への PEM の搬出（回収）に対して実施した。地下環境での PEM の回収試験の様子を図 3.2.2-2 に示す。

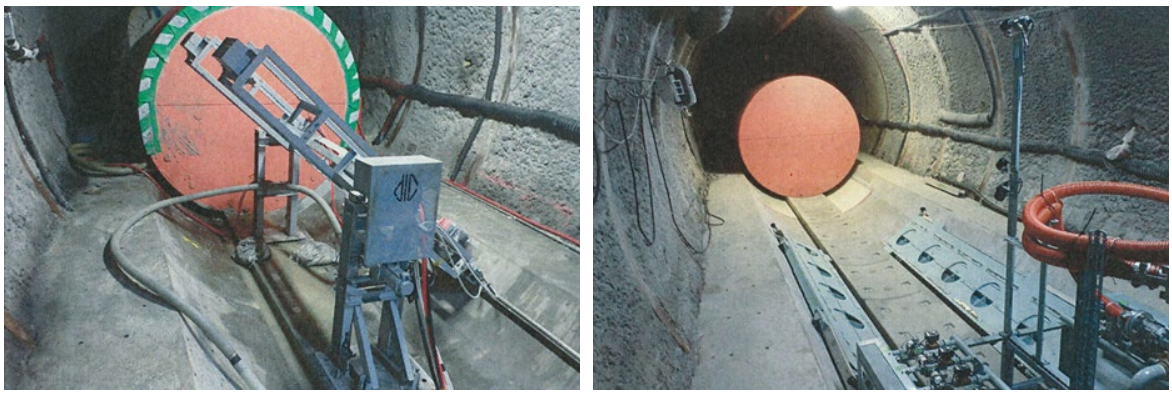


図 3.2.2-2　処分坑道横置き・PEM 方式を対象とした PEM の回収試験の様子

3)　横置き方式（オーバーパックの回収）

PEM 方式の回収では、PEM 容器を開封し内部の緩衝材を除去してオーバーパックを回収する方法も考えらえる。この場合、回収作業の姿勢が処分坑道竪置き方式と異なる横方向となり、緩衝材の除去手順やオーバーパックのハンドリング方法に違いが生じるが、基本となる緩衝材の除去技術は同じである。横置き方式での塩水による緩衝材の除去試験の様子を図 3.2.2-3 に示す [4]。

以上により、本検討においても、回収作業で直接取り扱う対象はオーバーパックと PEM 容器とし、廃棄体であるガラス固化体は除外する。

図 3.2.2-3　横置き定置方式を対象とした塩水による緩衝材除去試験

(3)　回収対象の健全性、及び回収可能性の維持に伴う影響の整理

定量化手法の整備に先立ち、回収作業時の廃棄体容器の健全性について定義するとともに、影響を与える事象や因子の抽出・整理を行った。

健全性として、①閉じ込め性、②遮蔽性、③ハンドリング性の 3 点を定義した。回収作業時の落下等の異常事象に対する検討については、本検討で取り上げる 3 点の健全性に対して定量化した後の評価項目として、本事業での検討から除外した。

1)　閉じ込め性

オーバーパックの閉じ込め性が機能している状態では、放射線管理区域の設定、適切な遮蔽、機器側の耐放性などの対応により、回収工程における作業安全性を確保することができる。一方、閉じ込めが喪失した場合は放射性物質による汚染により作業安全性は著しく低下する。閉じ込め性確保のため、構造健全性と腐食健全性がオーバーパックの設計要件として設定されている。PEM 容器には閉じ込め性は機能に割り当てられていない。

図 3.2.2-4 にオーバーパックの閉じ込め性に係る因子の関連を整理したものを示す。このような整理より、定置後の新たに追加される回収可能性の維持期間による影響はオーバーパックの腐食評価に集約した。以下に、各因子の考え方を示す。

a 構造健全性

オーバーパックの構造健全性の評価を構成する主要素として、形状、材料物性、破損の起点、作用する力を挙げた [6]。

・ 形状

処分容器としての形状や板厚は、安全機能確保の点から設計される。現状のガラス固化体を収納するオーバーパックは、円筒型、炭素鋼製、板厚 190mm のものが例示されている。板厚は耐圧層、放射線遮へい層、耐食層で構成される。回収可能性の維持に伴う影響として、定置後に生じる腐食現象による板厚の減少、それに伴う外形の変化が挙げられる。

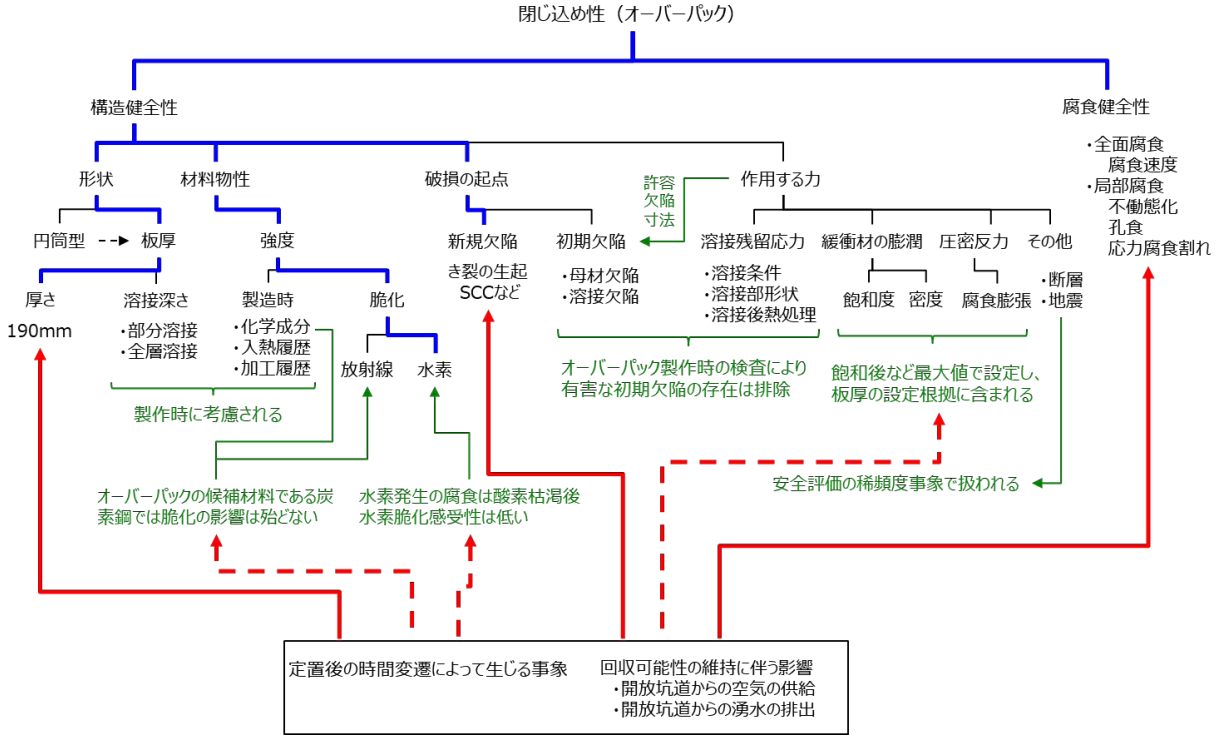


図 3.2.2-4 オーバーパックの閉じ込め性に係る因子の整理

・ 材料物性値

力学評価における物性値（強度）は、金属材料の化学組成、製造時の入熱履歴、溶接封入方法（溶接材料、溶接入熱履歴）などで決まるため、回収可能性の維持期間を含めた定置後事象で直接作用を受けるものは無い。材料の強度のうち、脆化（硬さの上昇）は時間依存性があり、放射線による脆化と腐食によって発生する水素による脆化が生じる事象として考えられる。これらは実験に基づく解析的評価や、長期の浸漬試験の結果から有意な影響が無いと考えられるため、回収可能性の維持に伴う影響での検討項目から除外した。

・ 破損の起点

応力集中や破壊の起点など構造上の弱点となる溶接欠陥、表面欠陥、き裂などが挙げられる。

オーバーパック製作時に適切に検査を行うことで、定置初期のオーバーパックに構造上の有害な欠陥が含まれることを回避できる。一方、定置後の腐食現象により、表面形状の不均一化、孔食などの局部腐食、応力腐食割れによるき裂の発生など、新たに破損の起点となる欠陥が生じる可能性がある。従来の腐食評価における環境条件では優位な影響とならないことを試験で確認している。一方、回収可能性の維持によりオーバーパック周囲の環境条件が変わり、生じる腐食現象が変わった場合、有意な影響となる可能性がある。

・ 作用する力

地下水の浸潤により生じる緩衝材の膨潤圧、オーバーパックの腐食膨張による圧密反力、溶接部の残留応力が挙げられる。回収可能性の維持期間中に生じる緩衝材の浸潤やオーバーパックの腐食による影響は、現在のオーバーパックの板厚の設定根拠としている緩衝材の飽和にと伴う膨潤圧の最大値、1000 年間のオーバーパックの腐食伴う圧密反力値よりも低い。また溶接残留応力は製造時の品質改善手法としての溶接後熱処理などの対策も検討されている。よって既に現在のオーバーパックの設計に考慮されているため、回収可能性の維持に伴う影響は無いと判断し、検討項目から除外した。

b 腐食健全性

現在のオーバーパックの設計には、定置後に新たに追加される回収可能性の維持伴う影響が考慮されていない。前述の構造健全性の評価にも関連するが、回収可能性の維持に伴う影響として、周辺環境の変化による腐食速度の増加や、これまで考慮していない腐食現象の発現などによりオーバーパックの閉じ込め性に影響を与える可能性がある。

2) 遮蔽性

オーバーパックや PEM は操業期間中の作業安全のための遮蔽性は求められてはいないが、高線量下での作業となるため、建設／操業の区域や動線の分離、装置機器の耐放射線性の確保、遠隔操作による作業が検討されている。ガラス固化体の放射能は製造時から減衰するが、これは時間の経過のみで決まり周囲の環境に依存しない。操業に用いる装置の耐放射線性に関する要件の設定や、作業環境の評価に関連するオーバーパックの表面線量は、設計したものに対する線量計算より評価されている。図 3.2.2-5 に作業安全上の遮蔽性に因子の関連を整理したものを示す。このような整理より、定置後の新たに追加される可能性のある回収可能性の維持期間による影響はオーバーパックの腐食評価に集約した。

オーバーパックの定置作業時の表面線量は 11mSv/h（ガラス固化体 30 年冷却後）と見積もられている [2]。回収作業時の作業安全に対するオーバーパックの表面線量は、ガラス固化体の放射能の減衰と、維持期間中の腐食量を引いた板厚で算出することができる。

PEM の場合、オーバーパックに加えて厚さ 70cm の緩衝材と PEM 容器が遮蔽層として機能するため、3.1μSv/h（ガラス固化体 30 年冷却後）程度となる [2]。現状の設計では PEM 鋼殻には閉じ込め性が割り当てられていないため、容器内部に地下水が浸入した場合は、緩衝材の飽和度が高くなり遮蔽効果が高まると考えられるため、回収可能性の維持期間中に生じる緩衝

材の浸潤は安全側に作用する。一方、金属製の PEM 容器が回収可能性の維持期間に生じる腐食によって板厚が減少する場合、PEM 容器が受け持つ遮蔽性が低下する。

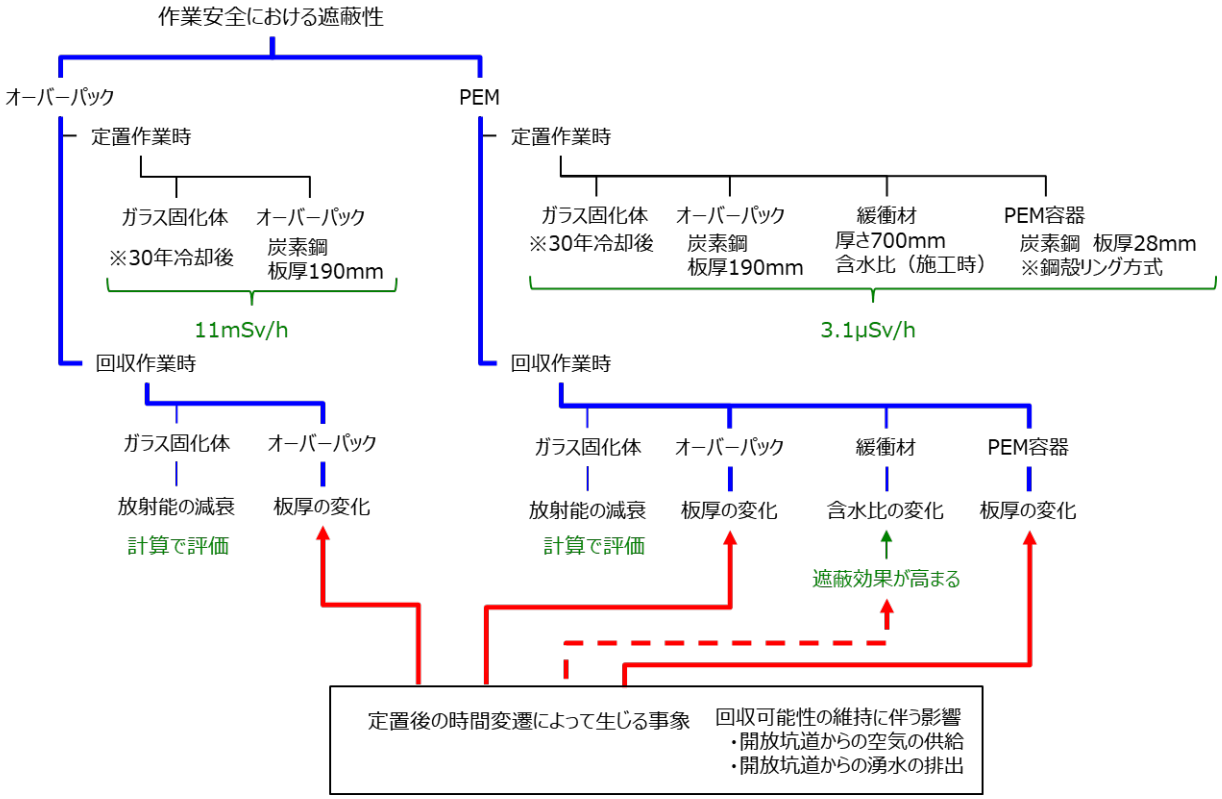


図 3.2.2-5　遮蔽性に係る因子の整理

3)　ハンドリング性

ハンドリング性とは廃棄体をオーバーパックや PEM の形態で、搬送、定置、回収する場合の作業性と定義する。

定置作業時は、地上施設で品質管理されたものが地下施設に搬入されるため、製造時のオーバーパックや PEM の重量に合わせた把持部や定置装置（把持機構含む）が設計され、作業上の安全性（健全性）が確保されている。回収作業時は、回収可能性の維持に伴う以下の影響が考えられる。

a オーバーパック

オーバーパックの重量は、ガラス固化体、オーバーパック、把持部を含めておよそ 6.2t である。オーバーパック周囲の緩衝材を除去（図 3.2.2-1 参照）し、処分孔からの引上げ際には 1)でも挙げた腐食が生じている。ハンドリング時には重量変化、把持部の減肉、破損の起点と成り得る新たな亀裂の発生など、腐食による安全性への影響が考えられる。また、腐食生成物が付着すると把持部の外形状が変わることも考えられる。

以上の事象より、定置後の回収可能性の維持期間中の腐食現象がオーバーパックのハンドリング性に影響を与える可能性がある。

b PEM

PEM の重量は、定置時は緩衝材の含水比を 10%とした場合、ツイストロック方式の把持部を含めて、37.2 t と見積もられている [2]。PEM のハンドリング性に対する影響として重量の変化、構造体としての健全性が考えられる。

PEM の製作技術の検討及び製作試験では、図 3.2.2-6 のような半割れ方式 [7]と鋼殻リング方式 [8]の２種類が検討されている。半割れ方式の PEM 容器は板厚 20mm の炭素鋼製の溶接構造物で上下２分割、人工バリアを組立てた後は上下ボルトで固定する方式である。定置時のハンドリング性は、エアベアリング方式での搬送を見据えた強度計算による評価が行われている。鋼殻リング方式は、図 3.2.2-7 に示すリング状の型枠内に撒き出し・転圧（空圧多連ランマ）で緩衝材を施工し、積上げて PEM を構築する方式である。鋼殻リングの厚さは、転圧力に対して 7.5mm、リングの印籠結合部の仕込みで 28mm となっており、組立工程時の蓋吊に対する耐力、横転動などの健全性を評価・確認している。

図 3.2.2-6　PEM 容器の製作検討の例　左：半割れ方式　右：鋼殻リング方式

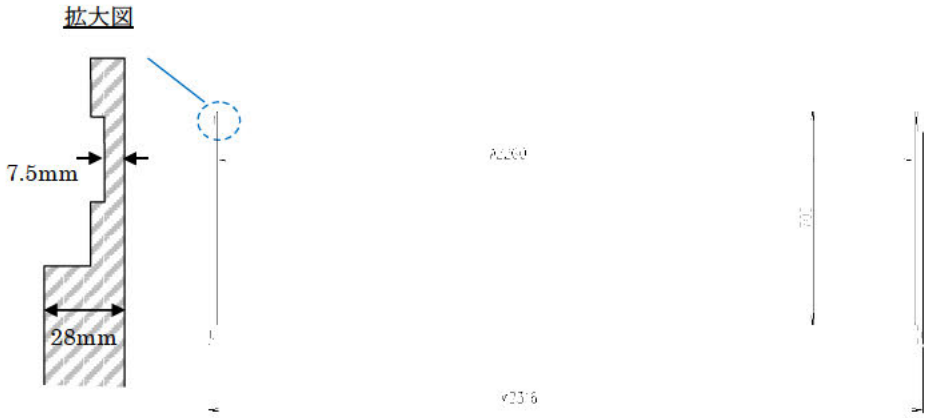


図 3.2.2-7　鋼殻リングの構造（No.6 リング）

何れの方式の PEM 容器も組立作業、および搬送・定置時のハンドリング性は設計に考慮されている。また PEM 容器は炭素鋼製でハンドリング性は構造と板厚で確保されているため、定置後の回収可能性の維持期間中の腐食による板厚の減少が回収作業時のハンドリング性に影響を与える可能性がある。また、現在の設計では PEM 容器に水密性は期待されておらず、定置後に地下水が容器内に進入し、緩衝材が膨潤することが考えられるが、この膨潤圧は設計に考慮されていないため、先の板厚減少や把持方法との兼ね合いによっては、PEM が構造体として機能せず、回収作業時に崩れる可能性も考えられる。

PEM 容器内への地下水の浸入は、PEM の総重量や重心位置にも影響を与える。重量のうち、PEM 容器、ガラス固化体、オーバーパックは製作時と回収作業時では腐食による重量変化のみである一方で、緩衝材は施工方法に適した含水比であったものが回収作業時は地下水を含んだ分だけ重量が増加する。さらに、容器の隙間からの浸入の不均一性により、重心位置が浸潤した側へシフトする。PEM は円筒型であるため、重心位置の変化はモーメントを発生させ、持ち上げた際に PEM が転動する要因となる可能性がある。

以上の検討より、定置後の回収可能性の維持期間中にハンドリング性に影響を与える可能性がある事象として、オーバーパックや PEM 容器の腐食、PEM 方式の場合の緩衝材の浸潤による膨潤圧と重量変化を抽出した。

(4)　本項目で検討・評価する対象

操業期間中の安全性への影響のうち「回収時の廃棄体容器の健全性」を定量化するため、定置後の回収可能性の維持期間中の事象や変遷の検討対象として以下の２項目を抽出した。

1)　地層処分環境における金属材料の腐食

オーバーパックや PEM 容器の素材である金属材料（炭素鋼）について、定置後の埋戻し状態に応じた環境下での腐食挙動について扱う。

2)　緩衝材の浸潤

オーバーパックの腐食挙動、PEM のハンドリング性への影響が考えられる、定置後の緩衝材と地下水の接触による浸潤挙動について扱う。

3.2.3　地層処分環境における金属材料の腐食

本項では、オーバーパックや PEM 容器の材料である炭素鋼の腐食について、定置後の回収可能性の維持期間中に生じる腐食挙動の扱いについて述べる。

金属材料の腐食は、材料と環境の組み合わせで生じる化学反応の結果生じる事象である。高レベル放射性廃棄物の地層処分事業における炭素鋼オーバーパックの腐食評価では多くの知見が蓄積されている。回収可能性の維持に伴う影響の定量化においても、同様の考え方を踏襲し、これまでのオーバーパックの設計や長期挙動との整合を図るとともに、回収可能性の維持に伴う影響を考慮すべき因子の抽出を行った。

(1)　地層処分事業における金属材料の腐食の検討事例

炭素鋼オーバーパックの構造や板厚は、第 2 次取りまとめ [5]で示された考え方が基本となりこれまでに製作技術の検討・開発や、腐食に係る試験が実施されてきた。オーバーパックの腐食代を求めるための試験では、処分坑道内にオーバーパックを定置した状態における温度、溶存酸素濃度、地下水の組成といった金属の腐食に対する環境因子を踏まえ、腐食に関しての一般的な情報に基づいて、処分環境で生起する可能性のある腐食に関する事象をオーバーパックに関する腐食因果時系列系統図（以下、腐食シナリオ）として整理し、腐食寿命の検討が必要な事象を評価対象としている。図 3.2.3-1 に炭素鋼溶接部の腐食挙動評価に使用した腐食シナリオを示す [9]。腐食シナリオ上分岐に位置する事象に対する室内試験では、腐食代を保守的に見積もるため、環境条件や試験の評価が以下のように設定されている。

1)　温度

現在の処分場の設計では、ガラス固化体からの発熱による緩衝材の熱変質防止の観点から、オーバーパック外表面温度が 100℃を超えないよう定置間隔や処分坑道離隔が設定されている。定置後の外表面温度はある時期に最高温度に達した後に低下し、最終的には周辺岩盤の温度に近くなる。腐食試験は試験の制約上 80℃で実施されたものが多く、その試験データに基づき行われた長期寿命評価は、長期的な系の温度変化を考慮していないが、腐食反応は一般的に温度が高い程激しくなるため、現在の腐食挙動評価は保守的になっていると考えられる。

2)　溶存酸素量

深部地下水の溶存酸素濃度は極めて低いため、閉鎖後長期の腐食代はグローブボックスを使用した低酸素雰囲気下で実施された浸漬試験後の腐食減量から平均腐食速度を算出し、ある期間経過後の腐食深さを見積もっている。一方、建設や操業期間中の開放された坑道中や、緩衝材や埋め戻し材に含まれた酸素により酸化性雰囲気になる初期については、持ち込まれた酸素がオーバーパックの腐食で消費されるという仮定に基づき、酸素量から物質収支で腐食量を算出し、平均腐食深さを求めている。さらに腐食の不均一性を求めるための水溶液系での浸漬試験を実施し、浸漬試験後の腐食減量から平均腐食深さ、形状計測から最大腐食深さを算出し、極地統計により酸素によりオーバーパックに生じる最大腐食深さとしている。このように酸素による腐食深さは、総酸素量とオーバーパックの表面積から求められており、坑道寸法や埋め戻し材の変更による総酸素量に依存する。

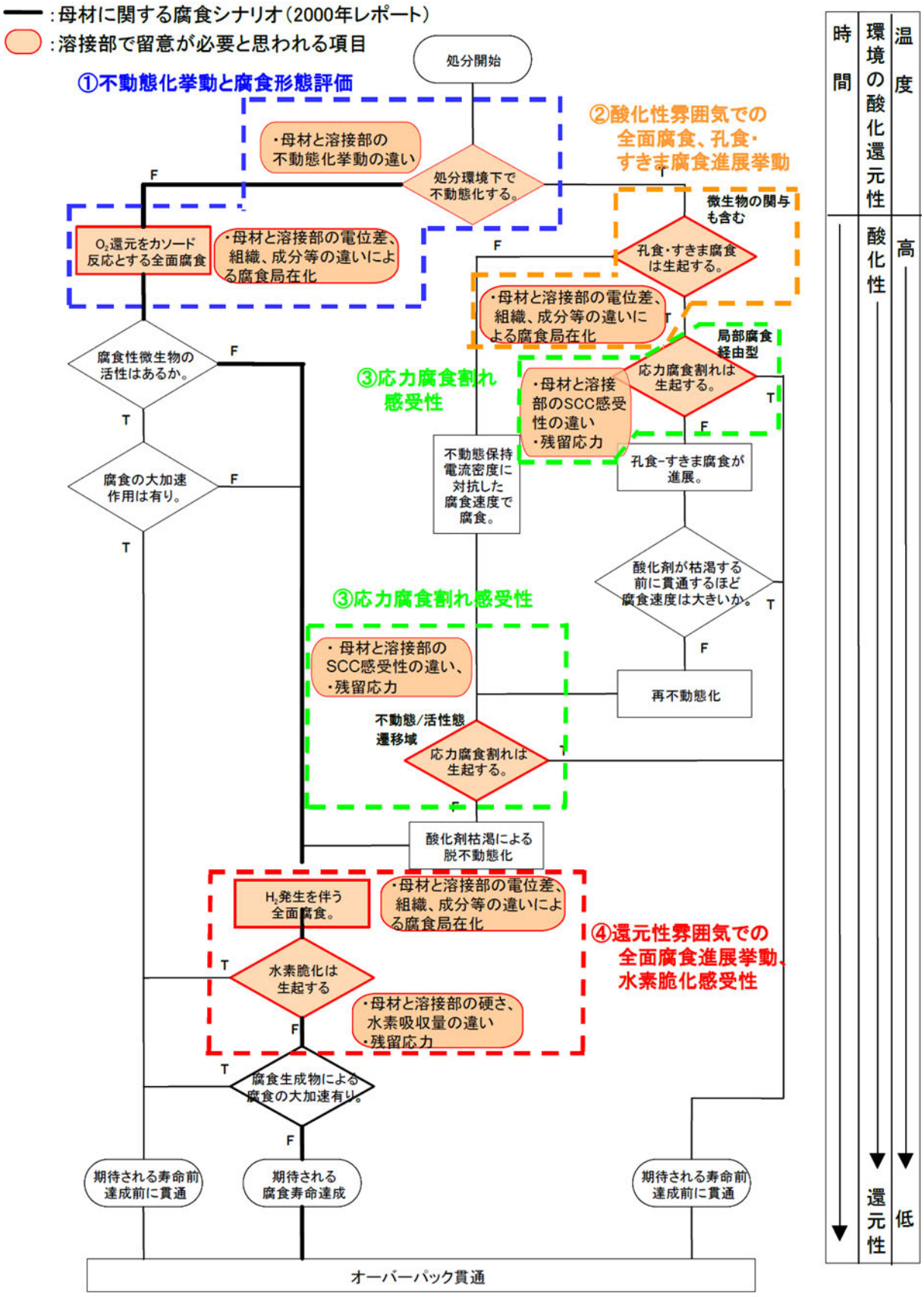


図 3.2.3-1　炭素鋼オーバーパック溶接部の腐食因果時系列系統図

3)　地下水組成

人工バリアシステムではオーバーパック周囲には緩衝材が存在するため、地下水が直接オーバーパックに接触することはない。図 3.2.3-2 に示すように、岩盤中の地下水は緩衝材を通過していくため、オーバーパック外表面が接する水は緩衝材の間隙水である。オーバーパックの腐食に係る緩衝材の間隙水組成は処分サイトに依存するため、5 種類のモデル地下水を設定し[10]、その仮想的地下水と緩衝材が反応した後の組成 [11]をもとに、オーバーパックの腐食に影響の大きいと考えられる地下水の化学種と濃度範囲を設定している。この化学種および濃度範囲をオーバーパックが曝される環境とし、生起する可能性のある事象の抽出、環境状態の変遷に合わせて事象を時系列で整理した腐食シナリオが作成されている。

腐食試験は海水系地下水として人工海水（ASTM D1141 準拠）、人工淡水（2.5mM NaCl + 2.5mM $NaHCO_3$）、その他目的に合わせた溶液を使用した実験室規模の試験を中心として腐食に係るデータを拡充している。

このような試験や評価から求められたオーバーパックの腐食代は、酸素による腐食の平均腐食深さを 1.8mm 程度、最大腐食深さを極値統計で求め 11.2mm としている。酸素が枯渇した後に水が酸化剤となって進む腐食については 1,000 年間では腐食深さ数 mm 程度、余裕をもって 20mm としている。両者の和から 1000 年間の閉じ込め性を確保するための腐食代が 40mm と設定されている。

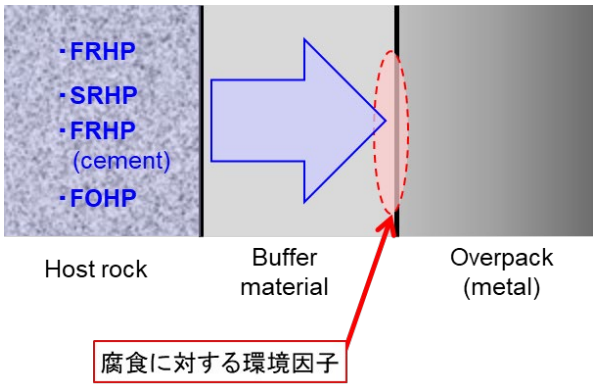


図 3.2.3-2　オーバーパックの腐食に影響する環境因子

4)　地層処分事業における腐食評価の方法論

以上のように、地層処分環境下でのオーバーパックに対する腐食の評価は、①地下水組成の設定、②緩衝材の化学的緩衝作用による間隙水組成の評価、③環境下における炭素鋼の腐食現象の抽出とシナリオ化、④実験や事例報告に基づく個々の腐食挙動の把握、⑤腐食寿命評価と展開している。現在の PEM は地上での製作、地下へ搬送・定置時の健全性のみで設計されており、腐食健全性に対する要件や、影響について評価された事例はない。

(2)　腐食評価に対する回収可能性の維持の影響

金属材料の腐食挙動評価では、金属表面の環境条件が重要な因子となる。緩衝材共存下での検討・試験であるオーバーパックの腐食評価を拡張するため、廃棄体の回収時の形態であるオーバーパックと PEM について、回収可能性の維持の状態オプションによる周辺環境の違いを整理し、回収時の健全性の定量化における金属材料の腐食の扱い方をまとめた。

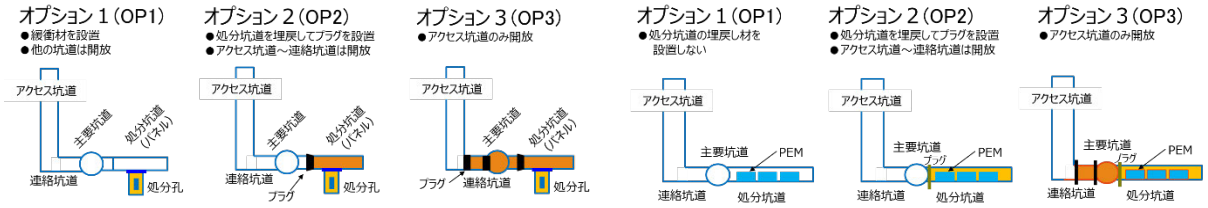
1)　状態オプションによるオーバーパック、PEM 周囲の状態

図 1.2.2-2 に我が国で有望とされている定置概念と状態オプションの 6 種類の組み合わせを再掲する。

回収可能性の維持の状態オプションは、地下に人工バリアを定置した後の埋戻し状態として設定したため、全ての状態オプションにおいてオーバーパックは緩衝材共存環境となっている。よって、オーバーパックは 6 種類の組み合わせ全てにおいて、ベントナイト：ケイ砂＝70%：30%、1.6Mg/m^3 のベントナイト混合土中（緩衝材中）での腐食挙動評価となる。

処分坑道横置き・PEM 方式の場合、状態オプション 2 と 3 は処分坑道内が埋め戻された状態であり、埋め戻し材（ここでは隙間充填材という）の設計要件に従い、坑道断面の違いにより異なる 2 種類の隙間充填材の共存環境となっている。隙間充填材の詳細は第 3 章の隙間充填技術の実証的整備に譲るが、緩衝材相当の粘土密度となる純ベンナイト 1.37Mg/m^3 と、ベントナイト：ケイ砂＝50%：50%の混合土 1.6Mg/m^3（乾燥粘土密度 1,15Mg/m^3）である。

一方、処分坑道横置き・PEM 方式の状態オプション 1 は処分坑道に PEM が定置された状態であり、6 種類の状態オプションのうち唯一坑道内に露出した状態となっている。



処分孔竪置き方式　　処分坑道横置き・PEM 方式

図 3.2.3-3　わが国で有望とされている定置概念と状態オプションの組み合わせ

回収可能性の維持期間中のオーバーパック、PEM の埋戻し状態に応じた腐食環境を表 3.2.3-1 に整理すると、着目する環境条件は 4 条件になる。具体的には、オーバーパックの腐食環境は緩衝材間隙水環境、PEM 容器の腐食環境は純ベントナイトの隙間充填材間隙水、掘削ズリ混合土の隙間充填材間隙水、状態オプション 1 の大気開放下である。

これらを集約すると、回収可能性の維持の影響に伴う廃棄体容器の健全性に係わる腐食評価は、ベントナイト混合土中と大気開放中の 2 つの環境条件での炭素鋼の腐食挙動評価として位置付けることができる。

表 3.2.3-1　回収可能性の維持期間中の金属材料の腐食環境

水の流れ	定置概念	処分孔竪置き方式			処分坑道横置き・PEM 方式					
		処分孔			狭隘な処分坑道			大断面処分坑道		
	状態オプション	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	オーバーパック	炭素鋼			炭素鋼			炭素鋼		
	腐食環境	緩衝材中間隙水			緩衝材中間隙水			緩衝材中間隙水		
	緩衝材	ケイ砂 30%混合クニゲル V1 1.6Mg/m^3（ρ_d =1.37Mg/m^3）			ケイ砂 30%混合クニゲル V1 1.6Mg/m^3（ρ_d =1.37Mg/m^3）			ケイ砂 30%混合クニゲル V1 1.6Mg/m^3（ρ_d =1.37Mg/m^3）		
	PEM 容器	↑			炭素鋼			炭素鋼		
	腐食環境	---			大気腐食	隙間充填材間隙水		大気腐食	隙間充填材間隙水	
	隙間充填材	↑			空気	純ベントナイト 1.37Mg/m^3		空気	掘削ズリ 50%混合クニゲル V1 1.6Mg/m^3（ρ_d =1.37Mg/m^3）	
	坑道支保	↑			コンクリート			コンクリート		
	岩盤	地下水の湧出			地下水の湧出			地下水の湧出		
	地下水組成									

2)　ベントナイト混合土中の炭素鋼の腐食評価における間隙水組成の見積

図 3.2.3-4 は(1)4)で整理した現行のオーバーパックの腐食評価手順の①と②を模式的に示したものである。現状のオーバーパックの腐食評価を A、同様の考え方を PEM 容器の腐食評価に導入する場合、隙間充填材の種類によって B-1／B-2 となる。B のイメージ図では処分坑道のセメント系材料の支保を表現していないが、入力する地下水組成を、セメント系材料を透過した後の平衡水（A における FRHP(cement)に相当）とすることで考慮することができる。

図 3.1.2-4 の A に相当する第 2 次取りまとめ報告書における処分システムの安全評価に用いる緩衝材間隙水組成の設定については、既報の報告に考え方・評価の方法がまとめられている[11]。この手法に表 3.2.3-1 に整理した隙間充填材の仕様を入力することで、PEM 容器の腐食評価に必要な環境条件の一つである隙間充填材の間隙水組成を見積もることができる。

以上のような隙間充填材の間隙水組成の評価では、混合ケイ砂の平衡による間隙水組成に及ぼす影響は、他の要素による間隙水組成の変動に比べると無視できるものとしている。掘削ズリを 50%配合したベントナイト混合土は、ズリに含まれる鉱物の平衡を考慮することで、隙間充填材の間隙水組成をより精緻に評価できると考えられる。

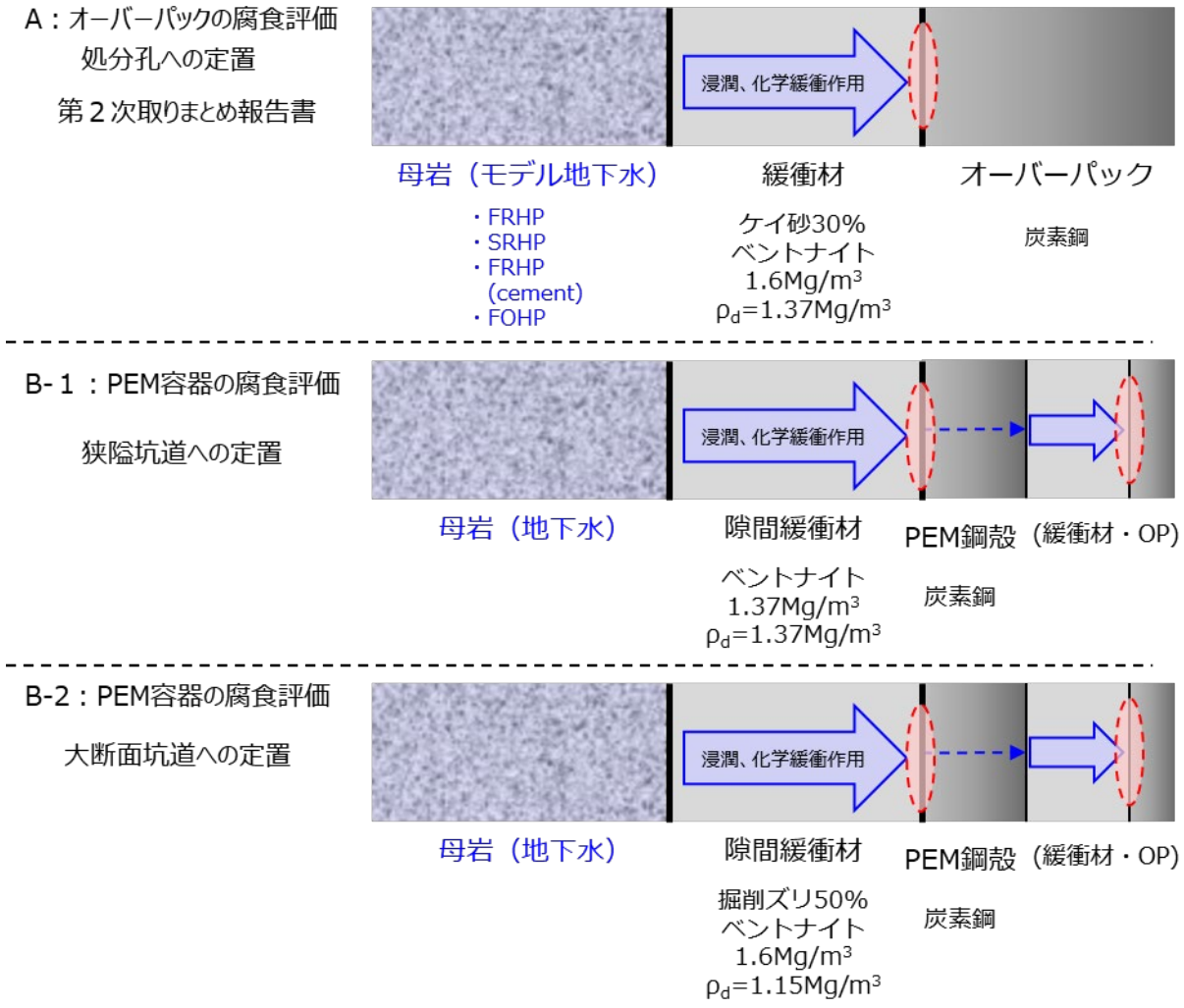


図 3.2.3-4　炭素鋼の腐食挙動評価における、間隙水の化学組成の検討イメージ

3)　大気腐食評価のための PEM 表面の濡れ状態

大気腐食では酸化剤である酸素の供給が無限に存在するため、物質収支による腐食量の推定は不可能である。乾燥空気中の鉄の酸化反応は穏やかであることから、PEM 容器の腐食では容器表面の水の存在状態の把握が重要となる。一般な大気腐食では、日向と日陰の温度差、日中の気温の上下動、飛来塩などによる吸湿、降雨による表面付着物の洗い流し効果などが複雑に関連している。これらの現象は金属表面の乾湿繰返しや、電池を形成する水膜の形成などに関与しており、大気腐食において重要な因子である。一方、処分坑道内に定置された PEM の場合は坑内の温度変動は換気に依存していること、太陽の影響を受けないことなどから、地上での大気腐食と比較してメカニズムは単純であると考えられる。ここでは、処分坑道内に定置した PEM の腐食について、結露について検討した。なお、ここでの検討では、PEM 容器は無塗装、潮解性を示す塩類の付着はないことを前提に置く。

PEM 容器の結露の発生の有無は、容器外表面の温度と坑道内空気の温度と湿度の関係で決まる。PEM 容器外表面の温度が坑道内温度よりも低い場合、湿度によっては結露が発生する。一方で外表面温度が坑道内温度よりも高い場合、結露は発生しない。このような結露発生の判断は、操業期間中の安全性への影響の技術検討項目の一つである「開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響」で整備する定量化手法による、坑道内の構成要素の温度分布から行うことができると考えられる。

坑道への湧水が PEM にかかる場合、飛沫環境、水膜環境での腐食となる。水膜は酸素の拡散障壁にならないため、このような部位は、気相（酸素）、液相、固相（金属）の三相が揃うまた、ガラス固化体からの発熱により地下水が蒸発することで、PEM 容器表面に塩濃縮が生じることも懸念される。このような環境は炭素鋼にとっては厳しい腐食環境となる。一方で、坑道内への地下水の湧出の程度、PEM への滴水の状況などを定量的に扱うには困難であるため、ここでは、生じる可能性を示すに留める。今後、操業時の坑道からの湧水の扱いの考え方などと整合を取りつつ、回収可能性の維持に伴う一つの事象として検討を進める必要がある。

4)　回収可能性の維持に伴う影響

状態オプション１～３で回収可能性を維持する場合、前述のような廃棄体容器に接する環境の変化の他に、埋戻されていない坑道からの地下環境への酸素の供給、作業環境確保のため坑道からの排水の継続が、影響を与える要因として挙げられる。

開放坑道からの空気の継続的な供給は、現状のオーバーパックの腐食評価におけるマスバランスでの腐食量の算出が困難になることの他に、本来酸素が極めて少ない地下環境を酸化性にする影響が考えられる。これは単純に溶存酸素量が増える以外に、還元性雰囲気で安定であった岩盤中の鉱物が酸化され、地下水組成を変化させる影響が考えられる。

坑内への湧水の排出による影響として、地下本来の水の流れが変化し、遠方の化学組成の異なる水を処分場に引き込むことが懸念される。

回収可能性の維持による影響を纏めると、廃棄体容器が接触する対象の変化、開放坑道からの空気の供給、排水による地下水組成の変化、及びそれらの時間変化が挙げられる。これらによって図 3.2.3-1 の現状の腐食シナリオ上に影響が生じるか否かがポイントである。

(3)　定量化における影響事象考え方

処分坑道横置き・PEM 方式の状態オプション 1 を除いて、廃棄体容器はベントナイト系材料が接触した状態である。そのため、(2)4)にまとめた周辺環境の変化が直接的に廃棄体容器の腐食には影響を与えない。回収可能性の維持に伴う周辺環境の変化の取扱を以下の様に整理した。

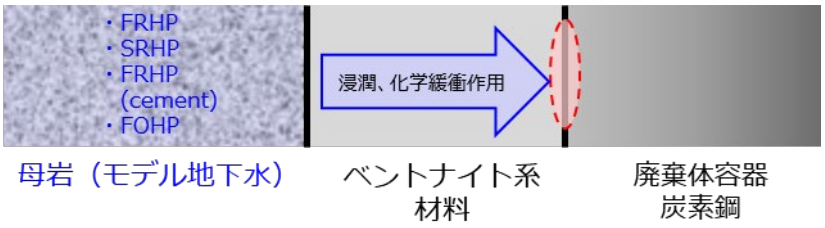


図 3.2.3-5　ベントナイト系材料の化学的緩衝作用

1)　地下水の化学組成の変化

開放坑道から供給される空気による系の酸化や、排水に伴う遠方の組成の異なる地下水の引き込みで母岩から湧出する地下水の組成が変化する場合である。

酸素による母岩の鉱物反応による地下水組成の変化は、母岩の鉱物組成や、地下水組成などを考慮した地球科学反応を扱うことができる解析コードによる数値解析的手法で反応後の地下水組成を見積もる。遠方の地下水の引き込みは地下水流動解析により、排水による地下水流動場の変化から、回収可能性の維持期間の長さによる地下水の引き込みの程度を評価する。何れの方法で母岩から湧出する地下水の組成を算出した後、現在のオーバーパックの腐食評価で用いているモデル地下水の組成と比較する。地下水組成がモデル地下水の組成の範囲であれば、現状のオーバーパックの腐食シナリオや腐食データを基に、維持期間中の腐食挙動を評価することができる。

2)　間隙水組成の変化

1)でモデル地下水の組成から外れた場合や PEM 容器の腐食評価では、ベントナイトの化学的緩衝作用を考慮した間隙水組成で評価する。ベントナイトと地下水の化学平衡を扱うことができる解析コードを用いて、表 3.2.3-1 に整理した対象とする廃棄体容器・隙間充填材に応じた化学平衡計算で間隙水組成を算出する。間隙水組成がオーバーパックの腐食評価における緩衝材間隙水組成の範囲であれば、現状のオーバーパックの腐食シナリオや腐食データを基に、維持期間中の腐食挙動を評価することができる。

算出した間隙水組成が緩衝材の間隙水組成の範囲から外れる場合、外れた化学種が炭素鋼の腐食に及ぼす影響を評価する。手法としては既往の腐食事例の調査に基づく腐食現象の抽出、詳細な腐食挙動評価報告があるものは、その結果に基づいて腐食評価を行う。事例報告が十分ではないものについては、室内試験等で腐食データを拡充する。

3)　開放坑道からの空気の影響

開放坑道から酸素が無限に供給されるため、現状のオーバーパックの腐食挙動評価のように、

処分場に持ち込まれた酸素の総量からオーバーパックの腐食量を計算で求めることができない。しかしながら、処分坑道横置き・PEM 方式状態オプション１を除いて、ベントナイト系材料が表面を覆っていることから、酸素の供給を阻害する障壁としての機能が期待できる。

処分孔竪置き方式の状態オプション１に近い条件での、炭素鋼製オーバーパックを対象とした工学規模の腐食試験が日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターで実施された [6]。この試験では、試験坑道底部に掘削した模擬処分孔（裸孔）に、円柱状の模擬オーバーパックと厚さ 95mm の緩衝材ブロックから成る人工バリアを定置し、坑壁からの自然湧水で長期間の浸漬試験を行った。処分坑道は埋め戻さず開放状態であったが、試験期間中の平均腐食速度は約 8.8μm/y であった。また浸漬後の模擬オーバーパック表面に顕著な不均一腐食は認められなかった。試験環境を管理した室内試験でより精緻なデータを取得しすることで、開放坑道からの酸素の供給の影響をより正確に算出できるようになると考えられる。

以上のように、回収可能性の維持に伴う影響のうち開放坑道からの空気の供給と排水よる遠方地下水の引き込みについては、現状のオーバーパックの腐食評価手法を基本として、数値解析と実験により回収可能性の維持期間における腐食挙動を定量化できると考えられる。

3.2.4　緩衝材の浸潤

緩衝材の浸潤は、オーバーパックの腐食評価や、PEM のハンドリング性に係わる事象として整理した。

(1)　オーバーパックの腐食への影響

緩衝材の初期含水比は緩衝材の製作・施工技術と関連があり、ブロック方式の場合約 10%である。オーバーパックは初期含水比の水分を有する緩衝材に囲まれた状態であるため、緩衝材が飽和膨潤してオーバーパックに接触するまでは湿潤大気環境下での腐食となる。しかしながら定置時のオーバーパックと緩衝材の隙間に含まれる空気の量は見積が可能であること、定置直後から腐食現象が開始されたと仮定する方が保守的な評価になることから、現状のオーバーパックの腐食評価では、緩衝材の浸潤による腐食開始時期の遅延は考慮されていない。よって、回収可能性の維持に伴う影響の定量化においても、廃棄体容器の腐食評価に対しては、緩衝材や隙間充填材の浸潤挙動は考慮しない。

(2)　PEM のハンドリング性への影響

現状の PEM 容器には水密性の確保が割り当てられていないため、定置期間後の PEM 容器内への地下水の浸潤によって、PEM の総重量や重心が変化すること、PEM 内側からの膨潤圧による PEM 構造の喪失が懸念される。総重量については、内部の緩衝材が飽和した場合の重量を計算し回収装置の設計に反映することが可能であるが、飽和の不均一性ついては、PEM 容器への地下水の接触状況、PEM 容器内への地下水の浸入などを一意に決めることが出来ない。また、PEM 容器の外観からは内部の浸潤状況を判断することが出来ない。PEM のハンドリングに対する安全性確保のためには、PEM 容器の設計、緩衝材の浸潤挙動などの課題として抽出、整理しておく。

3.2.5　回収時の廃棄体容器の健全性の評価手法のまとめ

(1)　腐食評価に基づく定量化手法の構築

回収時の廃棄体の健全性として「閉じ込め性」「遮蔽性」「ハンドリング性」を設定し、廃棄体容器についてオーバーパックの腐食評価に基づき、回収可能性の維持期間中の腐食量を定量化する方法を検討した。検討に基づいて構築した処分孔竪置き方式の状態オプション１におけるオーバーパックの腐食量の定量化方法の例を図 3.2.5-1 に示す。

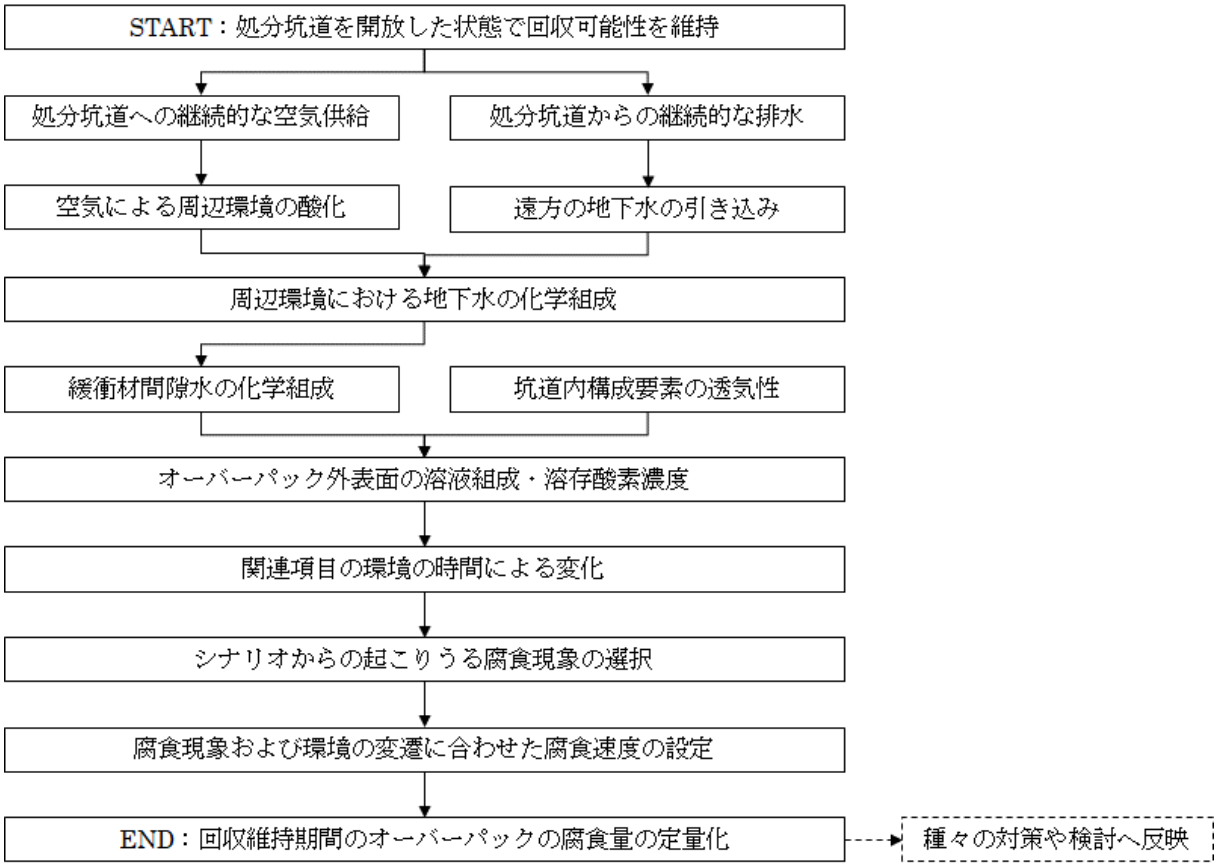


図 3.2.5-1　処分孔竪置き方式のオーバーパックの腐食挙動の定量化方法

この手法で定量化した腐食量を図 3.2.2-4 や図 3.2.2-5 に示した廃棄体容器の健全性と因子の関係に入力することで、回収時の廃棄体容器の健全性を定量化することができる。他の定置概念状態オプションに対しても同様に腐食量を定量化することで、廃棄体容器の健全性を定量化することができると考える。

(2)　定量化手法を構成する個別要素技術

今回構築した定量化手法は、実験データに基づく外挿による評価、酸素による周辺環境の変化を求める地球化学的数値解析、排水による遠方の地下水の引き込みを求める地下水流動解析などの個別要素技術で構成されている。それぞれの個別要素技術は、図 3.2.5-1 に例示した定量化のフローにおける役割や目的に合わせて適切に選択すること、技術整備を行うことが定量化した結果の信頼性に対して重要である。

(3)　他の定量化項目との関連

本節で取り扱った「回収時の廃棄体容器の健全性」は、他の定量化項目と関連性がある。

・　廃棄体からの熱影響

操業期間中の安全性への影響の定量化項目である廃棄体からの熱影響で定量化する、ガラス固化体からの発熱による処分システムの温度分布は、個々の事象の検討における温度条件として取り込むことができる。

・　地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度

閉鎖後長期の安全性への影響の定量化項目である排水による遠方の地下水の引き込みの影響は、3.2.3(3)1)や 3.2.3(3)2)で扱う廃棄体容器周囲の地下水組成として取り込むことが出来る。

・　空気の影響

閉鎖後長期の安全性への影響の定量化項目である開放坑道からの空気供給による化学場の変化の影響は、3.2.3(3)1)や 3.2.3(3)2)で扱う廃棄体容器周囲の地下水組成として取り込むことが出来る。

・　閉鎖後長期の安全性への影響

本項目にて定量化した回収可能性の維持に伴う廃棄体容器の腐食量評価の結果は、新たに追加で設けられる可能性のある回収可能性の維持期間後の廃棄体容器の状態を表す。これは閉鎖後長期の安全性のうち、人工バリア等の機能劣化等の影響の定量化における初期条件として扱うことができる。

3.3　回収可能性の維持に伴う影響の定量化手法の整備まとめ

可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会（「以下「検討会」という」にて具体化した回収可能性の維持に伴う影響の定量化項目について、定量化手法の整備を実施した。

・　検討会にて項目の内容として例示されたものを検討の出発点とし、建設⇒操業⇒閉鎖と進展する「基本の操業」をベースとし、閉鎖後長期の安全性との整合を保ちつつ、定量化手法の整備を進める基本的な方針を示した。

・　「回収時の廃棄体容器の健全性」について先行的に定量化手法の検討を行った。廃棄体容器の健全性の定義、および健全性の具体的な検討から主たる個別の定量化項目として地層処分環境における金属材料の腐食を抽出した。現行のオーバーパックの腐食評価を基本として、回収可能性の維持に伴う影響を扱う方法を検討するとともに、数値解析的手法と実験といった個別要素技術の役割を整理した。さらに、他の定量化の検討項目の関連も整理した。

・　今後は、他の定量化項目についても同様に整備を進めるとともに、閉鎖後長期の安全性の評価における地層処分システムの時間的・空間的遷移と連携を取りつつ、手法の整備を進める必要がある。

・　定量化において、実際の条件下で生じる現象についての理解、ならびに実験によるデータの拡充も重要な内容である。定量化手法の整備とともに、定量化の不確実性低減にむけた取り組みも合わせて実施する必要がある。

第３章　参考文献

[1] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成２９年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書（別冊，2018.

[2] 原子力発電環境整備機構：包括的技術報告，わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－（レビュー版）【本編・付属書】、NUMO-TR-18-03，2018.

[3] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 26 年度地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）平成 23 年度～平成 26 年度　総括報告書，2016.

[4] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム工学要素技術高度化開発　報告書，2015.

[5] 核燃料サイクル開発機構、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性–地層処分研究開発第 2 次取りまとめ–分冊 2 地層処分の工学技術、JNC-TN1400-99-022，1999.

[6] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業_処分システム工学確証技術開発とりまとめ報告書，2018.

[7] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 18 年度地層処分技術調査等　遠隔操作技術高度化調査　報告書(2/2)，2007.

[8] 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事業高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 1 分冊）－遠隔操作技術高度化開発－，2012.

[9] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム工学要素技術高度化開発　報告書，2015.

[10] 核燃料サイクル開発機構、Groundwater Evolution Modeling for the Second Progress Performance Assessment (PA) Report、JNC-TN8400-99-030，1999.

[11] 核燃料サイクル開発機構、地層処分研究開発第２次取りまとめにおける緩衝材間隙水化学の評価、JNC-TN8400-99-078，1999.

第4章　回収の容易性向上の検討

4.1　目的と方針

4.1.1　検討の目的

本検討は、第１章に示した技術的アプローチのうち、「②－２：回収の容易性を設計に考慮（回収作業時間の観点）」に対応するものである。具体的には、表 4.1.1-1　に整理した回収の容易性を設計に考慮する際の多様な方法の例のうち、別途、回収可能性の維持に伴う影響の定量化手法の検討などで既に考慮されている「坑道の埋戻し状態の工夫」を除いた他の観点から、回収容易性を高めた代替設計オプションの検討を行う。

本検討においては、まずは回収の容易性向上に着目した代替設計オプションの検討を行うが、将来的には処分場の反復的な設計開発プロセスによるシステム全体としての最適化や、NUMO が整理している設計因子などを考慮した検討などとの整合性に留意して進める。

表 4.1.1-1　回収の容易性を設計に考慮する際の多様な方法の例[1]

設計への考慮の考え方	設計への考慮の方法の例（操業手順の設定等を含む）
①回収可能性の維持期間内において、廃棄体へのアクセスを容易にしておく	○回収の容易性を坑道の埋め戻し状態を工夫することで考慮する（廃棄体を完全に埋め戻さない設計など） ○操業手順を工夫する
②回収可能性の維持期間内において、可能性のある将来の回収作業が容易となるようにしておく	○回収時に解体・破壊しやすい地下構造物を導入する（材料選定の工夫など） ○回収の容易性を念頭に置いたレイアウトや坑道寸法設計、定置方法を工夫する、など

4.1.2　検討の方針

本検討は以下の方針に沿って行う。

○段階的な検討の最初のステップとして、まずは「回収の容易性の向上」に着目して代替設計オプションを検討の対象とする。

本事業では、容易性向上の観点から有益なオプションの抽出を試みる。抽出されたオプションは、今後、包括的な観点から地層処分システムとしての実現性や将来の事業者による設計の最適化といった観点から精査が進められる。

○回収の容易性の指標として、回収の「作業時間」を設定する。

R&R 検討会でも示唆されたように、回収の容易性を示すものとして、廃棄体へのアクセス性、回収作業の技術的な複雑さ、それに要する時間や費用など、幾つかの次元の異なる指標が想定される。ここでは回収の容易性を示す指標の１つとして、現時点で技術的に定量化が可能である「回収作業時間」を設定する。

なお、候補サイトや処分場の全体設計（特に坑道展開など）が具体化されていない現段階に留意して、当面の検討では処分坑道及び人工バリアを検討対象として（アクセス、連

絡、主要坑道を除外した力学プラグ以遠が検討対象)、廃棄体へのアクセス性、回収作業の技術的な容易さといった観点から検討を進める。

○回収の容易性向上に係る検討の前提として「全量回収」を優先的な条件とする。

特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（平成 27 年 5 月 22 日改定）の改定[3]によって導入された可逆性・回収可能性は、将来世代が最良の処分方法を選択できるようにすることとされている。つまり、地層処分以外の代替管理方策への転換の可能性が示唆されており、そのような場面では全量回収が必要となる。

本事業では、まずは「全量回収」を念頭に、回収の容易性向上に係る検討を進める。

○追跡性に留意する。

国際的な共通理解として、回収の実現性に関する議論が回収の容易性に関する議論へと帰結する可能性が R&R 検討会でも示唆されている。事業の進展における関係者との多様な議論に資することに留意して、本検討における容易性を高めた代替設計オプションの抽出までの検討プロセスを丁寧に記録に残し、その追跡性を確保する。

4.1.3　検討の進め方と検討項目

前項で示した検討方針を踏まえ、より回収の容易性を高めた処分場の設計開発に向けて、回収の容易性を高める方策を組み込んだ代替設計オプションを構築する方法論を構築する。方法論に基づき抽出・例示される代替設計オプション案については、ジェネリックな現段階において実施可能な範囲でその実現性に関する確認や検討行い、更なる実現性の確証や信頼性の向上に向けた今後の展開（更なる検討の進め方）に関する考察を進める。

このような検討の考え方を踏まえ、以下の手順で回収の容易性を高めた代替設計オプションの検討を進める。

(1)　回収の容易性を高めた代替設計オプションを開発するためのポイントの整理
(2)　回収の容易性向上を図る方策の検討と整理
(3)　方策の選択と組合せによる代替設計オプションの構築
(4)　代替設計オプションの実現性の検討および今後の展開

4.2　本年度までの検討の成果

本年度までの検討で得られた成果は、大きく次の２点に要約できる。

①回収作業時間の観点から回収の容易性を高める方策を組み込んだ代替設計オプションを構築する方法を整備し、この方法に基づき検討した代替設計オプションの具体例を示した。

②事業者（NUMO）の処分場の設計手順に基づく設計照査手法に沿った代替設計オプションの実現性に係る検討方針や手順を整理した。本年度までに抽出した代替設計オプション案に対して、比較的サイトの地質環境特性への依存性が低いと考えられる廃棄体からの熱影響についての先行的な検討を行い、今後の検討の展開方法を示した。

前者①については、後述の 4.2.1～4.2.3 に、②については 4.2.4 に、それぞれの成果を要約整理する。詳細については年度報告書の第８章を参照されたい。

4.2.1　回収の容易性を高めた代替設計オプションを開発するためのポイントの整理

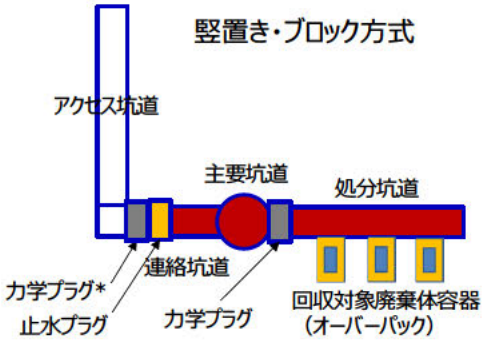
より回収の容易性を高めた代替設計オプションの抽出・具体化に向けて、回収の容易性向上の視点とポイントを整理した。整理に向けて、まずは、わが国で有望とされている二つの処分概念を対象に、回収を実施する際の作業工程を想定し、回収時間の短縮に資する工夫のポイントを抽出した。これらを“回収の容易性を高める”ための方策の検討へと展開するために、二つの概念に固有とならないように一般化を試みつつ、回収の容易性向上の視点とポイントとして整理した。

(1)　回収作業の具体化による回収の容易性向上のための工夫ポイントの抽出と整理

NUMO の包括的技術報告書[2]に示された処分概念（竪置き・ブロック方式および横置き・PEM 方式）を対象として、回収作業の工程を具体的し（想定し）、回収の容易性向上のための工夫のポイントを抽出した。

回収実行時の処分場の状態として、「アクセス坑道のみを開放状態、他の坑道は埋め戻されている状態」を仮定して、この状態から廃棄体容器（オーバーパック）を回収するまでの作業工程を検討し、三つの大工程と七つの中工程に分類整理した。図 4.2.1-1 は竪置き・ブロック方式を対象とした整理の例である。

上記の中工程をさらに小工程に分割し、それぞれの作業の時間短縮を図る上での留意点と課題を検討することで、回収の容易性を向上させる工夫のポイントを抽出した。一例として、竪置き・ブロック方式の“中工程 B-1：力学プラグの撤去”における小工程への分割と、それぞれの作業の時間短縮に向けた留意点・課題および工夫のポイントを図 4.2.1-2 に示す。



【オーバーパック回収までに撤去する対象】
- ✓ 力学プラグ（鉄筋コンクリート）
- ✓ 止水プラグ（ベントナイトブロック）
- ✓ 連絡坑道、主要坑道の埋め戻し材（掘削土85%＋ベントナイト15%）
- ✓ 処分坑道の力学プラグ（鉄筋コンクリート）
- ✓ 処分坑道の埋め戻し材（掘削土85%＋ベントナイト15%）

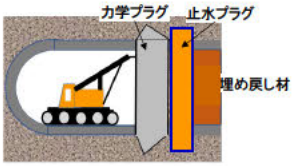
大工程	中工程
1. 連絡坑道・主要坑道の開放	B-1：力学プラグ撤去
	B-2：止水プラグ撤去
	B-3：連絡坑道・主要坑道の埋め戻し材撤去、坑道安定性確保、設備復旧
2. 処分坑道の開放	B-4：力学プラグ撤去
	B-5：処分坑道の埋め戻し材撤去、坑道安定性確保、設備復旧
3. 廃棄体容器の回収	B-6：オーバーパックの縁切り
	B-7：オーバーパックの回収・搬出

*力学プラグの設置位置：NUMOの技術報告書では、アクセス坑道と連絡坑道の境界には止水プラグのみを設置することになっているが、本検討では、アクセス坑道を長期に開放状態に置く場合を想定し、止水プラグの安定性を図るためにアクセス坑道側にコンクリート製の力学プラグを設置することとする。

図 4.2.1-1　竪置き・ブロック方式における処分場の状態と回収作業の大工程と中工程

B-1：力学プラグ撤去

【小工程】
B-1-1：力学プラグの状態確認
B-1-2：撤去機材の搬入・定置
B-1-3：鉄筋コンクリートの撤去・搬出
B-1-4：坑道周辺岩盤の安定化
B-1-5：透水層・フィルター材の撤去



小工程	作業上の留意点・課題	工夫のポイント
B-1-1:力学プラグの状態確認	・力学プラグの変形・ひび割れ等の構造的変質等の確認 ・背面の状況確認	・状況確認の作業量削減、速度向上、精度向上
B-1-2:撤去用機材の搬入・定置	・狭い空間での作業に適した機材の選定と撤去材の搬出ルートの確保	・狭い空間での可動性の向上
B-1-3:鉄筋コンクリートの撤去・搬出	・高強度の鉄筋コンクリートの効率的かつ安全な撤去	・力学プラグの撤去・搬出の作業量削減と速度向上
B-1-4:坑道周辺岩盤の安定化	・狭い空間での坑道周辺岩盤の安定性確保	・坑道安定性確保の作業量削減と速度向上
B-1-5:透水層・フィルター材の撤去	・狭い空間での透水層・フィルター材の撤去・搬出	・透水層等の撤去の作業量削減と速度向上

図 4.2.1-2　中工程 B-1：力学プラグの撤去における小工程ごとの時間短縮に向けた作業上の留意点・課題および工夫のポイント

(2)　容易性向上のポイントの整理

二つの処分概念を念頭に上記(1)で抽出した工夫のポイント等を、概念に固有とならないように一般化して、回収の容易性向上のポイントとして整理・統合した。

集約にあたっては、R&R 検討会で示した回収の容易性を設計に考慮する考え方に基づき、回収の容易性として何を高めるか、また何を変えることでその容易性が高まるのか等の検討を行い、回収の容易性向上を考えるうえでの視点の整理を行った。

回収の容易性は R&R 検討会の議論[1]で回収作業時間を視点に置くこととしたが、地下施設展開や坑道設計等が確定しない段階では全ての廃棄体の回収に要する時間を定量的に示すことはできないため、回収時間を他の視点に置き換える必要がある。R&R 検討会ではその点に留意して、回収作業時間の短縮に資する設計への考慮の考え方について、次のように例示している。

①回収可能性の維持期間内において廃棄体へのアクセスを容易にしておく

②回収可能性の維持期間内において可能性のある将来の回収作業が容易となるようにしておく

ここでは、①を“アクセス性”、②を“ハンドリング性“として、回収の容易性向上の視点を整理した。また、二つの視点に関して、(1)で整理した工夫のポイントを踏まえて、回収作業の手数が少なくなる、あるいは回収に伴う何らかの作業自体が無くなれば容易性は高まるという考え方に基づき、容易性向上のポイントを表 4.2.1-1 のように整理した。

他方、表 4.2.1-2 は、二つの処分概念を前提に回収作業工程を細分化した小工程から抽出された工夫のポイントの整理結果である（同表は竪置き・ブロック方式の整理の例）。これらの整理から、ある一つの作業を向上させるための工夫のポイントが、他の作業にも展開できる可能性があることがわかる。

表 4.2.1-1　回収の容易性向上の視点と容易性向上のポイント

回収の容易性向上の視点		容易性向上のポイント
廃棄体までのアクセス性向上	廃棄体までのアクセス経路を確保するための作業量の少なさ	1. プラグ、埋め戻し材、充填材、緩衝材の撤去作業量を削減
		2. 坑道や処分孔の安定性を確保するための作業量を削減
廃棄体のハンドリング性向上	物量	3. 一回の回収作業における回収物量の増加と作業数の低減
	重量と形状	4. 回収対象物の軽量化・形状の単純化
	健全性	5. 回収対象物の健全性を確保
	動線	6. 回収時の動作と動線の単純化
	環境	7. 作業性を高めるための空間を確保

表 4.2.1-2　竪置き・ブロック方式の小工程から抽出された工夫のポイントに対応する容易性向上のポイントの整理

中工程	小工程から抽出された工夫のポイント	容易性向上のポイント
B-1：力学プラグ撤去	・状況確認の作業量削減、速度向上、精度向上	1
	・狭い空間での可動性の向上	1
	・力学プラグの撤去・搬出の作業量削減と速度向上	1
	・坑道安定性確保の作業量削減と速度向上	2
	・透水層等の撤去の作業量削減と速度向上	1
B-2：止水プラグ撤去	・狭い空間での可動性の向上	1
	・止水プラグの撤去・搬出の作業量削減と速度向上	1
	・坑道安定性確保の作業量削減と速度向上	2
	・埋め戻し材表面の安定性確保の作業量削減と速度向上	2
B-3：連絡坑道・主要坑道の埋め戻し材撤去、坑道安定性確保、設備復旧	・狭い空間での可動性の向上	1
	・埋め戻し材撤去・搬出の作業量削減と速度向上	1
	・状況調査の作業量削減と速度向上	2
	・支保工の補修・補強・更新作業の作業量削減と速度向上	2
	・換気・排水設備復旧の作業量削減と速度向上	2
B-4：力学プラグ撤去	・状況確認の作業量削減、速度向上、精度向上	1
	・狭い空間での可動性の向上	1
	・力学プラグの撤去・搬出の作業量削減と速度向上	1
	・坑道安定性確保の作業量削減と速度向上	2
	・透水層等の撤去の作業量削減と速度向上	1
	・埋め戻し材の表面安定性確保の作業量削減と速度向上	2
B-5：処分坑道の埋め戻し材撤去、坑道安定性確保、設備復旧	・狭い空間での可動性の向上	1
	・埋め戻し材撤去・搬出の作業量削減と速度向上	1
	・状況調査の作業量削減と速度向上	2
	・支保工の補修・補強・更新作業の作業量削減と速度向上	2
	・換気・排水設備復旧の作業量削減と速度向上	2
B-6：オーバーパック周辺の緩衝材撤去	・状態確認の作業量削減と速度向上、処分孔上部の補強	1，2
	・遠隔操作での作業量削減と速度向上	1
	・上部埋戻し材撤去・搬出の作業量削減と速度向上	1，3，4
	・縁切りの作業量削減と速度向上	1
B-7：オーバーパックの回収・搬出	・機材設置作業の速度・精度の向上	7
	・回収作業（動線）の単純化	6
	・回収の作業量削減と速度向上	3，4，5，6，7
	・収納作業（動線）の単純化	6
	・収納の作業量削減と速度向上	3，4，5，6，7
	・搬出ルートの確保	6，7
	・搬出の作業量削減と速度向上	3，4，6，7

4.2.2　回収の容易性向上を図る方策の検討と整理

前記のとおり、具体的な工学的方策および手段を検討したうえで、容易性向上のポイントを展開・整理した。このようなポイントの整理を踏まえて代替設計オプション（工学的方策を含む）へと具体化するためには、個々のポイントや対策の相互関係を、「独立」、「相反」、「共存」、「融合」、「相乗」の観点から分類・整理することが望ましく、視認性にも留意して、これらの関係をマトリクス形式で整理した。なお、ここでの代替設計オプションの構築に向けた検討では、新たな構成要素も含まれることとなる（定義が必要）。また、NUMO が示す現時点で有望な二つの処分概念（設計）で定義されている処分坑道や処分孔との差別化にも留意して、ここでは、一部の構成要素を次のように定義する。

○廃棄体を定置する坑道や孔を合わせて“定置坑道”

○定置坑道につながる坑道を“作業坑道”

(1)　容易性向上のポイントに対応する工学的な方策と具体的な手段への展開

4.2.1 で取りまとめた回収の容易性向上の視点と 7 項目の容易性向上のポイントを出発点として、その実現方法、工学的な方策および具体的な手段への展開を行った。ここではその一例として、“容易性向上のポイント 1. プラグ、埋め戻し材、充填材、緩衝材の撤去作業量を削減”から展開した工学的な方策と手段に関する検討結果を図 4.2.2-1 に示す。

回収の容易性向上を高める方策を検討する過程では、回収の容易性を設計に考慮する方策だけでなく、図中で色付けした回収技術・装置の高度化を行う方策や回収可能性維持期間中の埋め戻し状態の工夫といった方策も導出される。ここではそれらの方策を、一旦取りこぼしなく抽出するが、第１章で述べたように、ここでの検討は、技術的アプローチ②－２（回収の容易性を設計に考慮）であるため、色付けした項目については、ここでの検討の対象外とする。

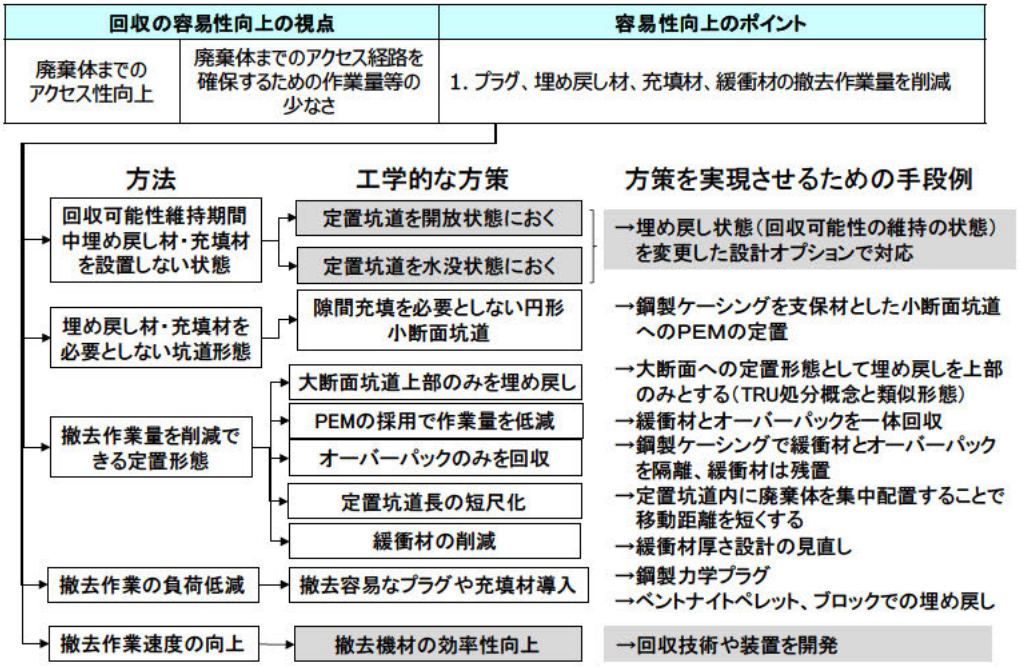


図 4.2.2-1　“容易性向上のポイント 1. プラグ、埋め戻し材、充填材、緩衝材の撤去作業量を削減”から展開した工学的方策および手段の例

(2)　工学的方策の組合せに関する整理

上述したように、回収の容易性を向上に寄与する複数の工学的方策が抽出されている。これらの方策を組み合わせることで、より効果的な代替設計オプションへと具体化することができる。そのような観点から、工学的方策の“組合せ”に関する分析を行い、整理を進めた。まずは、前項で挙げた工学的方策を整理して、それぞれの特徴を考慮しつつ、個々の方策を組合せるときの相互の関係性を「独立」、「相反」、「共存」、「融合」、「相乗」の五つに分類して整理した。

まずは、前項で抽出した工学的な方策について、重複などの整理・集約を行いつつ図 4.2.2-2 のように整理した。同図に示すように、七つの容易性向上のポイントから展開した工学的方策は A～U までの 21 の方策に集約して整理することができる。集約した個々の方策には、互いにトレードオフの関係にあるものも含まれる。

視点	容易性向上のポイント	工学的方策	項目
廃棄体までのアクセス性	1. プラグ、埋め戻し材、充填材、緩衝材の撤去作業量を削減	➢ 隙間充填を必要としない円形小断面坑道 ➢ 大断面坑道上部のみを埋め戻し ➢ PEMの採用で作業量を削減 ➢ OPのみを回収 ➢ 定置坑道長の短尺化 ➢ 緩衝材の削減 ➢ 撤去容易なプラグや充填材導入	A B C D E L F
	2. 坑道や処分孔の安定性を確保するための作業量を削減	➢ 高耐久性支保工等の適用 ➢ 円形小断面の坑道 ➢ 定置坑道断面を拡大 ➢ 定置坑道長の短尺化 ➢ アタッチメントタイプの支保材導入	G A B E H
廃棄体のハンドリング性	3. 一回の回収作業における回収物量の増加と作業数の低減	➢ 複数の廃棄体を格納する容器で回収 ➢ 緩衝材とOPを一体で回収 ➢ 緩衝材とOPを分離しOPのみを回収 ➢ 小断面の坑道に複数の廃棄体を定置	I C D J
	4. 回収対象物の軽量化・形状の単純化	➢ オーバーパックの軽量化 ➢ 緩衝材の軽量化 ➢ PEMの軽量化 ➢ 矩形のPEMの採用	K L M N
	5. 回収対象物の健全性を確保	➢ 小断面で充填材を省略 ➢ PEMによる外部環境との遮断 ➢ 止水機能を有する支保工の採用 ➢ 高耐久性支保工等の適用 ➢ 耐腐食性材料の使用 ➢ 容器の厚さを増加	A C O G P Q
	6. 回収時の動作と動線の単純化	➢ 小断面坑道に複数の廃棄体の定置 ➢ 大断面坑道でのPEMの集中定置 ➢ 回収動作が単純な定置方式と装置の採用 ➢ 動作と動線が単純な定置坑道レイアウト	J R S T
	7. 作業性を高める空間を確保	➢ 大断面坑道の採用 ➢ 大断面作業坑道と小断面定置坑道の組合せ	B U

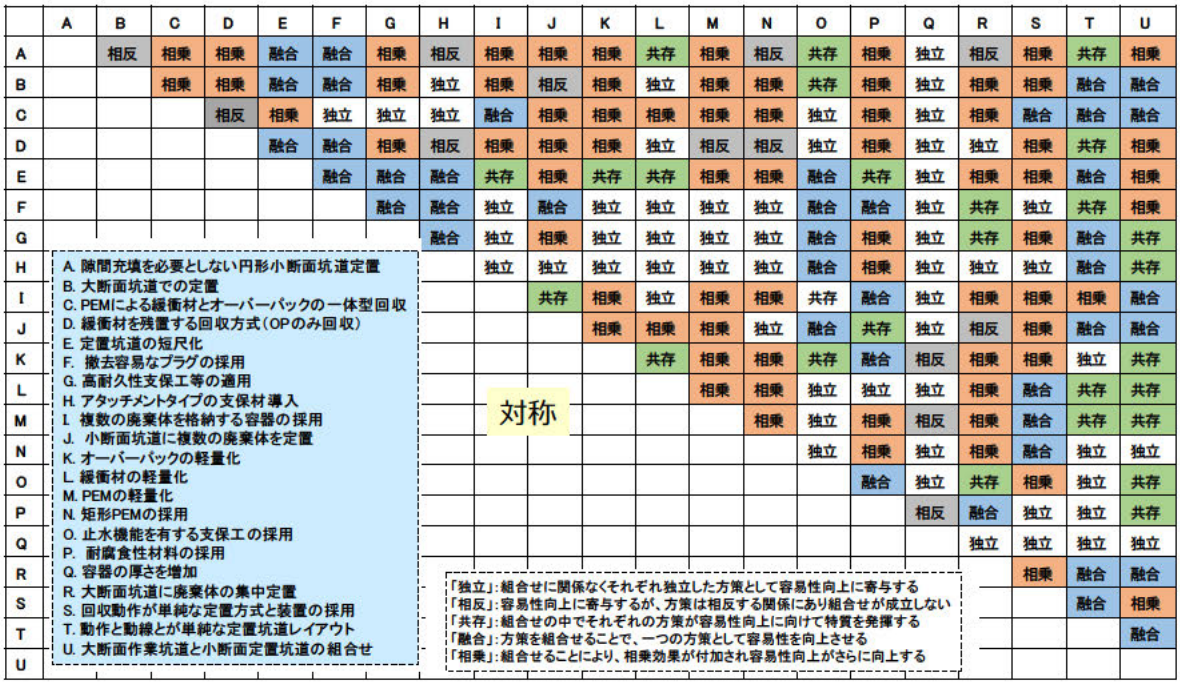
回収の容易性向上の工学的方策の整理

A. 隙間充填を必要としない円形小断面坑道定置
B. 大断面坑道での定置
C. PEMによる緩衝材とオーバーパックの一体型回収
D. 緩衝材を残置する回収方式（OPのみ回収）
E. 定置坑道の短尺化
F. 撤去容易なプラグの採用
G. 高耐久性支保工等の適用
H. アタッチメントタイプの支保材導入
I. 複数の廃棄体を格納する容器の採用
J. 小断面坑道に複数の廃棄体を定置
K. オーバーパックの軽量化
L. 緩衝材の軽量化
M. PEMの軽量化
N. 矩形PEMの採用
O. 止水機能を有する支保工の採用
P. 耐腐食性材料の採用
Q. 容器の厚さを増加
R. 大断面坑道に廃棄体の集中定置
S. 回収動作が単純な定置方式と装置の採用
T. 動作と動線とが単純な定置坑道レイアウト
U. 大断面作業坑道と小断面定置坑道の組合せ

図 4.2.2-2　容易性向上のポイントから展開した工学的方策の集約

上記の整理を踏まえ、A～U までの 21 の工学的な方策の組合せについて、「独立」、「相反」、「共存」、「融合」、「相乗」の相互関係を分析し、それらの関係が視認できるように、図 4.2.2-3 のようにマトリクス形式で整理した。

「独立」：組合せに関係なくそれぞれ独立した方策として容易性向上に寄与する
「相反」：容易性向上に寄与するが、方策は相反する関係にあり組合せが成立しない
「共存」：組合せの中でそれぞれの方策が容易性向上に向けて特質を発揮する
「融合」：方策を組合せることで、一つの方策として容易性を向上させる
「相乗」：組合せることにより、相乗効果が付加され容易性向上がさらに向上する



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
A		相反	相乗	相乗	融合	融合	相乗	相反	相乗	相乗	相乗	共存	相乗	相反	共存	相乗	独立	相反	相乗	共存	相乗
B			相乗	相乗	融合	融合	相乗	独立	相乗	相反	相乗	独立	相乗	相乗	共存	相乗	独立	相乗	相乗	融合	融合
C				相反	相乗	独立	独立	独立	融合	相乗	相乗	相乗	相乗	相乗	独立	相乗	独立	相乗	融合	融合	融合
D					融合	融合	相乗	相反	相乗	相乗	相乗	独立	相反	相反	独立	相乗	独立	独立	相乗	共存	相乗
E						融合	融合	融合	共存	相乗	共存	共存	相乗	相乗	融合	共存	独立	相乗	相乗	融合	相乗
F							融合	融合	独立	融合	独立	独立	独立	独立	融合	融合	独立	共存	独立	共存	相乗
G								融合	独立	相乗	独立	独立	独立	独立	融合	相乗	独立	共存	相乗	融合	共存
H									独立	独立	独立	独立	独立	独立	融合	相乗	独立	独立	独立	融合	共存
I										共存	相乗	独立	相乗	相乗	共存	融合	独立	相乗	相乗	相乗	融合
J											相乗	相乗	相乗	独立	融合	共存	独立	相反	相乗	融合	融合
K												共存	相乗	相乗	共存	融合	相反	相乗	相乗	独立	共存
L													相乗	相乗	独立	独立	独立	相乗	融合	共存	共存
M														相乗	独立	相乗	相反	相乗	融合	共存	共存
N															独立	相乗	独立	相乗	融合	独立	独立
O																融合	独立	共存	相乗	独立	共存
P																	相反	融合	独立	独立	共存
Q																		独立	独立	独立	独立
R																			相乗	融合	融合
S																				融合	相乗
T																					融合
U																					

図 4.2.2-3　回収の容易性を向上させる方策の相互関係の分析結果

4.2.3　工学的方策の選択と組合せによる代替設計オプション案の構築

回収の容易性を向上させる 21 の工学的方策とその相互関係の整理結果に基づく代替設計オプションの構築方法（考え方）について検討した。検討結果に基づき、「相乗」の関係が多いと判断した方策を組合せて、三つの代替設計オプション案を導出するとともに具体的なイメージ例として概念化した。

なお、この段階で導出した代替設計オプション案の具体的なイメージは、あくまでも回収の容易性向上の視点のみから導出したものであることに留意が必要である。今後、必要と考えられる代替設計オプションの実現性の検討については、後述の 4.2.4 で述べる。

(1)　代替設計オプションの構築方法（考え方）

前項で検討した回収の容易性向上の工学的方策の相互関係の整理結果をベースに、「相乗」効果の多くなる方策の組合せを抽出し、定置坑道の形状と大きさ、および廃棄体の形態に係る方策を中心に集約することで、回収の容易性を向上した代替設計オプションを導出する方法を提案した。

(2)　工学的方策の組合せによる代替概念の抽出

回収の容易性向上の工学的方策の組合せ分析結果から、「相乗」効果の多い方策を取りまとめた。(1)で検討した代替設計オプション構築の考え方に従って、A、B、D の 3 種類の方策に更に相乗可能な他の方策を組合せ、以下に示す三つの代替設計オプション案を導出した。ここで、D はオーバーパックのみを回収する概念である。

A：円形小断面坑道 PEM 複数定置概念
B：大断面坑道矩形 PEM 集中定置概念
D：円形坑道横置きブロック定置概念

(3)　代替設計オプション案の具体化

(2)で導出した A、B、D の概念を、それぞれ代替設計オプション A、B、D とし、それぞれの特徴に対応するイメージを図 4.2.3-1 に示すように具体化した。

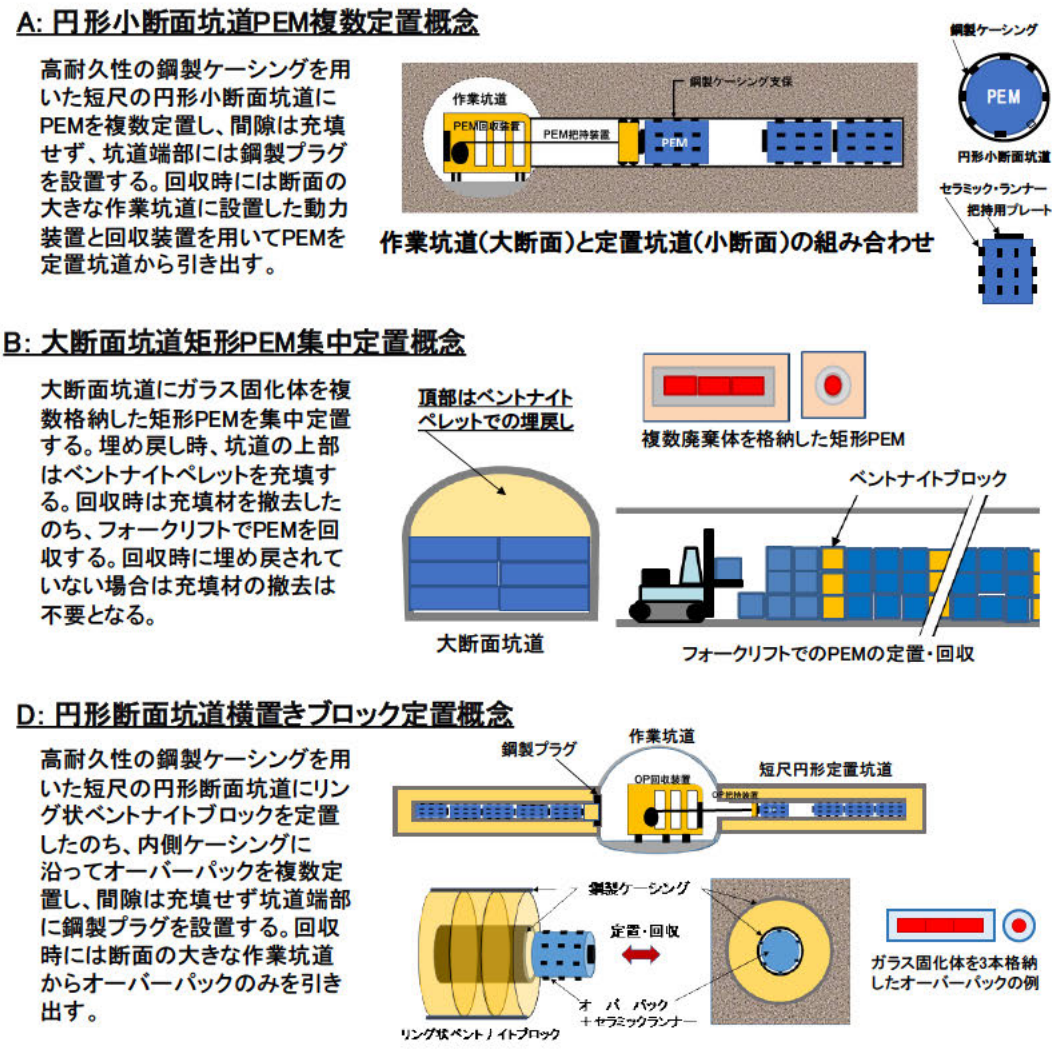


図 4.2.3-1　代替設計オプションの概要と具体的なイメージのまとめ

4.2.4　代替設計オプションの実現性の検討および今後の展開

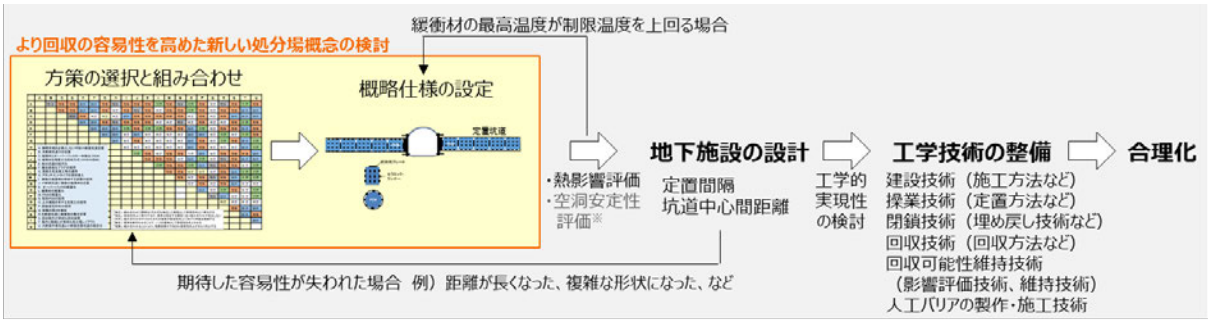
前節で具体化した代替設計オプションは、回収の容易性を向上する観点のみにより検討・抽出したものであり、この段階では例示である。今後、段階的な処分場設計の開発プロセス（設計の詳細化や最適化のプロセス）のなかで整合性を確保しつつ、代替設計オプションとしての実現性や信頼性に関する検討を進める必要がある。

本節では、代替設計オプションに対する実現性に関する検討の進め方（方針）を整理するとともに、その先行的な検討として、4.2.3 で作成した代替設計オプションに対して、サイト依存性が比較的低いと考えられる廃棄体からの熱影響の程度を示し、実現性を得るための課題を整理した。最後に、代替設計オプションの実現性や信頼性を高めていくうえでの、今後の検討や展開方法について考察した。

(1)　代替設計オプションの実現性に関する検討

代替設計オプションの実現性の検討は、事業者（NUMO）が計画する段階的な処分場の設計手順と整合させることを方針とする。すなわち、NUMO が設定している五つの設計因子（閉鎖前の安全性、閉鎖後長期の安全性、回収可能性、工学的成立性、経済的合理性）[2]やその設定において参照している事項などを念頭において検討を進めていくこととする。

なお、サイトや設計が具体化していない現段階に留意して、本検討では地上から地下までの処分場全体レイアウトは検討対象外とし、力学プラグより先の処分坑道（および廃棄体を含む人工バリア）を対象として検討を進める。以上を踏まえ、代替設計オプションの実現性に係る検討手順を図 4.2.4-1 のように提案する。



※空洞安定性の評価は、まずはNUMO包括的技術報告書で示された坑道内径に対する中心間距離を参照する。参照できない場合は評価が必要になる。

図 4.2.4-1　提案する代替設計オプションの整備の過程

図 4.2.4-1 に示すように、代替設計オプションの実現性の検討では、まずは廃棄体の熱影響の評価を行う。廃棄体を定置する処分坑道（定置坑道）の設計では、廃棄体の熱影響だけでなく、空洞安定性の評価により定置坑道（孔）の中心間距離の検討が必要となるが、包括的技術報告書には地質環境モデルに対応した坑道内径に対する中心間距離が示されているため、まずはこれらを出発点として検討を進めていく。次に、廃棄体の熱影響の評価によって実現性が確認された代替設計オプションに対して、例えば坑道中心間距離が長くなることなどにより、期

待した回収の容易性が失われていないかについて確認を行う。ここで、回収の容易性向上が見込めないと評価される代替設計オプションは、回収の容易性向上に寄与する方策の組合せを再考し（代替設計オプションの再構築を行い）、再び廃棄体の熱影響の評価および期待した回収の容易性が見込めるか否かの検討を行う。一方、熱的に実現性が確認された代替設計オプションが、期待した回収の容易性向上が見込めると考えられる場合、地下施設の建設や操業などに関する具体的な工学技術の検討を進め、関連する技術の整備状況や開発の見通しを踏まえて工学的な実現性を確認していく。さらに、処分場の概念について合理化を図っていく展開が考えられるが、本事業では、工学的な実現性の確認までを対象範囲として検討を進めていく。

(2)　廃棄体からの熱影響に対する先行的な検討

前述した方針に沿った代替設計オプションの実現性に関する先行的な取り組みとして、サイト依存性が比較的低いと考えられる廃棄体からの熱影響の程度の検討を行った。熱影響の検討では、代替設計オプションの概略仕様例を設定し、解析的な予測評価によりニアフィールドの温度分布の経時変化を把握し、NUMO の包括的技術報告書[2]で設定されている緩衝材の制限温度との比較を行った。

回収の容易性向上の視点から構築した三種類の代替設計オプションのうち、代替設計オプション B と D の二つの概念を先行検討の対象とした。熱伝導解析の結果、代替設計オプション B と D ともに、緩衝材の最高温度が制限温度 100℃を上回る結果となった。廃棄体の熱影響によるニアフィールドの温度の経時変化は、人工バリアおよび PEM の仕様、坑道や定置構造の仕様、定置間隔や坑道の中心間距離などに依存する。そのため、今後はこれらをパラメータとした設計の詳細化に向けた検討を行うことにより、最高温度と制限温度との比較を行い、熱影響の観点から再度その実現性について検討を行うことが必要となる。

他方、今後、緩衝材に関して、温度の時間履歴と地下水の水質・流動場などの環境条件等を考慮した熱変質に関する検討や熱変質の量を勘案した緩衝材厚さの設計などが進められ、現在設定されている制限温度が緩和されることも想定し得る。そのような場合には、これらを加味して、再度、代替設計オプションの実現性の検討を行うことが望まれる。このような対応を合理的に進めるうえでも、これらの検討過程を記録に残しておくことは有益である。

(3)　代替設計オプションの実現に向けての今後の展開

本検討では、代替設計オプションの実現性についての先行的な取り組みとして、図 4.2.4-1 の熱影響評価に対応する廃棄体の熱影響についての検討を行った。先に述べたように、代替設計オプションの検討は、事業者が計画している段階的な処分場の設計手順と整合した取り組みにより進めていく。今後は、回収の容易性という観点のみでなく、段階的な処分場設計の開発プロセス（設計の詳細化や最適化のプロセス）の中で整合性を確保しつつ検討を進めていく。

第 4 章　参考文献

[1]　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 29 年度資源エネルギー庁委託調査等事業“可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発”事業成果報告書（別冊，資料集），2018.

[2]　原子力発電環境整備機構：包括的技術報告，わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－（レビュー版）【本編・付属書】、NUMO-TR-18-03，2018.

[3]　経済産業省：特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（平成 27 年 5 月 22 日閣議決定），経済産業省ホームページ，
http://www.meti.go.jp/press/2015/05/20150522003/20150522003-1.pdf.

第5章　結言

5.1　本事業における成果

「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会」で検討・整理した、我が国における可逆性・回収可能性に対する技術的アプローチに基づき設定した課題に対して、技術開発、地下環境での実証試験、検討を実施した。図 4.2.4-1 に本事業を通じた技術の進捗のイメージを示す。

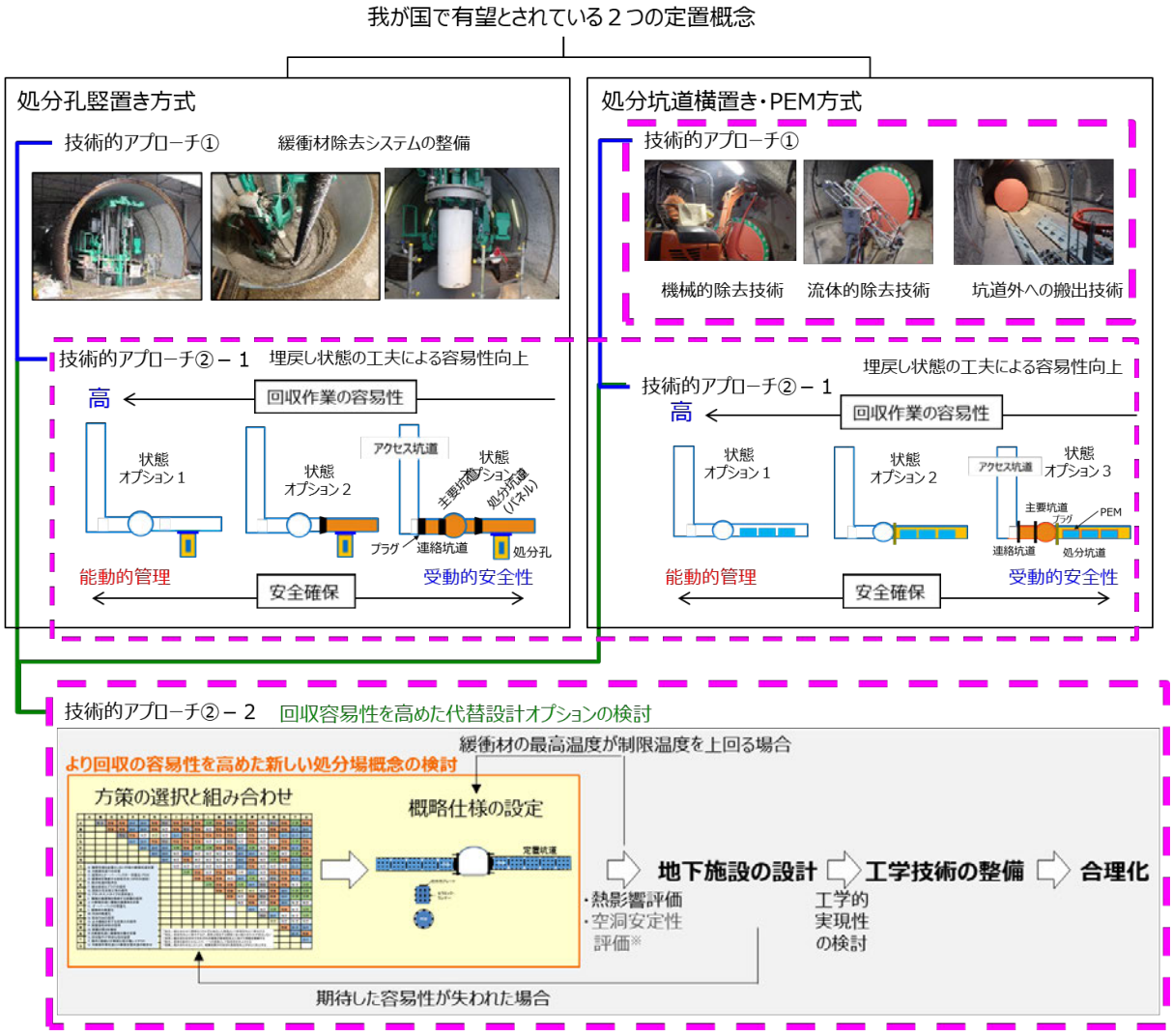


図 4.2.4-1　本事業における技術開発成果のイメージ

5.1.1　地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発（技術的アプローチ①）

本事業では多様な定置概念・方式に対する操業技術の検討・整備を目的とし、横置き・PEM 方式について、PEM の搬送・定置技術、PEM - 坑道間の隙間充填技術、隙間充填材の除去技術、PEM の回収技術を技術開発の対象とする。さらに、実際の地下環境における技術の適用性や、地下特有の課題の抽出も考慮し、実規模スケールでの地下環境で実証試験を実施した。

(1)　隙間充填技術の実証的整備

整備した PEM-坑道間の隙間充填材の施工技術を用いて、試験坑道 2 で下部狭隘部へのスクリューフィーダー方式によるペレット充填試験、上部開放部への吹付け方式によるベントナイト混合土充填試験を実施した。下部狭隘部の品質（密度）は充填部の容積と送り込んだペレット重量からのかさ密度の算出、上部開放部の品質はコアサンプリングや吹付け法面の三次元計測などによる配合比や密度分布の取得などで評価し、各部位で設定した密度の達成や施工品質のばらつきについての知見を取得した。地下で実施した隙間充填の実証試験の成果、及び地下実証試験までに地上で段階的に実施した技術開発の成果を、試験項目の考え方、地上での試験の位置付け、隙間充填部の品質管理などの観点から取りまとめるとともに、今後の技術開発課題を整理した。

(2)　隙間充填材除去技術の実証的整備

PEM の回収作業の前段となる PEM - 坑道間の隙間充填材の除去技術の整備を継続して進めた。除去作業による PEM の損傷の影響から、PEM 近傍は流体的除去技術であるウォータージェット方式、PEM から離れた部分は機械的除去技術であるオーガ方式を選定し、地下での実証試験に向けた整備を進めた。ウォータージェット方式については、PEM 周囲に沿ってノズルを動かすことが可能な除去装置を製作し、ノズルの種類や充填部への吹付け方法を変えた地上での予備試験を実施し、地下での充填材の除去試験に適用する装置の運転パラメータを整備した。オーガ方式については、小型バックホウ用のアタッチメントを製作し、吹付け箇所を再現した土槽を使用した切削性確認のための予備試験を実施した。整備した機械的除去技術、流体的除去技術を用いて、地下環境での隙間充填材の除去技術の実証試験を実施した。地下で実施した隙間充填材の実証試験の成果、及び地下実証試験までに地上で段階的に実施した技術開発の成果を、試験項目の考え方、地上での試験の位置付けなどの観点から取りまとめるとともに、除去技術の今後の技術開発課題を整理した。

(3)　搬送定置・回収技術の実証的整備

狭隘な空間でも重量物の搬送が可能なエアベアリングを採用した定置・回収装置の整備を進めた。一般産業では平滑な走行面に対して適用事例のあるエアベアリングによる搬送技術を、地下での曲率のある打設コンクリート面かつ隙間充填材除去後の回収時の環境に適用するため、実証試験装置の製作、地下環境でのエアベアリングの要素試験を行い、エアベアリングの走行特性に係るデータの拡充及び実証試験装置への反映、地上に構築した模擬コンクリート坑道面を用いた回収時の環境を模擬した検証試験を実施し、PEM の回収時における走行特性を確認

し、遠隔操作に必要な各種設定項目を検証した。整備したエアベアリング方式の定置・回収技術を用いて、地下環境での PEM 回収及び定置の実証試験を遠隔操作にて実施した。地下での実証試験の成果、及び地下実証試験までに地上で段階的に実施した技術開発の成果を、試験項目の考え方、地上での試験の位置付けなどの観点から取りまとめるとともに、今後の技術開発課題を整理した。

5.1.2　回収可能性の維持に伴う影響の定量化手法の整備（技術アプローチ②－１）

回収可能性の維持に伴う影響の設計上の考慮が無い、現行の竪置き方式、横置き・PEM 方式について、回収可能性を維持に伴う影響を定量化する手法の検討・整備を行った。課題の設定は、可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会（以下「検討会」という）にて具体化したものを検討の起点とした。本事業では、検討会で整理されたトレードオフの関係にあるもののうち、操業期間中の作業安全や閉鎖後長期の安全性に係わるものを対象として先行的に検討を実施した。

- 検討会にて項目の内容として例示されたものを検討の出発点とし、建設⇒操業⇒閉鎖と進展する「基本の操業」をベースとし、閉鎖後長期の安全性との整合を保ちつつ、定量化手法の整備を進める基本的な方針を示した。
- 「回収時の廃棄体容器の健全性」について先行的に定量化手法の検討を行った。廃棄体容器の健全性の定義、および健全性の具体的な検討から主たる個別の定量化項目として地層処分環境における金属材料の腐食を抽出した。現行のオーバーパックの腐食評価を基本として、回収可能性の維持に伴う影響を扱う方法を検討するとともに、数値解析的手法と実験といった個別要素技術の役割を整理した。さらに、他の定量化の検討項目の関連も整理した。
- 今後は、他の定量化項目についても同様に整備を進めるとともに、閉鎖後長期の安全性の評価における地層処分システムの時間的・空間的遷移と連携を取りつつ、手法の整備を進める必要がある。
- 定量化において、実際の条件下で生じる現象についての理解、ならびに実験によるデータの拡充も重要な内容である。定量化手法の整備とともに、定量化の不確実性低減にむけた取り組みも合わせて実施する必要がある。

5.1.3　回収の容易性を高めた代替設計オプションの検討（技術的アプローチ②－１）

回収の容易性を設計に考慮する際の多様な方法の例のうち、別途、回収可能性の維持に伴う影響の定量化手法の検討などで既に考慮されている「坑道の埋戻し状態の工夫」を除いた他の観点から、回収容易性を高めた代替設計オプションの検討を行った。

本検討においては、まずは回収の容易性向上に着目した代替設計オプションの検討を行うが、将来的には処分場の反復的な設計開発プロセスによるシステム全体としての最適化や、NUMOが整理している設計因子などを考慮した検討などとの整合性に留意して進めた。

より回収の容易性を高めた処分場の設計開発に向けて、代替設計オプションを構築する方法論を構築した。方法論に基づき抽出・例示される代替設計オプション案については、ジェネリックな現段階において実施可能な範囲でその実現性に関する確認や検討を行い、更なる実現性の確証や信頼性の向上に向けた今後の展開（更なる検討の進め方）に関する考察を進めた。

本年度までの検討で得られた成果は、大きく次の２点に要約できる。

- 回収作業時間の観点から回収の容易性を高める方策を組み込んだ代替設計オプションを構築する方法を整備した。
- この方法に基づき検討した代替設計オプションの具体例を示した。
- 事業者（NUMO）の処分場の設計手順に基づく設計照査手法に沿った代替設計オプションの実現性に係る検討方針や手順を整理した。本年度までに抽出した代替設計オプション案に対して、比較的サイトの地質環境特性への依存性が低いと考えられる廃棄体からの熱影響についての先行的な検討を行い、今後の検討の展開方法を示した。