### 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·回収可能性調查·技術高度化開発

### 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・ 技術高度化開発の開発成果の成果を取りまとめたもの です。

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.	<ol> <li>検討会における検討の背景と目的</li> </ol>	1-2
1.2.	<b>.2</b> 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	1-11
1.3	本事業における課題設定	1-15
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).	1-15
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)1-15
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) 1-15
1.4	本報告書の構成	1-16
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.	<ol> <li>地下環境での回収技術の実証試験の計画</li> </ol>	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	2-54
2.3.	<ol> <li>除去技術の整備目標と開発整備の進め方</li> </ol>	2-54
2.3.	<b>2</b> 除去技術の研究アプローチ	2-54
2.3.	3 機械的除去技術の実証的整備	2-59
2.3.4	.4 流体的除去技術の実証的整備	2-67
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	2-81
2.4	搬送定置・回収技術の実証的整備	2-85
2.4.	<ol> <li>搬送定置・回収技術の研究アプローチ</li> </ol>	2-85
2.4.	2 得られた成果の概要	2-89
2.5	まとめ	2-101
2.5.	<ol> <li>1 隙間充填技術の実証的整備</li> </ol>	2-101
2.5.	<b>2</b> 隙間充填材除去技術の実証的整備	2-101
2.5.	<b>.3</b> 搬送定置・回収技術の実証的整備	2-101
第3章	隙間充填技術の実証的整備	3-1
3.1	隙間充填技術の実証的整備	3-1

# 目 次

3.1.1	隙間充填技術の研究概要	3-1
3.2 隙間	<b>『充填技術の研究アプローチ</b>	3-3
3.2.1	目的と課題の設定	3-3
3.2.2	隙間充填技術実証の進め方	3-3
3.2.3	実証対象とする技術、検討項目の設定	3-5
3.3 下音	『狭隘部の隙間充填技術の実証	3-11
3.3.1	充填場所の状態確認(充填場所の状態の特性要因図)	3-11
3.3.2	充填場所に適した充填方式の設定	3-13
3.3.3	地上実証予備試験(スクリューフィーダ方式による充填技術の実証)	3-19
3.3.4	地下実証試験	3-78
3.3.5	下部狭隘部を対象とした隙間充填技術 成果のまとめ	3-81
3.3.6	実証試験成果の分析と拡張・展開	3-81
3.4 上音	『開放部の隙間充填技術の実証	3-94
3.4.1	地下実証試験で対象とする充填場所	3-94
3.4.2	充填場所に適した充填方式の設定	3-94
3.4.3	吹付け方式 施工品質目標に係る検討	3-96
3.4.4	吹付け方式 充填装置の概念設計と中核技術の抽出	3-98
3.4.5	吹付け方式による上部開放部の充填技術の整備手順	3-99
3.4.6	吹付け方式 充填技術の段階的な整備	3-101
3.4.7	地下実証試験	3-156
3.4.8	実証試験成果の分析と拡張・展開	3-199
3.5 隙間	『充填技術の実証的整備 まとめ	3-217
第4章 隊	隙間充填材除去技術の実証的整備	4-1
4.1 隙間	『充填材除去技術の除去対象	4-1
4.1.1	除去技術の整備目標と開発整備の進め方	4-1
4.2 除去	ち技術の研究アプローチ	4-1
4.2.1	除去工程に影響を与える主要因の整理	4-1
4.2.2	選定した除去技術	4-4
4.3 機械	或的除去技術の実証的整備	4-8
4.3.1	除去対象とする隙間充填材	4-8
4.3.2	機械的除去技術であるオーガ方式の選定	4-8
4.3.3	中核技術の抽出	4-10
4.3.4	機械的除去技術の整備手順	4-11
4.3.5	地上での予備試験	4-12
4.3.6	地下での実証試験	4-14
4.4 流体	本的除去技術の実証的整備	4-20
4.4.1	除去対象とする隙間充填材	4-20
4.4.2	流体的除去技術 ウォータージェット方式の選定	4-20
4.4.3	中核技術の抽出	4-22

4.4.	.4 流体的除去技術の整備手順	4-23
4.4	.5 地上予備試験	4-24
4.4	.6 地上要素試験	4-27
4.4	.7 地上試験	4-31
4.4	.8 地下での実証試験	4-38
4.5	実証試験成果を踏まえた技術の拡張・展開の可能性	4-44
4.6	隙間充填材除去技術の実証的整備 まとめ	4-46
第5章	搬送定置・回収技術の実証的整備	5-1
5.1	搬送定置・回収技術の研究概要	5-1
5.2	搬送定置・回収技術の研究アプローチ	5-1
5.2	.1 <b>PEM</b> の定置技術(回収技術)	5-1
5.2	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(	ェアベアリング
方式	ち) 5-2	
5.2	<b>.3</b> 本事業における課題設定と開発整備方針	5-5
5.3	搬送定置・回収技術の研究詳細	5-9
5.3	.1 定置・回収装置の設計・製作	5-9
5.3	.2 定置・回収装置の妥当性確認(鋼製坑道試験)	5-33
5.3	.3 地下試験坑道での要素試験(地下要素試験)	5-42
5.3	.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)	5-57
5.3	.5 地下環境での搬送定置・回収技術の実証(地下実証試験)	5-69
5.4	エアベアリング方式の適用性の評価	5-79
5.4	.1 昇降性の評価	5-79
5.4	.2 走行性の評価	5-85
5.4	.3 遠隔操作性の評価	5-89
5.4	.4 環境条件への評価	5-92
5.5	実機に向けた研究課題と将来拡張性	5-93
5.5	.1 台座の損傷防止対策について	5-93
5.5	.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	5-95
5.5	.3 将来拡張性	5-98
第6章	地層処分実規模試験施設の運用	6-1
6.1	概要	6-1
6.2	地層処分実規模試験施設の運用	6-1
6.2	.1 運用概要	6-1
6.2	<b>.2</b> 地層処分実規模試験施設の整備	6-3
6.2	.3 施設の一般公開	6-3
6.2	.4 緩衝材定置試験の実施	6-5
6.2	<b>.5</b> ベントナイト体感試験の実施	6-6
6.2	<b>.6</b> 緩衝材可視化試験の公開	6-7
6.2	.7 広報活動	6-9

6.3	地層処分実規模試験施設の来館者調査および分析	6-10
6.3	.1 来館者アンケートの分析	6-10
6.3	.2 来館者記録の分析	6-11
6.3	.3 まとめ	6-18
第7章	回収可能性の維持の影響の定量化手法の整備	7-1
7.1	可逆性・回収可能性に係わる技術課題の整理	
7.1	<ol> <li>安全性への影響の定量化</li> </ol>	
7.1	.2 定量化手法の整備の進め方	
7.2	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	7-7
7.2	<ol> <li>定量化手法の整備の方針</li> </ol>	7-7
7.2	.2 定量化の対象の抽出	7-7
7.2	<ul> <li>.3 地層処分環境における金属材料の腐食</li> </ul>	7-15
7.2	.4 緩衝材の浸潤	7-23
7.2	.5 回収時の廃棄体容器の健全性の評価手法のまとめ	
7.3	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	
第8章	回収の容易性向上の検討	8-1
8.1	目的と進め方	8-1
8.1	.1 検討の目的	8-1
8.1	.2 検討の方針	8-1
8.1	.3 検討の進め方と検討項目の概要	
8.2	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要	<b>隆理8-4</b>
8.2	.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のポイントの	つ抽出と整理 8-
4		
8.2	.2 工夫のポイントの集約による容易性向上のポイントの整理	
8.3	回収の容易性向上を図る方策の検討と整理	
8.3	.1 容易性向上ポイントの工学的な方策と具体的な手段への展開	
8.3	<b>.2</b> 工学的方策の組合せに関する整理	
8.4	工学的方策の選択と組合せによる代替設計オプションの構築	
8.4	<ol> <li>代替設計オプション構築の考え方の検討</li> </ol>	
8.4	.2 工学的方策の組合せによる一体化した概念の構築	
8.4	.3 一体化した概念に基づく代替設計オプションの具体化	
8.5	代替設計オプションの実現性の検討および今後の展開	
8.5	<ol> <li>代替設計オプションの実現性の検討方針</li> </ol>	
8.5	.2 廃棄体からの熱影響に対する先行的な検討	
8.5	<b>.3</b> 代替設計オプションの実現に向けての今後の展開	
8.6	第4章のまとめ	8-86
8.6	.1 本章の成果	8-86
第9章	結言	9-1
9.1	本事業における成果	

# 図目次

义	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)	
义	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
义	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
义	1.2.3-1	2つの定置概念を出発点とした回収可能性の維持に係る技術検討1-13
义	1.2.3-2	検討の進展後(例:研究フェーズの節目、セーフティケースの更新、など)1-
	14	
义	1.3.3-1	本事業における技術検討項目の設定1-16
义	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]
义	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
义	2.1.1-3	定置概念ごとの技術開発状況(※事業開始時)2-4
义	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
义	2.1.1-5	処分坑道-主要坑道間のプラグの撤去2-7
汊	2.1.1-6	坑道埋め戻し材の除去(廃棄体から離れた部分)
义	2.1.1-7	隙間充填材の除去(処分坑道内)2-8
义	2.1.1-8	定置場所から処分坑道外への PEM の搬送2-8
义	2.1.1-9	横置き・PEM 方式の回収作業の工程2-9
义	2.1.1-10	大断面坑道2-10
义	2.1.1-11	狭隘断面坑道2-10
义	2.1.1-12	対象となる模擬 PEM の外形寸法[8]2-11
义	2.1.1-13	PEM - 坑道間の隙間充填技術2-11
义	2.1.1-14	PEM の搬送・定置技術2-12
义	$2.1.1 \cdot 15$	PEM の回収技術(定置の逆動線)2-12
义	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
义	$2.1.1 \cdot 17$	本事業での実証試験サイトの整備の基本的考え方2-14
义	2.1.1-18	幌延 URL 試験坑道 2[11]2-14
义	2.1.1-19	試験坑道 2 の寸法2-15
义	2.1.1-20	整備前後の試験坑道 2 の様子[12]2-15
汊	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
义	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
义	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
义	2.2.3-3	有効粘土密度 1.37Mg/m <sup>3</sup> を満足する充填率と充填材料粒子密度の関係2-22
义	2.2.3-4	模擬土槽とスクリューフィーダ配置2-25
义	2.2.3-5	初期充填、移動充填、後充填 イメージ2-26
义	2.2.3-6	模擬土槽 上面からのサンプリング位置2-26
义	2.2.3-7	ステップ4 実施状況2-27

义	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
义	2.2.3-9	充填試験実施状況	2-29
义	2.2.3-10	地下実証試験における実充填容積	2-30
义	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
义	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
义	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
义	2.2.3-14	別方式による初期充填のイメージ	2-36
义	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
义	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
义	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
义	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
义	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	2-44
义	2.2.4-6	伸縮アーム式吹付け機械(MINIMEC)の仕様	2-44
义	2.2.4-7	吹付け機(ニードガン)の仕様	2-45
义	2.2.4-8	ジェクター(JT75S-5)の仕様	2-45
义	2.2.4-9	地下実証試験の吹付け状況	2-45
义	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	2-48
义	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)	2-49
义	2.2.4-12	地下実証試験結果 吹付け場所による乾燥密度	2-49
义	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)	2-49
义	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	2-55
义	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	2-56
义	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	2-57
义	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	2-58
义	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	2-59
义	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	2-60
义	$2.3.3 \cdot 3$	機械的除去技術の整備手順	2-60
义	2.3.3-4	地上予備試験 説明図	2-61
义	$2.3.3 \cdot 5$	製作したオーガアタッチメント	2-61
义	2.3.3-6	地上での予備試験の状況	2-61
义	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	2-62
义	2.3.3-8	機械的除去装置の配置平面図	2-63
义	2.3.3-9	地下実証試験 機械的除去装置	2-63
义	2.3.3-10	用語の説明 模式図	2-63
义	$2.3.3 \cdot 11$	オーガアタッチメント さや管なし	2-64
义	$2.3.3 \cdot 12$	オーガの除去手順による作業性の確認 説明図	2-66
义	2.3.3-13	PEM 近傍部および坑道際での除去状況	2-66
义	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	2-68
义	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-

68

义	2.3.4-3	流体的除去技術の整備手順
义	2.3.4-4	要素試験状況
义	2.3.4-5	地上試験ヤード2-71
义	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2-71
义	2.3.4-7	流体的除去装置の基本動作 説明図2-72
义	2.3.4-8	流体的除去装置の各部名称等 説明図
义	2.3.4-9	各ノズルの特徴等 一覧2-73
义	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
义	2.3.4-11	地上試験時の資機材配置図の全体平面図2-74
义	2.3.4-12	半 PEM 最奥部の除去状況2-77
义	2.3.4-13	流体的除去手順
义	2.3.4-14	機械的除去装置の配置平面図2-78
义	$2.3.4 \cdot 15$	地下実証試験 流体的除去 除去手順毎の除去程度
义	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2-80
义	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
义	2.4.1-1	エアベアリングの作動原理2-86
义	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)2-87
义	2.4.2-1	定置・回収装置 外観
义	2.4.2-2	要素試験装置 外観
义	2.4.2-3	地下実証試験時の遠隔操作実施状況
义	2.4.2-4	スタックパターン1のイメージ図2-95
义	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
义	2.4.2-6	台座損傷対策案(定置部の拘束方法の変更)2-99
义	3.1.1-1	充填対象隙間形状の例
义	3.1.1-2	幌延 URL 試験坑道 2 坑道断面(実証試験時)
义	3.1.1-3	隙間充填技術の実証の対象とする坑道断面と充填方式
义	3.2.2-1	一般的な特性要因図3-3
义	3.2.2-2	段階的な技術の整備の実施イメージ
义	3.2.3-1	かさ密度 説明図3-5
义	3.2.3-2	横置き・PEM 方式の施工ブロックフロー3-7
义	3.2.3-3	基本の特性要因図
义	3.3.1-1	対象断面
义	3.3.1-2	充填場所の状態の充填後かさ密度への影響因子
义	3.3.3-1	狭隘部の充填技術の整備フロー3-19
义	3.3.3-2	隙間充填材の製造、輸送、充填工程の一例
义	3.3.3-3	充填材品質の充填後かさ密度への影響因子
义	3.3.3-4	代表的なベントナイトペレットの製造方法[15]
义	3.3.3-5	有効粘土密度 1.37Mg/m <sup>3</sup> を満足する充填率と充填材料粒子密度の関係[17].3-23

义	3.3.3-6	ブリケッティングマシン	3-24
义	3.3.3-7	ブリケッティングマシンの構造図と使用したロール	3 <b>-</b> 24
义	3.3.3-8	製造したベントナイトペレット	3-25
义	3.3.3-9	かさ密度測定の様子	3-26
义	3.3.3-10	目標粒度分布	3-26
义	3.3.3-11	目標と破砕後の粒度分布	3-27
义	3.3.3-12	ブリケッティング材の解砕	3-27
义	3.3.3-13	ロールプレスによるシート状ベントナイトの製造	3-28
义	3.3.3-14	充填材料製造フロー	3-29
义	3.3.3-15	ロールプレス機	3-29
义	3.3.3-16	ロールプレス 2 回通過後	3-29
义	3.3.3-17	解砕機	3-30
义	3.3.3-18	ロールプレス法により製造したベントナイトペレット	3-31
义	3.3.3-19	製造したベントナイトペレットの粒度分布	3-32
义	3.3.3-20	使用したモルタルミキサ	3-32
义	3.3.3-21	ペレット充填材 A、B の移送前の粒度分布の比較	3-35
义	3.3.3-22	ステップ0 実施イメージ	3-37
义	3.3.3-23	移送性能測定結果イメージ(対象パラメータ:スクリュー回転数の場合)	3-37
义	3.3.3-24	スクリューフィーダ断面概略図	3-38
义	3.3.3-25	最小断面の処分坑道への PEM 定置イメージ	3-39
义	3.3.3-26	スクリューピッチ	3-39
义	3.3.3-27	スクリューフィーダパターン材料供給口開口パターン	3-41
义	3.3.3-28	スクリューフィーダ試作機全景	3-41
义	3.3.3-29	スクリューフィーダ配置イメージ	3-42
义	3.3.3-30	模擬土槽	3-42
义	3.3.3-31	ステップ2 実施イメージ	3-43
义	3.3.3-32	最小断面処分坑道に生じる PEM 定置後の隙間	3-43
义	3.3.3-33	充填予備試験用土槽	3-44
义	3.3.3-34	充填予備試験 ベントナイトペレットの投入状況	3-44
义	3.3.3-35	粒度分布(ケース 1、ケース 2)	3-45
义	3.3.3-36	粒度分布(ケース 3-1、ケース 3-3)	3-46
义	3.3.3-37	充填後の状況	3-47
义	3.3.3-38	未充填部分のイメージ図	3-47
义	3.3.3-39	上段のみ配置の場合の安息角による未充填部の形成のイメージ	3-48
义	3.3.3-40	上、下段スクリューフィーダ配置イメージ	3-48
义	3.3.3-41	スクリュー回転数への依存性確認のイメージ	3-49
义	3.3.3-42	坑道延長方向の安息角形成イメージ	3-50
义	3.3.3-43	抑止板への依存性確認のイメージ	3-50
义	3.3.3-44	軸有スクリューフィーダによる移送材料排出状況	3-51

义	3.3.3-45	スクリュー回転方向への依存性確認のイメージ	3-51
义	3.3.3-46	狭隘部充填試験用の模擬土槽の断面形状	3-52
义	3.3.3-47	想定される充填材の 2 次元的な広がり	3-52
义	3.3.3-48	左右対称に存在する狭隘部への模擬土槽の対応	3-53
义	3.3.3-49	模擬土槽上面に設けた試料サンプリング用の窓の配置	3-53
义	3.3.3-50	下部狭隘部 模擬土槽全景	3-54
义	3.3.3-51	ステップ3 実施イメージ	3-55
义	3.3.3-52	模擬土槽	3-55
义	3.3.3-53	ステップ4 実施イメージ	3-56
义	3.3.3-54	狭隘部隙間充填装置正面全景	3-56
义	3.3.3-55	模擬土槽	3-57
义	3.3.3-56	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	3-58
义	3.3.3-57	移送性能の供給ロ形状依存性の確認	3-61
义	3.3.3-58	移送性能のスクリュー回転数依存性確認	3-61
义	3.3.3-59	各スクリューピッチの移送性能の比較	3-62
义	3.3.3-60	移送有効容積のロスのイメージ	3-62
义	3.3.3-61	ステップ1 ペレット充填材に対する移送性能確認試験結果	3-64
义	3.3.3-62	移送前後の充填材粒度分布の比較	3-64
义	3.3.3-63	下部狭隘部内での未充填部の形成状況	3-65
义	3.3.3-64	上段/下段スクリューフィーダの基本配置	3-66
义	3.3.3-65	抑止板への依存性確認のイメージ(再掲)	3-66
义	3.3.3-66	ステップ3で用いた模擬土槽仕様	3-70
义	3.3.3-67	上段/下段スクリューフィーダの基本配置	3-70
义	3.3.3-68	初期充填、移動充填、後充填 イメージ	3-71
义	3.3.3-69	模擬土槽 上面からのサンプリング位置	3-72
义	3.3.3-70	スクリューフィーダ基本配置	3-74
义	3.3.3-71	模擬土槽 上面からのサンプリング位置	3-75
义	3.3.3-72	ステップ4実施状況	3-75
义	3.3.4-1	下部狭隘部の隙間充填装置配置イメージ(試験坑道 2)	3-79
义	3.3.4-2	充填試験実施状況	3-79
义	3.3.4-3	地下実証試験における実充填容積	3-80
义	$3.3.6^{-1}$	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	3-85
义	3.3.6-2	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	3-87
义	3.3.6-3	大断面へのスクリューフィーダ方式の適用例	3-88
义	3.3.6-4	別方式による初期充填のイメージ	3-88
义	3.3.6-5	製造直後のペレット充填材性状(粒度分布)	3-90
义	3.3.6-6	充填前のペレット充填材粒度分布	3-91
义	3.3.6-7	充填前のペレット充填材粒度分布	3-91
义	3.3.6-8	充填材料保管状況	3-92

义	3.4.1-1	充填技術の実証を行う対象断面(幌延 URL 試験坑道 2)	-94
义	3.4.3-1	吹付け方式における隙間充填技術 特性要因図	-97
义	3.4.4-1	横置き・PEM 方式における吹付け充填装置の概念設計例	-98
义	3.4.4-2	汎用的な機械を用いた地下実証試験における吹付け装置の構成	-98
义	$3.4.5 \cdot 1$	吹付け方式による上部開放部の充填技術 整備手順	-99
义	3.4.6 - 1	ケイ砂の粒径加積曲線	102
义	3.4.6-2	ベントナイト混合土(ケイ砂種類;3号+5号) 締固め曲線	102
义	3.4.6-3	ベントナイト混合土(ケイ砂種類;3号) 締固め曲線	102
义	3.4.6-4	ベントナイト混合土(ケイ砂種類;5号) 締固め曲線	103
义	3.4.6-5	吹付け予備試験の手順3-1	L04
义	3.4.6-6	吹付け試験に使用した汎用機材(1/2)3-1	105
义	3.4.6-7	吹付け試験に使用した汎用機材(2/2)3-1	106
义	3.4.6-8	吹付ノズル先端から吹付対象(吹付箱、板)との距離確認状況	107
义	3.4.6-9	シンウォールサンプラー3-1	108
义	3.4.6-10	吹付け後の状況(ケイ砂 3 号+5 号、製造時含水比 Wopt)3-1	108
义	3.4.6-11	締固め曲線と吹付け予備試験 乾燥密度の比較(ケイ砂 3+5 号)3-	110
义	3.4.6-12	吹付け前後のベントナイト配合率3-	111
义	3.4.6-13	吹付け要素試験試験の手順3-	112
义	3.4.6-14	吹付け容器 説明図3-2	113
义	3.4.6 - 15	ステップ 3(フェーズ 1)吹付け要素試験状況3-	114
义	3.4.6-16	締固め曲線と吹付け要素試験(フェーズ1) 乾燥密度の比較3-	116
义	3.4.6-17	ステップ 3(フェーズ 2)吹付け要素試験状況3-	117
义	3.4.6-18	・・・ ふるい装置の配置説明図3-1	117
义	3.4.6-19	団粒材の発生の様子(左:ふるい装置、右:発生した団粒材)3-1	118
义	3.4.6-20	乾燥密度と吹付け装置の運転条件(エアー量および回転数)との整理3-1	119
义	3.4.6-21	ステップ4 地上試験 試験手順3-1	121
义	3.4.6-22	模擬坑道の概念3-1	122
义	3.4.6-23	模擬坑道 全景	122
义	3.4.6-24	伸縮アーム式吹付け機械(MINIMEC) 仕様	L23
义	3.4.6-25	伸縮アーム式吹付け機械(MINIMEC) 稼働範囲図 [22]	L23
义	3.4.6-26	ジェクター(JT75S-5) 仕様3-1	l24
义	3.4.6-27	伸縮アーム式吹付け機械による吹付け性能確認試験	125
义	3.4.6-28	伸縮アーム式吹付け機械による模擬坑道への吹付け施工確認試験3-1	126
义	3.4.6-29	吹付け充填後の状況及び3次元計測による吹付け法面の画像(1/2)3-1	126
义	3.4.6-30	吹付け充填後の状況及び3次元計測による吹付け法面の画像(1/2)3-1	127
义	3.4.6-31	ハンディコアドリル、コアサンプラー3-1	128
义	3.4.6-32	コアサンプリング試料による乾燥密度の算出および度数分布	128
义	3.4.6-33	試験2日目 吹付け後の乾燥密度および度数分布	129
义	3.4.6-34	試験3日目 吹付け後の乾燥密度および度数分布	130

义	3.4.6-35	試験4日目 吹付け後の乾燥密度および度数分布	3 <b>-</b> 131
义	3.4.6-36	試験 5 日目 吹付け後の乾燥密度および度数分布	3-132
义	3.4.6-37	測定する面の状態、温度測定状況	3-133
义	3.4.6-38	誘電率計測による乾燥密度の算出および度数分布	3-134
义	3.4.6-39	2 日目 誘電率計測による乾燥密度結果およびコアサンプリン	ノグ試料から算出
	した乾燥	桑密度結果	3-135
义	3.4.6-40	試験3日目 誘電率計測による乾燥密度結果およびコアサンス	プリング試料から
	算出した	た乾燥密度結果	3-135
义	3.4.6-41	試験4日目 誘電率計測による乾燥密度結果およびコアサンス	プリング試料から
	算出した	と乾燥密度結果	3-136
义	3.4.6-42	3次元計測器の外観(左)、計測状況(右)	3-137
义	3.4.6-43	伸縮アーム式吹付け機械による模擬坑道への吹付け状況	3-141
义	3.4.6-44	リバウンド材の回収状況	3-141
义	3.4.6-45	吹付け後のベントナイト配合率の度数分布	3-141
义	3.4.6-46	吹付け1バッチ(約 1000kg)当たりのサイクルタイム	3-143
义	3.4.6-47	団粒化材の除去率と作業時間の関係	3-143
义	3.4.6-48	体積含水率変化のイメージ図	3-145
义	3.4.6-49	誘電率計 測定状況	3-146
义	3.4.6-50	検量線	3-147
义	3.4.6-51	試料内温度と出力値の関係	3-148
义	3.4.6-52	含水比が異なる試料における出力値と体積含水率の関係	3-149
义	3.4.6-53	含水比の差分と体積含水率の差分	3-150
义	3.4.6-54	ベントナイト混合土の製造プラントの構成(粉砕機を追加)	3-151
义	3.4.6-55	混合方法の改善後のベントナイト混合土(混合直後)	3-153
义	3.4.6-56	ベントナイト混合土の保管状況	3-153
义	3.4.6-57	保管前後のベントナイト混合土の含水比(保管期間 12 日)	3-154
义	3.4.6-58	試験サイトの気温と湿度の変化	3-154
义	3.4.7-1	上部開放部の形状(幌延 URL 深度 350m 坑道 試験坑道 2)	3-156
义	3.4.7-2	下部狭隘部と上部開放部の境界に設置した鉄板	3-156
义	3.4.7-3	幌延 URL 試験坑道 2 上部開放部の充填範囲図	3-157
义	3.4.7-4	上部開放部 実証試験フロー	3-158
义	3.4.7-5	上部開放部の隙間充填に係る全体設備・機械配置	3-159
义	3.4.7-6	ケイ砂混合設備 配置図	3-160
义	3.4.7-7	ケイ砂混合設備	3-160
义	3.4.7-8	ベントナイト混合土の混合設備 配置図	3-160
义	3.4.7-9	ベントナイト混合土の混合設備	3-161
义	3.4.7-10	ベントナイト計量用サイロ	3-161
义	3.4.7-11	ベントナイト混合土の製造フロー	3-162
义	3.4.7-12	ベントナイト混合土の製造状況	3-163

図 3.4.7-13	3 ベントナイト混合土の運搬状況	3-164
図 3.4.7-14	作業床(山留材)の設置計画図	3-165
図 3.4.7-15	5 作業床(山留材)の設置状況	3-165
図 3.4.7-16	: 吹付け設備の設置図	3-166
図 3.4.7-17	′ 吹付け設備の主要機械	3-167
図 3.4.7-18	3 距離計、パトランプ設置状況	3-168
図 3.4.7-19	) 吹付け範囲(再掲)	3-169
図 3.4.7-20	) 一連の吹付け作業	3-170
図 3.4.7-21	ベントナイト混合土の製造(混合)後の含水比	3-173
図 3.4.7-22	2 ベントナイト混合土の製造(混合)後の配合率	3-173
図 3.4.7-23	<ul><li>上部開放部の吹付けによる充填前後</li></ul>	3-174
図 3.4.7-24	- コアサンプリングおよび誘電率計測箇所 説明図	3-175
図 3.4.7-25	<b>コ</b> アサンプリング	3-176
図 3.4.7-26	3 誘電率計測方法および計測状況	3-176
図 3.4.7-27	'誘電率計出力值·体積含水率 検量線	3-177
図 3.4.7-28	3 3次元計測器による計測 球形ターゲット設置位置(計5点)	3-177
図 3.4.7-29	) 吹付け施工後の乾燥密度(コアサンプリング)	3-178
図 3.4.7-30	) 吹付け施工後のベントナイト配合率(コアサンプリング)	3-178
図 3.4.7-31	吹付け施工後の含水比(コアサンプリング)	3-179
図 3.4.7-32	2 コアサンプリング結果(試験7日目午後 サンプリング箇所毎の韓	£燥密度) .3-
179		
図 3.4.7-33	3 コアサンプリング結果(サンプリング測箇所毎の乾燥密度)(1/2)	3-180
図 3.4.7-34	コアサンプリング結果(サンプリング測箇所毎の乾燥密度)(2/2)	3-181
図 3.4.7-35	5 吹付け施工後の乾燥密度(誘電率計測)	3-182
図 3.4.7-36	; 誘電率計測結果(試験7日目 午後 計測箇所毎の乾燥密度)	3-182
図 3.4.7-37	'誘電率計測結果(計測箇所毎の乾燥密度)(1/2)	3-183
図 3.4.7-38	3 誘電率計測結果(計測箇所毎の乾燥密度)(2/2)	3-184
図 3.4.7-39	) 吹付け施工後の乾燥密度(3 次元計測)	3-185
図 3.4.7-40	) 3 次元計測による吹付け体積の計測結果(3D図)(1/2)	3-186
図 3.4.7-41	3次元計測による吹付け体積の計測結果(3D図)(2/2)	3-187
図 3.4.7-42	2 乾燥密度の各計測結果と施工日の関係	3-189
図 3.4.7-43	3 コアサンプリングと誘電率計測による乾燥密度計測結果	3-189
図 3.4.7-44	- 突固めによる土の締固め試験(JISA1210)と実証試験結果の比	較3-190
図 3.4.7-45	・ ベントナイト混合土の製造毎(フレコン毎)の含水比結果	3-191
図 3.4.7-46	; 吹付け前後(製造後、施工後)の含水比結果	3-192
図 3.4.7-47	' 吹付け前後(製造後、施工後)のベントナイト配合率結果	3-193
図 3.4.7-48	3 回収時間とリバウンド回収量の関係	3-193
図 3.4.7-49	) 全体の吹付け施工サイクルタイム	3-194
図 3.4.7-50	) 環境データ(地上 西建屋)	3-195

义	$3.4.7 \cdot 51$	環境データ(地下 350m 試験坑道 2)3-	195
义	3.4.8-1	地下実証試験結果 吹付け場所による乾燥密度	200
义	3.4.8-2	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)3-	201
义	3.4.8-3	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)3-	201
义	3.4.8-4	要素試験、地上試験、地下実証試験での乾燥密度3-	204
义	3.4.8-5	ベントナイト混合土の製造(混合)後の含水比	209
义	3.4.8-6	地下実証試験結果 吹付け後の含水比(コアサンプリング結果)3-	210
义	3.4.8-7	ベントナイト混合土の製造(混合)後の配合率	211
义	3.4.8-8	地下実証試験結果 吹付け後の配合率 (コアサンプリング結果)	211
义	3.4.8-9	地上試験、地下実証試験における3種類の算出方法による乾燥密度3-	214
义	4.2.1-1	除去工程に影響を与える主要因「除去対象物」、「空間」、「除去技術」の相関	4-2
义	4.2.1-2	除去技術に関する作業を分割・具体化した概念図	.4-3
义	4.2.2-1	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	.4-4
义	4.3.1-1	地下実証試験における機械的除去技術の対象領域 試験坑道2 断面図	.4-8
义	4.3.3-1	横置き・PEM 方式における機械的除去装置の概念設計例4	-10
义	4.3.3-2	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(1/2)4	-10
义	4.3.3-3	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(2/2)4	<b>I-</b> 11
义	4.3.4-1	機械的除去技術の整備手順	<b>I-</b> 11
义	$4.3.5 \cdot 1$	地上予備試験 説明図4	-12
义	$4.3.5 \cdot 2$	製作したオーガアタッチメント	-12
义	4.3.5 - 3	地上予備試験状況4	-13
义	4.3.6-1	地下実証試験における除去対象箇所 試験坑道2 断面図4	-14
义	4.3.6-2	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4	-14
义	4.3.6-3	機械的除去装置の配置平面図4	-15
义	4.3.6-4	地下実証試験 機械的除去装置	-15
义	4.3.6-5	用語の説明 模式図4	-16
义	4.3.6-6	オーガアタッチメント さや管なし4	-17
义	4.3.6-7	オーガの除去手順による作業性の確認 説明図4	-18
义	4.3.6-8	PEM 近傍部および坑道際での除去状況	-19
义	4.3.6-9	機械的除去前後の坑道内4	-19
义	4.4.1-1	地下実証試験における機械的除去技術の対象領域 試験坑道2 断面図4	-20
义	4.4.2-1	流体を使用した充填材への除去方法の整理の一例4	-20
义	4.4.3-1	横置き・PEM 方式における流体的除去装置の概念設計例4	-22
义	4.4.3-2	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	寸4-
	22		
义	4.4.4-1	流体的除去技術の整備手順	-23
义	$4.4.5 \cdot 1$	高圧洗浄車	-24
义	4.4.5 - 2	ノズル形状による噴射形態の違い4	-24
义	4.4.5 - 3	要素試験状況	-25

4.4.5-4	コンクリート面への影響確認	4-26
4.4.6-1	製作した供試体	4-27
4.4.6-2	吸引・撤去に係る使用機械	4-27
4.4.6-3	供試体の設置状況	4-28
4.4.6-4	奥行方向に対する切削能力の試験結果	4-28
4.4.6-5	試験説明図	4-29
4.4.6-6	高圧水での切削(ほぐし)後の副産物の撤去状況	4-29
4.4.7-1	地上試験ヤード	4-31
4.4.7-2	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	4-31
4.4.7-3	流体的除去装置の基本動作 説明図	4-32
4.4.7-4	流体的除去装置の各部名称等 説明図	4-32
4.4.7-5	各ノズルの特徴等 一覧	4-33
4.4.7-6	地上試験時の資機材配置図の全体平面図	4-33
4.4.7-7	半 PEM 最奥部の除去状況	4-36
4.4.7-8	流体的除去手順	4-36
4.4.8-1	地下実証試験における除去対象箇所 試験坑道2 断面図	4-38
4.4.8-2	機械的除去装置の配置平面図	4-39
4.4.8-3	地下実証試験 流体的除去装置	4-39
4.4.8-4	地下実証試験 流体的除去の試験状況	4-39
4.4.8-5	地下実証試験 流体的除去 除去手順毎の除去程度	4-40
4.4.8-6	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.4-41
4.4.8-7	下部狭隘部の隙間充填材(片側)の除去時間 サイクルタイム	4-42
4.4.8-8	上部開放部に対するトルネードノズルによる除去	4-43
5.2.1-1	<b>PEM</b> の搬送・定置技術	5-1
5.2.1-2	PEM の回収技術(定置の逆動線)	5-1
$5.2.2 \cdot 1$	エアベアリングの作動原理図	5-5
5.2.3-1	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)	5-7
$5.3.1 \cdot 1$	鋼殻リング方式 PEM の内部構造と外形寸法	5-9
5.3.1 - 2	試験坑道 2 外形図	5-10
5.3.1 - 3	既往研究での浮上量と供給空気流量の関係[2]	5-13
5.3.1-4	浮上量の計測位置	5-13
5.3.1 - 5	定置部 外形図	5-15
5.3.1-6	搬送部 外形図	5-18
5.3.1-7	制御部 システム構成図	5-20
5.3.1-8	定置・回収装置に設置するカメラ及び検出器	5-23
5.3.1 - 9	定置・回収装置の幌延 URL での搬入概念図	5-25
$5.3.1 \cdot 10$	定置・回収装置 計画図	5-27
$5.3.1 \cdot 11$	定置・回収装置 全体組立図	5-28
$5.3.1 \cdot 12$	定置・回収装置の全体システム 3D 図	5-29
	4.4.5-4 4.4.6-1 4.4.6-2 4.4.6-3 4.4.6-3 4.4.6-5 4.4.6-5 4.4.6-6 4.4.7-1 4.4.7-2 4.4.7-3 4.4.7-3 4.4.7-5 4.4.7-6 4.4.7-7 4.4.7-8 4.4.8-1 4.4.8-2 4.4.8-3 4.4.8-3 4.4.8-5 4.4.8-5 4.4.8-5 4.4.8-5 4.4.8-5 4.4.8-5 4.4.8-5 4.4.8-5 4.4.8-5 4.4.8-5 4.4.8-5 5.2.1-1 5.2.1-2 5.2.2-1 5.2.3-1 5.3.1-5 5.3.1-6 5.3.1-7 5.3.1-10 5.3.1-10 5.3.1-10 5.3.1-10 5.3.1-10 5.3.1-10 5.3.1-10	<ul> <li>4.4.5-4 コンクリート面への影響確認</li> <li>4.4.6-1 製作した供試体</li></ul>

义	$5.3.1 \cdot 13$	定置部 外観	.5-30
义	$5.3.1 \cdot 14$	搬送部 外観	.5-31
义	$5.3.1 \cdot 15$	制御盤 外観	.5-32
义	$5.3.1 \cdot 16$	操作卓 外観	.5-32
义	$5.3.2^{-1}$	鋼製模擬坑道 外観	.5-33
义	5.3.2-2	鋼製模擬坑道 外形図	.5-34
义	$5.3.2^{-3}$	鋼製坑道試験(目標浮上量 40 mm での定置動作)における浮上量	.5-36
义	5.3.2-4	鋼製坑道試験(目標浮上量 40 mm での定置動作)における押引力	.5-37
义	5.3.2 - 5	鋼製坑道試験(目標浮上量 40 mm での定置動作)における検出距離	.5-37
义	5.3.2-6	鋼製坑道試験(目標浮上量 45 mm での定置動作)における浮上量	.5-38
义	5.3.2-7	鋼製坑道試験(目標浮上量 40 mm での定置動作)における走行データ	.5-39
义	5.3.2-8	鋼製坑道試験(目標浮上量 45 mm での定置動作)における走行データ	.5-40
义	5.3.2-9	鋼製坑道試験における押引力上昇時のエアベアリング位置と継ぎ目位置	.5-40
义	$5.3.2 \cdot 10$	鋼製坑道試験におけるコンプレッサ吐出流量の周期変動と浮上量の関係	.5-41
义	$5.3.2 \cdot 11$	鋼製坑道試験におけるコンプレッサ吐出流量の周期変動と押引力の関係	.5-41
义	$5.3.3 \cdot 1$	要素試験装置 外観	.5-42
义	5.3.3-2	要素試験装置 外形図	.5-42
义	$5.3.3 \cdot 3$	試験坑道 2 の概略形状	.5-44
义	5.3.3-4	地下要素試験におけるスタックパターン1の時系列データ	.5-48
义	5.3.3 - 5	地下要素試験におけるスタックパターン2の時系列データ	.5-48
义	5.3.3-6	スタックパターン 1 のイメージ図	.5-49
义	5.3.3-7	スタックパターン 2 のイメージ図	.5-49
义	5.3.3-8	地下要素試験における牽引力と速度データ例(Run 326-1)	.5-50
义	5.3.3-9	地下要素試験における供給空気全流量と速度データ例(Run 326-1)	.5-52
义	$5.3.4 \cdot 1$	地上検証試験における定置・回収装置 外観	.5-57
义	5.3.4-2	地上検証試験における定置・回収装置の主な改良箇所試験坑道	.5-58
义	5.3.4-3	地上模擬坑道 外観	.5-58
义	5.3.4-4	地上模擬坑道 外形図	.5-58
义	5.3.4-5	地上検証試験における供給空気系統図	.5-59
义	5.3.4-6	地上検証試験における残留材充填面の走行試験状況	.5-61
义	5.3.4-7	地上検証試験における台座損傷箇所(地上検証試験) 外観	.5-62
义	5.3.4-8	地上検証試験における地上模擬坑道の台座境界位置と押引力との関連	.5-62
义	5.3.4-9	地上検証試験(乾燥面)における押引力の分布図(重量別)	.5-64
义	$5.3.4 \cdot 10$	地上検証試験における押引力の分布図(走行区間別)	.5-65
义	$5.3.4 \cdot 11$	分布図(箱ひげ図)の見方	.5-65
义	5.3.4-12	地上検証試験における充填材残留面走行時の操作卓モニタ映像	.5-67
义	5.3.4-13	地上検証試験における散水路面走行時の操作卓モニタ映像	.5-67
义	$5.3.5 \cdot 1$	地下実証試験における定置・回収装置 外観	.5-69
义	5.3.5 - 2	地下実証試験における試験坑道 2 外観	.5-70

义	5.3.5 - 3	地下実証試験における供給空気系統図	5-71
义	5.3.5 - 4	地下実証試験における操作卓モニタ映像	5-73
义	5.3.5 - 5	地下実証試験時の遠隔操作実施状況	5-74
义	5.3.5-6	地下実証試験における回収作業実施状況	5-74
义	5.3.5-7	地下実証試験における押引力の分布図(走行区間別)	5-75
义	5.3.5-8	地下実証試験における台座損傷箇所(試験坑道 2) 外観	5-76
义	5.3.5 - 9	地下実証試験における試験坑道2の走行面及び台座の損傷箇所	5-76
义	5.3.5-10	地上検証試験及び地下実証試験における表面計測結果	5-78
义	$5.5.1 \cdot 1$	台座損傷対策案(台座形状の変更、定置部ガイドローラの構造変更)	5-94
义	5.5.1-2	台座損傷対策案(定置部の拘束方法の変更)	5-94
义	$5.5.2 \cdot 1$	凹部通過時のエアベアリングを一時休止させるイメージ	5-96
义	5.5.2-2	上昇用と空気膜形成用を別系統とした空気供給イメージ	5-97
义	$6.2.1 \cdot 1$	地層処分実規模試験施設	6-2
义	$6.2.1 \cdot 2$	地層処分実規模試験施設内 全体図	6-2
义	$6.2.1 \cdot 3$	施設内の主な展示物	6-2
义	$6.2.2 \cdot 1$	緩衝材除去装置および緩衝材定置装置の遠隔操作設備	6-3
义	$6.2.3 \cdot 1$	実規模試験施設の来館者数(2015~2019 年度)	6-4
义	6.2.4-1	緩衝材定置試験の基本動作	6-5
义	$6.2.5 \cdot 1$	ベントナイト体感試験の方法	6-6
义	$6.2.5 \cdot 2$	ベントナイト体感試験の状況	6-6
义	6.2.6-1	2016 年度可視化試験の状況(上端面の閉塞)	6-7
义	6.2.6-2	2017 年度、2018 年度の可視化試験の状況(小型緩衝材ブロック)	6-7
义	6.2.6-3	小型緩衝材ブロックの経時変化	6-8
义	6.2.6-4	色付き緩衝材ブロックの試験状況および解体状況	6-8
义	$6.3.1 \cdot 1$	来館者の住まい(有効回答者)	6-10
义	$6.3.1 \cdot 2$	地層処分実規模試験施設およびゆめ地創館を何で知ったか	6-10
义	6.3.1-3	地層処分(左図)および高レベル放射性廃棄物(右図)に関する理解度	6-11
义	6.3.1-4	実物大の人工バリア(左図)および実物大試験(右図)に関する理解度	6-11
义	6.3.2-1	対話の出現概念(左図:事物、右図:行為・状態)	6-12
义	6.3.2-2	年度別出現概念(左図:事物、右図:行為・状態)	6-13
义	6.3.2-3	年度別の質問数と質問内容	6-14
义	6.3.2-4	「回収」についての質問内容の内訳	6-14
义	6.3.2-5	来館者の感想のうち地層処分事業に対するもの(全 742 件のうち 188 件)	6-16
义	6.3.2-6	来館者の感想のうち施設・説明に対するもの(全 742 件のうち 428 件)	6-17
义	7.1.2-1	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	7-2
义	7.1.2-2	「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	7-3
义	7.1.2-3	基本の操業で生じる事象の時間変遷のイメージ	7-4
义	7.1.2-4	「回収可能性の維持」で生じる事象の時間変遷のイメージ	7-5
义	7.2.2-1	竪置き定置方式を対象とした緩衝材除去試験の様子	7-8

义	7.2.2-2	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7-8
叉	7.2.2-3	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7-9
汊	7.2.2-4	オーバーパックの閉じ込め性に係る因子の整理
汊	7.2.2-5	遮蔽性に係る因子の整理
汊	7.2.2-6	PEM 容器の製作検討の例 左:半割れ方式 右:鋼殻リング方式
义	7.2.2-7	鋼殻リングの構造(No.6 リング)7-13
汊	7.2.3-1	炭素鋼オーバーパック溶接部の腐食因果時系列系統図
汊	7.2.3-2	オーバーパックの腐食に影響する環境因子
汊	7.2.3-3	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7-18
义	7.2.3-4	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
汊	7.2.3-5	ベントナイト系材料の化学的緩衝作用
义	$7.2.5 \cdot 1$	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
义	8.2.1-1	竪置き・ブロック方式における処分場の状態の設定と回収作業の大工程と中工程
	•••••	
汊	8.2.1-2	B-1:力学プラグの撤去の小工程、作業上の留意点・課題および工夫のポイント
	•••••	
汊	8.2.1-3	B-2:止水プラグ撤去の小工程、作業上の留意点・課題および工夫のポイント8-
	7	
汊	8.2.1-4	B-3:連絡坑道・主要坑道の埋め戻し材撤去等の小工程、作業上の留意点・課題
	および	工夫のポイント
义	8.2.1-5	B-4:処分坑道の力学プラグ撤去の小工程、作業上の留意点・課題および工夫の
	ポイン	۶-9»
义	8.2.1-6	B-5: 処分坑道の埋め戻し材撤去等の小工程、作業上の留意点・課題および工夫
	のポイン	ント8-10
义	8.2.1-7	B-6:オーバーパックの縁切りの小工程、作業上の留意点・課題および工夫のポ
	イント	
义	8.2.1-8	B-7:オーバーパックの回収・搬出の小工程、作業上の留意点・課題および工夫
	のポイン	× ⊦8-11
义	8.2.1-9	横置き・PEM 方式における処分場の状態の設定と回収作業の大工程と中工程8-
	12	
义	8.2.1-10	P-1:力学プラグ撤去の小工程、作業上の留意点・課題および工夫のポイント
义	8.2.1-11	P-2:止水プラグ撤去の小工程、作業上の留意点・課題および工夫のポイント
义	8.2.1-12	P-3:連絡坑道・主要坑道の埋め戻し材撤去等の小工程、作業上の留意点・課題
	および	工夫のポイント8-14
汊	8.2.1-13	P-4: 処分坑道の力学プラグ撤去の小工程、作業上の留意点・課題および工夫の
	ポイン	۶-15
义	8.2.1-14	P-5: PEM 周辺の充填材撤去の小工程、作業上の留意点・課題および工夫のポ

	イント	
义	8.2.1-15	P-6: PEM の回収・搬出作業の小工程、作業上の留意点・課題および工夫のポ
	イント	
図	8.2.1-16	P-7: 処分坑道の補修・補強作業等の小工程、作業上の留意点・課題および工夫
	のポイン	∠ F
义	8.2.1-17	処分坑道から PEM を回収するときの繰返し作業の概念
义	8.3.1-1	円形・小断面に定置した PEM を回収するイメージ8-25
义	8.3.1-2	大断面坑道の上部のみに埋戻し材を設置し回収時に先行撤去するイメージ.8-26
义	8.3.1-3	緩衝材を残置しオーバーパックのみを回収するイメージ
义	8.3.1-4	撤去作業の負荷を削減するために鋼製プラグに変更する例
义	8.3.1-5	プラグ、埋め戻し材、充填材、緩衝材の撤去作業量の削減に係る工学的方策およ
	び手段の	ひ例8-27
义	8.3.1-6	円形小断面に鋼製ケーシングを設置することで坑道安定性を確保するイメージ
	•••••	
义	8.3.1-7	大断面坑道にすることで補修・補強作業の空間を確保するイメージ8-29
义	8.3.1-8	坑道や処分孔の安定性を確保するための作業量の削減に係る工学的方策および
	手段の依	列
义	8.3.1-9	回収時にオーバーパックのみ回収する概念のイメージ
义	8.3.1-10	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に係る工学的方策およ
	び手段の	の例
义	8.3.1-11	回収対象物の軽量化・形状の単純化に係る工学的方策および手段の例8-33
义	8.3.1-12	回収対象物の健全性の確保に係る工学的方策および手段の例
义	8.3.1-13	回収時の動作と動線の単純化に係る工学的方策および手段の例
义	8.3.1-14	広い作業坑道と狭い定置坑道の組合せの例
义	8.3.1-15	作業性を高めるための空間確保に係る方策および手段の例
义	8.3.2-1	容易性向上のポイントから展開した工学的方策の集約
义	8.3.2-2	方策の組合せによる容易性向上の代替設計オプション構築のアプローチ例.8-42
义	8.4.2-1	代替設計オプションA. 円形小断面坑道 PEM 複数定置概念における相乗と融合
	の組合せ	さの整理
义	8.4.2-2	代替設計オプションB:大断面坑道矩形 PEM 集中定置概念における相乗と融合
	の組合せ	さの整理
义	8.4.2-3	代替設計オプション D:円形坑道横置きブロック定置概念における相乗と融合
	の組合せ	せの整理
义	8.4.3-1	代替設計オプションA:円形小断面 PEM 複数定置概念のイメージ
义	8.4.3-2	代替設計オプションB:大断面坑道矩形 PEM 集中定置概念のイメージ8-50
义	8.4.3-3	代替設計オプションD:円形坑道横置きブロック定置概念のイメージ8-51
义	8.5.1-1	現状の二つの処分概念(竪置き方式、横置き方式)の整備の過程
义	8.5.1-2	提案する代替設計オプションの整備の過程
义	8.5.2-1	代替設計オプション A の概略仕様例(イメージ図)8-55

义	8.5.2-2	代替設計オプション B の概略仕様例(イメージ図)	8-56
义	8.5.2-3	代替設計オプション D の概略仕様例(イメージ図)	8-57
义	8.5.2-4	代替設計オプション B の定置イメージ	8-60
义	8.5.2-5	矩形 PEM の寸法	8-60
义	8.5.2-6	代替設計オプション B における平面レイアウトのイメージ	8-61
义	8.5.2-7	代替設計オプション B の解析モデルの境界条件	8-62
义	8.5.2-8	代替設計オプション B の解析モデル	8-63
义	8.5.2-9	解析結果の出力点	8-64
义	8.5.2-10	PEM1 段目の出力点ごとの温度の経時変化	8-66
义	$8.5.2 \cdot 11$	PEM2 段目の出力点ごとの温度の経時変化	8-67
义	8.5.2-12	PEM3 段目の出力点ごとの温度の経時変化	8-68
义	8.5.2-13	1 年後の温度分布	8-69
义	8.5.2-14	5 年後の温度分布	8-69
义	8.5.2-15	10 年後の温度分布	8-70
义	8.5.2-16	50 年後の温度分布	8-70
义	$8.5.2 \cdot 17$	100 年後の温度分布	8-71
义	8.5.2-18	代替設計オプション D の定置イメージ	8-74
义	8.5.2-19	オーバーパックとガラス固化体の寸法	8-74
义	8.5.2-20	定置坑道の構造	8-75
义	8.5.2-21	代替設計オプション D における平面レイアウトのイメージ	8-75
义	8.5.2-22	代替設計オプション D の解析モデルの境界条件	8-76
义	8.5.2-23	代替設計オプション D の解析モデル	8-77
义	$8.5.2 \cdot 24$	解析結果の出力点	8-78
义	$8.5.2 \cdot 25$	出力点ごとの温度の経時変化(その1)	8-79
义	8.5.2-26	出力点ごとの温度の経時変化(その2)	8-80
义	8.5.2-27	1 年後の温度分布	8-80
义	8.5.2-28	4 年後の温度分布	8-81
义	8.5.2-29	10 年後の温度分布	8-81
义	8.5.2-30	50 年後の温度分布	8-82
义	8.5.2-31	100 年後の温度分布	8-82
义	8.5.3-1	提案する代替設計オプションの整備の過程 【再掲】	8-85
义	9.3.1-1	本事業における技術開発成果のイメージ	9-1

### 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	り枠組み
			1-11
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)	2-46
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	2-46
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	2-47
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	2-48
表	$2.3.2 \cdot 1$	本研究における機械的除去技術の選定検討	2-57
表	$2.3.3 \cdot 1$	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)	2-59
表	2.3.3-2	機械的除去装置の運転条件	2-62
表	$2.3.3 \cdot 3$	アースオーガによるほぐしの施工速度	2-64
表	2.3.3-4	真空吸引装置よる撤去(吸引)の施工速度	2-65
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	2-66
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)	2-67
表	2.3.4-2	供試体作製条件	2-70
表	2.3.4-3	除去装置の仕様	2-72
表	2.3.4-4	使用機械一覧	2-73
表	2.3.4-5	ノズルの種類と切削性・掻き出し性	2-75
表	2.3.4-6	除去装置の円弧状移動速度	2-75
表	2.4.1-1	定置・回収装置の整備方針	2-87
表	2.4.1-2	定置・回収装置の設計条件	2-87
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	2-88
表	2.4.2-1	鋼製坑道試験における押引力及び摩擦係数	2-91

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	2-91
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.	2-92
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	2-93
表	2.4.2-5	地下実証試験における浮上量、流量及び圧力	2-93
表	3.2.3-1	隙間充填工程において必要となる技術の整理	3-8
表	3.2.3-2	具体化した検討項目と順序	3-9
表	3.3.1-1	充填場所の状態の充填密度への影響因子	3-12
表	$3.3.2 \cdot 1$	下部狭隘部を対象とした隙間充填装置への要求事項	3-14
表	3.3.2-2	移送・充填方式の比較	3-16
表	3.3.2-3	軸有スクリューフィーダと軸無スクリューフィーダの仕様比較	3-17
表	3.3.2-4	軸有スクリューフィーダと軸無スクリューフィーダによる試験条件の比較.	3-17
表	3.3.2-5	軸有スクリューフィーダと軸無スクリューフィーダによる試験結果の比較.	3-17
表	3.3.2-6	スクリューの種類とその特徴の比較	3-18
表	3.3.3-1	充填材料品質の充填後かさ密度への影響因子	3-21
表	3.3.3-2	ペレットの密度結果	3-25
表	3.3.3-3	目標粒度分布	3-26
表	3.3.3 <b>-</b> 4	機械の仕様	3-27
表	$3.3.3 \cdot 5$	ロールプレス機の仕様	3-30
表	3.3.3-6	板状ベントナイトのかさ密度	3-30
表	3.3.3-7	解砕機の仕様	3-31
表	3.3.3-8	ベントナイトペレットのかさ密度(乾燥)	3-32
表	3.3.3-9	モルタルミキサの仕様	3-33
表	3.3.3-10	) ペレット充填材 移送前の初期含水比	3-34
表	3.3.3-11	ペレット充填材 移送前の粒度分布	3-34
表	3.3.3-12	・・・・ ペレット充填材 A の移送前の湿潤かさ密度	3-35
表	3.3.3 <b>-</b> 13	・ ・ · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3-35
表	3.3.3-14	移送性能に影響を与えうる仕様項目とその影響	3-36
表	3.3.3-15	5 スクリュー回転数と設計移送性能の設定	3-40
表	3.3.3-16	5 充填予備試験 試験ケース	3-44
表	3.3.3-17	/ 装置・充填方法の充填密度への影響因子	3-57
表	3.3.3-18	3 ステップ0 試験実施手順(基本)	3-59
表	3.3.3-19	) 試験ケース	3-60
表	3.3.3-20	) ステップ1 試験実施手順	3-63
表	3.3.3-21	ステップ1 試験ケース	3-63
表	3.3.3-22	2 移送性能確認試験結果の整理	3-63
表	3.3.3-23	3 ステップ2の調査実施手順	3-67
表	3.3.3-24	ニステップ2 試験ケース	3-68
表	3.3.3-25	- ステップ3 - 試験実施手順	3-71
表	3.3.3-26	; ステップ3(フェーズ2) 試験ケース	3-73

表	3.3.3-27	ステップ3(フェーズ2) 試験結果の概要	3-73
表	3.3.3-28	ステップ4 試験実施手順	3-74
表	3.3.3-29	ステップ4 試験ケース	3-76
表	3.3.3-30	ステップ4 試験結果の概要	3-76
表	3.3.3-31	充填試験結果整理表:4-2(T-1~T-3)バルク	3-76
表	3.3.4-1	ステップ4試験ケース 4-2 の施工条件と実績	3-78
表	3.3.4-2	地下充填実証試験の施工条件	3-79
表	3.3.4-3	下部狭隘部への実充填質量	3-80
表	3.3.4-4	下部狭隘部充填密度(乾燥密度は材料製造時の含水比 6.5%を用いて	算出)3-81
表	3.3.4-5	地下実証試験結果とステップ4の結果との比較	3-81
表	3.3.6-1	充填場所の条件	3-82
表	3.3.6-2	段階的な技術実証の目的、実施条件および成果の概要	3-84
表	3.3.6-3	ペレット充填材性状	3-89
表	3.4.3-1	「かさ密度(乾燥密度)」に影響を与える要因・因子の整理	3-96
表	3.4.6-1	使用材料	3-101
表	3.4.6-2	使用材料の基本物性	3-101
表	3.4.6-3	吹付け機、強制二軸ミキサの主要な仕様	3-106
表	3.4.6-4	予備試験時のベントナイト混合土の仕様	3-107
表	3.4.6-5	吹付け予備試験 含水比、乾燥密度結果	3-109
表	3.4.6-6	吹付け前後のベントナイト配合率	3-110
表	3.4.6-7	ベントナイト混合土の仕様	3-111
表	3.4.6-8	吹付け要素試験(フェーズ1) 試験ケース	3-113
表	3.4.6-9	吹付け要素試験(フェーズ1) 乾燥密度結果	3-115
表	3.4.6-10	吹付け要素試験(フェーズ 2) 試験ケース	3-116
表	3.4.6-11	吹付け要素試験(フェーズ 2) 結果	3-118
表	3.4.6-12	吹付け要素試験(フェーズ1および2) 乾燥密度の結果	3-119
表	3.4.6-13	ベントナイト混合土の仕様および吹付け装置の運転条件等	3-120
表	3.4.6-14	模擬坑道 仕様	3-122
表	$3.4.6 \cdot 15$	ステップ4 吹付け機の運転条件	3-125
表	3.4.6-16	SM150T 仕様、外観	3-133
表	$3.4.6 \cdot 17$	誘電率計測による乾燥密度の算出結果	3-133
表	3.4.6-18	誘電率計とコアサンプリングによる乾燥密度の算出結果比較	3 <b>-</b> 134
表	3.4.6-19	3 次元計測器(FARO 社製 Foucus3DX330)の主な仕様	3-137
表	3.4.6-20	3次元計測による体積と吹付け重量からの乾燥密度の算出(1/2).	3-137
表	3.4.6-21	3次元計測による体積と吹付け重量からの乾燥密度の算出(2/2).	3-138
表	3.4.6-22	乾燥密度結果(算出方法毎)	3-138
表	3.4.6-23	団粒材の除去率およびリバウンド率の測定結果	3-140
表	3.4.6-24	吹付け施工速度、吹付け速度結果	3-142
表	3.4.6-25	SM150T 仕様、外観(再掲)	3 <b>-</b> 144

表	3.4.6-26	供試体一覧	3-146
表	3.4.6-27	含水比が異なる試料における出力値と体積含水率の関係	3-149
表	3.4.6-28	供試体の組み合わせと含水比・体積含水率の差分	3-150
表	3.4.6-29	誘電率計測による乾燥密度への換算手順	3-150
表	3.4.6-30	ベントナイト混合土(1 バッチ 約 350kg 当たり)の混合方法	3-152
表	3.4.6-31	ベントナイト混合土の保管による含水比変化の確認試験 手順	3-153
表	3.4.6-32	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	3-155
表	3.4.7-1	ベントナイト混合土 混合時の1バッチ当たりの基本配合	3-162
表	3.4.7-2	吹付け設備の主要機械	3-166
表	3.4.7-3	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	3-168
表	3.4.7-4	吹付け数量	3-169
表	3.4.7-5	管理項目 一覧	3-171
表	3.4.7-6	使用材料の含水比測定結果(混合前)	3-172
表	3.4.7-7	ベントナイト混合土の混合条件	3-172
表	3.4.7-8	上部開放部の吹付けによる充填結果	3-174
表	3.4.7-9	品質確認の実施時期 一覧	3-175
表	3.4.7-10	誘電率計測による乾燥密度への換算手順	3-177
表	$3.4.7 \cdot 11$	吹付け施工後の乾燥密度(3次元計測)	3-185
表	$3.4.7 \cdot 12$	乾燥密度に関する品質確認項目	3-188
表	3.4.7-13	乾燥密度結果 一覧	3-188
表	3.4.7-14	含水比に関する品質確認項目	3-191
表	3.4.7 - 15	ベントナイト配合率に関する品質確認項目	3-192
表	3.4.7-16	リバウンド材の捕集効率	3-193
表	3.4.7-17	吹付け施工サイクルタイム(全体・1m <sup>3</sup> 当たり)	3-194
表	3.4.7-18	施工速度	3-194
表	3.4.8-1	充填場所の条件	3-199
表	3.4.8-2	段階的な技術実証の成果概要	3-203
表	3.4.8-3	吹付け装置の運転条件	3-205
表	3.4.8-4	要素試験、地上試験、地下実証試験でのリバンウンド率	3-206
表	3.4.8-5	要素試験、地上試験、地下実証試験での施工速度	3-207
表	3.4.8-6	要素試験、地上試験、地下実証試験での団粒材除去率	3-212
表	3.4.8-7	改善前の混合方法(ベントナイト混合土(1バッチ約350kg当たり))	3-213
表	3.4.8-8	改善後の混合方法(ベントナイト混合土(1バッチ約350kg当たり))	3-213
表	4.2.2-1	除去技術の比較評価[4]	4-6
表	4.3.1-1	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)	4-8
表	4.3.2-1	本研究における機械的除去技術の選定検討	4-9
表	4.3.6-1	機械的除去装置の運転条件	4-15
表	4.3.6-2	アースオーガによるほぐしの施工効率	4-16
表	4.3.6-3	真空吸引装置よる撤去(吸引)の施工効率	4-17

表	4.3.6-4	オーガの除去手順による施工効率の比較結果	4-18
表	4.4.1-1	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)	4-20
表	$4.4.5 \cdot 1$	供試体作製条件	4-24
表	4.4.5 - 2	切削試験結果の一例(粉体ベントナイト供試体)	4-25
表	4.4.6-1	使用機械一覧	4-27
表	4.4.6-2	奥行方向に対する切削能力の試験結果	4-28
表	4.4.6-3	切削試験結果一覧	4-29
表	4.4.7-1	除去装置の仕様	4-32
表	4.4.7-2	ノズルの種類と切削性・掻き出し性	4-34
表	4.4.7-3	除去装置の円弧状移動速度	4-35
表	4.4.7-4	トルネードノズルの前進速度における充填材の含水比の試算	4-35
表	4.4.8-1	流体的除去技術 ウォータージェット方式 除去速度、施工速度	4-42
表	5.2.2-1	搬送定置・回収技術の昇降方式	5-3
表	5.2.2-2	搬送定置・回収技術の走行方式	5-4
表	5.2.3-1	定置・回収装置の整備方針	5-6
表	5.2.3-2	定置・回収装置の設計条件	5-7
表	5.2.3-3	本事業における搬送定置・回収技術の整備計画	5-8
表	$5.3.1 \cdot 1$	本事業での PEM の仕様	5-9
表	5.3.1-2	地下実証試験場所の制約条件	5-10
表	$5.3.1^{-3}$	定置・回収装置に対する主な要求機能及び要求性能	5-11
表	5.3.1-4	エアベアリング主要仕様	5-12
表	$5.3.1^{-5}$	定置部の基本仕様	5-14
表	5.3.1-6	搬送部の基本仕様	5-17
表	5.3.1-7	制御部の基本仕様	5-21
表	5.3.1-8	定置・回収装置の安全対策	5-22
表	5.3.1-9	定置・回収装置の故障対策	5-24
表	$5.3.1 \cdot 10$	定置・回収装置の仕様一覧	5-26
表	$5.3.2 \cdot 1$	鋼製坑道試験の試験項目	5-35
表	5.3.2-2	主なインターロック機能に対する確認結果	5-36
表	5.3.2-3	鋼製坑道試験における押引力及び摩擦係数	5-39
表	$5.3.3 \cdot 1$	地下要素試験の試験内容(1/2)(き裂補修前)	5-45
表	5.3.3-2	地下要素試験の試験内容(2/2)(き裂補修後)	5-46
表	5.3.3 - 3	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	5-47
表	5.3.3-4	地下要素試験(Run326 と Run327)における牽引力	5-51
表	5.3.3 - 5	地下要素試験(Run316 と Run317)における牽引力	5-51
表	5.3.3-6	地下要素試験(Run228 と Run229)における牽引力	5-51
表	5.3.3-7	地下要素試験(Run216 と Run217)における牽引力	5-52
表	5.3.3-8	地下要素試験(Run326 と Run327)における供給空気全流量	5-53
表	5.3.3-9	地下要素試験(Run316とRun317)における供給空気全流量	5-53

表	5.3.3-10	地下要素試験(Run228 と Run229)における供給空気全流量	5-53	
表	$5.3.3 \cdot 11$	地下要素試験(Run216 と Run217)における供給空気全流量	5-54	
表	$5.3.3 \cdot 12$	地下要素試験における浮上量と重量に対する比較結果	5-55	
表	$5.3.3 \cdot 13$	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・	王力5-56	
表	$5.3.4 \cdot 1$	地上検証試験の試験項目	5-60	
表	5.3.4-2	地上検証試験における浮上量、流量及び圧力	5-61	
表	5.3.4-3	地上検証試験における重量別の押引力について(乾燥面)	5-63	
表	5.3.4-4	地上検証試験における走行路面別の押引力について	5-63	
表	5.3.4-5	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	5-63	
表	$5.3.5 \cdot 1$	地下実証試験の試験内容	5-73	
表	5.3.5-2	地下実証試験における浮上量、流量及び圧力	5-75	
表	$5.3.5^{-3}$	地下実証試験における動作方向別の押引力と鋼製面との比較	5-75	
表	6.3.2-1	「回収」についての質問内容の詳細	6-15	
表	6.3.2-2	来館者の地層処分に関する感想の例	6-16	
表	6.3.2-3	来館者の施設・説明に関する感想の例	6-17	
表	7.1.1-1	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	の枠組み	
表	7.2.3-1	回収可能性の維持期間中の金属材料の腐食環境	7-19	
表	8.1.1-1	回収の容易性を設計に考慮する際の多様な方法の例 [1]	8-1	
表	8.2.2-1	アクセス性向上の要素における考慮事項の例	8-19	
表	8.2.2-2	ハンドリング性向上の要素における考慮事項の例	8-19	
表	8.2.2-3	回収の容易性向上の視点とポイント	8-20	
表	8.2.2-4	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	
	向上のフ	ポイントの整理	8-21	
表	8.2.2-5	横置き・PEM 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ジ	容易性向	
上のポイントの整理				
表	8.3.2-1	工学的方策の組合せに関する相互関係のまとめ	8-42	
表	8.4.1-1	A(隙間充填を必要としない円形小断面坑道)と他の方策の組合せの関	係性8-	
43				
表	8.4.2-1	工学的方策ごとの「相乗」効果の数	8-44	
表	$8.5.2 \cdot 1$	解析に用いた物性値	8-58	
表	8.5.2-2	出力点における最高温度	8-72	
表	8.5.2-3	緩衝材の出力点において 100℃を超えた時間帯と最高温度	8-73	
表	8.5.2-4	岩盤の出力点において 150℃を超えた時間帯と最高温度	8-73	
表	8.5.2-5	出力点における最高温度	8-83	
表	8.5.2-6	緩衝材の出力点において 100℃を超えた時間帯と最高温度	8-83	

### 第1章 緒言

#### 1.1 事業の概要

1.1.1 事業名

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)(以下「本事業」という)

#### 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。

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

<sup>(「</sup>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)

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。

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)
<ol> <li>回収可能性の維持期間内</li> </ol>	○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
において、廃棄体へのアク	る(廃棄体を完全に埋め戻さない設計など:図 1.2.2-2)
セスを容易にしておく	
	○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	○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
来の回収作業が容易とな	定の工夫など)
るようにしておく	
	○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

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



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。

#### 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。

以下に、前記(3)で整理した項目の1つである安全性への影響について、操業期間中の安全性 への影響と閉鎖後長期の安全性への影響に分けて定量化の具体的な項目を示す。

- 1) 操業期間中の安全性への影響
- 回収可能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響
  - 開放坑道内の作業空間の安全性:

保守管理のための開放坑道内への人の出入り、装置の可動範囲の確保など、開放坑道内の作 業空間の安全性確保の観点から設定する。検討の出発点として以下の3項目を挙げた。

開放坑道の健全性

支保や覆工等の健全性に係わるもの

- ・ 開放坑道内(作業空間)への廃棄体からの熱影響
   埋め戻し状態に応じた作業空間への熱影響、換気系統の効果や健全性など
- ・ 操業段階に適用する技術の具体化
- 回収作業時の安全性への影響(回収を実施する場合)
  - 回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性:

一度埋め戻した坑道の再掘削/再利用を前提とする場合に、回収時に再利用する坑道内の作 業空間の安全性確保の観点から設定する。

- ・ 埋め戻した坑道の再利用時の健全性
   再利用時の支保や覆工等の健全性に係わるもの
- ・ 再利用する坑道内の安全な作業環境確保
  - 廃棄体近傍を再掘削では廃棄体からの放射線や熱の影響。坑内湧水の状況など
- ・ 操業段階に適用する技術の具体化
- 回収時の廃棄体容器の健全性

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を踏まえた、廃棄体容器の健全 性に係わるもの

2) 閉鎖後長期の安全性への影響

回収可能性の維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合の閉鎖後長期の安全性への影響に 係る項目を具体化する。回収可能性の維持に伴う安全性への影響は3つの視点があると考えら れる。具体化した項目の検討は、影響事象とその過程に留意して行う必要がある。

- ◆ 地下に構築する人工バリアを含む構造物が維持期間中に受ける影響により閉鎖後長期の 評価の初期条件が変わることによるもの。
- ◆ 維持期間中に受ける影響で評価の前提とする場(ニアフィールド等の母岩)の環境が変 化することで閉鎖後長期の変遷挙動が変わることによるもの。
- ◆ 両方の複合的な相互影響により、閉鎖後長期の安全性への影響が変わるもの。

- 回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う人工バリア等に期待する安全機能への影響
   回収可能性維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、人工バリア(及び他の地下構造物)に期
   待する閉鎖後長期の安全機能への影響を取り扱う。
  - ・ 開放坑道を介した空気(酸素)の持ち込みによる人工バリア等の機能劣化等の影響
     回収維持期間中は開放坑道を介して地上の空気が地下に持ち込まれるため、酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる人工バリア等への影響を扱う。空気による場の酸化性雰囲気への変化の影響、緩衝材等の再冠水過程への影響、それらに伴う人工バリア等の状態変遷プロセスへの影響などの事象への要因となる。
  - 廃棄体からの熱による影響

坑道の埋め戻し状態の違いによって廃棄体から発生する熱の伝播環境が変わるため、 それらを踏まえた人工バリア等への熱影響を扱う。断熱効果の高い空気の存在、熱によ る緩衝材等の変質、再冠水過程への影響の事象への要因となる。

坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響

回収維持期間中の開放坑道の存在によって継続される坑内湧水に伴う人工バリア等への影響を扱う。緩衝材等の流出現象、再冠水過程への影響、それに伴う人工バリア等の 状態変遷などの事象への要因となる。

回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う天然バリア(母岩)に期待する安全機能への影響

回収可能性維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、天然バリア(母岩)に期待される閉鎖後 長期の安全機能に係わる次のような影響を取り扱う。

・ 地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度

地下にある物質は主に地下水によって運ばれるが、地下深部では地下須の動きが極め て遅いため、物質の異動が非常に遅い特徴があるが、坑道が解放されている間の排水に よる、地下深部の水の動きへの影響や、化学組成の異なる地下水の引き込みの影響など が挙げられる。

空気の影響

地下深部の本来の環境は、酸素の量が極めて少なく、化学反応が抑えられ、物質を変 質させにくい特徴があるが、開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる 母岩側へ与える影響への要因となる。

ベースライン(建設前の元の地下環境の状態)への回復過程と回復の程度、など
 上記2項目に関連する事象の時間変遷

3) 回収の容易性(回収作業時間)

回収の容易性を測る指標の一つである回収作業時間を指標として、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つの視点で捉える。

より合理的な回収作業の実現に向けた技術検討/研究開発:

回収時間の短縮に向けた回収方法(技術・装置)の高度化:

回収作業時間の算定には単位ユニットあたり(廃棄体1体或いは処分坑道1本当たりの複数 廃棄体)の回収作業時間が必要となる。単位ユニットあたりの回収作業時間は、定置概念オプ ションや設計に応じて適用される回収方法に依存する。より合理的な回収作業の実現に向けた 回収方法(技術・装置)の高度化に係る検討や研究開発が望まれる。

回収作業手順の具体化:

上記で検討が進められる回収方法を踏まえ、より合理的な全体回収作業の実現に向けて、施 設レイアウト設計や坑道寸法設計等の工学的対策や回収作業手順の具体化が必要となる。これ らの具体化検討では、機器の故障対応(補修)や複数坑道での同時作業を念頭に置いた合理化 方策など(地下施設内での再掘削ズリや回収廃棄体の一時置き場の利用等)が考慮される。

● より回収の容易性を高めた処分場の設計開発:

現時点における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つの定置概念を検討の出発点としている。今後、表 1.2.2-1 に示した回収の容易性を設計に 考慮する際の多様な方法の導入や組合せに関する検討を進め、前提とした2つの処分概念オプ ション以外の新たなものを含めて、より回収の容易性を高めた処分場の設計開発に係る検討を 進める。前提とした2つの処分概念オプション以外の新たな設計を考慮する際には、併せて、 新たな設計に適用可能な技術検討/研究開発のみならず、安全性への影響に関する技術検討も 必要となる。

4) 最終閉鎖前の回収可能性を維持できる期間

1)操業期間中の安全性への影響、2)閉鎖後長期の安全性への影響で扱う、安全性の影響に関す る技術検討結果に基づき定量化される。固有の技術検討項目は想定されない。

5) 回収可能性に係る費用

1)操業期間中の安全性への影響、2)閉鎖後長期の安全性への影響、3)回収の容易性(回収作業時間)4)最終閉鎖前の回収可能性を維持できる期間の技術検討結果に基づき定量化される。固 有の技術検討項目は想定されない。 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。

ウ島ルナズキ桂和		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)					
正重化9へさ	処分	処分孔竪置き方式 処分坑道横置き・PE				PEM方式	
		OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3
1.安全性へ	(1)操業期間中の安全性への影響						
の影響	<ol> <li>①回収可能性維持期間中の開放坑 道の安全性への影響</li> </ol>						
	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、人エバリ 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						
<b>2.</b> 回収の容 易性(回	(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)						
収作業時 間)	(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							

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

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。

(2) 技術検討の展開

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の議論を通して整理・具体化された、我が国おける回収可能性の維持に係る2つの技術的アプローチを以下に再掲する。

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 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

検討会における議論をとおして、我が国で有望とされている2つの定置概念を出発点として、 回収方法の技術開発の必要性や回収可能性の状態オプションに対するトレードオフの関係(安全 性、容易性、維持が可能な期間、回収費用)を整理するとともに、維持の状態設定や設計オプシ ョンの選択を含む技術アプローチの比較検討等に資する回収可能性の維持に伴う影響の定量化項 目の具体化を行った。これらを踏まえ、我が国における回収可能性に係る技術検討の考え方を以 下に整理する。

1) 有望とされる2つの定置概念を出発点とした技術検討

我が国で有望とされている処分孔竪置き定置方式と処分坑道横置き・PEM 方式の2つの定置 概念を検討の出発点とする場合の展開である。これら2つの定置概念は、廃棄体の定置後に新 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(以下、「回収可能性の維持期間」と いう)に伴う影響が設計に考慮されていない。図 1.2.3・1 に各技術アプローチの関連を示す。

a 技術的アプローチ①:回収方法の開発

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中の処分場の状態として、処分 坑道が埋め戻されて端部にプラグが施工された状態オプション2を基本ケースとして選択する [7]。この場合の回収工程は、先ず処分坑道の坑口に施工された力学プラグの撤去作業、処分坑 道の埋戻し材の再掘削による廃棄体近傍までのアクセスルートが確保される。処分孔竪置き方 式の場合はオーバーパック回収のための緩衝材の除去、続いて処分孔からのオーバーパックの 引上げ、処分坑道外への搬送と続く。処分坑道横置き・PEM 方式の場合は、PEM の形態で廃 棄体を回収する場合は、PEM 周囲の隙間充填材の除去、処分坑道外への PEM の搬出と続く。 回収方法の開発においては、適切に設定(仮定)した坑道の形状、回収対象の廃棄体の状態や 健全性を前提として高度化開発に取り組む。研究開発のトレーサビリティ確保の観点から、検 討から除外した条件ならびに高度化開発のプロセスや結果に影響を及ぼす事項についての整理 を進めるとともに、技術の適用限界などを明示的に示していくことが望まれる。

b 技術的アプローチ②-1:現行の定置概念に容易性の視点を導入

1.2.2(4)1)操業期間中の安全性への影響、1.2.2(4)2)閉鎖後長期の安全性への影響に留意しつつ 回収の容易性を高めるための設計オプションの導入に関する検討を進める(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おける状態オプションの設定など)。設計オプショ ンの導入の有効性は、回収時間短縮の見通しや安全性に有意な影響が及ばないことの確認など、 最終的には技術検討のフレームワーク(表 1.2.3-1)の空白部分を具体化していくことで進める ことができる。このように同フレームワークを活用することで、例えば、状態オプションの選 択におけるオプション間の比較評価などが可能となるだけでなく、定量化された回収可能性の 維持に伴う影響は、その低減に向けた対策技術の検討(例えば回収作業のための坑道の補修な どの対策工の検討など)、あるいは、回収作業時の廃棄体の状態や作業環境の条件の見直しを含 む技術アプローチ①における回収技術の高度化開発への反映へと展開することができる。

c 技術アプローチ②-2:回収の容易性を設計に考慮(回収作業時間の短縮の観点)

回収可能性の維持に伴う影響が設計に考慮されていない現行の2つの定置概念に対する回収 可能性の確保は、技術アプローチ①、技術アプローチ②-1によって技術的な実現性が確保さ れていく。回収の容易性という新たな要件に留意しつつ、今後のサイト選定や技術の発展に対 応した定置概念の柔軟性を更に高めていくために、現行の概念や設計にとらわれない回収容易 性を高めた代替設計オプションの検討を進める。代替オプションの検討は、1.2.2(4)3)に述べた ように回収作業時間を指標として代替設計オプション(案)を構築する。その後、地層処分と しての成立性や技術的実現性などを検討していく。



### 検討の出発点

図 1.2.3-1 2つの定置概念を出発点とした回収可能性の維持に係る技術検討

2) 検討の進展

回収可能性に係わる技術開発や、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などの検討などが進展した後の各技術アプローチの関連を図 1.2.3-2 に示す。

技術アプローチ②-1における回収可能性の維持に伴う影響の定量化により、安全性への影響、回収の容易性(維持の状態オプション)、最終閉鎖前の回収可能性を維持できる期間といったトレードオフの関係にあるものについて、状態オプション間の比較評価が可能となる。また定量化される安全性への影響に対して、対策の検討が可能となり、現行の定置概念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に対する設計上の考慮があるものに更新することが可能となる。これらは、同期間における合理的な状態設定の一助となる。

地層処分としての成立性や工学的実現性の見通しが得られた代替設計オプションの抽出には、 現行の2つの定置概念に対する回収可能性の維持に伴う影響と同様に、トレードオフの関係に ある項目の見直し・更新を伴いつつ、影響等の定量化等の検討をとおして評価がなされる。こ のような検討や評価をとおして、新たな代替設計オプションに対しても、より合理的な設計と することが可能となる。

(51) エジマフェーブの第日			
セーフティケースの更新	処分孔竪置き方式	処分坑道横置き・PEM方式	代替設計オプションA
・技術アプローチ① 回収方法の開発	(再掘削)⇒除去⇒回収	(再掘削)⇒除去⇒回収	(再掘削)⇒除去⇒回収
<ul> <li>・技術アプロ−チ②−1</li> <li>現行の定置概念に 容易性の視点を導入</li> <li>・状態オプション比較評価</li> <li>・状態オプション比較評価</li> <li>・状態オプション比較評価</li> <li>・状態オプション比較評価</li> <li>・・・</li> <li>・・</li> <li>・・・</li> <li>・・</li> <li>・・</li></ul>	埋戻し状態の工夫 OP1 OP2 OP3 合理的な維持状態の設定 ・ 再掘削少 再掘削多 従動的管理 受動的安全	埋戻し状態の工夫 <u>OP1 OP2 OP3</u> 合理的な維持状態の設定 再掘削少 再掘削多 能動的管理 受動的安全	埋戻し状態の工夫 OP1 OP2 OP3 合理的な維持状態の設定 ▲ ・ ・ 維持の影響定量化
			→検討項目の更新

図 1.2.3・2 検討の進展後(例:研究フェーズの節目、セーフティケースの更新、など)

以上のような回収に係る研究開発や評価・検討を進めすことによって、現在有望とされている2つの定置概念あるいは回収の容易性向上の観点から構築した代替設計オプションについて、 回収可能性の維持に伴う安全性への影響や、回収の容易性といった指標で各定置概念を客観的 に比較評価できるようになる。このような技術検討に立脚した検討の成果は、図 1.2.1-1 に示 した可逆性・回収可能性のある地層処分の具体的なプロセスに寄与すると考えられる。

#### 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)

我が国では堅置き方式と横置き・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。堅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。



#### 1.4 本報告書の構成

本報告書は以下の内容で構成される。

- 第1章 緒言(本章)
- ・ 第2章 地下環境での実証試験の成果概要
- 第3章 隙間充填技術の実証的整備
- 第4章 隙間充填材除去技術の実証的整備
- ・ 第5章 定置・回収技術の実証的整備
- · 第6章 地層処分実規模試験施設
- 第7章 回収可能性の維持に伴う影響の定量化手法の整備
- ・ 第8章 回収容易性を高めた代替設計オプションの検討
- 第9章 結言

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 Highlevel 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) 堅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、堅置き・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、堅置き・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]。堅置き・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。

机分概令	操業に必要な技術				
70 77 196 105	搬送定置	隙間充填	緩衝材除去	回収	
竪置き方式	<b>技術材型型設備</b>	充填装置	援御材除去装置。	<b>底架体引上け機構</b>	
横置き方式		充填装置	充填材除去装置	定置の逆動線	

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。

#### 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。

#### 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。

- 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<sup>3</sup>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<sup>3</sup> かつ有効粘土密度 1.1Mg/m<sup>3</sup>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。

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
		①充填場所の	充填場所の	隙間形状	壁面形状寸法	
		状態状態によ	状態		PEM 形状寸法	
		る影響			PEM 台座形状	寸法
				壁面状態	表面粗さ	
					濡れ・湧水	
	2			造粒方法         ブリケッ           打錠法・		ブリケッティング法 打錠法・・・・
					定填材仕 材料混合	ベントナイト
		<ul><li>②充填材の品 質による影響</li></ul>		充填材仕		ケイ砂等
	王小万米		<b>赤埴材</b> の品	禄		水 (加水)
かさ	透水馀剱		質		約审調赦	造粒体種類
密度	膨潤圧		松皮調整       輸送時       材料分離       自重による       貯蔵時     自重による	松皮砌雀	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	
				充填量の 制御スクリュー回転数 運転時間		云数
		③装置・充填 方法による影 方				
			装置・充填 方法	充填材流 動の制御	付加層装置(排	印止板)の配置
		Ŧ		充填範囲	スクリュー配置	Ē.
				の分担	スクリュー回転	云数比



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/m<sup>3</sup>)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 3.3.3-6参照)。



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

ケース No.	含水比(%)	湿潤密度(Mg/m <sup>3</sup> )	乾燥密度(Mg/m³)
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 2.2.3-2 ブリケッティングによる造粒ペレットの粒子密度

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 <sup>3</sup>	2.14	2.10	2.19	2.14
乾燥密度 Mg/m <sup>3</sup>	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
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	<ul> <li>・スクリューピッチ 2種(70mm、 140mm)</li> <li>・スクリュー回転数 3種(33.6rpm、 25.5rpm、 16.8rpm)</li> <li>・充填材供給口形状</li> </ul>	クニゲル GX 含水比:9.6% 初期湿潤か さ密度(参考 値): 1.236Mg/m <sup>3</sup>	<ul> <li>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。</li> <li>直径 90mm×7mのスクリューフィーダで移送が可能である</li> <li>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)</li> <li>スクリューピッチは140mmと比較し70mmの移送性能が高い</li> <li>材料供給口形状は Φ90mmの場合、50 mm×90 mm以上であれば移送性能は変わらない</li> </ul>
ステップ1 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	<ul> <li>スクリュー回転数</li> <li>3種(33.6rpm、</li> <li>25.5rpm、</li> <li>16.8rpm)</li> </ul>	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/m <sup>3</sup>	<ul> <li>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、</li> <li>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。</li> <li>33.6rpmのとき 12.5kg/min(乾燥質量で 11.5kg/min)</li> <li>16.8rpmのとき 6.25kg/min(乾燥質量で 5.7kg/min)</li> <li>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。</li> </ul>
ル上での予備試験	充填率を高める ための製作(スクリュー回転数、スクリュー回転数、スクリュー回転の充填品で) 中回転方向、抑止板の影響でした スクリュー回転方は品での影響でした スクリュー回転の影響でした スクリュー回転の影響でした スクリュー配置 の妥当性確認)	<ul> <li>スクリュー回転数 3種(33.6rpm、 25.5rpm、 16.8rpm)</li> <li>スクリュー回転方 向</li> <li>抑止板の有無</li> </ul>	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/m <sup>3</sup>	<ul> <li>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。</li> <li>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</li> <li>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</li> <li>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</li> <li>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。</li> </ul>
地上での予備試験	下部狭に対して 部状に対して 適切な充ちきる施 工条件、施工条 件設定手法の構 築	<ul> <li>上段スクリュー回転数</li> <li>下段スクリュー回転数</li> <li>スクリューフィーダ移動速度</li> </ul>	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)
ステップ4	幌延 URL 試験 抗道 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	<ul> <li>初期充填量</li> <li>スクリューフィー ダ移動速度</li> <li>後充填量</li> </ul>	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 3.3.3-70 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 3.3.3-25 に示す。

	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

表	2.2.3-5	ステップ3	試験実施手順
---	---------	-------	--------

初期充填、移動充填、後充填の実施イメージを図 3.3.3-68 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 3.3.3-69 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 3.3.3-30 に、 試験結果整理表を表 3.3.3-31 に示す。

		甾位時間	当たり 教送!	⊒.	≣∆	.÷	移動	充填		結乳	<b></b>
試験ケース	(;	単位時間 kj 括弧内はス	ョたり移送』 g/min クリュー回!	<b>些</b> 転数)	初期充填 (kg)		フィーダ 設定移動 速度	設計 充填量	後充填 kg	土槽充填 かさ密度 (乾燥)	充填率 (1.37Mg/m <sup>3</sup> に対し)
	左右	上段	下段	合計	上段	下段	mm/min	kg/m		Mg/m <sup>3</sup>	%
A 1 T 1	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	14.7	17.2	00.9	169 5	8.5	1.354	98.8
4-1 1-1	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	14.7	17.2	99.8	169.5	8.5	1.373	100.2
4 4 7 7 7	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	22.5	17.2	00.9	169 5	8.5	1.357	99.1
4-1 1-3	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	22.5	17.2	99.8	169.5	8.5	1.374	100.3
40 T 4	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	05.4	177 3	8.5	1.368	99.9
4-2 1-1	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	95.4	177.3	8.5	1.378	100.6
42 72	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	05.4	177 3	12.4	1.360	99.3
4-2 1-2	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	95.4	177 3	12.4	1.374	100.3
4.2 7.2	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	05.4	177 3	7.6	1.362	99.4
4-2 1-3	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	95.4	177.3	7.6	1.387	101.3

表 2.2.3-6 ステップ4 試験結果の概要

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 <sup>3</sup> )	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 <sup>3</sup> )	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 3.3.3·31 および表 3.3.3·31 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:1.051m<sup>3</sup>/m、左 1.061m<sup>3</sup>/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。

	充填材含水比		7.6.0	フクリュー回転演奏			初期充填(20cm)				移動充填			充填			
試験ケー ス	左右	<u>狭隘部</u> 断面積 (m <sup>2</sup> )	8.8%の場合 の単位長あた りの所要充填 営業	スクリ 比率設	リュー回転速度 および 設定(kg/min)		充填時間 設定(sec)		初期充填 設定充填賞量 (kg/20cm)		移動充填 設定充填質量 (kg/m)		移動速度 設定	充填 時間	設計 充填賞量	実充填 かさ密度 (乾燥) (Mg/m <sup>3</sup> )	充填率 (1.37に対 し) (%)
			(kg/m)	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	(mm/min)	(sec)	(kg)	(1018/111/	
4 3 7 1	左	0.1061	158.1	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	15%	177.3	12%	05.2	30	8.5	1.368	99.9
4-2 1-1	右	0.1051	156.7	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	16%	177.3	13%	95.3	30	8.5	1.378	100.6
4 2 7 2	左	0.1061	158.1	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	15%	177.3	12%	05.2	44	12.4	1.360	99.3
4-2 1-2	右	0.1051	156.7	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	16%	177.3	13%	95.3	44	12.4	1.374	100.3
4 2 7 2	左	0.1061	158.1	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	15%	177.3	12%	05.2	27	7.6	1.362	99.4
4-2 1-5	右	0.1051	156.7	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	16%	177.3	13%	35.5	27	7.6	1.387	101.3

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

表 2.2.3-9 地下充填実証試験の施工条件

	充填材含水比		充填材含水比				初期充填(22cm)			移動充填			後充填				
<u>試験</u> ケース	左右	狭隘部 断面積 A (m <sup>2</sup> )	6.5%の場合 の単位長あた りの所要充填 質量 Wo	スクリ 比率設	ュー回転 および 定(kg/m	速度 in)	充填 設定	;時間 (sec)	初 設定 (kg	朝充填 充填 <b>質量</b> Wi /20cm)	移動 設定充: W (kg	充填 填質量 /m /m)	移動速度 設定値 S	充填 時間 (sec)	設計 充填質量	実充填 かさ密度 (乾燥) (Mg/m <sup>3</sup> )	充填率 (1.37に対 し) (%)
			(kg/m)	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	(mm/min)		(kg)		
地下充填	左	0.1058	154.4	7.57	8.84	16.41	164	125	39.2	15 59/	173.7	13 59/	04.5	44	12.0		
実証	右	0.1068	155.8	7.65	8.92	16.57	164	125	39.6	13.3%	175.3	12.3%	54.5	44	12.2		

b 地下実証試験実施状況

図 3.3.4-1 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0.3538m<sup>3</sup>、右隙間:約0.3571m<sup>3</sup>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0.3570m<sup>3</sup>、右:約0.3603m<sup>3</sup>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/m<sup>3</sup>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 3.3.3-31 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。

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
<b>工如独珍如长之家在(H3</b> )	湿潤	1.467	1.492
ト部狭隘部から密度(Mg/m°)	乾燥	1.378	1.401

表 2.2.3-10 地下実証試験結果

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

			充填材含水比		72 13		1	切期充均	ų (20o	m)		移動充填	t i	後	充填		
試験 ケース	左右	狭隘部 断面積 A (m <sup>2</sup> )	8.8%の場合 の単位長あた りの所要充填 質量 Wo	スクリ 比率設	ュー回転 および 定(kg/m	速度 lin)	充填 設定	(時間 (sec)	初) 設定 (kg	朝充填 充填實量 Wi /20cm)	移動 設定充 W (kg	充填 填質量 /m /m)	移動速度 設定値 S	充填 時間 (sec)	設計 充填質量	実充填 かさ密度 (乾燥) (Mg/m <sup>3</sup> )	充填率 (1.37に対 し) (%)
			(kg/m)	上段 su	下段 sl	合計	上段	下段		RHに対する 影響車		調査 18時に対4.9前	(mm/min)		(kg)	27	
4272	左	0.1061	158.1	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	15%	177.3	12.1%	05.2	44	12.4	1.360	99.3
4-2 1-2	右	0.1051	156.7	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	16%	177.3	13.1%	95.5	44	12.4	1.374	100.3
			充填材含水比	**				の期充均	<b>(22</b> c	Ë		移動充填	(	後	充填		Ĩ
<b>試験</b> ケース	左右	狭隘部 断面積 A (m <sup>2</sup> )	6.5%の場合 の単位長あた りの所要充填 質量 Wo	スクリ 比率設	ュー回転 および 定(kg/m	速度 lin)	充填 設定	( <b>11)</b> (sec)	初 設定 (kg	朝充填 充填實量 Wi /20can)	移動 設定充 Vi (kg	充填 填質量 /m /m)	移動速度 設定値 S	充壤 時間 (sec)	設計 充填質量	実充填 かさ密度 (乾燥) (Mg/m <sup>3</sup> )	<del>充填率</del> (1.37に対 し) (%)
			(kg/m)	上段 su	下段	合計	上段	下段		取計に対する 期間第		設計に対する制 増率			(Kg)		
地下充填	左	0.1058	154.4	7.57	8.84	16.41	164	125	39.2	10.000	173.7	12.50	04.5	44	12.0	1.378	100.6%
実証	右	0.1068	155.8	7.65	8.92	16.57	164	125	39.6	13.5%	175.3	12.5%	54.5	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(φ 2600mm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『3.3.6(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。

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 3.3.6-1 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 3.3.3・31 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 3.3.3-70 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 3.3.6-2 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

<sup>(</sup>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 3.3.6-3 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 3.3.6-4)。



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/m<sup>3</sup>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<sup>3</sup> 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<sup>3</sup>(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<sup>3</sup>(有効粘土密度 1.15Mg/m<sup>3</sup>) 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

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 3.4.3-1、図 3.4.3-1 に整理して示す。

品質管理指標	要因		因子
	<ol> <li>①充填場所の状態</li> </ol>	隙間形状	<ul><li>坑道形状・寸法</li><li>PEM 形状寸法</li></ul>
	による影響	壁面状態	表面粗さ 通水状能(通水量 温湿度)
かさ密度	②装置・充填方法	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
(轧)深名及)	による影響	吹付け方法・手順	吹付け順序 リバウンド材処理
		原材料	<ul><li>ベントナイト</li><li>混合する掘削土</li><li>水 (加水)</li></ul>
	<ul><li>③充填材の品質</li><li>による影響</li></ul>	<ul> <li>充填材の締固め性</li> <li>充填材の製造</li> <li>貯蔵・輸送</li> <li>充填後の品質確認手法</li> </ul>	配合比、含水比、密度 混合方法、材料分離・団粒化 材料分離、圧縮 直接的 間接的計測手法

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



(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 3.4.4-1)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 3.4.3・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、<br/>
②装置・充填方法<br/>
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<br/>
組んだ。本研究の吹付け方式の充填技術の整備手順を図 3.4.5-1 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 3.4.5-1 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 3.4.6-32)。

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 3.4.8-2 に要約する。 表 2.2.4-2 ベントナイト混合土の仕様お上び吹付け機の運転条件等

1 4.4		イド低百工の国家ねよの外的の機の連転未任寺
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 <sup>3</sup>
ゆけけと	エアー量	10~12 m <sup>3</sup> /min
の軍転冬姓	回転数	5rpm
0)運転未住	吐出圧	0.7MPa
	吹付け距離	(目標)1m 程度
ゆけけち注	吹付け角度	(目標)吹付け面と吹付けノズルの角度を垂直
欧国の方法	吹付け機械の	伸縮アーム式吹付け機械(汎用機械)を使用し
	操作	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
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 <sup>3</sup> 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)	<ul> <li>・ベントナイト混合土に 配合するケイ砂の種類</li> <li>・締固めエネルギー</li> </ul>	<ul> <li>・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</li> <li>・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<sup>3</sup>の結果を取得</li> <li>・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<sup>3</sup>)の達成を確認</li> </ul>
、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	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	<ul> <li>・ベントナイト混合土の 含水比</li> <li>・ベントナイト混合土に 配合するケイ砂の種類</li> <li>・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</li> </ul>	<ul> <li>・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</li> <li>・目標乾燥密度(1.6Mg/m<sup>3</sup>)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</li> <li>・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</li> </ul>
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	<ul> <li>・ 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</li> <li>・ 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</li> </ul>	<ul> <li>・吹付け装置のエアー量4条件(9、10、12、18m³/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</li> <li>・エアー量9m³/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</li> <li>・エアー量18m³/minのケースでは、目標乾燥密度に対し、 +0.15~0.24Mg/m³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</li> <li>・回転数は最も高密度となる5rpmを採用</li> <li>・目標乾燥密度1.60Mg/m³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 m³/min、回転数 5rpmを設定</li> </ul>

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	<ul> <li>・ 吹付け装置の運転条件 として エアー量 10~12m<sup>3</sup>/min 回転数 5rpm</li> <li>・ 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</li> </ul>	<ul> <li>・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、</li> <li>1.61Mg/m<sup>3</sup>となり、目標乾燥密度 1.6 Mg/m<sup>3</sup>を満足</li> <li>・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</li> <li>・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</li> </ul>
-------	---	--	---

(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 3.4.6-32)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 3.4.7-3 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/m<sup>3</sup>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 3.4.7-5 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 3.4.6-24)、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 3.4.6-26)を使用した。

項目	用途・仕様	外観
伸縮ブーム延長	2100mm	normel B.
ノズル回転	360°	Part II The
ノズル傾き	180°	
ブーム回転	$110^{\circ}$	
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	A STATE OF STATE					
最大骨材寸法	15mm						
所要空気圧	0.74MPa						
回転数	5~16.5rpm						
吐出量	20m <sup>3</sup> /h						
	(ホース 20m,0.74MPa 時)						
備考;上記はメー	備考;上記はメーカカタログ値(標準的な性能)						

3	图 2.2.4-7 吹付日	け機(ニードガン)の仕様
項目	用途・仕様	外観
吸引内径	75mm	- Charles - Char
排出内径	125mm	X
全長	1010mm	
幅	280mm	The second secon
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 3.4.6-32)である。地下実証試験の吹付け状況を図 3.4.7-20 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



ノズル先端部



吹付け機械からノズル先端への材料圧送



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/m<sup>3</sup>)>誘電率計 測による乾燥密度(1.55Mg/m<sup>3</sup>)>3次元計測による乾燥密度(1.49Mg/m<sup>3</sup>)、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。

	コアサンプリング		誘電率計測		3Dスキャナ計測	
	地上	地下	地上	地下	地上	地下
	実証試験	実証試験	実証試験	実証試験	実証試験	実証試験
平均乾燥密度	1 6 1	1.66	1 50	1 55	1 / 1	1.40
(Mg/m <sup>3</sup> )	1.01	1.00	1.50	1.55	1.41	1.49
標準偏差(Mg/m <sup>3</sup> )	0.05	0.08	0.13	0.09	0.10	0.09
中央値(Mg/m <sup>3</sup> )	1.62	1.67	1.61	1.57	1.39	1.53
範囲 (Mg/m <sup>3</sup> )	0.27	0.43	0.62	0.66	0.22	0.26
最大値(Mg/m <sup>3</sup> )	1.70	1.83	1.74	1.78	1.54	1.59
最小値(Mg/m <sup>3</sup> )	1.44	1.39	1.12	1.12	1.32	1.33
標本数	64	147	190	588	4	8

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)

◆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。

団粒材の除去率(%) = 団粒材の除去量 混合用ミキサへの材料投入量 × 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 3.4.8-4 に示す。

		団粒材除去率		判	昆合方法
ステップ <b>3</b> 要素試験		33.7 %		记合方法 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	2	7.9	17.6
標準偏差(%)		4.7	7	7.0	2.2
中央値(%)	34.2		2	7.8	17.7
範囲(%)	9.8		2	3.3	18.4
最大値(%)	38.1		4	2.0	28.5
最小値(%)	28.3		1	8.8	10.1
標本数		4		19	224

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

ステップ34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 3.4.8-4 に示す。

	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		距離;1m程度 毎 産・00 産	
	37.3~%	12 m³/min	۲	要素試験;吹付けノズルを	
地上試験	$23.0 \ \%$	10 - 10 - 3/m	ə rpm	<ul> <li>上記の距離・角度に固定</li> <li>地上試験、地下実証試験:</li> </ul>	
地下実証試験	33.0 %	$10^{\circ} \sim 12 \text{ m}^{\circ}/\text{min}$		ノズルをオペレータが操作	

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

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12m<sup>3</sup>/min の条件ではリバウンド率37.3%となり、エアー量を10m<sup>3</sup>/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 3.4.8-5 に示す。

	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	$2.6{\sim}3.4$ Mg/hr	
地上試験	11 Mg	12時間	3時間	0.9 Mg/hr	3.7 Mg/hr	田米形、 時間は累計値
地下実証試験	38 Mg	29時間	15 時間	1.3 Mg/hr	2.5 Mg/hr	

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

※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、リバン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/m<sup>3</sup>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<sup>3</sup>(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<sup>3</sup>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/m<sup>3</sup>、ばらつきは1.4~1.8 Mg/m<sup>3</sup>と目標の乾燥密度1.6Mg/m<sup>3</sup>に対し±0.2 Mg/m<sup>3</sup>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/m<sup>3</sup>(ばらつき1.4~1.7 Mg/m<sup>3</sup>)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/m <sup>3</sup> )	1.72	1.61	1.66
票準偏差(Mg/m <sup>3</sup> )	0.08	0.05	0.08
中央値(Mg/m <sup>3</sup> )	1.76	1.62	1.67
範囲 (Mg/m <sup>3</sup> )	0.20	0.27	0.43
最大値(Mg/m <sup>3</sup> )	1.81	1.70	1.83
最小值(Mg/m <sup>3</sup> )	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/m <sup>3</sup> )	1.68	1.65	1.45
標準偏差(Mg/m <sup>3</sup> )	0.07	0.08	0.02
中央値(Mg/m <sup>3</sup> )	1.67	1.66	1.45
範囲 (Mg/m <sup>3</sup> )	0.31	0.41	0.06
最大値(Mg/m <sup>3</sup> )	1.83	1.81	1.48
最小値(Mg/m <sup>3</sup> )	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べ 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<sup>3</sup>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<sup>3</sup>(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<sup>3</sup>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<sup>3</sup>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<sup>3</sup>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<sup>3</sup>)。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<sup>3</sup>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<sup>3</sup>)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<sup>3</sup>、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<sup>3</sup>、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 4.2.1-1)。

- ・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 4.2.1-2 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 4.2.1-2 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 4.2.2-1)。

- ・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。

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	$\bigtriangleup$
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	Δ
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	0

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) 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 <sup>3</sup> (有効粘土密度 1.15Mg/m <sup>3</sup> )	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 4.3.3-1)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 4.3.3<sup>-</sup>3)。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 4.3.4-1 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/m<sup>3</sup>, 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 4.3.5-1)。製作したオーガアタッチメント(図 4.3.5-2) 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 図 2.3.3-4 地上予備試験 説明図



機械的除去装置 全体



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 4.3.5-3)では、供試体の中央部の切削・捕集(直径 200mm・深さ 300mm, 切削量 0.006m<sup>3</sup>) 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。



<sup>家</sup>云の禄子 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/m<sup>3</sup>、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 4.3.6-1 に示す。

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

表 2.3.3-2 機械的除去装置の運転条件

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 4.3.6-3 及び図 4.3.6-4 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。






オーガ先端部







除去機械





回収タンク



試験状況

油圧ユニット 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 4.3.6-5)。

- ・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



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 4.3.6-2)。

・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 4.3.6-6)



表 2.3.3-3 アースオーガによるほぐしの施工速度



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 4.3.6·3)。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。

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

表 2.3.3-4 真空吸引装置よる撤去(吸引)の施工速度

b 切削方向・手順などの除去手順による作業性

図 4.3.6-7 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 4.3.6-4)。 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

	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	ースとも、さや	音ありのオーガアク	タッチメントを	2使用

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

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 4.3.6-8 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)。

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 <sup>3</sup> 以上 (有効粘土密度 1.37Mg/m <sup>3</sup> )	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 <sup>3</sup> (有効粘土密度 1.15Mg/m <sup>3</sup> )	約 16%

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) 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 4.4.5-1 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
炒休ベントナイト		$15 \sim 20\%$	45%程度	h - k n W1
初体、シトノイト	1.0711 / 2	35%程度	95%程度	9 9 /V VI
ベントナイトペレット	1.37Mg/m <sup>3</sup>	1 <sup>3</sup>	74%程度	ブリケッティング法で製作したペ
	程度		74/0性反	レット:クニゲル GX=70%:30%
破砕ベントナイトペレット		1 - 970	75%程度	ブリケッティング法で製作したペ
			10/01至反	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ー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 4.4.5-3 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<sup>3</sup>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。





切削状況 図 2.3.4-4 要素試験状況



切削後

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 4.4.7-1)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<sup>3</sup>となるように所定の隙間に充填した(図4.4.7-2)。 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<sup>3</sup>、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 4.4.7-3 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 4.4.7-4 及び表 4.4.7-1 に示す。





図 2.3.4-8 流体的除去装置の各部名称等 説明図

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

表 2.3.4-3 除去装置の仕様

# ◆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	$\blacksquare \longrightarrow$			$\mathbf{k}$	$\mathbf{X}$
切削 断面	•	$\bigcirc$		□ ● ● ● ●	御
切削 軌跡				後 前	前後
(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 噴射圧 201	ウォータージェッ MPa まで坑道面を	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 4.4.6-1 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 4.4.6-2 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	最大噴射圧:90MPa エンジン駆動(軽油)
(高圧水発生装置を搭載)	最大水量:120L/min 程度
固定式ハンドランスガン	· 唐针运县, 541 /
ハンドガン式直射ノズル	"貝别/仉里:54L/mm 柱及
龄力吸引声	吸引口径3インチ(約76mm)
四月双月年	風量 45m3/min、真空度: -96kPa (-720mmHg)







### ◆資機材の配置

地上試験における資機材の配置図を図 4.4.7-6 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 4.4.7・2 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。

2-74

	19 IV.	22 1220		
	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	${ \blacksquare}$			
切削 形状				後 後
状況 写真				
離隔	5cm	40cm	30cm	
切削性	<ul> <li>対象物を線状に切削</li> <li>奥行き方向に穿孔</li> <li>円弧運動では、切削・ 解砕は困難</li> </ul>	<ul> <li>対象物を面状に切削</li> <li>離隔の調整により、</li> <li>切削幅の調整可能</li> <li>切削性は十分</li> </ul>	<ul> <li>・離隔の調整により、</li> <li>切削幅の調整可能</li> <li>・水圧が分散し切削性</li> <li>は弱い</li> </ul>	・ 切削性を有しない
掻き出し 性	・なし	<ul> <li>手前へやや掻き出されるが、掻き出し性はなし</li> </ul>	<ul> <li>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</li> </ul>	<ul> <li>前方噴射の加水効果</li> <li>に加え、後方噴射で</li> <li>掻き出し性が高い</li> </ul>
評価	<ul> <li>・ 今回の実証試験で</li> <li>は、使用せず</li> </ul>	<ul> <li>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</li> </ul>	<ul> <li>・ 今回の実証試験で</li> <li>は、使用せず</li> </ul>	<ul> <li>「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</li> </ul>

# 表 2.3.4-5 ノズルの種類と切削性・掻き出し性

#### ◆流体的除去手順の構築

図 4.4.7-4 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 4.4.7-3)。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。

	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	「円弧状の動き:往復】 + + + + + + + + + + + + + + + + + + +	【円弧上の動き:片道】 + + + + + + + + + + + + + + + + + + +

X 4.5.40 际五农电V口加八1991	表	2.3.4-6	除去装置の円弧状移動速用
-----------------------	---	---------	--------------

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 4.4.7-7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 4.4.7-8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 4.4.8-2 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 4.4.8-6 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	the stand	uhyimenum an		S 7 C 2
60~90cm				e e c a
0~30cm PEM 手前端	ALL			EZI

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 4.4.8-8)。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。







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。



and the second		
	⇒	

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 5.2.2-1 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 5.2.3-1 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)

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

表 2.4.1-1 定置・回収装置の整備方針



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)

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)

表 2.4.1-2 定置・回収装置の設計条件

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 5.2.3-3 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。

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

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

### 2.4.2 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 5.3.2・3 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。

押引力[kN]定置部総重量[kN]摩擦係数(※)カタログ値(参考)1.7366.5<br/>(37.4 ton = 0.9 ton (定置・回収装<br/>置重量) +36.5 ton (PEM 重量))0.0050.001~0.007<br/>(平面床走行時)

表 2.4.2-1 鋼製坑道試験における押引力及び摩擦係数

※: (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 Nm³/min(=23.4 Nm³/min(表 5.3.3・13 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)

	荷重/	目標浮	鋼製面			打設コンクリート面		
装置	枚 [ton]	上量 [mm]	全流量 [Nm <sup>3</sup> /min]	流量/枚 [Nm <sup>3</sup> /min]	圧力 [MPa]	全流量 [Nm <sup>3</sup> /min]	流量/枚 [Nm <sup>3</sup> /min]	圧力 [MPa]
要素	3.74	40	1		-	5.04	1.26	0.27
試 転 転 、 、 、 、 、 、 、 、 、	<b>(※</b> 1)	55	-	1000	-	9.33	2.34	0.34
定置・	3.74	40	12.3	1.23	0.27	-	—	(0.27)
回収 装置	(※2)	55	_	-		(Q)※3	(q) <b>※</b> 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<sup>3</sup>/min、(Q)は23.4 Nm<sup>3</sup>/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 5.3.4-5 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。

	押引力	) [kN]	鋼製面との比較倍率		
十位工	(摩擦	係数)	(鋼製面:1.7 kN)		
正11 ॥	モルタル	打設コンクリ	モルタル	打設コンクリ	
	仕上げ面	ート面	仕上げ面	ート面	
乾燥面	5.15	8.40	3.0 倍	4.9 倍	
	(0.014)	(0.023)			
散水面	6.35	9.66	3.7 倍	5.7 倍	
	(0.017)	(0.026)			
充填材残留面	6.96	10.71	4.1 倍	6.3 倍	
(ベントナイト)	(0.019)	(0.029)			
上敷き材面	5.57~(3)	3.57	3.3 倍	2.1 倍	
	(0.015)	(0.010)			

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

※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 5.3.5・2 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)。

RUN-No.	項目	平均浮上量 (mm)	平均流量 (Nm <sup>3</sup> /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

表 2.4.2-5 地下実証試験における浮上量、流量及び圧力



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。

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 5.3.3-6 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。



2. スタックイメージ

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 5.3.5-10 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
- ・今回のゴム製べアリングでは、そのサイズの制約から浮上可能量に限界が存在

本事業ではゴム製べアリングに市販品(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 5.5.1-2 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1 m 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。



現状装置の上昇時の挙動

対策後装置の上昇時の挙動

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1mm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。

2.5.2 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 Highlevel 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)-遠 隔操作技術高度化開発-(2/2), 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 隙間充填技術の実証的整備

3.1 隙間充填技術の実証的整備

3.1.1 隙間充填技術の研究概要

処分坑道横置き・PEM 方式では、定置作業を行う装置の可動領域が必要となるため、定置 された PEM と坑道の間に空間(以下、『隙間』という。)が生じる。この隙間の残存は PEM 内 部の緩衝材の膨出による密度低下、坑道長手方向の有意な水みち形成、坑道安定性の低下等、 地層処分の操業や長期の安全性への影響要因となることが懸念されているため、適切な材料を 適正な品質で隙間に充填することが検討されている[1]。

上述の隙間を充填する材料(以下、『隙間充填材』という。)およびその充填状態(充填品質) は、本事業のスコープである PEM の回収技術の研究の観点からは、第4章に詳細を記す隙間 充填材の除去技術の実証的整備における除去対象として重要なものとなる。しかし、現時点で は、除去対象となる隙間充填材や隙間の状態(処分坑道や PEM の形状、覆工の状態、地下水 環境等)については様々な概念があり決定されていない。

このようななか、本研究では、2 つの隙間形状(定置された PEM と坑道の間の空間形状) 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、そのための管理手法を構築し、隙 間形状等の条件が変更となった場合にも、同様の手法を用いることで適正な充填施工が可能で あることの見通しを得ることを目的に、隙間充填技術の実証を行うこととした。

本研究で設定した隙間形状は、事業者 (NUMO) が例示している処分坑道断面と PEM との 間に生じる比較的大きな隙間、および、これまでの基盤研究で提示されている PEM を定置し うる最小断面の処分坑道 ( $\phi$  2600mm) と PEM ( $\phi$  2316mm) との間に生じる狭隘な隙間の 2 つである (図 3.1.1-1)。

なお、隙間充填材の原料としては、充填部の規模や隙間形状、要件を満足するための充填材 の機能等の観点から粘土系材料を用いることが検討されている。





本研究では、設定したこれら2つの隙間形状に対し、粘土系材料を適切な状態で送り込むた めの隙間充填技術の実証を幌延深地層研究センター(以下、『幌延 URL』という。)の地下350m にある試験坑道2(図 3.1.1-2)において実施した。なお、本事業では、図 3.1.1-2の内、比較 的大断面の隙間である「青ハッチ部」を『上部開放部』、狭隘な隙間である「赤ハッチ部」を『下 部狭隘部』と称す。



図 3.1.1-2 幌延 URL 試験坑道 2 坑道断面(実証試験時)

上部開放部については、NUMO セーフティケース[2]の一例に対する充填技術の実証として 吹付け方式を採用し、下部狭隘部については、PEM を搬送しうる最小断面に対する充填技術 の実証として、スクリューフィーダ方式を採用し、隙間充填技術の実証を行った(図 3.1.1-3)。



※出典:NUMOセーフティー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、2018.9.23

図 3.1.1-3 隙間充填技術の実証の対象とする坑道断面と充填方式

本章では、第4章に示す隙間充填材の除去技術の実証を行うにあたっての、除去対象物であ る隙間充填材の充填技術の実証事例と、実証事例の今後の処分事業への展開について示す。

- 3.2 隙間充填技術の研究アプローチ
- 3.2.1 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。

- 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。
- 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。
- 3.2.2 隙間充填技術実証の進め方
- (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、管理指標を定めた。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、抽出した因子を含む特性要因図(図 3.2.2-1 参照)を作成することで、本研究の実証試験で検討すべき具体的な項目を明確にすることとし た。



図 3.2.2-1 一般的な特性要因図

(2) 充填技術の実証試験

「充填技術の実証試験」では、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の要素技 術を、要素試験をとおして十分検討する。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・手順を事前に構築したうえで、地下環境において、事前に構築した充填装置の運転条 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・技術実証の確認を行った。

実施イメージを図 3.2.2-2 に示す。



図 3.2.2-2 段階的な技術の整備の実施イメージ

(3) 実証試験成果の整理・分析と拡張・展開

「実証試験成果の整理・分析と拡張・展開」では、地上から地下に至る技術実証の過程や、 取得した結果からの今後の技術開発への課題の抽出および、サイト条件の変更を考慮した場合 における実証試験・技術開発への拡張性についての検討を行った。

3.2.3 実証対象とする技術、検討項目の設定

(1) 目標品質の設定、充填品質管理のための管理項目、管理指標

充填後の充填材に求められる主な機能は、第2章で述べたように、PEM と坑道間の低透水 性の確保および PEM 内部の緩衝材の膨出による密度低下の抑制である。

これらに対し、充填後の充填材に求められる条件としては、低透水性の確保に対して所定の 透水係数以下であること、緩衝材の膨出抑制に対して所定の膨潤圧以上となること、の2つで ある。

これらの「透水係数」と「膨潤圧」の値は効率的に管理されなければならないが、施工現場 では容易には測定・管理できない。さらには透水係数と膨潤圧に影響を与える有効粘土(ベン トナイト)密度も施工現場で直接把握することは時間を要し、品質管理の項目とすることは実 用的ではない。このため、本事業では現場で比較的データの得やすい"かさ密度(すなわち充 填密度)"を有効粘土密度の代替指標として測定することにより求められる条件を満たすこと を確認することとした。

"かさ密度"は、一定容積の容器に粉体を充填し、その内容積を体積としたときの密度と定 義される。図 3.2.3-1 に示すように、ベントナイトとケイ砂の混合土のかさ密度は、ケイ砂等 粒子質量とベントナイト(粘土)粒子質量の合計を容器内体積(図中①~⑤の体積の和と等し い)で除した値であり、ベントナイト(粘土)のみの場合は、ベントナイト(粘土)粒子質量 の合計を容器内体積(同)で除した値である。



(2) 隙間充填に必要な技術と実証対象技術

かさ密度(すなわち充填品質)は、充填方法によらず充填材自体の密度と充填率によって支 配される。よって、実証の対象とする技術は、『充填材の品質に関わる技術』および『充填率向 上のための充填方法や装置に関わる技術』とすることが妥当といえる。

これまでに検討された横置き PEM 方式における一連の定置工程のブロックフロー図[3]を図 3.2.3-2 に示す。

同図に示すとおり、隙間充填に関与する施工工程は、充填材そのものの製造、輸送・保管に 関わる工程と、実際の充填施工に関わる工程のふたつに大別することができる

充填材製造、輸送・保管工程は、隙間充填材原料の受入れから、充填材の加工・製造、地上 運搬・保管、地上積込み、処分坑道への運搬、地下での一時保管、に至る工程であり、当該工 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、等が求められる。これ らの技術は充填材料そのものの品質に影響を与える可能性があり、充填品質に対する影響因子 となるため実証の対象となる。

充填施工工程は、PEM を定置するための装置と、隙間を充填するための装置の入れ替えか ら、PEM-処分坑道間の隙間充填、に至る工程であり、当該工程では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および、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が求められる。また、充填施工は操 業中の作業員に対する放射線安全や熱環境等の作業環境を考慮した安全衛生等の観点から、全 ての作業を遠隔操作で行うことが望ましく、⑦遠隔操作技術も必要となる。

ここで、④充填材を充填装置に供給・貯蔵するための技術とは、充填に備えて必要量の充填 材を充填装置近傍に連続的または断続的に枯渇することなく供給し、貯蔵する技術である。 ⑤ 充填装置を移動させるための技術としては、自走のための動力機構とその制御に関する技術が 求められる。また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としては、充填の ための動力機構とその制御(方向、速度など)に関する技術、その他充填率を高めるための機 構に関する技術等が必要となり、充填品質に対して最も重要な技術である。

表 3.2.3-1 に、以上に示した各工程において必要となる技術を整理し、実証技術の具体例を示した。

下部狭隘部および上部開放部の隙間充填技術の実証において対象とする技術は、表 3.2.3-1 に示した実証技術の具体例を参考に、『充填材の品質に関わる技術』および『充填率向上のため の充填方法や装置に関わる技術』を取捨選択し設定する。

3-6



図 3.2.3-2 横置き・PEM 方式の施工ブロックフロー

隙間充填関連工 程	各工程で必要となる技術		技術の解説、細目	実証技術の具体例
充填材製造、輸送・ 保管工程	充填材の品質に関 わる技術	①充填材加工·製造 技術	高密度化技術	原料圧密技術、混 合·粒度調整技術等
		②地上および地下にお ける充填材積込み・運 搬技術	充填材の状態に適した 積込み・運搬技術	充填材料製造時の品 質(含水比、最密粒 度分布等)を維持で
		③地上および地下にお ける充填材保管技術	品質維持のための技術	きる積込み・運搬、保 管技術
充填施工工程	装置・充填方法に関 わる技術	④充填材供給·貯蔵 技術	必要量の充填材を充 填装置に供給し、貯蔵 するための技術	地下充填材保管場 所から充填装置への 受渡し技術、受渡し 後の充填材の貯蔵技 術(貯留タンクなど)
		⑤充填装置移動技術	自走のための動力機構 とその制御技術	エンジン、電動、油 圧、空圧、タイヤ式、 レール式、キャタピラ 式、ジャッキ式など
		⑥充填材充填技術	充填材の充填率向上のための技術	最密粒度分布を維持 できる充填方式・装 置・手順、充填品質 管理が容易な充填方 式・装置・手順、充填 率の向上が期待でき る充填方式・装置・手 順
		⑦遠隔操作技術	充填材供給、充填装 置移動、充填材充填 を遠隔で制御、捜査す る技術	無線伝送技術、有線

表 3.2.3-1 隙間充填工程において必要となる技術の整理

(3) 技術実証における検討項目および検討内容(本実証試験の特性要因図概要)

PEM と坑道間の隙間充填においては、先に示したとおり、PEM 内部の緩衝材の膨出抑制、 坑道長手方向への有意な水みち形成の抑制、坑道安定性の低下の抑制などの効果が求められ、 そのための品質の指標として所定の充填密度を確保することが求められる。

所定の充填密度を確保するためには、充填の対象となる場所の状況や、その状況に合わせた 充填方法や充填材料について十分に把握し、検討する必要がある。

実証をすすめるにあたり、表 3.2.3-1 を参考に、隙間充填に関わる工程(充填材製造、輸送・ 保管工程および充填施工工程)における技術検討項目とその順序を具体化し、目標品質を確保 するために各項目で検討すべき内容等の具体例を整理したものを表 3.2.3-2 に示す。

充填品質への主な影響因子	具体化した検討項目と順序	検討内容、考慮する条件、管理項目等 (主な影響因子に関わる個別の影響因子)の例
充填場所の状態	1)充填場所の確認(与条件)	  幌延URL、実施設、寸法・形状、湧水、等
装置・充填方法に関わる技術	2)充填方式の設定	充填場所の状態を考慮した充填方式(ベルトコン ベア、スクリューフィーダ、エア圧送、吹付け、等)
	3)充填装置仕様の設定	施工品質および施工効率を満足するための動力 源、出力、充填機構、施工速度、付属設備、等
(允琪施工工程)	4)充填方法・手順の構築	装置仕様、充填材仕様を考慮した、安定的な施工 品質を得るための施工技術と品質管理手法の構築
充填材の品質に関わる	5)充填材仕様の設定	充填装置・方法に適した充填材料仕様(粒子密度、 配合、粒度分布、含水状態、等)
技術 (充填材製造、輸送•保	6)充填材の製造方法の設定	充填材料仕様を考慮した製造(圧縮、造粒、解砕、 混練方法、粒度調整等)
管工程)	7)充填材の輸送・保管	充填材製造時の品質(含水比、最密粒度分布等) の維持を考慮した輸送、保管方法
	8)充填施工	構築した施工品質管理手法に基づく充填施工
	9)充填品質の確認	設定した施工品質管理手法の妥当性検証

表 3.2.3-2 具体化した検討項目と順序

充填品質への主な影響因子としては、『装置・充填方法に関わる技術』と『充填材の品質に関 わる技術』に加え、『充填場所の状態』についても加えることとした。これは、充填空間の形状 によっては、死角が形成される場合や充填品質にムラが生じる場合など充填品質への影響が懸 念されること、同じく充填空間の形状や規模によって施工方式や装置をアレンジする必要が生 じるためである。本研究においては、実証場所を幌延 URLの試験坑道 2 としており、『充填場 所の状態』については与条件として取り扱った。

以降、充填空間に適した充填方式を検討し、装置仕様と充填材料については実証試験をとお して互いの適用性を確認しつつ、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 法の構築を図る手順で実証を進めることとした。

なお、表 3.2.3·1 に示した、充填施工工程における、『装置・充填方法に関わる技術』については、『充填率向上のための充填方法や装置に関わる技術』以外も含めて総合的に整理している。具体的には、④充填材供給・貯蔵技術、⑤充填装置移動技術、⑦遠隔操作技術がそれにあ

たる。表 3.2.3-2の整理に当たっては、これらの充填率向上に直接的に関与しない要素技術に ついては、本研究において実証対象とする技術から除外し、目的の達成に特化した効率的な技 術実証を進めることとした。

また、表 3.2.3-2 をもとに、充填品質への影響因子を特性要因図(図 3.2.3-3)として分析 し、検討すべき項目を可視化したうえで実証に取り組むこととした。



図 3.2.3-3 基本の特性要因図

次頁より、上記の研究アプローチに則り実施した下部狭隘部の充填技術の実証および、上部 開放部の充填技術の実証の詳細を記載する。 3.3 下部狭隘部の隙間充填技術の実証

今回充填対象とする場所は、幌延 URL 試験坑道 2 となる。このうち、本節では図 3.3.1-1 に示した充填対象断面のうち下部狭隘部(赤ハッチ部)を対象とした充填技術の実証について 示す。

3.3.1 充填場所の状態確認(充填場所の状態の特性要因図)

図 3.2.3-3 に示すとおり、充填場所の状態は、充填後の密度への影響因子の一つとして挙げ られている。主に隙間の形状と壁面の状態である。

下部狭隘部の隙間形状については、図 3.3.1-1 に示すとおり隙間の最小幅は PEM 台座厚の 110mm、最大幅となる組立台上面部付近においても 130mm 程度となっており、隙間部の弧長 は 900mm 程度となっている。

試験坑道2においては、湧水は見られるもののにじむ程度であり、本検討における地下での 実証試験実施の際は、充填場所の状態の不確かさを軽減するため、地下での実証試験の際には 隙間にたまった水を除去したのちに充填を行うこととし、地上での実証試験においても湧水状 態は考慮しないこととした。

また、PEM 台座および処分坑道壁面は覆工コンクリートを想定したコンクリート面、PEM 面は鋼製であることを前提条件として充填技術の実証を行うこととした。

表 3.3.1-1 および図 3.3.1-2 に充填場所の状態についての充填後のかさ密度への影響因子を 整理したものを示す。



図 3.3.1-1 対象断面

表 3.3.1-1 充填場所の状態の充填密度への影響因子

品質管理対象		要因		因子	
	透水係数		充填場所の 状態	隙間形状	壁面形状寸法
か さ 膨潤圧 密度 有効粘土 度		①充填場所の			PEM 形状寸法
	膨潤圧	状態による影 <b>響</b>			PEM 台座形状寸法
	有効粘土密			壁面状態	表面粗さ
	度				濡れ・湧水



図 3.3.1-2 充填場所の状態の充填後かさ密度への影響因子

#### 3.3.2 充填場所に適した充填方式の設定

充填品質目標(有効粘土密度 1.37Mg/m<sup>3</sup>以上のベントナイト系材料、または有効粘土密度 1.15Mg/m<sup>3</sup>以上かつベントナイトと珪砂の混合重量比1:1のベントナイト系材料、第2章参 照)を満たすためには、充填装置は粒状・粉末状のベントナイトあるいはベントナイト混合土 を適切な位置に適切な密度で充填できる機能が求められる。

国内外の既往検討(例えば[4]~[13])の文献調査によれば、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。

吹付け方式、空気圧送方式では、充填材を能動的に加圧・加速して到達時の密度を向上させ ることができるが、ベルトコンベア方式及びスクリューフィーダ方式等では、目標とする位置 までの充填材の運搬が主たる機能であるため、その充填後の密度は主に充填材自体の密度およ び充填材の自由落下による締固めに依存する。

ただし、スクリューフィーダ方式については、装置先端部を充填材中に挿入し、充填済みの 充填材中に「押し込む」ような使い方がされている試験例がある。これは、押し込むことによ る締固め効果に加え、既設充填材に力を加えることにより、自然落下では到達しにくい場所 (PEM の直下、坑道の凹凸面、坑道インバート等の隅角部など)に生成される可能性のある

ボイドに、定置済み充填材を送り込む効果を期待していると考えらえる。

一般に、充填密度の向上には充填材料が適切な粒度分布であることが望まれるが、どの充填 方式においても、充填材を排出する装置先端部を充填済みの充填材中に挿入しない場合、充填 材のうち、粒径の大きい(重量の大きい)材料が、安息角で形成される斜面を滑落して下部に 堆積することで粒度分布が変化し、期待した充填密度が得られなくなるおそれがある。装置先 端部の充填材中への挿入はその危険性を軽減することができる。

また、第2章で述べたとおり、PEMの定置、充填はPEM1体ごとに交互に行われることを 前提としていることから、PEM1体分の奥行き以上の距離への充填が可能である必要がある。 加えて、充填装置の制御と充填状況把握のためには、粉塵の発生が少ないこと、坑道内の作業 環境への悪影響が少ないことも望まれる。

これらの条件と文献調査から得た知見などから、下部狭隘部を対象とした隙間充填装置への 要求事項を表 3.3.2-1 のように整理した。

3-13

	要求事項	解説(または設計要件)
1	PEM1 基分の奥	基本機能の観点から、移送・充填機能を持つアームを移送・充填
	行き延長以上の狭	位置に配置する必要がある。その際、PEM と坑道壁面の間隔が
	小空間に対する充	比較的狭いことによる装置の制約が考慮されていることが求め
	填が可能なこと	られる。
2	移送・充填の前後	品質管理の観点から、粉粒状の充填材を充填する場合など、移送
	での材料特性(粒	開始位置で最密充填に適した状態(粒度分布や含水状態)となっ
	度分布や含水状態	ている場合は、移送時の衝撃等による破砕や、材料分離等による
	等)が変化しにく	粒度分布の変化や含水状態の変化が小さいことが求められる。
	いこと	
3	未充填部が生じに	品質管理の観点から、充填材が直接到達しにくい隅角部等にボイ
	くいこと	ドを形成させないことが求められる。
4	充填作業位置まで	操業工程の観点から、自走あるいは他車両による推進で移動可能
	のアクセスが円滑	なこと、充填箇所への正確な位置決めが可能なことなどが求めら
	に行われること	れる。
5	充填作業状況の監	品質管理および操業安全の観点から、ビデオカメラ、レーザー・
	視が可能なこと	センサーなどによる充填状況の監視のための設備が設置できる
		こと、付随して粉塵発生を抑制できる移送方式であることが望ま
		れる。
6	遠隔操作が可能で	放射線安全の観点から、操業中、作業員に対する放射線安全機能
	あること	(遮蔽、閉じ込めなど)や熱環境が現時点では明確に保障されて
		いないこと、比較的狭隘な坑道内での重量物を取り扱う定置作業
		となること、温度・湿度・粉塵などの作業環境を規定することが
		困難なことなどから、遠隔操作が可能な装置であることが望まし
		<u>۷</u> ۰,
$\bigcirc$	適切な充填速度	操業工程の観点から、求められる施工効率を確保できることが求
	(施工効率)が得	められる
	られること	

表 3.3.2-1 下部狭隘部を対象とした隙間充填装置への要求事項

表 3.3.2-1 に示した要求事項を機能面から分類すると、

- 充填材の移送・充填機能にかかる要求事項(①②③)
- ・ 充填装置を移動させるための移動機能にかかる要求事項(④)

・ 遠隔操作のための制御・監視機能にかかる要求事項(⑤⑥)

に大別され、これらの機能が効率的に運用可能であること(⑦)が求められる。

すなわち、隙間充填装置に最低限必要とされる機器構成としては、

- ・ 充填材の移送・充填装置(アーム)
- 隙間充填装置全体を移動させるための移動装置

・ 隙間充填装置を遠隔操作するための制御・監視装置

の3つに分類され、施工効率を確保するためにはそれぞれの装置性能がバランスよく設計さ れている必要がある。

ここで必要とされる3つの機能のうち、移動機能および制御・監視機能については、充填率 向上に直接的に関与しない付随機能であり、適切な充填方式および移送・充填装置仕様を設定 したうえで、それらに適した装置仕様等の技術検討を行うことが効果的と考えられる。

充填方式および装置仕様等の技術検討に際しては、同表に示されるとおり、充填率の向上に 関与する要求事項を勘案すると、①狭小空間への適用が可能な方式であること、②充填材料の 材料特性の変化が生じにくい方式であること、③未充填部が生じにくい方式であること、が求 められる。

粉粒体の移送・充填方式としては、先に述べたとおり、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。

ベルトコンベア方式については、自然落下による充填となり装置先端部の充填材への挿入が できないため材料分離やボイドの形成が懸念され、加えて下部狭隘部のような比較的狭小な断 面形状に対して適用することは非常に困難である。

吹付け方式については、狭小エリアへの適用が可能であり、細かなノズルワークによる未充 填部の抑制も可能となるが、吹付け時の圧力による粒径や粒子形状の変化や、リバウンドによ る材料特性の変化が予想されたため、狭隘部充填への適用は見合わせることとした。

以上より、狭小エリアへの適用可能性が高く、未充填部の形成や材料特性の変化への影響が 比較的小さいと考えられる方式として、スクリューフィーダ方式と空気圧送方式のいずれかを 選択することとした。

ここで、粉粒状材料の移送に関する既往研究[13] H16 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) P3-631~P3-634)を参考に表 3.3.2-2 のとおり両者の特徴 を抽出した。抽出結果より、空気圧送方式では比較的長距離への輸送性能でスクリューフィー ダ方式よりも優位であるが、定量供給性能ではスクリューフィーダ方式が優位となっている。 充填対象の空間と充填品質の管理面を考慮すると、長距離の輸送性よりも充填品質管理が容易 となる定量供給性で優位なスクリューフィーダ方式が適している。また、粉塵の発生について も装置への影響や施工箇所の遠隔監視の点からスクリューフィーダ方式が優位であることか ら、スクリューフィーダ方式を選定することとした。

表 3.3.2-2 移送・充填方式の比較

種類	空気圧送方式	スクリューフィーダ方式
	<ul> <li>粉粒体の搬送に適している</li> </ul>	<ul> <li>粉粒体の搬送に適している</li> </ul>
特徴	・ 比較的長距離への輸送性能で優位	<ul> <li>定量供給性能で優位</li> </ul>
	・ 比較的多くの粉塵が生じる	・ 比較的粉塵が少ない

出典:平成 16 年度 地層処分技術調查等 遠隔操作技術高度化調查報告書([13])

なお、スクリューの形状には表 3.3.2-6 に示すように様々な種類があり、また直径、軸計、 ピッチ、回転数などの仕様により搬送性能が異なる。

それぞれの特徴を標準型の軸有板状スクリュー(標準タイプ)を基準に特徴について比較検 討した結果は以下のとおりである。

- パドルスクリュー:主に攪拌、加湿効果を期待するタイプであり、付着性の高い粉体輸送に 有効であるが、輸送効率が劣る。
- カットスクリュー:固着する粉体の輸送に有効であるが、形状が複雑であり、切欠きがある 分輸送効率が劣る。
- コイルスクリュー:軸が無い分設計によっては輸送断面が大きく取ることができ、移送対象 の状態によっては高い輸送効率が見込まれる。
- 多軸スクリュー:一見輸送効率は高いが、スクリュー断面積あたりの輸送効率は低く、構造 が複雑。

今回充填対象とする PEM と処分坑道の隙間については、先に示したとおり最小部で約 110mm と狭隘なため、既往の研究に用いたスクリューフィーダと比較して、スクリューパイ プ(以下、『トラフ』という)外径が制限されるため、複雑な形状は適さない。よって、スクリ ュー形状については、最も一般的で輸送効率の高い軸有板状スクリューに加え、軸無のコイル スクリューとした。

後述する充填技術の実証のステップ1において実施した性能確認のための要素試験におい て両タイプの適用性を比較した結果、軸有スクリューの移送効率が顕著に良好であった。

両タイプの比較検討の概要について以下に示す(詳細は原環センター2015 年 3 月[14] 参照)

比較方法としては、各タイプのスクリューフィーダを用いて、同一材料を、設計上同等な単 位時間あたりの移送量となるスクリュー回転数設定により一定時間移送し、実際の単位時間あ たりの移送量から算出した移送効率 φ により比較する。

以下に移送効率↓の算出のための式を示す。

リボンスクリュー:付着性の高い粉体輸送に有効であるが、形状が複雑であり、羽根面積が 小さい分輸送効率が劣る。

■ 移送量の一般式(移送効率 φ の比較)

$$Q = V \cdot \gamma = 60 \cdot \phi \cdot \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \cdot a \cdot N \cdot \gamma$$

Q:単位時間あたりの移送量(Mg/h)

V:単位時間あたりの移送量(m<sup>3</sup>/h)

γ:材料密度(Mg/m<sup>3</sup>)

♦:移送効率

D:スクリュー外径 (m)

- d:軸外径(m)
- a:スクリューピッチ (m)
- N:スクリュー回転数 (rpm)

また、表 3.3.2-3~表 3.3.2-5 に、各スクリューフィーダの仕様、試験条件、試験結果の比較 結果を示す。

タイプ	軸有	軸無	備考
フィーダパイプ内径	90.2mm	80.1mm	
スクリュー外径	80mm	76mm	
軸径	34mm	なし	
有効断面積	$5.74  imes 10^{-3} m^2$	$5.15  imes 10^{-3} m^2$	
スクリューピッチ	70mm および 140mm	210mm	

表 3.3.2-3 軸有スクリューフィーダと軸無スクリューフィーダの仕様比較

表 3.3.2-4 軸有スクリューフィーダと軸無スクリューフィーダによる試験条件の比較

タイプ	軸有	軸無	備考
移送物質	クニゲル GX	クニゲル GX	同一ロット
			含水比 9.6%
スクリュー回転数	設計上同等とされる移送		

表 3.3.2-5 軸有スクリューフィーダと軸無スクリューフィーダによる試験結果の比較

タイ	試験	単位時間あたりの移送量		材料(クニゲル	単位時間あ	スクリュ	軸	スクリ	スクリュ	移送
プ	ケース			GX)の見掛	たりの移送	-	外径	2-		効率
				けの密度	量	外径		ピッチ	回転数	
		Q(実測値)	Q (換算値)	γ	V	D	d	а	Ν	φ
		(g/min)	(Mg/h)	(Mg/m3)	$(m^3/h)$	(m)	(m)	(m)	(rpm)	
動ち	GX70L40	5,280.1	0.3168	1.236	0.256	0.080	0.034	0.07	16.8	88%
翈竹	GX140L40	4,343.5	0.2606	1.236	0.211	0.080	0.034	0.14	8.4	73%
軸無	GX210_25	1,291.0	0.0775	1.236	0.063	0.076	無	0.21	11.25	10%

以上の比較結果より、これ以降、下部狭隘部の充填技術実証については軸有板状スクリュー を対象とした検討について述べる。

## 表 3.3.2-6 スクリューの種類とその特徴の比較

種類	板状スクリュー	リボンスクリュー	パドルスクリュー	カットスクリュー	コイルスクリュー	多軸スクリュー
	軸に羽根をつる巻状に取	リボン上の羽根を取り付	独立した羽根をつる巻き	外周を数か所切り欠いて	羽根部分だけ残して軸を	多軸のスクリュー
	り付けたスクリュー	けたスクリュー	状に取り付けたスクリュ	エッジ状にした羽根を取	切り取ったもの。	
			<u> </u>	り付けたスクリュー		
					AAA	
特徴	・ 一般的に用いられる	・羽根と軸に隙間があ	・ 拡販しながら搬送す	・ 微粉、やわらかいも	・ 同径の軸有(板状)	・ 相互の羽根でせん断
	タイプで実績も多い	り、ペレット等の壊	る場合に使用される	の、固まりやすいも	スクリューと比較す	と練り効果を与える
	・ 輸送効率が高い	れ易い粉体の搬送に	・ 輸送効率は板状スク	のに適用される	ると搬送断面が大き	ことができる
		有効である	リューに劣る	・ ケースに付着する粉	く取れるため高い輸	・ 汚泥等、または湿っ
		・付着性の高い粉体、		体を運ぶ場合に用い	送効率が見込める。	た付着性の高い粉粒
		粗粒物に適用		る	・ 長さを大きくするこ	体の輸送に適用する
		・搬送効率は板状スク		・ 板状スクリューより	とができる	・形状が複雑
		リューに劣る		も高価になる	・ 搬送距離が長くなる	・ シングルスクリュー
		・粒形を壊さず搬送で		・ カット部が充填材の	とスクリューにゆが	より高価になる
		きるがスクリュー径		破砕を促進する可能	みが生じ、ケーシン	・ 充填材の破砕を促進
		が小さい場合は効果		性がある	グと接触し摩耗する	する可能性がある
		が小さい			恐れがある	・ 対象の狭隘部では水
						平多軸での運用が困
						難

- 3.3.3 地上実証予備試験(スクリューフィーダ方式による充填技術の実証)
- (1) 段階的な技術実証・整備手順と実施内容(2017報告書 4.2.2 P4-16より)

本検討で対象とした下部狭隘部の形状は、直径 2.6m の円形坑道底部に高さ 110mm のコン クリート製の PEM 台座が設置され、その上に直径約 2.3m の PEM を定置した際に生じる十 数 cm の隙間(図 3.3.1-1 赤ハッチ部)である。スクリューフィーダ方式での品質管理では、 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密度(か さ密度)と、密度のバラつき(密度分布)が重要である。

本検討においては、充填時の施工条件(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、地上での実証予備試験により、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、構築した設定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。

図 3.3.3-1 に本検討で実施した充填技術の整備フローを示す。



図 3.3.3-1 狭隘部の充填技術の整備フロー

#### 隙間充填材料の製作試験

a 充填材料の品質への影響因子の分析(充填材料の特性要因図)

PEM 周囲に充填されたペレットの「透水係数」と「膨潤圧」は直接把握することは時間を 要し、品質管理の項目とすることは実用的ではないため、施工時には"かさ密度"を代替パラ メータとして測定することにより、これらの要求される項目または条件を満たすこととした。 PEM—坑道間の充填作業の行程は、図 3.3.3 のように、充填材料製造工程、輸送工程(ペ レット製造地から処分場)、処分場での充填工程からなる。



図 3.3.3-2 隙間充填材の製造、輸送、充填工程の一例

充填材料の製造工程から隙間充填までの工程で、この"かさ密度"に影響を与える要因としては、①充填材自体の品質と、②装置や充填方法および③充填場所の状態、があることは先に述べた通りである。

このうち、①充填材自体の品質に対して、材料製造時、保管時、施工時などの各ステージで、 充填部の品質に影響を及ぼす因子について抽出・整理した結果を表 3.3.3-1 及び図 3.3.3-3 に 示す。

充填材料の品質への影響への因子として、「充填材仕様」があるが、この「充填材仕様」には 「材料混合」、「造粒方法」、「混練」などが影響を与える因子である。さらにそれらの因子に対 しては、「材料混合」であれば「ベントナイト」やベントナイトに混合する「ケイ砂」の特性と、 必要により加えられる「水」の特性や量が影響を与えることを示している。

これらの各因子に対して、実際の充填作業に際しては各因子の品質に与える影響を極力小さ くするような作業手順を選定する必要がある。

品質管理対象		要	因	因子		
				造粒方法	ブリケッティ ング法 打錠法 ・・・・	
	透水係数 かさ 密度 膨潤圧		充填材の品 質	充填材仕 様	材料混合	ベントナイト
かさ		②充填材の品				ケイ砂等
密度		質による影響				水 (加水)
					於中部教	造粒体種類
				<u> </u>	混練方法	
				龄光味	材料分離	
			鞩还时	自重による圧縮		
				貯蔵時	自重による圧縮	

表 3.3.3-1 充填材料品質の充填後かさ密度への影響因子



図 3.3.3-3 充填材品質の充填後かさ密度への影響因子

b 充填材製造方法について

スクリューフィーダ方式による充填における充填部のかさ密度は、充填率と充填材料密度の 積である。充填率は充填材料の粒径や充填部の形状によって支配されるため、かさ密度向上の ためには、充填材料自体の密度を高める必要がある。代表的なベントナイトペレットの製造方 法を図 3.3.3-4 に示す[16]。



図 3.3.3-4 代表的なベントナイトペレットの製造方法[15]

有効粘土(ベントナイト)密度 1.37Mg/m<sup>3</sup>を達成できる充填率と充填材料密度の関係を図 3.3.3-5 に示す。図中の2本のラインはそれぞれ、砂混合率 Rs が 0%の場合と 20%の場合を示している。

図中のラインを境界として、原点側(左下側)は1.37Mg/m<sup>3</sup>を達成できない領域であり、図 中の右上側は達成できる領域である。

赤ラインで示した充填率は充填材料の粒度分布や充填方法に影響を受けるが、ペレット自体の密度が高い方がより低い充填率で目的の密度を達成でき、施工時の品質管理も容易になる。

ただし、図中の緑点線は、既往検討等から現実的に想定される充填率と充填材料粒子密度の 上限値のラインであり、現実的な想定ラインを考慮すると、例えば充填材料を100%ベントナ イトとした場合、緑破線と Rs=0%の青ラインで囲まれた、図中の黒破線内の領域が目指すべ き品質ラインと言える。



図 3.3.3-5 有効粘土密度 1.37Mg/m<sup>3</sup>を満足する充填率と充填材料粒子密度の関係[17]

図 3.3.3-4 に示した製造方法のうち、既往のベントナイトの高密度化製造方法に関する研究 ([16]、[18]等)より、実績のあるブリケッティング法およびロールプレス法について検討を 行った。

c 充填材料の高密度化製造方法

(a) ブリケッティング法

①装置概要

ペレット製造試験に使用するブリケッティングマシンの写真を図 3.3.3-6 に示す。ホッパー に供給された原料が、縦型の押し込みスクリューにより脱気と予備圧縮されながら、互いに同 一速度で逆方向に回転する2本のロールの間に効率よく送り込まれて圧縮成型されることで高 密度のペレットが製造される原理である。本要素試験に用いた設備は新東工業製の BMS シリ ーズ コンパクターで、ロール直径は520mm、ロール圧縮力は1.5MN である。



図 3.3.3-6 ブリケッティングマシン





図 3.3.3-7 ブリケッティングマシンの構造図と使用したロール

②造粒試験

空間への充填率を考慮し、ブリケッティングで製造するペレットの目標密度を 2.0~2.2Mg/m<sup>3</sup>と設定した。図 3.3.3-7 に示したロールで成型した場合、30×20mmのアーモン ド形のペレットとなる。造粒条件はロール圧縮力:460kN(46.9t)、ロール回転数:4.5rpm、 材料供給のフィーダースクリューの回転数:50rpmとした。造粒後の粒状物に対して、密度試 験 JIS A1225(パラフィン法)を実施し、粒状体としての密度を測定した。またペレットの粒 度分布を JIS A1102 粒度試験のふるい分け法、含水比を JIS A1202 で測定した。

造粒後はロールの隙間から落ちて混ざった原材料が混入しているため、ふるいにより原材料 とペレットに分けた。分けた原材料分は再度ブリケッティングマシンのホッパーに投入し造粒 材料として使用した。図 3.3.3-8 に造粒直後とふるい分け後のベントナイトペレットを示す。



(a) 造粒直後

(b) ふるい後のペレット

## 図 3.3.3-8 製造したベントナイトペレット

無作為に抽出したペレットに対し、パラフィン法により粒状体としての密度を測定した。表 3.3.3・2 に示すように、製造したペレットは 2.0Mg/m<sup>3</sup>以上の高密度ペレットであることを確認 した。

_		☆ 0.0.0 量	• 71 • 7日及相米	
	ケース No.	含水比(%)	湿潤密度(Mg/m <sup>3</sup> )	乾燥密度(Mg/m <sup>3</sup> )
	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 3.3.3-2 ペレットの密度結果

造粒したペレットは図 3.3.3-8 のような形状をしている。目標の密度を達成し易くするため、 原鉱石を破砕したクニゲル GX と重量比で7:3となるように混合充填し、かさ密度を測定した。結果、1.389Mg/m<sup>3</sup>であり、目標とした 1.37Mg/m<sup>3</sup>が達成出来ることを確認した。



図 3.3.3-9 かさ密度測定の様子

③下部狭隘部への適用

下部狭隘部の隙間は最下部の台座付近で約 110mm、開放部との境界付近で 150mm 程度で ある。充填部の幅に対するペレット自体の大きさや、後述する隙間充填装置のサイズを考慮し、 ブリケッティング材をそのまま使用するのではなく、ブリケッティング法をベントナイトの高 密度化の手段とした。

狭隘部への充填が可能なように、ブリケッティング法により製造したベントナイトペレット を、最密充填を可能とするため Fuller-Thompson 曲線による粒度分布に近似するように破砕 した。目標とした粒度分布を表 3.3.3-3 および図 3.3.3-10 に示す。

• • • • • • •			
粒径(mm)	通貨質量百分率(%)	100	
9.5	100	■ 80 フラー曲線	
4.75	70.7	- 60	
2	45.9	20	
0.85	29.9		
0.425	21.2	0.01 0.1 1 10	
0.25	16.2	図 3.3.3-10 目標粒度分布	

表 3.3.3-3 目標粒度分布

ペレットの破砕には、表 3.3.3-4 に仕様を示す装置を使用した。製造は、以下の手順で行った。

100

供給:機械の負荷を確認しつつ手投入 破砕;パルペライザーおよびフラッシュミルによる破砕

分級:振動ふるいで10mm以上の材料を除去(ふるい目開き:10mm)

破砕	型式	動力		ハンマー回転速度		スクリーン	
·		動力(主軸)		3,490rpm (約 50m/s)		破砕条件参照	
パルペライザーFⅡS-3型		200V 2.2kW 4P					
(スイングハンマー式粉砕機)		動力(送軸)					
		200V 0.4kW 4P					
破砕	型式	動力	ナイフロ	回転速度 スクリー		ーン	(底 板)
フラッシュミル FL-200		200V kW 4P	破砕条件参照				
分級	型式	ふるい目	期き ユーラ		ラス		
振動ふるい 702 型		10mm		3			

表 3.3.3-4 機械の仕様

図 3.3.3-11 に目標と破砕後の粒度分布を示す。目標のフラー粒度の 1mm 以下が約 30%であり、他の粒径の通過質量百分率も同程度であることを確認した。



図 3.3.3-11 目標と破砕後の粒度分布



図 3.3.3-12 ブリケッティング材の解砕

解砕後のペレット混合材の平均含水比は 8.66%であり、既知の容積を持つ容器に充填しかさ 密度を測定した結果、1.375 Mg/m<sup>3</sup>であり、目標とした乾燥密度である 1.37Mg/m<sup>3</sup>を達成して いることを確認した。

(b) ロールプレス法

原材料である粉体ベントナイトから直接 Fuller-Thompson 曲線による管理範囲に適合する ベントナイトペレットを製造することは困難である。ブリケッティング法以外に、一旦高密度 したベントナイト圧縮体を製造し、解砕工程を経ることに適した製造方法として、図 3.3.3-4 の④に示したロールプレス法によるシートベントナイト製造法を採用した。本手法によるベン トナイトペレットの製造方法、および粒度調整後のペレット混合材で乾燥密度 1.37Mg/m<sup>3</sup> を 達成出来ることが報告されている[16]。

使用材料には、粉体の山形産 Na 型ベントナイト(クニミネ工業社製、クニゲル V1)を原料 として使用した。加工後のベントナイトペレット(ベントナイト造粒品)の粒度分布が Fuller-Thompson 曲線による管理範囲から大きく逸脱しないように、粒度調整にも細粒分として同じ 粉体ベントナイトを使用した([19]LUCOEX WP2, D2.4, Sep. 2015)。配合は文献([16] 森拓雄、 深谷正明、棚井憲治、土木学会第 72 回年次学術講演会、VII-035、2017 年 9 月.)に準ずる。な お含水比の調整は行わず、出荷時のまま( $\omega$ =9.3%)で使用した。

図 3.3.3-13 にロールプレスによるシート状ベントナイトの製造の様子を示す。



図 3.3.3-13 ロールプレスによるシート状ベントナイトの製造

ロールプレス製法では、ロールプレスへの最適通過回数の検討や、大量解砕・粒度調整の時 短化など、その製造の合理化を図った過程を有している。図 3.3.3-14 に充填材料の製造フロー を示すと共に、図中に示す各 Step に関する概要を示す。



図 3.3.3-14 充填材料製造フロー

■ Step1:造粒

図 3.3.3-15 に使用したロールプレス機を、表 3.3.3-5 にその仕様を示す。造粒には直径 300mm×幅 300mmのロールを使用した。製造の流れとして、まず材料がロールを通過すると 板状に圧縮成形されたベントナイトが排出される。このロール通過を2回繰り返すことにより、 所定の条件を満足するベントナイト板を製造することができる。2回通過後のベントナイト板 の状況を図 3.3.3-16 に示す。



図 3.3.3-15 ロールプレス機



図 3.3.3-16 ロールプレス2回通過後

## 表 3.3.3-5 ロールプレス機の仕様

	150型	300型	450型
ロール径×幅	¢150×150mm	<i>ϕ</i> 300×300mm	¢450×450mm
回転数	~30rpm	~20rpm	$\sim$ 15rpm
押力	~3Ot	~60t	~90t
モーター	11.0kW	18.5kW	30.0kW

造粒後の材料について、パラフィン法(JISA1225)で板状のかさ密度を求め、含水比から乾燥密度に換算した結果を表 3.3.3-6 に示す。

乾燥密度でおおむね 2.0Mg/m<sup>3</sup>を達成していることを確認した。

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

表 3.3.3-6 板状ベントナイトのかさ密度

### ■ Step2:解砕

図 3.3.3-17 に使用したハンマー方式の解砕機を、表 3.3.3-7 にその仕様を示す。ローターが 回転し、材料が遠心力で内壁にぶつかることによって解砕される。



図 3.3.3-17 解砕機

3-30

表 3.3.3-7 角	解砕機の仕様
-------------	--------

処理量 (kg/Hr)	モーター出力 (kW)	ローター回転数 (rpm)	投入口寸法 (Φ)	重量 (kg)
90	1.5	1,500/50Hz	250×280	110
120	3.7	1,000	250×280	230
200	3.7	750	350×335	300
300	7.5	750	440×325	450

## ■ Step3:粒度調整

ロールプレス品を解砕し、さらに細粒分を加え粒度調整したベントナイトペレットを図 3.3.3-18 に示す。解砕後の材料および粒度調整後の材料の粒度分布を図 3.3.3-19 に示す。材料 の粒度分布が、暫定の管理目標とした 2 つの Fuller 曲線(最大粒径 7±2mm)の間に収まってい ることを確認した。この材料について JIS A 1224 に準じて行った、かさ密度試験の結果を表 3.3.3-8 に示す。試験は湿潤状態のままで行い、試験後乾燥密度に換算した。ベントナイトペレ ットの最大密度は 1.46Mg/m<sup>3</sup>で、この材料をスクリューフィーダで狭隘部に充填する場合、目 標とする 1.37Mg/m<sup>3</sup>を達成することが可能である。



図 3.3.3-18 ロールプレス法により製造したベントナイトペレット


図 3.3.3-19 製造したベントナイトペレットの粒度分布

表 3.3.3-8 ベントナイトペレットのかさ密度(乾燥)

	ロールプレス解砕品	粒度調整後
最小密度	1.07	1.12
最大密度	1.40	1.46
		$(Mg/m^3)$

図 3.3.3-20 に使用したミキサを、表 3.3.3-9 にその仕様を示す。一般的なモルタルミキサである。



図 3.3.3-20 使用したモルタルミキサ

表:	3.3.3-9	モルタルミ	、キサの仕様
----	---------	-------	--------

		3	スターミキサー 2	EU	7	ターミキサー 2.	8型	スターミキ	サー 3.5型
9일	式	STR-N2L	STR-N2H	STR-N2UD	STR-N2.8L	STR-N2.8H	STR-N2.8UD	STR-N3.5L	STR-N3.5H
推奨混	東書 81	14	600			800		10	02
動	力	1.0	400W			2	750W		
8	源				单相A	C100V			
定	格	6.8A/50Hz 5.8A/60Hz 11.9A/50Hz 10.4A 60Hz						CAN	
ドラム	寸法		¢610×345m ¢665×345m				φ780 <sup>3</sup>	<345m	
	ψ	700mm	850m	975m	770mm	765mm	950ma	1.030mm	1,085mm
寸法*2	奧行		690mm			710mm	10.000	83	Oma
	高さ	820mm	1,0	20mm	810mm	1,0	SSm	900nm	1.055mm
重	<b>2</b> ≉2	63kg	63kg 65kg 68kg 78kg 80kg 83kg				83kg	102kg	106kg
付員	8			ข่า					シュート

d 充填材料製造技術のまとめ

ブリケッティング法やロールプレス法による高密度ベントナイトペレットの製造試験、およ び充填する空間に対応したペレット充填材の配合について検討した。ベントナイトペレット等 の粉粒体による PEM-坑道間の隙間充填では、目標とするかさ密度を空間への充填率とペレ ット自体の高密度化により達成することとした。本実証試験では狭隘な空間へ適用するペレッ ト充填材として、高密度化したベントナイトの解砕品を Fuller-Thompson 曲線による管理範 囲に適合するように調整したものを採用した。以後の試験では、ブリケッティング法により製 造した大粒ペレットを解砕し粒度調整を行ったペレット充填材 A と、ロールプレス法により製 造したシート状ベントナイトを解砕し粒度調整を行ったペレット充填材 B を使用した。

ブリケッティング材解砕品である「ペレット充填材 A」、ロールプレス材解砕品である「ペレ ット充填材 B」の初期含水比、粒度分布、および湿潤かさ密度を試験直前に計測した結果をそ れぞれ表 3.3.3-10、表 3.3.3-11 および図 3.3.3-21、表 3.3.3-12 および表 3.3.3-13 に示す。

討料番号			ペレット充填	材 A	ペレット充填材 B			
武科留方		1	2	3	1	2	3	
容器+ 湿潤質量(g)	ma	2640.2	2882.0	2651.3	1563.9	1613.4	1654.5	
容器+ 乾燥質量(g)	mb	2485.0	2709.1	2495.5	1489.3	1534.6	1572.2	
容器重量(g)	mc	639.9	640.0	647.5	640.2	641.8	640.8	
含水比(%)	w	8.4	8.4	8.4	8.8	8.8	8.8	
含水比平均	値		8.4%		8.8%			

表 3.3.3-10 ペレット充填材 移送前の初期含水比

表 3.3.3-11 ペレット充填材 移送前の粒度分布

試料	ペレット充力	真材 A	ペレット充填	真材 B
サンプル重量(g)	4016.	0	4002.5	5
ふるい(mm)	通過試料質量(g)	通過百分率	通過試料質量(g)	通過百分率
19.000	4016.0	100.0%	4002.5	100%
9.500	3876.2	96.5%	4002.5	100%
4.750	3316.9	82.6%	3590.2	89.7%
2.000	2250.3	56.0%	2589.6	64.7%
0.850	1429.4	35.6%	1953.2	48.8%
0.425	932.8	23.2%	1629.0	40.7%
0.250	699.4	17.4%	1284.8	32.1%
0.106	405.5	10.1%	860.5	21.5%
0.075	288.7	7.2%	688.4	17.2%



図 3.3.3-21 ペレット充填材 A、Bの移送前の粒度分布の比較

21 01010		22/13 == -			
測定番号	1	2	3	4	5
容器質量(g)	160.6	160.6	160.6	160.6	160.6
容器+材料質量(g)	1262.9	1259.6	1256.2	1256.7	1272.7
材料質量(g)	1102.3	1099	1095.6	1096.1	1112.1
体積(cm <sup>3</sup> )	774.6	774.6	774.6	774.6	774.6
かさ密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.423	1.419	1.414	1.415	1.436
平均かさ密度(g/cm <sup>3</sup> )			1.421		

表 3.3.3-12 ペレット充填材 A の移送前の湿潤かさ密度

表 3.3.3-13 ペレット充填材 B の移送前の湿潤かさ密度

測定番号	1	2	3	4	5
容器質量(g)	160.6	160.6	160.6	160.6	160.6
容器+材料質量(g)	1214.4	1212.8	1224.1	1207.4	1216.5
材料質量(g)	1053.8	1052.2	1063.5	1046.8	1055.9
体積(cm3)	774.6	774.6	774.6	774.6	774.6
かさ密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.360	1.358	1.373	1.351	1.363
平均かさ密度(g/cm <sup>3</sup> )			1.361		

2) ステップ0:スクリューフィーダの基本仕様の設定のための検討

ステップ0では、充填場所に適したスクリューフィーダの基本仕様を設定する。設定に際しては、基本形状を設定したうえで、移送性能(単位時間当たりの移送量)に関わる仕様項目について、適切な仕様を設定するための予備的な移送性能確認試験を実施する。

スクリューフィーダの構造は主として、スクリュー、トラフ、動力装置からなる単純構造の ため、構造面で移送性能に影響を与える基本仕様の設計項目は限定的となる。

構造や機能面で移送性能に影響を与えうる仕様設定項目を挙げると、概ね表 3.3.3-14 のと おりとなる。

仕様設定項目	影響
スクリューフィーダ断面形	移送断面の大小は、単位時間当たりの移送量に最も影響が大き
状	₩.
スクリュー長	スクリュー長が長くなると移送性能が低下する可能性がある。
スクリューピッチ	スクリュー径およびスクリュー回転数が同一の場合、移送性能は
	スクリューピッチに依存すると想定される。
スクリュー回転数	スクリュー径およびスクリューピッチが同一の場合、移送性能は
	スクリュー回転数に依存すると想定される。
充填材料供給口の形状	移送性能を十分に発揮するため、スクリューフィーダからの排出
	に対して十分な供給量を確保できる構造である必要がある。

表 3.3.3-14 移送性能に影響を与えうる仕様項目とその影響

表 3.3.3-14 に示した 5 つのうち最も影響が大きいスクリュー断面形状は、充填箇所の寸法 より限定的である。また、スクリュー長については、最低限必要な長さを確保する必要はある が、それ以上長くする必要性はない。

以上より、スクリュー径およびスクリュー長については施工場所の条件のもとで限定的に設 計することとし、本ステップでは、それ以外の構造等をパラメータとした移送性能確認試験を 行う。

具体的には、スクリューピッチ、スクリュー回転数および充填材料供給口の形状を複数パタ ーン設定し、それらを組合せた試験ケースごとに移送試験(図 3.3.3-22 参照)を行い、単位時 間あたりの移送量(=移送性能)を計測(図 3.3.3-23 参照)し、それぞれの試験ケースにおけ る移送性能を比較することで、移送性能への実際の影響の程度についての知見を得る。

本ステップの結果を次回以降の試作機設計の際の設計仕様に反映させることとする。主とし て実証試験に際してパラメータとしにくいスクリューピッチおよび充填材料供給口の形状を 確定するとともに、スクリュー回転数と移送性能の関係について、その傾向を確認し、制御範 囲を設定する。



図 3.3.3-23 移送性能測定結果イメージ(対象パラメータ:スクリュー回転数の場合)

表 3.3.3-14 に示した各仕様項目への移送性能の依存性を確認するための装置仕様は以下の 通りとした。 a スクリューフィーダ断面形状

下部狭隘部においては、前述のとおり充填場所の隙間寸法が 110~174 mmとなることから、 スクリューフィーダ外径については 110mm 未満とすることを基準とした。

一般的に入手が容易な材料より、外径寸法が101.6 mm (90A)のパイプを採用する。

トラフは、剛性を考慮した厚みとしつつ内空を確保する必要がある。

スクリュー軸についても剛性を持たせつつ、自重によるトラフ内面との摩擦を抑制するため、 中実軸ではなく中空軸が望ましいと考えた。

以上、施工効率、加工の容易さ、および剛性を考慮し、汎用規格のなかから、トラフについ ては外径 101.6mm の sch40 (近似厚さ 5.7mm) 相当の鋼管(内径は 90mm 程度)、スクリュ ー軸については 34mm (25A) の sch160 (近似厚さ 6.4mm) 相当の鋼管とする(図 3.3.3-24 参照)。



本項目は先に述べたとおり、試験パラメータとはしない。

図 3.3.3-24 スクリューフィーダ断面概略図

b スクリュー長(既往の基盤研究における坑道断面対象)

図 3.3.3-25 に既往の基盤研究で示された最小断面の処分坑道における PEM の定置イメージを示す。図中、PEM1 体定置ごとに隙間を充填する場合の充填対象範囲の概念をハッチで示している。

この場合の移送距離は、PEM1 体分の長さと PEM 間のクリアランス、および充填材の堆積 (安息)角 θ によって形成される延長で構成される。

充填材の堆積(安息)角θについては、国の基盤研究における既往の研究成果[13](H16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)P3-641、P3-655)より、粒 状ベントナイト(Granulate 単体)に対して仮定した堆積(安息)角40°を参考とした。

また PEM 間のクリアランスを 150mm とすると、PEM1 体定置ごとに隙間を充填する場合 に最低限必要となる移送距離 L は、以下に示すとおり 6,600mm となる。

よって、定置された PEM と充填装置の施工安全からの離隔の確保等を考慮し、充填材供給 部からスクリューフィーダ先端の排出口までを 7m 程度として移送の可否のみを確認すること とし、スクリュー長は試験パラメータとはしない。

$$L = 3,343mm + 150mm + \frac{2,600mm}{\tan 40^{\circ}} \approx 6,600mm$$



図 3.3.3-25 最小断面の処分坑道への PEM 定置イメージ

c スクリューピッチ

スクリューピッチについては、移送性能への影響を確認するため、一般的なトラフ内径とス クリューピッチの比(1:1/2~2程度)を考慮し、仕様を設定した。

本項目は試験パラメータとし、スクリュー径×ピッチ: $\phi$ 80 mm×70 mm, $\phi$ 80 mm×140 mmの2種類で移送性能のスクリューピッチ依存性を確認することとした。



70 mmピッチ



140 mmピッチ

図 3.3.3-26 スクリューピッチ

d スクリュー回転数

スクリュー回転数は、操業手順(PEM 定置と隙間充填の順序)と PEM 定置ピッチ、1 日当たりの所要施工数量などの前提条件とスクリューピッチによって決められる。

図 3.3.3-25 より、処分坑道径を 2.6m、PEM 外径を 2.316m とすると、PEM1 体ごとの隙 間充填対象範囲の概ねの容積 V は、 V=  $(2.6^2 - 2.316^2) \times \pi/4 \times 3.343 + 2.6^2 \times \pi/4 \times 0.15 = 4.5 m^3$ となる。

充填品質管理の観点より、材料品質のばらつきを抑制するため、1日に PEM1 体分の隙間充 填が可能となるように移送性能を設定する。

1日の作業時間を8時間とした場合、約0.6m<sup>3</sup>/hの移送性能が必要となる。海外での既往の 試験実績([4]FE 試験)を参考に、スクリューフィーダ5本で移送・充填を行うことを想定し た場合、スクリューフィーダ1本あたり、0.12m<sup>3</sup>/hの移送性能が必要となる。

しかし、移送・充填作業に際しては、充填品質管理や、その他様々な作業ロスが生じる可能 性が高く、それらの安全率を考慮し、移送・充填作業効率を 80%とした場合には、0.12m<sup>3</sup>/h÷ 0.8=0.15m<sup>3</sup>/h (≒2.3L/min) 程度の移送性能が必要となる。

ここで、充填後の有効粘土密度(充填密度)を 1.37Mg/m<sup>3</sup>とした場合、乾燥質量換算では、 0.193Mg/h (≒3.2kg/min)の移送性能が必要となる。

スクリュー回転数は、移送性能に大きく影響を及ぼすものと想定されるが、回転数の増加に 伴う充填材供給量のアンバランス(回転数と移送性能の関係の非線形性)や、不測の要因によ る移送効率低下も想定される。よって、スクリュー回転数の制御範囲は、表 3.3.3-15 に示すと おり、移送効率を仮に 70%と設定し、最大制御回転数が最低限必要とする移送性能の約 6 倍 相当となるように設定した。

スクリュー	モータ	スクリュー	設計移	送性能	
ピッチ (mm)	周波数 (Hz)	回転数 (rpm)	L/min (充満率 70% の場合)	kg/min (密度 1.37 の場 合)	備考
	20	8.4	1.7	2.3	
70	40	16.8	3.4	4.7	
	80	33.6	6.8	9.3	
	20	4.2	1.7	2.3	
140	40	8.4	3.4	4.7	
140	80	16.8	6.8	9.3	
	80	33.6	13.6	18.6	倍速ギア

表 3.3.3-15 スクリュー回転数と設計移送性能の設定

e 充填材料供給口の形状

スクリューフィーダへの充填材料供給口の開口については,充填材の供給過多・過少(供給 と排出のアンバランス等)による移送性能低下の可能性を想定し,4種類の供給口形状により, 移送性能への影響を確認した。

設定した充填材料供給口の外観を図 3.3.3-27 に示す.



 $LL:300\,\text{mm} imes 115\,\text{mm}$ 

 $L:200~{
m mm} imes 90~{
m mm}$ 



 $M:100\,\text{mm} imes90\,\text{mm}$ 

 $\mathrm{S}:50~\mathrm{mm} imes90~\mathrm{mm}$ 

図 3.3.3-27 スクリューフィーダパターン材料供給口開口パターン

以上より設計・製作したスクリューフィーダ試作機を、図 3.3.3-28 に示す。



図 3.3.3-28 スクリューフィーダ試作機全景

3) 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

ステップ1では、充填材料を移送する際の基本移送性能、および移送前後の隙間充填材の性状(材料分離や粒度分布等)の変化等の基本情報を取得する。

試験方法は、ステップ0と同様であるが、ステップ1での試験パラメータは、スクリュー回 転数のみである。 ステップ1の実施イメージおよび移送性能計測結果イメージは、それぞれ図 3.3.3-22 およ び図 3.3.3-23 を参照のこと。

4) ステップ2:充填率を高めるための設計仕様の具体化

ステップ2では、幌延 URL 試験坑道2を対象とした狭隘部隙間充填を行うにあたり、隙間 を未充填なく充填できる可能性の高い施工条件や装置仕様(各スクリューフィーダ回転数、回 転方向、付加装置の有無、および上下段スクリューの配置)について調査する。

なお、幌延 URL 試験坑道 2 を対象とした隙間充填装置は、事前に実施した充填予備試験の 結果を受け、図 3.3.3-29 に示すとおりスクリューフィーダの本数を左右対称に合計 4 本を基 本仕様とし、幌延 URL 試験坑道 2 の下部狭隘部片側を模擬した土槽(以下、『模擬土槽』とい う。図 3.3.3-30 参照、詳細は([15] 4 章参照)を用い、以下に示す項目について、設計仕様を 具体化するための充填試験を実施する。

ステップ2の実施イメージを図 3.3.3-31 に示す。



図 3.3.3-29 スクリューフィーダ配置イメージ





図 3.3.3-30 模擬土槽



図 3.3.3-31 ステップ2 実施イメージ

a スクリューフィーダ配置

まず、スクリューフィーダ本数を決定するに至った充填予備試験の概要を以下に示す(詳細は H27 年度 RWMC 報告書 [14] 参照)。

PEM を定置しうる最小断面の処分坑道に PEM を定置した際に生じる隙間の模式図及び寸 法を図 3.3.3-32 に示す。同図中、赤の破線で示した模擬 PEM と試験坑道の 1/4 (下半側)を 模擬した図 3.3.3-33 に示す充填予備試験用の土槽を用いて、図 3.3.3-34 に示すように、比較 的充填率が高くなると思われる土槽最上段より、ベントナイトペレットを人力で自然落下によ って投入する試験を 4 ケース実施した(表 3.3.3-16 参照)。



図 3.3.3-32 最小断面処分坑道に生じる PEM 定置後の隙間



図 3.3.3-33 充填予備試験用土槽



図 3.3.3-34 充填予備試験 ベントナイトペレットの投入状況

ケース名	使用材料 (材料試験でのケース名)	粒子密度 (乾燥密度) Mg/m <sup>3</sup>	含水比 %	備考
1	大粒径(凡そ 25mm 以下)	1.45	26.3	粒度分布
	(CASE1-7-1)			: 🗵 3.3.3-35
2	小粒径(凡そ 10mm 以下)	1.45	24.2	粒度分布
	(CASE1-3-2)			: 🗵 3.3.3-35
3-1	大・小粒径混合	1.45	25.8	粒度分布
				: 🗵 3.3.3-36
3-2	大・小粒径混合	1.73	8.59	粒度分布
				: 🗵 3.3.3-36

表 3.3.3-16 充填予備試験 試験ケース

.............

土の粒度試験(粒径加積曲線)

調査件名

試料番号	5	ト粒	1	<b>卜粒</b>		鴙	料	番	号		大粒		小粒
(深 さ)						(深			さ)				
	粒 径 mm	通過質量百分率%	粒 径 mm	通過質量百分率%	粗	碟		分		%	17		
	75		75		中	礏		分		%	80	[	78
æ	53		53	-	細	礫		分		%	3		21
	37.5	100.0	37.5		粗	砂		分		%	0		1
5	26.5	98.7	26.5		中	砂		分		%	0		0
	19	83.0	19	100.0	縯	砂		分		%			
L)	9.5	26.7	9.5	92.9	シ	N	۰ŀ	分		%	} 0	}	0
¥ .	4.75	2.8	4.75	21.7	粘	±		分		%	J	U.	
	2	0.4	2	1.4	2mm	いふるい	通過	質量	百分署	<u>z</u> %	0	[	1
分	0.85	0.2	0.85	0.3	425µ	m.\$-3	い通過	資量	百分	≚%		[	0
	0.425		0.425	0.3	75µn	n.Srav	・通過	質量	百分	峄 %		[	
析	0.250		0.250		最	大	粒	径		mm	37.5		19
	0.106		0.106		60	%	粒	径	$D_{60}$	mm	15.1		5.75
	0.075		0.075		50	%	粒	径	D50	mm	13.4		5.72
					30	%	粒	径	$D_{30}$	mm	10.0		5.29
					10	%	粒	径	D10	mm	6.78		3.49
æ					均	等	係	数	U <sub>e</sub>		2.23		1.65
降					曲	率	係	数	${U'}_{\mathfrak{c}}$		0.977		1.39
					土 *	立子	の 密	度	ρ	g/cm <sup>3</sup>			
分					使用	した分	散剤						
#5					溶液	濃度,	溶液滑	加加	Ł				
71													
-		i									I		



(社) 地盤工学会 6343

図 3.3.3-35 粒度分布 (ケース 1、ケース 2)

J	IS A	1204
T	GS	0131

土の粒度試験(粒径加積曲線)

調査件名

試料番号			ブレンド試料		試料番号		大、小単体から 算出した曲線	ブレンド試料					
(深 さ)					(深 さ)								
	粒径mm	通過質量百分率%	粒 径 mm	通過質量百分率%	粗		磲		分		%	8	7
	75		75		中		磲		分		%	80	73
~5	53		53		細		磔		分		%	11	18
	37.5	100.0	37.5	100.0	粗		矽	)	分		%	1	2
5	26.5	99.3	26.5	99.5	中		砂	,	分		%	· 0	0
2	19	91.5	19	93.1	細		矽	•	分		%		
	9.5	59.8	9.5	63.4	Þ	,	ir	٢	分		%	} 0	} o
¥.	4.75	12.2	4.75	19.5	粘		±		分		%	J	
	2	0.9	2	1.9	2n	nm.\$	31	通過	質量	百分醫	隆 %	1	2
分	0.85	0.3	0.85	0.1	42	5μm	\$3	い通道	して	t百分 <sup>3</sup>	횓 %	0 .	0
	0.425	0.2	0.425	0.0	75	μm-	ふるい	、通道	質量	百分3	壑 %		
析	0.250	0.0	0.250	0.0	最	7	大	粒	径		mm	37.5	37.5
	0.106		0.106		60	9	%	粒	径	$D_{60}$	mm	9.52	9.05
	0.075		0.075		50	9	%	粒	径	D50	mm	8.61	7.98
			•		30	9	%	粒	径	D <sub>30</sub>	mm	7.16	6.01
					10	9	%	粒	径	D10	mm	4.31	3.44
22					均	4	寧	係	数	$U_{\rm c}$		2.21	2.63
降					曲	1	率	係	数	$U'_{\rm c}$		1.25	1.16
					±	粒	子	の寝	医度	$\rho_{_{\rm E}}$	g/cm <sup>3</sup>		
分					使	用し	た分	散剤					
析					溶	液濃	度,	溶液	忝加;	ł			
51													
				[	[								



(社) 地盤工学会 6343



充填後の状況の一例とイメージ図を図 3.3.3-37 および図 3.3.3-38 に示す。

充填エリア最上部からの充填材投入では、比較的に充填効率が高くなると思われる一方で、 PEM 台座と PEM により形成される隅角部から PEM 下面付近にかけて、いずれのケースに おいても図 3.3.3-37 および図 3.3.3-38 に示すような未充填部分が発生する可能性があること が示された。



図 3.3.3-37 充填後の状況



図 3.3.3-38 未充填部分のイメージ図

充填予備試験の結果より、本検討で充填対象とする幌延 URL 試験坑道 2 の下部狭隘部にお いても、最上段への配置のみの場合、図 3.3.3-39 のように安息角による未充填部分が生じる懸 念がある。未充填抑制対策としては、複数個所からの充填や未充填部分周辺での充填材のアジ テーションなどが考えられるが、確実に未充填部をカバーできるように未充填が生じる箇所に スクリューフィーダを配置し、複数個所から充填することとした。



図 3.3.3-39 上段のみ配置の場合の安息角による未充填部の形成のイメージ

基本的な配置としては、最も充填効率が良いと想定される狭隘部最上部に上段スクリューを 配置し、上段スクリューのみによる充填を行ったとき未充填が生じた箇所に下段スクリューを 配置する(図 3.3.3-40 参照)。

配置の妥当性については、配置の初期設定を行い、以下に示す b から d の各試験において未 充填が生じないことをもって確認することとした。



図 3.3.3-40 上、下段スクリューフィーダ配置イメージ

b スクリュー回転数

ステップ1で確認したスクリュー回転数と移送性能の関係から、単位時間当たりの移送量を スクリュー回転数で管理し、充填率のスクリュー回転数への依存性を確認する。

具体的な方法としては、模擬土槽を用い、スクリューを回転させて模擬土槽内に充填材を充 填しながらスクリューフィーダ自体を一定速度で坑道延長方向に後退させる。この時の充填状 態のスクリュー回転数への依存性について確認する。

確認方法は目視による未充填部分の程度と、充填後の充填材サンプリングによるかさ密度 (充填密度)測定結果を各試験ケースで比較することとした(図 3.3.3-41 参照)。



図 3.3.3-41 スクリュー回転数への依存性確認のイメージ

c 坑道延長方向の充填材傾斜面形成抑止の充填率向上への効果の確認

充填材料の充填による安息角は、図 3.3.3·39 に示す坑道半径方向だけでなく、図 3.3.3·42 に示すとおり坑道延長方向にも生じる。この坑道延長方向の安息角による傾斜は、スクリュー フィーダ直下の充填率の低下や、比較的質量の大きな充填材粒子の分級など、充填品質に影響 を与える要因となる可能性がある。そこで、付加装置として、図 3.3.3·43の右図に示すように スクリューフィーダ先端排出部付近に充填材の傾斜堆積を抑止するための板(以下、『抑止板』 という)を設置したケースを、設置しない場合の最適ケースとの比較のため実施する。



図 3.3.3-42 坑道延長方向の安息角形成イメージ



図 3.3.3-43 抑止板への依存性確認のイメージ

d 隙間形状に対する適切なスクリュー回転方向の確認

スクリューフィーダ排出口では、スクリューの回転方向によって、図 3.3.3-44 のように移送 材料の排出位置に偏りが生じることが予想される。

よって、隙間形状に対する相対的なスクリュー回転方向の、充填率や移送性能、装置への構造への影響の有無を確認する(図 3.3.3-45 参照)。



図 3.3.3-44 軸有スクリューフィーダによる移送材料排出状況



図 3.3.3-45 スクリュー回転方向への依存性確認のイメージ

# e 模擬土槽

(a) 模擬土槽の断面形状

狭隘部の充填試験に用いる模擬土槽は図 3.3.3-46 に示すとおり、実際に試験を行う試験坑 道の、狭隘部断面を模擬して設計・製作した。



図 3.3.3-46 狭隘部充填試験用の模擬土槽の断面形状

(b) 模擬土槽の延長

ペレット充填材安息角が 40°の場合に想定される、坑道延長方向への充填材の 2 次元的な 広がりを図 3.3.3-47 に示す。充填後の充填材のふもと(狭隘部最低部)の広がりは、1,500~ 1,600mm 程度になることから、模擬土槽の狭隘部延長は、2m 程度とした。また、充填開始地 点および充填終了地点では、狭隘部以外に充填材が流れることとなるため、狭隘部前後には組 立台を模擬した区間を設けることとした。



図 3.3.3-47 想定される充填材の2次元的な広がり

(c) 隙間形状に対する適切なスクリュー回転方向の確認への対応

実際に充填する下部狭隘部は左右対称である。模擬土槽は、相対的なスクリュー回転方向変 更できる(前後どちらからも充填できる)よう、前後対称となるようにした。

試験時には図 3.3.3-48 に示すように使用する。



図 3.3.3-48 左右対称に存在する狭隘部への模擬土槽の対応

(d) サンプリング

実際に地下で実施する充填試験では、充填部をサンプリングして密度分布を実測することが できないことから、充填作業時の手順と装置の運転条件によって充填部の密度分布がある範囲 に収まっていることを保証しなければならない。運転パラメータの妥当性を検証するデータと するため、土槽上面の PEM 鋼殻に相当する面には、試料採取用の開口を 16 か所設けた(図 3.3.3-49)。



図 3.3.3-49 模擬土槽上面に設けた試料サンプリング用の窓の配置

## (e) その他の工夫

材質として、土槽下面(組立台側)は鋼製とした。土槽下面の粗度や摩擦等の性状がペレットの安息角形成に及ぼす影響を再現するため、表面仕上げについては、一般的なコンクリート板の表面仕上げ状態を参考に塗料の種類を検討した結果、超速乾 EXE(大同塗料株式会社製)を使用することとした。市販コンクリート板および表面仕上げ、塗装面の比較の指標としては、

CSR 測定(耐滑り性試験:JISA 1454 準拠)による滑り抵抗係数を用いた。市販コンクリート 板と、鋼板に2種類の塗料を塗装した試験体の滑り抵抗係数を比較し、コンクリート板の滑り 抵抗係数と差が0.05程度となる塗料を採用した(CSR 値の差としての0.05という値は、一般 的に測定誤差の範囲とされている)。土槽上面(PEM 側)は充填状況を目視確認できるように、 アクリル等の透明な樹脂とし、PEM 表面は鋼殻であることから上面側は特に表面処理をせず、 アクリル材のままとした。

#### (f) 模擬土槽の外観

上記を踏まえ製作した下部狭隘部の模擬土槽を図 3.3.3-50 に示す。各試験ケースの比較を 容易にするため、土槽端部に妻板を設置し、解放部への充填材の流れを抑制した。



図 3.3.3-50 下部狭隘部 模擬土槽全景

## 5) ステップ3:幌延狭隘部の形状を想定した施工条件設定手法の構築

ステップ3では、適切な充填品質(所定のかさ密度)を確保できる施工条件設定手法の構築 に資するため、ステップ2で得たスクリュー回転数と移送性能の関係、隙間形状との相対的な スクリュー回転方向、および抑止板設置の有無への依存性に関する知見をもとに、模擬土槽(図 3.3.3-52)と上下2本のスクリューフィーダを用い、①上下各スクリューの回転速度(すなわ ち各スクリューでの充填量分担)と、②スクリューフィーダの坑道延長方向の移動速度、を主 なパラメータとして試験ケース(施工条件)を設定し、充填試験を行う。各試験ケースでの充 填品質を比較し、より充填品質(かさ密度)を向上できる可能性の高い施工条件を調査する。 ([15] H29\_RWMC\_4章 4.2.7を参考)

充填品質の比較は、模擬土槽内に充填した充填材重量と模擬土槽容積から得られるバルクの

かさ密度および、ステップ2と同様に模擬土槽上面の PEM 鋼殻に相当する面に設けた試料採 取用の 16 か所の開口より充填材料をサンプリングし、密度分布を測定、確認して行う。 ステップ3の実施イメージを図 3.3.3-51 に示す。



模擬土槽

図 3.3.3-51 ステップ3 実施イメージ



図 3.3.3-52 模擬土槽

6) ステップ4:設定した施工条件での品質確保、再現性の確認

ステップ4では、幌延 URL 試験坑道2における作業性の確認に加え、地下試験環境と同様 の物理的環境においても、ステップ3によって設定した施工条件(各スクリューの回転数と、 スクリューフィーダの坑道延長方向の移動速度の設定)によって所定の充填品質を確保でき、 かつその品質に再現性があることを確認すること、また、必要に応じ改善策を検討することを 目的とし、地上において、実際に地下での実証試験に用いる装置を使用した実証予備試験を実 施する。

実証予備試験実施時の概要図を図 3.3.3-53 に示す。図に示すとおり試験には、4本のスクリ ューと模擬土槽(図 3.3.3-54 および図 3.3.3-55 参照 詳細は[15] 平成 29 年度原環センター 報告書 2018 年 3 月 4 章参照)を用いる。

充填品質の確保および再現性の確認は、ステップ3と同様に、模擬土槽内に充填した充填材 重量と模擬土槽容積から得られるバルクのかさ密度、およびステップ2、3と同様に模擬土槽 上面の PEM 鋼殻に相当する面に設けた試料採取用の 16 か所の開口より充填材料をサンプリ ングし、密度分布を測定して行う。



図 3.3.3-53 ステップ4 実施イメージ



図 3.3.3-54 狭隘部隙間充填装置正面全景



図 3.3.3-55 模擬土槽

(2) 特性要因図の整理(装置・充填方法の特性要因図)

実証試験をとおして評価対象とする装置・充填方法についての充填後のかさ密度への影響因 子を表 3.3.3-17 および図 3.3.3-56 に整理した。

図 3.3.3 56 の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影響3要因(充填 場所の状態、充填材の品質、装置・充填方法)とそれぞれの因子(特性要因図)に基づき、実 証試験をとおして目標とする充填品質を確保するための設定を行う。

品質管理対象		要 因		因 子		
	透水係数	<ul><li>③装置・充填</li><li>方法による影&lt;</li><li>響</li></ul>		充填量の	スクリュー回転数	
				制御	運転時間	
か さ 密度	膨潤圧 有効粘土密 度		装置・充填方 法	充填材流 動の制御	付加層装置(抑止板)の配置	
				充填範囲	スクリュー配置	
				の分担	スクリュー回転数比	

表 3.3.3-17 装置・充填方法の充填密度への影響因子



図 3.3.3-56 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

- (3) 段階的な技術実証・整備
  - 1) ステップ0:スクリューフィーダの基本仕様の設定のための検討
  - a 試験方法

表 3.3.3-18 にステップ0の試験手順を示す。 試験条件を設定し、一定時間移送を行い、1 分毎の移送質量を測定した。

	試験実施手順	試験のポイント	注意・確認事項
1	試験条件(スクリューピッチ、ス クリュー回転数、供給ロ形状、を 設定する		
2	ホッパー内を充填材で満たす	初期投入量(容積、重量)を 記録しておく	
3	所定のスクリュー回転数でのトラ フ内の初期充填状況を確認する	排出口から排出されるまで の時間を確認、記録する。	
4	ホッパー内に充填材を補充しなが ら引続き移送試験を行う	<ol> <li>1分間毎の排出量(質量)、排</li> <li>出充填材のかさ密度を1分</li> <li>毎に測定し、経時推移を確</li> <li>認、記録する</li> </ol>	排出量が安定したのち 3分程度以上続ける
5	試験終了後ホッパーとトラフ内の 充填材残量を確認する		
6	スクリュー回転数を変更して、① ~⑤を実施する		
7	供給ロ形状を変更して、①~⑥を 実施する		
8	スクリューピッチを変更して、① ~⑦を実施する		
9	スクリュー回転数を変更して、① ~⑤を実施する		

表 3.3.3-18 ステップ0 試験実施手順(基本)

b 試験ケース

試験ケースは、初期設定として表 3.3.3-19のとおり設定した。実施し、結果を整理した試験 ケースを赤字で示した。

充填材	スクリュ ーピッチ	材料供給口 形状	スクリュー回転数 (制御周波数)	試験ケース名	実施順序	備考
			16.8rpm(40Hz)	GX70LL40		
		LL 200 mm ¥ 115 mm	25.2rpm(60Hz)	GX70LL60		
		300 mm × 113 mm	33.6rpm(80Hz)	GX70LL80	13	
			16.8rpm(40Hz)	GX70L40	1	
		L 200 mm × 90 mm	25.2rpm(60Hz)	GX70L60	2	
	70 mm	200 mm / (50 mm	33.6rpm(80Hz)	GX70L80	6	
	70 11111		16.8rpm(40Hz)	GX70M40	3	
		M	25.2rpm(60Hz)	GX70M60		
		100 mm > 90 mm	33.6rpm(80Hz)	GX70M80		
		S	16.8rpm(40Hz)	GX70S40	4	
			25.2rpm(60Hz)	GX70S60		
クニゲ		<u> 30 шш ∧ 90 шш</u>	33.6rpm(80Hz)	GX70S80	5	
ルGX		LL 300 mm × 115 mm	8.4rpm(40Hz)	GX140LL40		
			12.6rpm(60Hz)	GX140LL60		
			16.8rpm(80Hz)	GX140LL80	11	
			33.6rpm(80Hz)	GX140LL80 倍速	12	倍速ギア仕様
			8.4rpm(40Hz)	GX140L40	7	
		L 200 mm × 90 mm	12.6rpm(60Hz)	GX140L60	9	
	140 mm	200 mm × 50 mm	16.8rpm(80Hz)	GX140L80	8	
		M 100 mm×90 mm	8.4rpm(40Hz)	GX140M40		
			12.6rpm(60Hz)	GX140M60		
			16.8rpm(80Hz)	GX140M80		
		c	8.4rpm(40Hz)	GX140S40		
		S 50 mm×90 mm	12.6rpm(60Hz)	GX140S60		
			16.8rpm(80Hz)	GX140S80	10	

表 3.3.3-19 試験ケース

c 試験結果の整理

以下に、ステップ0の試験結果から得た成果を整理する。

試験結果の詳細については、[14] (RWMC, 2016)を参照のこと。

①移送性能は供給口形状に依存しなかった

今回設定した供給ロ形状のうち、最小であるSサイズ(幅91mm×長さ50mm)で、設計移送 速度に対する供給性能が十分であったことが要因と考えられる。すなわち、移送性能に影響を 及ぼす開口面積は、さらに小さいものであると思われ、それ以上の大きさの形状であれば移送 性能を損なわないことが分かった(図 3.3.3-57)。



よって、スクリューフィーダの供給口形状は幅 91 mm×長さ 50 mm以上とすることとした。

※開口形状 LL:115mm×300mm、L:91mm×200mm、M:91mm×100mm、S:91mm×50mm 図 3.3.3-57 移送性能の供給ロ形状依存性の確認

②移送性能はスクリュー回転数に依存し、ほぼ一次関数的に比例する

特に含水比が比較的低いクニゲル GX では、ほぼ線形の増加傾向を示したことから、スクリ ュー回転数の変化による顕著な移送性能ロスは見られず、スクリュー回転数と充填時間の管理 によってある程度の充填量管理が可能であることが分かった(図 3.3.3-58)。

また、必要とされる移送性能(乾燥質量で 3.2kg/min 以上)については、実施ケースで最大 約 10.5kg/min(湿潤質量で約 11.5kg/min)と十分達成可能であることを確認した。



①クニゲルGX-ピッチ70mm-開口L



③クニゲル GX-ピッチ 140mm-開口 L 図 3.3.3-58 移送性能のスクリュー回転数依存性確認



②クニゲル GX-ピッチ 70mm-開口 S

スクリュー ピッチ	周波数 Hz	回転数 rpm	設計移 送速度 g/min
	20	8.4	2,300
<b>70</b> mm	40	16.8	4,600
	80	33.6	9,300
	20	4.2	2,300
140mm	40	8.4	4,600
	80	16.8	9,300

※移送材料密度 1.37Mg/m<sup>3</sup>の場合

周波数・回転数と設計移送性能\*の関係

③移送性能はスクリューピッチに依存する

見掛けの移送容積を同じとして比較した場合、図 3.3.3-59 に示すとおり、70 mmピッチのス クリューによる移送性能が高いことが確認された。

要因としては、70 mmピッチのスクリューの方が、投入部の開口を通過するフィンの数が多く (140 mmピッチの2倍),かつ回転数も速く設定されている(140 mmピッチの2倍)ことから、 材料供給部での材料の擾乱により移送効率が高くなったこと、充填材料の安息角によりトラフ 内の移送有効容積のロスが140mm ピッチで大きくなっていたこと(図 3.3.3-60 参照)などが 想定される。

よって、以降の試験は、スクリューピッチ 70mm で実施することとした。



比較①

比較②

図 3.3.3-59 各スクリューピッチの移送性能の比較



図 3.3.3-60 移送有効容積のロスのイメージ

2) 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

## a 試験方法

表 3.3.3-20 にステップ1の試験手順を示す。 試験条件を設定し、一定時間移送を行い、1 分毎の移送質量を測定した。

試験実施手順		試験のポイント	注意・確認事項
	試験条件(スクリュー回転数)を		
Û	設定する		
0	ホッパー内を充填材で満たす	初期投入量(容積、重量)を	
9		<ul> <li>初期投入量(容積、重量)を</li> <li>記録しておく</li> <li>1分間毎の排出量(質量)、排</li> <li>出充填材のかさ密度を1分</li> </ul>	
୦	所定のスクリュー回転数でのトラ		
3	フ内の初期充填状況を確認する		
	ホッパー内に充填材を補充しなが	1分間毎の排出量 (質量)、排	排出量が安定したのち
	ら引続き移送試験を行う	出充填材のかさ密度を 1 分	3分程度以上続ける
4		毎に測定し、経時推移を確	
		認、記録する	
6	試験終了後ホッパーとトラフ内の		
9	充填材残量を確認する		
6	スクリュー回転数を変更して、①		
$\bigcirc$	~⑤を実施する		

表 3.3.3-20 ステップ1 試験実施手順

b 試験ケース

1 - 2 (40Hz)

6.28

表 3.3.3・21 にステップ1 にてペレット充填材 B を対象に実施した試験ケースを示す。また、 単位時間当たりの移送量(湿潤質量)の平均値、最大値、および最小値より、各スクリューフ ィーダの移送性能を、回転速度が 16.8rpm(制御周波数 40Hz)のとき 6.25kg/min、33.6rpm(制 御周波数 80Hz)のとき 12.5kg/min、と設定し、以降ペレット充填材 B を使用する地上試験で は、スクリュー回転数で移送量設定を管理する際の目安(検量線)とすることとした(表 3.3.3-22)。

表 3.3.3-21 ステップ1 試験ケース

充填材料	スクリュー	回転速度 (制御周波数)	試験 ケース
ペッレット	+ L	33.6rpm(80Hz)	1-1
充填材 B	白上	16.8rpm(40Hz)	1-2

試験ケース平均最大値最小値左の結果から設定した<br/>スクリュー移送性能1-1(80Hz)12.6512.7612.5040Hz (16.8rpm) : 6.25kg/min

6.38

表 3.3.3-22 移送性能確認試験結果の整理

6.20

80Hz (33.6rpm) : 12.50kg/min

c 試験結果の整理

試験結果の詳細については [15] (H29 RWMC, 2018) を参照のこと。 以下に、ステップ1の試験結果から得た成果を整理する。

①スクリュー回転数と移送性能の関係を確認した

ペレット充填材移送時も、クニゲル GX を用いたステップ0と同様に、スクリュー回転数と 移送性能は比例関係にあり、試験結果より、含水比 8.8%のペレット充填材 B に対する移送性 能は、スクリュー回転数が 16.8rpm のとき 6.25kg/min、スクリュー回転数が 33.6rpm のとき 12.5kgmin と設定した。また、以降のペレット充填材 B を用いた試験においては、この設定 を、スクリュー回転数で移送量設定を管理する際の目安(検量線)とすることとした。

また、必要とされる移送性能(乾燥質量で 3.2kg/min 以上)については、実施ケースで最大約 11.5kg/min(湿潤質量で約 12.5kg/min)と十分達成していることを確認した。



図 3.3.3-61 ステップ1 ペレット充填材に対する移送性能確認試験結果

②移送前後でペレット充填材の粒度分布に顕著な変化が生じないことを確認した

懸念された、移送前後での粒度分布の変化は、図 3.3.3-62 のとおり顕著なものではないこと から、この点においてペレット充填材とスクリューフィーダの狭隘部充填への適用性が確認で きた。



図 3.3.3-62 移送前後の充填材粒度分布の比較

- 3) ステップ2:充填率を高めるための設計仕様の具体化
- a 未充填部の形成状況の確認(フェーズ0)

解砕し粒度調整を行ったペレットによる下部狭隘部内での3次元的な未充填部の形成状況 を確認するため、上段スクリューの排出口の想定位置から模擬土槽へ充填材を手投入した。

手投入による未充填部の形成状況を図 3.3.3-63 に示す。約 65kg の充填材を PEM 端部より 投入したところ、PEM 端部約 10cm 範囲(未充填部を考慮すると約 15.3kg 相当)を PEM 面 の上部開放部との界面まで充填可能であること、坑道(土槽)延長方向への広がりは、充填位 置から 70cm 程度となること、未充填部と充填部の境界は、PEM 台座より約 30cm の位置に できることを確認した。

以上より、ステップ2における上段スクリューの移動開始のタイミングは、充填材 65kg を 模擬土槽に投入した後とすることとした。また、ペレットの重力落下による充填では上段スク リューと下段スクリューの分担量はおよそ2:1となる目安を得た。



図 3.3.3-63 下部狭隘部内での未充填部の形成状況

b 試験方法

(a) 試験手順

基本的なスクリューフィーダの配置は図 3.3.3-64 に示すように、上段スクリューは模擬土 槽の上部、下段スクリューは『a 未充填部の形成状況の確認(フェーズ0)』の結果を踏まえて、 未充填部を補うように台座側壁から 20cm とした。

トラフには図 3.3.3-65 に示すような狭隘部の断面を追従するような形状の付加装置(抑止板)を取り付けられるようにし、充填部の品質に対する効果を検証した。





図 3.3.3-65 抑止板への依存性確認のイメージ(再掲)

ステップ2では、単位時間当たりの移送量をスクリュー回転数のみで設定することから、充 填試験は安定移送状態(スクリュー内充満状態)より実施した。

また、未充填部を形成しないスクリューの配置選定に着目した試験とするため、スクリュー フィーダの移動は原則連続運転とし、各試験ケースでの移送終了まで試験の中断、再開等はし ない。また、充填開始位置での未充填部の形成を防止するため、スクリューフィーダの移動開 始は下段スクリューフィーダの先端が 200mm 程度以上充填材に覆われた後とした。また、充 填を開始した場所や定常運転時それぞれの部位のデータを取得するため、土槽部分の端部 (PEM 奥端部)から概ね~1m 程度をステップ2で充填する量とした。スクリューフィーダの 移動速度は、模擬土槽単位長さあたりの所要充填量に対し、スクリュー回転数で設定する単位時間当たりの移送量と移動距離から設定した。

表 3.3.3-23 にステップ2の試験手順を示す。

	試験実施手順	試験のポイント	注意・確認事項
1	スクリュー回転方向(左右どちら かの充填対象隙間)を設定する		開店方向はモータで は変更できないため、 模擬土槽の向きで対応 する
2	トラフ内を充填材で満たす	移送量が安定するまで排出 する	土槽には設置しない
3	模擬土槽の所定の位置にスクリュ ーフィーダを設置する	狭隘部端部は妻板等で閉塞 しておく	スクリューの先端がだ れないように養生する
4	所定のスクリュー回転数で充填し ながら、充填架台を後退させる	スクリュー回転数に合わせ た充填架台の後退速度を設 定し、充填状況を確認する	
5	アクリル面より充填状況を確認す る	目視、メガー等によって充填 状況を確認する	
6	充填架台を 1m 後退させ(1m 充填 し)、充填質量と充填容積を測定す る	未充填部を測定・確認する	
7	スクリュー回転数を変更して②~ ⑥を実施する		
8	②~⑦のうち最適ケースに対して 付加装置を使用したケースを実施 する		
9	スクリュー回転方向(充填対象隙 間)を変更して②~⑧を実施する		
10	①~⑨を上段、下段スクリューに 対して、個別に実施する		

表 3.3.3-23 ステップ2の調査実施手順

試験方法の詳細については、[15] (H29 RWMC, 2018) を参照のこと。

c 試験ケース

ステップ2では、ペレット充填材 A を用い、主に①スクリュー回転数、②模擬土槽の向きに 対するスクリュー回転方向、③付加装置(抑止板)による対策の有無に加え、必要に応じてス クリュー配置等の別途対策の要否をパラメータとし、それらの適切と思われる組合せ条件を調 査するとともに、設定した上下段スクリューの配置の適正を確認した。

表 3.3.3-24 にステップ2の試験ケースを示す。

試験は4つのフェーズに分け、上段スクリューと左土槽をフェーズ1、上段スクリューと右 土槽をフェーズ2、下段スクリューと左土槽をフェーズ3、下段スクリューと右土槽をフェー
ズ4とした。

試験の組合わせは、スクリュー上段/下段、右土槽/左土槽、付加装置あり/なし、スクリ ュー回転数3条件とした場合、パラメータの組合わせにより合計 24 条件となるが、結果の比 較を工夫することで試験点数を合理化した。

スクリュー	配置 X−Y(mm)	対象隙間	付加装置	回転速度    安定移送能力目 (kg/min)		1m 充填に 使用する充 填材料の目安(kg)	稼働率	1m充填に要する 時間の目安 (min)	<b>充填架台後退 速度の目安<sup>*2</sup></b> (mm/min)	試験 ケース	実施順序	実施 フェーズ			
					手投入					A-0	0	0			
				16.8rpm(40Hz)	6.4	153	1.00	23.9	42	A-1	2				
			なし	25.2rpm(60Hz)	9.6	153	1.00	15.9	63	A-2					
				33.6rpm(80Hz)	12.8	153	1.00	12.0	84	A-3	1	1			
		L		16.8rpm(40Hz)	6.4	153	1.00	23.9	42	B-1					
			あり	25.2rpm(60Hz)	9.6	153	1.00	15.9	63	B-2					
F 60-	1090-670			33.6rpm(80Hz)	12.8	153	1.00	12.0	84	B-3	3				
TEX				16.8rpm(40Hz)	6.4	153	1.00	23.9	42	A-4	5				
			なし	25.2rpm(60Hz)	9.6	153	1.00	15.9	63	A-5					
		Б		33.6rpm(80Hz)	12.8	153	1.00	12.0	84	A-6	4	,			
		R.		16.8rpm(40Hz)	6.4	153	1.00	23.9	42	B-4		2			
			あり	25.2rpm(60Hz)	9.6	153	1.00	15.9	63	B-5					
				33.6rpm(80Hz)	12.8	153	1.00	12.0	84	B-6	6				
				33.6rpm(80Hz)	12.8	57	1.00	4.4	225	A-7					
			なし	16.8rpm(40Hz)	6.4	57	1.00	8.9	112	A-8	7				
				8.4rpm(20Hz)	3.2	57	1.00	17.8	56	A-9	8	,			
		L					33.6rpm(80Hz)	12.8	57	1.00	4.4	225	B-7		3
			あり	16.8rpm(40Hz)	6.4	57	1.00	8.9	112	B-8	9				
下段	V1_V1			8.4rpm(20Hz)	3.2	57	1.00	17.8	56	B-9					
1.12	AI-11			33.6rpm(80Hz)	12.8	57	1.00	4.4	225	A-10					
			なし	16.8rpm(40Hz)	6.4	57	1.00	8.9	112	A-11	10				
				8.4rpm(20Hz)	3.2	57	1.00	17.8	56	A-12	11				
		n n		33.6rpm(80Hz)	12.8	57	1.00	4.4	225	5 B-10		•			
			あり	16.8rpm(40Hz)	6.4	57	1.00	8.9	112	B-11	12				
				8.4rpm(20Hz)	3.2	57	1.00	17.8	56	B-12					

表 3.3.3-24 ステップ2 試験ケース

d ステップ2試験結果の整理

試験結果および評価の詳細については[15](H29 RWMC, 2018)を参照のこと。

以下に、ステップ2の試験結果から得た充填品質の各パラメータへの依存性の評価結果を整 理する。

①スクリュー回転数への依存性

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。

②スクリュー回転方向(充填対象隙間)への依存性

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、スクリューフィ ーダおよび PEM に対する物理的作用を考慮した場合、左隙間に対するスクリュー回転方向は スクリューモータ側から見て右回転(スクリュー先端側部から見て左回転)が、右隙間に対し てはスクリューモータ側から見て左回転(スクリュー先端部から見て右回転)が優位であると いえる。 ③抑止板への依存性

抑止板の有無の差は、充填品質に大きな影響を与えないものの、上段スクリューフィーダに 対しては、充填可能範囲、および土槽中段部における粗流充填材の分級抑制に若干の効果があ ることが確認された。

なお、本試験での抑止板は、充填状態のスケッチ([15] 図 4.2.6-34~図 4.2.6-37 参照)に 示されているとおり、抑止板背面(スクリューフィーダ根元側)への充填材の流出を抑止する 効果が低かったため、充填品質に寄与しなかったものと考えられる。ステップ3以降では、抑 止板のシール性能を高め、背面への充填材の流出を抑制することで充填品質の向上を図ること とした。抑止板の効果を高めることで充填量に対する充填容積の管理(バルクのかさ密度管理) にも寄与するものと考えた。

以上、ステップ2での試験結果及び考察を受けて、ステップ3以降では、左隙間に対するス クリュー回転方向はスクリューモータ側から見て右回転(スクリュー先端側部から見て左回 転)、右隙間に対するスクリュー回転方向はスクリューモータ側から見て左回転(スクリュー 先端側部から見て右回転)とした。付加装置については、配置した場合の実証を行うこととし た。また、上下段スクリューフィーダの配置は、ステップ2での設定のとおり、上段は上部開 放部との境界部、下段は PEM 台座より 200mm の位置とし、上下段各スクリューフィーダの 充填分担割合とそれに対するスクリュー回転数を臨機応変に変更して適切な運転条件を検討 することとした。

4) ステップ3:幌延狭隘部の形状を想定した施工条件設定手法の構築

ステップ3では、適切な充填品質を確保できる施工条件の構築を目的とし、ステップ2で得 た上段スクリューと下段スクリューそれぞれの充填性能、土槽とスクリュー回転方向、トラフ への抑止板の設置の有無に関する知見を基に、上段/下段スクリューを同時に作動させた試験 を実施し、適切な上段/下段スクリューの分担範囲(各スクリューの回転数)、およびスクリュ ーフィーダの後退速度に関するデータを取得した。

なお、ステップ3はフェーズ 1 およびフェーズ 2 の 2 フェーズで実施した([15](H29 RWMC, 2018))。それぞれの違いは図 3.3.3-66 に示すとおり、模擬土槽の上部への界面閉塞 板の配置の有無となる。界面閉塞板の配置は PEM を定置しうる最小断面の処分坑道(φ 2600mm)と PEM(φ2316mm)との間に生じる狭隘な隙間への充填の状況(開放部がない) により近いものとなる。

本項では、ステップ4で実施した試験ケースの設定の基準となり、幌延 URL 試験坑道2での試験状況をより再現しているフェーズ2の試験結果を対象に示す。



図 3.3.3-66 ステップ3で用いた模擬土槽仕様

a 試験方法

ステップ3では、基本的なスクリューフィーダの配置はステップ2で設定したとおりである が、図 3.3.3-67 に示すように模擬土槽の狭隘部上端に界面閉塞板を設置し、上段スクリューを その直下に配置することで狭隘部を閉鎖した状態での充填試験を実施した。これは PEM を定 置しうる最小断面の処分坑道(φ2600mm)と PEM(φ2316mm)との間に生じる狭隘な隙 間への充填の際の、坑道円周方向に充填後の開放空間がない状況を考慮したためであり、より 現実に近い充填環境を模擬するためである。



図 3.3.3-67 上段/下段スクリューフィーダの基本配置

表 3.3.3-25 ステップ3 試験実施	手順
-----------------------	----

	F VEN / AND J PR											
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											

試験実施手順

初期充填、移動充填、後充填の実施イメージを図 3.3.3-68 に示す。



図 3.3.3-68 初期充填、移動充填、後充填 イメージ

また、ステップ2と同様に、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 16 か所のサンプリング窓から容積既知のシンウォ ールサンプラーにより充填材をサンプリングし、部位ごとの密度分布を取得する。

図 3.3.3-69 に模擬土槽を示す。



図 3.3.3-69 模擬土槽 上面からのサンプリング位置

b 試験ケース

ステップ3では、ペレット充填材 B を用い、①上下各スクリューの回転速度(すなわち各ス クリューでの充填量分担)と、②スクリューフィーダの坑道延長方向の移動速度、をパラメー タとして試験ケース(施工条件)を設定し、充填品質確認試験を行った。各試験ケースでの充 填品質を比較し、より充填品質を向上できる可能性の高い施工条件を調査した。

初回に実施する試験ケースは、界面閉塞版板を配置しないフェーズ1での試験結果[15]を踏まえて設定し、2ケース目以降は、直前の実施状況および結果を踏まえて条件設定し、試験を 進めることとした。

表 3.3.3・26 ステップ3 (フェーズ2)の試験ケースを示す。なお、ステップ3には、左土槽 を用い、左土槽全体の容積および所要充填質量は仕上がり寸法より、平均断面積を 0.1061m<sup>2</sup> として算出した。左土槽の仕上がり寸法より、単位長あたりの所要充填質量は、0.1061 m<sup>3</sup>/m (単位長容積)×1.37Mg/m<sup>3</sup>(所要かさ密度)×1.088(ペレット充填材 B 含水比 8.8%より) =0.15815Mg/m=158.15kg/m となる。

また、【ケース 3-9】以降では、施工条件として後充填工程を追加しているが、後充填は、基本的に試験前には設定せず、模擬土槽から充填材がオーバーフローしない範囲において、充填 状況に応じて任意に時間設定し実施することとした。

		単位服	時当たりま	<b>家</b> 送 册	毂	÷	移動	充填		
試験ク	「ース	(括弧内は	kg/min はスクリュー	-回転数) -回転数)	初期 <del>7</del> k	之 讫填量 g	フィーダ 設計移動 速度	設計 充填量	後充填 kg	備考
		上段	下段	合計	上段	下段	mm/min	kg/m		
3-2	T-1	12.8(33.6)	4.8(12.6)	17.6	6.4	26.4	99.2	177.4	0	フェーズ1の試験条件
3-4	T-1	12.5(33.6)	4.7(12.6)	17.2	6.3	25.8	104.9	163.9	0	フェーズ1との比較
3-5	T-1	12.5(33.6)	4.8(13.0)	17.3	5.2	24.6	102.1	169.8	0	3-4 T-1のロス率より
3-6	T-1	12.5(33.6)	5.3(14.3)	17.8	5.2	25.3	98.0	182.0	0	3-5 T-1のロス率より
3-7	T-1	12.5(33.6)	8.3(22.4)	20.8	4.2	33.0	114.5	181.9	0	3-6 T-1のロス率より
3-8	T-1	9.4(25.2)	9.4(25.2)	18.8	12.7	12.7	115.0	163.1	0	上下比率を1:1として試行
3-9	T-1	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	11.5	13.4	103.5	163.5	5.6	上下比率を6:7として試行
3-9	T-2	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	14.7	17.2	103.5	163.5	7.0	初期充填量変更
3-9	T-3	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	17.3	17.2	103.5	163.5	8.5	上段移動、初期充填量変更
3-9	T-4	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	14.7	20.0	103.5	163.5	8.5	初期充填量変更
3-10	T-1	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	14.7	17.2	99.8	169.5	8.5	架台移動速度を調整

表 3.3.3-26 ステップ3 (フェーズ2) 試験ケース

c ステップ3試験結果の整理

表 3.3.3-27 に試験結果の概要を示す。

		単位服	寺間当たり新	多送量	訳	·定	移動	充填		結果概要			
試験グ	<b>-</b> -ス	(括弧内は	kg/min はスクリュー	-回転数)	初期充填 kg		フィーダ 設定移動 速度	設計 充填量	後充填 kg	土槽充填 かさ密度 (乾燥)	充填率 (1.37Mg/m <sup>3</sup> に対し)		
		上段	下段	合計	上段	下段	mm/min	kg/m		Mg/m <sup>3</sup>	%		
3-2	T-1	12.8(33.6)	4.8(12.6)	17.6	6.4	26.4	99.2	177.4	0	1.386	101.2		
3-4	T-1	12.5(33.6)	4.7(12.6)	17.2	6.3	25.8	104.9	163.9	0	1.386	95.3		
3-5	T-1	12.5(33.6)	4.8(13.0)	17.3	5.2	24.6	102.1	169.8	0	1.305	98.0		
3-6	T-1	12.5(33.6)	5.3(14.3)	17.8	5.2	25 3	98.0	182.0	0	1.327	96.9		
3-7	T-1	12.5(33.6)	8.3(22.4)	20.8	4.2	33.0	114.5	181.9	0	1.359	99.2		
3-8	T-1	9.4(25.2)	9.4(25.2)	18.8	12.7	12.7	115.0	163.1	0	1.357	99.1		
3-9	T-1	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	11.5	13.4	103.5	163.5	5.6	1.374	100.3		
3-9	T-2	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	14.7	17.2	103.5	163.5	7.0	1.376	100.5		
3-9	T-3	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	17.3	17.2	103.5	163.5	8.5	1.398	102.0		
3-9	T-4	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	14.7	20.0	103.5	163.5	8.5	1.361	99.3		
3-10	T-1	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	14.7	17.2	99.8	169.5	8.5	1.379	100.7		

表 3.3.3-27 ステップ3 (フェーズ2) 試験結果の概要

模擬土槽全体での充填密度が、所要の充填密度を満足し、かつ最も多くのサンプリング試料 が所要の充填密度を満足し、各所での充填密度のばらつきの少なかった<u>試験ケース 3-10(T-1)</u> をステップ4における施工条件の基本とすることとした。

試験結果および評価の詳細については[15] (H29 RWMC, 2018) を参照のこと。

- 5) ステップ4:設定した施工条件での品質確保、再現性の確認
- a 試験方法
- (a) 試験手順

試験に用いた模擬土槽とスクリューフィーダの配置を図 3.3.3-70 に示す。



図 3.3.3-70 スクリューフィーダ基本配置

試験の実施手順を表 3.3.3-28 に示す。

A 0.0.0 20 ハノノノ 4 NM 天旭丁	一川只
--------------------------	-----

試驗宝施毛順

	Fred AND T PR											
1	スクリューフィーダ移動速度を設定する											
2	初期充填量を設定する											
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)											
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											

(b) 充填部からのサンプリング

ステップ2、3と同様に、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、かさ密度を測定した。

図 3.3.3-71 に模擬土槽とサンプリング位置を、図 3.3.3-72 にステップ4の実施状況示す。



図 3.3.3-71 模擬土槽 上面からのサンプリング位置



図 3.3.3-72 ステップ4実施状況

b 試験ケース

ステップ4ではステップ3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のための施工条件を検討した。

表 3.3.3-29 にステップ4の試験ケースを示す。

			甾合中間	业无口较送	_	≡л	.÷	移動	充填		
試験ケ	ース	(‡	単位時间) kg 舌弧内はス	ヨたり移送』 g/min クリュー回転	≞ 运数)	初期	定  充填 (g)	フィーダ 設定移動 速度	設計 充填量	後充填 kg	備考
		左右	上段	下段	合計	上段	下段	mm/min	kg/m		
4.1	т 1	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	14.7	17.2	00.8	169.5	8.5	基本
4-1	1-1	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	14.7	17.2	99.8	169.5	8.5	基本
4.1	тр	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	22.5	17.2	00.8	169.5	8.5	上段初期充填60s分追加
4-1	1-3	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	22.5	17.2	99.0	169.5	8.5	上段初期充填60s分追加
4.2	т 1	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	05.4	177.3	8.5	上段初期充填 <b>35s</b> 分追加
4-2	1-1	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	95.4	177.3	8.5	上段初期充填 <b>35s</b> 分追加
4.2	<b>T</b> 2	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	05.4	177.3	12.4	更に後充填 <b>14s</b> 分追加
4-2	1-2	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	95.4	177.3	12.4	更に後充填 <b>14s</b> 分追加
4.2	тр	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	05.4	177.3	7.6	
4-2	1-3	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	95.4	177.3	7.6	

# 表 3.3.3-29 ステップ4 試験ケース

c ステップ4試験結果の整理

試験結果および評価の詳細については[15] (H29 RWMC, 2018) を参照のこと。

表 3.3.3·30 にステップ4の試験結果の概要を、表 3.3.3·31 にステップ4の試験結果整理表 を示す。

		畄位時間	当たり移送		設定 初期充填 (kg)		移動	充填		結果概要			
試験ケース	(	<sup>単位時間</sup> k 活弧内はス	ョたり移送』 g/min クリュー回	転数)			フィーダ 設定移動 速度	設計 充填量	後充填 kg	土槽充填 かさ密度 (乾燥)	充填率 (1.37Mg/m <sup>3</sup> に対し)		
	左右	上段	下段	合計	上段	下段	mm/min	kg/m		Mg/m <sup>3</sup>	%		
A 1 T 1	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	14.7	17.2	00.9	169.5	8.5	1.354	98.8		
4-1 1-1	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	14.7	17.2	99.8	169.5	8.5	1.373	100.2		
4 4 7 2	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	22.5	17.2	00.9	169.5	8.5	1.357	99.1		
4-1 1-3	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	22.5	17.2	99.8	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	0F 4	177.3	8.5	1.368	99.9		
4-2 1-1	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	95.4	177.3	8.5	1.378	100.6		
<b>40 TO</b>	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	0F 4	177.3	12.4	1.360	99.3		
4-2 1-2	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	95.4	177.3	12.4	1.374	100.3		
<b>40 TO</b>	左	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	0F 4	177.3	7.6	1.362	99.4		
4-2 1-3	右	7.8(21.0)	9.1(24.5)	16.9	19.3	17.2	93.4	177.3	7.6	1.387	101.3		

表 3.3.3-30 ステップ4 試験結果の概要

表 3.3.3-31 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 <sup>3</sup> )	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 <sup>3</sup> )	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/m <sup>3</sup> )	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 3.3.3·30 および表 3.3.3·31 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:1.051m<sup>3</sup>/m、 左 1.061m<sup>3</sup>/m であることが影響していると推定され([15]参照)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、移動充填工程において割増率を設定していたのに対し、その効果が顕著に見られなかった要因としては、トラフ内での充填材の圧密等により、充填材のすべり(スクリューの回転とともに充填材も回転する)が生じ、ステップ1で設定した移送性能を下回っていたこと等が 想定される。それぞれの試験結果の取り纏め図表より、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る。

ステップ4の試験結果からは、本試験装置によって、土槽全体での充填率については、概ね 所要の充填密度での充填が可能であり、充填エリア内のスポット的な充填密度分布についても、 95%程度以上の充填率を確保できると思われる。

(4) 地下実証試験に向けた充填品質の管理について

『c ステップ 4 試験結果の整理』より、ステップ 4 の各試験ケースで設定した施工条件により概ね所要のかさ密度(充填密度)を満足する結果を得た。

地下実証試験における充填品質の管理については、地上予備試験で構築した施工条件設定手 法による施工条件の設定と、充填容積全体に対する充填質量にて管理することとした。

施工プロセスの管理については、ステップ4で実施した試験ケースのうち4-2の施工条件を もとにして試験坑道2に合わせた条件を設定することで行う。

具体的には、組立台、PEM 台座、および模擬 PEM の出来形および配置によって算出された 試験坑道 2 の狭隘部充填対象空間の容積、実証試験に用いる充填材によるステップ1で得られ た充填材の含水比より所要充填量(湿潤)Wを算出し初期充填量を設定し、同ステップ1で得 られた上下スクリューの移送速度、および試験ケース 4·2 で得られた移動充填量設定割増率よ り充填架台走行速度を設定する。

以下に設定方法の例を示す。

《地上実証予備試験ステップ4で設定されたパラメータ》

移動充填量設定割增率:112.1%~113.2%

初期充填区間長:0.2(m)

上下スクリュー移送速度比率:上6:下7

《地下実証試験で新たに設定するパラメータ》

上段スクリュー移送速度:su (kg/min)

下段スクリュー移送速度:sl (kg/min)

充填対象区間長:L(m)

充填対象部断面積:A(m<sup>2</sup>)

充填対象区間の容積:V(m<sup>3</sup>)

充填材含水比:ω(%)
所要充填密度(乾燥):ρd(Mg/m<sup>3</sup>)
所要充填量(湿潤):W(Mg)
初期充填量(湿潤):Wi(Mg)
充填対象区間単位長さ当たり所要充填量:Wo(Mg/m)
移動充填量設定値(湿潤):Wm(Mg/m)
移動充填時移動速度設定値:S(mm/min)
《実証試験設定パラメータの算出》

 $V=L\times A$ W=V× $\rho d\times$  (1+ $\omega$ ) Wi=0.2×A× $\rho d\times$  (1+ $\omega$ ) Wo=W/L Wm=Wo× (1.121~1.131)

 $S{=}~(su{+}sl)~{\times}1000{/}Wm{/}$ 

3.3.4 地下実証試験

地下実証試験における詳細な試験の手順や方法、実施状況等については、[20](H30 RWMC, 2019)を参照のこと。

ここでは、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。

(1) 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 3.3.4-1)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 3.3.4-2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。

			充填材含水比				ŧ	刃期充填	ų (20c	:m)		移動充填	Į	後:	充填		
<u>試験</u> ケース	左右	狭隘部 断面積 A (m <sup>2</sup> )	8.8%の場合 の単位長あた りの所要充填 質量 Wo	スクリュー回転速度 および 比率設定(kg/min)			充填時間 設定(sec)		初期充填 設定充填質量 Wi (kg/20cm)		移動充填 設定充填貫量 Wm (kg/m)		移動速度 設定値 S	充填 時間	設計 充填賞量	実充填 かさ密度 (乾燥) (Mg/m <sup>3</sup> )	充填率 (1.37に対 し) (%)
			(kg/m)	上段 su	下段 sl	合計	上殿	下段		設計に対する 割増率		設計に対する割 増率	(mm/min)	(000)	(kg)		
4 3 7 1	左	0.1061	158.1	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	15%	177.3	12.1%	05.2	30	8.5	1.368	99.9
4-2 1-1	右	0.1051	156.7	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	16%	177.3	13.1%	95.3	30	8.5	1.378	100.6
4 2 7 2	左	0.1061	158.1	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	15%	177.3	12.1%	05.2	44	12.4	1.360	99.3
4-2 1-2	右	0.1051	156.7	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	16%	177.3	13.1%	95.5	44	12.4	1.374	100.3
4 2 7 2	左	0.1061	158.1	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	15%	177.3	12.1%	05.2	27	7.6	1.362	99.4
4-2 1-3	右	0.1051	156.7	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	16%	177.3	13.1%	95.3	27	7.6	1.387	101.3

表 3.3.4-1 ステップ4 試験ケース 4-2 の施工条件と実績

表 3.3.4-2 地下充填実証試験の施工条件

<u>試験</u> ケース	左右	狭隘部 断面積 	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)			1	の期充均	(220	m)	移動充填			後	充填		
							充填時間 設定(sec)		初期充填 設定充填質量 Wi (kg/20cm)		移動充填 設定充填買量 Wm (kg/m)		移動速度 設定値 S	充填 時間 (sec)	設計 充填質量	実充填 かさ密度 (乾燥) (Mg/m <sup>3</sup> )	充填率 (1.37に対 し) (%)
				上段 su	下段 sl	合計	上段	下段		設計に対する 動地帯		設計に対する朝 増帯	(mm/min)		(kg)		
地下充填	左	0.1058	154.4	7.57	8.84	16.41	164	125	39.2	15.50/	173.7	12.59/	04.5	44	12.0		
実証	右	0.1068	155.8	7.65	8.92	8.92 16.57 164 125 39.6		175.3		34.3	44	12.2					

(2) 地下実証試験実施状況

図 3.3.4-1 に幌延 URL における実証試験場所(試験坑道 2 内)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 3.3.4-1 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) 図 3.3.4-2



台から)充填装置全景(PEM 側から)図 3.3.4-2充填試験実施状況

### (3) 試験結果の整理

## 1) 充填容積の確認

充填対象となる狭隘部の容積は、図 3.3.4-3 に示すとおり、左:約 0.3538m<sup>3</sup>、右:約 0.3571m<sup>3</sup> 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 0.3570m<sup>3</sup>、右:約 0.3603m<sup>3</sup>となった。



図 3.3.4-3 地下実証試験における実充填容積

## 2) 充填質量確認

左右各 2 本のスクリューフィーダへの充填材全投入質量と充填施工終了後のスクリューフィーダ内への残存質量の計測により、左右の下部狭隘部への実充填質量を算出した結果を表 3.3.4-3 に示す。

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

表 3.3.4-3 下部狭隘部への実充填質量

## 3) 充填密度の算出

1)で示した充填容積と 2)で示した実充填質量より算出した下部狭隘部充填密度の算出結果 を表 3.3.4・4 に、ステップ4の試験結果との比較を表 3.3.4・5 に示す。下部狭隘部の充填密度 は、左右とも、管理値である 1.37Mg/m<sup>3</sup>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 3.3.3・31 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。

		左狭隘部	右狭隘部			
下部狭隘部充填密度	湿潤	1.467	1.492			
$(Mg/m^3)$	乾燥	1.378	1.401			

表 3.3.4-4 下部狭隘部充填密度(乾燥密度は材料製造時の含水比 6.5%を用いて算出)

## 表 3.3.4-5 地下実証試験結果とステップ4の結果との比較

			充填材含水比			and second as		初期充填(20cm)		<b>n)</b>	移動充填		後充填				
<u>試験</u> ケース	左右	狭隘部 断面積 A (m <sup>2</sup> )	8.8%の場合 の単位長あた りの所要充填 質量 Wo	スクリ 比率設	ュー回転 および 定(kg/m	速度 1in)	充填 設定	(時間) (sec)	初) 設定: (kg	期充填 充填質量 Wi /20cm)	移動 設定充 V (kg	充填  填質量 /m ;/m)	移動速度 設定値 S	充填 時間 (sec)	設計 充填質量	実充填 かさ密度 (乾燥) (Mg/m <sup>3</sup> )	充填率 (1.37に対 し) (%)
			(kg/m)	上段 su	下段	合計	上段	下段		RHに対する 開始期		設計に対する朝 増帯	(mm/min)		(kg)		
4.27.2	左	0.1061	158.1	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	15%	177.3	12.1%	05.2	44	12.4	1.360	99.3
4-2 1-2	右	0.1051	156.7	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	16%	177.3	13.1%	55.5	44	12.4	1.374	100.3
			充填材含水比				1	初期充均	(220	m)		移動充填		後	充填		
試験 ケース	左右	狭隘部 断面積 A (m <sup>2</sup> )	6.5%の場合 の単位長あた りの所要充填 質量 Wo	スクリ 比率設	ュー回転 および 定(kg/m	速度 nin)	充城 設定	(時間 (sec)	初) 設定: (kg	期充填 充填質量 Wi /20cm)	移動 設定充 V (kg	充壤  填質量 /m ;/m)	移動速度 設定値 S	充填 時間 (sec)	設計 充填賃量	実充填 かさ密度 (乾燥) (Mg/m <sup>3</sup> )	充填率 (1.37に対 し) (%)
			(kg/m)	上段 su	下段	合計	上段	下段		設計に対する 開始期		設計に対する例 増帯	(mm/min)		(Kg)		
地下充填	左	0.1058	154.4	7.57	8.84	16.41	164	125	39.2	15 59/	173.7	12.5%	04.5	44	12.0	1.378	100.6%
実証	右	0.1068	155.8	7.65	8.92	16.57	164	125	39.6	13.3%	175.3	12.376	54.5	44	12.2	1.401	102.3%

3.3.5 下部狭隘部を対象とした隙間充填技術 成果のまとめ

地上備試験結果をもとに図 3.3.4-3 のとおり施工条件設定手法に基づいて設定した施工条件 による管理を行うことで、表 3.3.4-3 および表 3.3.4-4 に示すとおり所定の充填品質(かさ密 度)の確保と再現が可能であることを実証した。

また、充填密度の相対的な分布やばらつきについても、同様に施工プロセスの管理を行うこ とで、それらの傾向の再現性が示唆された。

以上より、横置き PEM 方式の狭隘部隙間充填技術としてペレット方式を採用する場合、所 定の充填条件の下で施工プロセス管理を行うことで品質の確保と再現が可能であり、一般的な 管理手法となりうる見通しを得た。

3.3.6 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
  - 1) 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と既往の基盤研究で提示された PEM ( $\phi$  2316mm)を定置しうる最小断面の 2 つの概念 (図 3.1.1-1 参照) 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。

充填場所に関する条件は表 3.3.6-1 に示すとおりである。

充填場所 の状態	既往の基盤研究	地下実証試験	地上実証予備試験 (ステップ4)
隙間形状	幅:110mm~174mm	幅:110mm~130mm	幅:110mm~130mm
	円周:約7,000mm(隙間	弧長:約 900mm(隙間中	弧長:約 900mm(隙間中
	中心)	心) ×2 (左右)	心) ×2 (左右)
	隙間断面積:約1.019m <sup>2</sup>	隙間断面積:約 0.213 m <sup>2</sup>	隙間断面積:約 0.211 m <sup>2</sup>
		左隙間:約 0.106m <sup>2</sup>	左隙間:約 0.106m <sup>2</sup>
		右隙間:約 0.107m <sup>2</sup>	右隙間:約 0.105m <sup>2</sup>
	充填延長:約6,600mm	充填延長:約3,343mm	充填延長:約2,000mm
壁面仕様	坑道面:コンクリート	坑道面:コンクリート(モ	坑道面:鋼製(塗装により
		ルタル仕上げ)	コンクリート相当の粗さ
	PEM 面:鋼製 (塗装)	PEM 面:鋼製 (塗装)	に仕上げ)
			PEM 面:鋼製(無塗装)
湧水状態	設定無し	有り(ただし、試験は水分	無し
		除去後に実施)	

表 3.3.6-1 充填場所の条件

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 3.1.1・1 右図に示すとおり坑道断面全周に隙 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 3.1.1・2 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。本実証試験はこれに対してスクリュー4本により充填を行ったものであり、 同程度の所要時間で坑道断面全周の隙間を充填するには 5 倍の 20 本のスクリュー本数で充填 を行うこととなる。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『3.3.6(2) 装置・充填方法による影響』にて示す。

2) 実証成果の拡張・展開

a 隙間形状について

隙間形状については、既往の基盤研究の坑道断面や NUMO のセーフティケースの一例で例 示された断面、その他の断面に関わらず、円形・三心円・馬蹄形(それぞれ処分坑道)と円形 (PEM)の組み合わせにより生じる隙間断面は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設定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、既往の基盤研究における隙間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、空間的な裕度が向上するこ 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見 込まれる。

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、PEM と PEM の間に隙間を設けるような定置概念(例えば図 3.3.3・25 参照)の場合、処 分坑道全断面に生じる隙間を含めてスクリューフィーダによって未充填なく施工することは、 今回の技術実証では行っていないため、他の充填方式を組み合わせるなど、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 件を確立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、表 3.3.6-1 に示すとおり、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 を与える可能性が高いため、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確立する 必要がある。

湧水状態については、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。本実証試験では表3.3.6-1 に示すとおり湧水状態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困難である。よって、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、施工条件を確立する必要がある。

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、熱環境および放射線環境の、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 技術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不可欠となる。

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 度上昇も懸念されることから、施工場所の温度環境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
- 実証成果の整理・分析

段階的な技術実証において実施した試験の実施条件およびその成果概要を表 3.3.6-2 に示す。

表 3.3.6-2 段階的な技術美証の目的、美施条件および成果の博	表 3.3.6-2	ŧ 3.3.6	3.6-2	段階的な技術実証の目的	的、実施条件および成果の構
-----------------------------------	-----------	---------	-------	-------------	---------------

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
<b>ステップO</b> 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	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	<ul> <li>スクリューピッチ 2種(70mm、 140mm)</li> <li>スクリュー回転数 3種(33.6rpm、 25.5rpm、 16.8rpm)</li> <li>充填材供給口形状</li> </ul>	クニゲル GX 含水比:9.6% 初期湿潤か さ密度(参考 値): 1.236Mg/m <sup>3</sup>	<ul> <li>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。</li> <li>直径 90mm×7m のスクリューフィーダで移送が可能である</li> <li>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)</li> <li>スクリューピッチは140mmと比較し70mmの移送性能が高い</li> <li>材料供給口形状はФ90mmの場合、91 mm×50 mm以上であれば移送性能は変わらない</li> </ul>
ステップ1 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	<ul> <li>スクリュー回転数</li> <li>3種(33.6rpm、</li> <li>25.5rpm、</li> <li>16.8rpm)</li> </ul>	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/m <sup>3</sup>	<ul> <li>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、</li> <li>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。</li> <li>33.6rpmのとき 12.5kg/min(乾燥質量で 11.5kg/min)</li> <li>16.8rpmのとき 6.25kg/min(乾燥質量で 5.7kg/min)</li> <li>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。</li> </ul>
ステップ2 ステップ2	充填率を高める ための体化 (スクリュー回 転数、スクリュー回 転数、スクリュー回 転数転方向品器 の影響症した スクリュー配 の妥当性確認)	<ul> <li>スクリュー回転数 3種(33.6rpm、 25.5rpm、 16.8rpm)</li> <li>スクリュー回転方 向</li> <li>抑止板の有無</li> </ul>	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/m <sup>3</sup>	<ul> <li>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</li> <li>への影響を確認した結果、以下を得た。</li> <li>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</li> <li>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</li> <li>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</li> <li>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。</li> </ul>
<b>ステップ3</b> 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	<ul> <li>上段スクリュー回転数</li> <li>下段スクリュー回転数</li> <li>スクリューフィーダ移動速度</li> </ul>	ペレット充 填材 B (ステップ 1と同じ)	<ul> <li>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。</li> <li>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)</li> <li>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)</li> <li>後充填:30sec(8.46kg相当)</li> </ul>
レニステップ4 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	<ul> <li>初期充填量</li> <li>スクリューフィー ダ移動速度</li> <li>後充填量</li> </ul>	ペレット充 填材 B (ステップ 1と同じ)	<ul> <li>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。</li> <li>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%)</li> <li>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)</li> <li>後充填: 44sec (左右各 12.4kg 相当)</li> </ul>
地下実証試験	地上実証予備試 験にて設定した 施工条件による 作業性および充 填品質の再現性 の確認	なし ※ステップ4で設定 した運転条件(試験 ケース 4-2 <b>T</b> -2)を地 下の充填箇所に適用 して充填試験を実施	ペレット充 填材 B 含水比:6.5%	<ul> <li>地上実証予備試験結果を受け、地下実証試験の施工条件を以下のと おり設定し、充填品質の再現性を確認した。</li> <li>初期充填:左隙間 39.2kg (220mm 区間対象、上段 20.7kg、下段 18.5kg、設定充填率 115.5%) 右隙間 39.6kg (上段 21.0kg、下段 18.6kg、 設定充填率 115.5%)</li> <li>移動充填:左上段 21rpm (7.57kg/min) 左下段 24.5rpm (8.84kg/min) 右上段 21.2rpm (7.65kg/min) 右下段 24.7rpm (8.92kg/min) 移動 94.5mm/min (設定充填率 112.5%相当)</li> <li>後充填: 44sec (左 12.03kg、右 12.15 相当)</li> </ul>

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、図 3.1.1-1 右図に示すとおり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。

①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。

②しかし、『3.3.3(1)2)d』に示すとおりスクリュー1本に求められる移送性能が 3.2kg/min (5 本のスクリューを用いて、PEM1 体分/日の充填量である 4.5m<sup>3</sup>の充填材を完了させる場合の 移送性能)とすれば、本実証試験では表 3.3.6-2 に示すとおり、3.2kg/min に対して 2.2~2.6 倍程度(ステップ3および4における移動充填時の移送性能 7.2~8.4kg/min より)の設定で の充填品質を確認しており、2~3本あれば最低限の施工効率は満足する。

③また、7~8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、

④図 3.3.6-1 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。

⑤または弧長約 900mm(表 3.3.6-1 参照)に対し2本のスクリューであることから弧長約 7,000mm(表 3.3.6-1 参照)に対しては、7000mm÷900mm×2で、15~16本程度が得られる。



図 3.3.6-1 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 いても検討対象としなければならない。

以上より、<u>本実証試験と同様に</u>、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、局所的な密度測定の結果では、試験ケース 4-2 での試験結果 ([15] 表 4.2.8.9 および表 4.2.8-10) より、片側隙間 16 か所に対して 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。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のこと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、それぞれの 隙間形状が表 3.3.6-1 に示すように既往の基盤研究の場合と比較すると小さく、かつ隙間自体 の高低差も図 3.3.3-70 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、表 3.3.6-1 のとおり隙間断面積 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 3.3.6-2参照)。

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 程度とする必要がある。



図 3.3.6-2 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 3.3.4-2 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、地上実証予 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。

2) 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。例えば図 3.1.1-1 左図に示す NUMO セーフティケースの一例のよ 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 3.3.6-3 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 3.3.6-3 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 3.3.6-4)。



図 3.3.6-4 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は求められる。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
  - 1) 実証成果の整理・分析
    - a 充填材密度・寸法・形状について 実証試験に用いたペレット充填材の製造時の性状を表 3.3.6-3 および図 3.3.6-5 に示す。

<u></u>		25	10	1		(	
	試験項目	地下実 証試験	ステップ 4	ステップ 3	ステップ 2	ステップ 1	備考
製造 工程	原材料	Na 型ベ ントナイ					
	高密度 化製法	ロールプ レス	ロールプ レス	ロールプ レス	ブリケッ ティング	ロールプ レス	
高密度	含水比 (%)	7.3	8.5	8.5	8.2	8.5	
化後(ペレット、シート状)	乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	2.00	1.98	1.98	2.05	1.98	JIS A 1225
471 T-1	含水比 (%)	6.5	8.8	8.8	8.4	8.8	
解砕 粒度 調整後	最小密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	1.05	1.12	1.12		1.12	HC A 1004
	最大密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	1.47	1.46	1.46		1.46	JIS A 1224
最大粒径		10mm 未満	10mm 未満	10mm 未満	10mm 未満	10mm 未満	Fuller- Thompson 曲線による 管理
移送前初期 湿潤かさ密度(Mg/m <sup>3</sup> ) (参考値)			1.361	1.361	1.421	1.361	ステップ1 相当試験実 施時測定
備考	t	ペレット 充填材 B	ペレット 充填材 B	ペレット 充填材 B	ペレット 充填材 A	ペレット 充填材 B	

表 3.3.6-3 ペレット充填材性状



図 3.3.6-5 製造直後のペレット充填材性状(粒度分布)

試料	ペレット充力	填材 A	ペレット充填材 B		
サンプル重量(g)	4016.	0	4002.5		
ふるい(mm)	通過試料質量(g)	通過百分率	通過試料質量(g)	通過百分率	
19.000	4016.0	100.0%	4002.5	100%	
9.500	3876.2	96.5%	4002.5	100%	
4.750	3316.9	82.6%	3590.2	89.7%	
2.000	2250.3	56.0%	2589.6	64.7%	
0.850	1429.4	35.6%	1953.2	48.8%	
0.425	932.8	23.2%	1629.0	40.7%	
0.250	699.4	17.4%	1284.8	32.1%	
0.106	405.5	10.1%	860.5	21.5%	
0.075	288.7	7.2%	688.4	17.2%	

図 3.3.6-6 充填前のペレット充填材粒度分布



図 3.3.6-7 充填前のペレット充填材粒度分布

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。

高密度化は 2 種類の製造法(ブリケッティング製法によるペレット充填材 A およびロール プレス製法によるペレット充填材 B) にて行った。

今回の実証試験で使用したスクリューフィーダはトラフ内径が約 90mm、スクリュー軸外径 が 34mm (図 3.3.3・24) であり、トラフ内のクリアランスは 28mm 程度となる。よって、移 送対象となるペレット充填材の最大粒径は、28mm よりも十分に小さいものであることが求め

られる。

ブリケッティングによる高密度化ペレットの仕上がり寸法は 20mm×30mm となっている。 対してロールプレス法によるものは、シート状のベントナイトとして製造され、厚さはロール 間隔により調整が可能であり、概ね 10mm 未満の厚さのシート状ベントナイトとして高密度 化される。

本実証試験においては、暫定的な管理目標としてより細粒分の多いふたつのフラー曲線(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([15] 表 4.2.5-8 および図 4.2.5-6 参照)、表 3.3.4-4 のとお り所定の充填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/m<sup>3</sup>を満足するための充填材料の粒子密度については、図 3.3.3-5 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<sup>3</sup>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(図 3.3.6-8)し、実証試験に使用した。







(近景)



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 した。

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<sup>3</sup>(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関する検討が必要となる。

#### 2) 実証成果の拡張・展開

a 充填材密度・寸法・形状について

実証試験結果から、比較的小口径のスクリューフィーダによる移送前後で充填材の品質の変 化が見られなかったことから、特に大口径となることが想定される不特定の断面形状に対して スクリューフィーダ方式を採用する場合も、今回の実証試験で用いたペレット充填材 B を適用 可能と思われる。ただし、スクリュー仕様が変わった場合は、改めて移送前後での確認が必要 である。

なお、今回最密充填のための粒度分布の管理値設定として、フラー曲線を活用したが、フラー曲線は、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。

但し、粒度分布が広範囲になるということは、特に大断面の隙間が対象となる場合、初期充 填における充填材料の落下高さが大きくなり材料分離の可能性も大きくなることが考えられ る。装置・充填方法による影響の項でも示したとおりこれに対応するための初期充填の手順に ついても併せて検討が必要といえる。

### 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、大規模保管、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。 3.4 上部開放部の隙間充填技術の実証

3.4.1 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。本節では図 3.4.1-1 に示した対象断面のうち上部開放部(青ハッチ部)を対象とした充填技術の実証について示す。

上部開放部の形状寸法は、直径 4.0m の円形坑道内に定置された模擬 PEM 上部の最大幅 約 1300mm、模擬 PEM 側部の最大幅 約 700mm、奥行 4m 程度である。

試験坑道2の坑道壁面からの湧水は、にじむ程度であることから、地下実証試験の際に、湧 水が充填材の品質に与える影響は少ないと判断した。そこで、充填場所の状態の不確かさを軽 減するため、本研究における技術実証では、坑道壁面の湧水状態については考慮しないことと した。

また、充填場所の処分坑道は、吹付けコンクリートおよび鋼製支保より構成され、PEM 面は 鋼製であることを前提条件とし、充填技術の実証を進めた。



図 3.4.1-1 充填技術の実証を行う対象断面(幌延 URL 試験坑道 2)

# 3.4.2 充填場所に適した充填方式の設定

隙間充填材の除去技術の観点からは、PEMと坑道との間に施工された隙間充填材は、機械的 /流体的技術での除去試験に適していることが望ましい。広い空間(上部開放部に PEM を定 置した場合に相当する空間)の隙間充填技術としては、下部狭隘部と同様に、スクリューフィ ーダ方式によるベントナイトペレットの充填技術を適用することも考えられる。一方、本研究 では、充填試験の終了から除去試験を開始するまでの期間が、最長で数ヶ月程度であり、充填 したベントナイトペレットを飽和させることが困難である。また、幌延 URLの制約上、水の浸 潤によるベントナイトペレットの膨出を抑制するための耐力壁を試験坑道 2 内に施工すること は不可であった。そのため、ベントナイトペレットで上部開放部を充填した場合、隙間充填材 の除去は乾燥したベントナイトペレットを機械的に掻き出す、または吸引捕集する程度で除去 可能となり、隙間充填材の除去技術課題としての位置付けが弱くなると考えた。 そこで、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 内には、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)[21]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<sup>3</sup>(有効粘土密度 1.15Mg/m<sup>3</sup>) と設定した。

なお、NUMO 包括的技術報告書(レビュー版)[21]では、横置き・PEM 方式における処分 坑道の埋め戻し材の仕様例を記載しており、吹付工法の埋め戻し材として、ベントナイト 50%、 掘削土(ケイ砂)50%、乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>を例示している。

# 3.4.3 吹付け方式 施工品質目標に係る検討

(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、②装置や充填方法および③充填材料の品質となる。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 ぼすと考えらえれる要因及び因子の関係を表 3.4.3-1、図 3.4.3-1 に整理して示す。

表 3.4.3-1 「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			
		险胆心中	坑道形状・寸法		
	①充填場所の状態	原间形状	PEM 形状寸法		
	による影響	陵子山船	表面粗さ		
		壁山扒態	湧水状態 (湧水量、温湿度)		
			材料供給速度 (吹付け機の回転数)		
			吐出エアー流量		
		装置の運転条件	吐出エアー圧		
	<ul><li>②装置<ul><li>・ 充填方法</li><li>による影響</li></ul></li></ul>	(パラメータ)	吹付け角度		
			吹付け距離		
かさ密度 (乾燥密度)			ノズル形状		
		吹付け七法・手順	吹付け順序		
		<b>以付け力伝・</b> 子順	リバウンド材処理		
			ベントナイト		
		原材料	混合する掘削土		
			水(加水)		
	<ol> <li>③充填材の品質</li> <li>による影響</li> </ol>	充填材の締固め性	配合比、含水比、密度		
	によるが貴	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 3.4.3-1 吹付け方式における隙間充填技術 特性要因図

(2) 本研究における施工品質の確認

本研究は実証的な試験であることから、吹付け後のベントナイト混合土の破壊を伴う直接的 な計測手法が適用可能となる。そこで、吹付け後の施工品質の確認方法として、直接的な計測 方法であるコアサンプリングや、間接的な計測手法である吹付け法面の三次元計測などから、 乾燥密度を算出した。複数の計測手法により吹付け後の乾燥密度を算出し、計測手法毎の密度 分布やバラつき等を確認した。また、吹付け前後のベントナイト混合土の配合比や含水比、吹 付け作業に係る施工効率のデータも併せて取得した。

コアサンプリングから算出した乾燥密度の結果を施工条件の設定手法の検証データとし、三 次元計測による充填体積と充填材重量から求めた充填箇所全体の乾燥密度との比較や、地上試 験と地下実証試験とで取得したデータの比較等を実施し、施工条件の設定手法の妥当性の確認 とした。 3.4.4 吹付け方式 充填装置の概念設計と中核技術の抽出

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を例示的に行い、この概 念設計例のうち、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 3.4.4・1 に、横置き・PEM 方式の処分概念に対し、吹付け方式による充填技術を適用し た場合の充填装置の概念設計例を示す。本概念設計例の装置は、遠隔監視・操作による吹付け 充填を前提に、装置前方より、①吹付けノズルおよび制御装置、吹付け機、距離測定器などを 搭載した「吹付け装置本体」、②充填材の粒径調整を行うスクリーニング装置や充填材を吹付け 装置本体へ搬送・供給する設備を搭載した「充填材の搬送・供給装置」、③充填材を格納する「材 料格納装置」、④装置全体を駆動する「駆動装置」で構成される。

本研究では、こ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。

ここで、汎用的な機械を用いた地下実証試験における吹付け装置の構成(吹付けノズルを有 する機械部、吹付け機、吹付け機へ材料供給する運搬機構(ベルトコンベア、材料ホッパー)) を図 3.4.4-2に示す。地下実証試験を含む段階的な技術開発については、3.4.6以降に記載する。



図 3.4.4-2 汎用的な機械を用いた地下実証試験における吹付け装置の構成

3.4.5 吹付け方式による上部開放部の充填技術の整備手順

図 3.4.3・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、装置や充填方法および③充填材料の品質となる。今回の 地下実証試験では、充填場所は幌延 URL 試験坑道 2 と決定しており、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)[21]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、3.4.4 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 3.4.5-1 に示す。



図 3.4.5-1 吹付け方式による上部開放部の充填技術 整備手順

ステップ1(吹付け材料の検討)では、目標乾燥密度を達成する吹付け材料(ベントナイト 混合土)の検討として、掘削土の代替として混合するケイ砂の粒径をパラメータとした土質試 験を実施し、ベントナイト混合土の締固め性(含水比-乾燥密度)を把握した。

続いて、ステップ2(吹付け予備試験)として、土質試験で選定した吹付け材料の候補に対 して、吹付け予備試験を実施した。予備試験では、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(吐出エアー量、吹付け機械の回転数)の見込 み・候補を確認するとともに、地下実証試験で使用する吹付け材料(ベントナイト混合土)の 仕様(ケイ砂の種類、含水比)を決定した。

ステップ3(吹付け要素試験)では、吹付け距離・吹付け角度を最適に調整(固定)した場 合の吹付け試験を実施した。吹付け装置の運転条件のうち、吐出エアー量と吹付け機械の回転 数を試験条件とした場合の乾燥密度を確認し、エアー量および回転数の最適値を設定した。

ステップ4(地上試験)では、幌延 URL 試験坑道2の上部開放部の形状を実寸大で模擬し た地上設備での吹付け試験を行い、汎用的な吹付け装置の操作(オペレータによる標準的な吹 付け方法・手順でのノズル操作)による乾燥密度の確認を行った。なお、乾燥密度の算出手法 として3種類の手法を用いた。コアサンプリングおよび誘電率計測による乾燥密度、3次元計 測による吹付け箇所全体の乾燥密度の確認や、各々の手法による乾燥密度のバラつき等を確認 した。

地下実証試験では、事前の地上試験で構築した「目標乾燥密度を達成する吹付け装置の運転 条件・手順」を地下環境で再現し、地上試験と地下実証試験で取得した乾燥密度等のデータを 比較することで、施工条件の設定手法の妥当性を確認し、整備した充填技術の実証とした

次項より、上記の段階的な技術開発の整備の詳細を示す。

3.4.6 吹付け方式 充填技術の段階的な整備

ステップ1; 吹付け材料検討(土質試験)

目標乾燥密度を達成する吹付け材料(ベントナイト混合土)の検討として、混合するケイ砂 の粒径をパラメータとした土質試験を実施し、ベントナイト混合土の締固め性(含水比-乾燥 密度)を把握した。

まず、各材料(ベントナイト、ケイ砂)の基本物性を確認するため、土粒子の密度試験(JIS A 1202:1999)、土の含水比試験(JIS A 1203:1999)、土の粒度試験(JIS A 1204:1999) を実施、ケイ砂の粒径による乾燥密度への影響を把握するため、3種類のベントナイト混合土(配合するケイ砂を3種)に対し、突固めによる土の締固め試験(JIS A 1210:1999)を実施した。なお、本研究で使用するケイ砂3号および5号は、緩衝材の製作試験等、既往のベントナイト混合土の穴付け材料としての使用実績が多いことより選定した。

本試験で使用した材料を表 3.4.6-1、基本物性(土粒子密度、含水比)を表 3.4.6-2に示す。

 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 号および 5 号)

 配合比
 ベントナイト:ケイ砂=50%:50%

表 3.4.6-1 使用材料

表 3.4.6-2 使用材料の基本物性

項目	ベントナイト	ケイ砂 (3号、5号)
土粒子密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.79	2.65
自然含水比(%)	9.9	0.1

ベントナイト混合土に配合するケイ砂は、3号、5号、3号+5号(重量比1:1)の3種類と した。図 3.4.6-1に3種類のケイ砂の土の粒度試験(JISA1204:1999)結果(粒径加積曲線) を示す。また、3種類のケイ砂を配合したベントナイト混合土の突固め試験結果(締固め曲線) を図 3.4.6-2~図 3.4.6-4に示す。



図 3.4.6-2 ベントナイト混合土 (ケイ砂種類;3号+5号) 締固め曲線



図 3.4.6-3 ベントナイト混合土 (ケイ砂種類;3号) 締固め曲線



図 3.4.6-4 ベントナイト混合土(ケイ砂種類;5号) 締固め曲線

ベントナイト混合土の突固め試験結果(締固め曲線)より、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<sup>3</sup>、ケイ砂種類3号を配合したベントナイト混合土では、最適含水比16.7%、最大乾 燥密度1.68 Mg/m<sup>3</sup>、ケイ砂種類5号を配合したベントナイト混合土では、最適含水比16.2%、 最大乾燥密度1.68Mg/m<sup>3</sup>となり、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<sup>3</sup>)を達成することを確認した。

これらの結果より、ベントナイト混合土の最適含水比近傍で2Ecのエネルギーを付与することで、目標乾燥密度が達成可能となる見通しを得た。また、使用したケイ砂の粒径によるベントナイト混合土の乾燥密度への影響は小さいことを確認した。
(2) ステップ2: 吹付け予備試験(吹付け材料の含水比、ケイ砂種類の決定)

ステップ1の結果より、ベントナイト混合土の最適含水比(Wopt)近傍の含水比で、2Ecの エネルギーを付与することで、目標乾燥密度1.6Mg/m<sup>3</sup>が達成可能な見通しを得た。ステップ 2では、ベントナイト混合土の「含水比」、ステップ1と同様にベントナイト混合土に配合する 「ケイ砂の種類」をパラメータとし、①ノズル等での閉塞の有無、②施工を考慮した連続吹付 けの可否、③目標乾燥密度を達成するための吹付け装置の運転条件の見込み・候補を確認し、 実証試験で使用するベントナイト混合土の仕様を決定した。

1) 試験手順

図 3.4.6-5 に吹付け予備試験の手順を示す。まず、材料(ベントナイト、ケイ砂)の含水比 を測定、混合の際の加水量を決定した。続いて、材料の計量を行い、強制二軸ミキサにより混 合を行い、ベントナイト混合土の製造を行った。製造したベントナイト混合土からの含水比・ 配合率計測用のサンプリングを行った後、吹付け機のホッパーにベントナイト混合土を投入し、 吹付け試験を実施した。吹付け機のホッパーや吹付けノズルの閉塞の有無の確認を行うととも に、吹付け後のベントナイト混合土のサンプリングを行い、含水比、配合率、乾燥密度を確認 した。



## 2) 吹付け装置

吹付け予備試験で使用した吹付け装置は、ベントナイトの吹付けにおいて実績のあるロータ リー式吹付け機(ニードガン 2000)を使用した。材料圧送用のコンプレッサーには、ドライコ ンプレッサー(19m<sup>3</sup>/min、0.7MPa)を使用し、圧送ホース中の水分によりベントナイト混合 土がホース内に付着し、閉塞する可能性を低減した。ホース径は3インチ(内径75mm)、ホ ース長は幌延 URL における試験を想定し 20m、吹付けノズルは吐出口で 30mm に絞ったノ ズルを使用した。ベントナイト混合土の混合には、強制二軸ミキサ(w-500)を使用し、吹付け は、バックホウ(0.7m<sup>3</sup>級)に吹付けノズルを取付けて実施した。吹付け予備試験に使用した 汎用機材を図 3.4.6-6、図 3.4.6-7 に示し、吹付け機、強制二軸ミキサの主要な仕様を表 3.4.6-3 に示す。



(a) 吹付け機 (ニードガン)





(c) ノズル径

(d) ノズル長さ

図 3.4.6-6 吹付け試験に使用した汎用機材 (1/2)



(e) ケイ砂投入サイロ



(f) ベントナイト投入サイロ



(g) ミキサによる混合

- (h) 含水比調整後 吹付け機に投入
- 図 3.4.6-7 吹付け試験に使用した汎用機材 (2/2)

13	. 0.4.00 火田仍成、風雨二
	吹付け機
	ニードガン 2000*1
メーカー	AGC プライプリコ
ホース内径(mm)	63.5
最大骨材粒径(mm)	15
所要空気圧(MPa)	0.74
回転数(rpm)	$5 \sim 16.5$ (常用使用回転数)
吐出量(m³/h)	20 (ホース 20m、0.74MPa 時)
寸法 W×D×H(mm)	$990\! \times\! 1845\! \times\! 1175$
重量 (kg)	約 1200
備老	※1 メーカーカタログ値
C, HI	(標準的な性能)

表 3.4.6-3 吹付け機、強制二軸ミキサの主要な仕様

	強制二軸ミキサ W-500 <sup>*</sup>
メーカー	(株)北川鉄工所
混合容量(m³/バッチ)	0.5
使用最大粗骨材径(mm)	40
寸法 W×D×H(mm)	$1480 \times 2040 \times 1530$
重量 (kg)	2800
備考	※2 メーカーカタログ値

#### 3) 吹付け材料(ベントナイト混合土)

ステップ1の土質試験と同様に、ベントナイト混合土に配合するケイ砂は、3号、5号、3号 +5号(重量比1:1)の3種類とした。また、ステップ1の結果を基に、ベントナイト混合土 の製造時の目標含水比は、最適含水比Wopt±5%を目標として計画したが、高含水比側(Wopt +2.5%以上)のベントナイト混合土は、混合時のミキサへの粘着・付着状況から、吹付けノズ ル等への閉塞が予想されたため、試験条件から除外した。

予備試験で用いたベントナイト混合土の仕様を表 3.4.6-4 に示す。

and + 11	ケイ砂	製造時含水比(目標)					
~~ ~ ~ 7 7 7 ~		Wopt-5%	Wopt-2.5%	Wopt	Wopt+2.5%	Wopt+5%	
Na 型	A:3号+5号	10.8%	12.3%	15.8%	18.3%	(20.8%)	
ベントナイト	B:3号	11.7%	14.2%	16.7%	19.2%	(21.7%)	
	C:5号	11.2%	13.7%	16.2%	18.7%	(21.2%)	

表 3.4.6-4 予備試験時のベントナイト混合土の仕様

4) 試験条件

表 3.4.6-4 に示したベントナイト混合土を用いて、吹付け箱(内寸 350mm×350mm× 100mm)および、側面影響を排した吹付け板に対して吹付け試験を実施した。本試験では、ベ ントナイト混合土に配合するケイ砂の種類、含水比をパラメータとし、吹付け装置の運転条件 のうち、吹付け機の回転数、コンプレッサの吐出圧力、吹付け角度、距離は固定とした。

図 3.4.6-6 に示した吹付け機(ニードガン)は、投入孔内のローター(回転体)の回転数で 圧縮空気のラインへ供給する材料の量を調整する役割を担う。本予備試験では、この回転数を 5rpm と設定した。また、コンプレッサの吐出エアー圧は 0.7MPa、吐出エアー量は 12m<sup>3</sup>と設 定した。

吹付け作業は、吹付けノズルをバックホウに取付け、ノズル先端から吹付け箱、吹付け板までの距離は 1m とし、吹付け箱、吹付け板と吹付けノズルとの角度は 90 度とした。



図 3.4.6-8 吹付ノズル先端から吹付対象(吹付箱、板)との距離確認状況

### 5) 管理項目

予備試験における管理項目は以下である。
①吹付け機のホッパー(材料投入容器)の閉塞の有無:目視確認
②吹付けノズルの閉塞の有無:目視確認
③ベントナイト混合土の製造時、吹付け後の含水比:JISA1203:1999
④吹付け後のベントナイト混合土の乾燥密度:JISA1225:2009

(シンウォールサンプラー(図 3.4.6-9)を用いてコアを採取し土質試験) ⑤吹付け前および吹付け後の配合率: JBAS 107-91 (メチレンブルー吸着量試験)



図 3.4.6-9 シンウォールサンプラー

試験結果

吹付け箱、板に対し、ベントナイト混合土(ケイ砂3号+5号を配合、製造時含水比;15.8%) を吹付けた後の状況を図 3.4.6-10に示す。吹付けたベントナイト混合土から、シンウォールサ ンプラーにて試料を採取(3ヶ所)し、含水比、乾燥密度、配合率のデータを取得した。





(a) 吹付け箱への吹付け後
 (b) 吹付け板への吹付け後
 図 3.4.6-10 吹付け後の状況(ケイ砂3号+5号、製造時含水比 Wopt)

①吹付け機のホッパー(材料投入容器)の閉塞の有無

目視確認の結果、表 3.4.6-4 に示したベントナイト混合土の仕様に対し、吹付け機のホッパ ーへの閉塞は無く施工上の課題は無し、と判断できた。

②吹付けノズルの閉塞の有無

目視確認の結果、表 3.4.6-4 に示したベントナイト混合土の仕様に対し、吹付けノズルの閉 塞は無く施工上の課題は無し、と判断できた。

上記の①②の結果より、吹付け機のホッパー、吹付けノズルでのベントナイト混合土の閉塞 はなく、連続的な吹付けが可能であると判断できた。

③ベントナイト混合土の製造時、吹付け後の含水比

④吹付け後のベントナイト混合土の乾燥密度

吹付け前後のベントナイト混合土の含水比の変化および吹付け後の乾燥密度の結果を表 3.4.6-5 に示す。

製造時の含水比の結果は、目標値に比べやや低い値となったが、概ね目標値と同程度であった。また、製造時と吹付け後の含水比を比較すると、大幅な変化は見られない結果となった。 一方、乾燥密度については、Wopt-5%の条件では、目標乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup> に達しない結果 を一部生じたが、最適含水比(Wopt)に近づくにつれて、高い密度を達成する結果を得た。

ステップ1で取得した締固め曲線上に、吹付け後の乾燥密度をプロットした結果を、ケイ砂 種類3号+5号を例に図3.4.6-11に示す。吹付け箱および側面影響を排した板のどちらの吹付 けの場合も、最適含水比(Wopt)のベントナイト混合土を用いた場合に最も高い密度となった。 なお、側面影響を排した板への吹付けと吹付け箱への吹付けの乾燥密度の差(側面影響による 乾燥密度の差)は、最大で±0.03Mg/m<sup>3</sup>となり、比較的影響が小さいことが確認できた。

			(]]Wop	t-5%	2 Wopt	t-2.5%	<u>3</u> V	Vopt
ベント ナイト	ケイ砂 種類	<ul><li>砂 製造時の目標含水比</li><li>類 は表 3.4.6-4 に準拠</li></ul>		<ul><li>吹付け</li><li>板への</li><li>吹付け</li></ul>	<ul><li>吹付け</li><li>箱への</li><li>吹付け</li></ul>	吹付け 板への 吹付け	<ul><li>吹付け</li><li>箱への</li><li>吹付け</li></ul>	<b>吹付け</b> 板への 吹付け
		製造時 目標含水比(%)	10	.8	12	2.3	15	5.8
	Α	製造時 含水比(%)	10.7	10.7	12.0	12.0	14.6	14.6
	3号+5号	吹付け後 含水比(%)	10.5	10.9	12.1	11.9	14.7	14.6
		乾燥密度(Mg/m³)	1.61	1.58	1.72	1.71	1.76	1.75
NT HI	製造時 目標含水比(%)	11.7		14.2		16.7		
いる空	В	製造時 含水比(%)	10.5	10.5	13.1	13.1	15.4	15.4
ナイト	3号	吹付け後 含水比(%)	10.3	10.8	13.2	13.0	15.6	15.2
2.41.15	r	乾燥密度(Mg/m <sup>3</sup> )	1.50	1.49	1.72	1.72	1.70	1.73
	С	製造時 目標含水比(%)	11	.2	13	8.7	16	5.2
		製造時 含水比(%)	10.5	10.5	12.6	12.6	15.1	15.1
	5号	吹付け後 含水比(%)	10.2	10.9	13.0	12.3	15.2	15.0
		乾燥密度(Mg/m <sup>3</sup> )	1.63	1.63	1.71	1.69	1.76	1.76

表 3.4.6-5 吹付け予備試験 含水比、乾燥密度結果



図 3.4.6-11 締固め曲線と吹付け予備試験 乾燥密度の比較(ケイ砂 3+5 号)

⑤吹付け前および吹付け後の配合率: JBAS 107-91

ベントナイト混合土について、吹付け前後におけるベントナイト配合率の変化をメチレンブ ルー吸着量試験により確認した。

ベントナイトの配合率は、ケイ砂(ベントナイト配合率 0%)およびベントナイトのみ(ベ ントナイ配合率 100%)のメチレンブルー吸着量を測定して作成した検量線を用いて、それぞ れのケース毎に換算した値である。なお、製造時のベントナイト配合率の設定値は 50%であ る。表 3.4.6-6 および図 3.4.6-12 にケースごとのベントナイト配合率の結果を示す。

なお、ケース名は「ケイ砂の種類 — ベントナイト混合土の含水比」で示している。

ケイ砂配合A:ベントナイト混合土に配合するケイ砂3号+5号

ケイ砂配合B:ベントナイト混合土に配合するケイ砂3号

ケイ砂配合C:ベントナイト混合土に配合するケイ砂5号

- 含水比①:最適含水比(Wopt)-5%
- 含水比②:最適含水比(Wopt)-2.5%

含水比③:最適含水比(Wopt)

ケース名	製造時 (吹付け前)	吹付け箱への 吹付け後	吹付け板への 吹付け後
A -①	47.8%	56.2%	57.7%
B -①	47.8%	52.9%	50.0%
C -①	47.7%	50.9%	52.3%
A - ②	47.8%	47.6%	48.3%
B - ②	47.2%	49.3%	48.6%
C -2	45.2%	50.9%	50.8%
A -3	47.4%	52.0%	51.1%
B-3	47.3%	50.8%	49.3%
C -3	47.2%	50.2%	50.2%

表 3.4.6-6 吹付け前後のベントナイト配合率



図 3.4.6-12 吹付け前後のベントナイト配合率

表 3.4.6-6 および図 3.4.6-12 から、全体の傾向として、吹付け前のベントナイト配合率より も、吹付け後のベントナイト配合率がやや高くなった。特に、製造時のベントナイト混合土の 含水比が低い①(Wopt-5%)のケースでは、吹付け後のベントナイト配合率が高くなる傾向 (例えば、A-①のケースでは約 10%増加)が顕著に確認できた。この結果は、含水比が低い場

(例えば、A-①のケースでは約10%増加)が顕著に確認できた。この結果は、含水比が低い場合には、ケイ砂のリバウンドが多いことが原因であると考えられる。一方、含水比が高くなる ほど、吹付け前後のベントナイト配合率の変化が小さい結果となった。

これらの結果より、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%) と決定した。なお、ケイ砂の種類の選定については、一般的に粒径幅の広い材料の方が締固め 性能がよいこと、既往のベントナイト混合土の吹付け材の材料として使用されている実績が多 いことから判断した。決定したベントナイト混合土の仕様を表 3.4.6-7に示す。

Sheeld and	
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 <sup>3</sup>

表 3.4.6-7 ベントナイト混合土の仕様

また、予備試験結果から、表 3.4.6-7 に示したベントナイト混合土に対し、目標乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>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、吐出エア 一量 12m<sup>3</sup>、吐出エアー圧 0.7MPa、吹付け距離 1m、吹付け角度 90 度を確認した。 (3) ステップ3:吹付け要素試験(吹付け装置の運転条件の選定) 吹付け要素試験では、吹付け距離・吹付け角度を最適に調整(固定)した場合の吹付け試験 を実施した。吹付け装置の運転条件のうち、吐出エアー量と吹付け機械の回転数を試験条件と した場合の乾燥密度を確認し、エアー量と吹付け機械の回転数の最適値を設定した。また、吹 付け時のリバウンド率や単位時間当たりの吹付け量など、施工速度に資するデータを併せて取 得した。

### 1) 試験手順

図 3.4.6-13 にステップ3 吹付け要素試験の手順を示す。



図 3.4.6-13 吹付け要素試験試験の手順

2) 吹付け装置

ステップ2の予備試験にて使用した吹付け装置(図 3.4.6-6、図 3.4.6-7)を使用し、要素試験を実施した。

3) 試験条件

吹付け装置の運転条件(パラメータ)は、吐出エアー量、吹付け機の回転数とした。吐出エアー圧については、吹付け機(ニードガン 2000)の所要空気圧の 0.7MPa に固定した。

a フェーズ1:吹付け装置の運転条件の設定

吹付け板に対して垂直に吹付けを実施し、吹付け装置の運転条件(エアー量と回転数)が乾 燥密度へ与える影響を確認し、吹付け装置の運転条件を設定した。

吹付け装置の運転条件(エアー量と回転数)について、コンプレッサのエアー量は、 9m<sup>3</sup>/min(A-1)、12m<sup>3</sup>/min(A-2)、18m<sup>3</sup>/min(A-3)の3条件、吹付け機の回転数は、3rpm(R-1)、 5rpm(R-2)、8rpm(R-3)の3条件とし、合計9条件による吹付け試験を実施した。なお、試験 ケースの表示として、例えば、エアー量9m<sup>3</sup>/min、回転数 3rpm の場合はA1R1と標記するも のとする(表 3.4.6-10)。

エアー量	A-1	A-2	A-3
回転数	(9m <sup>3</sup> /min)	(12m <sup>3</sup> /min)	(18m <sup>3</sup> /min)
R-1 (3rpm)	試験ケース名	試験ケース名	試験ケース名
	A1R1	A2R1	A3R1
R-2 (5rpm)	試験ケース名	試験ケース名	試験ケース名
	A1R2	A2R2	A3R2
R-3 (8rpm)	試験ケース名	試験ケース名	試験ケース名
	A1R3	A2R3	A3R3

表 3.4.6-8 吹付け要素試験(フェーズ1) 試験ケース

b フェーズ2:施工速度に係るデータの取得

フェーズ1の成果から設定した吹付け装置の運転条件(エアー量、回転数)にて、幌延 URL 試験坑道2の上部開放部の形状寸法を簡略化した2種類の吹付け容器に対して、吹付けを実施 し、乾燥密度の他、材料ロスやリバウンド率、単位時間あたりの吹付け重量などの施工速度に 係るデータを取得した。2種類の吹付け容器の説明図を図 3.4.6-14 に示す。



## 4) 管理項目

要素試験における管理項目は以下である。 フェーズ1:吹付け装置の運転条件の設定 ①吹付け機のホッパー(材料投入容器)、吹付けノズルの閉塞の有無 ②吹付け後のベントナイト混合土の乾燥密度:JISA1225:2009、JISA1203:1999

フェーズ2:施工速度に係るデータの取得 ①吹付け後のベントナイト混合土の乾燥密度:JISA1225:2009、JISA1203:1999 ②団粒材除去率、リバウンド率 ③施工速度(単位時間当たりの吹付け重量)

#### 5) 試験結果

a フェーズ1: 吹付け装置の運転条件の設定

吹付け板に対し、ベントナイト混合土(ケイ砂3号+5号を配合、製造時含水比:最適含水比 15.8%)を垂直に吹付けた要素試験の状況を図 3.4.6-10に示す。吹付けたベントナイト混合土 から、シンウォールサンプラーにて試料を採取(3ヶ所)し、乾燥密度等のデータを取得した。



(a) 吹付け板





(b) 吹付けの様子



(c) 吹付け後(d) サンプリングの様子図 3.4.6-15 ステップ3 (フェーズ1) 吹付け要素試験状況

①吹付け機のホッパー(材料投入容器)、吹付けノズルの閉塞の有無

目視確認の結果、ステップ1の結果と同様にベントナイト混合土の吹付け機のホッパーおよ び吹付けノズルへの閉塞は無く施工上の課題は無し、と判断できた。

上記の結果より、ステップ1で決定した仕様のベントナイト混合土について、吹付け機のホ ッパー、吹付けノズルでのベントナイト混合土の閉塞はなく、連続的な吹付けが可能であると 判断できた。

②吹付け後のベントナイト混合土の乾燥密度

吹付け後のベントナイト混合土の乾燥密度を表 3.4.6-9 に示す。なお表中に<>で記した乾燥密度は、ベントナイト混合土の製造時の含水比を最適含水比(Wopt)+2.5%と高含水比側に 調整した材料を用いた場合の吹付けの結果である。

ステップ1で取得した締固め曲線上に、吹付け要素試験から取得した吹付け後の乾燥密度を プロットした結果を図 3.4.6-16 に示す。

表 3.4.6-9、図 3.4.6-16の結果から、吹付け後の乾燥密度は、エアー量の影響を大きく受けることが確認され、エアー量 18m<sup>3</sup>/min の場合に 1.75~1.86Mg/m<sup>3</sup>、エアー量 12 m<sup>3</sup>/min の場合に 1.70~1.81Mg/m<sup>3</sup>、エアー量 9m<sup>3</sup>/min の場合に 1.56~1.60Mg/m<sup>3</sup>となった。

エアー量 9m<sup>3</sup>/min と小さい場合には、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考えられる。一方、エアー量 18m<sup>3</sup>/min のケ ースでは、目標の乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>に対し、+0.15~0.24Mg/m<sup>3</sup>上回る乾燥密度が得られたが、 ややオーバースペックであることと、一般的にエアー量が多い場合にはリバウンド量の増加が 考えられることから、以降の試験では、エアー量 12m<sup>3</sup>/min を採用することとし、回転数は、 今回は最も高密度となった 5rpm を採用した。

なお、ベントナイト混合土の製造時の含水比を最適含水比(Wopt)+2.5%と高含水比側に調整した材料を用いた場合の吹付け結果として、乾燥密度は1.70Mg/m<sup>3</sup>、1.72Mg/m<sup>3</sup>と目標を超える結果を得たが、吹付けノズルでの閉塞が多く、連続的な吹付けは不可であった。

エアー量	A-1	A-2	A-3
回転数	(9m <sup>3</sup> /min)	(12m <sup>3</sup> /min)	(18m <sup>3</sup> /min)
R-1 (3rpm)	1.60 Mg/m <sup>3</sup>	1.74 Mg/m <sup>3</sup>	1.84 Mg/m <sup>3</sup>
R-2 (5rpm)	1.56 Mg/m <sup>3</sup>	1.81 Mg/m <sup>3</sup>	1.86 Mg/m <sup>3</sup>
R-3 (8rpm)	1.61 Mg/m <sup>3</sup>	1.70 Mg/m <sup>3</sup>	1.75 Mg/m <sup>3</sup>
<wopt+2.5%> (5rpm)</wopt+2.5%>		<1.70 Mg/m <sup>3</sup> >	<1.72 Mg/m <sup>3</sup> >

表 3.4.6-9 吹付け要素試験(フェーズ 1) 乾燥密度結果



図 3.4.6-16 締固め曲線と吹付け要素試験(フェーズ1) 乾燥密度の比較

b フェーズ2:施工速度に係るデータの取得

図 3.4.6-14 に示した 2 種類の吹付け容器に対し、ベントナイト混合土(ケイ砂 3 号+5 号を 配合、製造時の含水比:最適含水比 15.8%)を用いて、乾燥密度の他、施工速度に係るデータ を確認する吹付け試験を実施した。なお、吹付け装置の運転条件は、フェーズ1で決定した条 件(エアー量:12m<sup>3</sup>/min、回転数:5rpm)に加え、エアー量によるリバウンド率への影響を 確認するため、エアー量を変更した条件(エアー量:10 m<sup>3</sup>/min、回転数:5rpm)の2 ケース とした。表 3.4.6-10 に試験ケースを、図 3.4.6-17 に試験状況を示す。

試験ケース名	吹付け方向	エアー量	回転数
	<b>火田の</b> 別向	$(m^{3}/min)$	(rpm)
A2R2	垂直	12	5
A2R2	斜め	12	5
A4R2	垂直	10	5
A4R2	斜め	10	5

表 3.4.6-10 吹付け要素試験(フェーズ2) 試験ケース



(a) 吹付け容器およびリバウンド回収設備



(c) 吹付け後



(b) 吹付けの様子



(d) リバウンド材の計量

図 3.4.6-17 ステップ3 (フェーズ2) 吹付け要素試験状況

ベントナイト混合土の製造過程(混合過程)で生じる「ベントナイト混合土が団粒化した材料」(以下「団粒材」と言う)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することとした(図 3.4.6-18、図 3.4.6-19)。 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。

・団粒材の除去率(%) = 団粒材の除去量 混合用ミキサへの材料投入量 × 100





図 3.4.6-19 団粒材の発生の様子(左:ふるい装置、右:発生した団粒材)

また、リバウンド率については、以下の式で算出した。  
・リバウンド率(%) = 
$$\frac{$$
リバウンド回収量  
リバウンド回収量 × 100

フェーズ2の試験結果を表 3.4.6-11 に示す。団粒材の除去率は約 30~40%となり、大きな材料ロスとなったことから、団粒材を解砕して利用する等の対策が必要となった。エアー量が 12m<sup>3</sup>/min の条件ではリバウンド率 35.8~38.8%となり、エアー量を 10m<sup>3</sup>/min に下げた条件ではリバウンド率が 24.4~26.4%と 10%程度、低下した。

乾燥密度に対しては、吹付け方向による密度の違いは少なく、エアー量が 12m<sup>3</sup>/min の条件では、1.76Mg/m<sup>3</sup>、エアー量が 10m<sup>3</sup>/min の条件では 1.61~1.66Mg/m<sup>3</sup>となった。

施工速度について、0.14~0.2m<sup>3</sup>の吹付け体積に対し、吹付け時間は6分~6分30秒となり、 施工速度は1.4~1.9m<sup>3</sup>/hr 程度となった。この施工速度を、吹付け重量に換算すると2.6~3.4 Mg/hr の吹付け速度となる。

試験 ケース名	吹付け 方向	エアー量 (m³/min)	団粒材 除去率 (%)	吹付け 重量 (kg)	リバウンド 率 (%)	乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )
A2R2	垂直	12	38.1	466.8	38.8	1.76
A2R2	斜め	12	37.1	475.2	35.8	1.76
A4R2	垂直	10	28.3	541.6	26.4	1.61
A4R2	斜め	10	31.2	519.6	24.4	1.66

表 3.4.6-11 吹付け要素試験(フェーズ2) 結果

全ての試験ケースで吹付け機の回転数は5rpm

ステップ3(フェーズ1および2)の吹付け要素試験の乾燥密度の結果を表 3.4.6-12 に示し、 吹付け装置の運転条件(エアー量、回転数)と乾燥密度との関係を整理した図を図 3.4.6-20 に 示す。

エアー量回転数	A-1 (9m <sup>3</sup> /min)	A-4 (10m <sup>3</sup> /min)	A-2 (12m <sup>3</sup> /min)	A-3 (18m <sup>3</sup> /min)
R-1 (3rpm)	1.60	-	1.74	1.84
R-2 (5rpm)	1.56	-	1.81	1.86
<wopt+2.5%></wopt+2.5%>		-	<1.70>	<1.72>
(斜め)		1.66	1.76	
(垂直)	-	1.61	1.76	-
R-3 (8rpm)	1.61	-	1.70	1.75





エアー量 10m<sup>3</sup>/min 以上のケースでは回転数に因らず、目標乾燥密度 1.60Mg/m<sup>3</sup>以上を達成 した。図 3.4.6-20 から、エアー量 12m<sup>3</sup>/min の条件で、回転数による乾燥密度への影響を確認 すると 3、8rpm の回転数の乾燥密度の結果 1.70~1.74Mg/m<sup>3</sup> に比べ、5rpm の回転数では、 1.76~1.81 Mg/m<sup>3</sup> (Wopt+2.5%の結果は除く) と高い密度を達成した。

一方で、材料ロスであるリバウンド率に関しては、表 3.4.6-11 に示した通り、エアー量 10m<sup>3</sup>/min の条件に対し 12m<sup>3</sup>/min の条件で 10%程度リバウンド率が増加したことから、エア 一量 18m<sup>3</sup>/min の条件では、更なるリバウンド率の増加が推察される。

上述の通り、吹付け装置の運転条件であるエアー量、回転数は、吹付け後の密度を調整する 重要なパラメータである。エアー量は吹付けエネルギーとなるため、エアー量を増加させるこ とで達成する密度は高くなり、エアー量を減少させた場合には密度が低くなる。一方で、エア ー量を増加させることで、材料の跳ね返りが多く(リバウンド率が高く)なり、材料ロスが増 える。また、回転数は、吹付けエネルギー受ける材料の吐出量を調整するパラメータである。

これらのパラメータは材料の性情により最適な値が異なることから、事前に確認することが 重要となる[22]。

ステップ3までの検討により、目標乾燥密度1.60Mg/m<sup>3</sup>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<sup>3</sup>/min、回転数 5rpm を設定した。ただし、本条件における

リバウンド率(最大 39%)の更なる低減については、次のステップ4の試験(試験坑道2の上 部開放部の形状を実寸大で模擬した地上設備による吹付け試験)で検討することとした。

(4) ステップ4:地上試験

ステップ3までの検討にて決定したベントナイト混合土の仕様および、吹付け装置の運転条件等を表3.4.6-13に示す。

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	票乾燥密度	1.6Mg/m <sup>3</sup>		
日本(上)ナゼ悠	エアー量	10~12 m <sup>3</sup> /min		
	回転数	5rpm		
0)连钩木门	吐出圧	0.7MPa		
吹付け 吹付け距離		1m 程度		
手順・方法	吹付け角度	吹付け面と吹付けノズルの角度を90度		

表 3.4.6-13 ベントナイト混合土の仕様および吹付け装置の運転条件等

ステップ4では、これまでの検討により決定した吹付け装置の運転条件(表 3.4.6-13)に基 づき、上部開放部の形状を実寸大で模擬した坑道にて、汎用的な吹付け機械である伸縮アーム 式吹付け機械を使用し、オペレータによる標準的な吹付け方法・手順でのノズル操作による吹 付け試験を実施し、吹付け後の乾燥密度等を確認した。なお、乾燥密度の算出手法として、3種 類の手法を用いた。コアサンプリングおよび誘電率計測による乾燥密度、3次元計測による吹付 け箇所全体のかさ密度(乾燥密度)の確認や各々の手法による乾燥密度のバラつき等を確認し た。また、リバウンド材の回収方法の検討、ベントナイト混合土の製造工程の改善検討を併せ て行った。 試験手順

図 3.4.6-21 にステップ4 地上試験の試験手順を示す。

まず、フェーズ1(伸縮アーム式吹付け機械による吹付け性能確認試験)として、伸縮アーム 式吹付け機械を用いた場合に、ステップ3までに決定した吹付け機の運転条件で目標乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>を達成可能であるかを確認するため、吹付け用板に吹付けを実施した。

続いて、フェーズ2(伸縮アーム式吹付け機械を用いた模擬坑道への吹付け施工性確認試験) として、模擬坑道内への吹付けを想定し、オペレータによる標準的な吹付け方法・手順でのノ ズル操作による吹付け試験を実施し、吹付け後の乾燥密度、作業性等を確認した。



図 3.4.6-21 ステップ4 地上試験 試験手順

# 2) 試験条件

# a 模擬坑道

模擬坑道の概念および全景を図 3.4.6-22、図 3.4.6-23 に示す。模擬坑道の外周部はライナー プレート、模擬 PEM は直径 2500mm のコルゲート管を使用して製作した。模擬坑道の仕様を 表 3.4.6-14 に示す。



図 3.4.6-22 模擬坑道の概念



図 3.4.6-23 模擬坑道 全景

表 3.4.6-14 模擬坑道 仕様

項目	サイズ	仕様
模擬坑道	直径 4000×高さ 3100×奥行 4000mm	ライナープレート
模擬 PEM	直径 2500×高さ 1800×奥行 3600mm	コルゲート管
模擬坑道妻部	幅 4000mm×高さ 3100mm	コンパネ、単管パイプ等

b 吹付け装置

ステップ3までの検討では、バックホウ(0.7m<sup>3</sup>級)に吹付けノズルを取付けることで、特 に吹付け距離、角度を最適に調整した条件下で、目標品質を達成する吹付け装置の運転条件(エ アー量、回転数)を検討し、最適値を設定した。ステップ4では、既往の土木分野のうち、コ ンクリート及びモルタル吹付けに実績を有する汎用的な吹付け機 伸縮アーム式吹付け機械 (MINIMEC、図 3.4.6-24)を使用して、地下実証試験を見据えた吹付け充填の作業性確認と未 充填部が生じない吹付け方法・手順を確認した。その他の吹付け装置(例えば、吹付け機(ニ ードガン)等)については、ステップ3までに使用した装置(図 3.4.6-6、図 3.4.6-7)と同一 である。

項目	用途・仕様	吹付け機 外観
伸縮ブーム延長	2100mm	normel Ek
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	横方向:6400mm	
(図 3.4.6-25)	垂直方向: 8000mm	
ブーム油圧システム	電気-油圧: 7.5kW/50Hz/1450rpm	

図 3.4.6-24 伸縮アーム式吹付け機械(MINIMEC) 仕様



3-123

また、リバ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 3.4.6-26)を用いて行いて吸引除去を行い、その重量を計測 した。

<u>項目</u>	用途・仕様	<u>吹付け機 外観</u>
吸引内径	<u>75mm</u>	
排出内径	<u>125mm</u>	
全長	<u>1010mm</u>	
幅	<u>280mm</u>	and the second
重量	<u>25kg</u>	
材質	SUS304	
X	346-26 27	- クター (JT75S-5) 仕様

3) 管理項目

ステップ4 地上試験における管理項目は以下である。

フェーズ1:伸縮アーム式吹付け機械による吹付け性能確認試験

(伸縮アーム式吹付け機械を用いた場合にステップ3までに決定した吹付け機の運転条件 で目標乾燥密度1.6Mg/m<sup>3</sup>を達成可能であるかを確認するため、吹付け用板に吹付け) ①吹付け後のベントナイト混合土の乾燥密度: JISA 1225:2009、JISA 1203:1999

フェーズ2:伸縮アーム式吹付け機械を用いた模擬坑道への吹付け施工性確認試験 (模擬坑道内への吹付けを想定し、機械である伸縮アーム式吹付け機械を使用し、オペレー タによる標準的な吹付け方法・手順でのノズル操作による吹付け試験を実施し、吹付け後 の乾燥密度、作業性等を確認)

①吹付け後のベントナイト混合土の乾燥密度: JISA 1225:2009、JISA 1203:1999

a) コアサンプリング試料の土質試験(JISA 1225:2009)から、乾燥密度の算出

b) 誘電率計測による乾燥密度の算出

c) 3 次元計測による吹付け体積と吹付け重量から、乾燥密度の算出 ②団粒材除去率

③リバンウド率

④吹付け後の配合率: JBAS 107-91 (メチレンブルー吸着量試験) ⑤施工速度(単位時間当たりの吹付け量) 試験結果

a 伸縮アーム式吹付け機械による吹付け性能確認試験

伸縮アーム式吹付け機械を用いた吹付け性能確認試験の様子を図 3.4.6-27 に示す。また、ス テップ4での吹付け機の運転条件を表 3.4.6-15 に示す。本試験では、吹付け用板への吹付けを 実施し、コア採取による密度の確認を行った。試験の結果、乾燥密度は、1.65 Mg/m<sup>3</sup>となり、 伸縮アーム式吹付け機械を用いた場合においても、ステップ3までに決定した吹付け装置の運 転条件により、目標の乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>を達成可能であることを確認した。



(a) 伸縮アーム式吹付け機械 による吹付け



(b) 吹付け後状況



(c) コアサンプリング

図 3.4.6-27 伸縮アーム式吹付け機械による吹付け性能確認試験

充填後の目標乾燥密度		1.6Mg/m <sup>3</sup>	
吹付け機	エアー量	$10 \sim 12 \text{ m}^{3/\text{min}}$	
	回転数	5rpm	
の連転未任	吐出圧	0.7MPa	
	吹付け距離※	(目標) lm 程度	
吹付け	吹付け角度※	(目標) 吹付け面と吹付けノズルの角度を垂直	
手順・方法	※伸縮アーム式吹付け機械を用いた吹付け、オペレータの操作により		
	吹付け距離、タ	角度を制御	

表 3.4.6-15 ステップ 4 吹付け機の運転条件

b 伸縮アーム式吹付け機械による模擬坑道への吹付け施工確認試験

準備した模擬坑道内の吹付け箇所に対し、伸縮アーム式吹付け機械を用いて、オペレータの 操作により吹付け面から 1m 程度の離隔を保ちながら、吹付け面にできるだけ直角となるよう にノズルの向きを調整して吹付けを実施した。模擬坑道への吹付け状況を図 3.4.6-28 に示し、 吹付け充填後の状況を 3 次元計測による吹付け法面の画像と併せて図 3.4.6-29、図 3.4.6-30 に 示す。



図 3.4.6-28 伸縮アーム式吹付け機械による模擬坑道への吹付け施工確認試験



図 3.4.6-29 吹付け充填後の状況及び3次元計測による吹付け法面の画像(1/2)



図 3.4.6-30 吹付け充填後の状況及び3次元計測による吹付け法面の画像(1/2)

吹付け後のベントナイト混合土の乾燥密度の算出は、①コアサンプリング試料による土質試 験、③誘電率計測、③3次元計測(吹付け体積と吹付け重量から乾燥密度の算出)、の3種類の 方法により実施した。なお、誘電率計測による品質確認(乾燥密度)検討の詳細は、3.4.6(4)5) に後述する。以下より、3種類の方法により算出した乾燥密度の結果を示す。 (a) コアサンプリングによる乾燥密度

コアサンプリングは、ハンディドリルおよびコアサンプラーを用いて実施した。使用したハ ンディコアドリル及びコアプラーを図 3.4.6-31 に示す。



図 3.4.6-31 ハンディコアドリル、コアサンプラー

コアサンプリングによる密度計測の結果を図 3.4.6-32 に示す。全体での乾燥密度は 1.44~ 1.70Mg/m<sup>3</sup>にばらつく結果となっており、平均乾燥密度は 1.61Mg/m<sup>3</sup>、標準偏差は 0.05Mg/m<sup>3</sup> であった。試験の 2 日目、3 日目において乾燥密度が 1.5Mg/m<sup>3</sup>以下の低い箇所があったが、吹 付け個所へのノズルの挿入が難しく吹付け面に対して垂直にノズルが当たらなかったこと、吹 付け面とノズルとの距離が離れてしまったこと等の影響が考えられる。3 日目以降は、垂直に ノズルが当たるよう機械配置のおよびノズル向きについて慎重に調整を行ったため、バラツキ の少ない乾燥密度が得られたと考えられる。図 3.4.6-33~図 3.4.6-36 にコアサンプリングを実 施した日毎の密度測定結果を示す。



平均	1.61 Mg/m <sup>3</sup>
標準偏差	0.05 Mg/m <sup>3</sup>
中央値	1.62 Mg/m <sup>3</sup>
範囲	0.27 Mg/m <sup>3</sup>
最大値	1.70 Mg/m <sup>3</sup>
最小值	1.44 Mg/m <sup>3</sup>
標本数	64

図 3.4.6-32 コアサンプリング試料による乾燥密度の算出および度数分布





【サンプリング箇所の含水比、乾燥密度】

No.	含水比(%)	乾燥密度(Mg/m <sup>3</sup> )
1	16.57	1.49
2	16.32	1.70
3	17.78	1.66
4	17.40	1.65
5	17.26	1.68
6	17.29	1.64
$\overline{\mathcal{O}}$	17.08	1.62
8	17.88	1.65





【乾燥密度の平均他】		
平均	1.64 Mg/m <sup>3</sup>	
標準偏差	0.06 Mg/m <sup>3</sup>	
中央値	1.65 Mg/m <sup>3</sup>	
範囲	0.21 Mg/m <sup>3</sup>	
最大値	1.70 Mg/m <sup>3</sup>	
最小値	1.49 Mg/m <sup>3</sup>	
標本数	8	

図 3.4.6-33 試験2日目 吹付け後の乾燥密度および度数分布





【サンプリング箇所の含水比、乾燥密度】

No.	含水比(%)	乾燥密度(Mg/m <sup>3</sup> )
1	17.32	1.57
2	17.45	1.54
3	17.80	1.64
4	17.80	1.62
5	16.94	1.44
6	18.39	1.61
$\bigcirc$	17.37	1.57
8	17.63	1.58
9	18.15	1.66
10	17.92	1.65
(11)	17.69	1.61





【サンプリング箇所の乾燥密度図】



【乾燥密度の平均他】		
平均	1.59 Mg/m <sup>3</sup>	
標準偏差	0.06 Mg/m <sup>3</sup>	
中央値	1.61 Mg/m <sup>3</sup>	
範囲	0.23 Mg/m <sup>3</sup>	
最大値	1.66 Mg/m <sup>3</sup>	
最小值	1.44 Mg/m <sup>3</sup>	
標本数	11	

図 3.4.6-34 試験3日目 吹付け後の乾燥密度および度数分布



【吹付け時の状況・条件】 ・吹付け面に対しノズルが垂直

・ノズルの離隔:凡そ 1m



【サンプリング箇所の含水比、乾燥密度】

No.	含水比(%)	乾燥密度(Mg/m <sup>3</sup> )
1	17.63	1.62
2	17.79	1.62
3	17.84	1.64
4	17.17	1.62
5	18.30	1.62
6	17.32	1.67
$\bigcirc$	17.93	1.65
8	18.33	1.64
9	17.66	1.62
10	17.65	1.63
(11)	18.70	1.63
12	18.21	1.63
(13)	17.92	1.62
14	17.72	1.55
(15)	17.70	1.64



【乾燥密度の平均他】		
平均	1.63 Mg/m <sup>3</sup>	
標準偏差	0.03 Mg/m <sup>3</sup>	
中央値	1.63 Mg/m <sup>3</sup>	
範囲	0.12 Mg/m <sup>3</sup>	
最大値	1.67 Mg/m <sup>3</sup>	
最小值	1.55 Mg/m <sup>3</sup>	
標本数	15	

図 3.4.6-35 試験4日目 吹付け後の乾燥密度および度数分布



・ノズルの離隔:~1.5m 程度



【サンフ	°IJ	ンク	"箇所の含水比、	乾燥密度】
------	-----	----	----------	-------

No.	含水比(%)	乾燥密度(Mg/m <sup>3</sup> )
1	18.38	1.66
2	18.12	1.59
3	16.92	1.63
4	17.81	1.63
5	16.52	1.70
6	16.50	1.70
$\bigcirc$	17.52	1.62
8	15.31	1.60
9	16.72	1.59
10	18.47	1.54
(11)	18.14	1.58
(12)	17.71	1.54
(13)	17.56	1.58



【乾燥密度の平均他】			
平均	1.61 Mg/m <sup>3</sup>		
標準偏差	0.05 Mg/m <sup>3</sup>		
中央値	1.60 Mg/m <sup>3</sup>		
範囲	0.16 Mg/m <sup>3</sup>		
最大値	1.70 Mg/m <sup>3</sup>		
最小值	1.54 Mg/m <sup>3</sup>		
標本数	13		

【サンプリング箇所図】

(13)

(10)

11

 $\overline{0}$ 

(12)

8 9

図 3.4.6-36 試験5日目 吹付け後の乾燥密度および度数分布

#### (b) 誘電率計測による乾燥密度

誘電率計測には、Delta-T 社の土壌水分計 SM150T を使用した。SM150T の仕様、外観を表 3.4.6-25 に示す。なお、誘電率計測による品質確認(乾燥密度)検討の詳細は、3.4.6(4)5)に後述 する。

項目	内容	SM150T 外	、観
寸法	全長:143mm (ロッド長:51mm) 直径:40mm	92mm	51mm
重量	0.1kg		
応答速度	0.1 秒	• 120	2mm
使用温度範囲	-20~+60°C	SN	4
出力電圧	0V~1V		

表 3.4.6-16 SM150T 仕様、外観

上記の誘電率計を使用して吹付け部の誘電率を測定、検量線より乾燥密度に換算した。計測は 吹付け法面表面にロッドを挿し込むことで行い、出力値はハンディモニターで確認した。なお、 空隙が生じると出力値が過小評価されるため図 3.4.6-37 に示すように測定する面をヘラで削り 平らな状態にした上で測定を実施した。また試料内温度は、5cm 程の温度計に接続されているス テンレス保護管付きのセンサーを試料内に挿し込み測定した。含水比は炉乾燥法により求めた。

誘電率計による計測は基本としてコアサンプリングを行う周囲4点で実施した。誘電率計測による乾燥密度の算出結果を表 3.4.6-17、図 3.4.6-38に示す。また誘電率計測とコアサンプリングによる乾燥密度の算出結果のコンター図を図 3.4.6-39~図 3.4.6-41に示す。なお、黒丸で囲んだ箇所がコアサンプリングの乾燥密度の算出結果である。





図 3.4.6-37 測定する面の状態、温度測定状況

測定日	平均含水比 (%)	平均乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	備考
2018/1/23	17.45	1.49	試験2日目
2018/1/24	17.85	1.57	試験3日目
2018/1/25	17.95	1.62	試験4日目
2018/1/26	17.38	1.60	試験5日目

表 3.4.6-17 誘電率計測による乾燥密度の算出結果



図 3.4.6-38 誘電率計測による乾燥密度の算出および度数分布

表 3.4.6-17より、試験4日目、5日目では平均乾燥密度が1.6Mg/m<sup>3</sup>を超えているが、2日目)、 3日目では平均乾燥密度が1.6Mg/m<sup>3</sup>を下回った。図 3.4.6-39を確認すると2日目では吹付け法 面の最下部左側の乾燥密度が誘電率計測、コアサンプリングの両方で1.5Mg/m<sup>3</sup>以下と低いこと が分かる。これは吹付け面からのノズルの位置が遠い、また吹付け面に対しノズルが垂直に配置 されていなかったためと考えられる。また、図 3.4.6-40を確認すると3日目では吹付け法面の中 腹左側で乾燥密度が誘電率計測、コアサンプリングの両方で1.5Mg/m<sup>3</sup>以下と低いことが分かる。 この法面の中腹左側では吹付け材が固着しておらず手で簡単に 5~10cm 程度掘れる状態であっ た。これはノズルの当たりが悪かったことや、法面がなだらかな傾斜でありリバウンドが溜まり やすかったためと考えられる。

誘電率計計測による乾燥密度の妥当性確認のため、誘電率計で計測した箇所のうち6箇所については、コアサンプリングし、誘電率計による乾燥密度とコアサンプリングによる乾燥密度を比較した。コアサンプリングに対する誘電率計乾燥密度の誤差を表 3.4.6-18 に示す。これより誘電率計計測による乾燥密度はコアサンプリングと比較し誤差は平均2.2%程度であった。この誤差は乾燥密度1.6Mg/m<sup>3</sup>のときに1.6±0.035Mg/m<sup>3</sup>程度となる。

No.	誘電率計 乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	コアサンプリング 乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	誤差
1	1.55	1.54	0.7%
2	1.57	1.55	1.1%
3	1.44	1.50	-3.7%
4	1.62	1.67	-3.3%
5	1.59	1.63	-2.2%
6	1.65	1.64	0.3%
	2.2%		

表 3.4.6-18 誘電率計とコアサンプリングによる乾燥密度の算出結果比較



図 3.4.6-39 2日目 誘電率計測による乾燥密度結果およびコアサンプリング試料から 算出した乾燥密度結果



図 3.4.6-40 試験3日目 誘電率計測による乾燥密度結果およびコアサンプリング試料 から算出した乾燥密度結果



図 3.4.6-41 試験4日目 誘電率計測による乾燥密度結果およびコアサンプリング試料 から算出した乾燥密度結果

# (c) 3次元計測による乾燥密度

3次元計測による吹付け体積と吹付け重量から乾燥密度を算出した。吹付け体積は、1日の吹 付けが終了した後に3次元計測により計測し、吹付け重量は、吹付け機(ニードガン)へのベ ントナイト混合土の投入重量とリバウンド材の重量差より算出した。3次元計測器の仕様およ び外観、計測状況を表 3.4.6-19、図 3.4.6-42に示す。また3次元計測による体積計測、乾燥密 度等の算出結果等を表 3.4.6-20、表 3.4.6-21に示す。

測定ユニット	
明瞭識別距離	307m@976000 点/秒
測定範囲	0.6m~300m
測定誤差	$\pm 5$ mm
偏向ユニット	
垂直視	$300^{\circ}$
水平視野	$360^{\circ}$
解像度	$0.009^{\circ}$
寸法	$240 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 100 \text{mm}$
重量	5.2kg

表 3.4.6-19 3 次元計測器 (FARO 社製 Foucus3DX330)の主な仕様



図 3.4.6-42 3 次元計測器の外観(左)、計測状況(右)

測定日	含水比 (%)	施工日毎 吹付け重量 (kg/日)	施工日毎 吹付け体積 (m <sup>3</sup> /日)	施工日毎 乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	備考
1日目	18.3	1542	0.99	1.32	吹付け体積は、 3次元計測器により計測
2 日 目	17.3	1881	1.13	1.42	
3日目	17.6	3193	1.76	1.54	
4 日 目	18.0	3369	2.12	1.35	

表 3.4.6-20 3 次元計測による体積と吹付け重量からの乾燥密度の算出(1/2)

測定日	累計吹付け 乾燥重量 (kg)	累計 吹付け体積 (m <sup>3</sup> )	全体 乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	備考
1日目まで	1303	0.99	1.32	施工日毎の吹付け重量 と含水比より、
2 日目まで	2907	2.12	1.37	累計の吹付乾燥重量を算出
3日目まで	5622	3.88	1.43	3次元計測器により計測
4 日目まで	8477	6.00	1.41	

表 3.4.6-21 3 次元計測による体積と吹付け重量からの乾燥密度の算出(2/2)

3 次元計測を用いた乾燥密度の結果は、施工日毎の乾燥密度は 1.32~1.54Mg/m<sup>3</sup> となり、4 日までの吹付け量(6m<sup>3</sup>)に対する全体の乾燥密度は 1.41Mg/m<sup>3</sup> となった。これらの結果をコ アサンプリングによる平均乾燥密度 1.61Mg/m<sup>3</sup> と比較すると、3 次元計測による乾燥密度は 0.07~0.29Mg/m<sup>3</sup>程度低い結果となった。

(d) 乾燥密度結果のまとめ

3種類の算出方法による乾燥密度結果を表 3.4.6-22 に示す。コアサンプリングによる乾燥密度では、目標乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>を達成する結果を得た。

算出方法	コア サンプリング	誘電率計測	3 次元 計測	
平均乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	1.61	1.58	吹付け全体に対して 1.41	
標準偏差 (Mg/m <sup>3</sup> )	0.05	0.13	0.10	
中央值 (Mg/m <sup>3</sup> )	1.62	1.61	1.38	
範囲 (Mg/m <sup>3</sup> )	0.27	0.62	0.22	
最大値 (Mg/m <sup>3</sup> )	1.70	1.74	1.54	
最小值 (Mg/m <sup>3</sup> )	1.44	1.12	1.32	
標本数	64	190	4	

表 3.4.6-22 乾燥密度結果(算出方法毎)

### (e) 団粒材の除去率、リバウンド率

材料ロスに係るデータの一つの指標として、ステップ3の要素試験と同様に団粒材の除去率 を以下の式で算出した。なお、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。

・団粒材の除去率(%) = 団粒材の除去量 混合用ミキサへの材料投入量 ×100

ステップ4における団粒材の除去率は、平均27.9%(最大42.0%、最小18.8%)となり、材料ロスが大きい結果となった。そこで、団粒材除去率の低下を目的としたベントナイト混合土の製造工程の改善検討を実施した。製造工程の改善検討の詳細については、3.4.6(4)6)に示す。

また、リバウンド率は以下の式で算出し、平均 23.0%(最大 42.1%、最小 8.5%)となった。 団粒材の除去率およびリバウンド率の測定結果を表 3.4.6-23 に示す。

・リバウンド率(%) = <u>リバウンド材の重量(ホース内残土重量を含む)</u> ノズル吐出重量(吹付け機ニードガンへの材料投入重量) × 100
	吹付け バッチ	吹付け前 含水比	ホッパー 投入重量	団粒材 除去率	ノズル吐出重量 吹付け機 (ニードガン) 材料投入重量	リバンウンド 材の重量	リバウンド率
	No. (フレコン No)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(kg)	(%)
1日目	No.1 (87-85)	17.70	1120	24.55	845	72	8.52
1日日 (1/22)	No.2 (84-82)	16.69	1070	20.75	848	79	9.32
	No.3 (81-79)	15.98	1072	21.74	839	181	21.57
2日目 (1/23)	No.4 (78-76)	16.83	1097	27.80	792	225	28.41
	No.5 (75-73)	16.34	1073	28.15	771	115	14.92
	No.6 (71-69)	16.46	1044	25.77	775	154	19.87
	No.7 (68-66)	16.66	1054	18.79	856	110	12.85
3日目 (1/24)	No.8 (65-63)	17.75	1110	21.17	875	247	28.23
	No.9 (62-60)	17.18	1049	21.07	828	140	16.91
	No.10 (59-57)	17.13	1005	29.85	705	195	27.66
	No.11 (56-54)	16.77	1082	35.12	702	155	22.08
	No.12 (53-51)	16.32	1066	35.27	690	171	24.78
4日目	No.13 (50-48)	16.75	1118	42.04	648	200	30.86
(1/25)	No.14 (47-45)	16.49	1099	37.31	689	88	12.77
	No.15 (44-42)	16.49	1048	29.87	735	202	27.48
	No.16 (41-39)	16.69	1041	20.37	829	108	13.03
	No.17 (38-36)	18.61	1012	<u>33.99</u>	668	267	39.97
5日目(1/26)	No.18 (35-33)	17.35	1124	35.59	724	305	42.13
	No.19 (2-1)	15.21	697	20.37	555	194	34.95
	平均	16.81	5- 54	27.87			23.0

表 3.4.6-23 団粒材の除去率およびリバウンド率の測定結果

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[24]においても示されている。本試験でリバウンド率が最大 42% と高い結果となった原因としては、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)があったことが挙げられる。伸縮アーム式吹付け機械による模 擬坑道への吹付け状況およびリバウンド材の回収状況を図 3.4.6-43、図 3.4.6-44 に示す。



図 3.4.6-43 伸縮アーム式吹付け機械による模擬坑道への吹付け状況



図 3.4.6-44 リバウンド材の回収状況

(f) ベントナイト配合率

吹付け後のベントナイト配合率を、コアサンプリングした供試体のメチレンブルー吸着量に より測定した。ここで、ベントナイト配合率は、ケイ砂(ベントナイト配合率 0%)およびベ ントナイトのみ(ベントナイト配合率 100%)のメチレンブルー吸着量を測定して作成した検 量線を用いて換算した値である。図 3.4.6-45 に吹付け後のベントナイト配合率の度数分布を 示す。平均が 49%、標準偏差が 2.8%であり、吹付け後もリバウンドによる偏りもなく、ほぼ 設定値である 50%であることを確認した。



平均	49.17 Mg/m <sup>3</sup>
標準偏差	2.80 Mg/m <sup>3</sup>
中央値	49.71 Mg/m <sup>3</sup>
範囲	10.40 Mg/m <sup>3</sup>
最大值	54.34 Mg/m <sup>3</sup>
最小值	43.93 Mg/m <sup>3</sup>
標本数	49

図 3.4.6-45 吹付け後のベントナイト配合率の度数分布

#### (g) 施工速度(単位時間あたり吹付け量)

施工速度および吹付け速度の結果を表 3.4.6・24 に示す。ここで、施工速度は吹付けの出来形 (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る。施工に係る総時間は、 吹付け材料(ベントナイト混合土)の団粒材除去時間、吹付け時間、リバンウンド材の回収時 間を含む時間である。ただし、品質確認に係る時間は含まない。吹付け速度は、出来形を吹付 け時間で除した値である。施工速度の平均は 0.9 Mg/hr、吹付け速度の平均は 3.5 Mg/hr とな った。また、図 3.4.6・46 に吹付け 1 バッチ(約 1000kg: 大型土のう 3 袋)あたりのサイクル タイムを示す。図 3.4.6・46 に示す各作業時間は表 3.4.6・24 に示した全ケースの各作業時間を 平均した値である。

	吹付け バッチ	<ul><li>出来形重量</li><li>吹付けにより</li><li>付着した重量</li></ul>	施工に 係る 総時間	吹付け 時間	施工 速度※	吹付け 速度※	<ul> <li>団粒材</li> <li>除去</li> <li>時間</li> </ul>	吹付け 時間	リバウンド 材 回収時間
	No. (フレコン No)	(kg)	(hr)	(hr)	(Mg/hr)	(Mg/hr)	(分:秒)	(分:秒)	(分:秒)
1日目	No.1 (87-85)	773	0.42	0.18	1.8	4.3	09:00	10:54	04:39
(1/22)	No.2 (84-82)	769	0.42	0.18	1.8	4.3	09:00	10:45	04:23
~	No.3 (81-79)	<mark>658</mark>	0.55	0.18	1.2	3.7	08:50	10:45	12:51
2日目 (1/23)	No.4 (78-76)	567	0.67	0.18	0.8	3.2	16:00	10:45	12:51
	No.5 (75-73)	656	0.58	0.17	1.1	3.9	17:00	09:24	08:23
	No.6 (71-69)	<mark>6</mark> 21	0.67	0.15	0.9	4.1	17:00	08:57	14:00
	No.7 (68-66)	746	0.62	0.18	1.2	4.1	16:00	10:55	10:00
3日日 (1/24)	No.8 (65-63)	628	0.78	0.18	0.8	3.5	17:29	10:51	18:36
	No.9 (62-60)	<mark>688</mark>	0.63	0.18	1.1	3.8	17:00	10:47	14:53
~	No.10 (59-57)	510	0.77	0.18	0.7	2.8	21:29	10:32	13:31
	No.11 (56-54)	547	0.75	0.15	0.7	3.6	22:00	09:15	14:00
	No.12 (53-51)	519	0.70	0.17	0.7	3.1	19:00	09:23	13:00
4日目	No.13 (50-48)	448	0.60	0.17	0.7	2.6	22:00	09:40	22:09
(1/25)	No.14 (47-45)	601	0.65	0.17	0.9	3.5	20:00	09:44	009:00
	No.15 (44-42)	533	0.73	0.12	0.7	4.4	19:00	07:00	18:00
	No.16 (41-39)	721	0.70	0.18	1.0	4.0	16:00	10:30	16:00
5日目	No.17 (38-36)	401	0.83	0.18	0.5	2.2	18:00	11:05	18:00
(1/26)	No.18 (35-33)	419	0.97	0.18	0.4	2.3	21:00	10:48	27:00
平均				0. <del></del>	0.9	3.5	16:59	10:07	13:58

表 3.4.6-24 吹付け施工速度、吹付け速度結果

備考

※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、 リバンウンド材の回収時間を含む。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。



図 3.4.6-46 吹付け1バッチ(約1000kg) 当たりのサイクルタイム

伸縮アーム式吹付け機械を使用したステップ4の試験では、ステップ3(フェーズ2)の試 験と同様に、吹付け機の運転条件として10~12m<sup>3</sup>/minのエアー量で吹付けを実施した。その 結果、吹付け1バッチ(ホッパーへの材料投入量約1000kg)に対し、吹付け時間は10分程 度、平均の吹付け速度は3.5Mg/hrとなった。バックホウ(0.7m<sup>3</sup>級)に吹付けノズルを取付 けて試験を実施したステップ3(フェーズ2)における吹付け速度は、2.8~3.3 Mg/hrであり、 伸縮アーム式吹付け機械を使用した場合においても吹付け速度に差がないことが確認できた。

団粒材の除去作業(ベントナイト混合土のふるい作業)に関しては、団粒材の除去率が増加 すると、除去作業に要する時間が多くなっている(図 3.4.6-47)。そのため、材料の状態によ っては 10 分程度で除去作業が完了している。サイクルタイム短縮の検討項目のひとつとして、 団粒材の除去作業に関しては、ベントナイト混合土の仕上りにより団粒材料量を減ずることが 可能となることから、ベントナイト混合土の製造方法の見直しにより改善が可能となり得る。 そこで、3.4.6(4)6)に後述するように、ベントナイト混合土の製造工程の改善検討を実施した。



図 3.4.6-47 団粒化材の除去率と作業時間の関係

5) 誘電率計測による吹付け部の品質確認の検討

吹付け後の品質確認として乾燥密度を測定する方法には、コアサンプリング法、出来形計測 によるかさ密度測定がある。コアサンプリング法は吹付け部の乾燥密度の分布の評価が可能で あるが、吹付け部の破壊を伴う。一方、出来形計測では、全体のかさ密度を非破壊で取得でき るが、分布を評価することが出来ない。そこで、吹付けた材料に与える影響が軽微で、かつ局 所的な乾燥密度分布を計測可能な品質確認方法として、誘電率による計測を検討した。

a 誘電率計を利用した密度管理の検討

地下実証試験に向け、誘電率計による吹付け材の密度管理が適用可能であるかを検証するこ とを目的に、誘電率出力値と乾燥密度との関係式を室内試験にて事前に取得した。次に、取得 した関係式を用いて、地上試験における吹付け試料の乾燥密度を算出し、誘電率計による密度 管理の適用性を確認した。

なお、誘電率計による密度管理の有利な点として以下の3点が挙げられる。

- ・測定時の試料の乱れが少ない点
- ・測定したその場で乾燥密度を確認できる点
- ・測定機器の扱いが容易である点

b 使用機器

本検討では、Delta-T 社の土壌水分計 SM150T を使用した。SM150 は農業分野で土壌水分状 態の把握のため広く利用されている土壌水分計である。SM150T のプローブは直径 40mm、高 さ 90mm 程度のボディと長さ 50mm 程度の 2 本の針状ロッドからなり、ロッドを土壌へ挿し 込むことでロッド周囲の土壌の体積含水率を測定する。

SM150T の仕様、外観を表 3.4.6-25 に示す。なお、SM150T の測定範囲はロッド中心から 25mm 程度で、ロッド近傍ほど感度が高くなる。出力値はケーブルを介してハンディモニター に表示し、データロガーに記録される。

	A 0.4.0 20 DM1001	
項目	内容	SM150T 外観
寸法	全長:143mm (ロッド長:51mm) 直径:40mm	92mm
重量	0.1kg	67mm 51mm
応答速度	0.1 秒	
使用温度範囲	-20~+60°C	
出力電圧	0V~1V	

表 3.4.6-25 SM150T 仕様、外観(再掲)

c 測定原理

SM150T は反射波の振幅差を振幅領域で測定し誘電率を求める ADR 法(振幅領域反射率測 定法)による誘電率計である。SM150T はプローブ内で発振させた高周波の電磁波をロッド内 の伝送線で通過・往復させる。発振された電磁波は伝送線内を往復するが、プローブ周囲の試 料の誘電率の影響より電磁波反射波の伝播速度、振幅が減衰する。そこで干渉反射波の振幅差 を測定することにより逆解析的にロッド周囲の試料の誘電率を評価することができる。

また、真空の誘電率を1としたときの、水の比誘電率は81、土壌は3~8程度であり、水の 比誘電率は土壌や空気に比べはるかに大きな値となっている。このため試料中に含まれる水分 量が多いほど試料全体の誘電率は高くなり、試料の誘電率は試料中の含水量に依存し影響を受 ける。また図 3.4.6-48に示すように含水比が一定の試料のかさ密度を増加させると、それに伴 い単位体積あたりの体積含水率が増加し誘電率も増加する。このような原理により電圧差、試 料の誘電率を測定することで試料の密度を評価することが可能となる。



図 3.4.6-48 体積含水率変化のイメージ図

d 検量線

誘電率計による吹付け材の乾燥密度測定の事前準備として、ベントナイト混合土を対象とした誘電率計出力電圧と体積含水率の検量線を作成した。なお、体積含水率は、乾燥密度、含水 比および水の密度から式 3.4.6-1 より算出される。

θw:体積含水率[%]、w:含水比(%)、ρw:水の密度(1.0 Mg/m<sup>3</sup>)、ρd:乾燥密度(Mg/m<sup>3</sup>)

ベントナイト混合土を対象とした誘電率計 出力電圧と体積含水率の検量線を作成するため、 様々な体積含水率の供試体(直径 15cm、高さ 10cm)を静的圧縮により作成した。供試体の材 料は、これまでの試験と同様にベントナイトにはクニゲル V1 を、ケイ砂は 3 号および 5 号を 使用し、配合比はクニゲル V1:ケイ砂(3 号+5 号)=50%:50%とした。材料含水比は、最適 含水比(15.8%)を目標とした。製作した供試体一覧を表 3.4.6-26 に示す。供試体の表面に誘 電率計のロッドを挿入し、ハンディロガーにて電圧値を取得した(図 3.4.6-49)。なお、供試体 の側面は乾燥防止のため養生した状態で測定を実施した。計測した箇所は供試体の上面・下面 のそれぞれ 5 点で、1 つの供試体につき 10 箇所とし、10 点の平均値をその供試体の出力値と した。

供試体	乾燥密度	体積含水率	含水比
No	$(Mg/cm^3)$	(-)	(%)
C-1	1.54	0.235	15.3
C-2	1.57	0.236	15.1
C-3	1.59	0.243	15.3
C-4	1.60	0.238	14.9
C-5	1.68	0.251	15.0
C-6	1.68	0.255	15.2
C-7	1.69	0.252	14.9
C-8	1.70	0.250	14.7
C-9	1.72	0.257	14.9
C-10	1.79	0.268	14.9
C-11	1.80	0.262	14.6

表 3.4.6-26 供試体一覧



図 3.4.6-49 誘電率計 測定状況

誘電率計出力電圧と体積含水率の関係の検量線を以下に基づき作成した。 誘電率εと体積含水率θwの関係は、一般に式 3.4.6-2のようになることが知られている。また、 SM150Tの出力値 V と誘電率εの関係は式 3.4.6-3のように表される。

 $\sqrt{\varepsilon} = a_0 + a_1 \theta_w$ 式 3.4.6-2  $\sqrt{\varepsilon} = 1.0 + 14.4396V - 31.2587V^2 + 49.0575V^3$   $-36.5575V^4 + 10.7117V^5$  $\varepsilon$ :誘電率、 $a_0$ 、 $a_1$ :実験から求める定数、 $\theta_w$ :体積含水率(-)、V:SM150の出力値(mV) 式 3.4.6-3 に示した通り出力値 V と誘電率εの関係は多項式で表されるが、体積含水率 20% 以上ではほぼ線形の関係となる。よって SM150T の計測では、式 3.4.6-2 と式 3.4.6-3 より、 体積含水率θw と出力値 V の関係は線形とみなせ、式 3.4.6-4 と表せられる。

$$\theta = \alpha_1 V + \beta_1$$

$$\alpha_1, \beta_1 : c \pm 3.4.6-4$$

ここで、材料の含水比が一定であると仮定すると、材料の体積含水率 $\Theta_w$ と乾燥密度  $p_d$ は比例 する。よって乾燥密度  $p_d$ と誘電率計出力値 Vについても線形関係と表せられる。

以上の関係から、最小二乗法により求めた回帰直線を検量線とした。作成した検量線を式 3.4.6-6 および図 3.4.6-50 に示す。

 $\theta o = 0.120029V + 0.000235$ 



図 3.4.6-50 検量線

図 3.4.6-50 にプロットした誘電率計の計測値は次項の【補足①;温度による補正】に記載した温度による補正後の値である。また、図 3.4.6-50 に示した誤差幅(破線)は、検量線の 95% 信頼区間での予測区間であり、これは乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>、含水比 15%の試料において最大 0.07Mg/m<sup>3</sup>程度の計測誤差が生じうることを示している。ここで、体積含水率の誤差幅は、以下の式から算出した。

$$\hat{y}_0 - t_{n-p-1} \left(\frac{1+0.95}{2}\right) SE \le y_0 \le \hat{y}_0 + t_{n-p-1} \left(\frac{1+0.95}{2}\right) SE \qquad \vec{\mathfrak{K}} \ 3.4.6-7$$

yo:体積含水率もしくは乾燥密度の検量線による値

$$SE = \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}\right) V_e}$$
   
  $\vec{x} \ 3.4.6-8$ 

SE:標準誤差、x:出力値の標本平均、Ve:残差の分散

【補足①;温度による補正】

誘電率計の計測において出力値がセンサー周辺温度に依存することが知られている。この温 度依存性は誘電率計機器の固有にあり、本試験で使用した SM150T には温度の変化に対し正の 相関がある。温度低下に伴い誘電率計の出力値は低下するため、検量線取得時と異なる温度環 境下での計測では密度が過小、もしくは過大に評価される可能性がある。このため得られた出 力値に対し温度による補正が必要である。そこで、温度変化に対する誘電率計出力値の変化を 測定し、温度補正式を作成した。

具体的には、含水比 15%(供試体 No.T-1)および含水比 17%(供試体 No.T-2)の2つの供 試体において温度変化に対する誘電率計変化を測定した。温度として外気温と試料内温度を測 定したが、誘電率計出力値の変化と相関が見られたのは試料内温度であり、外気温とは強い相 関は見られなかった。

試料内温度と誘電率計出力値の関係を図 3.4.6-51 に示す。またこの関係より求められた温度 補正式を式 3.4.6-9、式 3.4.6-10 に示す。



図 3.4.6-51 試料内温度と出力値の関係

V´= V-(6.322114\*T-94.8317)
 X´= V-(5.669797\*T-85.047)
 X`: 補正後の出力値(mV)、V: 測定出力値(mV)、T: 測定時の試料内温度(℃)

## 【補足②;含水比による補正】

含水比が異なる試料を誘電率計で測定したとき、概ね同等な電圧値が出力されたとしても、 含水比が異なる試料では体積含水率が異なる結果を得た。傾向として含水比が高いほど出力値 は小さくなり、含水比が低いほど出力値は大きくなった(図 3.4.6-52)。そこで、測定する材料 の含水比による補正式を取得した。まず補正式取得のため、出力値は概ね同等であるが含水比 が異なる2つの供試体を比較し、体積含水率の差分と含水比の差分を測定した。表 3.4.6-27の 通り供試体は全部で9個であり、比較はこの供試体の組み合わせ(5つの組み合わせ)で実施 した。供試体の組み合わせと含水比、および体積含水率の差分を表 3.4.6-28、図 3.4.6-53に示 す。またこの関係により得られた補正式を式 3.4.6-11に示す。



図 3.4.6-52 含水比が異なる試料における出力値と体積含水率の関係

供試体 No	含水比 [%]	体積含水率 [-]	出力値
W-1	12.4	0.221	582
W-2	14.9	0.257	569
W-3	15.2	0.255	579
W-4	15.3	0.235	481
W-5	15.3	0.243	503
W-6	17.1	0.246	479
W-7	17.2	0.249	495
W-8	20.9	0.297	577
W-9	21.4	0.296	568

表 3.4.6-27 含水比が異なる試料における出力値と体積含水率の関係

供試体 No	含水比差分 [%]	体積含水率差分 [%]
W-9 - W-2	6.4	0.064
W-8 - W-3	5.7	0.065
W-7 - W-5	1.9	0.025
W-6 - W-4	1.8	0.021
W-1 - W-3	-2.8	-0.021

表 3.4.6-28 供試体の組み合わせと含水比・体積含水率の差分



図 3.4.6-53 含水比の差分と体積含水率の差分

θ' = θo + 0.000197\*(w-15) + 0.009459\*(w-15)
 式 3.4.6-11
 θ': 補正後の体積含水率(-)、θo: 検量線で得られた体積含水率(-)、w: 試料の含水比(%)

従って、上記の検討をまとめると、表 3.4.6-29 のように整理される。まず、誘電率計(SM150T) の出力(測定)値V(mV)から、体積含水率θoを算出(式 3.4.6-6)、次にθoと当日採取した試料 の含水比w(%)を用いて補正後の体積含水率θ'(式 3.4.6-11)を算出、θ'と含水比w(%)より、乾 燥密度ρ<sub>d</sub>(Mg/m<sup>3</sup>)に換算(式 3.4.6-12)という手順となる。

誘電率計(SM150T)	$\theta o = 0.120029 \mathrm{V} + 0.000235$	<b>→</b> 2 4 C-C	
検量線(温度補正済)	$oldsymbol{ heta}_0$ :体積含水率(·)、V:誘電率計出力値(mV)	↓ 3.4.0℃	
含水比補正式	$\theta' = \theta o + 0.000197^{*}(w-15) + 0.009459^{*}(w-15)$ $\theta' : 補正後の体積含水率(-)$ $\theta o : 検量線で得られた体積含水率(-)$ w : 試料の含水比(%)	式 3.4.6-11	
乾燥密度への換算式	$\rho_{d} = \frac{\theta' \times \rho_{w}}{w} \times 100$ $\rho_{d} : 乾燥密度(Mg/m^{3}), \rho_{w} : 水の密度 (1.0 Mg/m^{3})$	式 3.4.6-12	

表 3.4.6-29 誘電率計測による乾燥密度への換算手順

6) ベントナイト混合土の製造工程の改善検討

ステップ3、4までの吹付け試験で使用するベントナイト混合土は図 3.4.6-7、図 3.4.6-18 に 示した製造設備を用いて試験前に混合、含水比調整を行った。しかしながら、ベントナイト混 合土の製造・混合段階においてベントナイト混合土が団粒化し、材料ロスが発生したことから、 材料製造工程の見直しとして、粉砕機による団粒材の解砕と混合方法の見直しを検討・実施し た。また、地下実証試験では、予めベントナイト混合土を製造しておき、保管の後、吹付け作 業に合わせて地下へベントナイト混合土を搬入することから、ベントナイト混合土の保管によ る材料への影響を確認するため、一定の保管期間の前後での含水比の変化を測定した。

a ベントナイト混合土の団粒化対策

(a) 粉砕機を用いた団粒材の解砕

ふるい装置(3cm 角目)のふるい上に残留したベントナイト混合土の団粒材(図 3.4.6-19) を解砕することを目的に、ベントナイト混合土の製造ラインに粉砕機を配置した。粉砕機を配 置したベントナイト混合土の製造プラントの構成を図 3.4.6-54に示す。



図 3.4.6-54 ベントナイト混合土の製造プラントの構成(粉砕機を追加)

粉砕機をベントナイト混合土の製造工程に組込み、ベントナイト混合土の団粒材の解砕試験 を実施した結果、今回のベントナイト混合土の含水比(最適含水比)では、団粒材を解砕でき ず粉砕機の内部で団粒材が目詰まりを起こし、効率的な解砕には至らなかった。

(b) ベントナイト混合土の混合方法の改善

ステップ3 ステップ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、団粒材の発生を抑制 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えることから、これらを総合的に管理するこ とが重要となる。混合方法の改善および団粒材除去率の結果を表 3.4.6-30 に示す。なお、団粒 材の除去率の算出方法は、以下のようである。

・団粒材の除去率(%) = 団粒材の除去量 混合用ミキサへの材料投入量 × 100

表 3.4.6-30 ベントナイト混合土 (1 バッチ 約 350kg 当たり)の混合方法

	ス	テ	ップ	3,4;	要素試験およ	こび地」	上試験におり	ける	混合フ	疠	ĥ	=
--	---	---	----	------	--------	------	--------	----	-----	---	---	---

混合手順	混合時間	団粒材 除去率
1. ケイ砂+混合水をミキサに投入	80秒 撹拌・混合	
2. ベントナイトをミキサに投入	90秒 混合・撹拌なし	
3. 混合水をミキサに投入	180秒 撹拌・混合	
	合計 約350秒	約 19~42%

改善した混合方法

混合手順	混合時間	団粒材 除去率
1. ケイ砂+混合水をミキサに投入	80秒 撹拌・混合	
2. ベントナイトをミキサに投入	90秒 混合・撹拌なし	
3. 混合水をミキサに投入	90秒 撹拌・混合	
	合計 約260秒	約 4%

表 3.4.6-30 に示した通り、ベントナイト混合土の混合方法を改善した結果、団粒化しふるい で除去される割合を4%まで低減できたことから、団粒材の発生抑制対策として、粉砕機による 団粒材の解砕方法ではなく、混合方法の改善を採用することとし、地下実証試験を実施するこ ととした。



図 3.4.6-55 混合方法の改善後のベントナイト混合土(混合直後)

b ベントナイト混合土の保管による含水比の変化の確認

地下実証試験では、予め混合土を製造しておき、保管の後、吹付け作業に合わせて搬入する。 そこで保管期間が長期に渡る場合を想定し、最適含水比に調整したベントナイト混合土の含水 比の変化を確認した。試験手順を表 3.4.6-31 に示す。製造したベントナイト混合土をフレキシ ブルコンテナパック(以下『フレコン』という)に収納し、地面とのパレットによる縁切りの うえブルーシートを被せ、12日間屋外ヤードに材料を保管(図 3.4.6-56)し、含水比の変化を 確認した。なお、ベントナイト混合土の含水比の測定は、54袋のフレコン毎に1試料を採取し、 赤外線水分計を用いて行った。

表 3.4.6-31 ベントナイト混合土の保管による含水比変化の確認試験 手順

試験手順
① 混合ミキサにケイ砂+ベントナイト+水を投入し混合
② 混合・ふるい後にフレコン(内袋あり)にベントナイト混合土を収納 収納時に含水比を測定
③ フレコンをパレット上に置き、ブルーシートを被せて、12日間、屋外で保管
④ フレコンを開封しベントナイト混合土の含水比を測定



図 3.4.6-56 ベントナイト混合土の保管状況

ベントナイト混合土の保管期間(12日間)の含水比の変化を図 3.4.6-57 に示す。保管前(製 造時)の含水比の平均値は 16.2%と設定値(最適含水比 15.8%)より 0.4%高い結果となり、含 水比のばらつきの幅については 4.5%、標準偏差は 0.80 であり、最大最小の幅がやや生じた。 保管後(吹付け直前)の含水比の平均値は、保管前の平均値に比べ約 0.7%増加し、16.9%となった。含水比のばらつきの幅については、3.64%、標準偏差は 0.80 となった。

保管後のベントナイトの含水比が増加し、バラつきの幅が減少した原因としては、12日間の 保管期間中のベントナイト混合土へ混合水のなじみが進展したこと、保管期間中の気候が雨や 雪により湿度の高い日が続いたことが考えられる。参考として、保管期間中の試験サイトの気 温と湿度の変化を図 3.4.6-58 に示す。本結果を踏まえ、地下実証試験のおけるベントナイト混 合土の製造・保管を行うこととした。



保管前	(材料製造時)
平均	16.21 %
標準偏差	0.80 %
中央値	16.13 %
範囲	4.54 %
最大值	18.28 %
最小值	13.74 %
標本数	54

保管後(吲	保管後(吹付け直前)		
平均	16.87 %		
標準偏差	0.80 %		
中央値	16.87 %		
範囲	3.64 %		
最大值	19.17 %		
最小值	15.53 %		
標本数	54		



図 3.4.6-57 保管前後のベントナイト混合土の含水比(保管期間 12 日)



7) 地上試験の成果

ステップ4では、上部開放部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 である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等の作業性、未充填部が生 じない吹付け手順を確認した。

伸縮アーム式吹付け機による模擬坑道への吹付けでは、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得たが、コアサンプリング試料による平均の乾燥密度は、1.61 Mg/m<sup>3</sup> となり、目標の乾燥密度 1.6 Mg/m<sup>3</sup>を満足した。また、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した。

一方で、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)の精度の 向上が、より安定した品質を得るための課題となった。

また、地下実証試験を見据え、施工後の品質確認方法として誘電率計測の検討、ベントナイト 混合土の製造工程の改善検討を行った。

地下実証試験では、これまでの試験より決定した表 3.4.6-32 に示すベントナイト混合土の仕様、吹付け機の運転条件を再現し、地下の原位置においても、地上試験と同様の品質(乾燥密度)を確保できることを確認することとした。次項より地下実証試験の詳細を示す。

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	Ł	15.8%(最適含水比)		
充填後の目標	票乾燥密度	1.6Mg/m <sup>3</sup>		
日本(上)ナゼ悠	エアー量	10~12 m <sup>3</sup> /min		
の     市     に     条     化	回転数	5rpm		
0)连钩木门	吐出圧	0.7MPa		
	吹付け距離	(目標) lm 程度		
吹付け方法 吹付け角度		(目標)吹付け面と吹付けノズルの角度を垂直		
9(11))/14	吹付け機械	伸縮アーム式吹付け機械(汎用機械)を使用し		
の操作		吹付けノズル等をオペレータが操作		

表 3.4.6-32 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

#### 3.4.7 地下実証試験

#### (1) 実証試験の概要

地下実証試験で吹付け方式による隙間充填材(ベントナイト混合土)の対象とした上部開放 部の空間形状は、模擬 PEM 上部の最大幅 約 1300mm、模擬 PEM 側部の最大幅 約 700mm、 奥行 4m 程度(図 3.4.7-1)である。



図 3.4.7-1 上部開放部の形状(幌延 URL 深度 350m 坑道 試験坑道 2)

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等(表 3.4.6-32)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。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。なお、ベ ントナイト混合土の配合は、ベントナイト:ケイ砂(3 号+5 号)=50%:50%、最適含水比 (15.8%)である。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保管した。地下実証試験では、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や、誘電率計測法およびコアサンプリングから 乾燥密度を取得し、目標の乾燥密度 1.60Mg/m<sup>3</sup>に対するバラつき等を示した。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。

図 3.4.7-3 に幌延 URL 試験坑道 2 上部開放部の充填範囲図を示す。なお、下部狭隘部と上 部開放部の境界には、鉄板を設置し(図 3.4.7-2)、各々の充填技術の実証試験に対して区分を 分けている。



図 3.4.7-2 下部狭隘部と上部開放部の境界に設置した鉄板



図 3.4.7-3 幌延 URL 試験坑道 2 上部開放部の充填範囲図

図 3.4.7-4 に上部開放部の実証試験フローを示す。地上で製造したベントナイト混合土を地 下の試験坑道 2 に搬入・運搬し、吹付け装置に供給、伸縮アーム式の吹付け機械を用いて、吹 付けを実施した。ノズルワークや機械配置等を確認する「試験吹付け」を試験坑道の奥部(図 3.4.7-3の縦断図のうち、紫ハッチ部)にて行い、その後「本吹付け」により開放部の充填を実 施した。なお、吹付け数量は、試験吹付けで約 5m<sup>3</sup>、本吹付けで約 20m<sup>3</sup>である。試験吹付けの 終了後、3 次元計測器による充填体積の計測を行い、本吹付けを開始した。本吹付けでは、午前 の終了後にコアサンプリング・誘電率計測、1 日の作業終了時にコアサンプリング・誘電率計 測、3 次元計測器による体積計測を行った。サンプリング試料は後日、室内試験を行い乾燥密度 等のデータを取得した。



(2) 吹付け方式による隙間充填に係る全体設備

図 3.4.7-5 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。

【地上設備:ベントナイト混合土の製造設備】

- ① ホッパー
- ② 混合ミキサ (強制二軸ミキサ)
- ③ ふるい

## 【地下設備:吹付け設備】

- ④ 伸縮アーム付き吹付け機械 (MINIMEC)
- ⑤ 吹付け機 (ニードガン)
- ⑥ ホッパー



図 3.4.7-5 上部開放部の隙間充填に係る全体設備・機械配置

(3) ベントナイト混合土の製造設備の設置

ベントナイト混合土の製造設備は、西建屋内に仮設した。ベントナイト混合土の製造準備と して、まずケイ砂3号と5号の混合を実施した。ケイ砂混合設備を図 3.4.7-6、図 3.4.7-7 に示 す。



図 3.4.7-6 ケイ砂混合設備 配置図



図 3.4.7-7 ケイ砂混合設備

ケイ砂 3 号と 5 号の混合作業の終了後、ケイ砂混合プラントを撤去し、続いてベントナイト 混合土の混合設備を西建屋内に仮設した。ベントナイト混合土の混合設備を図 3.4.7-8、図 3.4.7-9 と図 3.4.7-10 に示す。



図 3.4.7-8 ベントナイト混合土の混合設備 配置図



図 3.4.7-9 ベントナイト混合土の混合設備



図 3.4.7-10 ベントナイト計量用サイロ

(4) ベントナイト混合土の製造・坑内への運搬

吹付け方式による上部開放部の隙間充填に用いるベントナイト混合土は、Na 型ベントナイト(クニゲル V1:山形県産、クニミネ工業製)とケイ砂(3号、5号:岐阜県産、竹折砿業所) を乾燥重量比で 50%:50% (Na 型ベントナイト:ケイ砂(3号:5号=50:50))で混合した 材料である。ベントナイト混合土の製造フローを図 3.4.7-11 に示す。

まず、ベントナイトおよびケイ砂の含水比計測を行い、加水量を算出した。計量したベント ナイト、ケイ砂、混合水を二軸式の強制ミキサに投入し、材料を混合した。なお、ケイ砂は図 3.4.7-6 に示したケイ砂混合設備にて、あらかじめ1バッチ分(3号+5号の等重量)を計量し、 フレコンに収納しておき、天井クレーンを用いて強制二軸ミキサ内に投入した。ベントナイト は、図 3.4.7-10 に示したベントナイト計量用サイロから設定量が直接、強制二軸ミキサへ投入 される仕組みとした。水の計量には水量計を用い、シャワー式の添加装置を用いて強制二軸ミ キサへ水を投入した。ベントナイト混合土の1バッチ当たりの基本配合を表 3.4.7-1 に示す。 なお、ベントナイト混合土の含水比は、昨年度までの成果を基に、最適含水比 15.8%±2.0%以 内とした。

混合したベントナイト混合土は 3cm 目のふるい付きホッパーでふるい後、含水比の確認(最 適含水比 15.8%±2.0%以内)を行い、フレコン(0.5m<sup>3</sup>)へ収納し保管した。



図 3.4.7-11 ベントナイト混合土の製造フロー

表 3.4.7-1 ベントナイト混合土 混合時の1バッチ当たりの基本配合

材料名	仕様	乾燥重量(kg)	備考
ベントナイト	クニゲル V1	160	クニゲル V1
ケイ砂	3号	80	岐阜県産
	5号	80	岐阜県産
水	エナ (キョナ)	F0 6	混合後の含水比として
	工小(升户小)	00.0	w <sub>opt</sub> :15.8%を設定



強制二軸ミキサ内へのケイ砂の投入



ベントナイト計量用サイロ



強制二軸ミキサ



強制二軸ミキサ内への加水



ベントナイト混合土



フレコンへ収納

図 3.4.7-12 ベントナイト混合土の製造状況

地上の建屋で製造したベントナイト混合土を東建屋に移動した後、専用の楊重設備(キブル) を使用し、地上から地下 350m の東立坑ステージに荷卸しした。地下 350m 東ステージでは、 クレーンスケールを用いて、フレコン1袋毎に重量を計量した。その後、実証試験場所の試験 坑道2まで、ハンドパレットや電動トロリー等を用いて、坑内運搬を行った。ベントナイト混 合土の運搬状況を図 3.4.7-13 に示す。なお、製造したベントナイト混合土は、順次地下坑内へ 運搬し、製造当日中に吹付けに使用した。また、フレコンに収納したベントナイト混合土は、 材料の自重による圧縮の影響を避けるため、積み重ねを行わず、平置きとした。



地上 運搬前



東建屋 荷卸し



地下350m 東立坑ステージ 荷受け



地下 350m 周回坑道 運搬



地上 運搬



東立坑内 荷卸し



地下 350m 東立坑ステージ 計量



地下 350m 試験坑道 2 保管 図 3.4.7-13 ベントナイト混合土の運搬状況

- (5) 吹付け設備の設置
  - 1) 作業床の設置

地下 350m 坑道 試験坑道 2 内に、吹付け設備を設置するための作業床を仮設した。具体的に は、模擬 PEM 前面の組立台コンクリートに山留材を敷設し、作業床とした。作業床の設置計 画図を図 3.4.7-14 に、設置状況を図 3.4.7-15 に示す。



【試験坑道2 平面図】

図 3.4.7-14 作業床(山留材)の設置計画図





## 2) 吹付け設備の設置

表 3.4.7-2 に吹付け設備の主要機械を示す。これらの機械を坑道内へ搬入し、吹付け設備を 試験坑道 2 内に設置した。なお、設備類の稼働に必要となる圧縮空気(19m<sup>3</sup>/min, ドライ)や 電力(200V 及び 400V)については、坑内の既設備を利用した。また、搬入する機械の最大寸 法は、東周回坑道の風門通過可能サイズを考慮して、横幅 1.8m×高さ 2.0m 以内のものとした。 図 3.4.7-16 に吹付けプラントの設置図を図 3.4.7-17 に主要機械を示す。なお、伸縮アーム式 吹付け機械は、地上試験で使用した機種と同様であり、図 3.4.6-24 に仕様を示す。

機械名	仕様	数量	備考
吹付け機械	ニードガン 200V	1	重量 約1t
伸縮アーム式吹付け機械	MINIMEC 400V	1	重量 約1.8t
ベルトコンベヤ	5m, 幅 350mm	2	重量約 0.2t/台
材料ホッパー		2	重量 約 1t/台
レシーバータンク		1	重量約0.5t
長距離空気搬送機	ジェクター JT-75	1	
山留材	3.5m×25本	50	佐業庄
	3.0m×25本	50	1F耒床

表 3.4.7-2 吹付け設備の主要機械

【試験坑道2平面図】







吹付け機械 (ニードガン)



伸縮アーム式吹付け機械(MINIMEC)



ベルトコンベア



材料ホッパー



長距離空気搬送機(ジェクター)図 3.4.7-17 吹付け設備の主要機械

## (6) 吹付け方式による上部開放部の充填

上部開放部の吹付けによる隙間充填は、事前に地上で実施した予備試験、要素試験、証試験 から決定した、目標の乾燥密度を達成するための吹付け機の運転条件等(表 3.4.6-32)を基に、 吹付け機械(ニードガン)、伸縮アーム式の吹付け機械等を用いて実施した。

なお、ノズルから吹付け面までの距離を確認するための距離計をノズル根本部に設置し、設 定値(1.2m)以内の距離となる場合は青色、設定値(1.2m)を超える距離の場合は赤色を点灯 させるパトランプを伸縮アーム式の吹付け機械に設置し、吹付けパラメータの確認の一助とし た。図 3.4.7-18 に距離計およびパトランプの設置状況を示す。

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	Ł	15.8%(最適含水比)		
充填後の目標乾燥密度 1.6Mg/m <sup>3</sup>		1.6Mg/m <sup>3</sup>		
	エアー量	10~12 m <sup>3</sup> /min		
吹付り機 の運転冬供	回転数	5rpm		
少连铅木叶	吐出圧	0.7MPa		
	吹付け距離	(目標) 1m 程度		
<ul><li>吹付け方法</li><li>吹付け角度</li><li>吹付け機械</li><li>の操作</li></ul>		(目標)吹付け面と吹付けノズルの角度を垂直		
		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 3.4.7-3 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



距離計の設置状況



パトランプ設置状況

図 3.4.7-18 距離計、パトランプ設置状況

吹付け数量を表 3.4.7-4、吹付けの範囲を図 3.4.7-19 に示す。なお、範囲図中の赤ハッチ部 を、密度管理を伴う吹付け範囲(本吹付け)、マゼンダ部を密度の規定なしの試験吹付け範囲と した。試験吹付け範囲で、オペレータのノズル操作に関する習熟訓練を経て、本吹付けを実施 した。

表 3.4.7-4 吹付け数量

項目	数量 (設計)	備考
開放部の隙間充填	20.2m <sup>3</sup>	目標充填乾燥密度:1.60Mg/m <sup>3</sup>
開放部の隙間充填 (試験吹付け)	4.6m <sup>3</sup> 以内	目標充填乾燥密度の規定なし



縦断図

図 3.4.7-19 吹付け範囲(再掲)

吹付けの手順を以下に示す。まず、ベントナイト混合土を材料ホッパー内に供給し、ベルト コンベアを介して吹付機械(ニードガン)にベントナイト混合土を送る。次に、圧縮空気を原 動力として、吹付け機械(ニードガン)からベントナイト混合土をホース(3インチ)内に圧送 し、伸縮アーム式吹付け機械のノズル先端より噴射、対象箇所への吹付けを行う。

なお、地上でのベントナイト混合土の製造状況に応じて、フレコン3袋(約900kg)~5袋 (約1500kg)毎に吹付けを行い、リバウンド材の回収を行った。リバウンド材の回収には主に 長距離空気搬送機(ジェクター)を用いて行い、必要に応じて人力でのリバウンド材の回収を 行った。一連の吹付け作業状況を図 3.4.7-20 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



ノズル先端



吹付け機械からノズル先端への材料圧送



伸縮アーム式吹付け機械による 吹付け状況



長距離空気搬送機(ジェクター)によるリバウンド捕集、クレーンスケールでの計量 図 3.4.7-20 一連の吹付け作業

# (7) 試験結果

## 1) 管理項目

吹付け方式による上部開放部の充填に係る管理項目を表 3.4.7-5 に示す。

分類	項目	基準・標準類 (確認方法)	管理基準値	管理 or 確認	実施時期	数量
	含水比 (ベントナイト)	赤外線水分計	-	確認	混合前	1点/フレコン
日 時間の休 40	含水比 (ケイ砂)	赤外線水分計	E	確認	混合前	3 点/全体
品質確認 (材料)	含水比 (ベントナイト 混合土)	赤外線水分計	W <sub>opt</sub> 15.8±2% 以内	管理	混合後	1 点/フレコン
	ベントナイト 配合率	JBAS 107-91	50%	確認	混合後	1点/フレコン
	重量	(クレーンスケール)	Ι	確認	吹付け前	1点/フレコン
	吹付け距離	(レーザー距離計)	(目標) 1.0m 程度	確認	吹付け時	3. <del></del>
施工管理	吹付け角度	(目視)	(目標) 吹付け面に対し 90度	確認	吹付け時	-
	吹付け機械 回転数	(目視)	5rpm	確認	吹付け時	
	吹付け機械への エアー量	(デジタルフロースイ ッチ計測値の目視)	10~12m³/min	確認	吹付け時	-
	リバウンド量・率	(クレーンスケール)	-	確認	リバウンド回収後	1施工単位ごと
		(3次元計測)			午後の 吹付け作業後	Η
	乾燥密度	(コアサンプリング、 試料による試験)	(目標値) 1.6Mg/m <sup>3</sup>	確認	午前/午後の 吹付け作業後	20 個程度/日
品質確認		(誘電率計測)	XX.23		午前/午後の 吹付け作業後	コアサンプリング箇 所×4 点
(施工後)	含水比	JIS A 1203 (コアサンプリング 試料による試験)	1	確認	午前/午後の 吹付け作業後	20個程度/日
	ベントナイト 配合率	JBAS 107-91 (コアサンプリング 試料による試験)	50%	確認	午前/午後の 吹付け作業後	20個程度/日
その他	サイクルタイム	(ストップウオッチ)	主要工程の 所要時間記録		施工時	日常記録
£8 S	地上建屋・坑内 環境データ	(温湿度計)	—		常時	日常記録

表 3.4.7-5 管理項目 一覧

#### 2) 品質確認(材料)

表 3.4.7-6 にベントナイトおよびケイ砂の混合前の含水比の結果を示す。ベントナイト混合 土の製造(混合)に際し、ベントナイトが収納されたフレコン毎に、ベントナイトの含水比を 測定した。その含水比に基づき、1 バッチの混合毎に加水量を算出した。なお、ケイ砂の含水比 については、混合前に 3 点測定し 0.2%となったことから、ケイ砂の含水比を 0%とした。ベン トナイト混合土の 1 バッチ当たりの混合条件を表 3.4.7-7 に示す。混合後に、各フレコンから 1 点サンプリングを行い、含水比およびベントナイト配合率を測定した。混合後の含水比の測 定結果を図 3.4.7-21 に、ベントナイト配合率の測定結果を図 3.4.7-22 に示す。

材料名	仕様	含水比(%)	備考
ベントナイト	クニゲル V1 クニミネ工業(株)	7.5%(平均)	混合前の測定結果 フレコン毎に1点測定
ケイ砂	3号 岐阜県産、竹折砿業所	0.2%	混合前に3点測定
ケイ砂	5号 岐阜県産、竹折砿業所	0.2%	混合前に3点測定

表 3.4.7-6 使用材料の含水比測定結果(混合前)

表 3.4.7-7 ベントナイト混合土の混合条件

	含水比・配	合率の設定	5.
含水比(%)	ベントナイト 配合率(%)	ケイ砂 (3号) 配合率(%)	ケイ砂 (5号) 配合率(%)
15.8	50	25	25

以下の混合条件は、ベントナイトの含水比が 7.5%の場合の条件を示した。実際は、ベントナイトの含水比測定結果を基に、1 バッチの混合毎に加水量を算出した。

	混合条件			
1バッチあたり 混合重量	ベントナイト	砂 (3号)	砂 (5号)	加水量
含水比	7.5%	0%	0%	2
材料投入量 (kg)	171	80	80	
乾燥重量(kg)	160	80	80	
水分量(kg)	11	0	0	—
加水量 (kg)	—	_		40
仕上がり量 (kg)	371			



図 3.4.7-21 ベントナイト混合土の製造(混合)後の含水比



ベントナイト配合率		
平均	43.0 %	
標準偏差	3.7 %	
中央値	42.2 %	
範囲	18.5 %	
最大値	53.8 %	
最小值	35.3 %	
標本数	184	

図 3.4.7-22 ベントナイト混合土の製造(混合)後の配合率

ベントナイト混合土の含水比は平均で 15.6%、バラつきの範囲は 14.0~17.6%、標準偏差は 0.70 と非常に小さい結果となり、管理基準値とした 15.8%±2%に収まる結果を得た。

ベントナイト混合土の配合率は平均で 43.0%、バラつきの範囲は 35.3~53.8%、標準偏差は 3.7 となり、設定の配合率 50%に対して平均値は 7%程低い値となった。

3) 施工管理

上部開放部の吹付けによる充填前後の状況を図 3.4.7-23 に示す。吹付け距離は 1.0m 程度、 吹付け角度は、吹付け面に対し 90 度を目標の管理項目とした。ただし、両管理項目は、伸縮ア ーム式吹付け装置のノズルを操作するオペレータの技量による現場依存要因を含むものである。 表 3.4.7-8 に、吹付けで使用した全材料重量、リバウンド量、吹付け重量(ノズル吐出した全材 料重量-リバウンド重量)、吹付け時間およびリバウンド回収時間を示す。総時間はホースの閉 塞等に対応した時間も含んだ値を示している。ノズルから吐出し、吹付けに使用した全材料重 量は約 56t、そのうちリバウンド量が約 18t、吹付けた重量は約 38t であり、施工時間として吹 付けのみに要した時間は約15時間、吹付け+回収+ホースの閉塞等の対処に要した総施工時間は約29時間であった。



吹付け充填前(正面)



吹付け充填前



吹付け充填後(正面) 図 3.4.7-23 上部開放部の



吹付け充填後

义	3.4.7 - 23	上部開放部の吹付けによる充填前後	SZ

表 3.4.7-8	上部開放部の吹付けによる充填結果	R

	a	b	a-b			
吹付け 施工全体	ノズル吐出重量 吹付け機 (ニードガン) 材料投入重量 (kg)	リバウンド 材の重量 (kg)	吹付け 重量 (kg)	吹付け 時間 (hr)	回収 時間 (hr)	総施工 時間* (hr)
合計	56,036	18,159	37,877	15.3	9.7	29.0

\*ホースの閉塞など対応時間を含む

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 とし、 本試験では、リバウンド率は、33%(=18,159kg/56,036kg)となった。

#### 4) 品質確認(施工後)

## a 施工後の品質確認概要

施工後の品質確認として、コアサンプリングおよび誘電率計測による乾燥密度の算出を行った。併せて、3次元計測器による体積計測を実施し、吹付けた体積および重量から乾燥密度の算 出を行った。コアサンプリングおよび誘電率計測は、午前・午後の吹付け作業後を基本とし、 表 3.4.7-9の通り実施した。一方、3次元計測器による計測は、吹付けの施工開始前の坑道形状 を初期状態として計測、1日の作業終了後の吹付け形状を日々測定し、その差分から日々の吹 付け体積を算出した。コアサンプリングおよび誘電率計測の箇所の説明図を図 3.4.7-24に示す。 コアサンプリング箇所の上下左右の4ヵ所を誘電率計により計測した。

⇒L XBut m	乾燥密度(Mg/m³)					
計測口	3 次元計測	誘電率	コアサンプリング			
試験1日目午後	0	0	0			
試験2日目午前	·	0	0			
試験2日目午後	0	0	0			
試験3日目午前	r <u></u> 1	0	0			
試験3日目午後	0	0	0			
試験4日目午前	· <u> </u>	0	0			
試験4日目午後	0	0	0			
試験5日目午後	0	0	0			
試験6日目午後	0	0	0			
試験7日目午後	0	0	0			

表 3.4.7-9 品質確認の実施時期 一覧


コアサンプリングの状況を図 3.4.7-25 に示す。サンプリングには、直径 50mm×高さ 25mm のサンプリング容器を使用した。採取した試料は、室内試験にて乾燥密度および含水比試験(JIS A 1203、JGS 0122-2009)、ベントナイト配合率の確認としてメチレンブルー吸着量試験(JBAS 107-91)を実施した。



コアサンプリング用具



具 コアサンプリング(φ50mm\*h25mm) 図 3.4.7-25 コアサンプリング

誘電率計測には地上試験と同様に、Delta-T 社の土壌水分計 SM150T を使用した。計測は図 3.4.7-26 に示すように、コアサンプリング位置の周囲 4 か所をそれぞれ縦向き横向きの 2 回計 測を行い、平均値を求めた。すなわちコアサンプリング 1 点につき誘電率計測は 8 回行った。 対象試料の誘電率計出力電圧の乾燥密度への換算手順を表 3.4.7-10 に、誘電率計出力値と体積 含水率との検量線を図 3.4.7-27 に示す。なお誘電率計測による乾燥密度への換算等の検討の詳 細は、3.4.6(4)5)を参照されたい。



図 3.4.7-26 誘電率計測方法および計測状況

表 3.4.7-10 誘電率計測による乾燥密度への換算手順

誘電率計(SM150T)	$\theta o = 0.120029 \text{V} + 0.000235$
検量線(温度補正済)	$oldsymbol{ heta}_0$ :体積含水率(·)、V:誘電率計出力値(mV)
含水比補正式	$ \theta' = \theta o + 0.000197^*(w-15) + 0.009459^*(w-15) \theta': 補正後の体積含水率(-) \theta o : 検量線で得られた体積含水率(-) w : 試料の含水比(%) $
乾燥密度への換算式	$\rho_{d} = \frac{\theta' \times \rho_{w}}{w} \times 100$ $\rho_{d} : 乾燥密度(Mg/m^{3}), \rho_{w} : 水の密度 (1.0 Mg/m^{3})$



図 3.4.7-27 誘電率計出力値-体積含水率 検量線

3 次元計測の目的は、吹付け後の形状から吹付け体積を計算することであり、計測したすべ てのデータについて座標系を統一する必要がある。よって、計測期間のあいだ不動となる位置 を選定し、ここに球形ターゲットを設置し、不動点ととした。球形ターゲットは計5個をトン ネル壁面へ設置した。1回の3次元計測につき左端・中央・右端の3か所に3次元計測器を据 えて実施し、後にこれを合成した。なお、使用した3次元計測器は、地上試験と同様のもので ある。仕様を表 3.4.6-19に示す。また、3次元計測器による計測状況およびターゲットの設置 状況を図 3.4.7-28に示す。



図 3.4.7-28 3 次元計測器による計測 球形ターゲット設置位置(計5点)

b 施工品質の確認結果

(a) コアサンプリングによる乾燥密度、配合率、含水比

コアサンプリング試料による試験結果(乾燥密度、含水比、ベントナイト配合率)を図 3.4.7-29~図 3.4.7-31 に示す。乾燥密度は 1.39~1.83Mg/m<sup>3</sup>の範囲でバラつき、平均値は 1.66Mg/m<sup>3</sup>となり、目標の乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>を上回る結果となった。ベントナイト配合率に ついては、35.3~58.4%の範囲でバラつき、平均値は 47.2%となり、設定値 50%とほぼ近しい 結果となった。含水比は 13.6~19.3%の範囲でばらつき、平均値で 17.0%となり、製造時の平 均値 15.6%に比べ、約 1.5%含水比が高くなる結果となった。



乾燥密度			
平均	1.66 Mg/m <sup>3</sup>		
標準偏差	0.08 Mg/m <sup>3</sup>		
中央値	1.67 Mg/m <sup>3</sup>		
範囲	0.43 Mg/m <sup>3</sup>		
最大値	1.83 Mg/m <sup>3</sup>		
最小值	1.39 Mg/m <sup>3</sup>		
標本数	147		

図 3.4.7-29 吹付け施工後の乾燥密度(コアサンプリング)



ベントナイト配合率			
平均	47.2 %		
標準偏差	2.6 %		
中央値	46.8 %		
範囲	23.1 %		
最大值	58.4 %		
最小值	35.3 %		
標本数	147		

図 3.4.7-30 吹付け施工後のベントナイト配合率 (コアサンプリング)



含水比			
平均	17.03 %		
標準偏差	1.00 %		
中央値	17.17 %		
範囲	5.74 %		
最大値	19.33 %		
最小值	13.59 %		
標本数	147		

図 3.4.7-31 吹付け施工後の含水比(コアサンプリング)

試験7日目の午後の吹付け作業後のコアサンプルの結果(サンプル箇所毎の乾燥密度)を図 3.4.7-32 に示す。その他の測定日について、計測箇所と乾燥密度の結果を図 3.4.7-33、図 3.4.7-34 に示す。全体的に結果を俯瞰すると、模擬 PEM 側部の隅角部の乾燥密度が低い結果 となる傾向が見られた。



図 3.4.7-32 コアサンプリング結果(試験7日目午後 サンプリング箇所毎の乾燥密度)

計測日	試験状況	コアサンプリング結果	
HINT.		(サンプリング箇所毎の乾燥密度(Mg/m <sup>3</sup> ))	
施工前	1 Alert	_	
試験 1日目 午後		・・・・       ・・・・         ・・・・       ・・・・         ・・・・       ・・・・         ・・・・       ・・・・         ・・・・       ・・・・         ・・・・       ・・・・         ・・・・       ・・・・         ・・・・       ・・・・         ・・・       ・・・・	
試験 2日目 午前		コアサンプル乾燥密度         平均       1.720         標準偏差       0.07         中央値       1.73         範囲       0.22         最大値       1.81         最小値       1.58         標本数       10	
試験 2日目 午後		・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
試験 3日目 午前		・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	

図 3.4.7-33 コアサンプリング結果 (サンプリング測箇所毎の乾燥密度) (1/2)



図 3.4.7-34 コアサンプリング結果 (サンプリング測箇所毎の乾燥密度) (2/2)

(b) 誘電率計測による乾燥密度

誘電率計測による乾燥密度の結果を図 3.4.7-35 に示す。乾燥密度は 1.12~1.78Mg/m3 の範囲でバラつき、平均値は 1.56Mg/m<sup>3</sup>となった。

試験7日目の午後の吹付け作業後の誘電率計測結果(計測箇所毎の乾燥密度)図 3.4.7-36 に 示す。その他の測定日について、計測箇所と乾燥密度の結果を図 3.4.7-37 に示す。模擬 PEM 側部の隅角部と模擬 PEM 上側の坑道天端付近の乾燥密度が低い結果となる傾向が見られた。



乾燥密度			
平均	$1.56~{ m Mg/m^3}$		
標準偏差	0.09 Mg/m <sup>3</sup>		
中央値	$1.57 \ Mg/m^3$		
範囲	$0.66 \ Mg/m^3$		
最大値	1.78 Mg/m <sup>3</sup>		
最小值	$1.12 \text{ Mg/m}^3$		
標本数	588		

図 3.4.7-35 吹付け施工後の乾燥密度(誘電率計測)



図 3.4.7-36 誘電率計測結果(試験7日目午後 計測箇所毎の乾燥密度)

計測日	試験状況	誘電率計測結果(計測箇所毎の乾	彙密度(Mg/m <sup>3</sup> ))
試験前			
試験 1 日目 午後			誘電率計乾燥密度         平均       1598         標準偏差       005         中央値       159         範囲       022         最大値       168         最小値       147         標本数       36
<b>試験</b> 2日目 午前			誘電率計乾燥密度           平均         1.631           標準偏差         0.04           中央値         1.63           範囲         0.20           最大値         1.71           最小値         1.51           標本数         40
試験 2日目 午後			誘電率計乾燥密度         平均       1.581         標準偏差       0.08         中央値       1.60         範囲       0.40         最大値       1.67         最小値       1.27         標本数       60
試験 3日目 午前			誘電率計乾燥密度           平均         1 595           標準偏差         0 07           中央値         1 58           範囲         0 37           最大値         1 78           最小値         1 41           標本数         48

図 3.4.7-37 誘電率計測結果(計測箇所毎の乾燥密度)(1/2)



図 3.4.7-38 誘電率計測結果(計測箇所毎の乾燥密度)(2/2)

# (c) 3次元計測による乾燥密度

3 次元計測による吹付け体積と吹付け重量から算出した乾燥密度の結果を表 3.4.7-11、図 3.4.7-39 に示す。乾燥密度は、1.33~1.59Mg/m<sup>3</sup>の範囲でバラつき、平均値は 1.49Mg/m<sup>3</sup>とな った。3 次元計測による吹付け体積の計測結果(3D 図)を図 3.4.7-40、図 3.4.7-41 に示す。

試験日	吹付け 体積 (m <sup>3</sup> )	吹付け 重量 (Mg)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	累計 吹付け体積 (m <sup>3</sup> )	累計 吹付け重量 (Mg)
試験1日目	1.914	3.334	15.3	1.51	1.914	3.334
試験2日目	2.636	4.703	15.4	1.55	4.551	8.037
試験3日目	3.455	5.823	15.6	1.46	8.005	13.860
試験4日目	3.237	5.771	15.5	1.54	11.242	19.631
試験5日目	2.138	3.858	15.1	1.57	13.381	23.489
試験6日目	4.208	6.461	15.8	1.33	17.589	29.950
試験7日目	4.189	6.828	16.3	1.40	21.778	36.778
試験8日目	0.594	1.099	16.4	1.59	22.372	37.877
平均	2.796	4.735	15.7	1.49	<u></u>	<u> </u>

表 3.4.7-11 吹付け施工後の乾燥密度(3次元計測)



乾燥密度			
平均 1.49 Mg/m <sup>3</sup>			
標準偏差	0.09 Mg/m <sup>3</sup>		
中央値	1.53 Mg/m <sup>3</sup>		
範囲	0.26 Mg/m <sup>3</sup>		
最大値	1.59 Mg/m <sup>3</sup>		
最小值	1.33 Mg/m <sup>3</sup>		
標本数	8		



3 - 185

計測日	試験状況	3 次元計測結果	
試験 1日目 午後		PEMの中心高さ=0 280 2.00 2.00 2.00 1.00 1.00 1.00 1.00 0.00 0	
試験 2 日目 午後			
試験 3日目 午後			
試験 4日目 午後			

図 3.4.7-40 3 次元計測による吹付け体積の計測結果 (3D 図) (1/2)



図 3.4.7-41 3 次元計測による吹付け体積の計測結果 (3D 図) (2/2)

c 施工品質の確認結果に対する評価

(a) 乾燥密度

乾燥密度に関する品質確認項目を表 3.4.7-12に示し、乾燥密度の結果を表 3.4.7-13に示す。 コアサンプリングによる乾燥密度の平均は 1.66Mg/m<sup>3</sup>となり、目標乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>を達 成する結果を得た。この結果は、地上試験における乾燥密度の平均値 1.61 Mg/m3 と同程度の 結果である。この結果より、適切な施工品質確認を行うことで品質の確保と再現が可能であり、 一般的な管理手法となりうる可能性を有することが示唆された。一方、誘電率計測による乾燥 密度の平均は 1.56Mg/m<sup>3</sup>、3 次元計測による乾燥密度の平均は 1.48Mg/m<sup>3</sup>となり、目標乾燥密 度 1.6Mg/m3 に比べ、0.1Mg/m<sup>3</sup>程度の差異を有する結果となった。図 3.4.7-42 に乾燥密度の 各計測結果と施工日の関係を示す。コアサンプリングと誘電率計測の結果については、施工日 ごとの傾向が近しい結果となった。一方、3 次元計測を用いた乾燥密度の値は、誘電率計測、コ アサンプリングによる試験結果に比べ、全体的に低い値となった。参考として、図 3.4.7-43 に コアサンプリングと誘電率計測から算出した乾燥密度のヒストグラムを示す。コアサンプリン グの結果に比べ、誘電率計測の結果が 0.1Mg/m<sup>3</sup>程低くなる結果を得た。乾燥密度の算出手法 による結果の異なりやバラつきの原因の特定は今後の課題である。

分類	項目	<ul><li>基準・標準類</li><li>(確認方法)</li></ul>	管理基準値	実施時期
品質確認 (施工後) 乾燥密度	(3 次元計測)		本吹付け前、午後の 吹付け作業後	
	乾燥密度	(コアサンプリング、 試料による試験)	(目標値) 1.6Mg/m <sup>3</sup>	午前/午後の 吹付け作業後
		(誘電率計測)		午前/午後の 吹付け作業後

表 3.4.7-12 乾燥密度に関する品質確認項目

表 3.4.7-13 乾燥密度結果 一覧

計測日 -	乾燥密度(Mg/m³)			
	3 次元計測	誘電率	コアサンプリング	
試験1日目午後	1.51	1.60	1.71	
試験2日目午前	-	1.63	1.72	
試験2日目午後	1.55	1.58	1.64	
試験3日目午前	-	1.60	1.68	
試験3日目午後	1.46	1.52	1.64	
試験4日目午前	-	1.53	1.59	
試験4日目午後	1.54	1.56	1.65	
試験5日目午後	1.57	1.52	1.68	
試験6日目午後	1.33	1.56	1.64	
試験7日目午後	1.40	1.53	1.68	
平均	1.48	1.56	1.66	



図 3.4.7-43 コアサンプリングと誘電率計測による乾燥密度計測結果

突固めによる土の締固め試験(JIS A 1210)に実証試験のコアサンプリングの乾燥密度結果 を併記して図 3.4.7-44 に示す。実証試験の密度結果は室内試験の締固めエネルギー1Ec から 4Ec の間で幅広く分布する結果となった。この結果のバラツキは、現場依存要因(吹付け距離、 吹付け角度)の影響によるものが原因の1つと考えられ、吹付け距離、吹付け角度の管理の精 度向上が重要な課題の1つとなる結果を得た。



図 3.4.7-44 突固めによる土の締固め試験(JISA 1210)と実証試験結果の比較

(b) 含水比

含水比に関する品質確認項目を表 3.4.7-12 に示す。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含水比の平均は 15.62% (図 3.4.7-21) となり、当初設定した含水比 15.8% とほぼ同等の結果となった。混合後に計測したベントナイト混合土の含水比について、収納し たフレコン毎に整理した結果を図 3.4.7-45 に示す。なお、図 3.4.7-45 には、本吹付けに使用 した No.39~223 までの 185 袋の含水比計測結果について示した。試験期間中(8 日間)におい て、全ての製造日で、管理値である 15.8%±2%以内に収まっていることから、一定の品質を確 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。

図 3.4.7-46 に吹付け前後のベントナイト混合土の含水比の比較を示す。ここで吹付け前とは ベントナイト混合土の製造直後を示し、吹付け後とはコアサンプリングした試料から求めた含 水比を示す。吹付け後の平均含水比は約 17%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ことから、若干の水分のなじみの影響、 または測定誤差の範囲内の差異と考えられる。

分類	項目	基準・標準類 (確認方法)	管理基準値	実施時期
品質確認 (材料)	含水比	赤外線水分計	Wopt15.8±2% 以内	混合後
品質確認 (施工後)	含水比	JIS A 1203 (コアサンプリング 試料による試験)		午前/午後の 吹付け作業後

表 3.4.7-14 含水比に関する品質確認項目





	吹付け後	吹付け前	差分
平均(Mg/m <sup>3</sup> )	17.0	15.6	1.4
標準偏差(Mg/m <sup>3</sup> )	1.0	0.7	0.3
中央値(Mg/m <sup>3</sup> )	17.2	15.6	1.6
範囲(Mg/m <sup>3</sup> )	5.7	3.7	2
最大值(Mg/m <sup>3</sup> )	19.3	17.6	1.7
最小值(Mg/m <sup>3</sup> )	13.6	14.0	-0.4
標本数	147	184	

図 3.4.7-46 吹付け前後(製造後、施工後)の含水比結果

## (c) ベントナイト配合率

ベントナイト配合率に関する品質確認項目の一覧を表 3.4.7-15 に示す。図 3.4.7-22 に示し た通り、強制二軸ミキサにより混合・製造した配合率の平均は 43.0%、バラつきの範囲は 35.3 ~53.8%となり、平均値は、設定値 50%に比べてベントナイト配合率が若干低い値となった。 ベントナイト配合率のバラつきの原因として、製造時の加水方法による影響が考えられる。地 上試験では、人力のジョウロにて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 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、ベントナイトの団粒材が生じることがある。 これらの影響により、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。図 3.4.7-47 に吹付け前後のベントナイト配合率を示す。ここで吹付け前とはベントナ イト混合土の製造後を示し、吹付け後とはコアサンプリングした試料から求めた配合率を示す。 吹付け後のベントナイト配合率は、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、リバウンド材に砂分が多く含まれたことが要因 の一つとして考えられる。

分類項目		基準・標準類 (確認方法)	管理基準値	実施時期
品質確認 (材料)	ベントナイト 配合率	JBAS 107-91	50%	混合後
品質確認 (施工後)	ベントナイト 配合率	JBAS 107-91 (コアサンプリング 試料による試験)	50%	午前/午後の 吹付け作業後

表 3.4.7-15 ベントナイト配合率に関する品質確認項目



	吹付け後	吹付け前	差分	
平均(%)	47.2	43.0	4.2	
標準偏差(%)	2.6	3.7	-1.1	
中央値(%)	46.8	42.2	4.6	
範囲(%)	23.1	18.5	4.6	
最大値(%)	58.4	53.8	4.6	
最小値(%)	35.3	35.3	0.0	
標本数	147	184		

図 3.4.7-47 吹付け前後(製造後、施工後)のベントナイト配合率結果

5) その他

a リバウンド材の捕集速度

リバウンド材の回収時間と回収量の関係について図 3.4.7-48 に示す。回収の状況により必ず しも回収量と回収時間との関係が線形になるとは限らなかったが、リバウンド重量が多くなる と回収時間を要する結果となった。表 3.4.7-16 に長距離空気搬送機(ジェクター)によるリバ ウンド材の捕集速度を示す。なお、この捕集速度は、ホース内の閉塞等がなく連続的な捕集を 行った場合の正味の値である。



表 3.4.7-16 リバウンド材の捕集効率

長距離空気搬送機(ジェクター) によるリバウンド材の 捕集速度(Mg/時間)*	リバウンド重量(Mg)	捕集時間(時間)
1.88	18.159	9:40

※ホース内の閉塞等がなく連続的な捕集を行った場合

b サイクルタイム

吹付け・リバウンド材の回収・ホース閉塞などに要した時間について計測を行い、サイクル タイムを算出した。全体の吹付け施工サイクルタイムを図 3.4.7-49 に、全体および 1m<sup>3</sup> あたり のサイクルタイムを表 3.4.7-17 に示す。また、サイクルタイムを基に算出した施工速度を表 3.4.7-18 に示す。



図 3.4.7-49 全体の吹付け施工サイクルタイム

	吹付け時間 (hr:min)	回収時間 (hr:min)	閉塞対応など (hr:min)
全体	15:15	9:40	4:02
1m <sup>3</sup> 当たり	0:41	0:26	0:10

表 3.4.7-17 吹付け施工サイクルタイム(全体・1m<sup>3</sup>当たり)

表 3.4.7-18 施工速度

	吹付け時間 (hr:min)	吹付け重量(Mg) 吹付け体積(m <sup>3</sup> )	吹付け速度	備考
吹付け速度 (時間当たり 吹付け重量)	15.15	37.877 Mg	2.48 Mg∕h	リバウンド回収時間、閉塞対応等 の時間は除く
吹付け速度 (時間当たり 吹付け体積)	15:15	20.47 m <sup>3</sup>	1.34 m³∕h	湿潤密度=1.85Mg/m <sup>3</sup> ,乾燥密度 =1.6Mg/m <sup>3</sup> ,含水比 15.8%を基に上 記の重量から体積を算出

c 環境データ

(a) 地上建屋(西建屋)

隙間充填材の製造を行った西建屋内の温湿度状況を図 3.4.7-50 に示す。1 月 17 日は寒波に より平均温度が氷点下と著しく低くなったが、その日以外平均温度は約 3℃、平均湿度は約 45% であった。



(b) 地下 350m 試験坑道 2

吹付試験を実施した試験坑道2の日平均温湿度を図 3.4.7-51 に示す。温度に大きな変化はな く平均で温度は約18℃であり、湿度平均は約40%であった。試験坑道2において、湿度は外気 の影響を受けて多少変動が生じているが、温度についてはほぼ一定に保たれていた。



- (8) 地下実証試験のまとめ
- 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/m<sup>3</sup>、ばらつきは 1.4~1.8 Mg/m<sup>3</sup>と目標の乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>に対し±0.2 Mg/m<sup>3</sup>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/m<sup>3</sup>(ばらつき 1.4~1.7 Mg/m<sup>3</sup>)と同程度の結果と なった。

この結果より、事前に地上試験等で確認・設定した吹付け機械の施工条件の設定に基づくことで、地下環境においても、同程度の乾燥密度を達成できると考えられる。

● 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[27]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<sup>3</sup>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[25]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<sup>3</sup>(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<sup>3</sup>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<sup>3</sup>となった。 ● 地下実証試験成果を基にした整理・分析すべき事項の抽出

地下実証試験を通じて、吹付け方式による充填では、施工条件の設定(吹付け機械の運転条件・ 方法)を適切に管理することで、地下環境においても目標乾燥密度の確保と再現が可能である見 通しを得た。つまり、吹付け方式の施工条件の設定として、以下の項目を適切に管理することで、 目標乾燥密度の再現性を確保できると考えられる。

◆吹付け機の運転条件として

・エアー量、回転数、吐出圧

◆吹付け方法として

・吹付け距離、吹付け角度

ただし、吹付け距離、角度については、ノズル操作者の技量に依存する項目であり、吹付け場 所により、これらの精度にバラつきが生じ、目標乾燥密度を達成しない箇所が一部生じた。

よって、3.4.8(1)では、地下実証試験における「吹付け場所」による乾燥密度の分布等を分析し、 乾燥密度の低い箇所を特定し、吹付け距離・角度の乾燥密度への影響を分析する。

本研究では、要素試験、地上試験、地下実証試験と段階的な技術開発の整備を実施した。

この一連の整備の中で、要素試験では、吹付け距離・角度を最適な条件に調整(固定)した場 合の吹付けを実施した。一方、地上試験、地下実証試験では、ノズル操作者の技量に基づき、吹 付け距離・角度を管理した。

そこで、「<u>吹付け装置・充填方法」による乾燥密度への影響の整理・分析として、3.4.8(2)では、</u> <u>吹付け距離・角度を最適な条件に調整(固定)した要素試験結果と地上試験、地下試験との結果</u> <u>を比較し、乾燥密度のバラつき等を分析</u>する。なお整理・分析する項目は、以下とする。

・乾燥密度

・リバウンド率

・施工速度

本研究では、吹付け方式の充填材であるベントナイト混合土を強制軸ミキサの混合により、製造した。製造段階の確認項目は含水比および配合率である。

この両項目について、製造時と吹付け後との結果を比較することで、「充填材の品質」に関し、 吹付け施工の影響の有無を 3.4.8(3)で分析する。なお、吹付け後の含水比・配合率については、吹 付け場所による影響の有無も併せて分析する。

また、今回の<u>ベントナイト混合土の製造過程で課題となった団粒材の除去について、要素試験</u> 結果と地上試験、地下試験との結果を比較し、混合方法の改良の成果等を 3.4.8(3)にて分析する。

さらに、「充填材の充填後の品質」の確認として、3 種類の手法(コアサンプリング、誘電率計 測、三次元計測)にて乾燥密度を算出したが、各々の結果にバラつきが生じた。そこで、これら の<u>3種類の計測手法の整理・分析として、地上試験、地下実証試験の結果を比較・分析</u>する (3.4.8(3))。

- 3.4.8 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
  - 1) 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と既往の基盤研究で提示された PEM (↓ 2316mm)を定置しうる最小断面の 2 つの概念(図 3.1.1-1 参照)に対応したものである。

このうち吹付け方式による上部開放部の隙間充填は、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を対象として技術実証を行ったものである。

充填場所に関する条件は表 3.4.8-1 に示すとおりである。

充填場所 の状態	地下実証試験	地上試験 (ステップ 4)				
隙間形状	直径 4.0m の円形坑道内に定置された	直径 4.0mの模擬坑道内に定置された				
	模擬 PEM 上部の最大幅	模擬 PEM 上部の最大幅				
	約 1300mm	約 1300mm				
	模擬 PEM 側部の最大幅	模擬 PEM 側部の最大幅				
	約 700mm、	約 750mm、				
	奥行 4m 程度	奥行 4m 程度				
壁面仕様	坑道面:吹付けコンクリート	坑道面:鋼製(ライナープレート)				
	PEM 面:鋼製(塗装)	PEM 面 : 鋼製(コルゲート管)				
湧水状態	有り(ただし、湧水はにじむ程度)	無し				

表 3.4.8-1 充填場所の条件

地下実証試験場所 試験坑道2は、坑道壁面からの湧水はにじむ程度であり、隙間充填材(ベントナイト混合土)の吹付け作業への影響は少ないと判断し、充填場所の状態の不確かさを軽減するため、地上試験においても湧水状態は考慮しないこととした。

地下実証試験では、コアサンプリングによる乾燥密度の平均値は 1.66 Mg/m<sup>3</sup>、地上試験では 1.61 Mg/m<sup>3</sup>と、どちらの試験においても、目標の乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>に対し、同程度の結果と なった。これらの結果より、坑道壁面の状態として、にじむ程度の湧水量においては、吹付け 方式における乾燥密度への影響は少ないと考えられる。ただし、上述の通り、本実証試験では、 湧水状態を定量的に考慮した試験条件としてはいないことから、湧水環境に対する技術の適用 限界には、知見の拡充が必要となることに留意されたい。 ◆地下実証試験における「吹付け場所」による乾燥密度の分布等の分析;低密度箇所の特定

(吹付け距離、吹付け角度の精度が乾燥密度へ与える影響の分析)

吹付け場所・形状等による乾燥密度への影響を整理・分析するため、地下実証試験において 得たコアサンプリングによる乾燥密度を、PEM 近傍部およびそれ以外の一般部に分けて、分析 した結果を図 3.4.8-1 に示す。



図 3.4.8-1 地下実証試験結果 吹付け場所による乾燥密度

図 3.4.8-1 に示した結果のうち、乾燥密度が低い結果となった箇所は、PEM 近傍部のうち隅 角部など吹付けしにくい箇所であった。また、PEM 近傍部を除く一般部の吹付けにおいても、 障害物があり、ノズル操作に支障を生じる箇所については、乾燥密度が低い結果となった。 上述に示した乾燥密度の低い箇所の例を図 3.4.8-2 に示す。



図 3.4.8-2 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)

PEM 近傍部のうち PEM 側部の下端部などの狭隘な隅角部や、比較的広い吹付け箇所におい ても障害物があってノズル操作に支障を生じる場合では、顕著に乾燥密度が低くなる結果を得 た。このような場所では、吹付け装置の運転条件うち、吹付け距離、吹付け角度の精度がバラ ツキ、結果として乾燥密度に影響を与えている。

また、図 3.4.8-1 に示したように、最も乾燥密度が低い値 (1.39Mg/m<sup>3</sup>) を示した箇所は PEM の上端部である (図 3.4.8-3)。PEM の上端部付近にベントナイト混合土を吹付けた場合に、前 層で吹付けたベントナイト混合土に重ねて吹付けを実施できた場合には、十分な付着・締固め がなされるのに対し、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なく低密度の箇 所が生じたと考えれる。



図 3.4.8-3 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) 実証試験成果の拡張・展開
- a 隙間形状ついて
- ●多様な隙間形状に対する吹付け技術の拡張・展開

◆多様な隙間形状に適用可能な吹付け距離、吹付け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、乾燥密度が目標を下回る結果を得た。

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。

#### ◆吹付け充填が困難な特殊形状に対する他の充填技術の組合せ

吹付けノズルの精緻な操作ができず、目標乾燥密度の達成が困難となる隙間の形状を有する 場合には、吹付け方式による充填以外の施工方法を組み合わせることも有効な手段の一つにな り得る。

#### ◆PEM 鋼殻形状の工夫による吹付け材の付着性の向上

PEM 鋼殻に対し直接ベントナイト混合土を吹き付けた場合に、付着がしにくく、跳ね返り (リバンウンド)が多く生じる場合が一部生じたことから、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工夫・措置も 有効となり得ると考えられる。

#### ◆更なる大断面坑道への吹付け充填技術

更なる大断面坑道への吹付け方式による隙間充填を実施する場合には、吹付け量の増大に伴 い、吹付け速度の効率向上の技術展開が必要となる。装置の大型化など、吹付け装置の改良に より吹付け速度の効率が向上可能となるが、種々の要因(吹付け材料仕様(材料、配合、乾燥 密度)、リバンウンド材処理など)に対する装置の適用限界を調査する必要がある。

b 壁面状態について

坑道壁面の状態として、にじむ程度の湧水量であった地下実証試験において、コアサンプリ ングによる乾燥密度の平均値は 1.66 Mg/m<sup>3</sup>、一方、湧水のない条件下で実施した地上試験では 1.61 Mg/m<sup>3</sup>と、どちらの試験においても、目標の乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>に対し、同程度の結果と なったことから、坑道壁面の状態として、にじむ程度の湧水量においては、吹付け方式におけ る乾燥密度への影響は少ないと考えられる。

● 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拡張・展開

坑道壁面からの湧水量が多い場合など、多様な環境条件に対し適用性を有するベントナイト 系材料での吹付け技術への展開が求められる場合、既往の土木工学分野において、幅広い環境 条件で適用されているコンクリート(モルタル)吹付け技術や既往研究成果等を参考に、技術 開発を進めていくことが重要となると思われる。

既往研究[26]では、緩衝材を吹付けにより構築する実験において、0.1L/minの面状湧水湧水 状態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。」等の実績が確認できる。

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は、知見の拡充が必要と考えられる。

# (2) 装置・充填方法による影響

1) 実証成果の整理・分析

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 3.4.8-2 に要約して示す。

段階	主たる目的	試験パラメータ等	成果の概要
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 <sup>3</sup> 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)	<ul> <li>ベントナイト混合土に 配合するケイ砂の種類</li> <li>締固めエネルギー</li> </ul>	<ul> <li>・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</li> <li>・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<sup>3</sup>の結果を取得</li> <li>・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<sup>3</sup>)の達成を確認</li> </ul>
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	<ul> <li>ベントナイト混合土の 含水比</li> <li>ベントナイト混合土に 配合するケイ砂の種類</li> <li>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</li> </ul>	<ul> <li>・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</li> <li>・目標乾燥密度(1.6Mg/m<sup>3</sup>)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</li> <li>・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</li> </ul>
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	<ul> <li>・ 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</li> <li>・ 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</li> </ul>	<ul> <li>・吹付け装置のエアー量4条件(9、10、12、18m³/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</li> <li>・エアー量9m³/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</li> <li>・エアー量18m³/minのケースでは、目標乾燥密度に対し、 +0.15~0.24Mg/m³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</li> <li>・回転数は最も高密度となる5rpmを採用</li> <li>・目標乾燥密度1.60Mg/m³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 m³min、回転数 5rpmを設定</li> </ul>
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	<ul> <li>・ 吹付け装置の運転条件 として エアー量 10~12m<sup>3</sup>/min 回転数 5rpm</li> <li>・ 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</li> </ul>	<ul> <li>・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、</li> <li>1.61Mg/m<sup>3</sup>となり、目標乾燥密度 1.6 Mg/m<sup>3</sup>を満足</li> <li>・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</li> <li>・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</li> </ul>
地下実証試験	地上試験で決定した施工品 質管理手法(吹付け装置の運 転条件、オペレータのノズル 操作)により、目標乾燥密度 の達成程度、再現性の確認	<ul> <li>・地上試験と 同条件 エアー量 10~12m<sup>3</sup>/min 回転数 5rpm</li> <li>・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</li> </ul>	<ul> <li>コアサンプリングによる乾燥密度の平均値は         <ol> <li>1.66Mg/m<sup>3</sup>、ばらつきは 1.39~1.83 Mg/m<sup>3</sup>と目標の乾燥             密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>に対し±0.2 Mg/m<sup>3</sup>程度となる結果を取得</li> <li>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<sup>3</sup> (ばらつき 1.4~1.7Mg/m<sup>3</sup>)             と同程度の結果</li> <li>地上試験で決定した施工品質管理手法(吹付け装置の運転             条件、オペレータのノズル操作)より、同程度の目標乾             燥密度の達成、再現性を確認</li> </ol> </li> </ul>

表 3.4.8-2 段階的な技術実証の成果概要

◆要素試験、地上試験、地下実証試験における乾燥密度の分析

(現場依存項目(ノズル操作者による吹付け距離、吹付け角度の管理)の影響を分析)

ここで、ステップ3 吹付け要素試験、ステップ4 地上試験、地下実証試験のコアサンプリン グによる乾燥密度の分析結果を図 3.4.8-4 に示す。

図 3.4.8-4 に示した乾燥密度は、吹付け装置の運転条件のうち、材料供給量に係る条件であ る吹付け機(ニードガン)の回転数 5rpm、コンプレッサーの吐出エアー量 10~12m<sup>3</sup>/min に ついては、各試験で共通の条件に基づく結果である。

一方、吹付けノズルと吹付け面との距離 1.0m 程度、角度 90 度については、ステップ 3 吹付 け要素試験では、バックホウ(0.7m<sup>3</sup>級)に吹付けノズルを取付けた状態で吹付けを実施してお り、吹付け距離、角度を最適に調整(固定)した場合の吹付けであるが、ステップ 3 地上試験 および地下実証試験では、坑道での吹付けを想定し、汎用的な吹付け機械(伸縮アーム式吹付 け機械)を使用し、吹付けノズルをオペレータの操作により管理した吹付けである。上述の吹 付け装置の運転条件を表 3.4.8-3 に示す。



図 3.4.8-4 要素試験、地上試験、地下実証試験での乾燥密度

項目	設定値	備考
吹付け機の回転数	5rpm	吹付け機で設定
コンプレッサーの 吐出エアー量	10~12m³/min	計測器(デジタルフロースイッチ)で確認
コンプレッサーの 吐出空気圧	0.7MPa	コンプレッサーで設定
吹付けノズルから 吹付け面との距離	1.0m 程度	要素試験では、設定値に吹付けノズルを固定
吹付けノズルと 吹付け面の角度	90度	オペレータのノズル操作による管理
<u>要素試験</u> :吹付け距離 値)に調整(固定)	雛、角度を最適(設定 したリファレンス試験	<u>地上試験、地下実証試験</u> :坑道での吹付けを 想定し、汎用機(伸縮アーム式吹付け機械) を使用し、オペレータの操作により 吹付けノズルを管理した吹付け試験
要素試:	<b>設</b> の様子	地上試験の様子

表 3.4.8-3 吹付け装置の運転条件

図 3.4.8-4、表 3.4.8-3 に示した通り、ステップ 3 吹付け要素試験は、バックホウ(0.7m<sup>3</sup>級) に吹付けノズルを取付けた状態で、吹付け距離、角度を最適に調整した吹付けであり、コアサ ンプリングによる乾燥密度の平均値は 1.72Mg/m<sup>3</sup>、バラつきの範囲は 0.20Mg/m<sup>3</sup>となり、目標 乾燥密度 1.60Mg/m<sup>3</sup>を達成する結果となった。

一方、坑道での吹付けを想定し、汎用的な吹付け機械(伸縮アーム式吹付け機械)を使用し、 オペレータの操作により吹付けノズルを管理したステップ4 地上試験では、乾燥密度の平均値 は 1.61 Mg/m<sup>3</sup>、バラつきの範囲は 0.27 Mg/m<sup>3</sup>、同様にオペレータの操作により吹付ノズルを操 作した地下実証試験では、乾燥密度の平均値は 1.66 Mg/m<sup>3</sup>、バラつきの範囲は 0.43 Mg/m<sup>3</sup> と なった。

これらの結果より、吹付け距離、吹付け角度を最適に調整した場合の吹付け(ステップ3吹付け要素試験)に比べ、汎用的な吹付け機械を用いて、吹付け距離、吹付け角度をオペレータの操作により管理した場合の吹付け(ステップ4地上試験、地下実証試験)では、乾燥密度のバラつきの範囲が広くなるももの、平均の乾燥密度は、目標乾燥密度 1.60Mg/m<sup>3</sup>を達成する結果を得た。

上述の通り、汎用的な吹付け機械を用いて、標準的なオペレータのノズル操作、吹付け手順 により、吹付け距離、吹付け角度を管理した場合の地下坑道内の吹付けにおいても、未充填部 を生じることなく充填が可能であり、平均の乾燥密度は、目標乾燥密度を達成可能であること を確認した。ただし、吹付け装置・充填方法による影響として、吹付け距離、吹付け角度の精 度が、乾燥密度のバラつきの一要因となることが確認され、より安定した品質(乾燥密度)を 達成するには、吹付け距離、角度の精度の向上が必要となる。 ◆要素試験、地上試験、地下実証試験におけるリバウンド率の分析

ステップ3 吹付け要素試験、ステップ4 地上試験、地下実証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 3.4.8-4 に示す。

	リバウンド 率	コンプレッサー 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	
西丰計略	25.4~%	10 m³/min		距離;1m程度 鱼座:00 座	
安系訊駛	37.3 %	12 m³/min	5	要素試験; 吹付けノズルを	
地上試験	23.0 %	10 - 10 - 3/m	ə rpm	<ul> <li>上記の距離・角度に固定</li> <li>地上試験、地下実証試験:</li> </ul>	
地下実証試験	33.0 %	$10^{\circ} \sim 12 \text{ m}^{\circ}/\text{m}$		ノズルをオペレータが操作	

表 3.4.8-4 要素試験、地上試験、地下実証試験でのリバンウンド率

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[24]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12m<sup>3</sup>/min の条件ではリバウンド率37.3%となり、エアー量を10m<sup>3</sup>/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。

ここで、吹付け装置の運転条件であるエアー量、回転数は、吹付け後の密度を調整する重要 なパラメータである。エアー量は吹付けエネルギーとなるため、エアー量を増加させることで 達成する密度は高くなり、エアー量を減少させた場合には密度が低くなる。

一方で、エアー量を増加させることで、材料の跳ね返りが多く(リバウンド率が高く)なり、 材料ロスが増える。また、回転数は、吹付けエネルギー受ける材料の吐出量を調整するパラメ ータである。

目標密度を達成しリバンウンド率を低減する吹付け充填を実施するためには、これらの吹付 け装置の運転条件(エアー量、回転数、吹付け距離、吹付け角度)の最適な組み合わせを事前 に確認することが重要となる。なお、これらの運転条件は、材料の性情により最適値が異なる ことに留意されたい。 ◆要素試験、地上試験、地下実証試験における施工速度の分析

ステップ3 吹付け要素試験、ステップ4 地上試験、地下実証試験の吹付けの施工速度の結果のまとめを表 3.4.8-5 に示す。

	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	$2.6{\sim}3.4$ Mg/hr	山本武
地上試験	$11 { m Mg}$	12 時間	3時間	0.9 Mg/hr	3.7 Mg/hr	山米形、 時間は累計値
地下実証試験	$38 \mathrm{Mg}$	29 時間	15 時間	1.3 Mg/hr	$2.5~{ m Mg/hr}$	

表 3.4.8-5 要素試験、地上試験、地下実証試験での施工速度

備考

※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、リバンウンド材の 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/m<sup>3</sup>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[25]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<sup>3</sup>(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<sup>3</sup>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。

施工速度は、0.9~1.3Mg/m<sup>3</sup>となり、吹付け方式による充填効率を向上させるためには、吹 付け時間以外の効率(例えば、リバウンド材の捕集時間)を向上させることが必要となる。

なお、地下実証試験におけるリバウンド材の捕集効率(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)は、1.88 Mg/m<sup>3</sup>となった。

2) 実証成果の拡張・展開

a 吹付け装置の運転条件について

●吹き付け方式における施工方法・装置の高度化に対する技術の拡張・展開

◆遠隔化・無人化施工技術

吹付け装置の運転条件のうち、エアー量および回転数は、吹付け装置の設定により制御・管 理できる項目である。一方、吹付け距離および吹付け角度については、土木分野で施工される コンクリート吹付け作業においても、オペレータによる吹付けノズルの操作に依存することが 一般的である。ただし近年の動向として、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。

また、NUMO 包括的技術報告書(レビュー版)[21]では、PEM と処分坑道の隙間の埋め戻 しについて、PEM 方式では緩衝材による放射線遮蔽効果が期待できるが、安全性の高い放射線 防護の観点からは、遠隔操作による無人化が必要であるとの課題が示されている。

今回の地下実証試験では、汎用的な吹付け機械を用いて標準的なオペレータのノズル操作に より吹付け距離・角度を管理した吹付けを実施し、未充填部を生じることなく目標の乾燥密度 を達成したが、より安定した品質(乾燥密度)の確保や、材料ロスの低減(リバンウド率の低 下)、放射線防護の観点からは、精緻なノズル操作の制御が可能となる無人化・自動化による吹 付け技術の高度化が望まれる。そのためには、例えば、吹付け法面のセンシング技術(吹付け 法面の凸凹に応じた、吹付け距離、角度の制御技術)といった技術との組合せが肝要となる。

## ◆多様な吹付け材料仕様に適用性を有する吹付け装置・技術

本研究は、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であるが、今後の実証成果の拡張・展開としては、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考えらえる。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であるが、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装置適用限界など、知見の拡充が必要 と思われる。

b 吹付け装置の運転方法・手順について

● 吹付け方法・手順の観点から、施工速度向上に対する技術の拡張・展開

### ◆リバウンド材の捕集作業の高度化

吹付け方式による充填作業・手順では、吹付け材の充填作業に伴い材料の跳ね返り(リバン ウンド材)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に、一旦、吹付 け作業を中止し、吸引装置等で捕集することが一般的であるが、吹付け装置の運転方法・手順 の改善の一つとして、吹付け作業と同時にリバウンド材の捕集が可能であれば、施工速度の向 上となる。ただし、吹付け作業と同時にリバウンド材を捕集するための技術的課題の難易度は 高いと考えられる。

### ◆リバウンド材の再利用化

材料ロスの低減の観点から、リバウンド材の再利用が可能であれば、有効な手段の一つとな る。ただし、リバウンド材の管理項目(例えば、配合率、含水比など)に対し、再利用を可能と する基準等を整備する等の課題が残されている。

- (3) 充填材の品質による影響
  - 1) 実証成果の整理・分析
  - a 充填材の製造について

吹付け方式による開放部の充填に使用した充填材は、Na型ベントナイト(クニゲルV1)と ケイ砂(3号、5号)を乾燥重量比で50%:50%(Na型ベントナイト:ケイ砂(3号:5号=50: 50))で混合したベントナイト混合土であり、目標含水比は地上試験等の結果から15.8%を設定 している。各材料(ベントナイト、ケイ砂、混合水)を強制二軸ミキサにて混合し、ベントナイ ト混合土を製造した。

◆製造時と吹付け後のベントナイト混合土の含水比

地下実証試験におけるベントナイト混合土の製造(混合)後の含水比の結果を図 3.4.8-5 に 示す。ベントナイト混合土の含水比は平均で 15.6%、バラつきの範囲は 14.0~17.6%、標準偏 差は 0.70 と非常に小さい結果となり、管理基準値とした 15.8%±2%に収まる結果を得た。こ のことから、含水比については、一定の品質を確保した製造が達成できた。



図 3.4.8-5 ベントナイト混合土の製造(混合)後の含水比

図 3.4.8-1 には、地下実証試験結果のうち、ベントナイト混合土のコアサンプリングによる 含水比を吹付け場所毎に分類した結果を示しており、吹付け場所による含水比のばらつきは少 ないことが確認できた。



図 3.4.8-6 地下実証試験結果 吹付け後の含水比(コアサンプリング結果)

◆製造時と吹付け後のベントナイト混合土の配合率

地下実証試験におけるベントナイト混合土の製造(混合)後の配合率の結果を図 3.4.8-7 に 示す。ベントナイト混合土の配合率は平均で 43.0%、バラつきの範囲は 35.3~53.8%、標準偏 差は 3.7 となり、設定の配合率 50%に対して平均値は 7%程低い値となった。

ベントナイト配合率のバラつきの原因として、製造時の加水方法による影響が考えられる。 地上試験では、人力のジョウロにて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える。



ベントナイト配合率 43.0 3.7 42.2 18.5 53.8 35.3 186

図 3.4.8-7 ベントナイト混合土の製造(混合)後の配合率

図 3.4.8-1 には、地下実証試験結果のうち、ベントナイト混合土のコアサンプリングによる 配合率を吹付け場所毎に分類した結果を示しており、吹付け場所による配合率のばらつきは少 ないことが確認できた。



	一般部	PEM 近傍部	一般部 (障害物あり)
平均混合率 (%)	47.24	47.01	47.40
標準偏差(%)	2.70	2.46	2.21
中央値(%)	46.82	46.82	47.98
範囲 (%)	23.12	9.25	4.62
最大値(%)	58.38	51.45	49.13
最小値(%)	35.26	42.20	44.51
標本数	93	50	4

図 3.4.8-8 地下実証試験結果 吹付け後の配合率 (コアサンプリング結果)
## ◆ベントナイト混合土の製造過程で生じる団粒材の除去

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。

ステップ3 吹付け要素試験、ステップ4 地上試験、地下実証試験の団粒材除去率の結果のま とめを表 3.4.8-4 に示す。

		団粒材除去率		汐	昆合方法
ステップ3 要素試験 33.79		%	混合方法 改善前		
ステップ 4 地上試験		27.9	%	表 3.4.8-7	
地下実証試験		17.6 9	%	混合方法 改善後 表 3.4.8-8	
		要素試験	地上	試験	地下実証試験
平均団粒材除去率 (%)		33.7	2	7.9	17.6
標準偏差(%)		4.7 7		7.0	2.2
中央値(%)		34.2	2	7.8	17.7
範囲(%)		9.8	2	3.3	18.4
最大値(%)		38.1	4	2.0	28.5
最小値(%)		28.3	1	8.8	10.1
標本数		4	19		224

表 3.4.8-6 要素試験、地上試験、地下実証試験での団粒材除去率

ステップ34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。

表 3.4.8-7 改善前の混合方法(ベントナイト混合土(1バッチ約350kg当たり))

混合手順	混合時間
1. ケイ砂+混合水をミキサに投入	80秒 撹拌・混合
2. ベントナイトをミキサに投入	90秒 混合・撹拌なし
3. 混合水をミキサに投入	180秒 撹拌・混合
	合計 約350秒

表 3.4.8-8 改善後の混合方法(ベントナイト混合土(1バッチ約350kg当たり))

混合手順	混合時間
1. ケイ砂+混合水をミキサに投入	80秒 撹拌・混合
2. ベントナイトをミキサに投入	90秒 混合・撹拌なし
3. 混合水をミキサに投入	90秒 撹拌・混合
	合計 約260秒

b 輸送・貯蔵管理について

地下実証試験において、吹付けに使用したベントナイト混合土の重量は、約 56Mg である。 幌延 URL の地上施設内において製造したベントナイト混合土をフレコンに 500kg 程度に小分 けし、製造の当日もしくは翌日に地下 350m の坑道に運搬し、吹付け充填に使用した。地下実 証試験における坑道内での保管期間は、土日・祝日等を挟んでも3日間程度あり、ベントナイ ト混合土の含水比の大幅な変動や明確な団粒化といった事象は確認されなかった。

また、地上試験において、製造したベントナイト混合土をフレコンに収納し、地面とのパレ ットによる縁切りのうえブルーシートを被せ、12日間屋外ヤードに材料を保管した場合も含水 比の大幅な変動はなく、保管後の吹付け試験の結果(乾燥密度、リバウンド率および配合率等) への明確な影響も認められないことから、単純な静置条件での保管では、ベントナイト混合土 の材料劣化は少ないことが見込まれる。 c 充填後の品質の確認について

地上試験、地下実証試験では、3種類の方法により、充填後の品質確認として、乾燥密度を算 出した。具体的には、コアサンプリングおよび誘電率計測による乾燥密度の算出と、三次元計 測による体積計測を実施し、吹付けた体積および重量から乾燥密度の算出を行った。

図 3.4.8-9 に地上、地下実証試験における3種類の算出方法による乾燥密度の結果を示す。



図 3.4.8-9 地上試験、地下実証試験における3種類の算出方法による乾燥密度

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(1.61、 1.66Mg/m<sup>3</sup>) >誘電率計測による乾燥密度(1.58、1.55Mg/m<sup>3</sup>) >3 次元計測による乾燥密度 (1.41、1.49Mg/m<sup>3</sup>)、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。

コアサンプリングの標準偏差  $\sigma$  は 0.05、0.08 Mg/m<sup>3</sup>、誘電率計測の場合の  $\sigma$  は 0.13、0.09 Mg/m<sup>3</sup>となり、ややコアサンプリングの値が小さくなったが、概ね  $\sigma$  =0.1 Mg/m<sup>3</sup>となった。

標準偏差を 0.1 Mg/m<sup>3</sup>とする場合に、コアサンプリングおよび誘電率による乾燥密度の結果 を正規分布とすると、平均値±0.3 Mg/m<sup>3</sup>の範囲内に、99.7%の確率で乾燥密度の値が収まる ことになる。

ここで、充填材の密度や含水比を直接的に測定するためには、一般に試料採取(コアサンプ リング)が必要となるが、日常的な施工品質確認方法としては、手間と時間を要する。一方、 誘電率計測では、原位置で簡易に計測し、検量線等にて乾燥密度へ換算できることから、密度 確認の即応性は高い。ただし、材料の仕様に応じた検量線の準備や、試料内の温度や含水比に よる補正が必要となる。

また、コアサンプリングや誘電率計測では、局所的な密度の算出となるが、3次元計測器による計測では、充填箇所全体のかさ密度の算出が可能となる。

前述の通り、3種類の乾燥密度の算出手法により、乾燥密度の値が異なる結果となり、この原因の特定は今後の課題である。

## 2) 実証成果の拡張・展開

a 充填材の製造について

本研究では、強制二軸ミキサにてベントナイトおよびケイ砂を加水混合し、ベントナイト混合土を製造した。地下実証試験では、ベントナイト混合土の含水比は平均で15.6%、バラつきの範囲は14.0~17.6%、標準偏差は0.70と非常に小さい結果となり、管理基準値とした15.8% ±2%に収まる結果を得た。このことから、含水比については、一定の品質を確保した製造が達成できた。

一方、ベントナイト混合土の配合率は平均で 43.0%、バラつきの範囲は 35.3~53.8%、標準 偏差は 3.7 となり、設定の配合率 50%に対して平均値は 7%程低い値となった。したがって、 配合率については、バラつきの範囲が広い結果となった。

● 充填材(ベントナイト混合土)の製造技術の拡張・展開

#### ◆充填材の製造方法の規定化、基準化

要素試験および地上試験における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、特に配合率の品質については、課題を残した。

今後、多量の充填材の製造が必要となる場合を鑑みて、汎用的なミキサを用いた製造方法の

規定化・基準化(例えば、加水方法、混合時間時間などの規定化、基準化)が進むことで、より 安定した品質を確保した充填材を多量に製造可能となる。

ただし、多様な充填材の仕様(原材料種類、配合など)に対し、混合方法による品質のバラ つきに関する知見の整理・拡充等が必要になると思われる。

b 輸送・貯蔵管理について

前述の通り、地下実証試験ではベントナイトの製造後、最短で製造当日、最長でも製造後 3 日程度で吹付け充填に使用しており、輸送や貯蔵管理による明確な材料劣化は認められなかっ た。ただし、実際の地層処分の操業段階では、充填数量が膨大となることから、ある程度の充 填材料を在庫して施工に供していくことが想定される。そのため、充填材料の経時的な性状変 化についての検討を進めて行く必要があると思われる。

c 充填後の品質確認

地上試験、地下実証試験では充填後の品質確認として、3種類の手法により、乾燥密度を算出 した。具体的には、①コアサンプリングによる乾燥密度の算出、②誘電率計測による検量線を 用いた乾燥密度の算出、③3次元計測器による体積計測を実施し、吹付けた体積および重量か ら乾燥密度の算出である。3種類の乾燥密度の算出手法について、設定した目標密度の達成程 度や施工品質のばらつきについての知見を取得した。

地上試験と地下実証試験の各々で、コアサンプリングによる乾燥密度>誘電率計測による乾燥密度>3 次元計測による乾燥密度となる傾向などを確認し、3 種類の手法による乾燥密度の 算出について、一定の再現性を確認した。

● 充填後の品質(乾燥密度)の確認手法に対する技術の拡張・展開

◆間接的な計測手法技術(例えば、3次元計測技術)の整備

本研究では、コアサンプリングおよび誘電率計測による乾燥密度の算出と、三次元計測によ る体積計測を実施し、吹付けた体積および重量から乾燥密度の算出を行ったが、各々の手法で 乾燥密度の値が異なる結果となり、この原因の特定は今後の課題となった。

実際の処分事業を鑑みると、直接的な計測手法であるコアサンプリングの適用の可能性が低いことが想定される。

そこで、間接的な計測手法であり、遠隔・無人化施工との親和性が高く、局所的な結果でな く充填箇所全体での密度の算出が可能な、3次元計測による乾燥密度の確認技術の整備が必要 になると考えられる。ただし、本研究では、コアサンプリングより算出した乾燥密度に比べ、3 次元計測により算出した乾燥密度が低くなるなど、計測手法の違いによる密度結果のバラつき の原因特定には至っていない。充填後の品質確認方法の規定化や基準化を含め、密度の確認手 法に関する技術(特に3次元計測技術)の整備および知見の拡充が望まれる。

### 3.5 隙間充填技術の実証的整備 まとめ

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。

段階的に整備開発した PEM-坑道間の隙間充填材の施工技術を用いて、幌延 URL 試験坑道 2 における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、除去対象を適切な品質で構築するとともに、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。

これらの一連の試験を通じて、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した。

また、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踏まえ、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)に対し、今後の技術の拡張・展開の可能性等を整理した。

### 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24年度地層処分技術調査等事業処分シ ステム工学要素技術高度化開発報告書(第1分冊)遠隔操作技術高度化,2013.
- [2] NUMO セーフティー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
- [3] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成17年度地層処分技術調査等事業処分シ ステム工学要素技術高度化開発報告書(第2分冊),2016.
- [4] Implementation of the full-scale emplacement (FE) experiment at the Mont Terri rock laboratory, Herwig R. Müller, et.al (EU Project LUCOEX - Requirements, manufacturing and QC of the buffer components of WP 2 (FE Experiment))
- [5] Masuda Ryoichi; Asano Hidekazu; Tada Hiroyuki / RWMC Mori Takuo; Shimura Tomoyuki; Matsuda Takeshi; Uyama Masao; Noda Masaru / Obayashi : Buffer Construction Technique by means of Granular Bentonite.
- [6] 戸栗智仁、高橋康裕、朝野英一/原子力環境整備促進・資金管理センター、岩佐健吾、 中島均/清水建設:ベントナイトペレットとベントナイトスラリーを併用する隙間充て ん方法に関する研究(2007)
- [7] 戸栗智仁、景山仁志、朝野英一/原子力環境整備促進・資金管理センター、沖原光信、 岩佐健吾、中島均、石井卓/清水建設:横置き定置式における緩衝材周辺隙間へのベン トナイトペレットの充てん方法に関する研究(2008)
- [8] 山本卓也、矢田勤、藤原斉郁/大成建設:西村務、竹内靖典/神戸製鋼所:粒状ベント ナイト充填による狭隘部人工バリア施工の検討その3-施工・品質管理方法の検討-(2009)
- [9] 白瀬光泰、森川義人、遠藤さち恵/大成建設、三上登、池田淳/日特建設:粒状ベント ナイトを使用した乾式ベントナイト吹付け工法の基礎実験(2013)
- [10] 杉田 裕/核燃料サイクル開発機構、菊池広人/検査開発:人工バリアにおける緩衝材の 隙間充填挙動に関する基礎試験 JNC TN8430 2002-003 December (2002)
- [11] 杉田 裕、棚井憲治/核燃料サイクル開発機構、菊池広人/検査開発:人工バリアにおける緩衝材の隙間充填挙動に関する基礎試験(II) JNC TN8430 2003-007 November (2003)
- [12] 北川義人: テーマ 2: 技術の保有・移転に向けた関係機関との共同研究 人工バリア施工 技術適用試験の実施-SKB との共同研究-NUMO.
- [13] 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, 2005.
- [14] 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成27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第1編 可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理,2016.

- [15] 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(第2分 冊), 2018.
- [16] 森拓雄、深谷正明、棚井憲治、土木学会第72回年次学術講演会、VII-035、2017年9月.
- [17] 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(第1分冊),2017.
- [18] David Dixon, Torbjörn Sandén, Esther Jonsson, Johanna Hansen, Oy Backfilling of deposition tunnels: Use of bentonite pellets,
- [19] H. Jenni, S. Koehler: Full-Scale Emplacement (FE) Experiment, Report on the Construction, Testing and Commissioning of the Emplacement Equipment, LUCOEX WP2, D2.4, Sep. 2015
- [20] 原子力環境整備促進・資金管理センター: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 報告書(第1分 冊), 2019.
- [21] 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)、NUMO-TR-18-03,2018.
- [22] 公益財団法人日本コンクリート工学会、JCI 九州支部研究専門部会:乾式吹付け工法に おける施工性と品質の評価手法研究委員会報告書, 2015.
- [23] Normet Minmec Techical data sheet, <u>http://pdf.directindustry.com/pdf/normet-</u> international-ltd/minimec/59086-377629.html
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.

# 第4章 隙間充填材除去技術の実証的整備

4.1 隙間充填材除去技術の除去対象

4.1.1 除去技術の整備目標と開発整備の進め方

3章で述べたように、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<sup>3</sup>、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<sup>3</sup>、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[1]。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(2.2.1(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。

4.2 除去技術の研究アプローチ

4.2.1 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3つの要因(除去場所、除去対 象物、除去技術)について、それぞれの相関を整理した(図 4.2.1-1)。



図 4.2.1-1 除去工程に影響を与える主要因「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、3章に示したとおりである(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 4.2.1-2 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 4.2.1-2 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 4.2.1-2 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(2.2.1(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。 4.2.2 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方式)

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 4.2.2-1)。

- ・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 4.2.2-1 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。

(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、かつ機械的除去に比べ PEM 鋼 殻を損傷させる危険性が少ない技術である。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。なお、大断面坑道に PEM が定置された場合を想 定した上部開放部の除去では、機械的除去と流体的除去の両技術の試験、狭隘な坑道を想定し た下部狭隘部の除去では、流体的除去単体の試験を実施し、坑道形状に即した除去技術の組合 せにも留意した。

(3) NUMO における埋め戻し材の除去方法の検討例

NUMO では、横置き・PEM 方式の場合の隙間埋め戻し材の除去について、埋め戻し材の大部分を掘削機械で除去し、その後、PEM に損傷を与えないため、塩水噴射による PEM 周辺の埋め戻し材の除去を行う方法を検討しており、埋め戻し材の除去後、PEM 抱え込み型の回収装置を搬入し、PEM を回収する方法を検討している[3]。

本事業では、NUMO が検討している PEM の回収方法(手順、設備)と異なるが、横置き・ PEM 方式における隙間充填材の除去工程および選定している除去技術(機械的・流体的除去 技術)は概ね一致する。

(4) 海外の既往検討による隙間充填材の除去技術の調査

1) ほぐし工程の技術に関する既往検討

隙間充填材の除去工程のうち、ほぐし工程に係る技術は、コアとなる技術となる。隙間充填 材を含む結着した粘土材料をほぐす技術の検討例として、SKBの緩衝材除去技術の検討[4]が ある。この検討では、機械的除去技術、流体的除去技術、熱的除去技術、電気的除去技術の4 分野に技術を大別している。

また、以下の7項目を各技術の評価対象とし、各判定基準に対してスコアを付けて技術が選 定されている。

A: 処分孔から完全にベントナイトを取り除くことが出来るか?

;表 4.2.2-1 の凡例; yes(取り除ける)の場合に+、Noの場合に-

B:装置や作業は複雑か、または煩雑か?

;表 4.2.2·1 の凡例; yes (簡素で用意) の場合に+、No の場合に−、中間の場合に± C:必要な電力や動力は微少なものか?

;表 4.2.2-1 の凡例; yes (微少)の場合に+、No の場合に-、中間の場合に±

D: 副産物や汚染物は発生しないか?

;表 4.2.2-1 の凡例; yes (発生しない)の場合に+、Noの場合に-

E:副産物や汚染物の追加処理不要、または容易であるか?

;表 4.2.2·1 の凡例; yes (不要または容易)の場合に+、Noの場合に−、中間の場合に± F:廃棄体への潜在的な影響がないか?

;表 4.2.2-1 の凡例; yes (影響ない)の場合に+、Noの場合に-、中間の場合に±

G:廃棄体の位置に大きく影響される技術であり、廃棄体の位置の把握が必要か?

;表 4.2.2-1 の凡例; yes (必要)の場合に+、Noの場合に-、中間の場合に±

これらの基準の下、将来性が高い技術、低い技術、推奨しない技術と評価した。

技術					スコア				
技術の大分類	個別技術		А	В	с	D	E	F	G
	全断面掘	削	_	-	_	_	+	_	+
機械的除去	粉砕除去	ŧ	+	-	-	-	±	-	+
=	コアボーリング		+	-	-	-	-	-	+
	高圧水	Pressure 10-100 bar	+	±	±	-	-	+	+
水理的除去		Pressure ≥ 100 bar	+	-	+	-	-	±	+
	低圧水	< 10 bar	+	+	-	-	±	+	+
	加熱冷却なし		I	I	+	+	+	±	-
劫的险土	加熱	Buffer 50°C	I	-	-	+	+	-	+
<b>熟</b> 的际 <b>去</b>	.A +5	Buffer 50°C	I	-	-	+	+	±	-
	府却 Buffer Canister gable 50°C		-	+	-	+	+	±	-
電気的除去	直流電流	Ē	-	?	?	-	-	+	-
	マイクロ波		+	-	_	-	_	+	_

表 4.2.2-1 除去技術の比較評価[4]

その結果、SKBは10bar以下の低水圧での除去を有効な方法として選定した。そして塩水を 低い圧力で噴射し、緩衝材をスラリー化して除去することで廃棄体に加わる拘束力を解放し、 廃棄体が回収可能となることを実証試験で示している。

2) 副産物の性状に関する既往検討

ほぐし技術によって、拘束力が解放される状態と発生する副産物の性状が異なる。SKBの報告書では各技術で緩衝材を除去した場合の副産物の性状について以下のように示している。

○機械式除去

・全断面ボーリング法 彰	いた緩衝材(小	ヽ片、 破片、り	鬼)
--------------	---------	----------	----

- ・切削法 より細かい緩衝材(小片、破片、塊)
- ・コアドリル法 湿った緩衝材(小片、破片、塊)

○水理的除去

- <10bar (<1MPa) 固形物の含有量が多いスラリー</li>
- ・10-100bar (1-10MPa) 固形物の含有量が少ない泥
- ・>100bar (>10MPa) 固形物の含有量が少ない泥

ゲルに覆われた大小塊と切断に使った液体

○熱的除去

※加熱/冷却により、廃棄体周囲に隙間を作るため副産物は発生しない。

○電気的除去

通電や加熱による緩衝材の拘束圧の低下や収縮を期待。副産物は生じないがガスが発生。

・直流法

ガス(水蒸気を含む水素、酸素ガス)

・マイクロ波法 水蒸気

熱的除去や電気的除去は、廃棄体周囲の材料の収縮等の効果により隙間を作る原理のため、 拘束力の開放という目的そのものや、副産物が少ないもしくは発生しないという観点では有効 な技術である。しかしながら廃棄体を加熱/冷却する、可燃性の水素ガスが発生するなどの課 題がある。上記の海外の既往検討による隙間充填材の除去技術の調査結果を参考に、熱的除去 方法と電気的除去方法については、本事業では取り扱わないこととした。

- 4.3 機械的除去技術の実証的整備
- 4.3.1 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、図 4.3.1-1 の青色部で示 した模擬 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 ナイト混合土である(表 4.3.1-1)。



図 4.3.1-1 地下実証試験における機械的除去技術の対象領域 試験坑道2 断面図

表 4.3.1-1 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 (配合比;ベントナイト:ケイ砂 =50%:50%)	乾燥密度 1.60 Mg/m <sup>3</sup> (有効粘土密度 1.15Mg/m <sup>3</sup> )	16%

4.3.2 機械的除去技術であるオーガ方式の選定

一般の土木分野のトンネル掘削などで、多くの技術が実用化されている。既存の土木工学分 野の掘削技術を参考に、機械的除去技術のうち「ほぐし」技術として、バックホウに取付け可 能なバケット、衝撃を与えて破砕するブレーカ、回転するカッターで地盤や岩盤を破砕するロ ードヘッタ、そして地盤等にスクリューで穴をあけるオーガ(アースオーガ)を候補とした。 以下に各方式の特徴等を簡潔に示し、各技術に対する検討結果を表 4.3.2-1 に示す。

◆バケット方式;

バックホウのブームに取り付けられ、土砂等を掬う、移動させる作業によく用いられて いる。粘性土砂の場合には土砂がバケット内に付着し、効率が低下するとともに、バケッ トの回転に広い作業範囲が必要となる。

◆ブレーカ方式;

コンクリートや岩塊等の堅い物体を砕く方法としてよく用いられているが、粘性土砂で はブレーカで衝撃を与えても、対象物が柔らかいため、穴が開くだけでほぐす効果は少な いと考えられる。

◆ロードヘッダ方式;

対象物が柔らかい場合には、カッターに粘土分が付着して効率が低下すると考えられる。 ◆オーガ方式;

アースオーガスクリューの回転により解砕・切削(ほぐし)と撤去の効果から、効率の

良い除去が期待できると考えられる。また、横置き・PEM 方式の概念に対し、アースオー ガの挙動が処分坑道長手方向のみとなることから、PEM に接触して損傷させるという潜在 的な危険性を低減できる。

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	$\bigtriangleup$
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	$\bigtriangleup$
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	0

表 4.3.2-1 本研究における機械的除去技術の選定検討

ここで、ほぐした充填材(副産物)の「撤去」技術の選定について、以下に示す。

◆バケット方式;

バックホウのバケットで掻き出し、トラック等に積み込んで搬出する方法がある。この 方法ではバックホウがバケットに充填材を掬ったまま旋回する必要があり、坑道のように 狭い空間では作業効率が低下する。

◆シャフトローダ方式;

バケットを旋回しないで積み込んで搬出する方法としては、トンネル施工におけるシャ フローダの例が挙げられるが、装置が大がかりになる欠点がある。

◆吸引方式;

汚泥の吸引除去などに用いられている吸引は駆動機にてブロワを廻して真空槽を作り、 真空の持つ吸引力を利用して空気と一緒に回収物をタンクに吸引回収する方法であり、汚 泥の吸引や河川の浚渫あるいはダストの吸引などに用いられている(以降、「吸引方式」と 呼ぶ)。吸引工法の機械には移動式と定置型があり、ホースによる吸引が可能なため、小さ な空間での撤去作業が可能であり、坑道内のオーガによるほぐし工程と平行して、隙間充 填材を連続的に撤去することが期待できる。

以上のことから、機械的除去技術オーガ方式では、撤去技術として吸引方式を選定し、技術 の適用性、課題および拡張性について、実証試験を通じて確認した。

なお、選定したオーガ方式は、オーガ先端部の回転による隙間充填材の「ほぐし」と、後続 のスクリューの回転による副産物の「撤去」を兼ねた技術であることから、本方式の隙間充填 材の撤去技術は、スクリューの回転による副産物の撤去と吸引方式による副産物の撤去との組 み合わせたものとなる。 4.3.3 中核技術の抽出

実際の処分事業を想定した機械的除去装置の概念設計を例示的に行い、この概念設計例のう ち、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を実施した。

図 4.3.3・1 に横置き・PEM 方式の処分概念に対し、機械的除去技術を適用した場合の除去装置の概念設計例を示す。除去対象は、PEM 鋼殻から 300mm 以上離れた箇所のベントナイト 混合土とし、適用する技術は、オーガ方式および吸引方式とし、「ほぐし」と「撤去」を同時に 行う設定とした。

本設計例では、遠隔監視・操作による除去を前提に、装置前方より、①除去・撤去装置、② 回収・処理装置、③副産物収納装置、④駆動装置から構成される。除去・撤去装置では、除去 対象物をアースオーガによりほぐし、吸引により撤去する。撤去した副産物は、回収物収納装 置の廃棄用フレコンに収納される。走行機能はエアパレットによる走行を設定し、最後尾には エアコンプレッサを搭載した駆動装置を配置している。



図 4.3.3-1 横置き・PEM 方式における機械的除去装置の概念設計例

本事業では、中核となる技術として、上記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 4.3.3-2、図 4.3.3-3)。オーガと吸引以外の機構は、 汎用的な機械を活用した。



図 4.3.3-2 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(1/2)

アースオーガ機構と吸引機構の詳細



図 4.3.3-3 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 (2/2)

4.3.4 機械的除去技術の整備手順

図 4.3.4-1 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 4.3.4-1 機械的除去技術の整備手順

4.3.5 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/m<sup>3</sup>, 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 4.3.5-1)。

製作したオーガアタッチメント (図 4.3.5-2) 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。



図 4.3.5-1 地上予備試験 説明図



オーガアタッチメントを装備した 小型バックホウ



オーガアタッチメント 側面



オーガアタッチメント 正面 アタッチメント内部のオーガスクリュー 図 4.3.5-2 製作したオーガアタッチメント

地上での予備試験(図 4.3.5-3)では、供試体の中央部の切削・捕集(直径 200mm・深さ 300mm, 切削量 0.01m<sup>3</sup>) 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。



(a) 除去の様子



(c) 壁が近い箇所の除去



(b) 除去後の形状



(d) 連続除去

図 4.3.5-3 地上予備試験状況

4.3.6 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(図 4.3.6-1 の青色部)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 4.3.6-1 地下実証試験における除去対象箇所 試験坑道 2 断面図



図 4.3.6-2 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/m<sup>3</sup>、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 4.3.6-1 に示す。

項目	設定値	備考
オーガ回転数	36rpm	機械側で設定
オーガアタッチメント 挿入速度		オペレータのアーム操作に 依存

表 4.3.6-1 機械的除去装置の運転条件

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外観を図 4.3.6-3 及び図 4.3.6-4 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 一時的に保管し、適宜フレコンに封入して地上へ運搬した。



図 4.3.6-3 機械的除去装置の配置平面図



真空吸引装置

油圧ユニット 図 4.3.6·4 地下実証試験 機械的除去装置

試験状況

# (3) 地下実証試験結果

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 4.3.6-5)

- ・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



1) 施工速度

a 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 4.3.6-2)。

・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 4.3.6-6)



表 4.3.6-2 アースオーガによるほぐしの施工効率



図 4.3.6-6 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 5.5kg/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。

b 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 4.3.6·3)。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。

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
樹土(吸引)を	いい いっぽう いうしょう いうしょう しんしょう しんしょ しんしょ	回収点にた中の様子
	E 川唯心の様士	回収ダンク内の様子

表 4.3.6-3 真空吸引装置よる撤去(吸引)の施工効率

2) 切削方向・手順などの除去手順による作業性

図 4.3.6-7 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 4.3.6-4)。 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 4.3.6-7 オーガの除去手順による作業性の確認 説明図

	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				

表 4.3.6-4 オーガの除去手順による施工効率の比較結果

3) 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 4.3.6-8 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 4.3.6-8
 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。図 4.3.6-9 に機械的除去前および機械的除去 後の試験坑道 2 の写真を示す。なお、上述の施工効率や作業性等のデータを取得した後に残存 したベントナイト混合土の一部は、汎用機械および人力にて除去・清掃している。



機械的除去前 全景



機械的除去後全景

図 4.3.6-9 機械的除去前後の坑道内

### 4.4 流体的除去技術の実証的整備

4.4.1 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、図 4.3.1-1 の赤色部で示した下部 狭隘部および、黄色部で示した模擬 PEM 周囲 300mm 以内の PEM 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 り、これらの隙間充填材が除去対象となる。(表 4.4.1-1)。



図 4.4.1-1 地下実証試験における機械的除去技術の対象領域 試験坑道2 断面図

長 4.4.1-1 除去対象とする隙間充填権	打(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 <sup>3</sup> 以上 (有効粘土密度 1.37Mg/m <sup>3</sup> )	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 <sup>3</sup> (有効粘土密度 1.15Mg/m <sup>3</sup> )	約 16%

4.4.2 流体的除去技術 ウォータージェット方式の選定

流体的除去技術は流体を高圧で噴射して対象物を除去する技術であり、流体として水を使用 する事例が最も多い。本技術は、噴射圧力の調整、流体比重の調整が可能であり、コンクリー トなどの硬質材料にも適用可能であるとともに、目的とする除去対象物の強度に応じた噴射圧 力・流体比重を選択することで、幅広い除去対象物に適用可能である。さらに、除去作業に伴 う熱の発生が少なく、除去対象物の熱変質が生じる危険が少ない等の特徴を有している。

流体を使用した充填材の除去に対し、使用水の特性、除去対象への作用に着目し、整理した 図を図 4.4.2-1 に示す。



本事業では、以下の2点を考慮し、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。

◆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ること

◆機械的除去に比べ PEM 鋼殻を損傷させる危険性が少ない技術であること

なお、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。

さらに、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[7]
- ◆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[7]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)が整備されており、この技術は、水の種類に因らない技術である。

すなわち、整備済みの除去水の再利用技術は、ウォータージェット方式にも適用が可能であ り、切削水の削減も可能と考えられることから、「切削後の副産物の減容化処理や、切削水の再 利用」の技術は整備の対象外とした。 4.4.3 中核技術の抽出

実際の処分事業を想定した流体的除去装置の概念設計を例示的に行い、この概念設計例のう ち、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 4.3.3-1 に横置き・PEM 方式の処分概念に対し、流体的除去技術を適用した場合の除去装置の概念設計例を示す。除去対象は、PEM 鋼殻から 300mm 以内のベントナイト系材料とし、 適用する技術は、ウォータージェット方式および吸引方式とし、「ほぐし」と「撤去」を同時に 行う設定とした。

本設計例では、遠隔監視・操作による除去を前提に、装置前方より、①除去・撤去装置、②回 収・処理装置、③副産物収納装置、④駆動装置から構成される。除去・撤去装置では、除去対象 物をウォータージェットによりよりほぐし、吸引により撤去する。撤去した副産物は、回収物 収納装置の廃棄用ドラム缶に収納される。走行機能はエアパレットによる走行を設定し、最後 尾にはエアコンプレッサを搭載した駆動装置を配置している。



図 4.4.3-1 横置き・PEM 方式における流体的除去装置の概念設計例

本事業では、中核となる技術として、上記設計例のうち装置先端部の「除去・撤去装置」に 関する技術を実証の対象とし、ウォータージェット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 4.3.3・2)。なお、ウォータージェットと吸引 以外の機構は、汎用的な機械を活用した。



図 4.4.3・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

4.4.4 流体的除去技術の整備手順

図 4.3.4-1 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。



4.4.5 地上予備試験

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 を実施した。

(1) 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 4.4.5-1 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。

材料	乾燥密度	含水比	飽和度	備考
約休べいトナイト	1.37Mg/m <sup>3</sup> 程度	$15 \sim 20\%$	45%程度	カービル W1
初体シントノイト		35%程度	95%程度	9 - 9 / VI
ベントナイトペレット		$7 \sim 9\%$	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%
破砕べいトナイトペレット			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

表 4.4.5-1 供試体作製条件

(2) 使用機械

要素試験では、高圧ポンプ、発電機等のユニットー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。使用した高圧洗浄車の能力は、30MPa、120L/min である。



図 4.4.5-1 高圧洗浄車

現在、高圧水噴射するノズルの仕様に統一規格は無く、仕様・性能は各メーカによる製品規格となる。ここで、ノズル形状の種類の一例として、直射ノズルと扇形ノズルおよび、各々の 噴射状況を図 4.4.5-2 に示す。



(3) 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。

(4) 試験結果

20MPa の噴射圧での切削の可否

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の 一例として図 4.4.5-3 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<sup>3</sup>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できることを確認した。



図 4.4.5-3 要素試験状況



切削後

2) 切削速度と飽和度の関係

粉体ベントナイトで製作した供試体に対する切削試験結果を一例として表 4.4.5-2 に示す。 なお、供試体への噴射開始から鋼製モールドから充填材が完全に剥がれるまでの時間を切削時 間とした。表 4.4.5-2 の結果等より、ウォータージェットによるベントナイト系材料の除去に おいては、飽和度が高い条件が低い条件よりも切削時間を多く要した。

表	4.4.5-2 切削	試験結果の一	例(粉体ベント	ナイト供試体)	
	飽和度	含水比	乾燥密度	切削時間	
	(%)	(%)	$(Mg/m^3)$	(秒)	
			1.46	18	
	45	15	1.45	24	
			1.45	31	
			1.39	48	
	95	35	1.37	38	
			1.40	39	

### 3) PEM への影響の有無

要素試験後の鋼製容器を目視確認した結果、直射ノズルの噴射による底板、側部の損傷は認 められなかった。今回の噴射条件である 20MPa での充填材の除去では、PEM 鋼殻へ与える影 響は少ないと判断できた。

4) コンクリート面への影響の有無

PEM と坑道との間の充填材をウォータージェットで切削する場合、コンクリート坑道、特に 回収作業に使用するエアベアリング方式の装置が走行するコンクリート面の表面性状に影響を 与える可能性がある。そこで、コンクリート面への影響を確認するため、柱状供試体側面への 噴射試験を行った(図 4.4.5-4)。用いた供試体は幌延 URL の試験坑道 2 に整備した組立台と 同じ配合のコンクリートで製作した。

図 4.4.5-4に切削前後のコンクリート供試体の表面写真を示す。直射ノズル(噴射圧20MPa) を1分間、直接噴射した場合に、コンクリート表面のセメント成分が抜け、細骨材が剥き出し の状態となったが、明確な亀裂等は生じることは無かった。同様の条件で扇形ノズルを用いた 場合は、若干のセメント成分の抜けを確認したが、直射ノズルと比較すると、抜けの程度は小 さい結果となった。



図 4.4.5-4 コンクリート面への影響確認

上記の通り、噴射圧 20MPa とした場合、ノズルの種類によりコンクリート表面状態に若干 の違いが生じるものも、明確な亀裂等は確認できないことから、今回の噴射条件である 20 MPa での充填材の除去では、コンクリート面へ与える影響は少ないと判断できた。

(5) 地上予備試験 まとめ

流体的除去技術 ウォータージェット方式によるベントナイト系材料に対する予備試験を実 施し、以下の点を把握・確認した。

- ・直射ノズル先端と供試体の距離を 30cm とした場合に 20MPa の噴射圧の除去では、乾燥密 度 1.37Mg/m<sup>3</sup>程度のベントナイト系材料に対し、切削(ほぐし)は容易に可能となる
- ・ベントナイト系材料の飽和度とウォータージェットによる切削速度との関係として、飽和度が高い条件の場合に、低い条件よりも切削時間を要する
- ・20MPaの噴射圧において、PEM 鋼殻へ与える影響は少ない
- ・20MPaの噴射圧において、コンクリート面へ与える影響として、若干のセメント成分の抜けが生じるものの、明確な亀裂等生じず、回収作業に使用するエアベアリング方式の装置が走行するコンクリート面への影響は少ない

4.4.6 地上要素試験

流体的除去技術 ウォータージェット方式におけるベントナイト系材料の除去について、奥行 き方向の切削能力や切削状況を確認した。併せて、ほぐした充填材(副産物)の撤去技術の検 討として、2週類の吸引装置(ダイヤフラムポンプ、強力吸引車)を用いて、連続的な副産物の 撤去に関する予備試験を実施した。

(1) 除去対象とした供試体

試験で除去対象とした供試体は、上部開放部に充填するベントナイト混合土、下部狭隘部に 充填するベントナイトペレットを使用した。アクリル製モールドを使用し、供試体の寸法は、 直径 150mm×長さ 1000mm とした(図 4.4.6-1)。



図 4.4.6-1 製作した供試体

(2) 使用機械

使用機械一覧を表 4.4.6-1 に示しす。使用機械のうち、強力吸引車、ダイヤフラムポンプの 外観を図 4.4.6-2 に示す。

項目	用途・仕様			
高圧水発生装置	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 45m <sup>3</sup> /min、真空度:-96kPa (-720mmHg)			
ダイアフラムポンプ	吸引口径2インチ(約50mm)			

表 4.4.6-1 使用機械一覧



図 4.4.6-2 吸引・撤去に係る使用機械

(3) 噴射方法

直射ノズル先端と供試体の距離は 1cm、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、噴射圧は、予備試験で決定した 20MPa とした。

- (4) 試験結果
  - 1) 奥行方向に対する切削能力

ベントナイト供試体とノズルをそれぞれの架台に固定し、一定時間ごとの切削距離を計測した。なお、切削距離は、供試体に水が浸透した(亀裂が入った)距離を目視で確認した。

図 4.4.6-3 に供試体の設置状況、表 4.4.6-2、図 4.4.6-4 に試験結果を示す。



図 4.4.6-3 供試体の設置状況

充填物 (除去対象物)	乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	<mark>飽</mark> 和度 (%)	ノズル 距離 (cm)	経過時間(秒)		
				5	10	20
				切削距離 (cm)		
ベントナイトペレット	1.37	30	1	100	1.	10-00
ベントナイト混合土 (ベントナイト:ケイ砂 =50%:50%)	1.60	95	1	11.5	15	27
		95	1	15	21	27
		60	1	32	32	50

表 4.4.6-2 奥行方向に対する切削能力の試験結果



除去対象をベントナイトペレットとした場合は、飽和度および乾燥密度が低いことから、ウ オータージェットの水が一気に供試体の奥まで走り、亀裂が入った。高圧噴射後、20秒後には
供試体の奥が高圧水で洗い出されるような状態となった。除去対象をベントナイト混合土とした場合は、飽和度が低い条件ほど、単位時間当たりの切削距離が長いことを確認した。

2) 除去対象物を試験条件とした切削速度と使用水量等

直射ノズル (噴射圧 20MPa、水道水、ノズル流量 54L/min) と供試体面との距離 1cm とし、 供試体全体の切削時間 (供試体中の充填物を外に出す時間)、切削時の除去物の排出状況、使用 水量を確認した。試験の説明図を図 4.4.6-5 に、試験結果を表 4.4.6-3 に示す。

試験の結果、乾燥密度および飽和度が高い条件では切削しにくく(切削時間が長く)、低い条件では切削しやすい(切削時間が短い)傾向を確認した。



図 4.4.6-5 試験説明図

充填物 (除去対象物)	乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	含水比 (%)	飽和度 (%)	経過 (利	時間 少)	使用 (1	水量 _)	備考
ベントナイト ペレット	1.37	7~9	30	46	43	41	39	下部狭隘部 を想定
ベントナイト混合土	1.60	25	95	19	90	17	72	上部開放部
=50% : 50%)	1.00	16	60~70	77	84	70	76	を想定

表 4.4.6-3 切削試験結果一覧

#### 3) 副産物の撤去の可否

高圧水による切削後の副産物の回収を、強力吸引車およびエアー式ダイアフラムポンプを用いて行った。ダイアフラムポンプのホース径は2インチ、強力吸引車は3インチを使用した。 副産物の撤去の様子を図 4.4.6-6 に示す。



図 4.4.6-6 高圧水での切削(ほぐし)後の副産物の撤去状況

試験の結果、高圧水でほぐした副産物の撤去について、ダイアフラムポンプでは固形物を吸い込むには吸引力が弱く使用不可と判断し、強力吸引装置を採用することとした。

強力吸引車による撤去は、吸引ホースの径である3インチよりも小さく切削(ほぐす)こと で、連続的に吸引除去が可能であることを確認した。

(5) 地上要素試験 まとめ

流体的除去技術 ウォータージェット方式によるベントナイト系材料に対する要素試験を実 施し、以下の点を把握・確認した。

- ・ φ 150mm、L=1.0mの円筒形の供試体内に充填したベントナイト系材料について、1条の直 射ノズル(噴射圧20MPa)で充填物の除去が可能であることを確認し、下部狭隘部(幅110mm) においても、同様の方法で、隙間充填材(ベントナイトペレット)の切削(ほぐし)が可能 となる見通しを得た
- ・ 強力吸引車による副産物の吸引・撤去を採用することで、吸引ホースの径(3 インチ)より も小さく切削(ほぐす)ことで、連続的に吸引除去が可能であることを確認した

4.4.7 地上試験

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 4.4.7-1)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を実施した。

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



図 4.4.7-1 地上試験ヤード

(1) 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<sup>3</sup>となるように所定の隙間に充填した(図 4.4.7-2)。 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<sup>3</sup>、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 4.4.7-2 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) 使用機械
  - 1) 製作した流体的除去装置

地上試験では、地下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 4.4.7-3 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う機械である。なお、PEM 奥行方向ヘノズルの動き 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。流体的除去装置に関する 各部名称等の説明図を図 4.4.7-4 に、仕様を表 4.4.7-1 に示す。



図 4.4.7-3 流体的除去装置の基本動作 説明図



図 4.4.7-4 流体的除去装置の各部名称等 説明図

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

表 4.4.7-1 除去装置の仕様

## 2) 除去装置に取付け使用するノズル

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 4.4.7-5 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 20MPa 時の使用水量」、「坑道面への影響」について、地上 試験にて調査した結果を併せて示す。なお、高圧水発生装置、強力吸引車など、その他の使用 機械は、地上要素試験と同様の機械を使用した。

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					1
噴射 形態	$\square \longrightarrow$			$\mathbf{\mathbf{\mathbf{A}}}$	$\mathbf{X}$
切削 断面	•	$\bigcirc$		後 前 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	前 () () () () () () () () () () () () ()
切削 軌跡	<b></b>			後 前	後 前
<sup>(20MPa時)</sup> 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 噴射圧 20M	ウォータージェッ IPa まで坑道面を	ト噴射の場合 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 4.4.7-5 各ノズルの特徴等 一覧

(3) 資機材の配置

地上試験における資機材の配置図を図 4.4.7-6 に示す。



図 4.4.7-6 地上試験時の資機材配置図の全体平面図

(4) 試験結果

1) ノズルの種類と切削性・掻き出し性の確認

図 4.4.7-5 に示したノズルの種類(配管清掃用①は除く)を対象に、各々ノズルの切削性お 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、噴射圧は坑道面を傷つ けない噴射圧を事前に調査し、20MPa とした。表 4.4.7-2 に示した結果より、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。

	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	$\longrightarrow$			
切削 軌跡			-	# <b></b>
状況 写真				
離隔	5em	40cm	30cm	a na manana an <del>San S</del> anawana ya mwaka
切削性	<ul> <li>対象物を線状に切削</li> <li>奥行き方向に穿孔</li> <li>円弧運動では、切削・</li> <li>解砕は困難</li> </ul>	<ul> <li>対象物を面状に切削</li> <li>離隔の調整により、</li> <li>切削幅の調整可能</li> <li>切削性は十分</li> </ul>	<ul> <li>・離隔の調整により、</li> <li>切削幅の調整可能</li> <li>・水圧が分散し切削性</li> <li>は弱い</li> </ul>	・ 切削性を有さない
掻き出し 性	・なし	<ul> <li>手前へやや掻き出されるが、掻き出し性はなし</li> </ul>	<ul> <li>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</li> </ul>	<ul> <li>前方噴射の加水効果</li> <li>に加え、後方噴射で</li> <li>掻き出し性が高い</li> </ul>
評価	<ul> <li>・ 今回の実証試験で</li> <li>は、使用せず</li> </ul>	<ul> <li>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</li> </ul>	<ul> <li>・ 今回の実証試験で</li> <li>は、使用せず</li> </ul>	<ul> <li>「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</li> </ul>

表 4.4.7-2 ノズルの種類と切削性・掻き出し性

#### 2) 流体的除去手順の構築

図 4.4.7-4 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 4.4.7-3)。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ノズルである。

	17秒/往復(上止2秒、下止3秒)	6 秒/片道
円弧方向の	【円弧状の動き:往復】	【円弧上の動き:片道】
ノズル移動速度	+ + + + + + + + + + + + + + + + + + +	+ + + + + + + + + + + + + + + + + + +

表 4.4.7-3 除去装置の円弧状移動速度

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(表 4.4.7-4)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。

トルネードノズル の前進速度	1分間当たり の加水量	<ol> <li>1分間前進当たりの除</li> <li>去対象物のうち、</li> <li>土(粘土)重量</li> </ol>	<ol> <li>1分間前進当たりの除去対象物の うち、水重量</li> </ol>	1分間 前進当たりの加水量 を考慮した除去対象物の 含水比
5cm/min	30L	6,307g	505g	484%
10cm/min	(30,000g)	12,614g	1,010g	246%
備考	図 4.4.7-5	断面積 <sup>※1</sup> ×前進速度×乾 燥密度 <sup>※2</sup>	土(粘土)重量 ×初期含水比 <sup>※3</sup>	416%; ベントナイト (クニゲル V1)の液性限界

表 4.4.7-4 トルネードノズルの前進速度における充填材の含水比の試算

※1;下部狭隘部の片側断面積 1,060cm<sup>2</sup>、※2;充填材の乾燥密度 1.19g/cm<sup>3</sup>、※3;充填材の初期含水比 8%

上記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。

また、除去開始時(ノズル前進前)における除去対象物への十分な流動化のため、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であ 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 4.4.7-7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。

これらの試験から、決定した流体的除去手順を図 4.4.7-8 に示す。



図 4.4.7-7 半 PEM 最奥部の除去状況



図 4.4.7-8 流体的除去手順

(5) 地上試験 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、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。

- ・コンクリート(モルタル)坑道面に対し、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。
- ノズルの種類による除去対象物への切削性・掻き出し性を確認し、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選定、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 ルを採用した。
- ・選定したノズル、製作した除去装置を用いた除去試験を複数回実施し、下部狭隘部を対象と した流体的除去手順として、以下を構築した。
- ・トルネードノズルによる除去で、「回収作業のため PEM を拘束する隙間充填材との縁切り」 が完了、配管清掃用ノズルの2 往復による除去で、「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」が完了となることを確認した(図 4.4.7-8)。
- ・上記手順の構築にともない、ベントナイト(クニゲル V1)の液性限界に着目した試験を行い、バキュームによる連続的な吸引捕集が可能となるノズル前進速度を確認・設定した。
- ・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(2時間45分程度)で あり、使用水量は約9000L(約9m<sup>3</sup>)であった。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時間程度となる見込みを得た。

4.4.8 地下での実証試験

(1) 試験概要

ウォータージェット方式の流体的除去装置を使用し、図 4.3.1-1 の赤色部で示した下部狭隘 部の隙間充填材(ベントナイトペレット)に対し、「模擬 PEM と隙間充填材との縁切り」およ び「PEM の回収装置が要求する動作環境の実現」を目的とした地下実証試験を実施した。

下部狭隘部の隙間充填材の除去は、地上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、除去に係る作業時間の再現性等 を確認した。

また、機械的除去後に残された模擬 PEM 周囲 300mm 以内の PEM 近傍部の隙間充填材(ベントナイト混合土、図 4.3.1-1 の黄色部)を対象に、ウォータージェット方式の除去装置による除去を試行し、開放空間に残置した隙間充填材への技術の適用性等を確認した。



図 4.4.8-1 地下実証試験における除去対象箇所 試験坑道 2 断面図

(2) 除去対象物

除去対象物となる隙間充填材を下部狭隘部と上部開放部に分けて、以下に記載する。

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したベントナイトペレット (充填時の目標乾燥密度 1.37Mg/m<sup>3</sup>、設定含水比 6.5%)である。

上部開放部の隙間充填材は、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/m<sup>3</sup>、設定含水比15.8%)である。

(3) 流体的除去装置の施工条件の設定

ウォータージェット方式の流体的除去装置に関する施工条件の設定(除去装置の運転条件・ 方法)は、地上試験で決定した設定と同一とした(図 4.4.7-8)。

(4) 流体的除去装置の配置

地下実証試験における流体的除去装置の配置平面図を図 4.4.8-2 に、写真を図 4.4.8-3 に示 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 試験坑道 2 周囲に設置して 除去試験を実施した。なお、吸引方式により撤去・回収した副産物は、フレコンに一時的に保 管して固液分離し、分離した副産物はフレコンで地上へ運搬した。



図 4.4.8-2 機械的除去装置の配置平面図





強力吸引装置 □ 4 4 8 - 5



図 4.4.8-3 地下実証試験 流体的除去装置

- (5) 地下実証試験結果(下部狭隘部)
  - 1) 除去の程度

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状況を図 4.4.8-4 に示し、除去手順 毎の除去程度を図 4.4.8-5 に示す。



試験開始前





配管清掃用ノズルによる除去 +真空吸引

図 4.4.8-4 地下実証試験 流体的除去の試験状況

+真空吸引



図 4.4.8-5 地下実証試験 流体的除去 除去手順毎の除去程度

除去手順毎の除去の程度は、地上試験とほぼ同程度となり、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を完了し、配管清掃用ノズルによる除去を2回目完了時に、 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 4.4.8-6 に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 状況写真を比較して記載する。写真は、除去の完了後に、下部狭隘部と上部開放部の境界に設 置している鉄板を外して撮影したものでる。

	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				
270~300cm	and the second	ubuiushujunhuinnhuinnhuin		
240~270cm				
210~240cm				₽ E S /
180~210cm		yhuituu huitun huitun huitu		
150~180cm				
120~150cm		whyimin and when the second		<mark>'s 7 c 2</mark>
90~120cm				
60~90cm				<u>e s r a</u> mantantantantantantantantan
30~60cm				a s t c
0~30cm PEM 手前端				EZI

図 4.4.8-6 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) 除去の作業時間、施工速度

地下実証試験において、下部狭隘部の隙間充填材(片側)の除去に要した時間は、2時間43 分であり、地上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。

なお、上記の除去時間には、段取り替え(ノズル交換等)は含まないことに留意されたい。 この段取り替えに合計で約1時間を要したため、下部狭隘部片側の除去の施工時間(除去時間 +段取り替え時間)は合計で3時間41分となった。下部狭隘部片側の除去(充填)容積は0.36m<sup>3</sup>、 除去(充填)重量は、0.54Mgであることから、ウォータージェット方式による流体的除去の除 去速度は、0.13m<sup>3</sup>/hr(0.20Mg/hr)、施工速度は、0.1m<sup>3</sup>/hr(0.15Mg/hr)となった(表 4.4.8-1)。



図 4.4.8-7 下部狭隘部の隙間充填材(片側)の除去時間 サイクルタイム

除去容積	除去重量	除去時間	施工時間
$0.36 \mathrm{m}^3$	$0.54 \mathrm{Mg}$	2.72 hr	3.68 hr
除去	速度※	施工速	速度※
0.13 m <sup>3</sup> / hr	0.20 Mg/ hr	0.10 m <sup>3</sup> / hr	0.15 t/ hr
備考 ※除去速度は除: 速度は、除去 除した値であっ	・ 去容積(重量)を腐 容積(重量)を施工 る。	会時間で除した値	īであり、施工 段取り替え)て

表 4.4.8-1 流体的除去技術 ウォータージェット方式 除去速度、施工速度

## (6) 地下実証試験結果(上部開放部)

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 4.4.8-8)。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。



(7) 地下実証試験 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。

## 4.5 実証試験成果を踏まえた技術の拡張・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。

○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。

5章に後述するが、本研究で採用したエアベアリング方式による PEM の定置・回収装置の地上 試験において、装置の走行面に充填材の除去残留物が多少ある場合においても、PEM の回収が可 能となる見込みを得ている。一方で、流体的除去技術は作業時間、作業回数を増やす(例えば、 配管清掃用ノズルによる除去の回数を増やすなど)ことで、走行面の除去の程度をより良く(除 去の残留物を低減)することが可能である。

よって、今後の「PEM 回収の実現性の向上」への取り組みについては、「除去技術」による走 行面の状態(除去の程度)と「回収技術(装置)」が必要とする走行面の状態、の適合が重要とな り、両技術を拡張・展開していくことで、「PEM 回収の実現性」をより確実なものとすると考え らえる。

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。

4.6 隙間充填材除去技術の実証的整備 まとめ

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 近傍の隙間充填材の除去には流体的除去技術で あるウォータージェット方式、PEM から離れた部分の除去に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段階的に進めた。

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。一方、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 オーガ方式、流体的除去技術 ウォータージェット方式を用いて、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、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)を通じ、各技術の適用範囲や性能レベルを確認した。

また、地下での実証試験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踏 まえ、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)に対し、今 後の技術の拡張・展開の可能性等を整理した。

#### 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 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.
- [2] 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.
- [3] 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)、NUMO-TR-18-03,2018.
- [4] Techniques for freeing deposited canisters, SKB, TR-00-15, June, 2000.
- [5] 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)-遠隔操作技術高度化開発-(2/2), 2008.
- [6] 国立研究開発法人土木研究所:盛土施工の効率化と品質管理向上技術に 関する研究、盛 土施工の効率化と品質管理向上技術に関する研究、2009~2011
- [7] 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.

# 第5章 搬送定置・回収技術の実証的整備

5.1 搬送定置・回収技術の研究概要

本事業における搬送定置・回収技術の実証的整備は、横置き・PEM 方式を対象とした PEM の搬送定置・回収を地下環境で実証することを目的とする。そこで、幌延 URL の地下 350m に ある試験坑道 2 において、横置き・PEM 方式の搬送定置・回収技術に係る実証試験を、エアベ アリング方式の定置・回収装置により実施した。本実証的整備を通して定置・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し、エアベアリング方式の定置・回収装置の実機 に向けた研究課題と将来拡張性を示す。

- 5.2 搬送定置・回収技術の研究アプローチ
- 5.2.1 PEM の定置技術(回収技術)

2章で述べたように、エアベアリング方式の搬送・定置技術(図 5.2.1-1 を参照)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 5.2.1-2 を参照)を整備する方針とした。

本方針を基に、5.2.2 に「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)」、5.2.3 に「本事業における課題設定と開発整備方針」を記載する。



図 5.2.1-1 PEM の搬送・定置技術



図 5.2.1-2 PEM の回収技術(定置の逆動線)

- 5.2.2 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

対象とする処分坑道は水平坑道で、搬送対象となる PEM は数十トンの大重量物である。 重量物を水平に搬送させる動作は、搬送対象物を上昇させ、その状態で搬送し、目的の場所 に到着したら下降させることとなる。よって、PEM の定置・回収装置は、PEM を把持する ために上昇し、把持した状態を維持し、その状態で走行し、PEM を下ろすという一連の動 作ができる必要があり、昇降機能及び走行機能を要する。ここで、定置・回収装置の昇降及 び走行について、代表的な方式を表 5.2.2-1 及び表 5.2.2-2 に整理する。

② PEM 外径と同程度の円形小断面の坑道に適用できる

処分坑道の断面形状は、PEM 径と同程度の円形小断面とすることで、処分坑道に掛かる 掘削量を最小にできる。また、走行面が平面よりも円形の方が、搬送定置・回収技術に対 する難易度が高いことから、本技術を整備することで、様々な処分坑道の形状に適用でき ると考えられる。また、定置後の PEM への影響を考慮して、残置物が無い方法とする。

③ 遠隔で操作できる

装置を遠隔で操作するためには、装置(定置・回収装置)、搬送路(処分坑道)及び搬送 対象物(PEM)の状態を常に監視し、所定の動作を確実に実施したことを確認する必要が ある。また、放射線及び高温環境下により人が立ち入れないことを想定し、装置の異常時 に必要に応じて補修・交換できる場所へ移動させる動作(以後「救援」という。)は確実に 実施できる必要がある。そこで、PEM 上昇時に異常状態となった時を想定し、安全に PEM を下降させ、PEM 荷重から定置・回収装置を解放できる方法とする。

表 5.2.2-1 搬送定置・回収技術の昇降方式

項目	方法等	機構等	説明
PEM の 世手	面接触	弾性体 (ゴム等)	接触面積が大きくなり、接触圧力が低くなる。 坑道の形状精度や強度等について、自由度が増す。
何里 支持	線/ 点接触	剛体 (鉄等)	接触面積が小さくなり、接触圧力が高くなる。 坑道の形状精度や強度等について、要検討。
	吊上げ	ロープ、チェーン等	クレーン、エレベータ、ケーブルカー等。 上方に高強度部材が必要なため、広い空間が必要。
	吊上げ (把持部)	機械式 (ツイストロック、かご 等)	把持部の位置・形状等を要検討。 上方に高強度部材が必要なため、広い空間が必要。
	吊上げ (把持部)	吸引式	電源喪失時の落下防止を要検討。 上方に高強度部材が必要なため、広い空間が必要。
	吊上げ (把持部)	磁気式	電源喪失時の落下防止を要検討。 上方に高強度部材が必要なため、広い空間が必要。
PEM の 上昇	押上げ	機械式 (ボールねじ等)	荷重伝達経路及び荷重バランスを要検討。 下方に高強度部材が必要なため、比較的広い空間が 必要。
	押上げ	油圧機器 (フォーク、ジャッキ等)	荷重伝達経路及び荷重バランスを要検討。 下方に高強度部材が必要なため、比較的広い空間が 必要。
	押上げ	水圧機器 (ウォータベアリング等)	荷重の直下で支持可能なため、狭い空間に適用可 能。 荷重支持面の性状の考慮が必要。水循環装置が必 要。
	押上げ	空圧機器 (ェアベアリング、 ホバークラフト等) (※)	荷重の直下で支持可能なため、狭い空間に適用可 能。 荷重支持面の性状の考慮が必要。
	重力	_	下降の原動力となる。
PEM の	制動 (熱)	機械式ブレーキ等	運動エネルキ <sup>*</sup> ーをブレーキの摩擦熱等の 熱エネルキ <sup>*</sup> ーに変換して制動。
下降	制動 (電気)	発電ブレーキ、 回生ブレーキ等	運動エネルギーを電気エネルギーに変換して制動。
	制動 (流体)	空力ブレーキ等	流体抵抗を利用して制動。

注記:本表は、搬送・定置設備の技術オプションシート[3]を基に作成

※:エアベアリングは、走行面との間に形成させる空気膜が 0.1 mm 程度と非常に薄く、 若干の摩擦抵抗が生じる。一方、ホバークラフト(一般名称:エアクッション艇)は、 走行面から完全に浮上させるため、摩擦抵抗が生じないがエネルギー効率は悪い。

		采 0.2.2 Z	戚赵龙道 西极政府少龙门为武
項目	方法等	機構等	説明
	重力	そり、ココ等	摩擦抵抗以上の斜角が必要となる。 摩擦低減機構は残置物(PEM 付帯)となる。
	摩擦	タイヤ、クローラ等	走行面と荷重に適した効率の良い機構を選定可能。
	噛み合せ	ギヤ、ねじ等	ラックギヤ、コンベア、ボールねじ等が残置物となる。
	素可	ローフ°、チェーン	定置時:搬送方向奥側に定滑車の設置等、検討が必 要。
推進 力	傘り  推進	等	回収時:牽引ロープと把持部との取合等、検討が必要。
	押込み	油圧ジャッキ、 テレスコ等	搬送距離が限定される。起点の固定について要検討。
	流体 (水流)	プロペラ等	装置が大規模となる。周囲を水没させる必要がある。
	流体 (空気流)	ジェット、 プロペラ等	装置が大規模となる。
	流体 (水圧/空 圧)	カプセル輸送管 等	輸送管が残置物となる。
	ガイド無	操舵	操舵不全となった場合、救援が困難。
走行 方向	が小有	レール、 案内軌条等	レール、案内軌条等が残置物となる。
	が小有	坑道設置物	台座をガイドとして利用する。 (坑道側壁をガイドとする考え方もある。)

表 5.2.2-2 搬送定置・回収技術の走行方式

注記:本表は、搬送・定置設備の技術オプションシート[3]を基に作成

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 5.2.2-1 に示す([1]を参照)。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。また、エアベアリング方式は表 5.2.2-1 に示すとおり、PEM の搬送定置技術として 次の特徴を有する。

- PEM 荷重を荷重支持面(坑道)に対して面接触で支持するため、接触面積が大きく接触 圧力が低くなり、坑道への負荷が小さい。
- ▶ PEM 荷重を直下で支持することで、装置を小型化でき、狭い円形小断面の処分坑道に適用可能である。
- 万が一、電源が喪失した場合でも、エアベアリング内部の空気が流れ出るまで時間が掛かるため、衝撃を伴うような落下はしない。
- これらの特徴を有するエアベアリング方式は既に実用化されている技術であり、一般産業に

おける大重量物の搬送方式として利用実績[1]を有する。また、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(プレキャスト)コンクリート 面において PEM の搬送が可能であることが試験により確認されている[2]。

一方で、不整地な設置面に対して、表面の凹凸や目地の大きさの程度によっては、必要な性能を発揮できず(突き抜ける隙間は無し、かつ段差は1mm以内)、ベアリングの設置面に上敷材の設置等の対策が必要となる。



図 5.2.2-1 エアベアリングの作動原理図

5.2.3 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。上記に示したとお り、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 5.2.3-1 参照)。

(a) 昇降機能、走行機能及び遠隔機能の実証

昇降機能、走行機能及び遠隔機能を実証できる装置とする。なお、実際の処分坑道を想 定した電源供給設備(バッテリー等)や救援動作については実証範囲外とする。また、耐 放射線性や耐熱性等の耐環境性についても実証範囲外とする。

(b) 定置動作の逆動作での回収動作の実施

PEM の回収技術として、これまで研究してきた搬送定置技術を適用させる。そこで、

PEM の回収及び定置動作は、装置を PEM 下まで走行させた後、装置を上昇させて PEM を把持し、上昇させた装置の浮上状態を維持しつつ走行することで PEM を搬送させ、所 定の場所で停止し、装置を下降させて PEM を定置する手順とする(図 5.2.3・1 参照)。 (c) PEM 径と同程度の円形小断面での走行

坑道直径 2600 mm (PEM 径 (Φ2316 mm) と PEM を定置する台座高さ (110 mm) に余裕を見込んだ径)に設置可能で、走行可能な装置とする。また、PEM 荷重を支持する 部位の高さは、台座高さ (110 mm) より低いものとする (表 5.2.3-2 参照)。

(d) PEM の投影面積範囲内のエアベアリング配置

現在、PEM の定置間隔は決定していないが、PEM の定置間隔を極力小さくすることは、 処分坑道の全長を短くでき、建設費を低減できることから、PEM(長さ 3343 mm)の投影 面積範囲内にエアベアリングを配置することで、PEM を定置する際に定置済みの PEM に 極力近接できるようにする。

(e) 台座の走行ガイドとしての利用

操舵機構を設けると操舵不全となった場合、救援が困難となるため、操舵機構を設けないこととする。よって、走行ガイドが必要となるが、レール等の残置物を残さないように、 台座を走行時のガイドに利用することとする(表 5.2.2-2 参照)。

(f) 検出器及びカメラの設置による遠隔操作の実現

上昇時、走行時、定置時のそれぞれにおいて、遠隔操作にて安全に運転できる装置とする。上昇時には装置の上昇及び PEM の把持について、走行時には走行面に障害物の無い こと及び装置状態に異常が無いことについて、定置時には装置の下降及び PEM の定置に ついて、それぞれ検出器及びカメラにより確認する。

(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)

試験坑道 2 の走行面の長さは 19.5 m であるため、走行ストロークを考慮して、装置長さ は 10 m 以内とし、幌延 URL に設置されている風門(幅 1800 mm×高さ 2050 mm)の範 囲内の寸法に分割でき、試験坑道 2 内に設置されている揚重設備の制約から 2 ton 未満に 分割できるものとする(表 5.2.3-2 参照)。

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

表 5.2.3-1 定置・回収装置の整備方針



図 5.2.3-1 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)

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	R1300 mm 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)

表 5.2.3-2 定置・回収装置の設計条件

(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 5.2.3-3 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研究課題について整理する。

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	残留充填材のある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

表 5.2.3-3 本事業における搬送定置・回収技術の整備計画

- 5.3 搬送定置・回収技術の研究詳細 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以下に示す。
- 5.3.1 定置・回収装置の設計・製作

前述の「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。

(1) 前提条件

定置・回収装置の設計・製作の前提条件を以下に示す。

1) PEM の仕様

搬送定置・回収対象物となる PEM の仕様は、2 章に示しとおり、既往検討で提示された鋼 殻リング方式を基とした。本事業での PEM の仕様を表 5.3.1・1 に、基とした鋼殻リング方式 PEM の内部構造と外形寸法を図 5.3.1・1 に示す。

項目	仕様
寸法 φ2316 mm×3343 mm	
重量	36.5 ton
重心	PEM 容器中心
容器材料	炭素鋼(※)
その他	オーバーパック、緩衝材等、内 部構造は模擬対象外とする。

表 5.3.1-1 本事業での PEM の仕様

※:容器は別事業からの貸与品のため、板厚は20mm



図 5.3.1-1 鋼殻リング方式 PEM の内部構造と外形寸法

## 2) 地下実証試験場所の制約条件

定置・回収装置の設計にあたり考慮した、地下実証試験場所である幌延 URL 試験坑道 2 の制約条件を表 5.3.1-2 に示す。また、試験坑道 2 の概略形状を図 5.3.1-2 に示す。

項目	制約条件	
試験坑道2	・長さ約 25 m、直径 φ 4000mm(内径)	
	・坑道下部に、幅 700 mm×高さ 110 mm の台座	
	(コンクリート製)を設置。	
	・資機材の一時仮置きは可。試験終了後は速やかに	
	地上へ搬出	
	・揚重:トロリー 2 ton×1 基 (2 ton×1 基の増設は可)	
地上から試験坑道2への搬入	・坑道最小断面:幅 1800 mm、高さ 2050 mm	
	・揚重 : トロリー 2 ton×2 基	
地下環境	・湿度 100%、温度 20℃	
火気制限	・内燃機関の使用不可	
	・バッテリー使用不可	
	・溶接機の使用不可	

表 5.3.1-2 地下実証試験場所の制約条件





図 5.3.1-2 試験坑道 2 外形図

(2) 要求機能及び要求性能

定置・回収装置に対する主な要求機能と要求性能を検討した結果を表 5.3.1-3 にまとめる。

要求機能		开去社会	
項目	内容	安水性能	
1. PEM 把持機能	台座上に定置された PEM を、定置・回収装置で搬送 可能な状態にできること	以下の寸法・重量の PEM を正常に把 持できること ・寸法 : φ2316 mm ×3343 mm ・重量 : 36.5 ton	
2. PEM 定置機能	PEM を把持状態で搬送し ながら、定置・回収装置で PEM を台座上に定置でき ること	PEM を以下の寸法の台座へ定置でき ること ・寸法 : 高さ 110 mm、幅 700 mm	
3. 走行機能	PEM を把持した状態及び 把持していない状態で前 進・後進・停止できること	定格速度: 5 m/min 実機で想定する巡行速度 (1 km/hr = 16.6 m/min) に対し、 始動後及び停止前の速度として 設定した。 停止精度: ±20 mm PEM 間の想定距離(100~150 mm)を考慮して設定した。	
4. 遠隔操作機能	遠隔で定置・回収装置を操 作できること	操作卓から遠隔で定置・回収装置を操 作できること	
5. 緊急停止機能	緊急時に定置・回収装置の 運転を停止できること	緊急停止ボタンにより緊急時に定置・ 回収装置の運転を停止できること	
6. 分割・組立機能	定置・回収装置の分割単位 で、試験坑道2までの地下 搬入路を通過でき、試験坑 道2内の揚重機で吊り上げ られる重量であること	<ul> <li>・分割単位寸法:地下搬入路最小断面 (幅 1800 mm、高さ 2050 mm) を通過可能</li> <li>・分割単位重量:2 ton 未満(吊具含む)</li> <li>・試験坑道 2 で再組立て可能</li> </ul>	
7. 姿勢調整機能	PEM を把持している時に 定置・回収装置が所定の浮 上量となるよう供給する 供給空気流量を調整可能 であること	エアベアリングに供給する供給空気 流量を調整し、定置・回収装置の4隅 の浮上量が 35 mm~45 mm である こと	

表 5.3.1-3 定置・回収装置に対する主な要求機能及び要求性能

(3) 定置・回収装置の設計

前述の「前提条件」及び「要求機能及び要求性能」を満足する定置・回収装置の設計を行 った。装置仕様を以下に示す。

1) 全体構成

定置・回収装置は、PEM を把持、浮上及び定置する「定置部」、定置・回収装置を前進・ 後進・停止させる「搬送部」、及び定置部と搬送部を遠隔操作するための「制御部」で構成さ れるものとした。

- 2) 定置部
- a エアベリング仕様・数量

定置部に適用するエアベアリングは、既往の研究[2]で横置き PEM 方式の搬送定置試験 に対して実績のあるエアベアリングと同じ仕様とした。通常のエアベアリングは平滑な走行 面において使用することを使用条件としているが、本事業における定置部に使用するエアベ アリングは、曲面形状の走行面に適用させることを考慮して、通常のエアベアリングを曲げ 加工している。参考に通常のエアベアリングの主要仕様をメーカ技術資料[1]から表 5.3.1-4 に示す。

また、エアベアリングの数量については、既往の研究[2]で基本とされた 10 枚(5 枚×2 列)とした。既往研究の坑道内径が φ 2560 mm に対し、本業務で想定する試験坑道 2 の内 径は φ 2600 mm と異なるが、内径が大きい方が浮上方向に対する力が大きいため、既往研 究で設定されたエアベアリングの仕様及び枚数を、本業務でも適用可能であると判断した。

項目	仕様
製作メーカ	AeroGo 社
型式	K21NHD (特殊品 curved type)
<u>→</u>	トーラスバッグ外径:φ533 mm
小 伝	厚さ:休止時 51 mm、作動時 82 mm
能力	7.3 ton
揚 程	31 mm
内圧	$0.41 \text{ MPa} (4.2 \text{ kg/cm}^2)$
空気消費量	$0.79$ Nm <sup>2</sup> /min ( $\aleph$ )
(供給空気流量)	0.72  INIII9/IIIIII (%)
自重	11 kg

表 5.3.1-4 エアベアリング主要仕様

※ Nm<sup>3</sup>/min:基準状態(温度0℃、絶対圧101.3 kPa[abs]、相対湿度0%)における流量(m<sup>3</sup>/min)

b 供給空気流量

PEMの把持・定置に必要となるエアベアリングへの供給空気流量については、表 5.3.1-4からエアベアリングを10枚使用する場合は7.2 Nm<sup>3</sup>/minと算出できる。しかし、 この供給空気流量は、平滑な平面に使用する場合の数値であり、曲面の場合やコンクリート のような凹凸のある面に対し、平滑平面よりも多くなると考えられ、既往の研究[2]を参照 して必要空気量を検討した。

既往の研究では、内径 \$ 2560 mm の模擬コンクリート坑道面上で 33.4 ton の PEM の搬送試験を実施しており、エアベアリングの枚数が 10 枚の時における搬送定置装置の浮上量と供給空気流量は図 5.3.1-3 の関係となった。本図から、表 5.3.1-3 に示す要求性能の 1 つである定置・回収装置の床面からの浮上量が 35 mm~45 mm を満足する供給空気流量を 12 Nm<sup>3</sup>/min と設定した。なお、この試験時の浮上量の計測では、図 5.3.1-4 に示すように定置部の四隅と坑道面の距離を計測し、この距離を浮上量としている。

以上に基づき、エアベアリングへ空気を供給するコンプレッサの選定では、供給空気流 量 12 Nm<sup>3</sup>/min に、メーカ技術資料[1]に従い安全率 1.5 を乗じ、18 Nm<sup>3</sup>/min を供給できる 仕様のものを選定することとした。



図 5.3.1-3 既往研究での浮上量と供給空気流量の関係[2] (図中「↑」は、流量を増加させても浮上量が増加しなかったことを示す。)



図 5.3.1-4 浮上量の計測位置

#### c 定置部の構成

定置部の構成は既往の研究と同様に、大重量物である PEM を把持・定置するためエアベ アリングを設置した定置部フレーム、及びそのフレーム上にエアベアリングに供給する空気 の圧力を調整するバルブユニットとなる。また、定置部フレームには、空気を供給していな い時の走行用に、床面に接地する走行車輪と PEM 搬送時に台座をガイドとするためのガイ ドローラを装備する。なお、エアベアリングに空気を供給するコンプレッサは、搬送部に設 置し、定置部を前進・後進・停止させる駆動機構も搬送部に設置することとした。

## d 定置部の基本仕様

以上の設計検討に基づき設定した定置部の基本仕様を表 5.3.1-5 に、外形図を図 5.3.1-5 に示す。

No.	項目	基本仕様	備考
1	駆動方式	(1) 走行駆動:駆動機能なし	
		(搬送部による押引により走行)	
		(2) 浮上駆動:エアベアリング	
		① 型式:AeroGo 社製 K21NHD	
		(特殊品 curved type)	
		② 使用数量:10枚	
		③ 消費空気量:12 Nm <sup>3</sup> /min	
2	走行速度	定格速度:5m/min	搬送部による押引にて走行
3	走行面材質	鋼鈑(坑道模擬架台)/コンクリート	
4	走行面仕上げ精度	継目段差:±1mm以内	
5	走行車輪	ウレタン車輪	無負荷時走行用
			コンクリート表面を傷め
			ない材質
6	ガイドローラ	ウレタン車輪	コンクリート表面を傷め
			ない材質
7	搬送部との連結	連結ピンによる連結	
8	駆動用エア	搬送部上に搭載するコンプレッサより	
		供給	

表 5.3.1-5 定置部の基本仕様





₽₽

<del>7</del>8

Í

<u>230 。</u> 背重負荷方向





同時第

ූ

5 - 15

#### 3) 搬送部

a 駆動機構

搬送部の駆動機構は、電動モータ(ブレーキ機能付き)を基本として検討した。既往研 究[3]での PEM 搭載時の押引に必要な力(押引力)から、モータ出力を 1.5 kW(下記の計 算を参照)とし、加速時に必要な力、走行面の状態が悪くなる場合(勾配・凹凸・段差等) や駆動に寄与する車輪数が減る場合を考慮し、1.5 kW×4 輪駆動とした。

<必要な駆動モータの出力(P)>

 $F_1 = F_0 × W_1 ∕ W_0 = 866(kgf) × \frac{36.5(ton)}{33.4(ton)} = 946 (kgf) ⇒ 1000 (kgf) と ⇒ 3$ 

Fo: 既往研究での PEM 搭載時の押引力: 866 (kgf)

W<sub>0</sub>:既往研究での PEM 重量: 33.4 (ton)

W1:本研究の PEM 重量: 36.5 (ton)

<搬送部を動かすために必要な力(F2)>

 $F_2 = W_2 \times \mu = 6000 \text{ (kgf)} \times 0.03 = 180 \text{ (kgf)}$ 

W2:搬送部重量:6000(kgf)(設計重量 4960(kgf)から安全側に設定)

μ:走行車輪(ウレタン)の転がり摩擦抵抗:0.03(安全側に設定)

b 搬送部の構成

搬送部は、定置・回収装置を前進・後進・停止させる装置であり、搬送部フレーム上に 電動機(モータ)付き走行駆動ユニットを設置した駆動機構を有するものとした。地下処分 坑道内での故障時において搬送部を周回坑道に引き込む際に、モータのブレーキを開放する 必要があるが、搬送部と地下処分坑道間のクリアランスが小さく前方側モータへのアクセス が困難であることから、ブレーキ機能は後方部モータのみに付加することとした。

エアベアリングに空気を供給するコンプレッサは、搬送部フレーム上にコンプレッサを 設置することとした。以下に示すコンプレッサの主要仕様を基本として検討し、コンプレッ サの台数を3台と設定した。

・吐出圧力: 0.60~0.85 MPa

・吐出空気量: 6.05~6.95 Nm<sup>3</sup>/min

・メインモータ出力: 37 kW型

コンプレッサを搭載した搬送部と定置部は連結されていることから、固定配管・ホース 類からエアベアリングに空気を供給できるため、PEM 搬送時の供給空気用ホースの取り回 しは不要である。同様にケーブルの取り回しを簡素化するため、制御盤は搬送部フレーム上 に搭載することとした。搬送部フレームには、定置部と同様に PEM 搬送時に台座をガイド とするためのガイドローラを装備することとした。

c 搬送部の基本仕様

以上の検討に基づき設定した搬送部の基本仕様を表 5.3.1-6 に、外形図を図 5.3.1-6 に示 す。

No.	項目	基本仕様	備考
1	駆動方式	<ul> <li>・走行駆動:電動モータ 4 台</li> <li>・モータ出力: 1.5 kW</li> <li>(後部モータのみブレーキ機能付き)</li> <li>・浮上駆動:浮上機能なし</li> </ul>	
2	搭載品	コンプレッサ ・吐出圧力:0.60~0.85 MPa ・吐出空気量:6.05~6.95 Nm <sup>3</sup> /min ・メインモータ出力:37 kW ・使用台数:3 台	
3	走行速度	定格速度:5 m/min	
4	走行面材質	鋼鈑(坑道模擬架台)/コンクリート	
5	走行面仕上げ精度	継目段差: ±1 mm 以内	
6	走行車輪	ウレタン車輪	コンクリート表面を 傷めない材質
7	ガイドローラ	ウレタン車輪	コンクリート表面を 傷めない材質
8	定置部との連結	連結ピンによる連結	

表 5.3.1-6 搬送部の基本仕様






4) 制御部

a システム構成

制御部は、主に「制御盤」、「操作卓」及び「電源供給設備」で構成する。制御盤は、操 作卓からの指示により、定置部上のバルブユニットの弁の開閉、搬送部上の走行駆動ユニッ トやコンプレッサの動作等を制御する。操作卓は、定置・回収装置の操作を行うための機器 で、定置・回収装置上や床面に設置する監視カメラの映像を監視できるモニタも設置する。 電源供給設備は、定置・回収装置の運転に必要となる電気を供給する設備であり、定置・回 収装置までの動力・制御・通信ケーブルは、キャプタイヤケーブルとし、カーテンケーブル 方式で配線する。

上記の構成に基づく制御部のシステム構成図を図 5.3.1-7 に示す。



図 5.3.1-7 制御部 システム構成図

#### b 制御盤

制御盤では、図 5.3.1-7 に基づき、操作卓からの指示により主に以下の項目について制御する。

- ・ 定置部上のバルブユニットの弁の開閉
- ・ 搬送部上の走行駆動ユニット (ブレーキ付電動モータ等)の動作
- コンプレッサの動作
- · 空荷前進/後進
- ・ PEM 浮上/着床
- · 在荷前進/後進

また、電源供給設備から制御盤へ一度給電された後、定置部・搬送部に搭載される電気品 (電動モータ、コンプレッサ等)へ給電されることから主幹ブレーカを有するものとした。

c 操作卓

操作卓は、定置・回収装置の操作を行うための機器で、定置・回収装置上や床面に設置す る監視カメラの映像を監視できるモニタも設置する。

d 供給電源

供給電源については、幌延 URL 試験坑道 2 と同じ条件とするため、3 相 AC 200V、50 Hz を基本条件とした。また、必要となる電源設備容量は、コンプレッサや電動モータ、センサー類の合計で 240 kVA と設定した。

e 制御部の基本仕様

以上の設計検討に基づき設定した制御部の基本仕様を表 5.3.1-7 に示す。

No.	項目	基本仕様	備考
1	操作卓	タッチパネルによる操作。 「ON/OFF」、「浮上/着床」、「前 進/後進」、「低速/高速」	高速:5 m/min 低速:1 m/min (定置精度の向上のために、 停止前に低速へと減速する)
2	給電方式	試験工場分電盤より給電。 3 相 AC 200V、50 Hz	幌延 URL 試験坑道2 での実証試験時 は、坑道内分電盤より給電

表 5.3.1-7 制御部の基本仕様

## f 安全対策

横置き PEM 方式の搬送定置・回収作業を想定し、以下の項目を安全対策として抽出した。

- · 障害物検知
- 監視カメラ
- · 緊急停止
- オーバーラン防止
- **PEM** の引きずり防止
- 衝突防止
- 回転部への誤接触防止

上記の安全対策項目に対し、定置・回収装置の具体的な安全対策を表 5.3.1-8 に、装置に 設置するカメラ及び検出器を図 5.3.1-8 に示す。

項目	安全対策
障害物検知	進行方向前方の障害物を監視カメラにより検知して、手動操作により停止させる。
監視カメラ	監視カメラを設置し、稼働中の状態を操作者が目視確認できる。
緊急停止	操作卓に緊急停止ボタンを設置し、緊急時に運転を停止させる。
PEM の引きずり防止	<ul> <li>・ 浮上量検出器により設定値以下の浮上量で走行を停止させる。</li> <li>・ 牽引力検出器により設定値以上の押引力で走行を停止させる。</li> </ul>
衝突防止	<前方距離検出器により障害物との接近距離を検出し、自動的に 走行を停止させる。 <ul> <li>カメラ映像により監視する。</li> <li>後方距離検出器により障害物との接近距離を検出し、自動的に 走行を停止させる。</li> <li>カメラ映像により監視する。</li> <li>PEM 回収時&gt;</li> <li>PEM 検出器により PEM と定置部との接近距離を検出し、自 動的に走行を停止させる。</li> <li>カメラ映像により監視する。</li> </ul>
回転部への誤接触防止	搬送部の回転部にカバーを設置する。

表 5.3.1-8 定置・回収装置の安全対策

● カメラ(ライト付)

No.	名称	個数	機能
Α	前方確認カメラ1	1	
В	前方確認カメラ2	1	正行面、音座上の確認
С	中腹カメラ(上)	1	PEMと坑道の接触確認
D	中腹カメラ(下)	1	エアベアリング部のPEM接地面の確認
Е	後方確認カメラ1	1	
F	後方確認カメラ2	1	正行面、音座上の確認
G	全体監視カメラ	1	定置装置を後方から俯瞰的に確認(試験用)

● 検出器

<b>-</b> 12	ᅕᄪᅋ		
No.	名称	個数	機能
1	浮上量検出器1	1	
2	浮上量検出器2	1	た送売からの巡上号を拾山
3	浮上量検出器3	1	川辺面からの冷工里を快山
4	浮上量検出器4	1	
5	PEM検出器1	1	DEMの押持位業を検出
6	PEM検出器2	1	PEMの指行位置を検出
$\overline{\mathcal{O}}$	前方検出器1	1	
8	前方検出器2	1	前方(壁面、PEM)との距離を検出
9	後方検出器1	1	後士店止 <b>位罢</b> 去检山
10	後方検出器2	1	後万停止位置を快出
1	在荷検出器1	1	DEM把持定能力按出
(12)	在荷検出器2	1	FEMI応持仏感を使山
(13)	牽引力検出器	1	牽引力確認用の検出器





図 5.3.1-8 定置・回収装置に設置するカメラ及び検出器

g 故障対策

本業務での定置・回収装置における故障対策では、本装置は実証段階の装置であることか ら、駆動の二重化や救援装置の準備は不要とした。ただし、搬送部故障時における対応は表 5.3.1-9のとおり設定した。

項目	故障対策
供給空気 停止時	<ul> <li>・供給空気停止時は定置部が無負荷・車輪接地状態となる。</li> <li>・搬送部は無負荷状態で後進運転可能となる。</li> <li>・搬送部及び定置部を後進限まで移動させ、修理対応。</li> </ul>
電源喪失時	<ul> <li>・電源喪失時は、空気の供給、制御部が共に停止となる。定置部は 無負荷・車輪接地状態となる。</li> <li>・搬送部は走行駆動ユニットのブレーキを手動開放し移動可能とな る。なお、走行駆動ユニットのブレーキは手動開放の作業性を考 慮して、搬送部後部に備わるものとする。</li> <li>・ウインチ等により引き出し可能となる。</li> <li>・搬送部及び定置部を後進限まで移動させ、修理対応。</li> </ul>
操作卓から	・電源を遮断する。
の操作不可	・電源喪失時の手順に従い、搬送部及び定置部を後進限まで移動さ
時(起動時)	せ修理対応。
操作卓から の操作不可 時(動作時)	<ul> <li>・操作卓に緊急停止ボタンを設置し、緊急時に搬送部及び定置部を 運転停止する。</li> <li>・運転停止後、電源を遮断する。</li> <li>・制御部の修理対応。</li> </ul>
カメラ、検	・直接目視による後進運転のみ可能とし、後進限まで移動させ修理
山奋仪陧吁	入りルウッ

表 5.3.1-9 定置・回収装置の故障対策

5) 装置の分割単位

幌延 URL 内への装置の搬入を想定(図 5.3.1-9 を参照)し、以下の制約のもと分割する。

・寸法制約: 地下搬入路最小断面(幅 1800 mm、高さ 2050 mm)を通過可能

・重量制約: 2 ton 未満(吊具含む)

上記の制約を考慮し、定置部は3分割(右/中央/左)できる構造とし、搬送部は以下の 単位で分割できる構造とし、制御部は特に分割しないものとして詳細設計を実施した。

- ・ 搬送部フレーム
- ・ 走行駆動ユニット
- ・ コンプレッサ









図 5.3.1-9 定置・回収装置の幌延 URL での搬入概念図

6) 定置・回収装置の基本仕様のまとめ

これまでの定置・回収装置の基本設計結果を基に、定置・回収装置の仕様一覧を表 5.3.1-10 に示す。定置・回収装置の計画図及び全体組立図を図 5.3.1-10 及び図 5.3.1-11 に示す。 また、定置・回収装置の全体システム 3D 図を図 5.3.1-12 に示す。

機	器名称	定置・回収装置
-	基数	1台
	定格荷重	36.5 ton(定置部重量:0.9 ton)
基本仕様	自重	約 6 ton
	全長	9.5 m
	名称	PEM
取扱対象物	重量	36.5 ton
	寸法	$\phi$ 2316 mm $ imes$ 3343 mm
使用条件	設置場所	屋内(風雨に晒されない環境)
	把持・浮上	空圧支持(エアベアリング方式)
	エアベアリング	AeroGo 社 K21NHD 特殊品 curved type
定置部		コンプレッサによる圧縮空気
及び		・メインモータ出力: 37 kW 型
搬送部	供給エア	・吐出圧力: 0.60~0.85 MPa
		・吐出空気量: 6.05~6.95 Nm³/min
		<ul> <li>・台数: 3台</li> </ul>
	<b></b>	(高速)5 m/min
生1/20立7	处汉	(低速)1 m/min
(1日 小山)(山)	電動機	1.5 kW×4 基
	走行位置検出	目視による確認
運	転方式	操作卓からの遠隔操作
運転	監視方式	検出器・カメラ画像による監視
給	電方式	キャブタイヤケーブル
Ĩ	電源	3 相 AC 200V、50 Hz、240 kVA

表 5.3.1-10 定置・回収装置の仕様一覧



図 5.3.1-10 定置・回収装置 計画図



図 5.3.1-11 定置·回収装置 全体組立図

番号	名称	材質	数量	傭考
1	前方検出器1		1	レーザ変位計
2	前方検出器2		1	レーザ変位計
3	後方検出器1		1	レーザ変位計
4	後方検出器2		1	レーザ変位計
5	PEM検出器1		1	レーザ変位計
6	PEM検出器2		1	レーザ変位計
7	浮上重検出器1		1	レーザ変位計
8	浮上量検出器2		1	レーザ変位計
9	浮上量検出器3		1	レーザ変位計
10	浮上重枝出器4		1	レーザ変位計
11	在荷検出器1		1	近接センサ
12	在荷検出器2		1	近接センサ
13	牽引力枝出器		1	ピン型ロードセル
14	前方確認カメラ1		1	
15	前方確認カメラ2		1	
16	中腹カメラ(上)		1	0
17	中腹カメラ(下)		1	
18	後方確認力メラ1		1	
19	後方確認力メラ2	_	1	
20	ライト		6	
21	カメラスタンド		1式	
22	圧力計		10	
23	配管カバー		2式	エアベアリング部左右1式ずつ
24	カーテンケーブル配線用ラダー		1	Ú
25	ホース固定台		1式	
26	チェーンカバー		2	



図 5.3.1-12 定置・回収装置の全体システム 3D 図

- (4) 定置・回収装置の製作
  - 1) 定置部

図 5.3.1-5 に示す構造図に基づき、定置部を製作した。定置部の外観を図 5.3.1-13 に示す。



定置部全体



バルブユニット 図 5.3.1-13 定置部 外観



エアベアリング取り付け状況

2) 搬送部

図 5.3.1-6 に示す構造図に基づき、搬送部を製作した。搬送部の外観を図 5.3.1-14 に示す。



搬送部全体





ガイドローラ



走行車輪



コンプレッサ

図 5.3.1-14 搬送部 外観

3) 制御部

a 制御盤

図 5.3.1-7 に示すシステム構成図に基づき、制御盤を製作した。制御盤の外観を図 5.3.1-15 に示す。







制御盤内部

b 操作卓

図 5.3.1-7 に示すシステム構成図に基づき、操作卓(操作用タッチパネル等)を製作した。操 作卓の外観を図 5.3.1-16 に示す。

図 5.3.1-15 制御盤 外観



図 5.3.1-16 操作卓 外観

5.3.2 定置・回収装置の妥当性確認(鋼製坑道試験)

(1) 鋼製坑道試験の目的

製作した定置・回収装置が、まず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を実施する。

- (2) 鋼製坑道試験の試験設備
  - 定置・回収装置
     製作した定置・回収装置を用いて実施した。
- 試験坑道
   図 5.3.2-1 及び図 5.3.2-2 に示す鋼製模擬坑道上で試験を実施した。



図 5.3.2-1 鋼製模擬坑道 外観



- (3) 鋼製坑道試験の試験内容、結果及び評価
  - 1) 鋼製坑道試験の内容及び結果

鋼製坑道試験の試験項目、試験内容及び結果概要を表 5.3.2-1 に示す。また、カメラ及び検 出器類の機能を確認し、遠隔操作にて定置及び回収の一連動作ができた。

主要なインターロック機能の確認結果を表 5.3.2-2 に示し、遠隔自動運転による定置動作及 び回収動作時の浮上量、押引力及び距離検出器の検出値を図 5.3.2-3~図 5.3.2-5 に示す。

距離検出器の検出値(図 5.3.2-5 参照)について、振動等により瞬間的に変動している箇所 があったが、このような瞬間的な変動時においても、遠隔自動運転が継続することを確認した。

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。

採取した試験データー式は[4]にまとめているため参照願いたい。

No.	試験項目	試験内容	結果概要
1	<ul> <li>機能確認試験(共通)</li> <li>① カメラ視認性確認</li> <li>② 緊急停止確認</li> <li>③ タッチパネル画面確認</li> </ul>	PEM 把持から定置までの一連の動作の 確認実施と共に、各種機能の確認を実 施する。	①良 ②良 ③良
2	<ul><li>機能確認試験(遠隔手動)</li><li>① 定置動作</li><li>② 回収動作</li></ul>	遠隔手動操作における動作の確認試験 を実施する。	①良 ②良
3	<ul><li>機能確認試験(遠隔自動)</li><li>① 定置動作</li><li>② 回収動作</li></ul>	遠隔自動操作における動作の確認試験 を実施する。	①良(※1、3) ②良(※2、3)

表 5.3.2-1 鋼製坑道試験の試験項目

※1:在荷状態で定置位置(目標値:800 mm)に対して、左:805 mm、右:802 mm で停止した。
※2:在荷状態で原点位置(目標値:250 mm)に対して、左:249 mm、右:252 mm で停止した。
※3:PEM 着床時は PEM の損傷や異音なく PEM を台座に定置できた。

インターロック機能	確認結果
PEM の引きずり防止	<ul> <li>・ 浮上量検出器により浮上量を検出し、設定値以下になると自動 的に走行を停止することを確認した。</li> </ul>
	<ul> <li>・ 牽引力検出器により押引力を検出し、設定値以上になると自動 的に走行を停止することを確認した。</li> </ul>
衝突防止	<前進時> <ul> <li>前方距離検出器により障害物との接近距離を検出し、設定値以下になると、自動的に走行を停止することを確認した。</li> <li>&lt;後進時&gt;</li> <li>後方距離検出器により障害物との接近距離を検出し、設定値以下になると、自動的に走行を停止することを確認した。</li> <li><pem 回収時=""></pem></li> <li>PEM 検出器により PEM と定置部との接近距離を検出し、設定値以下になると、自動的に走行を停止することを確認した。</li> </ul>

表 5.3.2-2 主なインターロック機能に対する確認結果











2) 鋼製坑道試験の評価

鋼製坑道試験にて、曲面坑道に対するエアベアリングの性能及び定置・回収装置に付与した 機能(昇降性、走行性及び遠隔操作性)を確認した。その結果を踏まえ、本項では定置・回収装 置の機能について評価する。

a 昇降性に関する評価

昇降性については、浮上、浮上維持及び着床に分けて考える。図 5.3.2-6 に前進動作時(浮 上量 45 mm での前進運転(RUN 1-log009))の浮上量データを示す。図 5.3.2-6 より、鋼 製の曲面坑道に対して、PEM (36.5 ton)を浮上量 45 mm まで浮上できることを確認した。 浮上量の変動については、まず、停止区間で浮上量の変動がほぼ見られないことから、同一 場所では(走行面状態の変化がなければ)浮上が維持できることがわかる。次に、走行区間 での浮上量は変動しているものの、最大で 3 mm 程度(浮上量 2(赤線))と小さく、PEM が台座等に接触することがないと判断できる。また、PEM 着床時は PEM の損傷や異音な く PEM を台座に定置できた。

以上より、鋼製模擬坑道を走行面とする場合において、本装置は十分な昇降性(浮上、浮 上維持及び着床)を有していると考えられる。



図 5.3.2-6 鋼製坑道試験(目標浮上量 45 mm での定置動作)における浮上量

b 走行性に関する評価

定置・回収装置の搬送部、定置部間に搭載したロードセルにより、定置・回収装置走行時の押引力を測定した。自動定置動作時(浮上量 40 mm での定置運転(RUN No なし-log33))のときの押引力を図 5.3.2-7 に示す。測定の結果、多少の押引力の変動はあるものの、速度安定区間では約 1.7 kN(平均値)であった。本値は、定置・回収装置の鋼製架台面における摩擦係数に換算すると表 5.3.2-3 のとおり 0.005 となる。本摩擦係数は、平面床走行時のデータとなるカタログ値とほぼ同等の値となっており、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る。

一方、押引力が瞬間的に上昇する場合があった。この押引力上昇の要因を分析するため、 押引力上昇が顕著に確認された前進動作時(浮上量 45 mm での前進運転(RUN 1-log009)) の走行データを図 5.3.2-8 に、押引力上昇時のエアベアリング位置と走行面の継ぎ目位置の 関係を図 5.3.2-9 に示す。また、コンプレッサ吐出流量の周期が顕著に確認された前進動作時(浮上量 40 mm での前進運転(RUN 2-log001))のコンプレッサ吐出流量と浮上量の平均値の関係を図 5.3.2-10 に、コンプレッサ吐出流量と押引力の関係を図 5.3.2-11 に示す。

押引力上昇の要因として、図 5.3.2-8 及び図 5.3.2-9 より、エアベアリングが鋼製模擬坑 道の継ぎ目近辺を通過する際に、継ぎ目の段差等で引っ掛かりが生じたことが考えられる。 しかし、エアベアリングが段差に掛かる全てのタイミングで本事象が発生したわけではない。 また、押引力上昇の周期とコンプレッサ吐出流量及び浮上量の変動周期が約 10 秒で一致し ており、これらの変動の影響も考えられる。しかし、図 5.3.2-10 よりコンプレッサ吐出流 量の変動による浮上量の変動は約 1 mm と小さく、図 5.3.2-11 よりコンプレッサ吐出流量 の変動と押引力の変動には明確な相関関係はみられない。

以上のことから、押引力の上昇は、単独の要因ではなく、様々な要因が複合的に発生した ことにより生じたものと考えられる。

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)

表 5.3.2-3 鋼製坑道試験における押引力及び摩擦係数

※: (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。

ここで、速度安定区間の押引力は、加速完了後の速度が一定区間での押引力と定義した。



RUN Noなし-log33(鋼製/40mm/定置/遠隔)

図 5.3.2-7 鋼製坑道試験(目標浮上量 40 mm での定置動作)における走行データ



図 5.3.2-9 鋼製坑道試験における押引力上昇時のエアベアリング位置と継ぎ目位置





図 5.3.2-10 鋼製坑道試験におけるコンプレッサ吐出流量の周期変動と浮上量の関係

図 5.3.2-11 鋼製坑道試験におけるコンプレッサ吐出流量の周期変動と押引力の関係

c 遠隔操作性に関する評価

装置の姿勢検出や前方の障害物検出等の目的に合わせてカメラや検出器を定置・回収装置 の各所に設置し、インターロック機能を活用することで、装置及び周囲の状態を把握し、遠 隔操作にて定置及び回収作業の一連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。

よって、装置に付与した遠隔操作性は満足した評価できる。

- 5.3.3 地下試験坑道での要素試験(地下要素試験)
- (1) 地下要素試験の目的

試験坑道 2 で曲率のある打設コンクリート面のき裂等の有無に対するエアベアリングの走 行性を確認することを目的に、ハンドリングの負荷軽減やユーティリティ整備の負荷軽減等を 考慮して、縮小モデルの要素試験装置を製作した上で、幌延 URL 試験坑道 2 で走行試験を実 施した。

- (2) 地下要素試験の試験設備
  - 1) 要素試験装置

図 5.3.3-1 及び図 5.3.3-2 に示す要素試験装置を用いる。要素試験装置は、定置・回収装置 における定置部を縮小して模擬したものであり、エアベアリングを 4 枚配置し、搬送部及び 制御部を設けず、供給空気は外部からとし、走行はウインチによる牽引とした。



図 5.3.3-1 要素試験装置 外観



図 5.3.3-2 要素試験装置 外形図

a エアベアリング

要素試験装置におけるエアベアリング単体の仕様は、定置・回収装置と同じ仕様とした。

b テストウエイト

要素試験では、PEM の代わりに、エアベアリング4枚相当に重量換算したウエイトを用意 する。そこで、エアベアリング1枚当たりに掛かる重量を、定置・回収装置と同様となるよう に 14.125 ton (※)のウエイトを用意した。また、重量に対する走行性を確認するために、2 ton、6 tonのウエイトも用意した。なお、各ウエイト時のエアベアリング1枚当たりに掛かる 荷重は、2 ton時で 0.71 ton、6 ton時で 1.71 ton、14.125 ton時で 3.74 tonとなる。 ※: (36.5 ton(PEM 重量)+0.9 ton(搬送部重量)) ÷10枚×4枚-0.83 ton(要素試験装置重量)

c 計測機器

以下の計測機器を設置し、走行時での操作監視やデータ取得を実施した。

(a) 浮上量検出器:4箇所

定置・回収装置では、4 隅に距離検出器を設置し、定置・回収装置の浮上量を測定している。この値より、PEM が台座より離れていること及び定置・回収装置が水平であることを確認している。

本試験で使用する要素試験装置でも同様に、4 隅に距離検出器を設置し、ウエイトが 台座より離れていること及び要素試験装置が水平であることを確認し、ログ・データを 取得する。

(b) 接点付き圧力計:エアベアリング毎に4点計測

定置・回収装置では、圧力設定器(レギュレータ)後段の配管に圧力計を設置し、エ アベアリングに供給される空気の圧力を計測して圧力の変動を確認している。

要素試験では、走行面の凹凸による影響で、エアベアリングからの空気の漏れ量が変動し、それに伴う圧力の変動が想定されることから、圧力変動についてログ・データの 取得を行う。

- (c) 走行位置測定(レーザドップラー速度計):1箇所
   走行位置と取得データ(牽引力、圧力、流量及び浮上量)との関係を調査できるよう
   計測する。
- (d) 流量計:エアベアリング毎に4点計測

要素試験では、走行面の凹凸による影響で、エアベアリングからのエア漏れ流量が変 動し、供給空気流量に影響することが想定されることから、流量変動についてログ・デ ータの取得を行う。

(e) 牽引力検出器(ロードセル)
 要素試験では、定置・回収装置と同様に、エアベアリングの機能が働いていることを確認するためにロードセルを設置し、牽引力のログ・データの取得を行う。

#### 2) 試験坑道

図 5.3.3-3 に示す幌延 URL 試験坑道 2 で試験を実施した。





図 5.3.3-3 試験坑道 2 の概略形状

### (3) 地下要素試験の内容、結果及び評価

1) 地下要素試験の内容及び結果

地下要素試験では、エアベアリング方式について、浮上量及び負荷荷重の走行性への影響に ついて確認した。

走行試験に先立ち実施した作動確認にて、走行面の目地部においてエアベアリングの潰れや 引っ掛かりが生じることがわかり、試験では目地部をアルミテープで塞ぎ、データ採取を実施 することとした。

表 5.3.3-1 及び表 5.3.3-2 に試験内容を示す。走行中に異常停止した RUN は、備考欄にス タックと記載している。RUN225-0001 終了後に、走行面の区間 I に発生していた走行面を横 断するき裂を補修し、RUN116-0001 以降の試験では区間 I にき裂が無い条件で走行試験を実 施した。全ての RUN において、浮上及び着床時に過度な傾き及び異音はなかった。地下要素 試験の RUN No.の最左の数字の「1」はウエイト重量 2ton、「2」は 6ton、「3」は 14.125ton を示し、他の数字は基本的に連番となる。

なお、採取した試験データー式は[5]にまとめているため参照願いたい。

5-44

Run No	開始時間	ウエイト重量[1]	走行開始位置 ※1	走行停止位置 ※1	走行距離[m]	走行方向	走行区間	泽上量[mm]	走行速度[m/min]	備考
RUN110-0001	9:21	2	16.400	15.558	-0.842	作業台方向	区間 I(Type1)	40-45	5	スタック
RUN110-0002	9:54	2	16.400	9.004	-7.396	作業台方向	区間 I(Type1)~区間 II(Type2)	50-55	5	
RUN120-0001	10:08	2	9.000	15.723	6.723	妻壁方向	区間 I(Type1)~区間 II(Type2)	50-55	5	
RUN211-0001	10:36	9	16.400	13.540	-2.860	作業台方向	区間 I(Type1)	50-55	5	
RUN212-0001	10:39	9	13.550	15.727	2.177	妻壁方向	区間 I(Type1)	50-55	5	
RUN311-0001	14:08	14.125	16.300	13.570	-2.730	作業台方向	区間 I(Type1)	50-55	5	
RUN312-0001	14:13	14.125	13.550	15.677	2.127	妻壁方向	区間 I (Type1)	50-55	Ð	
RUN221-1-0001	90:6	9	12.000	10.996	-1.004	作業台方向	区間 II (Type2)	40-45	5	スタック
RUN221-2-0001	9:53	9	12.000	2.165	-9.835	作業台方向	区間I~区間II(Type2~Type4)	50-55	5	
RUN221-3-0001	10:01	9	2.200	11.997	9.797	妻壁方向	区間I~区間II(Type2~Type4)	50-55	5	
RUN222-1-0001	10:17	9	6.300	4.444	-1.856	作業台方向	区間II (Type3)	40-45	5	スタック
RUN224-1-0001	13:15	9	1.340	2.960	1.620	妻壁方向	区間亚(Type4)	40-45	5	
RUN321-1-0001	14:12	14.125	12.000	2.161	-9.839	作業台方向	区間I~区間II(Type2~Type4)	50-55	5	
RUN321-3-0001	14:29	14.125	2.200	12.048	9.848	妻壁方向	区間I~区間II(Type2~Type4)	50-55	5	
RUN313-0001	9:16	14.125	1.460	3.030	1.570	妻壁方向	区間亚(Type4)	40-45	5	
RUN136-0001	10:04	2	1.330	12.013	10.683	妻壁方向	区間 I ~区間 II (Lype2~Lype4)	50-55	2	
RUN131-0001	10:14	2	12.000	2.096	-9.904	作業台方向	区間I~区間II(Type2~Type4)	50-55	5	
RUN122-0001	10:25	2	1.340	1.839	0.499	妻壁方向	区間田(Type4)	40-45	2	スタック
RUN124-0001	10:56	2	4.600	7.289	2.689	妻壁方向	区間 II (Type3)	40-45	5	スタック
RUN126-0001	11:13	2	9.200	9.972	0.772	妻壁方向	区間 II (Type2)	40-45	5	スタック
RUN225-0001	12:13	6	16.400	16.267	-0.133	作業台方向	区間 I(Type1)	40-45	5	スタック
<b>%</b> 1	走行開	月始位置・え	<b>も行停止位置</b> の	値は、組立す	台の作業台	う側端部 (~	ビロ点)から要素試験装置	基準点まで	の距離 (m)	

# 表 5.3.3-1 地下要素試験の試験内容(1/2)(き裂補修前)

5 - 45

	基進点まで	グロ点)から が支援	、側端部()~	の作業台	値は、組立台	走行停止位置の	始位置.	走行開	₩1
5	40-45	区間皿(Type4)	作業台方向	-0.804	2.176	2.980	2	14:21	RUN121-1-0001
ממ	50-55	区間 I ~区間皿 (Type1~Type4)	妻壁方向	13.502	15.682	2.180	4 64	14:05	RUN129-0003
ى س	50-55	区間 I ~区間皿 (Type1~Type4) 匹體 I  匠體亚 (T   4   7   4)	妻壁万回 ケ <u>業 ヘ</u> ナウ	13.426	15.626	2.200	0 0	13:47	RUN129-0002
ŋ	50-55	区間 I ~区間Ⅲ (Type1~Type4)	作業台方向	-13.461	2.209	15.670	2	13:42	RUN128-0002
5	50-55	区間 I ~区間皿 (Type 1~Type 4)	妻壁方向	13.445	15.635	2.190	2	13:34	RUN129-0001
5	50-55	区間 I ~区間亚(Type1~Type4)	作業台方向	-13.465	2.235	15.700	2	13:23	RUN128-0001
5	50-55	区間 I ~区間亚(Type1~Type4)	妻壁方向	13.538	15.698	2.160	9	11:07	RUN229-0003
5	50-55	区間 I ~区間亚(Type1~Type4)	作業台方向	-13.540	2.160	15.700	9	11:01	RUN228-0003
ũ	50-55	区間 I ~区間亚(Type1~Type4)	妻壁方向	13.516	15.696	2.180	9	10:55	RUN229-0002
5	50-55	区間 I ~区間亚(Type1~Type4)	作業台方向	-13.510	2.190	15.700	9	10:49	RUN228-0002
Q	50-55	区間 I ~区間亚(Type1~Type4)	妻壁方向	13.508	15.698	2.190	9	10:42	RUN229-0001
Q	50-55	区間 I ~区間亚(Type1~Type4)	作業台方向	-13.489	2.181	15.670	9	10:35	RUN228-0001
3.5	50-55	区間 I ~区間亚 (Type 1~Type4)	妻壁方向	13.455	15.665	2.210	14.125	9:41	RUN332-0003
3.5	50-55	区間 I ~区間亚(Type1~Type4)	作業台方向	-13.480	2.200	15.680	14.125	9:31	RUN331-0003
3.5	50-55	区間 I ~区間亚(Type1~Type4)	妻壁方向	13.479	15.679	2.200	14.125	9:23	RUN332-0002
3.5	50-55	区間 I ~区間亚(Type1~Type4)	作業台方向	-13.452	2.238	15.690	14.125	9:12	RUN331-0002
3.5	50-55	区間 I ~区間亚 (Type 1~Type 4)	妻壁方向	13.463	15.663	2.200	14.125	9:03	RUN332-0001
3.5	50-55	区間 I ~区間亚 (Type1~Type4)	作業台方向	-13.497	2.213	15.710	14.125	8:55	RUN331-0001
2	50-55	区間 I ~区間亚 (Type1~Type4)	妻壁方向	13.485	15.665	2.180	14.125	16:15	RUN327-0005
о и.	50-55	医胃 I ~ 区間面 (Tvne 1~Tvne 4)	<u>《王/17</u> 作業台方向	-13504	2 206	15 710	14125	16-08	RUN326-0005
<u>п</u> и	50-55 50-55	△周1~○周皿(1) から1~1) から4) マ間1~「マ間町(T,m01~T,m04)	TF来口刀叫 事腔大向	NTN 01	15.221	000.01	14.125	10:01	RUN320-0004
1.01	50-55	区間 I ~区間皿 (Type I~Type 4) 元間 F   元間亜 (T   ) を ・ )	妻壁万回 """公子个	13.478	15.688	2.210	14.125	15:46	RUN327-0003
Ð	50-55	区間 I ~区間 II (Type 1~Type 4)	作業台方向	-13.409	2.301	15.710	14.125	15:39	RUN326-0003
5	50-55	区間 I ~区間 II (Type 1~Type 4)	妻壁方向	13.450	15.640	2.190	14.125	15:32	RUN327-0002
Ð	50-55	区間 I ~区間 II (Type 1~Type 4)	作業台方向	-13.481	2.239	15.720	14.125	15:25	RUN326-0002
2	50-55	区間 I ~区間亚(Type1~Type4)	妻壁方向	13.556	15.716	2.160	14.125	15:16	RUN327-0001
<u>م</u> ،	50-55	区間 I ~区間皿(Type1~Type4)	作業台方向	-13.399	2.281	15.680	14.125	15:06	RUN326-0001
2.0	40-45	区間 I (Tvpe1)	妻壁方向	2.144	15.684	13.540	14.125	14:22	RUN317-0005
2	40-45	区間 I (Tvpe1)	(1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	-2.444	13.556	16.000	14.125	14:18	RUN316-0005
ט יי	40-45	区間 I (Tvpe1)	妻壁方向	2.132	15.672	13.540	14.125	14:14	RUN317-0004
	40-45	区間 I (Tvne1)	<u>《</u> 美台方向	-2 450	13.550	16.000	14 125	14-05	RUN316-0004
ט יי	40-45	医間 I (Tvpe1)	<b>妻壁方向</b>	2.159	15.689	13.530	14.125	14:01	RUN317-0003
<u>م</u> در	40-45		反主义方向作業分方向	-2.471	13.539	16.010	14.125	13:58	RUN316-0003
یں در	40-45	区間 1 (Tvne1)	東降大向	2.000	15.685	13.530	14125	13-53	RUN317-0002
о <i>и</i>	40-45	区間 1(Type1) 区間 1(Type1)	<u> 英</u> 建2月月 在 第 台 方 句	-2 850	13.540	10.320	14 1 25	13.50	RUN316-0001
، م	40-45	△周 I (Typel) 区間 I (Typel)	TF米ロクト	0100	15.719	13 520	14.125	13:41	RUN310-0001 RUN317-0001
» и			女主之司	2.100	10.700	010.01	11105	1 2.20	DIN216-0001
n س	40-45	〇回 T(Lybel) 区間 T(Tymot)	TF未可クPD 事降大向	-2.644 2.166	15.206	13 540	ي م	10:44	RUNZ10-0004
о ш	40-45		★年2日 千米4十0	2.21/	10/01	13.490	0 0	10:40	RUNZ1 /-0003
<u>م</u>	40-45	区間 I(I ype1) 区間 I(工 1)	<b>作来时</b> 万回 <sup>東臨</sup> 十0	-2.899	13.501	16.400	9	10:38	KUN216-0003
1 21	40-45	区間 I (Type1)	妻壁方回 "	2.204	15.704	13.500	9	10:34	RUN217-0002
Ð	40-45	区間 I(Type1)	作業台方向	-2.887	13.513	16.400	9	10:31	RUN216-0002
5	40-45	区間 I(Type1)	妻壁方向	2.197	15.717	13.520	9	10:27	RUN217-0001
S	40-45	区間 I(Type1)	作業台方向	-2.877	13.523	16.400	9	10:23	RUN216-0001
2	40-45	区間 I (Type1)	妻壁方向	2.190	15.700	13.510	5	10:06	RUN117-0001
2	40-45	区間 I (Tvpe1)	作業台方向	-2.901	13.499	16.400	2	10:03	RUN116-0001
走行速度[m/min] 備考	[mm] 雪 工 葒	走行区間	走行方向	走行距離[m]	走行停止位置 ※1	1] 走行開始位置 ※1	ウエイト重量[	開始時間	Run No

表 5.3.3-2 地下要素試験の試験内容(2/2)(き裂補修後)

a 浮上量と走行可否

要素試験装置を用いて、打設コンクリート面を目標浮上量 40mm で走行した場合、走行不可(スタック)となる事象を確認した。

走行不可となった走行データを分析すると、図 5.3.3-4 及び図 5.3.3-5 の 2 つのパターンが 確認された。

図 5.3.3・4 のパターンでは、き裂部及び表面気泡部等の凹部(以下「凹部」という)からエ アベアリング内空気が漏れ、この漏れによりエアベアリングの空気膜形成に必要な空気が供給 できずに浮上量が低下し、そのまま走行不可となったものと考えられる。走行不可(スタック) となるイメージ図を図 5.3.3・6 に示す。

図 5.3.3-5 のパターンでは、凹部からのエアベアリング内空気の漏れにより空気膜が歪み、 エアベアリングが形を崩して浮上量が低下し、(これに伴いエアベアリングの圧力が上昇し供 給空気流量が低下し、)一隅の低下に伴う荷重の集中により、エアベアリングの耐荷重能力を 超えて再浮上できず、そのまま接地し(閉塞し、高圧状態で供給空気流量が0となる)走行不 可となったものと考えられる。走行不可(スタック)となるイメージ図を図 5.3.3-7 に示す。

上記の事象は、どちらも凹部からの空気漏れが要因と考え、漏れた分、過剰に空気を供給す ることで対応できると考えた。そこで、以下を考慮のうえ、供給空気を増加することとした。

・エアベアリングの圧力が定格圧力(0.41 MPa)を大きく超えないこと

・浮上量はガイドローラが台座より脱輪しない高さとすること

具体的には、目標浮上量を 40 mm から 55 mm に上げるように供給空気を増加した。その 結果、コンクリート面での走行不可が解消された。目標浮上量変更によるエアベアリング1枚 当たりに掛かる重量と供給空気圧力と走行可否の関係を表 5.3.3・3 に示す。

なお、目標浮上量 55 mm はガイドローラが台座より脱輪しない上限程度であり過剰な可能 性がある。したがって、地上検証試験以降において、適切な浮上量を再設定することが望まし いと考えられる。

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

表 5.3.3-3 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

※:大重量でスタックすると危険なため、1回のみ実施。







図 5.3.3-5 地下要素試験におけるスタックパターン2の時系列データ





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
$\downarrow$
圧力:低下
供給空気流量:増加
浮上量:卜降

浮上量:さらに下降
$\downarrow$
スタック

2. スタックイメージ

図 5.3.3-6 スタックパターン1のイメージ図



1. 凹部での走行イメージ



2. スタックイメージ

図 5.3.3-7 スタックパターン2のイメージ図

b 試験データの整理

本試験で得たの牽引力及び供給空気流量のデータについて、以下に整理する。

(a) 牽引力

地下要素試験で得られた牽引力と速度データの関係の一例として、Run326-1(ウエイト 重量:14.125 ton、目標浮上量:55 mm)のデータを図 5.3.3-8 に示す。Run326-1 と同じ 試験条件での牽引力を整理した結果を表 5.3.3-4 及び表 5.3.3-5 に示す。また、Run228 及 び Run229(共にウエイト重量:14.125 ton、目標浮上量:40 mm)の牽引力を整理した結 果を表 5.3.3-6 及び表 5.3.3-7 に示す。

なお、評価で用いた牽引力値は、装置速度が安定している区間(図 5.3.3-8 参照)の値の 最頻値を用いることとした。これは、要素試験装置はウインチとロープで繋いでおり、始動 及び停止時は、この牽引用ロープの伸縮の影響が大きいと考えられるためである。また、要 素試験における牽引力には、走行面の変化等からの影響に加えて、エアベアリングの摩擦抵 抗に関係の無い外力である牽引用ロープの伸縮や供給空気用ホースのハンドリングで生じ る力の影響も受けていると考えられる。これらのばらつきのある変動の影響を低減するため に、平均値ではなく最頻値を用いることとした。



図 5.3.3-8 地下要素試験における牽引力と速度データ例 (Run 326-1)

		試験条件		牽引力	牽引力
試験 No.	ウェイト重量[ton] (総重量[ton])	目標浮上量	走行区間 (去行支向)	(最頻値) [kN]	平均 [kN]
Run326-1	(総里里[ton])	[mm]	(走1) 万円)	2.8	
Run326-2			区間 I~Ⅲ	2.9	
Run326-3			(作業台	2.8	
Run326-4			方向)	2.8	
Run326-5	14.125	==		2.9	
Run327-1	(14.955)	00		2.6	<u> </u>
Run327-2			区間1~Ⅲ	2.4	
Run327-3			区间 I ° Ш (事面古向)	2.5	
Run327-4			(安面刀间)	2.9	
Run327-5				3.3	

表 5.3.3-4 地下要素試験(Run326と Run327)における牽引力

表 5.3.3-5 地下要素試験(Run316と Run317)における牽引力

	試験条件			牽引力	牽引力
試験 No.	ウェイト重量[ton]	目標浮上量	走行区間	(最頻値)	平均
	(総重量[ton])	[mm]	(走行方向)	[kN]	[kN]
Run316-1				2.2	
Run316-2			区間 I	2.0	
Run316-3			(作業台	2.1	
Run316-4			方向)	2.0	
Run316-5	14.125	40		2.1	
Run317-1	(14.955)	40		1.7	<u>2.0</u>
Run317-2			反明エ	1.7	
Run317-3			(事五士向)	1.7	
Run317-4			(安面刀间)	2.6	
Run317-5				1.8	

表	5.3.3-6	地下要素試験	(Run228 と Run229)	における牽引力
---	---------	--------	-------------------	---------

	試験条件			牽引力	牽引力
試験 No.	ウェイト重量[ton]	目標浮上量	走行区間	(最頻値)	平均
	(総重量[ton])	[mm]	(走行方向)	[kN]	[kN]
Run228-1			区間 I~Ⅲ	1.5	
Run228-2	6		(作業台	1.5	
Run228-3			方向)	1.5	1.6
Run229-1	(6.83)	00	区町1~Ⅲ	1.4	1.0
Run229-2			○同1~Ⅲ (事五古向)	1.8	
Run229-3			(安回刀円)	1.5	

50 H H	(A)	S. 1. 18	195		
	試験条件			牽引力	牽引力
試験 No.	ウェイト重量[ton]	目標浮上量	走行区間	(最頻値)	平均
	(総重量[ton])	[mm]	(走行方向)	[kN]	[kN]
Run216-1			に用す	1.0	
Run216-2			区间1	1.0	
Run216-3			(1F未百	0.9	
Run216-4	6	40	70 (FI)	1.2	0.0
Run217-1	(6.83)	40		0.8	0.9
Run217-2			区間I	0.8	
Run217-3			(妻面方向)	0.7	
Run217-4				0.6	5

表 5.3.3-7 地下要素試験 (Run216 と Run217) における牽引力

(b) 供給空気流量

図 5.3.3-9 に地下要素試験で得られた供給空気の全流量と速度データの関係の一例として、Run326-1 (ウエイト重量:14.125 ton、目標浮上量:55 mm)を示す。Run326-1 と同じ試験条件での供給空気流量を整理した結果を表 5.3.3-8 及び表 5.3.3-9 に示す。また、Run228 及び Run229 (共にウエイト重量:14.125 ton、目標浮上量:40 mm)の供給空気流量を整理した結果を表 5.3.3-10 及び表 5.3.3-11 に示す。

なお、評価で用いた供給空気流量値は、装置速度が安定している区間(図 5.3.3-9 参照) の値の最頻値を用いることとした。



図 5.3.3-9 地下要素試験における供給空気全流量と速度データ例(Run 326-1)

		試験条件			全流量
試験 No.	ウェイト重量[ton]	目標浮上量	走行区間	(最頻値)	平均
	(総重量[ton])	[mm]	(走行方向)	[Nm³/min]	[Nm³/min]
Run326-1			区間 I~Ⅲ	9.32	
Run326-2			(作業台	9.31	
Run326-3			方向)	9.33	
Run326-4				9.33	
Run326-5	14.125	55		9.33	0.99
Run327-1	(14.955)	55	区間 I~Ⅲ	9.31	<u>9.00</u>
Run327-2			(妻面方向)	9.32	
Run327-3				9.32	
Run327-4				9.32	
Run327-5				9.32	

表 5.3.3-8 地下要素試験(Run326とRun327)における供給空気全流量

表 5.3.3-9 地下要素試験(Run316と Run317)における供給空気全流量

		試験条件			全流量
試験 No.	ウェイト重量[ton]	目標浮上量	走行区間	(最頻値)	平均
	(総重量[ton])	[mm]	(走行方向)	[Nm³/min]	[Nm³/min]
Run316-1			区間 I	4.91	
Run316-2			(作業台	5.03	
Run316-3			方向)	5.04	
Run316-4				5.03	
Run316-5	14.125	10		5.10	5.04
Run317-1	(14.955)	40	区間 I	4.96	<u> 5.04</u>
Run317-2			(妻面方向)	5.05	
Run317-3				5.05	
Run317-4				5.10	
Run317-5				5.11	

表 5.3.3-10	地下要素試験	(Run228 と Run229)	における供給空気全流量

	試験条件				全流量
試験 No.	ウェイト重量[ton]	目標浮上量	走行区間	(最頻値)	平均
	(総重量[ton])	[mm]	(走行方向)	[Nm³/min]	[Nm³/min]
Run228-1			区間 I~Ⅲ	5.06	
Run228-2			(作業台	5.17	
Run228-3	6	= =	方向)	5.17	E 1 E
Run229-1	(6.83)	00	区間 I~Ⅲ	5.17	<u> </u>
Run229-2			(妻面方向)	5.17	
Run229-3				5.16	
		試験条件		全流量	全流量
----------	-------------	-------	--------	-----------	-------------
試験 No.	ウェイト重量[ton]	目標浮上量	走行区間	(最頻値)	平均
	(総重量[ton])	[mm]	(走行方向)	[Nm³/min]	[Nm³/min]
Run216-1			区間 I	2.28	
Run216-2			(作業台	2.28	
Run216-3			方向)	2.27	
Run216-4	6	40		2.27	9.90
Run217-1	(6.83)	40	区間 I	2.30	<u>2.29</u>
Run217-2			(妻面方向)	2.29	
Run217-3				2.28	
Run217-4				2.28	

表 5.3.3-11 地下要素試験(Run216と Run217)における供給空気全流量

2) 地下要素試験の評価

地下要素試験の浮上量とウエイト重量に対する比較結果を表 5.3.3-12 に示す。本結果より、エアベアリングの供給空気流量は、浮上量及びウエイト重量に依存することが分かった。打設コンクリート面に対する昇降性及び走行性を、以下に評価する。

a 昇降性に関する評価

浮上及び着床時に過度な傾き及び異音はなかったことから、打設コンクリート面に対して もエアベアリングの昇降は適用可能であると考える。ただし、目標浮上量 40 mm ではスタ ックしたことから、定置・回収装置の目標浮上量を変更する必要がある。

### b 走行性に関する評価

鋼製面と比較し打設コンクリート面では摩擦係数が高い傾向であるが、これは鋼製面と比 較してコンクリート面は表面が粗く、この表面粗さの影響を受けたものと考えられる。また、 摩擦係数が約 0.02 となり、カタログ値(0.001~0.007:平面床走行時)と比較して大きくな ったが、エアベアリングの材質であるクロロプレンゴムと坑道面との摩擦係数(0.5~1.3)(図 5.3.5-10 参照)よりも1桁以上低く、エアベアリングが当該走行面に対して作動していると 判断できる。また、走行中の挙動は鋼製面と同様に安定しており、走行への問題はないと考 えられる。

ただし、摩擦係数の増加とともに、走行中にエアベアリングの一部と走行面が接触して、 エアベアリングが摩耗・損傷する可能性が高くなると思われることから、今後、エアベアリ ング方式の実機適用に向けて、本事象に対する対応策について検討していく必要がある。

なお、摩擦係数について、総重量 14.96 ton 及び 6.83 ton の場合ともに、目標浮上量 40 mm よりも目標浮上量 55 mm の方が若干高い。この要因として、圧力増加によるエアベア リングの形状の変化・走行面への接触状態の変化による摩擦係数の増加や、圧力増加による 供給空気用ホースのハンドリングで生じた力の増加等の影響が考えられる。

項目	走行区間 I 目標浮上	(TYPE1) .量 40 mm	走行区 目標浮上	備考	
参照 RUN No.	RUN 316	RUN 216	RUN 326	RUN 228	
浮上量(平均) [mm]	45	43	56	56	
総重量 [ton]	14.96	6.83	14.96	6.83	А
牽引力 [kN]	2.0	0.9	2.8	1.6	В
圧力(平均) [MPa]	0.27	0.122	0.34	0.165	
全流量 [Nm <sup>3</sup> /min]	5.04	2.29	9.33	5.15	
摩擦係数(※)	≦0.014	≦0.014	≦0.020	≦0.024	B×10 <sup>3</sup> /9.8 /A

表 5.3.3-12 地下要素試験における浮上量と重量に対する比較結果

※:摩擦係数:牽引力(最頻値)を総重量(ウエイト重量+装置重量)で割った値とした。 牽引力(最頻値)は、摩擦抵抗以外の外力(牽引用ロープの伸縮や供給空気用ホースのハン ドリングで生じる力等)の影響も受けるが、安全側の評価となる。

定置・回収装置への反映

本試験により、き裂部分や表面気泡がある打設コンクリート面上でのエアベアリングが走 行可能な浮上量、装置走行時の摩擦係数、供給空気流量を確認した。これらを踏まえ、装置 側対策として定置・回収装置に対する主な反映事項を以下に示す。

a 定置・回収装置の目標浮上量の見直し

打設コンクリート面上では、従来設定していた浮上量 40 mm ではスタックが発生し、十分 な走行性能が得られなかった。エアベアリングの圧力を増加させた試験の結果、目標浮上量 値を 55 mm として正常な走行を確認した。ただし、浮上量 55 mm は上限に近い設定であり 過剰な可能性があることから、適切な浮上量を再設定することとする。

b 供給空気流量増加の影響・対策

本試験の結果より、エアベアリングの供給空気流量は、重量及び浮上量に依存することが わかった。そこで、定置・回収装置の走行に必要な供給空気流量を改めて算出する。

鋼製坑道試験(5.3.2項)の結果及び本試験にて得られたデータを表 5.3.3-13 に示す。

「要素試験装置・打設コンクリート面・目標浮上量 40 mm・荷重/枚 3.74 ton」と「定置・ 回収装置・鋼製面・目標浮上量 40 mm・荷重/枚 3.74 ton」を比較すると、エアベアリング 1 枚当たりの流量は、1.26 Nm<sup>3</sup>/min と 1.23 Nm<sup>3</sup>/min と同等であった。よって、供給空気流量 (エアベアリングの空気消費流量)は、装置の違いや走行面の状態(鋼製面と打設コンクリ ート面)による影響は小さいと考えられる。

そこで、定置・回収装置の目標浮上量 55 mm におけるエアベアリング1枚当たりの空気消 費量(q)は、「要素試験装置・打設コンクリート面・目標浮上量 55 mm・荷重/枚 3.74 ton」よ り 2.34 Nm<sup>3</sup>/min 程度と考えられる。よって、定置・回収装置は 10 枚使用のため、浮上量 55 mm とした場合の空気消費量(Q)は 23.4 Nm<sup>3</sup>/min 程度と考えられる。そこで、必要となる供 給空気流量は、安全率 1.5 を乗じ 35.1 Nm<sup>3</sup>/min (=23.4 (Nm<sup>3</sup>/min)×1.5)と算出した。 表 5.3.3-13 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)

	荷重/	目標浮		鋼製面		打設コンクリート面			
装置     枚     上量     分       [ton]     [mm]     [Nr	全流量 [Nm <sup>3</sup> /min]	流量/枚 [Nm <sup>3</sup> /min]	圧力 [MPa]	全流量 [Nm <sup>3/</sup> min]	流量/枚 [Nm <sup>3</sup> /min]	圧力 [MPa]			
要素	3.74	40	—	-	_	5.04	1.26	0.27	
試験 装置	(※1)	55	_	_		9.33	2.34	0.34	
定置・	3.74	40	12.3	1.23	0.27	—	—	(0.27)	
回収装置	(※2)	55	0	0000		(Q)	(q)	(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<sup>3</sup>/min、(Q)は23.4 Nm<sup>3</sup>/min 程度になると考える。

上記の算出結果より、現状定置・回収装置に搭載しているコンプレッサの供給空気流量(20 Nm<sup>3</sup>/min (0.7 MPa))に加えて、更に流量を上積みする必要があることが分かった。

そこで、今後は、搭載コンプレッサ(20 Nm<sup>3</sup>/min (0.7 MPa))に加えて、別途コンプレッ サを用意することとする。なお、地上検証試験では、エンジンコンプレッサを使用し、地下 実証試験では、施設の制約(火気厳禁)から、電動コンプレッサを使用することとする。

(4) 地下要素試験まとめ

縮小モデルとなる要素試験装置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、搬送定置・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40mm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55mm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。
- > き裂部や表面気泡部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 Nm³/min (=23.4 Nm³/min×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。

- 5.3.4 充填材除去後の走行面での走行性の確認(地上検証試験)
- (1) 地上検証試験の目的

地下実証試験に先立ち、地上にて曲率のある打設コンクリート面での定置作業及び回収作業 時の定置・回収装置の昇降性、走行性及び遠隔操作性を確認する。また、地下環境では模擬が 困難な PEM 回収時の走行面を想定した走行性について確認する。

- (2) 地上検証試験の試験設備
  - 1) 定置·回収装置

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、昇降時に異音が発生して外観点検したところ、台座の損傷を確認した。この台座の損傷は、昇降時に定置部ガイドローラが台座を挟み込むことによって発生したと考えられた。そこで、定置部が内側(台座側)に閉じないよう、定置・回収装置の定置部にトーションビームを追加する改造を実施した。改造後の全体外観を図 5.3.4-1 に、改造箇所の外観を図 5.3.4-2 に示す。



図 5.3.4-1 地上検証試験における定置・回収装置 外観



図 5.3.4-2 地上検証試験における定置・回収装置の主な改良箇所試験坑道 地下の試験坑道 2 と同形状、同仕様の地上模擬坑道の上で試験を実施した。地上模擬坑道は、 区間を LIFT1~LIFT4 の 4 つに分けており、そのうち走行範囲は LIFT1 及び LIFT2 である。 面仕上げは LIFT1 がモルタル仕上げ面、LIFT2 が打設コンクリート面である。また、走行ガイ ドとして、長さ 1 m のコンクリートブロックを繋ぎ合わせた台座を設けている。外観を図 5.3.4-3 に、詳細図を図 5.3.4-4 に示す。



図 5.3.4-3 地上模擬坑道 外観



図 5.3.4-4 地上模擬坑道 外形図

## 2) 追加コンプレッサ

地下要素試験(5.3.3 項)から、定置・回収装置に搭載しているコンプレッサ以外に外部から 追加で空気を供給する必要があることがわかり、地上検証試験では、エンジンコンプレッサを 2 台追加することで対応する。供給空気系統図を図 5.3.4-5 に示す。



図 5.3.4-5 地上検証試験における供給空気系統図

- (3) 地上検証試験の試験内容及び結果
  - 1) 地上検証試験の内容及び結果

地上検証試験では、積載重量を変更した試験及び走行路面環境を変更した試験を実施した。 試験項目を表 5.3.4-1 に示す。本試験では、エアベアリングへの供給空気を定格圧力(0.41 MPa) 以下かつ地下要素試験(5.3.3 項)で算出した流量(23.4 Nm<sup>3</sup>/min)程度という条件で、目標浮 上量を 50 mm に設定して実施した。

試験の結果、設定した目標浮上量程度で、定格圧力以下かつ算出流量程度の供給空気により 積載重量(16.2 ton、26.5 ton、36.5 ton)を搬送できることを確認した(表 5.3.4-2 参照)。ま た、すべての路面環境(散水面・充填材残留面(※)・上敷き材面)に対して、異常(PEM の 引きずり等)なく、定置作業及び回収作業ができた。ただし、残留充填材面の走行試験では、 装置前面に設置した排土板前に充填材が捲れて堆積(図 5.3.4-6 参照)し、走行抵抗も増加し た。

(※:流体的除去後の配管洗浄用ノズル2回目前の状態を模擬し、台座脇に三角錐状に残留)

また、昇降時に異音は発生していなかったが、台座の目地ごとに台座が損傷しており(図 5.3.4-7 参照)、台座の目地ごとに押引き力が増加していることを確認した(図 5.3.4-8 参照)。 試験で得られた重量別の押引力の測定値を表 5.3.4-3 に、走行区間別の押引力の測定値を表 5.3.4-4 に、鋼製坑道試験での押引力(1.7 kN)を基準とした押引力(摩擦係数)の比較結果を 表 5.3.4-5 に示す。また、重量別の押引力の分布図を図 5.3.4-9 に、走行区間別の分布図を図 5.3.4-10 に示す。(分布図(箱ひげ図)の見方は図 5.3.4-11 を参照。)

なお、地上検証試験の全試験項目及びデーター式は[6]にまとめているため参照願いたい。

RUN No.	試験項目	備考
3-1-1~6	定置試験(乾燥面)	PEM 重量:
3-2-1~6	回収試験 (乾燥面)	16.2  ton, 26.5  ton, 36.5  ton
3-4-3, 4	定置試験(残留充填材)	法体的险土效大措权
3-4-1, 2	回収試験 (残留充填材)	加得的床去仮を快艇
3-5-5, 6	定置試験(上敷き材)	上敷き材の材質:
3-5-1, 2	回収試験(上敷き材)	ポリカーボネート
3-11-1, 2	定置試験(散水)	同心味の通水笠な増埓
3-11-3, 4	回収試験(散水)	回収時の湧水寺を快嫌

表 5.3.4-1 地上検証試験の試験項目

08	.8			試験状態	<b>村</b> (1)	亚均流量	亚物压力			
No.	項目	重量 (t)	前方 PEM	上敷 き材	散水	ベント ナイト	目地	十均序工重 (mm)	(Nm <sup>3</sup> /min)	(MPa)
RUN3-1-1,2	定置/36.5ton/低速	36.5						48.9	24.8	0.36
RUN3-2-1,2	回収/36.5ton/低速	36.5						49.9	26.3	0.37
RUN3-4-1,2	回収/36.5ton/低速/ベントナイト	36.5			0	0		50.0	25.6	0.36
RUN3-4-3,4	定置/36.5ton/低速/ベントナイト	36.5			0	0		49.9	25.5	0.36
RUN3-5-1,2	回収/36.5ton/低速/上敷き材	36.5		0				50.6	26.2	0.37
RUN3-5-5,6	定置/36.5ton/低速/上敷き材	36.5		0				50.7	26.2	0.37
RUN3-11-1,2	回収/36.5ton/低速/散水	36.5			0			48.5	25.2	0.36
RUN3-11-3,4	定置/36.5ton/低速/散水	36.5			0			47.8	23.8	0.36

表 5.3.4-2 地上検証試験における浮上量、流量及び圧力



(a) 定置・回収装置(排土板取付け状態)



(b) 充填材除去後の残留充填材の模擬状態



(c) 定置・回収装置による PEM 把持状況



(d) PEM 回収後の残留充填材の模擬状態

図 5.3.4-6 地上検証試験における残留材充填面の走行試験状況



図 5.3.4-7 地上検証試験における台座損傷箇所(地上検証試験) 外観 36.5t回収(距離と押引力) -14 -12 é • -10 • 押引力(kn) -8 -6 -4 2 -2 0 3 4 5 6 7 2 距離(m) 定常\_モルタレ(kN) • 目地通過時(kN) • 定常\_コンクリート(kN) 丰定常(kN) . 台座幅 ガイドローラ 1262 1000 距離 基準 目地 台座 at. - ILTLE LIFT-1 LIFT-2 (モルタル面) (コンクリート面)



	項目	試験状態		押引力(kN)								
No.		重量 (ton)	モルタル仕上げ面 (LIFT1)		打設⊐ンクリート面 (LIFT2)		目地部 (LIFT1-LIFT2)		台座損傷箇所			
		(con)	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大		
RUN3-1-1,2	定置/36.5ton/低速	36.5	5.15	6.63	8.40	8.98	7.59	11.57	6.90	14.18		
RUN3-1-3,4	定置/16.2ton	16.2	2.95	3.72	4.77	5.11	3.96	5.11	3.66	6.79		
RUN3-1-5,6	定置/26.5ton	26.5	4.35	5.72	6.52	7.05	5.87	8.61	5.73	11.71		
RUN3-2-1,2	定置/36.5ton/低速	36.5	-4.74	-5.97	-7.42	-8.26	-6.43	-9.57	-6.06	-12.06		
RUN3-2-3,4	回収/16.2ton	16.2	-2.31	-2.74	-4.11	-4.60	-3.30	-5.51	-3.16	-6.99		
RUN3-2-5.6	回収/26.5ton	26.5	-3.94	-4.54	-5.92	-6.49	-5.04	-8.83	-5.10	-10.01		

表 5.3.4-3 地上検証試験における重量別の押引力について(乾燥面)

表 5.3.4-4 地上検証試験における走行路面別の押引力について

	試験状態					押引力(kN)								
No.	No. 項目		上敷 き材	散水	ベント	モルタル仕上げ面 (LIFT1)		5 打設コンクリート面 (LIFT2)		目地部 (LIFT1-LIFT2)		台座損傷箇所		
		(111)	2		<i>,</i>	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	
RUN3-1-1,2	定置/36.5ton/低速	36.5				5.15	6.63	8.40	8.98	7.59	11.57	6.90	14.18	
RUN3-2-1,2	回収/36.5ton/低速	36.5				-4.74	-5.97	-7.42	-8.26	-6.43	-9.57	-6.06	-12.06	
RUN3-4-1,2	回収/36.5ton/低速/ベントナイト	36.5		0	0	-5.16	-6.85	-8.08	-8.81	-6.73	-9.14	-6.07	-8.61	
RUN3-4-3,4	定置/36.5ton/低速/ベントナイト	36.5		0	0	6.96	9.71	10.71	11.64	9.34	13.60	8.10	11.69	
RUN3-5-1,2	回収/36.5ton/低速/上敷き材	36.5	0			-3.05	-4.49	-3.64	-4.42	-3.37	-8.96	-3.64	-10.82	
RUN3-5-5,6	定置/36.5ton/低速/上敷き材	36.5	0			5.57	7.32	3.57	4.43	5.54	11.30	5.89	12.56	
RUN3-11-1,2	回収/36.5ton/低速/散水	36.5		0		-5.92	-7.32	-9.00	-10.04	-7.66	-10.89	-7.34	-15.08	
RUN3-11-3,4	定置/36.5ton/低速/散水	36.5		0		6.35	8.24	9.66	10.40	9.34	13.13	8.27	16.21	

表 5.3.4-5 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

	押引え	カ[kN]	鋼製面との比較倍率				
土存五	(摩擦	係数)	(鋼製面:1.7 kN)				
定1] 囬	モルタル	打設コンクリ	モルタル	打設コンクリ			
	仕上げ面	ート面	仕上げ面	ート面			
乾燥面	5.15	8.40	3.0 倍	4.9 倍			
	(0.014)	(0.023)					
散水面	6.35	9.66	3.7 倍	5.7 倍			
	(0.017)	(0.026)					
充填材残留面	6.96	10.71	4.1 倍	6.3 倍			
(ベントナイト)	(0.019)	(0.029)					
上敷き材面	5.57 (※)	3.57	3.3 倍	2.1 倍			
	(0.015)	(0.010)					

※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。



図 5.3.4-9 地上検証試験(乾燥面)における押引力の分布図(重量別)



図 5.3.4-10 地上検証試験における押引力の分布図(走行区間別)



図 5.3.4-11 分布図(箱ひげ図)の見方

- 2) 地上検証試験の評価
- a 昇降性・走行性に関する評価
- (a) PEM 重量による対応可否について

PEM 重量を 16.2 ton、26.5 ton、36.5 ton と変更させても目標浮上量で浮上でき、16.2 ton 以下においても能力的に余裕ができることから、PEM 重量が 36.5 ton 以下であれば、浮上 できると言える。

(b) 路面環境による押引力の影響について

(区間別押引力)

走行区間別に押引力を比較すると、モルタル仕上げ面(LIFT1)と打設コンクリート面 (LIFT2)ではモルタル仕上げ面の方が小さい傾向であった。

また、図 5.3.4-11 から、モルタル仕上げ面(LIFT1)及び打設コンクリート面(LIFT2) の押引力と比較して、目地部及び台座損傷箇所の押引力は、分布にばらつきがあり、目地部 及び台座損傷程度(損傷形状や深さ等)が押引力へ大きく影響すると考えられる。

#### (路面別押引力)

走行面別に押引力を比較すると、表 5.3.4-5 に示すとおり打設コンクリート面に対する大 小関係は以下となった。

(鋼製面 <) 上敷き材面 < 乾燥面 < 散水面 <充填材残留面(ベントナイト) 本結果について、以下に考察する。

- 打設コンクリート面に上敷き材を敷設した場合、台座損傷等の他の影響が無い限り、 乾燥面よりも小さい押引力で走行できると言える。よって、万が一、打設コンクリー ト面の状態が悪く想定以上の押引力が必要となった場合でも、上敷き材を敷設するこ とで、定置・回収装置が走行できる目途が得られた。
- 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。
- ▶ 打設コンクリート面の乾燥面と充填材残留面を比較すると、充填材残留面の方が押引 力が大きい傾向であったが、乾燥面と比較し 1.3 倍程度(10.71 kN÷8.40 kN≒1.3) と大きな差ではないと言えるため、充填材が残留した場合でも押引力への影響は小さ く、走行性への影響も小さいと考える。
- 打設コンクリート面の乾燥面と散水面を比較すると、散水面の場合の方が押引力が大きい傾向であった。散水面の方が大きい押引力となる理由としては以下と考える。コンクリート面には砂埃等の粉塵がある。そのため、乾燥面の場合、摩擦関係は"エアベアリング"と"乾燥したコンクリート+乾燥した粉塵"の状況となり、粉塵のない環境よりも滑りやすい路面だと考えられる。一方、散水面の場合、エアベアリングが通過した箇所は乾燥傾向にあり、エアベアリングから漏れ出る空気により、水自身は弾かれてしまい、水の上を走行しているというよりは湿ったコンクリート及び湿った

粉塵の上を走行している状況にあると考えられる。この場合、摩擦関係は"エアベア リング"と"湿ったコンクリート+湿った粉塵"の状況となり、滑りにくい(粉塵に よる滑りやすさを得られない)路面だと考えられる。よって、散水面の方が乾燥面よ りも押引力が大きくなったと考える。

b 遠隔操作性に関する評価

散水面及び充填材残留面においても、検出器によるインターロック機能及びカメラ映像 (図 5.3.4-12、図 5.3.4-13 を参照)による監視のもと、遠隔運転にて所定の位置に PEM を 定置及び回収することができた。残留充填材(ベントナイト)や水が、エアベアリングから 漏れ出る空気により飛散することはなく、遠隔操作性への影響は小さいと考えられる。



図 5.3.4-12 地上検証試験における充填材残留面走行時の操作卓モニタ映像



図 5.3.4-13 地上検証試験における散水路面走行時の操作卓モニタ映像

c トーションビームの効果

トーションビームを搭載して各試験を実施したところ、一部、台座の損傷が確認されたこ とから、台座に負荷が掛かっていると言える。ただし、動作確認時に確認された昇降時の異 音はなく、ガイドローラによる挟み込みは緩和しており、トーションビームの追加は一定の 効果があると考えられる。今後は、更なる対策の検討、実証試験等により、台座の損傷防止 対策を講じていく必要がある。

(4) 地上検証試験のまとめ

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搬送定置・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 に付与した機能(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

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、搬送定置・回収装置を遠隔で操作できることを確認した。

打設コンクリート面の各種路面環境において、定置・回収装置が PEM を搬送できることを 確認し、地下実証試験に向けた準備が完了した。 5.3.5 地下環境での搬送定置・回収技術の実証(地下実証試験)

(1) 地下実証試験の目的

地下環境(幌延 URL 試験坑道 2)において、これまで製作、改良してきた定置・回収装置を 用いて、充填材除去後の地下環境で、遠隔操作にて PEM の搬送定置・回収作業が可能である ことを実証する。

- (2) 地下実証試験の試験設備
- 定置・回収装置

地上検証試験(5.3.4項)と同じ定置・回収装置を用いる。図 5.3.5-1 に試験坑道 2 に設置 した外観を示す。



図 5.3.5-1 地下実証試験における定置・回収装置 外観

# 2) 試験坑道

地下要素試験(5.3.3 項)と同じ幌延 URL 試験坑道 2 で試験を実施した。なお、目地部及 び表面気泡部については、補修を実施した。試験坑道 2 の外観を図 5.3.5-2 に、概要を図 5.3.3-3 (再掲) に示す。



図 5.3.5-2 地下実証試験における試験坑道 2 外観





図 5.3.3-3 試験坑道2(再揭)

# 3) 追加コンプレッサ

地下要素試験(5.3.3 項)の結果から、定置・回収装置の搭載コンプレッサ以外に追加空気を 供給する必要があると分かったため、電動コンプレッサを1台追加した。供給空気系統図を図 5.3.5-3 に示す。



図 5.3.5-3 地下実証試験における供給空気系統図

- (3) 地下実証試験の内容、結果及び評価
  - 1) 地下実証試験の内容及び結果

本試験では、地下環境で PEM の定置・回収作業が可能であることを実証し(RUN-01、02)、 実証後に追加試験(RUN-03 以降)を実施した。各試験内容を表 5.3.5-1 に示す。

試験の結果、検出器によるインターロック機能及びモニタに表示されたカメラ映像(図 5.3.5-4 を参照)により、操作者一人及びカメラ映像の監視者一人の計二人で負担なく地上検 証試験と同様に安定した遠隔操作ができた(図 5.3.5-5 を参照)。また、遠隔運転にて定格圧 力(0.41 MPa)以下で PEM を定置、回収することができた。

回収試験(RUN-01)(図 5.3.5-6 を参照)及び定置試験(RUN-02)での浮上量、流量及び 圧力を表 5.3.5-2 に示し、動作方向別の押引力(及び摩擦係数)と鋼製面との比較倍率を表 5.3.5-3 に示し、走行区間ごとの押引力の分布図を図 5.3.5-7 に示す。

追加試験において、走行面の損傷(表面気泡補修部の剥がれ)及び台座の損傷を確認した。 全試験終了後の台座損傷部の外観(代表)を図 5.3.5-8 に、走行面及び台座の損傷箇所を図 5.3.5-9 に示す。台座は損傷したものの、地上検証試験(5.3.4 項)と同様に、昇降時に異音は 発生していなかった。

追加試験の結果概要を以下に記載する。

- ・PEM の搬送に関する試験では全て搬送できることを確認した。(RUN-03~05, 17~28)
- ・前方 PEM へ約 10 mm まで近接できることを確認した。(RUN-05)
- ・圧力の均等となる位置調査では比較的均等となる位置を確認できた。(RUN-09~11)
- ・エアベアリング8枚ではPEM 重量を浮上できないことを確認した。(RUN-12~13)

					試験	犬態		
No.	RUN		内容	PEM重量	浮上量 (目標値)	AB 枚数	上敷き材	散水
0	RUN_00	-	初めてのPEM浮上	36.5ton	50mm	10	0	
1	RUN 01	-	回収試験			10		
2	RUN_02	_	定置試験			10		
3	RUN_03	追加試験	回収試験(上敷き材)			10	0	
4	RUN_04	追加試験	定置試験(上敷き材)			10	0	
5	RUN_05	追加試験	前方PEMへの近接試験(上敷き材)			10	0	
6	RUN 06	-	回収走行			10		
7	RUN_07	-	定置走行			10		
8	RUN 08	_	回収走行(後進走行)			10		
9	RUN_09_1	追加試験	圧力均等位置調査①			10	0	
10	RUN 09 2	追加試験	<b>圧力均等位置調査②</b>			10	0	
11	RUN_10	追加試験	<b>圧力均等位置調査③</b>			10	0	
12	RUN_11	追加試験	圧力均等位置調査④			10	0	
13	RUN_12_1	追加試験	AB8枚での浮上試験①(1,2,4,5列on)			8		
14	RUN_12_2	追加試験	AB8枚での浮上試験②(1,2,3,4列on)			8		
15	RUN 13 1	追加試験	AB8枚での浮上試験③(1,3,4,5列on)			8		
16	RUN_13_2	追加試験	AB8枚での浮上試験④(2,3,4,5列on)			8		
17	RUN 13 3	追加試験	AB8枚での浮上試験⑤(1,2,3,5列on)			8		
18	RUN_14	追加試験	AB6枚での浮上試験①(2,3,4列on)			6		
19	RUN 15	追加試験	AB6枚での浮上試験②(1,3,5列on)			6		
20	RUN_16	_	定置走行(前進走行)			10		
21	RUN_17	追加試験	回収試験			10		
22	RUN_18	追加試験	定置試験			10		
23	RUN_19	追加試験	回収試験			10		
24	RUN 20	追加試験	定置試験			10		
25	RUN_21	追加試験	回収試験(上敷き材,カバー)			10	0	
26	RUN 22	追加試験	定置試験(上敷き材,カバー)			10	0	
27	RUN_23	追加試験	回収試験(上敷き材,カバー)			10	0	
28	RUN_24	追加試験	定置試験(上敷き材,カバー)			10	0	
29	RUN_25	追加試験	回収試験(カバー)			10		
30	RUN_26	追加試験	定置試験(カバー)			10		
31	RUN_27	追加試験	回収試験(散水,カバー)			10		0
32	RUN_28	追加試験	定置試験(散水,カバー)			10		0
33	RUN 29	-	回収走行(後進走行)			10		

表 5.3.5-1 地下実証試験の試験内容

AB:エアベアリングを指す



図 5.3.5-4 地下実証試験における操作卓モニタ映像



図 5.3.5-5 地下実証試験時の遠隔操作実施状況





図 5.3.5・6 地下実証試験における回収作業実施状況

表 5.3.5-2 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 <sup>3</sup> /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

表 5.3.5-3 地下実証試験における動作方向別の押引力と鋼製面との比較

動化士白 /土石玉	押引) (摩擦	力[kN] 《係数)	鋼製面との比較倍率 (鋼製面:1.7 kN)				
期作力问/ 走们面	モルタル	打設コンクリ	モルタル	打設コンクリ			
	仕上げ面	ート面	仕上げ面	一下面			
定置(乾燥面)	7.86	6.03	4.6 倍	3.5 倍			
	(0.021)	(0.016)					
回収 (乾燥面)	6.80	5.59	4.0 倍	3.3 倍			
	(0.019)	(0.015)		10			

※: (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。



図 5.3.5-7 地下実証試験における押引力の分布図(走行区間別)



図 5.3.5-8 地下実証試験における台座損傷箇所(試験坑道2) 外観



図 5.3.5-9 地下実証試験における試験坑道2の走行面及び台座の損傷箇所

#### 2) 地下実証試験の評価

a 昇降性に関する評価

本試験での供給空気流量は、表 5.3.5-2 に示すとおり約 19 Nm<sup>3</sup>/min であり、地下要素試 験(5.3.3 項)からの想定流量(23.4 Nm<sup>3</sup>/min)及び地上検証試験の地上模擬坑道での流量 (約 25 Nm<sup>3</sup>/min)よりも少ない値となった。想定流量よりも少なかった理由は、想定流量 は目標浮上量 55 mmから算出したが、本試験では目標浮上量 50 mm(実測約 53 mm)で 実施したためと考える。また、地上模擬坑道の流量よりも少なかった理由は、本試験の実施 場所である試験坑道 2 の方が地上模擬坑道よりも凹凸状態が良かったためと考えられる。

b 走行性に関する評価

本試験での各走行面の押引力の大小関係は、表 5.3.5-3 及び図 5.3.5-7 に示すとおり、打 設コンクリート面<モルタル仕上げ面となり、地上検証試験(5.3.4 項)結果の大小関係 (モルタル仕上げ面<打設コンクリート面)と異なった。これは、表面粗度の違いによると 予想したが、表面計測(算術平均粗さ Ra:図 5.3.5-10の下段参照)の結果からは直接的な 相関を確認できなかった。ここで、材料の摩擦係数(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:図 5.3.5-10の上段参照)の大小関係を見ると、押引力の大 小関係と一致した。よって、定置・回収装置の押引力は、表面粗度にはあまり影響を受けず に、エアベアリングの材料と走行面との摩擦係数に影響を受けると考えられる。

また、本試験での走行方向別の押引力の大小関係は、表 5.3.5-3 及び図 5.3.5-7 に示すと おり、回収動作の方が定置動作よりも若干(1 kN 程度)低い値となった。これは、装置の 駆動力の伝達が牽引方向の方が、押出方向よりも円滑であったからであると考えられるが、 装置走行時の摩擦係数(押引力÷総重量)に換算すると 0.003 程度(≒1 kN÷366.5 kN) であり、走行性に与える影響は限定的であると考える。

また、台座は損傷したものの、昇降時の異音がなかったことから、ガイドローラによる挟 み込みは装置の改良により緩和したと考えられる。台座の損傷は、実際の搬送回数を考慮す ると損傷状況が悪化し走行性に影響を与えることが考えられるため、実機では損傷防止対策 が必要と考える。

c 遠隔操作性に関する評価

遠隔操作性に関し、操作者の負担を極力なくすために、インターロック機能により誤操作 の防止や、走行可否の判断を行っている。そのため、基本的に操作者はカメラ映像をモニタ にて監視し、異物等のないことを監視するだけで運転可能である。これらの機能により、操 作者一人及びカメラ映像の監視者一人の計二人で負担なく装置を遠隔操作できたことから、 良好な遠隔操作性を有していると判断できる。



<sup>(</sup>材料の摩擦係数及び算術平均粗さ)

(4) 地下実証試験のまとめ

地幌延 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。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。
- 5.4 エアベアリング方式の適用性の評価

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について記載した。

また、本事業で対象外としたが実際に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。

5.4.1 昇降性の評価

PEM の定置・回収装置は、PEM を把持するために上昇し、把持した状態を維持し、その状態で走行し、PEM を下ろすという一連の動作ができる必要がある。そこで、エアベアリング方式の定置・回収装置の運転は、装置を PEM 下まで走行させた後、装置をエアベアリングにより上昇させて PEM を把持・浮上させ、浮上状態を維持しつつ走行することで PEM を搬送させ、所定の場所で停止し、装置を下降させて PEM を定置する手順とした。

本項では、エアベアリング方式の定置・回収装置の昇降性について、(1)上昇性、(2)浮上維持 性及び(3)下降性に分けて評価した。

上昇性の評価

エアベアリング方式の定置・回収装置の上昇は、台座に定置されている PEM (36.5 ton) を把持する動作であり、安定的に実施する必要がある。

本装置の上昇は、エアベアリングに空気を供給させ、萎んでいるエアベアリングの内圧を 高くさせて膨らませることにより実施している。具体的な運転方法は、安定した装置姿勢と なるように目標浮上量(装置の4隅の高さ)を設定し、その浮上量となるように所定の流量 及び圧力の空気をエアベアリングに供給させることで、上昇させている。本装置の運転上の 制約として、エアベアリングの定格圧力(0.41 MPa)以下で上昇させることが求められる。 そこで、本装置の上昇性は、設定した曲率面において PEM 重量に対して十分な能力を有 しているか、圧力制限に対して十分な空気を供給できるかという観点で評価した。

## 1) PEM 重量に対する能力について

設定した曲率面において PEM 重量(36.5 ton)に対する定置・回収装置の能力は、各試験 (鋼製坑道試験(5.3.2 項)、地下要素試験(5.3.3 項)、地上検証試験(5.3.4 項)、地下実証 試験(5.3.5 項))の結果より、充填材除去後も想定した全ての試験環境において定格圧力以 下で、目標浮上量で浮上できたことから、十分であったと言える。

また、地上検証試験より、積載重量を 16.2 ton、26.5 ton、36.5 ton と変更させても目標浮 上量で浮上でき、16.2 ton 以下においても能力的に余裕ができることから、本装置は、PEM 重量が 36.5 ton 以下であれば、十分な能力を有すると言える。

なお、地下実証試験後の追加試験で PEM 重量 (36.5 ton。装置重量も追加すると 37.4 ton) に対して、8 枚のエアベアリングで PEM の浮上を試みたが、PEM を浮上させることができ なかったことから、本装置の打設コンクリートの曲面坑道におけるエアベアリング 1 枚当た りの荷重能力は 4.67 ton (≒37.4 ton÷8 枚) 未満であると言える。

2) 圧力制限に対する供給空気量について

地下要素試験(5.3.3 項)の結果より、設定した曲率面における凹部(き裂部及び表面気泡 部)のある打設コンクリート面に対して、定置・回収装置がPEM(36.5 ton)を搬送する際 に必要となる空気流量は、23.4 Nm<sup>3</sup>/min(安全率 1.5 を乗じ供給流量は 35.1 Nm<sup>3</sup>/min)と 算出した。地上検証試験及び地下実証試験にて、算出流量(23.4 Nm<sup>3</sup>/min)程度の空気の供 給で、エアベアリングの定格圧力(0.41 MPa)の範囲内でPEMを定置及び回収できること を実証した(表 5.3.4・2(再掲)及び表 5.3.5・2(再掲)参照)。よって、本事業で用意した走 行面においては、エアベアリングの定格圧力の範囲内で十分な空気を供給できたと言える。

ただし、走行面の凹凸状態により必要流量が変化すると考えられるため、実環境において 必要流量が増加することも考えられる。このとき、供給流量を増加させるとエアベアリング の圧力が高まり、定格圧力を超える可能性が考えられる。よって、走行面の凹凸を一定の範 囲内に抑えることが上昇性を満足させることに有効であると考えられる。さらに、走行面の 凹凸に関する状態設定が施工困難な場合に備え、装置側にも対策を講じることが望ましい。

(具体的な対策は5.5項で述べる。)

No.	項目	重量 (t)	前方 PEM	<u>試験状態</u> 上敷 き材	<sub>態</sub> 散水	ベント ナイト	目地	平均浮上量 (mm)	平均流量 (Nm <sup>3</sup> /min)	平均圧力 (MPa)
RUN3-1-1,2	定置/36.5ton/低速	36.5						48.9	24.8	0.36
RUN3-2-1,2	回収/36.5ton/低速	36.5						49.9	26.3	0.37
RUN3-4-1,2	回収/36.5ton/低速/ベントナイト	36.5			0	0		50.0	25.6	0.36
RUN3-4-3,4	定置/36.5ton/低速/ベントナイト	36.5			0	0		49.9	25.5	0.36
RUN3-5-1,2	回収/36.5ton/低速/上敷き材	36.5		0				50.6	26.2	0.37
RUN3-5-5,6	定置/36.5ton/低速/上敷き材	36.5		0				50.7	26.2	0.37
RUN3-11-1,2	回収/36.5ton/低速/散水	36.5			0			48.5	25.2	0.36
RUN3-11-3,4	定置/36.5ton/低速/散水	36.5			0			47.8	23.8	0.36

表 5.3.4-2 地上検証試験における浮上量、流量及び圧力(再掲)

表 5.3.5-2 地下実証試験における浮上量、流量及び圧力(再掲)

ſ	RUN-No.	項目	平均浮上量 (mm)	平均流量 (Nm <sup>3</sup> /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

(2) 浮上維持性の評価

エアベアリング方式の定置・回収装置の浮上維持は、把持した PEM を搬送するために実施する動作であり、走行時にも安定した状態とする必要がある。

本装置の浮上状態は、エアベアリングに圧縮空気を供給することで維持している。この浮 上状態を安定的に維持する方法として、圧縮空気の供給を装置姿勢(4隅の浮上量)に応じて 変化させる方法が考えられるが、供給量の変更指示と装置姿勢(浮上量)の変化には時間差 が生じると予想できるため、本装置は特に姿勢制御を実施しない運転方法とした。

そこで、本装置の浮上維持性は、設定した曲率面において定常時の装置姿勢(浮上量)の 変化は十分に小さいか、異常時の変化に対応可能かという観点で評価した。

## 1) 定常時の装置姿勢(浮上量)の変化について

鋼製坑道試験(5.3.2 項)にて、装置姿勢(浮上量)の変化量を確認すると、走行区間に おける浮上量の変化は最大 3 mm 程度であった(図 5.3.2-6(再掲)及び図 5.3.2-10(再 掲)参照)。この浮上量変化量は、最終的に設定した目標浮上量(50 mm)と最小浮上量(35 mm : PEM 引きずり防止の観点によるインターロック作動条件)との幅に対して十分小 さく、設定した曲率面において定置・回収装置は安定した浮上維持ができると言える。

ただし、目地部のような面状態が極端に変化する箇所において、突発的な押引力の増加 (図 5.3.2-8(再掲)参照)を確認しており、本事象は浮上量の変動も一因と考えられる。 突発的な押引力の増加は、エアベアリングの空気膜形成が異常であることを示しており、 エアベアリングを摩耗・損傷させる可能性を高くすると考えられる。実際、地上検証試験 (5.3.4 項)では、エアベアリングの摩耗・損傷を確認している。

よって、上記(1)と同様に、走行面の凹凸を一定の範囲内に抑えることが定常時における 浮上状態の安定性に有効と考えるが、これが困難な場合に備え、装置側にも対策を講じる ことが望ましい。また、エアベアリングの摩耗・損傷は、PEMの搬送の遅滞等につながる ことから、今後、耐久性の向上が必要と考える。(対策は 5.5 項で述べる。)



図 5.3.2-6 鋼製坑道試験(目標浮上量 45 mm での定置動作)における浮上量(再掲)



図 5.3.2-10 鋼製坑道試験におけるコンプレッサ吐出流量の周期変動と浮上量の関係(再掲)



図 5.3.2-8 鋼製坑道試験(目標浮上量 45 mm での定置動作)における走行データ(再掲)

2) 異常時の装置姿勢(浮上量)の変化について

地下要素試験(5.3.3 項)にて、設定した曲率面において打設コンクリート面の凹部(き裂部及び表面気泡部等)を起点として、浮上量が降下して走行不可(スタック)事象が発生した。本事象は、凹部からの空気漏れが要因と推定され(図 5.3.3-6(再掲)及び図 5.3.3-7(再掲)参照)、漏れた分、過剰に空気を供給することで対応可能と考えられる。本事業では、目標浮上量を40 mm 設定から55 mm 設定(最終的には50 mm 設定)に供給空気を増加することで、対応可能であることを確認した。

しかし、実際の処分坑道の走行面では、コンクリート面の場合、回収維持期間中にき裂の 発生及び進展等により状態が悪化することも予想され、これらの凹部により空気漏れ量が増 加する可能性が考えられる。そこで、さらに供給空気量を増加させる対応が考えられるが、 上記(1)のとおり、供給空気流量を増加させるとエアベアリングの圧力が高まり、定格圧力を 超える可能性が考えられる。

よって、上記(1)と同様に、走行面の凹凸を一定の範囲内に抑えることがスタック事象を発 生させない対応として有効と考えるが、これが困難な場合に備え、装置側にも対策を講じる ことが望ましい。(具体的な対策は 5.5 項で述べる。)



2. スタックイメージ 図 5.3.3-7 スタックパターン2のイメージ図(再掲)

(3) 下降性の評価

7// 111

エアベアリング方式の定置・回収装置の下降は、把持した PEM を台座に定置するために 実施する動作であり、空気の供給停止によりエアベアリング内の圧力を下げる(エアベアリ ングを萎ませる)ことで、PEM (36.5 ton)の自重を利用して実施している。

そこで、下降性の評価は、PEM 及び台座に影響を与えないかという観点で評価した。

1) PEM への影響

異音や PEM の損傷なく PEM を昇降させ、台座に着床できたことから、定置・回収装置での下降(及び上昇)による PEM への影響はないと言える。

2) 台座への影響

地上検証試験及び地下実証試験において、昇降時に異音は発生しなかったが、コンクリー ト製の台座が損傷した。台座の損傷箇所は昇降位置付近に多いことから、昇降時に台座に負 荷を与えたと考えられる。

本試験の実施回数の範囲では、台座損傷状態においても PEM の定置・回収作業は可能で あったが、実際の搬送回数を考慮すると損傷状況が悪化することが考えられ、走行性に影響 を与える可能性が高いことから、台座の損傷防止対策が必要である。(具体的な対策は 5.5 項 で述べる。)

(4) まとめ

上記(1)~(3)により、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、走行不可(スタック)となる事象を避けるためには、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。(対策は 5.5 項で述べる。)

5.4.2 走行性の評価

エアベアリング方式の定置・回収装置は、PEM を把持した状態で、装置を適切に走行させて、 PEM を搬送させる必要がある。よって、本装置は、エアベアリングの摩擦抵抗の低減効果を活 用し、PEM を把持した状態で、設定した走行速度で走行し、設定した停止精度内で停止する装 置とした。

本項では、本装置の走行性について、設定した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が得られたか、設定した走行速度及び停止精度を満足したかという観点で 評価した。

(1) 摩擦抵抗の低減効果について

設定した曲率の鋼製面における装置走行時の摩擦係数(=押引力÷(定置部重量+積載重 量))は、鋼製坑道試験(5.3.2 項)より、0.005 であることが分かった(表 5.3.2-3(再掲) 参照)。理想的な平面に対する摩擦係数が 0.001~0.007[1]であることから、曲面形状の走行 面に対してエアベアリングが適切に作動していることを確認した。

設定した曲率の打設コンクリート面においても、実環境で想定される走行面状態(乾燥面、 散水面、充填材(ベントナイト)残留面、上敷き材面)での押引力は、地上検証試験(5.3.4 項)及び地下実証試験(5.3.5 項)から、鋼製面を基準にすると2.1~6.3 倍(表 5.3.4-5 及び 表 5.3.5-3(再掲)参照)となり、装置走行時の摩擦係数に換算すると0.01(≒3.57÷366.5) ~0.03(≒10.71÷366.5)となった。また、走行面状態別の押引力の大小関係は以下となった。

(鋼製面<) 上敷き材面 <乾燥面 < 散水面 < 充填材残留面

最も力を要する充填材残留面において、押引力は最大で 12 kN 程度であり、ばらつきは 4kN 程度であった(図 5.3.4·10(再掲)参照)ことから、安全側に評価しても今回走行面に おける装置走行時の摩擦係数は 0.04 (≒ (12+4) ÷366.5)程度となる。

これらの装置走行時の摩擦係数は、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 5.3.5-10(再掲)参照)と比べると、一桁以上低い値であるこ とから、エアベアリングによる摩擦抵抗の低減効果は得られたと評価できる。

ただし、充填材残留面での走行では残留充填材が捲れて堆積し、押引力は残留状態によっ て変わると考えられることから、充填材を適切に除去することが望ましいと言える。

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)

表 5.3.2-3 鋼製坑道試験における押引力及び摩擦係数(再掲)

※: (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。

ここで、速度安定区間の押引力は、加速完了後の速度が一定区間での押引力と定義した。

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

※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。

動作士白/土仁五	押引力[kN] (摩擦係数)		鋼製面との比較倍率 (鋼製面:1.7 kN)	
動作方问/ 走行面	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
定置(乾燥面)	7.86 (0.021)	6.03 (0.016)	4.6 倍	3.5 倍
回収(乾燥面)	6.80 (0.019)	5.59 (0.015)	4.0 倍	3.3 倍

表 5.3.5-3 地下実証試験における動作方向別の押引力と鋼製面との比較(再掲)

※: (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。



図 5.3.4-10 地上検証試験における押引力の分布図(走行区間別)(再掲)



図 5.3.5-10 地上検証試験及び地下実証試験における表面計測結果(再掲) (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)

(2) 走行速度及び停止精度について

1) 走行速度について

各試験において、設定した走行速度(5 m/min)での PEM の搬送ができており、装置が走行 性能を満足することを確認した。実機の巡航速度は今回設定した走行速度より早くなると考え られ(1 km/hr = 16.6 m/min の想定)、駆動力の増強が必要と考える。

なお、処分坑道に排水勾配を付ける場合は、1/1000の勾配につき、押引力が追加で 0.37 kN (≒36.5 ton (PEM 重量) +0.9 ton (定置部装置重量))×9.8 (重力加速度)×1/1000 (勾配)) 定置作業または回収作業時に増加するため、これについても勾配に応じた駆動力の増強を検討 する必要がある。 停止精度について

停止精度について、設定した停止精度(20 mm)に対して、鋼製坑道試験(5.3.2 項)の結果、 目標停止位置に対する実測値のずれは最大 5 mm であり、装置が停止性能を満足することを確 認した。この停止精度は、前方に定置する PEM との離間距離は定まっていないが、現状 100~ 150 mm を想定しており、十分な性能であると考える。

また、地下実証試験後の追加試験において、前方に定置済みの PEM に対して約 10 mm まで 近接できることを確認した。なお、離間距離を 0 mm にすると、PEM 同士の接触により、回収 時に PEM 重量による荷重以上の荷重が必要となることが予想され、エアベアリングの能力を 超えて上昇不可となることが懸念される。よって、離間距離を極限まで短くする場合には、円 盤上の緩衝材を PEM に抱かせる等の PEM 同士の接触を回避させる工夫が必要であると考え られる。

(3) まとめ

(1)、(2)より、エアベアリング方式の定置・回収装置は、エアベアリングの機能である摩擦抵抗の低減効果が得られ、設定した走行速度及び停止精度を満足していることを確認した。

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。

5.4.3 遠隔操作性の評価

定置・回収装置は、PEMの定置・回収作業を遠隔で操作でき、異常時には放射線及び高温環 境下で人が立ち入れないことを想定し、救援できる状態になることが重要である。

以下に、エアベアリング方式の定置・回収装置の遠隔操作性について、定置・回収作業を安 全に運転できたか、救援できる状態になるかという観点で評価した。

(1) 運転の安全性について

カメラによる映像にて本装置の状態を常時監視でき、検出器からの検出値を基にしたインタ ーロック機能により、遠隔操作にて定置・回収装置で安全に PEM を定置・回収できることを 確認した。装置に設置したカメラ及び検出器を図 5.3.1-8 (再掲)に、主なインターロック機能 に対する確認結果を表 5.3.2-2 (再掲)に示す。地下環境での運転においても、地下実証試験 (5.3.5 項)では操作者一人及びカメラ映像の監視者一人の計二人で負担なく安全に遠隔操作で きることを確認した (図 5.3.5-5 (再掲)参照)。

なお、装置や台座の異常やエアベアリングの劣化等には、動作音も重要な情報となった。本 事業では装置周辺で遠隔操作していたが、実環境では装置から離れた場所で操作するため、実 機では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望めると考える。
• カメラ(ライト付)

No.	名称	個数	機能
Α	前方確認カメラ1	1	
В	前方確認カメラ2	1	定打面、音座上の確認
С	中腹カメラ(上)	1	PEMと坑道の接触確認
D	中腹カメラ(下)	1	エアベアリング部のPEM接地面の確認
Е	後方確認カメラ1	1	
F	後方確認カメラ2	1	正行面、古座上の確認
G	全体監視カメラ	1	定置装置を後方から俯瞰的に確認(試験用)

● 検出器

No.	名称	個数	機能
1	浮上量検出器1	1	
2	浮上量検出器2	1	た送売からの巡上号を拾山
3	浮上量検出器3	1	小坦面からの洋工里を快山
4	浮上量検出器4	1	
5	PEM検出器1	1	DEMの押持位業を検出
6	PEM検出器2	1	PEMの指行位直を検出
$\overline{\mathcal{O}}$	前方検出器1	1	
8	前方検出器2	1	前方(空面、PEM)との距離を検出
9	後方検出器1	1	後士店止 <b>位罢</b> 去检山
10	後方検出器2	1	後万停止位置を快出
(1)	在荷検出器1	1	DFM 抽体能力や山
(12)	在荷検出器2	1	FEMI応持仏感を使山
(13)	牽引力検出器	1	牽引力確認用の検出器





図 5.3.1-8 定置・回収装置に設置するカメラ及び検出器(再掲)

インターロック機能	確認結果					
PEM の引きずり防止	・ 浮上量検出器により浮上量を検出し、設定値以下になると自動					
	的に走行を停止することを確認した。					
	・ 牽引力検出器により押引力を検出し、設定値以上になると自動					
	的に走行を停止することを確認した。					
衝突防止	<前進時>					
	・ 前方距離検出器により障害物との接近距離を検出し、設定値以					
	下になると、自動的に走行を停止することを確認した。					
	<後進時>					
	・ 後方距離検出器により障害物との接近距離を検出し、設定値以					
	下になると、自動的に走行を停止することを確認した。					
	<pem 回収時=""></pem>					
	・ PEM 検出器により PEM と定置部との接近距離を検出し、設					
	定値以下になると、自動的に走行を停止することを確認した。					

表 5.3.2-2 主なインターロック機能に対する確認結果(再掲)



図 5.3.5-5 地下実証試験時の遠隔操作実施状況(再掲)

(2) 救援性について

定置・回収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 (36.5 ton)を台座に着床できることを確認した。これにより、異常時においてもエアベアリングへの供給空気を停止させることで、PEM 荷重から装置を解放し、定置・回収装置を救援できる状態になると評価できる。

(3) まとめ

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。

### 5.4.4 環境条件への評価

本事業で検討対象外としたが実際に想定される環境条件として、放射線環境及び高温環境が 想定される。そこで、放射線環境及び高温環境に対するエアベアリング方式の定置・回収装置 への適用性を以下に評価した。

(1) 放射線環境に対する評価

現在想定されているそうぎょう段階における PEM の表面線量率は、3.1 µSv/h (30 年冷却 後)程度[7]と試算されており、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。

(2) 高温環境に対する評価

地下環境(地温勾配)ならびに PEM や坑道換気の設計や廃棄体の特性にも依存するが、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。

現状、温度の影響を受けやすい主な部品としてエアベアリングが挙げられる。本事業で使用 したエアベアリングの耐熱性は 70℃であるが、使用温度(処分坑道の環境温度に依存するエア ベアリングへの供給空気温度)が 70℃を超える場合は、エアベアリングの材質変更等を検討す る必要がある。

### 5.5 実機に向けた研究課題と将来拡張性

定置・回収装置へのエアベアリング方式の適用性評価を踏まえて、実機に向けた研究課題と して、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について示し、こ れらを踏まえて将来拡張性を記載する。

5.5.1 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([9])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(1)PEM 昇降部及び (2)台座目地部への対策を以下に記載する。

### (1) PEM 昇降部への対策

- 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(図 5.5.1-1 を参照)。
  - ・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(図 5.5.1-1 を参照)。
  - ・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。

### 2) 台座形状の変更

本事業では、台座の壁面形状は鉛直であり、エアベアリングに空気を供給させると、定置部 は走行面に対して垂直に上昇する力が発生し、円形坑道であるため定置部(先端)が内側に狭 まり、台座と定置部(先端側ガイドローラ)が接触した状態で PEM(36.5 ton)を上昇させ、 台座に上昇方向の力が掛かり、欠け易い台座上方部の角で損傷が発生したと推定できる(図 5.5.1-2 を参照)。

そこで、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(図 5.5.1-1 を参照)。これに併せて、以下の定置部の高速方法の変更を実施する。

### 3) 定置部の拘束方法の変更

本事業で開発した定置部は、トーションビームによる補強等も実施して2列のエアベアリン グを一体に拘束し、基本的に鉛直方向に上昇する構造とした。これに対して、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 5.5.1-2 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。



図 5.5.1-2 台座損傷対策案(定置部の拘束方法の変更)

(2) 台座目地部への対策

本事業では、施工性の観点から、1m 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。

5.5.2 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)事象を避けるため、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1mm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。

以下に、昇降性を確保させる対策を示すとともに、その対策によるエアベアリングの耐久性 向上への効果も示す。

上敷き材の設置

走行面に上敷き材を設置することで、走行面の凹凸を低減させ、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させて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させる。本対策の効果は、本事業でも確認し ており、確実に効果を上げることができると考える。

ただし、定置工程では予め上敷き材を設置し、PEM を定置した後に徐々に上敷き材を回収す ることで、上敷き材を残置とせずに実施できると考えるが、巻き取り装置等が別途必要となる。 また、充填材除去後の回収工程については、充填材除去毎に定置済み PEM の下に上敷き材を 設置させる必要があり工程が煩雑となる。よって、特に回収工程では本対策以外の対策を適用 するのが現実的であると考える。

(2) 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、凹部での漏れ を無くし、エアベアリングへの空気供給量を抑制させて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。本対策は、操 作員の負荷を考慮して自動化すべきであり、障害となる凹部位置を試走等で事前に記憶する等 により実現可能と考える。

なお、現在の PEM 仕様に対し、本事業で開発した定置・回収装置に本対策を適用すると、エ アベアリング枚数を現状の枚数(10枚:片側5枚)から2枚(片側1枚)追加(※)し、凹部 直上のエアベアリングを一時的に休止させる対応(図 5.5.2-1 を参照)が可能と考えられる。 ただし、エアベアリング一時休止時の荷重バランス変化による装置姿勢の変化等については、 実証試験等により確認し、必要に応じて制御方法を検討する必要がある。

 ※:エアベアリングは1枚あたり 533 mm であり、PEM 長さは 3343 mm のため、PEM の 投影面積範囲内に 12枚(片側6枚<3343 mm÷533 mm/枚)の配置は可能</li>



図 5.5.2-1 凹部通過時のエアベアリングを一時休止させるイメージ

(3) エアベアリング機構の改善

回収工程では、回収維持期間中にき裂が発生・進展して、走行面の状態が悪化する場合が予 想される。この場合でも、エアベアリングへの供給空気量を増やすことで、多少の状態悪化に は対応可能と考える。しかし、厳しい状態悪化の場合、エアベアリングの圧力制限により供給 空気量を無制限に増加できず、走行不可となる可能性が考えられる。そこで、以下の2つの対 策について検討する。

1) エアベアリング(別系統供給)の開発

浮上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(図 5.5.2-2 参照)を開発 する。これにより、凹部等により空気が漏れても浮上を維持できる機構となる。

ただし、漏れ流量が多い時には空気膜を形成できないため、装置全体で余剰能力を要すると ともに、エアベアリングの摩耗・損傷が発生すると考える。また、本機構の場合、凹凸部通過 時の安定走行のため、上昇用の空気系統はバッファータンクに接続する等により、エアベアリ ングに弾力を持たせる必要があると考える。



図 5.5.2-2 上昇用と空気膜形成用を別系統とした空気供給イメージ

2) 空気漏れ抑制エアベアリングの開発

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。本事業で使用 したエアベアリングの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により、凹 部通過時の空気漏れの抑制及び摩耗・損傷の抑制に有効であると考えられる。

上記のエアベアリングに類するものに、例えば"ギャップマスター[1]"(15 mm の隙間及び 3 mm の段差を通過可能)等が商品化されており、適用を検討できると考える。ただし、ギャッ プマスターは、本事業で使用したエアベアリングに対して耐荷重能力が約50%であることから、 1 列6枚の4列配置(※1)等を検討する必要がある。

- ※1:1列6枚の4列配置の場合、本事業で開発した定置・回収装置に対し約96%(=0.5×(1+0.6(※2))×6枚÷5枚)の耐荷重能力となるが、本事業の装置定格には余裕(定格 圧力0.41 MPa に対して地下実証試験での平均圧力は0.32 MPa)があったことから、問題ないと言える。
- ※2:外側に設置した物は、内側に設置した物に比べると、鉛直方向への支持効率が悪く約 60% (cos 60°(外側設置角度)÷cos 34°(内側設置角度))の耐荷重能力となる。

(4) 昇降性の確保及びエアベアリングの耐久性向上のまとめ

上記の検討結果を受けて、昇降性を確保するための各対策とそれに対するエアベアリングの 耐久性向上への寄与について、以下に整理する。

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。

2) 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。

- 3) エアベアリング機構の改善
  - (a) 上昇用と空気膜形成用の空気供給を別系統化

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。

5.5.3 将来拡張性

エアベアリング方式の定置・回収装置は、5.5.1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) 5.5.2 に述べた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。

- 第5章 参考文献
  - [1] 株式会社コーテック HP http://www.cotech-inc.com/movingsys.html
  - [2] 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.
  - [3] 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.
  - [4] 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.
  - [5] 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.
  - [6] 原子力環境整備促進・資金管理センター: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 報告書, 2019.
  - [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ー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.
  - [8] 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成26年度地層処分技術調査等事業(地層処分回収技術高度化開発)報告書,2015
  - [9] 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

## 第6章 地層処分実規模試験施設の運用

6.1 概要

「地層処分実規模試験施設(原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター内)」は、実規模・ 実物を基本として(実際の放射性廃棄物は使用しない)、地層処分に使用される材料の性質、緩 衝材定置技術など操業に係る工学技術の実現性、地層処分の安全確保の考え方などを実感・体 感し、国民の理解を促進するための施設である。本事業では、この地層処分実規模試験施設に 新たな設備を整備するとともに、施設の一般公開および緩衝材定置試験等の実施により、国民 への理解促進活動を実施した。

本章では、6.2 に「地層処分実規模試験施設の運用」、6.3 に「地層処分実規模試験施設の来館 者調査および分析」について報告する。

6.2 地層処分実規模試験施設の運用

6.2.1 運用概要

これまで、資源エネルギー庁の委託事業として、平成21年度~平成25年度地層処分実規模 設備整備事業、平成26年度地層処分実規模設備運営等事業では、竪置き・ブロック方式におい て緩衝材ブロックを真空把持で定置する緩衝材定置試験装置の開発、地層処分の操業技術に係 る研究開発及び我が国の地層処分事業の理解促進を目的とした「地層処分実規模試験施設」(以 下、実規模施設)の整備を実施した[1]~[6]。地層処分実規模試験施設の外観および施設内全景 を図 6.2.1-1に、施設内全体図を図 6.2.1-2に、主な展示物を図 6.2.1-3に示す。

本事業では、実規模試験施設において、緩衝材除去システム等の新たな設備を整備するとと もに、施設を活用した公開試験や来館者への説明等の理解促進活動を実施した。以下にその活 動内容について述べる。なお、以下に示す活動内容の詳細は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)報告書,2016~2018[7]~[10]を参照のこと。

- 施設の一般公開
- 緩衝材定置試験の実施
- ・ ベントナイト体感試験の実施
- 緩衝材可視化試験の公開
- 広報活動



(a) 実規模試験施設 外観 (b) 実規模試験施設内 全景 (1F) 図 6.2.1-1 地層処分実規模試験施設



図 6.2.1-2 地層処分実規模試験施設内 全体図



オーバーパック

緩衝材







模擬処分孔

図 6.2.1-3 施設内の主な展示物

### 6.2.2 地層処分実規模試験施設の整備

本事業では、地層処分実規模試験施設に搬送定置・回収技術に関する理解促進を目的として、 以下に示す設備を新たに整備した。(図 6.2.2-1)

(1) 緩衝材除去装置

平成27年度に、塩水を利用して竪置き・ブロック方式の緩衝材ブロックを除去する緩衝材除 去装置を整備した。塩水を利用した緩衝材除去技術は、除去時に塩水を利用することで、緩衝 材の主成分であるモンモリロナイトの電気的結合力による維持を失わせ、緩衝材が浸漬崩壊挙 動を示す原理を利用している。

### (2) 緩衝材定置装置の遠隔・監視機能の整備

緩衝材ブロックの定置運搬作業における監視機能やその方法についてまとめるとともに、緩 衝材定置装置による定置工程において必要となる監視機能を抽出し、緩衝材定置装置に監視機 能を追加するための制御盤、監視カメラ等の遠隔操作設備を設置した。



図 6.2.2-1 緩衝材除去装置および緩衝材定置装置の遠隔操作設備

6.2.3 施設の一般公開

地層諸処分実規模試験施設は、国民への高レベル放射性廃棄物地層処分への理解を深めるこ とを目的に施設内を一般公開している。以下にその詳細について述べる。

(1) 開館日

幌延深地層研究センター「ゆめ地創館」と同様に、以下の様に実施した。

- ・開館期間 2015 年 4 月 1 日~2020 年 3 月 31 日
- ・開館時間 9:00~16:00
- ・休館日 毎週月曜日(休館日が祝日または振替休日の場合は水曜日)
   年末年始(12月29日~1月3日)

(2) 来館者への対応

来館者を受け入れる体制として、試験員を常時2名配置し、来館者に対して本事業の概要、 地層処分の概要、施設内の展示物や試験内容について説明を行った。

2015 年度~2019 年度(2月末)の実規模試験施設の来館者数を図 6.2.3-1 に示す。各年度に 延べ5,000 人~6,000 人程度の来館者数であり、5ヶ年合計の実規模試験施設の来館者数は2020 年 2月末で約 28,200 人となっている。(2010 年度実規模試験施設開館以来の延べ来館者数は 約 60,800 人)

来館者への説明方法として、平成22年度の施設開館時では、パネルに沿って施設内を巡る基 本コース(およそ10分)から、特に詳しい説明を希望される方や専門家向けの30分超のコー ス等を設定した[11]。来館者への正確な情報を伝えるため説明マニュアルを整備し、説明内容が 一定となるようにした。その後、実際に来館者への説明対応を実施している試験員の経験等を 踏まえ、現在では、当初計画したコースに沿った説明ではなく、説明や会話を通した来館者の 反応に留意しつつ興味を示す部分ではより詳細な説明や会話に努めるなど、来館者の関心の度 合いに合わせた対応を実施している[12]。



図 6.2.3-1 実規模試験施設の来館者数(2015~2019 年度)

### 6.2.4 緩衝材定置試験の実施

2015 年度より5年間に渡り、来館者に本施設に対する理解を深めてもらう事を目的として、 北海道経済産業局が主催する「おもしろ科学館 in ほろのべ」の開催日に併せ、緩衝材定置試験 を実施した。緩衝材定置試験は、模擬処分孔に模擬緩衝材ブロックを把持・搬送及び定置する 動作を基本とし、把持機構及び工程時間、緩衝材ブロックの定置位置および遠隔操作・監視カ メラによる確認方法等を試験の確認項目として実施した。緩衝材定置試験の基本動作を図 6.2.4-1 に示す。



- 動作1:天井クレーンを使用し、緩衝材台車へ模擬緩衝材ブロックを乗せる。
- 動作2:緩衝材台車をテレスコピック下部へ移動させる。
- 動作3:緩衝材台車に乗せた模擬緩衝材ブロックをテレスコピックの下で停止させる。
- 動作4:テレスコピックにて模擬緩衝材ブロックを真空把持する。
- 動作5:緩衝材台車を定位置(始動位置)へ移動する。
- 動作6:模擬処分孔に模擬緩衝材ブロックを定置する。
- 動作7:緩衝材定置後にテレスコピックを上部へ移動させる。

図 6.2.4-1 緩衝材定置試験の基本動作

### 6.2.5 ベントナイト体感試験の実施

実規模試験施設では、公開中の緩衝材ブロックの機能(低透水性、自己シール性など)の説 明に加えて、緩衝材ブロックの原材料であるベントナイトを使用した体感試験も併せて実施し た。

体感試験では、皿に敷き詰めたベントナイトに食紅で着色した水を垂らして絵を描き、吸水 したベントナイトをフライ返し等によりすくい上げることで、来館者にとって馴染みの薄いベ ントナイトの性質の理解向上を図った。ベントナイト体感試験の方法を図 6.2.5-1 に、試験状 況を図 6.2.5-2 に示す。



図 6.2.5-1 ベントナイト体感試験の方法



図 6.2.5-2 ベントナイト体感試験の状況

### 6.2.6 緩衝材可視化試験の公開

緩衝材可視化試験は人工バリアの主要構成要素である緩衝材の性質や利用方法についての来 館者の理解促進を目的として実施した。試験では、緩衝材と処分孔の隙間や緩衝材のブロック 同士の隙間などが、地下水による緩衝材の膨潤により塞がる様子(自己シール性)を可視化し、 確認した。

2015年度および 2016年度は、初期乾燥密度の異なる供試体を作製し、上端面に設けた隙間 が閉塞する際の様子を観察するとともに、閉塞までの時間や密度分布のデータを取得した。 2016年度の試験状況を図 6.2.6-1 に示す。

2017 年度~2019 年度は、緩衝材ブロック方式(8分割)の浸潤・膨潤挙動を視覚的に確認で きるように、約1/23 スケールの小型緩衝材ブロックを作製し、アクリル製の試験装置を用いて、 試験を実施し、緩衝材ブロックが一体化する様子を観察するとともに、注水量と経過日数の関 係などのデータを取得した。また、2019 年度は色付きの緩衝材ブロックを作製し、より緩衝材 ブロックの浸潤・膨潤挙動を視覚的に確認できるようにした。2018 年度、2019 年度の可視化 試験状況を図 6.2.6-2 に、小型緩衝材ブロックの経時変化を図 6.2.6-3 に、色付き緩衝材ブロッ クの試験状況および解体状況を図 6.3.2-4 に示す。



図 6.2.6-1 2016年度可視化試験の状況(上端面の閉塞)



図 6.2.6-2 2017 年度、2018 年度の可視化試験の状況(小型緩衝材ブロック)



試験開始





試験開始10日後





試験開始 42 日後

試験開始

試験開始60日後

試験開始300日後

図 6.2.6-3 小型緩衝材ブロックの経時変化



図 6.2.6-4 色付き緩衝材ブロックの試験状況および解体状況

6.2.7 広報活動

地層処分実規模試験施設の一般公開について、認知度向上のために以下に示す広報活動を実 施した。

- (1) ホームページ (http://fullscaledemo.rwmc.or.jp/)
  - 主な検索キーワード

オーバーパック、人工バリア(誤入力での人口バリアを含む) ガラス固化体、地層処分、地層処分実規模試験施設 地層処分、放射性廃棄物、緩衝材

(2) パンフレット

実規模試験施設では、経済産業省資源エネルギー庁および原環センターにより来館者が自由 に持ち帰ることができるパンフレットを製作し、常備している。また、パンフレットは実規模 試験施設のホームページからもダウンロードできるようにした。

(3) 広報誌への掲載(エフエムわっかない)

実規模試験施設の認知度向上のための一環として、地元ラジオ局のエフエムわっかない作成 の番組表に実規模試験施設の情報を掲載した。番組表は稚内市内 40~50 ヵ所(空港、フェリー ターミナル、高速バス乗り場、観光施設等)および道の駅 3 ヵ所(天塩、猿払、遠別)などに 設置されている。

- (4) 広報誌への掲載(その他) 実規模試験施設の認知度向上のため、情報誌などに実規模試験施設の情報を掲載した。以下
  - に掲載した情報誌および広告を示す。
  - 1) るるぶ冬の北海道(発行:JTBバブリッシング)
     2016年2月に発刊。220,000部販売。
  - 2) 北海道新聞広告特集チラシーるるぶ 夏のグルメ&行楽決定版(発行:北海道新聞)
  - 3) 2016 年度版 今の大ヒットはこれだ!!(発行:㈱ミスターパートナー)
     2016 年 7 月に発刊。10,000 部販売。

6.3 地層処分実規模試験施設の来館者調査および分析

地層処分実規模試験施設では、2010年度の開館時から、高レベル放射性廃棄物の地層処分事業の理解促進のために研究・技術開発側からどのような情報が発信されるべきか、また本施設の在り方に資する情報を取得するために、来館者アンケートおよび来館者記録を実施してきた。

6.3.1 来館者アンケートの分析

来館者アンケートは、隣接するゆめ地創館と共同で実施しており、用意された質問に対して 「よくわかった」から「全くわからなかった」まで4段階の回答を選択することで、施設運営 側が知りたい情報に対し、来館者が答える方式となっている。以下に来館者アンケートの分析 結果を示す。

### (1) 来館者の住まいおよび本施設に関する情報源

有効回答者による来館者の住まいを図 6.3.1-1 に、本施設について何で知ったかを図 6.3.1-2 に示す。本施設を訪れた人の住まいは、北海道内のみではなく、北海道外からの来館者も半分 程度いることがわかる。本施設については、通りすがりや知人の紹介という人が多いことから、 北海道旅行の途中で本施設について知り、立ち寄った人も多いことが考えられる。





図 6.3.1-2 地層処分実規模試験施設およびゆめ地創館を何で知ったか

### (2) 来館者の理解度

アンケート回答者における地層処分および高レベル放射性廃棄物に関する理解度を図 6.3.1-3 に、実物大の人工バリアおよび実物大の人工バリアを使った試験に関する理解度を図 6.3.1-4 に示す。地層処分および高レベル放射性廃棄物について「よくわかった」「大体わかっ た」と回答した人は全体の8割~9割であり、多くの人に理解して頂けたことがわかる。また、 実物大の人工バリアおよび実物大の人工バリアを使った試験についても全体の8割~9割の人 が、「よくわかった」「大体わかった」と回答している。









### **6.3.2** 来館者記録の分析

地層処分事業を円滑に推進するためには、地層処分の安全性の確保および実現するための技 術開発を適切に進めるだけではなく、その事実をステークホルダーと共有することが重要であ る。これまでの技術開発では最終成果の発信に重点が置かれ、情報を受信する側が成果に至っ た過程を知る機会は少ない。来館者記録は、地層処分実規模試験施設において、来館者への説 明を担当する試験員が来館者とのやり取りを対話記録として整理したものであり、年月日(曜 日)、天候、入退室時間(滞在時間)、年代・性別等の属性の他に、来館者と試験員の対話の情報 が含まれている。これらの記録を整理分析することにより、本施設内で説明する地層処分関連 技術に係る内容の他に、原子力に対し抱く疑問や意見など、来館者が日頃から抱く興味や関心 事項などを知るとともに、施設の案内パネルの改良案などより良い情報の発信方法について検 討することができると考える。以下に対話記録の分析結果を示す。

(1) 出現頻度

対話に出現した概念について図 6.3.2-1 に示す。使用したデータは 2009 年 4 月より蓄積した 15,905 グループ(57,324 人)のものである。事物に関する概念としては、「人工バリア」「ベントナイト・粘土」「ガラス・ガラス固化体」「緩衝材・ブロック」など、人工バリアに関するものについての対話が多い。また、行為・状態に関する概念としては「処分」「施設」「廃棄」「研究・試験・開発」「埋める・埋設・掘る」についての対話が多い。



図 6.3.2-1 対話の出現概念(左図:事物、右図:行為・状態)

(2) 時系列推移

対話に出現した概念の時系列推移について図 6.3.2・2 に示す。使用したデータは 2009 年 4 月 より蓄積した 15,905 グループ(57,324 人)のものである。事物に関する概念としては、2015 年以降「ベントナイト・粘土」が大幅に増加している。現状では、2012 年以降に増加した「人 エバリア」とともに言及が多い。そのほか「地下・坑道」「地層・岩盤・地質」「自然・天然」「鉱 物」「O/P」など、処分システムに関する語についての対話が 2015 年以降に増加している。一 方、「NUMO」は 2014 年度以降に減少しており、2015 年頃を境に、来館者との対話内容が事 業面から地層処分システムや技術に移ってきていることがうかがえる。また、行為・状態に関 する概念としては 2015 年度以降に「採る」(ベントナイト)、「除去」(緩衝材除去装置)、「置く」 (定置)、「作る・製作・製法」など人工バリアに関連する語、「本数」「容器」「入れる」などガ ラス固化体に関する語などが増えている。

2015年度以降は対話内容の傾向が変わっており、増えている概念についてみると、本事業に て実施してきた「緩衝材定置試験」「ベントナイト体感試験」「緩衝材可視化試験」などによる 来館者への理解促進活動が一定の成果を挙げていることがうかがわれる。



図 6.3.2-2 年度別出現概念(左図:事物、右図:行為・状態)

(3) 質問数および質問内容

2013年~2018年の年度別質問数と質問内容を図 6.3.2-3に示す。質問数は本事業の開始した 2015年より増加し、2017年より減少している。また、質問内容として多いものは「緩衝材」 「人工バリア」「OP」であり、2015年より「回収」に関する質問内容も多くなっている。



(4) 質問内容の詳細

前述した質問内容のうち、2015年より多くなった「回収」についての質問内容について整理 した。「回収」についての質問内容の内訳を図 6.3.2-4 に、質問内容の詳細を表 6.3.2-1 に示す。 「回収」についての質問内容は、緩衝材の除去に使用する塩水に関するもの、廃棄体を回収す る場合の理由や時期、機械装置に関するものが多かった。具体的には、なぜ緩衝材の除去に塩 水を使うのか?回収しないといけない理由は何か?という質問が多数寄せられた。



図 6.3.2-4 「回収」についての質問内容の内訳

質問内容	質問詳細(例:一部抜粋)				
	緩衝材の除去になぜ塩水を使うのか?				
※金井の除土に佐田ナス「坂水」に関ナスオ	除去に使う塩水の濃度は?				
被倒州の床云に使用りる「塩水」に関りるも	塩水は海水でも良い?海水を使うの?				
	リユースした塩水に放射性物質は含まれない?				
	地下水が塩水の場所では処分できない?				
	廃棄体を回収しないといけない時はどんな時?				
廃棄体を回収する場合の理由や時期	回収期間はどの程度を想定している?				
	1000 年後の回収も可能?				
	定置装置や除去装置はどこが作ったものか?				
機械装置に関するもの	除去装置の使い方は?				
	機械装置はどの定置方式でも使用できるのか?				
	除去装置は実際にどこかで試験をしたのか?				
緩衝材除去技術の実証試験等に関するもの	今後、この装置を用いた試験をするのか?				
	埋めてからどのくらいの期間の物で試験をする?				

表 6.3.2-1 「回収」についての質問内容の詳細

(5) 来館者の地層処分事業および実規模試験施設に関する感想

2019 年度における来館者の感想のうち、地層処分事業および実規模試験施設に関するものに ついて整理した。「地層処分に対して必要、安全、賛成」、「地層処分に対して不安、危険、反対」 の割合を整理したものを図 6.3.2-5 に、その感想の例を表 6.3.2-2 に、また、「施設・説明に対 して良かった」、「施設・説明に対する改善点」の割合を整理したものを図 6.3.2-6 に、その感想 の例を表 6.3.2-3 に示す。

地層処分事業については、関連する感想のうち3分の2程度が地層処分に対して必要、安全、 賛成などの内容であり、来館者に対して丁寧に説明することで地層処分事業についての理解や 安心感が高まっている様子が伺える。一方、地層処分事業について、安全かどうかわからない、 不安などの感想もあり、このような感想を持つ方に対してどのように説明していくかという点 が課題として挙げられる。

施設・説明に対する感想としては、関連する感想のうち8割程度が「良かった」という感想 であり、地層処分実規模試験施設として一定の成果が得られたと考えられる。一方、専門的な 言葉が多い、パネルが分かり難いなど施設・説明に対する改善の感想もあり、今後の施設の在 り方へ反映させる必要がある。



図 6.3.2-5 来館者の感想のうち地層処分事業に対するもの(全 742 件のうち 188 件)

地層処分に対して必要、安全、賛成	地層処分に対して不安、危険、反対
HLW の処分は各国で行わなければならず、他国に処	ガラス固化体を実際に埋める実験では、本物の放射性
理を依頼するのは無責任であると考える、ここで行わ	廃棄物を使っていないと思うので、漏れがあるかない
れている研究は非常に大切であると感じた。	かなどの完全な安全性は分からないなと思いました
安全性を理解しやすく説明してくださり、安心感を持	1000年以上経過したことがない材料で1000年以上保
てた。	管するのは実績がない分 100%でないのが不安。
現在の便利な生活、電力に頼った暮らしの裏にはきち	時間のスケールが大きすぎて現実的には不可能だと
んと考えておかなければならない事がたくさんあり	思う。将来への負債を頑張って原発依存を抜ける方が
ます。電力を使う者の責任として最終処分はさけて通	現実的だと思う。
れません、研究頑張って下さい。	
原子力は今後必要となる技術であり、地層処分の研究	数万年にわたる問題であり、どんなに良い方法であっ
は非常に重要だと考えます。地元民や今日のようなイ	ても当然に不安がある、現時点で考えられる「すべて
ベント?を通して国民の理解が追いつくことを望み	の事象について、一つひとつの対応策を示して」不安
ます。	感の払拭に努めなければ候補地はあらわれないと思
	われる。
原発はなくすべきだが、既にある放射性廃棄物の処分	地層処分は技術的・社会的にもムリだと思った。しか
の為有意義な研究と思います。	し、この問題から目をそらすこともできない。関係者
	の努力に敬意を表すとともに今後の活動に心から応
	援をしたい。頑張って下さい。
高レベル放射性廃棄物についての研究はこんなにも	想定外の事で地殻変動がある国で、地層処分するのが
研究されているという事が改めて分かった。安全だと	良いのか不安です。でも見学してみて、ここまで進ん
より多くの人に知ってもらうためにも、このような活	でいるのかと思いました。多くの人に見学して皆さん
動は大切だと思った。(私的には、これなら地層処分を	に知ってもらいたい
しても大丈夫なのかなと思いました。)	

表 6.3.2-2 来館者の地層処分に関する感想の例



図 6.3.2-6 来館者の感想のうち施設・説明に対するもの(全 742 件のうち 428 件)

施設・説明に対して良かった	施設・説明に対する改善点
過去2回程来たことがありましたが、今回ねんどの実	大筋は分かったが核 (原子力) がさっぱり分からない。
験ができておもしろかった。	自然のウランは爆発したり高温にならないのに・・・。
	そもそも核とは何?核分裂とはどうして起こるの?そ
	れが何故人に悪いの?等基本的な知識が知りたいで
	す。
きれいな施設で説明も分かり易く、実験も楽しく発見	見学させてもらい理解はできるものの難しい。皆の理
がありました。勉強になりました。知ると言う事はと	解を得るためにも若い世代に必要だという事を普及し
ても大切だと思いました、今日はありがとうございま	ないといけない。
した。	
実物大の模型を見ることができ、実際のイメージがわ	専門的な言葉が多すぎて私にはちょっと難しかったで
きました、ありがとうございました。	す。札幌から来ているのですが、こちらの事を会社の
	友人に話しても遠いのでなかなか来れないと言われた
	のが残念でした。
人工バリアの解説をいただいた方から丁寧な説明を	地質等専門的な分野は詳しくありません。パネルが並
こちらからの質問に対する回答をいただき理解が深	んだ文字の多い説明では内容が難しいので"理解に時
まりました。ありがとうございました(ベントナイト	間がかかります"映像での説明の方が分かり易いかと
の吸水・膨潤性の実験も良かったと思います)	思います。
旦那の紹介で来た。結構おかたい所かと思っていた	ビデオ、その他の説明、映像時間がより分かりやすい
が、意外と子どもが楽しむ所があってびっくり。大人	と、時間配分できる。 一般の人にはなかなか難しい内
も楽しめたのでまた来たい!	容だよね。
とてつもない時間をかけての研究、設置、実施これか	立派な建物だが、展示のパネルなど、ごちゃごちゃし
らなくてはならない施設になるのではと思いました。	過ぎ、ねらいがわかりづらくなっている。
とても勉強になりました。沢山の人に見ていただきた	
いです。	

表 6.3.2-3 来館者の施設・説明に関する感想の例

### 6.3.3 まとめ

本事業では、実規模試験施設において、緩衝材除去システム等の新たな設備を整備するとともに、施設を活用した公開試験や来館者への説明等の理解促進活動を実施した。

本事業期間中5ヵ年で、実規模試験施設を訪れた約28,000人の方に対して、地層処分に関す る説明や体験型の実験等を実施してきた。上述の通り、質問や対話の内容は、展示物に沿った ものになってきているとともに、アンケートや対話記録分析の結果より、地層処分および回収 事業について一定の理解が深められた結果が得られた。また、より来館者の理解を促進するた めの施設の在り方や課題なども抽出することができた。施設の開館初期はオーバーパックや緩 衝材の製作・施工技術、人工バリアのカットモデル等がメインの展示であった本施設は、緩衝 材定置試験装置の整備、緩衝材除去システムの移設を経て現在の公開内容となった。これによ り説明量も増加するが、実規模・実物を有する本施設の特徴を最大限に生かした効果的な対応 に努めている。

今後は、これまでの方向性を保ちつつ、展示物への関心を地層処分システムへの関心に結び つけることを意識しながら、来館者が地層処分事業への理解をより深めるための取組を実施し ていきたい。 第6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 21 年度核燃料サイクル関係推進調整等 委託費(地層処分実規模設備整備事業)報告書, 2010.
- [2] 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 22 年度核燃料サイクル関係推進調整委 託費(地層処分実規模設備整備事業)報告書,2011.
- [3] 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成23年度原子力発電施設広聴・広報等事 業委託費(地層処分実規模設備整備事業)報告書,2012.
- [4] 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成24年度原子力施設立地推進調整事業等
   委託費(地層処分実規模設備整備事業)報告書,2013.
- [5] 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 業委託費(地層処分実規模設備事業)報告書, 2014.
- [6] 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 26 年度原子力発電施設広聴・広報等事 業委託費(地層処分実規模設備運営等事業)報告書,2015.
- [7] 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成27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)報告書,2016.
- [8] 原子力環境整備促進・資金管理センター: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)報告書,2017.
- [9] 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 29 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)報告書, 2018.
- [10] 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 30 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)報告書, 2019.
- [11] 原子力環境整備促進・資金管理センター:原環センタートッピクス No.94、平成 22 年 7月
- [12] 原子力環境整備促進・資金管理センター:原環センタートッピクス No.123、平成 29 年 9月

# 第7章 回収可能性の維持の影響の定量化手法の整備

7.1 可逆性・回収可能性に係わる技術課題の整理

7.1.1 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。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。

		回収可能性の維持に関する技術的アプローチ						
定量化すべき情報			処分孔竪置き方式			処分坑道横置き・PEM 方式		
			OP2	OP3	OP1	OP2	OP3	
1.安全性へ	(1)操業期間中の安全性への影響							
の影響	<ol> <li>①回収可能性維持期間中の開放坑</li> <li>道の安全性への影響</li> </ol>							
	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、人エバリ 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							
<b>2.</b> 回収の容 易性(回	(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)	s						
収作業時 間)	(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								

表 7.1.1-1 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

### **7.1.2** 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 7.1.2-1 に示す。





図 7.1.2-1 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 7.1.2-2 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 7.1.2-2 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 7.1.2-2 「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 7.1.2-3 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 7.1.2-3 基本の操業で生じる事象の時間変遷のイメージ

図 7.1.2-3 の基本の操業における事象の時間変遷を基本として、図 7.1.2-2 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 7.1.2-4 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 7.1.2-4 「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。
7.2 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

## **7.2.1** 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7.1.2 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。

## **7.2.2** 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 7.2.2-1 に示す。



図 7.2.2-1 堅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 7.2.2-2 に示す。



図 7.2.2-2 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 7.2.2-3 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 7.2.2-3 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。

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 7.2.2-4 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 7.2.2-4 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 7.2.2-5 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、3.1 µ Sv/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 7.2.2-5 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 7.2.2-1 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。

7-12

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 7.2.2-6 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 7.2.2-7 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 7.2.2-6 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 7.2.2-7 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。 7.2.3 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 7.2.3-1 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 7.2.3-1 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 7.2.3・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<sub>3</sub>)、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 7.2.3-2 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<sup>3</sup>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<sup>3</sup>と、ベントナイト:ケイ砂=50%:50%の混合土1.6Mg/m<sup>3</sup>(乾燥粘土密度1,15Mg/m<sup>3</sup>)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。





処分坑道横置き・PEM 方式

図 7.2.3-3 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 7.2.3-1 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。

水の流		它罟栖今	処分孔竪置き方式		処分坑道横置き・PEM 方式						
		<b>正</b> 固概心	処分孔		2	狭隘な処分坑道		大断面処分坑道			
れ		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	腐食環境緩衝材中間隙水野材ケイ砂 30%混合クニゲル V1 1.6Mg/m³(ρd =1.37Mg/m³)1容器↑		ĥ	緩衝材中間隙水		緩衝材中間隙水			
T		緩衝材			ケイ砂 1.6Mg	30%混合クニ /m <sup>3</sup> (pd=1.3)	ニゲル V1 7Mg/m <sup>3</sup> )	ケイ砂 30%混合クニゲル V1 1.6Mg/m <sup>3</sup> (pd =1.37Mg/m <sup>3</sup> )		·ゲル V1 Mg/m <sup>3</sup> )	
		PEM 容器				炭素鋼		炭素鋼			
		腐食環境				大気腐食	隙間充填	真材間隙水	大気腐食	隙間充填	材間隙水
		隙間充填材		1		空気	純ベン 1.37	ットナイト Mg/m <sup>3</sup>	空気	掘削ズリ 50%洮 1.6Mg/m³(pd	昆合クニゲル V1 =1.37Mg/m <sup>3</sup> )
	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				<u> </u>					

表 7.2.3-1 回収可能性の維持期間中の金属材料の腐食環境

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 7.2.3-4 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 7.1.2-4 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 7.2.3-1 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 7.2.3-4 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。

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 7.2.3-1 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の考え方

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 7.2.3-5 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 7.2.3-1 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 8.8 µ m/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。

### 7.2.4 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。

- 7.2.5 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 7.2.5-1 に示す。



図 7.2.5-1 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 7.2.2-4 や図 7.2.2-5 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 7.2.5-1 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、7.2.3(3)1)や7.2.3(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、7.2.3(3)1)や 7.2.3(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。開放坑道から供給される空気や坑道の埋戻材の間隙に存在する空気による影響として は、酸素による系の酸化が挙げられる。気体として存在する空気が岩盤中へ広がっていくメカ ニズムとしては、岩盤中の間隙水が水蒸気として空気と交換されていくものと、空気が溶解し た地下水が岩盤中に移動するものなどが考えられる。岩盤中に移動した空気は、本来の地下環 境である還元性雰囲気で安定であった鉱物と反応し、系が酸化されることで、地下水の組成や pH、Ehが変化する。これらの現象に対して水理解析、地化学解析などにより坑道周辺の影響 領域の広がりを定量化する手法についても、様々な条件での数値解析的な検討を進めている [12]。

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。

7-25

7.3 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7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(第2分冊), 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2分冊),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.
  - [12] 原子力環境整備促進・資金管理センター: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)報告書(第3 分冊), 2019.

# 第8章 回収の容易性向上の検討

8.1 目的と進め方

#### 8.1.1 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 8.1.1-1 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。

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)
<ol> <li>回収可能性の維持期間内</li> </ol>	○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
において、廃棄体へのアク	る(廃棄体を完全に埋め戻さない設計など)
セスを容易にしておく	○操業手順を工夫する
②回収可能性の維持期間内	○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
において、可能性のある将	定の工夫など)
来の回収作業が容易とな	○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
るようにしておく	置方法を工夫する、など

表 8.1.1-1 回収の容易性を設計に考慮する際の多様な方法の例 [1]

8.1.2 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。 〇追跡性に留意する。

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。

8.1.3 検討の進め方と検討項目の概要

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

各検討項目の概要を以下に述べる。

(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

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 の視点と容易性向上のポイントを整理する。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を想定し、回収作業の留意点や課題の整理から回収作業時の工夫 のポイントを抽出して、回収の容易性向上の視点と容易性向上のポイントを整理する。

(2) 回収の容易性向上を図る方策の検討と整理

上記で整理した回収の容易性向上のポイントを代替設計オプションに反映させるため、容易 性向上のポイントを出発点とした展開により、具体的な工学的方策および手段を検討して整理 する。また、工学的方策の相互関係について、代替設計オプションを構築する際に必要と考え られる観点から定性的な分析を行い整理する。

(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

回収の容易性を向上させる工学的方策とその相互関係の分析結果を用いた代替設計オプション構築方法の考え方を整理する。整理した考え方に基づき、代替設計オプションを設定するとともに具体的なイメージ例を作成する。

(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

代替設計オプションに対して実現性の検討を行っていく上での方針を示し、先行的な検討と して、(3)で作成した代替設計オプションのイメージ例について概略仕様例を設定し、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す。また、代替設計オプション の提示に向けた今後の検討に関する展開を提案する。 8.2 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

本節では、より回収の容易性を高めた処分場の設計開発のための代替設計オプションの抽出・ 具体化に向けて、代替設計オプションを構築する際に用いる"回収の容易性を高める"方策の 検討に展開するため、回収の容易性向上の視点とポイントを整理することを目的として、検討 を実施した。

8.2.1 項では、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 を想定し、回収作業の留意点や課題の整理から回収作業時の工夫のポイントを抽出した。

8.2.2 項では、前節で抽出した各作業からの工夫のポイントを、"回収の容易性を高める"方 策の検討に展開するために集約し、個々の作業によらない回収の容易性向上の視点とポイント として整理した。

8.2.1 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のポイントの抽出と整理

本項では、NUMOの包括的技術報告書[2]に提示された処分概念(特に廃棄体の定置方式)を 対象として、具体的な回収作業の工程を検討することで回収作業の留意点や課題を設定し、回 収の容易性向上の工夫のポイントを抽出した。

(1) 回収作業の具体化の前提

NUMO の包括的技術報告書[2]では、処分場の設計で対象とする処分概念として、竪置き・ブ ロック方式と横置き・PEM 方式の二つの人工バリアの定置方式が示されている。ここで、PEM とは Prefabricated Engineered Barrier System Module の略で、地上施設で廃棄体を人工バリ アと一体化したモジュールを地下施設に搬送し、定置する技術をいう。

また、処分場が埋め戻されるときには力学プラグや止水プラグが設置される[2]。力学プラグ は、処分坑道を埋め戻した後に、埋め戻し材が埋め戻しの完了していない空間側に地下水の浸 潤により膨出することを防ぐことを目的として処分坑道の端部に設置される。止水プラグは、 地下施設の閉鎖後にアクセス坑道が放射性物質の移行経路になることを防ぐために、アクセス 坑道と連絡坑道の接続部または主要坑道に設置される。

これらを対象とした回収作業を具体化するため、大工程、中工程、小工程を設定して検討を行った。検討では以下を前提とした。

- オーバーパック、PEM、埋め戻し材、隙間充填材、ベントナイト緩衝材等の仕様は NUMOの包括的技術報告書に準じる。原則、工夫のポイントの検討ではこれらの仕様 を変更しない。
- 回収可能性維持期間は閉鎖の意思決定(閉鎖措置計画の承認)までとするが、その時期は未定である。
- 堅置き・ブロック方式ではオーバーパックを回収する。
- 横置き・PEM 方式では PEM 回収を基本とする。
- 処分場は、アクセス坑道のみを開放状態とし、他の坑道(主要坑道、連絡坑道、処分坑道)は埋め戻され、力学プラグ等が設置されている状態とする。

● 回収したオーバーパックや PEM からのガラス固化体の回収作業については検討の範 囲外とする。

これらの前提に基づき、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 作業の具体化のための工程の設定と、工夫のポイントの抽出を行った。

(2) 堅置き・ブロック方式を対象とした回収作業の具体化と工夫のポイントの抽出

1) 回収作業の具体化のための大工程と中工程の設定

処分場はアクセス坑道のみを開放状態とし、他の坑道は埋め戻されている状態とする。この 状態から廃棄体容器(オーバーパック)を回収するまでに撤去する対象を整理し、回収作業を 三つの大工程と七つの中工程に分類した(図 8.2.1-1)。中工程の"B"はブロック方式を意味する。 三つの大工程は、1.連絡坑道・主要坑道の開放、2.処分坑道の開放、3.廃棄体容器の回収 とした。これは、回収可能性維持の状態オプションに対応する。図中で整理したとおり、開放 されているアクセス坑道からオーバーパックを回収するまでに撤去する対象は、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)、連絡坑道および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%)である。

ここで、力学プラグの設置位置について、NUMOの仕様[2]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した。したがって、大工程の1.連絡坑道・主要坑道の開放は、 アクセス坑道と連絡坑道の境界に設置された力学プラグの撤去作業から開始するため、これを 中工程のB-1とした。

なお、NUMO包括的技術報告書では、パネル型とデッドエンド型の二つの処分区画の形状が 示されている。パネル型では連絡坑道、主要坑道、処分坑道から処分場が形成されているが、 デッドエンド型では連絡坑道に処分坑道が接続しており主要坑道が設定されておらず存在しな い。本検討では、連絡坑道、主要坑道、処分坑道を有する処分場を想定することで、二つの処 分区画を包含した検討とした。なお、第3章で示した回収可能性維持の状態オプションに対応 させるため、連絡坑道と主要坑道の開放を一つの大工程として整理しており、いずれの処分区 画形状でも整理される作業は同じとなる。

8-5



大工程	中工程	
1. 連絡坑道・	B-1:カ学プラグ撤去	
王要坑道の   開放	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	B-4:カ学プラグ撤去	
開放 B-5:処分均 安定性	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	B-6:オーバーパックの縁切り	
の回収	B-7:オーバーパックの回収・搬出	

\*カ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カ学プラグを設置することとする。

図 8.2.1-1 竪置き・ブロック方式における処分場の状態の設定と回収作業の大工程と中工程

2) 回収作業の具体化(小工程)と作業上の留意点・課題、工夫のポイントの整理

前述した中工程 B-1~B-7 をさらに小工程に分割し、それぞれの作業における作業上の留意 点と課題を整理することで、回収の容易性を向上させる工夫のポイントを検討した。

<u>B-1:力学プラグ撤去</u>

15%)

回収作業はアクセス坑道と連絡坑道の境界に設置された力学プラグの撤去作業から開始する。 カ学プラグは鉄筋コンクリート製が検討されており、撤去の工程を小工程に分けると、まずは カ学プラグの状態を確認する作業から始めることが想定される。図 8.2.1-2 に小工程、作業上 の留意点・課題、工夫のポイントを整理して示す。 B-1: カ学プラグ撤去

#### 【小工程】

B-1-1: カ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	エ夫のポイント
B-1-1:カ学プラグの状態確認	<ul> <li>・カ学プラグの変形・ひび割れ等の構造的変質等の確認</li> <li>・背面の状況確認</li> </ul>	<ul> <li>・状況確認の作業量削減、速度向上、精度向上</li> </ul>
Β−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
Β−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	・カ学プラグの撤去・搬出の作業量削減 と速度向上
Β−1−4:坑道周辺岩盤の安定化	<ul> <li>・狭い空間での坑道周辺岩盤の安定</li> <li>性確保</li> </ul>	<ul> <li>・坑道安定性確保の作業量削減と速度</li> <li>向上</li> </ul>
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 8.2.1-2 B-1: 力学プラグの撤去の小工程、作業上の留意点・課題および工夫のポイント

# <u>B-2:止水プラグ撤去</u>

カ学プラグを撤去したのち、止水プラグを撤去する。止水プラグは締め固めたベントナイ トブロックを積み上げる方法により施工されており[2]、撤去の工程を小工程に分けると、ま ずは撤去・搬出用機材の設置作業から始めることが想定される。図 8.2.1-3 に小工程、作業 上の留意点・課題、工夫のポイントを整理して示す。

# B-2:止水プラグ撤去

【小工程】

- B-2-1:止水プラグ撤去・搬出用機材の設置 B-2-2:止水プラグ撤去・搬出 B-2-3:坑道周辺岩盤の安定化
- B-2-4:埋め戻し材の表面安定性確保



小工程	作業上の留意点・課題	エ夫のポイント
B-2-1:止水プラグ撤去・搬出用機材 の設置	・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
Β−2−2:止水プラグ撤去・搬出	・ベントナイトブロックの効率的かつ安 全な撤去工法の選定	・止水プラグの撤去・搬出の作業量削減 と速度向上
Β−2−3:坑道周辺岩盤の安定化	<ul> <li>・狭い空間での坑道周辺岩盤の安定</li> <li>性確保</li> </ul>	<ul> <li>・坑道安定性確保の作業量削減と速度</li> <li>向上</li> </ul>
Β-2-4:埋め戻し材表面安定性確保	・撤去までの期間の埋め戻し材表面 の安定性確保	・埋め戻し材表面安定性確保の作業量 削減と速度向上

図 8.2.1-3 B-2:止水プラグ撤去の小工程、作業上の留意点・課題および工夫のポイント

B-3:連絡坑道・主要坑道の埋め戻し材撤去、坑道安定性確保および設備復旧

坑道の埋め戻し材の撤去、撤去後の坑道の安定性の確認と必要に応じての支保工の補修・ 補強を実施し、排水や換気設備の復旧も並行して実施する。この中工程を小工程に分けると、 まずは埋め戻し材撤去・搬出用機材の設置作業から始めることが想定される。図 8.2.1-4 に 小工程、作業上の留意点・課題、工夫のポイントを整理して示す。



図 8.2.1-4 B-3:連絡坑道・主要坑道の埋め戻し材撤去等の小工程、作業上の留意点・課題お よび工夫のポイント

# <u>B-4:力学プラグ撤去</u>

主要坑道の埋め戻し材の撤去が完了し、坑道安定性と換気・排水設備を復旧したのち、処 分坑道に設置された力学プラグの撤去が開始される。撤去の工程を小工程に分けると、まず は力学プラグの状態を確認する作業から始めることが想定される。図 8.2.1-5 に小工程、作 業上の留意点・課題、工夫のポイントを整理して示す。 B-4:カ学プラグ撤去

#### 【小工程】

B-4-1:カ学プラグの状態確認

B-4-2:撤去機材の搬入・定置

B-4-3:鉄筋コンクリートの撤去・搬出

B-4-4: 坑道周辺岩盤の安定化

B-4-5: 透水層・フィルター材の撤去

B-4-6:埋め戻し材の表面安定化



小工程	作業上の留意点・課題	エ夫のポイント
B-4-1:カ学プラグの状態確認	<ul> <li>・カ学プラグの変形・ひび割れ等の構造的変質等の確認</li> <li>・背面の状況確認</li> </ul>	<ul> <li>・状況確認の作業量削減、速度向上、</li> <li>精度向上</li> </ul>
Β−4−2: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-4-3: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	<ul> <li>・カ学プラグの撤去・搬出の作業量削減</li> <li>と速度向上</li> </ul>
B-4-4:坑道周辺岩盤の安定化	<ul> <li>・狭い空間での坑道周辺岩盤の安定</li> <li>性確保</li> </ul>	<ul> <li>・坑道安定性確保の作業量削減と速度</li> <li>向上</li> </ul>
B-4-5: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	<ul> <li>・透水層等の撤去の作業量削減と速度</li> <li>向上</li> </ul>
B-4-6:埋め戻し材の表面安定化	・撤去までの期間の埋め戻し材表面 の安定性確保	・埋め戻し材表面安定性確保の作業量 削減と速度向上

図 8.2.1-5 B-4: 処分坑道の力学プラグ撤去の小工程、作業上の留意点・課題および工夫のポ イント

B-5: 処分坑道の埋め戻し材撤去、坑道の安定性確保、設備の復旧

カ学プラグが撤去されたのち、処分坑道の埋め戻し材撤去、坑道安定確保のための支保の 補修・補強を開始するとともに換気・排水設備の復旧作業を平行して実施する。この中工程 を小工程に分けると、まずは埋め戻し材撤去・搬出用機材の設置作業から始めることが想定 される。図 8.2.1-6 に小工程、作業上の留意点・課題、工夫のポイントを整理して示す。

<ul> <li>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</li> <li>【小工程】</li> <li>B-5-1:埋め戻し材撤去・搬出用機材の設置</li> <li>B-5-2:埋め戻し材の撤去・搬出</li> <li>B-5-3:坑道の安定性確保 (状況調査、補修・補強等)</li> <li>B-5-4:換気・排水設備の復旧</li> </ul>			
	小工程	作業上の留意点・課題	エ夫のポイント
	B-5-1:埋め戻し材撤去・搬出用機材 の設置	<ul> <li>・狭い空間での作業の作業性、物流を 考慮した機材の選定と設置</li> <li>・掘削・搬出機材と補修・補強機材との取り合い</li> </ul>	・狭い空間での可動性の向上
B-5-2∶埋め戻し材の撤去・搬出		・狭い空間での埋め戻し材の効率的 な掘削・撤去、主要坑道への搬出	・埋め戻し材撤去・搬出の作業量削減と 速度向上
	B-5-3:坑道の安定性確保(状況調査、 補修・補強等)	<ul> <li>・支保材等の迅速な状況調査</li> <li>・狭い空間での効率的な補修・補強・</li> <li>更新</li> </ul>	<ul> <li>・状況調査の作業量削減と速度向上</li> <li>・支保工の補修・補強・更新作業の作業 量削減と速度向上</li> </ul>
	Β-5-4:換気・排水設備の復旧	・狭い空間での効率的な換気・排水設 備の復旧	<ul> <li>・換気・排水設備復旧の作業量削減と速度向上</li> </ul>

図 8.2.1-6 B-5: 処分坑道の埋め戻し材撤去等の小工程、作業上の留意点・課題および工夫の ポイント

<u>B-6:オーバーパックの縁切り</u>

処分坑道が開放状態を維持している中で、処分孔に定置されたオーバーパックを回収する ために、オーバーパックと周辺の緩衝材との縁切りを行う。この中工程を小工程に分けると、 まずは処分孔上部の状態を確認する作業から始めることが想定される。図 8.2.1-7 に小工程、 作業上の留意点・課題、工夫のポイントを整理して示す。

B-6:オーバーパックの縁切り 【小工程】 B-6-1:処分孔上部の状態確認 は鋼製キャップなどが対象 B-6-2:埋め戻し材、緩衝材撤支 B-6-3:上部の埋め戻し材・緩衝 B-6-4:オーバーパックと緩衝材と	<u>気分状</u> 選 上部電路しれ ペレトナインブロック ポットー パック 気分 大型電路した の 大型電路した の 大型電路した の 大型電路した の 大型電路した の 大型電路した の 大型電路した の の の の の の の の の の の の の	構業料・すり労出装置 第二日 11日 11日 第二日 11日 11日 11日 第二日 11日 11日 11日 第二日 11日 11日 11日 11日 第二日 11日 11日 11日 11日 第二日 11日 11日 11日 11日 第二日 11日 11日 11日 11日 11日 11日 11日 11日 11日 1	2月1-7(-37)ング 	NUMO-TR- 11-01に例示 されたものを イメージ化。 他に液体を用 いて緩衝材など をスラリー化させ て除去する方 法がある。	
小工程	作業上の留意点・課題		エ夫のポイント		
B-6-1:処分孔上部の状態確認	・遮蔽があるため確認、キャップ撤去 作業は比較的容易		·状態確認 処分孔上	の作業量削減と 部の補強	≤速度向上、
B-6-2:埋め戻し材、緩衝材撤去機材 の設置	・狭い空間での動作 の遠隔作業による	、放射線管理下で 効率的な設置	·遠隔操作	での作業量削減	域と速度向上
B-6-3:上部埋め戻し材・緩衝材の撤 去・搬出	・放射線管理下での遠隔作業による 効率的な撤去 ・撤去後の処分孔の安定性確保		・上部埋め戻し材撤去・搬出の作業量削 減と速度向上		出の作業量削
B-6-4:オーバーパックと緩衝材の縁 切り	<ul> <li>         ・放射線管理下での 効率的な縁切り         </li> </ul>	遠隔作業による	・縁切りの	作業量削減と速	度向上

図 8.2.1-7 B-6:オーバーパックの縁切りの小工程、作業上の留意点・課題および工夫のポイ

ント

B-7: オーバーパックの回収・搬出

オーバーパック周辺の緩衝材との縁切りをしたのち、回収・搬出装置によりオーバーパックを引き出す。図 8.2.1-8 に小工程、作業上の留意点・課題、工夫のポイントを整理して示す。



図 8.2.1-8 B-7:オーバーパックの回収・搬出の小工程、作業上の留意点・課題および工夫の ポイント

(3) 横置き・PEM 方式を対象とした回収作業の具体化と工夫のポイントの抽出

1) 回収作業の具体化のための大工程と中工程の設定

処分場はアクセス坑道のみを開放状態とし、他の坑道は埋め戻されている状態とする。この 状態から PEM を回収するまでに撤去する対象を整理し、回収作業を三つの大工程と七つの中 工程に分類した(図 8.2.1-9)。中工程の"P"は PEM 方式を意味する。

三つの大工程は、1.連絡坑道・主要坑道の開放、2.処分坑道の開放、3. 廃棄体容器の回収 とした。これは、回収可能性維持の状態オプションに対応する。図中で整理したとおり、開放 されているアクセス坑道から PEM を回収するまでに撤去する対象は、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)、連絡坑道および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)、PEM 周辺の充 填材(掘削土 50%+ベントナイト 50%)である。ここで、力学プラグの設置位置について、 NUMO の仕様[2]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した。し たがって、大工程の 1.連絡坑道・主要坑道の開放は、アクセス坑道と連絡坑道の境界に設置さ れた力学プラグの撤去作業から開始するため、これを中工程の P-1 とした。

なお、NUMO 包括的技術報告書では、パネル型とデッドエンド型の二つの処分区画の形状が

示されている。パネル型では連絡坑道、主要坑道、処分坑道から処分場が形成されているが、 デッドエンド型では連絡坑道に処分坑道が接続しており主要坑道が設定されておらず存在しな い。本検討では、連絡坑道、主要坑道、処分坑道を有する処分場を想定することで、二つの処 分区画を包含した検討とした。なお、回収可能性維持の状態オプションに対応させるため、連 絡坑道と主要坑道の開放を一つの大工程として整理しており、いずれの処分区画形状でも整理 される作業は同じとなる。



図 8.2.1-9 横置き・PEM 方式における処分場の状態の設定と回収作業の大工程と中工程

2) 回収作業の具体化(小工程)と作業上の留意点・課題、工夫のポイントの整理 前述した中工程 P-1~P-7 をさらに小工程に分割し、それぞれの作業における作業上の留意 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設定した。

P-1: 力学プラグ撤去

回収作業はアクセス坑道と連絡坑道の境界に設置された力学プラグの撤去作業から開始する。 カ学プラグは鉄筋コンクリート製が検討されており、撤去の工程を小工程に分けると、まずは 力学プラグの状態を確認する作業から始めることが想定される。図 8.2.1-10 に小工程、作業上 の留意点・課題、工夫のポイントを整理して示す。 P-1:カ学プラグ撤去

【小工程】

P-1-1: カ学プラグの状態確認

P-1-2:撤去機材の搬入・定置

P-1-3:鉄筋コンクリートの撤去・搬出

P-1-4: 坑道周辺岩盤の安定化

P-1-5:背面部透水層・フィルター材の撤去



小工程	作業上の留意点・課題	エ夫のポイント		
P-1-1:カ学プラグの状態確認	<ul> <li>・力学プラグの変形・ひび割れ等の構造的変質等の確認</li> <li>・背面の状況確認</li> </ul>	<ul> <li>・状況確認の作業量削減、速度向上、精度向上</li> </ul>		
P-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		
P-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	・カ学プラグの撤去・搬出の作業量削減 と速度向上		
P−1−4:坑道周辺岩盤の安定化	<ul> <li>・狭い空間での坑道周辺岩盤の安定</li> <li>性確保</li> </ul>	<ul> <li>・坑道安定性確保の作業量削減と速度</li> <li>向上</li> </ul>		
P-1-5:背面透水層・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	<ul> <li>・透水層等の撤去の作業量削減と速度</li> <li>向上</li> </ul>		

図 8.2.1-10 P-1: 力学プラグ撤去の小工程、作業上の留意点・課題および工夫のポイント

# <u>P-2:止水プラグ撤去</u>

カ学プラグを撤去したのち、止水プラグを撤去する。止水プラグは締め固めたベントナイ トブロックを積み上げる方法により施工されており、撤去の工程を小工程に分けると、まず は撤去・搬出用機材の設置作業から始めることが想定される。図 8.2.1-11 に小工程、作業上 の留意点・課題、工夫のポイントを整理して示す。

#### P-2:止水プラグ撤去

【小工程】

P-2-1:止水プラグ撤去・搬出用機材の設置 P-2-2:止水プラグ撤去・搬出

P-2-3: 坑道周辺岩盤の安定化 P-2-4: 埋め戻し材の表面安定性確保



小工程	作業上の留意点・課題	エ夫のポイント
P-2-1:止水プラグ撤去・搬出用機材 の設置	・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
P-2-2:止水プラグ撤去・搬出	・ベントナイトブロックの効率的かつ安 全な撤去工法の選定	・止水プラグの撤去・搬出の作業量削減 と速度向上
P−2−3: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
P−2−4:埋め戻し材表面安定性確保	・撤去までの期間の埋め戻し材表面 の安定性確保	・埋め戻し材表面安定性確保の作業量 削減と速度向上

図 8.2.1-11 P-2:止水プラグ撤去の小工程、作業上の留意点・課題および工夫のポイント

# P-3:連絡坑道・主要坑道の埋め戻し材撤去、坑道安定性確保および設備復旧

止水プラグ撤去後、連絡坑道・主要坑道の埋め戻し材の撤去、坑道安定性確保のための補修 や補強作業、換気・排水設備の復旧も並行して実施する。この中工程を小工程に分けると、ま ずは埋め戻し材撤去・搬出用機材の設置作業から始めることが想定される。図 8.2.1-12 に小工 程、作業上の留意点・課題、工夫のポイントを整理して示す。

<ul> <li>P-3:連絡坑道・主要坑道の地 坑道安定性確保、設備</li> <li>【小工程】</li> <li>P-3-1:埋め戻し材撤去・搬出用</li> <li>P-3-2:埋め戻し材の撤去・搬出</li> <li>P-3-3:坑道の安定性確保 (状況調査、補修・補強</li> <li>P-3-4:換気・排水設備の復旧</li> </ul>	20戻し材撤去、 復旧 月機材の設置 (1111) (美) (単) (1111)		
小工程	作業上の留意点・課題	エ夫のポイント	
P-3-1:埋め戻し材撤去・搬出機材の 設置	<ul> <li>・狭い空間での作業での作業性、物流 を考慮した機材の選定と設置</li> <li>・掘削・搬出機材と補修・補強機材との取り合い</li> </ul>	・狭い空間での可動性の向上	
P−3−2:埋め戻し材の撤去・搬出	・狭い空間での埋め戻し材の効率的 な掘削・撤去、主要坑道への搬出	・埋め戻し材撤去・搬出の作業量削減と 速度向上	
P-3-3:坑道の安定性確保(状況調査、 補修・補強等)	・支保材等の迅速な状況調査 ・狭い空間での効率的な補修・補強・ 更新	<ul> <li>・状況調査の作業量削減と速度向上</li> <li>・支保工の補修・補強・更新作業の作業 量削減と速度向上</li> </ul>	
P-3-4:換気・排水設備の復旧	・狭い空間での効率的な換気・排水設 備の復旧	<ul> <li>・換気・排水設備復旧の作業量削減と速度向上</li> </ul>	

図 8.2.1-12 P-3:連絡坑道・主要坑道の埋め戻し材撤去等の小工程、作業上の留意点・課題お よび工夫のポイント

# P-4: 力学プラグ撤去

主要坑道の埋め戻し材の撤去が完了し、坑道安定性と換気・排水設備を復旧したのち、処分 坑道に設置された力学プラグの撤去が開始される。撤去の工程を小工程に分けると、まずは力 学プラグの状態を確認する作業から始めることが想定される。図 8.2.1-13 に小工程、作業上の 留意点・課題、工夫のポイントを整理して示す。 P-4:カ学プラグ撤去

#### 【小工程】

P-4-1: カ学プラグの状態確認 P-4-2:撤去機材の搬入・定置 P-4-3:鉄筋コンクリートの撤去・搬出

P-4-4: 坑道周辺岩盤の安定化

P-4-5: 透水層・フィルター材の撤去

P-4-6:充填材の表面安定化

鉄筋コンクリートプラグ **充填**太 主要坑道 ....

小工程	作業上の留意点・課題	エ夫のポイント
P-4-1:カ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	<ul> <li>・状況確認の作業量削減、速度向上、精度向上</li> </ul>
P−4−2: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
P-4-3: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	・カ学プラグの撤去・搬出の作業量削減 と速度向上
P-4-4:坑道周辺岩盤の安定化	<ul> <li>・局所での坑道周辺岩盤の安定性確</li> <li>保</li> </ul>	<ul> <li>・坑道安定性確保の作業量削減と速度</li> <li>向上</li> </ul>
P-4-5:透水層・フィルター材の撤去	・局所での透水層・フィルター材の撤 去・搬出	<ul> <li>・透水層等の撤去の作業量削減と速度</li> <li>向上</li> </ul>
P−4−6:充填材の表面安定化	<ul> <li>・撤去までの期間の充填材表面の安 定性確保</li> </ul>	<ul> <li>・充填材表面安定性確保の作業量削減</li> <li>と速度向上</li> </ul>

図 8.2.1-13 P-4: 処分坑道の力学プラグ撤去の小工程、作業上の留意点・課題および工夫のポ イント

# <u>P-5: PEM</u> 周辺の充填材撤去

力学プラグが撤去されたのち、順次 PEM 周辺の隙間充填材を撤去する作業を開始する。こ の中工程を小工程に分けると、まずは充填材撤去・搬出用機材の設置作業から始めることが想 定される。図 8.2.1-14 に小工程、作業上の留意点・課題、工夫のポイントを整理して示す。

P-5:	PEM周辺の充填材撤去	

【小工程】



P-5-3: PEMに付着した充填材の撤去・搬出 P-5-4:充填材撤去・搬出機材の撤去



小工程	作業上の留意点・課題	エ夫のポイント
P−5−1:充填材撤去・搬出機材の設置	<ul> <li>・遠隔操作の機材が必要</li> <li>・処分坑道内で充填材撤去・搬出機材、</li> <li>PEM回収・搬出機材、坑道補強等機</li> <li>材の円滑な入替</li> </ul>	<ul> <li>・狭い空間での遠隔操作機材の可動性</li> <li>向上</li> </ul>
P−5−2:充填材の撤去・搬出	<ul> <li>・水を極力使用せず遠隔操作かつ効率的な充填材の撤去</li> <li>・他の作業と輻輳しない効率的な撤去 材の搬出</li> </ul>	<ul> <li>・狭い空間での充填材撤去・搬出の速度</li> <li>向上</li> <li>・充填材の撤去の作業量削減</li> </ul>
P-5-3:PEMIC付着した充填材の撤 去・搬出	・水を極力使用せず充填材を撤去す る(オーバーパックが発熱しているた め)	・乾燥状態での撤去・搬出の速度向上
P-5-4:充填材撤去・搬出用機材の撤 去	・処分坑道が長い場合、他の機材との 効率的な入れ替え	・機材の移動量の削減 ・狭い空間での動線の単純化

図 8.2.1-14 P-5: PEM 周辺の充填材撤去の小工程、作業上の留意点・課題および工夫のポイ

ント
#### <u>P-6:PEMの回収・搬出</u>

PEM 一体分の充填材を撤去したのち、PEM を回収・搬出する。この間、埋戻し材撤去、坑 道安定性確保機材等は処分坑道坑口まで退避する必要がある。この中工程を小工程に分けると、 まずは回収する対象の PEM の状態を確認する作業から始めることが想定される。図 8.2.1-15 に小工程、作業上の留意点・課題、工夫のポイントを整理して示す。



図 8.2.1-15 P-6: PEM の回収・搬出作業の小工程、作業上の留意点・課題および工夫のポイント

<u>P-7:処分坑道の安定性確保、設備復旧</u>

PEM が回収されたのち、次の PEM を回収するために、回収済みの PEM が定置されていた 処分坑道の安定性確保のための補修・補強、換気・排水設備の復旧作業を行う。図 8.2.1-16 に 小工程、作業上の留意点・課題、工夫のポイントを整理して示す。 P-7: 処分坑道の安定性確保、設備復旧

#### 【小工程】

P-7-1: 坑道安定性確認機材の設置・調査

P-7-2 : 坑道補修・補強用機材の設置

P-7-3: 坑道の補修・補強

P-7-4: 換気・排水設備の復旧



小工程	作業上の留意点・課題	エ夫のポイント						
P-7-1∶坑道安定性確認機材の設置・ 調査	・狭い空間で遠隔操作による効率的な 状況調査	・狭い空間での機材の可動性向上						
P−7−2:坑道補修・補強機材の設置	・狭い空間・遠隔操作による効率的な 機材の設置	・狭い空間での機材の可動性向上						
P-7-3:坑道補修·補強	・短時間で効果的な補修・補強方法	・支保工の補修・補強作業の作業量削 減と速度向上						
P−7−4:換気・排水設備の復旧	・狭い空間での効率的な換気・排水設 備の復旧	<ul> <li>・換気・排水設備復旧の作業量削減と速度向上</li> </ul>						

図 8.2.1-16 P-7: 処分坑道の補修・補強作業等の小工程、作業上の留意点・課題および工夫の ポイント

なお、処分坑道に横置きされた PEM を坑口から順次撤去していく作業では、上記の P-5~P-7までの作業が繰り返し実施されることになる(図 8.2.1-17 参照)。各作業で異なる機材を使用するため、作業ごとに機材の入替が発生することが想定される。よって、現段階で約 700mと検討されている処分坑道[2]の中では、処分坑道入り口から奥に進むにつれて、PEM の回収に係わる機材の入替時間が長くなり、回収に要する時間が増加していくことが想定される。



図 8.2.1-17 処分坑道から PEM を回収するときの繰返し作業の概念

#### 8.2.2 工夫のポイントの集約による容易性向上のポイントの整理

前項にて回収の各作業を具体化することにより抽出した工夫のポイントを、回収の容易性を 考慮した代替設計オプションに反映する方策に反映するために、具体的な個々の作業によらな い回収の容易性向上のポイントとして統合した。まずは 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、回収の容易性向上を考えるうえでの視点を設定し、次に、工 夫のポイントを集約した容易性向上のポイントとしての整理を行った。

(1) 回収の容易性の視点の整理

より回収の容易性を高めた処分場の設計開発を進めていく上で、回収の容易性の考え方とし て、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。先に述べた R&R 検討会 [1]では、「2.回収の容易性(回収作業時間)」を定量化の対象として設定している。廃棄体の 回収作業時間を短縮することが、容易性を高めるということに対する指標の1つになり得ると 考えられるが、多様な地質環境条件などに柔軟に対応するジェネリックな設計が実施されてお り、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が次のように示されて いる(表 8.1.1-1 参照)。

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、それらに関する回収の容易性 向上の視点を以下のように整理した。また、二つの視点に関して、前項にて整理した回収の各 作業の具体化から抽出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 上のポイントを次のように整理した。

① 廃棄体へのアクセス性の向上

廃棄体への"アクセス性"が高まれば、廃棄体の回収作業の容易性が高まり、結果として回 収作業時間の短縮も可能であると考えられる。廃棄体へのアクセス性の向上を図るには、次の ような要素が考慮事項として挙げられる。

・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

・廃棄体までの物理的な距離

ただし、「廃棄体までの物理的な距離」に大きく関与するのは処分場のレイアウトであるが、 本検討では処分場レイアウト設計は検討の対象外としたことから、アクセス性に関しては主と して「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」が対象になると考えられ る。

前項にて整理した回収の各作業の具体化から抽出した工夫のポイントを踏まえた、アクセス 性向上の要素における考慮事項の例を表 8.2.2-1 に示す。表中の換気や排水設備等を復旧する ための作業は、坑道の安定性を確保する作業と併せて坑道内の作業環境に関する安全確保のた めに実施される事項であるとともに、処分場全体のレイアウトに関係する側面も持つ。

アクセス性向上の 要素	容易性向上に対する考慮事項の例									
	・埋め戻し材や緩衝材等の撤去する作業量									
廃棄体までのアク	(撤去物の物量・重量・形状・状態、等を考慮)									
セス経路を確保す	・坑道の安定性を確保するための作業量									
るための作業量の	(坑道の大きさ・形状、支保工の耐久性、等を考慮)									
少なさ	・換気や排水設備等を復旧するための作業量									
	(排水、換気、維持管理、等を考慮)									

表 8.2.2-1 アクセス性向上の要素における考慮事項の例

②廃棄体のハンドリング性向上

廃棄体までのアクセスが確保できた後に、廃棄体の回収作業自体の容易性が高まれば、回収 作業時間の短縮もできると考えられる。前項にて整理した回収の各作業の具体化から抽出した 工夫のポイントを踏まえると、廃棄体のハンドリング性の向上を図るには、作業性が重要であ り、「物量」、「重量と形状」、「健全性」、「動線」、「環境」という要素が考えられる。これらの要 素の解釈と各要素における考慮事項の例を表 8.2.2-2 に示す。

ハン 向	/ドリング性 ]上の要素	要素の解釈	容易性向上に対する考慮事項の例							
作	物量	回収対象物の少なさ	1回の回収作業で扱う廃棄体の本数							
	重量と形状	回収対象物の扱いやすさ	1回の回収作業で扱う廃棄体容器や PEM 等 の重量、大きさ、形状、							
兼性	健全性	回収対象物の健全性	オーバーパックや PEM 等の健全性							
	動線	回収対象物の動作の少なさ	回収時の方向転換、上下運動、往復等の回数							
	環境	作業環境の確保	作業空間の大きさ、作業環境の維持							

表 8.2.2-2 ハンドリング性向上の要素における考慮事項の例

ここで、「動線」及び「環境」については、処分場レイアウトにも関与するものであるが、処 分場レイアウトの検討は対象外としていることから、本検討においては、主として処分坑道や 処分孔に対する「動線」及び「環境」の考慮事項を踏まえることとなる。

上記を整理した回収の容易性向上の視点と容易性向上のポイントを以下に示す。

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	廃棄体までの アクセス経路 を確保するた	1. プラグ、埋め戻し材、充填材、緩衝材の撤去作業量を削減								
性向上	を確保するための作業量の 少なさ	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								
	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								
廃棄体のハ	重量と形状	4. 回収対象物の軽量化・形状の単純化								
ンドリング	健全性	5. 回収対象物の健全性を確保								
性向上	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 8.2.2-3 回収の容易性向上の視点とポイント

(2) 小工程から抽出された工夫のポイントと容易性向上のポイントとの対応の確認

前項で検討した、回収作業を具体化した小工程から抽出された工夫のポイントと、(1)で整理 した回収の容易性向上の視点および容易性向上のポイントとの対応を確認した。この整理によ り、容易性向上の視点およびポイントが、個々の回収作業から抽出した工夫のポイントを集約 できていることを示す。

各回収作業の容易性を向上させるために抽出した一つの工夫のポイントは、必ずしも一つの 容易性向上の視点および容易性向上のポイントと対になっている(一対一で対応する)とは限 らず、複数の容易性向上の視点および容易性向上のポイントに含まれることもある。すなわち、 ある一つの作業を向上させるための工夫のポイントは、多面的に容易性の向上に展開される場 合があることを意味する。

1) 竪置き・ブロック方式

堅置き・ブロック方式におけるオーバーパックの回収作業を小工程まで展開し、作業上の留 意点と課題に対しての工夫のポイントを抽出し、対応する容易性向上のポイントを整理した結 果を表 8.2.2-4 に示す。 表 8.2.2-4 堅置き・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

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	・状況確認の作業量削減、速度向上、精度向上	1
去	・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	・狭い空間での可動性の向上	1
去	・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	・狭い空間での可動性の向上	1
要坑道の埋め戻	・埋め戻し材撤去・搬出の作業量削減と速度向上	1
し材撤去、坑道	・状況調査の作業量削減と速度向上	2
安定性確保、設	・支保工の補修・補強・更新作業の作業量削減と速度向	2
備復旧	上	2
	・換気・排水設備復旧の作業量削減と速度向上	
B-4:力学プラグ撤	・状況確認の作業量削減、速度向上、精度向上	1
去	・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	・狭い空間での可動性の向上	1
め戻し材撤去、	・埋め戻し材撤去・搬出の作業量削減と速度向上	1
坑道安定性確	・状況調査の作業量削減と速度向上	2
保、設備復旧	・支保工の補修・補強・更新作業の作業量削減と速度向	2
	上	2
	・換気・排水設備復旧の作業量削減と速度向上	
B-6:オーバーパッ	・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
ク周辺の緩衝材	・遠隔操作での作業量削減と速度向上	1
撤去	・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	・機材設置作業の速度・精度の向上	7
クの回収・搬出	・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,
	・収納作業(動線)の単純化	7
	・収納の作業量削減と速度向上	6
	・搬出ルートの確保	3, 4, 5, 6,
	・搬出の作業量削減と速度向上	7
		6, 7
		3, 4, 6, 7

上のポイントの整理

# 2) 横置き・PEM 方式

横置き・PEM 方式における PEM の回収作業を小工程まで展開し、作業上の留意点と課題に 対しての工夫のポイントを抽出し、対応する容易性向上のポイントを整理した結果を表 8.2.2-5 に示す。

# 表 8.2.2-5 横置き・PEM 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
P−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
P-2:止水プラグ撤去	・狭い空間での可動性向上	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
P-3:連絡坑道・主要	・狭い空間での可動性向上	1
坑道の埋め戻し	・埋め戻し材撤去・搬出の作業効率を向上	1
材撤去、坑道安	・状況調査の作業量削減と速度向上	2
定性確保、設備	・支保工の補修・補強・更新作業の作業量削減と速度向上	2
復旧	・換気・排水設備復旧の作業量削減と速度向上	2
P-4:力学プラグ撤去	・状況確認の作業量削減と速度向上	1
	・狭い空間での可動性を向上	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
	・充填材の表面の安定確保の作業量削減と速度向上	2
P-5:PEM 周辺の充填	・狭い空間での遠隔操作機材の可動性向上	1
材撤去	・狭い空間での充填材撤去・搬出の速度向上	1
	・充填材の撤去の作業量削減	1, 3, 4
	・乾燥状態での撤去・搬出の速度向上	1
	・機材の移動量の削減	1
	・狭所での動線の単純化	1
P-6:PEM の回収・搬	・状態確認の速度と精度の向上	5
出	・狭い空間での遠隔操作による可動性の向上	4, 6, 7
	・回収・収納作業(動線)を単純化	6
	・回収・収納の作業量削減と速度向上	3, 4, 5, 6
	・回収 PEM の軽量化	4, 6
	・搬出ルートを確保	6, 7
	・搬出の速度向上と動線の単純化	7
P-7:処分坑道の安定	・狭い空間での機材の可動性向上	2
性確保、設備復	・支保工の補修・補強作業の作業量削減と速度向上	2
旧	・換気・排水設備復旧の作業数削減と速度向上	2

上記の整理によって、(1)で集約した回収の容易性向上の視点および容易性向上のポイントは、 前項で具体的に想定した回収作業から抽出した工夫のポイントを全て包含することを確認した。 8.3 回収の容易性向上を図る方策の検討と整理

本節では、回収の容易性を向上させる代替設計オプションの構築に資するための工学的な方策を具体的に設定し、方策の相互関係について整理を行う。

8.3.1 項では、8.2 で整理した回収の容易性向上のポイントを出発点とした展開により、具体的な工学的方策および手段を検討して整理した。

8.3.2 項では、工学的方策の相互関係について、代替設計オプションを構築する際に必要と考 えられる、「独立」、「相反」、「共存」、「融合」、「相乗」の観点から分類し、マトリクス形式で整 理した。

なお、新たな代替設計オプションの検討であるため、本節以降では、NUMO レビュー版の処 分坑道および処分孔と区別するために、廃棄体を定置する坑道や孔を合わせて"定置坑道"と 呼ぶ。また、定置坑道につながる坑道を"作業坑道"と呼ぶこととした。

8.3.1 容易性向上ポイントの工学的な方策と具体的な手段への展開

8.2 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、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。

容易性の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、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など の方策も導出される。ここではそれらの方策を一旦挙げるが、第1章で整理したように、これ らは技術的アプローチ①および技術的アプローチ②-1に対応するため、今後検討が進展した 後に、地層処分としての成立性や工学的実現性に見通しを得た代替設計オプションに対して検 討がなされる。よって、現段階での代替設計オプションの構築には反映しないこととした。

以下、回収の容易性向上のポイントごとに検討した結果を示す。

(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 回収する廃棄体までのアクセス経路上の回収作業の撤去物としては、8.2 節の回収作業工程 で取り上げてきたプラグ、埋め戻し材、充填材、緩衝材などが挙げられる。これらを対象にし て、撤去する作業量を削減するためには、撤去物の物量低減、撤去作業数の削減、撤去作業負 荷の低減、撤去速度の向上の観点から、以下の方法が考えられる。

- 回収可能性維持期間中定置坑道に埋め戻し材・隙間充填材を設置しない状態
- 埋め戻し材・隙間充填材を必要としない定置坑道形態
- 埋め戻し材・隙間充填材撤去作業量(数量)を削減できる定置形態
- 埋め戻し材・隙間充填材撤去作業の負荷を低減させる方式
- 埋め戻し材・隙間充填材撤去作業の速度を向上させる方式

それぞれの方法に対応する具体的な工学的方策と手段の例を検討した。

1) 回収可能性維持期間中定置坑道に埋め戻し材・隙間充填材を設置しない状態

回収する廃棄体へのアクセスを容易とするために、回収可能性維持期間中の定置坑道の状態 については以下を方策として考慮した。これらの定置坑道の状態設定は、閉鎖措置が決定され たのち埋戻し・充填される。

- 定置坑道を処分場の閉鎖決定までの期間、開放状態とする。
- 廃棄体等を定置後、定置坑道を水没状態とし、回収時には排水、開放状態とする。

開放および水没させる方策は、回収可能性維持期間中の埋め戻し状態の工夫の方策となる。

2) 埋め戻し材・隙間充填材を必要としない定置坑道形態

埋め戻し材・隙間充填材を必要としない定置坑道形態に関しては、以下のような方策が考え られる。

● 定置坑道の形状を円形・小断面とし、隙間充填材を必要としない形態とする。

定置坑道を円形・小断面とすることで、隙間充填材を必要としないイメージとしては、図 8.3.1-1のような概念が想定される。小断面の支保材としては鋼製ケーシングが手段として考え られる。



図 8.3.1-1 円形・小断面に定置した PEM を回収するイメージ

3) 埋め戻し材・隙間充填材撤去作業量(数量)を削減できる定置形態

回収時に定置坑道の埋め戻し材・隙間充填材の撤去作業量(物量)を削減できる定置形態に ついては、以下のような方策が考えられる。

- 大断面で上部のみに埋め戻し材を設置する。
- 緩衝材とオーバーパックを一体で定置すること(PEMの採用)で回収の作業量を削減する。
- 緩衝材を残置し、オーバーパックのみを回収する。
- ● 定置坑道を短くする。

● 撤去する緩衝材の量を少なくする。

大断面で上部のみに埋め戻し材を設置する方策については、TRU 等廃棄物の地層処分概念[2] と類似の大断面定置形態を採用する手段が例として挙げられる(図 8.3.1-2)。また緩衝材やオ ーバーパックを一体で撤去する方策 (PEM の採用)により、緩衝材撤去作業量を削減できるこ とになる。緩衝材を残置しオーバーパックのみを回収する方策は、鋼製ケーシング等で緩衝材 とオーバーパックを隔てるなど定置形態を変更する手段の例もあることから検討対象とする (図 8.3.1-3)。廃棄体を定置する定置坑道を短くすることで、回収する廃棄体までの距離を短 縮でき、アクセス性が向上する。また、撤去する緩衝材の量を削減する方策で回収作業数量を 削減できる。



図 8.3.1-2 大断面坑道の上部のみに埋戻し材を設置し回収時に先行撤去するイメージ



図 8.3.1-3 緩衝材を残置しオーバーパックのみを回収するイメージ

- 埋め戻し材・隙間充填材撤去作業の負荷を低減させる方式 撤去作業時の負荷を低減させる方式については、以下のような方策が考えられる。
  - プラグ、埋め戻し材・隙間充填材を撤去し易い仕様(構造、材料)とする。

撤去し易い仕様の具体的な方策の具体的な手段の例として、力学プラグとして鉄筋コンクリ ートから鋼製プラグに変更するオプションが考えられる(図 8.3.1-4)。また、埋め戻し材・隙 間充填材を撤去し易い仕様にすることも作業を容易となり、例えば、図 8.3.1-2 の大断面坑道 の上部埋戻し材にベントナイトペレットあるいはベントナイトブロックを用いることで、作業 環境が大きくなる効果とも併せて、撤去作業にかかる負荷を小さくすることができる。



図 8.3.1-4 撤去作業の負荷を削減するために鋼製プラグに変更する例

5) 埋め戻し材・隙間充填材撤去作業の速度を向上させる方式

撤去作業の速度を向上させる方策としては、撤去機材の効率化が考えられる。狭い空間で場 合によっては遠隔での撤去作業となることから、撤去に用いる機材の効率化は不可欠となるが、 本検討では回収技術・装置の高度化を行う方策として分類し、代替設計オプションの構築時に は反映しない。

以上の工学的方策と実現させるための手段の例を図 8.3.1-5 に取りまとめた。なお、色付け されている方策は回収技術・装置の高度化を行う方策および回収可能性維持期間中の埋め戻し 状態の工夫などの方策に該当するものである。



図 8.3.1-5 プラグ、埋め戻し材、充填材、緩衝材の撤去作業量の削減に係る工学的方策および 手段の例

(2) 容易性向上のポイント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

回収する廃棄体に至るまでと、回収中あるいは回収後の搬出において、定置坑道の安定性を 確保することは、作業時の安全性確保にとって重要な課題となる。その安全性確保のための作 業量削減のためには、以下の方法が考えられる。

- 安定性確保作業の負荷を低減できるようにする
- 維持管理作業が容易な坑道形状とする
- 効率的な補修・補強機材の開発

それぞれの方法に対応する具体的な工学的方策と手段の例を検討した。

1) 安定性確保作業の負荷の低減

安定性確保作業の負荷を低減させるための具体的な工学的方策としては、以下が考えられる。

- 高耐久性支保工の導入:具体的な手段の例として、劣化・変質の程度の小さい材料(例 えば、高強度コンクリート、セラミック等)を適用する。円形小断面であれば、支保材 として用いる鋼製ケーシングの耐久性(腐食防止も含めて)を持たせる方策も考えられ る。また、覆工コンクリートを設置する方策も考えられる。
- 坑道の速やかな埋戻し:坑道を回収可能性維持期間中に開放状態に置かず、廃棄体定置 後速やかに埋め戻すあるいは隙間を充填することでメンテナンスは不要となるが、回収 のための再掘削時には安定性の確認が必要となる。ただし、これは回収可能性維持期間 中の埋め戻し状態の工夫などの方策に該当する。
- 円形小断面の定置坑道とする:定置坑道として円形小断面として安定性を向上させて、
   耐久性の高い鋼製ケーシングで支保する手段が考えられる(図 8.3.1-6)。この場合、回
   収中はもとより回収可能性維持期間中に支保材を補修・補強することは極めて困難となるため、ある程度の期間を具体的に設定する必要がある。



図 8.3.1-6 円形小断面に鋼製ケーシングを設置することで坑道安定性を確保するイメージ

### 2) 維持管理作業が容易な坑道形状

定置坑道の維持管理を容易とする方策としては、例えば、以下に示すものがある。

- 定置坑道の断面積の拡大:大断面の坑道の場合、作業環境が広くとれ、さらに短ければ 作業が迅速にできることになる。
- 定置坑道の短尺化:小断面の坑道の場合、延長が短ければ長い坑道に比較して容易となる。
- アタッチメントタイプの支保材の適用:手段の例としてセグメントなどを用いることで 支保材の交換が容易になる。
- 定置坑道に覆工:支保材として覆工コンクリートを設置することで、維持管理が容易と なる。



図 8.3.1-7 大断面坑道にすることで補修・補強作業の空間を確保するイメージ

3) 効率的な補修・補強機材の開発

狭い場所でかつ遠隔で補修・補強をしなければならない場合、断面等を変更することなく効率かつ安全に作業するために、小型で多機能を有する機材を開発する方策がある。なお、この 方策は回収技術・装置の高度化を行う方策に該当する。

以上の工学的方策と実現させるための手段の例を図 8.3.1-8 に取りまとめた。なお、色付け されている方策は回収技術・装置の高度化を行う方策および回収可能性維持期間中の埋め戻し 状態の工夫などの方策に該当するものである。



図 8.3.1-8 坑道や処分孔の安定性を確保するための作業量の削減に係る工学的方策および手段の例

(3) 容易性向上のポイント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 回収する廃棄体のハンドリング性を向上させるためには、一回の回収に係るサイクルタイム を低減する方法と回収作業そのものの物量を削減する観点があることから、以下の方法が考え られる。

- 一度の回収で多くの廃棄体を回収できる仕組み
- 廃棄体回収時の作業数の削減
- 一度の回収装置の設置で複数の廃棄体を回収できる仕組み
- 回収装置の効率性の向上

それぞれの方法に対応する具体的な工学的方策と手段の例を検討した。

1) 一度の回収で多くの廃棄体を回収する仕組み

具体的な方策としては、例えば、複数の廃棄体を格納できるオーバーパックや PEM を製作 することが考えられる[4]。当然ながら、NUMO の包括的技術報告書で示されたガラス固化体 を1体格納するオーバーパックや PEM に比較して寸法、重量とも増加する。

2) 廃棄体回収時の作業数の削減

方策としては、例えば、緩衝材とオーバーパックが一体として(PEM) 定置されているのを 回収する方策、回収時に緩衝材を残置しオーバーパックのみを回収する方策が考えられる。こ のためには、緩衝材とオーバーパックの縁を切っておく必要があり、図 8.3.1-9 の例では、緩 衝材(ベントナイト・リング)とオーバーパックの間に鋼製ケーシングを設置し、オーバーパ ックのみを回収する手段が挙げられる。これは、フランスの ANDRA が使用済燃料の直接処分 形態で提唱している手段と同様である。



図 8.3.1-9 回収時にオーバーパックのみ回収する概念のイメージ

3) 一度の廃棄体回収装置の設置で複数の廃棄体を回収する仕組み

図 8.3.1-9 に示す例のように、大きな断面積の作業坑道に回収装置(主として動力部)を設置し、定置坑道内に廃棄体を複数定置する方策が考えられる。この場合、定置坑道内の装置は 廃棄体を把持する役目だけとなる。

4) 廃棄体回収装置の効率性向上

狭隘な空間で遠隔操作による回収装置の効率性向上は、定置形態にかかわらず回収機械の高 度化に関する方策となり、これは回収技術・装置の高度化を行う方策に該当するものである。

以上の工学的方策と実現させるための手段の例を図 8.3.1-10 に取りまとめた。なお、色付け されている方策は回収技術・装置の高度化を行う方策に該当するものである。



図 8.3.1-10 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に係る工学的方策および手 段の例

(4) 容易性向上のポイント4. 回収対象物の軽量化・形状の単純化

回収する廃棄体の形状等の仕様を変更することによる回収時の負荷低減については、以下の 方法が考えられる。

- 廃棄体容器の軽量化
- 廃棄体容器の形状の単純化

それぞれの方法に対応する具体的な工学的方策と手段の例を検討した。

1) 廃棄体容器の軽量化

廃棄体容器(オーバーパック、PEM)を軽量化することで回収作業の負荷は大きく削減される。その方策として以下が考えられる。

- オーバーパックの厚みを薄くし軽量化・小型化を図る
- 緩衝材の厚みを薄くし軽量化を図る
- 上記との組合せと PEM 容器の軽量化・小型化により PEM の軽量化・小型化を図る

上記の方策に対する具体的な手段の例としては、材料や厚さの見直しが考えられる。PEM については、内容物の軽量化・小型化に伴い、外殻の鋼製シェルの厚みも削減することができる。

NUMO 包括的技術報告書で示された PEM の概念に比較して約 1/3 に軽量化されている PEM 概念の検討例もある[5]。

2) 廃棄体容器の形状の単純化

これまでの検討では、廃棄体は円筒形状をしており、定置・回収時のハンドリングでは安定 性の観点から運搬・定置時に転倒等の技術的な困難さがあった。そこで、カナダの例[6]にある ように、矩形の PEM にする方策により、定置・回収時のハンドリング時の安定性の向上を図 ることができる。矩形 PEM の特徴としては、定置時に隙間なく PEM を設置することができる ため、隙間充填材を必要としない定置形態を構築できる点がある。

以上の工学的方策と実現させるための手段の例を図 8.3.1-11 に取りまとめた。



図 8.3.1-11 回収対象物の軽量化・形状の単純化に係る工学的方策および手段の例

(5) 容易性向上のポイント5. 回収対象物の健全性を確保

回収時の廃棄体容器の状態は、回収作業の負荷の低減や回収作業の容易性を向上させるため にも重要な情報となる。廃棄体容器が金属である場合、耐食性のある材料でない限り、時間の 経過とともに腐食が進展していく。定置後から回収作業が行われるまでに回収する廃棄体容器 等の健全性が損なわれることを抑制する方法として以下が考えられる。

- 腐食速度を遅くするために還元雰囲気を早期に達成する。
- 周辺環境との遮断により変質・劣化を抑制する
- 開放状態での健全性確認を容易とする。
- 廃棄体のロバスト性を向上させる

それぞれの方法に対応する具体的な工学的方策と手段の例を検討した。

1) 還元雰囲気を早期に達成する

周辺の還元地下水の浸入速度を早くし、容器周辺を還元性にして腐食速度を抑制する方法で ある。その具体的な方策として、廃棄体を定置後速やかに埋め戻すあるいは間隙を充填し、早 期に飽和させる手段がある。また、小断面で充填材が省略されている場合、ケーシングに地下 水浸入を容易とする孔をあけて PEM 等との還元地下水との接触を早める手段も考えられる。

2) 周辺環境との遮断により変質・劣化を抑制する

1)とは反対の方法により、廃棄体を地下水に接触させないことを前提に方策を考えることに なる。例えば、遮水性の高い材料で内部への地下水の浸透を避ける手段として、PEM 容器によ り地下水との接触を遮断することが考えられる。

3) 開放状態での健全性確認を容易とする。

廃棄体の定置坑道を開放状態にし、廃棄体容器の状態の確認をし易くするには、坑道の安定 性確保が不可欠となり、高耐久性支保等を適用することが方策として考えられる。

4) 廃棄体のロバスト性を向上させる

廃棄体の容器のロバスト性を向上させるには、材質を耐腐食性材料にする、あるいは、腐食 しても健全性を維持できるように容器を厚くするなどの方策が考えられる。

上記のいずれの方法も、その有効性は回収可能性維持期間に依存することは明らかであるため、今後の検討は第3章で扱っている回収可能性維持期間の影響の検討結果を以って論ずることとする。例えば、オーバーパックをケーシング内に設置した場合、ケーシングの腐食に対する検討が必要になると考えられ、回収可能性維持期間がケーシングの設計に影響する。

上記に挙げた方法以外に回収時に廃棄体の状態を確実に確認する方法として、スイスの Nagra が提唱しているパイロット施設でのモニタリング情報を活用する方法がある[7]。Nagra では、処分場の閉鎖が決定されるまでパイロット施設でのモニタリングを継続するため、もし 回収が決定された場合、回収技術の実証を兼ねて廃棄体を掘り出し状態を確認することで、定 置されている廃棄体に関する情報を得ることができる。このような方法は、NEA が提唱したど のアプローチにも該当しないが、現実的な対応策となる。Nagra と類似のパイロット施設を設 置する考えは、フランス、カナダも採用しつつある。

以上の工学的方策と実現させるための手段の例を図 8.3.1-12 に取りまとめた。なお、色付け されている方策は回収可能性維持期間中の埋め戻し状態の工夫などの方策および前述したパイ ロット施設でのモニタリング情報を活用する方法に該当するものである。



図 8.3.1-12 回収対象物の健全性の確保に係る工学的方策および手段の例

(6) 容易性向上のポイント6. 回収時の動作と動線の単純化

廃棄体を回収する場合の動作と動線の単純化は、回収作業の容易性と安全性向上に寄与する。 回収時の動作と動線を単純化するには、以下の方法が考えられる。

- 同一方向(動線)での繰り返し作業
- 回収する廃棄体の動作・動線の単純化

それぞれの方法に対応する具体的な工学的方策と手段の例を検討した。

1) 同一方向(動線)での繰り返し作業

廃棄体の回収作業に係る動線(回収廃棄体の搬出も含め)が同一方向で繰り返される方法で あれば、回収装置の動作の負荷も減り、効率性を高めることができる。例えば、下図に示す坑 道長が短い円形小断面に複数の廃棄体(PEM)が定置されている方策では、廃棄体の回収は坑 口に向かって一方向(上下・左右の動きがない)に引っ張り出すだけであり、単純な一次元の 動線となる。



円形小断面の処分坑道に複数定置されたPEMを一 方向に引き出す装置と作業坑道に設置した動力源を 用いて少ない作業数で回収

図 4.3.14 短尺円形小断面坑道での一次元的な廃棄体回収動線の例

また、大規模空洞での PEM (特に矩形 PEM) の集中配置の方策により、回収時にはフォー クリフトを用いて下部を支えての上下動と出口への運搬という単純な動線となる。



大規模坑道に定置された矩形PEMを可動性の高い 遠隔操縦のフォークリフトで効率良く定置・回収

2) 回収する廃棄体の動作・動線の単純化

定置坑道から回収した廃棄体を搬出する場合、定置坑道の特徴に従って回収する廃棄体の動 線を単純化する坑道レイアウトを設計することで、回収の容易性が向上できる。方策としては、 回収動作が単純な定置方法と装置の採用や、動作と動線が単純となる定置坑道レイアウトの採 用が考えられる。手段の例としては、例えば短尺の円形小断面坑道の場合、断面の大きな作業 坑道(主要坑道)と90°に交差することで、廃棄体の向きを変えることなく、外部に搬出でき るレイアウトが考えられる。

図 4.3.14 大断面坑道での矩形 PEM 回収作業における単純化した回収動線の例



図 4.3.14 小断面定置坑道から回収された PEM の方向を変えずに大断面作業坑道内で搬 出する例

下図に示す大断面集中定置の場合では、回収した廃棄体(PEM)を運搬するフォークリフト を、作業空間を大きくとれる場所で180度反転させ、そのまま搬出する手段が挙げられる。



図 4.3.14 大断面坑道から回収された PEM の方向を変えずに搬出する例

以上の工学的方策と実現させるための手段の例を図 8.3.1-13 に取りまとめた。



図 8.3.1-13 回収時の動作と動線の単純化に係る工学的方策および手段の例

- (7) 容易性向上のポイント7. 作業性を高めるための空間を確保 回収作業の効率性を高めるためには、以下の方法が考えられる。
  - 回収機材の可動性を向上させるため坑道断面を拡張する。
  - 作業特性を考慮した作業空間を組合せる。
  - 作業効率の高い機材を導入する。

それぞれの方法に対応する具体的な工学的方策と手段の例を検討した。

1) 回収機材の可動性を向上させる坑道断面の拡張

回収作業は、狭い坑道よりも、定置坑道を広くする方策によって容易となると考えられる。 定置に用いる機材を回収作業にも転用する場合、遠隔操作による定置作業も容易となる。手段 の例としては、前述した大断面坑道に矩形 PEM を集中定置することにより、隙間を小さくし て埋戻し材の量を上部のみとして、定置・回収は大型のフォークリフトを用いて容易に行う、 等が挙げられる。

2) 作業特性を考慮した作業空間の組合せ

定置概念に従い、定置・回収装置が設計されることになるため、作業空間は与条件となる場合が多い。回収作業のやり易さに重点を置くと、広い坑道での作業が優位になる。これまで検討した容易性向上の方策から見ると、狭い空間でも容易に回収できる方法(円形小断面坑道定置)もあり、その利点を生かすために、例えば、回収装置の動力部や回収容器を設置する場所として比較的広い作業坑道を設計し、単純な容器の回収装置は円形小断面坑道で稼働させる組

合が方策として考えられる(図 8.3.1-14)。これにより、回収作業に必要な可動性が確保され、 装置の移動や回収する廃棄体の搬出を容易になると考えられる。



図 8.3.1-14 広い作業坑道と狭い定置坑道の組合せの例

3) 作業効率の高い機材の導入

作業環境が与条件として回収・搬送機材を設計することが多くなる。その場合、狭く遠隔で の作業となる回収装置の作業動作を速め、走行用動力を連結する装置の開発も考えられる。現 在検討されている PEM の重量は約 37 トン[2]であることから、回収時の機材と回収後の地表 までの搬送のための機材を別個にするのが合理的になると考えられる。ただし、これは回収技 術・装置の高度化を行う方策に区分される。

以上の工学的方策と実現させるための手段の例を図 8.3.1-15 に取りまとめた。なお、色付け されている方策は回収技術・装置の高度化を行う方策に該当するものである。



図 8.3.1-15 作業性を高めるための空間確保に係る方策および手段の例

#### 8.3.2 工学的方策の組合せに関する整理

代替設計オプションは回収の容易性を向上させる工学的方策を組合せて構築するため、工学 的方策の組合せに関する整理を行った。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、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。

(1) 工学的方策の集約と整理

前項で挙げた工学的方策のうち、本検討で対象とする、回収の容易性を設計に考慮する方策 について、重複した方策を整理して集約した。その結果、図 8.3.2-1 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の方策に整理することができた。 アクセス性向上とハンドリング性向上の両方に寄与する方策には、A、B、C、D、G、Lが挙 げられる。

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	<ul> <li>&gt; 隙間充填を必要としない円形小断面坑道</li> <li>&gt; 大断面坑道上部のみを埋め戻し</li> <li>&gt; PEMの採用で作業量を削減</li> <li>&gt; OPのみを回収</li> <li>&gt; 定置坑道長の短尺化</li> <li>&gt; 緩衝材の削減</li> <li>&gt; 撤去容易なプラグや充填材導入</li> </ul>	ABCDELF	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.大断面坑道での定面
	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	<ul> <li>&gt; 高耐久性支保工等の適用</li> <li>&gt; 円形小断面の坑道</li> <li>&gt; 定置坑道断面を拡大</li> <li>&gt; 定置坑道長の短尺化</li> <li>&gt; アタッチメントタイプの支保材導入</li> </ul>	G A B E H	C. PEMICよる版面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
	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	収 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3		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
廃棄体の	4. 回収対象物 の軽量化・形状 の単純化			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
0 ハンドリング	5. 回収対象物 の健全性を確保	<ul> <li>&gt; 小断面で充填材を省略</li> <li>&gt; PEMによる外部環境との遮断</li> <li>&gt; 止水機能を有する支保工の採用</li> <li>&gt; 高耐久性支保工等の適用</li> <li>&gt; 耐腐食性材料の使用</li> <li>&gt; 容器の厚さを増加</li> </ul>	A C O G P Q J R S	<ul> <li>P. 耐腐食性材料の採用</li> <li>Q. 容器の厚さを増加</li> <li>R. 大断面坑道に廃棄体の集中定置</li> <li>S. 回収動作が単純な定置方式と装置の採用</li> <li>T. 動作と動線とが単純な定置坑道レイアウト</li> </ul>
性	6. 回収時の動 作と動線の単純 化	<ul> <li>&gt; 小断面坑道に複数の廃棄体の定置</li> <li>&gt; 大断面坑道でのPEMの集中定置</li> <li>&gt; 回収動作が単純な定置方式と装置の採用</li> <li>&gt; 動作と動線が単純な定置坑道レイアウト</li> </ul>		U. 大断面作業坑道と小断面定置坑道の組合せ
	7. 作業性を高 める空間を確保	<ul> <li>&gt; 大断面坑道の採用</li> <li>&gt; 大断面作業坑道と小断面定置坑道の組合せ</li> </ul>	B U	

図 8.3.2-1 容易性向上のポイントから展開した工学的方策の集約

- (2) 工学的方策の組合せに関する整理
  - 1) 工学的方策の組合せに関する関係性の設定

代替設計オプションは回収の容易性を向上させる工学的方策を組合せて構築する。そのため、 集約した 21 の工学的方策ごとの特徴を踏まえて、それぞれの方策を組合せるときの容易性向 上に関する相互の関係性を、以下の「独立」、「相反」、「共存」、「融合」、「相乗」の五つに分類し

「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徴を発揮する 「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

以下、aとbを回収の容易性向上の方策の例として、それぞれの関係性について述べる。

「独立」とは、aという方策とbという方策が、同じ容易性向上であっても手段(アプロー チ)が異なり、それぞれが「独立」して回収の容易性に寄与する場合に相当する。 集約(共存) や一体化(融合)を必要としない関係をいう。

「相反」とはaとbの方策のアプローチが相いれない関係(例えば、小断面円形坑道の定置 と大断面坑道の定置)にある場合で、概念として組合せることができない関係を意味する。

「共存」とは、 a という方策と b という方策について、 a と b の方策は異なるアプローチで あるが、一つの概念のもとに集約でき、容易性向上にそれぞれの特徴で寄与できることをいう。

「融合」とは、aという方策とbという方策が、一つの概念に一体化(合体)することで容 易性向上に寄与できることをいう。

「相乗」とは、aの方策とbの方策が融合し一体化することで、さらに容易性を向上させる 相乗効果を生み出す関係をいう。この「相乗」効果を有する方策は、回収の容易性を向上させ る代替設計オプションを構築するうえで重要な要素となると考えられる。

2) 工学的方策の組合せに関する相互の関係性の整理

A~Uまでの21の工学的方策が有する回収の容易性向上の特徴を考慮し、相互の関係性を検 討した結果を Appendix 8-1 に示す。

た。

## 3) 工学的方策の組合せに関する相互関係のまとめ

各工学的方策の相互の関係性を「独立」、「相反」、「共存」、「融合」及び「相乗」の五つに分類 した結果をマトリクス形式で表 8.3.2-1 にまとめる。

	A	в	c	D	E	F	G	н	I	J	ĸ	L	м	N	0	Р	Q	R	s	т	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
в			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
с				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
Е						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									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
н	A. 隙	間充填を	必要とし	ない円	形小断面	55.000	置		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	」B.大	断面坑i	道での定	置 トオーバ	<u>パック</u>	の-体表	रंग ति । जि			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	D.緩	衝材を残	電する	回収方式	t(OPの	の <u>麻</u> み回収)	± LI 1X				相乗	相乗	相乗	独立	融合	共存	独立	相反	相乗	融合	融合
к	- E.定 - F. 撤	置坑道0 (去容易)	D短尺化 なプラグ	; の採用								共存	相乗	相乗	共存	融合	相反	相乗	相乗	独立	共存
L	G.高	耐久性	支保工等	の適用									相乗	相乗	独立	独立	独立	相乗	融合	共存	共存
м	夜	タッナメン 数の廃す	ノトダイノ 集体を格	の支係の 納する容	ォ 導 入 『器の 採』	用			対	称「				相乗	独立	相乗	相反	相乗	融合	共存	共存
N	」」 「」 「」	い断面坑	道に複数	の廃棄	体を定置	t			-	-					独立	相乗	独立	相乗	融合	独立	独立
0	_ L.緩	衝材の軸	₹量化	主里化												融合	独立	共存	相乗	独立	共存
Р	M.PE	EMの軽 i 形PFMの	量化 D 採用													102-122	相反	融合	独立	独立	共存
Q	0. LL	水機能	を有する	支保工の	O採用													独立	独立	独立	独立
R	- P. m Q. 容	F腐食性 器の厚る	材料の語 を増加	米用				۲	l	l	l		l	l	L	l			相乗	融合	融合
s	R.大	断面坑	道に廃棄	体の集中	中定置	う気を		- 「独	立」:組合 反1:容易	せに関係	系なくそれ こ寄与する	ぞれ独立 るが、 方等	こした方策 した方策	として容 する関係(	易性向上 こあり組存	に寄与す させが成り	・る 立しない			融合	相乗
т	5.回  	収到作れ  作と動線	い早純な	正直力1 純な定置	に表直	の採用		- 「共	存」:組合	せの中で	それぞれ	1の方策:	が容易性	向上に向	けて特質	を発揮す	-3				融合
Ū	- U. 大	断面作	業坑道と	小断面定	2置坑道	の組合	±	- 「相	□」.万束 乗」:組合	せること	により、相	、 500, 1乗効果た	が付加され	るの住る	向上がさ	らに向上す	する	: —			
U			 I	1			/	·	r	1	r	r		r		r		i i			

表 8.3.2-1 工学的方策の組合せに関する相互関係のまとめ

図 8.3.2・2 はそれぞれの方策を組合せて容易性を高めた代替設計オプションを構築する際の アプローチ例である。A から U までの 21 の方策の組合せにより、一つの合体した代替設計オ プションを構築していく。例えば、A と C、D、また、B と C、D の組合せはいずれも「相乗」 効果を生み出す。一方、A と B とは相いれない「相反」の関係、C と D も「相反」の関係とな っていることから、A と C、A と D、B と C、B と D でそれぞれ一つの概念を構築できる見通 しがある。



図 8.3.2・2 方策の組合せによる容易性向上の代替設計オプション構築のアプローチ例

8.4 工学的方策の選択と組合せによる代替設計オプションの構築

本節では 8.3 で整理した工学的方策の選択と組合せを用いて、回収の容易性を高めた代替設計オプションを設定し、具体的なイメージを構築した。検討の流れを次に述べる。

8.4.1 項では、工学的方策の相互関係の整理に基づく代替設計オプション構築の考え方を設定した。

8.4.2 項では、代替設計オプション構築の考え方に基づき、前節で検討した工学的方策の組合 せに関する相互関係から、「相乗」と「融合」の多い組合せを有する方策を抽出し、その方策を 系統的に集約して一体化した概念を記述により構築した。

8.4.3 項では、一体化した概念を対象に、代替設計オプションの具体的なイメージを構築した。 なお、本節で構築する代替設計オプションの具体的なイメージは、あくまでも回収の容易性 向上のみに着目して導出された概念オプション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、次節で言及する。

8.4.1 代替設計オプション構築の考え方の検討

代替設計オプションの構築の考え方は、前節で検討した回収の容易性を向上させる工学的方 策の組合せの整理を系統的に反映させることを基本とした。方策の相互の関係性である「独立」、 「相反」、「共存」、「融合」および「相乗」について、以下の考え方で代替設計オプションの具体 的なイメージ構築に結び付けることとした。

- 互いに「独立」関係となる方策は、代替設計オプションを構築したのち、方策としてオプションの容易性向上に寄与できるかを検討してから取り入れるかを判断する。
- 互いに「相反」関係にある方策は、代替設計オプション構築作業ではそれぞれ別の 概念として取り扱う。
- 互いに「共存」関係にある方策は、代替設計オプション構築時に組み入れを検討する。
- 互いに「融合」関係にある方策は、代替設計オプションに組み入れる。
- 互いに「相乗」効果がある方策は、優先的に設計オプションに組み入れる。

例えば、前節で取り扱った方策 A(隙間充填を必要としない円形小断面坑道)に対する他の 方策の組合せの相互関係を以下に示す。

表 8.4.1-1 A(隙間充填を必要としない円形小断面坑道)と他の方策の組合せの関係性

	А	В	С	D	E	F	G	н	Ι	J	к	L	м	N	0	Р	Q	R	S	Т	U
А	/	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

このうち、Aとの組合せで「相乗」効果があると判断された 10 個の方策と 2 個の融合する方策を A の方策に集約し一体化させることで代替設計オプションのイメージを構築することになる。

例えば、「相乗」のみの方策を組合せると「A.隙間充填を必要としない円形小断面坑道」に定置した「C. PEM による緩衝材とオーバーパックの一体回収」というイメージができる。

この基本概念にその他の「相乗」効果のある方策を組み入れると、「G.高耐久性支保工」を適 用した円形小断面に、「I.複数の廃棄体を格納」し、「M.軽量化」かつ「P.耐腐食性外殻を有する」 PEM を坑道内に「J.複数体」定置し、「S.回収動作が単純な装置」を「U.小断面に、動力を大断 面に設置し」て PEM を回収するという、定置坑道、定置、回収、装置、坑道の組合せという代 替設計オプションのイメージを構築することができる。「K.オーバーパックの軽量化」は PEM の軽量化に包含される。

次節では、このようなアプローチで代替設計オプションの基本とする二つの相反方策である A(小断面)とB(大断面)を基軸に代替設計オプションを構築する。

8.4.2 工学的方策の組合せによる一体化した概念の構築

8.3.2 で実施した、工学的方策の組合せに関する相互関係の整理から、「相乗」効果の数を取 りまとめた結果を表 8.4.2-1 に示す。表中、黄色で示しているのは 9 個以上の「相乗」効果が あると整理した方策である。

															2 33						
	Α	В	С	D	E	F	G	н	I	J	к	L	м	N	0	Ρ	Q	R	S	Т	U
	10	10	10	9	7	1	6	1	9	9	10	5	11	9	1	8	0	9	11	1	5
A	Y	相反	相乗	相乗	融合	融合	相乗	相反	相果	相樂	相樂	共存	化果	相反	共存	相乗	独立	相反	有果	共存	相果
в		1	相乗	相乗	融合	部合	相乗	独立	相東	相反	相果	独立	在来	相乗	共存	相乗	独立	相乗	有果		
C	ĵ.	1		相反	相乗	独立	独立	独主	-	10	相樂	相乗	<b>#</b>	相乗	独立	相乗	独立	10	融合	融合	
D	j –	ĵ.		1	融合	融合	相乗	相反一	相乗	布莱	相乗	独立	権反	相反	独立	相乗	独立	播立	相乗	共存	相乗
Е	j.	j			$\setminus$	融合	融合	融合	共存	格乗	共存	共存	格乗	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	共存	共存
н	A. 隙	間充填を	必要と	ない円	形小断	面坑道定	t置	/	独立	独立	独立	独立	独立	独立	融合	相乗	独立	独立	教立	融合	共存
I	B. 大断面坑道での定置									##	根果	抽立	-	-	**	融合	- 独立 -	相東	-	相乗	
Ы	D. 緩	価材を残	蔵面付	回収方式	t(OPO	み回収	알미粎				-10-	-1910	-	**	-	##	法中	105	-	-	
ĸ	E.定	置坑道0	0短尺化									#75	+10.00	+10.00	#7	-	- 195	1986	+	- Main	# 75
1	F. 捆 G. 高	<b>太容易</b> 耐久性	なノフク	の採用					対称	<u>к</u> —		1	10 m	11 A	独立	油立	油文	100		#左	#友
	H. 7	タッチメン	ハタイプ	の支保	材導入			<u> </u>	201 F3		38 86			11	14.12	78.12		TUPE		7417	THE
M	し複	数の廃す	東体を格	納する名	学器の探	用		<u> </u>		2	2 2	2. 7		作来	雅立	相果	相反	怕果	RE	<b>光</b> 仔	· 开仔
N	K A		国に接来	経営化	PCAL						12 20				独立	相樂	独立	相果	融合	独立	独立
0	L緩	衝材の	¥量化					i .								融合	独立	共存	相乗	独立	共存
Р	M. PE	EMの軽	化														相反	融合	教文	独立	共存
0	N. 矩	形PEM0	り採用	<b>大月</b> 丁(	D t≅ ⊞												1	X	X4.++	X4-+	X4-77
v	□. 止不慌能を有する文禄工の採用 ■ ■ 耐度合性材料の採用							<u> </u>	- 5 M 17 M 15	2004/07_04			e Domenikasi	e Norderer er en er	6 28- 19 5	1855-1857 S		134	111	1 H L	1 Martin
R	Q. 容器の厚さを増加								:組合せ	に関係な	よくそれそ	れ独立し	た方策	して容易	8性向上(	こ寄与す	3	1	相乗	融合	-融合+
S	R. 大断面坑道に廃棄体の集中定置								: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	えしない		1	融合	相乗
Т	S. 回収動作が単純な定置方式と装置の採用								」:粗合せ い方策を	の中でも	にれたれ	の万策が	容易性障害として	可上に同じの思想を	てて特質	を発揮する	0				融合
11	Ⅰ T. 動作と動線とが単純な定置坑道レイアウト Ⅰ 大断面作業坑道と小断面定置坑道の組合せ								]:組合也	ることに	より、相野	東効果が	付加され	容易性向	上がさら	に向上す	する				
<b>•</b>							Contraction of the local division of the loc														

表 8.4.2-1 工学的方策ごとの「相乗」効果の数

ここで、表 8.4.2-1 の黄色で示した「相乗」効果が多い方策について、以下のように整理した。

● A. 隙間充填を必要としない円形小断面坑道定置・・・「相乗」効果のある方策は、

10 方策⇒一体化の基軸となる概念として扱う

- B. 大断面坑道での定置・・・「相乗」効果のある方策は、10 方策⇒一体化の基軸となる概念として扱う
- C. PEM による緩衝材とオーバーパックの一体型回収・・・「相乗」効果のある方策 は 10 方策→一体化の概念の構成方策として扱う
- Ⅰ. 複数の廃棄体を格納する容器の採用・・・「相乗」効果のある方策は9方策⇒方策
   としてBとDで扱う
- J. 小断面坑道に複数の廃棄体を定置・・・「相乗」効果のある方策は 9 方策⇒方策
   としてAとDで扱う
- K. オーバーパックの軽量化・・・「相乗」効果のある方策は10方策⇒方策としてA、
   B、Dで扱う
- M. PEM の軽量化・・・「相乗」効果のある方策は11方策⇒方策としてAとBで扱う
- N. 矩形 PEM の採用・・・「相乗」効果のある方策は9 方策⇒方策として B で扱う
- S. 回収動作が単純な定置方式と装置の採用・・・「相乗」効果のある方策は、11 方 策⇒方策として A、B、D で扱う

以上のように、一体化の基軸となる概念として扱うこととした方策 A、B、D と、他の「相乗」 効果の数が多い方策との組み合わせにより、A、B、D の3種類の概念を構築することとして、 以降、代替設計オプションとして検討の対象とする概念を次の名称で呼ぶこととする。

- 代替設計オプションA:円形小断面坑道 PEM 複数定置概念
- 代替設計オプションB:大断面坑道矩形 PEM 集中定置概念
- 代替設計オプション D: 円形坑道横置きブロック定置概念

#### (1) 代替設計オプション A. 円形小断面坑道 PEM 複数定置概念

隙間充填材を必要としない円形小断面の方策と他の方策との組合せを整理した結果、「相乗」 効果を生み出す組合せは10個の方策があり、「融合」する方策は2個となった。これらの関係 を系統的に整理したものを、図 8.4.2-1に示す。



図 8.4.2-1 代替設計オプション A. 円形小断面坑道 PEM 複数定置概念における相乗と融合の 組合せの整理

円形小断面 PEM 複数定置概念に集約される方策相互の特徴を考慮して、概念の概要を記述 した結果を以下に示す。濃茶色字が「相乗」効果のある方策、青字が「融合」する方策を示して いる。

隙間充填材を必要としない円形小断面坑道に、緩衝材とオーバーパックを一体で回収でき る PEM を複数体定置(PEM には廃棄体を複数格納したオーバーパックも可)する。定 置坑道長を短尺化することで回収する廃棄体へのアクセス性が向上できる。円形小断面に は坑道安定性を確保することと PEM 回収時の装置のハンドリング性を向上させるために 耐腐食性の高耐久性ケーシング材を設置する。オーバーパック及び PEM を軽量化し、耐 腐食性材料を使用することで、より回収作業の負荷が低減できさらに容易性を向上でき る。また、小断面内での定置・回収には動作が単純な回収装置を用い、動力部は広い作業 坑道に設置することで一度回収装置を据えれば複数の PEM を回収することができ、作業 数が低減する。小断面坑口には撤去容易な鋼製プラグを設置してアクセス性を向上させ る。

上記の相乗と融合の方策だけなく、例えば、共存する PEM 内の緩衝材の軽量化、止水機能 を有する支保材の適用、動線・物流を考慮した定置坑道レイアウトも合体させることは可能で ある。

#### (2) 代替設計オプションB:大断面坑道矩形 PEM 集中定置概念

埋め戻し材・隙間充填材の撤去作業量を削減できる大断面坑道での定置の方策と他の方策と の組合せを整理した結果、「相乗」効果のある方策は9個、「融合」する方策は5個となった。 これらの関係を系統的に整理したものを、図 8.4.2-2 に示す。



図 8.4.2-2 代替設計オプション B:大断面坑道矩形 PEM 集中定置概念における相乗と融合の 組合せの整理

大断面矩形 PEM 集中定置概念に集約される方策相互の特徴を考慮して、概念の概要を記述 した結果を以下に示す。濃茶色字が「相乗」効果のある方策、青字が「融合」する方策を示して いる。

上部のみを埋戻すことで撤去量が少なくなる大断面坑道に、緩衝材とオーバーパックを 一体で回収できる PEM あるいは複数の廃棄体を格納したオーバーパックを集中定置す ることで回収時の作業効率の向上を図る。容器の形状を矩形 PEM とすることで隙間充 填材を省略でき、フォークリフトなど単純な回収装置を用いることで定置・回収が容易と なる。オーバーパックや PEM を軽量化し、耐腐食性材料を使用することで回収作業の負 荷を削減でき容易性は向上する。大断面坑道は短尺化することで回収する廃棄体までの アクセス性を高め、支保材に高耐久性部材を使用することで坑道安定性確保の作業量を 減らし、動線と物流を考慮して定置坑道レイアウトを単純化し、大断面坑道とアクセス用 の小断面坑道を組合せることで動線・物流の単純化を図れ、小断面の坑口には撤去が容易 な鋼製プラグを設置する。

上記の相乗と融合の方策の合体だけでなく、共存関係にある止水機能を有する支保材の適用 も組み入れることは可能である。 (3) 代替設計オプションD:円形坑道横置きブロック定置概念 緩衝材を残置しオーバーパックのみを回収する方策と他の方策との組合せを整理した結果、「相乗」効果のある方策は9個、「融合」する方策は2個であることが分かった。これらの関係 を系統的に整理したものを、図 8.4.2-3 に示す。



図 8.4.2·3 代替設計オプション D: 円形坑道横置きブロック定置概念における相乗と融合の組 合せの整理

円形坑道横置きブロック定置概念に集約される方策相互の特徴を考慮して、概念の概要を記述した結果を以下に示す。黒茶色字が「相乗」効果のある方策、青字が「融合」する方策を示している。

円形坑道に、高耐久性の支保材である鋼製ケーシングを設置、リング状の緩衝材ブロック を定置するとともにオーバーパックの縁を切るためのベントナイトブロックの内側に耐 腐食性のあるケーシングを設置し、内部に複数のオーバーパックを定置する(複数格納オ ーバーパックでも可)。回収時には内側のケーシングに沿ってオーバーパックのみを回収 し、緩衝材は残置する。オーバーパックを軽量化し、耐腐食性材料を使用することで回収 時の負荷は低減する。小断面の鋼製ケーシング内のオーバーパックを回収するために、回 収装置は単純化し、動力部は断面の広い作業坑道に設置する。坑口には撤去容易な鋼製プ ラグを設置し、回収距離を短くするために処分坑道は短尺化する。

大断面坑道でのオーバーパックのみの回収は、作業空間を広く取ることができることから、 定置の形態を工夫することで可能となる。

- 8.4.3 一体化した概念に基づく代替設計オプションの具体化 本節では、8.4.2 において一体化した 3 つの概念を対象に、代替設計オプションの具体的なイ メージを設定する。
- (1) 代替設計オプション A. 円形小断面坑道 PEM 複数定置概念

代替設計オプションAの特徴については、前項で「相乗」効果のある方策(濃茶字)と「融合」関係の方策(青字)を用いて下記に記述した。

隙間充填材を必要としない円形小断面坑道に、緩衝材とオーバーパックを一体で回収でき る PEM を複数体定置(PEM には廃棄体を複数格納したオーバーパックも可)する。定 置坑道長を短尺化することで回収する廃棄体へのアクセス性が向上できる。円形小断面に は坑道安定性を確保することと PEM 回収時の装置のハンドリング性を向上させるために 耐腐食性の高耐久性ケーシング材を設置する。オーバーパック及び PEM を軽量化し、耐 腐食性材料を使用することで、より回収作業の負荷が低減できさらに容易性を向上でき る。また、小断面内での定置・回収には動作が単純な回収装置を用い、動力部は広い作業 坑道に設置することで一度回収装置を据えれば複数の PEM を回収することができ、作業 数が低減する。小断面坑口には撤去容易な鋼製プラグを設置してアクセス性を向上させ る。

これらの特徴を具体的なイメージで視覚化した例を図 8.4.3・1 に示す。

緩衝材とオーバーパックを一体化した PEM 外周には、鋼製ケーシング内に挿入・牽引する ために設置間隔を確保し滑りを良くするためにセラミック製のランナーを設置する。PEM は円 形小断面内に水平方向あるいは鉛直方向に定置され、坑口には鋼製プラグが設置される。円形 小断面の長さは、下図の例では NUMO が1日当たりの廃棄体の定置数を5体としている工程 を参考にして、PEM5本分の短尺としている。定置坑道は定置・回収装置の動力部を有する装 置を比較的大きな断面を有する作業坑道に設置し、5本の PEM を連続して定置・回収できる装 置を遠隔で稼働させる。



#### 作業坑道(大断面)と定置坑道(小断面)の組み合わせ

図 8.4.3-1 代替設計オプションA: 円形小断面 PEM 複数定置概念のイメージ

- (2) 代替設計オプションB:大断面坑道矩形 PEM 集中定置概念
  - 代替設計オプション B の特徴については、前項で「相乗」効果のある方策(濃茶字)と「融合」関係の方策(青字)を用いて下記に記述した。

上部のみを埋戻すことで撤去量が少なくなる大断面坑道に、緩衝材とオーバーパックを 一体で回収できる PEM あるいは複数の廃棄体を格納したオーバーパックを集中定置す ることで回収時の作業効率の向上を図る。容器の形状を矩形 PEM とすることで隙間充 填材を省略でき、フォークリフトなど単純な回収装置を用いることで定置・回収が容易と なる。オーバーパックや PEM を軽量化し、耐腐食性材料を使用することで回収作業の負 荷を削減でき容易性は向上する。大断面坑道は短尺化することで回収する廃棄体までの アクセス性を高め、支保材に高耐久性部材を使用することで坑道安定性確保の作業量を 減らし、動線と物流を考慮して定置坑道レイアウトを単純化し、大断面坑道とアクセス用 の小断面坑道を組合せることで動線・物流の単純化を図れ、小断面の坑口には撤去が容易 な鋼製プラグを設置する。

これらの特徴を具体的なイメージで視覚化した例を図 8.4.3・2 に示す。緩衝材とオーバーパ ックを一体化した矩形 PEM (内部には複数のガラス固化体を格納)を集中定置することで、 PEM 間の隙間充填材を必要としない定置形態とする。埋戻しは上部のみとなり、回収可能性維 持期間中に埋め戻しをする場合でも、埋め戻し材にペレットを用いることで撤去は比較的容易 と考えられる。例えば廃棄体を 3 体収納した大型矩形 PEM を用いることで遠隔操作のフォー クリフトを用いて定置・回収が安定して実施できることになり、動線と物流は坑道の前後方向 の単純な形態となる。

大断面坑道の配置は、下図に示す並列配置で小断面のアクセス坑道で主要坑道と連結する TRU 廃棄物処分坑道のレイアウトと類似したものが考えられる。この小断面アクセス坑道の端 部に撤去が容易な鋼製プラグを設置する。

下図に示す矩形 PEM を坑道に定置し、3 列定置して 1 列ベントナイトブロックを設置した のは、PEM 容器の腐食による膨張と内部ベントナイトの膨潤圧の増加を緩衝させる役割を期待 しているためである。実際のベントナイトブロックの定置位置と寸法等は定量的な設計で決定 される。



図 8.4.3-2 代替設計オプション B: 大断面坑道矩形 PEM 集中定置概念のイメージ

(3) 代替設計オプションD:円形坑道横置きブロック定置概念

オーバーパックのみを回収する代替設計オプション D の特徴については、前節で「相乗」効 果のある方策(濃茶字)と「融合」関係の方策(青字)を用いて下記に記述した。

円形坑道に、高耐久性の支保材である鋼製ケーシングを設置、リング状の緩衝材ブロック を定置するとともにオーバーパックの縁を切るためのベントナイトブロックの内側に耐 腐食性のあるケーシングを設置し、内部に複数のオーバーパックを定置する(複数格納オ ーバーパックでも可)。回収時には内側のケーシングに沿ってオーバーパックのみを回収 し、緩衝材は残置する。オーバーパックを軽量化し、耐腐食性材料を使用することで回収 時の負荷は低減する。小断面の鋼製ケーシング内のオーバーパックを回収するために、回 収装置は単純化し、動力部は断面の広い作業坑道に設置する。坑口には撤去容易な鋼製プ ラグを設置し、回収距離を短くするために処分坑道は短尺化する。

これらの特徴を具体的なイメージで視覚化した例を図 8.4.3-3 に示す。NUMO が1日当たり の廃棄体の定置数を5体としている工程を参考にして、オーバーパック5体を定置する長さを 想定した短尺の円形坑道に支保材として止水機能を有する鋼製ケーシングを設置する。このケ ーシングと内側のケーシングに沿って、リング状のベントナイトブロックを挿入・定置する。 オーバーパックの外周にセラミックスペーサ(またはランナー)を装着し、内側のケーシング 内にプッシングマシンで挿入・定置し、坑口には鋼製プラグを設置する。

回収時には、鋼製プラグを撤去し、作業坑道に設置した動力車により定置坑道内のオーバー パックを、把持装置を有するプルマシーンにより回収する。オーバーパック回収装置は遮蔽機 能を有し、回収装置とリンクした遮蔽付きの搬送車両に積み替える。



図 8.4.3-3 代替設計オプション D: 円形坑道横置きブロック定置概念のイメージ
#### 8.5 代替設計オプションの実現性の検討および今後の展開

前項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した 例示である。今後は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の提示に向けた実現性の検討に取り組んで いく必要がある。段階的な処分場設計の開発は NUMO が取り組んでおり、現状の二つの処分 概念の整備の過程が示されている[2]。8.1.2 で検討の方針として示したように、代替設計オプシ ョンの実現性の検討においても、NUMOの検討の流れを踏襲することとする。本節では、代替 設計オプションの実現性の検討方針を示し、実現性に関する先行的な検討として、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を示す。また、代替設計オプション の検討についての今後の展開を述べる。

## 8.5.1 代替設計オプションの実現性の検討方針

代替設計オプションの実現性の検討は、NUMO が実施している段階的な処分場設計の流れを 踏襲することを方針とする。NUMO の包括的技術報告書には、設計によって持たせようとする 性質と能力を設計因子(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)として設定し、処分場の設計は設計因子に基づき設定された要求事項に基づく 設計の流れにしたがって行われることが示されている[2]。NUMOの処分場の設計フローでは、 各段階において地質環境モデルを考慮した一連の検討に基づく設計が行われ、設計された処分 場に対して閉鎖前および閉鎖後長期の安全評価が実施され、必要に応じてフィードバックを行 うことが示されている。また、処分場設計の中の地下施設の設計フローでは、坑道の設計、埋 め戻し材・プラグの設計、地下施設レイアウトの設計、地下施設設備の設計の手順で設計する ことが示されている。地下施設の設計で最初に実施される坑道の設計では坑道断面形状・寸法 の設定、設置深度および地質環境モデルの力学特性を考慮した支保の設計などが行われる。特 に、処分坑道および処分孔の中心間距離は空洞安定性の検討および廃棄体による熱影響の検討 からも設定される。廃棄体による熱影響の検討では、廃棄体の発熱を考慮した熱伝導解析によ り、緩衝材の最高温度が制限温度(100℃)を下回るように処分坑道中心間距離と廃棄体の定置 間隔を設定する。ここで、緩衝材の制限温度は熱変質を防止するため100℃と設定されている。 このような坑道の設計が行われた後に、地下施設の設計では、埋め戻し材・プラグの設計や地 下施設のレイアウトの設計と、地下施設に必要な設備の設計が行われる。NUMO は、閉鎖前お よび閉鎖後長期の安全評価を実施して設計された処分場について、他の設計因子である回収可 能性、工学的成立性、経済的合理性を考慮する。

本検討が対象としている地下施設に関して、包括的技術報告書で実施されている二つの処分 概念(堅置き方式、横置き方式)の整備の過程を図 8.5.1-1 のように整理した。

現状の二つの処分概念	(竪置き方式	式と横置き方式)の整備	前の過程			
人工バリアの設計 施工・定置方式の検討	<ul> <li>·熱影響評価</li> <li>·空洞安定性</li> <li>評価</li> </ul>	<b>地下施設の設計</b> 定置間隔 坑道中心間距離	レン 工学的 成立性 の評価	工学技術の整備 建設技術(施工方法など) 操業技術(定置方法など) 閉鎖技術(理め戻し技術など) 回収技術(回収方法など)		合理化
閉鎖前・閉鎖後長期の安全評価				回权可能注触可汉例(影響計)	MLXM/ #E14	121111/4-C/

図 8.5.1-1 現状の二つの処分概念(竪置き方式、横置き方式)の整備の過程

8.1.2 の検討方針で述べたように、代替設計オプションの実現性の検討は、NUMO が実施し ている段階的な処分場設計の流れを踏襲する。また、同様に検討方針で述べたように、本検討 では処分場全体レイアウトは検討対象とせず、力学プラグより先の処分坑道側に着目した検討 を行った。サイトや設計が決まっていない現状では、地上から地下までの全体レイアウトに対 して議論できない段階にあるためである。これらを踏まえ、代替設計オプションの実現性の検 討の過程を図 8.5.1-2 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 8.5.1-2 提案する代替設計オプションの整備の過程

図 8.5.1-2 に示すように、代替設計オプションの検討では、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(または孔)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 らを参照した設定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る実現 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の検討を行う。ここで、回収の容易性向上が見 込めないと考えられる代替設計オプションについては、回収の容易性向上に寄与する方策の組 合せを再考することにより、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によって工学 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念頭においた検討を進めていく。

本検討では、図 8.5.1-2 の代替設計オプションの実現性に関する先行的な検討として、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を把握した。結果を次項で述べる。

8.5.2 廃棄体からの熱影響に対する先行的な検討

回収の容易性向上の視点から構築した3種類の代替設計オプションは、いずれも廃棄体の集 中定置が特徴となっている。特に代替設計オプションBでは、大規模坑道内にガラス固化体3 体を格納したオーバーパックを含む矩形 PEM を隙間なく定置するため、ガラス固化体の発熱 による影響が懸案される。

本項では、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等で設定されている緩衝材等の制限温度との比較を 行った。最後に検討結果をまとめ、今後の課題を整理した。

## (1) 代替設計オプションの概略仕様例の設定

廃棄体からの熱影響について定量的な評価を行うためには、代替設計オプションの概略仕様 例を設定する必要がある。設定にあたっては NUMO 包括的技術報告書(レビュー版)を参照 し、人工バリア、坑道断面、坑道中心間距離などの概略仕様例を検討した。

人工バリアおよび PEM の仕様は NUMO 包括的技術報告書(レビュー版)の概念[2]を踏襲 することとして、現段階ではオーバーパック、緩衝材、PEM 容器等の仕様変更により軽量化を 図る回収の容易性向上については考慮しないこととした。

坑道断面、坑道中心間距離などについても、NUMO包括的技術報告書(レビュー版)[2]にお いて空洞安定性の観点から、処分坑道の内径に対する処分坑道中心間距離の関係が示されてい るため、これを参照して設定する。ここでは後述するとおり、初期地温がより高くなる処分深 度 1,000mを考慮するため、対象岩盤を深成岩類とする。高レベル放射性廃棄物処分場の竪置 き・ブロック方式では、処分坑道中心間距離を深成岩類については 2D (D は処分坑道の内径で 5m)以上、処分孔の中心間距離は 2d (d は処分孔内径で 2.22m)以上に設定することとしてい る。また、より坑道断面が大きい TRU 等廃棄物処分場の深成岩類の処分場については、坑道内 径が D=9.64 m~12.69m の坑道断面について、いずれも処分坑道中心間距離を 2.5D とした坑 道仕様に対して空洞安定性の評価基準を満足したことが示されている。

これらを踏まえて、代替設計オプション A,B,D に対して設定した概略仕様例を以下に整理する。ここで概略仕様例としているのは、詳細設計により寸法や材料の仕様を定めたものではなく、前述したとおり既往の検討を参考にした設定をおこなっているためである。今後、検討が進められることにより、これらの概略仕様例は更新されていく。

1) 代替設計オプションA 円形小断面 PEM 複数定置概念の概略仕様例

高耐久性の鋼製ケーシングを支保材に用いた短尺円形小断面坑道に、空間確保と定置・回収 時の滑り保持するセラミック製のランナーを装填した PEM を複数定置し、定置後ケーシング との隙間は充填せず開放状態とする。坑道端部には鋼製プラグを設置する。回収時には断面の 大きな作業坑道に設置した動力装置と回収装置を用いて PEM を定置坑道から把持装置を有す るプルマシーンで引き出す。定置坑道レイアウトは櫛型とし、定置坑道には二方向でのアクセ スを確保する。

特徴を以下に整理し、イメージ化した概略仕様例を図 8.5.2-1 に示す。

- ・円形小断面定置坑道には、止水機能を有する厚さ 30mm の鋼製ケーシングを設置すること としている。定置坑道は左右水平方向に配置し、それぞれに PEM を 5 体ずつ、一断面あ たり 15 体定置することとした。この PEM の定置数は NUMO が1 日当たりの廃棄体の定 置数を 5 体としている工程を参考としている。
- ・止水機能を有する高耐久性鋼製支保の厚さは 30mm とし、ケーシングと PEM の隙間は 50mm とし、定置・回収時の空隙確保のセラミックランナーの厚さを 30mm とした。
- ・坑口の端部には脱却が容易(ボルトで固定)な鋼製力学プラグを設置。このプラグはPEM の外殻シェルが健全の間は必要としない。



・定置坑道は、作業坑道を中央に櫛型形状に配置されるとした。

図 8.5.2-1 代替設計オプションAの概略仕様例(イメージ図)

2) 代替設計オプション B 大断面矩形 PEM 集中定置概念の概略仕様例

馬蹄形の大断面坑道にガラス固化体を複数格納(3体)した矩形 PEM を集中定置する。坑道 上部を開放状態で維持する。埋め戻しする場合には上部はベントナイトペレットを充填する。 回収時はフォークリフトで PEM を回収する。

特徴を以下に整理し、イメージ化した概略仕様例を図 8.5.2-2 に示す。

- ・矩形 PEM には、ガラス固化体を 3 体格納するオーバーパックを収納する。オーバーパッ クの厚さ、ベントナイトの厚さは、NUMO の人工バリアの仕様と同様としている。
- ・馬蹄形の大断面坑道に矩形 PEM を 6 体、隙間なく定置することで側部や隙間充填材を必要としない形態とし、上部の埋め戻し材の量を削減する。上部の空間にはベントナイトペレットの充填を想定する。
- ・定置坑道の端部はアクセス用の小断面の作業坑道で主要坑道と連絡し、坑口には鋼製プラ グを設置する。



図 8.5.2-2 代替設計オプション B の概略仕様例(イメージ図)

3) 代替設計オプションD 円形断面横置きブロック定置概念の概略仕様例

高耐久性の鋼製ケーシングを支保材に用いた短尺円形断面坑道にリング状ベントナイトブロ ックを定置したのち、内側ケーシングに沿ってオーバーパックを複数定置し、間隙は充填せず 坑道端部に鋼製プラグを設置する。回収時には断面の大きな作業坑道からオーバーパックのみ を引き出す。定置坑道レイアウトは櫛型とし、定置坑道には二方向でのアクセスを確保する。 特徴を以下に整理し、イメージ化した概略仕様例を図 8.5.2-3 に示す。

 ・定置坑道は作業坑道から左右水平方向に配置し、それぞれオーバーパックを5体ずつ定置 する。この定置数は、NUMOが1日当たりの廃棄体の定置数を5体としている工程を参考 に設定した。内部ケーシング内のオーバーパックは回収可能性維持期間中、ベントナイト との空間(30mm)を維持する。



図 8.5.2-3 代替設計オプション D の概略仕様例(イメージ図)

(2) 先行的な検討の対象とする代替設計オプション

ここでは、大断面坑道に集中する概念である代替設計オプションBと、作業坑道と小断面定 置坑道の組合せから構成される代替設計オプションDを検討対象とした。代替設計オプション AのPEMの配置はNUMO包括的技術報告書[5]の横置き・PEM方式に近いものであることか ら、廃棄体からの熱影響も近いことが想定される。よって、代替設計オプションAは今後の段 階的な取り組みの中で検討していくこととした。

(3) 解析手法と方針

解析手法は、第2次取りまとめ[8]、および平成26年度地層処分技術調査等報告書[9](以下、 「平成26年度報告書」と称する)と同様に、水・応力との連成を考慮しない非定常三次元熱伝 導解析として、平成26年度報告書と同じ解析コードを用いた。これは、空間方向の離散化には 有限要素法を、時間方向の離散化に差分法を適用した一般的な解析手法を採用している。

解析条件に関して、岩盤、処分深度、初期地温、坑道や PEM 等の形状、物性値、初期条件、 境界条件、発熱特性等の条件を定める必要がある。これらの解析条件は、代替設計オプション の検討結果、NUMO 包括的技術報告書、第2次取りまとめ等を参照して設定することとした。 また、回収可能性維持の状態は、定置坑道を埋め戻さない状態であることを考慮した。

解析結果は廃棄体からの熱影響によるニアフィールドの温度の経時変化を把握するために、 ガラス固化体、緩衝材、オーバーパック、PEM外殻、岩盤等の温度の経時変化を求めることと した。 (4) 解析条件

ここでは、代替設計オプション B と代替設計オプション D において、共通する解析条件について設定する。

#### 1) 対象岩盤と設置深度

対象とした岩盤は、NUMO 包括的技術報告書[2]にて示された深成岩類として、処分深度は 1,000m とした。これは、新第三紀堆積岩で処分深度 500m とした場合よりも、初期地温が高く なり、解析結果が保守的なものになると考えたためである。

# 2) 物性値と初期地温

解析に用いた物性値を表 8.5.2-1 に示す。

名称	熱伝導率	比熱	密度	備考
	$[W / (m \cdot K)]$	[ kJ / (kg•K) ]	$[ kg / m^3 ]$	
ガラス固化体	1.2	0.96	2,800	第2次取りまとめ[8]より
オーバーパッ	51.6	0.473	7,860	第2次取りまとめ[8]より
ク、 <b>PEM</b> 容器				
緩衝材	0.961	0.963	1,744	ブロック方式を想定(含水
				比 9%、ケイ砂混合率 30%、
				乾燥密度 1.6Mg/m <sup>3</sup> )[2]。
				含水比から JNC の実験式
				[11]を用いて物性値を設
				定。
岩盤	2.9	1.0	2,690	NUMO 包括技術報告書の
				深成岩類[2]より
空気	0.03	1.01	0.9799	第2次取りまとめ[8]より
コンクリート	2.6	1.05	2,350	コンクリート標準示方書
				[10]より

表 8.5.2-1 解析に用いた物性値

ガラス固化体、オーバーパックおよび空気の物性値は、第2次取りまとめ[8]で用いられた値 を引用した。代替設計オプション B では PEM 容器を使う概念となっているが、この PEM 容 器の物性値については、オーバーパックと同じ炭素鋼の設定とした。また、岩盤の物性値は、 NUMO 包括技術報告書[2]の深成岩類の値を引用した。なお、後述するように、代替設計オプシ ョン D では、緩衝材とオーバーバックの間に隙間を考慮している。ここでは、この隙間には空 気の物性を設定した。

代替設計オプション D の定置坑道の端部のプラグは、鋼材とコンクリートから構成される複 合構造物が想定されるが、現段階では詳細な構造や仕様についての検討はまだ行っていないた め、鋼材よりも熱伝導率の低いコンクリートのみで構成される単純な構造と仮定して、その物 性値は、コンクリート標準示方書[10]より設定した。

緩衝材に関して、代替設計オプション D では、その製作方式をブロック方式と想定した。一 方、代替設計オプション B では PEM を用いることになっているが、その緩衝材の製作方式に ついて、代替設計オプション D と同じく、ブロック方式とすることにした。NUMO 包括技術 報告書[2]によると、ブロック方式の緩衝材のケイ砂混合率は 30%、飽和湿潤により隙間が充填 された状態で乾燥密度が 1.6Mg/m3、製作時の乾燥密度は 1.8Mg/m3 となっている。また、含 水比 9%のときに高い品質のものが製作できたとしている。よって、この解析における緩衝材 も、ケイ砂混合率を 30%とした。また、第 2 次取りまとめ[8]と同様に、緩衝材は乾燥密度が小 さいほど熱伝導率が小さいことから、緩衝材の温度上昇に対して保守的な評価となる乾燥密度 1.6Mg/m3 の値を用いることにした。また、緩衝材の熱伝導率は含水比の増加とともに大きく なることから、含水比は製作時の 9%と設定した。そして、既存の実験結果[11]から、緩衝材の 熱伝導率と比熱を設定した。

定置坑道を埋め戻さない状態としたことから、坑道内の空気に熱が逃げることを考慮して、 空気と接触している坑道壁面等には熱伝達境界を設定することにした。定置坑道内の空気は換 気により流れていると想定される。甲藤[12]によると、流れている空気の熱伝達率の大体の値 は、10~250[kcal/(m2·hr· $\mathbb{C}$ )]であることが示されていること、熱伝達率が小さいほうが緩衝 材の温度上昇に対して保守的な評価になることから、熱伝達率は 10[kcal/(m2·hr· $\mathbb{C}$ )] = 11.6[W/(m2·K)]と設定した。また、坑内気温については、労働安全衛生規則の基準値から、 37 $\mathbb{C}$ と設定した。

さらに、地温の初期条件として、NUMO 包括技術報告書[2]と同様に、地表面 15℃、地温勾 配を深度方向に 3℃/100m とした。

発熱特性と解析対象期間

ガラス固化体の発熱特性には、第2次取りまとめで使用されたものを用いた[13]。また、解 析対象期間は、300年とした。

4) 制限温度

ニアフィールドの制限温度に関して、NUMO 包括技術報告書[2]では、緩衝材に対して 100℃ 以下としている。第 2 次とりまとめ[8]では、ガラス固化体に対して 400℃以下、緩衝材に対し て 100℃以下、岩盤に対して 150℃以下としている。また、オーバーパックは金属材料である ことから、融点等の熱的変質温度は、緩衝材、岩盤およびガラス固化体の制限温度に対して極 めて高いことから、制限温度を考慮していない[8]。

これらを参考にして、制限温度については、ガラス固化体に対して 400℃以下、緩衝材に対して 100℃以下、岩盤に対して 150℃以下と設定した。

- (5) 代替設計オプションBの解析モデルと解析結果
  - 1) 平面レイアウトの設定

解析モデルの範囲の検討に関連することから、初めに平面レイアウトを設定した。

代替設計オプション B の定置イメージを図 8.5.2-4 に示す。代替設計オプション B では、1 体のオーバーパックの中に 3 本のガラス固化体を収納する。そのオーバーパックを緩衝材で覆 って、矩形の PEM 容器の中に収める。そして、1 断面当たり 6 体の矩形 PEM を積み上げて定 置する。



矩形PEMを1断面あたり6体定置

次に、矩形 PEM の寸法を設定する。設定に当たっては、NUMO 包括技術報告書[2]の横置 き・PEM 方式を参考にすることにして、ガラス固化体の寸法を直径 440mm、高さ 1,350mm の円筒形、オーバーパックの厚さは 190mm、緩衝材の最低厚さは 700mm、PEM 容器の厚さ 28mm とした。これにより、矩形 PEM の寸法を 2,276mm×2,276mm×5,886mm と設定した。 設定した矩形 PEM の寸法を図 8.5.2-5 に示す。



図 8.5.2-5 矩形 PEM の寸法

矩形 PEM の幅が 5,886mm であること、図 8.5.2-4 において矩形 PEM を 2 列として、隙間 がないものとすると、定置坑道の幅 D は 11,772mm となる。

図 8.5.2-4 代替設計オプション Bの定置イメージ

定置坑道の中心間距離の設定では、坑道断面の大きさが類似している TRU 等廃棄物処分場 を参考にする。NUMO 包括技術報告[5]によると、深成岩類の場合、空洞安定性を確保できる TRU 処分坑道の中心間距離は 2.5D 以上であることが記されている。その結果、定置坑道の中 心間距離は 2.5W 以上の 30m と設定した。平面レイアウトのイメージを図 8.5.2-6 に示す。



図 8.5.2-6 代替設計オプション B における平面レイアウトのイメージ

D:坑道内径

2) 解析モデル

解析モデルの構築では、第2次取りまとめ[8]と同様に行った。すなわち、図 8.5.2-6 に示し た平面レイアウトを考慮して、水平方向の解析領域は定置坑道の中心から隣接する定置坑道と の中間点までとした。また、矩形 PEM が定置坑道軸方向に隙間なく定置されているものとし、 定置坑道軸方向の解析領域については、廃棄体中心から矩形 PEM の表面までとした。よって、 解析モデルの奥行き方向は、矩形 PEM の辺の半分の 1,138mm となる。

鉛直方向は地表面から処分深度より 200m 深い所までを解析モデルに含めた。

解析モデルの境界条件についても、第2次取りまとめ[8]と同様に設定した。鉛直の側面の境 界条件は、現象の対称性を考慮して断熱境界とした。地温の初期条件は8.5.2(4)に示した通りで あり、地表面と解析モデルの底面は、境界条件として初期温度で一定とした。よって、処分深 度1,000mで初期温度は45℃、深度1,200mでの境界条件は51℃となる。

定置坑道は埋め戻されていないことを考慮して、坑道壁面と矩形 PEM の表面には熱伝達境 界を設定した。また、坑内気温を 37℃としている。

さらに、定置坑道の支保工や覆工についても、第2次取りまとめ[8]と同様に、岩盤に置換した。

代替設計オプションBの解析モデルの境界条件を図 8.5.2-7 に示す。



図 8.5.2-7 代替設計オプション Bの解析モデルの境界条件

また、解析モデルを図 8.5.2-8 に示す。



図 8.5.2-8 代替設計オプション B の解析モデル

図 8.5.2-8 において、緑色の要素は岩盤、赤色はガラス固化体、水色はオーバーパックと PEM 容器、黄色は緩衝材を示している。

3) 解析結果の出力点

解析結果の出力点を図 8.5.2-9 に示す。この図において、出力点の名称を、例えば、OP\_●● の様に記しているが、この場合は、オーバーパックの出力点であることを示していて、先頭の 単語が材料や部材を示している。



図 8.5.2-9 解析結果の出力点

4) 解析結果

出力点ごとの温度の経時変化を図 8.5.2-10~図 8.5.2-12 に示し、ニアフィールドの温度分布 を図 8.5.2-13~図 8.5.2-17 に示す。これらの図より、緩衝材の最高温度は5年後の198.5℃と なる結果となった。図 8.5.2-12 において、PEM 容器の温度が、内側にある緩衝材やオーバー パックよりも高くなることがあった。これは、一見、矛盾した結果のように見えるが、この PEM 容器の出力点は2段目と3段目の間にあることから、2段目からの熱の影響を受けたものであ る。

各出力点における最高温度を表 8.5.2-2 に示す。この表において着色している箇所は(4)4)の 制限温度を超えたことを示している。緩衝材は1段目から3段目までのいずれにおいても、制 限温度の100℃を超えた。岩盤ではPEM1段目の底盤部において、制限温度の150℃を超えた。 ガラス固化体は制限温度を超えなかった。

緩衝材の出力点において、制限温度 100℃を超えた時間帯を表 8.5.2-3 に示す。また、岩盤の 出力点において、制限温度 150℃を超えた時間帯を表 8.5.2-4 に示す。 緩衝材の最高温度に着目すると、PEM1 段目、PEM2 段目、PEM3 段目の順で高くなってい る。PEM3 段目は上部が換気されていることから、その効果が現れていると考えられる。PEM1 段目と PEM3 段目については、解析モデル上、隙間がなく密着していることから、熱が貯まり やすい結果となった。岩盤の最高温度についても、空洞底盤部は、解析モデル上、隙間がなく、 PEM1 段目が密着している。換気の効果がないことにより、温度が高くなったと考えられる。



8-66







2.200-02 1.800-02 1.600-02 1.600-02 1.600-02 1.00

温度 (℃)



8-69



図 8.5.2-15 10 年後の温度分布









PEM1段目		PEM2段目		PEM3段目	
出力点	最高温度(℃)	出力点	最高温度(℃)	出力点	最高温度(℃)
PEM_A1	172. 8	PEM_A2	156. 7	PEM_A3	99. 1
PEM_F1	143. 5	PEM_F2	129. 7	PEM_F3	88.3
緩衝材_B1	196. 5	緩衝材_B2	183. 0	緩衝材_B3	124. 6
緩衝材_E1	188. 1	緩衝材_E2	175. 3	緩衝材_E3	121. 1
0P_C1	196. 9	OP_C2	183. 5	OP_C3	125. 2
OP_D1	188. 7	OP_D2	175.9	OP_D3	121. 7
岩盤_61	143. 4	岩盤_G2	129. 7	岩盤_G3	88. 2
ガラス固化体_11	215.8	ガラス固化体_12	203. 1	ガラス固化体_13	145. 4
0P_11-z	198. 9	0P_12-z	186. 2	0P_13-z	128.6
緩衝材_11-z	198. 5	緩衝材_12-z	185. 9	緩衝材_13-z	128. 4
PEM_11-z	165. 3	PEM_12-z	174. 5	PEM_13-z	138. 7
岩盤_11-z	165. 3	ガラス固化体_22	203. 4	ガラス固化体_23	146.8
ガラス固化体_21	215. 7	0P_22-z	186. 4	0P_23-z	129.8
0P_21-z	198.6	緩衝材_22-z	186. 1	緩衝材_23-z	129. 6
緩衝材_21-z	198. 2	PEM_22-z	172. 8	PEM_23-z	138. 1
PEM_21-z	162. 6	ガラス固化体_32	197. 6	ガラス固化体_33	142. 8
岩盤_21-z	162. 6	0P_32-z	180. 7	0P_33-z	126.0
ガラス固化体_31	209. 8	緩衝材_32-z	180. 4	緩衝材_33-z	125. 8
0P_31-z	192. 9	PEM_32-z	164. 2	PEM_33-z	131.6
緩衝材_31-z	192. 5				
PEM_31-z	156.0				

表 8.5.2-2 出力点における最高温度

156.0

岩盤\_31-z

出力点	時間(年)	最高温度(℃)	備考
緩衝材_B3	0.2~23	124.6	PEM3 段目
緩衝材_E3	0.25~22	121.1	
緩衝材_13-z	0.15~25	128.4	
緩衝材_23-z	0.15~26	129.6	
緩衝材_33-z	0.2~24	125.8	
緩衝材_B2	0.09~54	183.0	PEM2 段目
緩衝材_E2	0.1~52	175.3	
緩衝材_12-z	0.08~55	185.9	
緩衝材_22-z	0.08~55	186.1	
緩衝材_32-z	0.09~54	180.4	
緩衝材_B1	0.1~63	196.5	PEM1 段目
緩衝材_E1	0.15~61	188.1	
緩衝材_11-z	0.09~64	198.5	
緩衝材_21-z	0.1~64	198.2	
緩衝材_31-z	0.15~62	192.5	

表 8.5.2-3 緩衝材の出力点において 100℃を超えた時間帯と最高温度

表 8.5.2-4 岩盤の出力点において 150℃を超えた時間帯と最高温度

出力点	時間 (年)	最高温度(℃)	備考
岩盤_11-z	2~19	165.3	PEM1 段目、空洞底盤
岩盤_21-z	2.5~18	162.6	
岩盤_31-z	4~14	156.0	

(6) 代替設計オプションDの解析モデルと解析結果

1) 平面レイアウトの設定

代替設計オプション D の定置イメージを図 8.5.2-18 に示す。代替設計オプション D では、 作業坑道から左右の側壁に定置坑道を設けて、その中に 5 体ずつのオーバーパックを定置する 概念となっている。



図 8.5.2-18 代替設計オプション D の定置イメージ

NUMO 包括的技術報告書 (レビュー版) の概念[2]より、ガラス固化体の寸法を直径 440mm、 高さ 1,350mm の円筒形、オーバーパックの厚さは 190mm、緩衝材の最低厚さは 700mm とし た。オーバーパックとガラス固化体の寸法を図 8.5.2-19 に示す。このオーバーパックを 5 体定 置することと、オーバーパックと緩衝材の間に 3cm の空気層の隙間を考慮して、定置坑道の寸 法を図 8.5.2-20 のように、直径 2,280mm、長さ 11,100mm と設定した。図 8.5.2-18 では、緩 衝材とオーバーパックの間にケーシングがあるが、ここでは、そのケーシングの存在は無視し た。また、端部のコンクリートプラグの厚さについては、特段の根拠はない。



図 8.5.2-19 オーバーパックとガラス固化体の寸法



図 8.5.2-20 定置坑道の構造

定置坑道の中心間距離の設定では、NUMO包括的技術報告書の高レベル放射性廃棄物処分場の横置き・PEM 方式の処分坑道を参考にした[2]。それによると、深成岩類の場合、空間安定性を確保できる坑道中心間距離は、2.5d以上であることが示されている。よって、定置坑道の中心間距離は2.5d以上の4.6mと設定した。また、定置坑道の端部と端部の距離も同じく、4.6mと設定した。さらに、作業坑道の幅については、ここでは、6mと設定した。

平面レイアウトのイメージを図 8.5.2-21 に示す。



# 定置坑道の配置

D, d: 坑道内径

図 8.5.2·21 代替設計オプションDにおける平面レイアウトのイメージ

2) 解析モデル

解析モデルの構築では、(5)2)と同様に、水平方向の解析領域は、作業坑道の中心から隣接す る作業坑道の中間点までとした。作業坑道軸方向の解析領域は、定置坑道中心から隣接する定 置坑道の中間点までとした。よって、解析モデルの奥行き方向は、4,600/2=2,300mm となる。 鉛直方向は地表面から処分深度より 200m 深い所までを解析モデルに含めた。

解析モデルの境界条件についても、(5)2)と同様に設定した。鉛直の側面の境界条件は、現象の対称性を考慮して断熱境界とした。地温の初期条件は(4)2)に示した通りであり、地表面と解析モデルの底面は、境界条件として初期温度で一定とした。よって、処分深度 1,000m で初期 温度は 45℃、深度 1,200m での境界条件は 51℃となる。

作業坑道は埋め戻されていないことを考慮して、坑道壁面と矩形 PEM の表面には熱伝達境 界を設定した。また、坑内気温を 37℃としている。

さらに、作業坑道の支保工についても、(5)2)と同様に、岩盤に置換した。 代替設計オプション D の解析モデルの境界条件を図 8.5.2-22 に示す。



底面:GL-1200m (T=51°C)

図 8.5.2-22 代替設計オプション D の解析モデルの境界条件

また、解析モデルを図 8.5.2-23 に示す。この図において、緑色の要素は岩盤、赤色はガラス 固化体、水色はオーバーパック、黄色は緩衝材を示している。また、図 8.5.2-20 にも示したよ うに、オーバーパックと緩衝材の間にある 3cm の隙間も、空気層のメッシュを作成している。





3) 解析結果の出力点

解析結果の出力点を図 8.5.2-24 に示す。



図 8.5.2-24 解析結果の出力点

4) 解析結果

出力点ごとの温度の経時変化を図 8.5.2-25~図 8.5.2-26 に示す。

ニアフィールドの温度分布の経時変化を図 8.5.2-27~図 8.5.2-31 に示す。図 8.5.2-28 に示 したように、緩衝材の最高温度は、4 年後の 144℃となることが分かった。

各出力点における最高温度を表 8.5.2-5 に示す。この表において着色している箇所は、(4)4) の制限温度を超えたことを示している。また、岩盤およびガラス固化体は制限温度を超えなかった。

緩衝材の出力点において、制限温度100℃を超えた時間帯を表8.5.2-6に示す。

緩衝材の温度に関して、オーバーパックの端部に接触している緩衝材の温度が高くなること が分かった。オーバーパックの側面と緩衝材の間には隙間があるが、オーバーパック端部と緩 衝材の間には隙間がない。空気で構成される隙間は、熱が伝わりにくいので、熱が伝わりやす いオーバーパック端部と緩衝材の接触箇所に熱が集中した結果、端部の緩衝材(緩衝材\_B、緩 衝材\_E)の温度が高くなったと考えられる。







(a) 定置坑道端部の岩盤図 8.5.2-26 出力点ごとの温度の経時変化(その2)



図 8.5.2-27 1年後の温度分布



図 8.5.2-28 4年後の温度分布





図 8.5.2-30 50 年後の温度分布



図 8.5.2-31 100 年後の温度分布

出力点	最高温度(℃)
プラグ_A	55.7
緩衝材_B	132.8
ガラス固化体_1	158. <mark>8</mark>
0P_1-z	141.1
緩衝材_1-z	88. 1
<mark>岩盤_1-z</mark>	66.5
ガラス固化体_2	170. 2
0P_2-z	152. <mark>5</mark>
緩衝材_2-z	96. 5
岩盤_2-z	74.3
ガラス固化体_3	1 <b>7</b> 5. <mark>5</mark>
0P_3-z	157. 9
緩衝材_3-z	101.8
岩盤_3-z	79.4

# 表 8.5.2-5 出力点における最高温度

出力点	最高温度(℃)
ガラス固化体_4	175.0
0P_4-z	157.5
緩衝材_4-z	103. 6
岩盤_4-z	82. 1
ガラス固化体_5	168.0
0P_5-z	150. 6
緩衝材_5-z	102. 7
岩盤_5-z	82.9
OP_D	144. 6
緩衝材_E	144.0
岩盤_F	85.6

表 8.5.2-6 緩衝材の出力点において 100℃を超えた時間帯と最高温度

出力点	時間(年)	最高温度 (℃)
緩衝材_B	$0.05 \sim 27$	132.8
緩衝材_3-z	2.5~8	101.8
緩衝材_4-z	2.5~10	103.6
緩衝材_5-z	3.2~10	102.7
緩衝材_E	$0.05 \sim 35$	144.0

# (7) 結果のまとめと今後の課題

熱伝導解析の結果、代替設計オプション B および代替設計オプション D ともに緩衝材の最高 温度が制限温度を超える結果となった。また、代替設計オプション B では岩盤の最高温度も制 限温度を超える結果となった。

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、熱影響の観点からの実現性について検討を行うことが必要と考えられる。

一方で、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により、現在 設定されている制限温度が緩和される場合には、これらを考慮した代替設計オプションの実現 性の検討を行っていくことも視野に入れる。

## 8.5.3 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検討として、廃棄体の熱影響 についての検討を行った。これは図 8.5.3-1 の熱影響評価に対応する。8.5.1 で述べたように、 代替設計オプションの検討は、事業者が実施している段階的な処分場の設計のプロセスを踏襲 した取り組みを行っていく。今後は、設計の詳細化や他の設計因子を考慮した最適化の中で、 整合性を確保しつつ、検討を進めていく。

具体的には、まずは本検討で先行的に実施した廃棄体の熱影響の評価をさらに進めることに より、代替設計オプションの熱的な実現性の検討を行う。廃棄体を定置する坑道(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坑道や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[2]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、まずはこれらを参照した設定を出発点として検討を進める。次に、 熱的に実現性が確保された代替設計オプションに対して、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の検討を行う。ここで、回収の容易性向上 が見込めないと考えられる代替設計オプションについては、回収の容易性向上に寄与する方策 の組合せを再考することにより、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、熱的に実現性が確保 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を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により工 学的な実現性を確認していく。



図 8.5.3-1 提案する代替設計オプションの整備の過程 【再掲】

#### 8.6 第4章のまとめ

#### 8.6.1 本章の成果

本章の成果は二つに大別できる。一つは、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ことである。もう一つは、事業者(NUMO)の処分場の設計 の流れを踏襲した代替設計オプションの実現性の検討方針を示し、その方針に沿った最初の取 り組みとして、代替設計オプションの具体例に対して、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 を示したことである。前者は 8.2 節から 8.4 節で述べ、後者については 8.5 節で述べた。

以下に、本章の主な成果を節ごとに述べる。

## 8.2節 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 の視点と容易性向上のポイントを整理することを目的とした検討を実施した。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を想定し、回収作業の 留意点や課題の整理から回収作業時の工夫のポイントを抽出して、回収の容易性向上の視点と 容易性向上のポイントを整理した。

8.2.1 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]に提示された処分概念(堅置き・ブロック方式および横置き・ PEM 方式)を対象として、具体的な回収作業の工程を検討することで、回収作業の留意点や課 題を設定し、回収の容易性向上の工夫のポイントを抽出した。

処分場は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として、この状態 から廃棄体容器(オーバーパック)を回収するまでに撤去する対象を整理し、回収作業の具体 化のために回収作業を三つの大工程と七つの中工程に分類した。

前述した中工程をさらに小工程に分割し、それぞれの作業における作業上の留意点と課題を 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設定した。

#### 8.2.2 工夫のポイントの集約による容易性向上のポイントの整理

前項にて回収の各作業を具体化することにより抽出した工夫のポイントを、回収の容易性を 考慮した代替設計オプションに反映する方策に反映するために、具体的な個々の作業によらな い回収の容易性向上のポイントとして統合した。

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が次のように示されている。

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、回収の各作業の具体化から抽出した工夫のポイントを 踏まえて、作業の手数が少なくなる、あるいは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整理した。

二つの処分概念の各回収作業を具体化した小工程から抽出された工夫のポイントが、回収の 容易性向上の視点および容易性向上のポイントへ集約される整理を示した。ある一つの作業を 向上させるための工夫のポイントは、多面的に容易性の向上に展開される場合があることがわ かった。これらの整理によって、回収の容易性向上の視点および容易性向上のポイントは想定 される具体的な回収作業から抽出した工夫のポイントを全て包含することを確認した。

## 8.3節 回収の容易性向上を図る方策の検討と整理

上記で整理した回収の容易性向上のポイントを代替設計オプションに反映させるため、容易 性向上のポイントを出発点とした展開により、具体的な工学的方策および手段を検討して整理 した。また、工学的方策の相互関係について、代替設計オプションを構築する際に必要と考え られる、「独立」、「相反」、「共存」、「融合」、「相乗」の観点から定性的な分析を行い、マトリク ス形式で整理した。

なお、新たな代替設計オプションの構築に向けた検討であるため、本節以降では、NUMO レビュー版の処分坑道および処分孔と区別するために、廃棄体を定置する坑道や孔を合わせて"定置坑道"と呼び、定置坑道につながる坑道を"作業坑道"と呼ぶ。

#### 8.3.1 容易性向上ポイントの工学的な方策と具体的な手段への展開

8.2 にて整理した、回収の容易性向上の視点からの 7 項目の容易性向上のポイントを出発点 として、それぞれのポイントを具体的な方策に展開し、それを具現化するための手段を検討し た。容易性の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、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な どの方策も導出される。第1章で述べたように、これらは今後検討が進展した後に、地層処分 としての成立性や工学的実現性に見通しを得た代替設計オプションに対して検討がなされる。 よって、現段階での代替設計オプションの構築には反映しないこととした。

# 8.3.2 工学的方策の特徴ごとの組合せに関する整理

容易性向上のポイントから展開した工学的方策を対象に、回収の容易性を向上する代替設計
オプションの要素(単独あるいは組合せ)を設定するための分析を行った。

まずは、前項で挙げた工学的方策のうち、回収の容易性を設計に考慮する方策について、重 複した方策などを集約して整理した結果、七つの容易性向上のポイントから展開した具体的な 工学的方策は 21 の方策に集約することができた。

21 の工学的方策を組合せて代替設計オプションを構築する際に必要と考えられる、「独立」、 「相反」、「共存」、「融合」、「相乗」の観点から整理した。

# 8.4 節 方策の選択と組合せによる代替設計オプションの構築

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分析結果を用いた代替設計オ プション構築方法の考え方を整理した。ここで整理した考え方に基づき、「相乗」の関係が多い と判定した方策の組合せを集約して、三つの代替設計オプションを設定するとともに具体的な イメージ例を作成した。なお、ここで構築した代替設計オプションの具体的なイメージは、あ くまでも回収の容易性向上のみに着目して構築した概念オプションであることに留意が必要で ある。

#### 8.4.1 代替設計オプション構築の考え方の検討

代替設計オプション構築の考え方を整理した。前項で検討した回収の容易性向上の工学的方 策の相互関係の分析結果をベースに、「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構築する方法を提案した。

## 8.4.2 方策の組合せによる一体化した概念の構築

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」効果の数が多いA、B、Dの 3 種類の方策に相乗効果の多い他の方策を集約し、以下に示す三つの処分場概念を構築した。 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

#### 8.4.3 一体化した概念に基づく代替設計オプションの具体化

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 具体的なイメージの例を構築した。

#### 8.5節 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した 例示であり、今後は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の提示に向けた実現性の検討に取り組んで いく必要がある。そこで本節では、はじめに代替設計オプションに対して実現性の検討を行っ ていく上での検討方針を示した。また、実現性に関する先行的な検討として、4.4節で作成した 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、課題を整理した。最後に、代替設計オプションの実現性の検討についての今後の 展開を述べた。

## 8.5.1 代替設計オプションの実現性の検討方針

代替設計オプションの実現性の検討は、NUMO が実施している段階的な処分場設計の流れを 踏襲することを方針とする。また、本検討では処分場全体レイアウトは検討対象としないこと を方針としているため、力学プラグより先の処分坑道側に着目した検討を行った。サイトや設 計が決まっていない現状では、地上から地下までの全体レイアウトに対して議論できない段階 にあるためである。これらを踏まえ、代替設計オプションの実現性の検討の過程を提案した。

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、まずはこれらを参照した設定を出発 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る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の検討を行う。ここで、回収の容易性向上が見込めないと考えられる代 替設計オプションについては、回収の容易性向上に寄与する方策の組合せを再考することによ り、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によっ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念頭においた検討を進めていく。

#### 8.5.2 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と代替設計オプション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および代替設計オプション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、熱影響の観点からの実現性について検討を行うことが必要 と考えられる。一方で、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 により、現在設定されている制限温度が緩和される場合には、これらを考慮した代替設計オプ ションの実現性の検討を行っていくことも視野に入れる。今後の熱影響に関する検討課題は、 上記の二つに整理できる。

## 8.5.3 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、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、事業者が実施している段階的な処分場の設計のプロセスを踏襲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、提案した代替設計オプションの整 備の過程に沿って、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8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ー 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.

- [4] NUMO: Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments TR-04-03, 2004.
- [5] Kawamura. H., McKinley. I.G, Neall. F.B., 2006. Challenges for tele-handled emplacement of the EBS for Japanese HLW, Proc. International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas, USA.
- J. Noronha: Deep Geological Repository Conceptual Design Report Crystalline / Sedimentary Rock Environment, NWMO Report, APM-REP-00440-0015 R001, 2016.
- [7] EKRA (2000) : Disposal Concepts for Radioactive Waste, Final Report, Expert Group on Disposal Concepts for Radioactive Waste (EKRA), 31st January, 2 000.
- [8] 谷口航,岩佐健吾: 核燃料サイクル開発機構:ニアフィールドの熱解析~第2次取りまとめにおける処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの設定~. 核燃料サイクル開発機構東海事業所, JNC TN8400 99-051, 1999.
- [9] 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成26年度地層処分技術調査等事業(地層 処分回収技術高度化開発)報告書,2017.
- [10] 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]. 丸善出版, (2013).
- [11] 菊池広人,棚井憲治:緩衝材の熱物性測定試験(III) 面熱源法による緩衝材熱物性の 取得-. 核燃料サイクル開発機構東海事業所, JNC TN8430 2003-009, 2003.
- [12] 甲藤好郎: 伝熱概論. 養賢堂, 1964.
- [13] 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.

# 第9章 結言

# 9.1 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 8.6.1-1 に本事業を通じた技術の進捗のイメ ージを示す。

我が国で有望とされている2つの定置概念



図 8.6.1-1 本事業における技術開発成果のイメージ

9.1.1 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。

9.1.2 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20-1)

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。 9.1.3 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20-1)

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。