## 令和2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 (回収可能性技術高度化開発)

### 報告書

## 令和3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 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 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・資金管理センターと国 立研究開発法人日本原子力研究開発機構が実施した、 令和2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 回収可能性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。

1. 本事業の目的と実施内容	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 回収可能性に係わる技術検討のフレームワーク	1-2
1.2.1 技術開発·検討の目的	1-2
1.2.2 本事業における検討の前提条件の整理	1-4
1.3 技術開発課題ごとの関係と目的の整理	1-9
1.3.1 閉鎖後長期の安全性への影響	1-9
1.3.2 操業期間中(回収作業中)の安全性と回収作業時間	1-10
1.3.3 回収可能性の維持期間	1-15
1.4 本事業の実施内容	1-16
1.4.1 廃棄体の回収可能性を確保する技術の整備	1-16
2. 回収の迅速化に向けた技術の高度化	2-1
2.1 回収技術の高度化の狙い	2-1
2.2 本年度の実施方針	2-1
<b>2.3</b> 処分孔竪置き方式の回収技術の高度化	2-2
2.3.1 回収技術の整備状況	2-2
2.3.2 目標設定のための回収工程の分析	2-3
2.3.3 回収技術高度化の方針	2-9
2.3.4 流体的除去技術の高度化のための試験計画	2-11
2.3.5 オーバーパック引き抜き方法の検討	2-17
<b>2.4</b> 処分坑道横置き・PEM 方式の回収技術の高度化	2-19
2.4.1 回収技術の整備状況	2-19
2.4.2 目標設定のための回収工程の分析	2-20
2.4.3 回収技術高度化の方針	2-25
2.4.4 機械的除去技術の高度化	2-26
2.5 本章の成果と今後の課題	2-33
2.5.1 本章の成果	2-33
2.5.2 今後の展開	2-33
3. 回収の容易性を高めた代替設計オプションの開発	3-1
3.1 目的と方針	3-1
3.1.1 目的	3-1
3.1.2 方針	3-1
3.1.3 開発の進め方と検討項目	3-2
3.2 オーバーパックを回収の対象物の最小モジュールとした代替設計オプションの	開発3-6
3.2.1 回収の容易性を高めた代替設計オプション概念設計案の開発	3-6
3.2.2 代替設計オプションの概念設計案の具体化に係る技術開発課題の抽出と整	理3-21
3.2.3 オーバーパックを回収の対象物の最小モジュールとした代替設計オプショ	ンの開発ま

### 目次

とめ.		3-23
3.3 PEI	M を回収の対象物の最小モジュールとした代替設計オプションの開発	3-25
3.3.1	回収の容易性を高めた代替設計オプション概念設計案の開発	3-25
3.3.2	代替設計オプションの概念設計案の具体化に係る技術開発課題の抽出と整理	3-49
3.3.3	PEM を回収の対象物の最小モジュールとした代替設計オプションの開発のま	とめ3-
52		
3.4 代春	替設計オプションの概念設計案の具体化に係る技術開発課題への対応方策の検	討3-53
3.4.1	技術開発課題への取り組みの方針	3-53
3.4.2	技術開発課題への対応方策	3-53
3.4.3	技術開発計画	3-55
3.5 本重	章の成果と今後の展開	3-56
3.5.1	本章の成果	3-56
3.5.2	今後の展開	3-56
4. 回収可	能性の維持に伴う影響事象の定量化手法の整備	4-1
4.1 目白	内	4-1
4.2 定量	量化手法の整備の方針	4-2
4.2.1	回収可能性の維持に伴う影響の定量化項目	4-2
4.2.2	異なる定置概念への展開	4-4
4.2.3	閉鎖後長期の安全評価との関係	4-5
4.2.4	盛り込む事象の妥当性の確保	4-6
4.3 レフ	ファレンス(処分坑道竪置き・ブロック方式)の建設・操業工程分析	4-6
4.3.1	建設・操業工程の分析	4-7
4.3.2	区分ごとの工程分析結果	4-8
4.3.3	工程分析に基づくタイムラインと構成要素の整理	4-13
4.3.4	時間スケール Toの区分	4-17
4.4 定量	量化手法の構築に向けたストーリーボードの作成方法の検討	4-21
4.4.1	回収可能性の維持に伴う閉鎖後長期の安全性への影響	4-21
4.4.2	回収可能性の維持に伴う操業安全性への影響	4-23
4.4.3	扱う事象の合理的な選択	4-23
4.5 本重	章の成果と今後の展開	4-25
4.5.1	本章の成果	4-25
4.5.2	今後の展開	4-25
5. 回収可	能性の維持に伴う影響評価技術の整備	5-1
5.1 背景	景および目的	5-1
5.2 実際	際の地下環境における支保部材の状態把握	5-2
5.2.1	幌延深地層研究所で使用されているコンクリート支保工の再現とそれを使用	したコン
クリー	ート供試体の作成	5-2
5.2.2	コンクリート供試体の作成と初期値取得のための各種物性試験・分析	5-9
5.2.3	コンクリートコアの坑道内での養生	5-23
5.3 実隊	祭の地下深部の坑道で生じる事象の整理	5-25
5.3.1	坑道周辺地質環境の概念モデルの構築	5-25
5.3.2	坑道周辺地質環境の長期的な変化に関する予察的な解析	5-32
5.4 本重	章の成果と今後の展開	5-96

5.4.1 本章の成果	
5.4.2 今後の展開	
6. 地層処分実規模試験施設を活用した情報発信	6-1
6.1 目的	6-1
<b>6.2</b> 地層処分実規模試験施設の改修	6-1
6.2.1 施設の概要	6-1
6.2.2 施設の改修内容	6-1
6.2.3 更新工事の実施	6-1
6.3 地層処分実規模試験施設の公開内容の更新	6-2
6.3.1 処分孔横置き・PEM 方式の操業技術の発信	6-2
6.3.2 設備建屋内の更新計画	6-2
6.3.3 各エリアの展示物の検討	6-4
6.3.4 整備後の展示内容	6-6
6.4 本章の成果と今後の展開	6-12
6.4.1 本年度の成果	6-12
6.4.2 今後の展開	6-12
7. 本年度の成果と今後の展開	
7.1 回収の迅速化に向けた技術の高度化	
7.1.1 令和 2 年度の成果	
7.1.2 今後の展開	
<b>7.2</b> 回収の容易性を高めた代替設計オプションの開発	
7.2.1 令和 2 年度の成果	
7.2.2 今後の展開	
7.3 回収可能性の維持に伴う影響事象の定量化手法の整備	
7.3.1 令和2年度の成果	
7.3.2 今後の展開	
7.4 定量化に必要な物性値の取得	
7.4.1 令和2年度の成果	
7.4.2 今後の展開	
7.5 地層処分実規模試験施設を活用した情報発信	
7.5.1 令和2年度の成果	
7.5.2 今後の展開	

### 図表目次

义	1.2 - 1	回収可能性が維持されている状態の模式図	1-4
义	1.2-2	回収可能性の維持の状態オプション(処分孔竪置き・ブロック方式).	1-6
义	1.2-3	回収可能性の維持の状態オプション(処分坑道横置き・PEM 方式)	1-6
义	$1.3 \cdot 1$	通常の操業における閉鎖後長期の安全性への影響の考慮の範囲	1-9
义	1.3-2	閉鎖後長期の安全性の観点からの回収可能性の維持期間	1-9
义	1.3 - 3	回収が安全に実施できる状態の模式図	1-10
义	1.3-4	操業期間中の安全性の観点からの回収可能性の維持期間	1-11
义	1.3-5	緩衝材除去システムと緩衝材除去試験	1-13
义	1.3-6	地下環境での機械的除去試験	1-13
义	1.3-7	回収可能性が維持されている状態の模式図(再掲)	1-15
义	2.3-1	緩衝材除去システム(噴射・吸引設備)の仕様	2-2
义	2.3-2	平成26年度地層処分回収技術高度化開発における実証試験の実績	2-2
义	2.3 - 3	分析対象とした竪置き方式・ブロック方式(パネル型)のレイアウト.	2-3
义	2.3-4	処分孔竪置き方式の回収作業手順	2-4
义	2.3-5	各処分区画のタイムライン(処分孔竪置き方式)	2-4
义	2.3-6	施工要領図(立坑からの埋め戻し材搬出)	2-5
义	2.3-7	回収時間の試算に用いた平面・断面形状寸法	2-7
义	2.3-8	実証試験による緩衝材の除去形状と除去体積	2-8
义	2.3-9	処分孔縦置き方式のボトルネック抽出と目標時間	2-9
义	2.3-10	緩衝材除去の迅速化に向けた課題と方針	2-10
义	2.3-11	緩衝材除去を省略したオーバーパックの引き抜きによる回収方法	2-10
义	2.3 - 12	淡水噴射と塩水噴射における切削能力の比較	2-11
义	2.3-13	噴射試験の概念図	2-12
义	2.3-14	噴射試験のパラメータ	2-13
义	2.3 - 15	噴射試験の供試体作成方法	2-14
义	2.3-16	沈降試験の概念図	2-15
义	$2.3 \cdot 17$	実規模沈降試験の概念図	2-16
义	2.3 - 18	緩衝材除去装置の噴射吸引設備の噴射リング	2-16
义	2.3-19	引抜モードの考え方	2-18
义	2.3-20	引抜試験によって計測される引抜力の考え方	2-18
义	2.3 - 21	引抜試験 概念図	2-19
义	2.4-1	分析対象とした処分坑道横置き・PEM 方式(デッドエンド型)のレイ	アウト2-
	20		
义	2.4-2	処分坑道横置き・PEM 方式の回収作業手順	2-21
义	2.4-3	各処分坑道のタイムライン(処分坑道横置き・PEM 方式)	2-22
义	2.4-4	想定したプラグの厚みと処分坑道の埋戻し範囲	2-23
図	2.4-5	処分坑道横置き・PEM 方式のボトルネック抽出と目標時間	2-25
図	2.4-6	隙間充填材の除去手順の分割	2-28
図	2.4-7	隙間充填材除去の評価指標の構築フロー図	2-30
义	2.4-8	切削試験概要	2-32

义	2.4-9	切削機構を模擬した小型試験(オーガ)	2-32
义	3.2 - 1	代替設計オプション概要案のイメージ	3-9
义	3.2-2	代替設計オプション概念設計当初案 OP-1 の仕様設定	3-10
义	3.2-3	第1・第2ケーシングの機能による回収の容易性の整理の試行例	3-13
义	3.2-4	代替設計オプション概念設計案 OP-1 (処分孔間隔の短縮)	3-17
义	3.3 <b>-</b> 1	代替設計オプション概要案 PEM-1 の水平処分孔定置のバリエーション	3-29
义	3.3-2	代替設計オプション概要案 PEM-1 の鉛直処分孔定置のバリエーション	3-29
义	3.3 <b>-</b> 3	代替設計オプション概要案 PEM-1 の水平処分孔定置と鉛直(斜め)処分孔定	置の
	バリコ	ローション	3-30
义	3.3-4	代替設計オプション概要案 PEM-2 のバリエーション	3-32
义	3.3-5	代替設計オプション概念設計当初案 PEM-1V1 の PEM の仕様設定	3-33
义	3.3 <b>-</b> 6	代替設計オプション概念設計当初案 PEM-1V1 の仕様設定	3-34
义	3.3-7	代替設計オプション概念設計当初案 PEM-22 の矩形 PEM の仕様設定	3-35
义	3.3-8	代替設計オプション概念設計当初案 PEM-22 の仕様設定	3-35
义	3.3-9	孔の支保(ケーシング)及び PEM 容器の機能による回収の容易性の整理の	試行
	例		3-39
义	3.3-10	代替設計オプション概念設計案 PEM-1V1"鉛直処分孔複数 PEM 竪置き定	置方
	式"…		3-44
义	3.3-11	代替設計オプション概念設計案 PEM-22"大断面坑道複数ガラス固化体	格納
	PEM	横置き定置方式"	3-45
义	4.1-1	回収可能性が維持される状態の模式図	4-1
义	4.2-1	操業期間中の安全性の観点からの回収可能性の維持期間	4-3
义	4.2-2	閉鎖後長期の安全性の観点からの回収可能性の維持期間	4-3
义	4.3-1	建設・操業における処分区画の展開(NUMO, 2020.を基に作成)	4-7
义	4.3-2	建設・操業工程の検討の対象とした、パネル型の地下施設	4-8
义	4.3-3	Step 1 の期間に建設される部分(図中青)	4-8
义	4.3-4	Step 2 の期間に建設される部分(図中青)	4-9
义	4.3-5	Step 3 の操業区画(図中赤)と、建設区画(図中青)	4-10
义	4.3-6	Step 4 の操業区画 (図中赤)、建設区画 (図中青)、埋め戻し区画 (図中茶)	4-10
义	4.3-7	Step 5の操業区画(図中赤)、建設区画(図中青)、埋め戻し区画(図中茶)	4-11
义	4.3-8	Step 6の操業区画(図中赤)、建設区画(図中青)、埋め戻し区画(図中茶)	4-11
义	4.3-9	Step 7 の操業区画 (図中赤)、建設区画 (図中青)、埋め戻し区画 (図中茶)	4-11
义	4.3-10	Step 8の操業区画(図中赤)、建設区画(図中青)、埋め戻し区画(図中茶)	.4-
	12		
义	4.3-11	回収可能性の維持の状態	4-12
义	4.3-12	建設・操業期間中のタイムラインと経過時間	4-13
义	4.3-13	処分区画の建設・操業工程の詳細	4-14
义	4.3-14	処分場全体と処分坑道単体のタイムラインの関係	4-15
义	4.3-15	坑道の構成要素への分解と、使用材料の整理	4-16
図	4.3-16	時間スケール $T_0$ の区分	4-17
図	4.3-17	処分区画、処分坑道の違いによる Toの内訳の差	4-20
义	4.3-18	処分坑道の向き(NUMO, 2021b を参考に作成)	4-21
义	4.4-1	検討の戦略的手順	4-22

义	4.4-2	処分施設を構成する材料の変化を軸とした影響検討のイメージ4-2	24		
义	5.1 - 1	回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備における検討項目と本章での技術開			
	発との	⊃関係5	-1		
义	5.2 - 1	第八実験棟内の装置	-4		
义	5.2-2	使用した模擬トンネル	-4		
义	5.2 - 3	吹付け配管システム図	-5		
义	5.2-4	吹付け関連装置	-5		
义	5.2-5	ベースコンクリートのスランプ試験結果5	-8		
义	5.2-6	プルアウト強度(換算)試験結果5	-8		
义	5.2-7	ベースコンクリートの圧縮強度試験結果:平均値5	-8		
义	5.2-8	吹付けコンクリートコア作成	-9		
义	5.2-9	全空隙における各細孔孔径の割合5-	11		
义	5.2 - 10	弹性波速度測定状況	12		
义	5.2 - 11	弾性波速度測定結果および求められた動的物性値	13		
义	5.2 - 12	吹付けコンクリートコアの強度・力学特性5-1	15		
义	5.2 - 13	各試験体の応力-ひずみ関係5-1	16		
义	$5.2 \cdot 14$	縦ひずみと横ひずみの関係5-1	16		
义	5.2 - 15	割裂引張強度試験	17		
义	5.2 - 16	変水位法透水試験結果5-1	18		
义	5.2 - 17	分析用試験体5-2	22		
义	5.2-18	走査型電子顕微鏡(SEM)システム一式5-2	22		
义	5.2 - 19	分析結果の一例5-2	22		
义	5.2-20	試験坑道内での定置位置5-2	23		
义	5.2 - 21	定置装置の概念図	23		
义	5.2-22	定置完了状况	24		
义	5.2 - 23	環境測定状況	24		
义	$5.3 \cdot 1$	概念モデル構築の作業プロセス5-2	25		
义	5.3-2	力学的概念モデル	31		
义	5.3 - 3	水理的概念モデル	32		
义	5.3-4	幌延深地層研究所内の試験坑道3の位置図5-3	33		
义	5.3 - 5	試験坑道3の断面図	33		
义	5.3-6	応力-ひずみ曲線	34		
义	5.3-7	長期変化解析の初期状態	36		
义	5.3-8	せん断破壊透水試験の概要(郷家 他, 2011)5-3	37		
义	5.3-9	軸ひずみ-軸差応力関係5-5-5-5-5-5-5-5-5-5-5-5-5-5-5-5-5	37		
义	$5.3 \cdot 10$	軸ひずみ-透水係数関係5-3	37		
义	$5.3 \cdot 11$	正規化軸ひずみ-透水係数の増加率の関係5-3	38		
义	5.3 - 12	時間依存性の程度を示すパラメー5-3	39		
义	$5.3 \cdot 13$	稚内層・声問層の一軸圧縮強度と大久保モデルのパラメータ noの関係5-	39		
义	5.3 - 14	力学的長期変化解析の解析モデル5-4	10		
义	5.3 - 15	二次元解析モデルの概念図5-4	41		
义	5.3 - 16	二次元解析モデルのメッシュ図5-4	42		
义	5.3 - 17	一次元解析モデルの概念図5-4	42		

义	5.3 - 18	水分特性曲線	5-44				
义	5.3 - 19	比透水係数および透気係数曲線5-4					
义	5.3-20	二次元解析の初期条件(水理)	5-45				
义	5.3 - 21	液相の CH4 および CO2 の初期モル分率	5-46				
义	5.3 - 22	二次元解析の境界条件	5-46				
义	5.3 - 23	Case1 における周辺岩盤の天端部の変位	5-49				
义	5.3 - 24	Case1 における周辺岩盤の側壁部の変位	5-49				
义	5.3 - 25	Case1 における周辺岩盤の透水係数の増加率	5-49				
义	5.3-26	Case1 における周辺岩盤のヤング率の変化	5-50				
义	5.3 - 27	Case1 における周辺岩盤の最大主応力の変化	5-50				
义	5.3-28	支保工の天端部と側壁部において着目した要素	5-51				
义	5.3 - 29	Case1の支保工の着目要素における最大主応力の経時変化	5-51				
义	5.3-30	Case2 における周辺岩盤の天端部の変位	5-52				
义	5.3 - 31	Case2 における周辺岩盤の側壁部の変位	5-52				
図	5.3 - 32	Case2 における周辺岩盤の透水係数の増加率	5-52				
凶	5.3-33	Case2 における周辺岩盤のヤング率の変化	5-53				
凶	5.3-34	Case2 における周辺岩盤の最大主応力の変化	5-53				
凶	5.3-35	支保工の天端部と側壁部において着目した要素	5-54				
凶	5.3-36	Case2の支保工の着目要素における最大主応力の経時変化	5-54				
凶	5.3-37	上力分布の変化	5-56				
凶	5.3-38	圧力分布の変化	5-57				
凶	5.3-39	飽和度分布の変化	5-58				
図	5.3-40	飽和度分布の変化	5-59				
図	5.3-41	気相の流泉分布	5-60				
図 図	5.3-42	気相の流泉分布	5-61				
図 図	5.3-43	液相の流泉分布	5-62				
凶 I	5.3-44		5-63				
凶 I	5.3-45	気相における $CH_4$ および $CO_2$ のモル分率	5-64				
凶 III	5.3-46	気相における $CH_4$ および $CO_2$ のモル分率	5-64				
	$0.3^{-}47$	酸相にわける $OH_4$ わよび $OO_2$ のモル万率					
凶	$0.5^{-40}$	酸相にわける $CH_4$ わよい $CO_2$ のモルカギ	9-09 E-00				
凶 网	0.5 <sup>-</sup> 49	酸相にわける $OH_4$ わよい $OO_2$ の $M 取 / ブック /$	9-00 5-69				
凶 図	5.3.50	圧力力和の変化 圧力公布の変化	5 00 5-60				
区 図	5 3-59	二万万和の変に	5 03 5-60				
	5 3-53	的和度分布の変化	5 03 5-70				
	5 3-54	的和度分布の変化					
	5 3-55	一次元解析と二次元解析の飼和度分布の比較					
× V	5.3-56						
	5 3-57	液相の流束分布					
凶 図	5 3-58	気相の流束分布					
<u>図</u>	5.3-59	液相の流束分布					
<u></u> 叉	5.3-60	気相における CH <sub>4</sub> および CO <sub>2</sub> のモル分率					
ÉЧ	5.5 00	The second secon					

义	5.3-61	気相における CH4 および CO2 のモル分率	5-76
义	5.3-62	液相における CH4 および CO2 のモル分率	5-77
义	5.3-63	液相における CH4 および CO2 のモル分率	5-77
义	5.3-64	液相における CH4 および CO2 の拡散フラックス	5-78
义	5.3-65	気相における CH4 のモル分率	5-79
义	5.3-66	気相における CO <sub>2</sub> のモル分率	5-79
义	5.3-67	圧力分布の変化	5-81
义	5.3-68	圧力分布の変化	5-82
义	5.3-69	一次元解析と二次元解析による圧力分布の比較(Case2)	5-82
义	5.3-70	飽和度分布の変化	5-83
义	5.3-71	飽和度分布の変化	5-84
义	5.3-72	一次元解析と二次元解析の飽和度分布の比較	5-84
义	5.3-73	気相の流束分布	5-85
义	5.3-74	気相の流束分布	5-86
义	5.3-75	液相の流束分布	5-87
义	5.3-76	液相の流束分布	5-88
义	5.3-77	気相における CH4 および CO2 のモル分率	5-89
义	5.3-78	気相における CH4 および CO2 のモル分率	5-89
义	5.3-79	液相における CH4 および CO2 のモル分率	5-90
义	5.3-80	液相における CH4 および CO2 のモル分率	5-90
义	5.3-81	液相における CH4 および CO2の拡散フラックス	5-91
义	5.3-82	一次元二相流解析の圧力分布の変化	5-92
义	5.3-83	一次元二相流解析結果	5-92
义	5.3-84	一次元二相流解析結果	5-93
义	5.3-85	一次元二相流解析の飽和度変化	5-93
义	6.2 - 1	地層処分実規模試験施設(2020年度初め)	6-1
义	6.2-2	改修後の施設の外観	6-2
义	6.2-3	ゆめ地創館と連絡通路の改修	6-2
义	6.3-1	実規模試験施設更新後のイメージ図	6-3
义	6.3-2	更新後の実規模試験施設内	6-6
义	6.3-3	ゆめ地創館からの入場	6-6
义	6.3-4	地層処分実規模試験施設の入口	6-7
义	6.3-5	人工バリアの機能、製作技術の紹介	6-7
义	6.3-6	ブロック方式の人工バリアのカットモデル	6-7
义	6.3-7	スクリューフィーダ方式の隙間充填装置	6-8
义	6.3-8	エアベアリング方式の PEM 定置・回収装置	6-8
义	6.3-9	ウォータージェット方式の隙間充填材除去装置	6-8
义	6.3-10	オーガ方式の隙間充填材除去装置	6-9
义	6.3-11	エアベアリング要素試験装置	6-9
义	6.3 - 12	ベントナイト体感試験コーナー	6-10
义	6.3-13	スクリューによる材料移送のしくみを紹介する模型	6-10
义	6.3-14	処分孔竪置き方式の工学技術の紹介(地下1回)	6-11
义	6.3-15	処分孔竪置き方式の工学技術の紹介(地下1回)	6-11

表	1.2 - 1	回収可能性の維持に関する技術検討の枠組み	1-2
表	1.3-1	閉鎖後長期の安全性への影響の定量化項目(R&R 検討会の整理結果)	1-10
表	1.3-2	操業期間中の安全性への影響の定量化項目(R&R 検討会の整理結果)	1-11
表	2.3-1	地下施設の延長等に係る諸元	2-3
表	2.3-2	立坑からの埋め戻し材搬出能力	2-5
表	2.3-3	プラグ1式あたりの解体・撤去の所要時間内訳	2-6
表	2.3-4	処分坑道1本あたりの埋め戻し材除去の所要時間内訳	2-6
表	2.3-5	処分孔1本あたりの埋め戻し材除去の所要時間内訳	2-7
表	2.4-1	地下施設の延長等に係る諸元	2-21
表	2.4-2	処分坑道1本あたりの除去装置の移動距離	2-22
表	2.4-3	PEM 手前の埋め戻し材除去の所要時間内訳	2-23
表	2.4-4	隙間充填材の除去の所要時間内訳	2-24
表	2.4-5	PEM 回収の所要時間内訳	2-25
表	2.4-6	回収作業時間(施工速度)の迅速化に向けた課題の整理	2-27
表	2.4-7	一般土木分野におけるトンネル掘削方式	2-29
表	2.4-8	検討対象とした隙間充填材の仕様と状態	2-31
表	2.5 - 1	令和2年度の検討内容	2-34
表	2.5-2	2022 年度までの技術開発計画	2-34
表	3.1-1	回収の容易性向上の視点とポイント	3-3
表	3.1 - 2	回収の容易性向上の工学的方策	3-4
表	3.2 - 1	オーバーパックを回収の対象とした回収の容易性向上の工学的方策	3-6
表	3.2-2	緩衝材制限温度(100℃)を超えない概念設計当初案の仕様例とガラス	固化体1体
	あたり	)の処分坑道長さ	3-11
表	3.2 - 3	代替設計オプション概念設計案 OP-1、OP-2 の定性評価	3-19
表	3.2-4	代替設計オプション概念設計案 OP-3、OP-4 の定性評価	3-20
表	3.3-1	PEM を回収の対象とした回収の容易性向上の工学的方策	3-26
表	3.3-2	代替設計オプション概要案 PEM-1 に組み込んだ工学的方策	3-28
表	3.3-3	代替設計オプション概要案 PEM-2 に組み込んだ工学的方策	3-31
表	3.3-4	緩衝材制限温度(100℃)を超えない概念設計当初案 PEM-1V1 の仕様	例とガラス
	固化体	<b>\$1体あたりの処分坑道長さ</b>	3-36
表	3.3-5	概念設計当初案 PEM-22 の仕様例と緩衝材の最高温度	3-37
表	3.3-6	概念設計案 PEM-1V1 における工学的方策の実現性を評価する設計・	施工上の検
	討項目	目の設定	3-40
表	3.3-7	概念設計案 PEM-22 における工学的方策の実現性を評価する設計・施	工上の検討
	項目0	D設定	3-42
表	3.3-8	代替設計オプション概念設計案 PEM-1V1 の定性評価	3-47
表	3.3-9	代替設計オプション概念設計案 PEM-22 の定性評価	3-48
表	3.4-1	次年度以降の研究開発計画	3-55
表	4.2-1	操業期間中の安全性への影響の定量化項目	4-2
表	4.2-2	閉鎖後長期の安全性への影響の定量化項目(	4-3
表	5.2 - 1	使用した材料	5-2

表	5.2-2	吹付けコンクリートの配合仕様	5-3
表	5.2 - 3	ベースコンクリート作成	5-3
表	5.2-4	使用設備	5-3
表	5.2-5	吹付け条件の計測結果:第2回目(10月20日)	5-6
表	5.2-6	試験項目	5-6
表	5.2-7	各試験項目における準拠規格の一覧	5-7
表	5.2-8	作成したコンクリートのスランプ、空気量および温度測定結果	5-7
表	5.2-9	ベースコンクリートのプルアウト強度(換算)試験結果	5-7
表	5.2-10	ベースコンクリートの圧縮強度試験結果(N/mm <sup>2</sup> )	5-7
表	5.2 - 11	試験項目、数量、寸法	5-9
表	5.2 - 12	使用した装置等の仕様	5-10
表	5.2-13	測定条件	5-10
表	5.2-14	試料の質量	5-10
表	5.2 - 15	単位体積あたりの累積細孔容積	5-10
表	5.2 - 16	各細孔径分布	5-11
表	5.2 - 17	使用した装置の仕様	5-12
表	5.2-18	吹付コンクリートの弾性波速度	5-12
表	5.2 - 19	使用した装置の仕様	5-14
表	5.2-20	吹付けコンクリートコアの一軸圧縮強度試験結果一覧表	5-14
表	5.2 - 21	吹付けコンクリートコアの強度、変形特性試験結果	5-15
表	5.2-22	吹付コンクリートコアの割裂引張強度	5-17
表	5.2-23	変水位法透水試験結果	5-18
表	5.2-24	SEM 観察と SEM·EDS 分析について	5-20
表	5.2 - 25	SEM 観察と SEM-EDS 分析の範囲イメージ	5-21
表	5.2-26	使用した装置の仕様	5-22
表	5.3 - 1	幌延深地層研究所で取得された情報、掘削影響に関する知見の収集	5-26
表	5.3-2	国内外で実施された堆積岩を対象とした坑道周辺の地質環境の文献の収集(	国内)
			5-27
表	5.3-3	国内外で実施された堆積岩を対象とした坑道周辺の地質環境の文献の収集(	国内)
÷		同山月、今日本をした 単本山と した どうしょう しゅう 一日 「日本」 「日本」 「日本」 「日本」 「日本」 「日本」 「日本」 「日本	5-28
衣	5.3-4	国内外で実施されに堆積石を対象としに巩迫向辺の地質環境の又断の収集(	国外)
÷		フカル間キナキ	5-28
衣	5.3-5 5 0 C	ての他関連又職	5-29
衣	5.3-6	ての他関連大獣 (伝送国)四世駅中の天船和短柱の艇に毛汁に開きてすね)	5-29
衣	5.3-7	その他関連又厭(巩迫周辺右盛内の不飽相領域の解析手法に関する又厭)	5-29
衣	5.3-8		5-35
表	5.3-9	吹付りコンクリートと鋼裂文保上の物性値	5-35
衣	5.3-10	稚り 増い一 軸上 縮 試 験 から 鼻出 し た 大 人 保 モ ア ル の 足 数 等	5-40
表	5.3-11	設定ハフメータ	5-44
表	5.3-12	水分特性曲線のバフメータ	5-44
表	$5.3 \cdot 13$	予察的解析の解析ケース	5-47

#### 1. 本事業の目的と実施内容

#### 1.1 事業の概要

#### 1.1.1 事業名

令和2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(回収可能性技術高度 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等の地層処分については、 2000年に制定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」のもと、実施主体である原子 力発電環境整備機構の設立を経て、最終処分法が定める3段階の調査ステップの最初の段階であ る文献調査に係る公募が開始された。

一方で、制度創設から 10 年以上を経た段階においても文献調査の実施に至っていない状況を 踏まえ、原点に立ち返って何が根本的な課題であるかを追求することが必要であるとの認識のも と、国の審議会(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(以下「廃棄物 WG」という。))において、我が国の最終処分政策の再構築 に向けた議論が行われた。このような議論を経て、現世代として地層処分に向けた取組を進める ことが再確認されるとともに、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、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ため、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、及び機構(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)を確保することが定められた。

地層処分事業への可逆性の導入という新たな施策に対する社会の信頼感を更に高めて行くため には、それを裏付ける回収可能性という技術的能力に対する信頼性を高めていく必要があり、更 に、基本方針が要求している回収可能性に係る調査研究課題(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関する調査研究)を着実に進めて行く必要がある。本事業では、 上述した回収可能性に係る技術的課題に取り組み、施策に対する社会の信頼感の更なる醸成に資 することを目的とする。

#### 1.2回収可能性に係わる技術検討のフレームワーク

2015年5月に改定された基本方針の第4(特定放射性廃棄物の最終処分の実施に関する事項) において、「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 きるようにするため、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、 及び機構(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」が加えられ、回収可能性の確保が明文化された。 さらに、第5(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)において、「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。当該技術開発等の成果については、 最終処分事業や国の安全規制において有効に活用されることが重要である」として、回収可能性 に係る調査研究の実施を要求している。

本節では、改定された基本方針を踏まえ、本事業の3つの実施内容である【回収技術の高度化】、 【回収容易性を高めた代替設計オプションの開発】、【回収可能性の維持に伴う影響の定量化】そ れぞれの目的を整理した。

#### 1.2.1 技術開発·検討の目的

本事業の前身事業において、外部有識者で構成する「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点 整理に関わる検討会」(以下、「R&R 検討会」という。)を設置し、可逆性・回収可能性に関する 多面的な検討を実施した(原環センター,2017.)。本検討会では、今後の具体的な制度の運用、 研究開発の推進に向けて更なる検討が必要と考えられる事項(論点)について整理し、我が国に おける今後の運用や技術的な対応課題を取りまとめた。表 1.2-1 に R&R 検討会で整理された今 後の技術的な対応課題(今後定量化が必要となる情報)を示す。これらは、今後の更なる議論や 技術検討を進める上での"技術検討の枠組み"として整理されている。

同表に示された4つの課題に関して、以下に、本事業における課題の捉え方、並びに取組の技 術開発や検討の考え方・進め方について要約整理する。

	表 1.2-1 回収可能性の維持に関する技術検討の枠組み
定量化すべき情報	内容
1. 安全性への影響	(1) 操業期間中の安全性への影響
	①回収可能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響
	②回収作業時の安全性への影響(回収を実施する場合)
	(2) 閉鎖後長期の安全性への影響
	①人工バリアに期待する閉鎖後長期の安全機能への影響
	②天然バリア(母岩)に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響
2. 回収の容易性	(1)単位ユニット当たりの回収時間(例: 廃棄体1体、処分坑道1本、など)
(回収作業時間)	(2) 全ての廃棄体回収にかかる全体作業時間
3. 維持期間	最終閉鎖せずに回収可能性を維持できる期間
4. 費用	回収可能性に係わる費用

#### (1) 安全性への影響

安全性への影響とは、一定の確保すべき安全性のレベルに対してどのような影響があるかとい うことを指す。確保すべき安全性のレベルについては、今後整備される安全規制制度からの要求 が、その指標の1つになると考えられる。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ができる。 このように区分することで、安全性を論じる際の対象、安全性に影響を与える事象、安全性を定 量的に扱う手法や工学的対策の検討など、課題の位置付けを明確にしつつ取り組むことが可能と なる。

#### (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。R&R 検討会では、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"を設定した。回収作業時間は 廃棄体1体あたり、処分坑道1本あたりのような単位ユニットあたりの回収時間と、回収の対象 となった廃棄体の回収に係る全体作業時間の2つに細分できる。単位ユニットあたりの回収時間 は、回収工程の分析と各作業に要する時間からある程度定量的に見積もることが可能である。一 方で全体作業時間は、単位ユニット当たりの回収時間と数量との単純な比例関係にはなく、処分 場の地下施設の施設設計(地下施設の展開や坑道設計等)に対応した作業動線や物流容量、各作 業の組合せの最適化・合理化を経て算出される。地下施設の施設設計が具体化できない現在の事 業段階を踏まえ、当面は単位ユニット当たりの回収時間に焦点を当てて検討を進める。今後、全 体作業時間を見積る上でも、当面は単位ユニット当たりの回収時間は必須の情報となる。

#### (3) 回収可能性の維持期間

既に定置された廃棄体を回収(取り出す)する動機としては、

- ・処分事業の政策変更への対応
- ・処分事業の安全性に疑義が生じた場合の是正処置等の安全規制への対応
- ・自然災害や事故事象に対する復旧作業の一部

といったことが挙げられる。基本方針に示された「将来世代が最良の処分方法を選択できるよう にする」については政策変更への対応と解釈することができ、そのような政策変更が可能な期間 と条件について、「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」と基本方針に示されている。

以上のような基本方針の要求を踏まえれば、可逆性・回収可能性の維持期間の終期はその意思 決定の分岐判断(回収して別の管理方策に移行する/回収せずに地層処分施設を最終閉鎖する) の時点と考えることができる。これを踏まえ、本事業では、回収可能性の維持期間を"回収/閉 鎖措置の判断が可能な期間"と定義する。本定義を踏まえ、基本方針に示される「安全な管理が 合理的に継続される範囲内」について、以下のように整理する。

- ○操業期間中(回収作業を含む)の安全性の観点では、回収実行の判断の後に実施される回収 作業の安全性が確保できている必要があることから、回収可能性の維持期間の終期は、その 後に実施される可能性のある回収作業期間を考慮する必要がある(回収作業中の安全性の確 保が困難になるよりも前に閉鎖、もしくは回収の判断を行う必要がある)。
- ○閉鎖後長期の安全性の観点では、処分施設を最終閉鎖せずに回収可能性を維持することに伴 う影響が地層処分場の長期安全性に有意な影響を及ぼすよりも前に閉鎖もしくは回収の判

断を行う必要がある。

以上より、基本方針が要求する回収可能性の維持期間は、処分場への廃棄体の定置開始から、 操業安全性(回収作業期間中の安全性を含む)および閉鎖後長期の安全性に有意な影響を及ぼす よりも前と整理する。これらの期間を模式的に示すと図 1.2-1 のようになる。この関係は前述し た「(1)安全性への影響」と「(2)回収の容易性(回収作業時間)」の2つの項目を定量化すること で導出できるため、「(3)回収可能性の維持期間」は、(1)と(2)の検討を踏まえて総合的に判断する こととした。



図 1.2-1 回収可能性が維持されている状態の模式図

#### (4) 回収可能性の導入に伴う費用

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。前述(1)~(3)の技術検討を含め、今後の事業進展に応じて処分場の設計が具体化されることにより、このような費用を定量化する(見積もる)ことが可能となる。

表 1.2-1 に示す費用を含めた 4 つの項目は互いにトレードオフの関係にあり、今後の処分場設計の具体化では、全ての項目を定量的に評価して最適化していく必要がある。

#### 1.2.2 本事業における検討の前提条件の整理

回収可能性に係わる技術開発や検討では、回収の動機および回収の判断がなされる時期、回収 可能性の維持期間中の状態、回収時の処分場の状態など、多くの要因やそれらの関連性に留意す る必要がある。そのため、回収可能性に係わる技術開発や検討では、閉鎖後長期や閉鎖前の安全 性を満足させる処分場の施設設計だけではなく、処分場の地下構成要素の個々の詳細設計ならび に建設・操業段階における手順や処分場の展開・変遷などの細部に留意しながら取り組む必要が ある。

このような必要性に鑑み、本事業の検討では、出発点として前提条件を基本となるケース(レ ファレンス)の検討・設定に着手することとした。それ以外の条件は基本ケースからの差分とし て整理しておき、差分に伴う検討事項への影響度に留意しつつ拡張・展開してくことができるよ うにした。

#### (1) 技術開発の出発点とする定置概念

我が国で先行して検討・評価が進められている「処分孔竪置き・ブロック方式」と「処分坑道 横置き・PEM 方式」の2つの定置概念を本事業における基本ケース設定のベースとする。

処分場のレイアウト等は建設されるサイトの地質環境条件に依存するため、新第三紀堆積岩類 の母岩、地下 500m に建設される処分場を設定し、地下施設のレイアウトや坑道寸法などは、 NUMO 包括的技術報告書を参考にしつつ設定した (NUMO, 2021)。処分孔竪置き・ブロック方 式の特徴は、原位置での人工バリアの組立て、処分坑道から掘削された処分孔への定置、パネル 型の処分区画などである。処分坑道横置き・PEM 方式の特徴は、モジュール化された人工バリ ア、処分坑道への定置、デッドエンド型の処分区画などである。

これら2つの定置概念に対して、回収技術の高度化、回収可能性の維持に伴う影響の定量化手 法の整備を進める。また、回収容易性を高めた代替設計オプションの開発においては、回収容易 性を高める技術的方策を抽出・整理するための工程分析の対象とした。

#### (2) 回収可能性の維持の状態

廃棄体定置後の回収可能性維持中の処分坑道の状態として、図 1.2-2 や図 1.2-3 のように幾つ かの埋め戻し状態を想定し得る。それぞれの状態オプションは回収可能性を検討する上で、次の ような特徴を有する。

#### <u>状態オプション1</u>

処分坑道が埋め戻されておらず、解放された状態である。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。 一方で、解放坑道からの空気の供給や排水の継続に伴う周辺環境への影響や、それらの行為 による維持管理費用への影響などが懸念される。

#### <u>状態オプション2</u>

処分坑道が埋め戻され、坑道端部に力学プラグが設置された状態である。状態オプション 1 と比較して、力学プラグの撤去、処分坑道の再解放が回収作業に追加される。一方、人工 バリア周囲のニアフィールドスケールの領域は閉鎖時と同様の状態であり、閉鎖後長期の安 全性への影響は状態オプション1よりは軽微と考えられる。

#### <u>状態オプション 3</u>

アクセス坑道を除いた坑道が埋め戻されている状態である。回収作業時の坑道の再解放時 の物量が最も多くなる。地層処分の本質である安定した地下深部への廃棄体の定置の観点で は、状態オプション2よりもさらに受動的安全性が確保されていると考えられる。

本事業では、処分坑道が埋め戻され端部に力学プラグが設置された「状態オプション 2」を先 行検討対象として、技術開発や検討を行うこととした。

実際の処分事業における回収可能性維持期間中の状態は、回収作業の容易性だけではなく、処 分場の設計、閉鎖後長期の安全性への影響、回収作業時の安全性への影響や確保のあり方(維持 管理・補修、など)、そのコストなどを踏まえ、合理的に判断されることになる。



図 1.2-3 回収可能性の維持の状態オプション(処分坑道横置き・PEM 方式)

#### (3) 回収する廃棄体の総数

基本方針の意図および技術的な検討を進める上での下記に示す考え方を踏まえ、現時点における地層処分施設の処分量とされている 40,000 体全ての廃棄体が定置された状態での回収可能性の維持、ならびに全量回収を検討の前提とする。

操業期間中の安全性への影響

40,000 体の全量定置・全量回収とすることで、操業期間中の安全性への影響(建設・定置 作業、回収作業)を考慮する期間が最長となる。この期間中の安全性への影響は、定置作業 中の可逆性、特定の廃棄体を対象とした部分回収時の操業安全性も包含される。

閉鎖後長期の安全性への影響

処分場の建設に伴う換気や排水、地下への建設資材の持ち込みなど、地下環境の擾乱は処 分場の建設と同時に起こるため、40,000 体の全量定置が建設・操業期間中に生じる擾乱期間 としては最も長くなる。全長定置後の回収可能性の維持に伴う影響については、全量定置期 間中の影響事象を踏まえ、単純な期間の延長による影響の継続、または別の事象の発現の可 能性として扱う。

回収の容易性(回収作業時間)

廃棄体の回収作業時間は、回収対象となる廃棄体の数量に依存するため、40,000 体の全量 を回収する場合の回収作業時間が最長となる。 全量の定置が完了していない操業期間中(建設・定置作業)は、処分場の状態(地下施設の規 模、埋め戻された処分坑道の本数など)は事業進捗に依存するため、回収作業の工程分析などに 際して地下施設の展開状態などを現時点で想定ことは困難である。一方、廃棄体全量の定置が完 了した状態は、処分坑道の本数や坑道の埋戻し状態、処分場全体の管理体制など、物量や状態を 設定することができる。回収の容易性(回収作業時間)に関連する回収作業の工程分析、回収技 術の整備、回収の容易性を高めた代替設計オプションの整備では、全量回収する場合を対象とす る。

#### (4) 通常の操業

本事業で検討の出発点とした処分孔竪置き・ブロック方式、処分坑道横置き・PEM 方式は、段 階的な調査を経た事業許可後、処分場の建設、操業、地下施設の埋め戻し(閉鎖措置)と進む。 このように、建設・操業を経て、廃棄体の全量定置の後に速やかに最終閉鎖措置に移行する手順 を、本事業では"通常の操業"と呼ぶ。

#### (5) 廃棄体の健全性

#### 回収作業時の廃棄体の健全性は確保されているものとする。

基本方針で要求されている回収可能性は、処分事業の政策変更(可逆性)への対応として位置 付けられている。回収作業時の廃棄体の健全性について、本事業では下記のように整理した。な お、定置から期間を経た後の廃棄体の健全性については、前項(1)に示した操業期間中の安全性で 定量的に扱う。

#### <u>閉じ込め性</u>

オーバーパックの安全機能である"ガラス固化体の発熱が著しい期間の地下水との接触を 防止するための閉じ込め性"は、回収可能性の維持期間中、回収作業中は確保されているも のとする。よって、回収作業時の環境はガラス固化体由来の放射性物質による汚染はなく、 放射線環境となる。

#### 構造健全性

回収時の構造健全性を、回収作業時のハンドリングに耐え得る強度を有していることと定 義する。

高レベル放射性廃棄物の回収作業時の廃棄体のハンドリング形態は、定置方法や定置技術 (装置)に依存する。本事業では、回収作業時のハンドリング対象を操業時(定置時)と同 様に、オーバーパックと PEM とする。回収作業時のハンドリングに耐え得る強度は、定置 から時間が経過したオーバーパックや PEM の状態と、回収作業時の把持方法や搬送方法と いった装置側との関係に依存する。

#### 放射線遮蔽性

ガラス固化体からの放射線は製造時から徐々に減衰するため、回収時のガラス固化体からの放射線量は計算で求めることができる。オーバーパック、PEMの場合は緩衝材と鋼殻は 放射線遮へい層として機能が期待される。

#### (6) 処分施設の健全性

本事象における回収技術の整備では、回収作業時の処分施設の健全性は確保されていることを 前提とした技術開発を実施する。

実際の処分事業では、操業期間(40,000体の廃棄体の全量定置までに要する期間)を 50年程

度としている。回収可能性の維持期間中に開放されている坑道、回収作業時に再掘削する坑道、 その他の地下施設を含む処分施設は、建設からの経年劣化を受けている。これら処分施設の建設 から期間を経た後の健全性については、前項(1)に示した操業期間中の安全性で定量的に扱う。

#### (7) 回収後の廃棄体、処分施設の扱い

回収された廃棄体の保管方法、保管施設、回収後の扱いが未定などの理由が回収作業の制約と ならないこととする。また、回収が完了した後の処分施設の再利用や廃止などは検討対象から除 外する。

回収の動機として、①処分事業の政策変更への対応、②処分事業の安全性に疑義が生じた場合 の是正処置等の安全規制への対応、③自然災害や事故事象に対する復旧作業の一部、などが挙げ られる。①の場合は後続の政策が決定した後で回収作業、②と③は操業期間中の安全に対するリ スクマネジメントとして処分事業に考慮されているものと考える。

#### 1.3 技術開発課題ごとの関係と目的の整理

本節では基本方針に示された「安全な管理が合理的に継続される範囲内」をキーワードとして、 1.2.1 で述べた技術検討のフレームワークとして示される 4 つの技術的な対応課題(今後定量化 が必要となる情報)と本事業における実施内容との関連を整理する。

#### 1.3.1 閉鎖後長期の安全性への影響

図 1.3-1 は通常の操業のタイムラインを模式的に示したものである。坑道等の地下施設の建設 に伴う周辺岩盤への影響、セメントや鋼材などの材料の持ち込み、換気による空気の供給、坑道 への湧水・排水による水理場の変化など、建設・操業期間中に地下深部本来の環境への擾乱が生 じる。通常の操業における閉鎖までに生じる事象や閉鎖後長期の安全性へ与える影響は、既に考 慮されているものとする(現時点のセーフティケース開発の中で考慮されている、或いは本事業 以外で研究・技術開発が進められている)。



図 1.3-1 通常の操業における閉鎖後長期の安全性への影響の考慮の範囲

既述の状態オプション 2(処分坑道が埋め戻され力学プラグが設置されている状態)で回収可 能性を維持している処分施設では、処分坑道を除く坑道(主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道な ど)が解放された状態で存在する。開放坑道では換気による空気の供給、坑道への湧水と排水が 引き続き継続する。これにより通常の操業で既に考慮されている事象の影響だけではなく、通常 の操業期間中では発現せずに考慮の必要が無かった(或いは短期的な事象で安全性への有意な影 響はないと評価された)新たな事象の影響を受ける可能性がある。これらが閉鎖後長期の安全性 へ及ぼす影響の観点から、図 1.3-2 に示すように、回収可能性の維持期間の限度は維持に伴う影 響が有意になる時期までと考えることができる。



図 1.3・2 閉鎖後長期の安全性の観点からの回収可能性の維持期間

R&R 検討会では閉鎖後長期の安全性への影響として、安全機能が割当てられる人工バリアと 天然バリアに分け、表 1.3・1 に示す項目に整理した。我が国で検討が進められている 2 つの定置 概念を対象に、閉鎖後長期の安全性への影響を定量的に把握することで、閉鎖後長期の安全性の 観点から、回収可能性の維持期間の設定に寄与する事象の特定、特定した事象による安全性への 影響の定量評価、維持期間確保のための工学的対策の検討へと展開する。そのような展開を通し て、定置完了後に延長可能な回収可能性の維持期間が見通される。

のしていりマレカはよう	ア、リマト地体トス明烈の后	a. 坑道内の空気持ち込みによる機能劣化等の影響
山人上パリアに期待する 期の安全機能への影響	)闭鋇伐长 3	b. 廃棄体からの熱による影響
为吵女主候能、吵影音	•	c. 坑道開放期間中の坑内湧水影響
	5然バリア(母岩)に期待する閉 単後長期の安全機能への影響	a. 地下水の引き込みによる攪乱影響の範囲と程度
②大然バリア(母右)に		b. 酸素供給・乾燥環境による母岩への影響
與反反为少女主機能		c. ベースラインへの回復過程と回復程度

表 1.3-1 閉鎖後長期の安全性への影響の定量化項目(R&R 検討会の整理結果)

閉鎖後長期の安全性への影響は、通常の操業においても地下深部環境への擾乱、人工バリアの 定置後の状態変遷など図 1.3・1 の様に考慮される。定置完了後に閉鎖認可を得て速やかに閉鎖措 置に移行するか、回収可能性を維持するかの最も大きな違いは、開放坑道が引き続き存在するこ とによる、地下空間の存在と排水・換気の継続である。よって、本事業では定置完了後の維持期 間中の影響の定量化手法の整備に際し、通常の操業で生じる事象を建設・操業期間中の時間スケ ールで丁寧に扱った後、時間スケールを延長することで、図 1.3・2 に示した処分場を閉鎖せずに 回収可能性を維持した場合の影響の定量化に取り組む。

#### 1.3.2 操業期間中(回収作業中)の安全性と回収作業時間

#### (1) 安全な回収作業

回収作業を確実に行うためには、回収開始から完了までの回収作業時間(全体)の間、操業期間中(回収作業中)の安全性が確保されている必要があり、図 1.3-3 に模式的にしたタイムラインのような関係に収まっていれば、回収作業の安全性を見通すことができる。



図 1.3-3 回収が安全に実施できる状態の模式図

図 1.3-3 は、通常の操業において、40,000 本の廃棄体定置が完了した後に全量回収の判断をした場合である。この場合が、廃棄体本数や再掘削する処分坑道の総延長が最大となるため、回収 作業時間(全体)が最長になり、回収作業中の安全確保が求められる期間も最長になる。 操業期間中(回収作業中)の安全性の観点から、図 1.3-4 に示すように、回収可能性の維持期間の限度は、操業安全性(回収作業)が損なわれる時期から回収作業時間(全体)だけ遡った時点になる。これよりも回収可能性の維持期間が前であれば、回収作業中の安全性が確保できる期間内に回収作業を終えることができる。



図 1.3-4 操業期間中の安全性の観点からの回収可能性の維持期間

以上のように、操業期間中の安全性が確保された時間スケール内での回収作業の実現性の判断 や、操業安全性の観点からの回収可能性の維持期間の設定のためには、回収作業中の安全性が確 保できる期間と回収作業時間(全体)の2項目が関与する。

以下に、これら2項目に対する本事業での取り組みを述べる。

#### (2) 回収作業中の安全が確保できる期間

廃棄体の回収は、一度埋め戻した処分坑道を再掘削した坑道内での作業であること、定置後に 時間が経過した廃棄体を扱うことが、建設・操業と大きく異なる点である。R&R 検討会では、回 収可能性の維持に伴う操業期間中の安全性への影響を、「開放坑道の健全性(空間安定性)」、「埋 め戻した坑道の再利用時の健全性」、「回収時の廃棄体の健全性」「廃棄体からの熱影響」に分類整 理している(表 1.3-2)。本事業では、我が国で検討が進められている2つの定置概念の施設設計 を対象に、回収作業時の安全性を定量的に把握することで、定置完了後の回収作業中の安全性が 確保できる期間を見通すことができる。具体的には、安全性の低下に寄与する事象の特定、特定 した事象による安全性への影響の定量評価、安全性向上のための工学的対策の検討への展開を通 して定置完了後の回収作業中の安全性が確保できる期間を見積もる。

<ol> <li>回収可能性維持期間中の開放坑道</li> </ol>	a. 開放坑道の健全性(空間安定性)
の安全性への影響	b. 開放坑道内(作業空間)への廃棄体からの熱影響
<ul> <li>②回収作業時の安全性への影響</li> <li>(回収を実施する場合)</li> </ul>	a. 埋め戻した坑道の再利用時の健全性
	b. 再利用する坑道内(作業空間)への廃棄体からの熱影響
(回収を天旭りる物日)	回収時の廃棄体容器の健全性

表 1.3-2 操業期間中の安全性への影響の定量化項目(R&R 検討会の整理結果)

#### (3) 回収の容易性(回収作業時間)と単位ユニット

本事業では、廃棄体1体の回収に要する時間に着目した技術開発から着手する。 R&R検討会における技術検討のフレームワークにおいて、回収の容易性(回収作業時間)は、 "単位ユニット当たりの回収時間"と"全ての廃棄体回収にかかる全体作業時間"の2つを定量 化項目として挙げている。"単位ユニット当たりの回収時間"は、処分孔内のオーバーパック1体 や処分坑道に定置された PEM1体、処分坑道1本、1処分区画のように着目する範囲に因るが、 範囲を拡大すると最終的に"全ての廃棄体回収にかかる全体作業時間"になる。ただし、"全ての 廃棄体回収にかかる全体作業時間"は、最小ユニットである"廃棄体1体あたりの作業時間"と 回収対象の廃棄体本数の単純な積(単位ユニット当たりの回収時間×ユニット数)にはならない。 回収作業は、処分場の施設設計に依存する物流動線や物流容量、回収に係る装置や設備の能力、 同時に作業を行う系列数などが関係しており、単位ユニットの範囲を拡大するほど組合せが複雑 になる。そのため、作業時間の算出には回収工程の具体化や最適化が、対象とした単位ユニット の規模に対して必要となるが、サイト選定の初期段階にある現時点ではその具体化は時期尚早で ある。このような事情にも留意して、単位ユニットの拡張に伴う前述の検討に資するため、最小 単位ユニットである"廃棄体1体あたりの回収時間"を提示するための、技術開発から着手する。

回収可能性の実現性・容易性を示して行く上での技術的アプローチ(戦略)として次の2つの 方向性が国際的に共有されている(R&R 検討会)。

・技術的アプローチ1:回収方法(技術・装置)の開発に重点を置く

・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

2 つの技術的アプローチはそれぞれが回収可能性の実現性・容易性を示していく上での技術的ア プローチであるとともに、共存させることによって更なる回収容易性の向上も期待できる。

以下に、本事業での技術的アプローチ1と2の開発・整備の目的を示す。

#### (4) 技術的アプローチ1:回収技術の高度化

本事業では、回収作業時間の迅速化の観点からボトルネックとなる作業を特定し、ボトルネックの解消に向けた技術開発を行う。

本アプローチは、既定の処分概念に対して、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。これまでに、我が国で先行して検討・評価が進められている 処分孔竪置き・ブロック方式と処分坑道横置き・PEM 方式の 2 つの定置概念を対象として、拐 取技術の開発が進められてきた。処分孔竪置き方式に対する回収技術は、処分坑道を再掘削した 後に、処分孔からオーバーパックを引き出すため、塩水による緩衝材の崩壊効果を利用した緩衝 材除去システムを開発・整備した(原環センター, 2015.)。地上での実規模スケールで緩衝材除 去試験を通して、オーバーパックへの機械的な損傷を防ぐ流体除去技術による緩衝材除去の実現 性、実際の地下環境での作業を見据えた遠隔操作・遠隔監視技術や塩水リユース技術の適用性が 確認されている(図 1.3-5)。この試験では、処分孔からオーバーパックを引き揚げるまでの緩衝 材除去に要する時間は約 72 時間であった。

処分坑道横置き・PEM 方式に対する回収技術は、幌延深地層研究センターの地下 350m の試 験坑道 2 において、実規模スケールの模擬 PEM の回収試験を実施した。定置された PEM を坑 道から搬出可能な状態にするための隙間充填材の機械的除去技術の整備を行い、電動バックホウ にアタッチメント型の除去装置取付け切削試験を実施した(図 1.3-6)。切削試験の結果から、処 分坑道に定置された PEM を搬出するまでの隙間充填材の除去に約 69 時間要すると見積もられ た(原環センター, 2020.)。

以上の技術開発は、処分坑道が埋め戻された状態オプション2からの回収作業のうち、廃棄体 を拘束する緩衝材や隙間充填材の除去技術に注力したものであるが、最小の単位ユニットに相当 する廃棄体1体あたりの回収時間は、少なくとも70時間以上を要することになる。実際には、 処分坑道端部の力学プラグの撤去、処分坑道の再掘削、廃棄体の搬出、さらには処分坑道の補強 などの作業もあるため、1体あたりの回収にはより長い時間を要することとなる。



噴射吸引設備



塩水リユース設備



除去された緩衝材 模擬:図 1.3-5 緩衝材除去システムと緩衝材除去試験



遠隔操作設備



模擬オーバーパック引揚げ



塩水の噴射

オーガ先端部



除去機械



回収タンク



真空吸引装置

油圧ユニット 図 1.3-6 地下環境での機械的除去試験

試験状況

回収作業の長期化は操業期間中の安全性の確保の不確実性の増大や、工学的対策の導入の必要 性に伴う回収作業自体の難易度の増加にも繋がる。しかしながら現時点では、"単位ユニット当 たりの回収時間"、"全ての廃棄体回収にかかる全体作業時間"に対して明確な要求はない。

そこで、我が国で先行して検討・評価が進められている処分孔竪置き・ブロック方式と処分坑 道横置き・PEM 方式の2つの定置概念に対して、処分坑道が埋め戻された状態である状態オプ ション2からの回収工程の分析を行い、各作業に要する時間を定量的に求め、ボトルネックと なる作業の抽出を行うこととした。現在得られている約70時間を要する除去作業がボトルネックとなる場合には、時間的なボトルネックの解消を目的とした技術開発を進める。

技術的アプローチ1に基づく回収の容易性向上に向けた技術開発は、回収工程の分析結果を踏 まえた、時間的なボトルネックの解消を目指す。特定されたボトルネックが解消された後は、複 数の単位ユニットを組み合わせた上位の単位ユニットへ拡張し、新たに出現するボトルネックの 解消に向けた技術開発に次に取り組むことで回収時間の短縮化を図る。このような開発プロセス の反復を通して、処分場の施設設計・回収技術・工程の組合せを検討することで "全ての廃棄体 回収にかかる全体作業時間"の定量化を図る。

#### (5) 技術的アプローチ2: 容易性を高めた代替設計オプションの開発

本事業では、オーバーパックと PEM を回収時のハンドリングの対象(最小コンポーネント) とし、回収作業の全体工程における個別作業の省略や工程上の手数の削減など、回収容易性に向 上に資する代替設計オプションの開発を行い、代替設計オプションの地層処分概念としての成立 性や技術的実現性を提示するための技術開発を行う。

本アプローチは、回収をより容易にするための方法を処分場の設計に予め組み込むものである。 我が国で先行して検討・評価が進められている処分孔堅置き・ブロック方式と処分坑道横置き・ PEM 方式の 2 つの定置概念に対して、処分坑道が埋め戻された状態である状態オプション 2 か らの回収工程を分析し、回収の容易性の向上に資する技術的方策を整理した(原環センター, 2020)。これらの方策を組みわせることで、代替設計オプションの構築過程の追跡性を確保する とともに、現行の 2 つの定置概念に対して向上した回収の容易性を定性的に示す。

本事業で開発された代替設計オプションは様々な評価項目や設計因子に基づいてその妥当性が 評価される。なお、そのような評価項目の例として、以下の項目が今後の処分場設計の最適化に 係る検討の"たたき台"として提案されている(原環センター, 2021)。

①詳細設計への具体化の見通し/設計構築の実現性(建設・施工技術の適用性の見通し)
②設計のロバスト性・柔軟性
③建設・操業性(建設・操業の作業性)
④品質保証・品質管理のし易さ
⑤閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ
⑥閉鎖後長期の性能評価の確からしさ
⑦閉鎖前の安全性(放射線防護)
⑧一般労働安全
⑩環境保全
⑪回収可能性
迎費用・経済性

⑬その他

回収の容易性向上(作業時間の短縮)の観点から開発した代替設計オプションは、これらの評価項目で妥当性が評価され、結果に応じて技術開発をすることで、最適化が図られる。なお、この過程において、これらの評価項目を適時に更新していく。

#### 1.3.3回収可能性の維持期間

既出の図 1.3-2 に示した閉鎖後長期の安全性、および図 1.3-4 に示した回収作業期間中の安全 性の確保と回収作業時間(全体)の関係性を踏まえ、これら2つの観点から回収可能性が維持さ れている状態を図 1.3-7 に統合して整理した。本事業では回収可能性の維持期間を"回収/閉鎖 措置の判断が可能な期間"と定義しているが、閉鎖後長期の安全性への影響が有意になる時期と、 回収作業期間中の安全性が確保される期間を踏まえた回収作業を開始時期のいずれか早い側が判 断の期限となる。



図 1.3-7 回収可能性が維持されている状態の模式図(再掲)

以上の整理から、回収可能性の維持期間に関して、次のようなことが示唆される。

- ○設定した処分概念が回収可能性を有していることは、図 1.3-7の関係が成り立っていること を示す必要がある。定置完了後の回収作業期間中の安全確保のあり方(施設設計への反映、 再掘削時の点検・補修計画、など)と、回収可能性の維持期間中に回収作業を完了させるた めの技術(装置、方法、計画、など)の調和が重要である。
- ○40,000 体の廃棄体が全量定置完了時した時点以降に全量回収する条件(最も厳しい条件)に 対応できるように、適切な時間(期間)内に完了できる回収技術、並びに回収作業期間中の 安全性の確認技術(安全性への影響の定量化技術)や必要に応じた安全性の確保策(対策技術)を含む、回収計画の整備が必要である。
- ○定置完了後に回収可能性の維持期間を付加する場合には、図 1.3-7の関係が成立するように、 操業計画を策定する必要がある。この場合、回収作業期間中の安全性を確保すべき期間は付 加した"回収可能性の維持期間"と"回収作業期間(全体)"を合算した期間となる。このよ うな計画は、処分場の施設設計、維持管理、点検・補修計画として事業許可申請段階に要求 される可能性に留意が必要である。
- ○図 1.3-7 は、基本方針に示された政策変更に対する回収可能性の維持の状態である。操業期間中の不具合の是正措置や事故時の復旧対応などは別途検討を進めておく必要がある(回収技術そのものは、双方の対応に適用可能な共通技術となる)。

#### 1.4本事業の実施内容

回収可能性に係わる技術検討のフレームワーク、並びに技術対応課題および課題に対する開発 計画の進め方に関する整理を踏まえた本事業の実施内容を以下に要約整理する。各実施内容の詳 細については第2章以降に展開整理する。

#### 1.4.1 廃棄体の回収可能性を確保する技術の整備

#### (1) 高レベル放射性廃棄物に対する廃棄体回収技術の高度化

高レベル放射性廃棄物の廃棄体回収技術については、我が国で現時点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」のそれぞれを対象として、回収のための緩衝 材や隙間充填材の除去技術及び廃棄体の取り出し技術の開発・整備が進められており、実規模ス ケールでの技術実証を経て回収作業の技術的実現性が示されている。

一方で、回収作業及びその間の作業空間の健全性確保といった回収作業の安全性の確保、なら びに回収可能性の維持という施策への更なる信頼感醸成の観点では、回収作業時間の迅速化が必 要である。このような課題に対して、本事業では「回収技術の高度化」と「回収の容易性を高め る代替設計オプションの検討」の2つの方向から取り組む。

#### 1) 回収技術の高度化【第2章】

高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)の回収技術については、オーバーパックや PEM 外殻 容器を回収操作におけるハンドリング対象の最小モジュールとして、これまでに技術開発および 実規模スケールでの実証試験が実施されている。一方で、回収の実現性を示すことを優先してき たこれまでの研究開発では、迅速な回収作業時間に焦点はあてられていないものの、得られた開 発成果をとおして、回収の迅速化に資する高度化のポイントが示唆されている。具体的には、一 連の回収作業工程において迅速化のポイントとなる工程/技術として、廃棄体を拘束する周囲の 緩衝材や隙間充填材の除去技術に着目し、その迅速化に向けた要素技術の高度化に取り組む。

#### (a) オーバーパックの回収に係る技術の高度化

処分孔堅置き方式のオーバーパックに損傷を与えずに周囲の緩衝材の除去が可能な「塩水による除去技術」を対象として、迅速化の検討を行い、開発整備した技術の改良あるいは新たな要素 技術の開発を進め、実規模スケールでの実証試験をへてその有用性を確認・実証する。具体的に は平成 26 年度までに地層処分回収技術高度化開発で整備した緩衝材除去システムを活用し、除 去する緩衝材の除去範囲(除去量)を低減した場合のオーバーパックの引き抜きの技術的成立性 を試験で確認するとともに、迅速化に向けた改良点の把握に資するデータを取得する。

令和2年度は試験に向けた試験設備の整備、及び試験条件や計画の具体化を行う。

#### (b) PEM の回収に係る技術の高度化

PEMと坑道との間に施工された埋め戻し材(隙間充填材)の除去技術として開発された「流体 的除去技術」と「機械的除去技術」に関して実施された実規模スケールの実証試験では、特に後 者の機械的除去技術の除去効率が、隙間充填材の性状(材料特性や飽和度など)に依存すること が示唆された(ベントナイト混合土である隙間充填材の含水比の上昇による機械的な切削性の低 下や、切削した副残物の再団粒化による連続的な捕集作業の停滞など)。さらに、実際の事業にお ける隙間充填材として、掘削ズリにベントナイトを混合したものが検討されており、将来の幅広 い材料仕様条件等を見据えて、これらの除去技術の適用性を確認する必要がある。このような背 景を踏まえ、上述した機械的除去技術に関して、隙間充填材の性状と除去効率の関係を評価し、 除去技術の高度化(迅速化)に資するデータを取得する。

令和2年度は、含水比やベントナイトに混合される掘削ズリの違いが、隙間充填材の性状に及 ぼす影響に関する調査を行い、除去技術の検討・開発において重要となる物性値を整理した上で、 隙間充填材の除去技術の高度化(迅速化)に向けた開発計画を具体化する。

#### 2)回収の容易性を高めた代替設計オプションの検討【第3章】

我が国において有望とされている2つの定置概念に対して、より具体的な回収作業を想定した 回収作業工程の検討を行い、回収作業時間の短縮の観点から回収の容易性を高めるためのポイン トを抽出・整理して、回収の容易性を高めた代替設計オプションを構築する方法の整備を進めて きた。この構築方法に基づき考案する代替設計オプション案の成立性の確認に向けて、次の2つ の研究開発項目に取り組む。

(a) 代替設計オプションの成立性に係わる検討

第2次取りまとめ以降の処分場レイアウトの検討や、これまでの技術開発の成果等を参照しつ つ、閉鎖後長期の安全性の確保を見据えた処分概念としての成立性に関する検討を進める。

令和2年度は、整備した構築方法に基づき考案する代替設計オプション案に対して、候補サイト(地質環境特性)の依存性が比較的低いと想定される熱(廃棄体からの熱影響等)の観点から、 成立性に関する検討を実施し、有望なオプションの抽出を行う。

(b) 代替設計オプションに係る工学的実現性に係る動向調査

上記(a)で構築した代替設計オプション(成立性の見通しが得られた代替設計オプション)に対して、地下環境における施工性などの工学的な実現性を確認する。概念的に示される代替設計オプションの実現に向けて、坑道等の建設に係る工学技術ならびに坑道内に定置する人工バリアの施工や管理などの操業に係る工学技術について、一般土木や他産業の動向に留意して整理するとともに、工学的実現性の向上に向けた技術開発課題を整理する。

令和2年度は、構築する代替設計オプション案に対する地下施設の建設・施工等に係る工学技術について国内外の動向を調査し、工学的実現性の向上に向けた技術開発課題を整理する。

#### (2) 回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備

廃棄体の定置作業後に回収可能性の維持期間を設けることに伴い、坑道の開放期間が延長されることによる安全性への影響について、操業期間中の安全性、及び閉鎖後長期の安全性の双方の 観点から、個々の影響に関する定量的な評価技術を整備する。

#### 1) 回収可能性の維持に伴う影響の定量化技術の高度化【第4章】

回収可能性の維持期間を設けることによる影響の主な要因として、開放坑道に空気が継続的に 供給されること、開放坑道からの坑内湧水の排水が継続的に行われることの2つが挙げられる。 これまでに、これらを要因とする個々の影響に関する定量化手法の整備に向けて、主に解析的手 法の観点から予備検討を進めてきた。一方で、建設から操業、(回収可能性の維持)、閉鎖、閉鎖 後長期という一連の期間に生じる事象の時間変遷をより丁寧に考慮して、実現象としての影響の 程度に応じた優先課題の評価、ならびに定量化手法の整備における現象論的知見や経験則の活用 可能性など、より包括的な視点で取り組む必要性が示唆された。

令和2年度は、回収可能性の維持期間を設ける可能性を考慮しない通常の操業に対して作成さ れたストーリーボードをベースに、同期間を設ける可能性を考慮(追加)した場合に有意となり 得る影響項目を整理し、今後の検討対象とすべき事象の有無や優先度を整理する。その様な整理 を経て、次年度以降にそれらを加味した定量化手法の整備・更新に取り組む。

#### 2) 定量化に必要な物性値の取得【第5章】

定置作業後に回収可能性の維持期間を設ける可能性を考慮していない従来の概念に対して、同 期間を設ける可能性を考慮(追加)した場合に新たに考慮すべき具体的な事項として、以下が想 定される。

・長期間にわたる開放坑道の健全性

・再掘削後の坑道安定性

・定置後の過渡的期間における人工バリアの状態変遷等の評価の前提となる環境条件の違い

上記のうち、回収作業時の安全性への影響に係る事項(坑道の空間安定性の評価の対象となる 支保の劣化挙動、廃棄体の回収作業時の健全性)、および維持期間を経た後の閉鎖後長期の安全性 に対する影響に係る事項に関連して、これらの評価において必要となる次の物性値を、地下研究 施設等を活用して取得する。

(a) 実際の地下環境における支保部材(吹付けコンクリート、鋼製支保等)の状態把握

セメント系材料の Ca の溶脱と弾性係数の関係については実験室で精緻な試験が実施されている。実際の地下深部における吹付けコンクリートの挙動を確認することで、支保部材の劣化挙動の定量化に必要なデータを取得する。

(b) 実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理

既設の地下研究施設で生じている事象を元に、実際の開放坑道で生じる事象を整理し、予察的 な解析なども交え、回収可能性の維持に伴う影響の定量化の対象とする事象を再確認する。

#### (3) 地層処分実規模試験施設を活用した理解促進活動

回収に係る技術開発の成果を広く発信するため、地層処分実規模試験施設(〒098-322 4 北海道天塩郡幌延町北進432番地2)を活用して、同地を訪問する多様な方々への理解促 進に資する取組みを実施する。具体的には、これまでの研究で開発(製作)した実証試験資機材 を活用した施設の一般公開をとおして、我が国における地層処分技術の着実な研究進捗や工学技 術の整備状況等を発信するとともに、来館者への説明や対話記録の収集・分析などを行う。 第1章 参考文献

- 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター,平成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.
- 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 28 年度高レベル放射性廃棄物等の 地層処分に関する研究開発事業(可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発) 報告書(第 3分冊),2017.
- 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の 地層処分に関する研究開発事業(可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発) 報告書,2020.
- 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター,地層処分施設の設計・操業技術の最適化 手法に関する研究, RWMC-TRJ-20001, 2021.
- 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-,NUMO-TR-20-03, 2021.

#### 2. 回収の迅速化に向けた技術の高度化

#### 2.1 回収技術の高度化の狙い

これまでに、定置された廃棄体を回収するための技術として、処分孔竪置き方式におけるオー バーパックの回収作業の中核技術となる処分孔内の緩衝材を除去する技術や、横置きの PEM 方 式における隙間充填材の除去技術について技術開発が進められてきた。これらの技術については、 地上/地下施設を活用した実規模スケールでの実証試験を通して、廃棄体回収の回収が技術的に 可能であることを示したが、廃棄体一体あたりの回収に要する作業時間は数十時間になると見積 もられた。

第1章で既述したように、安全性への有意な影響が及ばない範囲の中で、回収可能性の維持期間をより長く設定するためには、廃棄体の回収作業期間を相対的に短くする必要がある。また、 サイト選定段階における今後の関係者との議論のなかで、見積もられる回収作業期間が論点となる可能性もある。このようなことを踏まえれば、現時点で有望とされる二つの概念への適用を念頭においた回収技術について、更なる迅速化を図っておくことが望まれる。

本取組では、回収方法(技術、装置)の開発に重点を置いた前フェーズまでの技術開発成果を 踏まえ、回収作業時間の短縮化(回収作業の容易性の向上)に向けた技術の高度化を進める。

#### 2.2 本年度の実施方針

本年度は、今後の高度化開発に先立ち、廃棄体の回収作業手順と各作業に要する時間の分析を 行い、これらをまとめて「回収工程」として整理し、回収工程において作業に要する時間の観点 からボトルネックとなる作業を抽出し、ボトルネックを解消するための作業時間の短縮目標時間 の設定に向けて検討を行うこととした。

既に述べたように、本取組では、「処分孔堅置き方式」と「処分坑道横置き・PEM 方式」を対象としたこれまでの技術開発成果に基づき、これらの技術の高度化を進める。

回収工程の具体化に際しては、上記の二つの概念における回収可能性の維持期間における状態 (坑道開放状態)を仮定し、検討に必要な処分施設の条件については NUMO が取りまとめた包 括的技術報告書(原子力発電環境整備機構, 2021)を参考にすることとし、不確定要因について は、他の類似事例(一般的な土木工事や他の産業分野の知見など)を参照するとともに、回収作 業実施までのシナリオによって変化する条件や地層処分事業の進展に伴い具体化される情報など は変数や定数として扱い、成果の汎用性や一般化ならびに参照情報の根拠の提示(追跡性)に留 意して検討成果を整理する。

回収工程に係る上記の整理の後に、ボトルネックとなる作業の分析・抽出を行い、作業時間の 短縮目標時間を高度化開発の成果目標として設定し、目標達成に向けた今後の技術開発計画を策 定する。

次節以降に、二つの処分概念毎に本年度の検討の成果を整理する。

2 - 1

#### 2.3 処分孔竪置き方式の回収技術の高度化

#### 2.3.1 回収技術の整備状況

処分孔竪置き・ブロック方式における回収では、オーバーパック周囲の緩衝材の拘束力を解く 必要があり、オーバーパックを破損させる恐れが低い流体的方法による除去技術の整備が進めら れてきた。流体的方法は、土質系材料の除去対象物である緩衝材に流体を作用させて取り除くも のであり、除去された緩衝材はスラリー化(スラッジ含む場合もあり)して、除去部位から取り 除かれる。過年度の研究では、電解質溶液によるベントナイトを含む緩衝材の崩壊効果を利用し た低圧塩水による緩衝材の除去技術の整備が段階的に進められ、緩衝材除去システムの開発・整 備を経て、総合動作試験が実施されている(原子力環境整備促進・資金管理センター,2015)。開 発された緩衝材除去システムは、以下の設備を有しており、これらを遠隔から監視・操作する遠 隔操作設備で構成されている。システムの主な仕様を図 2.3-1 に示す。

内容	緩衝材除去装置 仕様	
噴射圧/噴射流量	0.6 MPa/7.8 L/min ×32 噴射口	
吸引流量	250 L/min	
噴射部径/降下速度	1,430 mm⁄3.6 m/min	
移動速度/速度	キャタピラ駆動/1 km/hour	
オーバーパック	オーバーパック知告継能の状態	
転倒防止措置	スーパーパック た付機能の 搭載	
遠隔操作方法	無線によるリモートコントロール	
除去状況監視方法	Web カメラ、3D スキャナ	

図 2.3-1 緩衝材除去システム (噴射・吸引設備)の仕様

各設備を統合した総合動作確認試験では、模擬坑道に掘削した処分孔内に転圧方式で作製した 緩衝材を配置し、オーバーパックとの隙間をペレットで充填して定置済み廃棄体の環境を再現(模 擬)した。上部緩衝材を500mm残した状態から開始した試験では、30時間でオーバーパック上 部の把持部に到達し(露出し)、把持部の露出後から47時間でオーバーパックを拘束する周囲の 緩衝材との縁切りが完了した。即ち、上部緩衝材を500mm残した状態から流体的除去方法によ って緩衝材を除去した場合、オーバーパックの引き上げが可能となるまで77時間を要すること が確認されている(図 2.3-2)。(原子力環境整備促進・資金管理センター, 2015)。



図 2.3-2 平成 26 年度地層処分回収技術高度化開発における実証試験の実績

#### 2.3.2 目標設定のための回収工程の分析

#### (1) 本検討における処分場の地下施設の設定

NUMO が取りまとめた包括的技術報告書(原子力発電環境整備機構,2021)を参考に、地下深度 500m、新第三紀堆積岩類を対象母岩とした処分孔竪置き・ブロック方式(パネル型)のレイ アウトを参照対象とした。回収可能性の維持期間中はオーバーパックが定置され、処分坑道が埋め戻され、両端に力学プラグが設置された状態で維持されることとして、その状態から全量を回 収することを前提として、処分区画一つあたりの回収に要する時間を算出する。

包括的技術報告書の付属書 4-61「作業動線と換気経路の検討」の考え方を踏襲して本検討の条件とした場合、回収したオーバーパックはアクセス斜坑から搬出するため、本検討ではアクセス斜坑側の連絡坑道は主にオーバーパックの搬出経路として利用することを想定した。埋戻し材の搬出経路はオーバーパックの搬出経路と重複することを避け、アクセス斜坑と反対側の連絡坑道から立坑へ搬出するような動線を仮定した場合、処分坑道の再掘削はアクセス斜坑側の連絡坑道に向かって行うことが合理的であると考えた。回収に要する時間算定のための地下施設の延長等に係る諸元と処分坑道の断面諸元を図 2.3-3 および表 2.3-1 に示す。処分坑道の断面積は 16.5m<sup>2</sup>であり、処分坑道1本当たりに 131 の処分孔 (6.66m 間隔) が配置される。



図 2.3-3 分析対象とした竪置き方式・ブロック方式 (パネル型)のレイアウト

No.	該当箇所	延長 (m)
1	立坑延長	500
2	処分坑道再掘削延長	880
3	処分坑道片押延長	920
4	処分坑道と主要坑道交差点からプラグまでの延長	40
5	主要坑道移動延長	710
6	連絡坑道移動延長	300

表 2.3-1 地下施設の延長等に係る諸元

#### (2) 回収作業の設定

処分孔堅置き方式の回収に必要な作業手順を図 2.3・4 に示す。主たる作業は「処分坑道の再掘 削」と「廃棄体の回収」の2つに分けられる。それぞれの作業には専用の建設機械や装置が必要 となり交互に作業する場合は、その都度設備の入替作業が生じる。安全性や作業性を考慮すると 限られた空間である地下施設内での設備の入替は極力少なくすることが望ましい。そこで、本検 討では「処分坑道の再掘削」と「廃棄体の回収」を処分区画ごとに並行して作業することとした。 想定した各処分区間のタイムラインを図 2.3・5 に示す。このような前提のもと、例えば「処分坑 道の再掘削」に要する時間と「廃棄体の回収」に要する時間に大きな差があれば、より時間を要 する作業がボトルネックとなり、滞りなくオーバーパックを回収するためにはボトルネック作業 を他の作業に要する時間と同程度にする必要がある。それぞれの作業時間を分析し、ボトルネッ クとなる作業を分析・抽出することで、それを解消するための目標作業時間を設定することが可 能となる。



図 2.3-4 処分孔竪置き方式の回収作業手順

処分区画	タイムライン				
連絡坑道 主要坑道	オーバーパック、埋戻し材、緩衝材の搬出・換気・排水				
区 画 ①	処分坑道再掘削	廃棄体の回収			
区画2		処分坑道再掘削	廃棄体の回収		
区画3			処分坑道再掘削	廃棄体の回収	
:					•••••

図 2.3-5 各処分区画のタイムライン(処分孔竪置き方式)

#### (3) 各工程の作業時間とボトルネック抽出のための分析

処分孔竪置き方式の回収に必要な各作業(図 2.3-4)の作業時間を算定する。作業時間の算定 には一般的な土木工事の積算事例を参考にし、緩衝材の除去については過年度の実証試験(原子 力環境整備促進・資金管理センター, 2015)の実績から算定した。また、再掘削した埋戻し材や 撤去したプラグは立坑まで運搬して地上へ搬出するが、運搬・搬出時間が各作業時間より長くな らないことを確認した。具体的には、各作業の施工能力(単位時間当たりの作業量)が運搬、搬 出能力(単位時間当たりの運搬、搬出量)を超えていないことを確認した。運搬には10tダンプ (地下施設内は時速15kmで移動するとした)を用いることとし、立坑の搬出能力については立 坑設備仕様および設備能力の一例として既往の施工および設計事例(例えば、日本原子力研究開 発機構 東濃地化学センター 施設建設課,2012)を参考に算定した。表 2.3-2 に算定した立坑か らの埋め戻し材搬出能力を示す。

項目	数量/歩掛	備考				
		キブル容量 : 6.0m <sup>3</sup> (実容量 5.4m <sup>3</sup> )				
ナブリ 1 ムット りの 建い 味明	126公	シャフトマッカー0.4 m <sup>3</sup> による積込能力:				
キノルエロヨたりの損込时间	12.0 万	7 分/3.0m <sup>3</sup>				
		⇒ (7×5.4)/3 = 12.6 分/5.4 m³				
		立坑深度 500 m、キブル平均速度 160 m/min				
キブル1台当たりの運搬時間(往復)	6.3分	(キブルの平均速度は、原則、地上排出を考慮				
		し、仕様(200m/min)の 80%とした。)				
キブル1台当たりの埋戻し材搬出時間	18.9分	積込時間+運搬時間				
運搬(地下→地上)施工能力	17.1 m <sup>3</sup> /時間	5.4 m³/(18.9 /60)時間=17.1 m³/時間				

表 2.3-2 立坑からの埋め戻し材搬出能力



図 2.3-6 施工要領図(立坑からの埋め戻し材搬出)

#### 1) 処分坑道再掘削の作業時間

#### ① プラグ撤去の作業時間

NUMO が取りまとめた包括的技術報告書(原子力発電環境整備機構,2021)を参考に、プラグの厚みを2.5m、撤去範囲を処分坑道と同程度の断面積16.5m<sup>2</sup>と仮定すると、撤去されるプラグの体積は41.3m<sup>3</sup>となる。プラグ撤去の施工能力は土木工事積算基準令和2年度版(東日本高速 道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社,2020)のコンクリート構造物取壊し工に記載されている、鉄筋構造物を機械施工で11m<sup>3</sup>あたり実働時間(準備・跡片付け
を含む)8時間を以下に示す単位時間あたりの施工能力に直して(11 m<sup>3</sup>/日 = 11m<sup>3</sup>/8h = 1.375 m<sup>3</sup>/h)計算した。

これより、プラグ1式あたりの撤去に要する作業時間は30時間となる(表 2.3-3)。

項目	数量/歩掛	備考	
		処分坑道断面積 16.5m <sup>2</sup> ×2.5m×1 体、RC	
プラグ撤去体積	41.3m <sup>3</sup>	処分坑道断面積…吹付コンクリート、路盤コンクリート	
		に囲まれた範囲の面積	
樹土 施工能力	11m³/日→	「土木工事積算基準 令和2年度版」を参考に設定	
服云 爬上能力	1.375m <sup>3</sup> /時間	大型ブレーカ 600kg 級、0.45m <sup>3</sup> BH	
		10 t ダンプトラック 積載量 4 m <sup>3</sup> /台	
		(積算制限 10 t ÷密度 2.4 t /m <sup>3</sup> )	
		<1 台あたりの所要時間>	
		積込時間:10 分と設定(0.45m <sup>3</sup> BH)	
運搬能力(地下施設内)	6.1 m³/時間	運搬時間(往復):	
		平均運搬距離 2.0km÷15km/時間 = 8 分	
		荷降時間:10 分と設定(0.45m <sup>3</sup> BH)	
		∴28 分で4 m³を運搬→8.6 m³/時間	
		体積変化率 1.4 を考慮→6.1 m³/時間	
搬出能力(地下→地上)	17.1 m³/時間	立坑での搬出	
施工能力く運搬・搬出能力から、施工能力より作業時間を算出			
作業時間(プラグ1式あたり)	30 時間	41.3 m <sup>3</sup> ÷1.375 m <sup>3</sup> /時間=30.0 時間	

表 2.3-3 プラグ1式あたりの解体・撤去の所要時間内訳

# ② 処分坑道の埋め戻し材除去の作業時間

埋め戻し材として除去する体積は、処分坑道断面積 16.5m<sup>2</sup>×区間長 880 m (表 2.3·1) より、 処分坑道 1 本で 14,520 m<sup>3</sup>となる。処分坑道の埋め戻し材の除去能力は、土木工事積算基準令和 2 年度版(東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社,2020) のトンネル工(機械掘削方式)のサイクルタイムの考え方を参考に、想定する処分場での除去能 力を 4.04 m<sup>3</sup>/h と設定した。

これより、処分坑道1本当たりの埋め戻し材除去時間は3,594時間となる(表 2.3-4)。

項目	数量/歩掛	備考
埋め戻し材 除去体積	14,520 m <sup>3</sup>	処分坑道断面積 16.5 m <sup>2</sup> ×880 m
		「土木工事積算基準 令和2年度版」を参考に設定
除去 施工能力	4.04 m <sup>3</sup> /時間	サイクルタイム 4.04 時間/16.5m <sup>3</sup> より
		(掘削準備、掘削、その他を含む)
		10 t ダンプトラック 積載量 5 m <sup>3</sup> /台
		(積算制限 10 t ÷密度 2 t /m <sup>3</sup> )
		<1 台あたりの所要時間>
		積込時間:10 分と設定(0.45m <sup>3</sup> BH)
運搬能力(地下施設内)	7.6 m <sup>3</sup> /時間	運搬時間(往復):
		平均運搬距離 2.0km÷15km/時間 = 8 分
		荷降時間:10 分と設定(0.45m <sup>3</sup> BH)
		∴28 分で 5 m³を運搬→10.7 m³/時間
		体積変化率 1.4 を考慮→7.6 m³/時間
搬出能力(地下→地上)	17.1 m <sup>3</sup> /時間	立坑での運搬
施工能力	) <運搬・搬出能力	から、施工能力より作業時間を算出
作業時間	2 504 時間	14 520 m <sup>3</sup> :4 04 m <sup>3</sup> /時間
(処分坑道1体あたり)	つ,094 吋回	14,520 111 〒4.04 111 / 时间

表 2.3-4 処分坑道1本あたりの埋め戻し材除去の所要時間内訳

処分坑道1本当たりの再掘削に要する作業時間は、プラグ(2式)の解体・撤去と埋め戻し材 除去に要する時間を合わせて3654時間となる。

# 2) オーバーパック回収の作業時間

NUMO が取りまとめた包括的技術報告書(原子力発電環境整備機構, 2021)を参考に、試算に 用いた平面形状寸法、断面形状寸法を図 2.3-7 に示す。処分孔は路盤から 1.22m までの範囲を埋 戻し部とし、それ以深を緩衝材とした。



図 2.3-7 回収時間の試算に用いた平面・断面形状寸法

## ① 処分孔埋戻し材除去の作業時間

切削重機(本業務で機械概念提示)と運搬機械(設備)の使用による、処分孔の埋め戻し材除 去工程の所要時間を表 2.3-5 に示す。切削重機による処分孔埋め戻し材の除去能力はオーガによ るベントナイト混合土の地上での掘削予備試験(原子力環境整備促進・資金管理センター, 2019) の結果(0.012m<sup>3</sup>/min)を用いた。これより、処分孔1本当たりの埋め戻し材の除去時間は 6.0 時 間となる。

表 2.3-5 処分孔1本あたりの埋め戻し材除去の所要時間内訳

項目	数量/歩掛	備考
埋め戻し材 除去体積	4.645 m <sup>3</sup>	Φ2.22 m×1.2 m=4.645 m <sup>3</sup>
除去 施工能力	0.72 m <sup>3</sup> /時間	0.012m3/分(地上での予備試験結果)
		10 t ダンプトラック 積載量 5 m <sup>3</sup> /台
		(積算制限 10 t ÷密度 2 t /m <sup>3</sup> )
		<1 台あたりの所要時間>
		積込時間:10 分と設定(0.45m <sup>3</sup> BH)
運搬能力(地下施設内)	7.6 m <sup>3</sup> /時間	運搬時間(往復):
		平均運搬距離 2.0km÷15km/時間 = 8 分
		荷降時間:10 分と設定(0.45m <sup>3</sup> BH)
		∴28 分で 5 m³を運搬→10.7 m³/時間
		体積変化率 1.4 を考慮→7.6 m³/時間
搬出能力(地下→地上)	17.1 m³/時間	立坑での運搬
施工能力	く運搬・搬出能力な	から、施工能力より作業時間を算出
作業時間	60時間	4.5 m <sup>3</sup> :0.72 m <sup>3</sup> /時間-6.0 時間
(処分坑道1体あたり)	0.0 时间	4.5 111 〒0.72 111 / 吋回-0.0 吋回

#### ② 緩衝材の除去の作業時間

緩衝材除去システム(図 2.3-1)の実証試験で、オーバーパックを引抜き可能な状態にするまでに要した時間は 77 時間、除去した緩衝材の体積は 4.521 m<sup>3</sup>であった(図 2.3-8)。除去した緩 衝材の搬出は、緩衝材の除去作業時に塩水による崩壊効果で吸引による排出、運搬が可能なレベルにまでスラリー化できたことから、ここでは緩衝材除去と搬出を同時に作業できるものとして 作業時間には考慮しない。



図 2.3-8 実証試験による緩衝材の除去形状と除去体積 (原子力環境整備促進・資金管理センター(2015)に一部加筆)

# ③ オーバーパックの引き抜き、運搬時間

オーバーパックの引き抜き、主要坑道までの運搬は、緩衝材の除去作業と交互に行われること とした。そのため、各作業で装置や設備の入替が生じる。ここでは、処分坑道内での各作業に影 響する主要坑道までの運搬時間を検討する。オーバーパックの引抜は専用の装置が使用されるこ とが想定されるが、現状では具体化されていない。そこで、緩衝材除去システムを流用した場合、 塩水噴射部の昇降機能の仕様(3.6 m/min)を参考にすると数分でオーバーパックを引き抜くこ とができる。その後、専用の搬出装置に積込み主要坑道まで時速1 km で運搬した場合、処分坑 道の延長は約 900 m であるため、引抜きから主要坑道までの運搬に要する時間を1時間とした。

オーバーパック1体当たり主要坑道まで回収するのに要する作業時間は、処分孔の埋戻し材 除去、緩衝材の除去、オーバーパック引き抜き、運搬に要する合計84時間となった。

#### 3) ボトルネックの抽出と目標時間の設定

オーバーパックの回収を、「処分坑道の再掘削」区画と、「処分孔の緩衝材除去・オーバーパック回収」区画に分離して、回収作業の所要時間を見積った結果を以下に整理する。処分区画ごとに並行して作業するためには、それぞれ同程度の作業時間にする必要がある。比較するためにオーバーパック1本あたりの作業時間に直すとオーバーパック回収に要する時間の方が56時間長い。特に緩衝材除去に要する時間が大半を占めておりこの作業がボトルネックになっている。そこで、ボトルネックを解消するために緩衝材除去作業の迅速化における目標時間として20時間を設定した。



図 2.3-9 処分孔縦置き方式のボトルネック抽出と目標時間

#### 2.3.3 回収技術高度化の方針

緩衝材の除去は、電解質溶液による緩衝材の崩壊効果を利用した方法とウォータージェット噴 射を用いた高圧切削による方法が挙げられる。ウォータージェットを用いたベントナイト混合土 の除去は、地下実証試験で0.36 m<sup>3</sup>を約80分で除去(0.27 m<sup>3</sup>/時間)した実績があり(原子力環 境整備促進・資金管理センター,2020)、この方法を導入することで緩衝材除去の迅速化が期待で きる。ただし、地下実証試験は処分坑道横置き・PEM方式を対象とした試験であり、そのまま処 分孔竪置き方式の緩衝材の除去に適用するには不確実性がある。特に、処分孔竪置き方式の場合 には、ウォータージェットで鉛直下部方向に切削した緩衝材を処分孔から迅速に除去(回収)す る必要がある。

そこで、既往の成果を活用し「ウォータージェット噴射を用いた高圧切削」と「電解質溶液に よる緩衝材の崩壊効果を利用した切削土の回収」を組み合わせる方法を検討する。具体的には、 緩衝材除去システムをベースとして、地下実証試験で使用したトルネードノズルによるウォータ ージェット噴射機能を噴射・吸引設備に追加し、システム全体を高圧仕様へと改良する。そのよ うな改良における検討課題として、以下が挙げられる。

①噴射部降下のために切削幅の確保が必要となる

- ②高圧噴射で生成される切削土の生成速度がスラリー化する速度より早く、切削土が孔内に 滞留する可能性がある
- ③除去速度が速く、吸引したスラリーが高濃度となり塩水リユース設備の固液分離能力(固 体成分の沈降速度)が不足する可能性がある

これらの課題を解決すべく、次年度に実施すべき要素試験として、「噴射試験」、「沈降試験」に ついて検討した。緩衝材除去の迅速化に向けた課題と方針を図 2.3-10 にまとめた。



図 2.3-10 緩衝材除去の迅速化に向けた課題と方針

また、緩衝材除去という工程を迅速化する方策として、オーバーパックの引き抜きによる回収 方法を検討した(図 2.3-11)。これは、側部緩衝材の除去をせずにオーバーパックを引き抜く方 策であり、側部緩衝材の除去に要する時間を短縮できれば大幅な迅速化が見込めるが、引き抜き には大きな引抜力が必要となるため、地下の狭隘空間で稼働できる装置への装填には、技術的な 課題が想定される。このような装置に必要となる能力を把握するために、この引抜力を見積もる 必要があることから、次年度に実施すべき要素試験として「引抜試験」を検討した。



図 2.3-11 緩衝材除去を省略したオーバーパックの引き抜きによる回収方法

# 2.3.4 流体的除去技術の高度化のための試験計画

## (1) ウォータージェット噴射を用いた高圧切削の検討

ウォータージェット噴射を用いた高圧切削における噴射水の切削能力を決定する要素として、 噴射圧力と噴射する水の性質ならびにノズルの形状が挙げられる。噴射圧力は周辺構造物に影響 を与えない圧として 20MPa (原子力環境整備促進・資金管理センター, 2016)、噴射水は切削土 をスラリー化させるために塩水、ノズルの形状は面的な切削が可能なトルネードノズルを選定し た。なお、ウォータージェット噴射を用いた高圧切削において淡水と塩水では切削効率に大きな 差が無いことを確認している (図 2.3-12)。



図 2.3-12 淡水噴射と塩水噴射における切削能力の比較 (原子力環境整備促進・資金管理センター(2016)の成果より作成)

以上を試験の前提として、合理的に緩衝材が除去できる条件を把握することを目的とした噴射 試験を計画する。噴射試験に用いる装置の概念を図 2.3-13 に示す。噴射試験は、トルネードノズ ルを用いて供試体にウォータージェットを噴射する試験である。圧力 20MPa で 2 分程度、流量 30L/min で噴射を維持できる高圧ポンプを準備し、耐圧ホースを用いてトルネードノズルを取り 付けたランス・ガンに接続する。ランス・ガンは一定方向、一定速度で水平移動が可能なガイド に固定する。水槽は、供試体を並べる内水槽と、内水槽から溢れるスラリーを貯留する外水槽に 分かれる。内水槽は供試体上に一定の水深を保てる構造とし、外水槽は水深が内水槽の水深より も常に低くなるような、十分な容積を持ったものを選択する。

試験はノズルと供試体の離隔距離、噴射面積、噴射流量をパラメータとして、除去量、切削土 の形状、スラリーの濃度をデータとして取得する。



試験の基本的な手順として以下を想定する(試験の進展に応じて条件等を変更する場合があり 得る)。

- ① 試験条件に合う噴射面積、噴射流量を得られるノズルをランス・ガンの先端に取り付ける
- ② 試験条件に合わせてノズルと供試体の離隔距離を調整する
- ③ 高圧ポンプからランス・ガンまで圧力を供給する
- ④ ランス・ガンのトリガーを開放すると同時に、0.6m/minの速度でランス・ガンを水平移動 させる
- 5 ウォータージェットが供試体を切削する
- ⑥ ウォータージェットが供試体を横断したら、ランス・ガンのトリガーを閉じ水平移動を停止する
- ⑦ 高圧ポンプを止め、高圧ポンプーランス・ガン間の圧力を開放する
- ⑧ 除去量を 3D スキャナで計測する。点群から除去幅や除去体積を算定する
- ⑨ 切削土の形状を目視で確認し、必要に応じてサイズを記録する
- ① スラリーの粘度を、粘度計を用いて計測する
- 12 切削土の形状が大きな塊状となる場合には、さらにウォータージェットを噴射して十分に 小さなサイズまで解砕できるかを確認する
- ③ 供試体、スラリーを排除し、次の試験ケースへと移る

手順中の⑫における十分に小さなサイズとは、緩衝材除去システムの吸引ノズルで詰まりなく 吸引が可能なサイズとする。コンクリート標準示方書(土木学会,2018)では、コンクリート打 設の際の型枠内の充填性を考慮して、粗骨材の最大寸法を部材最小寸法の1/4(無筋コンクリー ト)を超えないこととしている。これを参考として、詰まりなく吸引が可能となる粒径を吸引ノ ズル径(12.7mm)の1/4と仮定し、切削土のサイズが3.2mm以下を目安として目視で確認する。

なお、ウォータージェット噴射装置のうち「ガン」とは、先端にノズルを取り付けてスイッチ とレバーによって手持ちで噴射を制御する装置を指し、「ランス」とは先端にノズルを取り付けて 遠距離や狭隘部への噴射を可能とするアタッチメントを指す。「ガイド」は、これらランス・ガン を一定軌道かつ一定速度で動かすための治具を示す。

供試体は以下の手順で作成する(図 2.3-15 参照)。

- ① ベントナイトと珪砂を 7:3 で混錬する
- ② 混練材料をプレス機に投入し、20cm四方、乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>となるように載荷してブロックを作成する
- ③ ブロックを 25 個作成し、内水槽内に隙間なく敷き詰めて 100cm×100cm×20cm の供試体 とする
- ④ ベントナイトブロック間の隙間は可能な限り密着させる。必要に応じてベントナイトスラ リーを塗布して接着するなどの方法も検討する。作成したブロックを用いて予備試験を実施し、供試体の整備手順としての適切性を予め確認するものとする

試験ケースは、図 2.3-14 に示すように、①ノズルと供試体の離隔距離、②噴射面積、③噴射流 量、の3つのパラメータに水深\*を加える。



※水深

できるだけ浅いことを前提とするが、水深10cm程度までの影響を把握しておく ※移動速度

緩衝材除去装置仕様の揺動速度0.59m/minを標準とする

図 2.3-14 噴射試験のパラメータ



図 2.3-15 噴射試験の供試体作成方法

# (2) 切削土の吸引、リユース設備の検討

緩衝材除去システムの実証試験では、緩衝材除去システムにおいて噴射する塩水の管理値(仕様)はSS濃度(浮遊物質 suspended solids濃度)で5,000 mg/L以下としていた。実際の実証 試験では、固液分離設備による処理後の塩水のSS濃度の計測値は平均298 mg/Lであり、十分 に仕様を下回っていた(原子力環境整備促進・資金管理センター,2015)。トルネードノズルを使 用することにより除去速度が速くなった場合、リユース系全体の流量が変わらなければ、固液分 離前のスラリーのSS濃度が上昇することは必然である。よって、固液分離設備の能力について 実験的検討を進め、必要に応じて装置の改良や装置への機能追加が必要となるため、まずは、沈 降試験による固液分離速度等の検証を実施する。

#### 1) 室内沈降試験

室内での沈降試験の概念図を図 2.3-16 に示す。沈降試験は過去の検討において様々な条件で なされているが、いずれも沈降量に着目しており、一次元的な沈降速度に着目した試験はなかっ た。そこで、本試験ではメスシリンダーの高さ方向を延長し、一次元的な沈降挙動を明確にした 形での試験を計画する。

液固比を変えた複数のスラリーを、高さ 150 cm 以上あるメスシリンダー内に投入し、沈降距

離を定時観測する。沈降距離は、透明度が変わる境界部分から水面までの距離とする。定時観測には定点カメラ等を利用し、できるだけ細かい時間刻みで記録する。



図 2.3-16 沈降試験の概念図

沈降試験の結果は固液分離機能の能力増強方法の検討に活用する。化学的な能力増強方法として、塩分濃度の調整、電解質の変更、凝集剤の添加などが挙げられるが、それぞれについて沈降 試験を実施して効果を確認する。

#### 2) 実規模沈降試験

実規模沈降試験の概念図を図 2.3-17 に示す。実規模試験は緩衝材除去システムのうち、塩水 リユース設備を模擬した機材により実施する。シックナー投入前後の水槽内で水質(pH、塩分濃 度)とスラリーの SS 濃度を計測し、シックナーの固液分離能力を確認する。

試験に使用するスラリー溶液は、スラリー生成槽で生成する。スラリー生成槽に塩水とベント ナイト混合土を一定量投入し、よく混ぜてスラリー供給槽へと圧送する。生成するスラリーの濃 度は時間とともに徐々に上昇させることとし、シックナーの固液分離能力の限界を確認する。

試験ケースは、以下の2ケース程度を実施する計画とするが、沈降試験からシックナー増設が 効果的な能力増強案であることが示唆された場合、シックナー2台以上による並列運転の実規模 試験も計画する。

- ・塩水4%を使用した基本ケース
- ・沈降試験によって導き出された最適な固液分離能力増強の対策(例えばシックナーの容量増加)を施したケース



図 2.3-17 実規模沈降試験の概念図

# (3) 緩衝材除去システムの改良

次年度の要素試験(ウォータージェット噴射試験)の結果を踏まえ、緩衝材除去装置の噴射リング(図 2.3-18)の改良に取り組む。



図 2.3-18 緩衝材除去装置の噴射吸引設備の噴射リング

### 2.3.5 オーバーパック引き抜き方法の検討

過年度に開発し実証試験に供した緩衝材除去システムは、オーバーパック転倒を防止するため の把持機能を有するものの、オーバーパックを把持したまま処分孔から処分坑道まで引き抜く機 能は有していない。よって、オーバーパックを回収するためには、緩衝材を除去した後に、オー バーパックを把持して処分坑道まで引き抜き、処分坑道内を移動して主要坑道まで運ぶ役割を担 う装置が必要となる。

オーバーパックの引き抜きによる迅速化方策とは、ここでは側部緩衝材の除去工程を省略して (完全な縁切りをせずに)引き抜く方策であり、オーバーパックの自重以上の"引抜力"を必要 とする方策である。側部緩衝材の除去に要する時間を省くことで、迅速化に大きく寄与すること が期待できるが、必要となる引抜力はオーバーパックの自重に比べて大きな値となることが推測 され、狭隘空間で稼働する装置への実装には困難も想定される。

側部緩衝材の縁切りをせずに、オーバーパックに引抜荷重を作用させた場合に起こりうる事象 を「引抜モード」として検討した場合、次の4つの引抜モード(図 2.3-19)が考えられる。

- ・オーバーパックー緩衝材間が滑る
- ・緩衝材が破壊される
- ・オーバーパックが破損する
- ・緩衝材ー岩盤間が滑る
- 各々の引抜モードについて、以降に解説する。

オーバーパックー緩衝材間が滑る

オーバーパックと緩衝材間の摩擦力が引抜力以下となったときに生じるモード。本モードに影響を与える要素は、オーバーパック – 緩衝材間の摩擦係数と、膨張圧等によって生じる垂直抗力 である。

#### 緩衝材が破壊される

緩衝材のせん断耐力が引抜力以下となったときに生じるモード。本モードに影響を与える要素 は、緩衝材のせん断強度(粘着力、摩擦係数)と側圧である。

#### <u>オーバーパックが破損する</u>

オーバーパックは、オーバーパック自身の自重に耐えうる設計としているが、それ以上の荷重 に対する耐力は定かではない。オーバーパックの弱部と考えられる把持部あるいは溶接部は引抜 力の作用に対して破損の可能性があるが、ここでは検討の対象外とする。

#### 緩衝材-岩盤間が滑る

緩衝材と岩盤間の摩擦力が引抜力以下となったときに生じるモード。オーバーパックの周面積 と岩盤の周面積では 2.7 倍程度の差があり、且つ引抜力には緩衝材の自重が加わるため、緩衝材 と岩盤間が摩擦で滑るより先に、前述した引抜モードが発生する可能性が高いことから、本モー ドは検討の対象外とする。

オーバーパックと緩衝材間の摩擦係数、緩衝材のせん断強度は、緩衝材の状態により変化する と考えられ、「オーバーパック-緩衝材間が滑る」モードと「緩衝材が破壊されるモード」のどち らが優先的に起こり得るかは現時点では予見できない。



図 2.3-19 引抜モードの考え方

引抜試験では、緩衝材側に抑え荷重を加えることを計画する。この試験で引抜モードを特定す ることはできないが、オーバーパック引抜装置に必要な引抜力を設計するという目的に対しては、 引抜力の値が試験の結果として計測することができる。



図 2.3-20 引抜試験によって計測される引抜力の考え方

引抜試験の概念図を図 2.3-21 に示す。引抜試験は引抜モードを特定するものではなく、引抜力 を計測するものである。よって、供試体の状態によって引抜モードが変わり、計測結果の傾向が 大きく変わる可能性も考えられる。よって、供試体の状態変化として最も顕著な飽和度の変化を パラメータとして試験を実施する。



図 2.3-21 引抜試験 概念図

# 2.4 処分坑道横置き・PEM 方式の回収技術の高度化

## 2.4.1 回収技術の整備状況

処分坑道横置き・PEM 方式の回収技術については、幌延深地層センター 地下 350m 試験坑道 2 において、PEM と坑壁間の隙間充填材に対する機械的除去技術と流体的除去技術を用いて地下 実証試験が行われた(原子力環境整備促進・資金管理センター, 2019; 2020)。

機械的除去技術の工法選定においては、

①除去作業に伴う潜在的な PEM 容器の損傷リスクの低減

②狭隘な作業空間での作業性の確保

を考慮し、地下の原位置での実証試験に適した手法としてオーガ方式を選定した。その理由として、上記①については坑道長手方向のみの切削動作のため PEM と接触するリスクを低減できること、②については除去対象物の切削~切削土の撤去までの一連の動作を1台の除去装置で連続的に実施できる機構を有し、狭隘な作業空間での作業性向上が見込まれることである。一方、流体的除去技術には淡水ウォータージェットを選定した。

オーガ方式による機械的除去技術については、地下施設の環境下における隙間充填材除去の実

証を達成したものの、隙間充填材の含水比の上昇に伴う粘性等の性状の変化や穿孔方法の違い等 により、地上での予備試験で確認していた達成可能な除去効率よりも時間当たりの除去量は減少 した。一方、淡水ウォータージェット方式による流体的除去技術については、地下特有の設備性 能やスペース確保などの制約を除けば、地下でも地上と同等の除去能力の発揮が可能であること を実証した。これらの結果から、機械的除去技術については更なる改善の余地があることが示唆 された。

#### 2.4.2 目標設定のための回収工程の分析

## (1) 想定する処分場の設定

NUMO が取りまとめた包括的技術報告書(原子力発電環境整備機構, 2021)を参考に、地下深度 500m、新第三紀堆積岩類を対象母岩とした処分坑道横置き・PEM 方式のレイアウトを分析対象とした。地下施設のレイアウトは、1本の連絡坑道に直交して、端部が行き止まりの処分坑道が平行に配置される「デッドエンド型」であり、アクセス斜坑1本、立坑5本、連絡坑道2本、処分区画6区画、1区画あたりの処分坑道は32本、坑道断面積は16.5m<sup>2</sup>とし、処分坑道1本当たり209体のPEM が定置されると想定した。廃棄体と埋戻し材(或いは隙間充填材)の搬出については、処分孔竪置き方式と同様にアクセス斜坑側からPEM を搬出することを想定し、埋戻し材はアクセス斜坑と反対側の立坑から搬出することとした。

回収作業は、処分坑道が埋め戻され、力学プラグが設置された状態から開始し、PEM を全量回 収する際の、処分区画一つあたりの回収に要する時間を算定する。回収における所要時間算定の ための地下施設の延長等に係る諸元と処分坑道の断面諸元を図 2.4-1、表 2.4-1 に示す。



アクセス斜坑へ (PEMの搬出)



No.	該当箇所	延長 (m)
1	立坑延長	500
2	連絡坑道(左)の延長	2,300
3	連絡坑道(右)の延長	3,100
4	処分坑道延長	720
5	区画延長	670

表 2.4-1 地下施設の延長等に係る諸元

## (2) 回収工程の設定

処分坑道横置き・PEM 方式の回収に必要な作業手順を図 2.4・2 に示す。ここで、隙間充填材の 除去には「PEM を拘束している隙間充填材との縁切り」と「PEM の回収装置が必要とする動作 環境の構築」の2つの目的がある。後者の作業量については、回収装置の仕様に基づく除去の達 成条件に依存するため現時点では決まっていないが、本検討が今後決定される条件に柔軟に対応 できるよう、隙間充填材の除去については「完全に除去」することを前提とした。そのため、隙 間充填材除去の工程については、「PEM を拘束している隙間充填材との縁切り」を目的とした広 範囲を効率よく除去する工程と、「PEM の回収装置が必要とする動作環境の構築」を目的とした 狭隘部を含む PEM 周囲を完全に除去する二つの工程を組み合わせることとした。



図 2.4-2 処分坑道横置き・PEM 方式の回収作業手順

作業手順としては、「PEM1体分の充填材の除去 → PEM1体の回収」という手順を繰り返す ことで順次回収作業を進めることが想定されるが、その場合、除去装置と回収装置の入れ替えに 伴う時間的なロスが顕著となるため、処分坑道1本分の隙間充填材の除去を連続して実施できれ ば施工効率が改善されることは明らかであることから、まずは、この両者の手順の差による所要 時間の差の定量化を試みる。

除去装置の移動距離については、PEM 周辺の充填材を除去作業に限っては両者に差がないが、 作業対象となる PEM の手前までセットするための移動距離と、PEM 周辺の除去を終えてから 撤収するための移動距離に差が生じる。装置の入れ替えはプラグ部周辺まで戻れば実施可能と仮 定して、これらの差を具体化する。本試行では、処分坑道に 209 本の PEM が隙間なく定置され ており、1 番目の PEM はプラグから 20m の位置にあるとし、任意の n 番目の PEM についての 移動距離を求め、その 209 体分の総和として求めた。なお、回収装置の移動距離については、い ずれの手順でも移動距離は同じであるため省略する。表 2.4・2 に示す算出結果によると、1 体ず つの施工手順では、処分坑道 1 本あたりで 155km 以上入替えのためだけの移動となることが示 された。仮に除去装置の移動速度を回収装置と同程度の 1km/時とすれば、処分坑道 1 本だけで 155 時間以上のロスとなる。これに対し、処分坑道 1 本分を連続して施工できれば 1 時間程度の ロスとなり大幅に短縮できる。さらに、処分坑道 1 本単位で施工内容を変えられるため、並行作 業が可能となる。

移動距離の 種類	隙間充填材除去と交互に回収する場合 [m]	坑道分一括回収 [m]
PEM 周辺 除去	$\sum_{n=1}^{209} (3.36) = 3.36 \times 209 = 702.24$	3.36×209 = 702.24
除去装置の セッティン グ	$\sum_{n=1}^{209} \left\{ 3.36(n-1) + 20 \right\} = \frac{3.36}{2} \times 209 \times 210 + 16.64 \times 209$ $= 77,212.96$	<b>20</b> (最初の位置だけ)
除去装置の 退避	$\sum_{n=1}^{209} (3.36n + 20) = \frac{3.36}{2} \times 209 \times 210 + 20 \times 209$ $= 77,915.2$	3.36×209+20=722.24 (最後の1回だけ)
合計	155,830.4	1,444.48
装置入替の	155,128.16	742.24
移動距離	(=155,830.4-702.24)	(=1,444.48-702.24)

表 2.4-2 処分坑道1本あたりの除去装置の移動距離

隙間充填材除去は「PEM を拘束している隙間充填材との縁切り」と「PEM の回収装置が必要 とする動作環境の構築」のそれぞれの目的に応じて除去装置を入れ替える必要があるため、処分 坑道毎に並行して作業する場合、図 2.4-3 に示すように作業を3分割することが合理的であると 考えられる。そこで、各作業時間を分析し、ボトルネックとなる作業を抽出することで、それを 解消するための目標作業時間を設定した。



図 2.4-3 各処分坑道のタイムライン(処分坑道横置き・PEM 方式)

## (3) 各工程の作業時間とボトルネック抽出のための分析

前述した処分場レイアウトと作業手順を対象に、処分坑道横置き・PEM 方式における回収作 業の所要時間を見積もった。なお、回収作業の見積もりに際しては、各々の作業で資機材やズリ 等の搬出入に用いる立坑が専有でき、物流が作業のボトルネックにならないこととした。ここで は、処分孔竪置き方式の検討と同様に、単位時間当たりの作業量で表される各作業の施工能力が 単位時間当たりに運搬、搬出が可能な量を超えていないことを確認した。運搬と立坑の搬出能力 (表 2.3-2)についても処分孔竪置き方式の検討と同条件とした。

## 1) プラグ撤去から隙間充填材除去までの作業時間

#### ① プラグ撤去と処分坑道の埋戻し除去時間

プラグ撤去と処分坑道の埋戻し除去は、前節と同様の施工能力を前提として計算した。図 2.4-4 に想定したプラグの厚みと処分坑道の埋戻し範囲を示す。プラグ1式あたりの撤去に要する作業 時間は処分孔竪置き方式と同様に 30 時間となる(既出の表 2.3-3 を参照)。プラグと最初の PEM の間には 20mの離隔があるものとし、この区間については PEM 周りの隙間充填材としてではな く、処分坑道の埋め戻し材として扱うこととした。処分坑道の埋戻し量は、330m<sup>3</sup>、これを除去 するのに要する作業時間は 82 時間となる(既出の表 2.3-4 を参照)。



#### ② 隙間充填材除去の作業時間

処分坑道の PEM を除いた断面積は 12.3m<sup>2</sup>であり、PEM 1 体の長さが 3.36m、処分坑道 1 本 に埋設する PEM が 209 体であることから、取り出すのに必要な充填材の体積はおよそ 8,640m<sup>3</sup> となる。地上での予備試験で得られた時間当たりの除去量 0.012m<sup>3</sup>/分(原子力環境整備促進・資 金管理センター, 2019)を適用すると、処分坑道 1 本の隙間充填材除去の所要時間は 12,000 時間 となる(表 2.4-4)。

項目	数量/歩掛	備考
隙間充填材 除去体積	8,640m <sup>3</sup>	PEM を除く処分坑道断面積 12.3m <sup>2</sup> ×3.36m×209 体
除去 施工能力	0.72 m <sup>3</sup> /時間	0.012m3/分(地上での予備試験結果)
		10 t ダンプトラック 積載量 5 m <sup>3</sup> /台
		(積算制限 10 t ÷密度 2 t /m <sup>3</sup> )
		<1 台あたりの所要時間>
		積込時間:10 分と設定(0.45m <sup>3</sup> BH)
運搬能力(地下施設内)	6.7 m³/時間	運搬時間(往復):
		平均運搬距離 3.0km÷15km/時間=12 分
		荷降時間:10 分と設定(0.45m <sup>3</sup> BH)
		∴32 分で 5 m³を運搬→9.4 m³/時間
		体積変化率 1.4 を考慮→6.7 m³/時間
運搬(地下→地上)施工能力	17.1 m <sup>3</sup> /時間	立坑での運搬
施工能力	く運搬・搬出能力な	から、施工能力より作業時間を算出
合計作業時間	12 000 時間	8 640 m <sup>3</sup> ÷0 72 m <sup>3</sup> /時間 – 12 000 時間
(処分坑道1本あたり)	12,000时间	0,040 111 〒0.72 111 / 时间 — 12,000 时间

表 2.4-4 隙間充填材の除去の所要時間内訳

なお、隙間充填材除去には「PEM を拘束している隙間充填材との縁切り」と「PEM の回収装 置が必要とする動作環境の構築」の2つを目的とした工程を仮定しており、前述した作業時間は 前者の「PEM を拘束している隙間充填材との縁切り」を想定したものである。「PEM の回収装 置が必要とする動作環境の構築」の作業時間については、回収装置の仕様(除去に関する条件) に依存するため現時点で推定できないため、ボトルネック抽出のための隙間充填材除去の作業時 間は 12,000 時間を代表値として取り扱う。

## 2) PEM の回収時間

導入される PEM の回収装置については現時点でその詳細は未定であるが、実機の走行速度と して時速 1.0km として検討を行う。処分坑道および連絡坑道はこの速度で運搬し、坑底施設で積 み替え後アクセス坑道から坑外へ運搬するものとし、ここでは主要坑道までの運搬時間を検討す る。また、想定する運搬距離については処分区画によって異なるため、区画 C (図 2.4-2)の運搬 距離を代表値とした。

これらの仮定を踏まえると、PEM 1 体あたりの地下施設内の回収時間は 5.0 時間となる(表 2.4-5)。これより処分坑道 1 本 (PEM 209 体) あたり 1,145 時間となる。

項目	数量/歩掛	備考
PEM 数量	209 体	
処分坑道内中央部から坑口までの往復距離	0.721/m	片道 360m と仮定
PEM 回収装置の処分坑道内の走行距離	0.72KIII	往復 720m
		区画 C(図 2.4-1)の中心部からの距離を
処分区画から坑底施設までの往復距離	2.0km	代表値とする
		片道 2,000m と仮定,往復 4,000m
PEM1 体当たりの回収能力	101/m/哇胆	定置回収装置の目標走行速度を参考
(処分坑道での回収+坑底施設への搬送)	1.0 KIII/吋间	OP 回収装置の走行速度と同等
地下施設内の回収時間(処分坑道⇔工程施設)	4.7 時間/体	4.720 km÷1.0 km/時間
PEM 積替え時間(回収装置⇒輸送用トラック)	0.3 時間/体	設定値
合計作業時間(PEM1体当たり)	5.0 時間/体	=4.7+0.3
合計作業時間(処分坑道1本あたり)	1,045 時間	=5.0 時間/体×209 体

表 2.4-5 PEM 回収の所要時間内訳

## 3) ボトルネックの抽出と目標時間の設定

図 2.4-3 に示すように処分坑道毎に「プラグ撤去から隙間充填材の除去」、「PEM の回収」を並 行して作業をするためには、それぞれ同程度の作業時間にする必要がある。同図には、それぞれ の作業時間をまとめて比較したものも示す。同図に示したとおり、PEM1体あたりの作業時間に して比較すると、回収に要する時間が5時間に対して、プラグ撤去から隙間充填材の除去に要す る時間は58時間となった。58時間のうち57.6時間が隙間充填材の除去に要する時間であるこ とから、この作業がボトルネックとなっている。そこで、ボトルネックを解消するために隙間充 填材除去作業迅速化の目標時間として5時間を設定した。ただし、この目標時間の達成は難易度 が高いため、処分孔竪置き方式で目標設定した緩衝材除去作業の目標時間25時間を第二の目標 時間として設定することとした。



図 2.4-5 処分坑道横置き・PEM 方式のボトルネック抽出と目標時間

#### 2.4.3 回収技術高度化の方針

隙間充填材除去は「PEM を拘束する充填材の縁切り」と「PEM の回収装置が必要とする動 作環境の構築」を目的とする2つに分けられる。前者については広範囲を効率的に、後者につ いてはPEM 周囲や狭隘部を除去しなければならない。これらの要求機能を踏まえると、前者に は「機械的除去」、後者には「流体的除去」が適していると考えられる。また、「PEM の回収装 置が必要とする動作環境の構築」は、除去の程度や範囲が回収装置に依存し現時点では決まって いないこと、「流体的除去」は処分孔縦置き方式の高度化の成果を応用することが可能であると 考えられることから、処分坑道横置き・PEM 方式の検討では PEM を拘束する充填材の縁切り を目的とした「機械的除去」の高度化を優先課題とする。

#### 2.4.4 機械的除去技術の高度化

過年度に実施した地下での実証試験を踏まえた、機械的除去技術の高度化に向けた課題の整理 結果を表 2.4-6 に示す。個々の課題に対する重み付けはできていないが、除去対象物の土質材料 のバリエーションや性状等の諸条件を把握したうえで、適用可能な除去技術を採用することと、 施工速度(効率)の改善のために指標を定めて定量的に評価することが課題設定におけるポイン トとなる。課題の整理において、改めて隙間充填材の除去技術に対する要求事項について整理す ると「PEM と隙間充填材とを縁切りし、PEM の拘束を解くこと」と、その後工程となる「PEM の回収作業において、回収装置の動作に必要な環境の実現」の2点に集約され、これらに加えて、 PEM の外殻容器に損傷等を与えないこと、連続的な除去作業が可能であることが、付加的な要 求事項となる。

表 2.4-6 に示した機械的除去技術の課題は、主に前者の PEM と充填材との縁切りに着目した ものであるが、後者の要求事項については、隙間充填材をどの程度まで除去すればよいかと言い 換えることができ、これは除去技術だけでなく後工程の回収装置・技術にも依存することとなる。 したがって、除去技術の高度化、除去時間の迅速化にあたっては、後工程の回収技術についても 作業時間の短縮を図る必要があり、さらに時間の短縮を進めていくには、複数の処分坑道の同時 施工などを含む、回収作業の全体工程を念頭に置くことも必要となる。プラグの撤去、処分坑道 内の埋め戻し材の再掘削、PEM 周囲の隙間充填材の除去、PEM の処分坑道外への搬出などの回 収事業全体に対して、このような工程の分析を行うことによって、除去工程に要求される作業効 率(時間当たりの除去量)の目安が得られ、技術・装置の設計や高度化・迅速化を検討するため の指標として、有用な基盤情報になり得ると考えられる。

上記を踏まえ、「横置き・PEM 方式」を想定した処分場レイアウト等の条件を整理し、プラグの撤去から PEM の坑外搬出までの全体回収工程の分析を行い、回収作業の全体工程を俯瞰しつつ、その中で複数坑道の同時施工等の適用しうる工程の合理化を行い、どの作業工程が全体工程のボトルネックとなりうるのかを検討・整理を行った。その上で、これを解消するために必要な技術開発課題の整理を行い、今後の開発計画の策定を行った。

目的	分類	要因	因子	具体的な課題
			坑道の形状・寸法	<ul> <li>・装置の全体概念設計</li> <li>(装置寸法、重量、構成等)</li> </ul>
			<b>PEM</b> の位置、形状	・走行方法 (PEM をまたぐ走行方法等)
		①除去場所	放射線影響 (PEM の健全性)	・遠隔化、無人化を含む設計
		の状態	熱、水(湿度、湧水)、 化学影響	・装置の頑健性
			坑道支保の安定性	・遠隔化、無人化を含む設計 ・装置の頑健性
	運用上 の課題		可燃性ガスの有無	・防爆措置を含む設計
			強度	<ul> <li>・切削機構設計</li> <li>(カッタヘッドの設計;</li> <li>開口率、カッタ突出長等)</li> </ul>
回収作業時間 (施工速度) の迅速化	②除 の ③そ	<ol> <li>②除去対象物</li> <li>の状態</li> </ol>	コンシステンシー (外力による変形、流動 による抵抗度合い)	<ul> <li>・機電設計(掘進速度、トルク)</li> <li>・切削物の移送装置設計 (閉塞対策;移送方法、装置に</li> </ul>
			粘着性、付着性	使用する材料選定・表面コー ティング等) ・除去対象物の性状改良検討
		③その他	除去物(副産物)の 再利用・減用化	・左記に付随する装置、設備設計
	技術的な課題	技術的 か課題 ④除去技術	ほぐし (切削)	<ul> <li>・切削機構の選定         <ul> <li>(適用土質に即した機構選定)</li> <li>・装置の動作方式</li> <li>(PEM 損傷防止検討)</li> <li>・装置の操作性                     (位置合わせ、切削位置の保持、装置の                     機動性)</li> <li>・閉塞防止検討</li> <li>・装置の運転パラメータの最適設定                     ・撤去技術との組合せ検討</li> </ul> </li> </ul>
	· & HAVE		撤去	<ul> <li>・撤去機構の選定</li> <li>(適用土質に即した機構選定)</li> <li>・閉塞防止検討</li> <li>・装置の運転パラメータの最適設定</li> <li>・積込み技術との組合せ検討</li> </ul>
			積込み	・今後検討
			搬出	<ul> <li>・今後検討</li> </ul>

表 2.4-6 回収作業時間(施工速度)の迅速化に向けた課題の整理

# (1) 機械的除去技術・装置の高度化に向けた課題の抽出、整理

地下での実証試験では、幌延深地層研究センターの試験坑道で利用されるバックホウに取り付 け可能なアタッチメント型の除去装置を製作し、NUMO が取りまとめた包括的技術報告書(原 子力発電環境整備機構, 2021)に示された仕様例として示される隙間充填材に対して除去試験を 実施した。

本検討では、機械的除去の作業時間を短縮するため、隙間充填材の特性に着目して、坑道断面

形状や PEM の配置、PEM-坑道間の幅など、処分場設計の更新・具体化への適用性等にも留意 して除去技術の開発に係る課題の整理を行った。隙間充填材の除去手順については、図 2.4.6 に 示すように、隙間充填材の除去手順を「ほぐし」、「撤去」、「積込み」、「搬出」と分割している。 ここではこれらを総じて「除去技術」とし、個々の技術を検討対象とする。ただし、このうちの 「搬出」については、隙間充填材の除去よりも坑道外への運搬方法への関連が強く、立坑の搬出 入の能力や斜路の運用等の埋設施設の性能に依存するため、本業務での検討の対象外とした。個々 の作業は、相互に密接な関連があると考えられるため、本業務では、まず、除去の第1手順であ る「ほぐし」すなわち「掘削(破砕・切削)」について、土木分野を含む既往研究を調査し、機械 的除去技術・装置の高度化に向けた課題の抽出・整理を行うこととした。その後、ほぐされた隙 間充填材を原位置から取り出す工程である「撤去」、坑外に搬出できるようにする工程である「積 込み」についても課題の抽出、整理を行い、これらを繰り返す「除去技術」について総合的に迅 速化を検討した。



(原子力環境整備促進・資金管理センター, 2019)

## (2) 掘削(破砕・切削)に関する整理

## 1) 機械的除去技術の選定に関する概略調査

除去の第1手順としての掘削(破砕・切削)について、機械的除去技術として適用する掘削機 械の選定にあたっては、土木分野における掘削機械が参考となる。地盤や岩盤の掘削機械につい ては、掘削の目的や対象とする岩種などによって、用いられる掘削機械は多種多様に存在し、通 常は掘削だけでなく排土の方法等も含めた工法の選定が必要となる。掘削方式は切削または圧砕 に分類できるが、隙間充填材はベントナイト混合土であり、粘性土に分類される粘性の高い対象 物であるため、適用される掘削メカニズムは切削が主となる。

さらに、地層処分への適用を念頭に置くと、地下の狭隘な環境における適用性についても考慮 が必要であるため、一般土木分野におけるトンネル掘削方式についても概略調査を行い、結果を 表 2.4-7 に整理した。適用地質に着目すると、ベントナイト混合土の性状に近しいと考えられる 軟岩、未固結地山に適用性がある掘削方式としては、自由断面掘削方式ではロードヘッダ等のブ ーム掘削機、全断面掘削方式ではシールド工法で用いるカッタビットが粘土に適用性があり、 TBM 工法で用いるカッタディスクは硬い地盤に適用性があり、この違いが適用性の差となって いる。これらの掘削方式をベースに機械的除去技術の高度化検討を行うこととした。

	自由断面掘削方式		全断面掘削方式	
	ブーム掘削機	バックホウ	<b>TBM</b> 工法	シールド工法
	・伸縮、上下左右首振り	・油圧ショベルの形態	・カッタを押し当てな	・地盤内にシールドマ
	可能なブーム先端にド	のうち、アームの先	がら推進する TBM	シンを推進させるト
ĺ	ラムを有しフームを移	端に取り付けたショ	を用いたトンネルの	ンネルの施上万法
	動しなから部分 掘り	ベルの作用面か于削	施工力法	・密閉型ンールトの場
		側のタイフ	・後方の功壁に押し的	台、削力に圧をかけ て切取の安安な図れ
		<ul> <li>・地衣面よりも「カッ」</li> <li>・地衣面よりも「カッ」</li> </ul>	リたクリツハにヘノ イドジャッキを押し	く切初の女庄を凶40 スため
丁法		1/四日りて二九回 ソ	付けて推進反力を取	るため、週田110日か 広い
概要			って掘進する	) V
17423			・圧砕するため堅い地	
			盤を掘ることに適す	
	・掘削速度はあまり大きく	ない	・適した地質の場合、掘	削速度が速い
	・任意断面を掘削可能	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	・断面形状は機械製作時	に固定
	<ul> <li>他の掘削との併用掘削の</li> <li>(1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)</li></ul>	例が多い	<ul> <li>施工途中の掘削径の変」</li> </ul>	更が困難
	・TBM 上法、ンールト上は	Sに比へ小型、女価 エ社~の亦再が家見	<ul> <li>・ 初期投資かてさい</li> <li>・ 惑准其地の構筑が必要</li> </ul>	
演用	・地山の変化に応して他の.	上法への変更が沿勿	・ 光進 本地 の 博衆 が 必安	
地質	軟岩、未固結地山に適用	土砂地山に適用性高い	岩盤等硬い地盤に適用	砂,粘土,岩盤等に適用
	【代表的なブーム式掘削機】	]	・回転式掘削方式	・回転式掘削方式
	・カッターローダータイプ:	ブームの部分がコンベ	・カッタディスクを有	・カッタビットを有す
	アになっており、その先端	端にカッタあり、カッタ 	するカッタヘッドを	るカッタヘッドを押
	で切削したスリはフーム	上を通り、後万に連搬	押し付けて回転さ	し当てて回転させ、
打出	<ul> <li>・ツインヘッダダイノ:10</li> <li>スレ切削能力け低い</li> </ul>	の右盤切削機械に比ハ	ぜ、石盛寺を伴い ・カッタ種類と配置 カッ	対家工を削る タヘッドの回転粉お上
(掘削)	ると90円肥刀は広く、回 使用	和した <u>工</u> 物守の別mに	<ul> <li>・ハック (重規 C 配直、ハッ び 推力等の設定が必要</li> </ul>	クトントの回転数心よ
(1)41	・ロードヘッダタイプ:ブー	-ム先端のカッタドラム	<ul> <li>・カッタ交換時期が掘進</li> </ul>	速度に大きく影響
	を回転させ、岩盤を切削			
	・オペレータの作業習熟が	重要		
	・湧水環境下では、地質に	より路面が泥濘化		
	・地山が乾燥している場合	には粉塵対策が必要		
	・タイヤ万式		<ul> <li>・コンベア万式 (TBM、</li> <li>・カス われ 活動刻算</li> </ul>	シールド上法共に採用
	<ul> <li>レールカ式</li> <li>・フンテナ古式</li> </ul>		される、なわ、你加利寺 流動化させている)	・を使用し畑則工を空性
ズリ	<ul> <li>・コンバア方式(ベルト</li> </ul>	スクリュー等)等	· 流体輸送方式(泥水式	シールド工法の場合
出し		·····	TBM 工法でも採用あり	
			・掘進速度とズリ出し等	の後続設備のバランス
			が重要	

表 2.4-7 一般土木分野におけるトンネル掘削方式

### 2) 掘削(破砕・切削)に関する課題

掘削対象となる隙間充填材は、粘土系の材料であることが想定されることから、通常の岩盤掘 削で課題となるような地山の硬さに起因する問題が発生する可能性は低いと考えられる。ただし、 機械的除去の作業時間を見積もるための施工効率に関するデータの取得が必要であり、掘削のメ カニズムとして「切削」の適用性が高いことから、不確定要因をパラメトリックに設定した除去 対象に対して、切削の施工性に関する要素試験について検討を行うこととした。

一方で、過年度の試験において、切削後の緩衝材が排土装置に付着して配管が閉塞する事象が 見られたことから、粘土成分の付着が課題の一つであると考えられる。そこで、除去技術の迅速 化に向けた試験計画の検討において、切削した土質材料の付着性に関する評価するために要素試 験について検討を行うこととした。

### (3) 試験計画

土木分野の機械掘削工法に対する掘削能力のまとめ方としては、掘削物の性状を代表するパラ メータ(例えば、岩盤掘削に用いられるツインヘッダやロードヘッダは岩の強度(一軸圧縮強度 等))を横軸として、縦軸には時間当たりの掘削量を整理することを念頭に置く。隙間充填材の除 去についても、このようなまとめ方を参考として、まずは除去に影響を与える隙間充填材のパラ メータを抽出する。次に隙間充填材の除去に適した切削機構、排土機構を選定し、充填材のパラ メータに応じた除去量を取得することで除去能力の評価指標を構築し、充填材の仕様、状態に応 じた対応が可能な除去装置を検討する。試験計画のフローを図 2.4-6 に示す。



図 2.4-7 隙間充填材除去の評価指標の構築フロー図

## 1) 隙間充填材の仕様と状態の設定

除去効率は隙間充填材の仕様や状態に依存するが、現時点で仕様(ベントナイト混合率、密度、 掘削土の種類・粒径等)は決定しておらず、必要とする要求性能を満足する範囲で、「処分場のサ イトに依存する掘削土の特性」、「施工方法(隙間充填技術)」等を基に設定されると考えられる。 また、隙間充填材の状態(例えば浸潤状態)は、廃棄体からの発熱による乾燥や坑壁からの湧水 よる浸潤の影響を受けるため、除去する時期における隙間充填材の状態(含水比)が特定できな い。そのため除去装置は幅広い範囲の仕様、状態に対応する必要がある。具体的には、隙間充填 材の仕様や状態に応じて適切な除去方法を選択できるように、選択評価に資する既述情報や技術 オプションを整備しておくことが望まれる。

そこで、まずは想定しうる隙間充填材の仕様と状態を設定し、土質パラメータを複数取得する。 その中から隙間充填材の除去に与える影響が大きいパラメータの抽出・整理を行う。検討対象と した隙間充填材の仕様と状態をまとめたものを表 2.4-8 に示す。

ベントナイト混合率	乾燥密度	有効粘土密度		含水比 <b>[%]</b>	
[%]	[Mg/m <sup>3</sup> ]	[Mg/m <sup>3</sup> ]	飽和度 75 [%]	飽和度 85 [%]	飽和度 95 [%]
	1.80	0.6	13.7	15.5	17.3
15	2.00	0.8	9.5	10.8	12.1
	2.14	1.0	7.1	8.0	8.9
	1.23	0.8	32.7	37.1	41.5
50	1.45	1.0	23.3	26.5	29.6
50	1.66	1.2	17.0	19.1	21.4
	2.00	1.6	9.2	10.4	11.7
	1.20	1.0	34.0	38.5	43.0
70	1.43	1.2	23.8	27.0	30.1
70	1.60	1.4	18.4	20.8	23.3
	2.00	1.8	9.0	10.2	11.4
	1.20	1.2	33.7	38.1	42.6
100	1.60	1.6	18.0	20.4	22.8
	2.00	2.0	8.7	9.8	11.0

表 2.4-8 検討対象とした隙間充填材の仕様と状態

#### 2) 除去(切削、排土)に影響を与える隙間充填材のパラメータの抽出、整理

除去の切削性を評価するために隙間充填材の除去における切削抵抗を計測する。試験方法については、図 2.4-8に示すように、載荷装置を活用して上方向・下方向の切削を再現する。試験条件の設定については、切削性に関するパラメータとして切削厚さと切削スピードを設定し、ロードセルにより切削抵抗を直接測定するとともに、切削状況を映像記録して目視による比較検討もできるようにする。なお、供試体寸法については効率的に設置できる目安として、切削部長さ20cm×幅20cm×奥行5cm程度とした。また、隙間充填材の切削、排土に関係する隙間充填材の付着については、別途、付着試験等を実施して付着力、付着量について検証を行う。

隙間充填材の各パラメータと切削抵抗、付着力、付着量の相関を整理し、切削、排土において 影響の大きい隙間充填材のパラメータを抽出する。



図 2.4-8 切削試験概要

# 3) 隙間充填材の除去に適した切削機構、排土機構の選定

小型試験装置を用いて切削機構毎に切削抵抗値、付着量、切削後の土塊寸法を計測する。前段 階で抽出した隙間充填材のパラメータとの関係を整理し、隙間充填材の切削に適した切削機構を 選定する。比較する切削機構は粘土系材料に対応可能と考えられる一般土木で実績のあるカッタ ビット、カッタローダ等を対象とする予定である。また、切削後の土塊の寸法や状態を考慮して 試験対象とする複数の排土機構を抽出し、切削機構と同様に小型試験から隙間充填材の除去に適 した排土機構を選定する。



図 2.4-9 切削機構を模擬した小型試験(オーガ)

## 2.5本章の成果と今後の課題

## 2.5.1 本章の成果

処分孔竪置き方式と処分坑道横置き・PEM 方式の 2 つの定置概念を前提として、それぞれオ ーバーパックと PEM の回収に関する作業手順と各作業に要する時間を算出し、ボトルネックと なる作業を抽出した。ボトルネックとなる作業は、処分孔竪置き方式ではオーバーパック周りの 緩衝材の除去、処分坑道横置き・PEM 方式では PEM 周りの隙間充填材の除去であり、ボトルネ ックを解消するために、迅速化の目標時間を設定した。

迅速化に向けた技術の高度化として、処分孔竪置き方式(オーバーパックの回収)にはウォー タージェットによる切削技術(流体的除去技術)を用いることとした。課題としてスラリー状(ス ラッジを含む場合もあり)となった緩衝材の処分孔からの排出とウォータージェットに使用する 流体のリユース機能の能力向上が挙げられ、これらの検討を進めるために噴射試験と沈降試験を 次年度以降に計画した。

処分坑道横置き・PEM 方式では、隙間充填材を広範囲に効率よく除去することを念頭に、機械 的除去技術の高度化を優先して検討することとした。機械的除去の除去効率は隙間充填材の仕様 や状態に依存するが現時点でこれらを特定できない。そのため、機械的除去に関する当面の課題 として、隙間充填材の仕様や状態に応じて適切な機構を選択可能とするために隙間充填材除去の 評価指標を構築することとした。

#### 2.5.2 今後の展開

流体的除去技術の高度化については、ウォータージェット噴射試験により得られる知見を基に、 除去システムの噴射部の改良を行う。また、緩衝材側部の除去工程の省略の可能性を検討するた めに、定置されたオーバーパックの引き抜き試験を実施する。

機械的除去技術の高度化については、評価指標の構築に向けて、切削試験や付着試験を実施して 隙間充填材のパラメータとの相関について整理を行い、除去効率に対して支配的となるパラメー タの抽出を行う。次に切削機構および排土機構を模擬した小型試験をとおして隙間充填材の除去 に適する機構を選定し、それらを組み合わせて除去効率を確認するための試験を行う。この試験 では切削厚さや切削スピード等の設定を変えて除去効率を比較し、それぞれの設定の対応範囲を 明確にする。令和2年度の検討内容をまとめたものを表 2.5-1 に、令和4年度までの技術開発 計画を表 2.5-2 に示す。

	処分孔竪置き方式	処分坑道横置き・PEM 方式
ボトルネックとなる作業	緩衝材の除去	隙間充填材の除去
ボトルネックとなる 作業時間	現状:77時間 短縮目標:20時間以内	現状:57時間 短縮第1目標:20時間以内 (処分孔竪置き方式と同等) 毎縮第2日標:5時間以内
	<ul> <li>・流体的除去技術</li> <li>ウォータージェットによる切削</li> <li>・オーバーパック引き抜き</li> </ul>	機械的除去技術 切削・排土機構の選定を実施
課題	処分孔からの排土 使用する流体のリユース機能	隙間充填材の仕様・状態の設定 切削・排土機構の評価指標の構 築
令和3年度検討事項	噴射試験、沈降試験、 オーバーパック引き抜き試験 除去システムの噴射部改良	隙間充填材のパラメータ整理 切削試験、付着試験 切削・排土機構選定のための 小型試験、除去効率確認試験

表 2.5-1 令和2年度の検討内容

表 2.5-2 2022 年度までの技術開発計画

処分概念	令和2年度	令和3年度	令和4年度
処分孔 竪置き	<ul> <li>緩衝材除去目標時間</li> <li>回収工程の分析</li> <li>高度化の方策</li> <li>・流体的除去技術を対象</li> <li>(高圧噴射による除去)</li> <li>・過年度までに製作した除去装置を</li> <li>ベースに改良する。</li> <li>⇒課題抽出・試験計画</li> <li>・除去装置の移設, 点検</li> </ul>	<ul> <li>要素試験</li> <li>【高圧噴射機能の検討】</li> <li>・噴射試験 (室内・工学規模)</li> <li>→ノズル1系統での噴射,除去量・</li> <li>除去後の形状・スラリー濃度の確認</li> <li>【流体リユース設備の検討】</li> <li>・沈降試験 (室内規模)</li> <li>→固液分離能力強化の検討</li> <li>除去装置</li> <li>・高圧噴射に向けた改良設計</li> <li>・噴射部・吸引部,昇降部,配管の高圧化対応</li> </ul>	<ul> <li>除去装置</li> <li>【改造】</li> <li>・装置の組立調整</li> <li>・組立て・動作確認</li> <li>実証試験</li> <li>・高圧噴射による緩衝材除去試験</li> <li>⇒除去時間の確認</li> </ul>
処分坑道 横置き	<u>隙間充填材除去 目標時間</u> 回収工程の分析 <u>高度化の方策</u> ・機械的除去技術を対象 (切削による除去) ・装置化に向けた基礎的な 検討(切削,排土機構の選定) から実施⇒課題抽出・試験計画 ・隙間充填材を想定した材料の パラメータの取得,整理	<ul> <li>要素試験         【切削機能の検討】         ・切削抵抗試験,付着力試験         ⇒切削に有意に影響する充填材         パラメータの確認         ・切削試験⇒切削機構の選定         【排土機能の検討】         切削後の充填材の状態に応じた         排土機構の選定         【除去能力確認試験】         選定した切削・排土機構による         除去能力を確認         </li> </ul>	<u>要素試験</u> 【除去能力確認試験】 充填材の状態に応じて最適な 設定(切削刃幅,すくい角,切削速 度等)を確認 <u>除去装置</u> 【設計】 ・坑道断面, PEM形状に合わせた 連続切削可能な機構 ・無人化施工 ・排土設備との統合

#### 第2章 参考文献

土木学会, 2017 年制定コンクリート標準示方書[施工編], 2018.

- 東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社,土木工事積算基 準令和2年度版,2020.
- 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.
- 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.
- 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)地下環境 での搬送定置・回収技術の高度化開発—実証試験—, 2016.
- 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2分冊)地下環境 での搬送定置・回収技術の高度化開発, 2019.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター,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 報告書, 2020.
- 日本原子力研究開発機構 東濃地化学センター 施設建設課, 瑞浪超深地層研究所研究坑道掘削工 事平成 14 年度から 17 年度までの建設工事記録(平成 18 年度の一部を含む), JAEA-Review 2012-026, 2012.
- 日本原子力研究開発機構 東濃地化学センター 施設建設課, 瑞浪超深地層研究所研究坑道掘削工 事平成 18 年度建設工事記録, JAEA-Review 2012-038, 2012.

### 3. 回収の容易性を高めた代替設計オプションの開発

# 3.1 目的と方針

### 3.1.1 目的

本検討では、第1章に示した技術的アプローチのうち、"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"に対応する開発を行う。今後のサイト選定や技術開発の進 展に応じて、多様な定置概念や設計オプションからの選択の柔軟性を更に高めていくことを目的 として、現行の候補概念や設計オプションにとらわれない、回収の容易性を高めた代替設計オプ ション案の提示、及びその成立性・技術的実現性に係る検討を行う。

#### 3.1.2 方針

回収の容易性を高めた代替設計オプションの開発は以下の方針に沿って行う。

#### (1) 代替設計オプション構築の考え方

○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」に着目した代替設計 オプションを開発の対象とする。

本事業では、回収の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、別途整備される 定量化手法の整備による操業期間中の安全性への影響及び閉鎖後長期の安全性への影響が 精査される。また、安全性、工学的成立性などの多様な設計因子、設計の最適化といった観 点からの検討により、その妥当性が評価される。設計の最適化において参照できる観点とし ては、別途実施されている「地層処分施設の設計・操業技術の最適化手法に関する研究」(原 子力環境整備促進・資金管理センター, 2021)で整備した評価項項目案などがある。

○回収の容易性の指標として、回収に要する時間(回収作業時間)を設定する。

R&R 検討会(原子力環境整備促進・資金管理センター, 2018)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、いく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 示す指標の一つとして、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、廃棄体へのアクセ ス性、回収作業の技術的な容易さ(ハンドリング性)といった観点から検討を進める。

○事業者が設計因子の設定において留意している事項を踏まえた検討とする。

NUMOの包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)では多様な設計因子の設定において留意している事項が以下のとおり示されており、本検討ではこれらを踏ま えて検討を行う。

・国際機関や関連する原子力施設の規制などで示されている処分場の安全確保に係る事項

- ・特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針など政策上の重要課題に係る事項
- ・処分場の設計・建設・操業などの実現性および経済的合理性に係る事項

本検討では、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に留意して検討を進める。その際、NUMO が整理している多様な設計因子などにも留意する。

○レファレンスを設定した検討を行う。

回収の容易性を高めた代替設計オプションを検討するうえで、比較対象となるレファレンス概念・設計が必要となる。ここでは、包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)に示された以下の処分概念、

·岩種 新第三紀堆積岩類

・処分深度 500m

・定置方式 処分孔竪置き・ブロック方式 (パネル型)

をベースとして、包括的技術報告書レビュー版に記載のない細部については、適宜、作業工 程の具体化や仮設定などを行い、本研究におけるレファレンス概念・設計として設定する。

#### (2) 検討の前提となる条件設定の考え方

○「全量回収」を優先的な条件とする。

第1章で示したとおり、基本方針に示される将来世代の選択の柔軟性という可逆性・回収 可能性の導入の意図を踏まえ(地層処分と異なる管理手法への転換)、「全量回収」を念頭に 置いて回収の容易性向上に係る検討を進める。

○代替設計オプションの開発範囲は、処分坑道及び処分孔を含む人工バリアを対象とする。

本検討における代替設計オプションの開発の基本的な開発範囲は、連絡・主要坑道を除く、 処分坑道及び処分孔を含む人工バリア(処分坑道の力学プラグより先)を対象とする。ただ し、以下に留意して検討を行う。

- ・包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)で示されたガラス固化体、 オーバーパック、緩衝材に割り当てられた安全機能や要件、並びに埋め戻し材/隙間充 填材、力学プラグに割り当てられた要件を満たすものとする。
- ・構成要素や人工バリアの材料や組み合わせを変更できることとするが、新たな材料を導入する際には、事業許可申請段階までに現在の材料と同等レベルの知見の整備が見込まれるものに限る。
- ・熱伝導解析による成立性の確認の際は、隣接処分坑道の廃棄体の影響を考慮する(結果 として処分坑道離間距離の目安が提示される)。
- ・連絡・主要坑道は基本的に検討の対象外とするが、力学プラグから先の代替設計オプションの具体化の延長として、連絡・主要坑道の設計に有意な影響が見込まれる場合は、 定性的な評価において補足説明を加える。

### 3.1.3 開発の進め方と検討項目

前項で示した方針を踏まえ、現行の候補概念や設計オプションにとらわれない、"回収の容易性 の向上"に焦点をあてた複数の代替設計オプション案(概要案及び概念設計案)を考案する。こ こで、代替設計オプションの概要案とは、設計オプションをイラスト化した概念的なものであり、 概念設計案とは、概要案に対して寸法などの仕様を仮設定し、成立性や実現性の検討を加えたも のである。併せて、考案した概念設計案の具体化に向けて、今後必要となる技術課題(研究開発 課題や技術実証すべき事項など)を取りまとめる。 このような考え方を踏まえ、回収の容易性を高める工学的方策を組み合わせた代替設計オプションの開発を進めた。開発の最初のステップとなる代替設計オプション概要案の考案にあたり、 回収作業におけるハンドリング対象物の最小モジュールが異なることで、回収の容易性を向上さ せる方策が異なる可能性があると考えられるため、回収の対象物となる最小モジュールに次の2 種を設定して検討を進めた。

・オーバーパックとした場合

# ・PEM (Prefabricated Engineered barrier system Module) とした場合

最小モジュールをオーバーパックとした場合には、単位ユニットあたりの回収作業時間を減ら すために"オーバーパックと緩衝材の縁切り"に関する技術の高度化に取り組んでいる(第2章 を参照)。ここでの代替設計オプションの検討では、そのような"縁切り"が不要となるような方 策などに着目した工学的方策を基軸として概要案の構築を試みるアプローチとした。

また、最小モジュールを PEM とした場合には、単位ユニットあたりの回収作業時間を減らす ために"PEM 周辺の隙間充填材の除去"に関する技術の高度化に取り組んでいる(第2章を参 照)。ここで検討では、そのような"除去"が不要となるような方策、或いは回収作業回数を低減 可できる可能性のある"廃棄体多格納 PEM"に着目し、より多くの方策を組み合わせられる工学 的方策を基軸として概要案の構築を試みるアプローチとした。

以下に、次のステップで進めた検討手順に沿って、本年度の実施内容(検討の成果)を整理する。

- (1) 回収の容易性を高めた代替設計オプション概念設計案の開発
  - ・回収の容易性を高めた代替設計オプション概要案の考案
  - ・概要案に基づく代替設計オプション概念設計案の具体化(成立性及び工学的実現性の検討)
- (2) 代替設計オプションの概念設計案の具体化に係る技術開発課題の抽出と整理
- (3) 代替設計オプションの概念設計案の具体化に係る技術開発課題への対応方策の検討

## (1) 回収の容易性を高めた代替設計オプション概念設計案の開発

#### 1) 回収の容易性を高めた代替設計オプション概要案の考案

これまでに、回収の容易性向上の視点とポイント(表 3.1-1)、並びに容易性を高める工学的方 策(表 3.1-2)とその組み合わせの可否の整理が進められている(原子力環境整備促進・資金管理 センター, 2020)。本検討では、表 3.1-1の視点とポイントを回収の容易性向上に関する「評価指 標(案)」として後述する定性評価に用いた。表中の下線は本年度の検討において、従来の整理結 果を見直した箇所である。また、表 3.1-2に示す工学的方策を組み合わせることにより代替設計 オプション概要案の構築を行った。

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

表 3.1-1 回収の容易性向上の視点とポイント

	表 3.1-2 回収の容易性向上の工学的方策
No.	工学的方策の具体的な内容
Α.	隙間充填を必要としない円形小断面坑道定置
В.	大断面坑道での定置
С.	PEM による緩衝材とオーバーパックの一体型回収
D.	緩衝材を残置する回収方式(オーバーパックのみ回収)
Е.	定置坑道の短尺化
F.	撤去容易なプラグの採用
G.	高耐久性支保工等の適用
H.	アタッチメントタイプの支保材導入
I.	複数の廃棄体を格納する容器の採用
J.	小断面坑道に複数の廃棄体を定置
K.	オーバーパックの軽量化
L.	緩衝材の軽量化
M.	PEM の軽量化
Ν.	矩形 PEM の採用
0.	止水機能を有する支保工の採用
Ρ.	耐腐食性材料の採用
Q.	容器の厚さを増加
R.	大断面坑道に廃棄体の集中定置
S.	回収動作が単純な定置方式と装置の採用
Τ.	動作と動線とが単純な定置坑道レイアウト
U.	大断面作業坑道と小断面定置坑道の組み合わせ

# 2) 概要案に基づく代替設計オプション概念設計案の具体化(成立性及び工学的実現性の検討)

前述した複数の概要案について、以下の手順で検討を進め、代替設計オプション概念設計案として具体化を行った。

○概念設計当初案の検討:

前記 1)で考案した概要案(イラスト)に対して寸法などの仕様を仮設定し、概念設計当初 案として具体化した。

○熱影響の評価による成立性の検討

概念当初設計案に対して、サイト依存性が低い廃棄体からの熱影響に着目して先行的に検 討を実施した。熱影響評価によるニアフィールドの温度変化の把握を行い、緩衝材制限温度 (ベントナイト温度 100℃)を超えない坑道中心間距離や廃棄体定置間隔などを検討して必 要な見直しを加えたものを概念設計案とした。

○概念設計案の実現性(設計・施工の実現性)の評価

熱影響以外の設計項目や施工性などを設計・施工の実現性に係る検討項目として整理し、 上記の概念設計案に対して評価を行った。本評価をとおして、設計や施工の観点から概念設 計案に実現性の見通しがあること(非現実的な案ではないこと)を確認するとともに、実現 性を高めるための課題を整理した。 ○「評価指標(案)」による概念設計案の定性評価

1)で整理した「評価指標(案)」に基づき、本研究におけるレファレンス概念(比較評価元 となる概念・設計)との定性的な比較評価により、代替設計オプション(概念設計案)が回 収の容易性に関して向上していることを確認した。

### (2) 代替設計オプションの概念設計案の具体化に係る技術開発課題の抽出と整理

概念設計案の具体化(詳細設計への展開や施工技術などの開発整備など)に向けて、研究開発 課題や技術実証すべき事項など、今後取り組む必要のある技術課題を検討・抽出した。

#### (3) 代替設計オプションの概念設計案の具体化に係る技術開発課題への対応方策の検討

上述した技術課題について、国内外の関連技術の動向などにも留意して、今後の対応方策(研 究開発など)について取りまとめた。

以上のような検討の考え方及び検討手順により、回収の容易性を高めた代替設計オプションの 開発を進めた。次節以降に、本年度の検討の成果を整理する。

# 3.2 オーバーパックを回収の対象物の最小モジュールとした代替設計オプションの開発

回収作業におけるハンドリング対象物の最小モジュールをオーバーパックとした場合の"回収 の容易性の向上"に焦点をあてて、前節 3.1 で示した検討手順により、代替設計オプションの概 要案及びそれを具体化した概念設計案を整理した。概念設計案については、成立性及び工学的実 現性の観点から検討を行いその見通しを得るとともに、今後の具体化(詳細設計への展開や施工 技術などの開発整備など)に向けた技術課題を抽出し、対応方策等を整理した。

# 3.2.1 回収の容易性を高めた代替設計オプション概念設計案の開発

#### (1) 回収の容易性を高めた代替設計オプション概要案の考案

# 1) 代替設計オプション概要案構築の進め方

代替設計オプション概要案の構築にあたり、表 3.1-2 で示した工学的方策をベースとして、表 3.2-1 のようにオーバーパックを対象とした方策に即したものに調整した。なお、本検討では"坑 道"と"孔"を次のように定義している。

・坑道:回収装置などの本体が入れる地下構造物

・孔:回収装置などの装置本体は入れず、坑道に設置した装置からアームなどを伸ばして定置・ 回収を行う地下構造物

# 表 3.2-1 オーバーパックを回収の対象とした回収の容易性向上の工学的方策 No. 工学的方策の具体的な内容

Α.	(オーバーパック回収の場合該当なし)
В.	大断面坑道での定置
С.	(オーバーパック回収の場合、該当なし)
D.	緩衝材を残置する回収方式(オーバーパックのみ回収)
Е.	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
Н.	アタッチメントタイプの支保材導入
Ι.	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
К.	オーバーパックの軽量化
L.	緩衝材の軽量化
M.	(オーバーパック回収の場合、該当なし)
N.	(オーバーパック回収の場合、該当なし)
0.	止水機能を有する支保工の採用
Ρ.	耐腐食性材料の採用
Q.	容器の厚さを増加
R.	大断面坑道に廃棄体の集中定置
S.	回収動作が単純な定置方式と装置の採用
Τ.	動作と動線とが単純な定置坑道レイアウト
U.	大断面作業坑道と小断面定置坑道の組み合わせ
表 3.2-1 に示した工学的方策を組み合わせることによって、代替設計オプションの概要案の構築を試みた。どの方策(単独或いは組み合わせ)が最も容易性向上に寄与するかは、回収作業時間の短縮効果として今後定量化する必要があるが、第2章の回収技術の高度化の検討成果も踏ま え、まずは廃棄体へのアクセス性向上から、次の2点を基軸にした検討から着手した。

- ・坑道の再掘削作業量を低減する方策"E:坑道の短尺化"
- ・緩衝材の除去作業量を低減する方策 "D:オーバーパックと緩衝材の縁切り(オーバーパックのみの回収)"

検討の出発点では、レファレンス概念との比較を明らかにしやすくするために、処分孔に定置 する方式を基本とした概要案の構築を行うこととして、レファレンス概念から坑道形状を大幅に 変更する大断面坑道に定置する方策などを組み込んだ概要案は今後の検討にすることとした。ま た、回収可能性を維持する状態を"坑道を埋め戻さない状態"とすることにより処分坑道の再掘 削の作業量を低減する方策もあるが、そのような方策の検討では、開放坑道の維持管理の負荷に 加えて人工バリアや天然バリアへの影響を評価する必要があるため、第4章の回収可能性維持に 伴う影響に関する定量化手法の整備で、そのような影響の定量化の見通しが得られた段階以降に 検討することとした。

#### 2) 着目した工学的方策とその組み合わせに関する整理

# ① 坑道の再掘削作業量を低減する方策 "E:坑道の短尺化"

処分孔定置方式の場合、処分坑道の埋め戻し材の撤去が廃棄体へのアクセス性を確保するうえ で重要な工程となるが、物量が多い。そこで、坑道断面をレファレンスの断面に固定し、処分坑 道総延長の短縮を図ることとした。処分坑道総延長を短縮するためには、ガラス固化体1体あた りの処分坑道長を短くすればよいという考えのもとで検討を進めた。この方策は、第1章で述べ たアプローチ1と共存する代替設計オプションである。この方策のみを組み込んだ概要案は、現 行の処分孔竪置き方式の緩衝材除去システムを適用できる可能性がある。

(a) 処分孔の間隔の短尺化 (OP-1)

レファレンス概念では、坑道安定性の評価から処分孔間隔 L が 6.66mに設定されている(原子 力発電環境整備機構, 2018)。これは熱影響評価から求められた処分孔間隔よりも大きいためであ る。そこで、処分孔とその周辺を支保などで力学的に補強することにより、熱的な要因のみで定 置間隔を設定することを試みた。ここから導出される概要案を OP-1 とする。

(b) 一断面あたりの定置数量の増加(OP-2~4)

レファレンス概念では、処分坑道の一断面(処分孔がある断面)あたりのガラス固化体の定置 数量は1体である。そこで、処分孔とその周辺を支保などで力学的な補強を行うことにより、定 置数量を増やし、ガラス固化体1体あたりの処分坑道長を短尺化する短くすることを試みた。

一断面あたりの定置数量を増やす手段として以下が挙げられる。これらは組み合わせることが可能であるが、ここでは独立の手段として評価し、それぞれの手段から導出される概要案を OP-2~4 とする。

- ・複数方向へ処分孔を設ける(左壁面+右壁面+坑道底部など): 概要案 OP-2 とする。
- ・一つの処分孔に定置するオーバーパックの本数を増やす:概要案 OP-3 とする。
- ・オーバーパック1本あたりのガラス固化体の封入数を増やす:概要案 OP-4とする。

# ② 緩衝材の除去作業量を低減する方策 "D:オーバーパックと緩衝材の縁切り"

処分孔定置方式の場合、処分孔に定置した緩衝材の除去作業が廃棄体へのアクセス性を確保す るうえで重要な工程となるが、第2章で高度化開発を進めている緩衝材除去システムの能力より もさらに迅速化を図るためには、緩衝材の除去工程そのものを省くことが有効である。そこで、 オーバーパックと緩衝材の間をケーシングなどの部材を用いて縁切りすることにより、緩衝材の 除去作業を低減する方策を概要案に組み込むこととした。この方策は①で挙げた全ての方策と組 み合わせることができる。

# 3) 代替設計オプションの概要案の構築

上記の工学的方策を組み合わせた概要案のイメージを図 3.2-1 に示す。概要案は次の二つの工 学的方策を基軸として構築した。各概要案の詳細は付属書 3-1 に示す。

- ・坑道の短尺化(処分孔間隔の短縮、処分孔数の増大、孔への複数定置、複数のガラス固化体 封入)
- ・オーバーパックと緩衝材の縁切り



### (2) 代替設計オプションの概念設計案の成立性及び工学的実現性の検討

# 1) 代替設計オプションの概要案の具体化による概念設計当初案の検討

前記(1)で構築した代替設計オプションの概要案を具体化し、概念設計当初案を構築した。

# ① 概念設計当初案構築の基本方針

処分坑道及び処分孔の形状・寸法、オーバーパック、緩衝材、埋め戻し材の材質、部材厚など の仕様は、包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構,2018)に示されたものをベー スとして、包括的技術報告書レビュー版に記載のない細部については、適宜、作業工程の具体化 や仮設定などを行い、本研究におけるレファレンス概念・設計として設定したものを本検討にお けるレファレンスとして設定した。回収の容易性を向上させるために、レファレンスの寸法や仕 様を変更したものを含めて、前記(1)で構築した代替設計オプションの概要案に関して熱影響や力 学的安定性を考慮して概念設計当初案として具体化する。ただし、使用材料を変更する方策につ いては、現段階で特定の材料や仕様を設定することが困難であることから、今後の段階的な検討 において設定することとし、当面の検討ではレファレンス概念の材料仕様を踏襲する。また、レ ファレンス概念で示された処分坑道の断面形状は岩種により異なるが、本検討では形状が単純な 深成岩類の処分坑道断面形状を用いることを基本とする。新たに追加する部材(処分孔の支保部 材、緩衝材とオーバーパック間の縁切り部材など)については、現段階で詳細検討に基づく仕様 設定が困難であるため、既往検討成果や土木分野における知見などを参照して、仕様を仮設定する。なお、概念設計当初案には概要案と同様の名称を付すこととする。

### ② 概念設計当初案の構築

上記の方針に沿って代替設計オプション概要案を具体化して概念設計当初案を構築した。各概 念設計当初案及びそれらの詳細については付属書 3-2 に詳述する。一例として、概念設計当初案 OP-1 を図 3.2-2 に抜粋して示す。



図 3.2-2 代替設計オプション概念設計当初案 OP-1 の仕様設定

### 2) 熱影響の評価による概念設計案の成立性の検討

概念当初設計案に対して、サイト依存性が低い廃棄体からの熱影響に着目して先行的に検討を 実施した。熱影響評価によるニアフィールドの温度変化の把握を行い、緩衝材制限温度(ベント ナイト温度 100℃)を超えない坑道中心間距離や廃棄体定置間隔などを確認・検討した。検討結 果から、熱影響に関する成立性に関して有望な概念設計案を抽出した。

## ① 熱影響評価の方針

概念設計当初案に対して、熱影響評価によるニアフィールドの温度変化の把握を行い、緩衝材の制限温度(ベントナイト温度100℃)を超えない坑道中心間距離や廃棄体定置間隔などを検討した。また、熱影響評価(熱伝導解析)に基づき坑道中心間距離や廃棄体定置間隔などを見直した検討結果について、意図した回収の容易性向上のための方策が保持されているか否かの評価も

併せて行った。なお、本検討ステップにおける概念設計当初案を対象とした熱影響評価では、設計の詳細さとの関係から(粗い)、今後さらに詰めるべき不確定要素を含んでいることに留意されたい。

### ② 概念設計当初案に対する熱影響評価

上記の方針に沿って代替設計オプション概念設計当初案に対する熱影響評価を行った。得られ た熱伝導解析の詳細については付属書 3-3 に詳述する。同解析結果から得られた緩衝材の最高温 度が緩衝材の制限温度(100℃)を超えない概念設計当初案の仕様例とガラス固化体1体あたり の処分坑道長さを表 3.2-2 に一覧で示す。同表より、全ての概念設計当初案でガラス固化体1体 あたりの処分坑道長さがレファレンス概念の 6.66m よりも短尺化できる見込みがあることが分 かる。一方で、処分坑道の中心間距離はレファレンス概念よりも大きくなるが、処分坑道が接続 する主要坑道の本数は処分坑道の本数に比べて少ないため、全体の坑道長は短尺化できると考え られる。

上記の結果を踏まえて概念設計当初案を修正し、概念設計案とする。

表 3.2-2	緩衝材制限温度	(100°C)	を超えない	い概念設計当初案の仕様例とガラス固化体	本1体
		ま	らたりの如	公坑道長さ	

概念設計当初案	<ul> <li>一断面</li> <li>あたりの</li> <li>ガラス固化</li> <li>体</li> <li>定置数</li> </ul>	処分孔 中心間 距離 (m)	処分坑道 中心間 距離 (m)	緩衝材 最高温度 (℃)	ガラス固化体 1体あたりの 処分坑道長さ (m)
OP-1(処分孔間隔の短縮)	1	2.38	24	81.9	2.38
OP-2(処分孔数の増大)	3	4.44	24	90.7	1.48
OP-3 (孔への複数定置)	5	4.44	48	96.1	0.88
OP-4 (複数のガラス固化体封入)	2	4.44	24	90.5	2.22

### 3) 概念設計案の実現性(設計・施工の実現性)の評価

熱影響評価を経て必要な修正を施した概念設計案について、設計・施工の実現性の観点で定性 的な評価を行い、必要な見直しを行いつつ、実現性のある(非現実的ではない)概念設計案を構 築した。なお、本検討での実現性評価は、設計・施工の実現性を評価対象としており、詳細な建 設工程(その適切性)や建設費用などは考慮していない。

# ① 概念設計案の実現性評価

# (a) 概念設計案 OP-1 の実現性評価

概念設計案 OP-1 は、次の二つの方策を基軸として構築している。これらの方策の導入に係る 検討結果を以下に整理する。

・坑道の短尺化(処分孔間隔の短縮

・オーバーパックと緩衝材の縁切り(オーバーパックのみ回収)

○方策:坑道の短尺化(処分孔間隔の短縮)について

新第三紀堆積岩類の場合、処分孔の力学的安定性の観点から、処分孔中心間距離は処分孔内 径 d に対して 3d (=6.66m) 必要とされている。概念設計案 OP-1 では、処分孔孔壁を支保す る工学的方策 L を組み合わせることにより、処分孔間隔の短縮を実現している。包括的技術報 告書レビュー版では、無支保で処分孔の安定が確保できない場合の対策として安定性確保対策 が示されており、概念設計案 OP-1 で採用している鋼製ライナープレートによる処分孔孔壁の 支保は実現性が見込めると考えられる。岩盤と鋼製ライナープレートの間の隙間を適切に充填 する必要があると考えられるが、セメント系のグラウトなどを注入することにより実現可能で あると考えられる。

熱影響の観点からは、隣接処分坑道との中心間距離を24m程度以上確保することで、処分孔 間隔を処分孔が接するまで短縮可能であるが、施工性を考慮すると0.5~1m程度の離隔を確保 することが望ましいと考えられる。

○方策:オーバーパックと緩衝材の縁切り

概念設計案 OP-1 は、オーバーパックと緩衝材の間に蓋と底板を有する鋼製ライナープレー トを設置することにより、オーバーパックと緩衝材を縁切りし、オーバーパック側方の緩衝材 の撤去を不要としている。これについては、フランスでも類似の構造が採用されている (ANDRA, 2005)ことを考慮すると実現性が見込めると考えられる。上述した処分孔の孔壁の支 保部材を含め、要求性能(構造強度、止水性など)との関係性を以下に整理する。

ここでは、便宜的に処分孔の孔壁を支保する鋼製ライナープレートを「第1ケーシング」、オ ーバーパックと緩衝材を縁切りするための鋼製ライナープレートを「第2ケーシング」と称し、 第1・第2ケーシングの有無、止水性の有無、上蓋・底板の有無などの組み合わせが、回収の 容易性に与える影響について図 3.2-3のように整理を試みた。



図 3.2-3 第1・第2ケーシングの機能による回収の容易性の整理の試行例

オーバーパックと緩衝材を縁切りすることによりオーバーパック側方の緩衝材撤去を不要 とし、かつ、オーバーパック上方の緩衝材を乾燥状態で撤去するためには、止水性を有する第 1ケーシングと蓋・底板を有する第2ケーシングが必要となる(図 3.2-3の赤字部分)。第1ケ ーシングに止水性を付与するためには、以下のいずれかの条件を満たせばよい。

・ 第1ケーシングが蓋と底板を有し、かつ、密閉されている

・ 第1ケーシングが底板を有し、かつ、処分坑道も止水されている

このとき、回収可能性の維持期間において処分坑道が埋め戻され端部に力学プラグが設置された状態で維持される場合には、第1ケーシングに深度相当の静水圧が作用する可能性があるため、静水圧に耐えうる構造強度が必要となる。

一方、オーバーパックと緩衝材を縁切りすることによりオーバーパック側方の緩衝材撤去を 不要とし、緩衝材が飽和することを許容する場合には、第1ケーシングに止水性は不要となる が、蓋と底板を有する第2ケーシングが必要となる(図 3.2-3の青字部分)。このとき、第2ケ ーシングには、上記と同様に深度相当の静水圧が作用する可能性があるため、静水圧に耐えう る構造強度が必要となる。

上記のいずれの場合でも、第1ケーシングまたは第2ケーシングが、止水性と深度相当の静水圧に耐えうる構造強度を有する必要がある。オーバーパックの回収時には、第1ケーシングまたは第2ケーシングの蓋が容易に撤去可能であることが求められるため、止水性を有する蓋を長期間経過した後に撤去できる構造とする必要がある。第1ケーシングの蓋を撤去する作業は遮へいされた空間での作業となることが想定されるが、第2ケーシングの蓋を撤去する作業は、放射線環境下での作業となるため、遠隔操作が必須となる。これを考慮すると、第1ケーシングに水密性と構造強度を付与する方が、撤去作業が容易になる可能性が高い。

本検討では、オーバーパックと緩衝材を縁切りすることによりオーバーパック側方の緩衝材 撤去を不要とし、かつ、オーバーパック上方の緩衝材を乾燥状態で撤去することが可能な形態 として、蓋・底版に止水性を期待できる第1ケーシングと蓋・底板を有する第2ケーシングを 配置する形態を想定する。本検討のように、回収可能性の維持期間において処分坑道を埋め戻 した状態で維持することを前提とした場合、第1ケーシングは、深度相当の静水圧に耐えうる 構造強度が必要となり、第1ケーシングに炭素鋼を用いるとすると、オーバーパックと同等程 度の耐圧厚さ(部材厚)が必要と考えられる。

その他に概念設計案に組み込むことが可能な方策として、"埋め戻し材及び緩衝材の軽量化"、 "オーバーパックの軽量化"、オーバーパックを回収時に把持可能な仕様とするための"耐腐食 性材料の採用"や"容器の厚さを増加"、"処分坑道支保部材の高耐久化"がある。

埋め戻し材及び緩衝材の軽量化については、本事業において具体的な使用材料を選定するこ とは困難であるが、現行の候補材料よりも単位体積重量が小さい材料を選定することにより実 現可能となる。埋め戻し材、緩衝材の性能は有効粘土密度を指標として設定される場合が多い ため、ベントナイトを変更せず、混合する土質系材料を変更する方が、性能を担保した上での 仕様変更に対応しやすいと想定される。また、大幅に性状が変更されない限り、レファレンス 概念で想定している施工方法により施工が可能と考えられる。

オーバーパックを軽量化することによるハンドリング性の向上については、第2次取りまと め(核燃料サイクル開発機構, 1999)において、オーバーパックの候補材料として検討されてい るチタンを用いることにより、軽量化が可能であると考えられる。オーバーパックに用いる材 料を変更する場合は、腐食や強度に関する十分なデータを取得した上で、必要な部材厚などを 検討・設定する必要がある。操業方法に関しては、レファレンス概念で想定している定置装置 を用いた操業が可能であると考えらえる。 オーバーパックを回収時に把持可能な仕様とすることに関しては、回収時に再度把持するこ とを想定して設計を行う必要がある。そのため、回収可能性維持期間における腐食を見込んだ 設計に見直すことにより、回収時の把持が可能な仕様とすることが可能と考えられる。ただし、 現時点では、回収可能性維持期間の具体的な設定値が示されていないため、具体的な仕様を検 討するためには、例えば、オーバーパックの耐用年数(1000年)を想定して示された炭素鋼を 用いた場合の値を参考に部材寸法などの仕様を設定することが考えられる。チタンを用いる場 合には、別途腐食に関するデータを取得した上で、必要な部材厚を設定する必要がある。操業 方法に関しては、把持部の形状が変更されるため、レファレンス概念で想定している定置装置 を見直す必要があるが、実現性の見通しはある。

坑道の支保部材の高耐久化については、第4章で整備される回収可能性維持に伴う影響の定 量化手法の成果を踏まえた検討が行われる。

(a) 概念設計案 OP-2 の実現性評価

概念設計案 OP-2 は、次の二つの方策を基軸として構築している。これらの方策の導入に係る 検討結果を以下に整理する。

・坑道の短尺化(処分坑道断面当たりの処分孔数増大)

・オーバーパックと緩衝材の縁切り(オーバーパックのみ回収)

後者については概念設計案 OP-1 と同様である(割愛する)。

○方策:坑道の短尺化(処分坑道断面当たりの処分孔数増大)について

概念設計案 OP-2 では、鉛直処分孔がある処分坑道の同一断面に、左右 2 本の水平処分孔を 追加で設ける案である。これについては、設計・施工上の実現性を有するものと考えられる。

また、概念設計案 OP-2 は、熱影響評価の結果、処分孔間隔を短縮する工学的方策も組み合わせることが可能であることが確認されたため、処分孔間隔を短縮しており、処分孔の孔壁を支保する工学的方策との組み合わせが必須となるが、上述のように実現性が見込めると考えられる。

その他の仕様設定については、概念設計案 OP-1 と同様である。

(b) 概念設計案 OP-3 の実現性評価

概念設計案 OP-3 は、次の二つの方策を基軸として構築している。これらの方策の導入に係る 検討結果を以下に整理する。

・坑道の短尺化(処分孔に複数のオーバーパック定置)

・オーバーパックと緩衝材の縁切り(オーバーパックのみ回収)

後者については概念設計案 OP-1 と同様である(割愛する)。

○方策:坑道の短尺化(処分孔に複数のオーバーパック定置)について

包括的技術報告書では1日に5本のオーバーパックを定置する操業工程を想定していること から(原子力発電環境整備機構,2018)、概念設計案 OP-3 では、一つの処分孔に1日分の定置本 数に相当する5本のオーバーパックを定置することを前提とした案である。レファレンス概念 の定置方法を踏襲する場合は、概念設計案 OP-3の処分孔深さは17m 程度となるため、緩衝材 ブロックの定置装置やオーバーパックの定置装置を深い処分孔に対応できるように改良し、そ の実現性を確証する必要がある。 また、概念設計案 OP-3 は、熱影響評価の結果、処分孔間隔を短縮する工学的方策も組み合わせることが可能であることが確認されたため、処分孔間隔を短縮しており、処分孔の孔壁を支保する工学的方策との組み合わせが必須となる。

同一処分孔内に隣接するオーバーパック間に配置するバッファーは、埋め戻し材相当の土質 系材料を鋼製容器に封入した仕様を想定している。バッファーの把持部の仕様については、オ ーバーパックの把持部と同様の仕様とすることにより定置時、回収時のいずれにも対応可能と 考えられる。

その他の仕様設定については、概念設計案 OP-1 と同様である。

(c) 概念設計案 OP-4 の実現性評価

概念設計案 OP-4 は、次の二つの方策を基軸として構築している。これらの方策の導入に係る 検討結果を以下に整理する。

・坑道の短尺化(オーバーパックに複数のガラス固化体封入)

・オーバーパックと緩衝材の縁切り(オーバーパックのみ回収)

後者については概念設計案 OP-1 と同様である(割愛する)。

○方策:坑道の短尺化(オーバーパックに複数のガラス固化体封入)について

概念設計案 OP-4 では、熱影響やオーバーパックの寸法を考慮して、ガラス固化体を縦に 2 段積みした形態を想定しており、既往の検討実績がある(NUMO, 2004)。

また、概念設計案 OP-4 は、熱影響評価の結果、処分孔間隔を短縮する工学的方策も組み合わせることが可能であることが確認されたため、処分孔間隔を短縮しており、処分孔の孔壁を支保する工学的方策との組み合わせが必須となる。レファレンス概念よりもガラス固化体1本分(1.35m)処分孔が深くなるものの、その実現性が見込めると考えられる。

その他の仕様設定については、概念設計案 OP-1 と同様である。

### ② 概念設計案の抽出

上記の検討結果より、代替設計オプション概念設計当初案に必要な修正を加えて概念設計案を 構築した。各概念設計案及びそれらの詳細については付属書 3-4 に詳述する。一例として、概念 設計案 OP-1 を図 3.2-4 に抜粋して示す。



図 3.2-4 代替設計オプション概念設計案 OP-1 (処分孔間隔の短縮)

### 4) 「評価指標(案)」による概念設計案の定性評価

3.1.3 で示した「評価指標(案)」に基づき、本検討におけるレファレンス概念とした堅置き・ブロック方式との比較により、代替設計オプションの概念設計案 OP-1~OP-4のそれぞれについて、 回収の容易性向上に関する定性的な評価を行った。表 3.2-3、表 3.2-4 に各概念設計案の容易性 向上に関する特徴を整理して示す。

廃棄体までのアクセス性については、概念設計案 OP-1~OP-4 の全てに組み込まれた次の二つの方策、

・坑道の短尺化

・オーバーパックと緩衝材の縁切り

の導入により、処分坑道の埋め戻し材の撤去量(係る作業量)の減少、坑道安定化作業量の減少、 ならびに処分孔内での緩衝材除去・撤去作業量の減少も期待できる(容易性向上)。一方で、水密 性及び構造強度を確保するケーシングを設置するため、ケーシングの蓋などの撤去作業が工程と して追加される(容易性低下)。また、処分坑道支保部材の高耐久化を導入できる場合は、処分坑 道の坑道安定化作業量はさらに減少する(容易性向上)。 廃棄体のハンドリング性については、全ての概念設計案 OP-1~OP-4 に組み込まれた"坑道の 短尺化"により、搬出経路が短縮される(容易性向上)。また、水密性を確保したケーシングの設 置により、オーバーパックは定置時の状態からほぼ変化しないため、把持部の健全性が保たれる。

個別の概念設計案については、概念設計案 OP-2 では、処分坑道の一断面に複数の処分孔(鉛 直及び水平方向)を設けるため、回収装置の動作や回収作業時の動線が複雑化する可能性に留意 が必要となる。概念設計案 OP-3 では、一つの処分孔に複数のオーバーパックを定置することか ら、底部のオーバーパックへの上載荷重が増加することに加え、処分孔が深くなる分の引き上げ の距離が増えることに留意が必要となる。概念設計案 OP-4 ではオーバーパックに複数のガラス 固化体を封入することにより、回収時のハンドリングに関して、総回収作業の回数や1体当たり の装置設置時間や移動時間は減少するものの(容易性向上)、オーバーパック1体当たりの重量が 増加することに留意が必要となる。その他に概念設計案に組み込むことが可能な方策として、オ ーバーパックの軽量化があり、重量の減少に伴い回収の容易性の向上が期待できる。

表 3.2-3 及び表 3.2-4 で示した内容は、今後、代替設計オプションの具体化に向けた検討が進むにつれて、詳細な比較検討の結果も詳細化することができる。

回収のの視点の	容易性向上 とポイント	レファレンス (竪置き・ブロック方式)	概念設計案 OP-1 (処分孔間隔の短縮)	概念設計案 OP-2 (処分孔数の増大)
廃 棄 体 ま での セ ス 性	廃棄体まで のアクセス 経るための 作業 かなさ	<ul> <li>回収廃棄体に到達するまでの作業</li> <li>①鉄筋コンクリートプラグの撤去</li> <li>②処分坑道埋め戻し材撤去・坑道</li> <li>③安定性確保の維持補修</li> <li>④換気・排水設備の復旧</li> <li>⑤上部埋め戻し材の撤去</li> <li>⑥上部ベントナイトブロックの撤去</li> <li>⑦ベントナイトブロックとオーバーパックの縁切り</li> </ul>	<ul> <li>回収廃棄体に到達するまでの作業</li> <li>①鉄筋コンクリートプラグの撤去</li> <li>②処分坑道埋め戻し材撤去・高耐久性支保 材適用による健全性確保</li> <li>③換気・排水設備の復旧</li> <li>④上部埋め戻し材の撤去</li> <li>⑤第1ケーシング蓋撤去作業</li> <li>⑥上部ベントナイトブロックの撤去</li> <li>⑦第2ケーシング蓋撤去作業</li> <li>・埋め戻し材の撤去量及び作業量が減少。</li> <li>・坑道安定化作業量が減少。</li> <li>・処分孔内での緩衝材除去・撤去作業量、作業数も減少。</li> <li>・ケーシングの蓋撤去作業が追加。</li> </ul>	<ul> <li>回収廃棄体に到達するまでの作業</li> <li>①鉄筋コンクリートプラグの撤去</li> <li>②処分坑道埋め戻し材撤去・高耐久性支保 材適用による健全性確保</li> <li>③換気・排水設備の復旧</li> <li>④上部埋め戻し材の撤去</li> <li>⑤第1ケーシング蓋撤去作業</li> <li>⑥上部ベントナイトブロックの撤去</li> <li>⑦第2ケーシング蓋撤去作業</li> <li>・埋め戻し材の撤去量及び作業量が減少。</li> <li>・坑道安定化作業量が減少。</li> <li>・処分孔内での緩衝材除去・撤去作業量、作業数も減少。</li> <li>・ケーシングの蓋撤去作業が追加。</li> </ul>
	物量	・回収装置一度の設置で1体のオ ーバーパックの回収	・変化なし	・変化なし
盛垂体	重量と形状	・円筒形オーバーパック(6.2t)	・変化なし (軽量化した場合は重量が減少)。	・変化なし (軽量化した場合は重量が減少)。
のハン ドリン	健全性	・オーバーパックは 1000 年健全 性	・把持部の健全性向上。	<ul><li>・把持部の健全性向上。</li><li>・底部オーバーパックへの上載荷重増加。</li></ul>
グ性	動線	・上部に引き上げ、遮蔽容器に格 納して搬出	<ul> <li>・搬出経路長さの短縮。</li> <li>・鉛直・水平方向の回収作業となり動線が 複雑化。</li> </ul>	・搬出経路長さの短縮。 ・孔が深くなる分の引き上げの距離増。
	作業環境	・処分坑道(約 20m <sup>2</sup> 程度)	・変化なし	・変化なし

表 3.2-3 代替設計オプション概念設計案 OP-1、OP-2 の定性評価

※青字は容易性が向上する内容、朱字は容易性が低下する内容を意味する。

3 - 19

回収の の視点	容易性向上 とポイント	レファレンス (竪置き・ブロック方式)	概念設計案 OP-3 (孔への複数定置)	概念設計案 OP-4 (複数のガラス固化体封入)
廃 棄 体 ま で の ア ク セ ス 性	廃棄体まで のアクセス 経するための 作業量の 少なさ	<ul> <li>回収廃棄体に到達するまでの 作業</li> <li>①鉄筋コンクリートプラグの 撤去</li> <li>②処分坑道埋め戻し材撤去・ 坑道</li> <li>③安定性確保の維持補修</li> <li>④換気・排水設備の復旧</li> <li>⑤上部埋め戻し材の撤去</li> <li>⑥上部ベントナイトブロックの撤去</li> <li>⑦ベントナイトブロックとオ ーバーパックの縁切り</li> </ul>	回収廃棄体に到達するまでの作業 ①鉄筋コンクリートプラグの撤去 ②処分坑道埋め戻し材撤去・坑道・高耐 久性支保材適用による健全性確保 ③換気・排水設備の復旧 ④上部埋め戻し材の撤去 ⑤第1ケーシング蓋撤去作業 ⑥上部ベントナイトブロックの撤去 ⑦第2ケーシング蓋撤去作業 ・埋め戻し材の撤去量及び作業量が減 少。 ・坑道安定化作業量が減少。 ・処分孔内での緩衝材除去・撤去作業量、 作業数も減少。 ・ケーシングの蓋撤去作業が追加。	<ul> <li>回収廃棄体に到達するまでの作業</li> <li>①鉄筋コンクリートプラグの撤去</li> <li>②処分坑道埋め戻し材撤去・坑道・高耐久性支保材 適用による健全性確保</li> <li>③換気・排水設備の復旧</li> <li>④上部埋め戻し材の撤去</li> <li>⑤第1ケーシング蓋撤去作業</li> <li>⑥上部ベントナイトブロックの撤去</li> <li>⑦第2ケーシング蓋撤去作業</li> <li>・埋め戻し材の撤去量及び作業量が減少。</li> <li>・坑道安定化作業量が減少。</li> <li>・処分孔内での緩衝材除去・撤去作業量、作業数も 減少。</li> <li>・ケーシングの蓋撤去作業が追加。</li> </ul>
	物量	・回収装置一度の設置で1体 のオーバーパックの回収	・変化なし	・総回収作業の回数削減。 ・1体当たりの装置設置時間、移動時間は減少。
	重量と形状	・円筒形オーバーパック (6.2t)	・変化なし (軽量化した場合は重量が減少)。	・重量が増加。
廃棄体 のハン ドリン	健全性	・オーバーパックは 1000 年 健全性	<ul> <li>・把持部の健全性向上。</li> <li>・底部オーバーパックへの上載荷重増加。</li> </ul>	・把持部の健全性向上。
グ性	動線	・上部に引き上げ、遮蔽容器 に格納して搬出	<ul> <li>・搬出経路長さの短縮。</li> <li>・孔が深くなる分の引き上げの距離増。</li> </ul>	・搬出経路長さの短縮。
	作業環境	・処分坑道(約 20m <sup>2</sup> 程度)	・変化なし	<ul> <li>オーバーパックの長尺化に伴い作業空間が手狭 となる(処分坑道断面拡大により解消するが、埋 め戻し材の撤去量などとのトレードオフに留意)</li> </ul>

表 3.2-4 代替設計オプション概念設計案 OP-3、OP-4 の定性評価

※青字は容易性が向上する内容、朱字は容易性が低下する内容を意味する。

3-20

### 3.2.2 代替設計オプションの概念設計案の具体化に係る技術開発課題の抽出と整理

代替設計オプション概念設計案の具体化や実現性の向上に向けた技術課題の検討を行い、今後 取り組むべき技術開発課題を抽出した。

なお、概念設計案に対する操業期間の安全性への影響や閉鎖後長期の安全性への影響について は、第4章に整理した回収可能性の維持期間に伴う影響の定量化手法に基づき、今後、検討を進 める。また、代替設計オプションの概念設計案に関する今後の具体化においては、回収の容易性 の向上に加えて、多様な設計因子を踏まえた設計の最適化の観点にも留意が必要となる。

### (1) 概念設計案 OP-1 に関する技術開発課題

概念設計案 OP-1 を具体化するために重要と考えられる技術開発課題として以下が挙げられる。

- ・第1ケーシングの円筒部と蓋及び底版の接合部の構造、蓋の撤去方法
- ・乾燥状態の緩衝材を効率的に撤去する方法
- ・処分孔からオーバーパックを円滑に引き出す方法
- ・地下施設の劣化状態を考慮した(に対応可能な)回収技術

○ 第1ケーシングの円筒部と蓋及び底版の接合部の構造、蓋の撤去方法

第1ケーシングには、処分孔間隔を短縮するための処分孔の支保、緩衝材を乾燥状態で撤去 するための止水機能を期待している。さらに、第1ケーシングに止水機能を付与した場合、深 度相当の静水圧が作用する可能性があるため、静水圧に耐えうる構造強度が求められる。その 際に必要となる耐圧厚さはオーバーパックと同等程度となる(既述のとおり)。

構造強度に対しては、耐用年数に応じた腐食代を考慮した上で構造解析などにより設定する ことが可能と考えられる。止水性の確保に対しては、第1ケーシングの円筒部と底版、円筒部 と蓋の接合部の構造について十分な検討、実証が必要である。一例として、溶接による接合が 考えられるが、制約のある原位置で適用できる溶接技術で長期間にわたって止水性を確保でき ることを実証する必要がある。また、溶接などにより円筒部と蓋を堅牢に接合した場合には、 回収時の効率的な撤去方法を検討する必要がある。

なお、後述する概念設計案 OP-2、OP-3、OP-4 も第1ケーシングを配置するため同様の技術 開発課題を有する。

○乾燥状態の緩衝材を効率的に撤去する方法

概念設計案 OP-1 では、オーバーパック上部の緩衝材のみを撤去すればよく、かつ緩衝材に は地下水が浸潤しないため初期の乾燥状態が維持されている。これまで検討されてきた緩衝材 の撤去方法とは撤去範囲と材料の状態が異なるため、これまでに検討されてきた方法の適用性 を確認する、あるいは新たな撤去方法を検討する必要がある。緩衝材の撤去方法については、 第2章において、密度、配合比、含水比などをパラメータとした機械的な除去技術の整備を進 めており、この成果を参照することができる。

なお、後述する概念設計案 OP-2、OP-3、OP-4 も止水性を有する第1ケーシングを配置する ため同様の技術開発課題を有する。

○処分孔からオーバーパックを円滑に引き出す方法

オーバーパックを処分孔から引き出す際には、オーバーパックと孔との間に隙間が確保され ていることが円滑な引き出し、及び定置装置を兼用する上で必要となる。そのためには、フラ ンスの概念のように、オーバーパックにスペーサーを装着させるなどの工夫が考えられる。ス ペーサーに付与する機能及び設計要件、仕様などを検討し、材料や構成としての長期(回収可 能性の維持期間中)の健全性や製作に関する実現性を確認する必要がある。

○地下施設の劣化状態を考慮した(に対応可能な)回収技術

定置後に時間が経過した地下施設(構成要素)の状態には不確実性が存在する。回収作業時 には、これらの状態変化に対応可能な技術が必要であり、回収装置などに付与する機能、要件 を検討し、適用可能な技術を整備しておく必要がある。

### (2) 概念設計案 OP-2 に関する技術開発課題

概念設計案 OP-2 を具体化するために必要な技術開発課題として以下が挙げられる。概念設計 案 OP-1 と重複する技術開発課題は既述のとおりである(割愛する)。

- ・ケーシングを設置した水平処分孔の緩衝材及びオーバーパックの定置方法
- ・第1ケーシングの円筒部と蓋及び底版の接合部の構造、蓋の撤去方法
- ・乾燥状態の緩衝材を効率的に撤去する方法
- ・オーバーパックを円滑に孔から引き出す方法
- ・地下施設の劣化状態を考慮した(対応可能な)回収技術

○ケーシングを設置した水平処分孔の緩衝材及びオーバーパックの定置方法

円筒形の空間に分割ブロックを積み上げる方法には、隙間の施工方法や品質管理の面で課題 が想定されるが(原子力環境整備促進・資金管理センター,2008)、フランスでは使用済燃料に関 する 2 重管構造の概念が検討され、リング型の緩衝材ブロックの定置が検討された例がある。 また、スイスでは横置きの概念に対して緩衝材ペレットによる充填方法が検討されていること から、要件や仕様の具体化とともに水平処分孔の緩衝材の定置/充填方法や技術の高度化が必 要となる。

○オーバーパックを円滑に孔から引き出す方法

本課題については概念設計案 OP-1 で述べたとおりであるが、概念設計案 OP-2 ではオーバ ーパックを横置きする場合も想定しているため、その場合には荷重及び摩擦に対応できる潤滑 部品の導入についても留意が必要となる。

### (3) 概念設計案 OP-3 に関する技術開発課題

概念設計案 OP-3 を具体化するために重要と考えられる技術開発課題として以下が挙げられる。 上述した概念設計案と重複する技術開発課題は既述のとおりである(割愛する)。

- ・深い処分孔の掘削方法と第1ケーシングの設置方法
- ・異なる深さにオーバーパックを定置する装置、異なる深さに定置されたオーバーパックを 回収する装置の開発
- ・処分孔底部の緩衝材の長期力学挙動評価
- ・第1ケーシングの円筒部と蓋及び底版の接合部の構造、蓋の撤去方法
- ・乾燥状態の緩衝材を効率的に撤去する方法
- ・処分孔からオーバーパックを円滑に引き出す方法
- ・地下施設の劣化状態を考慮した(対応可能な)回収技術

○深い処分孔の掘削方法と第1ケーシングの設置方法

概念設計案 OP-3 の処分孔は、レファレンス概念に比べ4 倍程度深く、スウェーデンの事例 (Svensk Kärnbränslehantering AB, 2011)よりも2 倍程度深い。また、第1ケーシングは掘削 と並行して設置する必要があると考えられる。そのため、掘削方法と第1ケーシングの設置方 法を合わせて検討し、実証する必要がある。

○異なる深さにオーバーパックを定置する装置、異なる深さに定置されたオーバーパックを回 収する装置の開発

概念設計案 OP-3 は、処分孔に複数のオーバーパックを定置するため、これに対応可能な定置装置及び回収装置を開発し、実証する必要がある。

○処分孔底部の緩衝材の長期力学挙動評価

概念設計案 OP-3 は、処分孔に複数のオーバーパックを定置するため、レファレンス概念に 比べ、底部の緩衝材に作用する鉛直力が大きく、沈下量をはじめとする長期的な力学挙動の評 価を行い、その成立性を確認する必要がある。

### (4) 概念設計案 OP-4 に関する技術開発課題

概念設計案 OP-4 を具体化するために重要と考えられる技術開発課題として以下が挙げられる。 上述した概念設計案と重複する技術開発課題は既述のとおりである(割愛する)。

- ・深い処分孔の掘削方法と第1ケーシングの設置方法
- ・処分孔底部の緩衝材の長期力学挙動評価
- ・第1ケーシングの円筒部と蓋及び底版の接合部の構造、蓋の撤去方法
- ・乾燥状態の緩衝材を効率的に撤去する方法
- ・処分孔からオーバーパックを円滑に引き出す方法
- ・地下施設の劣化状態を考慮した(対応可能な)回収技術

○深い処分孔の掘削方法と第1ケーシングの設置方法

概念設計案 OP-4 は概念設計案 OP-3 と比較すると処分孔の深さが 1/3 程度であるが、レフ アレンス概念と比較すると、少なくともガラス固化体1本分深くなる。そのため、概念設計案 OP-3 と同様の観点で、掘削方法と第1ケーシングの設置方法を合わせて検討し、実証する必 要がある。

○処分孔底部の緩衝材の長期力学挙動評価

底部の緩衝材に作用する鉛直力は概念設計案 OP-3 と比較すると小さいものの、レファレン ス概念と比較すると大きくなる。そのため、概念設計案 OP-3 と同様の観点で、沈下量をはじ めとする長期的な力学挙動の評価を行う必要がある。

### 3.2.3 オーバーパックを回収の対象物の最小モジュールとした代替設計オプションの開発まとめ

回収作業におけるハンドリング対象物の最小モジュールをオーバーパックとした場合の"回収 の容易性の向上"に焦点をあてて、代替設計オプションの概要案及びそれを具体化した概念設計 案を提示した。概念設計案に対する熱影響の評価による成立性の検討では、回収の容易性を高め た方策を保持しつつ、熱的影響の成立性を満足する見通しが得られた。また、工学的実現性に係 る検討を通して技術開発課題を抽出した。

概要設計案を具体化するための主な技術開発課題は以下のように整理できる。概要設計案に共

通の技術開発課題として、緩衝材除去の作業を省略することを目的としたオーバーパックと緩衝 材の縁切りのためのケーシングの構造検討、及びそれに関連した課題が抽出された。一方で、緩 衝材の除去に関する技術の高度化は第2章で開発が進められていることから、これらの課題につ いては、今後の第2章の成果を踏まえて更なる技術開発の要否の検討を行う。

○概要設計案に共通の技術開発課題

- ・第1ケーシングの円筒部と蓋及び底版の接合部の構造、蓋の撤去方法
- ・処分孔からオーバーパックを円滑に引き出すための潤滑部品やスペーサーに付与する機能 及び設計要件、仕様などの検討、製作に関する実現性の確認
- ・地下施設の劣化状態を考慮した(対応可能な)回収技術の検討

○概要設計案ごとの技術開発課題

- ・深い処分孔の掘削方法と第1ケーシングの設置方法
- ・ケーシングを設置した水平処分孔の緩衝材及びオーバーパックの定置方法
- ・異なる深さにオーバーパックを定置する装置、異なる深さに定置されたオーバーパックを 回収する装置の開発
- ・処分孔底部の緩衝材の長期力学挙動評価

# 3.3 PEM を回収の対象物の最小モジュールとした代替設計オプションの開発

回収作業におけるハンドリング対象物の最小モジュールを PEM とした場合の"回収の容易性 の向上"に焦点をあてて、前節 3.1 で示した検討手順により、代替設計オプションの概要案及び それを具体化した概念設計案を整理した。概念設計案については、成立性及び工学的実現性の観 点から検討を行いその見通しを得るとともに、今後の具体化(詳細設計への展開や施工技術など の開発整備など)に向けた技術課題を抽出し対応方策等を整理した。

### 3.3.1 回収の容易性を高めた代替設計オプション概念設計案の開発

### (1) 回収の容易性を高めた代替設計オプション概要案の考案

# 1) 代替設計オプション概要案構築の進め方

代替設計オプション概要案の構築にあたり、表 3.1-2 で示した工学的方策をベースとして、表 3.3-1 のように PEM を対象とした方策に即したものに調整した。なお、本検討では前節 3.2 と同様に、"坑道"と"孔"を次のように定義している。

・坑道:回収装置などの本体が入れる地下構造物

・孔:回収装置などの装置本体は入れず、坑道に設置した装置からアームなどを伸ばして定置・ 回収を行う地下構造物

これらの工学的方策の組み合わせにより、代替設計オプションの概要案の構築を試みた。どの 方策(単独或いは組み合わせ)が最も容易性向上に寄与するかは、回収作業時間の短縮効果とし て今後定量化する必要がある。また、"回収の作業時間(全体)"は、必ずしも"単位ユニット当 たりの作業時間"と"ユニット数"の積ではないため、対策の導入の検討においては"単位ユニ ット当たりの作業時間"の短縮を優先的に考慮するが、ここでの検討対象である PEM を"単位 ユニット"と考えれば、ユニット数を減らす対策が一つの廃棄体(ガラス固化体)あたりの回収 時間の短縮に繋がる可能性があるため、その観点からも検討を進めた。

まずは"単位ユニット当たりの作業時間"に着目し、第2章の検討を踏まえて、回収の容易性 向上の視点のうちアクセス性向上の観点から次の二つの方策を基軸として概要案を検討した。

・方策A: 隙間充填を必要としない処分孔定置

・方策 E: 坑道の短尺化

また、"ユニット数"に着目したものとして、次の方策 I を基軸に概要案を検討した。この場合、 大型の PEM モジュールを扱うことになるため、方策 B を併用して概要案を構築することとした。

・方策 I: 複数の廃棄体を格納する PEM容器の採用

・方策 B: 大断面坑道への定置

以上より、方策Aと方策Eを基軸とする"隙間充填を必要としない処分孔定置概念"、及び方策Iと方策Bを基軸とする"大型モジュール大断面坑道定置概念"の二種の概要案の検討に着手した。

ここで、各概要案ともに、回収可能性を維持する状態を"坑道を埋め戻さない状態"とするこ とにより処分坑道の再掘削の作業量を低減する方策もあるが、そのような方策の検討では、開放 坑道の維持管理の負荷に加えて人工バリアや天然バリアへの影響を評価する必要があるため、第 4章の回収可能性の維持に伴う影響に関する定量化手法の整備で、そのような影響を定量化の見 通しが得られた段階以降に検討することとした。 表 3.3-1 PEM を回収の対象とした回収の容易性向上の工学的方策

No.	工学的方策の具体的な内容
Α.	隙間充填を必要としない円形小断面坑道定置
В.	大断面坑道での定置
С.	PEM による緩衝材とオーバーパックの一体型回収
D.	(PEM 回収の場合、該当なし)
Е.	定置坑道の短尺化
F.	撤去容易なプラグの採用
F'.	除去が容易な隙間充填材の適用
G.	高耐久性支保工等の適用
Н.	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 PEM 容器の採用
J.	小断面坑道に複数の廃棄体を定置
К.	オーバーパックの軽量化
L.	緩衝材の軽量化
М.	PEMの軽量化(※結果的に K と L を包含する。)
Ν.	矩形 PEM の採用
0.	止水機能を有する支保工の採用
Ρ.	PEM 容器の耐腐食性材料の採用
Q.	PEM 容器の厚さを増加
R.	大断面坑道に廃棄体の集中定置
S.	回収動作が単純な定置方式と装置の採用
Τ.	動作と動線とが単純な定置坑道レイアウト
U.	大断面作業坑道と小断面定置坑道の組み合わせ

注)見直した PEM に関する工学的対策は基本的に前年度の構造を踏襲して いるため、対応を容易にするために A~U のフラグを付して表記する。

# 2) 着目した工学的方策とその組み合わせに関する整理

着目した工学的方策A、E、I、Bとそれらの組み合わせについて以下に整理した。組み合わせの可否はH31年度に整理した成果(原子力環境整備促進・資金管理センター, 2020)を参照した。

## ① 方策 A 隙間充填を必要としない処分孔定置

処分孔に隙間充填材を施工せずに PEM を定置することにより、回収時の隙間充填材の除去作 業を削減する方策である。処分孔には鋼製ケーシングなどを設置することを想定している。

# ② 方策 E 定置坑道の短尺化

処分孔定置方式の場合、処分坑道の埋め戻し材の撤去が廃棄体へのアクセス性を確保するうえ で重要な工程となるが、物量が多い。そこで、処分坑道総延長の短縮を図ることとした。処分坑 道総延長を短縮するためには、ガラス固化体1体あたりの処分坑道長を短くすればよい。手段と しては以下のパターンが考えられる。

- ・処分孔の間隔を短尺化する。
- ・複数方向へ処分孔を設ける。
- ・一つの処分孔に定置する PEM の数を増やす。
- ・オーバーパック1本あたりのガラス固化体の封入数を増やす。

方策 E は方策 A と組み合わせて概要案を構築することが可能である。

### ③ 方策 | 複数の廃棄体を格納する PEM 容器の採用

一つの PEM に複数のガラス固化体を格納することで、1 回の回収作業で複数のガラス固化体 を回収することを意図した方策である。方策 I では PEM が大型のモジュールとなるため、レフ アレンス概念と同規模の処分坑道断面では回収時の作業空間の確保が困難となる。方策 I を概要 案の基軸とする場合には次に述べる"方策 B 大断面坑道への定置"を併せて組み込み、作業性 を高めるための空間を確保することがハンドリング性向上の観点から必要となる。

#### ④ 方策 B 大断面坑道への定置

大断面坑道へ PEM を定置することで、回収装置の可動性が向上することを意図した方策であ る。フォークリフトなどの機械を使用すれば、回収時の動線を単純化した効率の良い作業が可能 となる。また、大断面坑道の定置形態として埋め戻しを坑道断面の上部のみとすることや、坑道 に PEM を集中定置することで、アクセス性の向上にも寄与すると考えられる。

工学的方策 A 及び E、また、工学的方策 I 及び B はそれぞれ組み合わせることが可能であり、 二種の概要案を構築することができる。

### 3) 代替設計オプションの概要案の構築

前述したとおり、方策 A と方策 E を基軸とする"隙間充填を必要としない処分孔定置概念"、 及び方策 I と方策 B を基軸とする"大型モジュール大断面坑道定置概念"の二種の概要案を構築 した。以下、"隙間充填を必要としない処分孔定置概念"には概要案 PEM-1、"大型モジュール大 断面坑道定置概念"には概要案 PEM-2 と略称を付けて呼ぶ。

概要案 PEM-1 及び PEM-2 に表 3.3-1 の工学的方策のうち、組み合わせ可能なものを組み込んで構築を行った。二つの概要案はどちらも多くの工学的方策を組み合わせることが可能であり、 多くのバリエーションへの展開ができる。

## ① 概要案 PEM-1 "隙間充填を必要としない処分孔定置概念"

着目した工学的方策 A と E を基軸とする概要案 PEM-1 "隙間充填を必要としない処分孔定 置概念"に組み込み可能な表 3.3-2 の方策を集約させることで回収の容易性を高める代替設計オ プション概要案を構築した。

No.	工学的方策の具体的な内容	除外理由
Α.	隙間充填を必要としない円形小断面坑道定置	
В.	大断面坑道での定置	Aと相反
С.	PEM による緩衝材とオーバーパックの一体型回収	
D.	(PEM 回収の場合、該当なし)	
Е.	定置坑道の短尺化	
F.	撤去容易なプラグの採用	
F'.	除去が容易な隙間充填材の適用	Aと相反
G.	高耐久性支保工等の適用	
H.	アタッチメントタイプの支保材導入	Aと相反
I.	複数の廃棄体を格納する PEM 容器の採用	
J.	小断面坑道に複数の廃棄体を定置	
К.	オーバーパックの軽量化	
L.	緩衝材の軽量化	
M.	PEMの軽量化(※結果的にKとLを包含する。)	
N.	矩形 PEM の採用	Aと相反
0.	止水機能を有する支保工の採用	
Ρ.	PEM容器の耐腐食性材料の採用	Aと相反
Q.	PEM 容器の厚さを増加	
R.	大断面坑道に廃棄体の集中定置	
S.	回収動作が単純な定置方式と装置の採用	
Τ.	動作と動線とが単純な定置坑道レイアウト	
U.	大断面作業坑道と小断面定置坑道の組み合わせ	

表 3.3-2 代替設計オプション概要案 PEM-1 に組み込んだ工学的方策

上記の工学的方策を組み合わせて構築した概要案 PEM-1 とそのバリエーションを図 3.3-1~ 図 3.3-3 に示す。概要案 PEM-1 では、レファレンス概念の処分坑道に相当する坑道を"作業坑 道"と呼ぶこととする。各概要案の詳細は付属書 3-5 に示す。





#### 基本形態PEM-1HO

作業坑道から隙間充填を必要としない処分孔を ケーシングを用いて建設し、ケーシング内にPEMを 1体定置する。定置には自走式プッシングマシン、 回収はプルマシンでケーシングから引っ張り出す。



#### バリエーション1 PEM-1H1

隙間充填を必要としない処分孔を水平2方向に設置し、ケーシング内部に 複数のPEMを定置。定置時には自走式プッシングマシン、回収時にはプルマ シンを使用し、横孔から引き出す。



#### バリエーション2 PEM-1H2

隙間充填を必要としない処分孔を斜め2方向に設置し、ケーシング内部に 複数のPEMを定置。定置・回収とも同じ装置を適用する。装置はPEMの 自重を活用し、回収時には把持装置でPEMI頁部を把持したプルマシンで 引き上げられる。

図 3.3-1 代替設計オプション概要案 PEM-1の水平処分孔定置のバリエーション



図 3.3-2 代替設計オプション概要案 PEM-1 の鉛直処分孔定置のバリエーション



図 3.3-3 代替設計オプション概要案 PEM-1の水平処分孔定置と鉛直(斜め)処分孔定置の バリエーション

# ② 概要案 PEM-2 "大型モジュール大断面坑道定置概念"

着目した工学的方策方策 I と方策 B を基軸とする概要案 PEM-2 "大型モジュール大断面坑道 定置概念"に組み込み可能な表 3.3-3 の方策を集約させることで回収の容易性を高める代替設計 オプション概要案を構築した。

表 3.3-3 代替設計オプション概要案 PEM-2 に組み込んだ工学的方策

No.	工学的方策の具体的な内容	除外理由
Α.	隙間充填を必要としない円形小断面坑道定置	B と相反
В.	大断面坑道での定置	
С.	PEM による緩衝材とオーバーパックの一体型回収	
D.	(PEM 回収の場合、該当なし)	
Е.	定置坑道の短尺化	
F.	撤去容易なプラグの採用	
F'.	除去が容易な隙間充填材の適用	
G.	高耐久性支保工等の適用	
H.	アタッチメントタイプの支保材導入	
Ι.	複数の廃棄体を格納する PEM 容器の採用	
J.	小断面坑道に複数の廃棄体を定置	
К.	オーバーパックの軽量化	
L.	緩衝材の軽量化	
M.	PEMの軽量化(※結果的にKとLを包含する。)	
Ν.	矩形 PEM の採用	
0.	止水機能を有する支保工の採用	
Ρ.	PEM容器の耐腐食性材料の採用	
Q.	PEM 容器の厚さを増加	
R.	大断面坑道に廃棄体の集中定置	
S.	回収動作が単純な定置方式と装置の採用	
Τ.	動作と動線とが単純な定置坑道レイアウト	
U.	大断面作業坑道と小断面定置坑道の組み合わせ	

上記の工学的方策を組み合わせて構築した概要案 PEM-2 とそのバリエーションを図 3.3-4 に 示す。各概要案の詳細は付属書 3-5 に示す。



#### 基本形態 PEM-20

大断面坑道内にPEMを集中定置する概念。定置・回収には天井 クレーンを用い、吊り上げた状態で坑口まで移動させる。回収した PEMは坑道内で台車に乗せ坑口まで搬出する方法も考えられる。



### バリエーション1 PEM-21

短尺大断面坑道に掘削ずりから作成した人工岩盤とケーシングの定置孔を設置し、その内部に PEMを複数定置する。定置・回収は天井クレーンを用いて行い、坑口まで搬出、あるいは坑道 内で積替し搬出する。



バリエーション2 PEM-22

短尺大断面坑道軸直角方向に、ガラス固化体を複数格納した矩形PEMを横置き定置する。 定置・回収は遠隔フォークリフトを用いる。

以上のように PEM を回収のハンドリング対象物の最小モジュールとした代替設計オプション の概要案は、多くのバリエーションへと展開できる。よって、上記から代替設計オプションの概 念設計案として以降で検討対象とする案を選定し、概念設計当初案を設定した。他の概要案への 展開を考慮して選定した結果、概要案 PEM-1V1 "鉛直処分孔複数 PEM 竪置き定置方式"及び概 要案 PEM-22 "大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式"の二つを具体化して、

図 3.3-4 代替設計オプション概要案 PEM-2 のバリエーション

代替設計オプション概念設計案としての具体化に向けて検討を進めた。検討の詳細は付属書 3-5 に示す。

### (2) 代替設計オプションの概念設計案の成立性及び工学的実現性の検討

# 1) 代替設計オプションの概要案の具体化による概念設計当初案の検討

上記で選定した次の二つの代替設計オプションの概要について、具体化に向けた検討を進め、 概念設計当初案として構築した。

- ・概要案 PEM-1V1 : 鉛直処分孔複数 PEM 竪置き定置方式
- ・概要案 PEM-22 : 大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式

#### ① 概念設計当初案 PEM-1V1(鉛直処分孔複数 PEM 竪置き定置方式)

本案では、高耐久・耐腐食性の鋼製ケーシングを支保材に用いた隙間充填を必要としない鉛直 処分孔に複数(例として5体を想定)の円筒形 PEM を竪置きに定置し、上部に遮蔽用の埋め戻 し材を定置する。また、水密性と耐腐食性を有する PEM 容器は鋼製で、外側には耐久性の高い セラミックランナーと呼ばれるスペーサーを装着して鋼製ケーシングとの間の隙間を確保する。

PEM の設定に当たっては、NUMO の包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)の横置き・PEM 方式の PEM の部材寸法を参考にして、PEM 容器、オーバーパック、緩衝 材、埋め戻し材の材質、部材厚などの仕様は、レファレンス概念に示されたものを基本とした。

PEM が5体定置できること、PEM と鋼製ケーシング間に隙間を考慮し、最上部のPEM の上 に埋め戻し材があることを考慮して、処分孔の寸法を設定した。鋼製ケーシングの厚さについて は、PEM 容器の厚さと同様に設定した。

作業坑道の大きさは、NUMOの包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018) の竪置き・ブロック方式の処分坑道を参考にして設定した。作業坑道は維持管理などの容易性向 上のために高耐久性の支保を配し、端部には脱着が容易な鋼製プラグを設置する。

回収作業は作業坑道に設置した単純な動作と動線で作動する回収装置を用いて、一つの処分孔 に定置されている複数の PEM を効率よく回収する。処分場レイアウトは物量を考慮した形状と 形態とし、作業坑道は二方向からのアクセスを確保する。

本概念設計当初案 PEM-1V1 を図 3.3-5~図 3.3-6 に示す。上述した検討の詳細は付属書 3-6 に示す。



図 3.3-5 代替設計オプション概念設計当初案 PEM-1V1 の PEM の仕様設定



図 3.3-6 代替設計オプション概念設計当初案 PEM-1V1 の仕様設定

本概念設計当初案 PEM-1V1 は、高耐久性のケーシングを支保材に用いた隙間充填を必要とし ない処分孔に PEM を複数定置することとしており、まずはこの概念設計案の成立性の見通しを 得る必要がある。そこで、PEM の外側に設ける隙間の許容範囲について、製作実績を踏まえた緩 衝材の乾燥密度を考慮して、単位断面あたりの概略検討を行った。検討の詳細は付属書 3-7 に示 す。

検討より、緩衝材製作時に乾燥密度 1.8Mg/m3 で施工した場合には隙間の幅は 121mm 程度、 乾燥密度 1.7Mg/m3 で施工した場合には 91mm 程度までの隙間が許容される結果が得られた。 ただし、この結果はさまざまな条件を仮定した概算の検討であるため、各構成要素の寸法などの 見直しなどに合わせてより詳細な検討を行う必要がある。

### ② 概念設計当初案 PEM-22(大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式)

本案では、高耐久性支保工を採用した大断面の定置坑道に、複数(2 体)のオーバーパックを 格納した矩形 PEM を横置きに定置し、熱影響の緩和策として緩衝材あるいは埋め戻し材を詰め た容器を交互に定置する。矩形 PEM 容器に耐腐食材料を用いて回収時の健全性を確保する。

矩形 PEM の寸法設定に当たり、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、PEM 容器の寸法・ 形状などは NUMO の包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)の横置き・ PEM 方式を参考にした。また、緩衝材ブロックを用いる場合など、オーバーパックと緩衝材の間 に隙間が存在する場合には充填材で埋めるものとして、矩形 PEM の寸法を設定した。

大断面の定置坑道は NUMO の包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018) の TRU 廃棄物処分場の処分坑道を参考にして設定した。この大断面坑道の上部のみ撤去容易な 材料で埋め戻し、坑道端部の定置連絡坑道には解体が容易な鋼製プラグを設置する。また、大断 面坑道には高耐久性の二次覆工を施工する。PEM は回収動作と動線が単純となるフォークリフ トあるいは天井クレーンで定置・回収し、回収した PEM の搬出は、物流と動線を単純化したレ イアウトを考慮することで効率性を向上させる。

本概念設計当初案 PEM-22 を図 3.3-7、図 3.3-8 に示す。上述した検討の詳細は付属書 3-6 に示す。

3-34



図 3.3-7 代替設計オプション概念設計当初案 PEM-22 の矩形 PEM の仕様設定



図 3.3-8 代替設計オプション概念設計当初案 PEM-22 の仕様設定

# 2) 熱影響の評価による概念設計案の成立性の検討

# ① 熱影響評価の方針

概念設計当初案に対して、熱影響評価によるニアフィールドの温度変化の把握を行い、緩衝材の制限温度(ベントナイト温度 100℃)を超えない坑道中心間距離や廃棄体定置間隔などを検討した。また、熱影響評価により坑道中心間距離や廃棄体定置間隔などが見直された検討結果について、意図した回収の容易性向上のための方策が保持されているか否かの評価も併せて行った。

なお、本検討ステップにおける概念設計当初案を対象とした熱影響評価では、設計の詳細さとの 関係から(粗い)、今後さらに詰めるべき不確定要素を含んでいることに留意されたい。

#### ② 概念設計当初案に対する熱影響評価

上記の方針により、代替設計オプション概念設計当初案に対する熱影響評価を行った。得られた熱伝導解析の詳細については付属書 3-8 に詳述する。

#### 概念設計当初案 PEM-1V1(鉛直処分孔複数 PEM 竪置き定置方式)

本案を対象とした熱伝導解析を通して、緩衝材の最高温度が制限温度(100℃)を超えない概 念設計当初案の仕様例のうち、坑道長さが最も短くなる(埋め戻し材の撤去量が最も少なくな る)仕様例を設定した。同仕様例のガラス固化体1体あたりの作業坑道長さを表 3.3・4に示す。 同表に示すように、概念設計当初案 PEM・1V1 (Case・A2)ではガラス固化体1体あたりの処分 坑道長さは 2.38m となり、レファレンス概念の 6.66m よりも短尺化できる見込みがある。作 業坑道の中心間距離は 15m となり、レファレンス概念の 13m よりも大きくなるが、平面レイ アウトから考えれば全体の坑道長は短尺化できる(埋め戻し材の撤去量が少なくできる)こと から、本案では回収の容易性向上は保持される見通しである。

後述の概念構築の実現性(設計・施工の実現性)の評価では、上記の結果を踏まえて概念設計当初案を修正し、処分孔中心間離間距離を11.9m、作業坑道中心間離間距離を15mと設定して概念設計案とする。

表 3.3-4 緩衝材制限温度(100℃)を超えない概念設計当初案 PEM-1V1 の仕様例とガラス 固化体1体あたりの処分坑道長さ

概念設計当初案 (解析ケース)	ー断面あたり のガラス 固化体定置数	処分孔 中心間 距離 (m)	作業坑道 中心間 距離 (m)	緩衝材 最高温度 (℃)	ガラス固化体 1体あたりの 処分坑道長さ (m)
PEM-1V1 (case-A2)	5	11.9	15	98.9	2.38

概念設計当初案 PEM-22(大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式)

本案を対象とした熱伝導解析結果から得られた概念設計当初案の仕様例及び緩衝材最高温 度結果を整理して表 3.3-5 に示す。表中の各間隔は、熱影響緩和のため、緩衝材または埋め戻 し材を容器に詰めたもの(バッファー容器)を定置することによる PEM 同士の間隔である。 同表より、概念設計当初案 PEM-22 は、定置後換気を行い、定置後 2 年から 20 年程度までの 間に坑道開放状態から埋め戻しすることにより熱的成立性が見通せる結果となった。PEM の 定置密度を制御するための PEM 及びバッファー容器の定置パターンについては更なる検討の 余地がある。

レファレンス概念との比較は単純にはできないが、この仕様例から想定される PEM-22 の定 置坑道の掘削量は約 375 万 m<sup>3</sup> (断面積 150m<sup>2</sup>×25,000m) となり、包括的技術報告書レビュ 一版(原子力発電環境整備機構, 2018)に示された新第三紀堆積岩類の掘削量 約 677 万 m<sup>3</sup> (処 分坑道 613 万 m<sup>3</sup> +処分孔 64 万 m<sup>3</sup>) よりも少なくなると考えられる。熱的な成立性を考慮し て定置パターンを変更しても、回収の容易性向上が保持できる見通しである。

後述の概念構築の実現性(設計・施工の実現性)の評価では、熱的な成立性の観点から矩形 PEMの定置後直ちに埋め戻すことができないために、操業工程を工夫して、一定の期間を経 た後に埋め戻すことを前提とした概念設計案として、ここに示した仕様例について検討を行う ことにする。

概念設計 当初案 (解析ケース)	定置坑道 上部の 状態	中央部 間隔 (m)	坑道 軸方向 間隔 (m)	鉛直方向 間隔 (m)	緩衝材 最高温度 (℃)	緩衝材 最高温度 時刻 (年)
PEM-22 (Case-B1)	埋め戻し	2.168 (緩衝材または 埋め戻し材 設置)	0	2.168 (緩衝材または 埋め戻し材 設置)	140	17
PEM-22 (Case-B1a)	開放	2.168 (緩衝材または 埋め戻し材 設置)	0	2.168 (緩衝材または 埋め戻し材 設置)	85	2

表 3.3-5 概念設計当初案 PEM-22 の仕様例と緩衝材の最高温度

### 3) 概念設計案の実現性(設計・施工の実現性)の評価

熱影響評価の結果を踏まえて修正した概念設計当初案を概念設計案として、設計・施工の実現 性の観点から評価する。さらに、評価結果を踏まえ、必要に応じて見直しを行い、実現可能性の ある(非現実的ではない)概念設計案を構築する。なお、本検討での実現性評価は、設計・施工 の実現性を評価対象としており、建設工程、建設費用などは考慮していないことに留意されたい。 検討の詳細については付属書 3-9 に詳述する。

# ① 概念設計案の実現性評価

- (a) 概念設計案 PEM-1V1(鉛直処分孔複数 PEM 竪置き定置方式)の実現性評価 本案は次の二つの方策を基軸として構築されている。
  - ・方策A:隙間充填を必要としない処分孔定置
  - ・方策 D: 定置坑道の短尺化

方策 A を実現させるためには、狭隘な孔内において PEM を円滑に定置・回収できる必要があ る。そのためには、狭隘な孔内での PEM の位置決め、PEM の円滑な移動、ならびに孔内の環境 などを考慮する必要がある。狭隘な孔内での位置決めについては、緩衝材が同心円状に膨潤する こと、また、回収作業時の位置決めの容易性の確保(遠隔操作による回収作業性が高まる)のた めに、孔と PEM の芯を合わせることが望ましい。この対策として、PEM 容器にスペーサーを付 けることが考えられる。これは堅置き方式、横置き方式に関わらず必要となる。狭隘な孔内での 定置・回収時の PEM の円滑な移動については、PEM 容器に潤滑部品を取り付けることなどが対 策として考えられる。潤滑部品は PEM の移動時に作用する力に耐えうる強度が必要であり、ま た、孔壁と併せて潤滑性を確保する必要がある。潤滑部品はこのように付与する機能や要件から、 材料の選定や寸法などの設計がされるが、潤滑部品の寸法は PEM の重量と隙間の幅とのトレー ドオフの関係に留意して設定する必要がある。潤滑部品は横置き方式には必要な構成要素である。 これらから、スペーサー、潤滑部品に対する検討事項として、長期的に不活性な材料、PEM 容器 への装着方法、衝撃や荷重に対する機械的な強度や耐久性などが挙げられる。

また、孔内の環境については、孔と PEM との隙間を確保すること、孔内の状態変化を抑制することが回収の容易性向上のために求められる。そのためには、孔壁との間に内空が確保でき、

かつ、湧水に対応できる支保(ケーシング、蓋など)を対策として使用することが考えられる。 その際、ケーシングに止水性を付与するか否かでケーシングや PEM の構造が変わることに留意 が必要である。止水性を付与する場合は、ケーシングは静水圧に耐えうる構造となり、止水性を 付与しない場合は PEM 容器に水密性を付与するなどして PEM 内の緩衝材の膨出を防止するこ とが容易性確保のために求められる。各構成要素へ付与する機能や要件の整理を試みた例を図 3.3-9 に示す。

このように、工学的方策とそれに係る構成要素に与える機能を回収の容易性向上の観点から整理した上で、設計・施工の実現性を定性評価した。表 3.3・6 は概念設計案 PEM-1V1(鉛直処分 孔複数 PEM 竪置き定置方式)に導入した工学的方策を対象に、設計と施工の観点から実現性を評価する際の検討項目を整理したものである。項目によっては、検討時に同時に扱うことができることから、色付けされた 6 項目に集約できる。また、概念設計案 PEM-1V1 を構築する上で、次の方策は考慮していない。その理由は、複数の廃棄体を格納する PEM は長さが長くなり、作業坑道を大きくする必要があること、PEM の軽量化は、長期安全性への影響など別途検討すべき点が多いことによる。

・方策 I: 複数の廃棄体を格納する PEM

方策 M: PEM の軽量化



図 3.3-9 孔の支保(ケーシング)及び PEM 容器の機能による回収の容易性の整理の試行例

工学的方策	要求機能	設計検討項目	施工検討項目	備考
A. 隙間充填を必要としない円形 小断面坑道定置	・PEM と定置坑道の隙間に充填を必要 とせずバリア機能が発揮できる形態	・隙間充填を必要としない PEM 定置 坑道(処分孔)の設計	・定置坑道 (処分孔) の施工方 法	
C. PEM による一体型回収	・定置/回収容易な PEM 容器の健全性 確保	・要求機能を考慮した PEM 容器の設 計	・ 設計した PEM の 製作	
E. 定置坑道の短尺化	・定置坑道/作業坑道の短尺化	・PEM 定置のレイアウト設計	・短尺化した坑道施工方法	Aに集約
F. 撤去容易な力学プラグの導入	・撤去が容易となるプラグ	・撤去が容易な力学プラグの設計	・力学プラグの施工・撤去技術	
G. 高耐久性支保工の適用	・定置/作業坑道支保材等の長期健全性 確保	<ul> <li>長期安定性を確保する高耐久性支 保の設計</li> </ul>	・高耐久性支保の施工技術	
I. 複数の廃棄体を格納する PEM 容器の採用	・搬送・定置・回収・搬出時の PEM 容 器の健全性確保	・今回の概念案では考慮せず	・同左	段階的に検討
J. 小断面坑道に PEM の複数定置	・複数定置できる PEM の定置形態	<ul> <li>・熱解析と坑道安定解析による PEM</li> <li>レイアウト設計</li> </ul>	・定置坑道 (処分孔) の施工技 術	Aに集約
M. PEM の軽量化	・現状の PEM からの軽量化	・今回の概念案では考慮せず	・同左	段階的に検討
<ol> <li>         ①. 止水機能を有する支保工の採用         用         </li> </ol>	・定置/作業坑道支保への止水機能	・定置坑道の設計(材料、構造)	・ケーシングの施工方法	G に集約
P. PEM 容器に耐腐食性材料の使用	・PEM 容器の回収時健全性確保	・PEM 容器の設計	・PEM 製作技術	Cに集約
<b>Q. PEM</b> 容器の厚さを増加	・PEM 容器の回収時健全性確保	・PEM 容器の設計	・PEM 製作技術	Cに集約
S. 回収動作が単純な定置方式と 装置の採用	・定置坑道の PEM の定置・回収動作・ 動線の単純化	<ul> <li>・動作が単純となる定置・回収装置の 設計</li> </ul>	・定置装置の製作	
T. 動作と動線とが単純となるレ イアウト	<ul> <li>・回収作業の動作と動線が単純となる (輻輳しない)レイアウト</li> </ul>	<ul> <li>・物量の効率化を考慮したシステム とレイアウト設計</li> </ul>	・物流シミュレーション	
U. 大断面作業坑道と小断面定置 坑道の組み合わせ	<ul> <li>作業環境が確保できる大断面坑道と 定置・回収効率が高い定置坑道</li> </ul>	・作業坑道と定置坑道(処分孔)の設 計	<ul> <li>・作業坑道と定置坑道(処分 孔)の施工技術</li> </ul>	Aに集約

表 3.3-6 概念設計案 PEM-1V1 における工学的方策の実現性を評価する設計・施工上の検討項目の設定

上表で集約した工学的方策の実現性に係る検討項目に沿って、設計と施工の観点から定性的に 評価した。評価の根拠としては、これまでの第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構,1999)で の設計・施工検討、電事連報告書(電気事業連合会,2005)、NUMO包括的技術報告書レビュー版 (原子力発電環境整備機構,2018)及び海外の類似概念の検討成果などを参照した。以下に、設計検 討項目及び施工検討項目に対する実現性評価の概要及び評価に基づき導出した課題を示す。これ らの検討の詳細は付属書 3-9 に示す。

○設計検討項目に対する実現性評価

概念設計案 PEM-1V1 に関する設計検討項目に対する実現性を評価した結果、実現性の見通し はあるものの、以下に示す課題が示唆された(付属書 3-9 参照)。その多くは、設計における要件 設定(設計対象が具備すべき機能や性能の設定)に係る課題であり、要件が設定されれば設計手 法は存在すると考えられる。

- ・処分孔の仕様を決定する要件の設定
- ・掘削とケーシング材の挿入を並行して実施する装置の設計
- ・PEM の設計要件の設定
- ・PEM のスペーサーの材料選定、容器への装着方法、要求される性能
- ・撤去しやすい力学(鋼製)プラグの岩盤への定着部、ユニットの接合部の構造
- ・処分孔のケーシングに対する要求機能の設定(構造強度、耐腐食性、止水性など)
- ・狭隘空間での重量 PEM の吊上げ動力とフレームの構造耐力
- ・PEM の搬送時の制動システム設計への要求機能の設定と設計
- ・坑道の交差部における PEM 方向転換装置の設計

○施工検討項目に対する実現性評価

概念設計案 PEM-1V1 に関する施工検討項目に対する実現性を評価した結果、実現性の見通し はあるものの、以下に示す課題が示唆された(付属書 3-9 参照)。

- ・狭隘空間での全断面掘削とケーシングを並行して推進する装置は存在しないことから試作、 動作確認、性能確認といった段階的な開発が必要
- ・PEM を竪置き状態で製作する技術と試作、及びスペーサーの装着方法と性能確認試験方法
- ・撤去容易な力学(鋼製)プラグのユニットを組立・解体する装置の開発・動作確認、及び実 証試験
- ・狭隘部で重量 PEM を定置・回収する装置の試作、動作確認、耐力確認
- ・地下施設のレイアウトを対象とした方向転換装置の開発・動作確認
- ・PEM の物流シミュレータによる、動線とサイクルタイムの確認
- ・重量 PEM 搬送時の制動システムの性能確認

(b) 概念設計案 PEM-22(大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式)の実現性評価

本案を対象として、工学的方策の実現性を評価するための設計と施工上の検討項目を設定した。 表 3.3-7 は導入した工学的方策を対象に、設計と施工の観点から実現性を評価する上での検討項 目を設定したものである。項目によっては、検討時に同時に扱うことができることから、色付け された 6 項目に集約できる。これらの工学的方策のうち、"方策 M. PEM の軽量化"については、 別途安全性確保の観点からの詳細な検討が必要となることから設計・施工上の検討項目から除外 した。

工学的方策	要求機能	設計検討項目	施工検討項目	備考
B. 大断面坑道定置	<ul> <li>PEM の熱的制約の順守、バリア機能の維持、大断面坑道安定性</li> </ul>	・大断面坑道の設計と PEM の定置レイ アウト設計	・大断面坑道の施工技術	
C. PEM による一体型回収	・定置/回収容易なPEM 容器の長期健 全性確保	・要求機能を考慮した PEM 容器の設計	・設計した PEM の製作	I.に集約
E. 定置坑道の短尺化	・定置坑道/作業坑道の短尺化	・大断面坑道の設計	・大断面坑道の施工技術	B.に集約
F. 撤去容易な力学プラグの導入	・撤去が容易となるプラグ	・撤去が容易な力学プラグの設計	・力学プラグの施工・撤去技術	
F. 撤去容易な埋め戻し材の選択	・撤去容易な埋め戻し材の選択と埋 め戻し方法	・撤去容易な埋め戻し材の選択と設計	・埋め戻し材撤去工法	
G. 高耐久性支保工等の適用	・大断面坑道の長期健全性確保	・大断面高耐久性支保の設計	・高耐久性支保の施工技術	B.に集約
I. 複数の廃棄体を格納する PEM 容 器の採用	・搬送・定置・回収・搬出時の PEM 容器の健全性確保	・複数ガラス固化体格納 PEM の設計	・多格納 PEM の製作	
M. PEM の軽量化	・現状の PEM からの軽量化	・今回の概念案では軽量化は考慮せず	・同左	段階的に検討
N. 矩形 PEM の採用	・PEM 容器の健全性確保	・矩形 PEM の設計	・矩形 PEM の製作	I.に集約
0. 止水機能を有する支保工の採用	・定置/作業坑道支保への止水機能	・大断面坑道支保工の設計	・大断面坑道の施工	B.に集約
P. PEM 容器に耐腐食性材料の使用	・PEM 容器の回収時健全性確保	・矩形 PEM 容器の設計	・PEM 製作技術	I.に集約
<b>Q. PEM</b> 容器の厚さを増加	・PEM 容器の回収時健全性確保	・矩形 PEM 容器の設計	・PEM 製作技術	I.に集約
R. 大断面坑道に PEM の集中定置	・PEM の人工バリア機能の維持	・熱解析による PEM レイアウト設計	・PEM の定置技術	B.に集約
S. 回収動作が単純な定置方式と装 置の採用	・回収動作・動線の単純化する装置	・矩形 PEM 定置・回収装置の設計	・定置装置の製作・動作確認	
T. 動作と動線とが単純となるレイア ウト	<ul> <li>・回収作業の動作と動線が単純となる(輻輳しない)レイアウト</li> </ul>	・矩形 PEM の物流設計	・物流シミュレーション	
U. 大断面作業坑道と小断面定置坑 道の組み合わせ	・作業環境が確保できる大断面坑道 と定置・回収効率が高い定置坑道	・処分場レイアウト設計	・大断面坑道の施工技術	B.に集約

表 3.3-7 概念設計案 PEM-22 における工学的方策の実現性を評価する設計・施工上の検討項目の設定
上表で集約した工学的方策の実現性に係る検討項目に沿って、設計と施工の観点から定性的に 評価した。評価の根拠としては、これまでの第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構,1999)で の設計・施工検討、電事連報告書(電気事業連合会,2005)、NUMO包括的技術報告書レビュー版 (原子力発電環境整備機構,2018)及び海外の類似概念の検討成果などを参照した。以下に、設計検 討項目及び施工検討項目に対する実現性評価の概要及び評価に基づき導出した課題を示す。これ らの検討の詳細は付属書 3-9 に示す。

○設計検討項目に対する実現性評価

概念設計案 PEM-22 に関する設計検討項目に対する実現性を評価した結果、実現可能性の見通 しはあるものの、以下に示す課題が示唆された(付属書 3-9 参照)。その多くは、設計における要 件設定(設計対象が具備すべき機能や性能の設定)に係る課題であり、要件が設定されれば設計 手法は存在すると考えられる。

- ・熱影響評価による合理的な PEM の定置パターン及び大断面坑道の設計要件、仕様の具体化
- ・撤去が容易な埋戻し材の選定や要求性能の設定
- ・撤去が容易な力学(鋼製)プラグの岩盤への定着部、ユニットの接合部の構造
- ・複数のガラス固化体を格納する矩形 PEM 設計への要求性能の設定
- ・重量 PEM を定置・回収する装置設計への要求性能の設定
- ・重量 PEM 搬送システム設計への要求性能(制御システムも含む)の設定

○施工検討項目に対する実現性評価

概念設計案 PEM-22 に関する施工検討項目に対する実現性を評価した結果、実現性の見通しは あるものの、以下の課題が示唆された(付属書 3-9 参照)。

- ・大断面坑道について、岩盤の種類と処分深度を考慮した安定性確保の観点からの詳細な検討
- ・撤去容易な埋め戻し材による、埋め戻し時の品質確認と実証試験、及び撤去時の施工方法と 実証試験
- ・撤去しやすい力学(鋼製)プラグのユニットを組立・解体する装置の開発・動作確認、及び 鋼製プラグの組立・解体技術の実証試験
- ・矩形 PEM の試作
- ・重量 PEM を定置・回収する装置の試作、動作確認、性能確認試験
- ・回収時の PEM の搬送システムの構築と動作確認
- ・PEM の物流シミュレータによる、動線とサイクルタイムの確認
- ・重量 PEM 搬送における制動システムの開発

# ② 概念設計案の抽出

上記の検討を通して、代替設計オプション概念設計当初案を修正して概念設計案を構築した。 概念設計案 PEM-1V1 を図 3.3-10 に、概念設計案 PEM-22 を図 3.3-11 に示す。なお、両図に示 した数量は、様々な仮定により仕様を設定して算出した大まかな数量であり、今後の詳細検討に より更新されることに留意されたい。

概念設計案 PEM-1V1 は、熱影響評価での制約条件を考慮して具体化した仕様であり、図 3.3-10 では、作業坑道1本に対して、PEM を 100 体定置した場合を想定している。

概念設計案 PEM-22 では、既往の熱解析の結果(原子力環境整備促進・資金管理センター, 2020) をベースに実施した熱影響評価から、矩形 PEM の大断面坑道内への定置は、図 3.3-11 に示す 3 段積みとし、ベントナイトブロックを格納したバッファー容器とともに定置していく概念とした。 大断面坑道内の中央部や坑道上部の埋め戻しは定置後直ちに行わず、操業工程を工夫して一定の 期間を経た後に埋め戻す概念である。熱影響評価の結果では、その期間は最大で 20 年程度であ る。ここでは、定置坑道1本に対して、ガラス固化体 400 体を定置した場合を想定している。



図 3.3-10 代替設計オプション概念設計案 PEM-1V1 "鉛直処分孔複数 PEM 竪置き定置方

式"



図 3.3-11 代替設計オプション概念設計案 PEM-22 "大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式"

# 4) 「評価指標(案)」による概念設計案の定性評価

3.1.3 で示した「評価指標(案)」に基づき、代替設計オプションの概念設計案 PEM-1V1 及び PEM-22 の回収の容易性向上に関して、本研究において設定したレファレンス概念(竪置き・ブ ロック方式) との比較による定性的な評価を行った。

各概念設計案の容易性向上に関する特徴を表 3.3-8 及び表 3.3-9 に整理するとともに、以下に 要約する。

#### 概念設計案 PEM-1V1(鉛直処分孔複数 PEM 竪置き定置方式)

概念設計案 PEM-1V1 の廃棄体までのアクセス性については、隙間充填材の除去作業量を低減する "方策 A 隙間充填を必要としない処分孔定置"及び坑道の再掘削作業量を低減する "方 策 E 坑道の短尺化"により、処分坑道の埋め戻し材の撤去量及び作業量の減少、坑道安定化作 業量の減少が見込まれる。また、PEM を回収の最小モジュールとすることで、処分孔内での除 去・撤去作業量、作業数も減少することが見込まれる(容易性向上)。

廃棄体のハンドリング性については、一つの処分孔に複数の PEM を定置することから、一 度の回収装置の移動・設置で連続的に複数体の PEM の回収が可能であり、装置の移動時間や 設置時間が減少することが見込まれる。一方で、底部 PEM への上載荷重が増加すること、孔 が深くなる分の引き上げの距離が増えることが挙げられる(容易性低下)。また、PEM を回収 の最小モジュールとすることで、レファレンス概念の回収対象であるオーバーパックに比べて、 重量やサイズが増大するが(容易性低下)、定置形態のまま搬出可能であれば回収作業の動作・ 動線が単純化され、作業時間が短くなることが見込まれる(容易性向上)。作業坑道の断面拡大 による作業性の向上も見込まれるが(容易性向上)、埋め戻し材の撤去量・作業量が増えること とのトレードオフに留意が必要である。

#### 概念設計案 PEM-22(大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式)

概念設計案 PEM-22 の廃棄体までのアクセス性については、大断面に集中して定置する本概 念に対する熱影響評価の結果から、坑道掘削量及び埋め戻し量がレファレンス概念より減少す る見通しがあり、埋め戻し材の撤去量及び作業量の減少、坑道安定化作業量の減少が見込まれ る。また、PEM を回収の最小モジュールとすることで、緩衝材の除去作業量、作業数も減少す ることが見込まれる(容易性向上)。

廃棄体のハンドリング性については、"方策 I 複数の廃棄体を格納する P E M 容器の採用" により、PEM に複数のガラス固化体を格納することから、一度の回収作業で複数のガラス固 化体の回収が可能となり、総回収作業の回数は削減される(容易性向上)。この方策により、一 体当たりの PEM 重量やサイズは増大するものの(容易性低下)、PEM 形状を矩形として回収 装置のマッチングさせることにより取り扱いの容易性向上を図り(容易性向上)、回収装置にフ ォークリフトなどを使用することにより、回収作業の動作・動線の単純化を図ることも可能で ある(容易性向上)。坑道の断面拡大により、"方策 I 複数の廃棄体を格納する PEM 容器の採 用"が可能となるが、その際は大型化したモジュールのハンドリング性の確保・向上を図る必 要がある(容易性向上)。これらの内容は、今後具体化に向けた検討が進むにつれて、詳細な整 理となっていく。

回収の容易性向上 の視点とポイント		竪置き・ブロック方式 新第三紀堆積岩類	概念設計案 PEM-1V1 "鉛直処分孔複数 PEM 竪置き定置方式"				
廃 棄 体 までの アクセ ス性	廃棄体まで アクセス 路をかん するための 作業 さ	<ul> <li>回収廃棄体に到達するまでの作業</li> <li>①鉄筋コンクリートプラグの撤去</li> <li>②処分坑道埋め戻し材撤去・坑道</li> <li>③安定性確保の維持補修</li> <li>④換気・排水設備の復旧</li> <li>⑤上部埋め戻し材の撤去</li> <li>⑥上部ベントナイトブロックの撤去</li> <li>⑦ベントナイトブロックとオーバーパックの 縁切り</li> </ul>	<ul> <li>PEM に到達するまでの作業(※は埋め戻して維持した場合の作業)</li> <li>①脱着が容易な力学プラグの撤去※</li> <li>②作業坑道埋め戻し材撤去・高耐久性支保材適用による健全性確保※</li> <li>③換気・排水設備の復旧※</li> <li>④処分孔上部遮蔽材の撤去</li> <li>○埋め戻し材の撤去量及び作業量、坑道安定化作業量が減少。</li> <li>○処分孔内での撤去作業量、作業数も減少。</li> </ul>				
廃のドグ性	物量	・回収装置一度の設置で1体のオーバーパックの回収	・回収装置一度の設置で連続して複数体の PEM の回収 ○1体当たりの装置設置時間、移動時間は減少。				
	重量と形状	・円筒形オーバーパック(6.2t)	・円筒形 PEM(約 37t⇒軽量化を考慮する) ○重量、サイズが増大。				
	健全性	・オーバーパックは 1000 年健全性	<ul> <li>・耐腐食性の PEM 容器の使用で健全性確保</li> <li>・定置孔には高耐久性ケーシング使用で健全性確保</li> <li>○底部 PEM への上載荷重が増大</li> </ul>				
	動線	・上部に引き上げ、遮蔽容器に格納して搬出	<ul> <li>・上部に引き上げ、定置形態のまま搬出</li> <li>○回収作業の動作・動線の単純化による作業時間の短縮。</li> <li>○孔が深くなる分の引き上げの距離増。</li> </ul>				
	作業環境	・処分坑道(約 20m <sup>2</sup> 程度)	<ul> <li>・作業坑道(約 20m<sup>2</sup> 程度⇒断面拡大を考慮、ただし埋め戻し材の撤 去量とのトレードオフに留意)</li> <li>○作業坑道断面拡大による作業性の向上。</li> </ul>				

表 3.3-8 代替設計オプション概念設計案 PEM-1V1 の定性評価

※青字は容易性が向上する内容、朱字は容易性が低下する内容を意味する。

3-47

回収の容易性向上 の視点とポイント		竪置き・ブロック方式 新第三紀堆積岩類	概念設計案 PEM-22 "大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式"				
廃 棄 での アクセ ス性	廃棄体まで のアクセス 経るを確保 するための 作業量の 少なさ	<ul> <li>回収廃棄体に到達するまでの作業</li> <li>①鉄筋コンクリートプラグの撤去</li> <li>②処分坑道埋め戻し材撤去・坑道</li> <li>③安定性確保の維持補修</li> <li>④換気・排水設備の復旧</li> <li>⑤上部埋め戻し材の撤去</li> <li>⑥上部ベントナイトブロックの撤去</li> <li>⑦ベントナイトブロックとオーバーパックの 縁切り</li> </ul>	<ul> <li>PEM に到達するまでの作業量(※は埋め戻して維持した場合の作業)</li> <li>①脱着が容易な力学プラグの撤去※</li> <li>②大断面坑道埋め戻し材撤去・高耐久性支保材適用による健全性確保※</li> <li>③換気・排水設備の復旧※</li> <li>④バッファー容器の撤去</li> <li>○埋め戻し材の撤去量及び作業量、坑道安定化作業量が減少。</li> <li>○坑道内の撤去作業量、作業数が減少。</li> </ul>				
廃のドグ	物量	・回収装置一度の設置で1体のオーバーパックの回収	・一度の回収作業で複数のガラス固化体を回収 ○総回収作業の回数が削減。				
	重量と形状	・円筒形オーバーパック(6.2t)	・矩形 PEM(約 70t 程度⇒軽量化を考慮する) ○重量、サイズが大きくなる ○矩形のため回収装置とのマッチングにより取り扱いが容易。				
	健全性	・オーバーパックは 1000 年健全性	<ul> <li>・耐腐食性の PEM 容器の使用で健全性確保</li> <li>・高耐久性二次覆工により健全性確保</li> </ul>				
	動線	・上部に引き上げ、遮蔽容器に格納して搬出	<ul> <li>・フォークリフトなどで定置形態のまま搬出</li> <li>○回収作業の動作・動線の単純化による作業時間の短縮。</li> </ul>				
	作業環境	・処分坑道(約 20m <sup>2</sup> 程度)	・大断面坑道(約 150m <sup>2</sup> 程度) ○作業坑道断面を大きくして作業性の向上。				

表 3.3-9 代替設計オプション概念設計案 PEM-22 の定性評価

※青字は容易性が向上する内容、朱字は容易性が低下する内容を意味する。

## 3.3.2 代替設計オプションの概念設計案の具体化に係る技術開発課題の抽出と整理

代替設計オプション概念設計案の具体化と併せて、具体化に向けた技術課題を検討して、今後 取り組むべき技術開発課題を抽出した。以下に検討内容を整理する。詳細については付属書 3-10 で詳述する。

なお、概念設計案に対する操業期間の安全性への影響や閉鎖後長期の安全性への影響について は、第4章で整備される定量化手法の整備により、今後整理と検討が必要である。さらに、多様 な設計因子や設計の最適化の観点での検討も進める必要がある。

#### (1) 概念設計案 PEM-1V1 及び PEM-1H1 に関する技術開発課題

概念設計案 PEM-1V1(鉛直処分孔複数 PEM 堅置き定置方式)及び概念設計案 PEM-1H1(水 平処分孔複数 PEM 横置き定置方式)を具体化するために必要となる技術開発課題は以下のよう に整理できる。

○処分孔に関する技術開発課題

・内空確保機能、止水性を有する処分孔の支保構造(ケーシングなど)

- ○PEM に関する技術開発課題
  - ・PEM を円滑に孔から引き出すための潤滑部品あるいはスペーサー、PEM への装着方法
  - ・水密性を有する PEM
  - ・鉛直孔複数定置の場合の PEM 容器などの構成要素の検討
- ○回収装置に関する技術開発課題
  - ・処分孔へ複数定置した場合のアームが長い回収装置

・回収作業時の処分場の劣化状態を考慮した回収技術(概念設計案 PEM-22 と共通) 〇坑道配置などに関する技術開発課題

- ・撤去しやすい力学プラグ(概念設計案 PEM-22 と共通)
- ・回収時の物流を考慮した坑道レイアウト(概念設計案 PEM-22 と共通)

以下、各技術開発課題について述べる。

#### ○処分孔に関する技術開発課題

・内空確保機能、止水性を有する処分孔の支保構造(ケーシングなど)

処分孔に設置するケーシングには、処分孔間隔を短縮するための処分孔の支保、処分孔の孔 壁と PEM との隙間を保持する内空確保機能(構造強度)を期待している。よって、処分孔の 支保構造(ケーシング)の設計要件(接手構造も含む)の設定、仕様の具体化などを検討し、 ケーシングの製作、接手部の耐力を確認する必要がある。構造強度に対しては、耐用年数に応 じた劣化(腐食代)を考慮した上で構造解析などにより確認・設定することが可能である。ま た、処分孔の掘削とケーシング推進を組み合わせた機械への要求機能や性能の設定、推進機械 の製作、動作確認、性能確認を検討して実証する必要がある。

なお、PEM に水密性を付与しない場合にはケーシングに止水機能を与える必要があるが、 その場合には深度相当の静水圧に耐えうる構造強度が求められるため、オーバーパックと同等 程度の部材厚が必要になる可能性がある。

○PEM に関する技術開発課題

・PEM を円滑に孔から引き出すための潤滑部品あるいはスペーサー、PEM への装着方法

・水密性を有する PEM

・鉛直孔複数定置の場合の PEM 容器などの構成要素の検討(概念設計案 PEM-22 と共通)
 処分孔から円滑に PEM を引き出すための隙間確保のためのスペーサー(竪置きの場合)あるいは潤滑部品(横置きの場合)への要求機能・性能の設定、仕様の具体化を検討し、PEM 容器への装着方法、装着技術と耐力の確認等を検討して、実証を行う必要がある。

PEM には水密性、構造強度を期待している。これらを考慮した PEM の設計要件の設定、仕様の具体化などを検討し、潤滑部品やスペーサーの装着を考慮した試作、さらには実規模製作などの段階的な開発を行う必要がある。鉛直処分孔に複数の PEM を竪置きする場合、底部の PEM は上載荷重を考慮した構造とする必要があり、耐用年数に応じた劣化(腐食代)を考慮した上で構造解析などにより設定することが可能である。

## ○回収装置に関する技術開発課題

- ・処分孔へ複数定置した場合のアームが長い回収装置
- ・回収作業時の処分場の劣化状態を考慮した回収技術(概念設計案 PEM-22 と共通)

狭隘空間で処分孔に複数定置した PEM を引き出すためには、アームなどを伸ばして回収す る装置開発が必要となる。また、遠隔で回収を行うことも想定されることから、これらを踏ま えた回収装置への要求機能・性能、設計要件の設定、仕様の具体化を検討し、装置の製作、動 作確認、性能確認などの実証を行う必要がある。

回収作業時の処分場の状態は、定置時から時間が経過しているため不確実性が高いと想定される。上記の回収装置や関連技術には、処分場の劣化状態の不確実性に対応することが求められるため、技術開発に際しては適用可能性のある技術を調査の上、実施する必要がある。

# ○坑道配置などに関する技術開発課題

- ・撤去しやすい力学プラグ(概念設計案 PEM-22 と共通)
- 狭隘部で力学プラグの組立あるいは解体を行う場合、どのような仕組みが相応しいかの概念 構築から検討を始める必要がある。組立・解体が容易なプラグ構造の概念構築、設計要件(組 立・解体の装置設計を含む)の設定について検討し、遠隔制御で組立・解体できるプラグの試 作と装置の開発・試作・動作確認などの実証が必要となる。

・回収時の物流を考慮した坑道レイアウト(概念設計案 PEM-22 と共通)

PEM の回収作業、埋め戻し材、プラグなどの撤去作業やそれらの物流を考慮した各坑道の レイアウトの最適化、重量 PEM の方向転換装置、搬送制御システム設計への要求機能・設計 要件の設定などの検討を行い、重量 PEM 積替え装置の試作、動作確認、・搬送制御システムの 試作、動作確認などの実証が必要となる。

#### (2) 概念設計案 PEM-22 に関する技術開発課題

概念設計案 PEM-22(大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式)を具体化する ために重要と考えられる技術開発課題は以下のように整理できる。PEM-1V1 と共通の技術開発 課題は PEM-1V1 の記述を参照されたい。

○定置坑道(PEM 定置パターン含む)に関する技術開発課題

- ・合理的な PEM の定置パターンなどを考慮した大断面坑道の設計・施工
- ・PEM の集中定置による熱的影響の緩和策の検討
- ○PEM に関する技術開発課題

- ・集中定置(段積みなど)を考慮した矩形 PEM の構造
- ・矩形 PEM の軽量化
- ○回収装置に関する技術開発課題
  - ・重量 PEM の回収装置

・地下施設の劣化状態を考慮した(に対応可能な)回収技術(概念設計案 PEM-1V1 と共通) 〇坑道配置などに関する技術開発課題

- ・撤去しやすい力学プラグ(概念設計案 PEM-1V1 と共通)
- ・回収時の物流を考慮した坑道レイアウト(概念設計案 PEM-1V1 と共通)

以下、各技術開発課題について述べる。

○定置坑道に関する技術開発課題

- ・合理的な PEM の定置パターンなどを考慮した大断面坑道の設計・施工
- ・PEM の集中定置による熱的影響の緩和策の検討

複数のガラス固化体を格納した PEM を集中定置する大断面坑道は、熱影響や定置・回収時の PEM の物流・動線などを考慮した合理的な断面とする必要がある。また、PEM の集中定置 に対する熱影響の緩和策として、緩衝材や埋め戻し材を入れたバッファー容器を PEM と共に 定置することが考えられる。坑道断面はこれらの定置も考慮した仕様になるため、熱影響を考慮した PEM 及びバッファー容器の定置パターンの検討、それらの物流と動線を考慮した大断 面坑道の設計要件の設定、仕様の具体化などを検討する必要がある。

○PEM に関する技術開発課題

- ・集中定置(段積みなど)を考慮した矩形 PEM の構造
- ・矩形 PEM の軽量化

複数のガラス固化体を格納した PEM 及びバッファー容器は矩形(直方体)とすることが集 中定置する上で効率的である。矩形 PEM には大断面に段積みすることを考慮して、上載荷重 を考慮した構造強度を期待している。これらを考慮した矩形 PEM の設計要件の設定、仕様の 具体化などを検討し、試作、さらには実規模製作などの段階的な開発を行う必要がある。

また、複数のガラス固化体を格納した矩形 PEM は重量が大きくなることから、軽量化が望まれるが、ベントナイトやオーバーパックなどの仕様との調整が必要となる。

○回収装置に関する技術開発課題

- ・重量 PEM の回収装置
- ・地下施設の劣化状態を考慮した(に対応可能な)回収技術(概念設計案 PEM-1V1 と共通) 複数のガラス固化体を格納した PEM は重量物となるため、定置・回収装置の開発が必要と なる。類似技術は存在するが、遠隔で回収を行うことも想定されることから、回収装置への要 求機能・性能、設計要件の設定、仕様の具体化を検討し、装置の製作、動作確認、性能確認な どの実証を行う必要がある。

回収作業時の地下施設の状態は、定置時から時間が経過しているため不確実性が高いと想定 される。上記の回収装置や関連技術には、地下施設の劣化状態の不確実性に対応することが求 められるため、技術開発に際しては適用可能性のある技術を調査の上、実施する必要がある。

# 3.3.3 PEM を回収の対象物の最小モジュールとした代替設計オプションの開発のまとめ

回収作業におけるハンドリング対象物の最小モジュールを PEM とした場合の"回収の容易性 の向上"に焦点をあてて、代替設計オプションの概要案及びそれを具体化した概念設計案を構築 した。概念設計案に対する熱影響の評価による成立性の検討では、回収の容易性向上の方策を保 持しつつ、熱的影響の成立性を満足する見通しが得られた。また、工学的実現性の検討により、 実現性の向上に向けた今後の技術開発課題を抽出した。

概要設計案を具体化するための主な技術開発課題は以下のように整理できる。また、検討した 概念設計案は、その元となった概要案から展開されたバリエーションの一つであるため、開発し た成果は他のバリエーションでも参照できると考えられる。

○概要設計案 PEM-1V1 及び PEM-1H1 の技術開発課題

- ・内空確保機能、止水性を有する処分孔の支保構造(ケーシングなど)
- ・PEM を円滑に孔から引き出すための潤滑部品あるいはスペーサー、PEM への装着方法
- ・水密性を有する PEM
- ・鉛直孔複数定置の場合の上載荷重などを考慮した PEM 容器などの構造
- ・処分孔へ複数定置した場合のアームが長い回収装置

○概要設計案 PEM-22 の技術開発課題

- ・合理的な PEM の定置パターンなどを考慮した大断面坑道の設計・施工
- ・PEM の集中定置による熱的影響の緩和策の検討
- ・集中定置(段積みなど)時の上載荷重などを考慮した矩形 PEM の構造
- ・矩形 PEM の軽量化
- ・重量 PEM の回収装置

○概要設計案に共通の技術開発課題

- ・地下施設の劣化状態を考慮した(に対応可能な)回収技術
- ・撤去しやすい力学プラグ
- ・回収時の物流を考慮した坑道レイアウト

レファレンス概念における PEM 回収時の隙間充填材の除去に関する技術の高度化は第2章で 開発が進められており、除去作業には時間を要することが分析されている。よって、"隙間充填を 必要としない処分孔定置"を回収の容易性向上の工学的方策として組み込んだ概念設計案 PEM-1V1、概念設計案 PEM-1H1、及びそのバリエーションを対象とした検討を進めていく。また、概 念設計案 PEM-22 はこれまでに検討されていない概念であり、成立性の観点からさらに検討を進 める。

# 3.4 代替設計オプションの概念設計案の具体化に係る技術開発課題への対応方策の検討 3.4.1 技術開発課題への取り組みの方針

回収作業におけるハンドリング対象物の最小モジュールをオーバーパックとした場合と PEM とした場合に分けて、回収の容易性を高めた代替設計オプション概念設計案を開発し、概念設計 案ごとに必要となる技術開発課題について整理した。一方で、第2章では竪置き・ブロック方式、 横置き・PEM 方式を対象として回収技術の高度化を進めており、それぞれに開発目標が設定さ れている。この開発目標は、回収作業において「回収対象物の拘束力の除去作業」が回収全体作 業工程においてボトルネックとならないことを目標としたものである。現時点では PEM 方式に 関する目標達成の困難さが想定されることから、今後の取り組みでは、PEM を回収の最小モジ ュールとした代替設計オプションの設計・施工の実現性を示すための技術開発を優先させること も考慮する必要がある。なお、PEM に関する技術開発の成果の一部は、PEM よりも重量が軽く サイズが小さいオーバーパックへと展開することが可能と考えられる。例えば、円滑な引き出し のための潤滑部品やスペーサー、回収装置、物流・動線を考慮した坑道配置などは双方の共通課 題である。

技術開発課題への取り組みは、回収する対象物である PEM に関する構成要素から始め、回収 対象物を扱う装置、坑道レイアウトへと段階的に展開していく方法が想定される。概念設計案は 元となる概要案から展開されたバリエーションの一つであるため、概要設計案を具体化するため の技術開発の成果は、他の概念設計案にも反映できると考えられることから、そのような点にも 留意して技術開発に取り組むことが望まれる。

#### 3.4.2 技術開発課題への対応方策

技術開発課題の取り組みの方針に沿って、今後優先させる可能性のある「最小モジュールを PEM」とした場合における、技術開発課題への対応方策を概念設計案毎に整理した。

#### (1) 概念設計案 PEM-1V1、PEM-1H1 に係る技術開発課題への対応方策

概要案 PEM-1 (隙間充填を必要としない処分孔定置概念)から展開した概念設計案 PEM-1V1 (鉛直処分孔複数 PEM 堅置き定置方式)および PEM-1H1 (水平処分孔複数 PEM 横置き定置 方式)の具体化におけるポイントは、「処分孔の孔壁と PEM との間に設けた隙間の保持」と「処 分孔に複数定置した重量物である PEM の円滑な搬出」と考える。

3.3.1 及び付属書 3-7 の概略検討で示したとおり、処分孔と PEM との間に許容される隙間の幅 は約 90mm 程度(緩衝材の乾燥密度 1.7Mg/m<sup>3</sup>で施工した場合)である。この隙間の幅を考慮す ると、これまで実証されてきた既往の研究で開発された搬送装置の本体(エアベアリングなど、 原子力環境整備促進・資金管理センター, 2020)は孔内に入れないため、孔の外側の作業坑道に 回収装置本体を設置し、装置のアームを伸ばして PEM を搬出する方法を採用することになる。

以上の課題認識を起点として、以下の順に技術開発を行うことを提案する。ただし、技術開発 の成果を最適化していくため、適宜フィードバックを繰り返しながら(③から①へ戻る、など)、 開発を進めていく。また、後述する概念設計案 PEM-22 と共通の内容、かつ、事前に着手できる 調査、検討などについては、先行して実施していく。

- ①PEM を円滑に孔から引き出すための潤滑部品あるいはスペーサーへの機能設定、設計要件の設定、仕様(材料、寸法など)の具体化、性能確認、PEM への装着方法の開発
- ②水密性、構造強度を有する PEM の設計要件の検討、仕様の具体化、さらに①から設定される限界重量を踏まえた PEM の合理化の可能性検討

- ③回収装置の具体化(処分孔へ複数定置した場合のアーム長さを考慮)、回収作業時の地下施設 の劣化状態を考慮した(に対応可能な)回収技術の開発
- ④内空確保機能を有する処分孔(ケーシング含む、②の開発状況によっては止水性を付与する)の設計要件の検討、構造の具体化
- ⑤作業性を高める空間を考慮した作業坑道の設計要件の検討、構造の具体化
- ⑥回収時の物流を考慮した坑道配置(レイアウト)の開発
- ⑦撤去しやすい力学プラグの開発

#### (2) 概念設計案 PEM-22 に係る技術開発課題への対応方策

概要案 PEM-2 (大型モジュール大断面坑道定置概念)から展開した概念設計案 PEM-22 (大断 面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式)の具体化におけるポイントは、「熱的成立性 を満足」させるとともに、「PEM の定置密度をできるだけ向上させる」ことにある。

3.3.1 及び付属書 3-8 の熱影響評価による成立性の検討で示したとおり、緩衝材の制限温度を 満足するための PEM の定置パターンには更なる検討の余地が残されている。大断面坑道への集 中定置や回収時の扱いやすさなどを考慮すると、矩形の PEM 及び熱影響を緩和するバッファー の併用が有力と考えられる。

以上の課題認識を起点として、以下の順に技術開発を行うこととする。ただし、技術開発の成 果を最適化していくため、適宜フィードバックを繰り返しながら(③から①へ戻る、など)、開発 を進めていく。また、前述の概念設計案 PEM-1V1 などと共通の内容、かつ、事前に着手できる 調査、検討などについては、先行して実施していく。

①熱的成立性を満足する、より合理的な PEM 形態及びバッファーの定置パターンの抽出

- ②集中定置(段積みなど)を考慮した構造強度を有する PEM の設計要件の検討、仕様の具体 化、さらに軽量化を含む PEM の合理化の可能性検討
- ③回収装置の具体化 (重量 PEM を考慮)、回収作業時の処分場の劣化状態を考慮した回収技術の開発
- ④PEM の定置パターン、回収時の物流・動線などを考慮した大断面坑道の設計要件の検討、仕様の具体化、施工方法の検討など
- ⑤回収時の物流を考慮した坑道配置(レイアウト)の開発
- ⑥撤去しやすい力学プラグの開発

# 3.4.3 技術開発計画

次年度以降の研究開発計画を表 3.4-1 に示す。研究開発計画は、本事業で実施されている他の 整備状況や開発成果を踏まえて更新していく。

概念設計案 (概要案)	$\begin{array}{c} \text{R3} \\ (2021) \end{array}$	$\begin{array}{c} \mathrm{R4} \\ (2022) \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{R5} \\ (2023) \end{array}$	R6 (2024)		
PEM-1V1	技術開発課題:狭隘空間における廃棄体の搬出技術の開発					
<ul> <li>鉛 直 処 分 扎 複 数</li> <li>PEM 竪置き定置方式"</li> <li>及び</li> <li>PEM-1H1</li> <li>"水 平 処 分 孔 複 数</li> <li>PEM 横置き定置方式"</li> <li>(隙間充填を必要としない円形小断面坑道定置)</li> </ul>	<ul> <li>・要件・機能の検討</li> <li>・材料選定</li> <li>・耐力、低摩擦性などの性能確認のための要素試験計画</li> </ul>	<ul> <li>PEM 重量を考慮 した仕様(厚さ・ 幅)の検討</li> <li>・性能確認のため の要素試験実施</li> </ul>	<ul> <li>・要件・機能の検 討</li> <li>・潤滑部品を装着 可能な容器厚さ の検討</li> </ul>	<ul> <li>・潤着方法の開</li> <li>・潤方法の開発</li> <li>(3D プリンタ</li> <li>ーなどによる</li> <li>試()</li> <li>・課題整理</li> </ul>		
	技術開発課題:廃棄体多格納 PEM の集中定置概念の開発					
PEM-22 "大断 面坑 道 複数 ガ ラス固化体格納 PEM 横置き定置方式" (大型モジュール定置 と大断面集積配置)	<ul> <li>・熱伝導解析によるPEM形態とバッファーの定置パターンなどの抽出</li> </ul>	<ul> <li>・回収時の動線を 考慮した PEM の 定置レイアウト の検討</li> <li>・PEM 形態と定置 レイアウトの最 適化</li> </ul>	<ul> <li>・要件・機能の検 討</li> <li>・仕様の検討</li> <li>・構造設計</li> <li>・工学規模での試 作に向けた計画 策定</li> </ul>	<ul> <li>工学規模での 規作による 現性の確認</li> <li>・実スケール展 開への課題抽 出</li> </ul>		
共通	<ul> <li>・回収装置などに</li> <li>必要な技術と</li> <li>求められる性</li> <li>能の抽出</li> </ul>	<ul> <li>適用可能性のある技術の情報調査</li> </ul>	<ul> <li>・回収作業の工程</li> <li>レイアウト設計</li> <li>た定量化手法の</li> </ul>	<ul> <li>・物流を考慮した</li> <li>の最適化に向け</li> <li></li></ul>		

表 3.4-1 次年度以降の研究開発計画

## 3.5本章の成果と今後の展開

# 3.5.1 本章の成果

多様な定置概念や設計オプションからの選択の柔軟性を更に高めていくことを目的として、現 行の候補概念や設計オプションにとらわれない、"回収の容易性の向上"に焦点をあてた代替設計 オプション概念設計案を開発した。概念設計案は、回収の容易性を向上させる工学的方策を組み 合わせた概念をイラスト化した概要案の考案を出発点として、仕様等の具体化を行い、廃棄体な どからの熱影響による成立性を確認したものである。また、概念設計案に対して工学的実現性の 評価を行い、概念設計案の具体化に向けて必要となる技術課題を検討し、抽出した技術開発課題 に対する今後の対応策(研究開発計画など)について整理した。

概念設計案の開発は、回収作業のハンドリング対象物の最小モジュールをオーバーパックとした場合と PEM とした場合に分けて検討を実施した。

最小モジュールをオーバーパックとした代替設計オプション概念設計案は、次の二つの方策を 基軸として構築した。

・緩衝材とオーバーパックの縁切り(緩衝材の除去作業を省くための工学的方策)

・坑道の短尺化( 埋め戻し材の撤去量・作業量などを削減するための工学的方策)

他方、最小モジュールを PEM とした代替設計オプション概念設計案は二つに大別できる。 一つは、次の二つを基軸として構築した概念設計案、

・隙間充填を必要としない処分孔定置(隙間充填材の除去作業を省くための工学的方策)

- ・坑道の短尺化(埋め戻し材の撤去量・作業量などを削減するための工学的方策)
- もう一つは、次の二つを基軸として構築した概念設計案である。
  - ・複数の廃棄体を格納する PEM 容器の採用 (回収作業数を削減するための工学的方策)
  - ・大断面坑道への定置(大型モジュールの PEM を定置・回収するための空間を確保するための工学的方策)

これらの概念設計案を具体化するための技術開発課題への対応策について、回収の最小モジュ ールを PEM とした場合を例題として、以下のような技術開発課題を抽出した。

・隙間充填を必要としない狭隘な処分孔に定置した PEM を円滑に搬出する技術の開発

・複数のガラス固化体を格納した大型モジュールを大断面坑道に定置・回収する技術の開発

技術開発は、回収する対象物である PEM に係る構成要素から着手し、PEM を扱う回収装置、 さらには坑道レイアウトなどへと段階的に実施していくことが想定される。

これらは PEM を例題とした課題ではあるが、包含される個別課題には、最小モジュールをオ ーバーパックとした場合の課題と共通するものが多く含まれる。

#### 3.5.2 今後の展開

回収の容易性を高めた代替設計オプション概念設計案の具体化に向けて、今後の対応策で示した技術開発(要素試験、検討など)に取り組んでいく。

本章で開発した代替設計オプション概念設計案は、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、操業期間中の安全性への影響や閉鎖後長期の安全性への影響が精査される。ま た、多様な設計因子、設計の最適化の観点からの検討により、その妥当性も評価する必要がある。 参考文献

ANDRA, Dossier 2005 Argile, Architecture and management of geological repository, 2005. 電気事業連合会,核燃料サイクル開発機構, TRU 廃棄物処分技術検討書一第 2 次 TRU 廃棄物処

分研究開発取りまとめー, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005. 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一適切なサイ

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.

原子力環境整備促進・資金管理センター,平成19年度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.

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.

原子力環境整備促進・資金管理センター,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 報告書,2020.

原子力環境整備促進・資金管理センター,地層処分施設の設計・操業技術の最適化手法に関する 研究,原環センター技術報告書,RWMC-TRJ-200012021.

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.

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO), Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments, NUMO-TR-04-03, August 2004.

Svensk Kärnbränslehantering AB, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project Volume I, Technical Report TR-11-01, 2011.

## 4. 回収可能性の維持に伴う影響事象の定量化手法の整備

# 4.1 目的

回収可能性の維持期間を設けることによる影響の主な要因として、開放坑道に空気が継続的に 供給されること、開放坑道からの坑内湧水の排水が継続的に行われることの2つが挙げられる。

2015 年 5 月に改定された基本方針の第5(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)において、「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。当 該技術開発等の成果については、最終処分事業や国の安全規制において有効に活用されることが 重要である」として、回収可能性に係る調査研究の実施を要求している。

これまでに「開放坑道に空気が継続的に供給されること」、「開放坑道からの坑内湧水の排水が 継続的に行われること」を要因とする個々の影響に関する定量化手法の整備に向けて、主に解析 的手法の観点から予備検討を進めてきた(原環センター,2020.)。一方で、建設から操業、(回収 可能性の維持)、閉鎖、閉鎖後長期という一連の期間に生じる事象の時間変遷をより丁寧に考慮し て、実現象としての影響の程度に応じた優先課題の評価、ならびに定量化手法の整備における現 象論的知見や経験則の活用可能性など、より包括的な視点で取り組む必要性が示唆された。

回収可能性の維持に伴う影響は図 4.1-1 に模式的に示したように、【第2章:回収の迅速化に向 けた技術の高度化】と【第3章:回収の容易性を高めた代替設計オプションの開発】の成果から 定量的に示される回収の容易性(回収作業時間)と併せて、基本方針に示される回収可能性の維 持期間の上限となる"安全な管理が継続できる範囲"を設定するための重要な要素である。

本章では、回収可能性の維持に伴う影響について、操業期間中の安全性と閉鎖後長期の安全性 の2つの観点から、定量化手法の整備に向けた本年度の検討結果を整理する。



図 4.1-1 回収可能性が維持される状態の模式図

## 4.2 定量化手法の整備の方針

処分場が建設されるサイトの地下環境特性の多様性、処分場の概念・設計のバリエーションな らびに回収可能性の維持期間中の地下施設の状態などに応じて操業期間中および閉鎖後長期の安 全性に影響を与えるものと受けるものの関係やその程度は変化する。更に、その関係や影響の程 度は、影響が継続する期間(回収可能性の維持期間)に応じて変化する。特に、図 4.1-1に示す 回収可能性の維持期間と操業期間中および閉鎖後長期の安全性が確保される期間の関係に関する 考え方は、新たに構築される処分概念・設計(第3章に詳述)に対しても共通である。計画され た全ての廃棄体の定置後に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伴う安全性へ の影響の定量化手法の整備では、以下の項目に留意して進める。

- ・回収可能性の維持に伴う影響の定量化項目の更新
- ・異なる処分概念への展開
- ・閉鎖後長期の安全評価との関係
- ・盛り込む事象の妥当性の確保

#### 4.2.1 回収可能性の維持に伴う影響の定量化項目

本事業の前身事業において、外部有識者で構成する「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点 整理に関わる検討会」(以下、「R&R 検討会」という。)を設置し、可逆性・回収可能性に関する 多面的な検討を実施した(原環センター, 2017.)。この検討会では、操業期間中の安全性、閉鎖 後長期の安全性のそれぞれに対して、回収可能性の維持に伴う影響の定量化項目を示した。この 項目を検討の出発点とする。

## (1) 操業期間中の安全性への影響

R&R 検討会で整理された、操業期間中の安全性への影響の定量化項目を表 4.2-1 に示す。坑道 内での作業安全性に係わる空間安定性と回収時の廃棄体の健全性の2つが主な対象である。

定量化すべき情報	定量化に必要となる技術検討項目			
①回収可能性維持期間中の開放坑道	a. 開放坑道の健全性(空間安定性)			
の安全性への影響	b. 開放坑道内(作業空間)への廃棄体からの熱影響			
	a. 埋め戻した坑道の再利用時の健全性			
②回収作業時の安全性への影響 (回収を実施する場合)	b. 再利用する坑道内(作業空間)への廃棄体からの熱影響			
(回収を天旭りる物日)	回収時の廃棄体容器の健全性			

表 4.2-1 操業期間中の安全性への影響の定量化項目

回収作業時の安全性への影響に関する定量化項目が通常の操業と大きく異なるのは、一度埋め 戻した処分坑道の再掘削、既に定置されて地下環境に晒された廃棄体を再度扱う点である。

1.2 節に述べたように、本研究では回収可能性の維持期間を"回収/閉鎖措置の判断が可能な 期間"と定義している。図 1.3・4 に示すように、今後検討される回収可能性の維持期間(同期間 の終期)は、その時点で回収実施が判断された場合に、その後に行われる回収作業の安全性が確 保されている必要がある(回収作業中の安全性の確保が困難になるよりも前に最終閉鎖もしくは 回収実施の判断を行う必要がある)。



図 4.2-1 操業期間中の安全性の観点からの回収可能性の維持期間

# (2) 閉鎖後長期の安全性への影響

R&R 検討会で整理された、閉鎖後長期の安全性への影響の定量化項目を表 1.3-1 に示す。

定量化すべき情報	定量化に必要となる技術検討項目
のしていいマンカはよう明確似目	a. 坑道内の空気持ち込みによる機能劣化等の影響
①人工ハリブに期待する闭鎖俊長 期の安全機能への影響	b. 廃棄体からの熱による影響
别 》	c. 坑道開放期間中の坑内湧水影響
	a. 地下水の引き込みによる攪乱影響の範囲と程度
②大然ハリア(母右)に期待する闭	b. 酸素供給・乾燥環境による母岩への影響
₩ (K / / / / / / K ± / (K / K / / K / F	c. ベースラインへの回復過程と回復程度

表 4.2-2 閉鎖後長期の安全性への影響の定量化項目(

閉鎖後長期の安全性の観点では、処分施設を最終閉鎖せずに回収可能性を維持することに伴う 影響が地層処分場の長期安全性に有意な影響を及ぼすよりも前に「最終閉鎖」もしくは「回収実 施」の判断を行う必要がある(図 1.3-2)。



図 4.2-2 閉鎖後長期の安全性の観点からの回収可能性の維持期間

なお、建設・操業を経て、廃棄体の全量定置の後に速やかに最終閉鎖措置に移行する通常の操 業においても、建設・操業期間中の換気・排水による地下環境への擾乱、擾乱を経た過渡期にお ける定置された人工バリア等の状態変遷など、閉鎖後長期の安全性へ与える影響は、現時点のセ ーフティケース開発の中で考慮されている(或いは本事業以外で研究・技術開発が進められてい る)ことから、本事業では、通常の操業で扱われる事象や事象に伴う安全性への影響の捉え方を ベースとして、定置完了後に回収可能性の維持期間が追加された場合に、新たに考慮すべき事象 や影響の有無の観点から検討を進める。

#### 4.2.2 異なる定置概念への展開

R&R 検討会では、当面の技術検討の進め方として、現時点で有望とされる二つの概念(処分孔 堅置き方式、処分坑道横置き・PEM 方式)を前提に、定量化すべき情報とそのための技術検討項 目案を示しているが、今後具体化或いは詳細化される地質環境条件や処分場設計に応じて、適宜、 これらの技術検討項目を見直すべきことも提案している(原環センター,2017.)。

R&R 検討会の考え方を踏まえ、また、現在の我が国の事業段階や将来の新たな代替設計オプションへの柔軟な対応にも留意して、本検討では、まず、「レファレンス」となる設計を設定し、それに対して操業期間中及び閉鎖後長期の安全性に影響を及ぼす可能性のある事象の分析・整理(および定量化手法の整備)を行う。その上で、他の設計オプションへの展開を行う(レファレンスとの差分を明確にした上で差分に着目して検討や定量化手法を整理する)。具体的には、次のようなアプローチで段階的に検討を進める。

①先行検討対象となるレファレンスの設定(処分孔竪置き・ブロック方式)

包括的技術報告書(NUMO, 2021)に示されている概念・設計を参考として、以下を本検討 におけるレファレンスとして設定した。地下施設のレイアウトや坑道寸法なども、包括的技術 報告書を参考としているが、細部で異なる部分がある。

- ・新第三紀堆積岩類の母岩、地下 500m
- ・処分孔竪置き・ブロック方式 (パネル型)
- ・回収可能性の維持期間中の地下施設の状態:処分坑道が埋め戻され力学プラグが設置され た状態(埋め戻し状態オプション2)

②埋め戻し状態オプションへの展開

埋め戻し状態オプション2から、処分坑道を解放した状態オプション1、アクセス坑道のみ が解放されている状態オプション3へと展開する。坑道内の埋め戻し材の有無、開放された坑 道で継続する排水や換気の影響を定量化手法に適切に扱えるように拡張・展開する。

③処分坑道横置き・PEM 方式への展開

我が国で先行して検討・評価が進められているもう1つの定置概念である「処分坑道横置き・ PEM 方式(デッドエンド型)」へと展開する。処分場のレイアウトや坑道設計、PEM 鋼殻など 地下構成要素や回収可能性維持期間中の状態オプションなど、レファレンスとの違いに留意し つつ拡張・展開する。

④代替設計オプションへの展開

回収の容易性を高めた代替設計オプションについても、上記③と同様な手法で拡張展開する。

本年度は、上記①のレファレンスを対象として、回収可能性の維持期間が追加された場合に、新たに考慮すべき事象や影響の有無の検討から着手する。

なお、埋め戻し状態オプションの変更は、開放坑道での換気・排水の範囲や継続する期間、異 なる処分概念の展開では処分場の構成要素や使用材料など、影響の要因と影響を受ける対象がレ ファレンスに対して変化する。異なる定置概念・維持の状態への拡張を見据え、差分が判断できるようレファレンスの構成要素や使用材料、処分施設の時間経過と状態の変遷を丁寧に整理する。

#### 4.2.3 閉鎖後長期の安全評価との関係

閉鎖後長期の安全評価に対しては、4.2.1(2)で述べたように通常の操業で考慮されている事象が 定置後に追加される可能性のある回収可能性の維持期間を通して継続されることをベースとして、 新たに考慮すべき事象等の有無を確認するという方針で進める。一方、回収作業中を含む操業期 間中の安全性への影響は、閉鎖後長期の安全評価が対象としている時期よりも前の期間であり、 処分坑道の空間安定性を支持する支保工等の構成要素など、閉鎖後長期の安全性確保の観点から 安全機能の割当てが無い構成要素の状態変遷が重要となる。

#### (1) 時間スケール・空間スケールの設定

包括的技術報告書における閉鎖後長期の安全評価では、建設・操業を経て閉鎖された時点の処 分システムの状態を初期状態として、システムが時間・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の移行にどのように影響するのかを論じるため、閉鎖後の処分システムと してのふるまいに関する記述に時間スケール・空間スケールを導入している(NUMO, 2021)。

これらを基にして、回収可能性の維持に伴う安全性への影響の定量化に向けて、本検討では時 間スケール・空間スケールを以下のように拡張する。

#### 1) 時間スケール

閉鎖後長期の安全評価では、処分場が閉鎖された時点を処分システムの初期状態としている。 その後の期間を次の4つの時間スケールに区分している(NUMO, 2021)。

- ・T1: 処分場閉鎖から再冠水完了までの期間
- T2:再冠水完了から放射性核種の移行が生ずるまでの期間
- ・T<sub>3</sub>: 放射性核種の移行が生じてから現在の地質環境の特性が大きく変化しないと考えられる までの期間
- T4:地質環境の特性関する不確実性が増大する期間

回収可能性の維持に伴う操業期間中および閉鎖後長期の安全性への影響を扱うため、T<sub>1</sub>より前の期間として「T<sub>0</sub>:建設開始から回収完了までの期間」を新たに設定する。T<sub>0</sub>の内訳は、工程分析による建設・操業期間中のタイムラインの作成で具体化する(0参照)。

#### 2) 空間スケール

地質環境モデルの構築、処分場の設計、閉鎖後長期の安全評価で整合を図るため、以下に示す 4つの空間スケールを設定・共有している(NUMO, 2021)。

- ・ニアフィールドスケール:人工バリアおよび処分坑道とその周辺 100m 程度の母岩の範囲
- ・パネルスケール:1つの処分区画を包含する、数百 m 四方程度の範囲
- ・処分場スケール:処分場全体(面積 10km2 程度)とその周辺数百 m 程度の岩盤を含む領域
- ・広域スケール : 地下深部処分場から地表までの広大な地質環境と生活圏を含む数十 km 四 方以上の領域

回収可能性の維持に伴う操業期間中の安全性への影響では、処分坑道などの地下施設、坑道周 辺の岩盤、定置された人工バリアが対象となるため、時間変遷のふるまいに関する記述の対象は、 ニアフィールドスケールが相当すると考えられる。一方、閉鎖後長期の安全性への影響では、開 放された処分坑道における換気による空気の供給、坑内湧水を排水することによる地下水の引き 込みが考えられるため、現行の閉鎖後長期の安全評価と同様に、広域スケールまでが対象になる と考えられる。安全性に対する回収可能性の維持の影響が及ぶ範囲を適切に設定することが重要 となる。

# (2) 安全機能の割当がない構成要素の扱い

処分場の設計において安全機能を付与していない地下施設の構成要素として、PEM 容器、構造躯体、グラウト、鋼製支保工、吹付コンクリート、ロックボルトなどがある (NUMO, 2021)。

閉鎖後長期の安全性の観点では、これらの状態変遷による影響は、金属材料の腐食による酸素の消費による化学場(C)への影響やセメント材料の成分の溶脱による透水性の増加による水理場(H)への影響等として扱われており、構成要素自体の機能の喪失や性能の低下などには触れていない。

一方、操業期間中の安全性の観点では、例えば開放坑道の空間安定性に関連する支保工の健全 性など、構成要素自体が期待される機能を発揮しているか否かが評価の対象となる。操業期間中 の安全性に係る検討では、処分施設の構成要素や使用材料の把握・整理、それらの安全性への影 響を丁寧に扱う必要がある。

#### 4.2.4 盛り込む事象の妥当性の確保

異なる定置概念への拡張(4.2.2)や、安全機能の割り当てがない構成要素の操業期間中の安全 性への影響の程度の把握(4.2.3)などでは、処分場の建設・操業工程を分析・整理し、安全性に 影響を及ぼす可能性のある対象を全て抽出しておくことが効果的である。一方で、安全性へ与え る影響の大小を問わないリアリスティックを指向するようなアプローチは、研究リソースの負荷 だけではなく因果関係が不明瞭になる懸念もある。また、数値解析では扱えない等の理由による 除外や簡略化は、本来評価対象とすべき事象を取りこぼす懸念もある。

以上を踏まえれば、事象や影響因子の取りこぼしや手法の拡張性に留意して、以下のような方 策を導入しつつ合理的に検討を進めることが望まれる。

- ○影響の大小に基づく合理化:出力に対する感度に応じた取捨選択(考慮すべき対象、事象や シナリオの取捨選択)。
- ○試験データや実測値の活用:全ての事象の時間変遷を数値解析で表現する必要はない。試験 データや地下施設などで取得された実測値を活用する。本事業では、実際の地下環境におけ る処分坑道の吹付コンクリートの特性の変化、開放された処分坑道からの空気の影響などに ついて、幌延深地層研究センターの地下坑道を活用した取り組みを進める(第5章を参照)。
- ○エキスパートジャッジ:トレーサビリティの観点から既往の文献など出典が明らかな情報の 活用が優先されるべきであるが、検討対象の特性等に応じて専門家や有識者によるエキスパ ートジャッジによる判断(対象の絞込み等)の導入を考慮する。

#### 4.3 レファレンス(処分坑道竪置き・ブロック方式)の建設・操業工程分析

定置完了後に新たに追加される可能性がある回収可能性の維持期間に伴い発生する事象・シナ リオについて、同期間を考慮しない"通常の操業"における事象・シナリオをベースとして検討・ 整理する。そのような検討のために、最初に"通常の操業"の建設・操業に係る工程の分析・整 理を実施した。

#### 4.3.1 建設・操業工程の分析

建設・操業は、地上から地下までのアクセスルートの建設、処分区画ごとの建設・操業へと展開するため、処分区画単位、さらには同一処分区画内の処分坑道単位や処分孔単位で建設と人工 バリアの定置・部分埋め戻しといった作業が繰り返される。個々の人工バリアや地下構成要素に 着目すると、これらの個々は、設置場所や施工後の全量定置完了までの経過時間が異なり、それ に応じて環境条件やその変遷状況も異なる。

このような時間的な分布の存在を、構成要素ごとに扱うことは非常に煩雑になり、必ずしも効 果的ではない。そこで、建設・操業工程の分析を行い、建設・操業期間中に地下処分施設が辿る 状態変遷の一般化を試みた。この分析では、建設・操業に要する具体的な時間経過を定量的に把 握するとともに、回収可能性の維持に伴う影響を考慮すべき対象(地下構成要素や使用材料)の 抽出も併せて実施した。

#### (1) 建設・操業における処分区画の展開

図 4.3-1 は、包括的技術報告書を基に作成した、建設・操業における処分区画の展開である。 廃棄体の有無に応じて、換気や作業動線を分離した建設・操業計画となっている。建設開始から 全ての処分区画で定置が完了するまでの期間は同図に示すように9つに区分することができるた め、この区分ごとに作業時間、構成要素や使用材料の抽出・整理を実施した。



図 4.3-1 建設・操業における処分区画の展開 (NUMO, 2020.を基に作成)

## (2) 分析対象の整理

#### 1) 処分施設レイアウト

レファレンスとして設定した定置概念(新第三紀堆積岩類地下 500m、処分孔竪置き・ブロッ ク方式、パネル型)に対して建設・操業工程を分析した。処分施設のレイアウト、寸法、形状、 使用材料などは、包括的技術報告書を参考に設定した。図 4.3-2 にレファレンスの地下施設のレ イアウトを示す。



図 4.3-2 建設・操業工程の検討の対象とした、パネル型の地下施設

# 2) 処分場の建設・操業期間の見積り

処分場の建設・操業を経て、定置完了後(閉鎖認可を得た後)に速やかに閉鎖措置に移行する "通常の操業"のタイムラインを具体化した。タイムラインの算出根拠については付属書 4-1 に 整理している。

# 4.3.2 区分ごとの工程分析結果

レファレンスとした処分孔竪置き・ブロック方式(パネル型)について、建設開始からの時間 経過に伴う、処分施設の建設や操業の進捗を示す。以下に示す各図は建設・操業期間中の地下施 設の展開の推移を示すものであり、図内の色分けは次の状態を表現している。

青:建設中、黒:建設済み、赤:操業中、茶:埋戻し状態

なお、ここで示すタイムラインや数値は、本検討で使用するために設定したものであり、実際 の処分事業が本項のとおりになることを意図したものではない。

# (1) アクセス立坑、アクセス斜坑、連絡坑道の建設(Step 1)

建設開始から 3.3 年となったこの期間では、図 4.3-3 に青で示すように、地上から地下へのア クセス立坑やアクセス斜坑の建設、立坑を起点として連絡坑道の一部が建設される。



図 4.3-3 Step 1 の期間に建設される部分(図中青)

Step1の期間に建設される地下施設の構成要素は以下のように整理した。

●アクセス立坑の一部

覆エコンクリート(コンクリート、鉄筋)、グラウト材(セメント系や溶液型)

●アクセス斜坑

吹付コンクリート(コンクリート、補強筋など)、鋼製支保工(炭素鋼製形鋼)、ロックボ ルト(鋼棒、定着材など)防水シート(シート、不織布)、覆工コンクリート(コンクリート、 鉄筋など)、インバート(コンクリート、鉄筋など)、グラウト材、排水用管

●連絡坑道

吹付コンクリート (コンクリート、補強筋など)、鋼製支保工 (炭素鋼製形鋼)、ロックボ ルト (鋼棒、定着材など)、防水シート (シート、不織布)、覆工コンクリート (コンクリー ト、鉄筋など)、インバート (コンクリート、鉄筋など)、グラウト材、排水管

#### (2) アクセス斜坑、連絡坑道、処分区画①の建設(Step 2)

建設開始から 3.3 年~9.5 年となったこの期間では、図 4.3-4 に青で示すように、地上から地下 へのアクセス立坑やアクセス斜坑の建設、連絡坑道の延伸、処分区画1の主要坑道と処分坑道が される。



図 4.3-4 Step 2 の期間に建設される部分(図中青)

Step 2 の期間に建設される地下施設の構成要素は以下のように整理した。 ●アクセス立坑の一部

Step 1 と同様

●アクセス斜坑

Step 1 と同様

●連絡坑道

Step 1 と同様

●主要坑道

吹付コンクリート(コンクリート、補強筋など)、鋼製支保工(炭素鋼製形鋼)、ロックボ ルト(鋼棒、定着材など)、防水シート(シート、不織布)、覆工コンクリート(コンクリー ト、鉄筋など)、インバート(コンクリート、鉄筋など)、グラウト材、排水管

●処分坑道

吹付コンクリート(コンクリート、補強筋など)、鋼製支保工(炭素鋼製形鋼)、ロックボ ルト(鋼棒、定着材など)、防水シート(シート、不織布)、覆工コンクリート(コンクリー ト、鉄筋など)、インバート(コンクリート、鉄筋など)、グラウト材、排水溝 ●処分孔

## (3) 処分区画①の操業、処分区画②の建設(Step 3)

建設開始から 9.5 年~17.7 年の工程である。図 4.3-5 に赤で示した処分区画①での操業と同時 に、青で示した処分区画②の建設が行われる。



図 4.3-5 Step 3 の操業区画(図中赤)と、建設区画(図中青)

Step 3 の期間に建設される地下施設の構成要素、操業で持ち込まれる部材などは以下のように 整理した。

●処分坑道(処分区画①)

埋め戻し材(ベントナイト、掘削土)、力学プラグ(コンクリート、鉄筋など) ●処分孔(処分区画①)

人工バリア ガラス固化体(ガラス固化体、ステンレス製キャニスタ)、オーバーパック(炭 素鋼)、緩衝材(ベントナイト、ケイ砂)

●主要坑道(処分区画②) Step 2 の処分区画①と同様

- ●処分坑道(処分区画②) Step 2 の処分区画①と同様
- 処分孔(処分区画②) Step 2 の処分区画①と同様

## (4) 処分区画②の操業、処分区画③の建設(Step 4)



●処分坑道(処分区画③)
 Step 2 の処分区画①と同様
 ●処分孔(処分区画③)

Step 2 の処分区画①と同様



図 4.3-6 Step 4 の操業区画(図中赤)、建設区画 (図中青)、埋め戻し区画(図中茶)

# (5) 処分区画③の操業、処分区画④の建設(Step 5)

- 建設開始から 25.9 年~34.1 年の工程
- ●処分坑道(処分区画③)
   Step 3 の処分区画①と同様
   ●処分孔(処分区画③)
   Step 3 の処分区画①と同様
- ●主要坑道(処分区画④)
   Step 2の処分区画①と同様
   ●処分坑道(処分区画④)
   Step 2の処分区画①と同様
   ●処分孔(処分区画④)

Step 2 の処分区画①と同様



図 4.3-7 Step 5 の操業区画 (図中赤)、建設区画 (図中青)、埋め戻し区画 (図中茶)

# (6) 処分区画④の操業、処分区画⑤の建設(Step 6)

建設開始から 34.1 年~42.3 年の工程 ●処分坑道(処分区画④) Step 3 の処分区画①と同様 ●処分孔(処分区画④)

- Step 3 の処分区画①と同様
- ●主要坑道(処分区画⑤)
   Step 2 の処分区画①と同様
   ●処分坑道(処分区画⑤)
   Step 2 の処分区画①と同様
   ●処分孔(処分区画⑤)

Step 2 の処分区画①と同様



図 4.3-8 Step 6 の操業区画 (図中赤)、建設区画(図中青)、埋め戻し区画 (図中茶)

(7) 処分区画⑤の操業、処分区画⑥の建設(Step 7)

建設開始から 42.3 年~50.5 年の工程
●処分坑道(処分区画⑤)
Step 3 の処分区画①と同様
●処分孔(処分区画⑤)
Step 3 の処分区画①と同様

●主要坑道(処分区画⑥)
 Step 2 の処分区画①と同様

- ●処分坑道(処分区画⑥)
   Step 2 の処分区画①と同様
- ●処分孔(処分区画⑥)
   Step 2 の処分区画①と同様



- (8) 処分区画⑥の操業(Step 8)
- 建設開始から 50.5 年~58.7 年の工程
  ●処分坑道(処分区画⑥)
  Step 3 の処分区画①と同様
  ●処分孔(処分区画⑥)
  Step 3 の処分区画①と同様



図 4.3-10 Step 8 の操業区画 (図中赤)、建設区画(図中青)、埋め戻し区画 (図中茶)

# (9) 定置完了後の回収可能性の維持(Step 9)

処分坑道が埋め戻された状態で継続する。この期間に地下施設に持ち込まれる部材などはない。



図 4.3-11 回収可能性の維持の状態

# 4.3.3 工程分析に基づくタイムラインと構成要素の整理

# (1) タイムラインの整理

図 4.3-1 の処分区画の展開に対して、建設・操業の工程分析を行った結果、図 4.3-12 のような タイムラインを得た。

処分区画	タイムライン								
アクセス坑道 連絡坑道	建設		物流・換気・排水					経過 時間	
主要坑道									
		建設	定置						49.2 (41.0)
処分区画①			埋戻し						
加八反王〇			建設	定置					41.0
処分区画②				埋戻し					(32.8)
				建設	定置				32.8
処分区画③					埋戻し				(24.6)
	<b>王</b> 画④				建設	定置			24.6
処分区画④						埋戻し			(16.4)
	<b>王</b> 画(5)					建設	定置		16.4
処分区画(5)							埋戻し		(8.2)
							建設	定置	8.2
処分区回60	【画(6)							埋戻し	(0.0)
各Step 所要時間	0 ~3.3	3.3 ~9.5	9.5 ~17.7	17.7 ~25.9	25.9 ~34.1	34.1 ~42.3	42.3 ~50.5	50.5 ~58.7	58.7~

図 4.3-12 建設・操業期間中のタイムラインと経過時間 上段:区画内の処分坑道完成後、括弧内:区画内の廃棄体定置完了後

# 1) タイムラインの一般化

建設・操業の工程分析は、処分坑道 5 本を 1 パーティーとして算定した。図 4.3-12 の処分区 画①について、建設、定置、埋め戻しの工程を更にパーティー単位に分解すると、図 4.3-13 のよ うになる。同一処分区画内でも、建設、操業の時期に最大で 8 年程度の差が生じる。



図 4.3-13 処分区画の建設・操業工程の詳細

処分区画内で詳細化した工程(図 4.3-13)を、6 区画のパネル展開に反映させたものが図 4.3-14 の上段になる。処分坑道内の換気や排水の継続・停止は、処分坑道自体だけではなく、人工バリ アや周辺岩盤の状態変遷に及ぼすため、開放状態/埋め戻し状態の違いは、影響の検討では重要 となる。そこで、地層処分施設内に存在する坑道の1本に注目し、処分場の建設開始から定置完 了を経て、回収に至る一連のタイムラインを抽出した。図 4.3-14 の下段に、特定の1 本の処分 坑道に対するタイムラインを示す。実線は処分坑道内に空間が無い状態(掘削前または埋め戻し 後の状態)を示し、点線は開放されている状態を示した。

この期間を、地層処分の安全評価における時間スケールの一つである「 $T_1$ :処分場閉鎖から再 冠水完了までの期間」よりも前の"建設・操業期間"を含む時間スケール $T_0$ と定義した。時間ス ケール $T_0$ は、処分施設の建設開始から廃棄体の定置完了を経て、廃棄体の回収完了までの期間を 扱う。



図 4.3-14 処分場全体と処分坑道単体のタイムラインの関係

# (2) 処分施設の構成要素と材料の整理

4.3.2 の工程分析では、各 Step で地下に構築される坑道の構成要素を抽出した。処分坑道は地下の岩盤等級に応じた標準支保パターンで基本的な設計が行われる。現時点では処分サイトが未決定のため、吹付コンクリートの厚さ、鋼製支保やロックボルトなどの鋼材の仕様、インバートや覆エコンクリートの有無などを特定することができない。そこで、施工時期は工程分析の結果を踏襲しつつ、構成要素の詳細については一般的な NATM 工法の山岳トンネルを参考に設定した。図 4.3-15 にトンネル標準示方書(土木学会, 2016.)を参考に整理した、坑道の構成要素と使用材料を示す。

処分施設に存在する様々な坑道は、構成要素の組合せや坑道断面形状がその役割に応じて設計 されるが、大別すれば図 4.3-15 のように、防水工・排水工等、支保工、覆工、インバートなどの 共通する構成要素からなる。構成要素は構造を成す構成部材、さらに材質・素材まで分解するこ とができる。処分場は主に以下の材料から構成される。

鉱物系 :母岩、コンクリート内の骨材、など
 セメント系 :グラウト、コンクリート中のペースト相、など
 金属材料系 :鉄筋、鋼製支保工、ロックボルト、補強材などの鋼材、処分容器、など
 有機材料系 :ビニールシート、混和剤、定着材、など

これらの材料が外乱(地下環境や相互作用)を受けて反応することで、材料からなる構成部材 の性能が変化し、最終的に構成要素の機能の変化を引き起こす。このように地下環境での材料側 の劣化に着目して整理することで、事象の取りこぼしの防止や、構成要素ごとの精緻な検討や今 後の定量化に向けた試験データや実測値など活用における共通化や簡略化を図る。



# 4.3.4 時間スケール Toの区分

新たに定義した時間スケール「T<sub>0</sub>:建設開始から回収完了までの期間」を、図 4.3-16 のように 処分坑道単位で 10 つの期間や作業に区分した。この区分における坑道の開放状態は、安全性へ の影響を検討する際の環境要因や影響時間に相当する。また、影響時間は処分坑道がどの処分区 画に属しているか、また、処分区画内での建設・操業の順番によっても変化し、他の処分区画・ 坑道から影響を受け、自身が他の処分坑道へ影響を与える。



# (1) 時間スケール To の内訳

Toを構成する期間や作業の区分ごとの特徴を以下に整理する。これらは建設・操業・回収維持・ 回収期間中の事象や環境の検討の出発点として設定した区分である。処分坑道単位を処分孔単位 へ変更するなど区分の精粗化の必要性、処分坑道ごとの経過時間考慮の必要性については、その 影響範囲を加味して、今後の検討のなかで必要に応じて再検討する。

# 1) 処分施設の建設開始から坑道掘削までの期間

- 特徴: 処分場の建設から、着目した処分坑道の掘削に着手するまでの期間。 他の処分区画の建設・操業、自身が属する処分区画の処分坑道の掘削が行われている。
- 影響: 本来の地下深部環境に対し、空間の存在、排水、換気による擾乱が加わる。 自身への影響は、掘削開始までの期間や、建設済みの坑道の位置に依存する。 連絡坑道、アクセス立坑、アクセス斜坑による擾乱は、閉鎖まで継続する。

### 2) 処分坑道の掘削

- 特徴: 着目した処分坑道の掘削、並びに 131 体の処分坑道の掘削に要する期間。 処分坑道とその構成要素の初期状態が決まる。
- 影響: 処分坑道などの構成要素に対し、空間の存在、排水、換気などによる擾乱が始まる。 建設・操業が未着手の区画へ与える影響の要因となり得る。

## 3) 定置開始までの処分坑道が解放されている期間

- 特徴: 着目した処分坑道の建設後、定置が開始されるまでの期間。 建設された順番に定置・埋め戻しを行うと仮定した場合、6~8年と見積もられる。
- 影響: 処分坑道などの構成要素に対し、空間の存在、排水、換気などによる擾乱が継続する。 建設・操業が未着手の区画へ与える影響が継続する。

# 4) 人エバリアの定置

- 特徴:着目した処分坑道に、131体の廃棄体の定置に要する期間。 処分孔内のオーバーパック、緩衝材、上部埋戻材の初期条件が決まる。 この処分坑道に対する回収可能性の維持期間の起点となる。
- 影響: 処分孔内のオーバーパック、緩衝材、上部埋戻材の状態変遷が開始する。 処分坑道などの構成要素に対し、空間の存在、排水、換気などによる擾乱が継続する。 建設・操業が未着手の区画へ与える影響が継続する。

# 5) 処分坑道の埋め戻し

- 特徴: 着目した処分坑道の埋め戻しに要する期間。 処分坑道をベントナイト混合土で埋戻し、両端部に力学プラグを設置する。
- 影響: 処分坑道の埋め戻しにより、処分坑道内への新たな空気の供給は停止する。 処分坑道内が空気(気体)からベントナイト混合土(固体)になる。 処分坑道と人工バリアに対し、湧水による擾乱、影響は継続する。
- 6) 他の処分区画の建設・操業期間
  - 特徴:着目した処分坑道の埋め戻し完了後、残りの処分坑道、他の処分区画への廃棄体の定置が完了するまでの期間。
    - 処分坑道は埋め戻し材が施工された状態。
  - 影響: 処分坑道と人工バリアに対し、湧水による擾乱、影響は継続する。

ここまでが Toにおける通常の建設・操業期間である。処分区画の違いによって、初期条件や状態変遷の期間が異なる。処分区画①と処分区画⑥を例に比較すると以下のとおりである。

- ・処分区画①: 最も擾乱が少なく、地下深部の初期条件に近い環境での建設・操業 処分坑道や人工バリアは最も長期間の状態変遷を受ける。
- ・処分区画⑥: 最も擾乱を受けた地下深部環境での建設・操業

処分坑道や人工バリアが影響を受ける期間が最も短い。

ただし、通常の操業の範囲内であるため、現時点のセーフティケース開発の中で考慮されている、或いは本事業以外で研究・技術開発が進められる。定置完了後、速やかに閉鎖措置に移行する場合は、1)~6)の後に閉鎖された状態が処分場システムの初期状態となり、T<sub>1</sub>~の閉鎖後長期の安全評価に進む。回収可能性の維持を選択した場合、T<sub>0</sub>は次の7)以降のフェーズに移行する。

### 7) 定置完了後再掘削までの期間

この期間はさらに2つに分けることができる。

①新たに追加される可能性がある回収可能性の維持期間

この期間は、閉鎖後長期の安全性への影響が有意になる時期と、回収作業期間中の安全性が確保される期間を踏まえた回収作業を開始時期のいずれか早い側が判断の期限となる。

- 特徴: 着目した処分坑道を含む、全ての処分坑道が埋め戻されている。
  - 主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道/斜坑は開放されている。
- 影響: 処分坑道と人工バリアに対し、湧水による擾乱、影響は継続する。

閉鎖措置を選択した場合は、1)~7)の後に閉鎖された状態が処分場システムの初期状態となり、T<sub>1</sub>~の閉鎖後長期の安全評価に進む。回収を選択した場合、T<sub>0</sub>はさらに回収作業期間中のフェーズに移行する。

②他の区画、処分孔坑道の再掘削

- 特徴: 着目した処分坑道が再掘削されるまでの期間。 処分坑道は埋め戻し材が施工された状態。
- 影響: 処分坑道と人工バリアに対し、湧水による擾乱、影響は継続する。 主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道/斜坑に加え、再掘削による開放区域の拡大に より、排水や換気の影響が増加する。
- 8) 処分坑道の再掘削
  - 特徴: 着目した処分坑道が再掘削される期間。
  - 影響: 処分孔内の人工バリアと上部埋戻材に対し、空気と湧水による影響が継続する。 埋め戻し材が負担していた内空変位抑制能が無くなる。 回収作業に未着手の区画へ与える影響の要因となり得る。

## 9) 回収開始までの坑道解放期間

- 特徴:着目した処分坑道が解放された後、廃棄体の回収に着手するまでの期間。 第2章で試算した回収作業の工程分析の結果を基にすれば、処分坑道が再掘削から回 収開始までの開放状態の期間は、1切羽で再掘削とオーバーパックの回収を行う場合 は約21年、建設・操業の試算と同様に1パーティー5本の処分坑道とすれば、約4年 と試算される。
- 影響: 処分坑道の構成要素への空間、空気、湧水による影響が継続する。 処分孔内の人工バリアと上部埋戻材に対し、空気と湧水による影響が継続する。 回収作業に未着手の区画へ与える影響が継続する。

#### 10) 回収作業

- 特徴:着目した処分坑道内に定置されている 131 体の廃棄体を回収するまでの期間。
- 影響: 処分坑道の構成要素への空間、空気、湧水による影響が継続する。 処分孔内の人工バリアと上部埋戻材に対し、空気と湧水による影響が継続する。 回収作業に未着手の区画へ与える影響が継続する。

# (2) 処分坑道の建設時期と、時間スケール To

新第三紀堆積岩類の処分坑道堅置き・ブロック方式(パネル型)は、51本の処分坑道を有する パネルが6区画ある。建設開始後、最初に掘削される処分坑道をP1-g01、最後に掘削される処分 坑道をP6-g51とすると、各処分坑道のToの内訳は図 4.3-17になる。

操業ステップごとの所要時間より、各処分区画の処分坑道の建設からの経過時間、廃棄体定置 からの経過時間を見積もることができる。前述した2)の処分坑道の掘削~5)の処分坑道の埋め 戻し迄の期間は、処分坑道によって大きな差は無いが、1)処分施設の建設開始から坑道掘削まで の期間と、7)6)他の処分区画の建設・操業期間には大きな差がみられる。



図 4.3-17 処分区画、処分坑道の違いによる Toの内訳の差

#### 1) 全量定置完了までの埋め戻し状態の期間の影響

図 4.3-17 は時間スケール To のうち、建設・操業を経て、廃棄体の全量定置の後に速やかに最 終閉鎖措置に移行する通常の操業と共通する期間である。処分区画①と処分区画⑥では定置完了 までに 40 年近い時間の差がある。表 1.3-1 に示した閉鎖後長期の安全性への影響に対して、こ の期間中の影響については現時点のセーフティケース開発の中で考慮されているため、新たに追 加される回収可能性の維持期間に伴い有意な影響となるか否かが、今後の検討対象の可否判断の ポイントとなる。一方、表 4.2-1 に示した操業期間中(回収期間中)の安全性への影響に対して は、坑道建設からの経過時間は構造物の劣化に大きく関係する。建設・操業後間もない若番の処 分坑道(区画)からの回収、または老番の処分坑道から着手して全ての処分坑道で埋め戻し完了 後の経過時間の均一化を図るなど、経年変化した坑道内での安全確保の有り方にも留意して、影 響の定量化を進める必要がある。

# 2) 処分施設の建設開始から坑道掘削までの期間の影響

建設・操業時期の違いは、完成後の経過時間の長短による影響のほかに、時期が異なる地下構 成要素の施工時における周辺環境条件の違いの影響も考慮する必要がある。例えば、処分事業初 期に建設された坑道は、擾乱の程度が少ない地下環境に建設されるが、その後の建設・操業期間 をとおして継続する換気(酸素の供給)や地下水の排水(周辺地下水の引き込み)などを経た事 業後期に建設される坑道では地下環境は異なり、両者の状態変遷は異なる可能性が想定される。 例えば、支保工に使用されているセメント材料からの成分の溶脱現象は、地下水中の塩化物イオ ンや炭酸イオンの濃度に依存するとの結果もあり(原環センター,2019.)、換気や排水の継続に よる遠方の地下水の引き込みの程度によっては、この期間の長短によって、大きく影響を受ける 可能性がある。

開放坑道内の換気に伴う酸素の持ち込みによる影響については、地下水流動方向(最大主応力 方向)を考慮した処分区画の配置の検討も行われている。図 4.3-18 のようなパネルスケールで の地下水流動の場合、初めに掘削される P1-g01 側での擾乱が最後の P6-g51 に及ぶ影響は少な



図 4.3-18 処分坑道の向き (NUMO, 2021b を参考に作成)

以上のように、数十年にわたる地層処分事業において、場所によって異なる建設・操業時期、 経過時間などが、安全性の評価に及ぼす影響に留意する必要がある。ただし、これらが安全性へ の影響にどのように関与するのかを見極め、検討の対象の取捨選択や時間スケール設定の簡略化 など、合理的に検討を進める工夫も必要である。

# 4.4 定量化手法の構築に向けたストーリーボードの作成方法の検討

回収可能性の維持に伴う影響を定量化は、処分場の安全性に関与する構成要素やその機能が、 処分場の建設・操業から回収可能性の維持期間までの時間内にどのように変化するかを把握する ことになる。定量化の手法としては、試験データや実測値などの実際に観測された事実に基づく 外挿や定数化、数値解析手法による予測などが挙げられる。いずれの手法においても処分場のシ ステムとしてのふるまいに関する理解が重要である。

閉鎖後長期の安全評価の基本手順では、以下を可能とする表現方法として、ストーリーボード を導入している(NUMO, 2021.)。

- ・地層処分システム全体のふるまいを俯瞰できる
- ・時間・空間スケールに関する整合性を確認できる

回収可能性の維持に伴う安全性への影響の定量化においてもこの手法を採用した検討を試みる。 ただし、操業期間中の安全性は、閉鎖後長期の安全評価と着目する時間・空間スケール、構成要 素のふるまいの扱いが異なる点に留意して進める。

#### 4.4.1 回収可能性の維持に伴う閉鎖後長期の安全性への影響

4.2.1(2)に述べたように、建設・操業を経て、廃棄体の全量定置の後に速やかに最終閉鎖措置に 移行する通常の操業においても、建設・操業期間中の換気・排水による地下環境への擾乱、定置 された人工バリアの初期状態といった閉鎖後長期の安全性へ与える影響は、現時点のセーフティ ケース開発の中で考慮されていることから、通常の操業で生じる事象の影響が定置完了後の回収 可能性の維持期間中も継続するという観点で検討を進める。

閉鎖後長期の安全評価では、表 1.3-1 に示した人工バリアと天然バリア(母岩)といった、安
全機能を割り当てた処分場の構成要素に対して、熱的(Thermal)、水理学的(Hydrological)、 力学的(Mechanical)、化学的(Chemical)な状態の変化のなかで、所期の安全機能がどのよう に働くかの理解に主眼を置いている。そのため、定量化の出力は、構成要素のTHMC状態の変 化とその条件における期待した機能の発揮の仕方を、時間・空間スケールで記述する(ストーリ ー展開する)。ただし、通常の操業では施設の最終閉鎖の時点を処分システムの初期条件として、 時間スケール「T<sub>1</sub>:処分場閉鎖から再冠水完了までの期間」以降の時間変遷を評価している。回 収可能性の維持に伴う影響を取り込むためには、4.3.4 で定義した時間スケール「T<sub>0</sub>:建設開始か ら回収完了までの期間」を踏まえ、「定置完了後に新たに追加される可能性がある回収可能性の維 持期間」を経た処分システムや周辺環境の状態(T<sub>1</sub>以降の評価における初期条件)を考慮する必 要がある。

そこで、通常の操業における安全評価の基本的な手順を参考に、閉鎖後長期の観点から設定さ れている安全機能だけではなく、より広範囲の影響を確認するために、要因分析の方法を拡張し 温度、水理、力学、化学の諸環境を評価する方法を採用する。この方法の要因分析を実施するこ とを目的として、最新の国際 FEP (OECD/NEA, 2019 OECD/NEA, 2020) および包括的技 術報告書 (NUMO, 2021) を対象とした調査・整理を実施する。この調査に基づき、処分場の状 態変遷に影響を及ぼす可能性のあるプロセスを整理し、FEP に記載されている内容を参考にデー タベース化を行う。次に、処分場の状態変遷に係る「定量的な評価」の観点から、「状態変数」を 定義し、これと処分工程の構築において処分場で用いられる材料との組み合わせにより、要因分 析を実施する。これらの結果を踏まえてストーリーボードの作成を行う。

図 4.4-1 に閉鎖後長期の安全性への影響に対するストーリーボードの作成手順を示す。



図 4.4-1 検討の戦略的手順

### 4.4.2 回収可能性の維持に伴う操業安全性への影響

閉鎖後長期の安全性への影響では、空間スケール及び人工バリアを主体とした構成要素の THMC 状態の変化とその条件における期待した機能の発揮の仕方を時間・空間スケールで記述す ることに対して、操業期間中の安全性への影響では表 4.2-1 に示したように、検討の対象は処分 坑道の空間安定性や廃棄体の健全性であり、これらの健全性を支持する安全機能が割り当てられ ていない対象物(例えば支保等の構成要素)の機能や性能の時間経過に応じた状態の変化がポイ ントとなる。そのため、閉鎖後長期の安全性への影響で用いる構成要素の THMC 状態の記述で は不十分である。

4.3 に整理したように、レファレンスの建設・操業期間中の工程分析により、処分施設の構成要素や材料、施工時期や経過時間を具体的に把握した。これに基づく、回収可能性の維持に伴う影響の定量化までの流れを図 4.4-2 に示す。

このような工程分析をとおして、処分場の構成要素とその材料を特定した。構成要素の性能の 変化は材料の変化によって生じる。例えば、吹付コンクリートの強度低下はセメントの成分の溶 脱による空隙率の増加、ロックボルトの効果喪失は腐食による断面減少に伴う破断のように、材 料自体の劣化挙動で構成要素の性能・機能の変化を記述することができる。

材料の変化はそれ自身の変化の他に周辺環境の変化にも作用する。例えば、溶脱したセメント 成分による周辺環境の高 pH 化、鋼材の腐食に伴う酸素の消費が挙げられる。これに加えて時間 スケール To の期間中に継続する換気や排水に伴う環境の変化、坑道の内空が存在することによ る力学的な作用などが、処分場の構成要素に作用する環境の変化となる。処分孔の構成要素は図 4.3-15 の処分坑道の例のように多くの部材から構成される。構成部材ごとに時間変遷をストーリ ーボードとして表現し、それらをさらに統合して構成要素のストーリーボードを作成する。これ により、挙動や材料間の相互作用に関して取りこぼしなく包括的に整理することができる。

### 4.4.3 扱う事象の合理的な選択

4.3 の工程分析では構成要素や使用材料、さらには時間スケール Toの区分を、閉鎖後長期の安 全性への影響に対する寄与度に因らず網羅的に抽出・整理した。ストーリーボードの作成後、時 間変遷を表すシナリオへ展開するが、全ての要素の相互作用を考慮して時間スケールで表現する ことは、技術的、リソース的に合理的ではない。時間スケールの合理化として 4.3.4(2)に示した ような方法、構成要素や使用材料の合理化として部材の省略などが挙げられる。

ストーリーボードからシナリオ作成の手順においては、専門家・有識者による検討会での議論 なども有効と考えられる。本事業ではそのような議論のたたき台となるよう、ストーリーボード の作成を行う。



図 4.4-2 処分施設を構成する材料の変化を軸とした影響検討のイメージ

### 4.5本章の成果と今後の展開

### 4.5.1 本章の成果

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伴う安全性への影響の定量化手法の整備に向け、以下の事項を実施した。

回収可能性の維持に伴う安全性への影響は、回収可能性の維持期間の決定、安全な回収の実施 の可否の判断に対して重要であり、定置概念に依存しない共通課題である。処分場が建設される 地質環境特性、回収可能性の維持の状態、他の定置概念への展開を見据え、レファレンスとして 新第三紀堆積岩類・地下 500m に建設された処分孔・竪置き・ブロック方式(パネル型)を設定 した。

R&R 検討会で整理した回収可能性の維持に伴う影響の定量化に先立ち、時間・空間スケールの 把握のため、レファレンスの建設・操業工程の分析を行った。閉鎖後長期の安全評価で採用され ている時間スケール ( $T_1$ - $T_4$ )を踏まえ、回収可能性の維持期間を検討するための時間スケールと して「 $T_0$ :建設開始から回収完了までの期間」を追加設定した。また、空間スケールについては、 ニアフィールドスケールなどの4つの空間スケールに加えて、坑道などの構成要素と使用材料の 個々が扱えるように整理を行った。

回収可能性の維持に伴う影響の対象ごとに、時間・空間スケールに関する整合性を確認できる ようにする表現方法として、ストーリーボード作成方法の導入を検討した。閉鎖後長期の安全性 への影響のストーリーボードは、通常の操業で考慮されている事象を踏まえ、構成要素のTHMC 状態変化とその条件における安全機能の発揮の仕方を人工バリア・天然バリアそれぞれに時間・ 空間スケールを念頭に記述する。操業期間中(回収作業中)の安全性への影響に関するストーリ ーボードは、坑道の空間安定性や廃棄体の健全性のように対象が個別の要素/材料レベルで明確 であるため、レファレンスの工程分析結果に基づき、材料の時間変化から構成要素の機能の時間 変化を記述する。

### 4.5.2 今後の展開

処分場の建設から廃棄体の全量定置までの通常の操業の時間軸(回収作業時間はその時間軸に 包含する)に対してストーリーボードを作成する。その上で、回収可能性を維持した場合に特有 となる影響項目を整理し、検討対象とすべき事象の優先度や新たに追加検討すべき事象の有無や 重要度を整理し、回収可能性の維持に伴う影響を考慮したストーリーボードを作成する。 第4章 参考文献

- 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 28 年度高レベル放射性廃棄物等の 地層処分に関する研究開発事業(可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発) 報告書(第 3分冊), 2017.
- 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の 地層処分に関する研究開発事業(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.
- 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の 地層処分に関する研究開発事業(可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発) 報告書,2020.
- 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-,NUMO-TR-20-03, 2021a.
- 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-,NUMO-TR-20-03,付属書 4-54,2021b.

土木学会, 2016年度制定 トンネル標準示方書 [共通編]・同解説/[山岳工法編]・同解説, 2016.

OECD/NEA, International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste Radioactive Waste Management and Decommissioning, NEA/RWM/R (2019)1, July 2019

### 5.回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備 -定量化に必要な物性値の取得-

### 5.1 背景および目的

定置作業後に回収可能性の維持期間を設ける可能性を考慮していない従来の概念に対して、同 期間を設ける可能性を考慮する場合に新たに考慮すべき事項として、長期間にわたる開放坑道の 健全性の維持や再掘削後の坑道安定性の確保、ならびに定置後の過渡的期間における人工バリア の状態変遷等の評価の前提となる環境条件の違いなどが挙げられる。本節では、「平成 31 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度 化開発 平成 27 年度~平成 31 年度 5 ヵ年取りまとめ報告書」においても課題として挙げられて いた、実際の地質環境条件下で生じる現象についての理解、実験によるデータの拡充ならびに定 量化手法の整備を 3 ヵ年の事業目標とした。

具体的には、地質環境条件について非常に多岐にわたり詳細なデータ等が取得されている日本 原子力機構が保有する幌延深地層研究所を事例としてとりあげ、図 5.1-1 に示す性能性維持期間 中の開放坑道の安全性への影響、②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 響の評価に資する物性値の取得・設定の方法を提示する形でのアプローチをとることとし、以下 2つの項目を設定し技術開発を進めることとした。

(1) 実際の地下環境における支保部材の状態把握

(2) 実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理

以降、上記について得られた成果を概説する。

定景化すべき頂	8	(トレードオフの関係にある4項目)	処分	・孔竪置き	方式	横置き・PEM方式		
に里1し9へと項日(トレートオノの民体にのる4項日)			OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3
	(1)	操業期間中の安全性への影響						
1.安全性への影響		①回収可能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響						
(1)は5つの小酒日		②回収作業時の安全性への影響(回収を実施する場合)						
(1)は5つの小項日	(2)	閉鎖後長期の安全性への影響響						
(2)は6つの小項目		①人工バリアに期待する閉鎖後長期の安全機能への影響						
		②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						

図 5.1-1 回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備における検討項目と本章での技術開発 との関係

### 5.2 実際の地下環境における支保部材の状態把握

支保部材の状態把握の検討を定量的に実施するためには、支保部材の最初の状態(初期状態) が定量的に把握されていることが必要となる。

幌延深地層研究所は、深度 350m までの坑道掘削が行われており、そのためにコンクリート支 保工が設置されているが、本事業で求められるような「性能性維持期間中の開放坑道の安全性」 を定量的に示すために必要な情報は設置時には取得されていない。このため、令和2年度は、実 際に施工されているコンクリート支保工自体を再現し、それに対して今後の定量的な評価や変化 のメカニズムの検討に必要な初期状態を把握するとともに、今後の経年変化を把握するために再 現したコンクリートを随時サンプリングが可能な状態で坑道内に定置した。

これらの結果を以降に述べる。なお、測定データについては付録1にまとめている。

## 5.2.1 幌延深地層研究所で使用されているコンクリート支保工の再現とそれを使用したコンクリート供試体の作成

### (1) 使用材料

本作業で使用した材料を表 5.2-1 に示す。また、幌延深地層研究所で施工されているコンク リート支保工の材料仕様(幌延深地層研究計画 地下研究施設整備(第Ⅱ)等事業、以下Ⅱ期工 事と称する)も併記している。再現のため、ほぼすべての材料について実際の工事で使われたも のと同一であるが、急結材については製造中止になっているため、同等の性能を持つものを利用 した。

	今回	今回					
材料名	銘柄及び製造メーカー         品質等(含む製造           又は産地         ー)		銘柄及び製造メーカー又は産地				
セメント	普通ポルトランドセメント (日鐵セメント(株))	密度=3.16g/cm <sup>3</sup>	普通ポルトランドセメント (日鐵セメント(株))				
シリカフ ューム	マイクロシリカ 940grade (エルケム・ジャパン(株))	密度=2.2g/cm <sup>3</sup>	マイクロシリカ 940grade (エルケム・ジャパン(株))				
フライ アッシュ	JISⅡ種灰 (苫東厚真発電所産)	密度=2.34g/cm <sup>3</sup>	JISⅡ種灰(苫東厚真発電所産)				
細骨材	砂(幌延町浜里産)	表乾密度=2.67g/cm <sup>3</sup>	砂(幌延町浜里産)				
粗骨材	砂利(5-15mm) (北斗市峩朗産)	表乾密度=2.69g/cm <sup>3</sup>	砂利 (5-15mm) (北斗市峩朗産)				
混和剤	高性能 AE 減水剤(マスターグレ ニウム SP8SV)	ポゾリスソリューション ズ(株)	高性能 AE 減水剤 (旧名:レオビルド SP8SV)				
急結剤	デンカナトミック Z-AF (デンカ(株))	カルシウムアルミネート 系	デンカナトミック TYPE-10 (デンカ(株))				
水	工業用水(デンカ(株))	新潟県糸魚川市	井戸水(幌延町)				

表 5.2-1 使用した材料

### (2) コンクリートの配合仕様

今回作成したコンクリートの配合仕様を表 5.2-2 に示す。なお、当該仕様は、Ⅱ期工事の際の配合選定試験結果に基づいて選定された配合と同じである。

				単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
	配合	水結合 材比 (%)	細骨 材率 (%)	水 W	セメ ント C	結合材 E シリカ ヒュー ム SF	フライ アッシ ユ FA	細骨 材 S	粗骨 材 G	混和剤 Ad
今回	HFSC	35.0	60.2	175	200	100	200	945	638	5.25
Ⅱ期 工事	HFSC -1-2	35.0	60.2	175	200	100	200	945	638	5.25

表 5.2-2 吹付けコンクリートの配合仕様

### (3) 使用設備およびベースコンクリートの作成方法

ベースコンクリートは、表 5.2-3 に示す方法に準拠して作成した。ベースコンクリート作成時 に使用した設備の仕様を表 5.2-4 に、作成場所および使用装置の外観を図 5.2-1、図 5.2-2 に示 す。また、吹付け配管システムの概要を図 5.2-3、図 5.2-4 に示す。なお、今回は 9/29 にベース コンクリートの作成を行ったものの一部不具合が生じたため、10/20に再度製作し直した。後述 するコンクリートの性状に関する試験では、両方のコンクリートを用いて比較を行っている。

試験項目 基準、規格等 吹付けコンクリート(モルタル)の圧縮強度試験用供試体の作り方(案) JSCE-F 561 ベースコンクリートの作成 コンクリート(モルタル)の吹付け試験方法(案) JSCE-F 565 吹付け

表 5.2-3 ベースコンクリート作成

種類	型式	能力	メーカー等
オムニミキサ	揺動型 OM ミキサー OM500-PB4	容量=500ℓ、200V/37kW、 2,850×2,150×2,550mm	(株)チョダマシナリ ー
模擬トンネル	_	内空幅=5.2m、高さ=4.4m、延長=20m	
吹付けロボット	KMS24	ブーム長=3,000mm 最大吹付け高さ=7,900mm 最大吹付け幅=10,190mm	(株)コバヤシ
急結剤添加装置	NATM クリート PAC-250V	ナトミック用添加装置(エアドライヤ 含む)	デンカ(株)
コンクリート・ポ ンプ	MKW-25SNT	理論吐出量=5~25m <sup>3</sup> /hr	(株)シンテック
コンプレッサー	—	100PS 級 エンジン式×2 台	_

表 5.2-4 使用設備





(b)オムニミキサ



図 5.2-1 第八実験棟内の装置

全景



(a)坑口側



(c)構内 B



(b)切羽側



(d)吹付け試験前のトンネル壁面の状態 図 5.2-2 使用した模擬トンネル



図 5.2-3 吹付け配管システム図



(a) コンクリート・ポンプ



(b)急結剤添加機(NATM クリート)



(c)吹付けロボット

(d)コンプレッサー

図 5.2-4 吹付け関連装置

### (4) 吹付け条件と手順

吹付けコンクリートの吹付条件を以下に示す。

- ・コンクリート吐出量 :10 m<sup>3</sup>/hr
- ・コンクリート練混ぜ量 : 吹付け・測定用コンクリート・ポンプ残コン含め
   1.0 m<sup>3</sup>/試験水準

今回、ベースコンクリートの作成を2回に分けて行った。第1回目は練り上げバッチの違いに よる影響を減らすため、全ての練り上がったコンクリートをアジテータ車で混合したものを吹き 付けた。その結果、全練り混ぜ量1.0m<sup>3</sup>のうち約0.1m<sup>3</sup>しか吹き付けることができなかった。こ のため、第2回目は、以下に記す吹付け順序で行い、全練り混ぜ量1.0m<sup>3</sup>を吹き付けることがで きた。具体的には、まず1バッチ目のコンクリートをポンプに投入し、ホッパー内とホース内を 充填した。その後、2バッチ目から順次コンクリートをポンプに投入し、吹付けた。なお、コン クリートをポンプに投入している間は、吹付けを停止した。吹付け試験では、4バッチ分のコン クリートを3回に分けて吹き付け、供試体を作成した。吹付量については、最初の吹付けは1バ ッチ目の残り+2バッチ目=0.6m<sup>3</sup>、2回目と3回目については合計で、3バッチ目+4バッチ目 (最後のバッチ)=0.4m<sup>3</sup>を吹き付けた。

なお、吹付条件を満たしているかを確認するため、コンクリート・ポンプ面圧、補助エア圧と エア量、NATM クリートエア圧とエア量を測定した。表 5.2-5 に、第2回目(10月 20日分)に 実施した吹付け試験における計測結果を示す。

コンクリートポン プ面圧 (MPa)	コンクリート 圧送圧 (MPa)	NATM エア <u>量</u> (m <sup>3</sup> /min)	NATM タンク圧 (MPa)	全コンクリート 量 (m³)	吹付け時間 (分)	コンクリー ト吐出 量 (m <sup>3</sup> /h)	急結剤使 用量(kg)	急結剤 添加率 (%)
$5.0 \sim 5.5$	4.2	5.0	0.31	1.4	練上り後 8 分→53 分(全吹付終了)	9.5	72.0	10.3

表 5.2-5 吹付け条件の計測結果:第2回目(10月20日)

### (5) 吹付けコンクリート供試体の性状確認

作成したコンクリートが実際のⅡ期工事で用いられたコンクリートと同等の性状を有すること を確認するため、表 5.2-6 および表 5.2-7 に示す実際の工事の施工管理で行われた試験を実施し 比較した。

試験結果は表 5.2-8~表 5.2-10 および図 5.2-5~図 5.2-7 に示す通りとなり、スランプ、プル アウト強度および材令毎の圧縮強度ともⅡ期工事のコンクリートと同等の値を示しており、当初 目的通り支保工コンクリートを再現できたと判断した。

	試験項目と数量	
フレッシュ性状(2 バッチ)	ベースコンクリート の圧縮強度試験	プルアウト 初期強度試験
<ul> <li>・スランプ、空気量</li> <li>・コンクリート温度</li> </ul>	・材齢7日、28日 n=3	・材齢 3hr、24hr n=3

表 5.2-6 試験項目

	表 5.2-7 谷試験項目における準拠規格の一覧						
試験項目	基準、規格、備考						
スランプ試験	コンクリートのスランプ試験方法 JISA 1101						
空気量試験	フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法(空気室圧力方法) JISA 1128						
コンクリート温度	コンクリートの温度測定方法 JISA 1156						
ベースコンクリート 圧縮強度 (型枠供試体)	<ul> <li>コンクリートの強度試験用供試体の作り方 JISA 1132</li> <li>コンクリートの圧縮強度試験方法 JISA 1108</li> <li>&lt;備考&gt;供試体寸法: φ100mm×h200mm(3本/材齢)</li> <li>測定材齢: 7日,28日</li> <li>標準養生: 20℃水中</li> </ul>						
プルマウレ知明改産	引抜き方法による吹付けコンクリートの初期強度試験方法 JSCE-G 561						

#### 7 タ学験百日にわけて淮圳田牧の EF A

表 5.2-8 作成したコンクリートのスランプ、空気量および温度測定結果

<備考>養生条件:吹付け後、屋内室温(20℃)養生

プルアウト初期強度

	No.	吹付け	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(℃)	バッチ数	備考
	1	1回目 (9/29)	21.5	3.8	23	アジ車	アジテータ車 (アジ車)積載
今回	2	2回目	23.0	4.3	18	1 バッチ目	バケットから
Ι	3	(10/20)	23.0	—	—	4	投入
	4		24.5	60 分	·経過後	バッチ目	
Ⅱ期工事	HFSC -1-2	2011/1/6	20.0	4.2	13	I	

### 表 5.2-9 ベースコンクリートのプルアウト強度(換算)試験結果

でたけいさ		プルアウトによる圧縮強度(換算) (N/mm <sup>2</sup> )							
欧国の		3hr		平均值		平均值			
第1回目 (9/29)	供討	供試体を採取できず		_	10.8 15.5 15.3			13.9	
第2回目 (10/20)	3.1	1.9	4.1	3.0	11.4	10.9	11.9	11.4	
Ⅱ期工事 (2011/1/6)				3.7				12.9	

表 5.2-10 ベースコンクリートの圧縮強度試験結果 (N/mm<sup>2</sup>)

	吹付け	材齢7日		平均值		平均值			
	第1回目 (9/29)	32.0	32.5	34.1	32.9	60.4	58.3	57.7	58.8
一旦	第2回目 (10/20)	29.0	28.1	29.2	28.8	51.7	54.0	53.9	53.2
Ⅱ期 工事	2011/1				27.7				58.5



図 5.2-5 ベースコンクリートのスランプ試験結果



図 5.2-6 プルアウト強度(換算)試験結果



### 5.2.2 コンクリート供試体の作成と初期値取得のための各種物性試験・分析

(6) 各種物性試験・分析項目とコンクリート供試体の作成

設定した初期値取得のための令和2年度分の各種物性試験・分析の項目・数量を以下に示す。 物性試験・分析項目は、支保エコンクリートの経時変化について定量的評価や変化のメカニズム の検討に必要な最低限のものを抽出している。この数量を勘案し、①で作成したベースコンクリ ートからコンクリート供試体を製作した。

ベースコンクリートは、吹付けコンクリート(モルタル)の圧縮強度試験用供試体の作り方(案) JSCE-F-561 に準拠した方法で作成し、その供試体から、必要な寸法のコアを作成した(図 5.2-8、 表 5.2-11)。なお、コアリングを実施する前までのベースコンクリートは吹付け後、室温で約1ヶ 月間気中にて養生した。また、吹付け面に対し垂直にコアリングし、両端を切断・研磨キャッピ ングを行い、封緘養生した。最終的には、239本(仕様寸法183本、長尺36本、短尺20本)の コンクリート供試体を作成し、後述するように表 5.2-11 に示される数量を除く分を幌延深地層 研究所深度350m 坑道内に定置した。





(a) ベースコンクリート養生状況
 (b) コアリング状況
 図 5.2-8 吹付けコンクリートコア作成

表	$5.2 \cdot 11$	試験項目、	数量、	寸法
~	<b>U</b> . <b>L L</b>			1 1

	試験項目	試験方法等	数量	寸法(1 体あたり)
物性試験	一軸圧縮試験	<ul> <li>・JSCE・F 561「吹付けコンクリート(モルタル)の圧縮強度 試験用供試体の作り方(案)」に準拠</li> <li>・JISA 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮 強度試験方法」に準拠</li> <li>・JISA 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠</li> </ul>	9	$\phi~50$ mm $ imes$ H100 mm
	弾性波測定 (P、S 波)	・パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法 (JGS2110-2009)	10	$\phi  50$ mm $ imes$ H100 mm
	透水試験(変水 位法)	・変水位法(低透水性材料の透水試験方法 JGS 0312 に準拠)	9	$\phi50{ m mmm} imes{ m H50}{ m mm}$
	圧裂試験	・JISA 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮 強度試験方法」に準拠 ・JISA 1113「コンクリートの割裂引張強度験方法」に準拠	9	$\phi~50\mathrm{mm}{ imes}\mathrm{H50mm}$
	空隙率測定	・JIS R 1655 2003「ファインセラミックスの水銀圧入法による成形体気孔分布試験方法」に準拠	9	コアを 2.5~5mm 角に微粉 砕
分析	薄片(試験体) 作成	9		φ20mm×H5mm 程度
	EDS 面分析	9		表面研磨
	SEM 観察	9		破断したまま
	備考:透水試験(3	変水位法)以外は、2回目の吹付け試験で作成したベースコン	·クリートカ	ら作成したコアを使用した。

### (7) 物性試験結果

### 物理的な性質

空隙率測定で使用した装置等、測定条件を表 5.2-12~表 5.2-14 に、測定結果を表 5.2-15、表 5.2-16 及び図 5.2-9 に示す。全般的な特徴として、コンクリート供試体の空隙率は 8~12%程度 と見積もられ、3~10nm の孔径の空隙が支配的であり、供試体毎の違いは見られない。

弾性波速度測定は、表 5.2-17 に示す装置を用いて図 5.2-10 のような形で実施したが、P 波および S 波の平均速度は、それぞれ、5.85km/sec、2.68km/sec で、かつ標準偏差も 0.18km/sec、0.05km/sec とバラつきも非常に小さい(表 5.2-18、図 5.2-11)

項目	メーカー 名称	仕様				
水銀圧入式細孔分布測定 装置	micromeritics 社製 オートポアIV 9520 型	測定範囲: φ 0.003~1000 μ m 圧力:大気圧~414MPa 試料セル: φ 15mm×10mm 又は 20mm				
水銀	キシダ化学株式会社 特級 水銀(試薬)	純度 99.5%以上				

表 5.2-12 使用した装置等の仕様

項目	仕様
水銀	表面張力: 480dynes/cm、接触角: 140.0degrees、密度: 13.5462g/ml
測定開始圧力	2.13psi
測定最高圧力	60000psi
測定モード	連続的に圧力を変化させる過程で、圧力変化あるいは水銀圧入量変化が一定 値を超えた時点における圧力と水銀圧入量を測定する。
ブランク補正の有無	無し

表 5.2-13 測定条件

表 5.2-14 試料の質量

試験体番号	質量 (g)	試験体番号	質量(g)
1	2.0837	6	2.3047
2	2.0145	7	2.3488
3	2.3766	8	2.3218
4	2.3493	9	2.4111
5	2.3182		
備考:試料形態は、吹付 コンクリートコア	けコンクリートコアから粉 粉砕した後、アセトンを用	分砕した 2.5~5mm の角柱 引いて水和停止処理後、24	。 時間真空脱気を行った。

表 5.2-15 単位体積あたりの累積細孔容積

試料番号	1	2	3	4	5
累積細孔容積 (ml/g)	0.7384	1.1802	1.0621	0.7264	0.8498
試料番号	6	7	8	9	平均值
累積細孔容積 (ml/g)	0.7384	1.1802	1.0621	0.7264	0.9429

= 5 5 6 / 1	細孔孔径 (ml/g)								
試験体 番号	10-100 μm	1-10 µm	0.5-1 μm	100-500 nm	10-100 nm	6-10 nm	3-6 nm	合計 (ml/ g)	空隙率 (%)
1	0.02386	0.03186	0.02950	0.09345	0.06911	0.28314	0.20747	0.73839	9.0916
2	0.02275	0.02600	0.02769	0.17247	0.14491	0.44343	0.34295	1.18020	13.0053
3	0.02078	0.03258	0.01418	0.11571	0.12856	0.44129	0.30895	1.06206	11.9478
4	0.02458	0.03370	0.02535	0.06941	0.05579	0.28488	0.23270	0.72641	9.0824
5	0.02554	0.03513	0.02788	0.10505	0.07058	0.30408	0.28157	0.84982	10.4820
6	0.02537	0.03046	0.03449	0.10590	0.09940	0.39424	0.31818	1.00805	11.6069
7	0.02579	0.03215	0.02573	0.09358	0.07400	0.37655	0.29213	0.91992	11.0497
8	0.02445	0.03429	0.02721	0.16539	0.12070	0.41076	0.30529	1.08809	12.6087
9	0.02061	0.03089	0.02000	0.11161	0.07182	0.32508	0.33266	0.91268	10.9233

表 5.2-16 各細孔径分布



図 5.2-9 全空隙における各細孔孔径の割合

項目	メーカー 名称	仕様
超音波速度測定器	OYO ニューソニックビュアー Model-5251C	振動子駆動電圧:500V±20V 振動子駆動パルス幅:6µsec±2µsec 利得:1、2、5、10、20、50、100、200倍 周波数帯域:下限値 10kHz±2KHz 上限値 1000kHz±200KHz カットオフ周波数 fc=200±40KHz 1000±200KHz サンプルレート:50、100、200、500、1000、2000nsec
超音波単子(P 波用)	OYO P-500K	500Hz
超音波単子(S 波用)	OYO S-100K	100Hz

表 5.2-17 使用した装置の仕様



-
 -
_
=
Ξ

(a) 測定状況(全体)
 (b) 測定状況(コンクリートコア近接)
 図 5.2-10 弾性波速度測定状況

表 5.2-18	吹付コンクリートの弾性波速度

試験年月日		2021年1月7日									
試 料											
供試体番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
材齢	(日)	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
		49.91	49.87	50.07	49.77	49.85	49.86	49.88	49.84	49.97	49.81
		49.88	49.88	50.05	49.74	49.84	49.88	49.84	49.86	49.83	49.84
		49.81	49.93	49.85	49.71	49.92	49.88	49.78	49.83	49.84	49.86
		49.85	49.84	49.91	49.73	49.82	49.83	49.84	49.84	49.93	
		49.82	49.85	49.84	49.71	49.85	49.83	49.85	49.81	49.86	
		49.85	49.82	49.84	49.67	49.82	49.90	49.85	49.82	49.83	
平均直径	(mm)	49.9	49.9	49.9	49.7	49.9	49.9	49.8	49.8	49.9	49.8
断面積	$(cm^2)$	19.52	19.53	19.58	19.42	19.52	19.53	19.51	19.50	19.54	19.51
		99.67	97.83	99.10	99.65	96.92	99.27	98.46	98.45	100.00	97.57
		99.87	97.80	99.10	99.67	96.94	99.32	98.44	98.43	100.10	97.62
平均高さ	(mm)	99.8	97.8	99.1	99.7	96.9	99.3	98.5	98.4	100.1	97.6
体積	$(cm^3)$	194.7	191.1	194.0	193.5	189.2	193.9	192.1	192.0	195.5	190.4
気 中 質 量	(g)	463.69	455.12	462.94	461.48	452.03	455.94	454.41	458.15	464.98	456.03
見掛けの密度		2.380	2.380	2.390	2.380	2.390	2.350	2.370	2.390	2.380	2.400
見掛けの密度の平均値	(g/cm <sup>3</sup> )					2.	38				
高さと直径との比	U	2.00	1.96	1.99	1.00	1.94	1.99	1.98	1.98	2.01	1.96
		16.9	17.0	18.2	17.6	16.5	17.7	18.7	18.2	18.9	17.3
		17.7	17.2	18.7	17.8	16.6	17.6	18.3	17.7	18.5	16.5
		18.1	16.7	18.2	16.7	16.6	17.3	18.1	17.0	18.7	17.1
平均P波伝播時間	(µsec)	17.6	17.0	18.4	17.4	16.6	17.5	18.4	17.6	18.7	17.0
Vp		5678	5764	5395	5737	5850	5665	5359	5584	5350	5751
Vp 平 均 值	(m/sec)					5613	3				
		37.6	39.0	38.1	38.1	37.2	39.5	38.3	39.0	38.2	38.3
		37.1	38.7	38.2	38.2	37.6	39.3	38.4	39.1	38.9	37.9
		36.9	38.3	38.5	38.0	37.6	39.0	37.8	39.0	38.0	38.1
半均S波伝播時間	(µsec)	37.2	38.7	38.3	38.1	37.5	39.3	38.2	39.0	38.4	38.1
Vs		2682	2530	2589	2616	2587	2529	2579	2522	2608	2562
Vs 平 均 值	(m/sec)					2580	)				
動 ポアソン 比		0.356	0.381	0.350	0.369	0.378	0.376	0.349	0.372	0.344	0.376
動ポアソン比平均値						0.36	5				
動せん断弾性係数		17.12	15.23	16.03	16.28	15.99	15.03	15.77	15.20	16.18	15.75
動せん断弾性係数平均値	直 (kN/mm <sup>2</sup> )					15.9	)				
動弾性係数		46.44	42.06	43.28	44.58	44.09	41.34	42.55	41.71	43.50	43.35
動磁性係数亚均值	$(kN/mm^2)$					43.3					



	Vp(m/sec)
最大値	5850
最小値	5350
平均値	5613
中央値	5672
最頻値	—
標準偏差	183

### S波速度

P波速度



	Vs(m/sec)
最大値	2682
最小値	2522
平均值	2580
中央値	2583
最頻値	_
標準偏差	49

動ポアン	ソン比
------	-----



	動ポアソン比
最大値	0.38
最小値	0.34
平均値	0.37
中央値	0.37
最頻値	
票準偏差	0.01

### 動せん断弾性係数



# 動せん断弾性係数 (kN/mm<sup>2</sup>) 最大値 17.1 最小値 15.0 平均値 15.9 中央値 15.9 最頻値 標準偏差 0.6

	動断弾性係数
	(kN/mm <sup>2</sup> )
最大値	46.4
最小値	41.3
平均值	43.3
中央値	43.3
最頻値	_
標準偏差	1.5

### 動弾性係数

	_						
45				-			 _
(in 40		T			1		
m/N/) 35	÷						
部 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	÷						
25	-						
20							

図 5.2-11 弾性波速度測定結果および求められた動的物性値

### 2) 力学的な性質

表 5.2-19 に使用した機器の仕様を、表 5.2-20~表 5.2-22 および図 5.2-12~図 5.2-15 に試験 結果を示す。静弾性係数は 37±1.2kN/mm<sup>2</sup>、一軸圧縮強度は 58.5±3.3kN/mm<sup>2</sup>、静ポアソン比は 0.25±0.2、圧裂引張強度は、4.17±0.35kN/mm<sup>2</sup>であり、応力ひずみ曲線からも弾性領域内では非 常にバラつきの少ない均質なコンクリート供試体となっている(図 5.2-13、図 5.2-14)。

項目	メーカー 名称	仕様							
一軸圧縮試験器	株式会社 マルイ Hi-TRITRON センサー型式 HVS-200	圧縮:500kN センサー容量:20MPa							
データロガー	東京測器研究所 TDS-303	<ul> <li>測点数:30点(本体のみの場合)</li> <li>A/D変換部三重積分方式</li> <li>ひずみ測定(標準分解能)</li> <li>測定範囲±40,000µ⇒±1µ、測定範囲±80,000µ⇒±2µ</li> <li>測定速度:0.06s/点</li> </ul>							
ひずみゲージ	東京測器研究所 PFL-30-11	単軸 ベース材:ポリエステル 室温けるひずみ限界:20000μ ゲージ長:30mm、ゲージ幅:2.3mm 抵抗値:120Ω							

表 5.2-19 使用した装置の仕様

表 5.2-20 吹付けコンクリートコアの一軸圧縮強度試験結果-	-覧表
----------------------------------	-----

-	試 験	:年 月	目				2	020年11月17日	3			
	試		料					10/20採取試料	ŀ		[材i	齢28日]
	供討	体番	号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
①材		齡	(日)	28	28	28	28	28	28	28	28	28
				49.9	49.8	49.9	49.9	49.9	49.8	49.8	49.8	49.9
				49.8	49.8	49.8	49.8	49.9	49.8	49.8	49.8	49.8
				49.8	49.8	49.8	49.8	49.9	49.8	49.8	49.9	49.8
				49.8	49.8	49.8	49.8	49.9	49.8	49.8	49.9	49.8
				49.8	49.8	49.8	49.8	49.9	49.8	49.8	49.8	49.8
				49.8	49.8	49.8	49.8	49.9	49.8	49.8	49.8	49.8
②平 均	直	径	(mm)	49.8	49.8	49.8	49.8	49.9	49.8	49.8	49.8	49.8
③断 ī	面	積	(cm <sup>2</sup> )	19.49	19.48	19.49	19.49	19.56	19.48	19.48	19.50	19.49
				100.8	101.6	102.0	101.2	100.9	101.3	101.3	100.6	102.2
				100.9	101.6	102.0	101.1	100.8	101.4	101.2	100.7	102.2
				100.9	101.6	101.9	101.2	100.8	101.4	101.3	100.7	102.3
				100.9	101.6	101.9	101.1	100.9	101.4	101.2	100.6	102.3
④平 均	高	さ	(mm)	100.9	101.6	102.0	101.2	100.9	101.4	101.3	100.7	102.3
⑤体		積	(cm <sup>3</sup> )	196.7	197.9	198.7	197.2	197.2	197.5	197.2	196.3	199.3
⑥気 中	質	量	(g)	465.8	470.2	471.0	464.2	467.7	469.4	468.2	460.1	471.9
⑦ 見 掛	け	の密り	度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.370	2.380	2.370	2.350	2.370	2.380	2.370	2.340	2.370
見掛け	ナの箸	「度の平	均值					2.367				
⑩最 大	荷	重	(kN)	98.1	112.0	105.0	107.0	97.0	97.2	114.0	108.0	107.0
①圧 縮	強	度	. 2.					10.0	40.0			
oc=10*0	<u>()</u> (3)	@ 11.	(N/mm <sup>-</sup> )	50.3	57.5	53.9	54.9	49.6	49.9	58.5	55.4	54.9
1955日	見住と	の比		2.03	2.04	2.05	2.03	2.02	2.04	2.03	2.02	2.05
⑬高さと副	直径と	:の補正	係数	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
④補正圧約 oc'=①*	縮強度 13	F.		50.3	57.5	53.9	54.9	49.6	49.9	58.5	55.4	54.9
(N/mm <sup>2</sup> ) 平 均 53.9												
載荷i φ15:												

試 験 年 月 日				2	020年11月17日	3			
試料		10/20採取試料 [材齢28日]					齢28日]		
供試体番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
⑦見掛けの密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.370	2.380	2.370	2.350	2.370	2.380	2.370	2.340	2.370
平 均		2.367							
⑩圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	50.3	57.5	53.9	54.9	49.6	49.9	58.5	55.4	54.9
(1)高さと直径との比	2.03	2.04	2.05	2.03	2.02	2.04	2.03	2.02	2.05
13高さと直径との補正係数	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
@補正圧縮強度	50.3	57.5	53.9	54.9	49.6	49.9	58.5	55.4	54.9
(N/mm) 平 均	53.9								
載荷速度: 0.6±0.4N/mm <sup>2</sup> /sec									
φ 15: 10kN/sec φ 12.5: 7.5kN/se	ec φ10: 5kN/se	c φ 5: 1.2kN/ε	sec						
静弾性係数	35.6	36.8	37.0	35.7	35.7	33.3	36.8	35.1	36.6
(kN/mm <sup>2</sup> ) 平均					35.8				
ポマンンと	0.25	0.19	0.22	0.23	0.21	0.21	0.19	0.22	0.19
ホテノンル 平均					0.21				

### 表 5.2-21 吹付けコンクリートコアの強度、変形特性試験結果



項目	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )
最大値	58.5
最小値	49.6
平均値	53.9
中央値	54.9
最頻値	54.9
標準偏差	3.3



静ポアソン比

一軸圧縮強さ



項目	静弹性係数(kN/mm2)
最大値	37.0
最小値	33.3
平均值	35.8
中央値	35.7
最頻値	36.8
標準偏差	1.2

項目	ポアソン比
最大値	0.25
最小値	0.19
平均值	0.21
中央値	0.21
最頻値	0.19
標準偏差	0.02



0.35 0.3 0.25 日子人 202 0.15 0.15 0.15



-:平均值 0.21



試 験 年 月	日				20	020年11月17	B			
試	料				1	10/20採取試料	ł		[材	齢28日]
供試体番	: 号	1	5	3	4	5	6	7	8	9
①材 齢	(日)	28	28	28	28	28	28	28	28	28
		49.8	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8
		49.8	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8
②平 均 直 径	(mm)	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8
③断 面 積	$(cm^2)$	19.48	19.48	19.48	19.48	19.48	19.48	19.48	19.48	19.48
		51.3	51.4	51.2	51.3	51.4	52.0	51.0	51.6	52.3
		51.1	51.3	51.0	51.4	51.2	51.8	51.1	51.7	52.1
④平 均 高 さ	(mm)	51.2	51.4	51.1	51.4	51.3	51.9	51.1	51.7	52.2
⑤体 積	(cm <sup>3</sup> )	100	100	100	100	100	101	99	101	102
6質 量	(g)	233.0	239.8	239.2	232.0	234.4	240.0	236.0	236.3	241.1
⑦見かけの密。	度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.336	2.398	2.403	2.320	2.346	2.374	2.373	2.349	2.37
平 均						2.363				
⑧割 裂 断 面 積	$(cm^2)$	25.5	25.6	25.4	25.6	25.5	25.8	25.4	25.7	26.0
⑨最 大 荷 重	(kN)	16.7	15.3	16.6	14.9	12.2	14.1	14.3	15.3	14.6
⑩割裂引張強度										
ft=2*10*9/n24	$(N/mm^2)$	4.17	3.81	4.15	3.71	3.04	3.47	3.58	3.79	3.58
平 均						3.70				
⑪養 生 方 法						封緘養生				
⑫養 生 温 度		室温								
載荷速度: 0.06±0	0.04N/mm <sup>2</sup> /sec									
φ 15*15: 1.5kN/se	ec φ 12.5*12.5	$0.9$ kN/sec $\phi$	10*10: 0.6kN	/sec φ 5*10	0.3kN/sec					

表 5.2-22 吹付コンクリートコアの割裂引張強度



割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )
4.17
3.04
3.70
3.71
3.58
0.35

図 5.2-15 割裂引張強度試験

以上の結果から、今回作成したコンクリート供試体は物理学的性質、力学的性質とも非常に均 ー性が高いと考えられ、実際の幌延深地層研究所に施工されているコンクリート支保工も同様の 性質をもつことが推測される。

### 3) 透水性

透水試験については、作成したコンクリート供試体が非常に低透水性であることが予測されて いたため、当初難透水性岩石の透水試験に適用されるトランジェントパルス法での実施する予定 であったが、試験装置等の不具合により急遽試験法を変水位法に変更して実施した。試験結果を 表 5.2-23 および図 5.2-16 に示す。

今回の透水試験では、得られた透水係数の最大値が 9.80E-08m/sec、最小値が 2.35E-13、平均 値が 1.39E-08m/sec、標準偏差が 3.01E-08m/sec となっており、数オーダーにわたる非常にバラ つきが大きい結果となった。

前述の通り、物理学的・力学的性質にこのような大きなバラつきはないことから、作成したコ ンクリート供試体の正確な透水性を測定するためには、透水試験手順や試験方法の見直し(トラ ンジェントパルス法による透水試験の実施)を検討する必要があると考えられる。

試験至	1 月 日					1	2021年1月22日				
活	料						9/29採取試料			[材1	龄28日]
供試体	本番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9
①材 歯	朎	(日)	28	28	28	28	28	28	28	28	28
			4.99	4.99	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	4.96
			4.98	4.99	4.98	4.97	4.98	4.99	4.96	4.98	4.98
			4.95	4.99	4.98	4.98	4.98	4.99	4.98	4.97	4.97
②平 均 直 径	Ě	(cm)	4.97	4.99	4.98	4.98	4.98	4.99	4.97	4.97	4.97
③断 面 利	ğ	(cm <sup>2</sup> )	19.43	19.54	19.47	19.44	19.49	19.54	19.39	19.43	19.40
			4.90	5.00	4.92	4.93	4.92	4.92	4.91	4.97	4.91
			4.90	4.99	4.94	4.92	4.92	4.94	4.92	4.96	4.94
			4.89	4.98	4.97	4.92	4.93	4.96	4.93	4.98	4.93
④平 均 高 さ	ş	(cm)	4.89	4.99	4.94	4.92	4.92	4.94	4.92	4.97	4.92
⑤体 利	資	(cm <sup>3</sup> )	95.058	97.457	96.223	95.692	95.936	96.512	95.371	96.573	95.526
⑨乾燥密度 (討	(験後)	(g/cm <sup>3</sup> )	2.372	2.352	2.357	2.371	2.391	2.385	2.404	2.293	2.400
⑨乾燥密度 (討	(験後)	(g/cm <sup>3</sup> )	2.348	2.325	2.302	2.317	2.340	2.325	2.361	2.239	2.343
			5.29E-11	2.23E-13	6.05E-09	9.24E-08	1.21E-08	7.07E-10	8.11E-12	1.03E-08	6.14E-10
			7.49E-11	3.65E-13	6.68E-09	9.31E-08	1.19E-08	7.46E-10	8.26E-12	1.86E-08	3.92E-10
			4.96E-11	1.45E-13	6.83E-09	9.23E-08	1.11E-08	6.08E-10	7.90E-12	1.19E-08	3.92E-10
			4.72E-11	3.16E-13	5.55E-09	9.27E-08	1.06E-08	5.85E-10	8.75E-12	1.61E-08	6.89E-10
			5.00E-11	1.24E-13	5.98E-09	9.45E-08	1.07E-08	6.18E-10	8.84E-12	9.75E-09	3.84E-10
⑩15℃に対する透 5回の平均値	5水係数 (m/s)		5.49E-11	2.35E-13	6.22E-09	9.30E-08	1.13E-08	6.53E-10	8.37E-12	1.33E-08	4.94E-10
<ul><li>①15℃に対する透 平均値</li></ul>	5水係数	(m/s)					1.39E-08				

表 5.2-23 変水位法透水試験結果



項目 項目 15℃に対する 透水係数(m/s) 最大値 9.30E-08 最小値 2.35E-13 平均値 1.39E-08 中央値 6.53E-10 標準偏差 3.01E-08

図 5.2-16 変水位法透水試験結果

### 4) SEM 観察および SEM/EDS 分析

走査型電子顕微鏡(SEM)による吹付けコンクリートコア断面の観察とその視野内における任 意の微小領域の元素分析、および走査型電子顕微鏡(SEM)に搭載したエネルギー分散型 X 線分 析装置(EDS)よる任意の元素の面的分布(元素マッピング)の分析を行った。表 5.2-24 およ び、表 5.2-25 に観察試料の作成方法等の詳細を、図 5.2-17、図 5.2-18 および表 5.2-26 に使用 したコア、分析装置および装置の仕様を示す。ここでは、次年度以降の経時変化の把握を勘案し、 観察用の試料作成位置や方法に留意した。

SEM 観察、および SEM-EDS 分析は、以下の手順で実施した。

<SEM 観察、および点分析の手順>

①SEM 観察、SEM・EDS 分析用の試料作製(材料切断~Pt 蒸着まで)。

②SEM に試料を設置する。

③外縁部について、倍率30倍にて観察する(全7回のうちの1回目)。

④拡大したい部分を視野の中心に移動させ、倍率を 100 倍に上げる。

⑤④の視野について、拡大したい部分を視野の中心に移動させ、倍率を1,500倍に上げる。
⑥⑤の視野について、拡大したい部分を視野の中心に移動させ、倍率を6,000倍に上げる。
⑦⑤の視野について、元素分析したい部分を選択し、点分析を実施する(3か所~5か所)。
⑧⑤の視野について、更に拡大したい部分が生じた場合、10,000程度まで拡大して観察する。
⑨30倍まで倍率を下げ、先に30倍で観察した部分の一部が重なるように視野を調整し(試料の内側、すなわちコアの中心部に向かって重複させる)、観察する。

⑩5~⑨の作業を繰り返す(全7回実施)。

<SEM-EDS 面分析の手順>

①SEM 観察、SEM-EDS 分析用の試料作製(材料切断~Pt 蒸着まで)。

②SEM に試料を設置する。

③外縁部について倍率30倍にて観察する(全7回のうちの1回目)。

④視野全体(40mm×40mm 程度)について面分析を実施する(分析時間を2時間程度とする)。

今年度は、初期状態として、コンクリート供試体を構成する主要成分や特徴的な水和化合物の 有無に着目して調べたが、全体的な傾向としては、骨材部分はSi,Naが相対的に多いこと、セメ ント硬化部ではCa,Sが相対的に多いことがわかった。また、特徴的なC-S-H化合物(エトリン ガイトのような針状結晶など)は観察した範囲の中では認められなかった(例えば、図 5.2-19)。

項目	SEM 観察(破断面)	SEM-EDS 分析(平坦面)
主な 目的	状態の把握	元素の分布状況の把握
試料 製作 方法	破断面の観察	です。 ア坦面の観察
数量	3 面/本 × 3本 =9 試料	3 面/本 × 3本 =9 試料
条件	加速電圧 5keV (Ti よりも軽い元素対象) 蒸着 Pt	加速電圧 15keV 蒸着 Pt
観察・分析	<ul> <li>①全体観察 ⇒ 倍率 30 倍×7 視野</li> <li>②部分(拡大)観察 ⇒ 30 倍の1 視野内で 3 か所/試料</li> <li>1 か所でのおおよその観察倍率:100 倍、1500 倍、6000 倍、10,000 倍で1 か所</li> <li>⇒3 か所/30 倍での1 視野内×3 倍率(1 か所あたり)×3 試料=27 点</li> <li>③6000 倍の視野において点分析(3~5 点程度)</li> <li>⇒3 か所/30 倍の1 視野×1 倍率(6000 倍)×3 点×3 試料=27 点</li> </ul>	<ul> <li>①全体観察 ⇒ 倍率 30 倍×7 視野</li> <li>②EDS 元素マッピング ⇒ 試料の外縁部(30 倍の視野全体に相当、1 辺 4mm×3mm 程度の四辺形の範囲)について、8 元素の分布状況を分析 ⇒</li> <li>0.57 ピクセル間隔 分析元素(案); Na、Ca、C、Si、Al、S、Fe、</li> <li>O、Mg、K 元素ごとの分布状況と濃度</li> </ul>
注意点	①SEM 観察と SEM-EDS 分析のどちらも、蒸着処理に は測定できない。 ②導電性を高めるため、試料側面に導電性樹脂(スリー ③SEM 観察は加速電圧が低いため、チタン(Ti)より	- エプラチナ (Pt) を使用したため、プラチナとリン (P) ーボンド 3350C) を塗布した も重い元素については測定できない。

表 5.2-24 SEM 観察と SEM-EDS 分析について



### 表 5.2-25 SEM 観察と SEM-EDS 分析の範囲イメージ

5 - 21



(上段:破断面 下段:平坦面)図 5.2-17 分析用試験体

図 5.2-18 走査型電子顕微鏡 (SEM) システ ムー式

### 表 5.2-26 使用した装置の仕様

項目	メーカー 名称	仕様
走查型電子顕微鏡	HITACHI SU8220	二次電子分解能:0.6nm (15kV時) 加速電圧:0.5~30kV ステージ制御:5 軸モータ駆動 稼働範囲:X、Y 05~50mm、Z1.5~30mm、 R 360°
エネルギー分散型 X線分析装置	Bruker XFlash Hetector 5030	Active Area : 30mm² Resolution:127eV
イオンスパッタ装 置	Ion Sputter HITACHI MC1000	放電方式:ダイオード放電マグネトロン形 コーティングレート参考値 最大値:ptターゲ ット 15nm/min (真空度 7Pa、放電電流 40mA、 試料間距離 20mm) コーティン時間:5~300 秒 試料サイズ:最大試料径 φ 60mm、最大試料高 さ 20mm





図 5.2-19 分析結果の一例

### 5.2.3 コンクリートコアの坑道内での養生

最後に、次年度以降実施が計画されているコンクリート供試体の長期変化の把握のため、作成 した吹付コンクリート供試体を坑道内に定置し、養生を開始した。この際、幌延において実際の 地質環境下でコンクリート支保工が置かれている状況を勘案し、気中養生と原位置地下水による 水中養生の2つの両極端なパターンでの長期変化が観測できるよう配慮した。

具体的には、吹付けコンクリート供試体を気中、水中でそれぞれ 80 体ずつ養生できるよう資 材を調達、加工し、定置作業を行った。水中養生に関しては、原位置地下水が常に流入・流出す るような形で養生した。

定置箇所は、今後の幌延深地層研究所内での様々な調査試験の実施場所を勘案し、深度 350m 調査坑道、試験坑道 3 奥側とした(図 5.2-20)。定置装置の概念図を図 5.2-21、図 5.2-22 に示 す。メタルラック上のプラ舟に、上から気中養生、水中養生(供試体)、水中養生(塊試料)の順 で定置される。地下水は路盤コンを貫通する採水孔より常時採水され、水中養生供試体が設置さ れているプラ舟に連続給水される。供試体水中養生用プラ舟からは上部からオーバーフローする 形で排水され、下段の塊試料へかけ流される。下段の塊試料用プラ舟も上部からオーバーフロー する形で排水される。

また養生中の環境条件もコンクリート供試体の経時変化のメカニズムの解釈に必要であることか ら、定置位置の気温、湿度、水温に関するデータも取得することとした(図 5.2-23)

上記作業により、次年度以降、実際の地質環境下でのコンクリート供試体の経時変化を把握す るための準備が整った。



### 図 5.2-20 試験坑道内での定置位置



図 5.2-21 定置装置の概念図



(a) 定置装置全体



(b) 気中養生用試料定置完了状



(c)水中養生用供試体定置状況





(a) 水中養生水温計測状況



(b) 定置位置温湿度計測状況

図 5.2-23 環境測定状況

### 5.3 実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理

本節では、幌延深地層研究所深度 350m 坑道周辺を事例としてとりあげ、令和2年度~令和4 年度の事業において、坑道掘削によって生じた周辺地質環境の変化とその後の時間経過に伴う変 化ならびにその坑道を埋め戻したと仮定した場合の変化した地質環境の回復までの一連の流れを 解析的なアプローチにより検討することにより、安全機能への影響評価に資する技術を提示する こととしている。

令和2年度は、事業初年度として、事例とする幌延深地層研究所深度350m坑道周辺の現在の 地質環境を表現する概念モデルの構築を行うとともに、それに基づく予察的な数値解析を実施し、 次年度以降の解析評価に向けた情報の整備等を実施した。以降、それらについて詳述する。

### 5.3.1 坑道周辺地質環境の概念モデルの構築

ここでは、幌延深地層研究所深度 350m 坑道周辺を事例としてとりあげる一方で、現状サイト ジェネリックな研究開発のフェーズにあることも念頭におき、以下のような作業プロセスを経る ことで概念モデルを構築した(図 5.3-1)。



図 5.3-1 概念モデル構築の作業プロセス

概念モデル構築のために収集分析した文献リストを表 5.3-1 幌延深地層研究所で取得された情報、掘削影響に関する知見の収集

(青:水理関係、黄色:力学関係)に示すが、幌延深地層研究所で取得された情報は計12件、その他ジェネリックな観点で堆積岩を対象にモデル構築に有益な情報が含まれているとしたものを計28件の計40件の既存情報の分析を行った。その上で、今回構築する概念モデルは、後述するモデル化・解析との関係から、力学的なものと水理学的なものに分けて構築することとし、文献調査の結果を(1)以降に示したように整理した。

### 表 5.3-1 幌延深地層研究所で取得された情報、掘削影響に関する知見の収集 (青:水理関係、黄色:力学関係)

No.	文献分類	著者	文献名
1-1	水理学的変	下茂道人,山本肇,	幌延深地層研究計画における地質環境のモデル化研究,
	化	熊本創,小野誠,藤原靖	JNC-TJ5400 2004-004, 2005.
1-2	水理学的変	山本肇, 下茂道人,	幌延深地層研究計画における立坑掘削時の地下水からの脱ガ
	化	國丸貴紀, 繰上広志	スの予察解析,土木学会,第36回岩盤力学に関するシンポ
			ジウム講演論文集, pp.293-298, 2007.
1-3	水理学的変	Miyakawa, K., Aoyagi, K.,	Numerical simulation for oxygen infusion into the
	化	Akaki, T., Yamamoto, H.	desaturation resulting from artifical openings in
			sedimentary formations, 第 15 回岩の力学国内シンポジウ
			ム講演論文集, p p.609·614, 2021
1-4	力学的変化	Aoyagi, K., Youqing Chen,	Visualization of fractures induced around the gallery wall
		Ishii, E., Sakurai,A.,	in Horonobe Underground Research Laboratory,
		Ishida, T.	YSRM2019&REIF2019, Okinawa, pp.488-493, 2019.
1-5	水理学的変	Miyakawa, K., Aoyagi, K.,	The effect of dissolved gas on rock desaturation in artificial
	化	Akaki, T., Yamamot, H	openings in geological formations, YSRM2019&REIF2019,
			Okinawa, pp.834-839, 2019.
1-6	水理学的変	Mochizuki, A., Ishii, E.,	Mudstone redox conditions at the Horonobe Underground
	化	Miyakawa, K., Sasamoto, H	Research Laboratory, Hokkaido, Japan: Effects of drift
			excavation, Engineering Geology 267, pp.1-11, 2020.
1-7	力学的変化	Tokiwa, T., Tsusaka, K.,	Fracture characterization around a gallery in soft
		Matsubara, M., Ishiikawa, T.	sedimentary rock in HoronobeURL of Japan, Int. J. Rock
			mech. mining sci., Vol.65, pp.1-7, 2014.
1-8	力学的変化	Asahina, D., Aoyagi, K.,	Modeling damage processes in laboratory tests at the
		Tsusaka,K., J. E. Houseworth,	Horonobe Underground Research Laboratory, 8th Asian
		J. T. Birkholzer	Rock Mechanics Symposium, pp.2812-2820, 2014.
1-9	力学的変化	Tsusaka, K., Inagaki, D.,	An Investigation on Mechanical Properties of In-situ Rock
		Niunoya, S., Jo, M.	Mass at the Horonobe Underground Research Laboratory,
			8th Asian Rock Mechanics Symposium, pp.591-599, 2014.
1-10	力学的変化	山崎雅直,津坂仁和,大谷達彦,	クラックテンソルによる現場スケールにおける透水係数の評
		進士正人	価, 土木学会論文集 F2(地下空間研究), Vol.71, No.1,
			pp1-10, 2015.
1-11	力学的変化	青柳和平,石井英一	幌延深地層研究センターの深度の異なる水平坑道を対象とし
			た掘削損傷領域の水理力学特性の検討,第14回岩の力学国
			内シンポジウム講演集,岩の力学連合会,講演番号 095,
			2017.
1-12	力学的変化	青柳和平,石井英一,石田毅	幌延深地層研究センターの 350m 調査坑道における掘削損傷
			領域の破壊様式の検討, Journal of MMIJ, Vol.133,
			No.2, pp.25-33, 2017.

No.	著者	文献名
2-1	杉原弘造, 亀村勝美, 二	堆積軟岩での発破による掘削影響の現場計測に基づく検討、土木学会論文集、
	宮康郎	No.589/III-42, pp.239-251. 1998.
2-2	佐藤稔紀, 菊地正, 杉原	掘削工法の相違が周辺岩盤の変形挙動に与える影響について,動燃技報, No.105,
	弘造	PNC TN1340 98-001, pp.41-46, 1998.
2-3	Sato, T.,	In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical
	Kikuchi, T.,	excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan,
	Sugihara, K.	Engineering Geology, Vol.56, pp.97-108, 2000.
2-4	羽柴公博,中間茂雄,佐	立坑掘削後約10年間の周辺岩盤の変形特性,土木学会,トンネル工学報告集,第
	藤稔紀	16 巻, pp.241-246, 2006.
2-5	青木俊朗,中間茂雄,佐	東濃鉱山における長期岩盤変位計測とコンプライアンス可変型構成方程式による数
	藤稔紀, 大久保晴介	値シミュレーション, 資源と素材, Vol.121, pp.489-497, 2005.
2-6	笹尾英嗣,中間茂雄, 藪	東濃鉱山における調査試験研究 年度報告書 (2003 年度), サイクル機構技術資
	内聡	料, JNC-TN7400 2004-003, 22p., 2004.
2-7	前村庸之, 細野高康	TDR による不飽和領域の原位置計測,サイクル機構技術資料(研究委託報告書;
		株式会社ダイヤコンサルタント), JNC TJ7430 2005-008, 124p., 2004.
2-8	升元一彦, 竹内 真司, 薮	堆積岩中の坑道周辺の不飽和領域を対象とした連続波レーダー調査結果の評価、土
	内 聡, 渥美 博行, 名児	木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, CS1-016, pp.31-32, 2004.
	耶薫	
2-9	戸井田克,渥美博行,名	東濃鉱山における孔間レーダーおよび間隙水圧計測の実施、サイクル機構技術資料
	児耶薰, 須山泰宏	(研究委託報告書:鹿島建設株式会社), JNC-TJ7400 2005-057, 113p., 2004.
2-10	平田洋一	水理学的緩み領域計測装置の改良及び透水試験,動燃技術資料(研究委託報告書:
		大成基礎設計株式会社), PNC-TJ7439 94-005, 105p., 1994.
2-11	松岡永憲	北延 NATM 坑道における緩み領域の透水試験,動燃技術資料(研究委託報告書:
		大成基礎設計株式会社), PNC-TJ7439 97-002, 55p., 1997.

表 5.3-2 国内外で実施された堆積岩を対象とした坑道周辺の地質環境の文献の収集(国内)

No.	著者	文献名
3-1	戸井田克, 渥美博行, 田中	余裕深度処分試験空洞掘削に伴う掘削損傷領域(EDZ)の透水性評価、日本地下水
	俊行,牧野章也,石田裕樹	学会 2005 年度秋季講演会要旨, pp.40-45, 2005.
3-2	冨田敦紀, 大槻英夫, 戸井	空洞掘削時の応力状態を考慮した要素試験による堆積軟岩空洞掘削時の破壊現象の
	田克, 岸田潔, 足立紀尚	一考察,土木学会,第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集,pp.213-
		218, 2006.
3-3	冨田敦紀, 戸井田克, 白鷺	空洞掘削時の岩盤内応力測定結果に基づく堆積軟岩空洞掘削時の破壊現象の一考
	卓, 蛯名孝仁, 岸田潔, 足	察,土木学会,第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.245-250,
	立紀尚	2007.
3-4	金子兵夫,小山俊博,鈴木	軟岩の透水特性に関する考察と掘削影響領域における透水特性予測手法の提案、土
	康正, 関根裕治, 佐々木	木学会,第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.261-266, 2006.
	泰,石田裕樹	
3-5	佐々木泰,進士喜英,亀谷	低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する検討状況, Journal of MMIJ,
	泰久,直江裕之,蒲池孝夫	Vol.125, pp.347-357, 2009.
3-6	冨田敦紀, 蛯名孝仁, 森川	堆積軟岩空洞掘削に伴う空洞周辺岩盤間隙水圧挙動に関する解析的検討、土木学
	誠司,田部井和人,岸田	会, 第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.225-230, 2006.
	潔,足立紀尚	
3-7	大沼和弘,寺田賢二,松村	地下空洞型処分施設性能確証試験における三次元地下水流動解析を用いた周辺岩盤
	勝秀, 小山俊博, 矢島一昭	間隙水圧測定区間の検討について,土木学会,第 37 回岩盤力学に関するシンポジ
		ウム講演論文集, pp.239-244, 2008.
3-8	中島貴弘, 佐藤敏文, 寺田	地下空洞型処分施設性能確証試験における周辺岩盤の間隙水圧計測の結果と評価に
	賢二,秋山吉弘,鈴木康	ついて,土木学会,第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.66-
	正,山下正	71, 2010.

表 5.3-3 国内外で実施された堆積岩を対象とした坑道周辺の地質環境の文献の収集(国内)

### 表 5.3-4 国内外で実施された堆積岩を対象とした坑道周辺の地質環境の文献の収集(国外)

No.	著者	文献名
4-1	Bossarta, P.,	Structural and hydrogeological characterisation of the excavation-disturbed
	Trickb, T.,	zone in the Opalinus Clay (Mont Terri Project, Switzerland), Appled Clay
	Meierc, M. P.,	Science, Vol.26, pp.429-448, 2004.
	Mayord, JC.	

表 5.3-5	その他関連文献
(坑道周辺岩盤の長期的変	化や堆積岩の鉱山に関する文献)

No.	著者	文献名
5-1	土木学会岩盤力学委員会ト	トンネルの変状メカニズム,丸善,2003.
	ンネル変状メカニズム研究	
	小委員会	
5-2	緒方義弘, 冨島康夫, 大久	軟弱岩盤内の坑道天盤の掘削に伴う変形の計測ー粘弾性的挙動を示す岩盤の坑道掘
	保誠介, 西松裕一	進に伴う変形挙動に関する研究(第1報)-, 資源と素材, Vol. 109, pp171-
		178, 1993.
5-3	緒方義弘, 冨島康夫, 大久	軟弱岩盤内の坑道周辺岩盤の掘削に伴う変形の計測-粘弾性的挙動を示す岩盤の坑
	保誠介, 西松裕一	道掘進に伴う変形挙動に関する研究(第2報) -, 資源と素材, Vol. 109, pp.853-
		860, (1993).
5-4	松長剛, 熊坂博夫, 小島芳	地山強度の経時劣化を考慮したトンネル変状の予測と対策に関する研究、土木学会
	之,朝倉俊弘	論文集, No.799/III-72, pp.75-88, 2005.
5-5	北田正彦, 櫻井春輔, 芥川	在来工法で建設されたトンネルの拡幅時変形挙動とグランドリングに関する考察,
	真一, 岡部幸彦, 進士正人	土木学会論文集 F, Vol.65, No.2, pp.119-127, 2009.
5-6	末永弘,中田英二	沿岸海底下堆積岩における空洞掘削に伴う地下水理への影響,電中研報告,
		N07043, 17p., 2008.

### 表 5.3-6 その他関連文献

(坑道周辺岩盤における長期的な変形と透水性変化の解析の事例に関する文献)

No.	著者	文献名
6-1	(公財) 原子力環境整備促	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
	進・資金管理センター	報告書(第2分冊:その1), pp.3-44-3-186, 2017.

### 表 5.3-7 その他関連文献(坑道周辺岩盤内の不飽和領域の解析手法に関する文献)

No.	著者	文献名
7-1	今井久,雨宮清,松井裕	地下空洞周辺岩盤内の不飽和領域解析手法に関する提案-岩石の不飽和浸透パラメ
	哉, 佐藤稔紀, 三枝博光,	ータと空洞壁面境界条件の設定方法-,土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.69,
	渡邉邦夫	No.3, pp. 285-296, 2013.

### (1) 力学的な概念モデルの構築

幌延の深度 350m の調査坑道を対象とした文献調査結果から、坑道周辺地質環境の力学的な概 念モデルを構築する上で有益と考えられる情報を集約すると、以下のようになる。

- ・ 坑道壁面から 0.8m(吹付けコンクリートの厚さ 0.16m も含む)以内に掘削時の応力再配分 よって、割れ目が発生した。坑道壁面から 0.25m 以内の割れ目は相互に連結していて、大き な開口量を持つ割れ目も観察された。
- ・ 坑道掘削に伴って壁面近傍には、せん断が成因で無い割れ目が多数発生していた。
- ・ 弾性波速度の分布に基づいて評価した場合、掘削損傷領域の幅は、岩盤面から最大 1m 程度 となっていた。
- ・ 壁面から 0.4m の範囲(吹付けコンクリートの厚さは含まれていない)では、引張割れ目が 発達していて、健岩部と比較して透水係数は 4~5 桁増加した。また、引張割れ目が発達した 領域よりも深い箇所でも、透水係数は 1~2 桁増加した。
- ・ 坑道掘削後約2年間、坑道周辺岩盤の透水係数に経時変化は見らない。これはモンテリー岩 盤研究所の結果とは異なった結果となっている。

また、幌延以外の堆積岩のサイトで収集された坑道周辺の地質環境の調査結果から、力学的な 概念モデルを構築する上で、特に有益と思われる情報としては、以下のようなものが挙げられる。 ただし、これらの情報は、幌延の深度 350m 調査坑道とは、元々の地質環境条件は違っているこ とから、幌延で得られた情報を補完するものとして取り扱う。

- 機械工法により坑道を構築した場合、坑道周辺岩盤において新規の割れ目が発生するのは、
   応力再配分に伴う塑性化などの破壊が要因となる。
- ・ 壁面近傍で透水性が急激に増加するのは、岩盤に生じた割れ目が互いに連結し、壁面まで達 するような場合である。
- ・ 壁面に近い場所で発生する新規の割れ目は、引張破壊あるいは Splitting 破壊によって壁面 に平行な方向が卓越することや、壁面から離れた場所で発生する割れ目は、壁面と高角度を 成すせん断破壊によって生じている。
- ・ 掘削影響領域の透水性は、時間変化する可能性がある。
- ・ 坑道周辺の地質環境の時間変化の要因には様々なものがあり、支保工の劣化や人為的な要因 等も影響を与える。

上記情報をまとめると、幌延の深度350m 坑道周辺の掘削損傷領域(EDZ:Excavation Damaged Zone)は、大きく2つに分けられると考えられ、1つ目は、岩盤壁面から約0.4mの範囲において、掘削に伴い新規の引張割れ目が発達し、透水係数は4~5桁増加するような領域(以下、EDZ 1と称す)、2つ目は、EDZ1の外側で岩盤壁面から約1mまでの範囲において、新規の割れ目は生じているが、EDZ1よりも頻度や連結性は小さく、透水係数は1~2桁増加する領域である(以下、EDZ2と称す)。

掘削に伴う新規割れ目の発生状況としては、特に、EDZ1内では、壁面に平行な方向に引張割 れ目が数多く生じていると考えらえる。一方、その外側では、数少ないながらもせん断割れ目が 生じていて、それが、EDZ2の透水係数の増加に寄与していると思われる。これらを基に、力学 的な概念モデルを描くと、図 5.3-2の様になると考えられる。

この図では、水色の線が新規の引張割れ目で、緑色の線が新規のせん断割れ目をイメージして

いる。また、初期応力状態は必ずしも等方的であるとは限らないので、この図では、仮に鉛直方 向の初期地圧の方が大きい場合を想定した。鉛直方向の初期地圧が大きい場合、坑道天端よりも 側壁近傍の方に、多くの新規の割れ目が生じるものと考えられることから、その状況もイメージ したものとなっている。

### (2) 水理的な概念モデルの構築

深度 350m 調査坑道、およびその周辺地質環境の水理学的な概念モデルを図 5.3-3 に示す。同 坑道は稚内層に掘削されており、上記のように壁面近傍から深度約 1m の範囲は EDZ と考えら れる。

母岩は、間隙率が約40%と大きい一方で、健岩部の浸透率は10<sup>-18</sup> m<sup>2</sup>(透水係数は10<sup>-11</sup> m/s) 程度と小さい。化学的には坑道壁面近傍から還元的環境にあり、地下水にはメタン(CH<sub>4</sub>)、二酸 化炭素(CO<sub>2</sub>)が溶存している。これらは坑道掘削に伴う地下水圧の低下により脱ガスし、母岩 内に不飽和領域を形成していると考えられている。なお、地下水や溶存ガスは、圧力勾配により 坑道に向かって流れると考えられる。

EDZ は損傷亀裂を有しており、浸透率は母岩の 10<sup>5</sup> 倍の 10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup> (透水係数は 10<sup>-6</sup> m/s) にも 達する。損傷亀裂の影響により、負圧に対する保水性は母岩よりも小さくなると考えられる。坑 道内の酸素の影響により、坑道側には酸化的領域が形成されていると推察されるが、その範囲は 明らかになっていない。なお、CO<sub>2</sub>の脱ガスの影響により沈殿が生じ、浸透率が低下する可能性 も考えられている。

以降のモデル化・解析評価は、これらの概念モデルに基づき実施した。



図 5.3-2 力学的概念モデル


図 5.3-3 水理的概念モデル

## 5.3.2 坑道周辺地質環境の長期的な変化に関する予察的な解析

#### (1) 予察的解析の概要

5.3.1 で構築した概念モデルに基づき、現時点の坑道の周辺地質環境の長期変化に関する予察 的解析を実施した。ここでは、幌延の深度 350m 坑道周辺を事例とし、かつ地下水中の溶存ガス の影響を考慮するため、力学と水理を完全に連成させずに、力学的長期的変化解析によって得ら れた周辺岩盤の透水係数や弾性係数等の時間変化の結果を、水理学的長期変化解析の解析条件と して引き渡す方法で解析を行うこととした。

### (2) 予察的解析の基本条件

予察的解析の対象としては、既往の研究(青柳 他, 2017)により掘削損傷領域の透水試験の データがあることや、他の解析的検討(青柳 他, 2017、三嶌 他, 2021)でも対象となってい ることを考慮して、図 5.3・4 に示す深度 350m の試験坑道 3 を選定した。

後述する水理的長期変化解析の複雑性から、今回の解析モデルは2次元とした。回収可能性維 持期間を念頭におき、5.3.1にて構築した概念モデルを初期状態として、時間経過にともなう変化 を見るために、非定常計算を実施した。また、概念モデルの長期変化に影響を及ぼす可能性があ る因子を考慮して、解析ケースを設定した。

### (3) 力学的長期変化解析の条件設定

幌延の深度 350m 坑道周辺の地質環境において、力学的な長期的変化として、周辺岩盤の変形 の進行が考えられる。そして、周辺岩盤の変形の進行によって透水性も変わり、坑道周辺の力学 以外の地質環境も変化していく可能性が考えられる。

この周辺岩盤の変形の進行に影響を与える因子としては、周辺岩盤のクリープ変形、岩盤の強 度低下などの劣化現象、支保工の耐力低下・劣化等が挙げられる(土木学会,2003)。本解析では、 これらの内、周辺岩盤のクリープ変形に着目することにした。

#### 1) 解析対象の坑道の断面と支保工の仕様

解析の対象は、深度 350m の試験坑道 3 である。試験坑道 3 の断面と縦断を図 5.3-5 に示す。 この情報に基づき、吹付けコンクリートの厚さを 20cm、鋼製支保工を H-150×150×7×10、材質 を SS400 とした。また、鋼製支保工の設置間隔は、透水試験等が行われた場所を考慮して、L=1.5m とした。



図 5.3-4 幌延深地層研究所内の試験坑道 3 の位置図



# 2) 岩盤のクリープ変形の構成則

岩盤の長期的な変形挙動を解析するためには、時間依存性の挙動や粘弾性的な挙動を考慮する ことが必要となる。これまでに、時間依存性を考慮できる力学モデルは幾つか提案されているが、 ここでは、第2次取りまとめの岩盤クリープ解析(核燃料サイクル開発機構, 1999)や、既に幌 延における長期的力学挙動の検討(吉野 他, 2005)でも用いられてきた、大久保らが考案した モデルを使用することにした(以下、大久保モデル)。

このモデルは、コンプライアンス可変型と呼ばれる構成則であり、非線形粘弾性挙動、および 破壊点以降の挙動を数値解析的に表現可能なものになっている。また、このモデルは、非線形 Maxwell モデルにも相当し、応力を受ける岩盤のコンプライアンス(ヤング率の逆数)が、時間 の経過とともに次第に増加していくものとしている。図 5.3-6 に示す応力-ひずみ曲線の勾配の 逆数がコンプライアンスである。



既往の研究(大久保 他, 1993)によると、コンプライアンス $\lambda$ の増加速度はそのときの軸差 応力  $\Delta \sigma$  (= $\sigma_1$ - $\sigma_3$ )の n 乗に比例する。また、コンプライアンスの増加速度は、 $\lambda$ の m 乗に比例 して加速度的に大きくなると考え、基礎方程式を次のように仮定している。

$$\Delta \varepsilon^* = \lambda^* \Delta \sigma^* \qquad \qquad \vec{\texttt{T}} \quad 5.3-3$$

ここに、 $\lambda^*$  (= $\lambda/\lambda_0$ ) は基準化されたコンプライアンス、 $\Delta \sigma^*$  (= $\Delta \sigma/\sigma_0$ ) は基準化された軸差応力、  $\Delta \epsilon^*$  (= $\Delta \epsilon/\Delta \epsilon_0$ ) は基準化された軸差ひずみ、 $\lambda_0$  は初期コンプライアンス、  $\Delta \sigma_0$  は破壊時の軸差応力、また、 $\Delta \epsilon_0 = \lambda_0 \Delta \sigma_0$  であり、to は、ひずみ制御による圧縮試験においてひ

ずみが $\Delta \epsilon_0$ となるまでの所要時間を表わしていて、既往の研究(大久保 他, 1993)では $t_0=120$ (s) を標準としている。さらに、m と  $n_0$ は岩盤のクリープ挙動を支配する物性値である。

nは、拘束圧の増加に伴い破壊強度 Aoo が増加すると、次式にしたがって増加する。

ここに、noは一時圧縮応力下でのnの値、ocは一軸圧縮強度である。

岩盤の破壊条件としては、Janach または Mohr-Coulomb の破壊基準を用いることがあるが、 ここでは、既往の検討(吉野 他, 2005)と同様に、Mohr-Coulomb の破壊基準を用いることに した。

Mohr-Coulomb の破壊基準は、次式で表される。

ここに、C は粘着力、φ は内部摩擦角である。

さらに、破壊の進行に伴うポアソン比 v の増加を次式のように仮定している。

ここに、voは、弾性領域で求められたポアソン比である。

# 3)物性値および初期状態

## ① 岩盤

岩盤の変形特性や強度特性の物性値については、既往の文献(青柳 他, 2017a、青柳 他, 2017b) に示されている 350m 調査坑道の珪質泥岩の値から引用した。また、大久保モデルのパ ラメータ no と m についても、幌延のボーリング調査で採取した岩石コアの室内試験結果から設 定したとする値(平本 他, 2008)を引用した。

珪質泥岩の物性値を表 5.3-8 に示す。

	珪質泥岩
一軸圧縮強度(MPa)	15.4
引張強度(MPa)	1.83
ヤング率 (GPa)	1.82
ポアソン比	0.17
粘着力(MPa)	5.9
内部摩擦角(°)	26
時間依存性を表すパラメータ n <sub>0</sub>	30
破壊進行性を表すパラメータm	20

表 5.3-8 珪質泥岩の物性値

#### ② 支保工と応力解放率

支保工については、線形弾性体としてモデル化し、劣化などの回収可能性維持期間中の時間変化については、考慮しないことにした。支保工の物性値についは、既往の検討(Aoyagi et.al., 2019)に示されている値を参照した。吹付けコンクリートと鋼製支保工の物性値を表 5.3-9に示す。

表 5.3-9 吹付けコンクリートと鋼製支保工の物性値

	吹付けコンクリート	鋼製支保工
ヤング率(GPa)	20	210
ポアソン比	0.2	0.3

今回の解析では、鋼製支保工は、吹付けコンクリートとの合成要素としてモデル化する。その 際、以下のような合成要素の等価ヤング率を用いる。

$$A = A_s + A_c \qquad \qquad \vec{\texttt{t}} \quad 5.3-9$$

ここに、Eは合成要素の等価ヤング率、Aは合成要素の断面積、Ecは吹付けコンクリートのヤング率、Acは吹付けコンクリートの断面積、Esは鋼製支保工のヤング率、Asは鋼製支保工の断面積である。

吹付けコンクリートの厚さが 20cm で、鋼製支保工(H-150×150)が 1.5m 間隔で設置されて いることから、合成要素の等価ヤング率 E は、E=22.5(GPa)となる。また、同様にして、合成 要素の等価なポアソン比 v を求めると、v=0.20となる。

また、支保工設置のタイミングは、既往の検討と同様に、応力解放率78%のときとする。

### ③ 初期応力

初期応力も、深度 350m の試験坑道 3 を対象とした既往の検討に用いられた値を引用し、初期 鉛直応力 oz=5.63 (MPa)、初期水平応力 ox=5.06 (MPa)と設定した。また、主応力の方向に傾 きはない。

### ④ 力学的長期変化解析の初期状態

図 5.3・2 に示した深度 350m 坑道周辺の力学的な概念モデルから、力学的長期変化解析の初期 状態、すなわち、坑道掘削後のイメージを図 5.3・7 に示す。岩盤面から 0.4m までの領域が EDZ1 であり、この領域では、既に透水係数は 5 桁増加しているものとする。また、EDZ 1 の外側で 1.0m までの領域が EDZ 2 であり、透水係数は 2 桁増加しているものとする。さらに、EDZ 2 の 外側は掘削による損傷がない母岩部であり、透水係数の増加は起きていないとする。EDZ 1 と EDZ 2 の幅については、初期応力の異方性によって、鉛直方向の幅の方が大きい場合や水平方向 の方が大きい場合があると考えられるが、ここでは、方向によらず一定値とした。



図 5.3-7 長期変化解析の初期状態

# ⑤ 透水性の変化

周辺岩盤の力学的な長期的な変形の進行によって周辺岩盤の透水性も変わっていくものと考え らえる。そのためには、解析で得られた岩盤のひずみや応力から透水係数に変換する必要がある。 ここでは、稚内層の岩石コアを対象として、三軸圧縮試験中に行われた透水試験(以下、せん断 破壊透水試験)の結果(郷家 他,2011)から、ひずみ-透水係数の関係を整理して、その関係 式を力学的長期変化解析に用いることにする。

せん断破壊透水試験の試験方法の概要を図 5.3-8 に示す。なお、軸方向の一様流の場合、透水 試験にはトランジェントパルス法を、半径方向の放射流の場合は、定水位法を用いている。試験 結果として得られた、軸ひずみー軸差応力関係を図 5.3-9 に、軸ひずみー透水係数関係を図 5.3-10 に示す。



試験ケース	透水試験	有効拘束圧 (MPa)
Case1	送达	0.3
Case2	一惊动	1.0
Case3	妆斛法	0.3
Case4	从又为于伊尼	1.0

図 5.3-8 せん断破壊透水試験の概要(郷家 他, 2011)



図 5.3・10 において、透水係数が最も変化したのは、Case3 (放射流、有効拘束圧 0.3MPa)で あることから、このデータを整理することにする。Case3 の結果によると、ひずみ軟化過程初期 である軸ひずみ 0.86%以降、透水試験が可能となった。その後、計測の上限値まで増加し、やが て、頭打ちの状態となった。また、Case3 では、初期状態からピーク強度到達時(軸ひずみ 0~ 0.83%)までは、定水位法では透水係数が小さすぎたために、その値は得られていない。初期状 態からデータが得られている Case1、Case2 の結果や、幌延以外の堆積岩に対するせん断破壊透 水試験の結果(郷家 他, 2003、郷家 他, 2009)からは、初期状態からピーク強度に達するま では、透水係数はほとんど増加しないことが分かっている。そこで、Case3 の初期状態からピー ク強度到達時までの透水係数は、Case3 と同じ有効拘束圧である Case1 において得られた初期状 態の透水係数 (1.90E-11[m/s])と同じ値であると仮定した。そして、ひずみの履歴によって岩盤 の透水係数は不可逆的に増加し、解析で得られる岩盤の最大主ひずみ ε1 が、試験時の軸ひずみに 相当すると仮定した。

これらから、初期状態からピーク強度に到達するまで、ピーク強度から透水係数の増加が頭打ちになるまで、それ以降の3つの区間に分けて関係を整理した。そして、正規化した軸ひずみと透水係数の増加率の関係を図 5.3-11 および、式 5.3-10~式 5.3-12 のように設定した。この図において、正規化した軸ひずみとは、Case3のピーク強度時の軸ひずみで除したものであり、縦軸は透水係数の増加率の対数値となっている。



図 5.3-11 正規化軸ひずみ-透水係数の増加率の関係

ここに、k は岩盤の透水係数、ko は透水係数の初期値、εc1 は Case3 のピーク強度到達時の軸 ひずみ(=0.83%)、εc2 は Case3 で透水係数の増加が頭打ちになったときの軸ひずみ(=1.00%)、 ε1\_max は最大主ひずみ ε1の履歴最大値である。

図 5.3-7 には、長期変化解析の初期状態における EDZ 1 と EDZ 2 の透水性を定性的に示して いるが、この透水係数は、式 5.3-10~式 5.3-12 と無関係に設定されている。よって、力学的長 期変化解析では、経過時間 t 年後の岩盤の最大主ひずみの履歴最大値 ɛ1\_max が得られたとすると、 その ɛ1\_max から、式 5.3-10~式 5.3-12 から透水係数の増加率を求め、その値が、図 5.3-7 の初 期状態の増加率を上回ったときは、式 5.3-10~式 5.3-12 の値を採用し、小さい場合は、初期状 態のままとすることにした。

#### 4) 解析ケースの検討

今回の力学的長期変化解析では、坑道周辺の地質環境の長期的変化に影響を及ぼす可能性がある因子として、周辺岩盤のクリープ変形に着目している。そして、このクリープ変形の構成則に 大久保モデルを適用し、標準的な場合として、表 5.3-8 に示す時間依存性を表すパラメータ no と 破壊進行性を表すパラメータ m の 2 つのパラメータを設定している。

一方、大久保モデルの2つのパラメータの内、時間依存性を示すパラメータn<sub>0</sub>には、値が小さ くなると、クリープ変形が速くなる特徴がある(大久保 他, 1993、図 5.3-12参照)。そこで、 別の解析ケースとしては、クリープ変形が速くなる場合を想定し、過去幌延にて取得されている データを調査した。



原子力機構から提供した稚内層・声問層の一軸圧縮強度と大久保モデルのパラメータ  $n_0$ の関係 (図 5.3-13) に示されたとおり、稚内層の大久保モデルのパラメータ  $n_0$ のデータとして、赤枠 の $\Delta$ が最も小さい値であることがわかった。さらに、幌延の堆積軟岩を対象とした既往の研究事 例(井上 他, 2004)を見てみると、供試体番号 462.12D のデータで、 $n_0=18$ 、m=18となって いることがわかった(表 5.3-10 参照)。

以上より、今回の力学的長期変化解析では、クリープ速度が標準的な場合として、大久保モデルのパラメータ no=30、m=20 と、クリープ変形が速い場合として、no=18、m=18 の 2 つの解析 ケースを設定することにした。

試験体番号	試験条件	λ1	n	m	а	σν	
		[/MPa]	[-]	[-]	[MPa·sec]	[MPa]	備考
462.04A	水中常温	0.0005058	49	49	8.53E+90	20.30	
462.04B	水中常温	0.0006492	20	20	2.69E+32	17.55	
462.12B	水中常温	0.0005836	43	43	1.50E+88	10.92	
462.12D	水中常温	0.0007853	18	18	1.16E+35	6.65	
463.04C	水中常温	0.0013400	50	50	2.48E+85	10.97	
463.04D	水中常温	0.0008500	42	42	3.33E+74	13.97	クリーン試験失敗
462.35B	水中80度	0.0009749	48	48	4.36E+89	10.33	
462.35C	水中80度	0.0014000	21	21	7.45E+32	9.86	
462.96B	水中80度	0.0011935	23	23	1.47E+35	13.17	
462.96C	水中80度	0.0009351	24	24	7.07E+39	12.77	
462.43B	乾燥	0.0006411	22	22	3.19E+30	31.78	
462.43D	乾燥	0.0005585	43	43	1.18E+65	38.19	
462.51A	乾燥	0.0006621	41	41	7.15E+56	42.26	
462.51B	乾燥	0.0008193	50	50	1.61E+86	17.13	
462.59B	乾湿水中常温	0.0009672	21	21	1.29E+34	12.33	
462.59C	乾湿水中常温	0.0007137	22	22	5.03E+34	18.84	
462.88A	乾湿水中常温	0.0014119	20	20	1.09E+32	8.74	
462.88C	乾湿水中常温	0.0005508	41	41	4.48E+68	26.49	

表 5.3-10 稚内層の一軸圧縮試験から算出した大久保モデルの定数等

λ1:初期コンプライアンス

n, m, a: 大久保モデルの定数(ただし, aはλl, n, mから算出している)

σv: 一軸圧縮強度

# 5) 解析モデル

カ学的長期変化解析に用いる解析モデルを図 5.3-14 に示す。要素には平面ひずみ要素を用いた。内空の代表寸法 D を 4.0m として、上下面までを 5D 相当、側面は 10D 相当の領域を設定した。また、初期応力に傾きがないことを考慮して、半断面としている。境界条件は、モデル上下面、および側面は、それぞれの面に対して垂直方向の変位を固定とした。さらに、2 次元の平面ひずみ条件として解析を行っている。



図 5.3-14 力学的長期変化解析の解析モデル

# 6) 解析コード

力学的長期変化解析には、既存の有限要素法の解析コード(市川、亀村, 1998)をベースとして、大久保モデルの構成則や、透水性変化のアルゴリズムを組み込んだ独自開発のものを用いた。

### (4) 地下水・ガス長期変化解析の条件設定

深度 350m 調査坑道における地下水・ガスの長期変化を予察的に解析するため、5.3.1 で構築 した水理学的な概念モデルに基づいて、解析モデルの構築、および解析条件の設定を行った。解 析パラメータのうち、透水係数、水分特性曲線、および比貯留係数については、力学的長期変化 解析での設定および解析結果を反映させて設定した。

#### 1) 解析対象の場所と断面

解析対象は、力学的長期変化解析での設定と同様に、深度 350m 調査坑道の東周回坑道に位置 する試験坑道 3 とした。

### 2) 解析モデル

解析には、力学的長期変化解析と同様の二次元解析モデルと、既往の研究(Miyakawa et al., 2017)による解析的検討で使用された一次元軸対称モデルの2種類を用いた。

二次元解析モデルの概念図を図 5.3-15 に示す。解析領域は、坑道の下方が坑道中心から 50m、 上方、および側方が坑道中心からそれぞれ 100m とした。ただし、モデルは左右対称であるため、 解析で使用したのは中の赤枠で示す右半分である。



2次元モデルの領域

図 5.3-15 二次元解析モデルの概念図

二次元解析モデルのメッシュ図を図 5.3-16 に示す。要素数は 2000 であり、坑道近傍から周辺 に向かって要素サイズが大きくなるように分割した。なお、EDZ1 は透水係数が母岩の 10<sup>5</sup> m/s と非常に大きいため、計算時間等の問題から、後述する理由により EDZ2 のみをモデル化した。 また、赤色で示す要素では力学解析の結果をもとに算定した貯留係数を設定した。



(a)坑道近傍拡大図
 (b) 図 5.3-16 二次元解析モデルのメッシュ図

次に、一次元解析モデルの概念図を図 5.3-17 に示す。モデルは軸対称とし、解析領域は坑道中 心から 3000m の範囲とした。試験坑道 3 の断面形状から、支保工を除く岩盤が坑道中心から 2.3m の位置にあるとし、その内側 0.2m の範囲を支保工(吹付けコンクリート)とした。また、EDZ の幅は全体で 1m とし、うち坑道中心側 0.4m の範囲を EDZ1 に、残りの 0.6m を EDZ2 として 概念モデルを忠実に再現した設定とした。



図 5.3-17 一次元解析モデルの概念図

#### 3) 解析コード

解析には、水、非凝縮性ガス(NCG)および揮発性有機化合物(VOC)を対象とした多成分・ 三相系の流体解析コードである TMVOC を用いた。TMVOC は TOUGH2 Ver. 2 をベースとした 解析コードであり、VOC を考慮しない場合は、多成分の二相流解析コードとして機能する。

#### 4) 解析ケースの検討

地下水・ガスの長期変化解析のパラメータのうち、結果に大きな影響を及ぼすものの1つが岩 盤の浸透率である。これについて、本解析では力学的長期変化解析の結果に基づいて浸透率を設 定する方針とした。また、二相流解析を行うことから、ガスの移行に影響を及ぼしうる因子とし て、EDZ および支保工の吹付けコンクリートを取り上げ、これらのモデル化の有無による比較を 行うこととした。

#### 5) 物性値

解析用物性値のうち、岩盤については、力学的長期変化解析での設定と同様に、孔壁に近い側から支保工、EDZ1、EDZ2、母岩とした。それぞれの物性値は、表 5.3-11 に示すよう設定した。

比貯留係数は、既往の研究事例 (Aoyagi & Ishii, 2019) に示される、岩盤と支保工それぞれの ヤング率E、およびポアソン比v をもとに、以下の式 5.3-13 から式 5.3-16 により計算し、設定 した。

比貯留係数Ssは、固体粒子が非圧縮の場合、式 5.3-13のように表せる(徳永, 1998)。

ここで、 $\rho_f$ は水の密度、gは重力加速度、 $\phi$ は間隙率、 $K_f$  は水の体積弾性係数である。 $K_v$  は、 垂直方向の一次元的な変形のみを考える場合の体積弾性係数であり、せん断弾性係数Gと体積弾 性係数Kを用いて式 5.3-14 のように表すことができる。

ここで、せん断弾性係数*G*と体積弾性係数*K*は、ヤング率*E*、およびポアソン比vを用いてそれぞれ以下のように表すことができる。

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$
 式 5.3-15

  $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$ 
 式 5.3-16

岩盤の保水性については、EDZ 1<EDZ 2<母岩となるように水分特性曲線を決定した。水分 特性曲線は式 5.3-17 で示される van Genuchten モデル(以下、VG モデルと記す。)で表現し た。

ここで、 $\alpha$ と $\lambda$ は水分特性パラメータであり、 $\alpha$ は保水性に寄与し、 $\lambda$ は水分特性曲線の傾きに寄 与するパラメータである。また、Sは飽和度である。EDZ1、EDZ2、母岩の保水性の大小関係は パラメータ $\alpha$ により表現した。設定した水分特性パラメータを表 5.3-12 に示す。また、EDZ1、 EDZ2、母岩それぞれの水分特性曲線を図 5.3-18 に示す。

パラメータ	支保工	EDZ 1	EDZ 2	母岩	設定根拠	
透過係数 [m <sup>2</sup> ]	2.1e-17	9.5e-14	9.5e-17	9.5e-19		
透水係数 [m/s]	1.8e-10	8.2e-7	8.2e-10	8.2e-12	頃石・Kurikami et al., 2008	
比貯留係数	1.23e-6	6.76e-	be-6 #1 6.76e-6		Aoyagi and Ishii (2019)が示した ヤング率、ポアソン比から、徳永 (1998)の式により計算	
有効間隙率	0.18	0.40			母岩:Kurikami et al., 2008	
初期溶解量 CH <sub>4</sub> [モル分率]	-	(初期圧力)/	(初期圧力)/(ヘンリー定数) × 0.922		Miyakawa et al., 2019	
初期溶解量 CO <sub>2</sub> [モル分率]	-	(初期圧力)/	初期圧力)/(ヘンリー定数) × 0.0177		Miyakawa et al., 2019	
初期間隙水圧 [Pa]	1.013e5	<sub>のf</sub> g(350 -10 - z) + (標準気圧)		(標準気圧)	ρ <sub>Γ</sub> : 水の密度、g: 重力加速度 z: モデルのz座標(坑道中心: O) 地下水位G.L10mの下での静水圧	
温度 [℃]		20.0			地表を9.5℃、地熱勾配を-0.03℃/ mとして計算	

表 5.3-11 設定パラメータ

#1 力学的長期変化解析の結果に基づき部分的に変化させる。

表	5.3 - 12	水分特性曲線のパラメータ					
		EDZ 1	EDZ 2	母岩			
	α [1/Pa]	5.0e-5	1.667e-5	5.0e-6			
	λ	0.455	0.455	0.455			

10000 1000 EDZ1 -EDZ2 100 10 サクション [MPa] 1 0.1 0.01 0.001 0.0001 20 80 40 60 100 有効飽和度 [%]

図 5.3-18 水分特性曲線

比透水係数および透気係数については、Verma モデルで表現した。比透気係数 $k_{rg}$ 、比透水係数 $k_{rl}$ を式 5.3-18 および式 5.3-19 に示す。 $k_{rg}$ のパラメータは、既往の研究 (Miyakawa et al.,

2019)に基づき設定した。透気係数および透水係数曲線を図 5.3-19 に示す。

$$k_{rl} = 2.9(S - 0.3)^3$$
 式 5.3-18



図 5.3-19 比透水係数および透気係数曲線

# 6) 初期条件、境界条件

二次元解析で設定した初期条件を図 5.3-20 および図 5.3-21 に示す。また、境界条件を図 5.3-22 に示す。初期圧力は、解析領域全体で水位が G.L. -10m にあるとしたときの静水圧分布と し、領域全体で飽和状態とした。液相の CH4 および CO2 の初期モル分率は、既往の研究 (Miyakawa et al., 2017) を参考に飽和溶解量に対する比を求め、この比を用いて初期圧力分布 に対応した量を設定した。境界条件は、モデル下端を圧力・溶存濃度固定とし、坑道壁面を除く 周囲を不透過境界とした。また、坑道壁面は大気圧固定境界とした(図 5.3-22)。





 CH4の初期モル分率
 CO2の初期モル分率

 図 5.3・21 液相の CH4 および CO2の初期モル分率



### (5) 予察的解析の解析ケースと解析対象期間の設定

幌延の深度 350m 坑道周辺の地質環境の長期変化に影響を及ぼす因子として、力学的長期変化 解析では、クリープ変形に着目した。また、水理学的長期変化解析では、支保工や EDZ の有無に 着目した。よって、この予察的解析では、これらの因子を組み合わせて解析ケースを設定するこ とにした。各因子の組み合わせと予察的解析の解析ケースを表 5.3-13 に示す。

この予察的解析では、力学的長期変化解析の結果を水理学的長期的変化解析の条件として引き 渡す方法を採用しているために、Case1 と Case3 の力学的長期変化解析は同じものとなる。ま た、水理学的長期変化解析では、支保工の有無を考慮しているが、力学的長期変化解析では支保 工の有無は因子としていないので、Case1、および Case2 いずれも支保工は存在している。

地下水・ガス長期変化解析の Case1-1 は、坑道掘削による全体的な変化の傾向を確認するため、 EDZ を考慮せず全体を母岩としたモデルで解析を行った。また、表 5.3-11 に示すように EDZ1 の透水係数は、母岩の透水係数の 10<sup>5</sup> 倍と母岩に比べて非常に透水性が高い。そのため、数 100 年オーダーの解析をする際には、EDZ1 は解析結果にほとんど影響しないことが予想される。そ こで、Case1-2 および Case2 では EDZ2 のみを考慮したモデルで解析を行った。

解析対象期間としては、回収可能性維持期間を念頭において設定する。ただし、現在、わが国では、回収可能性の維持を閉鎖まで確保することを方策としているが、その期間は明確に設定されていない(経済産業省,2015)。そこで、解析対象期間としては、廃棄体を定置してから1,000 年後の状態を最長の回収可能性維持期間の一つの目安とし、1,000年に設定した。

	力学長期	<b>一</b> 変化解析	水理学的長期変化解析				
	力学的因子:クリープ変形		水理学的因子:		備考		
			支保工の有				
Genel	支保工あり標準的な場合		支保工なし	EDZ1 省略, EDZ2 は母岩と同一	クリープ変		
Case1	支保工あり	(n0=30, m=20)	支保工なし	EDZ1 省略,EDZ 2 考慮	形 か 標 準 的 なケース		
Case2	支保工あり	クリープ変形が速い 場合 (n0=18、m=18)	支保工なし	EDZ1 省略,EDZ 2 考慮	クリープ変 形が速いケ ース		
Case3	支保工あり	標準的な場合 (n0=30、m=20)	支保工あり	EDZ1, EDZ 2 共 に考慮	支保工の効 果を考慮し た ケ ー ス (一次元解 析)		

表 5.3-13 予察的解析の解析ケース

### (6) 予察的解析結果の概要

### 1) 長期変化解析の結果

(3)および(4)にて設定した条件と、(5)で設定した解析ケースに基づいて、力学的長期変化解析 を実施した。(3)で示したとおり、岩盤は大久保モデル、支保工は線形弾性体として、有限要素法 による解析コードにより、2次元平面ひずみモデルの解析を行った。

解析結果として、周辺岩盤における天端部と側壁部の変位、周辺岩盤の透水係数の増加率の分 布、および周辺岩盤のヤング率の変化の分布の経時変化を図化した。周辺岩盤の変位は、図 5.3-7 の初期状態からのものであり、坑道掘削時の変位は含まれていない。透水係数の増加率は、ある 経過時間における岩盤の透水係数 k を初期透水係数 ko で除した値である。また、ヤング率の変化 の値は、岩盤のヤング率を初期ヤング率で除した値である。

#### 1 Case1

Case1 は、周辺岩盤のクリープ変形が標準的と設定した場合のものである。

周辺岩盤の天端部の変位を図 5.3-23 に、側壁部の変位を図 5.3-24 に示す。天端部の変位、および側壁部の変位のいずれも、坑道内側への方向を正としている。周辺岩盤の透水係数の増加率を図 5.3-25 に、周辺岩盤のヤング率の変化を図 5.3-26 に示す。

これらの図から、経過時間 1,000 年後の周辺岩盤のクリープ変形による天端の沈下量は、3.8E-5(m)となり、非常に小さいことがわかった。また、EDZ の透水係数の増加率については、側 壁下部の隅角部は、経過時間 1 年のときには、1.0E5(倍)から 1.7E5(倍)に増加した。ただ し、その他の場所では、クリープ変形が小さかったことから、それによって生じるひずみも小さ くなり、周辺岩盤の透水係数は、初期状態よりも増加することはなかった。

さらに、ヤング率の変化も小さく、経過時間 1,000 年のときに、天端部で 0.88 倍に、側壁部で 0.89 倍の領域が現れる程度の変化であった。周辺岩盤の水理特性である比貯留係数は、岩盤の剛 性と関連する量であることを考慮すると、ヤング率が、ほぼ時間変化を見せなかったことから、 比貯留係数も時間変化をしないことになる。

Case1 においてクリープ変形が小さかった理由を考察するために、周辺岩盤の最大主応力の経時変化を図 5.3・27 に示した。また、図 5.3・28 に示す支保工の天端部と側壁部の着目要素における最大主応力の経時変化を図 5.3・29 に示した。

天端部と側壁部における周辺岩盤の最大主応力を見てみると、その大きさは、8~10MPa 程度 でほとんど経時変化は見られなかった。また、支保工の最大主応力にも変化が見られなかった。 岩盤のクリープ変形が進行していくと、天端部や側壁部の支保工の最大主応力は増加するはずで あることから、今回の Case1 のようなパラメータの組合せの場合、岩盤に作用している応力が、 クリープ変形を進行させるほど、大きくなかったものと考えられる。また、天端部や側壁部の周 辺岩盤は、支保工の内圧効果として拘束圧を受けている。拘束圧を受けると、式 5.3-5 に示す通 り見かけ上の岩盤の強度は増加し、拘束圧が無い場合と比べると、クリープ変形は抑制されるこ とになる。今回の Case1 のようなパラメータの組合せの場合、この拘束圧の効果もクリープ変形 が小さかった理由になったと考えられる。



図 5.3-23 Case1 における周辺岩盤の天 端部の変位



図 5.3-24 Case1 における周辺岩盤の側 壁部の変位







図 5.3-28 支保工の天端部と側壁 部において着目した要素



図 5.3-29 Case1 の支保工の着目要素における最大 主応力の経時変化

### 2 Case2

Case2は、周辺岩盤のクリープ変形が速いと想定したケースである。

周辺岩盤の天端部の変位を図 5.3-30 に、側壁部の変位を図 5.3-31 に示す。これらの図において、坑道内側への方向を正としている。周辺岩盤の透水係数の増加率を図 5.3-32 に、周辺岩盤の ヤング率の変化を図 5.3-33 に示す。

これらの図から、経過時間 1,000 年後の周辺岩盤のクリープ変形による天端の沈下量は、6.1E-4(m)、側壁部の変位は 8.9E-4(m)となり、Case1の 10 倍以上となったが、それでも非常に小さい。また、EDZ の透水係数の増加率についても、側壁下部の隅角部で経過時間 1 年のときに 1.7E5(倍)に増加したが、その他の場所では、変形が小さかったことからひずみも小さく、周辺 岩盤の透水係数は、初期状態よりも増加することがなかった。

一方、ヤング率の変化については、経過時間1年のときから低下する領域が発生し、時間経過 とともに剛性が低下している領域が拡がっている。周辺岩盤の水理特性である比貯留係数は岩盤 の剛性と関連する量であることから、Case2では比貯留係数は時間変化をすることになる。

Case1 とは異なり、周辺岩盤の天端部や側壁部にヤング率が低下した領域が現れたことから、 その挙動の違いについて考察を行う。Case2 の周辺岩盤の最大主応力を図 5.3-34 に示す。また、 図 5.3-35 に示された天端部と側壁部の支保工の着目要素における最大主応力の経時変化を図 5.3-36 に示す。これらの図より、周辺岩盤の天端部および側壁部において、支保工の近傍では、 岩盤の最大主応力は減少する傾向を示し、同時に、最大主応力が低下する領域の外側の領域では、 応力が増加する傾向があることが分かった。また、支保工の最大主応力も時間経過共に増加する ことが分かった。これは、元々、天端部や側壁部の支保工の近傍の岩盤が受け持っていた応力を、 その外側の周辺岩盤や支保工が受け持つように変化していることを示している。

このように、周辺岩盤に大きなクリープ変形が継続して生じる場合は、支保工に生じる応力は 増加し、いずれは破壊に至ることも想定される。ただし、吹付けコンクリートの最大主応力が、 最終的には 12MPa 程度であり、今回の対象である幌延深地層研究所の吹付けコンクリートの設 計基準強度が 36MPa であることを考慮すると、Case2 の場合でも、支保工の健全性が保たれれ ば、坑道の安定性が懸念されるまでの応力には達しないと考えられる。



図 5.3-30 Case2 における周辺岩盤の天端 部の変位



図 5.3-31 Case2 における周辺岩盤の側 壁部の変位





5 - 53



図 5.3-35 支保工の天端部と 側壁部において着目した要素



図 5.3-36 Case2 の支保工の着目要素における最大主 応力の経時変化

### 2) 地下水・ガス長期変化解析の結果

力学長期変化解析の結果、標準的な変形の Case1、クリープ速度の速い Case2 のいずれも変位 量は小さく、したがって、透水係数もほとんど変化しないことがわかった。そこで、地下水・ガ ス長期変化解析では、透水係数は初期値のまま変化させないこととした。

力学的長期変化解析の Case2 では、坑道上部から側面にかけての EDZ1 および EDZ2 にヤン グ率の低下とポアソン比の変化領域が認められ、この領域で貯留係数が変化すると考えられた。 そこで、地下水・ガス長期変化解析の Case2 では、EDZ2 でヤング率の低下とポアソン比の変化 領域について、低下したヤング率の値を用いて計算した貯留係数を設定することとした。

1) Case1-1

【圧力分布の変化】

図 5.3-37 に、二次元解析により得られた解析開始から6年~1000年後までの圧力分布の変化 を示す。また、図 5.3-38 には、坑道付近の圧力分布の変化を示す。

圧力の低下領域は、時間の経過とともに坑道周辺から同心円状に広がり、側方境界の影響を受けて鉛直上下方向へと広がった。本解析では、モデル下端を圧力固定境界としたため、坑道下方に圧力勾配の大きくなる領域が形成され、坑道より下方領域の圧力分布は、約200年後以降は変化が小さくなり、500年後にはほぼ定常に達した。一方、坑道より上方領域の圧力は、時間の経過とともに低下し続け、圧力勾配は時間とともに小さくなった。

【飽和度分布の変化】

図 5.3-39 には、二次元解析により得られた解析開始から6年~1000年後までの飽和度分布の変化を示す。また、図 5.3-40 には、坑道付近の飽和度分布の変化を示す。

解析開始から 20 年後までは、不飽和領域が時間の経過とともに坑道を中心として同心円状に 広がっていった。これは、坑道周辺の圧力低下にともない、液相から CH4 が脱ガスしたためと 考えられる。50 年後以降は、坑道上方へ不飽和領域が拡大し続ける一方で、坑道下部から側部 に広がっていた不飽和領域が縮小していった。不飽和領域の縮小は、坑道周辺の圧力低下が緩や かになるとともに脱ガスが起こりにくくなる一方で、坑道周辺に形成された圧力勾配により、気 体が坑道へ流出したためと考えられる。

一方、坑道下方から坑道へ流入する地下水には、高濃度の CH4 および CO2 が溶けているの で、坑道に近づくにつれ圧力低下による脱ガスが予想されたが、前述の通り、坑道下方の不飽和 領域は維持されるどころか、むしろ縮小していった。この原因について、次の通り検討した。

液相に溶ける気体の量はヘンリー則により圧力に比例するため、溶存気体の濃度分布は圧力分 布と対応する。すなわち、坑道下方の領域では、圧力勾配と同様に液相に溶解する濃度勾配も大 きくなる。このような場合、液相中の CH4 および CO2 の流束には拡散と移流のどちらも強く影 響することになる。

モデル下部境界の要素について、拡散と移流のそれぞれによる CH4の流量を確認してみる と、拡散による CH4の流量が約 3×10<sup>-11</sup> mol/s であるのに対し、移流による CH4の流量は約 7×10<sup>-12</sup> mol/s であり、拡散によるフラックスのほうが 1 オーダー程度大きいことを確認した。 したがって、下方から流れてくる水に溶けている気体は拡散の影響が支配的であるため、圧力低 下により脱ガスせずに坑道へ湧出していると考えられる。

また、212年以降にはモデル上端部に不飽和領域が形成された。本解析では、モデル上部では 圧力勾配が小さいため、圧力に対応した溶存ガスの濃度勾配も小さくなる。そのため、拡散の影 響が小さくなり、その結果、モデル上部で気体が脱ガスし、不飽和領域が形成されたと考えられ る。なお、モデル上端は不透過境界としたため気相が透過せずに保持されている状態となる。

【気相および液相の流束】

気相および液相の流束分布を図 5.3-41 および図 5.3-43 に、図 5.3-42 と図 5.3-44 に坑道周 辺部の拡大図を示す。なお、これらの図では、ベクトルの大きさは流束の大小によらず一定とし ているため、ここでは気相および液相の流れ場についてのみ述べる。

気相の流束分布については、解析開始から10年後の解析結果で、坑道からおよそ50mの範囲 において坑道に向かう気相の流れが確認できた。それ以外の領域では、浮力による上方への流れ が確認できた。解析開始から119年以降の解析結果では、圧力低下領域の拡大に伴い坑道に向 かった流れが支配的となった。ただし、モデル上端付近に限り依然として上方への流れが生じ た。

液相の流束分布についても気相と同様に、坑道に向う流れが発達していた。また、時間の経過 とともに下方から上方に向かう流れの範囲が拡大していく様子が確認できた。これは、図 5.3-40に示す不飽和領域の形状と対応しており、前述した下方からの水の流れにより飽和領域 が拡大していくという考察と矛盾しない結果となった。

#### 【気相および液相の CH4・CO2 分布】

図 5.3・45 に、気相の CH<sub>4</sub>および CO<sub>2</sub>のモル分率を、図 5.3・46 にはその坑道付近の拡大図を 示す。気相のモル分率は、成分比(割合)と同一である。また、図 5.3・47 には液相における CH<sub>4</sub>および CO<sub>2</sub>のモル分率を、図 5.3・48 にはその坑道付近の拡大図を示す。液相における溶存 ガスのモル分率は、値が小さい範囲においては濃度と同一と考えられる。

気相の CH<sub>4</sub> モル分率はモデル全体で高い値となっている。これは、CH<sub>4</sub> が初期状態で飽和溶 解量に近い値まで溶存しているのに対し、CO<sub>2</sub> は飽和溶解量の 2%弱しか溶解しておらず、脱ガ ス時に発生する成分が CH<sub>4</sub> であることに起因する。但し、CO<sub>2</sub> についてはモル分率の高い領域 が坑道下部に形成される結果となった。これは、圧力が低下した坑道付近で CO<sub>2</sub> が脱ガスする 影響によるものと考えられる。液相の CH4 および CO2 のモル分率は、圧力分布と対応した結果 となった。

図 5.3-49 に液相での CH4 および CO<sub>2</sub>の拡散フラックスを示す。解析結果はいずれも解析開始から 119 年後の結果である。拡散フラックスについては、CH4 および CO<sub>2</sub> のいずれもモル分率のコンターにほぼ垂直な流れとなった。



(Case1-1, 解析開始から6年~1000年後まで, 解析領域全体)



(Case1-1, 解析開始から6年~1000年後まで, 坑道壁面から水平方向に18mの範囲)



(Case1-1, 解析開始から6年~1000年後まで, 解析領域全体)



(Case1-1, 解析開始から6年~1000年後まで, 坑道壁面から水平方向に18mの範囲)



(a) 11 年





(b) 119年



(c) 212 年



図 5.3-41 気相の流束分布 (Case1-1, 11 年~514 年,解析領域全体)













(a) 11 年









(c) 212 年

(d) 514 年

図 5.3-43 液相の流束分布 (Case1-1, 11 年~514 年, 解析領域全体)



図 5.3·44 液相の流束分布

(Case1-1, 11 年~514 年, 坑道壁面から水平方向に 18m の範囲)



 (a) CH4
 (b) CO2
 図 5.3・45 気相における CH4 および CO2 のモル分率 (Case1・1, 119 年後の解析結果, 解析領域全体)



(a) CH4
 (b) CO2
 図 5.3-46 気相における CH4 および CO2 のモル分率
 (Case1-1, 119 年後の解析結果, 坑道壁面から水平方向に 18m の範囲)



 (a) CH4
 (b) CO2
 図 5.3-47 液相における CH4 および CO2 のモル分率 (Case1-1, 119 年後の解析結果, 解析領域全体)



(a) CH4
 (b) CO2
 図 5.3·48 液相における CH4 および CO2 のモル分率
 (Case1-1, 119 年後の解析結果, 坑道壁面から水平方向に 18m の範囲)





 (a) CH<sub>4</sub>
 (b) CO<sub>2</sub>
 図 5.3-49 液相における CH<sub>4</sub> および CO<sub>2</sub> の拡散フラックス (Case1-1, 119 年後の解析結果, 解析領域全体)

2 Case1-2

【圧力分布の変化】

図 5.3-50 に、二次元解析により得られた解析開始から 5 年後から 533 年後までの圧力分布の 変化を示す。また、図 5.3-51 は、坑道付近の圧力分布の変化である。図 5.3-52 には一次元解析 結果と二次元解析結果の比較を示す。二次元解析の結果は、坑道壁面から水平方向に抽出した圧 力分布である。

解析領域全体については、圧力の低下領域は、時間の経過とともに坑道周辺から同心円状に広がり、側方境界の影響を受けて鉛直上下方向へと広がった。これは、Case1の解析結果とほぼ同 ーとなった。したがって、二次元解析では EDZ2 の有無は圧力分布の解析結果にはほぼ影響しな いことが分かった。

一次元解析結果と二次元解析結果の比較については、一次元解析と二次限解析で解析時刻に数 年程度の差があるため直接の比較は難しいが、概ね同様の結果となった。ただし、約440年後で は、母岩の領域で二次元解析の結果が一次元解析の結果に比べて全体に小さくなった。

【飽和度分布の変化】

図 5.3-53 には、二次元解析により得られた、解析開始から 6 年~500 年後までの飽和度分布 変化を示す。また、図 5.3-54 は、坑道付近の飽和度分布の変化を示す。図 5.3-55 には 1 次元解 析と二次元解析の比較図を示す。二次元解析の結果は、原点から坑道側部に水平方向に抽出した データである。

解析領域全体については、不飽和領域は坑道周辺から同心円状に拡大し、50年以降は下端の圧 力固定境界の影響で飽和領域が坑道下部から側方に向かって拡大した。これは Case1の解析結果 とほぼ同一の結果である。坑道周辺部に着目すると、飽和度の最も低い領域が EDZ2 の外側の縁 辺部に形成されていた。この結果は Case1-1 の結果とは異なっており、Case1-1 では飽和度の低 い領域は坑道縁辺に形成されていた。これは、EDZ2 の高透水性により液相が浸入しやすいため と考えられる。

図 5.3-55 に示す、一次元解析結果と二次元解析結果の比較では、解析時刻が数年程度異なっ ており直接の比較は難しいが、概ね整合した結果となった。ただ、二次元解析ではおよそ 100 年 以降から坑道下部から側部に向かって飽和領域が拡大し始めるため、数 100 年以降は一次元解析 と異なる結果となった。このように、数 100 年以前の結果については、一次元解析と二次元解析 で概ね整合した結果が得られたため、EDZ1 を解析モデルから除いても飽和度の解析結果にはほ とんど影響しないことが示唆された。

【気相および液相の流束ベクトル】

図 5.3-56 および図 5.3-57 に気相および液相の流束分布を示す。また、図 5.3-58 および図 5.3-59 にそれぞれの拡大図を示す。

モデル全体での流束分布に関しては気相と液相のいずれも Case1-1 とほぼ同様の結果となった。坑道周辺部での流速分布に関しては、液相について、EDZ2 の領域で重力方向への流れが確認できた。これは Case1-1 には見られない流れであり、EDZ2 の高透水性によるものと考えられる。

【CH<sub>4</sub>および CO<sub>2</sub>の分布】

図 5.3-60 に CH<sub>4</sub> および CO<sub>2</sub>の気相のモル分率を、図 5.3-61 にそれぞれの拡大図を示す。 図 5.3-62 に CH<sub>4</sub> および CO<sub>2</sub>の液相のモル分率を、図 5.3-63 にはそれぞれの拡大図を示すと
ともに、液相における CH<sub>4</sub> および CO<sub>2</sub> の拡散フラックスを図 5.3-64 に示す。また、図 5.3-65 および図 5.3-66 は、気相における CH<sub>4</sub> と CO<sub>2</sub> のモル分率を Case1-1 と Case1-2 で比較して示 したものである。

Case1-2 では坑道下部に見られる、CH4のモル分率の低い領域が広くなっている。また Case1-2 では坑道下部の CO2のモル分率が Case1-1 に比べてやや大きくなっている。



(Case1-2, 解析開始から5年~533年後まで、解析領域全体)



図 5.3-51 圧力分布の変化 (Case1-2,解析開始から5年~533年後まで,坑道壁面から水平方向に18mの範囲)



図 5.3-52 一次元解析および二次元解析による圧力分布の比較 (Case1-2)





図 5.3-54 飽和度分布の変化

(Case1-2, 解析開始から5年~533年後まで, 坑道壁面から水平方向に18mの範囲)



(04501 =)





(b) 119 年





2.6E+06

2.4E+06

2.2E+06

1.8E+06

1.6E+06

1.4E+06

1.2E+06

1E+06

800000

600000

400000

200000

2E+06





(b) 119 年



(c) 206年
 (d) 497年
 図 5.3-57 液相の流束分布
 (Case1-2, 10 年~497 年, 解析領域全体)







図 5.3-59 液相の流束分布 (Case1-2, 10 年~497 年, 坑道壁面から水平方向に 18m の範囲)







(a) CH4
 (b) CO2
 図 5.3·61 気相における CH4 および CO2 のモル分率
 (Case1·2, 119 年後の解析結果, 坑道壁面から水平方向に 18m の範囲)







(a) Case1-1
 (b) Case1-2
 図 5.3-63 液相における CH<sub>4</sub> および CO<sub>2</sub> のモル分率

 (119 年後の解析結果, 坑道壁面から水平方向に 18m の範囲)





 (a) CH4
 (b) CO2
 図 5.3-64 液相における CH4 および CO2 の拡散フラックス (Case1-2, 119 年後の解析結果, 解析領域全体)



(a) Case1-1
 (b) Case1-2
 図 5.3-65 気相における CH4 のモル分率
 (Case1-1 および Case1-2, 119 年後の解析結果, 坑道壁面から水平方向に 18m の範囲)



(a) Case1-1
 (b) Case1-2
 図 5.3-66 気相における CO<sub>2</sub> のモル分率
 (Case1-1 および Case1-2, 119 年後の解析結果, 坑道壁面から水平方向に 18m の範囲)

③ Case2

【圧力分布の変化】

図 5.3-67 に、二次元解析により得られた解析開始から 5.24 年~304 年後までの圧力分布の変化を示す。また、図 5.3-68 には、坑道付近の圧力分布の変化を示す。図 5.3-69 には、軸対称一次元解析と二次元解析の圧力(全圧)分布の比較を示す。

Case2の結果は、Case1-1 および Case1-2の解析結果とほぼ同じ結果となった。したがって、 EDZ2に設定した貯留係数の変化領域は圧力分布に影響しないことが分かった。また、図 5.3-69 で示されるように、Case1-1 および Case1-2 と同様一次元解析結果と二次元解析結果で概ね整合 した結果となった。

【飽和度分布の変化】

図 5.3-70 には、二次元解析により得られた解析開始から 5 年~500 年後までの飽和度分布変 化を示す。また、図 5.3-71 には、坑道付近の飽和度分布の変化を示す。なお、図 5.3-72 には一 次元解析結果との比較図を示す。

解析結果は Case1-2 とほぼ同じ結果となった。したがって、EDZ2 に設定した貯留係数の変化 は飽和度にほとんど影響しないことが分かった。

【気相および液相の流束ベクトル】

図 5.3-73 および図 5.3-75 に気相および液相の流束分布を示す。また、図 5.3-74 および図 5.3-76 はそれぞれの拡大図である。

液相および気相のいずれについても Case1-2 とほぼ同じ結果となった。したがって、EDZ2 に 設定した貯留係数の変化は流速に影響しないことが分かった。

【CH4 および CO2 の分布】

図 5.3-77 に、気相の CH<sub>4</sub>および CO<sub>2</sub>のモル分率を、図 5.3-78 にはその坑道付近の拡大図を示 す。また、図 5.3-79 には液相における CH<sub>4</sub>および CO<sub>2</sub>のモル分率を、図 5.3-80 にはその坑道 付近の拡大図を示すとともに、液相における CH<sub>4</sub>および CO<sub>2</sub>の拡散フラックスを図 5.3-81 に示 す。

CH4 および CO2 のモル分率ともに Case1-2 とほぼ同じ結果となり、EDZ2 の貯留係数の変化 は解析結果に影響しないことが分かった。



図 5.3-67 圧力分布の変化 (Case2, 解析開始から5年~304年後まで,解析領域全体)



図 5.3-68 圧力分布の変化 (Case2, 解析開始から5年~304年後まで, 坑道壁面から水平方向に18mの範囲)



図 5.3-69 一次元解析と二次元解析による圧力分布の比較(Case2)



(Case2, 解析開始から5年~304年後まで,解析領域全体)



(Case2,解析開始から5年~304年後まで,坑道壁面から水平方向に18mの範囲)



(Case2)



図 5.3-73 気相の流束分布 (Case2, 10 年後および 304 年後,解析領域全体)



図 5.3-74 気相の流束分布 (Case2, 10 年後~304 年後, 坑道壁面から水平方向に 18m の範囲)



(Case2, 10 年後~304 年後, 解析領域全体)



図 5.3-76 液相の流束分布 (Case2, 10 年後~304 年後, 坑道壁面から水平方向に 18m の範囲)



(Case2, 119 年後の解析結果, 解析領域全体)



図 5.3-78 気相における CH<sub>4</sub>および CO<sub>2</sub>のモル分率 (Case2, 119 年後の解析結果, 坑道壁面から水平方向に 18m の範囲)







(Case2, 119 年後の解析結果, 坑道壁面から水平方向に 18m の範囲)



(Case2, 119 年後の解析結果, 解析領域全体)

④ Case3 (一次元解析)

【圧力分布の変化】

図 5.3-82 に、Case1-2(支保工なし)と Case3(支保工あり)の軸対称一次元二相流解析について、圧力(全圧)分布変化を比較して示す。EDZ領域に着目すると、数十日~1年程度の期間で Case3 のほうが Case1 に比べて圧力の低下が遅れていることが確認できる。これは、支保の影響で坑道側に水が抜けにくくなっているためと考えられる。

【飽和度分布および気相のガス組成の変化】

図 5.3-83、図 5.3-84 には、一次元の二相流解析により得られた、解析開始から数十日程度~ 1,000 年後までの飽和度分布、気相の CH4 分率、CO2 分率および O2 分率の変化を示す。

また、図 5.3-85 には Case1 と Case3 について、一次元の二相流解析の飽和度分布変化を比較 して示す。Case3 は、短期間で Case1 に比べて EDZ1 の飽和度が大きく低下している。これは、 圧力低下により析出したガスが支保工の影響で坑道側へ抜けずに EDZ1 内で捕捉されているため と考えられる。







飽和度

気相中の CH4 分率

図 5.3-83 一次元二相流解析結果 (Case3 飽和度分布、気相の CH<sub>4</sub>分率の変化)





### (7) 予察的解析結果のまとめと課題

5.3.1 で構築した概念モデルに基づいて、現時点での坑道の周辺地質環境の長期変化に関する 予察的解析を行った。ここでは、力学と水理を完全に連成させずに、力学的長期変化解析によっ て得られた周辺岩盤の時間変化の結果を水理学的長期変化の解析条件として引き渡す方法で、解 析を行った。また、予察的解析の対象としては、掘削損傷領域の透水試験データや他の解析的検 討でも対象となっていることから、深度 350m の試験坑道 3 を選定した。

幌延の深度 350m 坑道周辺の地質環境の長期変化に影響を及ぼす因子として、力学的長期変化 解析ではクリープ変形に着目し、水理学的長期変化解析では支保工の有無に着目した。そして、 各因子を組み合わせることで、解析ケースとして 3 ケースを設定した。力学的長期変化解析と地 下水・ガス長期変化解析のまとめと課題を以下に示す。

#### 1) 力学的長期変化解析のまとめと課題

幌延の深度 350m 坑道周辺の地質環境において、力学的な長期的変化としては、周辺岩盤の変 形の進行を挙げた。そして、周辺岩盤の変形の進行によって透水性も変わり、坑道周辺の力学以 外の地質環境も変化していくことを想定した。この周辺岩盤の変形の進行に影響を与える可能性 がある因子としては、周辺岩盤のクリープ変形、岩盤の強度低下などの劣化現象、支保工の耐力 低下・劣化等が挙げられるが、本業務の力学的長期変化解析では、周辺岩盤のクリープ変形に着 目することにした。そして、周辺岩盤のクリープ変形の構成則には、第2次取りまとめにも用い られている大久保モデルを用いた。

解析に必要な物性値については、これまでに幌延にて取得されたデータや他の検討で用いられ た値から設定し、大久保モデルのパラメータとしては、標準的な場合(Case1)とクリープ変形 が速い場合(Case2)の2つの解析ケースを設定した。また、力学的長期変化解析の初期状態に ついては、深度350m坑道周辺の力学的な概念モデルを基にして設定した(図 5.3-7 参照)。力学 的長期変化解析の結果をまとめると、以下のようになる。

- ・クリープ変形による 1,000 年後の岩盤の変位は、Case1 の天端部において 3.5E-5 (m)、Case2 の側壁部において 8.9E-4 (m) となり、非常に小さかった。
- ・Case1、Case2 ともに、クリープ変形が非常に小さかったことから、生じるひずみも小さくなり、EDZ は拡大せず、側壁下部の隅角部を除いて、透水係数の増加率に変化は見らなかった。
- ・Case1 では、壁面近傍の岩盤のヤング率の低下もほとんど見られなかった。一方、Case2 では、特に、側壁や底盤において、岩盤のヤング率の低下していく領域が拡大して行った。これは、Case2 では比貯留係数が時間変化することを示している。
- ・クリープ変形が小さかった理由として、Case1のようなパラメータの組合せの場合、岩盤に作用している応力が小さかったことと、拘束圧の効果で見かけ上の岩盤の強度が増加したことが 挙げられる。Case2では、支保工が健全で岩盤の変形を抑制したものと考えらえる。

これらの結果を受け、いくつかの課題が考えられる。具体的には、周辺岩盤の透水性変化を予 測するために、この力学的長期変化解析では、ひずみー透水係数関係に、三軸圧縮試験中に行わ れた透水試験の結果を基にしている。これは、周辺岩盤でせん断破壊が起きている領域に対して 適用するものであると考えられる。一方、図 5.3-2 に示した力学的な概念モデルを構築する際に 行った文献調査によると、壁面にごく近い場所では、引張によって大きな開口量を持つ新規の割 れ目が発生していて、それが透水性の増大に寄与していることが示されていた。せん断破壊が発 生するひずみレベルと引張破壊が発生するひずみレベルは、その大きさは異なっていることから、 引張破壊が起きている領域に適用できるひずみ-透水係数の関係式を検討・適用することによって、より現実的な予測になると考えられる。

また、今回の力学的長期変化解析では、周辺岩盤の変形の進行に影響を与える因子として、ク リープ変形のみ取り上げたが、支保工の耐力低下・劣化等も因子の一つである。様々な因子の内、 いずれがより変形の進行に影響を与えるのかは、定量的には明らかになっていない。よって、今 後、より現実的な予測を目指すためには、支保工の劣化などの他の因子も取り込みつつ、検討す る必要があると考えられる。

さらに、解析結果の妥当性確認のためには、原位置の計測データとの比較が必要であると考え られる。今回の力学的長期変化解析では、クリープ変形は小さく、EDZの透水性は変化しない結 果となった。これは、既往の研究で得られている試験坑道3の透水係数の時間変化の結果と整合 するが、一方2年間という短期間の試験データであることから、より長い期間の計測データの取 得やデータとの比較も必要であると考える。

### 2) 地下水・ガス長期変化解析のまとめと課題

予察解析の結果から、次のことが明らかになった。

### ① 長期的な水理場の変化

二次元の二相流解析結果から、坑道上方の圧力は長期にわたって低下を続ける可能性が示され た。ただし、今回使用したモデルでは、上方からの涵養量は考慮されていない。これを設定する ことにより、ある時点から水圧分布が定常となることが期待される。また、モデル下端を圧力固 定境界としため、モデル下方の領域での圧力勾配が大きくなり、下方から水が供給され続ける結 果となった。これは、解析領域を拡大することで解消される問題である。よって、解析領域を拡 大すれば、より現実の水理場を再現する結果が期待される。ただし、モデル領域を拡大するとそ の分、計算にかかる時間も増えるため、現実的な時間で解析できる範囲で最適な解析領域を確保 することが今後の課題となる。

今回考案した概念モデルでは、EDZ1の透水係数が母岩の透水係数の105倍と非常に大きい設定となっている。そのため、数100年スケールの長期的な評価をする上でEDZ1の影響は無視できるものと考え解析モデルから除外した。EDZ1をモデル化した一次元軸対称モデルと二次元解析結果の比較では概ね整合した結果となったので、長期的な水理場の評価をする上でEDZ1の影響はそれほど大きくないことが示唆された。

力学解析の結果を引き継いで行った解析では、ポアソン比とヤング率に変化が見られた領域において、算定した貯留係数を設定した。ポアソン比およびヤング率の変化領域が EDZ2 のごく一部 であったこともあり、貯留係数の変化は水理場の変化にほとんど影響しなかった。

### 長期的な飽和度分布の変化

二次元の二相流解析の結果から、不飽和領域が EDZ を超えて母岩まで同心円状に拡大するこ とがわかった。不飽和領域はおよそ 100 年以降、坑道下端から縮小し始め、飽和領域が下端から 坑道側方に向かって拡大し続ける結果となった。これはモデル下方からの水の供給が原因であり、 水の流束分布からも確認することができた。前述のとおり、モデル下方では圧力勾配が大きくな っているので、それが原因で実態よりも過剰に水が供給された結果になっていると考えられる。 よって、モデル領域を充分に確保すれば、モデル下方からの飽和領域の拡大は抑制されると考え られる。

下方から供給される水には一定量の CH4 が溶けているので、圧力の低下に伴い溶出すること が予想されるが、不飽和領域は確認されなかった。これについては、拡散の効果が移流を卓越す ることにより液相から CH4 が溶出されることなく坑道へ湧出すると推察した。この議論が正し ければ、モデル下方の圧力勾配が小さくなれば拡散の効果も小さくなるので、CH4の溶出が予想 される。また、拡散係数を現在の設定値よりも小さく設定することでも拡散が小さくなるので CH4の溶出が確認できるはずである。以上のように、今回得られた飽和度分布は境界の影響を無 視できない結果といえる。

次年度は、上記に示した課題も考慮した上で、パラメータ・境界条件の見直し等を行いつつ、 坑道掘削後の周辺地質環境の長期変化に関する解析的検討を実施する予定である。

### 5.4 本章の成果と今後の展開

#### 5.4.1 本章の成果

本節では、「平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 可逆性・ 回収可能性調査・技術高度化開発 平成 27 年度~平成 31 年度 5 ヵ年取りまとめ報告書」におい ても課題として挙げられていた、実際の地質環境条件下で生じる現象についての理解、実験によ るデータの拡充ならびに定量化手法の整備を 3 ヵ年の事業目標とした。

具体的には、地質環境条件について非常に多岐にわたり詳細なデータ等が取得されている日本 原子力機構が保有する幌延深地層研究所を事例としてとりあげ、図 5.11に示す性能性維持期間 中の開放坑道の安全性への影響、②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 響の評価に資する物性値の取得・設定の方法を提示する形でのアプローチをとることとし、以下 2つの項目を設定し技術開発を進めた。

(1) 実際の地下環境における支保部材の状態把握

(2) 実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理

(1)では、実際に幌延深地層研究所で施工されているコンクリート支保工を再現し、初期値と してコンクリートの各種物性値を取得した。また、次年度以降、実際の地質環境下でのコンクリ ートの性状や物性値に関する変化を取得するための準備として、気乾状態、原位置地下水での水 没状態でコンクリート供試体を幌延深地層研究所深度 350m 坑道内に定置し養生を開始した。

(2)については、幌延を事例として、坑道周辺の地質環境変化に関する予察的解析を実施し、 長期に渡る坑道安定性評価の一つの手法を提示できる可能性を示すとともに、幌延のような多量 の溶存ガスを賦存する場合の地質環境変化を2相流解析で表現できることが示唆された。

#### 5.4.2 今後の展開

(1) については、坑内に定置養生している供試体を用いた物性試験を継続し、実際の地質環 境下におけるコンクリートの性状や物性変化に関するデータを蓄積する。

(2)については、予察的解析で得られた力学長期解析や地下水・ガス長期変化解析の課題を 考慮した形で、坑道が存在する状況下での周辺部の地質環境変化に関する長期解析を実施する。 また、最終年度は、ある時点から坑道を埋め戻したケースを想定した解析を実施し、坑道維持期 間が周辺地質環境の変化に与える影響度を把握するとともに、それが処分システムの安全性にお よぼす影響についても検討する。 第5章 参考文献

青柳和平,石井英一(2017a):幌延深地層研究センターの深度の異なる水平坑道を対象とした 掘削損傷領域の水理力学特性の検討,岩の力学連合会,第14回岩の力学国内シンポジウム講演 集,講演番号095.

青柳和平,石井英一,石田 毅 (2017b): 幌延深地層研究センターの 350m 調査坑道における掘 削損傷領域の破壊様式の検討, Journal of MMIJ, Vol.133, No.2, pp.25-33.

三嶌星輝,緒方 奨,乾 徹,安原英明,岸田 潔,青柳和平(2021):損傷モデルによる珪質泥 岩を対象とした坑道掘削解析,岩の力学連合会,第15回岩の力学国内シンポジウム講演集,講 演番号 39, pp.215-220.

土木学会岩盤力学委員会トンネル変状メカニズム研究小委員会(2003):トンネルの変状メカニズム,土木学会.

核燃料サイクル開発機構(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼 性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022. 吉野尚人,宮野前俊一,井上博之,梨本裕(2005):軟岩の長期的安定性に関する検討,核燃 料サイクル開発機構契約業務報告書, JNC TJ8400 2005-004.

大久保誠介,金豊年(1993):非線形粘弾性モデルによる円形坑道周辺岩盤挙動のシミュレーショ,資源と素材, Vol.109, No.3, pp.209-214.

平本正行,小林保之,青柳茂雄,宮野前俊一(2008):ニアフィールド岩盤の長期力学挙動予測 評価手法の信頼性向上に関する検討(II) -緩衝材の膨潤圧とオーバーパックの腐食膨張圧がニ アフィールド岩盤の長期安定性に与える影響に関する検討-,JAEA-Research 2008-013.

Aoyagi, K., Ishii, E.(2019): A Method for Estimating the Highest Potential Hydraulic Conductivity in the Excavation Damaged Zone in Mudstone, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.52, pp.385-401.

青柳和平,石井英一,石田 毅 (2017): 幌延深地層研究センターの 350m 調査坑道における掘 削損傷領域の破壊様式の検討, Journal of MMIJ, Vol.133, No.2, pp.25-33.

郷家光男,石井 卓,佐ノ木哲,松井裕哉,杉田 裕 (2011): せん断変形の進行に伴う堆積軟岩の透水特性の変化,第40回岩盤力学に関するシンポジウム講演集,土木学会, pp.282-287.

郷家光男,石井 卓,木下直人,船山潤一(2003):せん断変形下における軟岩基質部の透水特 性の変化,第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集,土木学会,pp.167-172.

郷家光男・岸野佑次(2009): 軟岩の掘削影響領域における透水性変化モデルの提案,土木学会 トンネル工学論文集,第19巻, pp.59-68.

井上博之,吉野尚人,宮野前俊一,水谷和彦,野田兼司(2004):軟岩の長期力学的変形挙動研 究(II),核燃料サイクル開発機構業務委託報告書,前田建設工業株式会社,JNC TJ8400 2004-005.

市川康明, 亀村勝美(1988): 有限要素法による数値解析入門 4. 地盤の変形解析, 土と基礎, Vol.36, No.9, pp.81-88.

Miyakawa, K., Aoyagi, K., Akaki, T., Yamamoto, H.(2019): The effect of dissolved gas on rock desaturation in artificial openings in geological formations, YSRM2019 & REIF2019, Okinawa, pp.834-839.

徳永朋祥(1998): 貯留係数に関する一,二の議論,応用地質, pp.475-479.

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), https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\_gas/genshiryoku/pdf/012\_s03\_00.pdfhttp://www.meti.go.jp/press/2015/05/20150522003/20150522003-1.pdf,2015(参照日: 2020.12.1). 6.1目的

地層処分実規模試験施設(以下、「本施設」という。)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。地層処分に関する技術開発成果の情報発信を目的とし、資源エネルギーから貸 与をうけ施設の運営を行うとともに、維持管理を行った。

本章では、6.2 に「地層処分実規模試験施設の改修」、6.3 に「地層処分実規模試験施設の公開 内容の更新」について報告する。

### 6.2 地層処分実規模試験施設の改修

#### 6.2.1 施設の概要

本施設は、北海道天塩郡幌延町にある国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下、「原子 力機構」という)幌延深地層研究センターの敷地内であり、隣接している原子力機構「ゆめ地創 館」との一体的な運営を実施している。2008年度の経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層 処分実規模設備整備事業」にて整備に着手し、2010年4月から一般公開を開始した。開館以来、 実規模・実物の展示を基本として、これまでの工学技術に関する研究開発で使用した装置や、そ れらを用いた試験を一般に公開してきた(原環センター,2009、原環センター,2010)。

施設の竣工、一般公開から十年余りが経過し、施設自体、防火・消防設備、電気設備などの施 設の老朽化が進んでいる。本施設は一般の来館者への公開を前提としており、日常の運営、来館 者の安全確保の観点から、施設の全面改修を実施した。



(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 地層処分実規模試験施設(2020年度初め)

### **6.2.2** 施設の改修内容

改修に先立ち施設の点検を行い、建物の外壁補修、防水工、非常灯の更新、水銀灯の LED 化、 エレベーターの耐震補強などを抽出した。

### 6.2.3 更新工事の実施

休館日である月曜日や、施設内の立入禁止エリアの工夫をすることで、改修工事に伴う閉館日 が生じないように工程を工夫して作業を行った。回収作業は無事故で進み、予定した工期内で完 了した。図 6.2-2 に改修後の施設の外構写真、図 6.2-3 にゆめ地創館との連絡通路の改修前後の 様子を示す。改修工事の詳細は『付属書 6-1』にまとめた。



図 6.2-2 改修後の施設の外観



図 6.2-3 ゆめ地創館と連絡通路の改修

## 6.3 地層処分実規模試験施設の公開内容の更新

### 6.3.1 処分孔横置き・PEM 方式の操業技術の発信

我が国では「処分孔竪置き・ブロック方式」と「処分坑道横置き・PEM 方式」の2つの定置概 念の検討・評価が先行して進められている。

本施設では、これまでに実規模・実物オーバーパックや人工バリアのカットモデルをはじめ、 「処分孔竪置き・ブロック方式」の技術的実現性を検証するための試験で実際に使用したブロッ ク方式の緩衝材定置試験装置や、処分孔からオーバーパックを回収するための緩衝材除去システ ムを一般に公開し、地層処分に係る工学技術の整備状況の発信を行ってきた。もう1つの定置概 念である「処分坑道横置き・PEM 方式」の技術開発は、PEM の政策試験や定置技術、定置され た PEM の回収技術の開発が進められており、2019 年度に幌延深地層研究センター地下 350m に 位置する試験坑道 2 にて、回収実証試験を実施した(原環センター, 2020.)。この試験で使用し た、スクリューフィーダ方式の隙間充填装置、エアベアリング方式の定置・回収装置の一般公開 を計画した。

### 6.3.2 設備建屋内の更新計画

展示内容を処分孔竪置き・ブロック方式主体の内容から処分坑道横置き・PEM 方式の定置装置、及び隙間充填装置を主体とする内容に変更した。展示品の配置については、関連する展示物をひとくくりに説明できるようエリア分けを行うこととした。本施設内のエリア分けを図 6.3-1 に示す。1 階南側(エリア 2、3)は、実規模装置を見てその多さや仕組みを実物や映像資料を見

ながら実感するエリアに、1 階北側(エリア 4、5)は、実際に装置やベントナイトの性質を、実物に触れることで体験するエリアと大別した。また、従来展示していた処分孔竪置き・ブロック 方式については、緩衝材定置装置及び緩衝材除去装置を移設したため実機を用いた紹介ができない。そのため、地下一階(エリア 8)に集約し、解説パネル及び映像資料による展示とした。



図 6.3-1 実規模試験施設更新後のイメージ図

- エリア1 施設概要
- エリア2 人工バリアの解説
- エリア3 処分坑道横置き・PEM 方式の解説
- エリア4 処分坑道横置き・PEM 方式エアベア要素装置の解説
- エリア5 ベントナイトの性質体験
- エリア6 その他の充填技術紹介
- エリア7 工学的映像資料
- エリア8 処分孔竪置き・ブロック方式の解説

## 6.3.3 各エリアの展示物の検討

地層処分の工学技術の整備状況の発信では、実物を基として様々なツールを効果的に利用して 行うことが重要である。各ツールの役割を以下に示す。

現物	試験で使用した試験装置や、試験で製作した実物。
パネル	技術や装置の解説 来館者が自由見学の際に情報を得る
動画	実際に実施した試験の様子をまとめたもの
解説	本施設に常駐する説明員が使用 来館者とのやり取りで更新される
模型	装置のしくみ、材料の特徴を体感するための道具

### (1) エリア1:入口

入場した来館者へ、本施設の位置付けや公開内容を発信する。

現物	なし
パネル	施設の紹介
動画	なし
解説	FAQ の整備
模型	なし

# (2) エリア2:人工バリアの製作技術

オーバーパック、緩衝材ブロック、竪置き・ブロック方式を用いた人工バリアのカットモデル を展示している。来館者には、人工バリアの構成要素が何であるかを理解してもらうことを第一 に、高レベル放射性廃棄物から放射性物質が出ないようにどのような工夫をしているか理解して もらえるような構成とした。

現物	オーバーパック、緩衝材ブロック、人工バリア
パネル	オーバーパック、緩衝材ブロックの製造方法
	人工バリアの構成要素に関するパネル
動画	オーバーパック製作試験、緩衝材製作試験
解説	FAQ の整備
模型	溶接試験片から採取した溶接深さの説明用の試験片

#### (3) エリア3: 処分坑道横置き・PEM 方式

模擬 PEM が積載されたエアベア装置やスクリュー式隙間充填装置、及び除去技術としてオー ガ方式による充填材除去装置の展示を行なう。来館者には、地下の処分場で約 37t の重量を持つ PEM をどのように搬送・定置するかを理解してもらう。

現物	エアベアリング方式の定置装置
	スクリューフィーダ方式の隙間充填装置
パネル	エアベアリング方式の定置装置の動作原理
	スクリューフィーダ方式の隙間充填装置の説明
	地下での実証試験の紹介
動画	2019 年度の地下実証試験、地上での要素試験の動画
解説	FAQ の整備
模型	スクリュー模型、実物大PEMカットモデル(モックアップ)

## (4) エリア4: 横置き・PEM 方式のエアベア要素装置

エアベアリング要素試験装置を展示し、PEM の下でエアベアリングがどのように機能しているか理解してもらう。

現物	エアベアリング要素装置
パネル	エアベア要素技術開発の概要
動画	なし
解説	FAQ の整備
模型	使用済みのトーラスパックのカットモデル

### (5) エリア5:ベントナイト試験

止水試験、色水でベントナイトにお絵かき体験ができる。ベントナイトは膨潤性と止水性を有 しているため、釘で穴をあけても水が零れ落ちないという実験を行い、その性質を体験し理解し てもらう。

現物	ベントナイトペレット
パネル	なし
動画	なし
解説	FAQ の整備
模型	なし

## (6) エリア6:緩衝材の施工技術の紹介

パネルによる解説を行う。ここでは吹付け方式、原位置締固め方式、ペレット充填方式を紹介 し、緩衝材敷設方法には様々な方法があることを認識してもらう。

現物	実際の吹付け試験で製作した供試体
パネル	吹付け方式、原位置締固め方式、ペレット充填方式解説パネル
動画	なし
解説	FAQ の整備
模型	なし

## (7) エリア7:工学的映像資料閲覧コーナー

タッチパネルモニタを設置し、これまでに実施した試験の映像資料を来館者に自由に見てもら えるようにする。

現物	なし
パネル	なし
動画	なし
解説	FAQ の整備
模型	なし
# (8) エリア8(地下一階):処分孔竪置き・ブロック方式

従来本施設にて展示されていた竪置き・ブロック方式の緩衝材定置装置と緩衝材除去装置の解 説パネル及び映像資料を展示し、理解を深めてもらう。

現物	なし			
パネル	真空把持機構による処分孔への緩衝材の定置試験			
	塩水を使用した緩衝材除去システムの概要と除去試験n			
動画	緩衝材定置試験 緩衝材除去システムの総合動作確認試験			
解説	FAQ の整備			
模型	1/10 緩衝材新区把持模型			

# 6.3.4 整備後の展示内容

6.3.3の計画に基づき、施設内の更新を実施した。更新後の施設内の様子を図 6.3-2に示す。



図 6.3-2 更新後の実規模試験施設内

隣接するゆめ地創館から入場する場合の順路に沿って、施設内の様子を以下に示す。

# (1) ゆめ地創館からの入場

ゆめ地創館の VT500 から降車後、パネルで実規模試験施設へ誘導する。



図 6.3-3 ゆめ地創館からの入場

# (2) 実規模施設への入場

本施設入口で高レベル放射性廃棄物の地層処分で最も重要となる人工バリアの紹介、実際に触ることができる緩衝材ブロックを配置した。



図 6.3-4 地層処分実規模試験施設の入口

# (3) 人工バリアの製作技術の紹介

炭素鋼製オーバーパックと緩衝材ブロックの安全機能の解説、製作工程の映像記録と解説パネ ルを配置し、人工バリアの製作技術の整備状況を紹介する。オーバーパックは実際に触ることが 可能である。



図 6.3-5 人工バリアの機能、製作技術の紹介

# (4) 人工バリアカットモデル

実物の緩衝材ブロックとオーバーパックを使用し、処分孔竪置き・ブロック方式の人工バリア の構造、大きさが体感できるようにした。



図 6.3-6 ブロック方式の人工バリアのカットモデル

# (5) スクリューフィーダ方式の隙間充填装置

地下環境での実証試験で使用したスクリューフィーダ方式の隙間充填装置を組立てた。充填部 密度や分布を確認するために仕様した、隙間を模した土槽を設置し、装置の動きがイメージでき るようにした。



図 6.3-7 スクリューフィーダ方式の隙間充填装置

# (6) エアベアリング方式の定置・回収装置

地下環境での実証試験で使用したエアベアリング方式の PEM 定置・回収装置を、円形断面坑 道を模擬した鋼製架台上に組立てた。PEM の内部構造が解るようにカットモデル(木製のモッ クアップ)を設置した。遠隔操作用に備わっている監視モニタの映像が確認できる。



図 6.3-8 エアベアリング方式の PEM 定置・回収装置

# (7) 隙間充填材除去装置(流体的除去)

地下環境での実証試験で使用したウォータージェット方式の隙間充填材除去装置組立てた。自 際に高圧水を噴射することができないため、噴射ノズルの動作をコントロールするための空気弁 コントローラーを設置した。



図 6.3-9 ウォータージェット方式の隙間充填材除去装置

# (8) 隙間充填材除去装置(機械的除去)

地下環境での実証試験で使用したオーガ方式の隙間充填材除去装置をパネルと共に設置した。



図 6.3-10 オーガ方式の隙間充填材除去装置

# (9) エアベアリング要素試験装置

エアベアリング方式の定置・回収装置は、搬送定置のしくみを表現するため、PEM カットモデルを上部に設置した。定置部の構造の説明と、地下実証試験に至るまでの段階的な技術開発を紹介するため、実際に使用した要素試験装置を設置した。



図 6.3-11 エアベアリング要素試験装置

# (10)体感試験

ベントナイト止水試験、ベントナイト色水試験などの体感試験コーナーを用意した。また、ス クリューコンベアによる材料の移送のしくみを紹介する模型を設置した。



図 6.3-12 ベントナイト体感試験コーナー



図 6.3-13 スクリューによる材料移送のしくみを紹介する模型

# (11) 処分孔・竪置き・ブロック方式の工学技術の紹介

ブロック方式の緩衝材定置試験装置、塩水を使用した緩衝材除去システムについて、整備状況 を紹介するパネルと実証試験の記録映像のモニタを設置した。



図 6.3-14 処分孔竪置き方式の工学技術の紹介(地下1回)

# (12)パンフレットの更新

施設内の更新に合わせて、パンフレットを作成した。



図 6.3-15 処分孔竪置き方式の工学技術の紹介(地下1回)

# 6.4 本章の成果と今後の展開

### 6.4.1 本年度の成果

竣工から十年余りが経過した地層処分実規模試験施設について、建物の外壁補修、防水工、非 常灯の更新、水銀灯の LED 化、エレベーターの耐震補強などを抽出し、安全を最優先に改修を 行った。これまでに公開してきた処分孔竪置き・ブロック方式の技術開発成果に代わり、2019 年 度に幌延深地層研究センターで実施した、処分坑道横置き・PEM 方式の実証試験の成果を発信 するため、展示品の移設・更新作業を実施した。

### 6.4.2 今後の展開

実規模試験施設は2021年4月1日にリニューアルオープンの予定である。また、これまでの 来館者と説明員との対話記録の分析より、平均的な施設の滞在期間は5~10分程度である。新し い設備に対する来館者の反応を基に、説明マニュアルの作成・更新を行い、より効果的な情報発 信を行う。 参考文献

- 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.
- 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.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター,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)報告書,2020.

### 7. 本年度の成果と今後の展開

# 7.1 回収の迅速化に向けた技術の高度化

#### 7.1.1 令和2年度の成果

処分孔竪置き方式と処分坑道横置き・PEM 方式の 2 つの定置概念を前提として、それぞれオ ーバーパックと PEM の回収に関する作業手順と各作業に要する時間を算出し、ボトルネックと なる作業を抽出した。ボトルネックとなる作業は、処分孔竪置き方式ではオーバーパック周りの 緩衝材の除去、処分坑道横置き・PEM 方式では PEM 周りの隙間充填材の除去であり、ボトルネ ックを解消するために、迅速化の目標時間を設定した。

迅速化に向けた技術の高度化として、処分孔竪置き方式(オーバーパックの回収)にはウォー タージェットによる切削技術(流体的除去技術)を用いることとした。課題としてスラリー状(ス ラッジを含む場合もあり)となった緩衝材の処分孔からの排出とウォータージェットに使用する 流体のリユース機能の能力向上が挙げられ、これらの検討を進めるために噴射試験と沈降試験を 次年度以降に計画した。

処分坑道横置き・PEM 方式では、隙間充填材を広範囲に効率よく除去することを念頭に、機械 的除去技術の高度化を優先して検討することとした。機械的除去の除去効率は隙間充填材の仕様 や状態に依存するが現時点でこれらを特定できない。そのため、機械的除去に関する当面の課題 として、隙間充填材の仕様や状態に応じて適切な機構を選択可能とするために隙間充填材除去の 評価指標を構築することとした。

### 7.1.2 今後の展開

流体的除去技術の高度化については、ウォータージェット噴射試験により得られる知見を基に、 除去システムの噴射部の改良を行う。また、緩衝材側部の除去工程の省略の可能性を検討するた めに、定置されたオーバーパックの引き抜き試験を実施する。

機械的除去技術の高度化については、評価指標の構築に向けて、切削試験や付着試験を実施して 隙間充填材のパラメータとの相関について整理を行い、除去効率に対して支配的となるパラメー タの抽出を行う。次に切削機構および排土機構を模擬した小型試験をとおして隙間充填材の除去 に適する機構を選定し、それらを組み合わせて除去効率を確認するための試験を行う。この試験 では切削厚さや切削スピード等の設定を変えて除去効率を比較し、それぞれの設定の対応範囲を 明確にする。

### 7.2回収の容易性を高めた代替設計オプションの開発

### 7.2.1 令和2年度の成果

多様な定置概念や設計オプションからの選択の柔軟性を更に高めていくことを目的として、現 行の候補概念や設計オプションにとらわれない、"回収の容易性の向上"に焦点をあてた代替設計 オプション概念設計案を開発した。概念設計案は、回収の容易性を向上させる工学的方策を組み 合わせた概念をイラスト化した概要案の考案を出発点として、仕様等の具体化を行い、廃棄体な どからの熱影響による成立性を確認したものである。また、概念設計案に対して工学的実現性の 評価を行い、概念設計案の具体化に向けて必要となる技術課題を検討し、抽出した技術開発課題 に対する今後の対応策(研究開発計画など)について整理した。

概念設計案の開発は、回収作業のハンドリング対象物の最小モジュールをオーバーパックとした場合と PEM とした場合に分けて検討を実施した。

最小モジュールをオーバーパックとした代替設計オプション概念設計案は、次の二つの方策を 基軸として構築した。

・緩衝材とオーバーパックの縁切り(緩衝材の除去作業を省くための工学的方策)

・坑道の短尺化( 埋め戻し材の撤去量・作業量などを削減するための工学的方策)

他方、最小モジュールを PEM とした代替設計オプション概念設計案は二つに大別できる。 一つは、次の二つを基軸として構築した概念設計案、

・隙間充填を必要としない処分孔定置(隙間充填材の除去作業を省くための工学的方策)

- ・坑道の短尺化(埋め戻し材の撤去量・作業量などを削減するための工学的方策)
- もう一つは、次の二つを基軸として構築した概念設計案である。
  - ・複数の廃棄体を格納する PEM 容器の採用 (回収作業数を削減するための工学的方策)
  - ・大断面坑道への定置(大型モジュールの PEM を定置・回収するための空間を確保するための工学的方策)

これらの概念設計案を具体化するための技術開発課題への対応策について、回収の最小モジュ ールを PEM とした場合を例題として、以下のような技術開発課題を抽出した。

・隙間充填を必要としない狭隘な処分孔に定置した PEM を円滑に搬出する技術の開発

・複数のガラス固化体を格納した大型モジュールを大断面坑道に定置・回収する技術の開発

技術開発は、回収する対象物である PEM に係る構成要素から着手し、PEM を扱う回収装置、 さらには坑道レイアウトなどへと段階的に実施していくことが想定される。

これらは PEM を例題とした課題ではあるが、包含される個別課題には、最小モジュールをオ ーバーパックとした場合の課題と共通するものが多く含まれる。

### 7.2.2 今後の展開

回収の容易性を高めた代替設計オプション概念設計案の具体化に向けて、今後の対応策で示した技術開発(要素試験、検討など)に取り組んでいく。

本章で開発した代替設計オプション概念設計案は、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、操業期間中の安全性への影響や閉鎖後長期の安全性への影響が精査される。ま た、多様な設計因子、設計の最適化の観点からの検討により、その妥当性も評価する必要がある。

### 7.3回収可能性の維持に伴う影響事象の定量化手法の整備

#### 7.3.1 令和2年度の成果

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伴う安全性への影響の定量化手法の整備に向け、以下の事項を実施した。

回収可能性の維持に伴う安全性への影響は、回収可能性の維持期間の決定、安全な回収の実施 の可否の判断に対して重要であり、定置概念に依存しない共通課題である。処分場が建設される 地質環境特性、回収可能性の維持の状態、他の定置概念への展開を見据え、レファレンスとして 新第三紀堆積岩類・地下 500m に建設された処分孔・竪置き・ブロック方式(パネル型)を設定 した。

R&R 検討会で整理した回収可能性の維持に伴う影響の定量化に先立ち、時間・空間スケールの 把握のため、レファレンスの建設・操業工程の分析を行った。閉鎖後長期の安全評価で採用され ている時間スケール ( $T_1$ - $T_4$ )を踏まえ、回収可能性の維持期間を検討するための時間スケールと して「 $T_0$ :建設開始から回収完了までの期間」を追加設定した。また、空間スケールについては、 ニアフィールドスケールなどの4つの空間スケールに加えて、坑道などの構成要素と使用材料の 個々が扱えるように整理を行った。

回収可能性の維持に伴う影響の対象ごとに、時間・空間スケールに関する整合性を確認できる ようにする表現方法として、ストーリーボード作成方法の導入を検討した。閉鎖後長期の安全性 への影響のストーリーボードは、通常の操業で考慮されている事象を踏まえ、構成要素のTHMC 状態変化とその条件における安全機能の発揮の仕方を人工バリア・天然バリアそれぞれに時間・ 空間スケールを念頭に記述する。操業期間中(回収作業中)の安全性への影響に関するストーリ ーボードは、坑道の空間安定性や廃棄体の健全性のように対象が個別の要素/材料レベルで明確 であるため、レファレンスの工程分析結果に基づき、材料の時間変化から構成要素の機能の時間 変化を記述する。

### 7.3.2 今後の展開

処分場の建設から廃棄体の全量定置までの通常の操業の時間軸(回収作業時間はその時間軸に包 含する)に対してストーリーボードを作成する。その上で、回収可能性を維持した場合に特有と なる影響項目を整理し、検討対象とすべき事象の優先度や新たに追加検討すべき事象の有無や重 要度を整理し、回収可能性の維持に伴う影響を考慮したストーリーボードを作成する。

### 7.4 定量化に必要な物性値の取得

### 7.4.1 令和2年度の成果

回収可能性の維持に伴う影響事象の定量化手法の整備にて課題として挙げた、実際の地質環境 条件下で生じる現象についての理解、実験によるデータの拡充ならびに定量化手法の整備を3ヵ 年の事業目標とした。具体的には、地質環境条件について非常に多岐にわたり詳細なデータ等が 取得されている日本原子力機構が保有する幌延深地層研究所を事例としてとりあげ、回収可能性 維持期間中の開放坑道の安全性への影響、②天然バリア(母岩)に期待する閉鎖後長期の安全機 能への影響の評価に資する物性値の取得・設定の方法を提示する形でのアプローチをとることと し、以下2つの項目を設定し技術開発を進めた。

(1) 実際の地下環境における支保部材の状態把握

実際に幌延深地層研究所で施工されているコンクリート支保工を再現し、初期値としてコンク リートの各種物性値を取得した。また、次年度以降、実際の地質環境下でのコンクリートの性状 や物性値に関する変化を取得するための準備として、気乾状態、原位置地下水での水没状態でコ ンクリート供試体を幌延深地層研究所深度 350m 坑道内に定置し養生を開始した。

(2) 実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理

幌延を事例として、坑道周辺の地質環境変化に関する予察的解析を実施し、長期に渡る坑道安 定性評価の一つの手法を提示できる可能性を示すとともに、幌延のような多量の溶存ガスを賦存 する場合の地質環境変化を2相流解析で表現できることが示唆された。

### 7.4.2 今後の展開

実際の地下環境における支保部材の状態把握については、坑内に定置養生している供試体を用いた物性試験を継続し、実際の地質環境下におけるコンクリートの性状や物性変化に関するデータを蓄積する。

実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理については、予察的解析で得られた力学長期解析や 地下水・ガス長期変化解析の課題を考慮した形で、坑道が存在する状況下での周辺部の地質環境 変化に関する長期解析を実施する。また、最終年度は、ある時点から坑道を埋め戻したケースを 想定した解析を実施し、坑道維持期間が周辺地質環境の変化に与える影響度を把握するとともに、 それが処分システムの安全性におよぼす影響についても検討する。

7-4

### 7.5 地層処分実規模試験施設を活用した情報発信

### 7.5.1 令和2年度の成果

竣工から十年余りが経過した地層処分実規模試験施設について、建物の外壁補修、防水工、非 常灯の更新、水銀灯の LED 化、エレベーターの耐震補強などを抽出し、安全を最優先に改修を 行った。これまでに公開してきた処分孔竪置き・ブロック方式の技術開発成果に代わり、2019 年 度に幌延深地層研究センターで実施した、処分坑道横置き・PEM 方式の実証試験の成果を発信 するため、展示品の移設・更新作業を実施した。

# 7.5.2 今後の展開

実規模試験施設は 2021 年 4 月 1 日にリニューアルオープンの予定である。また、これまでの 来館者と説明員との対話記録の分析より、平均的な施設の滞在期間は 5~10 分程度である。新し い設備に対する来館者の反応を基に、説明マニュアルの作成・更新を行い、より効果的な情報発 信を行う。

# 令和2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 (回収可能性技術高度化開発)

# 報告書(付属書)

# 令和3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 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 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・資金管理センターと国 立研究開発法人日本原子力研究開発機構が実施した、 令和2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 回収可能性技術高度化開発の開発成 果の成果を取りまとめた報告書の付属書です。

# 令和2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 (回収可能性技術高度化開発)報告書 付属書一覧

#### 第1章

付属書なし

### 第2章

付属書なし

### 第3章

- 付属書 3-2 オーバーパックを回収の対象物の最小モジュールとした代替設計オプション概念設 計当初案の検討
- 付属書 3-3 オーバーパックを対象とした代替設計オプション概念設計当初案に対する熱影響評価(熱伝導解析)
- 付属書 3-4 オーバーパックを回収の対象物の最小モジュールとした代替設計オプション概念設 計案の検討
- 付属書 3-5 PEMを回収の対象物の最小モジュールとした代替設計オプション概要案
- 付属書 3-6 PEMを回収の対象物の最小モジュールとした代替設計オプション概念設計当初案 の検討
- 付属書 3-7 PEMと孔壁との隙間に関する概略検討
- 付属書 3-8 PEMを対象とした代替設計オプション概念設計当初案に対する熱影響評価(熱伝導 解析)
- 付属書 3-9 PEMを対象とした代替設計オプション概念設計案の実現性(設計・施工の実現性) の評価
- 付属書 3-10 PEMを対象とした代替設計オプション概念設計案の具体化に係る技術開発課題の 抽出と整理

# 第4章

付属書 4-1 新第三紀堆積岩類・地下 500m 処分孔竪置き・ブロック方式(パネル型)の建 設・操業工程の分析

#### 第5章

付属書なし

### 第6章

付属書 6-1 地層処分実規模試験施設の改修

# 付属書 3-1

オーバーパックを回収の対象物の最小モジュールとした 代替設計オプション概要案

# 1. はじめに

オーバーパックを回収の対象物の最小モジュールとした代替設計オプション概要案として、坑 道の再掘削作業量などを低減する方策"坑道の短尺化(処分孔間隔の短縮、処分孔数の増大、孔 への複数定置、複数のガラス固化体封入)"及び緩衝材の除去作業量を低減する方策"緩衝材を残 置する回収方式(オーバーパックと緩衝材の縁切り)"の二つの工学的方策を基軸にして四つの概 要案を構築した。各概要案のイメージ及び特徴を整理して記述する。 2. 概要案の抽出

### 2.1 概要案 OP-1

概要案 OP-1 は着目した二つの工学的方策"坑道の短尺化(処分孔間隔の短縮)"及び"緩衝材 を残置する回収方式(オーバーパックと緩衝材の縁切り)"を基軸にして構築した。ここでは組み 込み可能な他の方策も集約させることで回収容易性を高める代替設計オプション概要案を構築し た。その概要は次のように記述できる。

処分孔間隔を短縮することで処分坑道を短尺化して撤去する埋め戻し材の数量を低減する。 その際、処分孔の力学的安定性を確保するために処分孔孔壁を支保する。オーバーパックと緩 衝材の間にライナープレートを設置することにより両者を縁切りし、オーバーパック側方の緩 衝材撤去を不要とすることで緩衝材の撤去数量を低減する。埋め戻し材と緩衝材は軽量化を図 り、撤去作業の負荷を軽減する。また、止水機能を有する支保工の採用により緩衝材周囲を防 水して緩衝材と地下水が接触することを抑制し、緩衝材を乾燥状態で撤去可能とすることで撤 去作業の負荷を軽減する。さらに、処分孔間隔を短縮することで処分坑道を短尺化しているた め、撤去部材の搬出経路長が短縮され、撤去作業の負荷が軽減する。処分坑道支保部材の高耐 久化と処分孔孔壁の支保により、処分坑道および処分孔再掘削時の補修作業の作業数を低減す る。以上により、廃棄体までのアクセス性が向上する。

オーバーパックの軽量化により、回収対象物の重量を低減する。オーバーパックは耐腐食性材料の使用あるいは容器の厚さを増加することにより回収時に把持可能な仕様とし、かつ緩衝材周囲の防水により地下水浸潤を抑制して劣化しにくい周辺環境にしているため、回収対象物の健全性は確保されている。処分孔間隔を短縮することで処分坑道を短尺化しているため、オーバーパックの搬出経路長が短縮され、回収時の動線が短くなっている。以上より、廃棄体のハンドリング性が向上する。

上記を図化した代替設計オプション概要案 OP-1 を図 1 に示す。



図 1 代替設計オプション概要案 OP-1 (処分孔間隔の短縮)

2.2 概要案 OP-2

概要案 OP-2 は着目した二つの工学的方策"坑道の短尺化(処分孔数の増大)"及び"緩衝材を 残置する回収方式(オーバーパックと緩衝材の縁切り)"を基軸にして構築した。ここでは組み込 み可能な他の方策も集約させることで回収容易性を高める代替設計オプション概要案を構築した。 その概要は次のように記述できる。

断面当たりの処分孔数を増大することで処分坑道を短尺化して撤去する埋め戻し材の数量 を低減する。その際、処分孔の力学的安定性を確保するために処分孔孔壁を支保する。オーバ ーパックと緩衝材の間にライナープレートを設置することにより両者を縁切りし、オーバーパ ック側方の緩衝材撤去を不要とすることで緩衝材の撤去数量を低減する。埋め戻し材と緩衝材 は軽量化を図り、撤去作業の負荷を軽減する。また、止水機能を有する支保工の採用により緩 衝材周囲を防水して緩衝材と地下水が接触することを抑制し、緩衝材を乾燥状態で撤去可能と することで撤去作業の負荷を軽減する。さらに、断面当たりの処分孔数を増大することで処分 坑道を短尺化しているため、撤去部材の搬出経路長が短縮され、撤去作業の負荷が軽減する。 処分坑道支保部材の高耐久化と処分孔孔壁の支保により、処分坑道および処分孔再掘削時の補 修作業の作業数を低減する。以上により、廃棄体までのアクセス性が向上する。

オーバーパックの軽量化により、回収対象物の重量を低減する。オーバーパックは耐腐食性 材料の使用あるいは容器の厚さを増加することにより回収時に把持可能な仕様とし、かつ緩衝 材周囲の防水により地下水浸潤を抑制して劣化しにくい周辺環境にしているため、回収対象物 の健全性は確保されている。断面当たりの処分孔数を増大することで処分坑道を短尺化してい るため、オーバーパックの搬出経路長が短縮され、回収時の動線が短くなっている。以上より、 廃棄体のハンドリング性が向上する。

上記を図化した代替設計オプション概要案 OP-2 を図 2 に示す。



図 2 代替設計オプション概要案 OP-2 (処分孔数の増大)

2.3 概要案 OP-3

概要案 OP-3 は着目した二つの工学的方策"坑道の短尺化(孔への複数定置)"及び"緩衝材を 残置する回収方式(オーバーパックと緩衝材の縁切り)"を基軸にして構築した。ここでは組み込 み可能な他の方策も集約させることで回収容易性を高める代替設計オプション概要案を構築した。 その概要は次のように記述できる。

処分孔に複数のオーバーパックを定置することで処分坑道を短尺化して撤去する埋め戻し 材の数量を低減する。その際、処分孔の力学的安定性を確保するために処分孔孔壁を支保する。 オーバーパックと緩衝材の間にライナープレートを設置することにより両者を縁切りし、オー バーパック側方の緩衝材撤去を不要とすることで緩衝材の撤去数量を低減する。埋め戻し材と 緩衝材は軽量化を図り、撤去作業の負荷を軽減する。また、止水機能を有する支保工の採用に より緩衝材周囲を防水して緩衝材と地下水が接触することを抑制し、緩衝材を乾燥状態で撤去 可能とすることで撤去作業の負荷を軽減する。さらに、処分孔に複数のオーバーパックを定置 することで処分坑道を短尺化しているため、撤去部材の搬出経路長が短縮され、撤去作業の負 荷が軽減する。処分坑道支保部材の高耐久化と処分孔孔壁の支保により、処分坑道および処分 孔再掘削時の補修作業の作業数を低減する。以上により、廃棄体までのアクセス性が向上する。 オーバーパックの軽量化により、回収対象物の重量を低減する。オーバーパックは耐腐食性 材料の使用あるいは容器の厚さを増加することにより回収時に把持可能な仕様とし、かつ緩衝 材周囲の防水により地下水浸潤を抑制して劣化しにくい周辺環境にしているため、回収対象物 の健全性は確保されている。処分孔に複数のオーバーパックを定置することで処分坑道を短尺 化しているため、オーバーパックの搬出経路長が短縮され、回収時の動線が短くなっている。 以上より、廃棄体のハンドリング性が向上する。

上記を図化した代替設計オプション概要案 OP-3 を図 3 に示す。



図 3 代替設計オプション概要案 OP-3 (孔への複数定置)

2.4 概要案 OP-4

概要案 OP-4 は着目した二つの工学的方策 "坑道の短尺化(複数のガラス固化体封入)"及び "緩衝材を残置する回収方式(オーバーパックと緩衝材の縁切り)"を基軸にして構築した。ここ では組み込み可能な他の方策も集約させることで回収容易性を高める代替設計オプション概要案 を構築した。その概要は次のように記述できる。

複数のガラス固化体を封入したオーバーパックを処分孔に定置することで処分坑道を短尺 化して撤去する埋め戻し材の数量を低減する。その際、処分孔の力学的安定性を確保するため に処分孔孔壁を支保する。オーバーパックと緩衝材の間にライナープレートを設置することに より両者を縁切りし、オーバーパック側方の緩衝材撤去を不要とすることで緩衝材の撤去数量 を低減する。埋め戻し材と緩衝材は軽量化を図り、撤去作業の負荷を軽減する。また、止水機 能を有する支保工の採用により緩衝材周囲を防水して緩衝材と地下水が接触することを抑制 し、緩衝材を乾燥状態で撤去可能とすることで撤去作業の負荷を軽減する。さらに、複数のガ ラス固化体を封入したオーバーパックを処分孔に定置することで処分坑道を短尺化している ため、撤去部材の搬出経路長が短縮され、撤去作業の負荷が軽減する。処分坑道支保部材の高 耐久化と処分孔孔壁の支保により、処分坑道および処分孔再掘削時の補修作業の作業数を低減 する。以上により、廃棄体までのアクセス性が向上する。

オーバーパックの軽量化により、回収対象物の重量を低減する。オーバーパックは耐腐食性 材料の使用あるいは容器の厚さを増加することにより回収時に把持可能な仕様とし、かつ緩衝 材周囲の防水により地下水浸潤を抑制して劣化しにくい周辺環境にしているため、回収対象物 の健全性は確保されている。複数のガラス固化体を封入したオーバーパックを処分孔に定置す ることで処分坑道を短尺化しているため、オーバーパックの搬出経路長が短縮され、回収時の 動線が短くなっている。以上より、廃棄体のハンドリング性が向上する。



上記を図化した代替設計オプション概要案 OP-4 を図 4 に示す。

前述の四つの概要案を、オーバーパックを回収の対象物の最小モジュールとした代替設計オプ ション概要案とした。

図 4 代替設計オプション概要案 OP-4 (複数のガラス固化体封入)

付属書 3-2 オーバーパックを回収の対象物の最小モ ジュールとした代替設計オプション概念設計当初案の検 討

# 1. はじめに

概要案を具体化した概念設計当初案の検討結果を示す。

### 2. 概念設計当初案の構築

# 2.1 概念設計当初案 OP-1

レファレンス概念である新第三紀堆積岩類の竪置き・ブロック方式(原子力発電環境整備機構, 2018)は、処分坑道中心間距離を 2.4D (D は処分坑道の内径で、2.4D=12.0m)、処分孔の中心間 距離を 3d (d は処分孔内径で、3d=6.66m)と設定している。第 2 次取りまとめ(核燃料サイクル 開発機構, 1999)も参照すると、処分坑道中心間距離、処分孔中心間距離は、空洞安定性の評価結 果から定まっていると考えられる。したがって、熱影響の観点からは処分孔中心間距離を短縮す ることが可能である。ここでは、深成岩類と同様の 2d (d は処分孔内径で、3d=4.44m)と設定 する。なお、後述するように、オーバーパックと緩衝材の縁切り部材、処分孔孔壁の支保部材を 設置することにより、処分孔の直径はレファレンスの 2.22m より拡大されることとなるが、本検 討では便宜的にレファレンス概念の処分孔直径 d=2.22m を基準として検討を進める。

オーバーパックと緩衝材の縁切りには、フランスの事例(ANDRA, 2005)や平成 31 年度の検討 成果(原子力環境整備促進・資金管理センター, 2020)を参考に、厚さ 30mm の鋼製ライナープレ ートを用いることとする。この縁切りライナープレートは、底板と蓋を有する構造とし、蓋は脱 着可能な仕様を想定する。また、オーバーパックとライナープレートの離隔は、レファレンス概 念においてオーバーパックと緩衝材ブロックの施工時の離隔として想定されている寸法を参考に、 20mm とする。また、フランスの事例を参考に、オーバーパックとライナープレートの接触を避 け、ライナープレート内でのオーバーパックの移動を円滑にすることを目的とした Ceramic sliding runners に相当するセラミックランナーをオーバーパック表面に配置する。なお、縁切り ライナープレート底面および上面とも離隔を確保できるようにセラミックランナーを設置する。

埋め戻し材と緩衝材の軽量化による回収容易性の向上を図るが、本検討では、仕様の詳細を検 討することが困難であるため、レファレンス概念と同様の仕様とする。

処分孔孔壁の支保部材は、緩衝材への地下水接触抑制も兼ねて、止水性を有する鋼製ライナー プレートを用いることとする。板厚は、縁切りライナープレートと同様に 30mm と設定する。

処分坑道の支保部材は、高耐久化を図るものの、概念設計当初案として設定する厚さはレファ レンス概念と同じ 200mm とする。200mm の中には、鋼製支保工、吹付コンクリート、覆工コン クリートが含まれるが、ここでは物性が一様な鉄筋コンクリート相当の支保部材とする。なお、 ロックボルトの仕様設定は省略する。

軽量化を図ったオーバーパック、回収時に把持可能なオーバーパックの仕様は、本検討で詳細 を検討することが困難であるため、レファレンス概念と同様の仕様とする。なお、概念設計当初 案では把持部を省略する。

以上で設定した概念設計当初案 OP-1 の仕様を図 1 に示す。





図 1 概念設計当初案 OP-1 (処分孔間隔の短縮)の仕様設定

# 2.2 概念設計当初案 OP-2

概念設計当初案の仕様は、前述の概念設計当初案 OP-1 の考え方を踏襲する。 以上で設定した概念設計当初案 OP-2 の仕様を図 2 に示す。





図 2 概念設計当初案 OP-2 (処分孔数の増大)の仕様設定

# 2.3 概念設計当初案 OP-3

包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構,2018)では、1日に5本のオーバーパックを定置する操業工程を想定していることから、ひとつの処分孔に1日分の定置本数に相当する5本のオーバーパックを定置することとする。オーバーパック間の離隔は、包括的技術報告書レビュー版の横置き・PEM方式、第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構,1999)の処分坑道横置き方式を参考に1400mmとする。オーバーパック間の離隔を保持するために、オーバーパック間にはスペーサーを配置する。スペーサーは、PEM容器のような鋼殻に埋め戻し材相当の土質系材料を充填したものとし、オーバーパックと同様の把持方式により把持可能な仕様とする。

その他の仕様設定については、前述の概念設計当初案 OP-1 の考え方を踏襲する。 以上で設定した概念設計当初案 OP-3 の仕様を図 3 に示す。



C - C

図 3 概念設計当初案 OP-3 (孔への複数定置)の仕様設定

### 2.4 概念設計当初案 OP-4

複数のガラス固化体を封入したオーバーパックは、既往検討(NUMO, 2004)で示されたように、 いくつかの形態が考えられる。既往検討の「3 cluster overpack」のように複数のガラス固化体を 束ねる形態は、緩衝材に対する熱影響が非常に大きいと想定されることから、「2 in-line overpack」、「3 in-line overpack」のような縦にガラス固化体を積み上げた形態を考える。オーバ ーパックの部材厚が不変とした場合、オーバーパックの高さは以下のようになる。

縦2段:190mm+1350mm×2+210mm=3100mm

縦3段:190mm+1350mm×3+210mm=4450mm

処分坑道の内空高さが 5.0m であることや定置・回収時のハンドリング性も考慮して、ここでは、縦2段積みのオーバーパック(直径 820mm、高さ 3100mm)を想定する。

その他の仕様設定については、前述の概念設計当初案 OP-1 の考え方を踏襲する。

以上で設定した概念設計当初案 OP-4 の仕様を図 4 に示す。





図 4 概念設計当初案 OP-4(複数のガラス固化体封入)の仕様設定

# 参考文献

ANDRA, Dossier 2005 Argile, Architecture and management of geological repository, 2005. 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一適切なサイ

- 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.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター,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 報告書,2020.
- 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一地層 処分研究開発第2次取りまとめ一,分冊2 地層処分の工学技術,JNC TN1400 99-022, 1999.
- Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO), Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments, NUMO-TR-04-03, August 2004.

付属書 3-3 オーバーパックを対象とした代替設計オ プション概念設計当初案に対する熱影響評価(熱伝導解 析)

### 1. 熱影響評価の概要

概念設計当初案に対する熱影響評価を行った。評価は有限要素法による非定常三次元熱伝導解 析を用いて実施した。解析コードは、ASTEA MACS((株)計算力学研究センター社製)を用いる。 解析コードの検証結果については、3.に示す。

### 2. 概念設計当初案に対する熱影響評価

# 2.1 解析条件

# 2.1.1 ガラス固化体発熱量

ガラス固化体発熱量の時間的変化は、第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999)で使用された中間貯蔵期間 50 年の発熱特性を用いた。

# 2.1.2 熱物性値

熱物性値を表 1 に示す。なお、いずれの材料も含水状態に関わらず表 1 の値を用いることと した。これらの物性値については、既往検討である第 2 次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999)、第 2 次 TRU レポート(電気事業連合会, 2005)、包括的技術報告書レビュー版(原子力発電 環境整備機構, 2018)、その他(竹ケ原ほか, 2005)で用いられた値を使用した。

部位	熱伝導率	比熱	密度	出典			
	$(W m^{-1} K^{-1})$	(kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	(kg m <sup>-3</sup> )	ШХ			
ガラス固化体	1.2	0.96	2800	第2次取りまとめ			
炭素鋼 <sup>※1</sup>	51.6	0.47	7860	第2次取りまとめ			
緩衝材	0.78	0.59	1712	第2次取りまとめ			
埋め戻し材	0.78	0.59	1712	第2次取りまとめ			
鉄筋コンクリート *2	2.56	1.05	2500	第 2 次 TRU レポート			
岩盤	0.0	1 4	0000	包括的技術報告書レビュ			
(新第三紀堆積岩類)	2.0	1.4	2280	一版			
充填材	0.20	0.14	1900	休を直にか			
(OP と緩衝材の間)	0.50	0.14	1200				
空気	0.03	1.01	0.9799	第2次取りまとめ			
※1 本検討では、オーバーパック、ライナープレートに適用した。							
※2 第2次 TRU レポートの「支保工」を参照した。本検討では処分坑道の支保工に適用した。							

表 1 熱物性値一覧

### 2.1.3 廃棄体処分深度

処分深度は、包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)のレファレンス概 念と同様に 500m とした。ただし、以降で熱伝導解析の対象とする概念設計当初案はガラス固化 体が三次元的に配置されるものがあるため、最上段のガラス固化体中心の深度を 500m とした。 また、最上段のガラス固化体中心から 200m 下方までをモデル化した。

# 2.1.4 地温勾配と地表面温度

包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)を参照し、地温勾配を 3℃/100m、 地表面温度を 15℃とした。

# 2.1.5 境界条件

第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999)を参照し、解析モデル上下面(水平面)は温度規定境界、解析モデル側面(鉛直面)は断熱境界とした。

# 2.1.6 解析期間

解析期間は0~1000年とした。

# 2.1.7 制限温度

ニアフィールドの制限温度に関して、包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)では、緩衝材に対して100℃以下としている。ここでも同様にして、緩衝材に対して100℃ 以下とした。

# 2.1.8 埋め戻し状態

処分坑道は埋め戻された状態を基本とした。

# 2.2 概念設計当初案に対する熱影響評価

### 2.2.1 概念設計当初案 OP-1

平面的なモデル化範囲は、第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999)のモデル化を踏 襲して、平面的な廃棄体専有面積の1/4範囲とした。ただし、隣接処分坑道の影響が無視できる 程度に処分坑道中心間距離が確保されている場合を想定するため、処分坑道中心から50m程度 までをモデル化した。処分孔中心間距離は、処分孔が接する2.38mとしてモデル化し、解析結果 に応じて変更した。

鉛直方向のモデル化範囲は、地表面から深度 700m までとした。

オーバーパックと緩衝材の縁切り部材 (ライナープレート)、オーバーパックと縁切り部材間の 隙間(空気、セラミックランナー)については、ライナープレートには表 1 の「炭素鋼」、隙間 には「空気」の物性値をそれぞれ適用した。

解析モデルを図1に示す。



図 1 概念設計当初案 OP-1 (処分孔間隔の短縮)の熱伝導解析モデル

解析結果のうち、緩衝材代表点における最高温度を表 2に、温度履歴を図 2に、温度分布を図 3に示す。処分孔中心間距離を処分孔が接する 2.38m とし、隣接処分坑道の影響が無視できる場 合には、既往検討に基づく熱影響評価で想定したように、緩衝材の最高温度は 100℃を下回った。 したがって、隣接処分坑道の影響が無視できる場合には、処分孔が接するまで処分孔中心間隔を 短縮できることになる。

出力点	最高温度 [℃]	発生時刻 [年]
緩衝材1	78.2	5.0
緩衝材 2	78.3	5.0
緩衝材 3	56.5	10.0
緩衝材 4	58.8	9.0
緩衝材 5	77.0	6.0
緩衝材 6	76.4	6.0
緩衝材 7	52.4	11.0
緩衝材 8	54.6	11.0

表 2 概念設計当初案 OP-1(処分孔間隔の短縮)の解析結果(処分孔中心間距離:2.38m、処 分坑道中心間距離:100m)



図 2 概念設計当初案 OP-1(処分孔間隔の短縮)の緩衝材温度履歴(処分孔中心間距離: 2.38m、処分坑道中心間距離:100m)



図 3 概念設計当初案 OP-1(処分孔間隔の短縮)の緩衝材温度分布(処分孔中心間距離: 2.38m、処分坑道中心間距離:100m)

次に、レファレンス概念と同様に処分坑道中心間距離を 12.0m とした場合、およびレファレンス概念の 2 倍に相当する 24.0m とした場合の解析を実施した。処分坑道中心間距離が 12.0m の 解析結果を表 3、図 4、及び図 5 に、処分坑道中心間距離が 24.0m の解析結果を表 4、図 6、 及び図 7 に示す。処分坑道中心間距離が 12.0m の場合には、緩衝材最高温度が 100℃を超える が、処分坑道中心間距離を 24.0m 確保することで、処分孔中心間距離を広げることなく緩衝材最 高温度を 100℃未満に抑制することが可能となる。

表 3 概念設計当初案 OP-1(処分孔間隔の短縮)の解析結果(処分孔中心間距離:2.38m、処 分坑道中心間距離:12.0m)

出力点	最高温度 [℃]	発生時刻 [年]
緩衝材1	103.7	30.0
緩衝材 2	103.8	30.0
緩衝材 3	90.6	40.0
緩衝材4	91.9	40.0
緩衝材 5	102.9	30.0
緩衝材 6	102.6	30.0
緩衝材7	87.8	40.0
緩衝材 8	89.4	40.0



図 4 概念設計当初案 OP-1(処分孔間隔の短縮)の緩衝材温度履歴(処分孔中心間距離: 2.38m、処分坑道中心間距離:12.0m)



図 5 概念設計当初案 OP-1(処分孔間隔の短縮)の概念設計当初案 C の緩衝材温度分布(処分 孔中心間距離: 2.38m、処分坑道中心間距離: 12.0m)

付属書 3-3-5
# 表 4 概念設計当初案 OP-1(処分孔間隔の短縮)の解析結果(処分孔中心間距離:2.38m、処 分坑道中心間距離:24.0m)

出力点	最高温度 [℃]	発生時刻 [年]
緩衝材1	81.8	12.0
緩衝材 2	81.9	12.0
緩衝材 3	64.9	30.0
緩衝材 4	66.5	30.0
緩衝材 5	80.7	13.0
緩衝材 6	80.2	13.0
緩衝材7	62.1	40.0
緩衝材 8	63.6	30.0



図 6 概念設計当初案 OP-1(処分孔間隔の短縮)の緩衝材温度履歴(処分孔中心間距離: 2.38m、処分坑道中心間距離:24.0m)



図 7 概念設計当初案 OP-1(処分孔間隔の短縮)の緩衝材温度分布(処分孔中心間距離: 2.38m、処分坑道中心間距離:24.0m)

付属書 3-3-6

以上の解析結果を一覧表にまとめて表 5 に示す。

処分孔中心間距離	隣接処分坑道との	緩衝材最高温度	緩衝材最高温度
(m)	中心間距離(m)	(°C)	発生時刻(年)
2.38m	100*	78.3	5
2.38m	12	103.8	30
2.38m	24	81.9	12

表 5 概念設計当初案 OP-1(処分孔間隔の短縮)の解析結果のまとめ

※ 隣接処分坑道との中心間距離を 100m としたケースは、隣接処分坑道からの熱影響が無 視できるほどに離隔が確保されている状態として設定した

# 2.2.2 概念設計当初案 OP-2

平面的なモデル化範囲は、第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999)のモデル化を踏 襲した。ただし、隣接処分坑道の影響が無視できる程度に処分坑道中心間距離が確保されている 場合を想定するため、処分坑道中心から50m程度までをモデル化した。処分孔中心間距離は、処 分孔間隔を短縮する工学的方策の組合せも考慮し、処分孔が接する2.38mとしてモデル化し、解 析結果に応じて変更した。

鉛直方向のモデル化範囲は、地表面から深度 700m までとした。

オーバーパックと緩衝材の縁切り部材 (ライナープレート)、オーバーパックと縁切り部材間の 隙間(空気、セラミックランナー)については、ライナープレートには表 1 の「炭素鋼」、隙間 には「空気」の物性値をそれぞれ適用した。

解析モデルを図8に示す。



図 8 概念設計当初案 OP-2(処分孔数の増大)の熱伝導解析モデル

解析結果のうち、緩衝材代表点における最高温度を表 6 に、温度履歴を図 9 及び図 10 に、 温度分布を図 11 に示す。処分孔中心間距離を処分孔が接する 2.38m とした場合は、隣接処分 坑道の影響が無視できるほど離隔を確保しても緩衝材の最高温度が 101.3℃とわずかながら制限 温度を上回った。

# 表 6 概念設計当初案 OP-2(処分孔数の増大)のの解析結果(処分孔中心間距離:2.38m、処 分坑道中心間距離:100m)

出力点	最高温度 [℃]	発生時刻 [年]
緩衝材1	101.2	10.0
緩衝材 2	101.3	10.0
緩衝材 3	81.5	15.0
緩衝材 4	83.5	14.0
緩衝材 5	100.6	11.0
緩衝材 6	99.0	11.0
緩衝材 7	80.2	15.0
緩衝材 8	77.5	16.0
緩衝材 9	96.1	11.0
緩衝材 10	96.4	11.0
緩衝材 11	75.6	16.0
緩衝材 12	77.7	16.0
緩衝材 13	94.0	11.0
緩衝材 14	95.7	11.0
緩衝材 15	72.9	17.0
緩衝材 16	77.1	16.0
緩衝材 17	96.3	11.0
緩衝材 18	78.7	15.0



図 9 概念設計当初案 OP-2(処分孔数の増大)の鉛直処分孔緩衝材温度履歴(処分孔中心間距 離:2.38m、処分坑道中心間距離:100m)



図 10 概念設計当初案 OP-2(処分孔数の増大)の水平処分孔緩衝材温度履歴(処分孔中心間 距離:2.38m、処分坑道中心間距離:100m)



図 11 概念設計当初案 OP-2(処分孔数の増大)の緩衝材温度分布(処分孔中心間距離: 2.38m、処分坑道中心間距離:100m)

次に、処分孔中心間距離をレファレンス概念の処分孔径 d に対して 2d に相当する 4.44m とした。解析結果のうち、緩衝材代表点における最高温度を表 7 に、温度履歴を図 12 及び図 13 に、 温度分布を図 14 に示す。処分孔中心間距離を 4.44m とし、隣接処分坑道の影響が無視できる場合には、緩衝材の最高温度が 78.7℃で、制限温度を下回った。

表 7 概念設計当初案 OP-2(処分孔数の増大)の解析結果(処分孔中心間距離:4.44m、処分

出力点	最高温度 [℃]	発生時刻 [年]
緩衝材1	78.7	8.0
緩衝材 2	78.7	8.0
緩衝材3	58.7	14.0
緩衝材4	59.1	14.0
緩衝材 5	77.9	8.0
緩衝材 6	76.8	9.0
緩衝材7	57.4	15.0
緩衝材8	56.3	16.0
緩衝材9	75.8	8.0
緩衝材 10	76.0	8.0
緩衝材 11	55.4	16.0
緩衝材 12	56.6	15.0
緩衝材 13	74.0	9.0
緩衝材 14	75.1	9.0
緩衝材 15	53.7	17.0
緩衝材 16	55.7	16.0
緩衝材 17	75.9	8.0
緩衝材 18	56.5	15.0





図 12 概念設計当初案 OP-2(処分孔数の増大)のの鉛直処分孔緩衝材温度履歴(処分孔中心 間距離:4.44m、処分坑道中心間距離:100m)



図 13 概念設計当初案 OP-2(処分孔数の増大)の水平処分孔緩衝材温度履歴(処分孔中心間 距離:4.44m、処分坑道中心間距離:100m)



 図 14 概念設計当初案 OP-2(処分孔数の増大)の緩衝材温度分布(処分孔中心間距離: 4.44m、処分坑道中心間距離:100m)

次に、隣接処分坑道の影響を考慮した場合として、レファレンス概念の2倍に相当する24.0m とした場合とレファレンス概念の 1.5 倍に相当する 18.0m とした場合の解析を実施した。解析結 果を表 8、表 9、及び図 15~図 20 に示す。処分坑道中心間距離を 24m 確保することで、緩衝 材最高温度を100℃未満に抑制することが可能となる。

表 8 概念設計当初案 OP-2(処分孔数の増大)の解析結果(処分孔中心間距離: 4.44m、処分

出力点	最高温度 [℃]	発生時刻 [年]
緩衝材1	90.7	30.0
緩衝材 2	90.7	30.0
緩衝材 3	77.7	40.0
緩衝材 4	77.9	40.0
緩衝材 5	90.2	30.0
緩衝材 6	89.4	30.0
緩衝材 7	77.0	40.0
緩衝材 8	75.9	40.0
緩衝材 9	89.4	30.0
緩衝材 10	89.5	30.0
緩衝材 11	76.1	40.0
緩衝材 12	77.1	40.0
緩衝材 13	88.3	30.0
緩衝材 14	88.9	30.0
緩衝材 15	75.5	40.0
緩衝材 16	76.0	40.0
緩衝材 17	89.5	30.0
緩衝材 18	76.9	40.0

坑道中心間距離:24.0m)



図 15 概念設計当初案 OP-2 (処分孔数の増大)の鉛直処分孔緩衝材温度履歴(処分孔中心間 距離:4.44m、処分坑道中心間距離:24.0m)



図 16 概念設計当初案 OP-2(処分孔数の増大)の水平処分孔緩衝材温度履歴(処分孔中心間 距離:4.44m、処分坑道中心間距離:24.0m)



図 17 概念設計当初案 OP-2(処分孔数の増大)の緩衝材温度分布(処分孔中心間距離: 4.44m、処分坑道中心間距離:24.0m)

# 表 9 概念設計当初案 OP-2(処分孔数の増大)の解析結果(処分孔中心間距離:4.44m、処分

出力点	最高温度 [℃]	発生時刻 [年]
緩衝材1	103.4	30.0
緩衝材 2	103.4	30.0
緩衝材3	91.3	40.0
緩衝材 4	91.4	40.0
緩衝材5	102.9	30.0
緩衝材6	102.0	30.0
緩衝材 7	90.6	40.0
緩衝材 8	89.2	40.0
緩衝材 9	102.9	30.0
緩衝材 10	103.1	30.0
緩衝材 11	90.1	40.0
緩衝材 12	91.3	40.0
緩衝材 13	101.9	30.0
緩衝材 14	102.3	30.0
緩衝材 15	90.2	40.0
緩衝材 16	89.7	40.0
緩衝材 17	103.0	30.0
緩衝材 18	91.0	40.0





図 18 概念設計当初案 OP-2(処分孔数の増大)の鉛直処分孔緩衝材温度履歴(処分孔中心間 距離: 4.44m、処分坑道中心間距離: 18.0m)



図 19 概念設計当初案 OP-2(処分孔数の増大)の水平処分孔緩衝材温度履歴(処分孔中心間 距離:4.44m、処分坑道中心間距離:18.0m)



図 20 概念設計当初案 OP-2(処分孔数の増大)の緩衝材温度分布(処分孔中心間距離: 4.44m、処分坑道中心間距離: 18.0m)

以上の解析結果を一覧表にまとめて表 10 に示す。

			HEALT OF G
処分孔中心間距離	隣接処分坑道との	緩衝材最高温度	緩衝材最高温度
(m)	中心間距離(m)	(°C)	発生時刻(年)
2.38m	100**	101.3	10
4.44m	100**	78.7	8
4.44m	24	90.7	30
4.44m	18	103.4	30

表 10 概念設計当初案 OP-2(処分孔数の増大)の解析結果のまとめ

్

隣接処分坑道との中心間距離を 100m としたケースは、隣接処分坑道からの熱影響が 無視できるほどに離隔が確保されている状態として設定した

#### 2.2.3 概念設計当初案 OP-3

平面的なモデル化範囲は、第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999)のモデル化を踏 襲して、平面的な廃棄体専有面積の1/4範囲とした。ただし、隣接処分坑道の影響が無視できる 程度に処分坑道中心間距離が確保されている場合を想定するため、処分坑道中心から50m程度 までをモデル化した。処分孔中心間距離は、処分孔が接する2.38mとしてモデル化し、解析結果 に応じて変更した。

鉛直方向のモデル化範囲は、地表面から深度 700m までとした。

概念設計当初案 OP-3 の仕様のうち、緩衝材最高温度への影響が小さいと考えられる以下の部 位は、モデル簡略化による解析負荷低減のため、モデル化を省略した。

・オーバーパック間に配置するスペーサーの鋼殻(スペーサー内に充填する埋め戻し材としてモデル化した)

オーバーパックと緩衝材の縁切り部材 (ライナープレート)、オーバーパックと縁切り部材間の 隙間(空気、セラミックランナー)については、ライナープレートには表 1 の「炭素鋼」、隙間 には「空気」の物性値をそれぞれ適用した。

解析モデルを図 21 に示す。



図 21 概念設計当初案 OP-3 (孔への複数定置)のの熱伝導解析モデル

解析結果のうち、緩衝材代表点における最高温度を表 11 に、温度履歴を図 22 に、温度分布 を図 23 に示す。処分孔中心間距離を処分孔が接する 2.38m とした場合は、隣接処分坑道の影響 が無視できるほど離隔を確保しても緩衝材の最高温度が 133.5℃と大きく制限温度を上回った。

出力点	最高温度 [℃]	発生時刻 [年]
緩衝材1	133.4	12.0
緩衝材 2	133.5	12.0
緩衝材3	115.3	15.0
緩衝材 4	118.3	14.0
緩衝材 5	122.0	13.0
緩衝材6	119.1	14.0

表 11 概念設計当初案 OP-3(孔への複数定置)の解析結果(処分孔中心間距離:2.38m、処分 坑道中心間距離:100m)



図 22 概念設計当初案 OP-3(孔への複数定置)の緩衝材温度履歴(処分孔中心間距離: 2.38m、処分坑道中心間距離:100m)



図 23 概念設計当初案 OP-3(孔への複数定置)の緩衝材温度分布(処分孔中心間距離:
2.38m、処分坑道中心間距離:100m)

次に、処分孔中心間距離をレファレンス概念の処分孔径 d に対して 2d に相当する 4.44m とした。解析結果のうち、緩衝材代表点における最高温度を表 12 に、温度履歴を図 24 に、温度分 布を図 25 に示す。処分孔中心間距離を 4.44m とし、隣接処分坑道の影響が無視できる場合には、 緩衝材の最高温度が 94.9℃で、制限温度を下回った。

表 12 概念設計当初案 OP-3(孔への複数定置)の解析結果(処分孔中心間距離:4.44m、処 分坑道中心間距離:100m)

出力点	最高温度 [℃]	発生時刻 [年]
緩衝材1	94.9	11.0
緩衝材 2	94.9	11.0
緩衝材3	77.2	15.0
緩衝材 4	78.1	14.0
緩衝材5	88.0	11.0
緩衝材 6	863	12.0



図 24 概念設計当初案 OP-3(孔への複数定置)の緩衝材温度履歴(処分孔中心間距離: 4.44m、処分坑道中心間距離:100m)



図 25 概念設計当初案 OP-3(孔への複数定置)の緩衝材温度分布(処分孔中心間距離: 4.44m、処分坑道中心間距離:100m)

次に、隣接処分坑道の影響を考慮した場合として、上述した解析ケースで岩盤が廃棄体の発熱 影響を受ける範囲を参考に、レファレンス概念の4倍に相当する48.0mとした場合の解析を実施 した。解析結果を表 13、図 26、及び図 27に示す。処分坑道中心間距離を48.0m 確保すること で、緩衝材最高温度を100℃未満に抑制することが可能となる。

表 13 概念設計当初案 OP-3(孔への複数定置)の解析結果(処分孔中心間距離:4.44m、処 分坑道中心間距離:48.0m)

出力点	最高温度 [℃]	発生時刻 [年]
緩衝材1	96.1	14.0
緩衝材 2	96.1	14.0
緩衝材3	80.3	30.0
緩衝材 4	80.9	22.0
緩衝材 5	89.4	16.0
緩衝材6	87.9	17.0



図 26 概念設計当初案 OP-3(孔への複数定置)の緩衝材温度履歴(処分孔中心間距離: 4.44m、処分坑道中心間距離:48.0m)



図 27 概念設計当初案 OP-3(孔への複数定置)の緩衝材温度分布(処分孔中心間距離: 4.44m、処分坑道中心間距離:48.0m)

以上の解析結果を一覧表にまとめて表 14 に示す。表 14 に示した隣接処分坑道との中心間距 離が 48m のケースにおいて、最上段および最下段のオーバーパック付近の緩衝材温度は 90℃程 度である(出力点:緩衝材 5、6)一方、3 段目のオーバーパック付近の緩衝材温度は 96℃程度と 制限温度をわずかに下回る程度である。したがって、さらに処分坑道を短尺化する方策(処分孔 数の増大や複数のガラス固化体封入)を組み合わせた場合には、緩衝材温度が制限温度を超える ことが想定される。

			AHAIT STELL
処分孔中心間距離	隣接処分坑道との	緩衝材最高温度	緩衝材最高温度
(m)	中心間距離(m)	(°C)	発生時刻(年)
2.38m	100*	133.5	12
4.44m	100*	94.9	11
4.44m	48	96.1	14

表 14 概念設計当初案 OP-3 (孔への複数定置)の解析結果のまとめ

※ 隣接処分坑道との中心間距離を 100m としたケースは、隣接処分坑道からの熱影響が無 視できるほどに離隔が確保されている状態として設定した

#### 2.2.4 概念設計当初案 OP-4

平面的なモデル化範囲は、第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999)のモデル化を踏 襲して、平面的な廃棄体専有面積の1/4範囲とした。ただし、隣接処分坑道の影響が無視できる 程度に処分坑道中心間距離が確保されている場合を想定するため、処分坑道中心から50m程度 までをモデル化した。処分孔中心間距離は、処分孔が接する2.38mとしてモデル化し、解析結果 に応じて変更した。

鉛直方向のモデル化範囲は、地表面から深度700mまでとした。

概念設計当初案 OP-4 の仕様のうち、緩衝材最高温度への影響が小さいと考えられる以下の部 位は、モデル簡略化による解析負荷低減のため、モデル化を省略した。

・処分孔孔壁の支保および止水を目的としたライナープレート(ライナープレートの部分は 岩盤としてモデル化した)

オーバーパックと緩衝材の縁切り部材 (ライナープレート)、オーバーパックと縁切り部材間の 隙間(空気、セラミックランナー)については、ライナープレートには表 1 の「炭素鋼」、隙間 には「空気」の物性値をそれぞれ適用した。

解析モデルを図 28 に示す。



図 28 概念設計当初案 OP-4 (複数のガラス固化体封入)の熱伝導解析モデル

解析結果のうち、緩衝材代表点における最高温度を表 15 に、温度履歴を図 29 に、温度分布 を図 30 に示す。処分孔中心間距離を処分孔が接する 2.38m とした場合は、隣接処分坑道の影響 が無視できるほど離隔を確保しても緩衝材の最高温度が 108.6℃で制限温度を上回った。

出力点	最高温度 [℃]	発生時刻 [年]
緩衝材1	108.5	7.0
緩衝材 2	108.6	7.0
緩衝材 3	79.7	10.0
緩衝材 4	83.5	10.0
緩衝材 5	104.5	7.0
緩衝材 6	103.3	7.0
緩衝材 7	70.9	12.0
緩衝材 8	74.0	12.0

表 15 概念設計当初案 OP-4(複数のガラス固化体封入)の解析結果(処分孔中心間距離: 2.38m、処分坑道中心間距離:100m)



図 29 概念設計当初案 OP-4(複数のガラス固化体封入)の緩衝材温度履歴(処分孔中心間距 離:2.38m、処分坑道中心間距離:100m)



図 30 概念設計当初案 OP-4(複数のガラス固化体封入)の緩衝材温度分布(処分孔中心間距 離:2.38m、処分坑道中心間距離:100m)

次に、処分孔中心間距離をレファレンス概念の処分孔径 d に対して 2d に相当する 4.44m とした。解析結果のうち、緩衝材代表点における最高温度を表 16 に、温度履歴を図 31 に、温度分 布を図 32 に示す。処分孔中心間距離を 4.44m とし、隣接処分坑道の影響が無視できる場合には、 緩衝材の最高温度が 87.4℃で、制限温度を下回った。

表 16	概念設計当初案 OP-4(複数のガラス固化体封入)の解析結果	(処分孔中心間距離:
	4.44m、処分坑道中心間距離:100m)	

出力点	最高温度 [℃]	発生時刻 [年]
緩衝材1	87.4	5.0
緩衝材 2	87.4	5.0
緩衝材 3	58.5	10.0
緩衝材 4	59.3	10.0
緩衝材 5	83.5	5.0
緩衝材 6	82.6	5.0
緩衝材7	52.3	12.0
緩衝材 8	54.7	11.0



図 31 概念設計当初案 OP-4(複数のガラス固化体封入)の緩衝材温度履歴(処分孔中心間距 離:4.44m、処分坑道中心間距離:100m)



図 32 概念設計当初案 OP-4(複数のガラス固化体封入)の緩衝材温度分布(処分孔中心間距 離:4.44m、処分坑道中心間距離:100m)

次に、隣接処分坑道の影響を考慮した場合として、上述した解析ケースで岩盤が廃棄体の発熱 影響を受ける範囲を参考に、レファレンス概念の2倍に相当する24.0mとした場合の解析を実施 した。解析結果を表 17、図 33、及び図 34に示す。処分坑道中心間距離を24.0m 確保すること で、処分孔中心間距離を広げることなく緩衝材最高温度を100℃未満に抑制することが可能とな る。

出力点	最高温度 [℃]	発生時刻 [年]
緩衝材1	90.5	11.0
緩衝材 2	90.5	11.0
緩衝材 3	67.5	30.0
緩衝材 4	68.1	30.0
緩衝材 5	87.1	12.0
緩衝材 6	86.3	12.0
緩衝材 7	63.3	40.0
緩衝材 8	64.8	40.0

表 17 概念設計当初案 OP-4(複数のガラス固化体封入)の解析結果(処分孔中心間距離: 4.44m、処分坑道中心間距離:24.0m)



図 33 概念設計当初案 OP-4(複数のガラス固化体封入)の緩衝材温度履歴(処分孔中心間距 離:4.44m、処分坑道中心間距離:24.0m)



図 34 概念設計当初案 OP-4(複数のガラス固化体封入)の緩衝材温度分布(処分孔中心間距 離:4.44m、処分坑道中心間距離:24.0m)

以上の解析結果を一覧表にまとめて表 18 に示す。

表 18	概念設計当初案 OP-4	(複数のガラス固化体封入)	の解析結果のまとめ
------	--------------	---------------	-----------

処分孔中心間距離	隣接処分坑道との	緩衝材最高温度	緩衝材最高温度
(m)	中心間距離(m)	(°C)	発生時刻(年)
2.38m	100**	108.6	7
4.44m	100**	87.4	5
4.44m	24	90.5	11

※隣接処分坑道との中心間距離を100mとしたケースは、隣接処分坑道からの熱影響が無 視できるほどに離隔が確保されている状態として設定した

# 2.3 概念設計当初案の熱影響評価のまとめ

熱伝導解析結果から得られた、緩衝材の制限温度(100℃)を超えない概念設計当初案の仕様例 とガラス固化体1体あたりの処分坑道長さを表 19 に一覧で示す。表より、全ての概念設計当初 案でガラス固化体1体あたりの処分坑道長さがレファレンス概念の 6.66m よりも短尺化できる 見込みがあることが分かる。一方で、処分坑道の中心間距離はレファレンス概念よりも大きくな るが、処分坑道が接続する主要坑道の本数は処分坑道の本数に比べて少ないため、レイアウトを 考慮すると全体の坑道長は短尺化できると考えられる。

表 19 緩衝材制限温度(100℃)を超えない概念設計当初案の仕様例とガラス固化体1体あた りの処分坑道長さ

	一断面	処分孔	処分坑道	经活开	ガラス固化体
抓入乳乳光如安	あたりの	中心間	中心間	被倒材 最高温度	1 体あたりの
城心政計目忉条	ガラス固化体	距離	距離		処分坑道長さ
	定置数	(m)	(m)	$(\mathbf{C})$	(m)
OP-1(処分孔間隔	1	0.00	9.4	01.0	0.00
の短縮)	1	2.38	24	81.9	2.38
OP-2(処分孔数の	0	4 4 4	9.4	00.7	1 40
増大)	ð	4.44	24	90.7	C) C) C)   (m) (m)   .9 2.38   0.7 1.48   0.1 0.88
OP-3(孔への複数	~	4 4 4	4.0	06.1	0.00
定置)	G	4.44	48	96.1	0.88
<b>OP-</b> 4(複数のガラ	9	4 4 4	9.4	00 5	0.00
ス固化体封入)	2	4.44	24	90.0	2.22

#### 3. 参考: 第2次取りまとめの再現解析による検証

本検討で用いた熱伝導解析の解析コードやモデルの設定方法に関して、第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999)の再現解析による検証結果を示す。

#### 3.1 解析条件

再現解析の解析対象は、第2次取りまとめの処分孔竪置き方式とし、岩盤は硬岩系岩盤(設置 深度 1000m)とした。また、オーバーパックと緩衝材間および緩衝材と岩盤間の空間をモデル化 していない「均一化モデル」を対象とした。

ガラス固化体発熱量の時間的変化は、第2次取りまとめの発熱特性を用いた。 人工バリア、岩盤等の物性値は第2次取りまとめで示された値を用いた。

#### 3.2 解析モデル

解析モデルは第2次取りまとめと同様の考え方で構築した。再現解析の解析モデルのうち、処 分坑道付近の拡大図を図 35 に示す。タイムステップは、試解析により時間的・空間的な振動が 生じていないことを確認して設定した。



図 35 再現解析の解析モデル(処分坑道付近拡大図)

#### 3.3 解析結果

解析結果のうち、第2次取りまとめにおける温度出力位置における温度時刻歴を図 36 に、各 出力位置における最高温度の比較を表 20 に示す。 温度時刻歴の傾向は、最高上昇温度出現前後(1年~100年)において第2次取りまとめとよい一致を示している。緩衝材(出力点「C」シリーズ)の最高上昇温度については、いずれの出力点においても再現解析と第2次取りまとめの差が1℃程度であり、よい一致を示している。なお、 再現解析の方が最高上昇温度を高めに評価しており、やや保守的な評価となっている。



図 36 再現解析結果の温度時刻歴

出力点	第二次と りまとめ	再現解析	差	
А	114.7	112.2	-2.5	
Bxin	0.80	00.2	+1.3	
Bxout	90.0	99.5		
Byin	0.80	00 3	+1.3	
Byout	70.0	)).5	+1.5	
Cxin	07 7	99.0	+1.3	
Cxout	)1.1			
Cyin	07.7	00.0	+1.3	
Cyout	91.1	99.0		
Cz1	96.9	98.1	+1.2	
Cz2	97.0	98.2	+1.2	
Dxin	01.7	83.3	+1.6	
Dxout	01./			
Dyin	82.0	92.6	+1.6	
Dyout	02.0	03.0		
Dz1	81.0	82.4	+1.4	
Dz2	79.5	80.8	1.4	
			単位:[℃]	

表 20 最高温度の比較

第2次取りまとめに示された温度コンター図と同時刻(廃棄体定置後20年)の緩衝材温度コンター図を図37に示す。再現解析における温度分布や等温線の傾向は、第2次取りまとめの結果とよい一致を示している。



図 37 再現解析結果の温度コンター図

# 3.4 再現解析のまとめ

熱伝導解析におけるタイムステップやメッシュサイズの設定に関して、第2次取りまとめ(処 分孔竪置き方式)の再現解析及び結果比較による検証を実施し、以下の結果を得た。

- ・温度時刻歴カーブの傾向は、最高上昇温度出現前後(1年~100年)において第2次取り まとめとよい一致を示した。
- ・緩衝材の最高上昇温度については、再現解析と第2次取りまとめの差が1℃程度であり、 よい一致を示した。なお、再現解析の方が最高上昇温度を高めに評価しており、やや保守 的な評価となった。
- ・緩衝材の温度分布について、温度分布のレンジや等温線の傾向は、第2次取りまとめの結果とよい一致を示した。
- 以上より、今回設定したタイムステップやメッシュサイズの設定が妥当であると判断した。

#### 参考文献

電気事業連合会,核燃料サイクル開発機構,TRU 廃棄物処分技術検討書一第2次TRU 廃棄物処 分研究開発取りまとめー,JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005.

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.

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一地層 処分研究開発第2次取りまとめ一,分冊2 地層処分の工学技術,JNC TN1400 99-022, 1999.

竹ケ原竜大,高尾肇,佐藤由子,和田英孝,荒岡邦明,中嶋幸房,幾世橋広,植田浩義,木元崇宏, すきま充填材としてのベントナイト特性に関する研究(その2)ーすきま充填材の熱物性評価 -,土木学会第55回年次学術講演会講演概要集,CS-190,2000. 付属書 3-4 オーバーパックを回収の対象物の最小モ ジュールとした代替設計オプション概念設計案の検討

## 1. はじめに

熱影響評価による成立性及び設計・施工の実現性の評価結果を踏まえ、概念設計当初案を修正 した概念設計案を示す。

#### 2. 概念設計案の構築

#### 2.1 概念設計案 OP-1

概念設計修正案 OP-1 を修正した概念設計案 OP-1 を図 1 に示す。処分孔孔壁の支保部材に止水性を付与する場合、深度相当の静水圧に耐える構造強度が必要となるため、部材厚をオーバーパックと同等程度に増厚し、蓋を有する構造とした。また、施工性を考慮して、処分孔間に 50cm 程度の離隔を設けることとした。



図 1 概念設計案 OP-1 (処分孔間隔の短縮)

## 2.2 概念設計案 OP-2

概念設計修正案 OP-2 を修正した概念設計案 OP-2 を図 2 に示す。処分孔孔壁の支保部材に止 水性を付与する場合、深度相当の静水圧に耐える構造強度が必要となるため、部材厚をオーバー パックと同等程度に増厚し、蓋を有する構造とした。



図 2 概念設計案 OP-2 (処分孔数の増大)

平面図

#### 2.3 概念設計案 OP-3

概念設計修正案 OP-3 を修正した概念設計案 OP-3 を図 3 に示す。処分孔孔壁の支保部材に止水性を付与する場合、深度相当の静水圧に耐える構造強度が必要となるため、部材厚をオーバーパックと同等程度に増厚し、蓋を有する構造とした。



図 3 概念設計案 OP-3 (孔への複数定置)

## 2.4 概念設計当初案 OP-4

概念設計修正案 OP-4 を修正した概念設計案 OP-4 を図 4 に示す。処分孔孔壁の支保部材に止 水性を付与する場合、深度相当の静水圧に耐える構造強度が必要となるため、部材厚をオーバー パックと同等程度に増厚し、蓋を有する構造とした。





図 4 概念設計案 OP-4 (複数のガラス固化体封入)
## 付属書 3-5 PEMを回収の対象物の最小モジュール とした代替設計オプション概要案

### 1. はじめに

着目した工学的方策を基軸にして構築した二種の概要案のイメージ及び特徴を整理して記述す る。一つは、隙間充填材の除去作業量を低減する"方策 A 隙間充填を必要としない処分孔定置"、 及び坑道の再掘削作業量を低減する"方策 D 坑道の短尺化"を基軸とする"隙間充填を必要とし ない処分孔定置概念"である。もう一つは、"方策 I 複数の廃棄体を格納する P E M容器の採用"、 及び"方策 B 大断面坑道への定置"を基軸とする"大型モジュール大断面坑道定置概念"であ る。以下、"隙間充填を必要としない処分孔定置概念"には概要案 PEM-1、"大型モジュール大断 面坑道定置概念"には概要案 PEM-2 と略称を付けて呼ぶ。

概要案 PEM-1 及び PEM-2 に第3章の表 3.3-1 に示す工学的方策のうち組み合わせ可能なもの を組み込んだ。概要案 PEM-1、PEM-2 はどちらも多くの工学的方策を組み合せることが可能で あり、多くのバリエーションが展開される。なお、工学的方策の組み合わせの可否は H31 年度に 整理した成果(原子力環境整備促進・資金管理センター, 2020)を参照した。

### 2. 概要案の抽出

### 2.1 概要案 PEM-1

概要案 PEM-1 "隙間充填を必要としない処分孔定置概念"に組み込み可能な表 1 の方策を集 約させることで回収容易性を高める代替設計オプション概要案を構築した。

No.	工学的方策の具体的な内容	除外理由
А.	隙間充填を必要としない円形小断面坑道定置	
В.	大断面坑道での定置	A と相反
С.	PEM による緩衝材とオーバーパックの一体型回収	
D.	(PEM 回収の場合、該当なし)	
Е.	定置坑道の短尺化	
F.	撤去容易なプラグの採用	
F'.	除去が容易な隙間充填材の適用	A と相反
G.	高耐久性支保工等の適用	
H.	アタッチメントタイプの支保材導入	A と相反
I.	複数の廃棄体を格納する PEM 容器の採用	
J.	小断面坑道に複数の廃棄体を定置	
К.	オーバーパックの軽量化	
L.	緩衝材の軽量化	
М.	PEMの軽量化(※結果的にKとLを包含する。)	
N.	矩形 PEM の採用	A と相反
0.	止水機能を有する支保工の採用	
Ρ.	PEM容器の耐腐食性材料の採用	A と相反
Q.	PEM 容器の厚さを増加	
R.	大断面坑道に廃棄体の集中定置	
S.	回収動作が単純な定置方式と装置の採用	
Τ.	動作と動線とが単純な定置坑道レイアウト	
U.	大断面作業坑道と小断面定置坑道の組み合わせ	

表 1 概要案 PEM-1 に組み込んだ工学的方策

その概要は次のように記述できる。

隙間充填を必要としない短尺の処分孔 [A、E] と大断面作業坑道を組み合わせ [R]、処分孔 に軽量化した PEM [C、L] を複数定置し [J]、端面には作業坑道埋め戻しによる埋め戻し材 浸入抑制のための撤去が容易なプラグを設置する [F]。処分孔は、回収維持期間中は止水性を 有する [O] 高耐久性支保工(ケーシング) [G] で健全性を維持し、孔の補強により作業坑道 も短尺化 [E] する。PEM には複数のガラス固化体を収納し(複数定置のオプション) [I]、 長期の耐久性を維持するために耐腐食性 [P]、あるいは容器の厚さを厚くした [Q] 容器を用 いる。大断面作業坑道に回収装置を定置し、一度の回収装置定置で複数の PEM を単純な動作 と動線で回収し [U]、物流と動線を考慮した定置坑道のレイアウト [T] により効率よく搬出 する。

代替設計オプション概要案 PEM-1 を構成する方策のイメージは図 1のように図化することができる。





概要案 PEM-1 から、処分孔を配置する方向を水平方向、鉛直方向、及びそれらの組み合わせ とすることにより、以下に示す概要案のバリエーションを構築することができる。

○PEM-1H:水平処分孔定置のバリエーション

作業坑道から水平方向に隙間充填を必要としない処分孔を配置し、それぞれ左右に PEM を 1 体ずつ定置する形態を"基本形態 PEM-1H0"とし、複数の PEM を定置した場合(バリエーション 1:PEM-1H1)、水平坑道を斜孔とし複数の PEM を定置した場合(バリエーション 2: PEM-1H2)の二つのバリエーションを構築した。



**基本形態PEM-1HO** 作業坑道から隙間充填を必要としない処分孔を ケーシングを用いて建設し、ケーシング内にPEMを 1体定置する。定置には自走式プッシングマシン、

回収はプルマシンでケーシングから引っ張り出す。



バリエーション1 PEM-1H1

隙間充填を必要としない処分孔を水平2方向に設置し、ケーシング内部に 複数のPEMを定置。定置時には自走式プッシングマシン、回収時にはプルマ シンを使用し、横孔から引き出す。



### バリエーション2 PEM-1H2

隙間充填を必要としない処分孔を斜め2方向に設置し、ケーシング内部に 複数のPEMを定置。定置・回収とも同じ装置を適用する。装置はPEMの 自重を活用し、回収時には把持装置でPEM頂部を把持したプルマシンで 引き上げられる。

図 2 水平処分孔定置の概要案 PEM-1H のバリエーション

○**PEM-1V**: 鉛直処分孔定置のバリエーション

作業坑道から鉛直方向に隙間充填を必要としない処分孔を配置し、PEM を 1 体定置する形態 を"基本形態 PEM-1V0"とし、複数の PEM を定置した場合(バリエーション1:PEM-1V1)、 大断面作業坑道から鉛直処分孔を複数建設して複数の PEM を定置した場合(バリエーション2: PEM-1V2)の二つのバリエーションを構築した。



図 3 鉛直処分孔定置の概要案 PEM-1V のバリエーション

○PEM-1HV: 水平処分孔定置と鉛直処分孔定置の組み合わせのバリエーション

作業坑道から水平と鉛直方向に処分孔を配置して PEM を 1 体ずつ定置する形態を"基本形態 PEM-1HV0"とし、複数の PEM を定置した場合(バリエーション 1: PEM-1HV1)、処分孔を 斜めに配置し複数の PEM を定置した場合(バリエーション 2: PEM-1HV2)の二つのバリエー ションを構築した。



図 4 水平処分孔定置と鉛直(斜め)処分孔定置の概要案 1HV のバリエーション

### 2.2 概要案 PEM-2

概要案 PEM-2 "大型モジュール大断面坑道定置概念"に組み込み可能な表 2 の方策を集約させることで回収容易性を高める代替設計オプション概要案を構築できる。

No.	工学的方策の具体的な内容	除外理由
Α.	隙間充填を必要としない円形小断面坑道定置	Bと相反
В.	大断面坑道での定置	
С.	PEM による緩衝材とオーバーパックの一体型回収	
D.	(PEM 回収の場合、該当なし)	
Е.	定置坑道の短尺化	
F.	撤去容易なプラグの採用	
F'.	除去が容易な隙間充填材の適用	
G.	高耐久性支保工等の適用	
Н.	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 PEM 容器の採用	
J.	小断面坑道に複数の廃棄体を定置	
К.	オーバーパックの軽量化	
L.	緩衝材の軽量化	
М.	PEMの軽量化(※結果的にKとLを包含する。)	
Ν.	矩形 PEM の採用	
0.	止水機能を有する支保工の採用	
Ρ.	PEM 容器の耐腐食性材料の採用	
Q.	PEM 容器の厚さを増加	
R.	大断面坑道に廃棄体の集中定置	
S.	回収動作が単純な定置方式と装置の採用	
Τ.	動作と動線とが単純な定置坑道レイアウト	
U.	大断面作業坑道と小断面定置坑道の組み合わせ	

表 2 概要案 PEM-2 に組み込んだ工学的方策

その概要は次のように文書で記述できる。

上部のみ撤去容易な材料で埋め戻した [F'] 短尺大断面坑道 [B、E] にガラス固化体を複数収 納して [I] 軽量化 [L] した矩形 PEM [C、N] を集中定置し [R]、坑道端部には撤去容易 な力学(鋼製) プラグを設置する [F]。矩形 PEM 容器には耐腐食材料 [P] あるいは容器の 厚さを厚くする [Q] ことで回収期間中の健全性を確保する。また、大断面坑道には高耐久性 [G] があり止水機能を有する支保材 [O] を適用する。PEM は回収動作と動線が単純となる 装置(フォークリフト等)で回収し [S]、回収した PEM の搬出は、物流と動線を単純化した レイアウト [T] を考慮することで効率性を向上させる。

代替設計オプション概要案 PEM-2 を構成する方策のイメージは図 5 のように図化することができる。



短尺大断面坑道上部に撤去し易いベントナイトペレット埋め戻し



複数ガラス固化体を収納した軽量化矩形PEMの例



短尺大断面坑道に軸直角方向に横置き定置された矩形PEMを可 動性の高い遠隔操縦のフォークリフトで単純な動作で効率良く回収



大断面坑道並列型レイアウト 二方向からのアクセスにより回収されたPEM は方向を変えず二方向に2体づつ搬出

図 5 概要案 PEM-2 の構成要素のイメージ

概要案 PEM-2 から、以下に示す概要案のバリエーションを構築することができる。

○PEM-2: 大型モジュール大断面坑道定置概念のバリエーション

大断面坑道に PEM を集中定置させる概念として、坑道に竪置きに PEM を順次定置し、その 周辺をベントナイトペレットで充填する形態を"基本形態 PEM-20"として、大断面坑道内に建 設した人工岩盤内に設置したケーシング内に複数の PEM を定置する概念(バリエーション1: PEM-21)、大断面坑道内に複数のガラス固化体を格納した矩形 PEM を坑道直角方向に横置き定 置する概念(バリエーション2: PEM-22)の二つのバリエーションを構築した。



### 基本形態 PEM-20

大断面坑道内にPEMを集中定置する概念。定置・回収には天井 クレーンを用い、吊り上げた状態で坑口まで移動させる。回収した PEMは坑道内で台車に乗せ坑口まで搬出する方法も考えられる。



### バリエーション1 PEM-21

短尺大断面坑道に掘削ずりから作成した人工岩盤とケーシングの定置孔を設置し、その内部に PEMを複数定置する。定置・回収は天井クレーンを用いて行い、坑口まで搬出、あるいは坑道 内で積替し搬出する。



### バリエーション2 PEM-22

短尺大断面坑道軸直角方向に、ガラス固化体を複数格納した矩形PEMを横置き定置する。 定置・回収は遠隔フォークリフトを用いる。

図 6 大型モジュール大断面坑道定置概念の概要案 PEM-2 のバリエーション

### 2.3 概要案 PEM-1 と概要案 PEM-2 の組み合わせによる代替設計オプションの概要案

概要案 PEM-1 "隙間充填を必要としない処分孔定置概念"と概要案 PEM-2 "大型モジュール 大断面坑道定置概念"を組み併せて概要案を構築することもできる。この概要案のイメージは図 7 のように図化することができる。



図 7 概要案 PEM-1 と PEM-2 を組み合わせたイメージ

隙間充填を必要としない左右・上下・斜めに配置した処分孔に複数の PEM を定置する概念と 大断面坑道を作業坑道として活用したのち、坑道内に複数のガラス固化体を格納した矩形 PEM を横置き定置する概念とを組み合わせた定置方式のバリエーションは以下の図のようになる。



図 8 概要案 PEM-1 と PEM-2 を組み合わせた概要案

### 3. 概要案のまとめ

PEM を回収の対象物の最小モジュールとした代替設計オプションの概要案は、バリエーションを含めて表 3 に整理することができる。この中から代替設計オプションの概念設計案として以降で検討対象とする案を選定し、概念設計当初案を設定した。

表において選定した概要案を○印で示し、薄黄色で色付けした。「▲」は容易性向上の程度が他 のバリエーションに比較して小さいと考え、今回の検討対象としては取り扱わないこととした。 また「△」は、「○」の概要案の熱解析結果と前年度実施した解析結果をもとに推定することがで きる概要案であると考えた。

定置方式	代替設計オプションの概要案	選定 結果	選定理由
PEM-1H: 水平処分孔	PEM-1H0:水平処分孔単体 PEM 横置き定置方式		容易性向上の程度が 小さい
	PEM-1H1:水平処分孔複数 PEM 横置き定置方式	$\bigtriangleup$	PEM-1V1 から推定 可能
	PEM-1H2 : 斜め処分孔複数 PEM 定置方式	$\bigtriangleup$	PEM-1V1 から推定 可能
	PEM-1V0:鉛直処分孔単体 PEM 竪置き定置方式		容易性向上の程度が 小さい
PEM-1V: 鉛直処分孔 定置	PEM-1V1:鉛直処分孔複数 PEM 竪置き定置方式	0	概念設計案の検討対 象
	PEM-1V2 : 鉛直複数処分孔複数 PEM 竪置き定置 方式	$\bigtriangleup$	PEM-1V1 から推定 可能
PEM-1HV :	PEM-1HV0:水平・鉛直処分孔単体 PEM 定置方式		容易性向上の程度が 小さい
水平方向と 鉛直方向の	PEM-1HV1:水平・鉛直処分孔複数 PEM 定置方式	$\bigtriangleup$	PEM-1V1 から推定 可能
組み合わせ	PEM-1HV2 : 斜・鉛直処分孔複数 PEM 定置方式	$\bigtriangleup$	PEM-1V1 から推定 可能
PEM-2	PEM-20:大断面坑道単体 PEM 定置方式		容易性向上の程度が 小さい
大型モジュ ール大断面	PEM-21:大断面坑道複数 PEM 竪置き定置方式	$\bigtriangleup$	PEM-1V1 から推定 可能
坑道定置	PEM-22:大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式	0	概念設計案の検討対 象
PEM-3: PEM-1 と	PEM-31: PEM-1H1 と PEM-22 との組み合わせ	$\bigtriangleup$	PEM-1V1、PEM-22 から推定可能
<b>PEM-2</b> との 組み合わせ	PEM-32: PEM-1H2、PEM-1V2、PEM-22の組み 合わせ	$\bigtriangleup$	PEM-1V1、PEM-22 から推定可能

表 3 代替設計オプションの概要案と概念設計案検討対象の選定

以上より、概要案 PEM-1V1 "鉛直処分孔複数 PEM 竪置き定置方式"および概要案 PEM-22 "大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式"の二つを具体化して、代替設計オプ ション概念設計当初案として検討を進めることとした。

### 参考文献

原子力環境整備促進・資金管理センター,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 報告書, 2020.

## 付属書 3-6 PEMを回収の対象物の最小モジュール とした代替設計オプション概念設計当初案の検討

### 1. はじめに

構築した代替設計オプションの概要案 PEM-1V1 "鉛直処分孔複数 PEM 竪置き定置方式"および概要案 PEM-22 "大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式"を具体化し、概 念設計当初案を構築した。

### 2. 概念設計当初案の構築

### 2.1 概念設計当初案 PEM-1V1 "鉛直処分孔複数 PEM 竪置き定置方式"

概念設計当初案 PEM-1V1 "鉛直処分孔複数 PEM 堅置き定置方式"では、高耐久・耐腐食性の 鋼製ケーシングを支保材に用いた隙間充填を必要としない鉛直処分孔に円筒形の PEM を複数 (例として5体を想定)堅置きに定置し、上部に遮蔽用の埋め戻し材を定置している。また、水 密性と耐腐食性を有する PEM 容器は鋼製で、外側には耐久性の高いセラミックランナーと呼ば れるスペーサーを装着して、鋼製ケーシングとの間に隙間が存在している。

PEM の寸法の設定に当たっては、NUMO の包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)の横置き・PEM 方式の PEM の部材寸法を参考にした。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、緩衝材の最小厚さは 700mm、PEM 容器の厚さは 28mm とした。また、オーバーパックの側面と緩衝材の間には、製作の都合上、隙間が 20mm 存在し、それを充填材で埋めるものとした。

PEM が 5 体定置できること、PEM と鋼製ケーシング間に 30mm の隙間を考慮し、最上部の PEM の上に 1m の埋め戻し材があることを考慮して、処分孔の寸法を設定した。鋼製ケーシン グの厚さについては、PEM 容器の厚さと同様に 28mm と設定した。

作業坑道の大きさは、NUMOの包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)の竪置き・ブロック方式の処分坑道を参考にして設定した。作業坑道は維持管理等の容易性向上のために高耐久性の支保を配し、端部には脱着が容易な鋼製プラグを設置する。

回収作業は作業坑道に設置した単純な動作と動線で作動する回収装置を用いて、一回の定置で 複数の PEM を効率よく回収する。処分場レイアウトは物量を考慮した形状と形態とし、作業坑 道には二方向でのアクセスを確保する。

以上で設定した概念設計当初案 PEM-1V1 の仕様を図 1~図 2 に示す。



図 1 概念設計当初案 PEM-1V1 の PEM の仕様設定



図 2 概念設計当初案 PEM-1V1 の仕様設定

### 2.2 概念設計当初案 PEM-22 "大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式"

概念設計当初案 PEM-22 "大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式"では、高耐久性支保工を採用した大断面の定置坑道に、複数(2 体)のオーバーパックを格納した矩形 PEM を横置きに定置し、熱影響の緩和策として緩衝材(例えば、ベントナイトブロック)あるいは埋め戻し材を詰めた容器を交互に定置している。矩形 PEM 容器に耐腐食材料を用いて回収時の健全性を確保する。

矩形 PEM の寸法の設定に当たっては、NUMO の包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環 境整備機構, 2018)の横置き・PEM 方式を参考にした。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 の厚さは 28mm とした。また、オーバーパックの側面と緩衝材の間には、製作の都合上、隙間が 20mm 存在し、それを充填材で埋めるものとした。これにより、矩形 PEM の外観の寸法を 2,316mm×2,316mm×4,916mm と設定した。

大断面の定置坑道は NUMO の包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018) の TRU 等廃棄物処分場の処分坑道を参考にして設定する。この大断面坑道の上部のみ撤去容易 な材料で埋め戻し、坑道端部の定置連絡坑道には解体が容易な鋼製プラグを設置する。また、大 断面坑道には高耐久性の二次覆工を施工する。PEM は回収動作と動線が単純となるフォークリ フトあるいは天井クレーンで定置・回収し、回収した PEM の搬出は、物流と動線を単純化した レイアウトを考慮することで効率性を向上させる。

以上で設定した概念設計当初案 PEM-22 の仕様を図 3~図 4 に示す。



図 3 概念設計当初案 PEM-22 の矩形 PEM の仕様設定



### 参考文献

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.

### 付属書 3-7 PEM と 孔壁との隙間に関する概略検討

### 1. 検討の手順

概念設計案 PEM-1V1 は、高耐久性のケーシングを支保材に用いた隙間充填を必要としない処 分孔に PEM を複数定置することとしており、まずはこの概念設計案の成立性の見通しを得る必 要がある。そこで、PEM の外側に設ける隙間の許容範囲について、製作実績を踏まえた緩衝材の 乾燥密度を考慮して、単位断面あたりの概略検討を行った結果を示す。なお、この概略検討結果 は概要案 PEM-1 の他のバリエーションでも参照できる。

NUMOの包括的技術報告書(原子力発電環境整備機構, 2018)では、緩衝材仕様の検討において 有効粘土密度を指標としており、緩衝材の設計要件を満足する膨潤後の有効粘土密度を示してい る。

それによると、有効粘土密度は砂の体積を除いたベントナイトの乾燥密度を表すもので、次式 で与えられる。

 $\rho_{e} = M_{b} / (V_{b} + V_{a}) = \rho_{d} (1 - R_{s}) / (1 - \rho_{d} R_{s} / \rho_{s}) \cdot \cdot \cdot \vec{\mathfrak{x}}(1)$ 

ここで、 $M_b$  [Mg] はベントナイトの乾燥質量、 $V_b$  [m<sup>3</sup>] はベントナイトの容積、 $V_a$  [m<sup>3</sup>] は 間隙の容積、 $\rho_e$  [Mg/m<sup>3</sup>] は有効粘土密度、 $\rho_d$  [Mg/m<sup>3</sup>] は乾燥密度、 $\rho_s$  [Mg/m<sup>3</sup>] は砂の土 粒子密度、 $R_s$  [·] は乾燥質量での砂の混合率である。

一方で、本検討で PEM の外側に想定する PEM 外面と孔壁との隙間幅を t [m] とすると、この隙間を満たしたときの膨潤後の緩衝材の体積  $V_I$ [m<sup>3</sup>]は tの関数となる。

膨潤後の乾燥密度 ρ d1 [Mg/m<sup>3</sup>] は、t を変化させたときの V1を用いて以下の式で表される。

 $\rho_{d1} = \rho_{d0} \left( V_0 / V_1 \right) \quad \cdot \cdot \cdot \vec{x}(2)$ 

ここで、 ρ do [Mg/m<sup>3</sup>]は製作時の初期乾燥密度、 Vo [m<sup>3</sup>]は製作時の初期緩衝材体積である。 式(2)と式(1)から、膨潤後の有効粘土密度と隙間幅 t との関係を求め、緩衝材の設計要件から求 められる PEM 方式での膨潤後の有効粘土密度の下限との比較により、評価を行った。

### 2. 条件設定

単位断面での概略的な検討として、以下の条件を設定した。

- ・種々の寸法、物性値は包括的技術報告書を参照して設定した。
- オーバーパックと緩衝材の間はペレットで埋められており、ペレットは変化しないこととする。
- ・PEM 容器(鋼殻)は厚さ 28mm として、空間を占有するだけの構成要素とする。ここで は腐食は一旦無視する。
- ・緩衝材は全体が均等に膨潤し、膨潤後の密度分布はないものとする。
- ・PEM 容器(鋼殻)に取り付ける潤滑部品やスペーサーの体積は無視する。

設定した人工バリアの仕様(寸法)および物性値を表 1および表 2に示す。

項目	寸法 (mm)	備考
オーバーパックの外径	820	
オーバーパックと緩衝材の隙間	20	ペレットを充填することとする。
		密度計算時には無視する。
緩衝材の内径	860	
緩衝材の厚さ	700	
PEM 容器の厚さ	28	
PEM の外径	2,316	_

表 1 仕様

表 2 物性値

項目	物性値	備考
ベントナイト土粒子密度	$2.7  [Mg/m^3]$	_
ケイ砂土粒子密度	$2.64  [Mg/m^3]$	—
砂混合率	0.3	—
初期乾燥密度	1.7, 1.8 $[Mg/m^3]$	製作実績を考慮して設定

### 3. 検討結果

検討結果を整理すると図 1 のように表される。図より、緩衝材製作時に乾燥密度 1.8Mg/m<sup>3</sup>で 施工した場合には隙間の幅は 121mm 程度まで、乾燥密度 1.7Mg/m<sup>3</sup>で施工した場合には 91mm 程度までの隙間が許容されると考えられる。ただし、前述したとおり、本検討は概算であるため、 各構成要素の寸法などの見直しなどに合わせてより詳細な検討を行う必要がある。



図 1 隙間に対する膨潤後の有効粘土密度の変化

### 参考文献

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.

# 付属書 3-8 PEMを対象とした代替設計オプション 概念設計当初案に対する熱影響評価(熱伝導解析)

### 1. 熱影響評価の概要

### 1.1 目的

概念設計当初案に対して熱影響評価によるニアフィールドの温度変化を把握し、熱的に成立性 を有する概念設計案を抽出することを目的とする。この熱影響の評価では、作業坑道、処分孔、 および廃棄体の定置間隔、さらに、埋め戻し状態等を変数とする熱伝導解析のパラメトリックス タディを行い、熱的に成立する組合せを求めた。

熱影響評価の対象とする概念設計当初案は、第3章3.3.1 にて設定された PEM-1V1 "鉛直処 分孔複数 PEM 竪置き定置方式"および PEM-22 "大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置 き定置方式"である。

### 1.2 解析手法と方針

解析手法は、第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構,1999)、平成26年度地層処分技術調 査等報告書(原子力環境整備促進・資金管理センター,2015)(以下、「平成26年度報告書」と称す る)、および平成31年度報告書(原子力環境整備促進・資金管理センター,2020)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た。そして、平成26年度報告書、および平 成31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。また、解析コードの検証例 については、既に平成26年度報告書に示されていることから、ここでは、詳細は割愛する。

解析条件や物性値等の設定に関して、NUMOの包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境 整備機構, 2018)に公開されている情報を使用した。ただし、未公開、あるいは別途定める必要が ある場合には、第2次取りまとめ等の既往の文献から設定した。

### 2. 概念設計当初案に対する熱影響評価

### 2.1 解析条件

ここでは、概念設計当初案 PEM-1V1 "鉛直処分孔複数 PEM 竪置き定置方式" および概念設計 当初案 PEM-22 "大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式"において、共通する 解析条件について設定した。

### 2.1.1 ガラス固化体発熱量

ガラス固化体発熱量の時間的変化は、第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999)で使用された中間貯蔵期間 50年の発熱特性を用いた。

### 2.1.2 熱物性値

熱物性値を表 1 に示す。なお、いずれの材料も含水状態に関わらず表 1 の値を用いることと した。ガラス固化体、炭素鋼、緩衝材、埋戻し材、および空気の物性値は、第 2 次取りまとめ(核 燃料サイクル開発機構,1999)で用いられた値を引用した。また、鉄筋コンクリート、および無筋 コンクリートの物性値は第 2 次 TRU レポート(電気事業連合会,2005)で用いられた値を引用し た。充填材はオーバーパックの側面と緩衝材の間の隙間を充填するための材料である。この物性 値は、既往研究(竹ケ原ほか,2005)の実験値のうち、粒状ベントナイト(< \phi 1.7~4.5mm)の径 4.5mm 以下の平均的な値から、熱伝導率、比熱、および密度を 設定した。なお、岩盤については、包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構,2018) の値を引用した。

部位	熱伝導率	比熱 (I-I-I1-IZ-1)	密度	出典
	$(W M^{-1} K^{-1})$	$(KJ Kg^{-1} K^{-1})$	(kg m <sup>-3</sup> )	
ガラス固化体	1.20	0.96	2,800	第2次取りまとめ
炭素鋼 *1	51.6	0.47	7,860	第2次取りまとめ
緩衝材	0.78	0.59	1,712	第2次取りまとめ
埋め戻し材	0.78	0.59	1,712	第2次取りまとめ
鉄筋コンクリート *2	2.56	1.05	2,500	第2次TRU レポート
岩盤	0.9	1 4	0.000	包括的技術報告書(レビ
(新第三紀堆積岩類)	2.0	1.4	2,280	ュー版)
充填材				
(オーパーパックと緩衝	0.30	0.14	1,200	竹ケ原ほか
材の間)				
空気	0.03	1.01	0.9799	第2次取りまとめ
※1 本検討では、オーバーパック、PEM 容器、ケーシングに適用する。				
→※9 筆 9 次 TRU レポートの「支保工」を参昭した 木桧封でけ 如分坑道の支保工に適用する				

表 1 熱物性値一覧

### 2.1.3 廃棄体処分深度

処分深度は、包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)のレファレンス概 念と同様に 500m とした。

### 2.1.4 地温勾配と地表面温度

包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)を参照し、地温勾配を深度方向 に 3℃/100m、地表面温度を 15℃とした。

### 2.1.5 境界条件

第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999)を参照し、解析モデル上下面(水平面)は温度規定境界、解析モデル側面(鉛直面)は断熱境界とした。

操業手順の考慮については、第2次取りまとめと同様に、PEM を定置後すぐに坑道を埋め戻 した状態を対象とすることにした。ただし、熱的に成立しない場合には、坑道を埋め戻さずに開 放した状態を対象とすることにした。開放した状態の場合、坑内の空気と接する面は温度規定境 界とし、規定温度を労働安全衛生規則の基準値から37℃と設定した。

### 2.1.6 解析期間

解析期間は0~1000年とした。

### 2.1.7 制限温度

ニアフィールドの制限温度に関して、包括技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)では、緩衝材に対して100℃以下としている。ここでも同様にして、緩衝材に対して100℃ 以下とした。

### 2.1.8 埋め戻し状態

処分坑道は埋め戻された状態を基本とした。なお、処分坑道が埋め戻されていない状態は、熱 影響を低減するための工夫として必要に応じて考慮した。境界条件の設定方法は 2.1.5 で述べた 通りである。

### 2.2 概念設計当初案に対する熱影響評価

### 2.2.1 概念設計当初案 PEM-1V1 "鉛直処分孔複数 PEM 竪置き定置方式"

### (1) 平面レイアウトの設定

解析モデルの範囲の設定に関連することから、初めに平面レイアウトを設定した。

概念設計当初案 PEM-1V1 "鉛直処分孔複数 PEM 堅置き定置方式"では、鋼製ケーシングを支 保材に用いた隙間充填を必要としない鉛直処分孔に円筒形の PEM を複数(例として5体を想定) 堅置きに定置し、上部に遮蔽用の埋め戻し材を定置している。また、PEM は鋼製で外側にはスペ ーサーを装着して、鋼製ケーシングとの間に隙間が存在している。

PEM の寸法の設定に当たっては、NUMO の包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)の横置き・PEM 方式の PEM の部材寸法を参考にした。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、緩衝材の最小厚さは 700m、PEM 容器の厚さは 28mm とした。なお、回収の容易性を向上させる方策として、「Q

. PEM 容器の厚さを増加」も組み合わせることができることから、PEM 容器の厚さを 28mm よりも厚くすることも考えられる。しかしながら、PEM 容器の材料である炭素鋼は熱伝導率が 大きく、解析モデル上の厚さの設定が、解析結果としての緩衝材の温度分布に大きな影響を与え ないと考えられることから、ここでは、28mm と設定した。また、オーバーパックの側面と緩衝 材の間には、製作の都合上、隙間が 20mm 存在し、それを充填材で埋めるものとした。設定した 円筒形の PEM の寸法を図 1 に示す。



単位:mm

図 1 PEM の寸法

図 1のPEMが5体定置できること、PEMと鋼製ケーシング間に30mmの隙間を考慮し、最 上部のPEMの上に1mの埋め戻し材があることを考慮して、処分孔の寸法を図 2のように設定 した。鋼製ケーシングの厚さについては、PEM容器の厚さと同様に28mmと設定した。PEMと 鋼製ケーシングの隙間は、空気の場合もあれば、水が浸入する場合、あるいは、ベントナイトス ラリーで埋める場合も想定される。ここでは、回収の容易性の向上の検討結果を受けて、鋼製ケ ーシングに水密性を持たせているという条件で空気が存在していると設定した。また、この隙間 を空気とすることで、水やベントナイトスラリーよりも結果的には熱的に厳しくなると想定され る。



作業坑道の大きさは、NUMOの包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)の竪置き・ブロック方式の処分坑道を参考にして、内空を D=5m と設定した。

付属書 3-8-4

作業坑道の中心間離間距離の最小値は、第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999)の 軟岩岩系岩盤の竪置き方式の処分坑道中心間離間距離が13.0mであることと、本検討のレファレ ンス概念である包括的技術報告書レビュー版の新第三紀堆積岩類の竪置き・ブロック方式の処分 坑道中心間離間距離が12.0mであることを参考にして、2.6D(13.0m)と設定した。

また、処分孔の中心間離間距離の最小値については、廃棄体が連なって定置されている様子が 類似している横置き方式から設定することにした。すなわち、第2次取りまとめの軟岩系岩盤の 横置き方式の処分坑道中心間離間距離が9.99mであることと、包括的技術報告書レビュー版の新 第三紀堆積岩類の横置き・PEM 方式の処分坑道中心間離間距離が12.0m であること参考にして、 5.0d(11.9m)と設定した。

さらに、作業坑道の中心間離間距離と、処分孔の中心間離間距離を変数として、パラメトリックスタディを行い、熱的に成立する組合せを求めた。

平面レイアウトのイメージを図3に示す。



図 3 概念設計当初案 PEM-1V1 の平面レイアウトのイメージ

### (2) 解析ケースと解析モデルの設定

作業坑道の中心間離間距離と処分孔の中心間離間距離の組合せと、解析ケースの対応を表 2 に 示す。

解析モデルに関して、水平方向の解析領域は、対称性を考慮することによって、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。また、作業坑道軸方向の解析領域は、処分孔中心 から隣接する処分孔の中間点までとした。

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は、鉛直方向の側面は、現象の対称性を考慮して断熱境界とし

た。地温の初期条件については、地表面と解析モデル底面は、境界条件として初期温度で一定とした。よって、処分深度 500m の初期温度は 30℃、解析モデル底面の境界条件は 36℃としている。

作業坑道の支保工は、NUMOの包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構,2018) を参考にして、厚さ200mmと設定した。また、PEM-1V1には、"方策G. 高耐久性支保工の適 用"も組み込まれている。したがって、作業坑道の支保工には無筋コンクリートではなく、鉄筋 コンクリートが使用されていると設定した。

Case-A1の解析モデルのイメージを図 4 に示す。

作業坑道 処分孔	2.6D (13m)	3.0D (15m)
5.0d (11.9m)	Case-A1	Case-A2
6.0d (14.3m)	Case-A3	—

表 2 中心間離間距離の組合せと解析ケースの対応



図 4 Case-A1の解析モデルのイメージ

また、Case-A1の解析モデルを図 5 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、橙色は埋め戻し材、ピンク色は支保工を示し ている。また、この図では、寸法が小さいために見づらくなっているが、PEM 外殻、鋼製ケーシ ング、PEM と鋼製ケーシングの隙間、充填材もモデル化されている。



(3) 解析結果の出力点

解析結果として緩衝材の温度の時間変化を見るために、その出力点を図 6 に示す。 この図において、出力点の名称を「緩衝材\_○●」の様に示しているが、「○」の数字は、下か ら何段目の PEM であることを示している。また、「●」の「a」はオーバーパック底面中心、「b」 と「c」は側面の中間点、「d」は上面の中心を示している。出力点の名称は、Case-A1 から Case-A3 まで、共通となっている。



図 6 解析結果の出力点

### (4) 解析結果

1) Case-A1

定置された PEM ごとに緩衝材の温度の経時変化を整理した。Case-A1 における緩衝材の温度の経時変化を図 7~図 11 に示す。これらの図において、1 体の PEM に対して 4 つの出力点があるが、同じような値となったために、1 本の線に重なって見えてしまうことに注意されたい。

Case-A1の緩衝材の最高温度は、PEM3 段目において経過時間 17 年のときに、104℃となり、 制限温度を超えることが分かった(図 9 参照)。また、PEM2 段目と 4 段目の緩衝材の温度も制 限温度を超えた(図 8、図 10 参照)。

緩衝材が概ね最高温度となる時間でのニアフィールドの温度分布を図 12 に示す。概ね最高温 度となる時間としているのは、解析時のファイル容量の都合上、全ての要素の全経過時間の温度 データを保存しておらず、あらかじめ指定しておいた経過時間の温度データしか保存していない ためである。この図は経過時間が 20 年のときのものである。なお、経過時間 20 年のときの緩衝 材の最高温度は、PEM3 段目で 103℃であった。



図 7 Case-A1の PEM1 段目における緩衝材の温度の経時変化



図 8 Case-A1の PEM2 段目における緩衝材の温度の経時変化



図 9 Case-A1の PEM3 段目における緩衝材の温度の経時変化



図 10 Case-A1の PEM4 段目における緩衝材の温度の経時変化



図 11 Case-A1の PEM5 段目における緩衝材の温度の経時変化



図 12 Case-A1の緩衝材が概ね最高温度となる時間でのニアフィールドの温度分布

2) Case-A2

Case-A2 における緩衝材の温度の経時変化を図 13~図 17 に示す。 Case-A2 の緩衝材の最高温度は、PEM3 段目において経過時間 15 年のときに、98.9℃となり、 制限温度以下となることが分かった(図 15 参照)。

緩衝材が概ね最高温度となる時間でのニアフィールドの温度分布を図 18 に示す。この図は経 過時間が 20 年のときのものである。なお、経過時間 20 年のときの緩衝材の最高温度は、PEM3 段目で 98.5℃であった。



図 13 Case-A2の PEM1 段目における緩衝材の温度の経時変化


図 14 Case-A2の PEM2 段目における緩衝材の温度の経時変化



図 15 Case-A2の PEM3 段目における緩衝材の温度の経時変化



図 16 Case-A2の PEM4 段目における緩衝材の温度の経時変化



図 17 Case-A2の PEM5 段目における緩衝材の温度の経時変化



図 18 Case-A2の緩衝材が概ね最高温度となる時間でのニアフィールドの温度分布

3) Case-A3

Case-A3における緩衝材の温度の経時変化を図 19~図 23に示す。

Case-A3 の緩衝材の最高温度は、PEM3 段目において経過時間 15 年のときに、97.9℃なり、 制限温度以下となることが分かった(図 21 参照)。

緩衝材が概ね最高温度となる時間でのニアフィールドの温度分布を図 24 に示す。この図は経 過時間が 20 年のときのものである。なお、経過時間 20 年のときの緩衝材の最高温度は、PEM3 段目で 97.0℃であった。



図 19 Case-A3の PEM1 段目における緩衝材の温度の経時変化



図 20 Case-A3の PEM2 段目における緩衝材の温度の経時変化



図 21 Case-A3の PEM3 段目における緩衝材の温度の経時変化



図 22 Case-A3の PEM4 段目における緩衝材の温度の経時変化



図 23 Case-A3の PEM5 段目における緩衝材の温度の経時変化



図 24 Case-A3の緩衝材が概ね最高温度となる時間でのニアフィールドの温度分布

付属書 3-8-19

## (5) 熱的に成立する概念設計当初案の設定

各解析ケースにおける緩衝材の最高温度とそれが出現する経過時間を表3に示す。表より、中 心間離間距離が増えると、緩衝材の最高温度は低下する傾向があることが分かる。また、Case-A1 以外は、緩衝材の制限温度を満足した。

これらのことから、Case-A1 以外の中心間離間距離の組合せ、つまり、Case-A2 および Case-A3 が、熱的に成立性を有する概念設計当初案の候補となる。そして、これらの中から、埋め戻し 材の撤去量が最も少なくなる組合せを概念設計当初案の中心間離間距離として設定することにす る。図 3 の平面レイアウトから考えると、まずは、作業坑道の延長を短くすること、その次に、 作業坑道の中心間離間距離を短くすれば、埋め戻し材の撤去量が少なくなることが分かる。した がって、Case-A2 の中心間離間距離の組合せが、埋め戻し材の撤去量が最も少なくなる。

後述の概念構築の実現性(設計・施工の実現性)の評価では、熱的に成立する概念設計案 PEM-1V1の仕様は、処分孔中心間離間距離を 11.9m、作業坑道中心間離間距離を 15mと設定して、検 討を行うことにする。

解析ケース				
ケース名	処分孔中心間	作業坑道中心間	緩衝材の最高温度	経過時間(年)
	離間距離	離間距離	(°C)	
Case-A1	5.0d (11.9m)	2.6D (13m)	104	17
Case-A2		3.0D (15m)	98.9	15
Case-A3	6.0d (14.3m)	2.6D (13m)	97.9	15

表 3 緩衝材の最高温度と最高温度が出現する経過時間

2.2.2 概念設計当初案 PEM-22"大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式"の熱影 響評価

#### (1) 平面レイアウトの設定

解析モデルの範囲の設定に関連することから、初めに平面レイアウトを設定した。

概念設計当初案 PEM-22 "大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式"では、高耐久性支保工を採用した大断面の定置坑道に、複数(2 体)のオーバーパックを格納した矩形 PEM を横置きに、緩衝材(例えば、ベントナイトブロック)を交互に定置している。

矩形 PEM の寸法の設定に当たっては、NUMO の包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環 境整備機構, 2018)の横置き・PEM 方式を参考にした。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 の厚さは 28mm とした。ここでも、回収の容易性を向上させる方策として、"方策 Q. PEM 容器 の厚さを増加"も組み合わせることができることから、PEM 容器の厚さを 28mm よりも厚くす ることも考えられる。しかしながら、矩形 PEM 容器の材料である炭素鋼は熱伝導率が大きいこ とから、緩衝材の温度分布には大きな影響を与えないと考えられることから、ここでは 28mm と 設定した。また、オーバーパックの側面と緩衝材の間には、製作の都合上、隙間が 20mm 存在し、 それを充填材で埋めるものとした。これにより、矩形 PEM の外観の寸法を 2,316mm×2,316mm ×4,916mm と設定した。矩形 PEM の寸法を図 25 に示す。



図 25 矩形 PEM の寸法

PEM-22 において、熱的に成立させるために、矩形 PEM を積み上げたときの鉛直方向、定置 坑道の軸方向、定置坑道断面内の水平方向の3方向に、離間距離を取ることが考えられる。平成 31 年度報告書(原子力環境整備促進・資金管理センター, 2020)の代替設計オプション B では、こ の3つの離間距離はいずれも0となっていたが、熱的に成立していないために、ここでは、これ らの離間距離を設定することにした。ただし、どの程度の離間距離を取れば熱的に成立するのか を想定できる検討例は見当たらない。そのため、ここでは、鉛直方向は矩形 PEM の寸法を参考 にして、2.316mの間隔を空けることにした。また、定置坑道断面内の水平方向については、2.168m の間隔を空けることにした。これにより、定置坑道の内空幅(D)を12mと設定した。さらに、 1 断面に廃棄体を集中することを防ぐために、緩衝材(例えばベントナイトブロック)または埋め戻し材を容器に詰めて交互に定置することにした。なお、緩衝材と埋め戻し材の物性値は同じ としていることから、いずれを選択しても解析結果に違いはない。

矩形 PEM の離間距離と定置のイメージを図 26 に示す。1 断面あたりの廃棄体の数は4 体となる。



図 26 矩形 PEM の離間距離と定置のイメージ

定置坑道の中心間離間距離の設定では、坑道の断面の大きさが類似している TRU 等廃棄物処 分場の処分坑道を参考にする。NUMO の包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)によると、新第三紀堆積岩類の場合、TRU 等廃棄物処分場の処分坑道の中心間離間距離は 3D となっている。よって、定置坑道の中心間離間距離を 3D=36m と設定した。平面レイアウト のイメージを図 27 に示す。



図 27 平面レイアウトのイメージ

# (2) 解析ケースと解析モデルの設定

矩形 PEM の離間距離は、図 26 にて示した。解析ケースとしては、まずは、矩形 PEM を定置 後すぐに定置坑道を埋め戻した場合を設定した。このケースで熱的に成立しない場合は、矩形 PEM を定置した中央部と定置坑道上部を埋め戻さずに開放した場合を設定した。なお、一部開 放した状態で熱的に成立する場合、そのような条件下で成立する処分場概念であることを意味す ることになる。また、過去に行われた熱解析では、緩衝材の温度のピークは 10~20 年程度で現 れているので、定置後の埋め戻しの時間をずらすことで熱的な課題に対応できる処分場概念とも 言える。

解析ケースを表4に示す。

解析 ケース	中央部 間隔	軸方向 間隔	鉛直方向 間隔	定置坑道 上部の状態
Case-B1	2.168m (緩衝材または 埋め戻し材設置)	0m	2.168m (緩衝材または 埋め戻し材設置)	埋め戻し
Case-B1a	2.168m (開放)	0m	<b>2.168m</b> (緩衝材または埋 め戻し材設置)	開放

表 4 解析ケース

解析モデルに関して、水平方向の解析領域は、定置坑道断面内は左右非対称であることから、 隣接する定置坑道の中間点から中間点までとした。また、定置坑道軸方向の解析領域は、対称性 を考慮して、ある断面における矩形 PEM の中心から次の断面の矩形 PEM の中心までとした。 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は、鉛直方向の側面は、対称性を考慮して断熱境界とした。地 温の初期条件については、地表面と解析モデル底面は、境界条件として初期温度で一定とした。 よって、処分深度 500m の初期温度は 30℃、解析モデル底面の境界条件は 36℃としている。

定置坑道の支保工と覆工コンクリートは、NUMO の包括的技術報告書レビュー版(原子力発電 環境整備機構, 2018)を参考にして、それぞれの厚さを 300mm と設定した。また、PEM-22 では、 "方策 G. 高耐久性支保工の適用"も組み込まれている。したがって、定置坑道の支保工と覆工 コンクリートには無筋コンクリートではなく、鉄筋コンクリートが適用されていると設定した。 Case-B1a の場合、開放された部分があることから、2.1.5 で述べたとおり、坑内の空気と接す る面は温度規定境界と設定し、温度を 37℃とした。

解析モデルのイメージを図 28 に示す。



図 28 Case-B1 の解析モデルのイメージ

また、Case-B1の解析モデルを図 29 に、Case-B1aの解析モデルを図 30 に示す。これらの図 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、橙 色は埋め戻し材、ピンク色は支保工を示している。また、この図では、寸法が小さいために見づ らくなっているが、矩形 PEM の外殻、充填材もモデル化されている。さらに、これらの図の背 面側にも矩形 PEM は 2 体あり、矩形 PEM は合計 4 体がモデル化されている。



付属書 3-8-25

## (3) 解析結果の出力点

解析結果として緩衝材の温度の時間変化を見るために、その出力点を図 31 に示す。矩形 PEM の 4 体のうち、2 体は図 29 および図 30 の背面側にあるが、対称性のために正面側の矩形 PEM と同じ温度となる。よって、正面側の矩形 PEM2 体の温度を出力すればよいことになる。

この図において、出力点の名称を「緩衝材\_○●」の様に示しているが、「○」の数字の「1」は、 正面からみて右下側の矩形 PEM、「2」は左上側の矩形 PEM を示している。また、「●」の「a」 と「k」はオーバーパック端面の中心、「b」~「d」と「h」~「j」はオーバーパックの側面、「e」 ~「g」は 2 体のオーバーパックが接している箇所の周囲を示している。また、出力点の名称は、 Case-B1 と Case-B1a ともに、共通となっている。



## (4) 解析結果

#### 1) Case-B1

Case-B1における緩衝材の温度の経時変化を図 32~図 39に示す。

これらの図から、Case-B1 の場合、いずれの出力点においても緩衝材の制限温度の100℃を超 えたことから、熱的に成立していないことが分かった。なお、Case-B1 の緩衝材の最高温度は、 上段側の矩形 PEM の「緩衝材\_2k」において、経過時間17年のときに、140℃となった(図 36 参照)。

緩衝材が概ね最高温度となる時間でのニアフィールドの温度分布を図 40 に示す。この図は経 過時間が 20 年のときのものである。なお、経過時間 20 年のときの緩衝材の最高温度は、出力点 「緩衝材\_2k」で 139℃であった。



図 32 Case-B1の下段側の矩形 PEM における緩衝材の温度の経時変化(その1)



図 33 Case-B1の下段側の矩形 PEM における緩衝材の温度の経時変化(その2)



図 34 Case-B1の下段側の矩形 PEM における緩衝材の温度の経時変化(その3)



図 35 Case-B1の下段側の矩形 PEM における緩衝材の温度の経時変化(その4)



図 36 Case-B1の上段側の矩形 PEM における緩衝材の温度の経時変化(その1)



図 37 Case-B1の上段側の矩形 PEM における緩衝材の温度の経時変化(その2)



図 38 Case-B1の上段側の矩形 PEM における緩衝材の温度の経時変化(その3)



図 39 Case-B1の上段側の矩形 PEM における緩衝材の温度の経時変化(その4)



図 40 Case-B1 の緩衝材が概ね最高温度となる時間でのニアフィールドの温度分布

# 2) Case-B1a

矩形 PEM を定置後すぐに定置坑道を埋め戻した場合の Case-B1 は、熱的に成立しなかったことから、矩形 PEM を定置した中央部と定置坑道上部を埋め戻さずに開放した場合の Case-B1a の熱伝導解析を行った。

Case-B1aにおける緩衝材の温度の経時変化を図 41~図 48 に示す。

これらの図から、Case-B1a の場合、いずれの出力点においても緩衝材の制限温度 100℃以下 となっていて、熱的に成立することが分かった。なお、Case-B1a の緩衝材の最高温度は、下段側 の矩形 PEM の出力点「緩衝材\_1k」において、経過時間 2 年の時に、85.0℃となった(図 41 参 照)。

緩衝材が最高温度となる時間でのニアフィールドの温度分布を図 49 に示す。この図は経過時 間が2年のときのものである。



図 41 Case-B1aの下段側の矩形 PEM における緩衝材の温度の経時変化(その1)



図 42 Case-B1aの下段側の矩形 PEM における緩衝材の温度の経時変化(その2)



図 43 Case-B1aの下段側の矩形 PEM における緩衝材の温度の経時変化(その3)



図 44 Case-B1aの下段側の矩形 PEM における緩衝材の温度の経時変化(その4)



図 45 Case-B1aの上段側の矩形 PEM における緩衝材の温度の経時変化(その1)



図 46 Case-B1aの上段側の矩形 PEM における緩衝材の温度の経時変化(その2)



図 47 Case-B1aの上段側の矩形 PEM における緩衝材の温度の経時変化(その3)



図 48 Case-B1aの上段側の矩形 PEM における緩衝材の温度の経時変化(その4)



図 49 Case-B1a の緩衝材が最高温度となる時間でのニアフィールドの温度分布

# (5) 熱的に成立する概念設計当初案の設定

PEM-22 "大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式"では、矩形 PEM を図 26 に示したような離間距離や定置をした場合、矩形 PEM を定置後すぐに定置坑道を埋め戻すと、熱的に成立しないことが分かった。また、矩形 PEM を定置した中央部と定置坑道上部を埋め戻さずに開放した場合は、熱的に成立することも分かった。開放した場合、熱的に成立することは分かったが、どのタイミングで埋め戻すことができるのかが課題として残っている。定置後直ちに埋め戻した Case-B1 の結果を見てみると、経過時間 20 年以降は、温度は低下している。したがって、定置後は開放していても、遅くても経過時間 20 年のときには埋め戻すことができると考えられる。さらに、Case-B1a の緩衝材の最高温度が 85℃程度であったことから、熱的には、まだ余裕が残っているとも言える。上下の矩形 PEM の間隔を、2.316m としたが、それを縮めるなどの合理化の余地は残っていると考えられる。図 26 では、矩形 PEM の坑道軸方向の間隔をあけることで、アクセス性向上を保ちつつ、定置後すぐに埋め戻しても、緩衝材の制限温度を満足できる可能性はある。これについては、今後の課題と考える。

本検討では、PEM-22 "大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式"の熱的に成立 する概念設計当初案として、矩形 PEM の寸法、定置間隔、平面レイアウト、定置坑道の仕様等 は、図 25~図 28 に示したものとする。また、矩形 PEM の定置後直ちに埋め戻すことができな いために、時間をずらして埋め戻すものとする。これらを基にして、後述の概念構築の実現性(設 計・施工の実現性)の評価を行うものとする。

#### 2.3 概念設計当初案の熱影響評価のまとめ

概念設計当初案 PEM-1V1 を対象とした熱伝導解析結果から得られた、緩衝材の制限温度 (100℃)を超えない概念設計当初案の仕様例のうち、レイアウトを考慮したときに坑道長さが 最も短くなる(埋め戻し材の撤去量が最も少なくなる)仕様例とガラス固化体1体あたりの作業 坑道長さを表 5 に示す。

表より、概念設計当初案 PEM-1V1 (Case-A2) ではガラス固化体1体あたりの処分坑道長さは 2.38m となり、レファレンス概念の 6.66m よりも短尺化できる見込みがあることが分かる。作業 坑道の中心間距離は 15m となり、レファレンス概念の 13m よりも大きくなるが、平面レイアウ トから考えると全体の坑道長は短尺化できるため、埋め戻し材の撤去量が少なくなると考えられ る。よって、"方策 E 処分坑道の短尺化"および"方策 J:小断面坑道に PEM の複数定置"に よる回収の容易性向上は保持されるという見通しが得られた。

後述の概念構築の実現性(設計・施工の実現性)の評価では、上記の結果を踏まえて概念設計 当初案を修正し、処分孔中心間離間距離を11.9m、作業坑道中心間離間距離を15mと設定して概 念設計案とする。

表 5 緩衝材制限温度(100℃)を超えない概念設計当初案 PEM-1V1 の仕様例とガラス固化体 1 体あたりの処分坑道長さ

概念設計当初案 (解析ケース)	一断面あたり のガラス 固化体定置数	処分孔 中心間 距離 (m)	作業坑道 中心間 距離 (m)	緩衝材 最高温度 (℃)	ガラス固化体 1体あたりの 処分坑道長さ (m)
PEM-1V1 (case-A2)	5	11.9	15	98.9	2.38

一方、概念設計当初案 PEM-22 を対象とした熱伝導解析結果から得られた概念設計当初案の仕 様例および緩衝材最高温度結果を整理して表 6に示す。表中の各間隔は、図 28 で示したように、 PEM の定置密度を制御するために、緩衝材(例えばベントナイトブロック)または埋め戻し材を 容器に詰めたものを定置することによる PEM 同士の間隔である。表より、概念設計当初案 PEM-22 は、定置後換気を行い、定置後 2 年から 20 年程度までの間に坑道開放状態から埋め戻しする ことにより熱的成立性が見込まれる結果となった。定置パターンについては検討の余地が残され ている。

レファレンス概念との比較は単純にはできないが、この仕様例から想定される PEM-22 の定置 坑道の掘削量は約 375 万 m<sup>3</sup> (断面積 150m<sup>2</sup>×25,000m) となり、包括的技術報告書レビュー版 (原子力発電環境整備機構, 2018)に示された新第三紀堆積岩類の掘削量 約 677 万 m<sup>3</sup> (処分坑道 613 万 m<sup>3</sup> +処分孔 64 万 m<sup>3</sup>) よりも少なくなると考えられる。熱的な成立性を考慮して定置パ ターンを変更しても、"方策 I 複数の廃棄体格納 PEM" および"方策 E 処分坑道短尺化"が保 持される可能性はある。

後述の概念構築の実現性(設計・施工の実現性)の評価では、熱的な成立性の観点から矩形 PEM の定置後直ちに埋め戻すことができないために、時間をずらして埋め戻す概念設計案として、こ こに示した仕様例について検討を行うことにする。

概念設計 当初案 (解析ケース)	定置坑道 上部の 状態	中央部 間隔 (m)	坑道 軸方向 間隔 (m)	鉛直方向 間隔 (m)	緩衝材 最高温度 (℃)	緩衝材 最高温度 時刻 (年)
PEM-22 (Case-B1)	埋め戻し	2.168 (緩衝材または 埋め戻し材 設置)	0	2.168 (緩衝材または 埋め戻し材 設置)	140	17
PEM-22 (Case-B1a)	開放	2.168 (緩衝材または 埋め戻し材 設置)	0	2.168 (緩衝材または 埋め戻し材 設置)	85	2

表 6 概念設計当初案 PEM-22 の仕様例と緩衝材の最高温度

参考文献

電気事業連合会,核燃料サイクル開発機構,TRU 廃棄物処分技術検討書一第2次TRU 廃棄物処 分研究開発取りまとめー,JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005.

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.

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.

- 原子力環境整備促進・資金管理センター,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 報告書,2020.
- 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一地層 処分研究開発第2次取りまとめ一,分冊2 地層処分の工学技術,JNC TN1400 99-022, 1999.
- 竹ケ原竜大,高尾肇,佐藤由子,和田英孝,荒岡邦明,中嶋幸房,幾世橋広,植田浩義,木元崇宏, すきま充填材としてのベントナイト特性に関する研究(その2)-すきま充填材の熱物性評価

-, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, CS-190, 2000.

# 付属書 3-9 PEMを対象とした代替設計オプション 概念設計案の実現性(設計・施工の実現性)の評価

## 1. 概念設計案の実現性(設計・施工の実現性)評価の概要

熱影響評価の結果を踏まえて修正した概念設計当初案を概念設計案として、設計・施工の実現 性の観点で評価する。さらに、評価結果を踏まえ、必要に応じて見直しを行うことにより、実現 可能性のある(非現実的ではない)概念設計案を構築する。なお、本検討での実現性評価は、設 計・施工の実現性を評価対象としており、建設工程、建設費用などは考慮していないことに留意 されたい。

設計・施工の実現性評価にあたり、前提として、対象岩盤と処分深度を以下のように設定した。

・新第三紀堆積岩類:処分深度 500m

·深成岩類、先新第三紀堆積岩類: 処分深度 1000m

## 2. 概念設計案の実現性評価

## 2.1 概念設計案 PEM-1V1 の実現性評価

概念設計案 PEM·1V1 "鉛直処分孔複数 PEM 堅置き定置方式"を対象として、工学的方策の実 現性を評価するための設計と施工上の検討項目を設定した。表 1 は導入した工学的方策を対象 に、設計と施工の観点から実現性を検討する項目を整理したものである。項目によっては、検討 時に同時に扱うことができることから、色付けされた 6 項目に集約できる。また、概念設計案 PEM-1V1を構築する上で、"方策 I 複数の廃棄体を格納する PEM"及び"方策 M. PEM の軽量 化"工学的方策は考慮していない。その理由として、複数の廃棄体を格納する PEM は長さが長 くなり、作業坑道を大きくする必要があること、PEM の軽量化は、長期安全性への影響など別途 検討すべき点が多いことによる。

工学的方策	要求機能	設計検討項目	施工検討項目	備考
A. 隙間充填を必要としない円形 小断面坑道定置	・PEM と定置坑道の隙間に充填を必要 とせずバリア機能が発揮できる形態	・隙間充填を必要としない PEM 定置 坑道(処分孔)の設計	・定置坑道 (処分孔) の施工方 法	
C. PEM による一体型回収	・定置/回収容易な PEM 容器の健全性 確保	・要求機能を考慮した PEM 容器の設 計	・設計した PEM の製作	
E. 定置坑道の短尺化	・定置坑道/作業坑道の短尺化	・PEM 定置のレイアウト設計	・短尺化した坑道施工方法	Aに集約
F. 撤去容易な力学プラグの導入	・撤去が容易となるプラグ	・撤去が容易な力学プラグの設計	・力学プラグの施工・撤去技術	
G. 高耐久性支保工の適用	・定置/作業坑道支保材等の長期健全性 確保	・長期安定性を確保する高耐久性支 保の設計	・高耐久性支保の施工技術	
I. 複数の廃棄体を格納する PEM 容器の採用	・搬送・定置・回収・搬出時の PEM 容 器の健全性確保	・今回の概念案では考慮せず	・同左	段階的に検討
J. 小断面坑道に PEM の複数定置	・複数定置できる PEM の定置形態	<ul> <li>・熱解析と坑道安定解析による PEM</li> <li>レイアウト設計</li> </ul>	・定置坑道 (処分孔) の施工技 術	Aに集約
M. PEM の軽量化	・現状の PEM からの軽量化	・今回の概念案では考慮せず	・同左	段階的に検討
0. 止水機能を有する支保工の採 用	・定置/作業坑道支保への止水機能	・定置坑道の設計(材料、構造)	・ケーシングの施工方法	G に集約
P. PEM 容器に耐腐食性材料の使 用	・PEM 容器の回収時健全性確保	・PEM 容器の設計	・PEM 製作技術	Cに集約
<b>Q. PEM</b> 容器の厚さを増加	・PEM 容器の回収時健全性確保	・PEM 容器の設計	・PEM 製作技術	Cに集約
S. 回収動作が単純な定置方式と 装置の採用	・定置坑道の PEM の定置・回収動作・ 動線の単純化	<ul> <li>動作が単純となる定置・回収装置の 設計</li> </ul>	・定置装置の製作	
T. 動作と動線とが単純となるレ イアウト	・回収作業の動作と動線が単純となる (輻輳しない)レイアウト	<ul> <li>・物量の効率化を考慮したシステム とレイアウト設計</li> </ul>	・物流シミュレーション	
U. 大断面作業坑道と小断面定置 坑道の組合せ	・作業環境が確保できる大断面坑道と 定置・回収効率が高い定置坑道	<ul> <li>・作業坑道と定置坑道(処分孔)の設計</li> </ul>	・作業坑道と定置坑道(処分 孔)の施工技術	Aに集約

表 1 概念設計案 PEM-1V1 における工学的方策の実現性を評価する設計・施工上の検討項目の設定

上記で集約した工学的方策の実現性について、設計と施工の観点から定性的に評価する。評価の判断根拠としては、これまでの第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構,1999)での設計・施工検討、電事連報告書(電気事業連合会,2005)、NUMO包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構,2018)及び海外の類似概念の検討成果などを参照する。

#### 2.1.1 設計検討項目に対する実現性評価

工学的方策を具体的に設計する上で、検討すべき項目について、現状の設計技術レベルを定性 的に評価し、対応上の課題を抽出した。検討項目は表 1の整理から以下の6項目に集約する。

- 方策 A ⇒隙間充填を必要としない PEM 定置坑道(処分孔)の設計(方策 E.J.U.を含む)
- 方策 C ⇒要求機能を考慮した PEM 容器の設計(方策 P.Q.を含む)
- 方策 F ⇒撤去が容易な力学プラグの設計
- 方策 G ⇒長期安定性を確保する高耐久性支保の設計(方策 O.を含む)
- 方策 S ⇒動作が単純となる定置・回収装置の設計
- 方策 T ⇒物量の効率化を考慮したシステムとレイアウト設計

方策 A ⇒隙間充填を必要としない PEM 定置坑道(処分孔)の設計(方策 E、J、U を含む) 概念設計案 PEM-1V1の円形小断面(以下「処分孔」という。)の仕様は、複数体(例えば 5 体) の PEM を竪置きする概念を基本とする。設計時の検討項目と、その実現性の評価を以下に示す。

- ◆ 処分孔の断面設計では、PEM仕様に従い、定置・回数時に隙間充填を必要としないスペースを設計する必要がある。この設計では、PEMに内蔵されるベントナイトの膨潤で充填できる幅を見極め、間隙のスペースを検討する必要があり、このことは、PEMの仕様決定とも密接に関連する。
- ◆ 例えば、PEMを5体堅置きする場合、処分孔の深さが17mにも及ぶことから、岩盤特性によっては、掘削時に支保が必要となり、定置・回収のガイドとなるケーシングを支保材として用いることを前提とすると、全断面掘削機とケーシング挿入を平行して施工する装置が必要となるが、現状では存在しないことから設計段階から取り組む必要がある。
- ◆ 概念設計案PEM-1V1では5体のPEMを処分孔に定置することを基本とし、熱解析により PEM内のベントナイトの熱的制約を満足できる処分孔と作業坑道のレイアウトを設定して いる。

方策 C ⇒要求機能を考慮した PEM 容器の設計(方策 P、Q を含む)

PEMの設計は、搬送・定置方法にも関係する。概念設計案 PEM-1V1 では、吊下げ定置、吊り上げ回収を基本としている。設計時の検討項目と、その実現性の評価を以下に示す。

- ◆ PEM容器の設計要件として、吊下げ・吊り上げ時および処分孔に複数体(例えば5体)重ねた場合の耐力設計、耐腐食性・水密性確保等を要件とした材料の選定等がある。荷重に対しては応力解析により適切なPEM容器の厚さは求めることができる(現在の28mmは照査する必要がある)。水密性は腐食速度とも関係することから、周辺の地下水環境を考慮した上で、厚さを求めることになる。ただし、PEMの定置・回収方法、回収可能性維持期間中の健全性を考慮して設計を行うことになるため、PEMの設計要件を設定する必要がある。
- ◆ PEM内のベントナイト緩衝材の機能を維持するために、容器が腐食等で損傷した場合、ベントナイトの膨潤圧で処分孔と定置坑道が均質な材料となる必要があり、PEMと処分孔の隙間を均一にする等のために、スペーサー(ANDRAはセラミックランナーと呼ぶ)

(ANDRA, 2005)。)を設計する必要がある。これについては現在わが国では設計した経験 がなく、材料およびPEM容器への装着方法を含めたより詳細な設計が不可欠となる。

◆ また、PEMを処分孔に定置あるいは回収するには、PEMの上部に把持装置や治具を設計する必要がある。これに対しては、荷重条件等が想定できれば、現状の設計技術の延長線上で対応が可能であると考えられる。

方策 F ⇒撤去が容易な力学プラグの設計

撤去が容易な力学(鋼製)プラグのイメージとしては、下図に示す分割可能なパラボラ型のプ ラグ等とすることが考えられる。設計時の検討項目と、その実現性の評価を以下に示す。

◆ パラボラ型プラグを想定した場合、プラグの設計に必要となる定着部、形状、構造設計のための要求性能を設定する必要がある。力学プラグに作用する主な荷重としては、埋め戻し材の膨潤圧等が想定される。この膨潤圧をアーチ形状で受け止めることで薄肉の構造とすることが可能となると考えられる。さらに、反力を岩盤で受け止める構造を設計する必要がある。このような構造の設計手法としては、シェル構造やアーチダムの設計を参考にすることができると考えられる。下図の例では、パラボラ型プラグは12のユニットで構成され、原位置で組み立てる方式をイメージしている。ただし、このような構造は実例がないことから、特に岩盤への定着部や、ユニットの接合部の設計が、課題となると考えられる。



図 1 パラボラ型鋼製力学プラグのイメージ

方策 G ⇒長期安定性を確保する高耐久性支保の設計(方策 O を含む) 設計時の検討項目と、その実現性の評価を以下に示す。

- ◆ 作業坑道の設計と高耐久性支保の設計は、土木分野で多くの実績もあり可能であると考えられる。堆積岩の場合、坑道の基本形状が三心円となることが多いが、軽量高耐久性セグメントを用いる場合は、TBMによるトンネルの様に円形形状に変更することも考えられる。また、坑道内での作業性を考慮するとNUMOの主要坑道よりも内径が大きくなる可能性があるが、安定性を確保することは可能であると考えられる。また、二次覆工として高強度コンクリートを用いた設計も可能である。
- ◆ 処分孔の長期健全性を確保するために高耐久性ケーシング用いる場合、ケーシングに支保としての役割を持たせるか、ガイドとしてのみ機能するか等、機能により設計方法と仕様が異なる。また、掘削方法が泥水を用いる場合と排水しつつ掘削する場合によりケーシング材の遮水性機能担保が異なる。このような設計要件の設定が必要となる。

方策 S ⇒動作が単純となる定置・回収装置の設計

概念設計案 PEM-1V1 では、PEM の定置と回収及び搬入・搬出は同じ装置を用いることを前 提とする。設計時の検討項目と、その実現性の評価を以下に示す。

- ◆ 重量物(約37t)となるPEMの吊下げ定置、吊り上げ回収する装置と自動制御システムの 設計は、従来の機械設計技術が適用可能であると考えられる。例えば、門型クレーンのよう な装置でPEMをワイヤー6本吊りする仕組みを設計し、モーターの負荷を小さくするような 装置とすることなどが考えられる。ただし、狭所での作業となるため、現状このような重量 物を上下に吊る装置は存在が限定されていることもあり、別途、開発が必要となる。
- ◆ 定置・回収時のPEMの搬入・搬出において、PEMを堅置きの状態のままとすることによって、PEMを立てた直したり、倒したりする動作を無くし、動作を単純化することが考えられる。PEMを立てまま搬入・搬出するために、作業坑道の断面積を増やすことも考えられる。PEMの搬入・搬出時は、PEMが重量物であることからレール(軌道)走行を基本として、PEMの台車及び牽引車両を設計することも想定される。このような重量物に対する台車等については、100t超の使用済核燃料輸送貯蔵容器など、PEMよりも重いものを運搬する特殊車両の設計の実績はあることから、設計は可能であると考えられる。ただし、安全な輸送を確保するための制動システムの設計が作業安全性の観点から、設計要件の設定も含めて検討を行う必要があると考えられる。



図 2 鉛直処分孔に PEM を定置・回収する装置イメージ

方策 T ⇒物流の効率化を考慮したシステムとレイアウト設計

定置・回収 PEM は竪置きの状態で搬入・搬出できるレール搬送車両を設計する必要がある。 設計時の検討項目と、その実現性の評価を以下に示す。

- ◆ 坑道の交差部等では、複数の搬送・搬出車両を用いることによって、動線に対応することが 考えられる。例えば、PEMの搬出時は、作業坑道からバックより主要坑道にPEMを収めた 搬送容器を押し出し、主要坑道に設置したリフターでPEM搬送容器を吊り上げる。そし て、下部の台車を90度方向の異なる主要坑道側の台車に積み替えて、主要坑道側では前方 に牽引することが考えられる。車両を制御するシステム設計の要件を設定する必要はある が、従来の機械設計技術の延長で設計は可能であると考えられる。
- ◆ 重量PEMを搬送するための台車や牽引車の設計は可能であるが、要求性能を設定する必要 がある。また、搬送時の制動システムの設計も作業時安全性の観点から、設計要件の設定も 含めて検討を行う必要があると考えられる。

概念設計案 PEM-1V1 の回収の容易性向上に寄与する工学的方策に係る設計検討項目について、 実現性を評価した結果、実現可能性はあるが、以下に示す課題があることが分かった。多くは設 計する場合の要件(設計対象が具備すべき機能や性能)の設定という課題であり、要件が設定さ れれば設計手法は存在すると考えられる。

・処分孔の仕様を決定する要件の設定

- ・掘削とケーシング材の挿入を並行して実施する装置の設計
- ・PEMの設計要件の設定
- ・PEM のスペーサーの材料選定、容器への装着方法、要求される性能
- ・撤去しやすい力学(鋼製)プラグの岩盤への定着部、ユニットの接合部の構造
- ・処分孔のケーシングに対する要求機能の設定(構造強度、耐腐食性、止水性など)
- ・狭隘空間での重量 PEM の吊上げ動力とフレームの構造耐力
- ・PEMの搬送時の制動システム設計への要求機能の設定と設計
- ・坑道の交差部における PEM 方向転換装置の設計

#### 2.1.2 施工検討項目に対する実現性評価

製作・施工上の検討項目について、現状の技術レベルを考慮して定性的に評価する。対象とす る項目は、設計に対する検討と同様、以下の6項目とする。

- 方策 A ⇒ 定置坑道の施工方法(方策 E、J、U を含む)
- 方策 C ⇒ 設計した PEM の製作(方策 P、Q を含む)
- 方策 F ⇒撤去が容易な力学プラグの施工・撤去技術
- 方策 G ⇒高耐久性支保の施工技術(方策 O も含む)
- 方策 S ⇒ 定置装置の製作
- 方策 T ⇒物流シミュレーション

方策 A ⇒ 定置坑道の施工方法(方策 E、J、U を含む)

複数(例えば5体)のPEMを処分孔に竪置きすることを想定した処分孔の仕様は設計により 決定されていることを前提とする。施工の実現性の評価を以下に示す。

- ◆ 処分孔の建設では、岩盤の特性に依存するが、支保が必要な場合、例えば全断面掘削機 (shaft boring machine)と鋼製ケーシング推進装置の組合せで対応することになる。鉛 直に処分孔を掘削する場合、地下水の浸入は避けられないことから、地下水を排水しなが ら、あるいは泥水掘削工法を適用する。泥水を活用する方がより孔壁の安定性確保が容易 となる。掘削しながら作業坑道でケーシングをセットし、溶接等で繋ぎ合わせ、圧力で鉛 直に推進する装置の開発が求められる。
- ◆ 全断面掘削機は存在するが、想定する径での鉛直方向への連続掘削の実績はない。先進ボーリングを活用した掘削方法(プッシング掘削の活用)も想定されるが、竪坑に適用した例は今のところない。これらの装置の開発と性能確認(掘削・ずり出し速度や精度)試験を実施する必要がある。
- 方策 C ⇒設計した PEM の製作(方策 P、Q を含む)

施工の実現性の評価を以下に示す。

- ◆ PEM容器の材料・製作技術は存在する。PEMは立てた状態で組み立てることを想定した 場合、横置きで製作する従来の方法とは異なり、円筒状の鋼管に下蓋を溶接し、内部に高 圧縮ベントナイトブロックとオーバーパックを定置していくイメージで構築する等、様々 な方法が考えらえる。すなわち、竪置きブロック方式を地表で作成する要領で構築するこ とになると考えられる。これらの要素技術は存在するが、実物で製作した事例はない。
- ◆ PEM容器にスペーサーとなる材料(例えばセラミック)を装着する技術は、現状ではア

イデア段階で具体的な方法はない。ANDRAの装着方法(ANDRA, 2005)も参照できるが、装着部に要求される強度も含めて技術開発が必要となる。

- 方策 F ⇒撤去が容易な力学プラグの施工・撤去技術
  - 施工の実現性の評価を以下に示す。
  - ◆ 設計検討項目でイメージしたパラボラ型プラグのユニットに対しては、既存の製造技術で 製造は可能であると考えられる。
  - ◆ パラボラ型プラグを組立、解体した実績はなく、施工技術は現存しない。よって、岩盤側 に定着部を設置する施工技術、ユニットを組み立てる施工技術、分解して撤去する施工技 術は開発課題となる。
- 方策 G ⇒高耐久性支保の施工技術(方策 O も含む)
- 施工の実現性の評価を以下に示す。
- ◆ 作業坑道の高強度コンクリートによる二次覆工施工技術は存在する。狭所でのセグメント 型式の移動型枠と高流動コンクリート(高い耐久性を示す)を組わせて連続的な施工が可 能となる。
- ◆ 作業坑道に軽量高強度コンクリートセグメントを設置する技術は作業坑道が円形である必要がある(三心円では実績がない)。シールドトンネルでの実績はあるが、自動化施工をするには7m程度の直径が必要となる。
- ◆ 処分孔に耐久性のあるケーシングを装着する技術は存在するが、狭所で鉛直に押し込む装置、継手部の対応などの掘削技術と並行して実施する施工技術は確立されていない。これについては、装置の開発から必要となる。また、実証試験は地表でも可能であると考えられる。

方策 S ⇒ 定置装置の製作

概念設計案 PEM-1V1 では、PEM の定置と回収及び搬入・搬出は同じ装置を用いることを前 提としている。施工の実現性の評価を以下に示す。

- ◆ 重量物(約37t)となるPEMの吊下げ定置、吊り上げ回収する装置と自動制御システム 構築の要素技術は存在する。ただし、狭隘空間での作業となるため装置の動力系を含めて 各部位を小型化し、かつ高性能とする必要があり、制御システムを含めて動作確認を段階 的に行うことで装置を開発していく必要がある。
- ◆ 定置・回収時のPEMの搬入・搬出台車、レール軌道、牽引車の製作は実績があり可能であると考えられる。移動時の安全制御装置は存在するが、軌道上での動作確認は不可欠となる。

方策 T ⇒物流シミュレーション

施工の実現性の評価を以下に示す。

- ◆ 主要坑道と作業坑道の交差部での重量PEMの台車の方向転換に係る自動制御装置の製作 と動作確認が必要となる。
- ◆ 定置・回収を含むPEMの物流シミュレータを作成し、動線とサイクルタイムを確認する 必要がある。
- ◆ レール軌道などを利用した搬送に係る制動システムの性能確認試験は必須と考えられる。

概念設計案 PEM-1V1 における回収の容易性向上の工学的方策に係る施工検討項目について、 実現性を評価した結果、実現可能性はあるが、以下の課題が抽出された。

- ・狭隘空間での全断面掘削とケーシングを並行して推進する装置は存在しないことから試作、 動作確認、性能確認といった段階的な開発が必要
- ・PEM を竪置き状態で製作する技術と試作、およびスペーサーの装着方法と性能確認試験方法
- ・撤去容易な力学(鋼製)プラグのユニットを組立・解体する装置の開発・動作確認、および 実証試験
- ・狭隘部で重量 PEM を定置・回収する装置の試作、動作確認、耐力確認
- ・地下施設のレイアウトを対象とした方向転換装置の開発・動作確認
- ・PEM の物流シミュレータによる、動線とサイクルタイムの確認
- ・重量 PEM 搬送時の制動システムの性能確認

#### 2.2 概念設計案 PEM-22 の実現性評価

概念設計案 PEM-22"大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式"を対象として、 工学的方策の実現性を評価するための設計と施工上の検討項目を設定した。表 2 は導入した工学 的方策を対象に、設計と施工の観点から実現性を検討する項目を整理したものである。項目によ っては、検討時に同時に扱うことができることから、色付けされた 6 項目に集約できる。これら の工学的方策のうち、"方策 M. PEM の軽量化"に関しては、別途安全性確保の観点からの詳細 な検討が必要となることから設計・施工上の検討項目から除外した。

上記で集約した工学的方策の実現性について、設計と施工の観点から定性的に評価する。評価の判断根拠としては、これまでの第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構,1999)での設計・施工検討、電事連報告書(電気事業連合会,2005)、NUMO包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構,2018)及び海外の類似概念の検討成果などを参照する。

工学的方策	要求機能	設計検討項目	施工検討項目	備考
B. 大断面坑道定置	<ul> <li>PEM の熱的制約の順守、バリア機</li> <li>能の維持、大断面坑道安定性</li> </ul>	・大断面坑道の設計と PEM の定置レイ アウト設計	・大断面坑道の施工技術	
C. PEM による一体型回収	・定置/回収容易なPEM 容器の長期健 全性確保	・要求機能を考慮した PEM 容器の設計	・設計した PEM の製作	I.に集約
E. 定置坑道の短尺化	・定置坑道/作業坑道の短尺化	・大断面坑道の設計	・大断面坑道の施工技術	B.に集約
F. 撤去容易な力学プラグの導入	・撤去が容易となるプラグ	・撤去が容易な力学プラグの設計	・力学プラグの施工・撤去技術	
F'. 撤去容易な埋め戻し材の選択	<ul> <li>撤去容易な埋め戻し材の選択と埋め戻し方法</li> </ul>	・撤去容易な埋め戻し材の選択と設計	・埋め戻し材撤去工法	
G. 高耐久性支保工等の適用	・大断面坑道の長期健全性確保	・大断面高耐久性支保の設計	・高耐久性支保の施工技術	B.に集約
I. 複数の廃棄体を格納する PEM 容 器の採用	・搬送・定置・回収・搬出時の PEM 容器の健全性確保	・複数ガラス固化体格納 PEM の設計	・多格納 PEM の製作	
M. PEM の軽量化	・現状の PEM からの軽量化	・今回の概念案では軽量化は考慮せず	・同左	段階的に検討
N. 矩形 PEM の採用	・PEM 容器の健全性確保	・矩形 PEM の設計	・矩形 PEM の製作	I.に集約
0. 止水機能を有する支保工の採用	・定置/作業坑道支保への止水機能	・大断面坑道支保工の設計	・大断面坑道の施工	B.に集約
P. PEM 容器に耐腐食性材料の使用	・PEM 容器の回収時健全性確保	・矩形 PEM 容器の設計	・PEM 製作技術	I.に集約
Q. PEM 容器の厚さを増加	・PEM 容器の回収時健全性確保	・矩形 PEM 容器の設計	・PEM 製作技術	I.に集約
R. 大断面坑道に PEM の集中定置	・PEM の人工バリア機能の維持	・熱解析による PEM レイアウト設計	・PEM の定置技術	B.に集約
S. 回収動作が単純な定置方式と装 置の採用	・回収動作・動線の単純化する装置	・矩形 PEM 定置・回収装置の設計	・定置装置の製作・動作確認	
T. 動作と動線とが単純となるレイア ウト	<ul> <li>・回収作業の動作と動線が単純となる(輻輳しない)レイアウト</li> </ul>	・矩形 PEM の物流設計	・物流シミュレーション	
U. 大断面作業坑道と小断面定置坑 道の組み合わせ	<ul> <li>作業環境が確保できる大断面坑道 と定置・回収効率が高い定置坑道</li> </ul>	・処分場レイアウト設計	・大断面坑道の施工技術	B.に集約

表 2 概念設計案 PEM-22 における工学的方策の実現性を評価する設計・施工上の検討項目の設定
#### 2.2.1 設計検討項目に対する実現性評価

工学的方策を具体的に設計する上で、検討すべき項目について、現状の設計技術レベルを定性 的に評価し、対応上の課題を抽出する。検討項目は表 2の整理から以下の6項目に集約する。

- 方策 B ⇒大断面坑道の設計と PEM の定置レイアウト設計(方策 E、G、O、N、U を含む)
- 方策 F' ⇒撤去容易な埋め戻し材の選択と設計
- 方策 F ⇒撤去が容易な力学プラグの設計
- 方策 I ⇒複数ガラス固化体格納 PEM の設計(方策 C、N、P、Q を含む)
- 方策 S ⇒矩形 PEM の定置・回収装置の設計
- 方策 T ⇒矩形 PEM の物流設計
- 方策 B ⇒大断面坑道の設計と PEM の定置レイアウト設計(方策 E、G、O、N、U を含む) 設計時の検討項目と、その実現性の評価を以下に示す。
  - ◆ 大断面坑道の規模(約150m<sup>2</sup>程度を想定)は、包括的技術報告書レビュー版(原子力発電 環境整備機構, 2018)におけるTRU処分坑道と類似の規模であり、施工方法(例えば NATM工法)に対応した掘削時の安定性確保に係る支保工の設計は可能である。大断面坑 道の長期健全性を確保するために、覆工として高耐久性コンクリートを設計することも多 くの設計実績があり可能である。支保工と覆工の間に防水シートを設置し、また背面排水 システムを設計することで、大断面坑道内部はある期間は地下水の漏洩を抑制することが できる。底盤と側壁に対しては、定置・回収装置等の重量物の荷重に対応することが想定 されることから、補強設計が必要となることも想定される。これに対しては、荷重条件が 設定されれば、従来の土木構造物の設計技術で対応することは可能であると考えられる。
  - ◆ 集中定置を目標とするPEMのレイアウト設計では、上記の坑道仕様設計とともに熱解析 により適切な配置を設計することができる。また、概要設計案PEM-22では矩形PEMの 熱影響を緩和するために、緩衝材あるいは埋め戻し材を入れた矩形バッファー容器を交互 に定置するなど、集積度を落とさずに熱影響を緩和させる定置パターンや離間距離の取り 方があることも想定されることから、そのような熱影響を緩和させる方策の検討は課題と なる考えられる。

方策 F' ⇒撤去容易な埋め戻し材の選択と設計

大断面坑道の上部の空隙を埋め戻す材料として、定置及び撤去が容易な材料を選択する。設計 時の検討項目と、その実現性を以下に示す。

- ◆ 埋め戻し材への要求性能は、周辺岩盤と同程度の低透水性とする。PEM周辺の空隙及び PEM上部の被り部分は、撤去が容易なベントナイトペレットを選択、その上部には掘削時 の発生材とベントナイトを混ぜ合わせた材料を埋め戻し材として用いることなどが考えら れる。これまでの検討で、ベントナイトペレット、現地発生材とベントナイトの混合材に より、低透水性は確保できる見通しがあり、仕様を決めることができると考えられる。撤 去が容易な埋め戻し材の選定や要求性能の設定が課題と考えられる。
- 方策 F ⇒撤去が容易な力学プラグの設計

主要坑道と定置連絡坑道の境界に鋼製の力学プラグを設置することを想定している。設計時の 検討項目と、その実現性を以下に示す。

◆ 撤去容易な力学プラグの設計では、プラグ設計に必要となる定着部、形状、構造設計のた

めの要求性能を設定する必要がある。力学プラグに作用する主な荷重としては、埋め戻し 材の膨潤圧等が想定される。この膨潤圧をアーチ形状で受け止めることで薄肉の構造とす ることが可能となると考えられる。さらに、反力を岩盤で受け止める構造を設計する必要 がある。このような構造の設計手法としては、シェル構造やアーチダムの設計を参考にす ることができると考えられる。

◆ 図 1のパラボラ型プラグは、12のユニットで構成され、原位置で組み立てる方式をイメージしている。ただし、このよう構造は実例がないことから、特に、岩盤への定着部や、ユニットの接合部の設計については、課題となると考えられる。

方策 I ⇒複数ガラス固化体格納 PEM の設計(方策 C、N、P、Q を含む)

現段階における矩形 PEM のイメージは、下図に示す 2 体のオーバーパックを格納する形式と している。設計時の検討項目と、その実現性を以下に示す。

- ◆ 矩形PEMの外殻は厚さ28mmの鋼板を想定したが、耐腐食性、吊り上げ時、および吊り 下げ時の健全性を設計要件として再吟味する必要があり、想定される荷重に対して、応力 解析に基づいて適切な寸法を設定することは可能であると考えられる。また、定置坑道 は、定置後直ちに埋め戻すことができず、最長で20年程度は開放された状態であること から、その影響も考慮して設計する必要もある。よって、矩形PEMへの要求性能を定め ることによって、設計は可能であると考えられるので、その要求性能を設定することが課 題になると考えられる。
- ◆ PEMをフォークリフトで定置・回収する場合は、フォークリフトの爪を差し込む必要があるために、矩形PEMの下部にスペーサーが必要となり、その設計も必要となる。また、天井クレーンで定置・回収する場合、PEMの頂部に吊り上げ用の把持プレートや治具も設計する必要となる。ただし、こらは、イメージ的にはコンテナ容器と類似していることもあり、従来の機械設計技術で対応できると考えられる。
- ◆ バッファー容器は矩形PEMとともに定置される。バッファー容器には、熱的な影響を緩 和する役割して機能が求められると考えられる。また、回収時の機能として撤去の容易性 も求めるのであれば、矩形PEMと同様に、耐腐食性、吊り上げ時、および吊り下げ時の 健全性を設計要件として考慮する必要があると考えられる。この場合、バッファー容器の 設計は、矩形PEM容器と同様に行うことになり、設計は可能であると考えられる。



図 3 複数ガラス固化体格納矩形 PEM の仕様例とバッファー容器の設置レイアウト

方策 S ⇒矩形 PEM の定置・回収装置の設計

概念設計案 PEM-22 では、定置と回収装置は同じ装置を用いることとし、フォークリフトある いは天井クレーン等での定置・回収を行うことが想定される。設計時の検討項目と、その実現性 を以下に示す。

- ◆ 重量物(約70t)を定置・回収するフォークリフトは、接地圧を下げるためにクローラー タイプとすることが望ましいと考えられる。ただし、このフォーリフトは別途設計する必 要がある。また、坑道の底盤の補強についても設計が必要になると考えられる。
- ◆ 天井クレーンで定置・回収する場合も、別途設計する必要がある。また、矩形PEMの重 量が大きいことから、天井クレーンのレール設置用架台や、それらが載る側壁の補強の設 計も含めての検討が必要となる。
- ◆ 設計に先立って、定置・回収装置への要求性能の検討が必要であると考えられる。



図 4 大断面坑道定置における矩形 PEM の定置・回収装置のイメージ

# 方策 T ⇒矩形 PEM の物流設計

大断面坑道と主要坑道のレイアウトは下図に示す二方向アクセスが可能な坑道配置とする。設 計時の検討項目と、その実現性を以下に示す。

- ◆ 矩形PEMの搬出において、例えば天井クレーンを用いることとした場合、PEMは定置状態から向きを変えずに搬送し、主要坑道に準備した搬出用台車に定置する等の方法が考えられる。また、この設備は、定置の場合と同じ車両を用いることが考えられる。このような重量物に対する台車等については、100t超の使用済核燃料輸送貯蔵容器など、矩形PEMよりも重いものを運搬する特殊車両の設計の実績はあることから、設計は可能であると考えられる。
- ◆ フォークリフトを用いて搬出する場合には、定置連絡坑道に設置した搬送用コンベアで向きを変えずに主要坑道に準備した搬出用車両に移送することが考えられる。これらの装置や設備の設計も事例(ユッカマウンテン)があり、設計対応は可能であると考えられる。
- ◆ 重量PEM搬送時の制動システムについても作業安全性の観点から、設計要件の設定も含めて検討を行う必要があると考えられる。



図 5 大断面坑道に定置された回収 PEM の搬出ルート例

概念設計案 PEM-22 の回収の容易性向上に寄与する工学的方策に係る設計検討項目について、 実現性を評価した結果、実現可能性はあるが、以下に示す課題があることが分かった。多くは設 計する場合の要件(設計対象が具備すべき機能や性能)の設定という課題であり、要件が設定さ れれば設計手法は存在すると考えられる。

- ・熱影響評価による合理的な PEM の定置パターン及び大断面坑道の設計要件、仕様の具体化
- ・撤去が容易な埋め戻し材の選定や要求性能の設定
- ・撤去が容易な力学(鋼製)プラグの岩盤への定着部、ユニットの接合部の構造
- ・複数のガラス固化体を格納する矩形 PEM 設計への要求性能の設定
- ・重量 PEM を定置・回収する装置設計への要求性能の設定
- ・重量 PEM 搬送システム設計への要求性能(制御システムも含む)の設定

#### 2.2.2 施工検討項目に対する実現性評価

製作・施工上の検討項目について、現状の技術レベルを考慮して定性的に評価する。対象とする工学的方策は、設計に対する検討と同様、以下の6項目とする。

- 方策 B ⇒大断面坑道の施工技術(方策 E、G、O、R、U を含む)
- 方策 F' ⇒埋め戻し材撤去工法
- 方策 F ⇒撤去容易な力学プラグの施工・撤去技術
- | 方策 I | ⇒多格納 PEM の製作(方策 C、N、P、Q を含む)
- 方策 S ⇒ 定置・回収装置の製作と動作確認
- 方策 U ⇒物流シミュレーション

方策 B ⇒大断面坑道の施工技術(方策 E、G、O、R、U を含む)

施工の実現性の評価を以下に示す。

◆ 大断面坑道の施工方法としては、多くの実績があるNATM工法の適用が考えられる。一 次覆工でロックボイルと吹付けを行い、二次覆工に高耐久性コンクリートを用いること で、長期の健全性を確保できる見通しが得られているが、堆積岩を対象とした場合、処分 深度での大断面の定置坑道の建設には、安定性確保の観点から実現性について詳細な吟味 が必要となる。また、周辺地下水の浸透に対しては、二次覆工の背面排水システムで対応 できる。

方策 F' ⇒埋め戻し材撤去工法

施工の実現性の評価を以下に示す。

- ◆ 設計検討項目で述べた撤去しやすい埋め戻し材の施工方法について、一連の施工技術は存在すると考えられるが、品質確認を含めた実証試験、撤去時の施工方法と実証試験が必要となる。
- 方策 F ⇒撤去容易な力学プラグの施工・撤去技術

施工の実現性の評価を以下に示す。

- ◆ 設計検討項目でイメージしたパラボラ型プラグのユニットに対しては、既存の製造技術で 製造は可能であると考えられる。
- ◆ パラボラ型プラグを組立、解体した実績はなく、施工技術は現存しない。よって、岩盤側 に定着部を設置する施工技術、ユニットを組み立てる施工技術、分解して撤去する施工技 術は開発課題となる。

#### 方策 I ⇒多格納 PEM の製作(方策 C、N、P、Q を含む)

施工の実現性の評価を以下に示す。

- ◆ オーバーパックを複数体(例えば2体)格納する矩形PEMを横置きで製作する要素技術は存在するが製作例はない。矩形PEM外殻に半割りのベントナイトブロックを設置し、オーバーパックを定置したのち、上から半割りのベントナイトブロックで蓋をする形で製作する方法が考えられるが、アイデア段階であり、実規模での試作が必要となる。
- ◆ バッファー容器は、矩形PEMの内部を全てベントナイトブロックとすることで製作できると考えられる。

方策 S ⇒ 定置・回収装置の製作と動作確認

概念設計案 PEM-22 では、PEM の定置と回収装置は同じ装置を用いることを基本として施工 技術を評価する。施工の実現性の評価を以下に示す。

- ◆ 例えば、フォークリフト等で定置・回収を行う場合、矩形PEMの重量が重いため、接地 圧を下げるためにクローラータイプの遠隔操作フォークリフトを使用する。このような大型のフォークリフトは特別に製作する必要がある。
- ◆ 天井クレーンを使用して定置・回収する場合には、大断面坑道の側壁を利用して設置する ことが考えられる。天井クレーンの装置は存在する技術であるが、特別に製作する必要が ある。また、クレーンの移動用レールの設置は実績があり施工可能である。
- ◆ どのような装置を用いることとしても、試作、動作確認、性能確認試験が必要となる。

方策 T ⇒物流シミュレーション

主要坑道のレイアウトは二方向アクセスが可能な坑道配置を基本とする。施工の実現性の評価 を以下に示す。

- ◆ 天井クレーンで搬出する場合には、そのまま主要坑道まで向きを変えずに搬送し、主要坑 道に準備した搬出用台車に定置することが考えられる。この設備は、定置の場合と同じ車 両を用いる。100トン程度の重量物を搬送する車両は実績があり製作可能である。
- ◆ フォークリフトで搬出する場合には、定置連絡坑道に設置した搬送用コンベアで向きを変

えずに主要坑道に準備した搬出用車両に移送することが考えられる。これらの装置や設備 は実存することから準備できる。重量PEMとなることからコンベアを試作し動作確認が 必要となる。

- ◆ 上記のPEMの回収から搬出までの手順の物流シミュレーションを作成し、動線とサイク ルタイムを確認する必要がある。
- ◆ 重量PEM搬送時における制動システムの開発が必要となる。

概念設計案 PEM-22 における回収の容易性向上の工学的方策に係る施工検討項目について、実 現性を評価した結果、実現可能性はあるが、以下の課題が抽出された

- ・大断面坑道について、岩盤の種類と処分深度を考慮した安定性確保の観点からの詳細な検討
- ・撤去容易な埋め戻し材による、埋め戻し時の品質確認と実証試験、および撤去時の施工方法 と実証試験
- ・撤去しやすい力学(鋼製)プラグのユニットを組立・解体する装置の開発・動作確認、およ び鋼製プラグの組立・解体技術の実証試験
- ・矩形 PEM の試作
- ・重量 PEM を定置・回収する装置の試作、動作確認、性能確認試験
- ・回収時の PEM の搬送システムの構築と動作確認
- ・PEM の物流シミュレータによる、動線とサイクルタイムの確認
- ・重量 PEM 搬送における制動システムの開発

参考文献

ANDRA, Dossier 2005 Argile, Architecture and management of geological repository, 2005. 電気事業連合会,核燃料サイクル開発機構, TRU 廃棄物処分技術検討書-第2次 TRU 廃棄物処

分研究開発取りまとめ-, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005. 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一適切なサイ

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.

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一地層 処分研究開発第2次取りまとめ一,分冊2 地層処分の工学技術,JNC TN1400 99-022, 1999.

# 付属書 3-10 PEMを対象とした代替設計オプション 概念設計案の具体化に係る技術開発課題の抽出と整理

# 1. 概念設計案の具体化に係る技術開発課題の抽出と整理の概要

概念設計案 PEM-1V1 "鉛直処分孔複数 PEM 堅置き定置方式" および概念設計案 PEM-22 "大 断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式"を対象として、工学的方策を実現するた めに抽出した設計と施工上の技術開発課題を整理した。概念設計案 PEM-1V1 は鉛直孔に複数の PEM を定置する概念だが、定置する孔が鉛直方向と水平方向では課題が異なるため、概要案 PEM-1H1 "水平処分孔複数 PEM 横置き定置方式"についても課題を整理した。

# 2. 概念設計案の設計・施工上の技術開発課題の抽出と整理

#### 2.1 概念設計案 PEM-1V1 の技術開発課題

概念設計案 PEM-1V1 "鉛直処分孔複数 PEM 竪置き定置方式"を対象として、工学的方策を実現するために抽出した設計・施工上の技術開発課題を表 1 に整理した。表中、下線を引いた箇所は PEM-1H1 との違いを意味する。

工学的方策	設計上の課題	備考	施工上の課題	備考
<ul> <li>A. 隙間充填を必要としない円形小断面定置坑道</li> <li>E. 定置坑道の短尺化</li> <li>J. 小断面坑道に PEMの複数定置</li> <li>U. 大断面作業坑道と小断面定置坑道の組合せ</li> </ul>	<ul> <li>・処分孔の設計要件の 設定、仕様の具体化</li> <li>・掘削とケーシング推 進を組み合わせた 機械への要求機能・</li> <li>性能の設定</li> </ul>	<ul> <li>・設計手法 は存在</li> </ul>	<ul> <li>・処分孔掘削・ケーシン グの推進機械の製作、 動作確認、性能確認</li> </ul>	<ul> <li>・個別の掘 削、推進技 術は存在</li> </ul>
<ul> <li>C. PEM による一体型回収</li> <li>P. PEM 容器に耐腐食性材料の使用</li> <li>Q. PEM 容器の厚さを増加</li> </ul>	<ul> <li>PEM の設計要件の 設定、仕様の具体化</li> <li>・スペーサーへの要求 機能・性能の設定、 仕様の具体化、</li> <li>PEM 容器への装着 方法</li> </ul>	<ul> <li>・設計手法 は存在</li> <li>・ ANDRA と条件が 異なる (ANDRA, 2018)</li> </ul>	<ul> <li><u>スペーサー</u>を装着する</li> <li>PEM の堅置き状態</li> <li>で実規模製作</li> <li>・実規模 PEM への <u>スペ</u></li> <li><u>ーサー</u>の装着技術と</li> <li>耐力確認</li> </ul>	・ ANDRA と条件が 異 な る (ANDRA, 2018)
<ul> <li>F. 撤去容易な力学プラ グの導入</li> </ul>	<ul> <li>・組立・解体が容易な</li> <li>プラグ構造の概念</li> <li>構築、設計要件(組</li> <li>立・解体の装置設計</li> <li>を含む)の設定</li> </ul>	<ul> <li>・概念から 構築する 必要あり</li> </ul>	<ul> <li>・容易に組立・解体できるプラグの試作と装置の開発・試作・動作確認</li> </ul>	<ul> <li>・概念から 構築する 必要あり</li> </ul>
G. 高耐久性支保の適用 O. 止水機能を有する支 保工の採用	<ul> <li>・処分孔の支保を兼ね るケーシング材へ の設計要件(接手構 造も含む)の設定</li> </ul>	<ul> <li>・設計手法 は存在</li> </ul>	・ケーシングの製作、接 手部の耐力確認(設置 技術は A.で対応)	<ul> <li>実規模装 置による 動作確認</li> </ul>
S. 回収動作が単純な定 置方式と装置の採用	<ul> <li>・狭隘空間で重量</li> <li>PEMを<u>吊り上げ</u>、</li> <li>搬出する装置の設</li> <li>計要件の設定</li> </ul>	<ul> <li>・設計手法 は存在</li> </ul>	・装置の製作、動作確認、 性能確認	<ul> <li>動力部と フレーム</li> <li>部の耐力</li> <li>確認</li> </ul>
<b>T.</b> 動作と動線が単純と なるレイアウト	<ul> <li>・作業・物流を考慮したレイアウトの最適化</li> <li>・重量 PEM の方向転換装置、搬送制御システム設計への要求機能・設計要件の設定</li> </ul>	<ul> <li>・設計手法 は存在</li> </ul>	<ul> <li>・重量 PEM 積替え装置の試作、動作確認</li> <li>・搬送制御システムの試作、動作確認</li> </ul>	・一連の装 置・システ ムとして 構築

表 1 概念設計案 PEM-1V1 の設計・施工に係る技術開発課題の整理

工学的方策ごとの課題を整理した結果を以下に示す。

- A. 間隙充填を必要としない円形小断面(処分孔)定置坑道 【設計上の課題】
  - ◆ 処分孔の仕様結果のための設計要件の設定:処分孔の径は定置する PEM 容器の外径、 定置・回収する場合に必要とされるスペース、ガイドとなるケーシングの施工精度が設 計で考慮するべき事項となる。ケーシングと PEM 容器のスペースは、PEM に内蔵され るベントナイトの膨潤性に依存する。回収しない場合を考慮して、隙間はベントナイト の膨潤により充填される必要がある。設計要件が設定されれば設計法は存在する。
  - ◆ 処分孔掘削とケーシング材の挿入を平行して施工できる装置の設計要件の設定:処分孔の掘削中の孔壁安定性を確保する方法としては、泥水を使用し掘削しながらケーシング材を挿入する方法、シールド掘削機のように掘削機の進捗と並行して支保材が装填される方法がある。PEM-1V1 では、処分孔上部の作業坑道が狭隘であることから、泥水を用いたマイクロ TBM などで掘削し、進捗に合わせてケーシングを挿入する施工法を選択した場合、装置としての性能を考慮した設計要件を設定することが課題となる。設計要件が設定されれば設計できると考えられる。
  - 【施工上の課題】
    - ◆ 処分孔掘削・ケーシング挿入装置の設計に基づく製作、動作確認、性能確認:狭隘な作業坑道で鉛直に機械掘削するマシンと並行してケーシングを挿入する装置は存在しないことから、設計に対応して装置を試作し、動作確認、性能確認試験を行う必要がある。 要素技術は存在するが、システムとして組み合せた装置は存在しないと考えられる。
- C. PEM による一体型回収

【設計上の課題】

- ◆ PEM の設計要件の設定: PEM の内部については、原則レファレンス概念(原子力発電 環境整備機構, 2018)の人工バリア仕様(オーバーパックの材質・仕様、ベントナイト緩 衝材の材質・仕様)を踏襲している。設計が必要となるのは PEM 容器となる。PEM の 定置・回収方法、回収可能性維持期間中の健全性を考慮して設計要件を設定する必要が ある。設計要件が決まれば設計手法は存在する。
- ◆ PEM 容器に外周に装着するスペーサーの材質選択と装着方法、要求性能の設定:PEM の定置・回収時にケーシングとのスペースを確保するためのスペーサー設計への要件(材質、機能、装着方法)を決定する必要がある。フランスの ANDRA が横置き定置の場合のオーバーパックにセラミック製のスペーサーを設計しているが(ANDRA, 2018)、条件が異なる。堅置きの条件を考慮した場合、類似技術は存在するが新たに開発が必要となる。

【施工上の課題】

- ◆ PEM の竪置き状態で実規模製作:PEM の実物大での製作に関しては、これまで横置き 状態で実施されてきた。あらかじめスペーサーを装着した PEM 容器を竪に置き、内部 にベントナイトとオーバーパックを定置し PEM を製作する試験を行う。技術は存在す るが実施した例はない。
- ◆ スペーサーの装着技術と耐力確認:スペーサーとして腐食しないセラミックを選定した 場合、設計仕様に基づき PEM 容器(鋼製)に装着し、装着部の耐力確認をする必要が

ある。要素技術は存在するがシステム技術として開発が必要となる。

F. 鋼製プラグの導入

【設計上の課題】

- ◆ 組立・解体が容易な鋼製力学プラグの概念構築、設計要件の設定:狭隘部で力学プラグ を組立、解体する場合、どのような仕組みが相応しいかの概念構築からスタートする必 要がある。本検討では、事例としてパラボラ型の鋼製ユニットを組み立てるアイデアを 提示した。次に構造体としてプラグを設計するための性能要件を設定し、組立・解体す る装置の設計を行う。要素技術は存在しない。
- 【施工上の課題】
  - ◆ 鋼製プラグを組立・解体する装置の開発が必要である。
- G. 高耐久性支保の適用

【設計上の課題】

- ◆ 処分孔の支保機能も有するケーシングの設計要件の設定:支保材としてまたガイド材として求められる機能を設計要件として設定する。設計手法は存在する。
- 【施工上の課題】
  - ◆ 設計仕様のケーシングの製作・継手部の耐力確認:ケーシングは、狭隘空間で掘削に伴いつなぎながら挿入していくため、継手方式の簡略化を図る必要がある。狭隘部での継手技術開発の観点から、要素技術は存在するが組み合わせたシステムとして開発が必要である。
- S. 回収動作が単純な定置方式と装置の採用

【設計上の課題】

- ◆ 狭隘空間で、重量 PEM を吊り上げる装置の設計要件(目標性能)の設定:例えば、図のような PEM の場合、その重量は約 37 トンであることから、PEM を吊り下げ・吊り上げるために必要となる動力システム、動力システムと PEM を支える装置構造に求められる設計要件を設定する必要がある。類似技術は存在するが適用に当たっては開発が必要と考えられる。
- 【施工上の課題】
  - ◆ 設計した仕様の装置の製作、動作確認、性能確認:室内に類似環境を再現し、試作した 装置を用いて重量 PEM を回収する装置の動作確認と性能(動力システム、装置構造耐 力等)の確認試験を段階的に進める必要がある。
- T. 動作と動線が単純となるレイアウト

【設計上の課題】

- ◆ 作業坑道と主要坑道交差部での重量 PEM の積替え装置の設計要件の設定:回収された PEM は順次作業坑道から搬出され、主要坑道の交差部で異なる向きの台車に積みかえ るシステムを想定している。レール軌道を含め、システム設計に求められる要件を設定 する。設計技術は存在すると考えられる。
- ◆ 重量 PEM 搬送時の制動システムの設計要件の設定:重量 PEM をレール軌道で搬送す る場合、制動システムに求められる機能設定が作業安全確保のためにも必要となる。設 計技術は存在すると考えられる。

【施工上の課題】

- ◆ 重量 PEM 積替え装置の試作、動作確認:設計仕様に従い装置を試作し、動作確認の試 験を行う必要がある。要素技術は存在するがシステムとしての技術開発が必要となると 考えられる。
- ◆ 搬送装置の制動システムの試作、動作確認:重量 PEM をレール軌道で搬送することを イメージした場合、稼働方式とともに、制動システムの設計が重要となることから搬送 装置として具備すべき性能要件の設計が必要となる。

# 2.2 概念設計案 PEM-1H1 の技術開発課題

概念設計案 PEM-1H1 "水平処分孔複数 PEM 横置き定置方式"を対象として、工学的方策を 実現するために抽出した設計と施工上の課題を表に整理した。概念設計案 PEM-1H1 で考慮する 工学的方策は、概念設計案 PEM-1V1 "鉛直処分孔複数 PEM 竪置き定置方式"と同様であるが、 定置形態が異なることにより、実現性に向けて新たな課題が存在すると想定される。そこで、設 計・施工上の課題を抽出して課題の特徴を表 2 に整理した。表中、下線を引いた箇所は PEM-1V1 との違いを意味する。

工学的方策	設計上の課題	備考	施工上の課題	備考
<ul> <li>A. 隙間充填を必要としない円形小断面定置坑道</li> <li>E. 定置坑道の短尺化</li> <li>J. 小断面坑道に PEMの複数定置</li> <li>U. 大断面作業坑道と小断面定置坑道の組合せ</li> </ul>	<ul> <li>・処分孔の設計要件の 設定、仕様の具体化</li> <li>・掘削とケーシング推 進を組み合わせた 機械への要求機能・ 性能の設定</li> </ul>	<ul> <li>・設計手法 は存在</li> </ul>	・処分孔掘削・ケーシン グの推進機械の製 作、動作確認、性能確 認	<ul> <li>・個別の掘</li> <li>削、推進</li> <li>技術は存</li> <li>在</li> </ul>
<ul> <li>C. PEM による一体型回収</li> <li>P. PEM 容器に耐腐食性材料の使用</li> <li>Q. PEM 容器の厚さを増加</li> </ul>	<ul> <li>PEM の設計要件の 設定、仕様の具体化</li> <li><u>潤滑部品</u>への要求 機能・性能の設定、 仕様の具体化、</li> <li>PEM 容器への装着 方法</li> </ul>	<ul> <li>・設計手法 は存在</li> <li>・ ANDRA と条件が 異なる (ANDRA , 2018)</li> </ul>	<ul> <li>・<u>潤滑部品</u>を装着する <b>PEM</b> の実規模製作</li> <li>・実規模 PEM への <u>潤</u> <u>滑部品</u>の装着技術と 耐力確認     </li> </ul>	・ ANDRA と条件が 異 な る (ANDR A, 2018)
<ul> <li>F. 撤去容易な力学プラ グの導入</li> </ul>	<ul> <li>・組立・解体が容易な プラグ構造の概念 構築、設計要件(装 置設計を含む)の設 定</li> </ul>	<ul> <li>・概念から 構築する 必要あり</li> </ul>	<ul> <li>・容易に組立・解体できるプラグの試作と装置の開発・試作・動作確認</li> </ul>	<ul> <li>・概念から 構築する 必要あり</li> </ul>
G. 高耐久性支保の適用 O. 止水機能を有する支 保工の採用	<ul> <li>・処分孔の支保を兼ね るケーシング材へ の設計要件(接手構 造も含む)の設定</li> </ul>	<ul> <li>・設計手法 は存在</li> </ul>	・ケーシングの製作、接 手部の耐力確認(設 置技術は A.で対応)	<ul> <li>・実規模装 置による 動作確認</li> </ul>
S. 回収動作が単純な定 置方式と装置の採用	<ul> <li>・ 狭隘空間で重量</li> <li>PEMを引き出し、</li> <li>搬出する装置の設</li> <li>計要件の設定</li> </ul>	<ul> <li>・設計手法 は存在</li> </ul>	・装置の製作、動作確 認、性能確認	<ul> <li>動力部と フレーム</li> <li>部の耐力</li> <li>確認</li> </ul>
<b>T.</b> 動作と動線が単純と なるレイアウト	<ul> <li>・作業・物流を考慮したレイアウトの最適化</li> <li>・重量 PEM の方向転換装置、搬送制御システム設計への要求機能・設計要件の設定</li> </ul>	<ul> <li>・設計手法 は存在</li> </ul>	<ul> <li>・重量 PEM 積替え装置の試作、動作確認</li> <li>・搬送制御システムの 試作、動作確認</li> </ul>	・一連の装 置・シス テムとし て構築

表 2 概念設計案 PEM-1H1 の設計・施工に係る技術開発課題の整理

工学的方策ごとの課題を整理した結果を以下に示す。

- A. 隙間充填を必要としない円形小断面(処分孔)定置 【設計上の課題】
  - ◆ 処分孔仕様設計への設計要件の設定(設計技術は存在):水平処分孔では、回収時の容易 性向上のために複数 PEM を、隙間充填を必要としない状態で定置することを目標として いる。一方、回収しない場合は、この隙間の存在は安全確保上問題となる可能性があるこ とから、PEM に内蔵されるベントナイトの膨潤により隙間が充填される必要がある。処 分孔の仕様設計では、以下の観点からの検討が求められる。
    - ・PEM内蔵ベントナイトの膨潤で均質に充填できるスペース
    - ・水平処分孔内への重量PEMの推進・牽引に必要なスペース
    - ・ガイドとなるケーシング材設置の精度と耐久性(施工対応にも関係)
    - 設計手法は存在するが、適用された例は見当たらない。

【施工上の課題】

- ◆ 掘削装置とケーシング挿入装置の試作と動作、性能確認:処分孔には重量 PEM (例として、 PEM の場合,約 37t)を円滑に推進・牽引するため、ガイドとなる高耐久性ケーシングを 掘削と並行して設置する。ケーシングに期待する役割を考慮した処分孔掘削とケーシング 設置技術(定置精度の確認)の実証試験が必要となる。
  - Aの場合:掘削時の孔壁安定性確保の支保は必要とせず、ケーシングは、ガイドとしての 機能のみを考慮する場合、要素技術は存在する。
  - Bの場合:ケーシングに孔壁安定の支保としての役割と PEM のガイドとしての機能を考慮する場合は、新たな装置製作が必要となる。
  - Cの場合:掘削時の孔壁安定は別途の支保材で確保し、ケーシングでは、ガイドとしての 機能のみを考慮する場合は、要素技術は存在する。



図 1 水平処分孔の掘削とケーシング材挿入イメージ

C. PEM による一体型回収

【設計上の課題】

- ◆ PEM 容器の設計要件の設定:処分孔への横置き定置を考慮した PEM 容器設計への要 求性能の設定。PEM 容器に長期耐久性と遮水性が要求される場合、材料の選定、厚さの 増加などの対応が考えられる。これらの要件により設計は変化するが、設計手法は存在 する。
- ◆ PEM に装着する潤滑部品の材料選択と設計要件の設定:水平処分孔に重量 PEM を推

進・牽引するために、PEM 容器に装着する潤滑部品の材料選択と装着構造等設計への 要求性能を設定する必要がある。よって、課題の分類としては、フランス ANDRA が類 似の取り組み(ANDRA, 2018)をしているが荷重条件などが大きく異なる。例えば、セラ ミックランナーに求められる設計要件としては、耐力、低摩擦性、長期耐久性等が挙げ られる。また、セラミックランナーと PEM 容器との接合に求められる設計要件として は、接合強度等が求められる。

【施工上の課題】

- ◆ 設計仕様に従い PEM 試作、潤滑部品装着の後、ケーシング挿入などで性能を確認:上図にあるような PEM を試作し、ケーシング内に推進・牽引する動作による潤滑部品と装着部位の健全性を確認する必要がある。
- G. 高耐久性支保の適用

【設計上の課題】

◆ 処分孔の支保機能も有するケーシングの設計要件の設定:支保材としてまたガイド材として求められる機能を設計要件として設定する。設計手法は存在すると考えられる。

【施工上の課題】

◆ 設計仕様のケーシングの製作・継手部の耐力確認:ケーシングは、狭隘空間で掘削に伴いつなぎながら挿入していくため、継手方式の簡略化を図る必要がある。

S. 回収動作が単純な定置方式と装置の採用

【設計上の課題】

◆ 狭隘空間で重量 PEM を推進・牽引する装置への要求性能の設定:水平処分孔に重量 PEM を定置・回収するための装置については、先ず概念構築から開始する必要がある。フランス の ANDRA が考案した装置(ANDRA, 2018)では、扱う重量が大きいことからそのまま適 用することは困難であると考えられる。



図 2 水平ケーシング内の PEM を回収する装置のイメージ

【施工上の課題】

◆ 設計された装置の試作、動作確認、性能確認:実物大の環境で、ケーシング内に重量 PEM を定置・回収する装置の動作確認から開始し、装置の性能を確認しトラブル時(スタッキン グ等)への対応策までの技術を段階的に開発していく。例えば、下図に示すように ANDRA では開発した装置(自走式定置装置)の性能を確認する実物大の試験を室内で実施してい る。

- T. 動作と動線が単純となるレイアウト
- 【設計上の課題】
  - ◆ 作業坑道と主要坑道交差部での重量 PEM の積替え装置の設計要件の設定:回収された PEM は順次作業坑道から搬出され、主要坑道の交差部で異なる向きの台車に積みかえ るシステムを想定している。レール軌道を含め、システム設計に求められる要件を設定 する。設計技術は存在すると考えられる。
  - ◆ 重量 PEM 搬送時の制動システムの設計要件の設定:重量 PEM をレール軌道で搬送す る場合、制動システムに求められる機能設定が作業安全確保のためにも必要となる。設 計技術は存在すると考えられる。
- 【施工上の課題】
- ◆ 重量 PEM 積替え装置の試作、動作確認:設計仕様に従い装置を試作し、動作確認の試験を行う必要がある。要素技術は存在するがシステムとしての技術開発が必要となる。
- ◆ 搬送装置の制動システムの試作、動作確認:重量 PEM をレール軌道で搬送することを イメージした場合、稼働方式とともに、制動システムの設計が重要となることから搬送 装置として具備すべき性能要件の設計が必要となる。。

# 2.3 概念設計案 PEM-22 の技術開発課題

概念設計案 PEM-22"大断面坑道複数ガラス固化体格納 PEM 横置き定置方式"を対象として、 設計と施工上の課題に対して、特徴を表 3に整理した。

工学的方策	設計上の課題	備考	施工上の課題	備考
<ul> <li>B. 大断面坑道定置</li> <li>E. 定置坑道の短尺化</li> <li>G. 高耐久性支保工等の 適用</li> <li>O. 止水機能を有する支 保工の採用</li> <li>R. 大断面坑道に PEM の 集中定置</li> <li>U. 大断面作業坑道と小 断面定置坑道の組合せ</li> </ul>	<ul> <li>・合理的な PEM の定置 パターン等を考慮し た大断面坑道の設計 要件、仕様の具体化</li> <li>・集中定置による熱的 影響の緩和策の検討</li> </ul>	<ul> <li>・設存見す</li> <li>・設存見す</li> <li>・定しる</li> <li>・定しる</li> <li>・にの</li> <li>・</li> <li>・<td><ul> <li>・矩形 PEM のレイア</li> <li>ウト設計から断面</li> <li>積が大きくなった</li> <li>場合の大断面坑道</li> <li>の施工(岩盤特性</li> <li>に依存)</li> </ul></td><td><ul> <li>レイアウ</li> <li>トを</li> <li>し断</li> <li>減</li> </ul></td></li></ul>	<ul> <li>・矩形 PEM のレイア</li> <li>ウト設計から断面</li> <li>積が大きくなった</li> <li>場合の大断面坑道</li> <li>の施工(岩盤特性</li> <li>に依存)</li> </ul>	<ul> <li>レイアウ</li> <li>トを</li> <li>し断</li> <li>減</li> </ul>
F. 撤去容易な埋め戻し 材の選択	<ul> <li>・埋め戻し部位設計への要求機能・性能の設定、撤去が容易な埋め戻し材の選定</li> </ul>	<ul> <li>・設計手</li> <li>・設計手</li> <li>・設計</li> <li>・設計</li> <li>・設計</li> <li>・設計</li> <li>・設計</li> <li>・設計</li> <li>・設計</li> <li>・設計</li> </ul>	・埋め戻し材の施工 方法(材料運搬・装 置)の決定、動作確 認と施工品質確認	<ul> <li>・実証試験 が必要</li> </ul>
F. 撤去容易な力学プラグ の導入	<ul> <li>・組立・解体が容易なプ</li> <li>ラグ構造の概念構</li> <li>築、設計要件(装置設計を含む)の設定</li> </ul>	<ul> <li>概念から 構築する 必要あり</li> </ul>	<ul> <li>・容易に組立・解体で</li> <li>きるプラグの試作</li> <li>と装置の開発・試</li> <li>作・動作確認</li> </ul>	<ul> <li>・概念から 構築する 必要あり</li> </ul>
<ul> <li>I. 複数ガラス固化体を格納する PEM 容器</li> <li>C. PEM による一体型回収</li> <li>N. 矩形 PEM の採用</li> <li>P. PEM 容器に耐腐食性材料の使用</li> <li>Q. PEM 容器の厚さを増加</li> </ul>	<ul> <li>・矩形 PEM の設計要件の設定、仕様の具体化</li> <li>・矩形 PEM の軽量化</li> </ul>	<ul> <li>・設計手法 は存在</li> </ul>	<ul> <li>・軽量化を含めた矩</li> <li>形 PEM の試作・健</li> <li>全性確認(吊下げ</li> <li>時、持ち上げ時)</li> </ul>	・試作し、性 能を確認
S. 回収動作が単純な定 置方式と装置の採用	<ul> <li>・重量 PEM を定置・回</li> <li>収・搬出する装置へ</li> <li>の要求機能・性能の</li> <li>設定</li> </ul>	<ul> <li>・類似性置の</li> <li>り、適用</li> <li>酸</li> </ul>	・装置の試作、動作確 認、性能確認	<ul> <li>・試作・動作</li> <li>確認が必</li> <li>要</li> </ul>
T. 動作と動線が単純とな るレイアウト	<ul> <li>・作業・物流を考慮した レイアウトの最適化</li> <li>・重量 PEM の方向転換 装置、搬送制御シス テム設計への要求機 能・設計要件の設定</li> </ul>	<ul> <li>・類似装置、</li> <li>設計手法</li> <li>は存在</li> </ul>	<ul> <li>・重量 PEM 積替え装 置の試作、動作確 認</li> <li>・搬送制御システム の試作、動作確認</li> </ul>	・一連の装 置・シス テムとし て構築

表 3 概念設計案 PEM-22 の設計・施工に係る技術開発課題の整理

工学的方策ごとの課題を整理した結果を以下に示す。

B. 大断面坑道定置

【設計上の課題】

- ◆ 複数のガラス固化体を格納したPEMを集中定置する大断面坑道は、熱影響や定置・回 収時のPEMの物流・動線などを考慮した合理的な断面とする必要がある。また、PEM の集中定置に対する熱影響の緩和策として、埋め戻し材などを入れたバッファー容器を PEMと共に定置することが考えられる。坑道断面はこれらの定置も考慮した仕様にな るため、熱影響を考慮したPEMおよびバッファー容器の定置パターンの検討、それら の物流と動線を考慮した大断面坑道の設計要件の設定、仕様の具体化などを検討する必 要がある。設計技術は存在すると考えられる。
- 【施工上の課題】
  - ◆ 矩形 PEM のレイアウト設計から、大断面坑道の面積が大きくなり、堆積岩の特性によっては施工上の困難さが増加する:現在の PEM-22 の大断面坑道の面積は、熱的制約から PEM の定置間隔を空け、かつバッファー容器を定置している。これにより断面積が大きくなった場合、処分深度と堆積岩の強度特性によっては、施工が困難となる可能性があるため、検討が必要である。
- F'. 埋戻し材撤去作業負荷の低減

【設計上の課題】

- ◆ 撤去が容易な埋戻し材の選定と埋戻し部位の要求性能の設定:大断面坑道では、下部に 転圧を必要としないベントナイトペレットを充填し、上部に粒度調整した掘削発生ずり とベントナイトの混合材を用いることをイメージしている。これらの埋戻し材に要求さ れる性能を設定する必要があるが、これまでの検討によって、低透水性を確保できる見 通しはあり、仕様を決めることができると考えられる。設計技術は存在すると考えられ る。
- 【施工上の課題】
  - ◆ 埋戻し材の施工方法(材料運搬・装置)の決定、動作確認と施工品質確認:現在イメージしている埋戻し材の施工方法は既に多く適用されている技術であり、開発要素は、他の課題と比べると少ないと考えられ、実際に適用して施工品質を確認することが課題となる。
- F. 鋼製プラグの導入

【設計上の課題】

◆ 組立・解体が容易な鋼製力学プラグの概念構築、設計要件の設定:狭隘部で力学プラグ を組立、解体する場合、どのような仕組みが相応しいかの概念構築からスタートする必 要がある。本検討では、事例としてパラボラ型の鋼製ユニットを組み立てるアイデアを 提示した。次に構造体としてプラグを設計するための性能要件を設定し、組立・解体す る装置の設計を行う必要がある。

【施工上の課題】

◆ 鋼製プラグを組立・解体する装置の開発については、要素技術は存在しないため、新た に開発が必要となる。 I. 複数ガラス固化体格納する PEM 容器

【設計上の課題】

- ◆ 矩形 PEM 設計への要求性能の設定:複数廃棄体を格納する矩形 PEM 容器の設計のための要求性能を設定する必要がある。
- ◆ 矩形 PEM の軽量化に向けての設計要件の設定:内蔵するベントナイト仕様、オーバー パック仕様の見直しについては、技術・知見は存在するが適用された例はないため、開 発が必要である。
- 【施工上の課題】
  - ◆ 矩形 PEM の試作:実規模で矩形 PEM を試作し、定置・回収及び搬送時に作用する荷 重を再現し、荷重作用時の容器の健全性を確認する必要がある。
- S. 回収動作が単純な定置方式と装置の採用

【設計上の課題】

◆ 重量 PEM を定置・回収する装置設計への要求性能の設定:想定している矩形 PEM の場合、その重量は約70トンとなる。このような重量を持つ矩形 PEM を坑道に横置き定置し・回収するフォークリフトなどの装置は存在しないことから装置の設計への要求性能の設定が必要となる。類似装置は存在するが新たに開発が必要となる。また、定置・回収に天井クレーンを用いる場合には、クレーン走行レール架設部位への設計要件、クレーン設計の要求機能の設定が必要となる。類似技術は存在するが適用するには開発が必要となる。

【施工上の課題】

- ◆ 設計された装置の試作、動作確認、性能確認:設計できれば試作は可能と考えられる。 類似技術は存在するが、適用するには開発が必要となる。
- T. 動作と動線が単純となるレイアウト

【設計上の対応】

- ◆ 作業坑道と主要坑道交差部での重量 PEM の積替え装置の設計要件の設定:回収された PEM は順次作業坑道から搬出され、主要坑道の交差部で異なる向きの台車に積みかえ るシステムを想定している。レール軌道を含め、システム設計に求められる要件を設定 する。設計技術は存在すると考えられる。
- ◆ 重量 PEM 搬送時の制動システムの設計要件の設定:重量 PEM をレール軌道で搬送す る場合、制動システムに求められる機能設定が作業安全確保のためにも必要となる。設 計技術は存在すると考えられる。

【施工上の課題】

- ◆ 重量 PEM 積替え装置の試作、動作確認:設計仕様に従い装置を試作し、動作確認の試験を行う必要がある。要素技術は存在するがシステムとしての技術開発が必要となると 考えられる。
- ◆ 搬送装置の制動システムの試作、動作確認:重量 PEM をレール軌道で搬送することを イメージした場合、稼働方式とともに、制動システムの設計が重要となることから搬送 装置として具備すべき性能要件の設計が必要となる。類似技術は存在するが適用するに は開発が必要となる。

# 参考文献

ANDRA, Emplacement concept for French vitrified wastes in long horizontal micro-tunnel, LUCOEX MID-TERM WORKSHOP Montpellier, 25th October, 2018.

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.

# 付属書 4-1 レファレンスの建設・操業工程の分析

(タイムラインの設定の条件整理)

# 1. はじめに

回収可能性の維持に伴う影響の定量化手法の整備において、時間・空間スケールの検討の出発 点とするため、新第三紀堆積岩類地下 500m に建設される処分孔・竪置き・ブロック方式(パネ ル型)の建設・操業工程の分析を実施した。

# 1.1 処分場を閉鎖するまでの期間の詳細工程

# 1.1.1 タイムライン設定の条件整理

各坑道の延長、処分坑道1本当たりのオーバーパック定置数は包括的技術報告書(NUMO, 2021)に準拠する(表1、表2)。なお、本委託業務では、精密調査段階に建設される地下調 査施設の一部を処分場に転用することは考慮しない。

		パネル型		デッドエンド型			
坑 道		竪置き・ブロックフ		方式 横置き・PEM 方式		式	
		深成岩類	新第三紀 堆積岩類	先新第三紀 堆積岩類	深成岩類	新第三紀 堆積岩類	先新第三紀 堆積岩類
処分	延 長 [km]	194	285	181	138	138	137
坑道	掘削量 [×10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ]	444	613	425	258	311	255
	延 長 [km]	166	166	166	—	—	—
处 <sub>万</sub> 孔	掘削量 [×10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ]	64	64	64	—	—	_
主要	延 長 [km]	13	20	—	_	_	_
坑道	掘削量 [×10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ]	33	51	—	—	—	—
連絡	延 長 [km]	13.6	16.7	6.4	4.9	5.8	5.4
坑道	掘削量 [×10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ]	78	123	36	28	43	31
アクセス	延 長 [km]	10.7	5.4	10.6	10.7	5.4	10.6
斜坑	掘削量 [×10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ]	61	39	60	61	40	60
アクセス	延 長 [km]	6.0	3.0	5.0	5.0	2.5	5.0
立坑	掘削量 [×10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ]	25	13	21	21	10	21
∕⊃⊒L	延 長 [km]	403	497	370	159	152	158
ЪЦЦ.	掘削量 [×10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ]	705	903	606	368	404	367

表 1 各坑道の延長

表 2 処分坑道の仕様

岩種	ガラス固化体を 封入したオーバ ーパック定置数 (1 区画当り)	処分坑道本数 (1 区画当り)	ガラス固化体を封入した オーバーパック定置数 (処分坑道1本当り)	処分坑道延長 (1 区画当り)
深成岩類	6,672 体	48本	139本	672.7 m
新第三紀堆積岩類	6,681 体	51本	131 体	925.8 m
先新第三紀堆積岩類 (坑道長最長のケース)	5,000 体	20本	250 体	1,110 m

# (1) 施工速度、稼働日数の設定

建設、操業、閉鎖の各作業における施工速度を表3のように設定した。

作業	旅 (深瓦	西工速度 戈岩を対象)	施 (速度係数	工速度 数 <b>※</b> 1を考慮)	備考
処分坑道建設	4.0	m/方	2.80	m/方	₩2
処分孔建設	0.5	孔/方	0.35	孔/方	₩2
主要坑道建設	2.5	m/方	1.75	m/方	₩2
連絡坑道建設	1.5	m/方	1.05	m/方	₩2
アクセス立坑建設	2.0	m/方	1.40	m/方	₩2
アクセス斜坑建設	2.0	m/方	1.40	m/方	₩2
力学プラグ設置	10	日/箇所	10	日/箇所	₩3、₩4
処分坑道埋戻し準備	3	日/回	3	日/回	₩3、₩4
OD 空墨·經漸壯聖墨	5	体/日	5	体/日	₩3、₩4
UI 化电·破倒附放电	1	体/日/坑道	1	体/日/坑道	₩3、₩4
処分坑道埋戻し	6.66	m/方	6.66	m/方	₩3、₩4

表 3 施工速度

※1:深成岩類から新第三紀堆積岩類への補正は速度係数=0.7を用いる。

※2:トンネル掘削工事における実績と比較した結果、「m/日」で示された建設速度は「m/方」に 相当すると判断し、「m/日」および「孔/日」を「m/方」および「孔/方」と読み替えた。

※3:包括的技術報告書(NUMO, 2021)より設定。

※4:岩種に依存しないため、岩種の違いを考慮する速度係数による補正を行わない。

稼働日数は、以下を基本とする。また、OP 定置・緩衝材設置作業は昼勤のみでの施工、それ 以外の作業は、昼夜施工を基本とする。

OP 定置・緩衝材設置作業: 200 日/年

上記以外の作業 : 276 日/年(23 日/月)

#### (2) 各作業の所要日数の算定

# 加分区画①建設まで

# ① アクセス斜坑

アクセス斜坑は、地上から片押し掘削とする。施工体制は、1パーティーでの昼夜2交代制 とする。アクセス斜坑建設の所要日数算定結果を表4に示す。

•••			21.7 = 11.7 1.7
パーティー数	1	パーティー	
方数	2	方/日	
坑道延長	5400	m	
施工速度	1.40	m/方	
所要日数	1929	日	
所要年数 (暦日換算)	7.0	年	

表 4 アクセス斜坑建設の所要日数算定結果

#### ② アクセス立坑-連絡坑道-処分区画①

アクセス立坑は、地上から6本同時に掘削を開始する。施工体制は、1パーティー/立坑(全 6パーティー)での昼夜2交代とする。

アクセス立坑完成後、連絡坑道のうち処分区画①建設時に動線および換気経路として必要と なる坑道(「連絡坑道①」と称する)を優先的に建設する。ただし、処分区画①建設に必要な 連絡坑道の延長は明示されていないため、連絡坑道①の延長を連絡坑道総延長の1/3と仮定す る。連絡坑道①は4本の立坑と接続しているため、施工体制は4パーティーでの昼夜2交代 とする。

連絡坑道①の完成後、残りの連絡坑道(「連絡坑道②」と称する)と処分区画①を並行して 建設する。連絡坑道②の施工体制は、引き続き4パーティーでの昼夜2交代制とする。

処分区画①は、主要坑道を2パーティーでの昼夜3交代制で施工し、主要坑道の半分が完成 (平行四辺形の二辺が完成)した時点で処分坑道の建設を開始する。処分坑道は片押し掘削と し、5パーティー(1パーティ/坑道)の昼夜3交代制で施工する。次に、処分坑道が5本完成 した時点で処分孔の建設を開始する。処分孔は5パーティー(1パーティ/坑道)での昼夜3交 代制で施工する。

アクセス立坑、連絡坑道①、連絡坑道②、処分区画①(主要坑道、処分坑道、処分孔)建設 の所要日数算定結果を表 5~表 10 に示す。

パーティー数	1	パーティー	
方数	2	方/日	
坑道延長	500	m	
施工速度	1.40	m/方/パーティー	
所要日数	179	日	
所要年数 (暦日換算)	0.7	年	

表 5 アクセス立坑建設の所要日数算定結果(立坑1本当たり)

表	6	連絡坑道①建設の所要日数算定結果

パーティー数	4	パーティー	
方数	2	方/日	
坑道延長	5567	m	16.7km 𝕂 1/3
施工速度	1.05	m/方/パーティー	
所要日数	663	日	
所要年数 (暦日換算)	2.5	年	

表 7 連絡坑道②建設の所要日数算定結果

パーティー数	4	パーティー	
方数	2	方/日	
坑道延長	11133	m	16.7km 𝕂 2/3
施工速度	1.05	m/方/パーティー	
所要日数	1326	日	
所要年数 (暦日換算)	4.9	年	

表 8 主要坑道建設の所要日数算定結果(処分区画①)

パーティー数	2	パーティー	
方数	2	方/日	
坑道延長	3333	m	20km 🕫 1/6
施工速度	1.75	m/方/パーティー	
所要日数	477	日	
所要年数 (暦日換算)	1.8	年	

表 9 処分坑道建設の所要日数算定結果(処分区画①)

パーティー数	5	パーティー	
方数	3	方/日	
坑道延長	925.8	m	
施工速度	2.80	m/方/パーティー	
武田口粉	111	日/坑道	
川安口奴	1221	日/区画	*
所要年数	0.41	年/坑道	
(暦日換算)	4.5	年/区画	

※ 5パーティーが5本の処分坑道を並行して建設する。この場合、処分坑道が51本あるため、5パーティーのうち4パーティーは10本の処分坑道を建設し、1パーティーは11本の処分坑道を建設する。このため、1区画当たりの所要日数は、処分坑道1本当たりの建設日数に11を乗じた日数となる。

パーティー数	6	パーティー	
方数	3	方/日	
孔数	131	孔/坑道	
施工速度	0.35	孔/方/パーティー	
正面口粉	125	日/坑道	
川安日奴	1375	日/区画	*
所要年数	0.46	年/坑道	
(暦日換算)	5.0	年/区画	

表 10 処分孔建設の所要日数算定結果(処分区画①)

ここで、アクセス立坑建設開始から処分区画①建設完了までの工程は、以下のとおりであり、 設定した施工体制で概ね同時期に建設が完了することになる。

アクセス立坑→連絡坑道①→主要坑道→処分坑道→処分孔:0.7+2.5+1.8/2+0.41+5.0=9.5 年 アクセス立坑→連絡坑道①→連絡坑道② : 0.7+2.5+4.9=8.1 年

#### 2) 処分区画2~6の建設

処分区画①までの建設で連絡坑道は全線で建設が完了しているため、処分区画②~⑥の建設 時は、主要坑道、処分坑道、処分孔を建設すればよい。

主要坑道を2パーティーでの昼夜2交代制で施工し、主要坑道の半分が掘削を終えた時点 で処分坑道の建設を開始する。処分坑道は5パーティーでの昼夜3交代制で施工する。次に、 5本の処分坑道が完成した時点で、処分孔の建設を開始する。処分孔は5パーティーでの昼夜 3交代制で施工する。

処分区画②~⑥の主要坑道、処分坑道、処分孔の施工体制は処分区画①と同様であるため、 建設の所要日数も同じであるが、表 11~表 12に再掲する。

パーティー数	2	パーティー	
方数	2	方/日	
坑道延長	3333	m	20km Ø 1/6
施工速度	1.75	m/方/パーティー	
所要日数	477	日	
所要年数 (暦日換算)	1.8	年	

表 11 主要坑道建設の所要日数算定結果(処分区画②~⑥)

<sup>※ 5</sup>パーティーが5本の処分坑道に別れて処分孔を建設する。この場合、処分坑道が51本 あるため、5パーティーのうち4パーティーは10本の処分坑道で処分孔を建設し、1パ ーティーは11本の処分坑道で処分孔を建設する。このため、1区画当たりの所要日数は、 処分坑道1本当たりの建設日数に11を乗じた日数となる。

表	12	処分坑道建設の所要日数算定結果	(処分区画2~6)

パーティー数	<b>5</b>	パーティー	
方数	3	方/日	
坑道延長	925.8	m	
施工速度	2.80	m/方/パーティー	
武田口教	111	日/坑道	
川安日奴	1221	日/区画	※表 9 参照
所要年数	0.41	年/坑道	
(暦日換算)	4.5	年/区画	

表 13 処分孔建設の所要日数算定結果(処分区画②~⑥)

パーティー数	6	パーティー	
方数	3	方/日	
孔数	131	孔/坑道	
施工速度	0.35	孔/方/パーティー	
武田口教	125	日/坑道	
川安日剱	1375	日/区画	※表 10参照
所要年数	0.46	年/坑道	
(暦日換算)	5.0	年/区画	

ここで、処分区画②~⑥の建設完了までの工程は、以下のとおりである。 主要坑道→処分坑道→処分孔:1.8/2+0.41+5.0=6.3 年

#### 3) 操業

①オーバーパック定置・緩衝材設置

オーバーパック定置・緩衝材設置作業は、表 3 に示したとおり、1 日 5 体(5 本の処分坑道 で並行作業を行い、1 体/坑道)の施工速度で作業する。

オーバーパック定置・緩衝材設置の所要日数算定結果を表 14 に示す。

パーティー数	5	パーティー	
方数	1	方/日	
処分孔数	131	孔/坑道	
施工速度	1	孔/方/パーティー	
武田口粉	131	日/坑道	
川安日剱	1441	日/区画	*
所要年数	0.66	年/坑道	200 日/年
(暦日換算)	7.3	年/区画	200 日/平

表 14 OP 定置・緩衝材設置の所要日数算定結果

※ 5パーティーが 5本の処分坑道で並行作業する。この場合、処分坑道が 51本あるため、5パーティーのうち4パーティーは 10本の処分坑道、1パーティーは 11本の処分坑道を担当する。このため、 1区画当たりの所要日数は、処分坑道1本当たりの建設日数に 11を乗じた日数となる。

#### ② 処分坑道埋め戻し・カ学プラグ設置

包括的技術報告書(NUMO, 2021)より、処分坑道埋戻しは坑道単位で行う。オーバーパック定置・緩衝材設置作業が全て完了した処分坑道の端部に力学プラグを設置し、その後処分 坑道の埋め戻し、最後にもう一方の端部に力学プラグを設置する。オーバーパック定置・緩衝 材設置作業を5パーティーで行うため、オーバーパック定置・緩衝材設置作業が完了した処分 坑道を順次埋め戻していけるように、処分坑道埋戻し・力学プラグ設置作業も5パーティーで 行い、各パーティーが5本の処分坑道に別れて作業する。

処分坑道埋戻し作業の所要日数算定結果を表 15 に示す。

パーティー数	5	パーティー			
方数	1	方/日			
孔数	925.8	m/坑道			
施工速度	6.66	m/方/パーティー			
所要日数	140	日/坑道			

表 15 処分坑道埋め戻し作業の所要日数算定結果

カ学プラグ設置・養生、埋め戻し準備の日数を考慮すると、処分坑道埋戻し・カ学プラグ設 置作業の所要日数は表 16 のようになる。

	力学プラグ設置	10	日/箇所	埋め戻し始点側
	埋め戻し準備	3	日/回	
<b>正</b> 一 粉	処分坑道埋戻し	140	日/坑道	
川安口级	力学プラグ設置	10	日/箇所	埋め戻し終点側
	コンクリート養生	28	日	終点側は工程に含めない
	合計	16	3+28 日	
所要年数(暦日換算)		0.68	年/坑道	
		7.5	年/区画	*

表 16 処分坑道埋戻し・力学プラグ設置作業の所要日数算定結果

※ 5パーティーが 5本の処分坑道で並行作業する。この場合、処分坑道が 51本あるため、5パーティ ーのうち4パーティーは 10本の処分坑道、1パーティーは 11本の処分坑道を担当する。このため、 1区画当たりの所要日数は、処分坑道 1本当たりの建設日数に 11を乗じた日数となる。

ここで、オーバーパック定置・緩衝材設置から処分坑道埋戻し・力学プラグ設置までの工程 は、以下のとおりである。

オーバーパック定置・緩衝材設置→処分坑道埋戻し・力学プラグ設置:0.66+7.5=8.2 年

## 4) 閉鎖

閉鎖措置の認可取得後に閉鎖作業に入ることを想定する。まず、各処分区画の主要坑道を埋 め戻す。連絡坑道やアクセス斜坑、アクセス立坑には、止水プラグが設置されるが、位置、数 が明確になっていないため、ここでは、以下のように設定する。

アクセス斜坑:1箇所

アクセス立坑:各1箇所

連絡坑道 :2箇所(アクセス斜坑との接続部付近)

坑道の埋め戻しと止水プラグの施工速度を設定する必要があるが、参考にできる実施等がな いため、本検討では以下のように設定する。

主要坑道、連絡坑道、アクセス斜坑、アクセス立坑の埋め戻し:建設速度の2倍 (処分坑道の建設速度と埋戻し速度の比=6.66/2.80=2.4を参考に2倍と仮定) 止水プラグ:10日(力学プラグと同等と仮定)

閉鎖の所要日数算定結果を表 17~表 20表 20に示す。

パーティー数	1	パーティー	
方数	2	方/日	
坑道延長	3333	m	
施工速度	3.50	m/方/パーティー	
所要日数	477	日	
止水プラグ	0	日	止水プラグなし
所要年数 (暦日換算)	1.8	年	

表 17 主要坑道埋め戻しの所要日数算定結果(1処分区画当たり)

表 18 連絡坑道埋め戻しの所要日数算定結果

パーティー数	4	パーティー	
方数	2	方/日	
坑道延長	16700	m	総延長
施工速度	2.10	m/方/パーティー	
所要日数	995	日	
止水プラグ	20	日	止水プラグ2箇所
所要年数	27	左	
(暦日換算)	ə. (	<del>4-</del>	

表 19 アクセス斜坑埋め戻しの所要日数算定結果

パーティー数	1	パーティー	
方数	2	方/日	
坑道延長	5400	m	総延長
施工速度	2.80	m/方/パーティー	
所要日数	965	日	
止水プラグ	10	日	止水プラグ1箇所
所要年数 (暦日換算)	3.6	年	

表 20 アクセス立坑埋め戻しの所要日数算定結果(立坑1本当たり)

パーティー数	1	パーティー	
方数	2	方/日	
坑道延長	500	m	
施工速度	2.80	m/方/パーティー	
所要日数	90	日	
止水プラグ	10	日	止水プラグ 1箇所/立坑
所要年数 (暦日換算)	0.4	年	

ここで、主要坑道埋戻し開始から閉鎖完了までの工程は、以下のとおりである。 主要坑道→連絡坑道→アクセス斜坑:1.8+3.7+3.6=9.1 年

主要坑道→連絡坑道→アクセス立坑:1.8+3.7+0.4=5.9年

## 1.2 詳細工程のまとめ

以上で示した各作業の所要日数をもとに、建設から閉鎖までの期間の詳細工程を作成した。作 成した詳細工程を図 1、図 2に示す。

参考文献

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-,NUMO-TR-20-03, 2021.



図 1 通常の操業を想定した場合の詳細工程(坑道ごと)

P14230ft     Image: Sector Secto				
P142Alfi.     P142A	63 64 65			
連絡坑道 通絡坑道 如分区画① 如分区画② 如分区画③ 如分区画③ 如分区画④ 如分区画⑤ 如分区画⑤ 如分区画⑥ 如分区画⑥ 如<	63 64 65			
処分区画①       0 </td <td>63 64 65</td> <td></td> <td></td> <td></td>	63 64 65			
処分区画②       回       回       回       回       回       回       I </td <td>63 64 65</td> <td></td> <td></td> <td></td>	63 64 65			
処分区画③       □ </td <td>63 64 65</td> <td></td> <td></td> <td></td>	63 64 65			
処分区画④       回       回       回       回       回       回       回       回       回       回       回       回       I </td <td>63 64 65</td> <td></td> <td></td> <td></td>	63 64 65			
処分区画⑤       小       1       1       1       1       1       1       1       1       1       1       1       1       1       1 </td <td>63 64 65</td> <td></td> <td></td> <td></td>	63 64 65			
<u> <u> </u> <u></u></u>	63 64 65			
抗道等、経過年       4       35       36       37       38       39       40       41       42       43       44       45       46       47       48       49       50       51       52       53       54       55       56       57       58       59       60       61       62         アクセス立坑       -	63 64 65	·····		
抗道等、経過年       4       35       36       37       38       39       40       41       42       43       44       45       46       47       48       49       50       51       52       53       54       55       56       57       58       59       60       61       62         アクセス立坑       -	63 64 65			
アクセス立坑     アクセス前端     ロー     ロー<		65 66 6	67 68 69	9 70
アクセス斜坑         連絡坑道         日本		-		
		++		

図 2 通常の操業を想定した場合の詳細工程

# 付属書 6-1 地層処分実規模試験施設の改修
#### 1. はじめに

本付属書は、第6章「地層処分実規模試験施設を活用した情報発信」の付帯作業として実施した「地層処分実規模試験施設の改修」作業について示すものである。

#### 2. 作業実施計画

今後の技術の高度化開発に向けた環境整備の一環として、地層処分実規模試験施設(以下「当該施設」という)に保管・設置されていた竪置き方式の緩衝材除去装置及び緩衝材定置試験装置 を地層処分実規模試験施設に移動させ、当該施設に横置き方式のPEM 定置装置及び隙間充填装 置を設置するため、2010年3月に竣工して10年を経過した当該施設の改修作業を計画した。

#### 2.1 改修対象

以下に示す施設を改修対象とする。

地層処分実規模試験施設

住所:〒098-3224 北海道天塩郡幌延町字北進 432 番地 2 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター敷地内

#### 2.2 設置対象

設置対象となる横置き方式の PEM 定置装置の諸元を表 1 に、外観を図 1 に、横置き方式の隙 間充填装置の諸元を表 2 に、外観を図 2 に示す。

表 1 PEM 定置装置の諸元			
装置名称	設置寸法(mm)	重量 (t)	
PEM 定置装置	$9,500 \times 2,065$	6.1	



図 1 PEM 定置装置の外観

表 2 隙間充填装置の諸元

装置名称	設置寸法 (mm)	重量 (t)
隙間充填装置	$9,000 \times 3,600$	8.6



図 2 隙間充填装置の外観

#### 2.3 計画工程

上記装置の設置作業を2020年12月以降に計画することから、当該施設の改修は基本的に2020 年11月までに実施する計画とする。

#### 2.4 改修計画

当該施設の改修作業の計画を以下の構成で示す。

- ・本体建屋とプレハブ建屋の外壁塗装
- 本体建屋屋上の防水補修
- 本体建屋屋根折板の塗装
- ・排煙窓の漏水補修
- ・外部鉄骨階段の塗装
- ・外部鉄骨階段の防雪ネットの改修
- ・外部鉄骨階段床の補修
- ・外部エキスパンション・ジョイントの点検・補修
- ・オーバースライダーの吹込み防止対策
- ・定置装置走行レールピットの防寒対策
- ・風除室扉の防寒対策
- ・プレハブ建屋入口扉の補修
- ・屋外動力盤の取り替え
- ・事務室床及び壁の貼り替え
- 事務室内倉庫壁の撤去
- ・展示エリア壁の部分補修

- ・展示エリア床の部分補修
- ・展示室手洗いの改修
- ・空調機の更新
- ・照明器具の更新
- ・渡り廊下シーリングの打ち替え
- ・渡り廊下の結露対策
- ・北側駐車場の舗装
- ・屋外キュービクルの塗装補修
- ・エレベーターの耐震構造強化対策

### 1) 本体建屋及びプレハブ建屋の外壁塗装

本体建屋の外壁(図 3参照)は、目地シーリング打ち替えのうえ既存の仕上りを生かしたクリア塗装 とし、隣接するプレハブ建屋の外壁(図 4参照)は、耐候性の高いウレタン塗装を行う。



図 3 本体建屋外壁の改修前外観



図 4 プレハブ建屋外壁の改修前外観

#### 2) 本体建屋屋上の防水補修

本体建屋屋上(図 5参照)はシート防水となっており、シート防水の保証期間は10年のため、全面更新 を行う。施工時の漏水を防止するため、カバー工法として、既存防水の上に新規アスファルト防水層を施 工する。



図 5 本体建屋屋上防水の改修前外観

# 3) 本体建屋屋根折板の塗装

本体建屋屋根折板(図 6参照)の腐食進行を防ぐため、錆止め塗装のうえシリコン塗装を行う。



図 6 本体建屋屋根折板の改修前外観

4) 排煙窓の漏水補修

排煙窓の漏水補修として、吹込み防止用に水切・上・左右(図 7 参照)にフラットバーを設置する。



図 7 排煙窓の改修前外観

#### 5) 外部鉄骨階段の塗装

外部鉄骨階段(図 8参照)を防錆処理のうえ、ウレタン塗装補修する。



図 8 外部鉄骨階段の改修前外観

6) 外部鉄骨階段の防雪ネットの改修

外部鉄骨階段の防雪ネット(図 9参照)をワイヤー・金物共に交換する。



図 9 外部鉄骨階段の防雪ネットの改修前外観

# 7) 外部鉄骨階段床の補修

外部鉄骨階段床(図 10参照)の勾配を修正補修し、塗布防水をする。



図 10 外部鉄骨階段床の改修前外観

# 8) 外部エキスパンション・ジョイントの点検・補修

外部エキスパンション・ジョイント(図 11 参照)を点検・補修する。



図 11 外部エキスパンション・ジョイントの改修前外観

# 9) オーバースライダーの吹込み防止対策

オーバースライダー(図 12参照)の吹込み防止対策を行う。



図 12 オーバースライダーの改修前外観

# 10) 定置装置走行レールピットの防寒対策

定置装置走行レールピット(図 13参照)から隙間風が入るため、防寒対策を行う。



図 13 定置装置走行レールピットの改修前外観

### 11) 風除室扉の防寒対策

風除室扉の防寒対策として、風除室扉に吹込み防止ゴムを設置する。(図 14 参照)



図 14 風除室扉の施工概要

# 12) プレハブ建屋入口扉の補修

プレハブ建屋入口扉の補修について、以下の計画とする。

・ プレハブ建屋入口扉(図 15参照)が歪んで開閉不良のため、建具・枠の交換を行う。



図 15 プレハブ建屋入口扉の改修前外観

#### 13) 屋外動力盤の取り替え

屋外動力盤の取り替えについて、以下の計画とする。

・ 屋外動力盤(図 16参照)が腐食しているため、ステンレス製に取り替える。



図 16 屋外動力盤の改修前外観

### 14) 事務室床及び壁の貼り替え

事務所床及び壁(図 17参照)に汚損があるため、貼り替える。



図 17 事務室床及び壁の改修前外観

# 15) 事務室内倉庫壁の撤去

事務室内倉庫壁の撤去について、以下の計画とする。

• 事務室が手狭なため、倉庫壁(図 18参照)を撤去して事務室を広くする。また、壁の塗装・天井一部の張り替えを行う。



(撤去する壁は右図の青枠部)

図 18 事務室倉庫壁の改修前外観

#### 16) 展示エリア壁の部分補修

展示エリア壁に汚損があるため、水性塗装にて部分補修する。また、各壁コーナー部にアルミL型のコ ーナーガードを取付ける。(図 19参照)



図 19 展示エリア壁の改修前外観

#### 17) 展示エリア床の部分補修

展示エリア床(図 20参照)に汚損があるため、アクリル防塵塗装にて部分補修する。



図 20 展示エリア床の改修前外観

ゆプラス

## 18) 展示室手洗いの改修

展示室手洗いは電気温水器を設置し(図 21 参照)、使い勝手の良い流し台に変更する。





設置予定の電気温水器 図 21 展示室手洗いの改修前外観

### 19) 空調機の更新

空調機(図 22 参照)を省エネ節電タイプに更新する。



図 22 空調機の改修前外観

## 20) 照明器具の更新

照明器具(図 23 参照)を LED タイプに更新する。



図 23 照明器具の改修前外観

# 21) 渡り廊下シーリングの打ち替え

渡り廊下シーリング(図 24参照)をオーバーブリッジで打ち替える。



図 24 渡り廊下シーリングの改修前外観

#### 22) 渡り廊下の結露対策

渡り廊下(図 25 参照)の結露を防止するため、断熱処置を実施し、仕上壁を新設する。また、床部の 結露等により、汚損カ所の塗装も併せて行う。



図 25 渡り廊下の改修前外観

# 23) 北側駐車場の舗装

北側駐車場(図 26 参照)の不陸を調整し、アスファルト舗装を実施する。また、プレハブ建屋入り口の 高低差は階段を設置する。



北側駐車場全景





本体建屋前

プレハブ建屋入口

図 26 北側駐車場の改修前外観

## 24) 屋外キュービクルの塗装補修

屋外キュービクル(図 27 参照)が腐食しているため、塗装補修を実施する。また、基礎を補修し、塗布 防水を行う。



図 27 屋外キュービクルの改修前外観

### 25) エレベーターの耐震構造強化対策

エレベーター(図 28 参照)を現行法規(2014 年に施工された建築基準法施行令)に適応させるため、 耐震構造強化対策としてガイドレールのブラケット補強と釣合おもりブロックの落下防止措置を行う。



図 28 エレベーターの改修前外観

#### 3. 作業実績

立案した計画に基づき、改修作業を実施した。特に大きな計画変更はなく、工程通りに安全に 作業を完了した。なお、エレベーターの耐震構造強化対策については、作業員手配の関係で2021 年11月に実施した。図29~図53に改修後外観を示す。



本体建屋 プレハブ建屋 図 29 本体建屋とプレハブ建屋の外壁塗装の改修後外観



図 30 本体建屋屋上の防水補修の改修後外観



図 31 本体建屋屋根折板の塗装の改修後外観



図 32 排煙窓の漏水補修の改修後外観



図 33 外部鉄骨階段の塗装の改修後外観



図 34 外部鉄骨階段の防雪ネットの改修の改修後外観



図 35 外部鉄骨階段床の補修の改修後外観



点検作業中 改修後外観 図 36 外部エキスパンション・ジョイントの点検・補修の改修後外観



図 37 オーバースライダーの吹込み防止対策の改修後外観



図 38 定置装置走行レールピットの防寒対策の改修後外観



図 39 風除室扉の防寒対策の改修後外観



図 40 プレハブ建屋入口扉の補修の改修後外観



図 41 屋外動力盤の取り替えの改修後外観



図 42 事務室床及び壁の貼り替えの改修後外観





事務室内倉庫壁の撤去状況事務室内倉庫壁の撤去後外観図 43 事務室内倉庫壁の撤去の改修後外観



図 44 展示エリア壁の部分補修の改修後外観



図 45 展示エリア床の部分補修の改修後外観



図 46 展示室手洗いの改修の改修後外観





図 47 空調機の更新の改修後外観



図 48 照明器具の更新の改修後外観



図 49 渡り廊下シーリングの打ち替えの改修後外観



図 50 渡り廊下の結露対策の改修後外観



図 51 北側駐車場の舗装の改修後外観



図 52 屋外キュービクルの塗装補修の改修後外観



図 53 エレベーターの耐震構造強化対策の改修後外観