令和3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4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、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業として、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3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」の事業報告書である。

1.1 事業の概要......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 本事業での取り組み.....1-4 1.3 実施内容......1-6 1.3.1 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......1-6 1.3.2 回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備......1-8 1.3.3 地層処分実規模試験施設を活用した情報発信【第6章】......1-9 2. 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......2-1 2.3 処分坑道横置き・PEM 方式の回収技術の高度化......2-50 2.3.3 機械的除去技術の選定に関する調査と機械的除去装置の具体化......2-53 2.3.6 切削手順の具体化に向けた検討......2-75 2.3.7 隙間充填材を想定したベントナイト混合土の性状確認と機械的除去装置の適用性検討

目次

3.1 目的	3-1
3.2 回収の容易性の定量化手法の検討	
3.2.1 処分場に対する回収作業工程具体化	3-2
3.2.2 回収作業期間の試算手法	3-4
3.2.3 処分坑道の再開放期間の考え方	3-5
3.2.4 技術的アプローチにより実現する回収作業期間	3-12
3.3 現行の定置方式に対する回収作業時間の試算	3-13
3.3.1 立坑による掘削ズリの搬出能力の設定	3-13
3.3.2 処分孔竪置き方式に対する試算	3-14
3.3.3 処分坑道横置き・PEM 方式に対する試算	3-15
3.3.4 回収装置の能力必要能力と同時稼働するパーティー数	3-16
3.3.5 実際の工程を想定した作業計画と課題	3-17
3.4 処分孔竪置き方式を起点とした詳細設計オプションの適用例	3-18
3.4.1 施設設計に対する詳細設計オプションの適用	3-18
3.4.2 回収作業を行う装置や設備に対する詳細設計オプションの適用	3-22
3.4.3 オーバーパックの引抜力の推定と把持部の検討	3-27
3.4.4 処分孔竪置き方式に対する詳細設計オプションのまとめ	3-31
3.5 処分坑道横置き・PEM 方式を起点とした詳細設計オプションの適用例	3-32
3.5.1 施設設計に対する詳細設計オプションの適用	3-32
3.5.2 装置や設備に対する詳細設計オプション	3-36
3.5.3 廃棄体の摺動による定置・回収の実現性	3-39
3.5.4 処分鼓動横置き・PEM 方式に対する詳細設計オプションのまとめ	3-44
3.6 まとめ	3-45
 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 はじめに	4-1
4.1.1 目的	4-1
4.1.2 定量化手法の整備の方針	4-2
4.1.3 ストーリーボートの作成方針	4-2
4.2 評価対象とする構造、スケール及び状態	
4.2.1 評価対象とする処分場の構造	4-3
4.2.2 時間及び空間スケール	4-4
4.2.3 坑迫の掘削前及び掘削後の状態	4-5
4.3 ストーリーホードの作成	
4.3.1 ストーリーホートの作成手順	
4.3.2 ステップ 1: 処分場構成要素の抽出と機能の整理	
4.3.3 \land 7 ツノ 2:) 送理 $ \circ$ 2 \land FLP の 拙田	
4.5.4 ヘアツノ 3: 処万笏柟成安系のふるよい(環境変遷)の登理	
4.5.3 $\land / \lor / 4: \land \lor = \lor = \lor = \lor \lor \lor \lor \lor \lor \lor$	4-18
4.4 回収り能性維持期間を取りた場合のヘトーリーホート	
4.4.1 回収可能は袖打効則で取りたことによる时间件の変更	
1.1.2 四枢 つ比江神辺が明て取りた物ロジクトニソニ かニト	4-23 Л-92
451 回収可能性維持期間を設けたことに上ス時間枠の変更	
	± 40

4.5.2 状態オプション 1、3 のストーリーボード	
4.6 廃棄体全量を回収する場合のプロセス	4-31
4.6.1 廃棄体全量を回収する場合のプロセスとその影響	4-31
4.7 本章の成果と今後の展開	4-33
4.7.1 本章の成果	4-33
4.7.2 今後の展開	4-33
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 背景及び目的	5-1
5.2 実際の地下環境における支保部材の状態把握	5-2
5.2.1 実施内容	5-2
5.3 坑道周辺地質環境の長期的な変化に関する解析	5-60
5.3.1 予察的解析で得られた課題への対応方法の検討	5-60
5.3.2 坑道周辺地質環境の力学的・水理学的長期変化に関する解析	5-127
5.3.3 坑道埋め戻しによる地質環境回復に関する解析のための境界条件など	の検討5-182
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 実施内容	6-1
6.2 地層処分実規模試験施設の運営	6-1
6.2.1 施設の概要	6-1
6.2.2 本施設の一般公開の計画	6-5
6.2.3 来館状況	6-6
6.3 施設運営方針の検討	6-8
6.3.1 来館者の動向調査	6-8
6.4 本年度の成果(結論:まとめ)	6-10
7. 結言	7-1
7.1 廃棄体の回収可能性を確保する技術の整備	
7.1.1 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	7-1
7.1.2 回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備	7-3
7.1.3 情報発信	7-4
7.2 まとめ	7-4

図目次

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	2.1 - 1	回収可能性の維持状態と回収時の廃棄体の経路	2-2
义	2.1 - 2	廃棄体周囲の土質材料の除去技術の整備状況	2-4
义	2.2-1	緩衝材除去システム(噴射・吸引設備の仕様)	2-6
义	2.2-2	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	2-6
义	2.2 - 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	2-7
义	2.2-4	処分孔竪置き方式の回収作業手順	2-8
义	2.2-5	各処分区画のタイムライン(処分孔竪置き方式)	2-8
义	2.2-6	処分孔竪置き方式のボトルネック抽出と目標時間	2-8
义	2.2-7	緩衝材除去の方法(従来方法とWJ噴射方法)	2-9
义	2.2-8	緩衝材除去作業の手順分析	2-10
义	2.2-9	オーバーパック開放までの作業内容及び緩衝材除去の手順	2-10
义	2.2-10	緩衝材除去の迅速化に向けた課題と方針	2-11
义	2.2-11	噴射ノズルの種類と除去能力の評価	2-12
义	2.2 - 12	噴射試験の概要	2-12
义	2.2-13	離隔と噴射円の大きさの関係	2-13
义	2.2-14	噴射部のスリム化	2-14
义	2.2 - 15	噴射流の除去面接触時のイメージ	2-14
义	2.2-16	水深イメージ	2-14
义	2.2 - 17	斜め方向噴射イメージ図	2-15
义	2.2-18	側部緩衝材除去イメージ	2-15
义	2.2-19	試験装置の概要	2-16
义	2.2-20	噴射の実施前(左)・後(右)(ケース 4)	2-16
义	2.2-21	直射ノズルによる把持部除去のイメージ	2-17
义	2.2-22	上部緩衝材を除去する際の離隔と必要となる除去深度	2-18
义	2.2-23	離隔と必要除去深度の関係より設定した噴射試験の条件(ケース 10~12)	2-18
义	2.2-24	直射ノズルを使用した噴射試験(ケース 10~12)の手順	2-19
义	2.2-25	試験ケースにおける時間当たり除去量	2-20
义	2.2-26	噴射試験結果(ケース 4)	2-21
义	2.2-27	噴射試験結果(ケース 9)	2-22
义	2.2-28	噴射回数と除去深度の関係	2-24
义	2.2-29	噴射回数と除去幅の関係	2-24
义	2.2-30	緩衝材除去対象範囲	2-24
义	2.2-31	OP 把持部付近の緩衝材除去に直射ノズルを使用した場合の噴射位置	2-25
义	2.2-32	トルネードノズルによる除去断面形状(ケース 4)	2-26
义	2.2-33	塩水噴射・スラリー吸引装置(噴射リング)	2-28
义	2.2-34	塩水噴射・スラリー吸引装置(噴射リング)の装備品取付け	2-29
义	2.2-35	ケース1試験イメージ図	2-30
义	2.2-36	ケース 2 試験イメージ図	2-30
义	2.2-37	ケース 3 試験イメージ図	2-30
义	2.2-38	幾何学的干渉試験イメージ	2-31

义	2.2-39	塩水リユース設備の運用方法(案 1)	2-32
义	2.2-40	塩水リユース設備の運用方法(案2・案3)	2-32
义	2.2-41	塩水リユース設備の全景	2-33
义	2.2-42	上昇流式の固液分離の原理	2-33
义	2.2-43	沈降試験の概要	2-34
义	2.2-44	遠隔操作技術高度化開発における沈降試験の結果	2-35
义	2.2-45	スラリー化進行の目安(試料 C が充分にスラリー化した状態)	2-37
义	2.2-46	アクリル円筒容器	2-37
义	2.2-47	試験状況	2-38
义	2.2-48	固液境界部の読み取り	2-38
义	2.2-49	沈降深さと経過時間	2-39
义	2.2-50	沈降速度算出イメージ	2-40
义	2.2-51	液固比と沈降速度の関係	2-40
义	2.2-52	遠隔操作システムの構成図	2-41
义	2.2 - 53	遠隔操作盤の操作ボタン及び制御状態表示	2-41
义	2.2-54	除去形状観測システムの全体概要	2-42
义	2.2 - 55	除去形状観測システムの筺体外観	2-43
义	2.2-56	除去形状観測システムの筺体取付け位置	2-43
义	2.2-57	フルスケール試験の設備名称と平塚倉庫の設備配置計画図	2-44
义	2.2-58	測量結果に基づく試験設備の断面配置検証図	2-45
义	2.2-59	供試体制作計画図	2-45
义	2.2-60	既往の供試体構成	2-46
义	2.2-61	フルスケール試験供試体の構成及び寸法計画図	2-46
义	2.2-62	緩衝材の除去手順計画と装置操作のイメージ	2-47
义	2.2-63	噴射試験状況	2-48
义	2.2-64	噴射・吸引性能試験状況	2-48
义	2.3-1	研究計画	2-51
义	2.3-2	処分坑道横置き・PEM 方式の回収作業手順	2-52
义	2.3-3	処分坑道ごとに手順を集約したタイムライン(処分坑道横置き・PEM 方式).	2-52
义	2.3-4	PEM を跨ぐ構造の機械的除去装置のイメージ図	2-52
义	2.3-5	固定断面掘削方式	2-57
义	2.3-6	自由断面掘削方式	2-57
义	2.3-7	試験における切削方向(左:固定断面掘削、右:自由断面掘削)	2-57
义	2.3-8	試験装置設置状況(固定断面掘削方式)	2-58
义	2.3-9	試験装置設置状況(自由断面掘削方式)	2-58
义	2.3-10	使用した二軸ミキサ	2-59
义	2.3 - 11	ベントナイト混合土の混練状況	2-59
义	2.3 - 12	固定断面切削用試験体型枠	2-60
义	2.3-13	自由断面切削試験体型枠	2-60
义	2.3-14	転圧・締固めによる試験体製作状況	2-60
义	2.3 - 15	試験体のラップによる養生	2-60
义	2.3-16	試驗手順説明図(固定断面方式)	2-61
义	$2.3 \cdot 17$	試驗手順説明図(自由断面方式)	2-62

义	2.3 - 18	切削機構の付着状況(ケース 1-2)	2-63
义	2.3 - 19	除去生成物の形状	2-64
义	2.3-20	使用したバキュームユニットと収集タンク	2-67
义	2.3 - 21	除去生成物の吸引状況	2-67
义	2.3-22	吸引口の形状 概要図	2-69
义	2.3 - 23	アタッチメントの取付状況	2-70
义	2.3-24	吸引口(TYPE-2)の閉塞状況	2-71
义	2.3 - 25	切削部の回転方向と切削方向の関係	2-72
义	2.3-26	試験体端部の除去生成物の飛散状況(試験体 No.1-1、ダウンカットのケース)	.2-74
义	2.3 - 27	試験終了時の吸引口の状態(試験体 No.1-2、アップカットのケース)	2-74
义	2.3 - 28	隙間充填材の除去において理想的な切削方向と切削面の組み合わせ	2-75
义	2.3 - 29	面切削試験装置の概要	2-76
义	2.3-30	切削経路パターン	2-76
义	2.3 - 31	切削機への除去生成物付着状況(パターン C 試験終了後)	2-78
义	2.3-32	コンシステンシー指数の確認	2-83
义	2.3 - 33	一軸圧縮強度、コンシステンシー指数とコンシステンシー指数、有効粘土密度の	D関係
			2-85
义	2.3-34	粘着力、内部摩擦角とコンシステンシー指数、有効粘土密度の関係	2-86
义	2.3 - 35	試験装置の概要	2-87
义	2.3-36	本試験で整理する切削力と切削長さ	2-87
义	2.3 - 37	切削試験で確認された切削パターン	2-90
义	2.3 - 38	切削力とコンシステンシー指数、有効粘土密度の関係	2-93
义	2.3 - 39	切削長さとコンシステンシー指数、有効粘土密度の関係	2-94
义	3.2 - 1	パネル型の場合の処分区画の建設・操業の順序(区画数6の場合)	3-2
义	3.2-2	デッドエンド型の場合の処分区画の建設・操業の順序(区画数6の場合)	3-2
义	3.2 - 3	パネル型の場合の処分区画の再開放・回収の順序(区画数6の場合)	3-3
义	3.2-4	デッドエンド型の場合の処分区画の再開放・回収の順序(区画数6の場合)	3-3
义	3.2 - 5	一般化した回収手順と回収作業期間(ユニット数N)	3-4
义	3.2-6	処分坑道の取付部の形状(新第三紀堆積岩類の場合)	3-5
义	3.2-7	回収可能性が維持されている処分坑道の模式図	3-5
义	3.2-8	掘進機による埋め戻し材の解砕(自由断面掘削機の例)	3-7
义	3.2-9	解砕した埋め戻し材の積込み工程	3-7
义	3.2 - 10	処分坑道の一掘進長の再開放時間の考え方(直列作業)	3-9
义	3.2 - 11	処分坑道の再開放時間と算出方法の関係(平均時間、作業時間の総和)	3-10
义	3.4-1	詳細設計オプション(孔壁補強・処分孔近接)を適用したイメージ	3-19
义	3.4-2	廃棄体定置間隔 2.4 m、処分坑道中心間距離 24 m 熱解析結果	3-19
义	3.4-3	詳細設計オプション(上部埋め戻し材の省略)を適用したイメージ	3-24
义	3.4-4	油圧ジャッキ&巻上げウインチ方式のオーバーパック回収装置の概念と作業手順	.3-26
义	3.4-5	緩衝材共存下での炭素鋼腐食試験後に表面に付着した緩衝材	3-27
义	3.4-6	オーバーパック引抜き時に想定される破壊モード	3-28
义	3.4-7	炭素鋼オーバーパック把持部の外観と寸法(板厚190mm、落し蓋方式)	3-29
义	3.5 - 1	処分坑道定置方式の定置方法のバリエーション	3-33
义	3.5 - 2	PEM を跨ぐ構造の機械的除去装置のイメージ図(左)	3-34

义	3.5 - 3	詳細設計オプション(隙間充填材の省略)を適用したイメージ	3-35
义	3.5-4	円形断面の坑道に対する PEM の操業技術の整備例	3-35
义	3.5 - 5	閉鎖後長期の安全性の観点から見た隙間幅の許容値(PEM 方式)	3-36
义	3.5-6	PEM を水平移動させる際の、把持部・鋼殻に作用する荷重と変形モード	3-38
义	3.5-7	PEM 回収時における摺動スライダーへの反力	3-39
义	3.5-8	摺動スライダーの形状案	3-41
义	3.5-9	解析モデル(例:窒化珪素のスライダー形状)	3-42
义	3.5-10	最大主応力の分布(例:窒化珪素のスライダー形状)	3-42
义	3.5-11	PEM に摺動スライダーを取り付ける方法の例	3-43
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	評価対象とした処分場の構成	4-4
义	4.2-2	回収可能性維持の状態オプション	4-4
义	4.2-3	処分場スケールの変遷と水理的変化に対する想定	4-5
义	4.2-4	ニアフィールドスケールにおける坑道の掘削前後での環境条件の想定	4-6
义	4.3-1	処分場構成要素の細分化、階層整理(アクセス立坑の例)	4-8
义	4.3-2	評価対象とした坑道の構成要素(アクセス立坑の例)	4-15
义	4.3-3	各坑道の構成要素の変遷	4-16
义	4.3-4	ストーリーボードとりまとめ例(状態オプション2、回収可能性維持期間を設	けない
	場合、	アクセス立坑、期間②)	4-20
义	4.4-1	回収可能性維持期間を設けた場合の時間区分	4-22
义	4.4-2	回収可能性維持期間を設けた場合の処分場スケールの変遷と水理的変化に対す	る想定
			4-23
义	4.5-1	回収可能性維持の状態オプションと工程	4-26
义	$5.1 \cdot 1$	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	۶	5-1
义	$5.2 \cdot 1$	試験イメージ	5-2
义	5.2-2	幌延深地層研究所内での吹付けコンクリート供試体養生状況	5-3
义	5.2^{-3}	養生環境の気温、湿度、水温の経時変化	5-3
义	5.2-4	定置装置からのサンプル採取(2021年)	5-4
义	5.2-5	試験用供試体の作成方法	5-5
义	5.2-6	受入れ時の供試体の状況	5-6
义			
	5.2-7	フェノールフタレインにより呈色した試料の断面写真	5-8
凶	5.2-7 5.2-8	フェノールフタレインにより呈色した試料の断面写真	5-8 5-10
図	5.2-7 5.2-8 5.2-9	フェノールフタレインにより呈色した試料の断面写真 透水試験試料	5-8 5-10 5-11
义 図 図	5.2-7 5.2-8 5.2-9 5.2-10	フェノールフタレインにより呈色した試料の断面写真 透水試験試料 透水試験の予備検討結果 透水試験の状況	5-8 5-10 5-11 5-11
N N N N N	5.2-7 5.2-8 5.2-9 5.2-10 5.2-11	フェノールフタレインにより呈色した試料の断面写真 透水試験試料 透水試験の予備検討結果 透水試験の状況 一軸圧縮強度(補正後)	5-8 5-10 5-11 5-11 5-16
8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	5.2-7 5.2-8 5.2-9 5.2-10 5.2-11 5.2-12	フェノールフタレインにより呈色した試料の断面写真 透水試験試料 透水試験の予備検討結果 透水試験の状況 一軸圧縮強度(補正後) 静弾性係数	5-8 5-10 5-11 5-11 5-16 5-16
	5.2-7 $5.2-8$ $5.2-9$ $5.2-10$ $5.2-11$ $5.2-12$ $5.2-13$	フェノールフタレインにより呈色した試料の断面写真 透水試験武料 透水試験の予備検討結果 透水試験の状況 一軸圧縮強度(補正後) 静弾性係数 静ポアソン比	5-8 5-10 5-11 5-11 5-16 5-16 5-17
N N N N N N N N N N N N N N N N N N N	5.2-7 $5.2-8$ $5.2-9$ $5.2-10$ $5.2-11$ $5.2-12$ $5.2-13$ $5.2-14$	フェノールフタレインにより呈色した試料の断面写真 透水試験武料	5-8 5-10 5-11 5-16 5-16 5-17 5-17
N N N N N N N N N N N N N N N N N N N	5.2-7 $5.2-8$ $5.2-9$ $5.2-10$ $5.2-11$ $5.2-12$ $5.2-13$ $5.2-14$ $5.2-15$	フェノールフタレインにより呈色した試料の断面写真 透水試験武料 透水試験の予備検討結果 透水試験の状況 一軸圧縮強度(補正後) 静弾性係数 静ポアソン比 各試験体の一軸圧縮試験時の応力ひずみ関係 P波速度	5-8 5-10 5-11 5-16 5-16 5-17 5-17 5-19
医宽宽宽宽 医	5.2-7 $5.2-8$ $5.2-9$ $5.2-10$ $5.2-11$ $5.2-12$ $5.2-13$ $5.2-14$ $5.2-15$ $5.2-16$	フェノールフタレインにより呈色した試料の断面写真 透水試験試料 透水試験の予備検討結果 透水試験の状況 一軸圧縮強度(補正後) 静弾性係数 静ポアソン比 各試験体の一軸圧縮試験時の応力ひずみ関係 P波速度 S波速度	5-8 5-10 5-11 5-16 5-16 5-17 5-17 5-17 5-19 5-19
	5.2-7 5.2-8 5.2-9 5.2-10 5.2-11 5.2-12 5.2-13 5.2-13 5.2-14 5.2-15 5.2-16 5.2-17	 フェノールフタレインにより呈色した試料の断面写真	5-8 5-10 5-11 5-16 5-16 5-17 5-17 5-17 5-19 5-20

义	5.2 - 19	動弹性係数	5-21
义	5.2 - 20	割裂引張強度	5-23
义	5.2 - 21	各試験体の透水試験の状況	5-25
义	5.2-22	気中養生試験体の透水係数(3点平均)の比較結果	5-26
义	5.2 - 23	各試験体の透水試験(インプット法)の状況	5-27
义	5.2-24	水の浸透深さの計測方法	5-27
义	5.2 - 25	水中養生試験体の拡散係数の比較結果	5-29
义	5.2-26	拡散係数及び仮定条件を設け算出した透水係数の結果	5-29
义	5.2 - 27	各試料の空隙率	5-31
义	5.2-28	養生条件の違いによる健全部の空隙径分布の比較	5-32
义	5.2 - 29	変質領域と健全部の空隙径分布(気中養生供試体)	5-33
义	5.2 - 30	変質領域と健全部の空隙径分布(水中養生供試体)	5-34
义	5.2 - 31	気中養生試料の元素濃度分布(1/2)(カラーバーの単位は mass%)	5-36
义	5.2-32	気中養生試料の元素濃度分布(2/2)(カラーバーの単位は mass%)	5-37
义	5.2 - 33	水中養生試料の元素濃度分布(1/2)(カラーバーの単位は mass%)	5-38
义	5.2 - 34	水中養生試料の元素濃度分布(2/2)(カラーバーの単位は mass%)	5-39
义	5.2 - 35	気中養生 No.10 の EDS 分析結果	5-41
义	5.2 - 36	気中養生 No.11 の EDS 分析結果	5-42
义	5.2 - 37	気中養生 No.12 の EDS 分析結果	5-43
义	5.2-38	水中養生 No.10 の EDS 分析結果	5-44
义	5.2 - 39	水中養生 No.11 の EDS 分析結果	5-45
义	5.2-40	水中養生 No.12 の EDS 分析結果	5-46
义	5.2-41	気中養生 No.10 の SEM 像	5-47
义	5.2-42	気中養生 No.11 の SEM 像	5-48
义	5.2-43	気中養生 No.12 の SEM 像	5-49
义	5.2-44	水中養生 No.10 の SEM 像	5-50
义	5.2-45	水中養生 No.11 の SEM 像	5-51
义	5.2-46	水中養生 No.12 の SEM 像	5-52
义	5.2-47	粉末X線回折測定結果	5-54
义	5.2-48	TG 曲線	5-54
义	5.2-49	ペースト部の鉱物組成(シリカゲルを C-S-H に含む)	5-56
义	$5.3 \cdot 1$	幌延の深度 350m 坑道周辺の力学的な概念モデル	5-60
义	5.3-2	供試体及びリボーリングの状況	5-62
义	5.3 - 3	人工亀裂の作製状況	5-62
义	5.3-4	供試体の外観及び作成した亀裂面の状況	5-63
义	5.3 - 5	三軸圧縮型透水試験装置 1	5-64
义	5.3-6	三軸圧縮型透水試験装置 2	5-64
义	5.3-7	ひずみゲージ式リング型変位計	5-65
义	5.3-8	ひずみゲージ式リング型変位計設置概略図	5-65
义	5.3-9	試験時の供試体設置状況など	5-66
义	$5.3 \cdot 10$	試験1本目試料 No.5 の透水係数と	5-68
义	$5.3 \cdot 11$	試験1本目試料 No.5 の亀裂の水理	5-68
义	5.3 - 12	試験1本目試料 No.5 の亀裂の透水	5-68

义	$5.3 \cdot 13$	試験1本目試料 No.5 のひずみゲー	.5-68
义	5.3 - 14	試験1本目試料 No.5の降圧時3 MPa維持でのひずみゲージ変位量の経時変化	.5-69
义	5.3 - 15	試験2本目試料No.1の透水係数と	.5-71
义	5.3 - 16	試験2本目試料No.1の亀裂の水理	.5-71
义	5.3 - 17	試験2本目試料No.1の亀裂の透水	.5-71
义	5.3 - 18	試験2本目試料No.1のひずみゲージ変位量と有効拘束圧の関係	.5-71
义	5.3 - 19	試験3本目試料No.3の透水係数と有効拘束圧の関係	.5-73
义	5.3 - 20	試験3本目試料No.3の亀裂の水理学的開口幅と有効拘束圧の関係	.5-73
义	5.3 - 21	試験3本目試料No.3の亀裂の透水係数と有効拘束圧の関係	.5-73
义	5.3 - 22	試験3本目試料 No.3 のひずみゲージ変位量と有効拘束圧の関係	.5-73
义	5.3 - 23	亀裂を含んだ堆積岩の透水係数と拘束圧の関係(酒井ほか,2009)	.5-74
义	5.3 - 24	亀裂を含んだ結晶質岩の透水係数と拘束圧の関係(酒井ほか,2009)	.5-74
义	5.3 - 25	各試験試料の亀裂の透水係数と有	.5-76
义	5.3 - 26	各試験試料の透水係数と有効拘束	.5-76
义	5.3 - 27	各試験試料のひずみゲージ変位量	.5-76
义	5.3 - 28	各試験試料のひずみゲージ変位量	.5-76
义	5.3 - 29	光ファイバー式地中変位計の設置状況 (青柳ほか, 2020)	.5-78
义	5.3 - 30	光ファイバー式地中変位計の長期変位計の計測結果	.5-78
义	5.3 - 31	光ファイバー式地中変位計の区間(青柳ほか, 2020)	.5-79
义	5.3 - 32	東立坑 GL-159.3m の断面及び覆工(原子力機構, 2011)	.5-80
义	5.3 - 33	応力-ひずみ曲線	.5-80
义	5.3 - 34	稚内層・声問層の一軸圧縮強度と大久保モデル定数 noの比較	.5-83
义	5.3 - 35	時間依存性の程度を示すパラメータ noの概念図(平本ほか, 2008)	.5-84
义	5.3 - 36	岩級区分の深度分布(森岡ほか, 2006)	.5-86
义	5.3 - 37	東立坑 GL-159.3m の解析モデル	.5-87
义	5.3 - 38	深度 350m 試験坑道 3 の計測器のレイアウト(青柳ほか, 2020)	.5-91
义	5.3 - 39	深度 350 m 試験坑道 3 の地中変位計による計測結果(青柳ほか, 2020 に加筆)	5 - 91
义	5.3-40	E1 地中変位計による計測結果(青柳ほか, 2020 に加筆)	.5-92
义	5.3 - 41	E1 地中変位に対する独立成分分析の結果	.5-93
义	5.3-42	解析モデル概念図	.5-94
义	5.3 - 43	水分特性曲線	.5-95
义	5.3 - 44	比透水係数及び透気係数曲線	.5-96
义	5.3 - 45	Case a-S の解析メッシュ図	.5-97
义	5.3-46	Case a-M の解析メッシュ図	.5-97
义	5.3 - 47	Case a-L の解析メッシュ図	.5-98
义	5.3-48	Case b 及び Case c の解析メッシュ図	.5-98
义	5.3 - 49	境界条件	5-101
义	5.3 - 50	Case a-L : 圧力分布の変化	5-102
义	5.3 - 51	Case a-M: 圧力分布の変化 (150 年後から 1,000 年後、解析領域全体)	5-103
义	5.3 - 52	Case a-S : 圧力分布の変化	5-104
义	5.3 - 53	Case a-L : 飽和度分布の変化	5-106
义	5.3 - 54	Case a-M : 飽和度分布の変化	5-107
义	5.3 - 55	Case a-S : 飽和度分布の変化	5-108

义	5.3 - 56	Case b: 圧力分布の変化(1) (202 年後から 1,000 年後、解析領域全体)	.5 - 109
义	5.3 - 57	Case b: 圧力分布の変化(2) (202 年後から 1,000 年後、坑道壁面から	水平方
	向に 10	00m の範囲)	.5-110
义	5.3 - 58	Case b: 飽和度分布の変化 (202 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平	方向に
	100m Ø	り範囲)	.5-111
义	5.3 - 59	Case b : 気相における CH ₄ のモル分率	.5-112
义	5.3-60	Case b:気相における CO2 のモル分率 (202 年後から 1,000 年後、坑道壁	面から
	水平方	向に 100m の範囲)	.5-113
义	5.3-61	Case b:気相における O ₂ のモル分率 (202年後から 1,000年後、坑道壁面	から水
	平方向	に 100m の範囲)	.5-114
义	5.3-62	Case b : 気相の流束分布	.5-115
义	5.3 - 63	Caseb:液相の流束分布(202年後から1,000年後、坑道壁面から水平方向に	100m
	の範囲))	.5-116
义	5.3-64	Case c: 圧力分布の変化(1) (140 年後から 1,000 年後、解析領域全体)	.5-117
义	5.3 - 65	Case c: 圧力分布の変化(2) (140 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平	方向に
	100m Ø	り範囲)	.5-118
义	5.3-66	Case c: 飽和度分布の変化 (140 年後及び 1,000 年後、坑道壁面から水平	方向に
	100m Ø	り範囲)	.5-119
义	5.3-67	Case c:気相における CH4 のモル分率 (140 年後から 1,000 年後、坑道壁	面から
	水平方	向に 100m の範囲)	.5-120
义	5.3-68	Case c: 気相における CO ₂ のモル分率 (140 年後から 1,000 年後、坑道壁	面から
	水平方	向に 100m の範囲)	.5-121
义	5.3-69	Case c: 気相における O ₂ のモル分率 (140 年後から 1,000 年後、坑道壁面	から水
	平方向	こ 100m の範囲)	.5-122
义	5.3-70	Case c:気相の流束分布(140年後及び1,000年後、坑道壁面から水平方向に	100m
	の範囲))	.5-123
义	5.3-71	Case c:液相の流束分布(140年後から1,000年後、坑道壁面から水平方向に	100m
	の範囲))	.5-124
义	5.3-72	試験坑道 3 の断面図	.5-128
义	5.3-73	試験坑道 3 の縦断図	.5-128
义	5.3-74	深度 350m の pump station の底盤の弾性波速度分布 (Tsusaka,K., et al., 201	4)5-
	129		
义	5.3 - 75	力学的長期変化解析の初期状態	.5-131
义	5.3-76	正規化軸ひずみ-透水係数の増加率の関係(郷家ほか, 2011に加筆)	.5-132
义	5.3 - 77	亀裂透水試験によって得られた透水係数の対数平均値	.5-133
义	5.3-78	有効拘束圧-透水係数の回帰式	.5-134
义	5.3-79	EDZ1 と EDZ2 における透水性変化の概念	.5-135
义	5.3-80	力学的長期変化解析の解析モデル	.5-136
义	5.3-81	Case 4 における周辺岩盤の変位	.5-140
义	5.3-82	Case 4 における周辺岩盤の透水係数の増加率	.5-140
义	5.3-83	Case 4 における解析結果及びの原位置計測結果の比較例(EDZ の透水係数)	5-
	141		
図	5.3-84	Case 4 における周辺岩盤のヤング率の変化	.5-142

义	5.3-85	Case 4 における周辺岩盤の平均主応力の経時変化	5-142
义	5.3-86	Case 4 における支保工着目要素の最大主応力の経時変化	5-143
义	5.3-87	深度 350 m 試験坑道 3 における吹付けコンクリートの応力の経時変化	5-143
义	5.3-88	Case 5 における周辺岩盤の変位	5-145
义	5.3-89	Case 5 における周辺岩盤の透水係数の増加率	5-145
义	5.3 - 90	Case 5 における着目要素の透水係数の経時変化	5-146
义	5.3-91	Case 5 における周辺岩盤のヤング率の変化	5-146
义	5.3-92	Case 5 における周辺岩盤の平均主応力の経時変化	5-147
义	5.3 - 93	Case 5 における支保工着目要素の最大主応力の経時変化	5-147
义	5.3 - 94	水理解析(Case 4) で用いたメッシュ図(坑道周辺拡大図)	5-148
义	5.3 - 95	絶対浸透率の分布図(Case 4)(50年から1,000年)	5-149
义	5.3-96	比貯留係数の分布図(Case 4)(50 年から 1,000 年)	5-149
义	5.3 - 97	水理解析(Case 5)で用いたメッシュ図(坑道周辺拡大図)	5-150
义	5.3 - 98	絶対浸透率の分布図(Case 5)(50年から1,000年)	5-151
义	5.3 - 99	比貯留係数の分布図(Case 5)(50 年から 1,000 年)	5-151
义	5.3 - 100	一次元解析モデルの概念図	5-152
义	5.3 - 101	各領域に与える絶対浸透率を抽出した要素(Case 4)	5-152
义	5.3 - 102	絶対浸透率の経時変化(Case 4)	5-153
义	5.3 - 103	平均化した絶対浸透率の経時変化(Case 4)	5-153
义	5.3 - 104	各領域に与える絶対浸透率を抽出した要素(Case 5)	5-154
义	5.3 - 105	各領域に与える比貯留係数を抽出した要素(Case 5)	5-154
义	$5.3 \cdot 106$	絶対浸透率の経時変化(Case 5)	5-155
义	5.3-107	比貯留係数の経時変化(Case 5)	5-155
义	5.3-108	平均化した絶対浸透率の経時変化(Case 5)	5-155
义	5.3-109	平均化した比貯留係数の経時変化(Case 5)	5-156
义	5.3-110	各領域に与える絶対浸透率を抽出した要素(Case 6)	5-157
义	$5.3 \cdot 111$	要素 45 の絶対浸透率の経時変化(Case 6)	5-157
义	5.3 - 112	要素 301 の絶対浸透率の経時変化(Case 6)	5-158
义	5.3-113	要素 45 の平均化した絶対浸透率の経時変化(Case 6)	5-158
义	5.3-114	要素 301 の平均化した絶対浸透率の経時変化(Case 6)	5-158
図	5.3-115	Case 4: 圧力分布の変化(1) (100 年後から 1,000 年後、解析領域全体))5-159
図	5.3-116	Case 4: 圧力分布の変化(2)(100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水	、平方向に
	100 m	の範囲)	5-160
义	5.3-117	Case 4: 飽和度分布の変化(1) (100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から	,水平方向
	に 100	m の範囲)	5-161
义	5.3-118	Case 4: 飽和度分布の変化(2) (100 年後から 1,000 年後, 図中の色つき	の部分が
	EDZ2		5-162
凶	5.3-119	Case 4:気相の CH ₄ モル分率 (100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から	,水平方向
	に 100	m の範囲)	5-163
凶	5.3-120	Case 4: 気相の CO ₂ モル分率 (100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から	,水平方向
_	に 100	m の範囲)	5-164
凶	5.3-121	Case4:気相の O ₂ モル分率 (100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水	、半方向に
	100 m	の範囲)	5-165

义	5.3 - 122	Case 4: 気相の流向分布 (100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 10)()
	mの範疇	(\pm)	6
义	5.3 - 123	Case 4:液相の流向分布 (100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 10)0
	mの範疇	围)5-16	57
义	5.3 - 124	Case 5: 圧力分布の変化(1) (100 年後から 1,000 年後、解析領域全体)5-16	8
义	5.3 - 125	Case 5: 圧力分布の変化(2) (100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向)	2
	100 m Ø	つ範囲)5-16	;9
义	5.3 - 126	Case 5: 飽和度分布の変化(1) (100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方	句
	に 100 r	n の範囲)5-17	0'
义	5.3 - 127	Case 5: 飽和度分布の変化(2) (100 年後から 1,000 年後、図中の色つきの部分	が
	EDZ2 $\mathcal{O}_{\mathcal{I}}$)領域)	1'
义	5.3 - 128	Case 5:気相の CH ₄ のモル分率 (100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平)	方
	向に 10) m の範囲)5-17	2
义	$5.3 \cdot 129$	Case 5:気相の CO ₂ モル分率 (100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方)	句
	に 100 r	n の範囲)5-17	3
义	5.3 - 130	Case 5:気相 O ₂ モル分率 (100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向)	C
	100 m Ø	⊃範囲)5-17	'4
义	5.3-131	Case 5:気相の流向分布(100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 10)0
	mの範	围)	5
凶	5.3-132	_ Case 5 : 液相の流向分布 (100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 10 >)0
_	mの範	围)	6
図	5.3-133	Case 6: 圧力分布の変化 (100 年から 1,000 年後、坑道中心から 10 m) …5-17	7
図	5.3-134	Case 6: 飽和度分布の変化 (100 年から 1,000 年後、 坑道 中心から 10 m) 5-17	8
凶	5.3-135	Case 6: 気相の CH ₄ モル分率の変化 (100 年から 1,000 年後、坑道中心から 1	.0
	m)		9
凶	5.3-136	Case 6: 気相の CO ₂ モル分率の変化 (100 年から 1,000 年後、坑道壁面から 1	.0
	m)		9
凶	5.3-137	Case 6: 気相の O2 モル分率 (100 年から 1,000 年後、坑道中心から 10 m) …?	5-
ज्य	180		0
X	5.3-138	地質境境の回復に関する対象期間のイメーン	5Z
凶 団	5.3 ⁻ 139)ວັ
凶 网	5.5°140	「同辺石盛にわりる有日安系)J)A
凶 网	$0.3^{-}141$	「有日安系にわける取人せん例いりみの経时変化(原現センター, 2018)3-18 順延地下水に対すて影響圧の双時亦化(藍油ほか、2005) $=$ $=$ 19)4)E
凶 网	$0.5^{-}142$	院理地下小に対する彫画工の程時変化(新他は λ^3 ,2003)	ю 20
凶 図	5.3-145 5.2-144		27
凶 図	5.3-144 5.2-145	生戻し後の脾例 / シンユ因 (現道向辺拡入因)	
凶 図	5 3-140	240万 01 2 小刀11 II I	20
回 図	5 3-147	- 新期条件を与うろ ED71 の領域分割及び新期値の抽出位置 5-19	20,20
	5 3-1/8		,,, 10
	5 3-1/9	- エッパ - C マンエフカ - コー	11
	5 3-150	理め 同し 後の 約 和度 分 右	93
2 V	5 3-151	埋め 戸し後の 気相の CH4 モル 分率 5-10	14
ĽЧ	0.0 IOI	-2 γ_{J}	1

义	5.3 - 152	2 埋め戻し後の気相の CO ₂ モル分率5	-195
义	5.3 - 153	3 埋め戻し後の気相の O2 モル分率5	-196
义	5.3-154	4 データを抽出した要素位置及び気相における各成分のモル分率の時間変化5	-197
义	6.2 - 1	地層処分実規模試験施設	6-1
义	6.2-2	施設内の主な展示物①	6-2
义	6.2 - 3	施設内の主な展示物②	6-2
义	6.2-4	施設内の主な展示物③	6-3
义	6.2-5	体感展示物の展示	6-4
义	6.2-6	ベントナイト体感試験	6-4
义	6.2-7	来館者数の推移(2010年4月~2022年2月)	6-6
义	6.2-8	来館者数の属性(2010年4月~2021年3月)	6-7
义	6.2-9	来館者数の居住地(2013年4月~2021年3月)	6-7
义	6.3-1	施設内の展示状況	6-8
义	6.3-2	施設入口での誘導措置	6-9

表目次

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	2.2-1	地下施設の延長などに係る諸元	2-7
表	2.2-2	緩衝材ブロックの管理値	2-13
表	2.2-3	試験ケース	2-15
表	2.2-4	計測機器詳細	2-17
表	2.2-5	直射ノズルを用いた試験ケース	2-18
表	2.2-6	試験ケースにおける毎分の除去量	2-19
表	2.2-7	噴射吸引設備の運転容量の検討結果	2-20
表	2.2-8	除去物の性状、吸引性の結果一覧	2-23
表	2.2-9	直射ノズルを使用した場合の OP 把持部の緩衝材除去時間	2-26
表	2.2 - 10	OP 側部緩衝材の除去に要する時間の算定	2-27
表	2.2 - 11	要素試験から与えられる条件	2-28
表	2.2-12	試験環境(次年度試験候補地)から与えられる条件	2-28
表	2.2 - 13	既往の知見から与えられる条件	2-28
表	2.2-14	溶液の設定理由	2-35
表	2.2 - 15	沈降試験 試験ケース	2-36
表	2. 2–16	ベントナイト混合土の配合	2-36
表	2.2 - 17	算出した定速沈降速度の一覧	2-40
表	2.2 - 18	遠隔操作ボタン・制御状態表示の概要	2-42
表	2.3 - 1	一般土木分野におけるトンネル掘削方式	2-53
表	2.3-2	固定断面掘削方式 機械的除去装置(案)	2-54
表	2.3-3	自由断面掘削方式 機械的除去装置(案)	2-55
表	2.3-4	試験装置に用いた切削機構の仕様	2-56
表	2.3-5	掘削方式選定のための要素試験における配合ケース設定	2-59
表	2.3-6	ケースごとの試験体1体あたりに必要な材料重量	2-59
表	2.3-7	固定断面掘削方式の試験結果	2-63
表	2.3-8	自由断面掘削方式の試験結果	2-63
表	2.3-9	除去生成物の主なサイズ(mm)と形状	2-65
表	2.3-10	配管のケース	2-66
表	2.3 - 11	試験体のケース	2-67
表	2.3 - 12	吸引能力確認試験結果	2-68
表	2.3 - 13	吸引口の断面積	2-69
表	2.3 - 14	吸引口形状の確認試験結果	2-71
表	2.3 - 15	再試験に用いた吸引口の仕様	2-71
表	2.3 - 16	吸引口形状の確認再試験結果	2-71
表	2.3 - 17	試験ケース	2-73
表	2.3-18	試驗結果	2-74
表	2.3 - 19	面切削確認試験結果(切削速度)	2-78
表	2.3-20	面切削確認試験結果(除去生成物)	2-78
表	2.3-21	塑性限界と液性限界	2-80
表	2.3-22	ベントナイトとケイ砂、ベントナイト混合土の土粒子密度 (Mg/m ³)	2-81

表	2.3 - 23	一軸圧縮強度試験、コーン指数試験、一面せん断試験に用いた試験体(1/2)2	2-82
表	2.3-24	一軸圧縮強度試験、コーン指数試験、一面せん断試験に用いた試験体 (2/2)2	2-83
表	2.3 - 25	切削試験に用いた試験体 (1/2)2	2-88
表	2.3-26	切削試験に用いた試験体 (2/2)2	2-89
表	2.3-27	各試験体の切削パターン (1/2)2	2-90
表	2.3-28	各試験体の切削パターン (2/2)2	2-91
表	3.3-1	建設時の掘進速度に基づく立坑からの搬出能力の設定	8-13
表	3.3-2	処分孔竪置き方式の試算の前提	8-14
表	3.3 - 3	処分孔竪置き方式の回収作業時間	8-14
表	3.3-4	処分坑道横置き・PEM 方式の試算の前提	8-15
表	3.3 - 5	処分坑道横置き・PEM 方式の回収作業期間	8-15
表	3.4-1	処分坑道を短尺化した場合の処分孔竪置き方式の区画形状の例	8-21
表	3.4-2	処分孔竪置き方式の回収作業時間(平均)の内訳※1	8-23
表	3.4-3	推定した引抜き力に対する把持部形状	8-30
表	$3.5 \cdot 1$	熱伝導解析で使用した物性値3	8-33
表	3.5 - 2	円形小断面の坑道の掘削技術	8-37
表	3.5-3	セラミックスの主な物性値3	8-40
表	4.2-1	各坑道の構成要素	.4-4
表	4.3-1	要素の機能、要件(アクセス立坑の例)	.4-9
表	4.3-2	プロセスに関与する FEP と区分の対応(1/2)4	1- 11
表	4.3-3	プロセスに関与する FEP と区分の対応(2/2)4	-12
表	4.3-4	区分毎の影響先とパラメータのまとめ4	- 13
表	4.3-5	処分場構成要素のふるまい(環境変遷)(アクセス立坑の例)	l-17
表	4.3-6	評価対象事象(アクセス立坑、時間区分②の例)4	1-19
表	4.4-1	回収可能性維持期間を設けた場合のプロセスの相違(状態オプション2、アクセス	ス立
	坑(其	J間③が延長される場合)の例)(1/2)4	-24
表	4.4-2	回収可能性維持期間を設けた場合のプロセスの違い(状態オプション2、アクセス	ス立
	坑(其	J間③が延長される場合)の例)(2/2)4	-25
表	4.5-1	回収可能性維持期間中の坑道の状態4	-26
表	4.5 - 2	状態オプション1におけるプロセスの違い(処分坑道(期間③が延長される場合))(1/3)
		4	-28
表	4.5 - 3	状態オプション1におけるプロセスの違い(処分坑道(期間③が延長される場合))(2/3)
			-28
表	4.5-4	状態オプション1におけるプロセスの違い(処分坑道(期間③が延長される場合))(3/3)
			-29
表	4.6-1	回収可能性維持期間中または終了後に廃棄体全量を回収する場合に考慮するプロセ	セス
	とその)影響4	1-32
表	5.2 - 1	地下水分析結果	.5-4
表	5.2-2	試験項目一覧	.5-5
表	5.2^{-3}	供試体の識別番号と分析項目の一覧	.5-9
表	5.2-4	一軸圧縮試験方法及び使用装置5	5-10
表	5.2 - 5	EPMA 測定条件5	5-12
表	5.2-6	地下水の分析方法	5-13

表	5.2-7	一軸圧縮強度試験結果(気中養生)	5-14
表	5.2-8	一軸圧縮強度試験結果(水中養生)	5-14
表	5.2-9	一軸圧縮強度試験 変形特性試験結果 (気中養生)	5-15
表	5.2-10	一軸圧縮強度試験 変形特性試験結果(水中養生)	5-15
表	$5.2 \cdot 11$	弹性波測定結果(気中養生)	5-18
表	5.2-12	弹性波測定結果(水中養生)	5-18
表	$5.2 \cdot 13$	割裂引張強度試験結果(気中養生)	5-22
表	5.2-14	割裂引張強度試験結果(水中養生)	5-22
表	5.2 - 15	強度特性試験結果の一覧	5-24
表	5.2-16	透水係数の算出結果	5-25
表	5.2 - 17	拡散係数及び仮定条件を設け算出した透水係数の結果	5-27
表	5.2-18	水銀圧入式ポロシメータの測定結果	5-31
表	5.2 - 19	骨材を含めた分析試料の鉱物組成	5-55
表	5.2-20	ペースト部の鉱物組成(シリカゲルを C-S-H に含む)	5-55
表	5.2 - 21	各試験における気中養生試験体と水中養生試験体の相違点	5-57
表	5.2-22	各試験により確認された変質部と健全部の相違点	5-58
表	5.3 - 1	試験試料寸法	5-62
表	5.3-2	亀裂透水試験に使用する計測器	5-63
表	5.3^{-3}	試験1本目試料 No.5 透水試験結果	5-67
表	5.3-4	試験 2 本目試料 No.1 透水試験結果	5-70
表	5.3 - 5	試験3本目試料 No.3 透水試験結果	5-72
表	5.3-6	声問層の大久保モデルのパラメータ	5-83
表	5.3-7	東立坑 GL-159.3m における声問層の物性値	5-84
表	5.3-8	覆エコンクリートと鋼製支保工の物性値	5-85
表	5.3-9	解析ケースごとの区間変位量の経時変化	5-89
表	5.3-10	移動值物性	5-95
表	$5.3 \cdot 11$	水分特性曲線(VG モデル)のパラメータ	5-95
表	5.3 - 12	解析ケース一覧	5-96
表	5.3-13	初期条件	5-100
表	5.3-14	EDZ1 と EDZ2 のヤング率の設定	5-130
表	5.3 - 15	EDZ1 と EDZ2 の強度定数の設定	5-130
表	5.3-16	坑道周辺岩盤の物性値	5-130
表	5.3-17	長期変化解析の解析ケース	5-138
表	5.3-18	NUMO による埋め戻し材の仕様(原子力発電環境整備機構, 2021)	5-184
表	5.3-19	埋め戻し材仕様の材料に対する膨潤圧の計測結果(菊池ほか, 2005)	5-185
表	5.3-20	緩衝材仕様の材料に対する膨潤圧の計測結果(菊池ほか, 2005)	5-186
表	5.3-21	埋め戻し材と EDZ1 の各領域における初期設定値	5-189
表	6.2-1	2021 年度の実規模試験施設の開館計画(当初)	6-5
表	6.2-2	2021 年度の新型コロナウイルス感染症対策に伴う対応	6-5

1.1 事業の概要

1.1.1 事業名

令和3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2002年に開始された。

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)に着実に取り組んで行く必要がある。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。

1-1

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"と示され、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)では、"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、本事業で技術課題として設定している下記の課題について、その研究開発の目的や考え方を整理する。

○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

- ・回収技術の高度化
- ・回収の容易性を高めた詳細設計オプションの開発

○回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備

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。

定量化すべき情報	内容
 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

表 1.2-1 回収可能性の維持に関する技術検討の枠組み

これらは、段階的に進められる事業の各節目において、可逆性・回収可能性の観点での施策的 或いは技術的な対応の評価や判断を支援する(必要となる)定量的な技術情報として、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。

(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、後者は地層処分の閉鎖後長期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体あたり或いは処分坑道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 対象となる廃棄体の全量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、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

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」ことが基本方針に示されている。

こ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)が できる期間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。

(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。

基本方針が調査研究を要求する背景となる回収可能性の維持期間の設定は、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)及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とができる。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、本事業では、これら2つを技術検討課題として 設定して取り組むこととしている。「(3)回収可能性の維持期間」と「(4)回収可能性の導入に伴う 費用」は、(1)と(2)の検討を踏まえて総合的に判断することができる。



図 1.2-1 回収可能性が維持されている状態の模式図

1.2.2 本事業での取り組み

「(1)安全性への影響」については、ストーリーボードの整備手法を用いて影響を及ぼす要因や シナリオを包括的に整理し、既存の定量化技術の有無や開発が必要な技術・知見を評価手法の多 様性に留意しつつ抽出するとともに、要因・シナリオの一部を先取りし(支保等のセメント系材 料)、地下研を活用して先行的に知見の整備に着手する。 「(2)回収の容易性(回収作業時間)」については、現時点で具体化されている 2 つの候補概念 (定置概念)を対象とした回収技術の高度化(技術的アプローチ 1)と、回収の容易性を高める ことに寄与できる詳細設計オプションの開発・整備(技術的アプローチ 2)の 2 つの観点から、 回収作業の技術的実現性の提示、確実かつ合理的な時間内での回収作業の実施に向けた技術開発 を行う。

1.3 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及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示す。各実施内容の詳細および本 年度の成果については第2章以降に示す。

1.3.1 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、「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、定置済みの廃棄体の回収作業に必要となる緩衝材や 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、以下の理由から回収作業時間の迅速化が課題として残されている。

- ・回収作業時間に長時間を要すると、回収作業そのものにおける事故リスクの増加やその間の 作業空間の健全性確保といった安全確保上のリスクが増す
- ・可逆性・回収可能性の導入という施策への更なる信頼感を醸成するには、社会が納得できる 期間内に回収作業が完了できる必要がある

回収作業時間の迅速化という課題に対して、本事業では「回収技術の高度化」と「回収の容易性 を高める詳細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、これまでに研究開発および 実規模スケールでの実証試験が実施されている。回収の実現性を示すことを最優先としてきたこ 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。

そのような示唆を踏まえ、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

処分孔竪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を除去する「塩水による除 去技術」を対象として、迅速化の検討を行い、これまでに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経てその有用性を確認・実証する。具 体的には 2014 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 て、高圧塩水を使用した流体的除去による除去時間の短縮化や緩衝材の除去範囲(除去量)の低 減化に伴う時間の短縮化を図る。

本フェーズではこれまでに、処分孔竪置き方式(パネル型)に対して、処分坑道が埋め戻され た状態から全量回収する場合の工程の具体化を行い、ボトルネックとなる緩衝材の除去作業の目 安時間(作業短縮時間)を設定した。除去作業時間を短縮するための方策として塩水とウォータ ージェットを併用することとして、緩衝材除去システムの改良に向けた技術検討項目の整理し、 開発計画を具体化した。

2021 年度は、ウォータージェットで緩衝材を切削する際の条件や、スラリー化した緩衝材の 固液分離能力の把握など、要素試験によってデータを拡充するとともに、緩衝材除去システムの 改良に向けた更なる検討を進めつつ技術開発を進める。

(b) PEM の回収に係る技術の高度化

PEMと坑道との間に充填された埋め戻し材(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」に関して過年度に実施された実規模スケールの実証試験から、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)。また、実際の事業では、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を導入することが想定されており、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。

本フェーズではこれまでに、処分坑道横置き・PEM 方式(デッドエンド型)に関して全量回 収する場合の工程を具体的し、隙間充填材除去作業の迅速化の目安時間(作業短縮時間)を設定 した。また、除去後の PEM 回収作業(処分坑道外への搬出)との連携を考慮し、装置化に向け た概念検討を行うとともに、充填材の除去に係る物性値の取得計画を立案した。

2021 年度は、隙間充填材の機械的な除去と副産物を固形物として扱う際に重要となるベント ナイト系材料と掘削ズリ(模擬)の混合土の粘性や付着性の評価に必要な土質系材料の物性値の 取得を実施する。さらに、PEM が存在する狭隘な処分坑道内で遠隔操作による除去を実施する ための除去装置の要件や機能の検討を行うとともに、取得した物性値を基にした除去装置の機構 や構造の具体化を図る。

(2) 回収の容易性を高めた詳細設計オプションの開発【第3章】

我が国において検討や技術開発が進められている処分孔竪置き方式と処分坑道横置き・PEM 方式の2つの定置概念に対する回収作業の具体化、工程の検討を通して、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、回収の容易性を高める詳細設計 オプションの検討を進めてきた。同手法や考え方に基づき創出される詳細設計オプションについ て、その成立性を確認するとともに、有望なオプションの技術的実現性を示すために必要となる 技術開発を進める。

これまでに、オーバーパックと PEM を各定置方式に対する回収時のハンドリングの最小コン ポーネントとして、回収作業時間の短縮を可能とする詳細設計オプションを適用した詳細設計や 定置方式に関する複数の案を作成した。これらについて、廃棄体からの熱影響の観点から処分場 としての成立性が確保できる定置密度に関する知見を得た。また、詳細設計オプションに対す る、製作・施工性などの技術的実現性の確保に向けた技術開発課題を抽出し、2 つの最小コンポ ーネントに共通する課題として整理した

2021 年度は、回収の容易性を表す尺度とした回収作業期間(時間)の定量化手法の検討を行 う。NUMOの包括的技術報告書に示された2つの定置概念に対して、本手法を適用して回収作 業期間の定量化を試みるとともに、この定置概念をベースに詳細設計オプションを適用した場合 の回収の容易性を評価する。さらに、共通課題として整理した回収時の緩衝材や隙間充填材の除 去作業の合理化に対して、候補となる詳細設計オプションの技術的実現性を確認する。

1.3.2 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安全性への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、定量化技術としての信頼性や説明性の確保、更に 将来の安全規制対応なども考慮すれば、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、並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適用など、よ り丁寧かつ包括的な視点で取り組む必要性がある。

本フェーズではこれまでに、閉鎖後長期の安全評価シナリオのベースとなるストーリーボード として建設・操業期間中の地層処分場の状態変遷を表現するため、処分坑道竪置き定置方式(新 第三紀堆積岩類、パネル型)の建設・操業工程を分析し、建設・操業のタイムライン、経時変化 の対象となりうる地層処分場の構成要素と使用材料を整理した。また、最新のFEP(IFEP)を 参照した要因分析により、安全性に関連する状態変遷の因子や現象を整理した。併せてストーリ ーボードへの展開方法に関する検討を進め、閉鎖後長期の安全性についてはこれまでの展開手法 を適用することとし、操業安全性(建設・定置・回収作業)については処分場の構成要素(長期 の安全機能の割り当てがないもの)並びに使用材料の劣化に着目した性能評価の手法を適用する こととした。

2021 年度は、処分場の建設から廃棄体の全量定置に至る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重要度や優先度の整理 を加えつつ、回収シナリオに対するストーリーボードを作成する。

(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。これまでに、幌延深地層研究所の坑道において実際に施工 されている吹付けコンクリート支保工と同等なコンクリート供試体を作成し、各種物性の施工直 後の初期値を計測するとともに、その後の原位置での変遷挙動の把握に向けて幌延深地層研究所 の坑道内にて定置・養生を開始した。

2021年度は、養生中の供試体のサンプリングと物性値計測を継続し、異なる養生環境(気乾状態、原位置地下水による水没状態)における劣化状況の程度を把握する。

(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、回収可能性の維持期間の追加に伴う影響の定量化の対象とする事象を再確認 する。

これまでに、実際の地下深部坑道である幌延深地層研究所深度 350m 坑道を対象として、国内外での研究成果も参照しつつ、現在の坑道周辺の地質環境概念モデルを構築するとともに、そのモデルに基づく予察的解析を実施した。

2021 年度は、予察的解析結果に基づき、解析に用いる物性値の再検討等を行うとともに、坑 道掘削直後~数百年程度までの期間を念頭においた坑道周辺の地質環境の変化に関する解析評価 を実施する。

1.3.3 地層処分実規模試験施設を活用した情報発信【第6章】

上述したような回収可能性に係る関連技術を含めた地層処分の技術開発に関する着実な進捗や 地層処分の技術的内容に関する理解を深めて頂くため、地層処分実規模試験施設を活用して、同 施設を訪問する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 行うとともに、来館者への説明や対話記録の収集・整理などを行う。

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.

2. 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

第1章で述べたように、2015年5月に改定された基本方針において、廃棄体が最終処分施設 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、最終処分施設閉鎖まで の間の廃棄体搬出の可能性(回収可能性)を確保することが要求されている。

本章では、1.3 節に示した 3 つの設計課題のうち、回収作業時間の迅速化に向けた廃棄体回収 技術の高度化に関する実施内容について整理する。

2.1 技術開発の前提

2.1.1 基本方針への対応

基本方針で示された回収は、処分事業の可逆性(政策変更)を技術的に担保するものとの意味 合いで示されており、本技術開発は以下に示す前提の下で進める。

(1) 廃棄体からの放射性物質の漏えいは生じていない

基本方針が要求する可逆性・回収可能性に関して考慮すべきシナリオとして「回収可能性の維 持期間を経て施設を閉鎖する」、「回収可能性の維持期間中に回収実行の判断を行い、全量回収す る」の2つが挙げられる。この両シナリオを満足させるためには、閉鎖/回収実行の判断に因ら ず、その判断に至るまでの通常の操業(建設、廃棄体の搬送・定置、地下施設の部分的な埋め戻 しやプラグ設置など)が適用される品質管理体系のもとで適切に行われ、閉鎖後長期の安全性が 確保されている必要がある。そのため、1,000年間は破損しないとする要件が設定されたオーバ ーパックは閉じ込め性能を維持しており、回収可能性の維持期間中において放射性物質の漏えい による汚染は生じていない。

上記を前提として本技術開発では、建設・操業・回収の各段階における、緩衝材や PEM 鋼殻、 埋め戻し材などのオーバーパックからの遮蔽厚さに応じた放射線環境を考慮し、遠隔操作による 実施を見据えた回収技術の開発を行う。

(2) 定置済みの廃棄体の全量回収の実施

基本方針が要求する可逆性・回収可能性は、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余地を確保するためのものであり、そのような制度を担保 する回収技術には、今後の技術の進展や他の変化の可能性に柔軟かつ適切に対応する観点が必要 となる。このような基本方針が要求する可逆性・回収可能性は、基本的には政策変更(将来世代 の判断による地層処分以外の管理方法への移行)に相当する。

上記を前提として本技術開発では、回収の対象となる廃棄体は回収実行を判断した際に定置済 みの全ての廃棄体を回収することとする。また、回収実行時には、地上での一時的な保管を含め て回収した廃棄体を扱う施設が新たな管理方法と共に用意されているはずであることから、回収 後の廃棄体の扱いにつては本検討の対象範囲から除外する。

(3) 回収作業時の操業安全性は確保されている

基本方針は安全な管理が合理的に継続される範囲内で回収可能性を維持することを要求していることから、回収作業時の作業安全(地下空洞の空間安定性など)は確保されている状態を前提とする。

そのような作業安全が確保されている状態について、当面の本技術開発では、回収のために特

別に施す対策(追加的な坑道の維持管理や再開放時の補修作業や回収作業時の養生など)は考慮 しない(将来的に回収可能性の維持期間を長くする必要があれば、そのような対策の具体化を図 る)。なお、回収作業期間の空間安定性については、第4章で実施中の回収可能性の維持に伴う影 響の定量化で扱っている。

以上を前提とした本事業で高度化開発する回収技術は、事故や異常事象の発生といった安全性 に関わる操業中の意図せぬ状態への対応を前提としていないが、例えば安全規制に対する是正措 置としての回収など、回収技術そのものには共通部分がある。回収が必要となる場面や動機、回 収シナリオなどの検討から技術的な要件の差分を抽出し、更なる改良による適用範囲の拡大など、 技術の拡張性を念頭に置きつつ技術開発を進める。

2.1.2回収作業工程と本事業で扱う技術開発の範囲

回収可能性の維持期間中に処分坑道や主要坑道をどのような状態にしておくかは、開放してお く/埋め戻しておくといった処分場の状態に応じて得失が相反する<u>処分場の安全性と回収手順の</u> 複雑さ(容易性)の観点から評価され決定される。実施主体が取りまとめた技術報告書によれば、 処分坑道が埋め戻され力学プラグが設置された状態で回収可能性を維持することが、2つのいず れの観点でも適用性が高いと評価されている(NUMO, 2021)。図 2.1-1 に 2 つの定置方式にお ける回収可能性の維持期間中における処分場の状態と回収時の廃棄体の搬出経路(搬出できるよ うに開放すべき場所)を模式的に示す。





(1) 処分孔竪置き方式の回収工程

オーバーパック回収時の主要作業は、①力学プラグ撤去、②処分坑道再開放、③オーバーパック周囲の緩衝材除去、④オーバーパックの搬出である。鉄筋コンクリート製の力学プラグの撤去 は、一般的な RC 構造物の解体技術、処分坑道の再開放は通常のトンネル工事の技術が適用でき ると考えられる。オーバーパック周囲の緩衝材の除去技術は、他分野にはない地層処分に要求さ れる固有の技術であり、オーバーパックに与える影響や回収作業の安全性等に留意した技術的実 現性の提示が求められる。緩衝材の除去後のオーバーパックの搬出は、閉じ込め性は確保されて いるが表面線量の高いオーバーパックのかンドリングが技術開発のポイントであり、建設・操業 時に適用するオーバーパックの搬送・定置技術の応用(再利用)が考えられる。

(2) 処分坑道横置き・PEM 方式

PEM 回収時の主要作業は、①力学プラグ撤去、②処分坑道の再開放(③PEM 周囲の隙間充填 材の除去を兼ねる)、④PEM の搬出である。処分坑道横置き定置方式では、処分坑道の再開放作 業で廃棄体が露出するため、廃棄体が存在する処分坑道内での作業となる。よって、隙間充填材 の除去技術は、他分野にはない地層処分に要求される固有の技術であり、PEM へ与える影響や 回収作業の安全性等に留意した技術的実現性の提示が求められる。隙間充填材の除去後の廃棄体 の搬出は、PEM が構造物としてハンドリングに耐える健全性を有していれば PEM として回収 することが可能である。その場合には、建設・操業時に適用する PEM の搬送・定置技術の応用 (再利用)が考えられる。

以上を踏まえ、本技術開発では、一連の回収作業において中核的な技術となる緩衝材や隙間充 填材といった土質材料の除去技術から着手した。

2.1.3 土質材料の除去技術の開発

除去技術の開発では、2 つの定置方式に適用可能な技術の提示に向けて、回収時の様々な状態 に対する技術の柔軟性の確保、回収作業に対する技術的選択肢の確保、遠隔操作や作業安全の確 保などに留意し、地層処分事業や関連技術分野における開発動向も参照しつつ、前提条件や留意 点を考慮して技術開発を進めている。

(1) 第一段階の技術開発:技術的実現性の提示

廃棄体周囲の土質材料の除去が可能な様々な技術(SKB, 2000)から,流体的除去技術(湿式) と機械的除去技術(乾式)を選択した。

処分孔竪置き方式に対しては、緩衝材の除去に流体的除去技術を適用し、緩衝材除去システムの開発を実施した(原環センター,2015)。この開発で対象とした技術は、電解質溶液による崩壊 効果で緩衝材をスラリー化させて除去するものである。フルスケールの実証試験により、オーバ ーパック周囲の緩衝材を除去できることを確認した。一方で、1 体の廃棄体を拘束する全ての緩 衝材の除去に 77 時間程度を要することが明らかになった。

処分孔横置き・PEM 方式に対しては、隙間充填材が施工されている PEM 周囲の隙間の幅に応 じて、機械的・流体的それぞれの除去技術を適用した。円形小断面坑道に PEM を定置した場合 の十数 cm の隙間に対しては、流体的除去技術のうちウォータージェット方式を適用し、PEM へ の物理的な影響を考慮した除去技術としての実現性を確認した。大断面坑道に PEM を定置した 場合の 1 m 超の隙間に対しては、機械的除去技術を適用した。オーガー方式のアタッチメントに より、吹付け工法で施工した隙間充填材の除去が可能であることに加え、付着・閉塞といった高 含水比の土質材料が除去効率の低下に及ぼす影響について確認した。一方で、1 体あたりの PEM 周囲の隙間充填材の除去に 68 時間程度を要することが明らかになった(原環センター, 2020)。

第一段階の技術開発によって、廃棄体回収の技術的実現性を提示したものの、除去時間に課題 が残される結果となった。



(a) 処分孔竪置き方式(流体的除去)
 (b) 処分坑道横置き・PEM 方式(機械的除去)
 図 2.1-2 廃棄体周囲の土質材料の除去技術の整備状況

(2) 第二段階の技術開発:一定の期間内での回収の実現(※今フェーズにおける技術開発)

第一段階の技術開発の結果として示された廃棄体 1 体あたりに数十時間を要する除去作業は、 回収作業全体の長期化、ひいては再開放した処分坑道の空間安定性などの作業安全の確保に対す る不確実性の一因となる。実際の事業を見据えた第二段階の技術開発においては、作業時間の短 縮による作業安全上の不確実性の低減が重要である。そこで、一定の期間内に回収作業が完了で きることを技術的に示すことを目的とした第二段階の開発に着手した。目安となる除去時間は, 建設・操業時の作業動線・換気経路の検討(NUMO, 2021)を踏襲し、「処分坑道の再開放」と「廃 棄体の搬出」の2つの作業を<u>別区画での同時かつ独立作業</u>で実施すると仮定した場合の作業時間 のバランスから設定した。設定した除去時間の達成が今フェーズの技術開発の目標であり、処分 孔竪置き方式には流体除去技術である塩水ウォータージェット方式を、処分孔竪置き方式には機 械的除去技術である切削方式を選定して技術の高度化に着手した。

(3) 技術の柔軟性の確保(※今フェーズにおける技術開発)

開発する除去技術の作業効率などに大きく影響する因子として、廃棄体を拘束する緩衝材や隙 間充填材の含水比の変化、隙間充填材の配合比や密度、混合される掘削ズリなどが挙げられる。 これら土質材料の性状は、定置から回収までの時間経過、処分場の個々の構成要素の仕様に依存 する。実際の回収作業時に適切な技術を選択できるよう、技術の適用性の評価に資するデータを 収集することも重要である。小型の要素試験でパラメータとして影響を把握し、実寸大の実証的 試験で技術の適用性を確認するなど、段階的な技術開発計画を策定して取り組む。

2.1.4 回収の容易性向上における技術開発の役割り

R&R 検討会で整理された技術開発のフレームワークにおいて、回収の容易性(回収作業時間) が定量化すべき項目の一つとして挙げられている。本章で報告する回収技術の高度化は、回収作 業時間の定量化において、前提とする(適用する)回収技術の技術的実現性を担保するものであ る。回収作業時間の見積においては、回収を実施する施設の設計、作業内容や手順の具体化、必 要な装置や設備能力の設定が必要であり、それらを考慮した計画・運用に基づいて定量化される。

回収の容易性向上に対しては、次の2つの方法がある(原環センター,2017)。

・技術的アプローチ1:回収方法(技術・装置)の開発や運用に重点を置く

・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

本開発は技術的アプローチ1に対応するものである。一方、第3章で検討する技術的アプロー チ2では、回収作業の具体化、各作業時間の定量的な扱いが必要となる。本開発で対象とした処 分孔竪置き方式、処分坑道横置き・PEM 方式に対する除去技術の提示に加えて、詳細設計オプシ ョンを適用した概念の回収作業時間の定量化に対しても、要素試験で取得した情報を適用してい くことが重要である。

2.2 処分孔竪置き方式の回収技術の高度化

2.2.13か年の開発計画

2020 年度から 2022 年度の3か年で、回収作業全体の安全性や作業の効率性を考慮して回収作業の工程や流れを検討し、合理的な回収作業を可能とするための処分孔竪置き方式に対する回収 技術の高度化(迅速化)を行う。

過年度に整備した緩衝材除去システムは、処分孔竪置き方式のオーバーパックに損傷を与えず に廃棄体周囲の緩衝材の除去が可能な「塩水による除去技術」によるものであり、実規模スケー ルの実証試験により約 77 時間で緩衝材除去が可能であることを実証している(原環センター, 2015)。

2020年度は、回収作業全体を効率的に進めるため、個別の処分坑道で「処分坑道の再掘削」と 「廃棄体の回収」を同程度の時間で進められることを目指して試算した結果、「塩水による除去技術」による廃棄体一体あたりの緩衝材除去作業を77時間から20時間以内に迅速化するという 目標を設定した。この迅速化の目標に向けて、技術開発課題の抽出・整理、方策の検討、試験計 画の立案を行った。主な対応策として、「噴射する水圧を高くして除去量を多くすること」、「高圧 噴射部の降下が可能なように、緩衝材の除去幅を確保する」こととした。また、水圧の高圧化に 伴う課題として、「高圧噴射の除去で生成される除去物がスラリー化するより早く、除去物が孔内 に滞留する可能性があること」、「除去速度向上により、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が不足すること」が懸念された。これらの対策・課題を解決するため に、実施すべき要素試験(噴射試験、沈降試験)の実施計画を策定した。

2021年度は、「噴射試験」、「沈降試験」の要素試験を実施して、迅速化の可能性及び噴射水の リユースの性能に関する基礎情報の確認を行う。噴射試験は、除去装置の噴射条件の設定を目的 に、パラメータとして先ず「液種、緩衝材の飽和度」について基本的な確認を行う。次いで「緩 衝材上の水深、緩衝材と噴射ノズルとの離隔、噴射ノズルの移動速度、噴射方向」の検討を行い、 要素試験で取得した除去に関わるデータから OP 底部までの緩衝材除去時間の推定を行う。更に、 高圧噴射による緩衝材除去の迅速化によってスラリーが高濃度化することが予想されるため、噴 射する液体のリユース設備の要求性能の設定のための基礎データを沈降試験により確認する。

これらの要素試験の結果を評価して、実寸大の除去実証試験(以下「フルスケール試験」という)で使用する装置の設計条件を定め、設計・製作を行うとともに、フルスケール試験の計画立 案を行う。

最終年度である 2022 年度では、フルスケール試験を実施し、高圧化した緩衝材除去システム による除去時間の迅速化の確認、高度化したシステムの性能確認及び課題の抽出、噴射水のリユ ースに関わる検討を行うものとする。

2.2.2 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、オーバーパックの破損リスクを回避できる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(原環センター, 2015)。システムの主な仕様を図 2.2-1 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	オーバーパック切片掛きの状態
転倒防止措置	スープ・マング 1日行1後記の1合戦
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 2.2-1 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500 mm 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、オーバーパックの把持部の露出、周囲の緩衝材との縁切 りまで77 時間を要することが確認されている(図 2.2-2)。



図 2.2-2 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

2.2.3 回収工程の目標設定

回収工程の検討では、NUMO が取りまとめた包括的技術報告書(NUMO, 2021)を参考に、 地下深度 500 m、新第三紀堆積岩類を対象母岩とした処分孔堅置き・ブロック方式(パネル型) のレイアウトを参照した。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前 提条件とした場合、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 長などに係る諸元と処分坑道の断面諸元を図 2.2-3 及び表 2.2-1 に示す。処分坑道の断面積は 16.5 m²であり、処分坑道 1 本当たり 131 の処分孔 (6.66 m 間隔) が配置される。



図 2.2-3 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	処分孔道再掘削延長	880
3	処分坑道片押延長	920
4	処分坑道と主要坑道交差点	40
	からプラグまでの延長	
5	主要坑道移動延長	710
6	連絡坑道移動延長	300

表 2.2-1 地下施設の延長などに係る	5諸元
----------------------	-----

(1) 回収作業の設定

処分孔竪置き方式の回収に必要な作業手順を図 2.2-4 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、その都度装置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 2.2-5 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。

処分孔竪置き方式の回収に必要な各作業(図 2.2-4)の作業時間を算定する。処分坑道再掘削 の作業時間は、①プラグ撤去、②処分坑道の埋め戻し材除去に分けて、また、オーバーパック回 収の作業時間は、③処分孔埋戻し材除去、④緩衝材の除去、⑤オーバーパックの引抜き、運搬に 分けて算定した。(原環センター, 2020)

なお、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(原環センター,2015)の実績から算定した。また、立坑の搬出能力について は、立坑設備仕様及び設備能力の一例として既往の施工及び設計事例(例えば、原子力機構,2012) を参考に算定した。



図 2.2-4 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 2.2-5 各処分区画のタイムライン(処分孔竪置き方式)

(2) 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オーバーパック1本あたりとして見積った結果を図 2.2-6 に示す(原環センター, 2020)。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とする必要がある。



図より、オーバーパック1本あたりの作業時間として、【処分坑道再掘削】から算出した作業時間は28時間/本となり、【オーバーパック回収】から算出した作業時間は84時間/本となった。
「処分坑道の再掘削」時間と、「処分孔の緩衝材除去・OP 回収」時間を同程度にするためには、 回収1 本に要する 84 時間を 56 時間短縮して、28 時間とする必要がある。

ここで、OP回収作業84時間の内訳は、埋戻し材除去に6時間、緩衝材除去作業に77時間、 OP引抜運搬に1時間であり、緩衝材除去作業が92%を占めていた。なお、緩衝材除去作業の77 時間は、2014年度の実証試験(上部緩衝材500mmと側部緩衝材1700mmを除去)で得られた 値である。緩衝材除去作業は、時間の占有率が大きく、迅速化(高度化)の余地があると考え、 ボトルネックになっていると考えられる。そこで、ボトルネックを解消するために、現状77時 間を要する緩衝材除去作業を、57時間短縮して20時間を目標に迅速化させることとした。これ により、再掘削と回収の作業時間が釣り合い、並行して作業が進められることになる。

2.2.4 緩衝材除去システムの改良計画

上述したように、全工程上のボトルネックとなる作業は、「緩衝材除去工程」であることが示唆 された。それを踏まえ、緩衝材除去作業を迅速化する方策について検討した。

緩衝材除去の迅速化は、過年度に採用した電解質溶液による緩衝材の崩壊効果を利用した方法 に対して、ウォータージェット(以下、「WJ」と称す)噴射を用いた高圧除去による方法が候補 として挙げられた。WJを用いたベントナイト混合土の除去については、処分坑道横置き・PEM 方式を対象とした地下実証試験で 0.36 m³を約 80 分で除去(0.27 m/時間)した実績があること から(原環センター, 2020)、この方法により緩衝材除去の迅速化が期待できる。ただし、PEM 方 式の試験では、PEM 周囲の除去された緩衝材が水平方向に流れ出る状況であったのに対し、処 分孔竪置き方式の場合には、WJ で鉛直下部方向に除去した緩衝材を処分孔から除去(回収)す る必要がある。

そこで、既往の成果を活用し「WJ 噴射を用いた高圧除去」と「電解質溶液による緩衝材の崩 壊効果を利用した除去土の回収」を組み合わせる方法を検討する。従来の緩衝材除去の方法との 対比で、WJ 噴射による迅速化を行うための方策を図 2.2-7 に示す。

オーバーパック(OP)周囲の緩衝材除去作業の手順を分析した内容を図 2.2-8 に、緩衝材除去 手順と装置操作のイメージを図 2.2-9 に示す。開発済みの緩衝材除去システムをベースとして、 WJ 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改良することで、緩衝材除 去の迅速化を図る。噴射・吸引設備の主たる動作は、「坑道内での位置決め」と「緩衝材の除去」 である。本事業の対象とする「緩衝材の除去」では、噴射リングの下降と揺動、流体の噴射、除 去生成物の吸引が基本動作である。



図 2.2-7 緩衝材除去の方法(従来方法とWJ噴射方法)



図 2.2-8 緩衝材除去作業の手順分析



図 2.2-9 オーバーパック開放までの作業内容及び緩衝材除去の手順

なお、噴射圧力は周辺構造物に影響を与えない圧力として 20 MPa(原環センター, 2020)、噴 射水は除去土をスラリー化させるために塩水を使用し、ノズルの形状は面的な除去が可能なトル ネードノズルとした。高圧仕様への改良における検討課題として、以下が挙げられる。

① 効率的なWJ噴射の噴射方法の設定

(ノズルと緩衝材の離隔距離、噴射する塩水が滞留した水深、ノズルの揺動(移動)速度、 噴射角度)

- ② 噴射部降下のために必要な除去幅の確保
- ③ 除去した緩衝材の塊の大きさ・形状、スラリーの性状が吸引可能であるか
- ④ 高圧噴射で生成される除去土の生成速度がスラリー化する速度より早く、除去土が孔内に滞 留する可能性がある
- ⑤ 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、現象を抽出した要素試験を行い、緩衝材除去の迅速化の可能性を 確認し、設計・改良に反映させるものとする。緩衝材除去システムの改良点として、噴射吸引設 備の高圧化、塩水リユース設備の増強、遠隔操作設備の改良が挙げられる。



図 2.2-10 緩衝材除去の迅速化に向けた課題と方針

2.2.5 噴射・吸引設備の改良

2014 年度までに低圧の流体的方法による除去技術において、実寸大の実証試験をとおして緩 衝材の除去及び回収を可能とする緩衝材除去システムを整備・開発している。噴射設備の高圧仕 様への改良による緩衝材除去の迅速化に向けて、懸念される課題への対処の見通しを得ること、 更に噴射条件の設定に必要な基本情報を得るために噴射試験を行う。

噴射試験は、ノズル種類、噴射離隔、揺動速度、作業時の水深などをパラメータとして実施し、 噴射・吸引設備の動作条件の検討を行い、緩衝材除去効率への影響を確認するとともに、除去能 力の迅速化について評価を行う。

(1) 噴射試験

(a)試験概要

噴射試験は、以下の条件を基本とした。

○ノズル

面的な除去に使用するノズルは、以下の除去性を考慮して、トルネードノズルを選定した。ノ ズル形状について、適用性をまとめた結果を図 2.2-11 に示す。

直射ノズル:エネルギーが集中するため直線的に深く穿孔できるが、面的な除去には適さない トルネードノズル:除去面と一定の距離を維持すれば除去能力が維持され、面的に除去が可能

で、吸引口も除去面先端に接近させることができ、スラリー吸引が可能 扇射ノズル:水圧が分散し線的な穿孔も面的な除去も進まない

夕称	切削	性能	副產	童物	竪置きOP回収への適用性			
1011/1	穿孔性	解砕性	排出	切削への影響	除去手順	ノズル降下	遠隔性	
直射 ノズル	 エネルギーが 集中するため 深く穿孔が進 行する 噴射水・副 排出できない 	× 面的な切削の 進行は期待で きない 深い 物を	× 流動化した副 産物が穿孔し た孔内に滞留 するため、吸 引が困難	? 噴射水と副産 物が噴射のエ ネルギーを遮 る可能性	頃射部降下のスペースは確保でき ない →ノズル降下せずに噴射 頃射 副産物は OP側部に 残留する	× 噴射部が降下 するスペース を確保できず、 ノズルの降下 はできない	× 噴射部が降下 できず、切削 の進行が目視 できない	
トルネード ノズル	△ 切削能力を維 持するには離 隔の管理が必 要 深く穿孔するに 離隔の管理が必	〇 面的に切削が 進行する	△ 流動化した副 産物が噴射面 に滞留 → スラリー化し て吸引が可能 射水・副産物が滞留 5が、排出可能	? 副産物の量が 多くスラリー 化が間に合わ ない可能性	離隔維持のためノズル降下が必須 →面的な解砕により実現可能 吸引 順射部の降下 リー化すれば 吸引が可能	○ 離隔の維持の ためノズル降 下が必須だが、 面的な解砕に より実現可能	○ 噴射部が降下 し、切削進行 がカメラ等で 目視できる	
扇射 ノズル ■	× 水圧が分散し、 穿孔性が弱い	× 水圧が分散し、 切削性が弱い	-	-	-	-	-	

図 2.2-11 噴射ノズルの種類と除去能力の評価

○模擬緩衝材(供試体)

模擬緩衝材の材料と配合は以下に示す通りである。

- ・クニゲル V1:70%
- ・砂:30%(珪砂3 号:5 号= 50:50) ※乾燥重量比

噴射試験の概要を図 2.2-12 に示す。本試験では内水槽内に1辺20 cm で成形された立方体の 緩衝材供試体を3×5列に配置し、トルネードノズルは緩衝材上を移動させる。



図 2.2-12 噴射試験の概要

(b) 試験パラメータ

要素試験の各々の項目について、パラメータの設定根拠を示す。

1 つ目の試験パラメータは液種とする。平成 26 年度地層処分技術調査等事業では並塩を水道 水 (pH:8.0) に 4%溶解した塩水を噴射水として用いた。塩水を基本とした理由は、緩衝材への 浸漬による崩壊効果及びスラリー化する際の沈殿効果が高くリユース設備の固液分離機能を期待 できるためである。塩分の装置への影響を考慮すると共に、スラリー化・浸漬作用の小さい淡水 による噴射試験も行う。

2つ目の試験パラメータは緩衝材の飽和度とする。過去に実施した緩衝材の飽和度40%と 80%の噴射試験では、80%の方が緩衝材の除去寸法が小さくなり除去効率が低くなった。(原環 センター, 2012) これを踏まえ、緩衝材の飽和度は 80%を基本とし、比較のため 60%の緩衝材 も使用した。

供試体は、プレス機を用いてベントナイト混合土を静的(圧縮力:5 MPa)に成形した1辺20 cm の立方体の緩衝材ブロックを、隙間なく敷き並べたものを用いた。緩衝材ブロックの管理値を表 2.2-2 に示す。

1	(2.2-2 版目的)ログクの自生値
目標乾燥密度	1.60 Mg/m ³ (許容値 1.60 ± 0.05 Mg/m ³)
目標飽和度	①60%(許容値 60±5%) ②80%(許容値 80±5%)

表 2.2-2 緩衝材ブロックの管理値

3 つ目の試験パラメータはノズル先端との離隔とする。トルネードノズルを規定圧力で噴射した際の噴射の広がりは、約 22 度 (メーカー提示)とされており、供試体までの離隔を 25 cm、50 cm、75 cm とする場合の噴射円の直径はそれぞれ約 10 cm、20 cm、30 cm となる。水道水をベニヤ板に噴射し、噴射円の大きさを確認したところ、図 2.2-13 のようになり、ほぼ上記の直径となった。

「塩水噴射・スラリー吸引装置」は、装置の事前設計で極力スリム化させ、降下に必要な幅は約200mmとなった。下向きノズルは、20cmの除去幅を確保できるノズル選定とノズル配置とした。1つのノズルは緩衝材との離隔25cmで、掘削幅10cmを掘削できることから、ノズル2個を10cmの間隔で並列に配置して、除去幅を20cm以上を確保するものとした。

オーバーパックの外周を円状に幅約20cmで除去するため、ノズルを固定したリング状の装置 を回転角度90度で揺動させる。ノズルは、円周方向に90度ごとノズル2個並列(離隔10cm) を1組として4か所に設置する計画とする。

これらより、ノズルと緩衝材との離隔距離は 25 cm を基準として、比較のため離隔距離 50 cm、 75 cm の確認を行う。



噴射円の直径 10 cm



噴射円の直径 20 cm 図 2.2-13 離隔と噴射円の大きさの関係

離隔 75 cm



噴射円の直径 30 cm



4 つ目の試験パラメータは噴射ノズルの移動速度とする。今回採用するトルネードノズルは円 形の噴射流となる。円形の噴射流を緩衝材の除去面に効率的に切磋させる必要がある。そのため、 効率的に除去できる緩衝材との離隔 25 cm について、噴射流が描く円が近接するような速度とし て 50 cm/min を基準として、比較のため 100 cm/min の確認を行う。



図 2.2-15 噴射流の除去面接触時のイメージ

5 つ目の試験パラメータは緩衝材の水深とする。高圧噴射を用いることで、緩衝材は塊状に除 去されることが考えられる。「噴射・吸引設備」に取り付けた吸引ノズルで、沈降した緩衝材を吸 引すると管内閉塞が懸念される。そこで、沈降した塊状の緩衝材を吸引せずに、スラリー化した 緩衝材のみを吸引するために、水深を維持する必要がある(図 2.2-16)。ただし、水深は、高圧 噴射による除去抵抗となり、除去効率を低下させる。これらより、スラリー吸引のために水深 5 cm を確保するものするが、水深が増加した場合の除去量への影響を把握する目的で、除去抵抗 が大きくなる水深 10 cm の確認も行う。



(c) 試験ケース

噴射試験は、①基本とする条件の確認、②設定したパラメータによる除去量低減の影響の確認、 ③オーバーパック上部・把持部の緩衝材除去への直射ノズルの適用性の確認、の3段階に分けて 実施した。なお、各段階終了後、次の段階の条件を再検討する要領で行った。試験ケースを表 2.2-3 に示す。

- 第1段階:ケース1~4であり、液種及び飽和度をパラメータとして基本となる条件を選定した。以降のケースでは、液種を塩水、緩衝材の飽和度を80%に固定した。
- 第2段階:ケース 5~9 であり、噴射・吸引設備の運転条件の取得を目的とする。移動速度・ 水深・離隔・噴射方向をパラメータとした基本ケース (ケース 4) との比較により、 各管理項目の除去量・形状に対する影響を把握する。ケース 9 では。オーバーパッ ク把持部の除去方法として噴射方向を斜め方向とした。
- 第3段階:ケース10~12は、直射ノズルによる把持部除去への適用を検討する。検討理由は 図 2.2-17に示すように、ケース9のトルネードノズルを採用した斜め方向噴射で は、噴流と緩衝材の接触点がa,bのように大きく離れるため、面的に均一な除去は 困難な恐れがある。その場合、OP 把持部が露出し難い状況や塊状の緩衝材が残存 することが懸念される。さらに、緩衝材除去システムは図 2.2-18に示すように側 部緩衝材を除去する際はOPの転倒防止を目的にOP上部を把持しながら噴射を行 うため、塊状の緩衝材が残存することは望ましくない。これらの改善策として、直 射ノズルによる噴射試験を行った。

なお、直射ノズルを使用した試験方法は、トルネードノズルによる方法に準じる 形で実施した。直射ノズルによる試験方法及び評価結果は後述する。

			-	• === •		-		
段階	ケース	液種	離隔 (cm)	水深 (cm)	移動速度 (cm/min)	噴射方向	飽和度 (%)	
	1	水道水	25	5	50	垂直	60	
1	2	水道水	25	5	50	垂直	80	
1	3	塩水 4%	25	5	50	垂直	60	
	4	塩水 4%	25	5	50	垂直	80	基本ケース
	5	塩水 4%	25	5	100	垂直	80	
	6	塩水 4%	25	10	50	垂直	80	
2	7	塩水 4%	50	5	50	垂直	80	
	8	塩水 4%	75	5	50	垂直	80	
	9	塩水 4%	50	5	50	斜め 45 度	80	
3	10	塩水 4%	5	0	50	垂直	80	直射ノズル
	11	塩水 4%	46	0	50	垂直	80	直射ノズル
	12	塩水 4%	63	0	50	垂直	80	直射ノズル

表 2.2-3 試験ケース





図 2.2-17 斜め方向噴射イメージ図

図 2.2-18 側部緩衝材除去イメージ

(d) 使用した機材

試験装置の概要を図 2.2-19 に示す。試験で使用する機材は、(1) ノズル、(2) ポンプ、(3) ノ

ズル移動装置となる。また、除去物のサンプリングや供試体の敷き並べに必要となる資材として (4)外水槽、(5)内水槽を使用する。



(e) 試験手順

ケース 1~9 は、WJ が供試体上を 1 度通過するのみの片道 1 回で噴射を終了して 3D スキャ ナにより除去量を測定する。一方、ケース 10~12 では WJ によってできた溝が必要除去深度に 達するまで繰り返しノズルを往復させる。噴射完了後、塊状除去物の確認、スラリー状除去物の サンプリングを実施する。

本試験は、試験データの整合性を確保するため、供試体浸漬時間の統一、噴射量の統一、外水 槽への流入水量の把握、移動距離と噴射時間を管理して行う。図 2.2-20 に噴射試験の実施前後 の状況を示す。



図 2.2-20 噴射の実施前(左)・後(右)(ケース4)

(f) 計測項目

除去性能の確認として、緩衝材除去の計測、塊状除去物の形状確認、スラリー性状の確認を、 以下の要領で行った。

- 緩衝材除去の計測 : 3D スキャナ・差金により供試体の除去前の形状と除去後の形状を計 測し、それらを比較することで、除去された体積を求めた。
- 塊状除去物の形状確認:塊状除去物が発生した場合は、最大径や含水状態を確認し、塊状除去 物が真空吸引可能かを検討した。
- スラリー性状の確認 :スラリー状除去物の性状を確認して、塩水リユースの可否を評価した。 スラリー状除去物に含まれる緩衝材の重量を濁度から求め、塊状除去 物の量を加えて除去された総重量を算定し除去体積を推定した。

計測機器詳細を表 2.2-4 計測機器詳細に示す。

メーカー	CUSTOM
型番	PH-6011A
測定範囲	0.00~14.00 pH
分解能	0.01 pH
測定精度	±0.1 pH
備考	自動温度補正
	機能あり

濁度計

Focus 3DS 120 $0.6 \sim 120 \text{m}$

±0.5% F.S.(水温 20 度時)

FARO

 $\pm 2 \text{ mm}$

メーカー

型番

測定範囲 誤差

測定精度

表 2.2-4 計測機器詳細

メーカー	OPTEX			
型番	TD-M500			
測定範囲	0.0~500度			
	(ホルマジン度)			
分解能	0.1度(0.0~99.度)			
	1度(100~500.度)			
測定精度	±0.5% F.S.(水温 20 度時)			
TT ⇒1				

pH 計

3D	スキャナ	
----	------	--

(g) 直射ノズルを使用した試験(把持部対応)

OP 把持部の緩衝材除去を、直射ノズルで行うことを検討する。除去装置噴射吸引部の構造を 踏まえた、OP 把持部緩衝材除去のイメージを図 2.2-21 に示す。先ず、先行して下向き噴射によ りリング降下用の溝を除去しておき、次いで、直射ノズルを降下させて、すり鉢状に緩衝材除去 を行う。噴射水及びスラリー状除去物は、リング降下用の溝に流れ、吸引ノズルにより吸引する。



直射ノズルによる把持部除去のイメージ 図 2.2-21

直射ノズルを下降させて、緩衝材除去の際の離隔と必要となる除去深度の関係を図 2.2-22 に 示す。図中、噴射イメージを赤で示した離隔最大(1ケース)、必要除去深度大(2ケース)が除 去に関して厳しい条件になると考えられる。

ここで、離隔 A からの噴射で除去深度 B の除去が確認すれば、離隔 A 以下、且つ、除去深度 B以下の条件であれば、除去が可能と判断できる。ただし、除去深度 Bは、複数回で除去できて も良いと考える。この考え方に基づき、図 2.2-22 に示したノズルの離隔と必要となる除去深度 の関係を包括する条件(図 2.2-23 参照)(離隔,必要除去深度) = (46 mm, 474 mm)、(455 mm, 424 mm)、(626 mm, 183 mm)を試験ケースとして設定したものを表 2.2-5 に示す。



図 2.2-22 上部緩衝材を除去する際の離隔と必要となる除去深度

		X 1.2 0	* 11/ 22					
ケース	ノズル	液種	離隔	必要除去深度	水深	移動速度	噴射	飽和度
			(cm)	(cm)	(cm)	(cm/min)	方向	(%)
10	直射ノズル	塩水 4%	5	48	0	50	垂直	80
11	直射ノズル	塩水 4%	46	43	0	50	垂直	80
12	直射ノズル	塩水 4%	63	19	0	50	垂直	80

表 2.2-5 直射ノズルを用いた試験ケース



図 2.2-23 離隔と必要除去深度の関係より設定した噴射試験の条件(ケース 10~12)

トルネードノズルを使用したケース 1~9 では、噴射ノズルを除去面に1 回移動させて除去量 を計測したのに対し、直射ノズルによる試験では設定した離隔において必要除去深度を満たすま で往来させて除去する方法とする。除去深度及び除去幅は片道1回ごとに計測する(図 2.2-24 参照)。



図 2.2-24 直射ノズルを使用した噴射試験(ケース 10~12)の手順

(h) 試験結果

要素試験の結果を以下に示す。

噴射吸引設備の改良は、WJ 噴射機能を噴射・吸引設備に追加し、緩衝材除去の迅速化を図る ことを目的としている。噴射試験による緩衝材除去の結果は、毎分当たりの掘削量で評価を行う。 試験ケースにおける除去量を表 2.2-6 及び図 2.2-25 に示す。

第1段階の検討で、液種(塩水、水)及び飽和度(60%、80%)をパラメータとして試験を行った結果を示す。液種による除去量は、飽和度60%では塩水(ケース3)は水道水(ケース1)の約5割増し、飽和度80%では塩水(ケース4)は水道水(ケース2)の約2割増しとなり、塩水を使用した方が時間当たりの除去量が多くなった。緩衝材の飽和度の除去量への影響は、塩水と水ともに飽和度80%の除去量が多くなった。これらより、WJ噴射による緩衝材の時間当たりの除去量は、水道水より塩水を使用した方が多く、また、緩衝材の飽和度は60%より80%の方が多くなることが確認できた。

第2段階以降の試験の基本条件として、緩衝材の崩壊効果及びスラリーの沈殿効果が高い「塩水」を使用するものとし、緩衝材は過去(原環センター,2012)の噴射試験で除去効率が低くなった「飽和度80%」とするものとした。これは、ケース4の試験条件に相当するため、除去状況の比較にケース4を用いるものとした。

第2段階の試験で行った、噴射・吸引設備の運転条件(移動速度・水深・離隔・噴射方向)の 影響は、ケース4(基本ケース)の除去量との比較で、表 2.2-7 に示すとおりになった。噴射に よる除去量低減への影響は、離隔距離が最も大きく、次いで水深、移動速度であることが確認で きた。

段階	ケース	液種	離隔 (cm)	水深 (cm)	移動速度 (cm/min)	噴射方向	飽和度 (%)	除去量 (cm³/min)
	1	水道水	25	5	50	垂直	60	1,784
1	2	水道水	25	5	50	垂直	80	2,874
1	3	塩水 4%	25	5	50	垂直	60	2,743
	4	塩水 4%	25	5	50	垂直	80	3,382
	5	塩水 4%	25	5	100	垂直	80	3,005
	6	塩水 4%	25	10	50	垂直	80	2,316
2	7	塩水 4%	50	5	50	垂直	80	885
	8	塩水 4%	75	5	50	垂直	80	63
	9	塩水 4%	50	5	50	斜め 45 度	80	1,050

表 2.2-6 試験ケースにおける毎分の除去量



図 2.2-25 試験ケースにおける時間当たり除去量

検討項目	影響	設定	ケース4に	ケース 4(基本ケース)
	順位		対する除去率	の設定値
離隔距離	1	2 倍(50 cm)	約 25%程度	$25~{ m cm}$
		3 倍(75 cm)	約 2%程度	$25~{ m cm}$
水深	2	2倍(10 cm)	約 70%程度	$5~{ m cm}$
移動速度	3	2倍 (100 cm/min)	約 90%程度	50 cm/min
斜め噴射	_	45 度の噴射	約 30%程度	90度(垂直)

表 2.2-7 噴射吸引設備の運転容量の検討結果

WJ 噴射によるオーバーパック側面の面的除去について、噴射吸引設備の動作手順として、以下の条件を基本とする。

- ・離隔距離:25 cm を基本とする。
- ・水深 : 5 cm を基本とする。
- ・移動速度: 25 cm/min を基本とする。

基本としたケース 4 及び把持部を対象とした斜め 45 度から噴射したケース 9 について、緩衝 材の物性(乾燥密度、飽和度)、噴射終了後の状態、除去形状の 3D スキャン結果、塊状除去物の 観察結果を図 2.2-26 及び図 2.2-27 に示す。

ケース4の除去形状は、凹形の水路のような形状で除去されており、幅は約10cm 程度となっ ており、緩衝材除去設備のリング降下に必要となる面的な除去の可能性が確認できた。除去断面 の形状は、底中央部が凸形に膨らんでおり、最も浅い部分で5.6cm 程度除去されており、噴射の 当たる密度が高い側部で7~8cm 程度除去されていた。なお、除去形状は、斜め噴射(ケース9) 以外の垂直に噴射したケースでは、離隔距離・水深などの試験条件により除去寸法は変わるもの の、除去中央部が凸形で、噴射の当たる密度が高い側部の除去が多くなっていた。

トルネードノズルによる斜め方向噴射(ケース 9)の離隔 50 cm は、噴射ノズル中心からノズ ル軸上の模擬緩衝材までの直線距離である。斜め方向噴射では、離隔が短い側での除去深度が大 きく、遠い側の除去深度は小さくなっている(図 2.2-27 参照)。斜め方向噴射では、噴射の当た る密度が高い部分の除去が主体で、面的に均一な除去を行うことができなかった。この結果より、



OP 把持部が露出し難い状況や塊状の緩衝材が残存することが懸念される。

図 2.2-26 噴射試験結果 (ケース 4)



図 2.2-27 噴射試験結果 (ケース 9)

各ケースの、除去物の性状、毎分の除去量、吸引性の結果を表 2.2-8 に示す。

除去物に見られた塊状の緩衝材は、塩水使用では塊が確認できた場合に最大径 5~8 cm 程度の ものが数個、水道水使用では塊が確認できた場合に最大径 5~9 cm 程度のものが数個であった。 緩衝材への浸漬による崩壊効果が高い塩水使用時の塊は、容易に破砕でき吸引可能であったのに 対し、一方、水道水用時の塊は粘土状のためホース内で詰まる懸念がある。

ケース	液種	除去物の性状	除去量	スラリー	吸引性	飽和度
			(cm ³ /min)	液個比※		(%)
1	水道水	塊は押せばつぶれる、	1,784	84	粘土状のためホース内	60
		最大径 5~9cm 程度で様々			で詰まる恐れ	
2	水道水	塊は押せばつぶれる、	2,874	146	粘土状のためホース内	80
		最大径 2~5cm 程度で様々			で詰まる恐れ	
3	塩水 4%	塊は押せばつぶれる、	2,743	186	吸引可能、塊は容易に	60
		最大径 5~8cm 程度が数個			破砕	
4	塩水 4%	塊は無し	3,382	178	吸引可能	80
5	塩水 4%	塊は無し	3,005	142	吸引可能	80
6	塩水 4%	塊はほとんど無し	2,316	142	吸引可能	80
7	塩水 4%	塊はほとんど無し	885	66	吸引可能	80
8	塩水 4%	塊は無し	63	24	吸引可能	80
9	塩水 4%	径1cm以下が数個	1,050	66	吸引可能	80

表 2.2-8 除去物の性状、吸引性の結果一覧

※ スラリー液個比:1,000:X、Xの値を掲載

直射ノズルを使用した噴射試験における噴射回数と除去深度の関係を図 2.2・28 に示す。ケース 10~12 のどのケースにおいても繰り返し噴射を行うことで必要除去深度に到達することが確認できた。ケース 10 及びケース 11 では必要除去深度に到達するまでに 5 回の噴射を必要としたが、ケース 12 では 2 回の噴射で必要除去深度に達した。この結果より、直射ノズルを使用する場合、トルネードノズルと比較して離隔による除去深度への影響は小さいことが確認できた。噴射回数と除去幅の関係を図 2.2・29 に示す。除去幅については、噴射回数による影響はほとんどないことが確認できた。直射ノズルによる結果より、ノズル位置、離隔に応じて OP もしくは緩衝材中心部まで緩衝材を除去できることが示唆された。よって、把持部緩衝材除去に直射ノズルを使用することは有効であると判断できる。



(i) WJ 噴射による緩衝材除去時間の算定

噴射試験により得られた結果を踏まえ、WJ 噴射による緩衝材除去時間の算定を OP 側部の緩 衝材(トルネードノズル対象)と OP 把持部の緩衝材(直射ノズル対象)に分けて行う。図 2.2-30 に緩衝材除去対象範囲を示す。



図 2.2-30 緩衝材除去対象範囲

直射ノズルによる把持部緩衝材除去は、図 2.2-31 に示すように、WJ により緩衝材を削り取る ことで除去が進行し、除去形状はすり鉢状になると考えられる。除去時間を推定する際の、緩衝 材除去幅は、ケース 11 (図 2.2-29)を参考に 2.5 cm と仮定する。

除去幅を 2.5 cm と仮定した場合、図 2.2-31 のように斜め 45 度から噴射する水流による鉛直 方向の緩衝材除去幅は、2.5 cm× $\sqrt{2}$ =3.5 cm と計算できる。これより、鉛直方向 88.5 cm の除 去は、88.5 cm/3.5 cm=26 段階に分けて降下させるものとする。すなわち、オーバーパック肩 部上面の 88.5 cm の区間は、3.5 cm ごとにノズルを降下させていくことで、オーバーパック把持 部の全ての緩衝材を除去できると考えられる。

ただし、ノズルを降下させて各段階で噴射する回数は、要素試験の結果を基に、除去する深さ に応じた噴射回数とする。



図 2.2-31 OP 把持部付近の緩衝材除去に直射ノズルを使用した場合の噴射位置

各段階の離隔と必要除去深度(図 2.2-22)から、ケース 10、11、12 から得られた除去深度と 噴射回数の関係(図 2.2-28)を用いて、必要な噴射回数をもとめ、除去に要する時間を算出した。 なお、噴射 1 回に要する時間は 106 秒*とする。

結果を表 2.2-9 に示す。オーバーパック上部の緩衝材除去に要する合計時間は 137.8 分(約 2.3 時間) と算定された。

※ 噴射1回に要する時間は、噴射リングの揺動が90度回転する時間。外側の下向きトルネ ードノズル設置位置 φ112 cm の円周の1/4 (90度)を50 cm/min で進む時間で106秒とする。

	戶几個比	離隔	掘削幅	必要除去深度	噴射回数	噴射時間
1~~ r	权陷	(cm)	(cm)	(cm)	(回)	(sec)
斜め 45 度下向きへ	1	62.6	1.25	0	1^{*1}	106
噴射開始	2	60	2.5	2.6	1^{*1}	106
	3	55.1	2.5	7.5	1^{*1}	106
	4	50.1	2.5	12.5	1^{*1}	106
	5	45.2	2.5	17.4	2^{*2}	212
	6	40.2	2.5	22.4	2^{*2}	212
	7	35.3	2.5	27.3	3^{*2}	318
	8	30.3	2.5	32.3	3^{*2}	318
	9	25.4	2.5	37.2	4^{*2}	424
	10	20.4	2.5	42.2	5^{st_2}	530
把持部の頂部に到達	11	15.5	2.5	42.4	5^{*2}	530
	12	10.5	2.5	42.4	5^{st_2}	530
	13	5.6	2.5	42.4	5^{st_2}	530
	14	4.6	2.5	43.8	4^{*3}	424
	15	4.6	2.5	47.4	5^{*3}	530
	16	4.6	2.5	47.4	5^{*3}	530
	17	4.6	2.5	47.4	5^{*3}	530
	18	4.6	2.5	47.4	5^{*3}	530
把持部の根元に到達	19	4.6	2.5	38.5	3^{*3}	318
	20	4.6	2.5	33.5	3^{*3}	318
	21	4.6	2.5	28.6	3^{*3}	318
	22	4.6	2.5	23.6	2^{*3}	212
	23	4.6	2.5	18.7	2^{*3}	212
	24	4.6	2.5	13.7	1^{*3}	106
	25	4.6	2.5	8.8	1^{*3}	106
OP 上部の除去完了	26	4.6	2.5	3.8	1	106
				噴射時間	計 (sec)	8268
				噴射時間	計 (min)	137.8

表 2.2-9 直射ノズルを使用した場合の OP 把持部の緩衝材除去時間

※1:ケース12から得られた切削距離と噴射回数の関係を参照 ※2:ケース 11 から得られた切削距離と噴射回数の関係を参照 ※3:ケース 10 から得られた切削距離と噴射回数の関係を参照

トルネードノズルによるオーバーパック側部の緩衝材除去は、高圧噴射の除去システムの噴射 リングが降下できる幅の緩衝材を除去して、順次、鉛直下向きにオーバーパック側部の緩衝材除 去が進んでいくものである。除去時間推定で重要となるのは、噴射リング以上の幅をもって掘削 できていること、及び、深さ方向への進行速度である。ここで、除去できた体積が多くても、そ れが必要な幅以上に掘削していれば、深さ方向への進行速度には寄与しない。よって、オーバー パック側部の緩衝材除去時間は、鉛直方向の除去深さにより求めることとする。

基本としたケース4の形状計測結果のうち断面形状(図 2.2-32)から、除去深さが浅くなる中 央付近の深さを抽出し、この平均 5.57 cm を噴射 1 回における除去速度(cm/回)とする。

噴射試験	断面 1	断面 2	断面 3	
ケース4	10.6cm 7.4cm 7.6cm 7.1cm	10.7cm 7.8cm 7.7cm	10.7cm 7.8cm 5.5cm 7.9cm	

図 2.2-32 トルネードノズルによる除去断面形状 (ケース 4)

鉛直方向噴射は、水深 5 cm、離隔 25 cm を維持して噴射することを設計条件とする場合、オ ーバーパック側部緩衝材の除去対象範囲内の深さ 220.5 cm を全て掘削するには、220.5/5.57= 40 回の噴射が必要となる。前述の通り、1 回の噴射には揺動 90 度に要する時間、106 秒が必要 であるため、除去に要する時間は 106 秒×40 回=4240 秒=70.7分(1.2 時間)と算定される。

オーバーパックの緩衝材除去に要する合計時間は、以下のように算定される。噴射リングの降 下回数及び必要噴射回数を、除去時間との関係で一覧にしたものを表 2.2-10 に示す。

OP 把持部: 137.8 分(約2.3 時間)

OP 側部 : 70.7 分(約1.2 時間)

合計 : 208.5 分 (約 3.5 時間)

対象部位	除去部長さ	除去速度	降下回数	必要噴射	除去時間	除去時間
	(cm)	(cm/回)	(回)	回数(回)	(秒)	(時間)
把持部	88.5	3.5	26	78 [*]	8268	2.3
側部	220.5	5.57	40	40	4240	1.2
					合計	3.5

表 2.2-10 OP 側部緩衝材の除去に要する時間の算定

※ 把持部は、1 回の降下に対して、複数回の噴射を行う。

ここで、算定された約 3.5 時間は、WJ の噴射時間の合計である。実際は、これに「リングの 昇降」、「除去形状の計測」、「システムの確認・調整」などの時間が加算される。また、要素試験 では確認できていない「スラリーの吸引性低下」、「除去速度の変動」、「塊状での除去」などの事 象の発生も懸念され、除去時間へ影響すると考えられる。それらを含めても、目標としていた 20 時間以内での除去を満足する可能性の高い算定結果となった。

(2) 噴射・吸引設備の設計・制作

緩衝材除去作業の時間を低圧の流体的方法による除去技術から高圧 WJ を採用することで、作 業時間短縮の検討を行った。検討は、WJ 噴射の動作条件に関する要素実験を行い、緩衝材の除 去能力及び必要な動作条件を確認し、フルスケール試験の緩衝材除去に要する時間の算定という 手順で進めた。その結果、3.5 時間程度での除去が可能と見積もられ、目標とした 20 時間を下 回る予測が得られた。

過年度に開発した低圧流体的方法による緩衝材除去システムは、フルスケール(実寸大)試験 の実施により、安定動作のための油圧系昇降動作の改善や深度増加によるスラリー吸引流量の低 下といった課題が明らかになり、それらに対応することでフルスケールに対応する装置としての 完成度を高めることができた。

噴射試験により定めた噴射条件に対応する噴射リング部の試験装置の設計・製作を行い、高圧 噴射による緩衝材除去及び OP の引き抜き試験を行う。これらをとおして、フルスケールでの緩 衝材除去作業時間の確認及び装置の改善事項の抽出を行う。

(a) 設計条件の整理

フルスケール試験装置の設計は、(1)要素試験から与えられる条件、(2)試験環境(次年度 試験候補地)から与えられる条件、(3)既往の知見から与えられる条件について、表 2.2-11~ 表 2.2-13 に詳細を示した。

区分	項目	条件	
前提条件 (材料条件)	緩衝材配合	ベントナイト 70 wt%+ケイ砂 30 wt%	
(材料条件)	緩衝材密度	乾燥密度 1.6 Mg/m ³	
(装置・設備条件)	噴射圧力	20 MPa	
材料条件	噴射水液種	塩水	
	緩衝材飽和度	80%	
装置・設備条件	水深(吸引ノズル位置)	緩衝材面より5 cm	
	離隔(下方向ノズル、斜め方向ノズル)	緩衝材面より 25 cm	
	噴射ノズルの移動速度	50 cm/min	

表 2.2-11 要素試験から与えられる条件

表 2.2-12 試験環境(次年度試験候補地)から与えられる条件

区分	項目	条件
前提条件(装置·設備条件)	装置高さ、試験スペース	屋内試験施設に収まる寸法、設備数

表 2.2-13 既往の知見から与えられる条件

区分	項目	条件
前提条件 (装置·設備条件)	流量(噴射/吸引流量)	総噴射流量 250 L/min、総吸引流量 250 L/min
		(リユース設備の規模・能力から与えられる目安)

(b) 装置設計

上述した設計条件満足するフルスケール試験装置の設計を実施し、以下の検証を段階的に実施した。

・2D加工・組立図による構造検証

- ・3D モデリングによる構造検証
- 組立検証

図 2.2-33、図 2.2-34 にフルスケール試験装置に関する本年度の製作状況を示す。2021 年度は 噴射・引設備のうち、主に塩水噴射・スラリー吸引装置(噴射リング)を製作し、噴射及び吸引 に関する性能確認までを実施した。



図 2.2-33 塩水噴射・スラリー吸引装置(噴射リング)





図 2.2-34 塩水噴射・スラリー吸引装置(噴射リング)の装備品取付け

(3) フルスケール試験に向けた確認試験

(a) 噴射・吸引設備の性能確認試験

2021 年度に制作した塩水噴射・スラリー吸引装置(噴射リング)について、フルスケール試験 時の動作確認試験を実施した。確認する性能は、噴射圧力、噴射流量(ノズル単体、総量)、吸引 圧力、吸引流量とした。

試験は、以下の3ケースに分けて実施し、噴射及び吸引性能を確認することとした。計測機器 で測定する項目は、「噴射圧力」「噴射流量(総量)」「吸引圧力」「吸引流量(総量)」であり、「噴 射流量(ノズル単体)」は時間当たりの流量を、計量容器を用いて測定することとした。なお、斜 め方向噴射時ノズルについては、装置の構造上単体での流量測定が困難であることから、ノズル 4本の総量測定をもって性能確認とした。

ケース1 噴射圧力・噴射流量(鉛直方向噴射ノズル単体、鉛直方向噴射ノズル総量)確認 ケース2 噴射圧力・噴射流量(鉛直方向噴射ノズル総量)・吸引圧力・吸引流量(総量)確認 ケース3 噴射圧力・噴射流量(斜め方向噴射ノズル総量)確認 ケース1からケース3の試験イメージを図 2.2-35~図 2.2-37 に示す。



図 2.2-36 ケース 2 試験イメージ図



図 2.2-37 ケース3試験イメージ図

試験の結果、鉛直方向噴射ノズル単体では、圧力値 20 MPa に対し、噴射流用 28.7 L/min であること、また、鉛直方向噴射ノズル総量、斜め方向噴射ノズル総量が目標値を満たすことを確認した。ただし、噴射と吸引を同時に実施したケース2では、懸念されていたエア吸い込みによる吸引流量の脈動と吸引流量不足が確認された。この対策として、フルスケール試験では補助として負圧ポンプ(バキュームダンパー)の導入を検討している。詳細は付属書 2.2 に記載する。

(b) 噴射・吸引設備の幾何学的干渉確認試験

2021 年度に制作した塩水噴射・スラリー吸引装置(噴射リング)について模擬オーバーパック に対する幾何学的な干渉について確認する動作試験を実施した。

試験では、フルスケール試験で使用する模擬オーバーパック、模擬処分孔などの設備を構成し、 天井クレーンを用いて噴射リングの昇降動作を模擬した。図 2.2-38 に幾何学的干渉試験のイメ ージ図を示す。



図 2.2-38 幾何学的干渉試験イメージ

試験の結果、塩水・噴射吸引装置(噴射リング)が模擬オーバーパック側部を円滑に通過し、 装置に装着したガイドローラーが模擬オーバーパック接触時に円滑に作動(回転)することを確 認した。詳細は付属書 2.2 に記載する。

2.2.6 塩水リユース設備の改良

(1) 塩水リユース設備の運用案

トルネードノズルと直射ノズルを組み合わせた高圧化 WJ 噴射により、緩衝材除去時間が大幅に短縮できる試算が得られた。

除去時間の大幅な短縮の見込みを受けて、緩衝材除去に使用する総使用水量も大幅に削減する ことができる。2014年度の実証試験では1処分孔あたりの緩衝材除去に要する時間は77時間 であり、緩衝材除去に使用する総使用水量は1,155 m⁶(噴射量:250 L/min)と大量の除去水を 必要とした。処分坑道内での緩衝材除去という制約条件を踏まえ、除去水を確保するための設備 規模を合理化するため、除去水を循環利用して緩衝材除去を可能とする塩水リユース設備の運用 を前提とした検討が行われてきた。これにより、緩衝材除去に用いる使用塩水量を約25 m⁶にま で削減し、限られたスペースでの緩衝材除去を可能とした。

しかし、今回の噴射試験結果により、緩衝材除去に要する時間が1処分孔あたり約3.5 時間に まで短縮できる見込みとなり、総使用水量は約33 m³にまで削減できることとなる。総使用水量 削減に伴い、塩水リユース設備の運用方法に様々な可能性を見出すことができる。例えば、図 2.2-39 に示す坑道内での原位置処理(案1)である。これは既述の通り緩衝材除去に使用した噴 射水を、塩水リユース設備を介して循環利用し、連続的な緩衝材除去を行う方法である。次に図 2.2-40 に示す塩水リユース設備を坑底施設などの処分孔より離れた個所に配置する(案2)であ る。これは1処分孔で使用した除去水を貯留槽等などに貯留し、水槽内の除去水を塩水リユー ス設備へ運搬する方法である。その他の案として緩衝材に使用した除去水を地上施設へ運搬する (案3)である。これは地上施設に配置した塩水リユース設備に案2と同様に除去水を運搬する か、もしくは除去水を地上へ運搬し廃棄する方法である。

廃棄案を採用する場合、塩水リユース設備を介する必要性はなくなるため、緩衝材除去に使用 する液種に水を選択することも可能となる。ただし、水を使用する場合は、噴射により除去され た緩衝材が塊となり、吸引設備を閉塞させないようにする工夫が必要となる。

各案に対し、塩水リユース設備の設置規模や設置場所、除去水の運搬手法・経路などの課題が あるものの、緩衝材除去時間の短縮に伴う総使用水量の削減は塩水リユース設備の運用方法に柔 軟性を生み出すこととなる。



図 2.2-39 塩水リユース設備の運用方法(案1)





(2) 噴射・吸引設備と塩水リユース設備の関係

噴射・吸引設備の改良による除去速度の向上により、緩衝材除去に要する時間を大幅に短縮で きる可能性があることが示された。除去速度向上に伴い吸引すべきスラリーの発生量は減少する が、その一方でスラリー濃度は増大し固形成分の沈降に時間を要する(沈降速度が低下)ことが 予想される。2014年度の検討における塩水リユースの全景を図 2.2-41に示す。緩衝材除去に より発生したスラリーは塩水リユース設備内の一時回収槽を経由し、固液分離槽で処理される。 同年に実施された実証実験では、スラリーの平均 SS 濃度 5000 mg/L 弱を、安定して 300 mg/L 程度まで低減できており、固液分離槽の処理能力は十分であると評価した。

噴射・吸引設備を高圧化して迅速化することで、短時間で高濃度のスラリーが発生する。一方 で、オーバーパックを回収可能な状態にするための除去範囲は、低圧塩水噴射と高圧塩水噴射に よる大きな差はなく、単位時間あたりの噴射量も15 m²h と同程度である。よって、除去時間が 77 時間から3.5 時間へと短縮される見込みにより、除去生成物であるスラリーの液固比は22 倍 程度濃くなることが予想される。

2014年度の実証試験における固液分離装置は、沈殿分離を原理とした固液分離槽であった。 上昇流式の固液分離装置の原理を図 2.2-42 に示す(井出哲夫, 1976)。固液分離槽が能力を発揮 するためには、沈降速度 Vp が水槽内の上向き流速 Vw(=全体流量 Q/固液分離槽の有効断面 積 A)より大きくなる必要がある。この特性をリユース設備の能力補強として活用するため、 種々の条件における沈降速度を取得する必要がある。



図 2.2-41 塩水リユース設備の全景 (原環センター, 2015)



図 2.2-42 上昇流式の固液分離の原理

(3) 沈降試験

リユース設備に必要な固液分離能力を検討する上で基本情報となるスラリー中の固形物の沈降 速度の取得を目的として、スラリー濃度、電解質の種類・濃度、凝集剤の有無をパラメータとし て試験を実施した。本試験は、上澄み液と沈殿物の境界部の時間変化(沈降状況)に着目した試 験であるため「沈降試験」とした。一般に、沈殿試験は沈殿物の容積に着目した試験であり、現 象や実際の作業手順は本「沈降試験」と同じである。

(a) 試験概要

試験は、アクリル円筒状容器に溶液とベントナイト混合土を混合してスラリー状になるまで攪拌したもの(以降、緩衝材スラリーと呼ぶ)を水深150 cm まで投入し、ベントナイト混合土が 沈降していく状況を確認するものである。スラリー濃度は液固比(1000:n)で規定し、複数の 液固比について試験を行い、沈降速度とスラリー物性の関係を取得する。本試験の概要図を図 2.2-43 に示す。



図 2.2-43 沈降試験の概要

(b) 試験パラメータ

沈降試験で使用する溶液の設定理由を表 2.2-14 に示す。

表 2.2-14 溶液の設定理由

No.	電解	濃度	凝集	設定理由
	質	(%)	剤	
1	NaCl	4	無	従来システムでの検討(原環センター,2015)で使用し、さら
				に今回の噴射試験で基本ケースに設定した溶液である。
2	NaCl	8	無	過去の検討(原環センター, 2009)で NaCl 濃度が 2%、2%、
				4%、6%、での沈降試験の結果、NaCl 濃度 3%で沈降速度が著
				しく速くなり、濃度 3%以上で沈降速度が大きく変化しないと
				いう結果であった。また、他の過去の検討(同,2013)では、
				液固比 1000:20 で NaCl 濃度が 4%、6%、10%の場合、塩分濃
				度が高いほど沈降速度が速いという結果が得られている。こ
				れらの結果を踏まえ、NaCl 濃度 8%での試験を行う。
3	$CaCl_2$	4	無	電解質の変更例として、SKB が実証実績のある CaCl2を選択
				し、沈降速度上昇の余地があるかを確認した。また、過去の検
				討(同, 2009)では、CaCl2濃度が2%以上でNaCl溶液と同
				程度の沈降速度を有すると結論付けている(図 2.2-44)。こ
				れらの結果を踏まえ、CaCl2濃度 4%での試験を行う。
4	NaCl	4	有	固液分離装置内で凝集剤 (PAC:下水処理で一般的に使用され
				るポリ塩化アルミニウム)を添加することによる沈降速度へ
				の影響を検討した。沈降試験実施後に上澄み液を採取し、塩分
				濃度、pH、SS 濃度の計測を行い、リユース水の水質・除去能
				力などへの影響、並びに沈降前後の PAC の濃度変化・必要添
				加量などを検討する。なお、塩分濃度と pH は、ベントナイト
				混合物を投入する前にも計測を行い比較する。
5	並塩	4	無	塩水による緩衝材除去が実用化する場合、価格の安い並塩の
				使用が想定される。工業用の並塩でも試薬と同等の固液分離
				効果の有するか確認する。なお、噴射試験でも並塩水溶液を使
				用している。



図 2.2-44 遠隔操作技術高度化開発における沈降試験の結果 (原環センター, 2009)

フルスケール試験では、噴射試験ケース4の条件を基本に噴射関係の機械設計を行うため、発 生するスラリーの濃度もケース4と同程度となることが想定される。沈降試験では、液1000に 対して、固体比を50、100、150、200、250、300の計6パターンの液固比で試験を実施する。

ケース	電解質	電解質濃度(%)	凝集剤	液固比(1000:n)
				a : 50、 b : 100
1	NaCl	4	無	c : 150、 d : 200
				e : 250、 e : 300
2	NaCl	8	無	a~f(ケース1と同じ)
3	$CaCl_2$	4	無	a~f(ケース1と同じ)
4	NaCl	4	有	a~f(ケース1と同じ)
5	並塩	4	無	a~f(ケース1と同じ)

表 2.2-15 沈降試験 試験ケース

(c) 供試体の作成

ベントナイト混合土の配合を表 2.2-16 に示す。混練時の加水量は、目標飽和度である 80% ± 2%に必要な含水比となるように調整する。混練は、噴射試験と同様の手順と設備で実施する。

沈降試験では、沈降速度が遅くなることが想定される飽和度 80%(含水比:約 21.0%)の緩衝 材の材料となるベントナイト混合土(含水比:約 21.0%)を用いて沈降試験を実施した。

A 2.2 10			
クニゲル V1	70%		
砂	30%	珪砂 3 号 15% 珪砂 5 号 15%	

表 2.2-16 ベントナイト混合土の配合

※乾燥重量比

過去のスラリーの固液分離特性試験では、攪拌などによりせん断分解を促進すると、沈降速度 が遅くなると結論付けている。そのため、沈降試験ではスラリーの分散を十分に行い、沈降速度 を遅くして、塩水リユース設備に負荷がかかるデータを得るものとする(原環センター,2009)。 本試験では、攪拌を十分に進めるため「①ポリバケツ内に溶液とベントナイト混合土を投入」、 「②攪拌機を作動させて手動で上下方向に移動させながら1分間攪拌」、「③十分にスラリー化が 進行したことを確認」の3ステップを確実に実施してから試験を行うこととした。さらに、十分 にスラリー化が進行したことを、過去の基礎試験の結果から右(試料 C)(原環センター,2013) の状態を参考に、珪砂周りのベントナイトが分離していることを目視確認することとした。



図 3.3.3-2 コロイド現象 (試料 A)

図 3.3.3-3 コロイド現象 (試料 B)

図 3.3.3-4 コロイド現象 (試料 C)

図 2.2-45 スラリー化進行の目安(試料Cが充分にスラリー化した状態)

(d) 使用機材

試験に使用した透明なアクリル円筒容器を図 2.2-46 に示す。円筒容器は直径 10.8 cm、高さ 170 cm であり、沈降量を観察するためセッティングメジャーを円筒に貼付し、転倒防止のため底 面には重りを載せている。試験は、各ケースの液固比が異なる a~f の供試体を、一度に沈降を開 始させて、目視により沈降速度の比較を行う。



図 2.2-46 アクリル円筒容器

(e) 試験手順

沈降試験は、以下の手順で実施する。

ベントナイト混合土及び溶液を10L作製する。ケース4のみ、凝集剤を添加する。溶液にベントナイト混合土を規定量投入し、電動攪拌機でかき混ぜ、緩衝材スラリーを作製する。緩衝材スラリーを円筒容器内に投入し、経過時間と固液分離境界部の高さを記録する(図 2.2-47、図 2.2-48)

計測は、固液分離境界部の高さが10分間に1mm以上変化しなくなった時点で終了とする。



図 2.2-47 試験状況



図 2.2-48 固液境界部の読み取り

(f) 試験結果

沈降試験により計測されたスラリーの沈降深さ(=初期水面高一固液分離境界の高さ)及び経 過時間との関係となる界面沈降曲線を図 2.2-49 に示す。どのケースの液固比においても沈降は 試験開始からしばらく一定速度で進行する定速沈降領域と、ある時間を境に沈降の進行が緩やか になる減速沈降領域が見られ、液固比が大きくなるとその境界点は不明瞭となる。この緩やかと なる時間はどのケースも試験開始から 20 時間を超えることはなく、計測は約 20 時間で終了と した。

リユース設備の固液分離装置において最も影響が大きいのは沈降し始めの初期であることから、 各ケースについて試験初期の定速沈降領域における傾きを沈降速度とした。沈降速度算出のイメ ージを図 2.2-50 に、算出結果を表 2.2-17 及び図 2.2-51 に示す。

試験を行った4種類の溶液について、スラリー濃度が低い(液固比1000:50)場合は、NaCl 8%溶液(ケース2)が最も沈降速度が速く、沈降速度は16 mm/min~44 mm/min と幅があ り、溶液の違いにより最大30 mm/min程度差が生じていた。スラリーの液固比が1000:100~ 150の場合は、NaCl 8%溶液が最も速かったものの、全ケースで沈降速度は8 mm/min以下と 遅くなり、各ケースによる沈降速度の差は4 mm/min以下になった。さらに、スラリーの液固 比1000:200以上になると、全ケースにおいて沈降速度は2 mm/min以下まで低下し、沈降速 度の差は1 mm/min以下になり、溶液による沈降速度の差異は小さいと言える。

なお、ケース 4: NaCl 4%溶液に PAC を加えたケースでは、基本ケースより沈降速度が遅く なる結果となった。

基本ケースで使用した塩は、不純物を含有しない NaCl であった。一方、実用化する場合に使用が想定される塩は、経済的である並塩であり、噴射試験でも並塩 4%水溶液を使用している。 そこで、並塩 4%水溶液によるケース5と NaCl4%のケース1と比較した。液固比 1000:178の 場合の沈降速度測定結果は 1.5 mm/min となり、NaCl4%の沈降速度 1.6 mm/min とほぼ同程度 であり、並塩の使用は全く影響がないと言えるため、今後の除去試験では経済的合理性を考慮し て並塩水溶液を使用する。





経過時間

図 2.2-50 沈降速度算出イメージ

表 2.2-17	算出した定速沈降速度の一覧	

沈降速	度(mm/min)	液固比(1000:)					
		50	100	150	200	250	300
ケース1	NaCl4%	23.37	4.43	1.75	1.13	0.89	0.73
ケース2	NaCl8%	43.44	8.23	3.72	1.76	1.19	1.03
ケース3	CaCl ₂ 4%	28.76	4.68	1.65	1.05	0.89	1.01
ケース4	NaCl4%+ PAC	16.86	2.81	1.03	0.71	0.61	0.64
ケース5	並塩 4%	17.80	3.43	1.52	0.98	0.91	0.84



図 2.2-51 液固比と沈降速度の関係

2.2.7 遠隔操作設備の改良

フルスケール試験装置(噴射・吸引設備)は、遠隔操作が可能なシステムとした。遠隔操作シ ステムは、PCL(Programmable Logic Controller)と遠隔操作盤ソフトウェアで構成されてい る。構成図を図 2.2-52 に示す。



図 2.2-52 遠隔操作システムの構成図

遠隔操作盤の画面イメージを図 2.2-53 に示す。遠隔操作盤では、フルスケール試験装置の昇降動作、揺動動作、把持動作について操作ボタンを用いて制御指示を行うとともに、各種センサ値の取得を行い、制御状態を表示する。遠隔操作ボタン・制御状態表示の概要を表 2.2-18 に示す。

高圧噴射中は、回収装置・OP 周囲の周りは WJ の霧でレーザーの使用は厳しいと考えられる が、掘削深さは噴射離隔ガイドの先端深さより常時確認することができる。



図 2.2-53 遠隔操作盤の操作ボタン及び制御状態表示

	ボタン・表示など	内容
	電源状態の表示	遠隔操作盤の電源状態を示す
叝	非常停止ボタン	すべての操作を緊急停止する
作	吸引配管昇降	吸引配管の上昇、下降を制御する
盤関	吸引配管昇降リセットスイッチ	機能でゼロポジションにできる
係	噴射リング昇降ボタン	噴射リングの上昇、下降を制御する
	噴射リングフリー降下ボタン	噴射リングのフリー降下を制御する
	噴射リング揺動ボタン	噴射リングの揺動を制御する
	①把持装置下面の深さ(エンコーダ①)	深度情報。把持頭部に把持装置下面が接触時に0(ゼロ)
表示	②噴射ノズル先端深さ(エンコーダ②)	基本は基準点からの距離表示する
小関係	③噴射離隔ガイド先端深さ	エンコーダ①とエンコーダ②を加算して表示する
	④摇動方向	揺動動作中の回転方向を表示する
	⑤把持状態	把持の状態を表示する

表 2.2-18 遠隔操作ボタン・制御状態表示の概要

高圧化に伴い緩衝材の除去状況を精度よく監視するため、形状センサ LiDAR (Light Detection And Ranging:光による検知と測距)を用いた。LiDAR は 2D 断面形状を取得するため、向きを 機械的に変えることで 3D 計測を実現することとした。LiDAR の計測方向を自動的に変えるモー ター機構には、ステッピングモーターとそのコントロールに小型のボードを用いることで、最小 1/128 のマイクロステップ制御を可能とした。これらの組み合わせにより、LiDAR の分解能とし ては、0.25 度、モーターの回転分解能は最小 0.014 度まで細かく点群取得を可能とした。

システムは、2 台のスキャナと1 台の無線 LAN 親機及び管理 PC で構成し、スキャナと管理 PC 間の通信は無線 LAN を利用する構成とした。システムの全体概要を図 2.2-54 に示す。



緩衝材の形状計測では、管理 PC がスキャナ1とスキャナ2に対してスキャン指示を出し、得 られた2つの点群データ(形状形状データ)を1つに合成する。合成したデータを元に体積評 価プログラムで除去量の算出を行う。また、点群データを用いて緩衝材の形状を表示できるとと もに、任意の点間の距離を計測することも可能である。スキャナを内包した筐体外観を図 2.2-55 に、筐体(2台)の取付け位置を図 2.2-56 に示す。

高圧噴射中は、WJの霧でレーザーの使用は厳しいと考えられる。フルスケール試験において、 高圧噴射停止後のリング降下段階で、どの程度の待機時間でレーザーが使用可能か、噴霧による 水滴の測定結果への影響などを確認する。



図 2.2-55 除去形状観測システムの筐体外観



図 2.2-56 除去形状観測システムの筐体取付け位置

本事業では、既往の試験と比較することも考慮して、除去速度を「時間当たりの除去深度」 「時間当たりの除去量」で示すとともに、「緩衝材除去作業時間」を提示する計画とする。

2.2.8 フルスケール試験計画

(1) フルスケール試験の目的

2020年度に、回収作業の工程を検討し、緩衝材除去作業に要する時間が工程のボトルネックになることが明らかとなり、これを解消するためには緩衝材除去時間を 20 時間以内へ短縮するという目標を設定した。

高圧化に関する要素試験により得られた知見を踏まえて設計・制作した装置を用いて、フルス ケール試験を行い、緩衝材除去作業を 20 時間以内への迅速化の確認を行う。また、フルスケー ル試験により、高圧化した緩衝材除去システムの特性や課題を抽出して整理・可視化し、回収技 術の更なる高度化にフィードバックすることとする。

(2) フルスケール試験の設備計画

(a) 設備配置検証

フルスケール試験は、地上実証試験設備「厚木機械センター」での実施を検討する。本試験候 補地は、屋内試験施設であること、地表面レベル以上での試験(模擬処分孔設置のため地盤掘削 は不可)が求められること、試験スペースに制約があること、などの空間的制約のほか、電気、 水などの供給にも制約がある。地上実証試験設備の空間的制約を前提に計画した設備配置を図 2.2-57 に示す。



図 2.2-57 フルスケール試験の設備名称と平塚倉庫の設備配置計画図

緩衝材除去システムの「噴射・吸引設備」、「塩水リユース設備」、「遠隔操作設備」の3つの 設備構成のうち、「塩水リユース設備」についてはフルスケール試験の目的を緩衝材除去時間作 業の短縮としているため、塩水の「リユース」は実施しない方針とした。そのため、設備名称を 「塩水供給・スラリー貯留設備」としている。

次に、フルスケール試験候補地に対する設備の断面配置について検証した結果を図 2.2-58 に 示す。図は 3D スキャナを用いて試験候補地を現地測量したものに、噴射吸引設備の 3D モデル 図を重ねて作図した。断面検証の結果、試験候補地で最も高さの低い天井クレーン部分(約 8.26 m)に対し、フルスケール試験用に設計した噴射・吸引設備(8.08 m)の断面配置が可能 であることを確認した。


図 2.2-58 測量結果に基づく試験設備の断面配置検証図

(b) 供試体の製作計画

フルスケール試験に用いる供試体は、模擬処分孔、模擬オーバーパック、緩衝材、隙間充填材 で構成することとした。これらの構成要素を組み合わせた供試体制作計画図を図 2.2-59 に示 す。



図 2.2-59 供試体制作計画図

フルスケール試験では、模擬オーバーパック把持部及び側部の緩衝材除去を確認するため、図 2.2-60 に示す既往の供試体製作方法を参考に製作する(原環センター, 2015)。模擬オーバーパ ック把持部周辺は緩衝材を締固めることが難しいため隙間充填材を使用する。側部は、振動コン パクタ及びランマーを使用して転圧を行う。フルスケール試験時に採用する供試体の構成及び寸 法を図 2.2-61 に示す。





図 2.2-61 フルスケール試験供試体の構成及び寸法計画図

(3) 緩衝材の除去手順計画

噴射試験の結果より、除去手順計画と装置操作のイメージを図 2.2-62 に示す。直射ノズルに よる斜め方向噴射でオーバーパック把持部周辺の緩衝材を除去する際は、噴射リングが降下する ためのスペースを確保すること、及び塊状除去物の発生を可能な限り抑えることを考え、トルネ ードノズルによる下向き噴射を先行させ、斜め噴射及び下向き噴射をこまめに切り替えながら進 行する計画である。OP 把持部が露出したこと(把持部緩衝材の除去完了)を確認した後は、オー バーパック側部緩衝材をトルネードノズル噴射により除去し、噴射リングを降下させながらオー バーパック下端まで除去を進める計画である。



図 2.2-62 緩衝材の除去手順計画と装置操作のイメージ

(4) 高圧 WJ 噴射による緩衝材除去で予想される課題

WJ 噴射を高圧化に改良することにより、目標とする緩衝材除去時間の短縮は可能であること が見込まれた。その一方で、高圧化したことによる緩衝材除去システムで予期される課題をここ に整理する。

図 2.2-63 に噴射試験時の噴射状況を示す。高圧噴射化したことにより緩衝材を直撃した水流 は噴霧となり、視認性を低下させることが噴射試験状況で確認できる。緩衝材除去システムには、 噴射・吸引時の動作監視・観測を目的とした 360 度カメラや除去深度情報の取得を目的としたセ ンサなどが搭載されている。本システムに関する種々の装置は防水性を有しているものの、水滴 の付着により期待される機能を継続的に維持することができるかフルスケール試験時に確認する 必要がある。その結果次第では各種装置の配置を再考する必要がある。また、噴射・吸引装置自 体も緩衝材除去時間中は噴霧を浴び続けることとなる。緩衝材除去に使用される液種が塩水であ る場合は、長期的に使用する機械装置の維持管理方法が課題となる。

図 2.2-64 に制作した噴射・吸引設備の噴射・吸引性能試験時の状況を示す。試験の結果、噴射 側については所定圧力 20 MPa 時に 28.7L/min の噴射流量を確認した。一方、噴射と吸引を同時 に実施した場合、懸念されたエア吸い込みによる吸引流量の脈動と吸引流量不足が確認された。 フルスケール試験においては、補助として負圧ポンプ(バキュームダンパー)の導入により吸引 流量不足を補う計画としているが、吸引流量不足は水深が増加し除去効率の低下につながるため、 今後の課題である。



図 2.2-63 噴射試験状況



図 2.2-64 噴射·吸引性能試験状況

2.2.9 まとめ

地下施設における回収作業は、専用の機械や装置の搬入・稼働などにより行う「処分坑道の再 掘削」と「廃棄体の回収」の2つの作業に大別される。処分孔竪置き方式の「廃棄体の回収」に ついては、過年度に開発した低圧塩水による緩衝材除去システムにより、オーバーパック1本に ついて緩衝材除去作業を77時間で行えることを実証実験により確認している。

一方、廃棄体の全量回収を考えた場合、「処分坑道の再掘削」と「廃棄体の回収」を1つの区画 で繰り返し行うことは、機械や装置の入替えが頻繁に発生するため、作業効率が低下するだけで なく作業の危険性が増すことが懸念される。それに対して、両作業を処分区画ごとに、独立に並 行して進められれば、回収作業全体の安全性や作業性が向上すると考えられる。さらに、両作業 が同程度の作業時間で進められれば、回収作業時間の面でも合理的に進めることができると考え られる。

1 つの処分区画について、2 つの作業内容・時間を試算・分析した結果、「処分坑道の再掘削」 時間に対して、緩衝材除去作業を含む「廃棄体の回収」時間が長くなる結果となった。特に、「廃 棄体の回収」のうち、緩衝材除去システムによる緩衝材除去作業がボトルネックになっていた。 77 時間を要していた緩衝材除去作業を、20 時間以内に迅速化させることができれば、1 つの処 分区画における「処分坑道の再掘削」と「廃棄体の回収」時間が同等になることから、回収作業 全体の時間も合理的に進めることができると考えられる。このことから、過年度に開発した低圧 塩水による緩衝材除去システムを改良して回収作業時間の短縮を図ることとした。改良は、低圧 塩水を「高圧水 WJ 噴射を用いた高圧除去」へ改良することで、回収時間の高度化(迅速化)を 図ることにした。

開発は、以下の手順で行った。検討を行った内容を示す。

①高圧水噴射を用いた緩衝材除去能力の調査

②ノズル・液種の選定、WJの操作方法の検討のため要素試験(噴射試験、沈降試験)の実施 ③フルスケール試験装置の設計・製作及び確認試験

④フルスケール試験に向けた計画

高圧水噴射を用いた緩衝材除去能力の調査

既存システムをベースに、設備を低圧から高圧化対応へ改良することで、迅速化できると判断 した。また、高圧ノズルによる緩衝材除去事例などから、面的な緩衝材除去にはトルネードノズ ルが適しており、線的な除去には直射ノズルが適することを確認した。要素試験により、トルネ ードノズルによる緩衝材除去能力を把握することとした。

②ノズル・液種の選定、WJの操作方法の検討のため要素試験(噴射試験、沈降試験)の実施 ポンプは、20 MPa 時の流量 28.7 L/min に対応するものを使用する。

噴射試験の結果より、OP 把持部緩衝材除去には直射ノズルを使用するものとし、離隔は 63 cm 以下で操作するものとした。OP 側部緩衝材除去にはトルネードノズルを使用し、基本的に、離 隔距離 25 cm、水深 5 cm、移動速度 50 cm/min の条件で操作するものとした。トルネードノズ ルによる除去量への影響は、離隔距離・水深・移動速度のうち、離隔距離よる除去量低下が顕著 であり、噴射・吸引設備の動作上、最も適切な管理が必要な項目となった。噴射試験で取得した データを基に試算した OP 周囲の緩衝材除去時間は約 3.5 時間となり、その他、除去作業中の装 置の昇降・計測・調整などに要する時間を加えても、目標とした 20 時間以内を達成できる見込 みを得た。

上記結果を踏まえ、緩衝材除去に使用する総使用水量は OP1 体あたり約 33 mの見込みとなる。このことから、塩水リユース設備の原位置での運用以外の代替案を提示し、塩水リユース設備の運用方法及び除去水の選択性など、条件に応じた柔軟性を生み出すことができた。

沈降試験により、スラリーの液固比、電解質の種類をパラメータとして、沈降初期の定速沈降 速度を取得した。結果として液種による沈降速度の差異は小さこと、土木現場で一般的に活用す る凝集剤の効果は得られないことが分かった。

また、噴射試験で使用した 4%並塩水溶液と NaCl4%溶液の比較より、沈降速度は同程度であることが確認できた。このことより、並塩水溶液の使用は経済性の観点より合理的であることを示した。

③フルスケール試験装置の設計・製作及び確認試験

要素実験で得られた WJ の基本的な動作条件を基に、ノズル配置・リング剛性・昇降間隔を考慮し過年度に開発したシステムの改良を前提としたフルスケール試験装置(噴射・吸引設備)の 設計・製作を行った。試験装置は、二次元の加工・組立図による構造検証、三次元モデルによる 構造検証を行い、加工した部材の組立検証及び動作確認を実施した。

塩水噴射・スラリー吸引装置(噴射リング)について、噴射圧力、噴射流量(ノズル単体、総 量)、吸引圧力、吸引流量(総量)の計測機器の性能確認及び模擬オーバーパックに対する幾何学 的な干渉の確認試験を実施した。

試験装置は、遠隔操作が可能なシステムとしており、高圧噴射中でも掘削深さは噴射離隔ガイドの先端深さより常時確認することが可能である。

④フルスケール試験に向けた計画

フルスケール試験の実施候補地の制約条件を考慮して、使用する試験設備を抽出し、設備配置を計画した。

フルスケール試験では、OP 周囲の緩衝材除去の迅速化(高度化)の確認を行う。除去に関して WJ 操作方法の妥当性評価や更なる改良事項の抽出を行う。

遠隔操作設備に関して、操作性・改良効果の確認、地下施設での稼働を考慮した装置稼働の更なる効率化に向けた課題の抽出に留意するとともに、改善点の再確認を行う計画である。

2.3 処分坑道横置き・PEM 方式の回収技術の高度化

2.3.1 開発方針

前フェーズにおいて、処分坑道横置き・PEM 方式の回収技術については、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、幌延深地層センターの地下 350m 試験坑道 2 で実証試験が行われた(原環センター, 2020)。

その際に機械的除去技術の工法選定は、以下の2点を考慮し、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。

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

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具備させることで、狭隘な作業空間での作業性向上が見込 まれるためである。また、機械的除去技術の適用後に残される隙間充填材に対しては、流体的除 去技術である淡水ウォータージェットを適用して回収装置が作動できる環境にまで除去できるこ とを確認した。このような地下原位置での実証試験をとおして、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するという結果を得た。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確認した。こ のことから、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。

本フェーズの初年度である令和2年度には、機械的除去技術の高度化における目標を設定する ために、回収作業(プラグの撤去から PEM の回収まで)を具体化して各工程の作業時間を算出 した。その結果、上述した実証試験の結果より約69時間と推定された PEM1体当たりに要する 隙間充填材除去の作業が一連の回収作業におけるボトルネックになることが明らかとなった。そ のため、ボトルネックを解決するための隙間充填材除去の作業時間に対して、5時間以内とする ことを本技術の高度化の目標とした。隙間充填材除去技術の高度化では、隙間充填材の仕様や処 分場の配置、坑道の寸法など、検討に必要な条件がサイトの地質環境を踏まえて今後具体化され るため、現時点では NUMO が取りまとめた包括的技術報告書(NUMO, 2021)の設計例を参照 しつつ、技術の実現性だけではなく、上述した仕様や地質環境条件等のバリエーションに対する 柔軟性や適用限界などを先行的に示していくことも重要である。以上を踏まえて策定した本フェ ーズの研究計画を図 2.3・1 に示す。

本報告書では、本年度に取り組んだ、図 2.3-1 に示す「回収工程の具体化」から「切削手順の 具体化」までの検討内容をまとめた。



2.3.2回収工程の具体化と隙間充填材除去方法の選定

包括的技術報告書(NUMO, 2021)を参考に、地下深度 500 m、新第三紀堆積岩類を対象母岩 とした処分坑道横置き・PEM 方式のデッドエンド型処分場を想定した時の、PEM の回収に必要 な作業手順を図 2.3-2 のように整理した。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依存することを避けるため、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 程で構成されることとなる。

1 体の PEM に着目した場合、定置された PEM を回収する作業手順は図 2.3-2 の②~③にな る。複数の PEM が定置されている処分坑道に着目すると、PEM を 1 体回収する手順を繰り返す ことで、坑道内の PEM を全て回収することができる。しかしながら、「PEM 1 体分の充填材の 除去 → PEM 1 体の回収」という手順を繰り返す場合、除去装置と回収装置の入れ替え作業に伴 う時間的なロスが生じるため、処分坑道に定置される複数の PEM の周りの隙間充填材の除去作 業を先行して連続で実施できれば回収効率の向上が見込まれる。このような装置の入れ替えをせ ずに同じ作業を連続して実施する手順は、図 2.3-2 に挙げた①~③の作業をそれぞれ別の処分坑 道に割り当てることになり、図 2.3-3 のタイムラインが示すように複数の処分坑道での同時かつ 独立した回収作業が実施できる。装置の入れ替えの有無における作業時間を比較したところ、そ の差は処分坑道 1 本あたり 154 時間程度になった(原子力機構・原環センター, 2021)。

以上のことから、隙間充填材の除去と PEM の回収を効率的に実施するためには処分坑道ごと に独立して作業することが望ましい。これを実現するためには、処分坑道に PEM が定置された 状態でも坑道内での隙間充填材の除去を実施できるような、PEM を跨ぐ構造(図 2.3-4)の装置 が必要である。



図 2.3-2 処分坑道横置き・PEM 方式の回収作業手順



図 2.3-3 処分坑道ごとに手順を集約したタイムライン(処分坑道横置き・PEM 方式)



図 2.3-4 PEM を跨ぐ構造の機械的除去装置のイメージ図

2.3.3 機械的除去技術の選定に関する調査と機械的除去装置の具体化

図 2.3-2 に示したように、隙間充填材の除去は、「②PEM を拘束する隙間充填材との縁切り」 と「② 'PEM の回収装置が必要とする動作環境の構築」の2つを目的とした作業に分けられる。 包括的技術報告書(NUMO, 2021)では、前者には「機械的除去」、後者には「流体的除去」を候 補技術の例として挙げている。「② 'PEM の回収装置が必要とする動作環境の構築」における, 除去の完了判断基準は PEM を回収(搬出)する装置に依存するため、現時点では定量的に示す ことはできない。また、「流体的除去」は処分孔縦置き方式に対する回収技術高度化の成果(2.2 参照)を応用することが可能であるため、本検討では「PEM を拘束する充填材の縁切り」を目的 とした広範囲を効率的に除去する「機械的除去」を技術開発の対象とした。

機械的除去装置を検討するにあたり、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を参考にするために整理した(表 2.3-1)。 適用地質に着目すると、ベントナイト混合土の性状に近いと考えられる軟岩、未固結地山に適用 性がある掘削方式は、自由断面掘削方式のロードヘッダ等のブーム掘削機と固定断面掘削方式の シールド工法が挙げられる。これらの掘削方式をベースに機械的除去装置を具体化した。具体化 した 2 つの機械的除去装置(案)の概要を表 2.3-2 と表 2.3-3 に示す。

-	12 2.0-1	版工术力到12030	るトンホル協力力式	
	自由断面	掘削方式	固定断面	掘削方式
	ブーム掘削機	バックホウ	TBM 工法	シールド工法
工法概要	 ・伸縮、上下左右首振り 可能なブーム先端にド ラムを有しブームを移 動しながら部分掘削 	 油圧ショベルの形態の うち、アームの先端に 取り付けたショベルの 作用面が手前側のタイ プ 地表面よりも下方の掘 削に適す 	 カッタを押し当てなが ら推進する TBM を用 いたトンネルの施工方法 後方の坑壁に押し付け たグリッパにスライド ジャッキを押し付けて 推進反力を取って掘進 する 圧砕するため堅い地盤 を掘ることに適す 	 ・地盤内にシールドマシンを推進させるトンネルの施工方法 ・密閉型シールドの場合、前方に圧をかけて切羽の安定を図れるため、適用範囲が広い
	 ・ 掘削速度はあまり大きく ・ 任意断面を掘削可能 ・ 他の掘削との併用掘削の ・ TBM 工法、シールド工法 ・ 地山の変化に応じて他の 	ない 例が多い まに比べ小型、安価 工法への変更が容易	 ・適した地質の場合、掘削 ・断面形状は機械製作時に ・施工途中の掘削径の変更 ・初期投資が大きい ・発進基地の構築が必要 	速度が速い 固定 が困難
適用地質	軟岩、未固結地山に適用	土砂地山に適用性が高い	岩盤等の硬い地盤に適用	砂、粘土、岩盤等に適用
切削 (掘削)	【代表的なブーム式掘削機】 ・カッターローダータイプ:ブームの部分がコンベア になっており、その先端にカッタがあり、カッタで 切削したズリはブーム上を通り、後方に運搬 ・ツインヘッダタイプ:他の岩盤切削機械に比べると 切削能力は低い、固結した土砂等の切削に使用 ・ロードヘッダタイプ:ブーム先端のカッタドラムを		 ・回転式掘削方式 ・カッタディスクを有す るカッタヘッドを押し 付けて回転させ、岩盤 等を砕く ・カッタ種類と配置、カッ 力等の設定が必要 	 ・回転式掘削方式 ・カッタビットを有する カッタヘッドを押し当 てて回転させ、対象土 を削る タヘッドの回転数および推
	回転させ、岩盤を切削 ・オペレータの作業習熟が ・湧水環境下では、地質に ・地山が乾燥している場合	重要 より路面が泥濘化 には、粉塵対策が必要	・カッタ交換時期が掘進速	度に大きく影響
排土	 ・タイヤ方式 ・レール方式 ・コンテナ方式 ・コンベア方式 (ベルト、 	スクリュー等)等	 コンベア方式(TBM、シ る、なお、添加剤等を使 せている) 流体輸送方式(泥水式シ 工法でも採用あり) 掘進速度と排土等の後続 	ンールド工法共に採用され 用し掘削土を塑性流動化さ アールド工法の場合、TBM 設備のバランスが重要

表 2.3-1 一般土木分野におけるトンネル掘削方式

表 2.3・2 は固定面掘削方式のうち、シールド工法をベースにした案である。サイズの異なる複数の切削機構を配置することにより、中央の PEM を避けつつ、坑道断面形状に合わせた連続掘削を実現する。PEM を跨いで全断面掘削方式で掘り進める機構であるため、連続掘削が可能となることによる回収作業速度の向上が期待される。これに加えて坑道の形状に合わせた掘削断面形状にできるため、隙間充填材の残存が少ないこと、切削範囲が固定されるため PEM と接触するリスクを低減できることがメリットとして挙げられる。また、ビット以外の切削機構も装着することが可能であるため、隙間充填材の性状に応じた切削機構を柔軟に選択することが可能である。デメリットとしては、複雑な機構であることや排土設備が必要であることなどから、開発コストが高くなる可能性があることが挙げられる。





表 2.3・2 は自由断面掘削方式のブーム掘削機をベースにした案である。ロードヘッダは、坑内 堀りによるベントナイト採掘にも用いられている。坑道内の隙間充填材に対してヘッダをアーム の届く範囲で自由に動かして切削する機構であり、門型のベースマシンに取り付ければ PEM を 定置したまま連続して坑道端部まで隙間充填材を除去できる。自由断面掘削であるので除去範囲 の自由度が高いことがメリットとして挙げられるが、一方で PEM と接触する可能性が高いこと がデメリットとなる。

掘削方式選定のための要素試験では、これらの装置の切削機構を想定した試験装置を製作し、 隙間充填材の切削方式としての適用性を評価した。



表 2.3-3 自由断面掘削方式 機械的除去装置(案)

2.3.4 掘削方式選定のための要素試験

令和2年度の検討において、PEM1体あたりの隙間充填材の除去に要する目標時間に「5時間 以内」を設定した(原環センター・原子力機構,2021)。これを達成するための装置に要求される 単位時間あたりの切削量を以下のように求めた。

・切削速度…0.7 m/時間(=11.3 mm/min)

(=PEM1体の長さ(3.4 m) /目標時間(5時間))

・切削量…8.4 m³/時間(=0.14 m³/min)

(=切削速度(0.7 m / 時間) × 除去する隙間充填材の断面積(12.4 m²))

本試験は隙間充填材除去に適した掘削方式を選定することを目的に、切削時に生じるトルク、推 力、切削機構への隙間充填材の付着量、除去生成物(切削後の隙間充填材)を計測した。これら のデータから隙間充填材の切削装置が下記の条件を満たすことを念頭に置いて、隙間充填材除去 に適した掘削方式について検討した。

① 切削機械の能力は上記要求性能を満たすこと。

② 切削時に添加剤等は使用せずドライな状態で切削できること。

③ビットもしくはカッタへの除去生成物の付着が少なく、切削能力が低下しないこと。

④ 除去生成物(切削後の隙間充填材)が排土に適した寸法や形状となること。

(1) 試験装置

本試験で用いる試験装置の切削機構として、固定断面方式(図 2.3-5)と自由断面方式(図 2.3-6)の2つを準備した。それぞれの概要を以下にまとめる。

【固定断面掘削方式】

切削機械の回転軸の軸方向に切削し、装置の進行方向と同一に固定された断面を切削する方式

【自由断面掘削方式】

切削機械の回転軸の円周方向で切削し、装置の進行方向とは異なる方向に自由に動きながら断 面を切削する方式

これらの試験装置は、表 2.3-2 および表 2.3-3 に示す機械的除去装置(案)の一部を抽出した 実寸大相当のものである。両者の主な仕様について表 2.3-4 に整理した。

	1			
HR ×11 ++ -++	寸法 A×B	回転速度	装備トルク	装備押付力
加用力式	[mm]	[rpm]	[Nm]	[kN]
固定断面掘削方式 B	800×400	10	4,100	1,000
自由断面掘削方式 月 4 4	810×370	110	3,120	1,000

表 2.3-4 試験装置に用いた切削機構の仕様



図 2.3-5 固定断面掘削方式

図 2.3-6 自由断面掘削方式

自由断面掘削方式はロードヘッダにより切削範囲を自由に広げていくことが可能なため、主に 横方向の切削能力が重要となる。一方、固定断面は回転軸が固定されるため試験体に対して前方 向(軸方向)の切削能力が重要となる。本試験ではこれらを考慮して切削方向を図 2.3-7 のよう に設定した。試験装置の設置状況を図 2.3-8 および図 2.3-9 に示す。切削機構は押出装置(最大 押込力:1000 kN)に装着し、切削速度を管理した。



図 2.3-7 試験における切削方向(左:固定断面掘削、右:自由断面掘削)



図 2.3-8 試験装置設置状況(固定断面掘削方式)



図 2.3-9 試験装置設置状況(自由断面掘削方式)

(2) 試験ケース

本試験ではベントナイト配合率と含水比を変えた4ケース(表 2.3-5)について、自由断面掘 削方式と固定断面掘削方式の両者で試験を行い、その結果を踏まえて掘削方式の選択の可否を判 断することとした。

試験ケースは幌延での地下実証試験の配合をケース1-1とし、それよりも含水比を高くしたケ ースをケース1-2とした。ベントナイトの貧配合(配合率15%)をケース2、富配合(配合率 70%)をケース3とし、いずれも塑性状になるようにコンシステンシー指数が1を下回る含水比と なる条件を設定した。なお、両掘削方式とも、各ケースの試験体を3体連続して切削し、最後に 装置に付着していた隙間充填材の重量を各ケースの付着量とした。

				-	
ケース	ベントナイト	乾燥密度	有効粘土密度	含水比	コンシステンシー
No.	配合率 [%]	[Mg/m ³]	[Mg/m ³]	[%]	指数 [-]
1-1	50	1.66	1.21	16	1.01
1-2	50	1.00	1.21	22	0.989
2	15	1.80	0.63	14	0.984
3	70	1.60	1.37	24	0.998

表 2.3-5 掘削方式選定のための要素試験における配合ケース設定

(3) 試験体の製作

試験体に用いるベントナイト混合土について、次項で示す試験体寸法と上記のケース設定を基 に必要な土量や水分量を定めた。本試験の各ケースの試験体を1体製作するために必要な材料の 仕様を表 2.3-6 に示す。実際の製作においては、各材料の初期含水比を確認して、既に含まれて いる水分の重量と必要な水分重量との差分を加水したうえで、ベントナイトとケイ砂を二軸ミキ サ(図 2.3-10)で混練した(図 2.3-11)。

製作した混合土は内袋付きのフレキシブルコンテナバッグに詰め、ロを縛って水分の蒸発を防止した状態で保管・運搬した。

ケース	仕様		必	必要水分		
No.	乾燥密度設定値	含水比	ヘンントナイト	ケイ砂	ケイ砂	五夏六六 重量 [kg]
	$[Mg/m^3]$	[%]	• • • • • •	3号	5号	
1-1	1.((16	404	202	202	129
1-2	1.00	22	404	202	202	178
2	1.80	14	131	372	372	123
3	1.60	24	545	117	117	187

表 2.3-6 ケースごとの試験体1体あたりに必要な材料重量



図 2.3-10 使用した二軸ミキサ



図 2.3-11 ベントナイト混合土の混練状況

試験体のケース設定は上記の4ケースとしたが、固定断面掘削方式と自由断面掘削方式により 切削面や切削方向が異なるため、試験体についても2種類の形状を用意した。図 2.3-12に固定 断面掘削方式の試験で用いた試験体の型枠を、図 2.3-13に自由断面掘削方式の試験で用いる試 験体の型枠をそれぞれ示す。なお、実際は材料の撒き出し厚を考慮した開口部の立ち上げや、試 験装置と干渉する部分の切断等の加工を適宜施した。

試験体製作においては、試験体の品質を均一にするため、1層の仕上がり厚を15 cm とし、ケ ース設定に応じた所定の重量の混合土を試験体型枠に投入後、エンジンランマによる転圧・締固 めを行った(図 2.3-14)。その際、各層 3 ヶ所程度の位置で高さを測定し、表面が概ね平らに なるよう確認・調整を行った。これらの手順を所定の高さである 90 cm となるまで繰り返すこ とにより試験体を製作した。試験体は使用時までラップ養生を行った(図 2.3-15)。



図 2.3-12 固定断面切削用試験体型枠



図 2.3-13 自由断面切削試験体型枠



図 2.3-14 転圧・締固めによる試験体製作状況



図 2.3-15 試験体のラップによる養生

(4) 試験手順と評価項目

試験体の切削前の重量を測定した後に試験体を装置にセットして切削を行い、事後の試験体重 量を測定するとともに、回収した除去生成物の重量を測定した。切削試験は、各ケースで試験体 3体を続けて実施したが、試験終了ごとに切削部の清掃はせずに続けて試験を実施することで、 切削部への付着状況を観察した。付着量は3体目の試験体の終了後に計測した。試験開始前に切 削部の回転数を非接触式回転計によって計測して設定値になるように調整した。切削部と押し出 しジャッキに油圧計を設置して試験中に生じた油圧を計測した。計測した油圧の値から切削部の トルクと押し出しジャッキの推力を換算し整理した。切削速度は「切削した試験体の幅/切削に 要した時間」から平均的な速度を求めた。除去生成物の形状(粒径)や排出状況、切削機への付 着状況等を観察した。切削完了後は試験体を試験装置から外して重量を計測した。その後、切削 形状を計測して所定の形状で切削できていることを確認した。試験装置の下のブルーシート等に 集積した除去生成物は収集して重量を計測した。最後に切削機に付着した除去生成物を収集して 重量を計測した。これらの計量した除去生成物の重量収支が合っていることを確認した。それぞ れの掘削方式における試験手順の詳細を次にまとめた。

(a) 固定断面掘削方式の試験手順

固定断面掘削方式の試験手順を以下の図 2.3-16 に示す。固定断面掘削方式では、切削機回転数 10 rpm、切削速度 30 mm/min、切込量 3.0 mm として試験を実施した。



2. 固定断面切削機にて切削



3. 固定断面切削機を戻して切削土の回収と計測



(b) 自由断面掘削方式の試験手順

自由断面掘削方式の試験手順を以下の図 2.3-17 に示す。自由断面掘削方式では、切削機回転数 110 rpm、切削速度 400 mm/min、切込量 3.6 mm として試験を実施した。



(5) 試験結果

固定断面掘削方式の試験結果を表 2.3-7 に、縦断面掘削方式の試験結果を表 2.3-8 に示す。切 削速度、トルク、推力、回転数は、同じ条件で製作した 3 体の試験体を切削して得られた値の平 均値である。また、ケース 1-2 における切削機構に付着したベントナイト混合土を図 2.3-18 に 示す。固定断面掘削方式および自由断面掘削方式の両方式ともに、ベントナイト混合土は主に刃 先付近に付着している。付着量は異なるが他の試験ケースでも同様の傾向が見られた。

試験ケース No.	1–1	1–2	2	3
切削速度 [mm/min]	32	32	33	36
トルク [N・m]	27	27	32	27
推力 [t]	0	0.4	0.4	0.8
回転数 [rpm]	10	10	10	10
付着量 [kg]	0.36	1.16	2.78	0.52
付着量/切削量×100 [%]	0.13	0.43	0.95	0.21

表 2.3-7 固定断面掘削方式の試験結果

火 2.00 日日四百百万万人又又多						
試験ケース No.	1-1	1–2	2	3		
切削速度 [mm/min]	401	385	397	417		
トルク [N・m]	55	48	45	46		
推力 [t]	0	0	0	0		
回転数 [rpm]	112	113	112	111		
付着量 [kg]	0.35	0.97	0.04	0		
付着量/切削量×100 [%]	0.13	0.37	0.01	0		

表 2.3-8 自由断面掘削方式の試験結果



固定断面掘削方式



自由断面掘削方式

図 2.3-18 切削機構の付着状況 (ケース 1-2)

図 2.3-19 および表 2.3-9 に除去生成物の形状と寸法を示す。固定断面掘削方式の除去生成物 はベントナイト配合率が低い(15%)ケース2以外は長さ100 mm 程度の瓦状の形となった。ケ ース2は粒状の形となっており固定断面掘削方式の場合は含水比ではなくベントナイト配合率に 依存して除去生成物の形状が変わる結果となった。自由断面掘削方式では、全てのケースで粒状の除去生成物が確認された。特に含水比が低く半固体状のケース1とベントナイト配合率の低い(15%)のケース2の粒径は10 mm以下とケース1-2、3の半分以下となった。

ケース No.	固定断面掘削方式	自由断面掘削方式
1–1	511 234 \$ 678 9101 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 234 \$ 678 9401 23	4 5 6 7 8 980 1 2 3 4 5 6 7 8 980 1 2 3 4 5 6 7 8 980 1
1-2	34567890123456789012345678901234567890123456	3.4.5.647 8 9ED1 2 3 4 5 6 7 8 9ED1 2 3 4 5 6 7 8 9ED1 2 3
2	5678920123456789201234567892012	23456789412345678961234567
3	4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9	01234\$\$789201234\$6789801234

図 2.3-19 除去生成物の形状

ケース No.	1-1	1-2	2	3
固定断面掘削方式	L=5-120(板状)	L=50-100(板状)	φ5−30 (粒状)	L=10-100 (板状)
自由断面掘削方式	φ1-5(粒状)	φ10-20 (粒状)	φ1−10 (粒状)	φ10 −20 (粒状)

表 2.3-9 除去生成物の主なサイズ (mm) と形状

以下に固定断面掘削と自由断面掘削の試験状況の詳細を示す。

(a) 固定断面掘削

試験装置の装備能力に対して、いずれのケースの試験体においても推力・トルクはほぼ無負荷 状態で切削できており、十分な切削能力を有していることが確認された。

本試験で用いたカッタビットの形状は、除去生成物のビットへの付着防止を試み、切削面から 隙間充填材を薄皮状にスライスし、ビットから剥がれやすい形状とした。本試験での切込み量は 3.0 mm となっているため、除去生成物は薄皮状に削れることが確認できたが、試験体によって は切削が進むにつれ薄皮状の除去生成物が徐々に厚みを増し、最終的には厚さ約 10 mm 程度の 瓦状の除去生成物として排出されるものもあった。除去生成物の寸法は 100~120 mm 程度であ り、自由断面切削と比較すると大きな除去生成物となって排出された。試験ケース 2 についての み 30 mm 程度の寸法となったが、これは砂分が最も多い配合のため圧密されても崩れやすいた め落下した際に除去生成物が崩れた結果と考えられる。

カッタへの除去生成物の付着量については、試験ケース2、1-2、3、1-1の順に多くなる結果 となった。付着状況の写真を見ても分かるように、カッタ内部や外周部に付着が見られ、このま ま切削を継続した場合は、付着量が増加する可能性がある。

(b) 自由断面掘削

自由断面掘削方式の試験装置の装備能力に対して、いずれのケースの試験体においても推力・ トルクはほぼ無負荷状態で切削できており、十分な切削能力を有していることが確認された。本 試験は要求性能から逆算した条件(切削速度、回転数)で行ったが、機械能力としては十分に余 裕があったと考えられる。

除去生成物の寸法については、ケース 1-1 とケース 2 の粒径が小さく、それと比較してケース 3、ケース 1-2 の粒径は大きいという結果が得られた。前者の含水比が 16%、14%、後者の含水比 が 22%、24%となっており、除去生成物の粒径に明らかな差が生じたのは含水比の影響が大きい と考えられる。

ロードヘッダへのベントナイト混合土の付着量については、いずれの試験体もほぼ付着の無い 状態であった。これは、ロードヘッダの回転数が110 rpm で高速回転していたため、除去生成物 が付着しても、ある程度の量まで付着した後は遠心力や切削時の抵抗により剥がれ落ちてしまっ たためと考えられ、ロードヘッダの高回転の切削機構とピックタイプの切削ビット形状が影響し たと言える。

(6) 切削機構の選定と具備すべき排土機構について

この試験は、切削機構の選定と併せて、次のステップとなる排土機構の検討に資するという目 的を兼ねるものである。切削対象物がベントナイト混合土であることから、トンネル施工と比較 して軟弱な土が対象であるため、総合的に見て固定断面掘削、自由断面掘削の両方式ともに機械 能力としては問題ないと考えられる。したがって,掘削方式の選定は組み合わせる排土機構との 兼ね合いを鑑みた上で決定することとした。

2.3.5 排土方式の検討

軟弱地盤を掘削するシールドトンネルにおける排土方法としては、スクリューコンベア、ベル トコンベアならびに掘削土を液状にしてポンプ圧送する方法が一般的に挙げられる。22節で検 討した緩衝材の除去では、ウォータージェットによる切削方式を用いるため除去生成物の大半は 液状であり、排土にはこれをポンプ圧送する機構を検討している。隙間充填材の除去についても 同様の方法を用いることは可能であるが、排土機構の選択肢を増やすことを目的に本試験では除 去生成物が固体状であるときの排土機構として「バキューム吸引」による方法について検討を進 めた。バキュームの搬送距離には限界があり、切羽で吸引したものを坑外まで搬出することは現 実的ではないと考えられる。そのため、切羽ではバキューム吸引により除去生成物を集積し、切 削機の後方でベルコン等に積み変えて坑外に搬出する方法が適していると考えられる。その場 合、バキューム吸引では除去生成物の粒径が小さいほど有利であることから、掘削方式を「自由 断面掘削方式」として排土試験計画を検討することとした。

(1) 隙間充填材の排土における吸引能力確認試験

排土機構に求める要件は、除去装置における切削機構の切削能力(量)に対して、同等以上の 排土能力(量)を有することである。ここでは、固体状で排土することを前提として選定したバ キューム方式の吸引能力を試験により確認し、どの程度の吸引能力を持たせることが隙間充填材 の排土機構として適正であるかを検討した。

(a) 試験装置、試験手順、試験ケース

バキュームの仕様は使用条件等を鑑みて検討するべきではあるが、詳細な条件は現時点では設 定できないため、本試験では坑道内に収まるサイズとして 75 kW 級、公称吸引能力 9.0 m³/hr のも のを用いることとした。これに吸引した除去生成物を収集するタンクを取り付けた(図 2.3・20)。 本試験では、取り付けた収集タンクに接続した配管の先端から、幅 350 mm の H 鋼の上に敷設し た除去生成物を吸引する。なお、配管は吸引状況に応じて除去生成物が敷設されている H 鋼端部 まで手動で前進させた(図 2.3・21)。配管は口径の異なる 4 種類(表 2.3・10)、除去生成物は掘 削方式選定のための要素試験と同様に製作した試験体を自由断面掘削方式で切削したものであり、 ベントナイト配合率と含水比を変えた 3 種類のベントナイト混合土(表 2.3・11)を材料とした。 試験は、配管と試験体のケースを組み合わせた合計 12 ケースを実施した。

呼び径	内径 (mm)	断面積(cm ²)
6B	150	177
5B	125	123
4B	100	79
3B	75	44

表 2.3-10 配管のケース

ケース	ላ`	含水比	コンシステンシー	乾燥密度	湿潤密度	除去生成物
No.	配合率 [%]	[%]	指数 [-]	[Mg/m ³]	[Mg/m ³]	の粒径 [mm]
1-1	50	16	1.010	1.66	1.93	φ1~5
1-2	50	22	0.989	1.66	2.03	$\phi 10 \sim 20$
3	70	24	0.998	1.60	1.98	φ 10~20

表 2.3-11 試験体のケース



図 2.3-20 使用したバキュームユニットと収集タンク



図 2.3-21 除去生成物の吸引状況

(b) 評価項目

試験終了後、各収集タンク内の除去生成物の重量を測定し、吸引能力を確認した。試験の実施 中に記録し、評価した項目は以下の通りである。

- ・吸引距離(除去生成物を吸引し始めた時の除去生成物と吸引口までの距離)
- ・除去生成物の吸引率(吸引した除去生成物の重量/敷設した除去生成物の重量×100)

(c) 試験結果と考察

吸引能力確認試験の結果を表 2.3-12 に示す。吸引時間と吸引能力は、配管を手動で前進させる試験者によって差が生じるため参考値として記載した。配管の内径が 150 mm と 100 mm のケースでは吸引率が 100%に満たないケースが見られた。これは、口径が大きくなることで配管内の流速が低下したため配管内に除去生成物が残ってしまったためである。そのため、連続的に運転している場合には問題にならないと推定される。逆に口径が最も小さい 75 mm の配管では管内の流速は上昇するが除去生成物の最大粒径が 20 mm 程度であるため配管抵抗も大きく、除去生成物が通過しづらくなる傾向があることが確認された。その傾向は、除去生成物の粒径が小さく、半固体状である試験体ケース 1-1 では口径によって差は見られなかったが、塑性状のケース 1-2、3 ではより顕著となった。今回の試験条件で得られたこれらの状況から、4B もしくは 5B の配管が試験体の状態に関わらず効率良く吸引できていると判断した。以上のことから、吸引が可能な範囲で断面積を大きくする方が粒径の大きな隙間充填材に対応できること、更に運搬量の面でも有利となることから、主配管には 5B 配管を用いることとした。

また、全てのケースで吸引距離が 0~1 cm となっており、吸引口を除去生成物に接触する所ま で近づけないと吸引できない結果となった。したがって、除去生成物を如何に吸引口まで収集す るかが重要であることが確認できた。

試験体		西己	管	試験体重量		而且卖	吸引	吸引	ᄪᆆᄮ
N.	湿潤密度	内径	断面積	敷設量	吸引量	败51伞 [0/]	距離	時間	败与IIE刀
INO.	[Mg/m ³]	[mm]	$[cm^2]$	[kg]	[kg]	[%]	[cm]	[min]	[m³/nr]
		150	177	138	135	98	0	1.57	2.7
1_1	1.02	125	123	99	96	97	0	0.667	4.5
1-1	1.93	100	79	100	100	100	0	0.663	4.9
		75	44	98	98	100	0	0.750	4.1
		150	177	51	36	71	0	1.15	0.9
1-9	9.09	125	123	68	66	97	0	0.820	2.4
1-2	2.03	100	79	65	65	100	0	0.820	2.4
	75	44	71	71	100	0	0.900	2.3	
		150	177	66	66	100	1	0.567	3.5
3 1.98	1.09	125	123	92	92	100	0	0.617	4.5
	1.90	100	79	96	96	100	0	0.683	4.3
		75	44	96	96	100	0	1.08	2.7

表 2.3-12 吸引能力確認試験結果

(2) 吸引ロ形状を選定するための吸引能力確認試験

(a) 吸引口形状の検討

吸引能力確認試験において、吸引による排土は除去生成物を吸引口まで収集する必要があることが 課題として示された。自由断面掘削方式による切削で生じる除去生成物は切削方向と反対側に飛散す るため、吸引口は切削部から排土される方向の面を覆うような形状となることが望ましい。また、前述した ように、吸引する配管の断面積は 123 cm²(5B 相当)を基本とすることとした。除去生成物は吸引口の底 部に堆積するため、配管形状と同様の円形断面で吸引する場合には、断面下側の範囲は有効に機能 するが、上側の範囲は空気を吸引してしまうため吸引能力が低下する。そのため、より効率的に除去生 成物を吸引するためには形状について検討する必要がある。これらの考え方に基づいて試作した 3 つの タイプの吸引口形状の概要を図 2.3-22 に、吸引口の断面積を表 2.3-13 に示す。いずれのタイプも吸引 口を低い位置に設けた。

吸引口形状タイプ	吸引口の総断面積 [cm ²]	5B 配管との断面積比[·]
TYPE-1	96	0.78
TYPE-2	101	0.83
TYPE-3	376	3.1

表 2.3-13 吸引口の断面積





(b) 試験装置、試験手順、試験ケース、評価項目

図 2.3-22 に示した吸引ロアタッチメントを制作し、どの形状が除去生成物の吸引に適してい るかを試験により確認した。試験装置、試験手順、評価項目は前述した「隙間充填材の排土にお ける吸引能力確認試験」と同様であり、主配管先端には製作したアタッチメントを取り付けた(図 2.3-23)。試験体は、塑性状で粒径が大きいと配管抵抗が増加し、吸引能力が低下する傾向がある。 本試験では可能な範囲で厳しい条件とするために、準備できる試験体の中でコンシステンシー指 数が最も低いベントナイト配合率 50%、含水比 22%のベントナイト混合土(表 2.3-11のケース No.1-2)を用いて試験体を作成した。試験は吸引口の形状と試験体のケースを組み合わせた合計 4ケースとした。



図 2.3-23 アタッチメントの取付状況

(c) 試験結果

試験結果を表 2.3-14 に示す。吸引口を分割した TYPE-1 と TYPE-2 では、試験開始直後から吸引口 が閉塞し(図 2.3-24)、吸引できない結果となった。これは除去生成物の粒径が大きく、付着性を有する ため除去生成物が塊状になり吸引口間の仕切り部に引っ掛かることで生じていることが目視で確認でき た。仕切り部のない TYPE-3 では、閉塞することなく吸引することができたが配管(円形断面)で直接で吸 引した試験(表 2.3-12)と比較して明らかに吸引能力は低下した。この原因として、製作したアタッチメン トに除去生成物が付着していることが挙げられた。そこで、これを改善するためにアタッチメントの吸引口 に撥水性のテープを貼付け、さらに TYPE-3 の吸引口の断面積を見直した TYPE-4'を追加して再試験を 行った。再試験に用いた吸引口アタッチメントの仕様を表 2.3-15 に示す。

再確認試験の結果を

表 2.3-16 に示す。撥水性のテープを貼付けた TYPE-3'は TYPE-3 と比較して吸引し易くなっ ていることが目視で確認できた。TYPE-3'よりも吸引口の断面積を 0.56 倍にした TYPE-4'も同様 に閉塞することなく除去生成物を吸引できる結果となった。断面積が大きいと除去生成物が塊状 になりにくく通過し易くなり、断面積が小さいと吸引する空気の流速が

速くなり除去生成物に作用する吸引力は増加する。吸引口の設計は、このような相反する特徴を 踏まえて決定する必要があり、本試験の結果のみで TYPE-3'と TYPE-4'の優劣を決定することは 適切ではないと判断した。そこで、より実際の状況に近い条件として切削時の除去生成物が飛散 する状況下での排土について TYPE-3'と TYPE-4'を対象に確認した。

試験体		吸引	吸引口の形状		試験体重量		ᄪᄍᆋᆝ	収みさし	
No.	湿潤密 度 [Mg/m ³]	TYPE	総断面積 [cm ²]	敷設量 [kg]	吸引量 [kg]	吸引率 [%]	吸引 距離 [cm]	吸り 時間 [min]	吸引能力 [m ³ /hr]
	2.03	1	96	計測不可 (四月口が閉塞したため)					
1-2		2	101		計側~	ド町(奴方	ロル和本し	$\mathcal{I}(\mathcal{I}(\mathcal{A}))$	
		3	376	37	37	100	0	6.73	0.16

表 2.3-14 吸引ロ形状の確認試験結果



図 2.3-24 吸引口 (TYPE-2)の閉塞状況

表 2.3-15 再試験に用いた吸引口の仕様

吸引口形状タイプ	吸引口の総断面積 [cm ²]	5B 配管との断面積比 [-]	追記事項
TYPE-3'	376	3.06	吸引口に撥水性の
TYPE-4'	210	1.71	テープを貼付

表 2.3-16 吸引ロ形状の確認再試験結果

試験体		吸引	吸引口の形状		試験体重量		╓╓╶╛╽	ᄪᅏᆋᆝ	
No.	湿潤密 度 [Mg/m ³]	TYPE	総断面積 [cm ²]	敷設量 [kg]	吸引量 [kg]	吸引率 [%]	吸引 距離 [cm]	吸引 時間 [min]	吸引能力 [m³/hr]
1-2	2.03	3'	376	34	34	100	0	0.63	1.59
		4'	210	27	27	100	0	1.22	0.65

(3) 除去生成物の飛散方向が排土に与える影響の確認

実際に切羽を面として隙間充填材を除去する際には、切削経路について検討する必要がある。 自由断面掘削方式の場合には除去生成物は切削方向と反対方向に飛散するため、バキューム吸引 によって排土する際には、吸引口を適切な位置に配置しなければならない。そのため、切削経路 の方向を限定すると排土は容易になるが、戻りの経路が生じるため切削の効率は低下する。従っ て隙間充填材を効率的に除去するためには、排土への影響を考慮した切削経路の最適化が必要と なる。本試験では、切削経路を検討するにあたり、除去生成物の飛散方向が吸引による排土に与 える影響について切削・排土試験によって確認した。

(a) 試験装置、試験手順、試験ケース

「掘削方式選定のための要素試験」における自由断面掘削方式の試験装置(図 2.3・9)にバキューム吸引による排土機構を組み合わせたものを試験装置とした。吸引口は切削装置の回転部と 隣接するように配置し、切削装置と一定の距離を保って移動する。試験手順についても「掘削方 式選定のための要素試験」と同様(図 2.3・17)とした。本試験では、切削装置の回転方向によ って除去生成物の飛散方向が変化することが排土に与える影響を確認するために、図 2.3・25に 示すように切削方向を変化させて試験を実施した。このとき切削面に対して切削機構の回転が上 方向になるものを「アップカット」、下方向になるものを「ダウンカット」と本報告書では記載 する。試験体のケースはベントナイト配合率 50%のベントナイト混合土の半固体状と塑性状の2 ケースを準備した。吸引口の形状は吸引能力確認試験で選定したTYPE-3'とTYPE-4'(表 2.3・15)を対象とし、試験ケースは、これらを組み合わせた8ケース(表 2.3・17)とした。な お、掘削方式選定のための要素試験では、同じ条件で3回試験を繰り返したが結果に差が見られ なかったため本試験では同じ条件での試験数は1回とした。



アップカット ダウンカット ダウンカット 図 2.3-25 切削部の回転方向と切削方向の関係

試験体 No.	吸引口の形状 (断面積)	切削機構の 回転方向
1-1 ベントナイト配合率 : 50 %	TYPE-3' (376 cm²)	アップカット ダウンカット
含水比:16% 半固体状 (IC=1.01) 湿潤密度:1.93 Mg/m ³	×比:16% 平状(IC=1.01) 度:1.93 Mg/m ³ TYPE-4' (210 cm ²)	アップカット ダウンカット
1-2 ベントナイト配合率 : 50 %	TYPE-3' (376 cm²)	アップカット ダウンカット
含水比:22% 半固体状 (IC=0.989) 湿潤密度:2.03 Mg/m ³	TYPE-4' (210 cm²)	アップカット ダウンカット

表 2.3-17 試験ケース

(b) 評価項目

試験前後の試験体重量の差を除去重量、収集タンク内の除去生成物の重量を排土量として計測 した。それらの比率を排土率(排土量/除去量×100%)として各試験ケースで比較した。

(c) 試験結果

試験結果を表 2.3-18に示す。半固体状である試験体No.1-1は、除去生成物の粒径が小さいた め吸引口の形状、切削機構の回転方向に関らず吸引可能であることを確認できた。排土率が40 ~70%程度に留まっている理由は試験体の両端部の開放面が排土できていない(図 2.3-26)こ とが主な原因である。ただし、実際に処分坑道内で隙間充填材を除去する際には、本試験のよう な開放面は生じないことが想定されるため問題にならないと考えられる。なお、排土率はアップ カットのケースの方がダウンカットのケースよりも20 ~ 30 %程度大きくなっているが、これ はアップカットの場合は除去生成物が上方に飛散するために開放面での排土量が大きくなるため である。塑性状である試験体No.1-2は、除去生成物の粒径が大きく粒同士が付着するため、ア ップカットのケースでは吸引口に除去生成物が堆積した(図 2.3-27)。TYPE-4'は装置が前進し て除去生成物が吸引口に押し込まれることで排土することができたが、試験終了時には吸引口は ほぼ閉塞しており、更に続けて切削した場合には完全に閉塞してしまう可能性がある。TYPE-3' は切削中に吸引口は完全に閉塞してしまい、それ以上切削することが出来なくなったため、その 時点で試験を終了した。ダウンカットのケースでは除去生成物が吸引口に向かって飛散するため 吸引口の形状に関わらず排土することができた。しかし、TYPE-3'はアップカットのケースと同 様に吸引口付近に除去生成物が堆積しており、充分に吸引できている状態ではなかった。一方、 TYPE-3'よりも断面積が小さく流入速度が速いTYPE-4'では、除去生成物の堆積は見られなかっ た。以上のことから切削はダウンカットで行い、吸引口の形状はTYPE-4'であれば排土は可能で ある。隙間充填材の除去において理想的な切削方向と切削面の組み合わせを図 2.3-28にまとめ る。

=>+max (+ ► ►	吸引口の形状	切削機構の	除去重量	排土量	排土率
訊駛1本 №.	(断面積)	回転方向	[kg]	[kg]	[%]
1-1	TYPE-3'	アップカット	93	56	60.2
ベントナイト配合率 : 50 %	(376 cm^2)	ダウンカット	115	45	39.1
含水比:16%	TVDE- 4'	アップカット	111	78	70.3
半固体状(IC=1.01) 湿潤密度:1.93 Mg/m ³	(210 cm^2)	ダウンカット	110	42	38.2
1-2	TYPE-3'	アップカット	118	6	5.1
ベントナイト配合率 : 50 %	(376 cm^2)	ダウンカット	119	44	37.0
含水比:22%	TVDE- 4'	アップカット	121	61	50.4
半固体状(IC=0.989) 湿潤密度:2.03 Mg/m ³	(210 cm^2)	ダウンカット	122	55	45.1

表 2.3-18 試験結果



試験開始直後

試験終了直前

図 2.3-26 試験体端部の除去生成物の飛散状況(試験体 No.1-1、ダウンカットのケース)



吸引口形状:TYPE-3' 吸引口形状:TYPE-4' 図 2.3-27 試験終了時の吸引口の状態(試験体 No.1-2、アップカットのケース)



図 2.3-28 隙間充填材の除去において理想的な切削方向と切削面の組み合わせ

2.3.6 切削手順の具体化に向けた検討

これまでの検討をとおして、切削と排土のバランスや切削装置と排土装置の配置等の重要性に 関する知見を得た。ただし、これまでの検討は一次元的であり、自由断面切削方式による実際の 隙間充填材除去は二次元多方向の動きを伴う切削が想定されるため、前提条件が異なる。したが って、切削方向と除去生成物の排出方向の確認、切削経路による影響の確認、排出されずに滞留 する除去生成物が掘削に及ぼす影響の確認などを二次元的に行う必要がある。

そこで、現時点で想定されている処分坑道横置き・PEM 方式の坑道寸法を参考に、幅 1.5 m、 高さ 2.6 m の試験体を転圧締固めにより作製し、そのうち幅 1.2 m、高さ 2.4 m の範囲を切削対 象として二次元的に切削する面切削確認試験を実施し、切削経路について検討した。

(1) 試験装置、試験手順、試験ケース

試験装置については、0.45 m³ 級バックホウをベースマシンとして、時計回りに回転する切削 機をバックホウのアームの先にアタッチメントとして取り付けて除去装置を模擬した。切削方向 のうち、上下方向はブームシリンダの伸縮によるブームの上げ下げ、左右方向はバックホウ上部 の旋回で動かすこととし、アームから先は試験体の中心が水平となるように調整して固定した(図 2.3-29)。なお、バックホウを直接操縦するには可動させる範囲が狭く、試験結果がオペレータの 操縦技術に依存してしまうことが懸念されたため、外部からの油圧制御により機械を遠隔操作で きるようにした。

面切削確認試験では、切削機構の回転方向と排土位置の関係を踏まえた切削手順の具体化に向 けた検討に資する情報を得ることを目的として、図 2.3-30 に示す 3 通りの切削経路パターンを 対象とした。これは図 2.3-28 に示す吸引による排土が容易となる切削パターンの組み合わせを 基本としている。ただし、本試験では吸引装置の実装までは行わず、除去生成物を適宜取り除き ながら切削し、飛散状況を確認することとした。なお、この切削経路パターンを決定する際には、 試運転(試切削)を実施して、貫入から最初の切削において、縦方向の場合は重力の影響により 除去生成物が下に堆積するため、下から上の方向に切削することが有効であること、また水平方 向に切削範囲をオーバーラップさせようとすると、部分的に切削面に接触した際に、回転する切 削機がタイヤのように作用して、開放空間に向かってブームが走り出すことがあったため、水平 方向の切削範囲内でオーバーラップは行わないこととした。









(2) 試験結果

パターンAでは、切削面の左側に縦方向の開放面となる溝を掘削後、水平方向の切削を繰り返 した。水平方向の切削は吸引に対して有利となるように、右方ダウンカットとした。このパター ンでは、切削による除去生成物は、回転する切削機の後方の概ね同じ位置から掻き出されて堆積 してしまうため、切削直後に除去生成物を吸引しなければ、堆積した除去生成物が切削の支障と なるが、この位置での吸引が有効であることが示唆される結果となった。

パターン B では、切削面の右上から連続的に切削を行うように設定しており、切削を伴わない 移動(リトラクト)がないため、時計回りの切削機にとって吸引に有利な右方向ダウンカットだ けではなく、吸引するには不利な左方アップカットや開放面のない下方への切削も含まれている。 左方アップカットとなる切削の場合、掻き出した除去生成物が切削機より後方に降り積もるよう に飛散するため、切削機の回転を直接妨げることはないが、収集できない除去生成物が多く残る 可能性が高い。結果的に、次の右方ダウンカットの切削工程で、残存する除去生成物が切削機の 回転に巻き込まれて装置の振動を引き起こしており、やはり切削直後の除去生成物の吸引が重要 であることを確認した。したがって、リトラクトのない連続的な切削手順の成立性については、 排土機構としての吸引装置の実装が重要課題である。

パターン C では、切削面の左側に縦方向の開放面を掘り込んだ後、上下方向の切削を確認する 設定とした。その際、最初の掘り込み部分のみリトラクトして下端に戻した後、右方向に切削機 構の半分に相当する距離だけを切り込み、50%オーバーラップした状態で上方向への切削を行い、 以降は上端へのリトラクト後にオーバーラップなし、50%オーバーラップ、75%オーバーラップ の3通りの下方向への切削を行う設定とした。除去生成物は上方への切削においては回転後方の 真下に飛散し、下方への切削においては開放面である左方に飛散する結果となった。ただし、今 回は吸引せずに切削を行ったことにより、試験体下部については堆積した除去生成物に切削機構 を突っ込むような状況となった。オーバーラップの割合の違いについては、ラップの少ない方が 左上方への飛散が多くみられたが、どの場合もほぼ同様に左方へ飛散する結果となった。したが って、時計回りに回転する本試験の切削機の場合、左側に縦方向の開放面を掘り込んだ後は、上 下どちらの方向でも概ね一定方向へ除去生成物が飛散する結果となっており、切削直後の吸引が しやすい切削工程であったと考えられる。

試験結果のうち、切削速度に係るものを表 2.3·19に、除去生成物に係るものを表 2.3·20にそ れぞれ示す。切削においては複数の切削速度を各パターンで確認したが、切削状況に有意な差は 見られなかった。一方、図 2.3·31に示すように、切削終了時点での切削機への隙間充填材の付着 が、いずれの切削パターンでもこれまでの要素試験よりも多く確認された。この原因としては、 装置の試験体への貫入直後や除去生成物が堆積した箇所など、除去生成物の行き場がない状態で 切削したためと推察される。なお、除去生成物が切削機構と隙間充填材の間に詰まると、開放面 が小さい場合は切削機の回転が一時的に遅くなり、開放面がある場合はブームごと逸走しようと するなどの影響が見られた。だが、回転する切削機構と隙間充填材が適切に接触すれば解砕・飛 散は継続しており、切削能力の低下は見られなかった。したがって、試験装置への付着はあまり 除去効率に影響はなく、滞りなく排土を行うことの方が実機の検討において重要であると考えら れる。

	切削条件		移動距離	所要時間	切削速度
パターン	動作	オーハ゛ーラッフ゜ [%]	[mm]	[min]	[mm/min]
	(貫入→)上方	—	1,850	4:10	444
	右方	_	830	0:47	1,060
٨	右方	0	830	1:41	493
A	右方	0	830	1:10	711
	右方	0	830	1:07	743
	右方	0	830	1:25	586
	(貫入→)左方	_	830	0:31	1,606
	(下方→)右方	0	830	2:04	402
D	(下方→)左方	0	830	0:41	1,215
Б	(下方→)右方	0	830	1:07	743
	(下方→)左方	0	830	1:51	449
	(下方→)右方	0	830	2:03	405
	(貫入→)上方	_	2,030	4:18	472
	(右方→)上方	50	2,030	4:01	505
С	(右方→)下方	0	2,030	2:48	725
	(右方→)下方	50	2,030	1:09	1,765
	(右方→)下方	75	2,030	2:39	766

表 2.3-19 面切削確認試験結果(切削速度)

表 2.3-20 面切削確認試験結果(除去生成物)

パターン	付着量 [kg]	除去生成物の粒径 [mm]
А	17	$5{\sim}67$
В	16	2~68
С	17	$2\sim\!63$



図 2.3-31 切削機への除去生成物付着状況(パターンC試験終了後)

面切削確認試験で生じた機械的な課題として、バックホウの旋回を油圧制御した際にブレーキ をかけられず、回転する切削機構が切削面ではない箇所と接触した際に回転の反動で動いたり、 開放部に向かってブームごと走り出してしまったりすることがあった。また、左右の切削につい ては、静止状態からの動き出しが遅いこと、逆に動き出した際に急旋回するなどの操作性に問題 があった。実際の除去装置においては、切削装置が PEM と接触しないように、これらの諸問題 について対処する必要がある。ただし、これらはいずれも本試験で用いたバックホウの特性に因 るものであり、除去装置の具体化を検討する際にブームを短くして装置の剛性を高めたり、左右 のブレをブレーキ制御する機構を設けたりする等の対策方法を導入することで改善できる。

2.3.7 隙間充填材を想定したベントナイト混合土の性状確認と機械的除去装置の適用性検討

回収時のベントナイト混合土の性状は、処分場の個々の構成要素に割り当てられる要件や仕様、 隙間充填材の施工後から PEM 回収までの時間経過における過渡期の状態変化に依存するため、 様々な仕様や状態のベントナイト混合土に対して除去技術の適用性を確認しておく必要がある。

ここでの適用性検討に係る試験では、隙間充填材のベントナイト混合土の仕様については既出 の要素試験と同様に、ベントナイト配合率が15%(貧配合想定)、50%(貧配合と富配合の中間 想定)、70%(富配合側想定)、100%(ベントナイトペレット想定)の計4ケースの試料を検討 対象とすることとした。本試験をとおしてベントナイト混合土の配合率、密度、含水比が機械的 除去技術に与える影響を確認し、一般的な土質試験と切削試験から土のコンシステンシーや強度 に関するパラメータとの関係や切削メカニズムについて整理を行い、ベントナイト混合土に対す る機械的除去装置の適用性について検討した。なお、ベントナイト混合土の付着性について試行 的な試験をとおして検討した結果については付属書2.3に示す。

(1) 液性限界·塑性限界試験

ベントナイト配合率が15、50、70%のベントナイト混合土とベントナイトのみ(配合率100%) の計4ケースの試料の塑性限界と液性限界を確認するために土の液性限界・塑性限界試験(地盤 工学会,2020:JIS A1205)を実施した。土の液性限界・組成限界試験の対象となる土は「425 µm ふるいを通過した土」とされている。しかし、ベントナイト混合土に含まれる3号・5号ケイ砂 の混合土については、425 µm 以上の土粒子が多く含まれるため、ふるいにかけると厳密にはベ ントナイト配合率が変化する。これが試験結果に与える影響を確認するため、「そのままふるいに かけたケース」と「ケイ砂を細粒の6号に変えたケース」の2ケースで測定を実施し比較するこ ととした。試験結果を表 2.3・21 に示す。ベントナイト配合率が高いほど液性限界・塑性限界とも に高い値を示すが、塑性限界については配合率70%と100%で差はなくなった。また、混合材料 であるケイ砂の粒径の違いについては、液性限界・塑性限界ともに、3号・5号をそのままふるい にかけたケースの方で高い値が得られたが、塑性限界については大きな差にはならなかった。。ふ るいによって粒の大きいケイ砂が取り除かれると考えると、液性限界はベントナイトの存在比に 対して感度が高いと考えられる。これが、コンシステンシー指数に与える影響については後述す る一軸圧縮強度試験等で用いた試験体を対象に確認した。

ベントナイト 配合率[%]	15		50		70		100
混合材料	ケイ砂* 3号・5 号	ケイ砂 6 号	ケイ砂* 3号・5 号	ケイ砂 6号	ケイ砂* 3号・5 号	ケイ砂 6号	-
塑性限界 ω_p [%]	12.5	12.2	18.8	15.5	23.5	17.2	23.5
液性限界 <i>ol</i> [%]	105	62.4	305	210	356	324	419

表 2.3-21 塑性限界と液性限界

*混合材料がケイ砂3号・5号のケースはふるい(425μm)を通過した試料を用いた試験結果
(2) 一軸圧縮試験、コーン指数試験、一面せん断試験

(a) 試験体ケース

隙間充填材の仕様(ベントナイト配合率、密度、掘削土の種類・粒径等)は、現時点では決定 していないが、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。そこで、本検討で対象とす る隙間充填材の仕様を設定するために、放射性廃棄物処分の既往研究における締固めや充填に関 する仕様の事例調査結果(詳細は付属書 2.3 に示す)を参考に検討した、試験ケースの設定の考 え方や内容を以下に整理する。

- ・ベントナイトはクニゲル V1 とする。
- ・混合土材料は、掘削ズリが仕様の例として挙げられているが不確定要素が多いため地下実証試験(原環センター,2019;2020)に準じてケイ砂(3号・5号を乾燥質量比1:1で混合した もの)とする。
- ・ベントナイト配合率は15%(貧配合想定)、50%(貧配合と富配合の中間想定)、70%(富配合側想定)、100%(ベントナイトペレット想定)の4ケースとする。
- ・含水比は統一的に設定できないため、飽和度に換算して設定することとする。具体的には、地下実証試験における隙間充填材の飽和度 75%に対して、飽和側に+10%(85%)、+20%(95%)の3通りを設定する。
- ・乾燥密度は地下実証試験における隙間充填材の 1.6 Mg/m³に対し、前項の検討事例を基に低 密度側として 1.2 Mg/m³、高密度側として 2.0 Mg/m³の 3 通り設定する。
- ・一方、有効粘土密度についても塩水環境下で低透水性確保の目安となる 0.8Mg/m³を下限値と して、1.0Mg/m³、1.2Mg/m³の 3 通りを設定する。

以上に基づき製作した 42 ケースの試験体の詳細を表 2.3・23 と表 2.3・24 に示す。表中に示した 飽和度と有効粘土密度は含水比と乾燥密度から土粒子密度(表 2.3・22)を用いて換算した値であ る。コンシステンシー指数については表 2.3・21 に示したそれぞれの塑性限界と液性限界を用い て計算した値を比較した(図 2.3・32)。この結果からコンシステンシー指数が1付近では両者の 差は小さく、以降の検討において有意な差ではないと考えられる。混合材料がケイ砂3号・5号 として得られた塑性限界と液性限界の値を表 2.3・23 と表 2.3・24 に示した。

	実測値			計算值				
クニゲル V1	ケイ砂 3号	ケイ砂 5号	ケイ砂 平均値	^ 	×ントナイト混合 ×ントナイト配合 50 %	上 率 70 %		
2.774	2.669	2.743	2.706	2.72	2.74	2.75		

表 2.3-22 ベントナイトとケイ砂、ベントナイト混合土の土粒子密度 (Mg/m³)

					I	. ,
ベントナイト 配合率 [%]	乾燥密度 [Mg/m3]	有効粘土密度 [Mg/m3]	含水比 [%]	飽和度 [%]	塑性限界 [%]	コンシステンシー 指数 [·]
	1.80	0.620	14.1	75.1		0.983
	1.81	0.625	15.8	85.0		0.964
	1.80	0.618	17.7	93.8		0.944
	2.00	0.802	9.90	74.4		1.03
15	2.00	0.804	11.1	83.7	12.5	1.02
	2.00	0.803	12.4	93.4		1.00
	2.19	1.05	7.30	82.2		1.06
	2.17	1.02	8.00	85.6		1.05
	2.11	0.944	9.20	87.7		1.04
	1.23	0.795	33.4	74.4		0.949
	1.22	0.791	38.1	84.3		0.933
	1.23	0.792	42.6	94.4		0.917
	1.45	0.988	24.4	74.9		0.980
	1.46	1.00	27.3	84.7		0.970
50	1.44	0.983	30.8	93.8	18.8	0.958
50	1.66	1.19	17.7	74.0	10.0	1.00
	1.66	1.19	19.9	83.4		0.996
	1.65	1.19	22.4	93.2		0.987
	2.04	1.63	9.80	78.0		1.03
	2.03	1.63	11.1	87.2		1.03
	1.99	1.57	12.5	90.6		1.02

表 2.3-23 一軸圧縮強度試験、コーン指数試験、一面せん断試験に用いた試験体 (1/2)

表 2.3-24	- 一軸圧縮強	度試験、コーン	指数試験、	一面せん	断試験に用	いた試験体 (2/2)
ベントナイト	乾燥密度	有効粘土密度	含水比	飽和度	塑性限界	コンシステンシー
配合率 [%]	[Mg/m3]	[Mg/m3]	[%]	[%]	[%]	指数 [-]
	1.20	0.966	35.1	74.3		0.965
	1.21	0.974	40.2	86.1		0.950
	1.20	0.973	44.5	95.2		0.937
	1.43	1.19	25.3	75.6		0.995
	1.43	1.19	28.5	84.8		0.985
70	1.43	1.19	31.8	94.8	92 5	0.975
70	1.60	1.36	19.6	74.5	20.0	1.01
	1.60	1.36	22.3	85.6		1.00
	1.60	1.36	25.0	94.8		0.995
	2.01	1.80	9.00	66.4		1.04
	2.02	1.82	10.6	80.1		1.04
	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1.04				
	1.20	1.20	35.2	74.8		0.970
	1.20	1.20	40.2	85.1		0.958
	1.20	1.20	44.8	94.7		0.946
	1.59	1.59	19.8	74.2		1.01
100	1.60	1.60	22.4	84.2	23.5	1.00
	1.60	1.60	25.00	94.5		0.996
	1.95	1.95	10.2	67.3		1.03
	1.97	1.97	10.9	74.1		1.03
	1.95	1.95	11.9	78.4		1.03





(b) ー軸圧縮強度、コーン指数、粘着力、内部摩擦角の整理

表 2.3・23 と表 2.3・24 に示した 42 ケースのベントナイト混合土、ベントナイトを対象に一軸 圧縮試験(地盤工学会, 2020: JIS A1216)、コーン指数試験(地盤工学会, 2020: JIS A1228)、 一面せん断試験を実施した。これらの試験から得られた一軸圧縮強度、コーン指数、粘着力、内 部摩擦角とコンシステンシー指数、有効粘土密度の関係について図 2.3・33 および図 2.3・34 に整 理した。データに一部欠損が見られるのは試験から適切な値が得られなかったためであり、特に コーン指数試験では半固体状の試験体を対象としたケースの大半が荷重計の測定限界(コーン指 数 2,255 [kPa])を超える結果となった。

全体的な傾向としては塑性状(コンシステンシー指数<1)では強度は低く半固体状(コンシス テンシー指数>1)になると上昇する。また、半固体状では有効粘土密度の増加とともに一軸圧縮 強度、コーン指数、粘着力が上昇するが、内部摩擦角については、有効粘土密度との相関は見ら れず逆にケイ砂を多く含む配合(ベントナイト配合率15%)のケースで大きい。このことから、 ベントナイト配合率 15%の混合土は粘土よりも砂の性質が支配的であると考えられる。掘削機 による岩盤の掘削性に関する判断基準とされる一軸圧縮強度は、最大で11.7 MPaであり軟岩系 岩盤相当となった。そのため土質試験に用いたいずれのベントナイト混合土においても、一軸圧 縮強度を基準とした場合には、岩盤の掘削機をベースに開発している機械的除去装置の適用範囲 内と考えられる。





図 2.3-33 一軸圧縮強度、コンシステンシー指数とコンシステンシー指数、有効粘土密度の関係





図 2.3-34 粘着力、内部摩擦角とコンシステンシー指数、有効粘土密度の関係

(3) 切削試験

実際の除去作業における隙間充填材の切削メカニズムを把握するため、1次元の切削試験を実施した。試験は前述した土質試験の結果を参考に決定した表 2.3・25に示す 37ケースの試験体を 試験装置(図 2.3・35)に設置し、切削刃で幅 15 mm×奥行き 50 mmの帯状に切削した。切削時 の移動速度は 200 mm/min、切削刃の角度は 30、45、60度として試験では切削刃に作用する荷 重(切削力)をロードセルにより測定した。切削力は図 2.3・36に示すように試験体が破壊する瞬 間の値を抽出して切削長さと合わせて整理するとともに、試験体の切削パターン(破壊の状況) の確認も進めた。試験装置の詳細、試験手順、試験体の製作状況については付属書 2.3 に示す。







(a) 試験体ケース

切削試験では、前述した土質試験と同様にベントナイト配合率15、50、70、100%の4ケース を対象に乾燥密度を1.2~2.0 Mg/m³の範囲で試験体を製作した。土質試験の結果から半固体状と 塑性状の境界で切削力の変化する可能性があると考え、試験体の含水比は塑性限界前後の値を含 むように含水比を設定した。切削試験に用いた試験体の詳細を表 2.3-25 と表 2.3-26 に示す

ベントナイト 配合率 [%]	乾燥密度 [Mg/m3]	有効粘土密度* [Mg/m3]	含水比 [%]	飽和度* [%]	塑性限界 [%]	コンシステンシー 指数[-]
	1.83	0.641	10.8	60.1		1.02
	1.83	0.647	13.0	73.2		0.995
	1.84	0.651	15.1	85.7		0.972
1.5	1.81	0.626	16.6	89.5	10 5	0.956
15	1.91	0.715	9.80	63.0	12.5	1.03
	1.91	0.715	11.2	72.0		1.01
	1.92	0.725	12.7	83.1		0.998
	1.94	0.746	0.746 12.7 86.4	0.988		
	1.49	1.02	16.0	51.9		1.01
	1.46	1.00	19.1	59.8		0.999
	1.45	0.994	20.9	64.8		0.993
	1.47	1.01	28.9	91.7		0.965
	1.69	1.23	17.5	77.2		1.01
50	1.71	1.24	18.8	84.9	18.8	1.00
	1.68	1.21	21.5	92.8		0.991
	1.77	1.31	15.2	75.8		1.01
	1.80	1.35	15.3	80.4		1.01
	1.83	1.38	16.6	90.7		1.01
	1.76	1.30	17.8	87.2		1.00

表 2.3-25 切削試験に用いた試験体 (1/2)

*飽和度と有効粘土密度は含水比と乾燥密度から土粒子密度(表 2.3-22)を用いて換算した値である。

ヘ゛ントナイト	乾燥密度	有効粘土密度*	含水比	飽和度*	塑性限界	コンシステンシー
配合率 [%]	[Mg/m3]	[Mg/m3]	[%]	[%]	[%]	指数[-]
	1.44	1.20	21.6	65.3		1.01
	1.44	1.20	23.7	71.7		0.999
	1.45	1.21	25.0	76.7		0.995
0	ト乾燥密度有効粘土密度*含水比飽和度*塑性限界コンシス[%][Mg/m3][Mg/m3][%][%][%]指数1.441.2021.665.31.41.441.2023.771.70.91.451.2125.076.70.91.451.2125.076.70.91.431.1927.983.423.51.661.4219.982.823.51.621.3821.885.31.01.621.3823.592.41.01.561.3226.595.70.91.211.2120.543.91.01.221.2222.649.11.01.201.2034.272.20.91.181.1843.790.123.51.491.4918.559.61.01.491.4921.468.71.01.541.5425.788.60.9	0.987				
0	1.66	1.42	19.9	82.8	23.9	1.01
	1.62	1.38	21.8	85.3		1.01
	1.62	1.38	23.5	92.4		1.00
	1.56	1.32	26.5	95.7		0.991
	1.21	1.21	20.5	43.9		1.01
	1.22	1.22	22.6	49.1		1.00
	1.22	1.22	24.3	53.0		0.998
	1.20	1.20	34.2	72.2		0.973
100	1.18	1.18	43.7	90.1	00 F	0.949
100	1.49	1.49	18.5	59.6	25.0	1.01
	1.49	1.49	21.4	68.7		1.01
	1.53	1.53	23.6	80.5		1.00
	1.54	1.54	25.7	88.6		0.994
	1.52	1.52	27.3	91.8		0.990

表 2.3-26 切削試験に用いた試験体 (2/2)

*飽和度と有効粘土密度は含水比と乾燥密度から土粒子密度(表 2.3-22)を用いて換算した値である。

(b) 切削パターン

試験体が破壊されるとき、鉛直軸方向に亀裂が生じて割裂するパターンと切削刃面の垂直方向 にせん断されるパターンが確認された(図 2.3・27)。試験を撮影した画像データから目視にて各 試験体の切削パターンを判断し、整理したものを表 2.3・27 と表 2.3・28 に示す。切削刃の角度に よって切削パターンが変化するケースは少なく、塑性状の試験体にせん断破壊が多く見られる傾 向がある。ただし、ベントナイト配合率 100%の試験体は1つのケースを除く全ての試験体で割 裂が生じ破壊していることから一概に塑性状ならせん断パターンが生じるとは言えない。剛性が 高い試験体(半固体状、乾燥密度大、ベントナイト配合率大)ほど、破壊時の限界ひずみも小さ くなるため、割裂が生じやすくなっていると考えられる。切削パターンの差異については引張強 度や剥離性などの観点からの考察が必要であり、畑村ら(畑村・千々岩, 1974)は粘着力が引張 強度より小さいときにせん断破壊が生じるとしている。塑性状の土の引張強度を正確に取得する ことは容易ではなく、現時点ではベントナイト混合土のデータが不足しているため本試験の検証 は今後の課題である。また、本試験では飽和度 100%での試験は実施できておらず、このような 条件において切削パターンが変化する可能性もある。





図 2.3-37 切削試験で確認された切削パターン

ベントナイト	お帰家庄	右动业上家庄*	全水山	約50亩*	マンシー	切	切削パターン	
配合率 [%]	乾燥密度 [Mg/m ³]	有効枯工密度" [Mg/m ³]	呂水比 [%]	起和度" [%]	120X)79- 指数[-]	$\theta = 30^{\circ}$	$\theta = 45^{\circ}$	$\theta = 60^{\circ}$
	1.83	0.641	10.8	60.1	1.02	割裂	割裂	割裂
	1.83	0.647	13.0	73.2	0.995	割裂	割裂	割裂
	1.84	0.651	15.1	85.7	0.972	せん断	せん断	せん断
15	1.81	0.626	16.6	89.5	0.956	せん断	せん断	せん断
15	1.91	0.715	9.80	63.0	1.03	割裂	割裂	割裂
	1.91	0.715	11.2	72.0	1.01	割裂	せん断	割裂
	1.92	0.725	12.7	83.1	0.998	せん断	割裂	割裂
	1.94	0.746	12.7	86.4	0.988	せん断	割裂	割裂
	1.49	1.02	16.0	51.9	1.01	割裂	割裂	割裂
	1.46	1.00	19.1	59.8	0.999	割裂	割裂	割裂
	1.45	0.994	20.9	64.8	0.993	割裂	割裂	割裂
	1.47	1.01	28.9	91.7	0.965	せん断	せん断	せん断
	1.69	1.23	17.5	77.2	1.01	割裂	割裂	割裂
50	1.71	1.24	18.8	84.9	1.00	割裂	せん断	せん断
	1.68	1.21	21.5	92.8	0.991	せん断	せん断	せん断
	1.77	1.31	15.2	75.8	1.01	割裂	割裂	割裂
	1.80	1.35	15.3	80.4	1.01	割裂	割裂	割裂
	1.83	1.38	16.6	90.7	1.01	せん断	せん断	せん断
	1.76	1.30	17.8	87.2	1.00	割裂	せん断	せん断

表 2.3-27 各試験体の切削パターン (1/2)

*飽和度と有効粘土密度は含水比と乾燥密度から土粒子密度(表 2.3-22)を用いて換算した値である。

**切削パターンは試験を撮影した画像データから目視によって判断した

ベントナイト	古榀広庄	方动业上密度*	승규나	約10亩*	マバクテンバー	切]削パターン	**
配合率 [%]	紀陳祖及 [Mg/m ³]	有効柏工名及 [Mg/m ³]	四水比	昭和戊 [%]	指数[-]	$\theta = 30^{\circ}$	$\theta = 45^{\circ}$	$\theta = 60^{\circ}$
	1.44	1.20	21.6	65.3	1.01	割裂	割裂	割裂
	1.44	1.20	23.7	71.7	0.999	割裂	割裂	割裂
	1.45	1.21	25.0	76.7	0.995	割裂	割裂	割裂
70	1.43	1.19	27.9	83.4	0.987	せん断	せん断	割裂
70	1.66	1.42	19.9	82.8	1.01	割裂	割裂	割裂
	1.62	1.38	21.8	85.3	1.01	割裂	割裂	割裂
	1.62	1.38	23.5	92.4	1.00	せん断	せん断	せん断
	1.56	1.32	26.5	95.7	0.991	せん断	せん断	せん断
	1.21	1.21	20.5	43.9	1.01	割裂	割裂	割裂
	1.22	1.22	22.6	49.1	1.00	割裂	割裂	割裂
	1.22	1.22	24.3	53.0	0.998	割裂	割裂	割裂
	1.20	1.20	34.2	72.2	0.973	割裂	割裂	割裂
100	1.18	1.18	43.7	90.1	0.949	割裂	割裂	せん断
100	1.49	1.49	18.5	59.6	1.01	割裂	割裂	割裂
	1.49	1.49	21.4	68.7	1.01	割裂	割裂	割裂
	1.53	1.53	23.6	80.5	1.00	割裂	割裂	割裂
	1.54	1.54	25.7	88.6	0.994	割裂	割裂	割裂
	1.52	1.52	27.3	91.8	0.990	割裂	割裂	割裂

表 2.3-28 各試験体の切削パターン (2/2)

*飽和度と有効粘土密度は含水比と乾燥密度から土粒子密度(表 2.3-22)を用いて換算した値である。

**切削パターンは試験を撮影した画像データから目視によって判断した

(c) 切削力、切削長

試験体が破壊する瞬間の切削力、切削長さとコンシステンシー指数、有効粘土密度の関係について、図 2.3-38 および図 2.3-39 に整理した。切削力については、コンシステンシー指数との 相関は見られなかったが、有効粘土密度が 1.2 Mg/m³を境に切削力は上昇しており、塑性状で あってもその傾向は変わらない。これは前述した一軸圧縮強度等と異なる傾向である。畑村ら (畑村・千々岩, 1983) は、ロームの切削において排土板表面の摩擦条件が切削挙動に影響を与 えることを指摘しており、そのことを踏まえると、本試験において試験体が塑性状であっても切 削力が低下しない要因の一つとして、ベントナイト混合土が固体状から塑性状に変化することで ベントナイト混合土と切削刃間の摩擦力が増加している可能性が考えられる。摩擦力は、刃先面 と試験体の接触面積にも依存する。本試験の場合、試験体が破壊される瞬間の接触面積 A は切 削長さ L と切削刃の角度 θ、奥行き B から求められる (A = (L/Cos θ) B)。本試験の場合、奥 行きは一定としており切削刃の角度と切削長さが増加すれば接触面積も増加する。切削刃の角度 を変えたケースで切削力を比較すると、角度の増加に伴い切削力も増加する傾向が見られる。し かし、図 2.3-39 に示すように、切削長さは切削刃の角度、コンシステンシー指数ならびに有効 粘土密度との相関は見られない。

ベントナイト混合土と除去装置間の摩擦は、切削機構だけではなく排土機構にも影響を与える ため、機械的除去装置の適用性を検討するにあたり重要なパラメータとなる。今後は、この影響 の定量的な把握・評価に向けて、引き続き検討が必要である。





2.3.8 まとめ

処分坑道横置き・PEM 方式の回収技術の高度化では、「PEM を拘束している隙間充填材との 縁切り」を目的とした機械的除去技術の高度化を検討した。機械的除去装置に求められる性能と して「PEM を定置した状態の処分坑道内で連続的に隙間充填材を除去できること」、「地下の 狭隘な環境における適用性」が挙げられ、一般土木分野におけるトンネル掘削方式を参考に自由 断面掘削方式と固定断面掘削方式の掘削方式をベースにした機械的除去装置を具体化した。

具体化された2つの機械的除去装置の隙間充填材に対する切削性能を確認するために要素試験 を実施し、隙間充填材はトンネル施工と比較して軟弱な土が対象であるため、固定断面掘削、自 由断面掘削の両方式ともに機械能力としては問題がないことが確認できた。そのため、掘削方式 の選定は組み合わせる排土機構との兼ね合いを鑑みた上で決定することとした。

排土機構としては、スクリューコンベア、ベルトコンベアならびに掘削土を液状にしてポンプ 圧送する方法が挙げられるが、技術選択肢を増やすことを目的に、本検討では除去生成物を固体 状で排土できる「バキューム吸引」による方法について検討を進めた。バキュームの搬送距離に は限界があり、除去生成物の粒径が小さい方が有利であるため、組み合わせる掘削方式には「自 由断面掘削方式」を採用することとした。切削位置から直接的に除去生成物を収集する機構を試 案し、試験によりその性能を確認した。その結果、バキューム吸引で滞りなく排土するためには 切削方向と切削面の組み合わせを考慮する必要があることがわかった。そこで、自由断面切削方 式による隙間充填材除去の操作をより現実的に想定し、二次元多方向の切削試験から切削方向と 除去生成物の排出方向の確認、排出されずに滞留する除去生成物が掘削に及ぼす影響を確認し た。試験結果より、試験体への貫入や除去生成物の堆積箇所など、除去生成物の行き場がない状 態で切削することで切削機構への付着量が増加する結果となった。これにより、除去生成物が切 削機構と隙間充填材の間に詰まると、切削機の回転が一時的に遅くなり、開放面がある場合はブ ームごと逸走しようとするなどの影響が見られた。しかし、回転する切削機構と隙間充填材が適 切に接触すれば解砕・飛散を継続して進めることができ、切削能力の低下は見られなかった。し たがって、試験装置への付着は除去効率に有意な影響はないと判断することができ、滞りなく排 土を行えることが実機の検討において重要であると考えられる。また、ブームの逸走については 本試験で用いたバックホウの特性に因るものであるが、除去装置を設計する際にブームを短くし て装置の剛性を高める、或いは左右のブレをブレーキ制御するような機構を設ける等の対策を導

様々な仕様や状態のベントナイト混合土に対する除去技術の適用性を検討するために、隙間充 填材を想定したベントナイト混合土を対象に一般的な土質試験と切削試験から土のコンシステン シーや強度に関するパラメータならびに切削メカニズムについて整理した。その結果、掘削機に よる岩盤の掘削性に関する判断基準とされる一軸圧縮強度は、最大で11.7 MPa となり軟岩系岩 盤相当となった。そのため土質試験に用いたいずれのベントナイト混合土においても、一軸圧縮 強度を基準とした場合には、岩盤の掘削機をベースに開発している機械的除去装置の適用範囲内 と考えられる。しかし、実際の切削においては、隙間充填材と除去装置間の摩擦や切削パターン が、切削機構だけではなく排土機構にも影響を与えると考えられる。これらについては現時点で は定量的に評価できていないため、引き続き検討が必要である。

入することで抑制できる可能性があることがわかった。

令和4年度は機械的除去装置の更なる具体化に向けて、本年度に把握された課題等に対する検 証や設計・開発に向けての概念検討に取り組む。

2.4 回収技術の高度化のまとめ

i)回収技術の高度化

オーバーパックや PEM の回収工程における緩衝材や隙間充填材の除去技術は、回収対象物へ 与える影響を最小限に留めることを念頭に置いた第一段階の技術開発によって、回収の技術的実 現性(回収可能であること)を実規模スケールの試験で示した。一方、除去作業は一体あたりの 数十時間を要する。そこで、第二段階の技術開発として、一定の期間で回収作業を実施するため に除去技術を含めた回収工程の迅速化に向けた技術開発を実施した。

a)オーバーパックの回収に係る技術の高度化

処分孔竪置き方式の回収作業手順の具体化と作業時間の分析により抽出された回収作業の迅速 化を図る上でのボトルネックは、オーバーパック周囲の緩衝材の除去作業である。ボトルネック 解消のため、過年度事業(平成26年度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 テムを改良し、除去時間を77時間からの短縮に向けた技術開発を計画した。時間短縮のための 緩衝材除去システムの改良点・課題として、噴射吸引設備の高圧化、塩水リユース設備の増強、 遠隔操作設備の改良を抽出した。フルスケールの除去試験による除去時間短縮の実現性の提示に 向け、令和3年度は要素試験により、緩衝材除去システムを構成する各装置の高度化に必要なデ ータを取得した。

噴射吸引設備の高圧化の課題は、除去作業の短縮に向けた噴射条件の特定と高圧化に対応した 噴射リングの製作である。これに対し、ノズル種、噴射離隔、揺動速度、作業時の水深をパラメ ータとした噴射要素試験を実施し、各パラメータが時間当たりの除去量に及ぼす影響を把握した。 これに基づき、除去作業時の装置の動作条件を設定するとともに、高圧化対応の噴射リングを製 作した。塩水リユース設備の増強の課題は、除去作業の短縮に伴う除去生成物(スラリー)の高 濃度化への対応である。これに対し、スラリー中の固形物の沈降速度が固液分離槽の設計におけ る基本情報となることから、沈降速度を取得するための要素試験を実施し、スラリー濃度や溶液 種をパラメータとした界面沈降曲線を取得した。遠隔操作設備の改良については、噴射要素試験 時の噴霧による視界不良による除去の状態把握など具体的な改善点を抽出・整理した。

b) PEM の回収に係る技術の高度化

処分坑道横置き・PEM 方式(デッドエンド型)の迅速化については、隙間充填材を広範囲に効 率よく除去することを念頭に、機械的除去技術の適用を選択した。全量回収する場合の具体的な 工程の検討を行い、隙間充填材除去作業の迅速化の目安時間を設定した。過年度事業(平成 31 年 度可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発)において、機械的な方法による隙間充填時の除去 において、半固体状のベントナイト混合土の除去装置への付着や閉塞が作業効率に大きな影響を 与えることが明らかになっている。よって除去対象である隙間充填材の配合比や密度、回収作業 の実施時期より変化する含水比に対する技術の適用性の評価も念頭に開発に取り組んだ。 土質材料に対する機械的除去技術の適用範囲を評価するため、ベントナイトと珪砂の配合比、乾 燥密度、含水比などをパラメータとした土質試験や切削試験・付着試験を実施し、切削性と土質 材料の物性値の関係を整理した。機械的除去技術の開発では、適用する切削機構の選定から着手

した。切削機構を選定するため、隙間充填材を再現した供試体に対する切削要素試験を実施し、 自由断面方式と固定断面方式それぞれの切削効率や、排出される除去生成物の形状等の情報を収 集した。切削要素試験をとおして得られた除去生成物の性状を踏まえ、切削により発生する除去 生成物を効率良く排出するための排土方法として、吸引方式の適用性を確認するための排土要素 試験を実施し、除去生成物の寸法や含水比の違いが排土効率に与える影響を整理した。 参考文献

SKB, Techniques for freeing deposited canisters. SKB-TR-00-15, 2000.

井出哲夫,水処理工学・理論と応用・,技報堂出版,1976.

- 原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放 射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書,2009.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 23 年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射 性廃棄物処分関連 地層処分回収技術高度化開発 報告書,2012.
- 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 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.
- 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.
- 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.
- 畑村 洋太郎,千々岩 健児:土の切削機構の解明(第1報,土の切削パターンについて),日本機 械学会論文集第3部,40巻338号,pp.2945-2955,1974.
- 畑村洋太郎,千々岩健児:土の切削機構の解明(第5報,土の切削理論について),日本機械学会論 文集第3部,42巻359号,pp.2258-2268,1983.

米倉亮三, 久野悟郎: 土と岩の施工論, 理工図書, 1981.

3. 回収の容易性を高めた詳細設計オプションの開発

第1章で述べたように、2015年5月に改定された基本方針において、廃棄体が最終処分施設 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、最終処分施設閉鎖まで の間の廃棄体搬出の可能性(回収可能性)を確保することが要求されている。

本章では、1.3 節に示した 3 つの設計課題のうち、回収の容易性を高めた詳細設計オプション の検討に関する実施内容について整理する。

3.1 目的

回収の容易性を示す指標の1つである回収作業時間は、回収可能性の維持が安全性に及ぼす影響とともに、回収可能性の維持期間を設定する上で重要な定量化項目である。回収作業時間の短縮は、回収作業そのもの安全性に対する不確実性の低減、回収可能性の技術的信頼性の確保に寄与する。この迅速化という技術開発課題に対して、回収方法(技術・装置)の開発や運用に重点を置いた技術的アプローチ1として、回収作業上のボトルネックとなる廃棄体の周囲の土質材料の除去技術の高度化を進めている(第2章)。一方で、処分場の施設設計に対応した作業動線や物流容量などにより、技術の高度化を実現した場合であっても、ある程度の回収作業時間は必要になる。これに対し、回収をより容易にするための方法を設計に考慮する技術的アプローチ2による更なる迅速化について検討を進めている。

これまでに、我が国において検討や技術開発が進められている処分孔竪置き方式と処分坑道横 置き・PEM 方式の2つの定置概念に対する回収作業の具体化、工程の検討を通して、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、回収の容易性を高め る詳細設計オプションの検討を進めてきた。また、オーバーパックとPEM を各定置方式に対す る回収時のハンドリングの最小コンポーネントとして、回収作業時間の短縮を可能とする詳細設 計オプションを適用した詳細設計や定置方式に関する複数の案を作成した。現時点においては、

「回収可能性」に重点を置いたものとなっている。今後は「閉鎖前の安全性」、「閉鎖後長期の安 全性」、「工学的成立性」、「経済的合理性」とった他の設計因子(NUMO, 2021)、それらを具体化 した評価項目(原環センター, 2021)の観点からも適時検討を加え、適切に更新・改良を加えて いくこと(最適化)が必要である。

2021年度は、回収の容易性を表す尺度とした回収作業期間(時間)の定量化手法の検討を検討 した。現行の2つの定置概念に対して、本手法を適用して回収作業期間の定量化を試みるととも に、この定置概念をベースに詳細設計オプションを適用した場合の回収の容易性を評価した。さ らに、共通課題として整理した回収時の緩衝材や隙間充填材の除去作業の合理化に対して、候補 となる詳細設計オプションの技術的実現性を確認した。

3-1

3.2 回収の容易性の定量化手法の検討

回収容易性を高めた詳細設計オプションの効果を定量的に示すため、回収作業時間を試算する 方法を検討した。

3.2.1 処分場に対する回収作業工程具体化

回収作業は建設・定置が実施された処分施設で実施することから、建設・操業時の処分施設の 運用を踏まえて、回収作業工程を検討した。

(1) 建設・操業における処分施設の運用の考え方

建設・操業時は、建設時に所定量の掘削土の搬出できる経路を確保し、かつ搬送・定置に必要 な作業動線を合理的に確保する観点から、連絡坑道およびアクセス坑道の配置に際しては、前提 条件として以下の項目が考慮されている(NUMO, 2021、付属書 4-61 参照)。

- ・ 建設および操業(定置・埋め戻し)の別区画での同時かつ独立作業の実施
- ・ 定置および埋め戻し作業時の動線を分離
- ・ 廃棄体はアクセス斜坑より搬入,その他は立坑を利用
- ・ 掘削土の搬出作業のため専用の立坑を設置
- ・ 避難経路は、火災時を想定し、排煙経路となる排気立坑としない

「処分区画の建設」と「操業」の2つの大工程に分けた場合、<u>別区画での同時かつ独立作業</u>の実施の観点から、建設・操業の手順は図 3.2-1、図 3.2-2 のように考えられている。

タイムライン	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5	Step 6	Step 7
建設			建	設			
操業				操	業		
区画①	建設	操業					
区画2		建設	操業				
区画3			建設	操業			
区画④				建設	操業		
区画(5)					建設	操業	
区画⑥						建設	操業

図 3.2-1 パネル型の場合の処分区画の建設・操業の順序(区画数6の場合) (NUMO, 2021 を基に作成)

タイムライン	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5	Step 6	Step 7		
建設		建設							
操業			操業						
連絡坑道 A	建設	操業	建設	操業	建設	操業			
連絡坑道 B		建設	操業	建設	操業	建設	操業		

図 3.2-2 デッドエンド型の場合の処分区画の建設・操業の順序(区画数6の場合)

(NUMO, 2021 を基に作成)

(2) 回収における処分施設の運用の考え方

処分坑道が埋め戻された状態(状態オプション2)から廃棄体を回収するための作業を、処分 坑道の再開放(処分坑道内での回収装置の動作環境の構築)と、廃棄体の回収(廃棄体の処分坑 道外への搬出)の2つに分ける。建設・操業時の考え方を踏襲すると、回収工程で考慮する前提 条件は以下のように置き換えることができる。

- ・ 再開放および回収の別区画での同時かつ独立作業の実施
- ・ 再開放および回収時の動線を分離(廃棄体の有無による分離)
- ・ 廃棄体はアクセス斜坑より搬出,その他は立坑を利用
- ・ 掘削した埋戻し材の搬出作業や、建設時の掘削土の搬出に使用した立坑を利用
- ・ 避難経路は、火災時を想定し、排煙経路となる排気立坑としない

建設・操業時の区画分けに基づき、<u>別区画での同時かつ独立作業の実施</u>の観点で回収の手順を 構築した。区画数6の場合の回収の手順について、図 3.2-3 にパネル型、図 3.2-4 にデッドエン ド型をそれぞれ示す。

タイムライン	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5	Step 6	Step 7
再開放							
回収							
区画①	再開放	回収					
区画②		再開放	回収				
区画③			再開放	回収			
区画④				再開放	回収		
区画⑤					再開放	回収	
区画6)						再開放	回収

図 3.2-3 パネル型の場合の処分区画の再開放・回収の順序(区画数6の場合)

タイムライン	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5	Step 6	Step 7
再開放							
回収							
連絡坑道 A	再開放	回収	再開放	回収	再開放	回収	
連絡坑道 B		再開放	回収	再開放	回収	再開放	回収

図 3.2-4 デッドエンド型の場合の処分区画の再開放・回収の順序(区画数6の場合)

処分坑道の再開放に要する期間は、掘削装置の能力に因る掘進速度と、搬出装置の能力と搬出距 離や経路上の物流容量に依存する掘削ズリの搬出速度から求めることになる。将来世代の技術選 択によっては、回収済み処分坑道の再利用も想定される(例えば、高耐食性オーバーパックへの 変更、など)。そのため、再開放で発生した掘削ズリの行先については、回収が完了した区画へ の搬入ではなく、全て地上へ搬出することを以後の検討では前提とした。

3.2.2 回収作業期間の試算手法

(1) 回収作業手順の一般化

定置方式、処分場の区画数、実際の回収作業時に設定される回収ユニットの規模などに対して、 回収作業期間を試算できるよう、現行の2つの定置概念に対して設定した回収手順(図 3.2-3、 図 3.2-4)を一般化する。

R&R 検討会にて整理した技術検討のフレームワークにおいて、回収容易性(回収作業時間)で 定量化する情報として、単位ユニットあたりの回収作業時間(期間)と全ての廃棄体回収に係る 全体作業時間(期間)の2つが挙げられている。単位ユニット当たりの回収時間(期間)は廃棄 体1体、処分坑道1本、複数本の処分坑道、1つの処分区画のように、別区画での同時かつ独立 作業時の分割に相当するものとした。全体作業時間(期間)は、回収の判断時に定置されている 全ての廃棄体の回収に要する作業期間に相当する。これらを一般化し、Nユニットに分割した場 合の手順と回収作業時間(期間)の関係をまとめると、図 3.2-5 のようになる。

タイムライン		Step 1	Step 2	Step 3	\sim	Step N-1	Step N	Step N+1
総再開放期間								
総回収期間								
ユニット1		再開放	回収					
ユニット2			再開放	回収				
ユニット3				再開放				
5	5	5	5	5	Ş	5	S	5
ユニット N-1						再開放	回収	
ユニット N							再開放	回収
回収作業期間					\sim			

図 3.2-5 一般化した回収手順と回収作業期間(ユニット数 N)

(2) 処分坑道の再開放期間に基づく、回収作業期間の試算方法

定置済みの領域をN分割し、処分坑道の再開放⇒廃棄体の回収という手順とする場合、タイム ラインのステップ数はN+1になる。また、再開放が完了したユニットから廃棄体を順次回収して いくため、回収作業がスムーズに進めるためには、ユニットあたりの廃棄体の回収期間が処分坑 道の再開放期間よりも短い必要がある。この時、全量回収の作業期間は、

回収作業期間 =1ユニットの再開放期間 × ユニット数 + 1ユニットの回収期間 式 3.2-1

処分坑道の再開放期間 ≧ 回収期間であるなら、簡易的に以下の様にも表記できる。

回収作業期間 ≒ 1 ユニットの再開放期間 × (ユニット数 + 1) 式 3.2-2

このように、全量回収の作業期間は1ユニットあたりの再開放期間を基に試算することができる。

3.2.3 処分坑道の再開放期間の考え方

処分坑道が埋め戻された状態からの回収作業期間の算出に必要となる、処分坑道の再開放に要 する期間(時間)について、現行の定置概念、詳細設計オプションの適用した場合、さらに今後 具体化される処分場の施設設計への適用を考慮し、処分場レイアウトを表す寸法や距離を変数と する数式の形式に整理した。

(1) 処分坑道の再開放に係る物量の整理

処分区画の処分坑道の取付部は、搬送定置装置の移動方式によって図 3.2-6 に示すような2種類の形状が検討されている (NUMO, 2021、付属書 4-52)。タイヤ方式では拡幅部を設けた直交、 レール方式では鈍角となっている。



(a)レール方式(処分坑道竪置き方式の例) (b)タイヤ方式(処分坑道横置き・PEM 方式の例) 図 3.2-6 処分坑道の取付部の形状(新第三紀堆積岩類の場合)

搬送定置装置の移動方式による取付部の形状も踏まえ、回収可能性が維持されている状態の処分 坑道を図 3.2-7 に模式的に示す。同図に示した寸法を基に、回収作業時間(期間)の試算に必要 となる、距離や物量について設定した。



図 3.2-7 回収可能性が維持されている処分坑道の模式図

以下に、各変数の内訳、回収作業期間の試算上の扱いを示す。なお、記号の一部については、処 分坑道の再開放に要する時間を作業工程の検討を踏まえて算出できるよう、土木工事積算基準に おける記号と統一している(NEXCO, 2021)。 取付部: h m

処分坑道内に設置された力学プラグ前までの距離と定義する。起点は、パネル型の場合は主 要坑道中心、デッドエンド型の場合は連絡坑道中心とする。

・ プラグ領域: *l*_p m

処分坑道内で力学プラグが施工される領域と定義する。力学プラグ撤去後は、処分坑道内の 移動距離に加算し、埋め戻し領域としては扱わない。

● プラグ直近距離 : *l*₂ m

プラグ領域の端部から廃棄体までの距離と定義する。処分孔定置の場合は処分孔中心までの 距離、坑道定置の場合は、廃棄体前面までの距離とする。力学プラグ直後から定置される場合 は0mとする。

廃棄体定置間隔: A m
 処分坑道内の廃棄体の中心間距離と定義する。処分孔定置の場合は、処分孔の中心間距離、
 坑道定置の場合は、廃棄体の大きさを考慮した中心間距離とする。

処分坑道内空の断面積: A m²

支保工が施工された状態の処分坑道の内空断面積。新第三紀堆積岩類では、断面形状は三 芯円である。処分坑道の建設時の支保施工前の掘削断面積はA1とする。

- 土量変化率(ほぐし率):L
 処分坑道内の埋め戻し材であるベントナイト混合土を掘削する(ほぐす)と体積が大きくなる。その割合を表す。
- 廃棄体定置数:n体
 処分坑道1本に定置されている廃棄体の数量
- 再掘削全長: *l*exca. m

プラグ領域の端部から奥側の埋め戻されている領域と定義する。処分坑道1本あたりの全長 は式 3.2-3 のよう一般的に表される。また、処分坑道横置き・PEM 方式(デッドエンド型) で、PEM を近接させて定置した場合、*lexca*.は式 3.2-4 になる。

坑道再掘削全長	$l_{exca.} = l_2 \times 2 + l_3 \times (n-1)$	式 3.2-3
横置き・PEM 方式		* 204
(デッドエンド型)	$\iota_{exca.} = \iota_3 \times n$	IL 3.2-4

● 発生土総量: Vexca._total m³

処分坑道1本当たりの再開放で発生する土量は式 3.2-5 で表される。処分坑道横置き・ PEM 方式の場合、PEM1体の占有堆積を VPEMとすれば、式 3.2-6 で表される。

$V_{exca_total} = l_{exca.} \times A \times L$	式 3.2-5
$V_{exca._total} = l_{exca.} \times A \times L - V_{PEM} \times n$	式 3.2-6

1ユニットあたりの処分坑道本数: j本

回収を実施する領域をN分割した場合に、1ユニットを構成する処分坑道本数

(2) 装置単体の能力と作業時間の関係

カ学プラグの撤去した後の処分坑道の再開放は、掘削、ズリ搬出の繰り返しで実施される。(1) で整理した再開放の物量に対し、掘削、ズリ搬出に関与する掘進機、積込み機、搬出装置の能力 を設定し、作業時間との関係を整理した。

・掘進機による処分坑道内の埋め戻し材の掘削(B、C、vi)

図 3.2-8 のように、処分坑道内の埋め戻し材を解砕し、空間を構築する。一掘進長:*B*m、 掘進機能力: *C*m³/分、掘進機の移動速度: v₁m/分とする。



図 3.2-8 掘進機による埋め戻し材の解砕(自由断面掘削機の例)

・積込み機と搬出装置によるズリ搬出(R、v2、H、v3)

図 3.2-9 のように掘進機によって解砕した埋め戻し材を搬出装置(ダンプなど)に積み込む。積込み機能力: *R*m³/分、積込み機の移動速度: v₂m/分、搬出装置の積載量: *H*m³、搬出装置の移動速度: v₃m/分とする。



図 3.2-9 解砕した埋め戻し材の積込み工程

一掘進長の掘削⇒ズリ搬出の作業を 1 cycle とし、掘進機と積込み機の入れ替えが必要な手順での再開放に要する時間ついて考える。k cycle 目の再開放における切羽の位置、すなわち起点からの機械の移動距離を p_k は、式 3.2-7 で表される。

$$p_k = l_1 + l_p + (k - 1) \times B$$
 式 3.2-7

起点から切羽までの掘進機の移動、起点までの退避に要する時間 k_{1_run} 、一掘進長 Bの掘削に要する時間を $t_{exca.}$ はそれぞれ式 3.2-8、式 3.2-9 となる。よって、k cycle 目の一掘進長の切削に要する時間 T_{k_1} は、式 3.2-10 で表される。

$$T_{k1} = t_{k1,run} \times 2 + t_{k1}$$
 式 3.2-10

発生土量 Vexca.、積込みに要する時間 toad、搬出装置の往復回数 m は、それぞれ、式 3.2-11、式 3.2-12、式 3.2-13 となる。発生土量は掘削位置に依存しない。

積込み機、搬出装置の片道の移動に要する時間を t_{k2_run} 、 t_{k3_run} 、とすれば、一掘進長当たりのズ リ出しに要する時間 T_{k4} は式 3.2-16 で表される。

$$t_{k2_run} = \frac{p_k}{v_2} = \frac{l_1 + l_p + (k-1) \times B}{v_2}$$

$$t_{k3_run} = \frac{p_k}{v_3} = \frac{l_1 + l_p + (k-1) \times B}{v_3}$$

$$\vec{x} \quad 3.2-15$$

以上より、掘進機と積込み機の入替を要する手順では、k cycle 目の一掘進長の掘削+ズリ出しに 要する時間 T_k は、準備時間 $T_{pre.}$ 、作業の損失 $T_{k,loss}$ を用いて、式 3.2-17 となる。なお、この関係は、図 3.2-10 のように、全ての作業が直列で行われている場合に相当する。

$$T_k = T_{pre.} + T_{k1} + T_{k4} + T_{k_{loss}}$$
 $\vec{z} \ 3.2-17$



処分孔定置方式の場合は、通常のトンネル建設工事で使用される土木建設機械(掘進機や積込み 機、搬出装置)の仕様や能力から、再開放時間を定量化することができる。一方、処分坑道定置 方式の場合は PEM を跨ぐ特殊な装置での再開放となるため、第2章で整備を進めている隙間充 填材の除去技術の開発成果を踏まえて定量化する。

(3) 処分坑道1本当たりの再開放時間の考え方

処分坑道一本当たりの再開放時間を求める際、再開放の進捗に伴う *p*kの変化を考慮する必要がある。ここでは、一掘進長あたりの再開放時間 *T*kから、処分坑道一本当たりの再開放時間 *Tg*を求める際の目的に応じた 2 つの方法について述べる。

(a) 作業時間の総和による算出

一般化した一掘進長あたりの再開放時間 Tk について、一掘進長 Bとした場合の処分坑道一本 あたりの再開放に要する総掘進回数を c として一掘進ごとに Thから Tc まで求め、その総和を処 分坑道一本の再開放時間 Tg とする。

$$c = \left| \frac{l_{exca.}}{B} \right|$$
 \vec{x} 3.2-18

$$T_g = \sum_{k=1}^{c} T_k = T_{pre} \times \left[\frac{l_{exca.}}{B}\right] + \sum_{k=1}^{\left\lfloor\frac{l_{exca.}}{B}\right\rfloor} (T_{k1} + T_{k4} + T_{k_{-loss}})$$
 $\vec{\mathfrak{I}}$ 3.2-19

(b) 平均作業時間に基づく算出

.

装置の移動距離の重心位置を処分坑道長の中心 pave.に定めると、重心位置における作業時間 Tave.は pkの変化を考慮した平均作業時間となる。Tave.と cの積を処分坑道一本の再開放時間 T'g とする。

2つの処分坑道一本の再開放時間を模式的に示したものが図 3.2-11 である。作業重心における 平均作業時間に基づき算出された再開放時間 T'g は図中の緑色破線で囲まれた面積に相当する。 また、掘進ごとの再開放時間は、装置の移動距離の影響を受け、Tiから Taに長期化していく。処 分坑道一本の作業時間の総和で求めた再開放時間 Tg は図中の黄色い領域の面積に相当する。



図 3.2-11 処分坑道の再開放時間と算出方法の関係(平均時間、作業時間の総和)

作業重心における平均時間を用いた方法は簡易的ではあるものの、ほぼ Tg と等しい値を得る ことができる。そのため、3.2.1 に示した回収作業時間の算出方法における回収ユニットを処分坑 道単体とした場合は、T'gに(定置済みの処分坑道総本数+1)を掛けることで、およその全量回 収期間を見積もることができる。

(4) 複数処分坑道での同時作業を実施した場合の再開放時間

回収ユニットを複数本の処分坑道とした場合でも、ユニット内の処分坑道を一本ずつ再開放する手順では、T'gにユニットに含まれる処分坑道の本数を掛けたものがユニットあたりの再開放時間になる。これに対して、処分坑道を幾つか同時に再開放する手順では、一本ずつ実施する手順と比較して再開放時間が短縮される。この短縮効果は同時並行で再開放する処分坑道の本数が多いほど高い。

同時作業で再開放できる処分坑道の本数は、掘削ズリの搬出経路である立坑の搬出能力を超え ない範囲で設定することができる。一掘進長あたりの発生土量 Vexca.は、式 3.2-11 のように切羽 位置 pk に依存しない。平均時間 Tave.で再開放時間を算出した場合、単位時間あたりに排出され る掘削ズリの量(掘削ズリの排出速度)は、見かけ上 Vexca./ Tave.の一定値で排出されることにな る。一方、実際の一掘進に要する時間 Tk は、図 3.2-11 のように進捗に伴って長時間側にシフト するので、掘削ズリの排出速度は pave.を境に坑口側では Vexca./ Tave.よりも大きく、妻側では小さ くなる。よって、地上への搬出口である立坑へは、複数の処分坑道から時間変化を伴って掘削ズ リが運び込まれることになる。地上への搬出が滞ると、再開放自体も停滞することになるため、 再開放の進捗に伴うズリ発生量の変化は工程を検討する上で重要である。 以上より、2つの算出方法 $T'_g > T_g$ は、目的に応じて選択することが重要である。 T'_g は、処 分坑道一本あたりの再開放時間を簡易的に把握する場合は有効である。一方、 T_g :はより現実に 近い再開放時間となり、掘削ズリの排出速度の時間変化を考慮した複数処分坑道での同時作業を 具体化する場合に有効と考えられる。

(5) 立坑の搬出能力に基づく、再開放期間の考え方

複数の処分坑道から構成される回収ユニットの再開放時間は、同時に再開放する坑道の本数に 依存するが、この本数は掘削ズリを地上へ搬出する立坑の能力の制約を受ける。ある能力を有す る立坑に対し、作業手順や移動経路の最適化により稼働率を上げ、常時 100%を実現したとき、 再開放時間は最も短くなる。よって、この値を式 3.2-2 に代入したものが、その処分施設におけ る最短の回収作業期間となる。作業手順や経路の最適化には処分施設の詳細な施設設計、回収作 業計画が必要である。それらは事業の進捗に伴って今後具体化されていくため、ここでは立坑の 能力を簡易的な設定に基づく、最短となる再開放期間の推定方法を示す。

最終処分計画に基づく廃棄体の定置速度を、建設および操業(定置・埋め戻し)の別区画での 同時かつ独立作業の実施で達成するため、処分区画数と坑道掘削速度の関係が検討されている (NUMO, 2021、付属書 4-51)。ある処分区画数に対して1ヵ月あたりに掘削する必要がある処 分坑道の総延長をXm/月とする。ここでは、1切羽あたりの掘進速度を考慮した複数切羽での 施工といった、総延長Xmを達成するための実際の建設計画は考慮しない。この時発生する掘削 ズリの体積を Vcm³は、式 3.2-5を掘削断面積: A1m、地山の土量変化率: L'で置き換えた式 3.2-22 で表される。

$$V_c = X \times A1 \times L'$$

建設・操業時の作業動線・換気経路の検討(NUMO, 2021、付属書 4-61)によれば、処分坑道の 建設で発生した掘削ズリは全て立坑を使用して地上へ搬出される。一か月あたりの実稼働日数を *d*日、一日あたりの実働時間を *h*時間とすれば、立坑の 1 時間あたりの搬出能力は式 3.2-23 で 表される。立坑の搬出能力は、実働時間が長いほど小さくて済む。

$$V_c \div (d \times h)$$

式 3.2-23

式 3.2-22

回収作業において、処分坑道1本あたりの再開放で発生する土量は、式 3.2-5 や式 3.2-6 で表される *V*exca_total であるから、全量を立坑で搬出するのに要する時間は式 3.2-24 で表される。この式は図 3.2-10 に示すような掘削・搬出の実作業時間を考慮していないが、立坑の能力を超えて発生したズリは地下空間に蓄積していくため、搬出が完了するまで再解放を中断しなければならない。よって、式 3.2-24 によって算出される再開放時間は、作業手順に依存しない最短の再開放時間 *T*g_min.となる。

$$T_{g_min.} = \frac{v_{exca_total}}{v_c} \times (d \times h)$$

式 3.2-24

3.2.4 技術的アプローチにより実現する回収作業期間

複数本(*j*本)の処分坑道の回収ユニットの最短の再開放時間は、式 3.2-25 で表される。この値 を式 3.2-2 に代入して得た値は、既設の処分場の最も短い全量回収期間となる。

1ユニットの最短の再開放時間= $T_{g_{min}} \times j$

式 3.2-25

回収作業の迅速化という技術開発課題に対する2通りの技術的アプローチがあるが、再開放時間 の定量化手法の検討の観点から、それぞれの役割について整理した。

(1) 技術的アプローチ1による回収作業時間の迅速化

回収方法(技術・装置)の開発や運用に重点を置いた技術的アプローチは、既設の処分場に対 する回収作業の迅速化において、次の役割がある。第2章に示した回収技術の高度化開発の成果 は、この部分に反映される。

(a) 再開放に関連する技術の迅速化

ユニットあたりの再開放期間である *T*g_min.×*j*は、ズリの搬出経路である立坑の稼働率を常時 100%とした場合の値である。処分坑道の再開放に関連する技術単体を迅速化したとしても、掘削 ズリの地上への搬出が遅滞するため、この期間を短くすることはできない。

実際の作業では、図 3.2-11 のように切羽位置の移動に伴い、単位時間あたりの掘削ズリの発生 量が変化する。この要因は、図 3.2-10 に模式的に示すように、装置の移動に要する時間が変化す るためである。この時間を短縮若しくは一定とするための技術として、装置の移動速度 m~mの 高速化、掘削と積込みを兼ねる装置の導入による入替作業の省略、連続式コンベアシステムの導 入による搬出作業の合理化などが挙げられる。パネル型の処分区画の場合は、両坑口からの同時 掘削することで式 3.2-7 で表される起点からの移動距離 pkの変動幅を抑えることも有効である。

技術単体の迅速化は、作業パーティー数の削減に寄与する。同時に稼働するパーティー数が少ない方が、処分坑道の再開放における作業計画の策定や運用の柔軟性が高まる。

以上のように、処分坑道の再開放に対する技術的アプローチ1は、掘削ズリ発生量の時間変動 を抑え、立坑の稼働率を100%に近づける行為とみることができる。

(b) 回収作業に関連する技術の迅速化

別区画での同時かつ独立作業により、式 3.2-1 で示される回収作業時間を実現するためには、 1 ユニットあたりの再開放時間以内で、ユニット内に定置されている廃棄体を全て回収する必要 がある。回収作業に関連する技術の迅速化は、作業パーティー数の削減に寄与する。同時に稼働 するパーティー数が少ない方が、廃棄体の回収における作業計画の策定や運用の柔軟性が高まる。

(2) 技術的アプローチ2による回収作業時間の迅速化

回収をより容易にするための方法を設計に考慮する技術的アプローチ2は、技術的アプローチ 1における検討や技術開発の前提条件に関連すると考えられる。

3.3 現行の定置方式に対する回収作業時間の試算

これまで、処分場の施設設計、回収作業で使用する装置の能力、回収手順や運用計画の観点から、回収の容易性(回収作業時間)を定量化する方法、容易性を高める詳細設計オプションの適 用レベルの検討結果を示した。この手法に基づき、現行の2つの定置方式について、全量回収に 要する期間を試算した。回収作業時間は、式 3.2-2 に処分坑道の再開放時間を代入する簡易的な 方法で算出した。再開放時間は、立坑の能力 3.2.3(5)に示した方法にて設定する。また、試算に必 要な処分場の施設設計は NUMO 包括的技術報告書(NUMO, 2021)内の値を使用した。

3.3.1 立坑による掘削ズリの搬出能力の設定

処分場建設時の処分坑道の掘進速度は月進 500 m と設定されている (NUMO, 2021、付属書 4-51)。建設時には坑道掘削速度に坑道の断面積を乗じた掘削土量が発生することから、立坑は月 進 500m で生じる掘削土量を地上に搬出する能力を有すると仮定した。処分場の区画形状、取り 付け部の形状、処分坑道中心間距離などは、処分場を建設するサイトの地質環境を踏まえた施設 設計により具体化される。ここでは、新第三紀堆積岩類深度 500m に建設される S.L.幅 5 m の処 分坑道の掘削を対象とし、式 3.2-22 により設定した。

表 3.3・1 に試算時の条件、処分坑道建設時のズリ発生量、並びに立坑による掘削ズリの搬出能力の試算結果を示す。この試算では「3.2.3 処分坑道の再開放の考え方」においても課題として挙 げた、複数処分坑道での同時作業におけるズリ発生速度の変化は考慮していない。また、建設時 の鋼製支保やロックボルト、吹付けコンクリートの施工時間は考慮していない。さらに、月進 500 mの計画に対しても立坑の搬出能力は、実稼働時間に依存する。例えば、稼働時間が長い方が掘 進速度は遅くてもよく、掘削ズリの搬出能力の要求は低くなる。

この試算で設定した立坑の搬出能力は、本報告書における回収作業期間の算出の使用のみを前提とした値であり、実際の処分施設の立坑の能力の設定ではないことに注意されたい。

項目	単位		試算時の条件、等
掘削断面積:A1	m^2	21.47	NUMO, 2021、新第三紀堆積岩類深度 500m
土量変化率:L	—	1.4	NEXCO, 2021、地山等級 DIII
1 m あたりの掘削ズリ	m³ / m	30.1	処分坑道掘削断面積×土量変化率
坑道掘削計画(月進)	m / 月	500	NUMO, 2021、付属書 4-51 より
掘削ズリ発生量	m ³ /月	15,050	1m あたりの掘削ズリ×月進
稼働日数	日/月	23	NEXCO, 2021、1 ヵ月の実作業日数
稼働時間	時間 / 日	18	NEXCO, 2021、二方作業の実作業時間
実稼働時間	時間 / 月	414	稼働日数×稼働時間
立坑搬出能力	m ³ /時間	36.4	※本検討のために設定した仮の能力

表 3.3-1 建設時の掘進速度に基づく立坑からの搬出能力の設定

3.3.2 処分孔竪置き方式に対する試算

(1) 処分場の施設設計条件の整理

新第三紀堆積岩類、深度 500m 処分孔竪置き方式に対する試算の前提、及び処分坑道再開放よる発生土総量 Vexca_total の算出結果を表 3.3-2 に示す。

項目	単位	値	試算時の条件、等
サイト条件			新第三紀堆積岩類、深度 500m
プラグ直近距離: h	m	3.33	出典: NUMO, 2021
廃棄体定置間隔: h	m	6.66	出典:NUMO, 2021
廃棄体定置本数:n	体	131	処分坑道1本当たり 出典: NUMO, 2021
再掘削全長:Lexca.	m	873	式 3.2-3より 処分坑道1本あたり ※小数点以下切り上げ
処分坑道内空断面積: A	m^2	16.5	CAD による坑道断面図の作図より
土量変化率:L		1.4	NEXCO, 2021、土工 土質区分 C より仮設定
発生土総量:Vexcatotal	m ³	20,166	式 3.2-5 より 処分坑道1本あたり ※小数点以下切り上げ

表 3.3-2 処分孔竪置き方式の試算の前提

(2) 区画の再開放時間、及び回収作業期間

3.2.13.2.2 における回収作業時の単位ユニットを建設・操業時の処分区画とし、6 ユニットとした場合の処分坑道の再開放期間、並びに全量回収期間の試算結果を表 3.3-3 に示す。

項目	単位	値	試算時の条件、等
処分坑道本数	本	51	1 区画あたり 出典 : NUMO, 2021
発生土量	m ³	1,028,466	V _{excatotal} ×51 1区画あたり
再開放期間: $T_{g_{min.}}$	h	28,255	1 ユニットあたり ※小数点以下切り上げ
ユニット数: N		6	処分場の区画数 出典 : NUMO,2021
回収作業期間	h	197,785	式 3.2-2 より 小数点以下切り上げ
	日	8,242	24 h 連続稼働で進めた場合

表 3.3-3 処分孔竪置き方式の回収作業時間

3.3.3 処分坑道横置き・PEM 方式に対する試算

(1) 処分場の施設設計条件の整理

新第三紀堆積岩類、深度 500m 処分坑道横置き・PEM 方式に対する試算の前提、及び処分坑 道再開放よる発生土総量 Vexca._totalの算出結果を表 3.3-2 に示す。

項目	単位	値	試算時の条件、等
サイト条件			新第三紀堆積岩類、深度 500m
プラグ直近距離: h	m	0	出典:NUMO, 2021
廃棄体定置間隔: h	m	3.356	PEM 全長 出典: NUMO, 2021
廃棄体定置本数:n	体	209	処分坑道1本当たり 出典: NUMO, 2021
再掘削全長:Lexca.	m	702	式 3.2-4より 処分坑道1本あたり ※小数点以下切り上げ
処分坑道内空断面積: А	m^2	16.5	CAD による坑道断面図の作図より
PEM 断面積	m^2	4.2	直径 2.316 m 出典: NUMO, 2021 ※小数第二位以下切り捨て
土量変化率:L		1.4	NEXCO, 2021、土工 土質区分 C より仮設定
発生土総量: V _{excatotal}	m ³	12,089	式 3.2-6より 処分坑道1本あたり ※小数点以下切り上げ

表 3.3-4 処分坑道横置き・PEM 方式の試算の前提

(2) 区画の再開放時間、及び回収作業期間

3.2.13.2.2 における回収作業時の単位ユニットを建設・操業時の処分区画とし、6 ユニットとした場合の処分坑道の再開放期間、並びに全量回収期間の試算結果を表 3.3-3 に示す。

21 0.0	- / - / 4		
項目	単位	値	試算時の条件、等
処分坑道本数	本	32	1 区画あたり 出典 : NUMO, 2021
発生土量	m ³	386,848	V _{excatotal} ×32 1区画あたり
再開放期間: $T_{g_{min}}$	h	10,628	1 ユニットあたり ※小数点以下切り上げ
ユニット数: N		6	処分場の区画数 出典:NUMO,2021
回収作業期間	h	74,396	式 3.2-2 より 小数点以下切り上げ
	日	3,400	24 h 連続稼働で進めた場合

表 3.3-5 処分坑道横置き・PEM 方式の回収作業期間

3.3.4 回収装置の能力必要能力と同時稼働するパーティー数

建設・操業時の立坑の搬出能力から、処分区画の再開放期間、並びに回収作業期間を試算した。 図 3.2-5 に示すような<u>別区画での同時かつ独立作業</u>で回収作業を円滑に進めるためには、回収ユ ニットあたりの再開放に要する期間内に、そのユニットに定置された廃棄体を全量回収するため の、回収作業計画及び装置能力が必要である。

ここでは回収ユニットを建設・操業の6区画とし、回収技術の高度化開発で実施中の事業で実 施中の回収技術にて、

(1) 処分孔竪置き方式の回収作業

表 3.3・3 に示したように、処分孔竪置き方式の 1 区画当たりの再開放に要する最短期間は、 28,255h である。1 区画当たりの廃棄体定置数は 131 体×51 坑道より 6,681 体である。よって、 廃棄体 1 体あたりの回収作業は 28,255÷6,681=4.229...≒4.2h となる。つまり、1 体あたりの回 収作業を 4.2 h 未満で実施すれば、処分坑道の再開放と廃棄体の回収の作業時間のバランスが成 り立つことになる。

2.2 に示した処分孔堅置き方式の回収技術の高度化では、処分孔 1 本に対する作業時間のバランスから、廃棄体 1 体あたりの回収時間を 28 h 未満とすることを目標に、77 h 要する緩衝材除去時間を 20 h 未満に迅速化するための技術開発を実施している。約 4.2 h/体の回収時間を実現するためには、28÷4.2=6.66...≒7、つまり迅速化を達成したオーバーパックの回収作業を 7 パーティー同時に実施すればよいことになる。

1区画当たりの処分坑道は51本であるので、7本に1パーティーの割合で回収作業を実施する ように計画すれば、処分坑道の再開放と再開放後の回収作業を同時進行で実施することができる。

(2) 処分坑道横置き・PEM 方式の回収作業

表 3.3-5 に示したように、処分坑道横置き・PEM 方式の 1 区画当たりの再開放に要する最短 期間は 10,628 h である。1 区画あたりの廃棄体の定置数は 209 体×32 坑道より、6,688 体であ る。よって、廃棄体 1 体あたりの回収作業は、10,628÷6,681=1.590...≒1.6 h 未満で実施すれば、 処分坑道の再開放と廃棄体の回収の作業時間のバランスが成り立つことになる。

しかしながら、処分坑道定置方式の場合は(1)と異なり、処分坑道の再開放が廃棄体周囲の隙間 充填材の除去を兼ねることに留意が必要である。PEM を 1 体回収際に発生する掘削ズリの体積 は、表 3.3-4 の値を用いて計算すれば、(16.5-4.2)×3.356×1.4=57.790...≒57.8 m³になる。立坑 の搬出能力を最大 36.4 m³/h と仮設定しているので、57.8÷16=36.125≒36.2 m³/h は立坑の搬出 能力内に収まるので、約 1.6h/体の PEM の回収は立坑の搬出能力からみても実現性はある。

2.3 に示した処分坑道横置き・PEM 方式の回収技術の高度化では、処分孔1本に対する作業時間のバランスにおいて、PEM の搬出装置の移動速度を1km/h とした場合の隙間充填材の除去時間を5h 未満に迅速化するための技術開発を実施している。約1.6h/体の回収時間を実現するためには、5÷1.6=3.125≒4、つまり迅速化を達成した隙間充填材除去装置を4パーティー用意し、立坑の搬出能力の範囲内で同時に稼働させればよいことになる。

1区画当たりの処分坑道は32本であるので、8本に1パーティーの割合で回収作業を実施する ように計画すれば、処分坑道の再開放と再開放後の回収作業を同時進行で実施することができる。

3.3.5 実際の工程を想定した作業計画と課題

ここまで、立坑の搬出能力を基に算出した回収作業時間を実現するための回収装置の必要パー ティー数を試算した。実際のユニットあたりの再開放は、3.2.3(4)で述べたように切羽の位置を考 慮する必要があるため、立坑の搬出能力に基づく再開放期間よりも長期化する。これは回収作業 側に対しては作業時間に余裕が生じる側に働く。すなわち、第2章で実施中の回収の迅速化に向 けた技術開発で目標を達成した技術による回収作業を、処分孔竪置き方式の場合は7パーティー、 処分坑道横置き・PEM 方式の場合は4パーティー同時に実施すれば、除去作業は回収のボトル ネックにならない。

一方で、回収に関わる技術や装置の高度化を実施しても、表 3.3-3、表 3.3-5 に示すようにある程度の回収作業期間を要する。この時間の実現のためには、あるパーティー数で同時作業を実施する必要があるが、地下施設のレイアウトや空間によっては実現できない可能性もある。さらに、回収作業中の作業安全性の観点から、より迅速な回収作業が要求される可能性もある。

本節における回収作業時間の試算は、回収方法(技術・装置)の開発や運用に重点を置いた技術的アプローチ1によるものである。技術的アプローチ1で対応可能な範囲を超える場合を見据 え、回収をより容易にするための方法を設計に考慮する技術的アプローチ2について、次節以降 に具体的に示す。

3.4 処分孔竪置き方式を起点とした詳細設計オプションの適用例

現行の処分孔竪置き方式の施設設計に対する回収作業では、技術的アプローチ1によっても ある程度の期間を要することを0で述べた。さらなる回収作業時間の短縮の要求への対応とし て、現行の処分孔竪置き方式を出発点とした技術的アプローチ2による検討を実施した。本検 討は、以下に挙げる前提条件の範囲で実施した

- ・現行の処分孔竪置き方式をベースとした検討
- ・現行の作業動線、換気経路の考え方を踏襲
- ・閉鎖後長期の安全性への影響に留意し、人工バリア構成は現行概念を踏襲

現行の処分孔竪置き方式の設計に対して回収の容易性を高める詳細設計オプションを適用する と、処分場のレイアウトの変更が生じる。更新された処分場の施設設計に対し、現行の定置方式 に対して開発された回収技術の適用について、技術的アプローチ1による容易性向上の余地に ついても再検討する。

3.4.1 施設設計に対する詳細設計オプションの適用

現行の処分孔竪置き方式に対する技術的アプローチ2の適用について、再開放期間の短縮の観 点による検討を行った。

(1) 廃棄体定置間隔の変更

処分孔中心間距離(廃棄体定置間隔)や処分坑道中心間距離の設計は、先ず力学的観点で距離 を設定し、次に廃棄体の発熱による熱的観点での成立性を評価する手順となっている(NUMO, 2021、付属書 4-33)。現行の処分孔竪置き方式の廃棄体定置間隔(*k*)は、隣接する裸孔の処分孔 の空洞安定性から設定されており、新第三紀堆積岩類の場合は、処分孔直径 *d*(定置作業で必要 な隙間を無視すれば、人工バリア外径と同値)に対して *k*=3*d*とされている。処分坑道1本あた りの再掘削長 *l*exca.(式 3.2-3)を短縮する詳細設計オプションは、熱的観点で成立性が確保でき る距離まで *k*を短縮することである。

(2) 近接処分孔の構築(操業技術に対するオプション:処分孔の補強)

隣接する処分孔の中心位置における局所安全率 Fs =1.2 の領域の深さが大きく変化しないこ とを、処分孔の力学的安定性の評価基準としている (NUMO, 2021、付属書 4·33)。ある深さを 有する処分孔を 3d より近づけると、Fs の基準を満たす領域が深くなり、処分孔の空洞安定性が 低下する。この課題に対して、処分孔自体の空洞安定性が求められる期間を建設操業期間中の処 分孔の掘削から人工バリアの定置が完了するまでとすれば、ケーシングといった一時的な仮設構 造物による孔壁の補強が、孔内作業空間を確保する操業技術オプションとして考えられる。オー ルケーシングによる孔の掘削事例として、幌延深地層研究センター試験坑道 4 で人工バリア性能 評価試験がある (原子力機構, 2016)。この試験では、人工バリア設置時にケーシングを引抜いた が、ケーシングを存置することで回収作業期間中までの処分孔の空洞安定性を確保する。この操 業技術オプションが実現した場合、L は人工バリアの外径にケーシング厚さを加味した距離まで 短縮されることになる。図 3.4-1 に、孔壁補強、処分孔近接の詳細設計オプションを適用したも のを模式的に示す。



図 3.4-1 詳細設計オプション(孔壁補強・処分孔近接)を適用したイメージ

(3) 熱的観点による廃棄体の定置密度の評価

(1)で述べたように、現行の処分区画の検討は力学的観点⇒熱的観点の順番で実施されている。 これに対して、(2)で述べた操業技術オプションの適用により力学的観点の制約を外すことで、*L*exea. に大きく寄与する *h*については熱的観点で成立性を評価することができるようになる。処分孔の 安定性確保に必要なケーシング厚さは処分孔を掘削する母岩や深度などに依存するが、人工バリ アの外径 2.22 m に対して仮に設定した 9 cm 厚さのケーシング加えた外径 2.4 m にて熱的成立 性を評価した(原環センター・原子力機構, 2020)。解析に使用したパラメータや条件は現行の概 念を踏襲し、貯蔵期間 50 年のガラス固化体を対象とした(NUMO, 2021、付属書 4-39)。

隣の処分坑道の熱的影響が無視できる条件(処分坑道中心間距離 100 m)の場合は、ケーシン グ同士が接触する最小の $h_3 = 2.4$ m において、オーバーパック周囲の緩衝材は 100 ℃を下回っ た。一方、処分坑道内の廃棄体の低密度が高くなったため、坑道単体の発熱量は増加している。 そのため、現行の力学的観点から設定された処分坑道中心間距離 12 m では熱的には成立しない が、中心間距離を 2 倍の 24 m にした場合はいずれの出力点においても 80 ℃程度となり、熱的 に成立する (図 3.4-2)。

以上より、処分坑道に対しては直径 2.4 m のケーシング付きの処分孔同士を近接させ、かつ十 分な処分坑道中心間距離とすることで、処分区画としての熱的な成立性が確保できるする見通し を得た。



図 3.4-2 廃棄体定置間隔 2.4 m、処分坑道中心間距離 24 m 熱解析結果 (原環センター・原子力機構, 2021)
(4) 処分区画の形状

力学的観点、熱的観点による成立性を踏まえ、新第三紀堆積岩類深度 500 m の処分孔竪置き方 式・パネル型に対して、坑道短尺化の詳細設計オプションを適用し、定置間隔を 6.66 m から 2.4 m に変更した場合の区画形状の例を表 3.4-1 に示す。実際の処分場の区画数、1 区画当たりの処 分坑道本数、処分坑道 1 本あたりの定置本数といった施設設計は、処分場を設置する地質条件、 建設・操業工程、建設・操業期間中の換気など様々な観点を踏まえて、適切に設定されると考え られる。本検討で提示した、廃棄体定置間隔 &の短縮した場合の熱的成立性、付随する処分坑道 中心間距離の延長の関係は、処分坑道の再開放期間の短縮だけではなく、処分場の施設設計に対 しても適用できると考えられる。

(5) 短尺化による再開放時間の短縮効果

処分坑道の再掘削延長 $l_{\text{axea.}}$ は、廃棄体定置間隔×定置本数($h \times n$)となるので、再開放による発生土量も近接度合に応じて減少する。h = 2.4 mにする詳細設計オプションの適用により、再開放に要する期間は現行の期間の約 36%に短縮される。ただし、h = 6.66 mの処分坑道建設で必要となる立坑の搬出能力を試算の前提としており、hの短縮を考慮して、建設・操業時の立坑の搬出能力が見直された場合はこの限りではない。

また、熱的観点から処分坑道中心間距離が延長されることになるが、作業上は処分坑道坑口から掘削ズリや廃棄体を搬送する距離に影響する。

項目*1	レファレンス(NUMO, 2021)	処分坑道本数を固定	区画形状をレファレンス相当に調整
区画形状		/7	
※区画数6の場合			
※全て同一縮尺			
	_	560m	
		2=1,2	Ę
	mx2=	30m×	
) + 30	1-1)+	Û Û Û
	(51-1	0×(5	
	12.0>	5	0×01
		$2 4 \times (131 (4 - 1) + 30 m \times 2 = 372 m$	5 ⁷
	6.66×(131∰-1)+30m×2≒930m	2.4^(13194-1)+30002=37200	2.4×(267体-1)+30m×2=372m
廃棄体定置間隔: <i>l</i> a	6.66 m	2.4 m^{st_2}	2.4 m^{st_2}
廃棄体定置数:n	131 体/坑道	131 体/坑道	267 体/坑道
処分坑道本数	51 本/区画	51 本/区画	25 本/区画
廃棄体定置可能本数	6,681 体/区画	6,681 体/区画	6,675 体/区画
処分坑道長*3	約 930 m	372 m	約 700 m
処分坑道中心間距離	12 m	24 m	24 m
再掘削長 ^{※4} : <i>l</i> exca	約 873 m	約 315 m	約 641 m
再掘削総延長	44,523 m	16,065 m	16,025 m
再開放短縮効果※5		36%	36%
※1·記号け323(1)参昭	•		•

表 3.4-1 処分坑道を短尺化した場合の処分孔竪置き方式の区画形状の例

※1: 記方は 3.2.3(1)参照

※2:人工バリアの外寸 2.22 m に、

※3: 処分坑道全長は $2(h + h+h) + h \times (n-1)$ で表されるが、ここでは簡易的に $h \times (n-1) + 30 \times 2$ で試算した。

※4:短尺化した場合のプラグ直近距離: hが未定のため、h×nとした。小数第一位を切り上げ。

※5: (詳細設計オプションを適用した区画当たりの再掘削総延長)/(レファレンスの区画当たりの再掘削総延長)×100

3.4.2 回収作業を行う装置や設備に対する詳細設計オプションの適用

処分場の施設設計に対して詳細設計オプションを適用することにより、再開放期間の短縮によ る回収の容易性向上(作業時間の短縮)の見通しを得た。一方、別区画での同時かつ独立作業の 実施の観点で構築した回収手順を円滑に進めるためには、この再開放期間内の再掘削が終了した 区画内の廃棄体の回収を終える必要がある。

そこで、詳細設計オプションを適用し短尺化した処分坑道を対象に、第2章で整備を進めてい る処分孔竪置き方式の回収技術の高度化の成果を踏まえ回収作業を具体化し、回収作業を行う装 置や設備に対する詳細設計オプションの適用(技術的アプローチ1)による、回収の容易性の向 上について検討した。

(1) 高度化した緩衝材除去システムによる回収作業

2020年度に実施した作業時間の試算は、式 3.2-21で表される作業重心における平均作業時間 から算出した T'gを、処分坑道1当たりの廃棄体定置本数nで割ったものを廃棄体1体あたりの 回収作業時間としている。この値が2.2に示した緩衝材除去システムの高度化開発における目安 の時間のベースとなっている(原環センター・原子力機構, 2021)。表 3.4-2に、回収工程を構成 する3つの作業である、上部埋め戻し材の除去、緩衝材の除去、オーバーパックの搬出、それぞ れの作業時間の内訳を示す。2.2の開発によって、表中の「②作業時間」の77h→20hを実現す れば、回収装置パーティー数1でも、処分坑道1本に定置された131体の廃棄体の回収が再開放 期間 T'gで実施できることになり、別区画での同時かつ独立作業による回収作業が成立する。

オーバーパック1体あたりの回収作業時間のうち、装置の入退場に要する平均時間は約2.5h と見積もられている。この時間は装置の移動速度と移動距離に依存し*k*=2.4mの場合、約0.9h となる。これを踏まえるとオーバーパック1体の回収作業の平均時間は約26.4hになるが、移動 距離の短縮の寄与度は5%程度に留まる。一方で、*k*=6.66mから2.4mへの変更が再開放期間 の短縮に及ぼす効果は64%にもなる。つまり坑道再開放期間が、回収作業に関与する装置による 作業時間を大幅に下回るため、両者の作業期間のバランスを確保するために必要な回収作業のパ ーティー数が増えることになる。

必要な回収作業のパーティー数について、0(1)と同様の検討を行った。詳細設計オプションを 適用すると再開放期間は 36%に短縮されるので、現行の区画の再開放に要する 28,166 h から 10,139 h に短縮される。全量回収における回収作業のユニット数 N を 6 とした場合、1 ユニット あたりの廃棄体定置数は表 3.4-1 のように約 6,680 体となり、廃棄体 1 体あたりの回収作業に割 り当てられる平均時間は、10,139÷6,800=1.491...≒1.4 h となる。この回収時間を実現するため には 26.4÷1.4=18.587...≒19、つまり迅速化を達成したオーバーパックの回収作業を 19 パーテ ィー同時に実施する必要がある。

再開放済みの区画内で同時に稼働させることが可能なパーティー数の上限は、処分場の地下空 間や作業動線などによって制約を受ける。技術的アプローチ2により坑道の再開放期間を短縮し た施設設計に対し、再び技術的アプローチ1による回収作業のパーティー数の合理化の余地につ いて、表 3.4-2 に示す①上部埋め戻し材除去、②緩衝材除去を対象に検討した。

作業内容	1	2	3
	上部埋め戻し材除去	緩衝材除去	オーバーパック搬出
	上部埋め戻し材 1 m	オーバーパック周囲	オーバーパックの処
	と緩衝材 20 cm の除	の緩衝材の除去	分坑道外への搬出
	去作業	(時間は高度化前後)	
①装置入場時間※2	0.467 h		
①作業時間	$4.5 h \times 3$		
①装置退場時間※2	0.467 h		
②装置入場時間※2		0.467 h	
②作業時間		$77 \text{ h} \rightarrow 20 \text{ h}$	
②装置退場時間※2		0.467 h	*4
③装置入場時間※2			
③作業時間			1 h ^{**} 3
③装置退場時間※2			0.467 h
各工程の時間	$5.5~\mathrm{h}$	$78 \text{ h} \rightarrow 21 \text{ h}$	$1.5~\mathrm{h}$
移動に要する時間	1 h	1 h	0.5 h
廃棄体1体回収時間	85 h -	→ 28 h (移動時間は 2	2.5 h)
※1:表 3.4-1と数値る	を統一したため、2020年	F度の算出結果と異なる。	点に留意。
※2:各装置の移動速度	度を1 km/h とした場合に	こ、 <i>p</i> aveの移動に要する	時間。
1			

表 3.4-2 処分孔竪置き方式の回収作業時間(平均)の内訳^{※1}

式 3.2-20 で算出し、小数第一位を切り上げ。

 $p_{\text{ave}} \doteq 467 \text{ m}$ $(l_1 + l_p \doteq 30 \text{ m}, l_{\text{exca}} = 6.66 \times 131 \doteq 873 \text{ m})$

※3:装置検討未実施のため、仮に設定した値。

※4:緩衝材除去システムの退場と同時に反対側の坑口から入場。

(2) 処分孔内の上部埋め戻し材の除去の合理化による回収作業の時間短縮

処分坑道堅置き方式では、処分孔内の人工バリア上に厚さ 1.7 m の遮蔽層を確保する目的で緩 衝材相当の仕様の厚さ 1 m の上部埋戻し材が施工されている。流体的除去技術による緩衝材除去 に先立ち実施する上部埋め戻し材と緩衝材 20 cm の除去作業時間は、表 3.4-2 に示すように移動 時間を除いて 4.5 h の設定である。この作業時間の短縮について検討した。

(a) 上部埋め戻し材除去装置の高度化

緩衝材除去システムの除去範囲よりも上方の厚さ 1.2 m の土質材料を除去する装置の技術開発 により、作業時間を短縮する。作業時間の内訳は、処分坑道起点から対象の処分孔までの装置の 移動時間、除去作業時間(掘削+積込み)、装置の退出時間である。

往復の移動時間の短縮は、上部埋め戻し材除去装置の移動速度の向上で実現する。再開放した 処分坑道内、放射線環境下で使用する装置となるため、遠隔操作を前提とした技術開発が必要で ある。除去作業時間の短縮は、作業を迅速に実施する除去装置の開発で実現する。処分孔内での 除去作業であるが、対象範囲がオーバーパックから 50 cm 離れているため、機械的な掘削技術も 候補となり得る。

上部埋め戻し材の除去作業と、緩衝材除去作業は直列作業となるため、処分孔単体に対しての

同時並行作業はできない。また、除去後にオーバーパックを搬出する装置の移動経路と重複する ため、処分孔ごとに入替え時間が必要になる。処分坑道内における装置の移動経路や作業手順の 組合せなど実際の作業を具体化し、上部埋め戻し材の除去装置(掘削+積込み作業)の要求性能 などを定量的化し、技術開発課題としてまとめていくことが重要である。

(b) 緩衝材除去システムによる上部埋め戻し材の除去

パネル型の処分区画は両端の坑口からアクセスが可能である。緩衝材除去システムを構成する 噴射吸引設備を、除去した処分孔付近に留めておけば、次の回収対象の処分孔までの移動距離は 僅かである。上部埋め戻し材の除去を緩衝材除去システムで実施できれば、(a) に示した上部埋 め戻し材除去装置の起点から作業位置までの往復に要する時間を削減できる可能性がある。

処分坑道の短尺化によって、上部埋め戻し材の除去装置の往復に要する平均時間は、0.467×2×0.36=0.336...≒0.34 h となるので、上部埋め戻し材の除去時間は 4.85 h と見積もることができる。この時間内にウォータージェット方式の噴射・吸引設備にて、1.2 m 分を除去することができれば、上部埋め戻し材除去装置を省略することができる。

実際の作業時間は、次年度に予定するフルスケールの緩衝材除去試験で確認する。

(c) 上部埋め戻し材の省略

処分孔内の上部埋め戻し材は、処分坑道の空間線量を低下させる遮蔽層の目的で施工されてい る。回収作業で上部埋め戻し材を除去すると遮蔽層が損なわれるため、その後の処分坑道内での 作業は、放射線環境を前提とした遠隔操作での実施が前提となる。また、処分坑道横置き・PEM 方式の場合は、処分坑道内の線量を低減する遮蔽機能を有した構成要素は存在しない。今後の建 設・操業計画の具体化検討の結果にも拠るが、地下施設での作業を遠隔操作で行う場合、放射線 防護の観点からの遮蔽代である上部埋め戻し材は省略できる可能性がある。

図 3.4-3 に上部埋め戻し材を省略した処分孔竪置き方式のイメージを示す。上部埋戻し材の省略により、①上部埋め戻し材の除去作業自体が不要となり、回収作業自体の短縮が期待できる。 また、この考え方は、処分場の構成要素の一つを省略する詳細設計オプションの適用に相当する。



現行の処分孔竪置き方式

上部埋め戻し材の省略

(3) 回収作業の装置構成の検討

処分孔の上部埋め戻し材除去の合理化のうち、構成要素の省略に相当する(c)を適用した定置 方式について、回収作業手順の再考を行う。上部埋め戻し材が無い処分孔のオーバーパックは、 埋設深さが現行の定置方式と比較して1m浅くなることから、回収作業時間の短縮を念頭に置い た手順、装置の要求性能などを具体化した。

図 3.4-3 詳細設計オプション(上部埋め戻し材の省略)を適用したイメージ

(a) 処分坑道で実施する作業の遠隔化

上部埋め戻し材の省略によって、処分坑道内の線量が上昇する。これに伴い、建設・操業時を 含め、処分区画への廃棄体の定置以降の全ての作業は、放射線環境を前提として実施する必要が ある。また、処分坑道の再開放作業も放射線環境下となるため、回収期間中の換気経路の検討に おいても留意が必要である。

(b) 緩衝材の除去領域の合理化

これまでの回収作業手順の検討では、緩衝材 70 cm のうち 20 cm の範囲は上部埋め戻し材の 除去の範囲に含め、緩衝材除去システムの適用はオーバーパック上に残された厚さ 50 cm の緩衝 材からとしていた。上部埋め戻し材の除去手法で厚さ 20 cm 分の緩衝材を除去する時間は、除去 作業 4.5×(0.2÷1.2)=0.75 h に装置の平均移動時間 0.34 h を加えた、約 1.1h と見積もられる。 作業時間としては 1 h 程度であるが、この範囲を含めた緩衝材の除去を全て緩衝材除去システム で実施すれば、回収作業における装置構成の合理化に繋がる。

表 3.4-2 に示したように、回収作業では緩衝材の除去が作業時間の大半を占めている。この時間短縮向けて技術開発を実施中であるが、根本的な時間短縮として緩衝材除去領域の合理化が挙 げられる。緩衝材除去工程を2分割し、第一段階をオーバーパック把持部が露出するまでの除去、 第二段階をオーバーパック側部の除去とする。過年度に整備した緩衝材除去システムによる除去 作業時間は77hであり、その内訳はオーバーパック上部50 cm からの第一段階が30h、第二段 階が47hである。オーバーパック上部の除去領域が70 cm となった場合、第一段階の所要時間 は30hから42hになる。全作業時間を100とした場合の比率は、第一段階:第二段階≒47:53 となる。緩衝材除去を第一段階に留め、第二段階の除去作業を省略できれば緩衝材除去の所要時 間を半分程度に短縮できる見込みがある。この場合、側部緩衝材は残された状態のため、オーバ ーパックは引き抜きにより回収することになる。

(c) 技術的アプローチ1による回収作業具体化

図 3.4-3 に示す詳細設計オプションを適用した置き方に対して技術的アプローチ1適用し、新たな回収作業を具体化した。オーバーパック側部緩衝材除去の省略、オーバーパックの引抜き回収を、実現する技術に対する要件を検討した。

(i) 緩衝材除去システム

現在開発中の緩衝材除去システムの噴射部の形状は、オーバーパックに沿って下降しながら側 部の緩衝材を除去するためにリング型となっている。このリング型噴射部は、リングが下降する 空間を作りながら側部の緩衝材を除去する下向きトルネードノズル、下向きトルネードノズルの からの噴射が届かない把持部の緩衝材を除去する斜め方向の直射ノズル、中心部にオーバーパッ ク転倒防止機構を備えている。第一段階の緩衝材の除去に限れば、噴射部がオーバーパックに沿 って下降しないためリング型である必要がなく、オーバーパック転倒防止機構も不要である。平 面方向の緩衝材除去範囲は、後続のオーバーパック回収装置の動作範囲に依存する。このような 第一段階の緩衝材除去に特化した噴射部の構造として、下向きトルネードノズルを複数配置した 円盤型が考えられる。ノズルの配置など噴射部の設計には、2.2 で取得した噴射要素試験の結果 が活用できる。

上部埋め戻し材の省略により、緩衝材上面と処分坑道の路盤面が同じ高さになる。この状態で 塩水を噴射すると、除去生成物のスラリーが処分坑道内に流れ出し、坑内作業環境が悪化する。 ある程度除去が進んでスラリーが処分孔内に停留するまでの間、坑内へのスラリーの流出を防止 する円筒型の補助器具の装備なども、回収作業期間中の坑内環境の管理の観点から有効と考えられる。

(ii) オーバーパック回収装置

オーバーパック上部の緩衝材を除去した後の回収作業手順は、オーバーパックの引抜き、遮蔽 容器への格納、処分坑道からの搬出である。処分坑道内での装置の入替による作業時間のロスを 省くため、これら一連の作業を1台で実施する回収装置について検討した。

オーバーパックを引き抜くためには、回収装置が引抜きに必要な揚重力を有し、オーバーパック把持機構が揚重力に耐える強度を有することが必要である。表面線量が高いオーバーパックが 処分坑道内で剥き出しになることを避けるため、遮蔽機能を有する装置内の空間へ引抜きと同時 にオーバーパックを格納できることが望ましい。さらに、オーバーパックを直接扱うことから、 一連の作業はスタッキングや落下等への予防・対応策が考慮された遠隔操作で実施することが求 められる。図 3.4-4 に油圧ジャッキと巻上げウインチを備えたオーバーパック回収装置の概念と 動作手順の一例を示す。引抜き初動時の最大荷重に対しては油圧ジャッキ、その後の引抜きはウ インチで対応するものである。全ての機能を有した自走式の装置、あるいは処分坑道内に据え付 けた引上げ装置と遮蔽機能を有する搬出装置(移動式)の組合せなど、が考えられる。



作業手順

1. 把持装置の付いたケーブルを下降させ、オーバ ーパックを把持する。

2. 油圧ジャッキの伸長により、緩衝材の周面摩擦 等を開放する。

3. オーバーパックを回収装置内の遮蔽空間内まで 引き上げ、可動式床板を閉める。

4. オーバーパックの荷重を床板上に預ける。

5. 遮蔽容器ごとオーバーパックを処分坑道から搬 出する。

図 3.4-4 油圧ジャッキ&巻上げウインチ方式のオーバーパック回収装置の概念と作業手順

油圧ジャッキの能力は、オーバーパックの引抜時の緩衝材との相互作用などを考慮して設定する。 上部緩衝材の除去に要する時間を考慮し、回収作業の律速とならないように一連の作業速度を設 定することが重要である。

(iii) オーバーパック把持部の強化

現行のオーバーパックの把持部は、地上施設での封入作業や、搬送・定置作業時のハンドリン グを考慮して設計がなされている(原環センター,2001)。ガラス固化体を封入したオーバーパ ック重量である 6.2 t に対する形状や製作方法となっており、引抜き回収を考慮したものではな い。現行のオーバーパック把持部の耐力の照査、作用する引抜力を考慮した把持部の強化が必要 である。

3.4.3 オーバーパックの引抜力の推定と把持部の検討

前項に示した引抜きによるオーバーパック回収の技術的実現性の提示に向け、緩衝材の拘束力などを加味した引抜き力を推定する。

処分孔で湧出する地下水や建設・操業で持ち込まれた酸素によって、オーバーパックは緩衝材 共存下での腐食、緩衝材は地下水による膨潤が生じる。これらの状態変遷は処分孔への定置直後 から始まり、定置直後は明瞭であったオーバーパックと緩衝材の境界は腐食生成物によって次第 に固着し、緩衝材の膨潤によってオーバーパックを拘束する圧力が上昇する。このような現象は オーバーパック引抜力の上昇に影響を及ぼす。腐食挙動や膨潤挙動の進行の程度は湧水量や定置 からの経過時間が関与する一方で、それらは処分施設内の定置位置や回収作業を実施するタイミ ングに依存するため、一意に決めることが困難である。ただし、回収装置やオーバーパック把持 部の設計は、状態変遷によって幅を持つ引抜力に対しては最大値を対象とすればよい。

そこで、オーバーパックと緩衝材の界面の性状に着目し、オーバーパックの引抜き力を推定す るとともに、オーバーパックの把持部の形状の観点から、技術的アプローチ1による詳細設計オ プションの成立性を評価した。

(1) 引抜力の推定方法

オーバーパックと緩衝材の間の隙間が存在するれば(例えば、定置直後)、引抜き力はオーバー パックの重量である 6.2t になる。緩衝材が膨潤して両者が密着すると、引抜時によって底面に生 じる空間には負圧が加わる。直径 820 mm のオーバーパック底部に生じる負圧による引抜力への 寄与は、101,325×(0.82÷2)^2÷g×10⁻³=5,456...≒ 5.5 t (@1 atm =101,325 Pa) が最大であ る。これらの和である 11.7 t に、緩衝材からオーバーパック側面($0.82 \times 1.75 \times \pi = 4.51 \text{ m}^2$) に 作用する力を加えたものが引抜力となる。

過年度に実施された炭素鋼の腐食試験では、炭素鋼表面に緩衝材が固着する事例が確認されて いる(図 3.4-5)。このような固着の有無によって、緩衝材から作用する力に違いが生じることが 考えられる。そこで、オーバーパック表面への緩衝材の固着の有無で場合分けし、それぞれに引 抜力を推定した。



地下化環境での腐食試験後の様子 (原環センター, 2018)



室内腐食試験後の表面性状 (原環センター, 20xx)

図 3.4-5 緩衝材共存下での炭素鋼腐食試験後に表面に付着した緩衝材

(2) 引抜時の破壊モードと引抜力の関係

図 3.4-6 はオーバーパックの引抜き時に想定される破壊モードを模式的に示したものである。 パターンAとならないようなオーバーパック把持部の設計に資するため、引抜力を推定する。 オーバーパックと緩衝材が固着していない場合、パターンBのように界面剥離が生じると考え

られる。固着している場合は、金属に比べて強度が低い緩衝材で破壊が生じるパターン C、 パターン D の発生が考えられる。



図 3.4-6 オーバーパック引抜き時に想定される破壊モード

(a) 緩衝材から受ける側圧による表面摩擦力に基づく試算

パターン B のような界面剥離が生じる場合は、緩衝材界面でオーバーパックが滑るような挙動 となる。この際の摩擦的な力については、簡易的な引抜き試験による緩衝材の拘束力との関係が 調べられている(原環センター, 2015)。この試験における側圧の最大値 0.6 MPa で 218 kPa の 表面摩擦応力を得ている。この値を用いれば、オーバーパック側面に作用する側圧による表面摩 擦力、218×10³×(0.82÷2)²× π ×1.75÷g×10⁻³ = 20.544...≒21t となる。また、緩衝材の有効 粘土密度と平衡膨潤圧の関係より、 ρ_e =1.37 Mg/m³では淡水条件において 0.632 MPa と見積も られ、作用する表面摩擦力は 21 t より若干高くなるので、ここでは 23 t とした

以上より、オーバーパックの自重と底部の負圧に因る 11.7t に表面摩擦力を加えた約 35t を界 面剥離時の引抜力とした。

(b) 杭の引抜き抵抗の考え方に基づく試算

パターン C に類似する事例として、基礎杭の引抜きがある。道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編(以下「道示」という)(日本道路協会,2017)では、地盤から決まる杭の極限引抜き抵抗力の特性値の推定方法として、引抜載荷試験から求めない場合の推定式として式 3.4-1 が示されている。

*P*_u:地盤から決まる杭の極限引抜き抵抗力、*U*:杭の周長、*L*_i:周面摩擦力を考慮するi層の層 厚、*f*_i:周面摩擦力考慮するi層の最大周面摩擦力度の特性値

cu:粘着力(せん断抵抗角φu=0、有効拘束圧σ'におけるせん断強度)(日本道路協会,2020) ※非排水条件の三軸圧縮試験で取得 緩衝材の特性については、飽和度 100%データが無いため、小山らが実施した三軸圧縮試験で 首都された、飽和度 87%と 88%の結果から、 $c_{cu} = 0.19$ MPa、 $\phi_{cu} = 7.6$ deg.を使用した(古山 ら, 2014)。式 3.4·2 より、 $f_i = 0.274$ MPa を得る。よって、緩衝材の強度特性から決まるオーバ ーパックの引抜抵抗力は、式 3.4·1 より $P_u = 127$ t となる。

以上より、オーバーパックの自重と底部の負圧に因る 11.7 t に引抜抵抗力 127 t を加えた約 140 t を、杭の引抜き抵抗の考え方に基づく引抜力の試算値とした。

(c) 緩衝材のせん断応力に基づく試算

パターン C の破壊モードにおいて、オーバーパック側部に接触する緩衝材が全面でせん断破壊 した場合、最も引抜力が高くなると想定される。緩衝材のせん断応力は式 3.4-3 で表される。

$$\tau_s = c + \sigma \tan \varphi$$

式 3.4-3

 $c: 粘着力、 \phi: 摩擦角$

飽和度別に取得された緩衝材のせん断強度特性 (JNC, 1999) のうち、飽和度 100%の一体型供試体のピーク強度である c=0.81 MPa、 $\phi=35.9$ deg.を用いて、式 3.4-3 より、 τ s=1.03 MPa となる。オーバーパック側部に緩衝材が固着し、その外側でせん断破壊させるために必要な力は、オーバーパック側面積を考慮して、 $1.03 \times 10^6 \times 0.82 \times \pi \times 1.75 \div g \div 10^3 = 473.498... = 474$ t である。

以上より、オーバーパックの自重と底部の負圧に因る 11.7 t に緩衝材のせん断力を加えた約 490 t を、緩衝材のせん断御応力に基づく引抜力の試算値とした。

(3) 把持部の強度評価と把持部形状の変更

図 3.4-7 に現行の炭素鋼オーバーパック把持部の外観と寸法を示す(原環センター,2009)。この把持部はオーバーパックの自重 6.2 t のハンドリングの観点から設計されており、フランジ型の把持部がオーバーパック蓋部に隅肉溶接で接合されている。



図 3.4-7 炭素鋼オーバーパック把持部の外観と寸法(板厚 190mm、落し蓋方式)

これに対し、(2)で推定したオーバーパック引抜力 Fton に耐え得る把持部の形状を、オーバーパックの耐圧代の設定の考え方 (NUMO, 2021、付属書 4-10) に基づき検討した。対象はオーバーパック把持部の首径 d とフランジ厚さ t とし、それぞれ式 3.4-4、式 3.4-5 による簡易的な強度 評価に基づいて実施した。表 3.4-3 に各引抜力に対する首径 d とフランジ厚さ t を示す。炭素鋼 オーバーパックの候補材料は確定しないため、これまでに製作技術の検討が行われてきた炭素鋼 鍛工品 (SF 材: JIS G 3201) や、溶接による封入への適用から溶接構造用圧延鋼材 (SM 材: JIS G 3106) の強度を使用した。

$$d \ge 2 \times \sqrt{\frac{F \times 10^3 \times 9.8}{S_{mc} \times 10^6}} \times 10^3$$

$$t \ge \frac{F \times 10^3 \times 9.8}{D \times \pi \times \tau_{mc} \times 10^6} \times 10^3$$
 式 3.4-5

				溶接による製造を想定した鋼種の例					
				SF340A	SF390A	SF440A	SF490A	SM400B	SM490B
		\mathbf{S}^{*1}	MPa	95	111	126	138	100	121
材料強度	$\mathrm{S_y}^{*2}$	MPa	162	180	208	227	194	268	
材料強度 -		$\mathrm{S}_{\mathrm{mc}}^{*3}$	MPa	104.5	122.1	138.6	151.8	110.0	133.1
		${ m T}~{ m mc}^{*4}$	MPa	62.70	73.26	83.16	91.08	66.00	79.86
35t 引 抜	把持部太さ d	mm	65	60	57	54	64	58	
	フランジ厚 t	mm	27	25	24	23	26	24	
	把持部太さ d	mm	130	120	113	108	127	115	
力	140t	フランジ厚 t	mm	54	50	47	45	53	48
F	1001	把持部太さ d	mm	242	224	211	201	236	215
	490t	フランジ厚 t	mm	101	94	88	84	99	90
*1:	JSM	IE S NJ1-2015	Part 3 🔅	第1章 表	3				
*2:	JSM	IE S NJ1-2015	Part 3 🔅	第1章 表	6				
*3:	JSM	IE S NJ1-2015	PVE-34	10 平板の	厚さの規定	 	$S, 0.9 S_{y}$		
*4:	JSM	IE S NJ1-2015	PVB-31	15 純せん	断荷重評価	0.6*S _{mc}			
*	SF340	A (JIS G 3201	炭素鉀	岡鍛工品)に	は、過年度の	り OP 製作詞	試験での使用	用材	
×	SFVC	1 (JIS G 3202	圧力容	ぶ 器用鍛工品	1) は同表に	こ無記載のた	・め、割愛		

表 3.4-3 推定した引抜き力に対する把持部形状

引抜力は、引抜き時の破壊モードや推定方法によって幅を持つが、いずれの条件においても現 行のオーバーパックの把持部形状では、フランジの変形や首部、接合部が破損する破壊パターン Aが生じることが明らかになった。よって、引抜きによるオーバーパック回収を実現するために は、引抜力に対応できるように把持部を再設計する必要がある。特に、パターンCでは引抜力の 推定方法よって 3.5 倍近くの差が生じることから、小型の模型試験から実寸大の試験まで、実際 に作用する正確な引抜抵抗力を取得することが重要である。

これに加え、把持部の形状変更は、オーバーパックの封入を行う地上施設から地下への搬送定 置までの一連の操業工程に関連する装置や技術に影響が波及する。回収可能性以外の地層処分の 設計因子の観点による評価も、回収の容易性を高める詳細設計オプションの実現性評価では重要 である。

式 3.4-4

3.4.4 処分孔竪置き方式に対する詳細設計オプションのまとめ

現行の処分孔竪置き方式を起点とした、詳細設計オプションの適用の検討結果について下記の様に整理した。

(1) 施設設計に対する詳細設計オプションの適用(技術的アプローチ2)

処分坑道の再開放作業のボトルネックとなる立坑のズリ搬出能力への対策として、廃棄体定置 間隔 Aの短縮により処分坑道を短尺化する。また、処分坑道の再開放期間の短縮に対して、さら なる回収作業の迅速化を図るため処分孔内の上部埋め戻し材を省略する。

熱的観点では人工バリアの近接定置が許容されることから、ケーシングなどの孔壁補強を伴う 処分孔の掘削技術を適用する。

(2) 回収作業手順、技術に対する迅速化の要求(技術的アプローチ1)

処分坑道の再開放期間の短縮に対して、さらなる回収作業の迅速化を図るため緩衝材の除去範 囲をオーバーパック把持部までの除去に限定する。これにより、流体的除去技術による緩衝材除 去の作業時間を半分に短縮できる見込みがある。オーバーパックは側部緩衝材から受ける作用を 考慮した引抜き装置により定置場所から引き揚げる方法を適用する。

ただし、緩衝材を除去する範囲の合理化については、2.2 で整備中の塩水ウォータージェット 方式の除去技術の開発実績を踏まえて判断することが重要である。除去技術の高度化開発の成果 によっては、当初計画よりも更なる迅速化の実現の可能性がある。実際の能力を踏まえた回収作 業手順や時間の再検討を実施し、緩衝材除去範囲やオーバーパックの引抜き技術の要否について 見直しを進める。

これらの検討、技術開発により、処分坑道の再開放との作業期間のバランスをとるための、回 収作業のパーティー数が設定できるようになる。

(3) 廃棄体に対する詳細設計オプションの適用

引抜きによるオーバーパックの回収作業では、拘束力がある状態からのオーバーパックの引抜 きに耐える把持部の形状検討が必要となる可能性がある。把持部の形状変更は、オーバーパック の封入を行う地上施設から地下への搬送定置までの一連の操業工程に関連する装置や技術に影響 が波及することに留意が必要である。

(4) 実現に向けた技術開発課題

(1)~(3)の技術開発課題は以下のとおりである。

・処分孔の力学的安定性を確保できる近接処分孔の掘削技術

- ・オーバーパック上部緩衝材の除去に特化した緩衝材除去技術(2.2の成果を応用)
- ・オーバーパックの引抜き、処分坑道外へ搬出技術
- ・オーバーパック把持部の形状変更による建設・操業工程への波及の評価

3.5 処分坑道横置き・PEM 方式を起点とした詳細設計オプションの適用例

現行の処分坑道横置き・PEM 方式の施設設計に対する回収作業では、技術的アプローチ1に よってもある程度の期間を要することを0で述べた。さらなる回収作業時間の短縮の要求への 対応として、現行の処分孔竪置き方式を出発点とした技術的アプローチ2による検討を実施し た。本検討は、以下に挙げる前提条件の範囲で実施した

- ・現行の処分坑道横置き・PEM 方式をベースとした検討
- ・現行の作業動線、換気経路の考え方を踏襲
- ・閉鎖後長期の安全性への影響に留意し、人工バリア構成は現行概念を踏襲

現行の処分坑道横置き・PEM 方式の設計に対して回収の容易性を高める詳細設計オプション を適用すると、処分場のレイアウトの変更が生じる。更新された処分場の施設設計に対し、現行 の定置方式に対して開発された回収技術の適用について、技術的アプローチ1による容易性向 上の余地についても再検討する。

3.5.1 施設設計に対する詳細設計オプションの適用

処分坑道横置き・PEM 方式に対する、回収作業をは立坑の搬出能力を律速としたなる処分坑 道の再開放期間である。現行の定置方式に対する技術的アプローチ2の適用について、再開放期 間の短縮の観点による検討を行った。

(1) 廃棄体の定置方向の変更

現行の処分坑道横置き・PEM 方式における PEM は、直径 2,316 mm、長さ 3,356 mm の円柱 形状である。この外寸は、処分坑道横置き方式における定置間隔 3.33m を出発点とし(JNC, 1999)、 PEM 方式の検討や PEM の製作試験の成果を踏まえて設定されている。施設設計に対する詳細 設計オプションの検討では、この PEM 形状を前提とする。

処分坑道に PEM を定置する場合、人工バリアとしての定置方向である竪置き/横置き、円柱 形状の PEM の並べ方として直列/並列があり、その組合せとして図 3.5-1 に示す 3 通りが考え られる。現行の処分坑道横置き・PEM 方式は(a)の横置き直列型に相当し、hは PEM の長さであ る 3,356 mm になる。再開放における掘削長 l_{exca} は式 3.2-4 ように hと定置数 n の積となるた め、 l_{exca} を短縮するためには、(b)や(c)のように円柱型の PEM を並列型で並べることになる。PEM 同士を接触して定置した場合、直列型から並列型とすることで l_{exca} を 2/3 に短縮される。

(2) 熱的観点による廃棄体の定置密度の評価

(a)横置き直列型の PEM の定置間隔は、処分孔横置き方式の定置間隔 3.33 m に基づくもので あるため、熱的観点での成立性は確認されている。一方、(b)や(c)の並列型にした場合 A は最小で PEM 外径の 2,316mm まで接近する。並列型の熱解析は実施であるため、類似する近接処分孔の 解析事例(図 3.4-2)を参考に推定した。

3.4.1(3)に示した 2020 年度の熱伝導解析では、解析モデルに鋼製ケーシングによる処分孔の補 強を考慮しており、これは PEM 鋼殻に相当する構成要素として考えることができる。熱伝導解 析におけるの熱物性値を図 3.5-1 に示す。



[※]本図中では、便宜上 PEM 全長を 3.4m、PEM 外径を 2.4m としている。

図 3.5-1	処分坑道定置方式の定置方法のバリエーション
---------	-----------------------

	F1			
部位	熱伝導率	比熱	密度	儿曲
目的位于	$(W m^{-1} K^{-1})$	(kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	(kg m ⁻³)	ЦЩ
ガラス固化体	1.2	0.96	2800	JNC, 1999
炭素鋼 ^{※1}	51.6	0.47	7860	JNC, 1999
緩衝材	0.78	0.59	1712	JNC, 1999
埋め戻し材	0.78	0.59	1712	JNC, 1999
鉄筋コンクリート ^{※2}	2.56	1.05	2500	電事連・JNC, 2005
岩盤	2.3	1.4	2280	NUMO, 2021
(新弗二杧堆慎石類)				
充填材	0.30	0.14	1200	竹ケ原ほか 2000
(OPと緩衝材の間)	0.00	0.14	1200	11 / //(000
空気	0.03	1.01	0.9799	JNC, 1999
※1 オーバーパック、構成	。 友ケーシングに 道	 通用		
※2 第 2 次 TRU レポート	、の「支保工」を	参照した。処分り	亢道の支保工	に適用

表	3.5-1	熱伝導解析で使用し	、た物性値
~	•••		

処分孔定置方式の鋼製ケーシングの外側には母岩、処分坑道 PEM 方式の鋼殻の外側には埋め戻し材が存在する。埋め戻し材の熱伝導率は埋め戻し材の 1/3 程度であるため、PEM を並列型で処分坑道に定置・埋め戻した場合は、緩衝材の制限温度を超える可能性がある。

(3) 建設・操業・回収技術の観点からみた PEM の定置方向

処分坑道内の PEM の定置方向の工夫によって、 A を現行の 3.356 m から熱的に成立する距離 まで短縮すれば、立坑の搬出能力による制約の点においては処分坑道の再開放期間の短縮が見込 まれ、その効果は最大で 31%である。処分坑道横置き・PEM 方式に対しては、作業量の削減と、 作業性効率の低下の双方の効果を踏まえ、坑道短尺の詳細設計オプションの適用の是非を検討す る必要がある。

処分坑道定置方式における坑道再開放は、廃棄体周囲の土質材料の除去を兼ねるため、ある空 間を占める廃棄体が存在する環境下での作業となる。定置方向の違いによって、図 3.5-1 のよう に PEM 周囲の隙間充填材の施工領域の形状が大きく異なる。直列型は処分坑道内の断面形状が 画一であり、除去作業の単純化やある断面形状に対する除去装置の開発が実施し易いと考えられ る。一方、並列型では坑道長手方向に対して、断面形状が周期的に変化するため、例えば PEM を 回り込むような動作が必要になる。さらに、処分坑道断面に対する PEM の投影面積が大きくな るため、装置や動作に対する空間的な制約が直列型よりも大きくなる。このように、掘削ズリの 発生量削減を目的とした PEM の定置方向の変更の効果と、定置方向による除去作業性効率はト レードオフの関係にあると考えられる。再開放作業自体の効率が低くなる場合、再開放作業を実 施するパーティー数を増やす必要が生じるため、地下環境での運用が新たな制約条件となる可能 性がある。

(4) 隙間充填材の省略による回収作業時間の迅速化

処分坑道内での作業性に及ぼす PEM の定置方向の影響としては、画一的な坑道断面となる横 置き直列型が有利であると考えられるが、この場合 *lexca*.の短縮による掘削ズリ(除去生成物)の 削減という詳細設計オプションは成立しない。*lexca*.一定の条件下で発生土総量 *Vexca*._total を削減す るには、処分坑道断面積 *A* を縮小する必要がある。ただし *A* は PEM の搬送定置装置の動作空間 の確保の観点から設定されており、縮小するにはコンパクトな搬送定置装置と隙間充填技術の開 発が必要である。

現在実施中の処分坑道横置き・PEM 方式の回収技術の高度化開発 (2.3 節参照) において、PEM 1 体分の充填材の除去 → PEM 1 体の回収」という手順を繰り返す場合、除去装置と回収装置の 入れ替え作業に伴う時間的なロスが課題として挙げられている。これに対して、処分坑道に定置 される複数の PEM の周りの隙間充填材の除去作業を先行して連続で実施し、その後に PEM 回 収する作業手順を検討している。処分坑道に PEM が定置された状態でも坑道内での隙間充填材 の除去を実施できる、PEM を跨ぐ構造の隙間充填材の除去装置(図 3.5-2)の実現に向けた技術 開発を実施している。



図 3.5-2 PEM を跨ぐ構造の機械的除去装置のイメージ図(左)

以上のように、処分坑道横置き・PEM 方式においては、処分坑道の短尺化や処分坑道断面の縮小による掘削ズリ(隙間充填材)の発生量の低減が必ずしも回収作業時間の迅速化に繋がらないことが示唆された。

これに対し、処分坑道内の隙間充填材を省略し、処分坑道の再開放作業自体を不要とする詳細 設計オプションの適用を検討した。図 3.5-3 に詳細設計オプションの適用イメージを示す。



図 3.5-3 詳細設計オプション(隙間充填材の省略)を適用したイメージ

円形小断面への定置・回収技術については、PEM 周囲の隙間が十数 cm となる場合の定置から 回収までの一連の技術について実証が行われている(図 3.5-4)。ただし、十数 cm 程度の隙間の 場合、隙間の残存が閉鎖後長期の安全性の観点で許容できないため、隙間充填材の施工が、回収 の除去作業は必須である。



搬送定置・回収技術 エアベアリング方式





隙間充填材除去技術 ウオータージェット方式

図 3.5-4 円形断面の坑道に対する PEM の操業技術の整備例

隙間充填技術

スクリューフィーダ方式

閉鎖後長期の安全性への影響の観点から、PEM 周囲に許容できる隙間の幅を計算した(原環 センター,2020)。PEM 内部の緩衝材が隙間を埋めることを想定し、基本的な設計要件に対する 緩衝材の仕様範囲を満たすことができるか検証した(NUMO,2021)。基準値は、最も高い有効粘 土密度を要求する「Ca型化した緩衝材が塩水環境中で自己修復性を発現する下限値」とした。図 3.5-5 に、隙間幅と有効粘土密度の関係を示す。PEM 内部の緩衝材を乾燥密度 1.7 Mg/m³で製作 した場合、隙間の幅が 91 mm 未満であれば、緩衝材のかさ密度の観点では成立することが示さ れた。PEM 内部からの緩衝材の膨出による隙間の閉塞挙動、巨視的な密度分布、安全評価上の坑 道長手方向の透水性など、確認すべき項目や課題は存在するが、PEM 周囲に隙間を存置する定 置方式が成立する見通しを得た。

以上より、現行の処分坑道横置き・PEM 方式に対する施設設計への詳細設計オプション適用 例として、隙間充填材の省略を選択した。



図 3.5-5 閉鎖後長期の安全性の観点から見た隙間幅の許容値(PEM 方式)

3.5.2 装置や設備に対する詳細設計オプション

処分場の施設設計に対して詳細設計オプションを適用することにより、再開放作業の省略によ る回収の容易性向上(作業時間の短縮)の見通しを得た。再開放作業自体が無くなったため、再 開放と回収を別区画での同時かつ独立作業の実施の観点で回収計画を策定する必要はなく、処分 坑道から PEM を搬出するに要する時間が、そのまま回収作業時間になる。幅 91 mm の隙間幅 では、これまでに整備してきた横置き・PEM 方式の技術の適用範囲外である。重量物である PEM の搬送定置、回収に関わる技術、このような円形処分坑道の掘削技術について技術動向を調査し た。

(1) 円形小断面坑道の掘削技術

最終的な小断面円形坑道の仕上がり内径は、PEM の外径 2,316mm に隙間の許容幅 91mm を 踏まえ直径 2.4m 程度を目安とした。掘削まま、ケーシングや支保の設置の有無によって、掘削 する坑道径は設定する必要がある。我が国では3種類の岩盤を母岩候補として取り上げているが (NUMO, 2021)、本検討では、工学的な観点から「軟岩」と「硬岩」という分類で適用する掘削 工法と支保材の設置方法について整理する。

水平円形坑道の掘削技術について調査した結果を表 3.5-2 に示す。軟岩の場合、ドリルカッタ ー工法、大口径推進工法とも適用が可能で、推進管として鋼製ケーシング、ヒューム管の使用が 可能である。無水で掘削できるかは、岩盤の強度に依存する。岩盤との間隙が発生するため、充 填が必要な場合、ヒューム管の方が対応は容易である。どちらの場合も浸透してくる地下水の排 水ドレーンが必要となる。硬岩の場合、プッシュ・リーミング工法が最も適用性が高い。基本的 に支保工は必要ないが、掘削後の鋼製ケーシングの挿入は可能である。地下水の浸透、掘削水の 排水のため、処分孔は坑口方向に傾斜をつける必要がある。

なお、パイロットボーリング孔が必要となる「4)プッシュ・リーミング工法」や「5)レイズボー リング工法」は、デッドエンド型の処分区画の掘削には適用できない。

表:	3.5-2	円形小断面の坑道の掘削技術

掘削工法	特徴	支保材	実績	軟岩への適用性	硬岩への適用性
NATM					
1)ドリルカッター工法	鋼製ケーシングを坑口で油圧 ジャッキで推進しつつドリルカッ ターで掘削しオーガーで掘削ず りを排出する。無水掘削可能	・鋼製ケーシング ・ヒューム管	•ANDRA (φ700mm)	・実績があり適用できる ・径が大きくなった場合押し管 の選択が必要	・口径が大きくなった場合、ド リルカッターでは無水での掘 削が難しい
2 大口径推進工法	坑口にセットした油圧ジャッキで 管を押しながら刃先で岩盤を 掘削。無水掘削可能	・鋼製ケーシング ・ヒューム管	地盤:多数あり 岩盤:実用機械が存在	・ヒューム管を用いた実績が十 分ある。 ・掘削面に泥水が必要	・刃先を硬岩用とし泥水推進 掘削で対応できる。 ・推進力の吟味が必要
3)マイクロTBM	オープン/シールドタイプのマイク ロTBMは、掘進動力を内蔵し 掘削できる。径が大きくなると 機械長も長くなる。	・鋼製ケーシング ・コンクリートセグメント ・ヒューム管 ・無支保	・ANDRA ・SKB(比較対象として検 討)	 ・小型TBMは適用可能(マ イクロTBMではなく)但しマ シンの短縮化が必須 ・挿入菅の選択が必要 	・オープンタイプの適用が可能 ・マシーンの組立・発進空間 の確保が必要 ・支保なしでも掘削可能
4)プッシュ・リーミング工法	パイロットボーリング孔に反力を 得て、刃先を回転しながら掘 削面を前進させる。極めて精 度が高く仕上がる。	・鋼製ケーシング ・ヒューム管 ・無支保	•SKB (φ1,850mm)	・軟岩への適用も可 ・支保材が必要 ・掘削水、泥水が必要	・SKBの実績もあり適用可能 ・掘削ずりの排出に工夫が必 要 ・掘削水・泥水が必要
5)レイズボーリング工法 (プル・リーミング工法)	パイロットボーリング孔に内蔵し たケーブル等を牽引することで 回転する刃先が岩盤を掘削す る。	・鋼製ケーシング ・ヒューム管 ・無支保	・WIPP換気立坑 ・HRL立坑	 ・軟岩系にも適用可能 ・支保材が必要 ・掘削水、泥水が必要 ・両側に作業坑道が必要 	・プル・リーミングでの掘削可 能、支保必要なし ・掘削ずりの排出に工夫が必 要 ・掘削水、泥水が必要 ・両側に作業坑道が必要
6)推進工法	推進管の先端に掘進機を取り 付け、後方のジャッキで推し進 める。推進管を付け足して処 置の管路を構築する。	・鋼製ケーシング ・ヒューム管	・下水道管、など	・地下深部での適用事例は ない。	・地下深部での適用事例は ない。

掘削した小断面円形坑道は、空洞安定性や操業時の作業性などの観点から切削ままの裸孔、鋼製 ケーシングやコンクリート製ヒューム管の設置などが考えられる。掘削坑道を鞘として管材を設 置する場合、使用材料による坑道壁面の性状だけではなく、繋ぎ目の存在、止水機能の有無も、 操業時の環境条件となる。また、表 3.5-2 に示す各掘削技術により実現可能な坑道延長は、処分 坑道長を決定する因子の一つとなる。

(2) 坑道内での PEM の定置・回収技術

緩衝材の密度の観点から周囲に許容できる隙間の幅は 91mm 未満であるが、整備したエアベア リング方式の定置装置の適用可能な隙間よりも狭い。よって、PEM を地切りした状態で坑道内 を搬送することは困難である。そこで、摺動(引き摺り)による搬送・定置・回収について技術 的な実現性について、類似するフランス ANDRA の定置方式を参考に検討した。

処分坑道内での地切りが困難であるため、摺動による移送を検討する。回収可能性の維持期間 中に PEM と処分坑道が固着し、摺動が困難とならないような細工が必要である。これについて は、セラミックス製の摺動スライダーを PEM に装着する方法が考えられる。技術的実現性は 3.5.3 で検討する。

これまでに検討された搬送定置技術で PEM を移送する場合、エアベアリング方式では下方支 持、門型クレーン方式では上方吊上げとなり、いずれも PEM 側面に荷重が作用する。一方、水 平方向に PEM を摺動で移送させる際は、図 3.5-6 に示すような把持部や荷重の作用を PEM の 設計に反映する必要がある。

a-1: プッシングロボット搬送・定置時を行う場合、推進力に対して把持部と PEM 前面の鋼板が 破壊しない(曲げせん断、押し抜きせん断)強度を有する必要がある。把持部がフランジ構造と なっている場合には、フランジの曲げ破壊、首部との溶接部の破断を防ぐ設計が求められる。 a-2: 回収時には、把持部を持って坑口まで牽引する動作となる。PEM 前面や把持部が牽引力に 対して強度を確保する設計が必要となる。



図 3.5-6 PEM を水平移動させる際の、把持部・鋼殻に作用する荷重と変形モード

定置装置や回収装置については、推進力・牽引力を有すること、把持部がそれらの荷重に対して 十分な強度を有していることが求められる。また、推進/牽引による PEM の可搬距離は、処分 坑道長を決定する因子の一つとなる。

3.5.3 廃棄体の摺動による定置・回収の実現性

円形小断面の坑道内における PEM の摺動による移送について、PEM 重量、摺動スライダーの形状と取付位置を考慮し、摺動スライダー部材自体の強度評価をから、摺動方式の技術的な実現性を検討した。

(1) 解析条件

(a) 摺動スライダーに作用する荷重

回収時の摺動スライダーへの荷重としては、自重による反力、摺動時の摩擦力が想定される。 PEM1体に対して、4個の摺動スライダーを取り付けた場合について作業荷重を設定した。

物体は 3 点が接地した状態で安定するため、PEM を剛体と仮定しても製作上の誤差などによ り、静止時は 3 点支持になると考えられる。また、摺動時は 3 点支持から 2 点支持を経て新たな 3 点支持に落ちづく動作を繰り返すと考えられる。よって、摺動スライダーへの反力を求める際 には、前後の 2 点支持になった時を想定することにした。

PEM の中心を荷重 P で引張った時の反力の状況を図 3.5-7 に示す。ここで、W は PEM の自 重、P は牽引力、HA と HB は A 点と B 点の水平反力、RA と RB は A 点と B 点の鉛直反力、 RBr は RB の半径方向の分力、RB θ は RB の円周方向の分力である。なお、揺動スライダーの取 り付け位置の円周方向の角度 θ については θ =30° と設定した。また、摺動スライダーの前後の 取付位置については、両者が接近しすぎると、牽引時に A 点側が浮いてしまうこと、また、両者 を離した方が鉛直反力の差が小さくなるので、なるべく両者は離した方が良いと考えられる。



図 3.5-7 PEM 回収時における摺動スライダーへの反力

図 3.5-7 のような状況の場合、B 点側の鉛直反力 R_B の方がA 点側の鉛直反力 R_B よりも大きくなるので、摺動スライダーに作用する荷重は、B 点側だけで算定することにする。 摩擦係数をfとすると、鉛直方向の力のつり合い、水平方向の力のつり合い、および B 点廻りの モーメントのつり合いから、鉛直反力 R_B は、 R_B =W - { $1/2 - (h \cdot f \cdot \cos \theta)/l_2$ }W となる。また、摩 擦係数を、f=0.5 とすると、R_B=250(kN)、半径方向分力 R_{Br} と、円周方向分力 $R_{B\theta}$ 、水平反力 H_B は、それぞれ、 R_{Br} = $R_B \cdot \cos \theta$ =216(kN)、 $R_{B\theta}$ = $R_B \cdot \sin \theta$ =125(kN)、 H_B = $R_{Br} \cdot f$ =108(kN)となる。

なお、PEMの定置時の反力については、図 3.5-7の左図とは逆方向に PEM の右面を左方向に 押し込むものとして、摩擦係数が回収時と同一とすると、鉛直反力 R_A と R_Bの値は、回収時と入 れ替わるだけである。また、水平反力 Haと HBは、方向が逆となって、両者の値が入れ替わるだけである。

(b) スライダー部材の候補材料と物性値

摺動スライダーの材料には、機械的特性、特に強度に優れたものを選ぶ必要がある。定置孔の 壁面との固着を防ぐため、化学的に安定なセラミックスをも選定した。セラミックスは、鋼材と 比較すると、脆性的であり強度のばらつきも大きいことや、強度に及ぼす寸法の効果がある。こ こでは、セラミックスに絞って検討することにした。本検討では代表的なセラミックスである窒 化珪素(Si₃N₄)とジルコニア(ZrO₂)を対象とする。表 3.5-3にセラミックスの主な物性値を 示す(京セラ, 2020を基に作成)。

材質			窒化珪素	ジルコニア
材質記号			SN240	Z701N
3点曲げ強度	MPa	JIS G 1601	1,020	1,470
ヤング率	GPa	JIS R 1602	300	220
ポアソン比	-		0.28	0.31

表 3.5-3 セラミックスの主な物性値

セラミックスの強度評価では、強度のばらつきを考慮するためにワイブル統計に基づく方法が用いられており、実際には材質ごとのワイブル係数が必要である。本検討における評価では、便宜的に3点曲げ試験による破壊応力の累積破壊確率の結果(北住ら,1989)から、窒化珪素のワイブル係数を m=13.8 と設定した。

(c) 強度評価の方法

セラミックス部材の強度評価は、寸法効果と破壊確率を考慮して行われている。ここでは、日本セラミックス協会が発行した図書の方法を踏襲した(日本セラミックス協会,1979)。

(d) 摺動スライダーの形状案

- 以下の点を踏まえて摺動スライダーの形状を設定した。摺動スライダーと鋼製ケーシングの 接地圧を考慮すると、摺動スライダーの接触面の曲率は、鋼製ケーシングの内側の曲率と合 致していること。
- 定置・回収時での摺動時、鋼製ケーシング内の腐食生成物や段差を乗り越えられるように、
 前方・後方にテーパーがある形状となっていること。
- ・ 製造プロセスを考慮すると、摺動スライダーがPEM側面に接する側(底面)は平面になって いること。
- ・ 製作上、最大寸法は材質によって異なることこと。

摺動スライダーの形状案を図 3.5-8 に示す。曲面となっている部分が坑道の壁面に接する。



図 3.5-8 摺動スライダーの形状案

(2) 応力解析の結果と強度評価

応力解析に用いた解析モデル(例:窒化珪素)を図 3.5-9 に示す。摺動スライダーに作用させ る荷重(反力、摩擦力)は、摺動スライダーの上面に均等に作用することが最も理想的であるが、 摺動スライダーの上面と処分孔の壁面が均等に接しない場合も想定されることから、厳しくなる 条件として、(1)解析条件の(a)に示された力を上面中央部の長さで除して、上面中央部に線荷重と して作用させることにした。境界条件として、底面の面外方向変位と、側面の内、PEM の取付け 穴に接する面の面外方向の変位は固定とした。

窒化珪素の場合の最大主応力の分布を図 3.5-10 に示す。反力や摩擦力を線荷重として上面の 中央部に作用させたことにより、その中央部で最大主応力が大きくなっている領域が生じている。 最大主応力の最大値は、σmax=76.4(MPa)となった。この応力状態から有効体積を求めると、 VE2=6.938(mm3)となり、部材の平均強度は、μ2=417(MPa)となる。

破壊確率 F については、PEM1 体に 4 枚の摺動スライダーが設置されることから、廃棄体 4 万本を考慮すると、摺動スライダーの全数は 16 万枚となる。そして、1 枚も破損しないとすると、破壊確率は、1/160,000=6.25×10-6 以下と設定する必要がある。よって、破壊確率を F=5×10-5とすることにした。そして、窒化珪素のワイブル係数は、m=9.30としたことにより、安全係数はSp=3.52となる。窒化珪素の破壊確率 F に相当する応力 σ R は、 σ R= μ /Sp=417/3.52=118(MPa)と評価された。その結果、 σ max=76.4(MPa) $\leq \sigma$ R=118(MPa)となって、強度評価上、窒化珪素を用いたセラミックスで摺動スライダーが実現できる見通しを得た。

ジルコニアを用いたセラミックスでも同様に、摺動スライダーが実現できる見通しを得た。



図 3.5-9 解析モデル(例:窒化珪素のスライダー形状)



図 3.5-10 最大主応力の分布 (例:窒化珪素のスライダー形状)

(3) 摺動スライダーの取り付け方の検討

摺動スライダーを取り付ける方法として、機械加工された窪みに摺動スライダーをはめ込んで 底面を接着剤で接合する方法、蟻継ぎ形状の溝に摺動スライダーを差し込んで、ロック・キーを 溶接することで脱落を防止する方法の2方式がANDRAでは検討されている。いずれの方法で も PEM に用いる場合、窪みや蟻継ぎ形状の溝を PEM 鋼殻に設ける必要がある。現行の PEM の外殻厚さは28mm であるので、この鋼殻に窪みや蟻継ぎ形状の溝を設ける際は、強度の低下 に留意が必要である。鋼殻の厚さを一様に増やすことは、PEM の重量が増えることになる。よ って、図 3.5-11 に示すように摺動スライダーを設置する部分のみ強度が確保できるように、鋼 製リングに窪みや蟻継ぎ形状の溝を設けて、それに摺動スライダーを装着して、PEM 容器に鋼 製リングを溶接する方法が考えられる。これにより、摺動スライダーを取り付けるための窪みや 蟻継ぎ形状の溝の寸法を確保しつつ、重量を無駄に増やさないことが可能となる。



図 3.5-11 PEM に摺動スライダーを取り付ける方法の例

(4) セラミックス製摺動スライダーの技術開発課題

今回実施したの強度評価は、セラミックス製摺動スライダーによる PEM の移送の技術的実現 性を確認するための簡易的なものである。解析で必要となる物性値やワイブル係数は、同一素材 であっても製品ごとに幅をもつ。実際にセラミックス製のスライダーを製作して確認する必要が ある。

セラミックスは材料自体の特性上、寸法が大きくなると相対的に強度が低下する。今回設定した無垢材ではその影響が顕著になる可能性がある。一方、セラミックスの要件は、定置環境下で不活性であり、PEMと坑道壁面の固着を防止する数ミリの隙間を確保することにある。また、摺動距離は最大で処分坑道内の往復(往路は定置、復路は回収)であるため、損耗量を予め設計に反映することも考えられる。このような観点から、無垢材のほかに、強度を担保する母材へのコ ーティングもスライダー製作の手法の候補になると考えられる。

定置・回収時の移動距離に対する、手動スライダーの損耗量は、処分坑道長を決定する因子の 一つとなる。

3.5.4 処分鼓動横置き・PEM 方式に対する詳細設計オプションのまとめ

現行の処分坑道横置き・PEM 方式を起点とした、詳細設計オプションの適用の検討結果について下記の様に整理した。

(1) 施設設計に対する詳細設計オプションの適用(技術的アプローチ2)

処分坑道定置型の場合、処分坑道の再開放が廃棄体周囲の土質材料の除去を兼ねる。廃棄体の 配置方向の変更や坑道断面の縮小は、掘削ズリの削減に効果がある一方で、坑道内の作業空間の 減少による作業効率の低下の側面も併せ持つ。回収作業時間の迅速化に対する根本的な対策とし て、処分坑道内の隙間充填材を不要とする、円形小断面坑道を適用する。許容できる隙間の幅 は、閉鎖後長期の安全性に対する緩衝材の性能と密度の観点から設定される。

処分坑道の延長は、小断面坑道の掘削技術、坑道内での PEM の可搬距離、摺動スライダー損 耗量などから設定される。

(2) 回収作業手順、技術に対する迅速化の要求(技術的アプローチ1)

技術的アプローチ2により、処分坑道の再開放作業自体が省略される。これにより、回収作業 期間は、PEMの搬出速度と同時作業のパーティー数により算出できるようになる。

PEMの前面を把持し、推進動作で定置し、牽引動作で回収する。これにより、PEM 側部の装置の占有空間が不要となり、PEM 周囲に残存する隙間の幅を最小限に留めることができる。

(3) 廃棄体に対する詳細設計オプションの適用

回収可能性の維持期間中の PEM 鋼殻や鋼製ケーシングの腐食による摺動性能の低下を抑制するため、坑内環境で不活性な素材の摺動スライダーを PEM に取り付ける。PEM 前面には把持部を設置する。

地下環境で不活性なセラミックスは摺動スライダーの候補材料である。ただし、重量物の移送 時の損耗や破損が懸念事項となる。

PEM 鋼殻への水密性の付与は、回収作業の容易性の観点からは良だが、緩衝材の浸潤挙動の 阻害要因ともなる。PEM 鋼殻の水密性/通水性については、トレードオフの関係にある回収の 容易性と閉鎖後長期の安全性の双方から検討が必要である。

(4) 実現に向けた技術開発課題

(1)~(3)の技術開発課題は以下のとおりである。

- ・大深度地下の岩盤に対する円形小断面の掘削技術
- ・牽引/推進による PEM の搬送定置・回収技術
- ・不活性の摺動スライダーを設けた PEM の製作技術
- ・残置される隙間への緩衝材の膨出挙動、PEM 鋼殻の要件の具体化

3.6 まとめ

回収容易性を高めた詳細設計オプションの開発の、本年度の成果を以下にまとめる。

回収の容易性(回収作業期間)の定量化手法の検討

処分坑道が埋め戻された回収可能性の維持状態からの回収作業時間の試算方法について検討した。処分場の建設・操業期間中の作業動線・換気経路の考え方である「別区画での同時かつ独立 作業で回収作業」を回収作業に適用し、回収作業のユニット数と単位ユニットあたりの再開放期 間から、回収作業時間を求める定量化手法を構築した。

● 詳細設計オプションの適用例と実現性の課題の整理

構築した定量化手法にて、現行の2概念の全量回収期間を試算した。この試算結果を踏まえ、 現行の2概念をベースとし、安全性への影響を考慮した詳細設計オプションの適用例を検討した。

処分坑道竪置き方式に対しては、坑道の短尺化による再解放期間の短縮、緩衝材の除去範囲の合 理化、引抜きによるオーバーパック回収の3点から成る詳細設計オプションの適用例を提案した。 この適用例の技術的実現性の評価として、引抜力に対するオーバーパック把持部の強度の照査を 実施し、引抜によるオーバーパック回収の実現性の見通しを得るとともに、引抜き回収を可能に する把持部の形状を提示した。

処分坑道横置き・PEM 方式に対しては、PEM 内の緩衝材の密度から周囲に許容可能な隙間幅を 設定し、埋戻し材の施工・除去が不要な狭隘坑道定置方式を提案した。狭隘な処分坑道の建設技 術の調査、狭隘空間で重量物の移送を実現するための、摺動による定置・回収技術を選択した。 要となるセラミックス製摺動スライダーについて、PEM 荷重と摺動時の負荷を考慮した強度評 価により、摺動による重量物移送の実現性の見通しを得た。

参考文献

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次取りまとめー,分冊2 地層処分の工学技術,JNC TN1400 99-022,

1999.

北住順一,谷口佳文,星出敏彦,山田敏郎:各種セラミック材料における強度特性およびその欠 陥寸法分布との関係(第1報 静的強度),材料, No.38, Vol.434, pp.1254-1261, 1989.

京セラ株式会社:材料物性表, https://www.kyocera.co.jp/prdct/fc/product/pdf/material.pdf, 2020. 原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 12 年度高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査 報告書(第2分冊)-遠隔操作技術高度化調査-(1/2), 2001.

- 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-2001, 2021.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 20 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,2009.

原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 21 年度地層処分調査等 処分システム工学要素 技術高度化開発(人工バリア品質評価技術の開発)報告書第2分冊(1/2),2010.

- 原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 29 年度地層処分調査等 処分システム工学確証 技術開発 報告書(第1分冊),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-,NUMO-TR-20-03, 2021.

高速道路総合技術研究所, 土木工事積算基準 令和3年度版, 2021.

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.

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.

- 日本機械学会,発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2015 年版)第I編 軽水炉規格,JSME S NC1-2015, 2015a.
- 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 材料規格(2015 年版), JSME S NJ1-2015, 2015b.
- 日本原子力研究開発機構,幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験-大口径掘削機の開発、模擬オーバーパック、緩衝材および埋め戻し材の製作-,JAEA-Research 2016-010, 2016.
- 日本セラミックス協会編集委員会基礎工学講座小委員会:セラミックスの機械的性質,セラミックス基礎工学講座シリーズ1,1979.
- 日本道路協会,道路橋示方書·同解説 IV 下部構造編, 2017.

日本道路協会,杭基礎設計便覧,2020.

古山翔悟,小高猛司,崔瑛,高田英典:ベントナイト・珪砂混合体の不飽和三軸試験,土木学会 第 69 回年次学術講演会講演概要集, CS9-023, pp.45-46, 2014.

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 はじめに

4.1.1 目的

回収可能性維持期間を設けた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。

平成 27 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、定量化技術としての信 頼性や説明性の確保、更に将来の安全規制対応なども考慮すれば、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、並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、より丁寧かつ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。



4.1.2 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並 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及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。さらに、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 可能性維持期間と操業期間中及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

上述のような留意点を踏まえた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が、いずれの手法 においても地層処分システム全体のふるまいに関する理解が重要である。これまで、安全性に影 響を及ぼす主要な要因とシナリオを抽出し、既存の予測解析手法の適用性の確認(トップダウン・ アプローチ)を実施(原環センター,2020)してきたが、将来の安全規制対応を念頭おけば高い 説明性が求められることから、信頼性が高い評価手法やより確からしい定量値の提供が可能な予 測評価手法及び知見の整備に向け、安全性に影響を及ぼす要因やシナリオの包括的な整理(ボト ムアップ・アプローチ)を実施することとした。閉鎖後長期の安全評価の基本手順では、地層処 分システム全体のふるまいを俯瞰でき、時間・空間スケールに関する整合性を確認できる表現方 法として、ストーリーボードが導入されている(NUMO,2021)。ここでは、回収可能性維持期間 と操業期間中及び閉鎖後長期の安全性が確保される期間に、回収可能性の維持に伴う安全性への 影響の定量化手法として、既に NUMO によって閉鎖後長期の安全評価に用いられているストー リーボードの適用を試みることし、その作成方法(NUMO,2011)を参考にすることとした。

4.1.3 ストーリーボートの作成方針

処分システムの状態変遷を俯瞰するストーリーボードには、作成作業の過程を含めて以下に示す3つの役割を期待している(NUMO, 2011)。

知見の統合

各時間・空間領域における地層処分システムの振る舞いについての関連する諸分野の知見を統 合して記述する。なお、ストーリーボードの枠組みを用いて分野横断的なシステム理解の整理を 行うことにより、分野間での理解の齟齬や矛盾する知見などを把握することが期待できる。

● 分野が異なる専門家が議論する枠組みの提供

地層処分全体を理解する管理者や各分野の専門家が議論するための共通の枠組みを提供し、地 質環境の調査・評価及び処分場の設計と安全評価との緊密な連携が促進される。また、ストーリ ーボードにおける地層処分システムの将来挙動の表現は、多角的かつ視覚的に捉えやすいもので もあり、システムの理解を効果的に深めることが期待できる。

● ステークホルダーとの理解の共有

非専門家も含めたステークホルダーとの対話においても、理解を共有するための場として有効

に活用できる。

このような役割を踏まえ、ストーリーボードは、段階的に作成される。第1段階のストーリー ボードでは、さまざまな分野の専門家との議論の前に、安全評価の専門家が中心となり、安全機 能に着目した処分システムの状態変遷に関わる知見を集約する。第2段階のストーリーボードは、 さまざまな分野専門家との議論に基づき、第1段階のストーリーボードを改善する。

昨年度までに、回収可能性の維持に伴う安全性への影響の定量化手法の整備に向けたストーリ ーボードの全体開発計画を作成し、それに基づき、建設・操業の工程分析、国内外の FEP データ ベースの調査、回収可能性の維持に伴う影響を受ける期間や影響が波及する期間のタイムスケー ル、構成要素、部材、使用材料を含めた空間スケールの把握を行った。令和3年度は、これらを 参考に、処分場の建設・操業の期間及び処分場閉鎖から再冠水完了までの期間を対象に、第1段 階のストーリーボードの作成方法を提案するとともに、その方法に従いストーリーボードを作成 し、回収可能性維持期間を設けた場合や回収可能性オプションの異なる場合について、回収可能 性維持期間を設けない場合の工程との違いを提示する。

上述の観点から、第1段階のトーリーボードの作成に際しては、客観性、追跡性及び透明性の 確保に留意して進めることとし、国際機関、国、学会、実施主体等で複数の専門家による議論が なされた資料を参考とするとともに、判断に至ったプロセスを明らかにするように心掛けること とした。また、このようにして作成したストーリーボードには、直感的な分かりやすさ、示して いるプロセスの網羅性に留意し、ストーリーボード作成経験がある研究者を含め、第三者の意見 を聞くとともに、取り扱うプロセスの分野(熱(T)、水理(H)、力学(M)、化学(C))に偏り がないよう心掛けることとした。

NUMO の包括的技術報告書(NUMO, 2021)では、処分場の設計に際し、5つの項目からな る設計因子に基づいて要求事項を整理しており、その中の閉鎖前の安全性での要求事項を満足す るためには、坑道等の地下構造物の安定性が確保され、供用性は保たれる必要がある。したがっ て、力学的安定性を中心とした「地下構造物の安定性」を対象として、ストーリーボードの作成 を行った。

4.2 評価対象とする構造、スケール及び状態

ストーリーボードを作成する対象は、令和2年度の検討と同様に、NUMOの包括的技術報告書(NUMO, 2021)において示された岩種、処分場の構成、処分形態を参考として、以下のように設定した。

4.2.1 評価対象とする処分場の構造

評価対象とする岩盤は、新第三紀堆積岩類の特性を前提とし、処分深度は、深部環境で還元性 環境が想定される深度である 500m と設定した。

処分場の構成としては、アクセス立坑、アクセス斜坑、連絡坑道、処分坑道からなるパネル型 の処分場を想定した(図 4.2-1)。また、それぞれの坑道の構成要素を表 4.2-1 に示す。アクセス 立坑及びアクセス斜坑は、地表から続くため深度依存性があるが、ここでは、廃棄体の置かれる 処分環境と同程度の深度を前提として評価を実施する。したがって、評価対象とする坑道は、ア クセス立坑、アクセス斜坑/連絡坑道/主要坑道、処分坑道に区分して取り扱った。

処分形態として、処分孔竪置き方式とし、処分孔は、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、 埋め戻し材で構成される。回収可能性維持の状態オプション(図 4.2 2)は、状態オプション 2 (処分孔竪置き・ブロック方式)をリファレンスとし、比較のため、状態オプション 1(処分坑 道開放)、状態オプション 3(処分坑道が埋め戻され、力学プラグが設置)についても検討対象と した。



図 4.2-1 評価対象とした処分場の構成

坑道	支保工	覆工	インバート	防水工	処分孔、埋め戻し			
				排水工	材、力学プラグ			
アクセス立坑	0	0		0				
アクセス斜坑/連絡	0	0	0	0				
坑道/主要坑道								
処分坑道	0		0	0	0			

表 4.2-1 各坑道の構成要素



4.2.2 時間及び空間スケール

処分システムの状態変遷を記述する対象領域をストーリーボードの縦軸として、処分場が立地 する地質環境の境界条件、人工バリアや処分場のレイアウト、地下構造物の安定性などの情報を もとに領域とそのスケールを設定した。また、ストーリーボードの横軸は、処分場の建設・操業 の期間及び処分場閉鎖から再冠水完了までの期間の状態変遷に着目した時間枠を設定した。 ●空間スケール:処分システムの対象領域とスケールの設定

① 処分場スケール(坑道の建設・操業に伴う影響を記述)

② ニアフィールドスケール(坑道周辺の母岩を含む領域の建設・操業に伴う影響を記述)

③ 詳細スケール(処分場構成要素の細部の変遷を記述)

●時間スケール:処分システムの状態変遷の時間枠の設定

①処分場の建設が開始される前の時間枠を設定(初期条件)

②処分場の建設から閉鎖まで、または回収までの時間枠を設定

(空洞、構造の安定性に着目)

③処分場内の再飽和までの時間枠を設定(坑道の埋め戻し後、または閉鎖後)

4.2.3 坑道の掘削前及び掘削後の状態

(1) 処分場スケール

坑道は、それぞれに建設時期や坑道を開放している期間が異なる。坑道内部への地下水の漏出・ 排水は建設においては設計の基本条件であり、漏出・排水の状態に応じて処分場スケールにおい て地下水流動環境は坑道の建設・操業期間内で変動していくことが予想される。この状況変化は ニアフィールドスケールでの環境変遷に影響を与えることが考えられることから、処分場スケー ルでの各坑道の開放の程度を最初に想定しておく必要がある。

図 4.2-3 に処分場スケールでの水理的変化に関する概念を示す。これらの水理的な変遷は地質 環境である層序や岩盤の不均質性に大きく作用されることから、広域または処分場スケールでの 水理解析、または坑道の掘削途中におけるモニタリングなどで確認する必要がある。ここでは、 単純に地下水流速・流向の変動及び地表水または深部地下水の化学性状の異なる地下水の坑道近 傍へ移動することを想定した。

したがって、坑道の掘削と排水により地表面の水位が変化するとともに、動水勾配の変化に伴 い流速・流量が変化し、坑道内への地下水の引き込みにより地表水や深部地下水が坑道方向に移 動する。また、長期間、異なる性状の地下水と接触する岩盤は鉱物組成の変化や密度変化が生じ、 処分パネルの建設・操業・閉鎖に伴い処分場閉鎖までの期間、地下水流速や流向は動的に変化す る。さらに、処分場閉鎖後は水位の回復が見込まれるが処分場及びその近傍の岩盤の透水性の変 化に対応したものとなる。



図 4.2-3 処分場スケールの変遷と水理的変化に対する想定

(2) ニアフィールドスケール

ニアフィールドスケールでの坑道の掘削前及び掘削後での環境条件の想定を図 4.2-4 に示す。 ここでは、現段階での専門家間による共有理解を目的とすることから、亀裂の頻度や岩塊の分布、 鉱物組成の詳細といった特定のデータについては設定せず、必要に応じて考慮していくこととし た。

掘削前の岩盤の水理・化学環境は還元性雰囲気にあり、降水系地下水が流れていること、坑道 掘削予定とする近傍に透水性の亀裂が存在し卓越的流路となっていること、力学環境は偏圧が存 在し、掘削による応力開放によって地山が相対的な変位を生ずること、温度環境は一般的な地温 勾配が存在するものとした。

掘削後の状態としては、力学的なゆるみ域の発生、水理的な不飽和帯の発生、大気からの酸素・ 炭酸ガスの岩盤への拡散を想定した。



図 4.2-4 ニアフィールドスケールにおける坑道の掘削前後での環境条件の想定

4.3 ストーリーボードの作成

4.3.1 ストーリーボードの作成手順

ストーリーボードの作成に際しては、処分場の状態変遷を評価する上で、関連する FEP の抽 出をし易くするために、まず、処分場構成要素の抽出・細分化を行うとともに、細分化した要素 に要求される機能を整理する。次に、整理した処分場構成要素の機能に影響を与えるプロセスを 抽出し、地下構造物の安定性との関係を整理する。さらに、各坑道の構成要素の変遷に伴う環境 の変遷を整理し、ストーリーボードを作成する。

- ステップ1:処分場構成要素の抽出と細分化
- ステップ2:関連するプロセス FEP の抽出
- ステップ3:処分場構成要素のふるまい(環境変遷)の整理

ステップ4:ストーリーボードの作成

4.3.2 ステップ1: 処分場構成要素の抽出と機能の整理

(1) 構成要素の細分化

ストーリーボードの作成に際しては、処分場の状態変遷を評価する上で、関連する FEP の抽 出をし易くするために、処分場構成要素の抽出・細分化し、階層整理した。構成要素の細分化、 階層整理に当たっては、包括的技術報告書(NUMO, 2021)において示された処分場の仕様を反 映するが、詳細が不明な部分については、NATM 工法で施工される一般的な山岳トンネルを想定 し、トンネル標準示方書(土木学会, 2016)を参考にした。また、アクセス立坑の仕様について は、幌延深地層研究センターの立坑の情報を踏襲した(日建設計, 2005)。なお、細分化された構 成要素の最小単位については、材料の類似性(時間変遷において同様の影響を考えるべき材料) を勘案し「区分」(金属(炭素鋼)、セメント鉱物(砂、砂利を含む)、有機物(微生物影響を含む)、 鉱物(ベントナイト混合土を対象とする)、無機物、その他)として分類した。

処分場構成要素を細分化、階層整理した結果(アクセス立坑の例)を図 4.3-1 に示す(全体は 付属書 4.1 を参照)。

(2) 処分場構成要素の抽出と機能

(1)で細分化、階層整理した要素のうち、「要素 2」に求められる機能を設定した。さらに、「要素 2」が機能を満たすために必要となる「要素 3」の要件を設定した。機能、要件の設定に際しては、包括的技術報告書(NUMO, 2021)及びトンネル標準示方書(土木学会, 2016)を参考にした。なお、構成部材は上位の階層にのみ機能を設定した。設定した要素の機能、部品の要件を表4.3-1 例示する。

ここでは、機能及び要件設定の考え方をアクセス斜坑、連絡坑道、主要坑道の支保工を例に示 す。構成部材の機能及び部品の要件の設定に関する詳細は、付属書 4.2 に追記する。

なお、トンネル標準示方書(土木学会,2016)によると、これまでトンネル構造物は、要求性 能を明確に意識して計画、設計、施工及び施工管理等を実施するに至っていない。設計において は、仕様規定型の設計体系となっており、性能規定型の設計体系ではないため、明確に機能及び 要件を設定できない場合があることに留意が必要である。



図 4.3-1 処分場構成要素の細分化、階層整理(アクセス立坑の例)

	区分
	金属
	金属
	金属
	セメント鉱物
	鉱物
	金属
	有機物
_	金属
	金属
	セメント鉱物
	鉱物
	セメント鉱物
	 セメント鉱物 鉱物
	 セメント鉱物 鉱物 鉱物
	 セメント鉱物 鉱物 鉱物 五機物
	セメント鉱物 鉱物 鉱物 有機物
	 セメント鉱物 鉱物 鉱物 有機物 有機物
	セメント鉱物 鉱物 鉱物 有機物 有機物 有機物
	 セメント鉱物 鉱物 鉱物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物
	 セメント鉱物 鉱物 鉱物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物
	 セメント鉱物 鉱物 鉱物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物
	 セメント鉱物 鉱物 鉱物 有機物
	 セメント鉱物 鉱物 鉱物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物 和機物 金属
	 セメント鉱物 鉱物 鉱物 有機物
	セメント鉱物 鉱物 鉱物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物
	 セメント鉱物 鉱物 鉱物 á鉱物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物 有機物 金属 有機物 金属 有機物

鉱物

セメント鉱物

有機物

無機物

Q 4.5-1 安米の仮能、女什(ノノビヘエ丸のD	表	₹ 4.3-	1 要素	唇の機能、	要件	(アク	1セスュ	な坑の	列)
---------------------------	---	--------	------	-------	----	-----	------	-----	---	---

要素1	要素 2	要素 2 の機能	要素 3	
	鋼製支保工	・ 外力(圧縮、せん断、曲げ)に対して抵抗する。	H 形鋼	・ 作用する圧縮、曲け
		・ 鋼製支保工と地山を密着させることにより、部材の曲げ抵抗性能やせん断抵抗性能により局所的な岩塊の崩落を防		 ・ 地山との密着を保持
		地山の弱点となる箇所を鋼製支保工が支持することにより、地山内の不連続面や弱層の影響を低減する。	继壬拓	·
		・ クラウントアーチが形成されくにい軟岩や未固結地山等では、鋼製支保工等が反力として半径方向外向きの拘束力 (・	胚于似	· ///// / /////
		(内圧)を地山に与え、掘削面近傍地山を二軸応刀状態に保つことで地山の町何刀を高のる。 吹付はったりし、「加井井塾において古伊王の副姓」に(地方向上させて、吹付はったりし、「没在登田後は、吹付は、		
		・ 吹刊りコンクリート初期初齢において又体工の側性、しん性を向工させる。吹刊りコンクリート強度光現後は、吹刊り コンクリートとー体となって地山に密差し、立位深度古向に連結したマーチシェル構造を形成して立位が用辺地山の空	ボルトナット	 継手板とともに継手
		コンソリートと一体となって地面に留着し、立机床及力向に建成したアーテンエル構造を形成して立机や周辺地面の安定を図る		
	吹付けついク	たて回る。 ・ コンクリートの軸圧縮耐力や副性によって、アーチに作用する主に内空に向いた外力や変形に起因する軸力に抵抗す	<u> コンクリート</u>	・作田する圧縮・サム
	リート	コンファイの細圧幅的力で耐圧になって、アークに作用するエに内シュンアカで変形に超因する細力に強化する。		 ・ 地山との密着を保持
		・ コンクリートのせん断耐力や剛性によって、局所的な抜け落ち等に起因するせん断力やせん断変位に抵抗する。		
		・コンクリートの曲げ耐力や剛性によって、局所的な抜け落ち等に起因する曲げモーメント等に抵抗する。		
		・ 上記の荷重を、吹付けコンクリートと地山の境界面におけるせん断抵抗(付着抵抗)によって支持するとともに、地山に		
		分散させる。	金網	・ コンクリートのせん
		 ・ 掘削直後の切羽面から落下しようとする小岩塊を保持することにより、作業の安全性を確保するとともに、引き続いて 		 コンクリートのはく落
		発生するおそれのある大きな緩みや崩壊を防止する。		 コンクリートのじん性
		 ・ 吹付けコンクリートが反力として半径方向外向きの拘束力を地山に与え、トンネル掘削面近傍地山を三軸状態に保つ 		
		ことで地山の耐荷力を高める。	/ +h ///	
		・ 地山の弱点となる箇所を、吹付けコンクリートで充填補強する、あるいは跨いで比較的しっかりとした地山部分同士を	繊維	 コンクリートの曲げ
		連結、一体化することで、地山内の不連続面や弱層の影響を低減する。		 ・ コンクリートのはく溶 ・ コンクリートのはく溶
		・ 凹部を尤項し吹付け表面を円弧状に消らかに仕上けることで、吹付けコンクリートや地山内の円周万向応刀分布が平 温化される。また、民手的にお思された日本に満足した機能です。 ほうかん ひょうかん しょうちょう		 コンクリートのしん性
		常化される。また、局所的に配直されたロックホルトや構成文保上寺の文持効果を面的に拡大して伝達する。めるい はい、カルに作用する原本素、民能共美な天物に八散してませまる。		
		はFンイルにTF用9の価何里、同別何里を面別に刀取して又持9つ。 - 「「「」「」「」「」「」「」「」」「」「」」「」「」」「」」「」」「」」「」」		
		・ 協利地山衣面を恢復し、王丸との按照による私体や酸心による地山の方心、のるいな房小との接触による地山の執 化や十粒子の流出を防止する		
	ロックボルト	・ ロックボルト軸方向の引張抵抗によってその方向に地山との相対変位を抑制する。	芯材	 作用する引張、せん
		・ ロックボルト軸直角方向のせん断抵抗によってその方向に地山との相対変位を抑制する。	10(1)	 ・ 定着材との付着を確
		・ 岩塊を地山と一体化させ、岩塊の剥落や抜落ちを抑止する。	ベアリングプレ	<u> </u>
		・ 岩盤の亀裂面や地山のせん断抵抗、残留強度を向上させる。	ート・ナット	 ベアリングプレート(
		・ ロックボルトに発生する軸力が吹付コンクリートを介して壁面に作用することで、トンネル周辺地山の塑性化とその拡		 ナットによりベアリン
		大を抑制する。	モルタル系定	 ・ 地山との付着を保持
		 ・ 吹付コンクリートを地山に縫い付けることにより、吹付コンクリートと地山の付着を確保する。 	着材	 芯材との付着を保持
				 作用するせん断力(
覆工	覆工	・ 供用後の点検、保守等の作業性を高める。	コンクリート	・ 作用する軸圧縮、曲
		・ 立坑内の架線、照明、換気等の施設を保持する。		 支保工との一体性な
		 外力(水圧、上載荷重等)に対して構造物全体としての安定性を保持する。 	繊維	 コンクリートのひび器
		・ 立坑の構造物としての耐久性を向上させる。		 コンクリートのはく謝
		・ 支保工と一体となって地山を安定化する。		
防水工・排水工 埋め戻し材	防水工	・ 立坑内に地下水を漏水させない。	シート	 水を透過しない。
		・ 復工に過大な水圧を作用させない。		 水比等の何重に対
			表面緩衝材	 シートの破損を防止
	145 J		1.1.1.1	
	排水工	・ 立坑内に地下水を漏水させない。	排水材	 ・ 地山と復エコンクリ ・ 地口と復エコンクリ
		・復工に過大な水圧を作用させない。	てほしい	
			へ 透水シート	・ 復上コングリートに、
			水抜さハイノ	 ・ 表面排水材(排水体) ・ 満北された 済北され
			朱水リンク 生业等	
	上所ブロッ		未水官 - ベントエノン 泪	
	工貝糸埋め 豆 対	・ ・ 川坦及いてい向辺か早越しに放射性物貝の物行粧路となることを抑制する。	ハノトナ1ト混 ム+	 ・ 小坦内か早越した
БШ	大し171	・ グラウンドアーチに上り空間を保持する	· ㅁㅗ · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	・ ガニー・バマエー
母岩	石笛	- ノノノノトリーナにより三川と休行りる。 - 涌水県た低減する	石口	・ サリフレア・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	7 7.71	<i>は、1711年には1</i> 1%をついて、1911年1月1日にあった。	ルガラフ	
1			ホルノヘ	IPI

要素 3 の要件

ず、せん断に対して十分な耐荷力を有する。 持する。

□継手部でⅡ形鋼を一体化させる。

●部でH形鋼を一体化させる。

ん断、曲げに対して十分な耐荷力を有する。 持する。

断耐力を向上させる。 喜を防止する。 生を向上させる。

耐力を向上させる。 喜を防止する。 性を向上させる。

ん断に対して十分な耐荷力を有する。 確保するための形状を保持する。 フリート(または岩盤)を一体化させる。 に作用する曲げ、せん断力に対して十分な耐荷力を有する。 ッグプレートの位置を保持する。 持する。 持する。 に対して十分な耐荷力を有する。 曲げ、せん断に対して十分な耐荷力を有する。 を確保する。

割れ発生、ひび割れ幅の増大を抑制する。 雛、はく落を防止する。

して十分な伸びと強さを有する。 Lする。

層を形成する。

ートの間、または吹付けコンクリートと覆エコンクリートの間に透 水を導水する。

湧水を浸透させない。

オ)が導水した湧水を集水リングに導水する。

耒水する。

れた湧水を排水する。

地下水の流動経路にならない(低透水性)。

より空間を保持する。 等の水みちを閉塞することにより、地山の透水性を低下させる。
4.3.3 ステップ2: 関連するプロセス FEP の抽出

最新の IFEP (OECD/NEA, 2019) 及び包括的技術報告書 (NUMO, 2021) を参考にプロセス に関与する FEP (プロセス FEP) と「区分」との関係を整理した(表 4.3・2、表 4.3・3)。IFEP (OECD/NEA, 2019) で示されるプロセスは重複するものがあるため、類似するプロセスをまと めるとともに、THMC に関与する状態変数を記載した。なお、IFEP 自体が、閉鎖後長期の安全 性を目的として収集されていることから、閉鎖前の安全性については、別途、工事等のトンネル の安全性に着目した文献(土木学会, 2016;農業土木事業協会, 2015)で評価対象としている事象 と照らし合わせた。プロセス FEP と「区分」との関係に基づき、「区分」毎に関連するプロセス FEP、地下構造物の安定性に影響する特性及び評価するパラメータを設定した(表 4.3・4)。なお、 本検討では、特に力学的安定性に影響を与える「区分」として、金属(炭素鋼)、セメント鉱物(砂、 砂利を含む)、有機物(微生物影響を含む)、鉱物(ベントナイト混合土を対象とする)、鉱物(岩 石を対象とする)を選択した。また、本検討の目的である空間的な安定性(安全性と供用性)に 直接影響を与える力学的な特性は、以下のように分類した。

- 形状・厚さ:力学的な強度を保つために設計された、部材の厚さや形状に関係するもの
- 強度特性:部材そのものの強度に関与するもの
- 作用荷重:部材に作用する荷重が変化するもの
- 副次的効果:部材そのものの変化に伴い他の環境条件を変化させるもの

カテゴリ	プロセス FEP	THMC に関与する状態変数	No	金属(鉄系)	セメント鉱物	鉱物	鉱物(母岩)	有機物	無機物	その色
Т	ガラス固化体で生じる化学反応による熱の発生	発熱量	1	•	•	•	•	•		
Т	オーバーパックで生じる化学反応による熱の発生	発熱量	2	•						
Т	セメント、モルタル利用部位で生じる化学反応による熱の発生	発熱量	3		•					
Т	微生物影響による熱の発生	発熱量	4					٠		
С	微生物活動による金属の腐食、腐食生成物の発生	鉱物・材料組成	5	۲				٠		
С	好気性の環境下で起こるコンクリートの微生物分解	鉱物・材料組成	6		•	٠		•		
С	セルロース存在下での微生物活動(酸の生成)によるセメント劣化	鉱物・材料組成	7							
С	酸素供給下での微生物活動によるセメント劣化	鉱物・材料組成	8			•		•		
Н	微生物活動によるコロニー生成による表面坑道の変化	固相表面構造	9		•	٠	•	•		
Н	微生物活動によるコロニー生成による間隙構造の変化	間隙の構造(亀裂,断層構造)	10		•	٠	٠	٠		
С	微生物の有機物分解によるガス発生、水質変化によるセメント変質	鉱物・材料組成	11		•	•		•		
Н	セメント境界部分でのパイピングの発生	固相・液相・気相の密度	12		•	•	•			
Н	セメント境界部分でのパイピングの発生	間隙の構造(亀裂,断層構造)	13		•					
Н	緩衝材もしくは埋戻材の流体浸食(hydraulic erosion)	固相・液相・気相の密度	14			٠				
Н	掘削による不飽和領域の発生	間隙構造(ミクロ)	15	٠	•	٠	٠	٠	•	
Н	緩衝材、埋め戻し材の再冠水に伴う不均質な膨潤	固相・液相・気相の密度	16			٠				
Н	温度に依存した密度変化と密度差による水の流れ	固相・液相・気相の密度	17			٠	٠			
М	水素ガスの発生による圧力の増加は母岩の亀裂状態の変化させる	間隙水圧	18				٠			
Н	水素ガスの発生による圧力の増加と緩衝材中地下水の排水	間隙水圧	19	•						
Н	還元環境下のオーバーパックの腐食ガスにより圧力勾配が生じる	液相・気相の移動速度	20	•						
Н	母岩の掘削により、坑道が大気開放され大気圧に変動、地下水が流出する	間隙の構造(亀裂,断層構造)	21				٠			
М	処分場の設置による母岩及び及びその周辺母岩他の岩の応力場の変化	力学特性値	22				٠			
М	オーバーパックの腐食に伴う体積の増加	領域の形状	23							
М	金属腐食に伴う体積変化と鉱物組成の変化	領域の形状	24							
М	モルタル中の鉱物組成の変化に伴い体積変化が生じる	領域の形状	25		•					
М	モルタル中の鉱物組成の変化に伴い体積変化が生じる	鉱物・材料組成	26		•					
М	ベントナイトの鉱物組成(Ca 型化)の非膨潤性鉱物への変化に伴う体積変化	鉱物・材料組成	27			٠				
М	応力腐食割れの発生による、坑道等の強度低下	鉱物・材料組成	28	٠						
М	水素脆化による力学的強度の低下	力学特性値	29	•						
М	母岩のクリープ変形による坑道への応力変化	領域の形状	30		•	•	•			
М	廃棄体の荷重や母岩の地盤圧力のような応力による緩衝材や埋め戻し材に応力がかかると塑 性変形	領域の形状	31			•				
М	クリープ変形による母岩の特性変化(密度、間隙率、透水性、力学特性)	間隙率	32				•			
С	母岩の鉱物組成や人工バリア構成要素の特性などに依存し、pH が変化する	鉱物・材料組成	33				•			
С	pH 上昇によりモンモリロナイト溶解が促進されると、鉱物組成の変化に対応して密度が変化する	固相・液相・気相の密度	34			•				ĺ
С	地下水流量や利用可能な酸素の消費速度に依存する処分場領域の酸化還元電位の経時的変遷	鉱物・材料組成	35	•	•	•	•	•		
Н	セメント由来の高 pH プルームと母岩鉱物組成の反応は、鉱物組成を変化させ、密度、間隙 率を変化させる	間隙率	36			•	•			
С	セメント系材料は長期的には地下水との反応により変質を生じる	鉱物・材料組成	37		•					
М	酸化性状態での金属の腐食は酸化物を沈殿させ、膨張性の沈殿物は応力状態を変化させる	鉱物・材料組成	38							
М	ロックボルトは様々な腐食形態により、力学的な強度を低下させる	鉱物・材料組成	39	•			•			
С	腐食によって生ずる Fe イオンによりベントナイトのイオン交換, モンモリロナイトの溶解 と二次鉱物沈殿等が生じ鉱物組成が変化する	鉱物・材料組成	40	•		•	•			
М	プラスチックや他のポリマーの分解によるガス発生は、内部の圧力を変化させる	間隙水圧	41					٠		
С	pH や Eh 等の化学的環境は、時間をかけて変化する可能性があり、これらの変化は、廃棄体 パッケージ内部の廃棄物やマトリクスの溶解を起こす	鉱物・材料組成	42					•		
Н	セメント系鉱物の溶出に伴う空隙量の増加が、セメント系材料の透水係数を上昇させる	間隙率	43		•					
С	オーバーパック表面は、腐食により被膜が生成される	固相表面構造	44	•						
С	セメント系鉱物の溶出に伴う空隙量が増加する	間隙率	45	<u> </u>	•				\vdash	
M	セメント系鉱物の溶出に伴うカルサイトの生成と沈殿(鉄筋の腐食によるひび割れの発生)	鉱物・材料組成	46							
С	セメント系鉱物の溶出に伴うカエトリンガイトの生成と沈殿、エトリンガイトの膨潤	鉱物・材料組成	47	<u> </u>	•					
С	セメント系鉱物の溶出に伴うカルサイトの生成と沈殿(セメントの中性化、鉄筋の腐食)	鉱物・材料組成	48	<u> </u>	•					
С	セメント系鉱物の溶出に伴うマグネシウムイオンとの反による炭酸マグネシウム (マグネサイト) もしくはドロマイトの沈殿 (収着性の変化)	鉱物・材料組成	49		•					
С	セメント系鉱物の溶出に伴うマグネシウムイオンとの反応による炭酸マグネシウム(マグネ サイト)もしくはドロマイトの沈殿による空隙の閉鎖	間隙率	50							l
М	骨材中のアルカリ反応性シリカ鉱物とコンクリート中の水酸化物を主成分とする高 pH となった間隙水との反応による膨潤物質の生成	鉱物・材料組成	51		•					

表 4.3-2 プロセスに関与する FEP と区分の対応(1/2)

カテゴリ	プロセス FEP	THMC に関与する状態変数	No	金属(鉄系)	セメント鉱物	鉱物	鉱物(母岩)	有機物	無機物	その色
Т	セメント系材料利用による水和熱	発熱量	52		•					
С	セメント系材料利用によるカルサイトの沈殿	鉱物の沈殿	53		•					
С	ポルトランダイトが溶解しきった表面においては, C-S-H, C-S-A-H の溶解	鉱物・材料組成	54		•					
М	流水と接触していた面の浸食	領域の形状	55		•	۲	•			
С	経年変化によるセメントの変質	鉱物・材料組成	56							
С	イライト化、クロライト化等の鉄影響で鉱物組成の変化、密度の変化	間隙構造(ミクロ)	57							
С	鉱物組成の変化より、非膨潤性鉱物の割合が増えるとすき間が形成	鉱物・材料組成	58							
С	鉱物組成の変化に伴い緩衝材・埋め戻し材の間隙水組成が変化	鉱物・材料組成	59			٠				
С	処分場におけるキレート剤は、非常に安定な錯体を形成することにより、特定の元素の溶解	収着・沈殿・溶解反応	60							•
C C	皮を劇的に上昇させる可能性がある。 コロイドは様々な形で汚染物質の移行に影響を与えて可能性がある	収差,沈熙,浓留后内	61						<u> </u>	
C		収有・元殿・谷胜区心	01				•		<u> </u>	-
С	鋼材の腐食により浴出した成分により、OH-や Fe2+等のイオンの濃度勾配が形成されると 共に、二次鉱物が生成	鉱物の沈殿	62	•						
С	地球化学的プロセスは、収着、地下水流動、及びマトリクス拡散といった特性を変化させる	収着・沈殿・溶解反応	63				•			•
Н	ロックボルト等の金属からのガス発生による透気	液相・気相の移動速度	64							
Т	金属腐食のガスの発生による気相の生成と熱伝導率の変化	間隙構造(ミクロ)	65							
Н	金属腐食のガスの発生による気相の生成と水理への影響	間隙水圧	66	•						
М	気相が形成され、ガス圧が上昇するとオーバーパックの破損や変形、緩衝材が変形	領域の形状	67	•	•	٠				
Т	オーバーパック表面または腐食生成物の間隙にガスが蓄積による腐食速度と熱伝導に影響する速度の変化	熱特性	68	•						
Т	オーバーパック表面または腐食生成物の間隙にガスが蓄積による熱特性の変化	間隙構造(ミクロ)	69	•						
Н	放射線分解ガスの発生による水の押出し	間隙水圧	70	-						•
C	二酸化炭素、メタン中 C14 の移行	液相・気相の移動速度	71							•
M	ガス爆発による破壊	領域の形状	72							•
C		液相・気相の移動速度	73						<u> </u>	•
Т	放射能減衰に伴う発熱量低下	梁執 量	74							
M	微生物の右機物分解によろガス発生」水質変化による影響	鉱物・材料組成	75							-
Н	水麦ガスの発生による圧力の増加と母岩の亀裂状能の変化	間隙の構造(亀裂 新層構造)	76		-	-		•		
M	ったったったったったったったったった。 カジャーパーパックの 座合 ガスに上り 圧力 気配が生じ、 力学的に 破壊される	液相・気相の移動速度	77							
M	母岩の掘削に上り 広道が大気間放され大気圧に変動 広力状能が変化	問階水圧	78		•				<u> </u>	
Н	小人場の設置に と ろ 母 岩 及 び み び み び み び み び み び み び み び み び み び	問附の構造(魚裂) 新属構造)	79						<u> </u>	
M	全尾庭合に伴う体積変化と密度の変化	前家の構造(電波,前層構造) 鉱物・材料組成	80				•		<u> </u>	
M	立周肉及にドノ 仲倶友し こ 山友の友し	国相・海相・気相の密度	81							
M		領域の形状	82							
Н	立周肉及にドノド頃をして応力が必要し ロックボルトの庭合膨張にとり 国辺の母学の象裂状能が変化する	問題の構造(鱼烈 新属構造)	83	•						
	セメント系鉱物から溶出する接液水による母岩中に二次鉱物の生成(エトリンガイトの生成:	同际9.件但(电农,可信件但)	0.0				•		<u> </u>	
С	硫酸塩との反応) セメント系鉱物から溶出する接液水による緩衝材中に二次鉱物の生成(エトリンガイトの生		84 85		•	•	•		<u> </u>	
	0.1 硫酸温との反応) ほとんど動いていない水と接触していた面では表面のごく近傍でポルトランダイトが溶解								<u> </u>	
	し、替わりにカルサイトが沈殿している現象が確認されている。 セメント系鉱物の溶出に伴う塩素イオンとの反応によるフリーデル氏塩やその他の物質を生	動物・材料組成	86 97		•				<u> </u>	
M	成(体積膨張) セメント系鉱物の溶出に伴う塩素イオンとの反応によるフリーデル氏塩やその他の物質を生	減めの形状 鉱物・材料組成	88		•				<u> </u>	
	以(体積膨張)	ぶ おい 、 気 わ い な か あ あ あ あ あ あ あ あ あ あ あ あ あ あ あ あ あ あ	00		-				┣──	
	ロノノ 小ルドサツ亚属ル ジワルヘ九土による 返风 描話した御仕物に上るガスの発生		00						├──	
	1/20 た今ホコウまギュの発生	同际小山	3U 01		-				<u> </u>	
С С	1125 c 白 U H / 氷 / へ V 九 エ H3 を 今 む 水 苏 気 の 発 生	が10 ⁻ XVIロックジョンと反	0.0 2.T						├──	
С	レジェロシッボスレジルエー セメント系鉱物から溶出する接液水による母岩中に二次鉱物の生成(フリーデル氏塩の生成: 塩化物イオンとの反応)	1×10 ×10 ジャンジェス 鉱物の沈殿	93		•		•		<u> </u>	
С	セメント系鉱物から溶出する接液水による母岩中に二次鉱物の生成(ドロマイトの生成:マ グネシウムイオンとの反応)	鉱物の沈殿	94		•		•			
С	セメント系鉱物から溶出する接液水による緩衝材中に二次鉱物の生成(カルサイトの生成 : 炭酸塩との反応)	鉱物の沈殿	95		•	•				
С	セメント系鉱物から溶出する接液水による緩衝材中に二次鉱物の生成(ドロマイトの生成: マグネシウムイオンとの反応)	鉱物の沈殿	96		•	•				
С	 でハノトボ動物から浴口りる按次水による緩衝材中に二次動物の生成(フリーナル氏塩の生成:塩化物イオンとの反応) 	鉱物の沈殿	97		•					
Н	掘削工事により解放された坑道は大気圧に変動	間隙水圧	98	•	•	•	•	•	•	
М	掘削工事により解放された坑道には処分深度に依存する、水圧、地圧が発生する	間隙水圧	99	•		•	•	•	•	
Т	掘削工事により解放された坑道は、作業可能な温度に制御される	熱特性	100							
Т	廃棄体中での放射線による熱の発生	発熱量	101			•				•
Н	亀裂の連続性や断層による水の流れ	液相・気相の移動速度	102				\bullet			
Н	地下水のくみ上げによる深部地下水の移動	間隙水圧、液相・気相の移動速度	103				\bullet			
Н	地下水のくみ上げによる地表水の移動	間隙水圧、液相・気相の移動速度	104				ullet			

表 4.3-3 プロセスに関与する FEP と区分の対応(2/2)

区分	影響する特性	パラメ-タ	No	評価対象事象
<u>ب</u>	厚さ、形状	コンクリートの 変質・劣化	37	
ン メ		<u> </u>	45	セメントと地下水の反応にともなう定着材 の変質速度(劣化の深さ)
÷			56	
			6	
			7	│微生物活動に伴う定着材の変質速度(劣化 │の深さ)
			8 11	
	強度・特性	コンクリートの 変質・劣化	53	
			48	変質・劣化の形態
			15	
			49	収着性の変化
			9	
			52	材料の温度影響
			1 3	
	作用荷重	-	47	油砚物 :- 노 7 苯壬 /· ㅁ
			51	沈殿初による何里TFH
			87	
			67	ガス圧による荷重作用
			77	
			99	水圧、岩盤からの荷重作用
			30	
	副次的効果	コンクリ – ト表 面の変質	86	微生物活動に伴う表面の変化
		透水性への影響	9	間隙構造の変化の水理への影響
			12	
区分	影響する特性	パラメータ	No	評価対象事象
属	厚さ、形状	腐食の速度、腐食の形態	35	
金			62	
			87	金属の腐良速度、腐良形態、破膜の形成
			44	
			15	
			68	不飽和領域の発生、ガスの蓄積
			65	
			28 5	応力腐食割れの発生、微生物影響下での腐 食速度・形態
	強度・特性	材料の特性	1	力学特性の温度変化
			2	
			68	
			29	水素脆化による強度変化
	作用荷重	ガス発生による 荷重	98	ガス圧による作用荷重
-		-	-	-

表 4.3-4 区分毎の影響先とパラメータのまとめ

区分	影響する特性	パラメータ	No	評価対象事象
騷)	厚さ、形状	岩盤の変質・劣	83	亀裂状態や岩盤間隙構造の変化
](岩	強度・特性		89	
鉱牧			32	応力開放による変形
			78	
			99 15	水圧による変形
			21	
			98	
			99	
			53	鉱物組成の変化
			48 63	間隙構造の変化
			15	
			1	材料の温度影響
			4 98	
	 作用荷重	岩盤の変形	32	クリープによる作用荷重
			75	微生物によるガス発生からの荷重作用
			78	水圧、岩盤からの荷重作用
			99	
	副次的効果	岩盤表面、亀裂	9	微生物活動による影響
		表面の状態 透水性への影響	17	間隙構造の変化の水理への影響
			102	岩盤の透水構造や坑道からの排水の影 響
			103	Π
		泡度亦 化	104	泪皮 泪皮匀配
		温度 変化 (強度・特性に	4	血皮、血皮为 <u>能</u>
		同じ)	00	
			90	
区分	影響する特性	パラメータ	No	評価対象事象
()	厚さ・形状	形状・間隙構造 の変化	67	ガス圧による変形
も			12	流体による侵食、パイピングの発生
照上			14 55	
+			55 58	膨潤性の低下による変形
ト		透水性、粘性の	17	透水性の温度依存性
・解	 強度・特性	変112 変質速度	34	モンモリロナイトの溶解
 郎:			36	高p日プルーム影響
			40	二次鉱物の沈殿
			85	エトリンガイトの生成
			95	カルサイトの生成
			50	ドロマイトの生成
			96	
			97 57	ノッ-ナル氏温の生成 イライト化、クロライト化
			27	Ca 化
		処分深度や岩質	27 99	Ca 化 水圧・地圧の作用

区分	影響する特性	パラメータ	No	評価対象事象
物	強度・	素材の劣化	4	温度変化による素材の劣化
有機	特性		7	
			8	微生物活動に伴う素材の劣化

23

24 80 82

99

66

89

材料の膨張

処分深度や岩質 に伴う荷重

ガス発生

腐食膨張による作用荷重

水圧・地圧の作用

排水・不飽和化

副次的効果

		11	
作用荷重	荷重	41	ガス圧による荷重作用
		90	
		99	水圧 岩般からの荷重作田
		30	
副次的効果	シ − ト表面また は境界部	9	微生物活動に伴う表面の変化
	周辺のコンクリ - トの劣化	9	微生物影響による間隙構造の変化の水理へ の影響
		12	
	金属腐食	5	金属腐食への影響
	水質変化	6	地下水組成
	発熱	4	温度・温度勾配

酸化還元電位	35	地下水と緩衝材中鉱物の反応
核種移行特性	61	コロイドの発生
	9	微生物コロニーの発生
	75	有機物分解によるガス発生、地下水組成 の変質
発熱	101	廃棄体からの発熱
	1	ガラス溶解熱

59

11

 31
 廃棄体等からの荷重

15 不飽和領域の発生

16 不均質な再冠水

間隙水組成の変化 セメント変質による影響

構造物の自重

間隙水組成

間隙特性

副次的効果

4.3.4 ステップ3: 処分場構成要素のふるまい(環境変遷)の整理

前節で整理した「区分」と「地下構造物の安定性に影響する特性(形状・厚さ、強度特性、作 用荷重、副次的効果)」及び「評価するパラメータ」について、「4.2.2 時間及び空間スケール」に 示した各坑道の構成の変遷を考慮したときのプロセスを整理した。

(1) 評価対象とした各坑道の構成部材

評価対象とした坑道の構成要素の例を図 4.3-2 に示す(すべて坑道の構成要素については付属 書 4.3~4.6 に記載)。今回は、設置・敷設場所が判明できる要素 2 又は要素 3 のふるまいを評価 対象とした。なお、湧水等の地質環境によっては、排水工やグラウト施工等が必要となるが、こ こでは、現段階での専門家間による共有理解を目的とすることから、細部については設定せず、 トンネル技術者の意見を参考に設定した。

各坑道における掘削、支保敷設、埋め戻し等の時期と構成については、図 4.3-3 に示す。処分 坑道に関しては、パネル毎に工程が異なることから、パネル1とパネル6(最初に建設されるパ ネルと最後に建設されるパネル)を代表として評価することとした。

全ての坑道(アクセス立坑、アクセス斜坑・連絡坑道・主要坑道、処分坑道(パネル1)、処分 坑道(パネル6))は、共通に、繊維の混入及び金網により補強された吹付けコンクリート、ロッ クボルト、鋼製支保によって構成し、空洞内部は、作業環境に応じて換気され温度管理される。 アクセス立坑を除いた坑道では、インバート・路盤が設置され、操業期間中は重量物が通過する。 また、アクセス立坑及びアクセス斜坑・連絡坑道・主要坑道では、覆工は鉄筋により補強され、 建設時から処分場閉鎖までの期間、坑道が開放される。処分坑道(パネル1)は、坑道の掘削か ら閉鎖までの期間は長くて9年程度、処分孔は掘削・定置・埋め戻しまで2年程度であり、処分 坑道閉鎖後においても、周辺での建設・操業・閉鎖作業が50年程度継続する。処分坑道(パネル 6)は、坑道の掘削から閉鎖までの期間は長くて9年程度、処分孔は掘削・定置・埋め戻しまで2 年程度であり、処分坑道建設まで、周辺のパネルで建設・操業・閉鎖の工程が継続する。

(2) 処分場構成要素のふるまい(環境変遷)の整理

表 4.3-4 表 4.3-5 に示した「区分」毎の影響先とパラメータ、図 4.3-2 に例示した評価対象と した各坑道の構成(「区分」と要素 2 又は要素 3 の関係)及び図 4.3-3 に示す各坑道の構成要素 の時間変遷に基づき、処分場構成要素のふるまい(環境変遷)を整理した。例を表 4.3-5 まとめ る (すべての坑道のふるまい(環境変遷)については付属書 4.3~4.6 に記載)。表中各期間のプ ロセスに、温度(赤色)、水理(水色)、力学(灰色)、化学(黄色)を色分けしたタグを記載する とともに、ストーリーボードの図中にも色分けしたタグを示すものとした。

プロセスの記述については、決まった方法・ルールはなく、場合によっては化学の記述が力学 や水理と重複することも予想される。例えば、「大気からの酸素・炭酸ガスの供給」があったとき に「Ehの上昇」や「pHの変化」が起こり、「pH反応による間隙構造の変化等」が考えられるが、 どこまでプロセスを展開し、ストーリーボードに記述するかは、専門家によって判断が分かれる ところである。着目するプロセスについての取り扱いについては、今後、第2段階のストーリー ボードの検討におけるさまざまな分野専門家との議論において、必要に応じ見直しが行われるこ ととなる。



図 4.3-2 評価対象とした坑道の構成要素(アクセス立坑の例)

区分
金属
金属
金属
セメント鉱物
鉱物
鉱物
全層
工内
10歳初
並爲
金属
トリントな物
國的
セメント鉱物
鉱物
鉱物
有機物
金属
有機物
航场
到后初
鉱物
セメント鉱物
有機物
赵 隆·地加



(a) アクセス立坑における坑道の構造

(b) アクセス斜坑、主要坑道、連絡坑道の構造





(d) パネル6(坑道の構成はパネル1と同じ)

図 4.3-3 各坑道の構成要素の変遷

表 4.3-5 処分場構成	要素のふるまい(環境	変遷)(アクセス立坑の例)
---------------	------------	---------------

	アクセス立坑 - 支保工(要素1) - ロックボルト(要素 2) -芯材(要素 3)										
	区分 影響先 パラメータ 評価対象事象		振測直後	吹付けコンクリート施工後	覆エコンクリート施工後	埋戻し後					
区分			評価対象事象	11111111111111111111111111111111111111	0~数ヶ月程度	60~70年程度	~1000年程度まで				
				初期条件+期間①	期間②	期間③	期間④				
			金属の腐食速度、 腐食形態	坑道近傍の不飽和となる領域では大気から 酸素が供給される。坑道から距離のある領 域の Eh の変化は小さい。	ロックボルト抗の掘削により、ロックボルトが敷設される 近傍に大気が浸入する <mark>大気からの酸素・炭酸ガスの供給</mark>	岩盤側 (奥手方向) の酸素は消費され、ロックボルト芯 材の岩盤側の Eh は低下する <mark>大気からの酸素・炭酸ガスの供給</mark> 酸 <u>素の消費</u> Eh 勾配の発生	全体的に還元性に変動し電位差は解消される。還元環境で の水素発生型の腐食が生じる 水素ガスの発生				
			被膜の形成	_	吹付けコンクリ−トや定着材中の影響でロックボルトが敷 設される領域は高 pH 環境に変動する <mark>高 pH プルームの発生</mark>	坑道表面近傍は覆エコンクリ−ト影響により高 pH プ ルームが生じる。ロックボルト芯材の岩盤奥手方向で は、定着材中のセメント成分の溶出により pH は元の 地下水環境に回復する 高 pH プルーム源の枯渇	残存する酸素は消費され、定着材中のセメント成分は溶脱 し、被膜が形成される環境ではなくなる <mark>既存 pH での腐食形態</mark>				
	厚さ、 形状	腐食の速度 腐食の形態	、 腐食の速度	さ、 腐食の速度 K 腐食の形態	、 腐食の速度 腐食の形態	不飽和領域の 発生、ガスの蓄積	掘削面からの流水に伴い、岩盤の坑道面近 傍では不飽和領域が発生し、酸化性の雰囲 気に変動する	不飽和領域やガス蓄積部位では、水とロックボルトとの接 触が制限される <mark>不飽和領域の発生</mark> 地下水の流出	覆エコンクリート外側では、流水が継続することから 大気成分を含む不飽和領域は残存する <mark>不飽和領域の残存</mark> 地下水の流出	不飽和領域は再冠水し、水素発生型の腐食に腐食形態が変 化する。 <mark>不飽和領域の再冠水</mark> 水素ガスの発生	
			応力腐食割れ の発生	-	ロックボルト芯材の材質は炭素鋼であり、吹付けコンクリ - トが固化した後は圧縮場と考えられ応力腐食割れは発生 しにくい	同左	同左				
金属			微生物影響下での 腐食速度・形態	坑道開放前は、嫌気性の微生物が活動。掘 削により大気が流入し、その場に存在する 好気性の微生物が活性化する。	好気性の微生物活動が継続する。防水工や吹付けコンクリ -トや定着材中の有機物が微生物の栄養源となる <mark>好気性微生物の活動</mark>	覆エコンクリートにより大気成分の浸入は制限される ものの、好気性の微生物活動は継続する。覆エコンクリ ート中の有機物(繊維)は、微生物活動の栄養源となる ロックボルト芯材の岩盤奥手方向では、嫌気性微生物 が活動する 好気性微生物の活動 嫌気性微生物の活動	坑道埋め戻しにより、坑道からの大気成分の浸入は制限さ れ、酸素が消費された後には、嫌気性微生物の活動に戻る <mark>嫌気性微生物の活動</mark>				
	強度・	甘料石桂树	力学特性の温度変 化	坑道開放により坑道内は大気温に変化し、 温度勾配が発生する	温度勾配、セメントの水和熱、化学反応熱を起因とする温 度変化が生じる <mark>坑道温度と岩盤との温度差</mark>	セメント水和熱は数年でなくなる。坑道開放に伴う温 度勾配が継続する <mark>温度差による温度勾配の継続</mark>	埋戻し後は、地温環境に戻る <mark>地温への回復</mark>				
	特性	材料の特性	材料の特性	材料の特性	材料の特性 7.	生 ^{約400存住} 水素 度変 [.]	水素脆化による強 度変化	_	この期間の水素発生源は予想されない	岩盤側では還元環境下での腐食で発生する水素が作用 する <mark>水素の発生と吸収</mark>	ロックボルト全体に還元環境下での腐食で発生する水素が 作用する <mark>水素の発生と吸収</mark>
		ガス発生によ る荷重	ガス圧による作用 荷重	坑道の大気圧開放に伴い地下水中の溶存ガ スが気化するが、量的に荷重作用への影響 は予想されない	この期間の腐食に伴うガスの発生は予想されない	ロックボルト芯材の一部は、水素発生型の腐食が見込 まれるが、ロックボルトの金属量、腐食速度から考え有 意なガス圧の上昇は予想されない	対象とする岩盤の透気性及びロックボルトの金属量、腐食 速度から、有意なガス圧の上昇は予想されない				
	作用荷	材料の膨張	腐食膨張による作 田荷重	-	周辺の岩盤に作用する可能性があるが、期間の長さ及び腐 食形能から、この期間の有音か影響け予想されたい、	周辺の岩盤に作用する可能性がある 金属の庭食膨張に伴う周辺への作用荷重の発生	周辺の岩盤に作用する可能性がある 金属の庭食膨張に伴う周辺への作用荷重の発生				
	¥	処分深度や岩 質に伴う荷重	水圧・地圧の作用	坑道開放により、坑道近傍の岩盤に力学的 ゆるみ領域が生じる。これに水圧、地圧、 偏圧が作用する	坑道開放による水圧、地圧が作用。偏圧が生じる場合は、 ロックボルトにせん断応力が発生する ゆるみ・塑性領域の発生 偏圧によるせん断荷重の発生 水圧勾配の発生	坑道開放による水圧、地圧が作用。偏圧が生じる場合は、ロックボルトにせん断応力が発生する。岩盤のクリープ変形によってもせん断応力が発生する。 クリープによる塑性領域の拡大変形クリープによるせん断荷重の発生 水圧勾配の発生	広道閉鎖に伴い、水圧は初期条件に回復する。埋戻し材の 膨潤圧により地圧・応力環境は変化する。岩盤クリープが 継続する場合には作用荷重が変化する可能性がある 水圧の回復 埋め戻し材の再冠水 埋め戻し材からの膨潤圧				
	副次的 効果	ガス発生	排水・不飽和化		腐食に伴うガスの発生は予想されない	腐食に伴うガスの発生は岩盤奥手側で生じる	腐食に伴うガスの発生が生じる 水素ガスの発生				

4.3.5 ステップ4:ストーリーボードの作成

表 4.3-5 に示すプロセスとりまとめ方は、要素の空間的な位置が明確なことから、同じ「区分」 でも異なる要素の区別がしやすい利点がある。半面、坑道内では、同じ「区分」でも異なった要 素が重複して存在する場合がある。例えば、立坑の「区分」の「金属」では、ロックボルト芯材、 ベアリングプレート・ナット、H 形鋼、ボルト・ナット、金網が存在する。これらは、要素の形 状により時間的変化の程度が異なるものの、ほぼ孔壁近傍に位置し、ストーリーボード上同じプ ロセスで記載されることから、内容が冗長で、煩雑になる。したがって、直感的な分かりやすさ の観点から、要素毎に記載されたプロセスの抽出結果を、再度、表 4.3-6 に示すように、評価対 象事象として区分で統合した(すべての坑道の評価対象事象については付属書 4.7 に記載)。

以上をまとめ、ストーリーボードとして記載した(図 4.3·4)。ストーリーボードは、時間、処 分場スケールの状態、ニアフィールドスケールの状態、詳細スケールの状態、評価対象とする事 象が一覧できるように、一件一葉でまとめた。

上記の手法を適用し、回収可能性維持期間を設けない場合のストーリーボードを作成した(付 属書 4.8)。

表 4.3-6 評価対象事象 (アクセス立坑、時間区分②の例)

				吹付けコンクリ−ト施工後
区分	影響先	パラメータ	評価対象事象	0~数ヶ月程度
				大気からの酸素・炭酸ガスの供給
			金属の腐食速度、腐食形態 	掘削面及びロックボルト孔から大気成分が供給される
			被膜の形成	<mark>高 pH プルームの発生</mark> 吹付けコンクリートからの言っ日 プルームが発生する
	厚さ、	腐食の速度	 不飽和領域の	
~ 屋	形状	腐食の形態	発生、ガスの蓄積	地下水の流出に伴い不飽和領域が発生し、大気が不飽和領域に浸入
亚周			応力腐食割れ	
ロックボ				
ルト				好気性微生物活動により腐食速度・形態に影響を及ぼす地下水の pH と Eh が変化
鋼製支保	強度・	材料の特性	力学特性の温度変化	<mark>坑道温度と岩盤との温度差</mark> 佐道温度と岩盤温度差による温度勾配の発生と吹付けコンクリートの発熱
ム畑	特性	初科の符注		り、追加及こ右盗加及左による加及り100元王と吹付りコンフリートの元款
並相		ガス発生による荷重	ガス圧による作用荷重	
	作用荷	材料の膨張	腐食膨張による作用荷重	
	重	処分深度や岩質に伴う荷 重	水圧・地圧の作用	<u>いたういてにはないたち</u> 加速になっていたいが、 加速にはないたちた。 加速になっていたいでは、 加速になっていたいでは、 加速になっていたいでは、 加速になっていたいです。 加速になっていたいでは、 加速になっていたいでは、 加速になっていたいでは、 加速になっていたいでは、 加速になっていたいでは、 加速になっていたいでは、 加速になっていたいでは、 加速になっていたいでは、 加速になっていたいでは、 加速になっていたいでは、 加速になっていたいでは、 加速になっていたいでは、 加速になっていたいでは、 加速になっていたいでは、 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 加速になった。 のでのでのでのでのでのでのでのでのでのでのでのでのでのでのでのでのでのでので
	副次的	ガス発生		組成領域を形成する
	効果		が小小品相に	
			なうコンクリート材料の変質速	「フルカラ版力の平和」 地下水流による侵食
	厚さ、	コンクリートの変質・劣	度(劣化の深さ)	坑道面に接する吹付けコンクリートは、酸素・炭酸ガスの拡散により変質する
	形状	12	微生物活動に伴うコンクリート	<mark>好気性微生物の活動</mark> 好気性微生物活動により腐食速度・形能に影響を及ぼす地下水の nH と Fh が変化しコンクリート ℃化に
			材料の変質速度(劣化の深さ)	影響を与える
セメント 鉱物			変質・劣化の形態	アルカリ成分の中和 コンクリート成分の変質 た逆面に持まる吹付けコンクリートは酸素、炭酸ガスの拡散に上り変質し、力学的な没度が変化する
	強度・	コンクリートの変質・劣	 収着性の変化	が追回に接りる吹付りコンクリードは酸素・灰酸ガスの弧散により変更し、ガ子的な強度が変化する コンクリート鉱物組成変化
吹付けコ	特性	112	材料の温度影響	坑道温度と岩盤との温度差
۱. ۲			初代の温度が音	温度勾配の発生、セメントの水和熱はセメント鉱物と地下水の反応に影響を及ぼす
覆 エ コ ン	作用荷	_	ガス圧による荷重作用	-
7 9 - F	里		水圧、岩盤からの荷重作用	ゆるみ・塑性領域の発生 偏圧によるせん断荷重の発生 水圧勾配の発生
		コンクリ – ト素面の恋質	微生物活動に伴う素面の変化	微生物活動による間隙構造の変化 ロックボルト社中の微生物活動におけるコロニー生成け透水性及び定差材の鉱物組成の変化に客与する可
	副次的		「際工物加動に件り致固め交化	能性がある
	МЖ	透水性への影響	間隙構造の変化の水理への影響	表面の削剥による透水性変化 岩殻内部の流速が大きた位置(例えば、流水魚裂)においては、セメントが侵食される透水性が変化する
	強度・	素材の劣化		水和熱による発熱道と岩盤中の温度差による温度勾配が素材の劣化速度に影響する
	特性		 微生物活動に伴う素材の劣化	<u>版生物による有機物の分解、务10</u> 繊維、防水シ−ト、減水剤が栄養源となる微生物活動による有機物の分解は覆工・吹付けコンクリートの
				強度を低下させる
			ガス圧による荷重作田	微生物による有機物の分解とガスの発生 健全なセメント内部でのガスは、内部に萎着される、繊維を栄養源としたガスの発生は、ガス圧による荷
有機物	作用荷	荷重		重を発生させる
A45. A74	重		 水圧、岩盤からの荷重作用	岩盤からの荷重水圧による荷重
^{繊維} 防水シー			御告告げもためにまての支払	吹付けコンクリートは岩盤や水圧からの何重を受け、コンクリート内部の繊維にもせん断荷重か作用する
<u>۲</u>		シート表面よたは現芥部 国辺のコンクリートの劣		做生物活動に伴うコローーの先生により、現外部の間隙構造が変化する 微生物活動による nH Fbの変化
減水材		120コンクタードの第	間隙構造の変化の水理への影響	繊維が栄養源となる微生物の活動によっては、水質が変化し、覆エコンクリートの劣化速度を変化させる
1	副次的	金属腐食	金属腐食への影響	微生物活動による、pH、Ehの変化
1	効果			防水シートが栄養源となる微生物の活動によっては金属の腐食速度に影響を与える ###が営業酒となる微生物の活動にとっては、少無ポックリーアマンをリートの少少生産さず少させる
		水質変化	地下水組成	^{189/世ル} 不衰/ルとなる134-1700/山町にようては、小貝//変化し、復エコノクリートの为化迷度を変化させる <mark>微生物活動による、pH、Eh の変化</mark>
		 発熱	温度・温度勾配	<mark>坑道温度と岩盤との温度差</mark> 水和熱による発熱 水和熱による発熱が微生物活動による発熱
			 	ッヘヤ#☆による元☆ペレルエTz/ロ=ルによる元ポよッキ感しているものと了ぶされる 吹付けコンクリートからの荷重
			岩盤間隙構造の変化	金属部品の腐食膨張やセメントの変質・膨張に伴う岩盤への荷重は、亀裂幅等の間隙の状態を変化させる
			応力開放による変形	
	厚さ、			玉馬部品の腐良膨張やセメントの変質・膨張に伴っ石盤への荷重は、亀裂幅等の間隙の状態を変化させる 水圧による変形
	形仏 強度・	岩盤の変質・劣化、変形	水圧による変形	水圧勾配が坑道の変形に作用する。また、坑道壁面からの出水、坑道壁面近傍に不飽和領域を形成する
	特性		鉱物組成の変化	岩盤と高 pH プルームとの反応 四分はコンクリートカンの京 - リプリーノム出発な物からに広し、な物知され恋化させる
			間隙構造の変化	吹付りコングリートからの高 pH フルームは右盤鉱物と反応し、鉱物組成を変化させる 大気、または大気影響を受けた地下水は、岩盤の鉱物組成を変化させる
			材料の温度影響	<mark>抗道温度と岩盤との温度差</mark> 水和熱による発熱。
鉱物(岩盤)			クリープによる作用荷重	城工12/10 = 判、城12/12/10による元部の当形はひのるが、処理開放による温度変化が又能的と了恐される -
	作用荷		ガス圧による荷重作用	同左
	重	石 亜マタル	 水圧、岩盤からの荷重作用	塑性領域の発生 ゆるみ域の発生
		느 아 부고 아 아 우리 아 아 아 아 아 아 아 아 아 아 아 아 아 아 아 아		石盛の城間に汗い、石盛内の何里ハフンスが変化
		石盛衣囬、黾殺表面の状 態	微生物活動による影響	彩音源とし〔は → ンクリ──中の繊維や減水剤、防水ンートか考えられる 期間が短く <mark>微生物コロニー</mark> の発生には至らない
		ᆕᅶᄮᆣᆞᅎᄝᅇ		
	副次的 动 ^里	透水忹への影響 	间隙構這の変化の水埋への影響 	表面の削剥による透水性変化 亀裂の発生による透水性の変化
	刈木	地下水化学組成の変化	異なる領域の地下水の移動	<mark>地表水、深部地下水の引き込み</mark> <mark>岩盤と地下水との反応</mark> 坑道壁面からの出水に伴い、水頭が変化し、地表水の引き込みや深部地下水の引き込みが生じろ
		温度変化	19 座 19 座 万型	
		(強度・特性に同じ)		微生物活動、鉱物反応による発熱の可能性もあるが、坑道開放による温度変化が支配的と予想される



				電波気感で 岩盤間隙構造の変化	公長がコンプラードからの時重 金属部品の腐食影張やセメントの変質・影張に伴う岩盤への荷重は、亀裂幅等の間隙の状態を変化させる	
				応力開放による変形	歴性課題の発生 ゆるみ類の発生 金属部品の腐食能張やセメントの変質・影張に伴う岩盤への荷重は、亀裂幅等の閣隊の状態を変化させる	
	厚強	厚さ、形状 厳度・特性	岩盤の変質・ 劣化、変形	水圧による変形	水圧による変形 水圧勾配が筑道の変形に作用する。また、坑道壁面からの出水、坑道壁面近傍に不飽和領域を形成する	
				鉱物組成の変化 間隙構造の変化	密盤と高pHブルームとの反応 吹付けコノフリートからの高pHブルームは岩密鉱物と反応し、鉱物組成を変化させる 大気、または大気影響を受けた地下水は、岩盤の鉱物組成を変化させる	
	4 () () () () () () () () () (材料の温度影響	院道理度と書望との理度型 源生物活動、鉱物反応による発熱の可能性もあるが、坑道間放による湿度変化が支配的と予想される	
μα γ	(初(右盟)			クリープによる作用荷重	-	
	ft	作用荷重	岩盤の変形	ガス圧による荷重作用	-	
				水圧、岩盤からの荷重作用	歴性領域の発生 ゆるみ域の発生 岩盤の掘削に伴い、岩盤内の荷重バランスが変化	
			岩盤表面、亀 裂表面の状態	微生物活動による影響	<u>職生物コロニーの発生</u> 影響源としてはコンクリー中の繊維や現水剤、防水シートが考えられる	
			透水性への影 響	闇隙構造の変化の水理への影響	表面の創刻による透水性変化 値裂の発生による透水性の変化 岩盤内部の流速が大きな位置(例えば、岩盤からの地下水流出部)においては、セメントが侵食される	
	2	别次的劝果	地下水化学組 成の変化	異なる領域の地下水の移動	他表水、冥部地下水の引き込み 気道豊富からの出水に伴い、水類が変化し、地表水の引き込みや深部地下水の引き込みが生じる	
			温度変化 (強度・特性 に同じ)	温度、温度勾配	戦調調度と割益との温度 離生物活動、鉱物反応による発熱の可能性もあるが、抗道関放による温度変化が支配的と予想される	

図 4.3-4 ストーリーボードとりまとめ例(状態オプション2、回収可能性維持期間を設けない場合、アクセス立坑、期間②)

4.4 回収可能性維持期間を設けた場合のストーリーボード

4.4.1 回収可能性維持期間を設けたことによる時間枠の変更

前節では、設定したストーリーボード作成手順に従い、回収可能性維持期間を設けない場合の 建設・操業・閉鎖の工程を対象としたストーリーボードを作成した。ここでは、回収可能性維持 期間を設けた場合のストーリーボードを整理した。本事業では、基本方針の要求を踏まえ、回収 可能性維持期間を"回収/閉鎖措置の判断が可能な期間"と定義し、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、以下のように整理した(原環センター・原子力 機構, 2021)。

- 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)及び閉鎖後長期の安全性に有意な影響を及ぼすより も前となる。

回収可能性維持期間を設けない場合の建設・操業・閉鎖の工程に対して、回収可能性維持期間 を設けた場合の想定を図 4.4-1 に示す。回収可能性維持期間を設けた場合、アクセス立坑、アク セス斜坑・主要坑道・連絡坑道では、期間②までは回収可能性維持期間を設けない場合の操業と 同じで、期間③において、50~70 年程度の坑道開放期間が数百年程度に伸びる。また、処分坑道 (パネル 1) では、期間③までは回収可能性維持期間を設けない場合の操業と同じで、期間④に おいては、パネル 1 は閉鎖されているが、他のパネル(2~6)の建設・操業・閉鎖作業により坑 道開放期間が 50 年程度継続する。さらに、処分場閉鎖までの期間(数百年程度)、処分坑道以外 の坑道は開放状態になる。処分坑道(パネル 6) では、期間③までは回収可能性維持期間を設け ない場合の操業と同じで、期間④においては、パネル 6 の建設開始まで、他のパネル(1~5)の 建設・操業・閉鎖作業により坑道開放期間が 40 年程度継続する。さらに、処分場閉鎖までの期間 (数百年程度)、処分坑道以外の坑道は開放状態になる。

回収可能性維持期間の終了後、処分場を閉鎖する場合と、終了後または維持期間途中で回収を 実施する場合とでは評価すべき内容が異なる。前者の場合においては、埋め戻し・閉鎖されるこ とから埋め戻し時の安全性(開放状態にある坑道)と長期安全性が問題となる。すでに埋め戻さ れている坑道については、操業に関する安全性の考慮の必要はないため、処分場構成要素の機能 の変遷の評価の必要はなくなる。後者の場合、すでに埋め戻されている坑道については、坑道の 再掘削及び回収作業における安全性が新たに問題となる。再掘削時の坑道の安全性については、 既設の吹付コンクリートや覆工、ロックボルト、鋼製支保、岩盤の変質に影響されることから、 各要素に割り付けられている機能の評価が必要となる。ただし、廃棄体は回収されることから、 長期安全性に関する評価の必要はなくなる。

処分場を閉鎖する場合、長期に開放されている坑道は維持管理されることから、本来、これら 対策を踏まえた坑道の長期安定性の評価が必要となるが、ここでは、考慮しなかった。





4.4.2 回収可能性維持期間を設けた場合のストーリーボード

回収可能性維持期間を考慮した場合の処分場スケールの変遷と水理的変化に対する想定を図 4.4-2に示す。坑道の掘削と排水により地表面の水位が変化するとともに、動水勾配の変化に伴い 流速・流量が変化し、坑道内への地下水の引き込みにより地表水や深部地下水が坑道方向に移動 する。また、長期間、異なる性状の地下水と接触する岩盤は鉱物組成の変化や密度変化が生じ、 処分パネルの建設・操業・閉鎖に伴い処分場閉鎖までの期間、地下水流速や流向は動的に変化す る。回収可能性維持期間中、新たな坑道掘削はないことから、一部の坑道からの排水量に応じ定 常状態に変化する。さらに、処分場閉鎖後は水位の回復が見込まれるが処分場及びその近傍の岩 盤の透水性の変化に対応したものとなる。

前節を踏まえ、回収可能性維持期間を考慮した場合のストーリーボードを作成した(付属書 4.9)。また、表 4.4-1 表 4.4-2 に回収可能性維持期間を設けた場合のプロセスの相違例を示す(他 は付属書 4.9 にまとめる)。表に示すように、回収可能性維持期間を設けた場合、坑道解放時間が 長くことによる影響が追加された。

具体的には、全ての坑道共通で、金属材料の腐食に伴う周辺鉱物組成の変化、金属部品の機能 劣化、ひび割れの生成、金属部品のせん断、腐食による耐圧代の喪失が追加された。また、コン クリート中のコンクリートの変質、ひび割れの生成、高 pH プルーム源の枯渇が追加された。さ らに、岩盤クリープによる荷重の変化、金属部品のせん断、経過時間が長いことによる廃棄体か らの発熱、補強材の繊維の劣化によるコンクリートの強度低下、防水シート劣化による防水機能 の喪失、微生物活動によるコロニーの発生、地下水と母岩の反応による岩盤の変質が加えられた。 処分坑道 (パネル 1、パネル 6) では、これらに加え、埋め戻し材の変形、坑道の変形、緩衝材の 膨張、流出に起因するパイピング、アルカリプルーム、地下水との反応による緩衝材の鉱物組成 変化が加えられた。特にパネル 6 では、緩衝材、埋め戻し材の鉱物組成の変化に伴う膨潤圧の低 下が加えられた。

回収可能性維持期間を設けた場合(リファレンス:状態オプション2)のプロセス抽出結果及 びストーリーボードは付属書 4.9 にまとめる。



図 4.4-2 回収可能性維持期間を設けた場合の処分場スケールの変遷と水理的変化に対する想定

表 4.4-1 回収可能性維持期間を設けた場合のプロセスの相違(状態オプション2、アクセス立坑(期間③が延長される場合)の例)(1/2)

				覆エコンクリート施工後	
区分	影響先	パラメータ	評価対象事象	60~70年程度	数百年程度
					回収可能性維持期間③
			金属の腐食速度、腐食 形態	大気からの酸素・炭酸ガスの供給 酸素の消費 医h 勾配の 発生 ロックボルト芯材の岩盤奥手方向と手前に位置による相違、 綱制支保工けた道面の近傍に位置	同左 周辺鉱物組成の変化 <mark>能劣化</mark> 定着材、吹付けコンクリートのアルカリ成分 けた場する
	厚さ、形 状	腐食の速度 腐食の形態	被膜の形成	高 pH プルーム源の枯渇 高 pH プルーム源の枯渇 コンクリート内部の中性化、鉱物変質により高 p H 成分が枯 渇する。定着剤、吹付けコンクサート、覆工で使用量が異なる	高 pH プルーム源の枯渇 定着材、吹付けコンクリートのアルカリ成分 は枯渇する(覆工は不明)
			不飽和領域の 発生、ガスの蓄積 応力腐食割れの発生		四左
金属 ロック ボルト			微生物影響下での腐 食速度・形態	<mark>好気性微生物の活動</mark> 嫌気性微生物の活動 ロックボルト芯材の岩盤奥手方向では、嫌気性微生物が活動	同左
鋼製支保) 御度・特		力学特性の温度変化	<u>温度差による温度勾配の整碗</u> 坑道温度と岩盤温度差による温度勾配の発生と吹付けコンク リート、覆エコンクリートの発熱	
金網	性 性	材料の特性	水素脆化による強度 変化	<mark>水素の発生と吸収</mark> ロックボルト芯材の岩盤奥手方向は還元性腐食による水素を 吸収する	同左 ロックボルト芯材の岩盤奥手方向は還元性 腐食による水素を吸収する。酸化還元フロン トの移動の程度に依存
		ガス 発 生 に 」 ス 荷	ガス圧による作用荷	予想されない	予想されない
	作用荷重	材料の膨張	ェ 腐食膨張による作用 荷重	金属の腐食膨張に伴う周辺への作用荷重の発生	ひび割れの生成 金属の腐食膨張による
	1作用何里	処 分 深 度 や 岩 質 に 伴 う 荷重	水圧・地圧の作用	クリーブによる塑性領域の拡大変形 荷重の発生 水圧勾配は、不飽和領域の変化に伴い、拡大または縮小する。 クリーブによる岩盤変形は作用荷重を変化させる	同左 <u>金属部品のせん断</u> 腐食により減肉・劣化した金属部品は、荷重 の増加に伴いせん断される
	副次的効 果	ガス発生	排水・不飽和化	予想されない	予想されない
	厚さ、形 状 強度・特 性	コンクリー	セメントと地下水の 反応にともなうコン クリート材料の変質 速度(劣化の深さ)	アルカリ成分の中和 地下水流による侵食 坑道面に接する覆工・吹付けコンクリートは、酸素・炭酸ガス の拡散により中性化する。地下水流量の大きな部分では、コ ンクリート境界部が削剥される	<mark>コンクリートの変質</mark> <mark>地下水流による侵食</mark> 腐食により減肉
		化	微生物活動に伴うコ ンクリート材料の変 質速度(劣化の深さ)	好気性微生物の活動 ロックボルト芯材の岩盤奥手方向では、嫌気性微生物が活動、 坑道近傍では好気性微生物が活動し、定着材や吹付けコンク リート、覆エコンクリートの劣化・変質に影響する	同左
セメント		コンクリ – トの変質・劣 化	変質・劣化の形態	アルカリ成分の中和 コンクリート成分の変質 不飽和領 域での鉱物反応低下 地下水中の溶存する炭酸ガス、大気からの炭酸ガスは、セメント成分を中和しカルサイトを生成する。地下水中の硫酸塩 や硝酸塩もセメントの劣化を促進させコンクリート部が変質 し強度が変化する。不飽和領域では、変質の速度も異なる	同左 <mark>コンクリートの強度低下</mark>
· 鉱物			収着性の変化	コンクリート鉱物組成変化 鉱物組成の変化は放射性核種の収着性に影響を及ぼす	同左
定着材			材料の温度影響	 坑道温度と岩盤との温度差 和熱による温度上昇 温度勾配の発生、セメントの水和熱はセメント鉱物と地下水 の反応に影響を及ぼす 	同左 <u>廃棄体からの発熱 </u>
コンク リート 覆エコ			沈殿物による荷重作 用	膨張性鉱物の生成と荷重の発生 硫酸イオン、硝酸塩、塩化物とのセメント成分の反応、また骨 材中のシリカとの反応は、膨潤性物質を生成し、セメント材 料のひび割れの発生の原因となる	同左 ひび割れの生成
シクリート	作田荷重	_	ガス圧による荷重作		
	作用何重		・・・・ 水圧、岩盤からの荷重 作用	クリープによるせん断荷重の発生 岩盤保持性能低下による 荷重発生 岩盤のクリープ変形は吹付けコンクリートに荷重を作用させ る。ロックボルトや鋼製支保の機能が損なわれる場合には、 覆工・吹付けコンクリートへの荷重が増加する可能性がある	同左 クリープ変形量の考慮が必要
	副次的効	コンクリ – ト表面の変 質	微生物活動に伴う表 面の変化	微生物活動による間隙構造の変化 ロックボルト孔中や覆工・吹付けコンクリート表面や内部の 微生物活動におけるコロニー生成は透水性及び定着材の鉱物 組成の変化に寄与する可能性がある	同左 <mark>コロニーの発生</mark>
	*	透 水 性 へ の 影響	間隙構造の変化の水 理への影響	表面の削剥による透水性変化 岩盤内部の流速が大きな位置(例えば、流水亀裂)において は、セメントが侵食される透水性が変化する	同左
	 改立		温度変化による素材 の劣化	<mark>坑道温度と岩盤との温度差</mark> 水和熱による発熱道と岩盤中の温度差による温度勾配が素材 の劣化速度に影響する	同左 <mark>廃棄体からの発熱</mark> 水和熱の発生は初期、廃棄体の定置位置との 距離はあるが伝熱する
有機物 繊維	^{強度・} 特性	素材の劣化	微生物活動に伴う素 材の劣化	微生物による有機物の分解、劣化 繊維、防水シ – ト、減水剤が栄養源となる微生物活動による 有機物の分解は覆工・吹付けコンクリートの強度を低下させる	同左 コンクリートの強度低下 防水機能 の喪失
防 水 シ ート			ガス圧による荷重作 用	微生物による有機物の分解とガスの発生 健全なセメント内部でのガスは、内部に蓄積される。繊維を 栄養源としたガスの発生は、ガス圧による荷重を発生させる	同左
	作用荷重	荷重	水圧、岩盤からの荷重 作用	岩盤からの荷重 岩盤クリープによる荷重の変化 水圧に よる荷重 吹付けコンクリートは、岩盤や水圧からの荷重を受け、繊維 にもせん断荷重が作用する。吹付けコンクリートへの荷重は 岩盤のクリープ変形により変化する	同左

4-24

表 4.4-2 回収可能性維持期間を設けた場合のプロセスの違い(状態オプション2、アクセス立坑(期間③が延長される場合)の例)(2/2)

				覆エコンクリート施工後		
区分	影響先	パラメータ	評価対象事象	60~70年程度	数百年程度	
				期間③	回収可能性維持期間③	
		シ – ト 表 面 ま た は 境 界 部	微生物活動に伴う表 面の変化	微生物コロニーの発生 微生物活動に伴うコロニーの発生により、境界部の間隙構造が変化 する	同左	
		周辺のコン クリ – トの 劣化	間隙構造の変化の水 理への影響	<mark>微生物活動による、pH、Eh の変化</mark> 繊維が栄養源となる微生物の活動によっては、水質が変化し、覆工 コンクリートの劣化速度を変化させる	同左	
	副次的効 果	金属腐食	金属腐食への影響	<mark>微生物活動による、pH、Eh の変化</mark> 防水シ-トが栄養源となる微生物の活動によっては金属の腐食速 度に影響を与える	同左	
		水質変化	地下水組成	<mark>微生物活動による、pH、Eh の変化</mark> 繊維が栄養源となる微生物の活動によっては、水質が変化し、覆工 コンクリートの劣化速度を変化させる	同左 	
		発熱	温度・温度勾配	<mark>坑道温度と岩盤との温度差</mark> 水和熱による発熱 水和熱による発熱が微生物活動による発熱より卓越しているもの と予想される	同左 <mark>廃棄体からの発熱</mark> 	
	厚状強性 さ、 形		亀裂状態や 岩盤間隙構造の変化	<u>吹付けコンクリートからの荷重</u> 金属部品の腐食膨張やセメントの変質・膨張に伴う岩盤への荷重 は、亀裂幅等の間隙の状態を変化させる	同左	
			応力開放による変形	塑性領域の発生 金属部品の腐食膨張やセメントの変質・膨張に伴う岩盤への荷重 は、亀裂幅等の間隙の状態を変化させる	同左	
		岩盤の変質・ 劣化、変形	岩盤の変質・ 考化、変形	水圧による変形	<u>水圧による変形</u> 水圧勾配が坑道の変形に作用する。また、坑道壁面からの出水、坑 道壁面近傍に不飽和領域を形成する	同左
					鉱物組成の変化 間隙構造の変化	岩盤と高 pH プルームとの反応 吹付けコンクリートからの高 pH プルームは岩盤鉱物と反応し、鉱 物組成を変化させる 大気、または大気影響を受けた地下水は、岩盤の鉱物組成を変化さ せる
			材料の温度影響	<mark>坑道温度と岩盤との温度差</mark> 微生物活動、鉱物反応による発熱の可能性もあるが、坑道開放によ る温度変化が支配的と予想される	同左 <mark>廃棄体からの発熱</mark>	
弘初 (石 盤)			クリープによる作用 荷重	坑道の変形	同左	
	作用荷重	岩盤の変形	ガス圧による荷重作用	_	-	
			水圧、岩盤からの荷重 作用	塑性領域の発生 ゆるみ域の発生 岩盤の掘削に伴い、岩盤内の荷重バランスが変化	同左	
		岩盤表面、亀 裂 表 面 の 状 態	微生物活動による影 響	微生物コロニーの発生 影響源としてはコンクリ―中の繊維や減水剤、防水シートが考えら れる	同左	
	副次的効	透 水 性 へ の 影響	間隙構造の変化の水 理への影響	表面の削剥による透水性変化 岩盤内部の流速が大きな位置(例えば、岩盤からの地下水流出部) においては、セメントが侵食される	同左	
	果	地 下 水 化 学 組成の変化	異なる領域の地下水 の移動	<mark>地表水、深部地下水の引き込み</mark> 岩盤と地下水との反応 坑道壁面からの出水に伴い、水頭が変化し、地表水の引き込みや深 部地下水の引き込みが生じる	同左 <mark>岩盤の変質</mark>	
			温度変化 (強度・特性 に同じ)	温度、温度勾配	<mark>坑道温度と岩盤との温度差</mark> 微生物活動、鉱物反応による発熱の可能性もあるが、坑道開放によ る温度変化が支配的と予想される	同左 廃棄体からの発熱

4-25

4.5 異なる回収可能性維持の状態オプションの場合のストーリーボード

4.5.1 回収可能性維持期間を設けたことによる時間枠の変更

処分孔竪置き方式の廃棄体定置後の回収可能性維持期間中の処分坑道の状態としては、図 4.5-1 のような埋め戻し状態を想定し得る。回収可能性維持期間中の坑道の状態を表 4.5-1 にま とめる。

回収可能性維持の状態オプション1は、回収可能性維持期間内において処分坑道は開放された 状態にある。したがって、坑道からの排水が継続することが予想されることから、処分場スケー ルでの水位変化や、地表水や深部地下水の坑道周辺への引き込み量は大きくなる。また、地表水 や深部地下水の坑道周辺への引き込み量の増加に伴い、長期間の地下水と岩盤の反応量も増加し、 程度によっては、岩盤が不可逆的に変質することが予想される。また、期間③(状態オプション 2では、この状態が継続する期間は2年程度)の状態が、数百年程度継続することになる。処分 パネルの処分坑道のすべてが開放された状態にあることから、孔壁はこの間、空気にさらされる。 状態オプション1の場合、坑道のメンテナンスは可能となり、この間のメンテナンスで使用する 材料や工法は、維持期間経過後に坑道を閉鎖する場合の長期安全性に影響を及ぼす。回収可能性 維持期間中のメンテナンスの1つである排水の状況によっては、緩衝材や上部埋め戻し材の再冠 水過程に影響を与える(ここでは、状態オプション2と同様に再冠水するものと仮定した)。



図 4.5-1 回収可能性維持の状態オプションと工程

	アクセス立坑	アクセス斜坑	主要坑道	連絡坑道	処分坑道
レファレンス (状態オプション2)	開放	開放	開放	開放	埋め戻し材等で充 填された状態
状態オプション1	開放	開放	開放	開放	処分孔は廃棄体等 で充填され、上部 坑道は開放
状態オプション3	開放	開放	維持期間移行 時に埋め戻し	維持期間移行 時に埋め戻し	埋め戻し材等で充 填された状態

表 4.5-1 回収可能性維持期間中の坑道の状態

4.5.2 状態オプション 1、3 のストーリーボード

状態オプション1のストーリーボードを作成した(付属書 4.10)。また、表 4.5・2~表 4.5・4 に 状態オプション1の処分坑道で、回収可能性維持期間を設けない工程と設けた工程のときの考慮 すべきプロセスの相違についてまとめた。時間区分③の延長期間が延長されることによる(回収 可能性維持期間を設けない工程との相違)について、についてまとめた。処分坑道以外のアクセ ス立坑、アクセス斜坑、連絡坑道、主要坑道の回収可能性維持期間中の坑道の開放状態がオプシ ョン2と同様のため、ストーリーボードも同様となる。また、パネルの建設時期の相違は回収可 能性維持期間に比較して短いため、パネル 1、6 の建設期間の相違はないものとした。状態オプ ション1のストーリーボードでは、以下のプロセスが追加された。

- 酸素の要素への拡散(大気からの酸素の供給)による腐食の進行に伴う、ロックボルト、 鋼製支保の耐圧代の喪失
- 酸素の要素(岩盤を含む)への拡散による酸化還元フロントの拡大
- コンクリートを使用する要素からの高pHプルーム源の枯渇
- 長期間の地下水流との接触による地下水流による侵食
- コンクリートを使用する要素の変質・劣化に伴うひび割れの発生 コンクリートの剥落
- 岩盤のクリープの拡大に伴う塑性領域の拡大 ゆるみ域の拡大
- 長期間の地下水との接触による岩盤鉱物と地下水の反応 大気成分と岩盤鉱物の反応
- 岩盤のクリープの拡大による岩盤のクリープによる荷重の発生
- 岩盤のクリープ変形に伴う埋め戻し材の変形
- 緩衝材、埋め戻し材からの膨潤圧の発生
- 緩衝材、埋め戻し材の温度上昇、地下水との接触による鉱物組成変化
- 緩衝材、埋め戻し材の変質に伴う膨潤圧の低下
- オーバーパック近傍でのガス発生に伴うガス圧による緩衝材の変形

状態オプション3では、アクセス立坑、アクセス斜坑以外の坑道はすべて埋め戻される。した がって、この状態オプション3は回収可能性維持期間を設けない建設・操業・閉鎖における工程、 または状態オプション2における処分坑道以外の坑道が開放された状態で維持期間を考慮した工 程と同様なものとなる。具体的には、回収可能性維持期間を設けない建設・操業・閉鎖における 期間(処分場閉鎖後の期間、連絡坑道、主要坑道に対しては期間④、処分坑道に関しては期間⑤)、 または状態オプション2の期間(アクセス立坑及びアクセス斜坑の期間③)のストーリーボード の組み合わせとなる。 表 4.5-2 状態オプション1におけるプロセスの違い(処分坑道(期間③が延長される場合))(1/3)

				処分坑道 廃棄体定置後				
区分	影響先	パラメータ	評価対象事象	2 年程度				
			金属の腐食速度、腐食形態	<mark>大気からの酸素の供給</mark> <mark>酸素の消費</mark> <mark>Eh 勾配の発生</mark> ロックボルト芯材の岩盤奥手方向と手前に位置による相違、それ以外の鋼材は坑道面の近傍に位置する	同左 <mark>酸化性雰囲</mark>			
		应会会计应	被膜の形成	<mark>高 pH プルーム源の枯渇</mark> 高 pH プルームの供給 コンクリート内部の中性化、鉱物変質により高 p H 成分が枯渇する。定着剤、吹付けコンクリート、覆工で使 用量が異なる	<mark>高 pH プルーム源</mark> pH の低下による履			
金属 ロックボル ト	厚さ、形状	腐食の速度 腐食の形態	不飽和領域の 発生、ガスの蓄積	不飽和領域の残存 地下水の流出に伴い不飽和領域が発生し、大気が不飽和領域に浸入。覆工の施工にと伴い大気の浸入量が変化 する。飽和領域、不飽和領域での不均質な腐食の進行	<mark>不飽和領域の拡大</mark> 飽和領域、不飽和			
			応力腐食割れの発生	予想されない				
			微生物影響下での腐食速 度・形態	<mark>好気性微生物の活動</mark> <mark>嫌気性微生物の活動</mark> ロックボルト芯材の岩盤奥手方向では、嫌気性微生物が活動	<mark>好気性微生物の活</mark>			
鋼製支保	没庄,桂州	オミク作業	力学特性の温度変化	<mark>温度差による温度勾配の継続</mark> 「抗道温度と岩盤温度差による温度勾配の発生と吹付けコンクリートの発熱	廃棄体からの発熱			
金網	一」一次反・付任	初科の特性	水素脆化による強度変化	<mark>水素の発生と吸収</mark> ロックボルト芯材の岩盤奥手方向は還元性腐食による水素を吸収する	予想されない			
	作用荷重	ガス発生に よる荷重	ガス圧による作用荷重	予想されない	予想されない			
		材料の膨張 処分深度や 岩質に伴う 荷重	腐食膨張による作用荷重	金属の腐食膨張に伴う周辺への作用荷重の発生 ロックボルトの膨張は周辺の岩盤に、その他の鋼材はそれに接するコンクリートに荷重を与える	同左			
			水圧・地圧の作用	クリープによる塑性領域の拡大変形 クリープによるせん断荷重の発生 重量物移動によるせん断荷重の発 生 水圧勾配の発生 水圧勾配は、不飽和領域の変化に伴い拡大または縮小する。クリーブによる岩盤変形は作用荷重を変化させる	同左			
	副次的効果	ガス発生	排水・不飽和化	予想されない	予想されない			
	厚さ、形状	コンクリ <i>ー</i> トの変質・ 劣化	コンクリ- トの変質・	ー コンクリー 伏 トの変質・	セメントと地下水の反応 にともなうコンクリート 材料の変質速度(劣化の深 さ)	<mark>アルカリ成分の中和</mark> <mark>地下水流による侵食</mark> 坑道面に接する覆工・吹付けコンクリートは、酸素・炭酸ガスの拡散により中性化する。地下水流量の大きな 部分では、コンクリート境界部が削剥される	<u>高 pH プルーム源</u>	
			微生物活動に伴うコンク リート材料の変質速度 (劣 化の深さ)	<mark>好気性微生物の活動</mark> <mark>嫌気性微生物の活動</mark> ロックボルト芯材の岩盤奥手方向では、嫌気性微生物が活動、坑道近傍では好気性微生物が活動し、定着材や 吹付けコンクリート、覆エコンクリートの劣化・変質に影響する	<mark>好気性微生物の活</mark>			
セメント 鉱物		コンクリ - トの変質・ 劣化	変質・劣化の形態	アルカリ成分の中和 コンクリート成分の変質 不飽和領域での鉱物反応低下 地下水中の溶存する炭酸ガス、大気からの炭酸ガスは、セメント成分を中和しカルサイトを生成する。地下水 中の硫酸塩や硝酸塩もセメントの劣化を促進させコンクリート部が変質し強度が変化する。不飽和領域では、 変質の速度も異なる	<mark>高 pH プルーム</mark> 源 鉱物反応低下			
吹付けコン	強度・特性		トの変質・ 劣化	生 トの変質・ 劣化	度・特性 トの変質・ 劣化	収着性の変化	<mark>コンクリート鉱物組成変化</mark> 鉱物組成の変化は放射性核種の収着性に影響を及ぼす	同左
クリート 覆エコンク								材料の温度影響
リート インバート			沈殿物による荷重作用	膨張性鉱物の生成と荷重の発生 硫酸イオン、硝酸塩、塩化物とのセメント成分の反応、また骨材中のシリカとの反応は、膨潤性物質を生成 し、セメント材料のひび割れの発生の原因となる	同左 ひび割れの			
1	作用荷重	_	ガス圧による荷重作用	予想されない				
			水圧、岩盤からの荷重作用	クリープによるせん断荷重の発生 岩盤保持性能低下による荷重発生 重量物移動によるせん断荷重の発生 岩盤のクリープ変形は吹付けコンクリートに荷重を作用させる。ロックボルトや鋼製支保の機能が損なわれ る場合には、吹付けコンクリート、への荷重が増加する可能性がある	同左 岩盤の変位			
	副次的効果	コンクリ – ト表面の変 質	微生物活動に伴う表面の 変化	微生物活動による間隙構造の変化 ロックボルト孔中や覆工・吹付けコンクリート表面や内部の微生物活動におけるコロニー生成は透水性及び 定着材の鉱物組成の変化に寄与する可能性がある	コロニーの発生			
		透水性への 影響	間隙構造の変化の水理へ の影響	表面の削剥による透水性変化 岩盤内部の流速が大きな位置(例えば、流水亀裂)においては、セメントが侵食される透水性が変化する	同左			

表 4.5-3 状態オプション1におけるプロセスの違い(処分坑道(期間③が延長される場合))(2/3)

数百年間の延長
回収可能性オプション1 期間③
気での腐食
<mark>の枯渇</mark> ^氦 食被膜への効果
<mark>地下水の流出</mark> <mark>不均質な腐食の進行</mark> 領域での不均質な腐食の進行
5 4
の位海 地下水流による反良
動
「の枯渇」 <mark>コンクリート成分の変質</mark> 」 <mark>不飽和領域での</mark>
は初期のみ
発生 コンクリートのはく落
抗道の変位

				処分坑道 廃棄体定置後	
区分	影響先	パラメータ	評価対象事象	2 年程度	
				期間③	
	強度・	ませる少少	温度変化による素材の劣 化	<mark>坑道温度と岩盤との温度差</mark> 水和熱による発熱 廃棄体からの発熱 水和熱による発熱道と岩盤中の温度差による温度勾配のが素材の劣化速度に影響する	同セ
	特性	素材の多化	微生物活動に伴う素材の 劣化	<mark>微生物による有機物の分解、劣化</mark> 繊維、防水シ−ト、減水剤が栄養源となる微生物活動による有機物の分解は覆工・吹付けコンクリートの強度を低下させる	
	作田共手	# #	ガス圧による荷重作用	<u>微生物による有機物の分解とガスの発生</u> 健全なセメント内部でのガスは、内部に蓄積される。繊維を栄養源としたガスの発生は、ガス圧による荷重を発生させる	同
有機物	TF用何里	何里	水圧、岩盤からの荷重作用	岩盤からの荷重 岩盤クリープによる荷重の変化 水圧による荷重 吹付けコンクリートは、岩盤や水圧からの荷重を受け、繊維にもせん断荷重が作用する。吹付けコンクリートへの荷重は岩盤 のクリープ変形により変化する	
繊維 防水シート		 シ – ト表面 または境界 部 	微生物活動に伴う表面の 変化	<mark>微生物コロニーの発生</mark> 微生物活動に伴うコロニーの発生により、境界部の間隙構造が変化する	同
減水材	副次的効果	周辺のコン クリートの 劣化	間隙構造の変化の水理へ の影響	<mark>微生物活動による、pH、Eh の変化</mark> 繊維が栄養源となる微生物の活動によっては、水質が変化し、覆エコンクリ−トの劣化速度を変化させる	同
		金属腐食	金属腐食への影響	<mark>微生物活動による、pH、Eh の変化</mark> 防水シ-トが栄養源となる微生物の活動によっては金属の腐食速度に影響を与える	同
		水質変化	地下水組成	<mark>微生物活動による、pH、Eh の変化</mark> 繊維が栄養源となる微生物の活動によっては、水質が変化し、覆エコンクリ-トの劣化速度を変化させる	Ę
		発熱 温度・温度勾配 <mark>坑道温度と岩盤との温度差</mark> 水和熱による発熱 水和熱による発熱が微生物活動による発熱より卓越しているものと予想される			
			亀裂状態や 岩盤間隙構造の変化	<u>吹付けコンクリートからの荷重</u> 金属部品の腐食膨張やセメントの変質・膨張に伴う岩盤への荷重は、亀裂幅等の間隙の状態を変化させる	Ę
			応力開放による変形	<u>塑性領域の発生</u> 金属部品の腐食膨張やセメントの変質・膨張に伴う岩盤への荷重は、亀裂幅等の間隙の状態を変化させる	同
	厚さ、形状 強度・特性	岩 盤 の 変 質・劣化、変	水圧による変形	<u>水圧による変形</u> 水圧勾配が坑道の変形に作用する。また、坑道壁面からの出水、坑道壁面近傍に不飽和領域を形成する	同
		<i>л</i> и	鉱物組成の変化 間隙構造の変化	<mark>岩盤と高 pH プルームとの反応</mark> 吹付けコンクリートからの高 pH プルームは岩盤鉱物と反応し、鉱物組成を変化させる 大気、または大気影響を受けた地下水は、岩盤の鉱物組成を変化させる	醛
			材料の温度影響	<mark>坑道温度と岩盤との温度差</mark> <mark>廃棄体の発熱</mark> 微生物活動、鉱物反応による発熱の可能性もあるが、坑道開放による温度変化、廃棄体の定置にる温度変化が支配的と予想さ れる	同
鉱物(岩盤)			クリープによる作用荷重	予想されない(2年程度であることから)	ク
	作用荷重	岩盤の変形	ガス圧による荷重作用	予想されない	予
			水圧、岩盤からの荷重作用	塑性領域の発生 ゆるみ域の発生 岩盤の掘削に伴い、岩盤内の荷重バランスが変化	同
		岩盤表面、 亀裂表面の 状態	微生物活動による影響	<mark>微生物コロニーの発生</mark> 影響源としてはコンクリ―中の繊維や減水剤、防水シートが考えられる	同
	司法的社员	透水性への 影響	間隙構造の変化の水理へ の影響	表面の削剥による透水性変化 岩盤内部の流速が大きな位置(例えば、岩盤からの地下水流出部)においては、セメントが侵食される	Ē
	副次的効果 	地下水化学 組成の変化	異なる領域の地下水の移 動	地表水、深部地下水の引き込み 岩盤と地下水との反応 坑道壁面からの出水に伴い、水頭が変化し、地表水の引き込みや深部地下水の引き込みが生じる	同
		温度変化 (強度・特 性に同じ)	温度、温度勾配	<mark>坑道温度と岩盤との温度差</mark> <mark>廃棄体の発熱</mark> 微生物活動、鉱物反応による発熱の可能性もあるが、坑道開放による温度変化、廃棄体の定置にる温度変化が支配的と予想さ れる	同

表 4.5-4 状態オプション1におけるプロセスの違い(処分坑道(期間③が延長される場合))(3/3)

数百年間の延長
回収可能性オプション1 期間③
メントの水和熱は初期のみ
左 強化繊維の劣化 防水シートの機能喪失
左
左
左
_
左
左
左 左
左
_
E
化還元フロントの拡大 岩盤の鉱物組成変化
+
左
リープによる変形 <u></u> 相されない
左
左
左 岩盤と地下水との反応 岩盤の劣化
+
4

				処分坑道 廃棄体定置後					
区分	影響先	パラメータ	評価対象事象	2 年程度					
				期間③					
			間隙構造の変化	<u>埋め戻し材の変形</u> 金属部品の腐食膨張やセメントの変質・膨張に伴う岩盤への荷重は、岩盤の変位を伴い緩衝材や埋め戻し材の変形に影響する	同左				
鉱物(緩衝材)			応力開放による変形	塑性領域の発生 ゆるみ域の発生 金属部品の腐食膨張やセメントの変質・膨張に伴う岩盤への荷重は、埋め戻し材を変形させ力学的バランスを保つ 岩盤の変形に伴い埋め戻し材、緩衝材も変形する	同左				
	厚さ、形状 強度・特性	変質・劣化、 変形	水圧による変形	<u>水圧による変形</u> 水圧勾配が坑道の変形に作用する。また、坑道壁面からの出水、坑道壁面近傍に不飽和領域を形成する	同左				
			鉱物組成の変化 間隙構造の変化	地下水の接触により鉱物組成変化が始まるが、期間が短く有意な変化とはならない 埋め戻し材、緩衝材は、アルカリプルームにより鉱物組成が変化する。また、地下水との反応が継続し、鉱物組成を変 化させる	鉱物組成				
			材料の温度影響	<mark>廃棄体の発熱</mark> 水和熱は初期の数年で収束し、長期的には廃棄体の発熱が優位となる	同左				
		変形	クリープによる作用荷重	埋め戻し材も岩盤の変形量に応じて変形するが期間が短く坑道の変形影響は有意とはならない	<u> 坑道の変</u> 岩盤の変				
				ガス圧による荷重作用	予想されない	予想され			
	作用荷重		水圧、岩盤からの荷重作用	塑性領域の発生 対象期間が短く、有意な影響とはならない	同左				
				粘土鉱物の膨潤	<u>膨潤圧の発生</u> 緩衝材、埋め戻し材の鉱物組成変化や密度変化は膨潤圧の低下の原因となる	同左変			
		表面の状態	微生物活動による影響	<mark>微生物コロニーの発生</mark> 影響源としてはコンクリ―中の繊維や減水剤、防水シートが考えられる	同左				
		透水性への 影響	間隙構造の変化の水理へ の影響	緩衝材の流出 埋め戻し材の流出 不均質な膨潤 パイピング 緩衝材や埋め戻し材の流出	同左				
	副次的効果	地下水化学 組成の変化	異なる領域の地下水の移 動	<mark>地表水、深部地下水の引き込み</mark> <mark>地下水との反応</mark> <mark>鉱物組成変化</mark> 坑道壁面からの出水に伴い、水頭が変化し、地表水の引き込みや深部地下水の引き込みが生じる	同左				
		<u>温度変化</u> (強度・特 性に同じ)	温度、温度勾配	<mark>廃棄体の発熱</mark> 廃棄体の発熱が優位となる	同左				

4.6 廃棄体全量を回収する場合のプロセス

4.6.1 廃棄体全量を回収する場合のプロセスとその影響

回収可能性維持期間中または終了後に廃棄体全量を回収する場合には、長期安全性への影響を 考慮する必要がなくなり、回収可能性維持期間途中までの環境変遷と坑道の再掘削等の回収作業 に係る安全性を考慮する必要がある。したがって、回収可能性維持期間中または終了後に廃棄体 全量を回収するストーリーボード上のプロセスは、回収可能性維持期間を設けない場合と同等と なるが、プロセスによる影響が変わってくる。

表 4.6-1 に、回収可能性維持期間中または終了後に廃棄体全量を回収する場合のプロセスとその影響を示す。ここでは、数百年時間経過後に回収することを想定した。

例えば、回収可能性維持期間中の立坑では、坑道が開放された状態にある。その際、金属部品 (金網)の腐食は継続し、吹付けコンクリートのひび割れが生じる。しかしながら、吹付けコン クリートは覆工により囲まれていることから坑道の内部に直接の影響はない。覆工コンクリート は、鋼製支保の腐食により作用荷重が発生する。鋼製支保の腐食の増加は覆工コンクリートへの 作用荷重の増加となり、長期的には覆工コンクリートの破壊につながり坑道の共用性の低下、坑 道内での作業の安全性の低下となる。

このような考慮するプロセスやシナリオについては、1 つのプロセスのみならず、複数のプロ セスが同時に、または、連鎖して坑道の安定性に影響を及ぼすことから、要素の機能変遷も考慮 した連成現象として捉え、定量化する必要がある。

4.6.2 状態オプション間の比較

4.5 で示したように、回収可能性維持の状態オプション間では坑道の開放状態が異なる。開放 された状態で回収可能性維持期間を経過する坑道においては、その後、処分場閉鎖、または回収 時までの坑道の利用が前提であることから、坑道の維持管理がなされるものと考えられる。坑道 が閉鎖された状態で回収可能性維持期間を経過する坑道では、大気中からの酸素や炭酸ガスの影 響が少なくなるものと予想され、構造の安定性に寄与する要素の機能の劣化の進行は抑えられる 可能性がある。ここでは、抽出されたプロセスを参考に、状態オプション間の相違についてまと めた。状態オプションの相違に伴う構造的な相違は表 4.5・1 に示す通り、アクセス立坑、アクセ ス斜坑はオプションによらずに同じ状態、主要坑道及び連絡坑道は、状態オプション3のみ埋め 戻さ、処分坑道は状態オプション1のみ開放された状態になる。坑道の開放量から推測して、ニ アフィールド近傍の地下水の流速・流向への影響の度合いは以下の順序となる。これは、坑道壁 面から拡散する酸素や炭酸ガスの量も同様となることが考えられる。

状態オプション 3 < 状態オプション 2 < 状態オプション 1

そのため、鉱物組成の変化や地下水による緩衝材部の浸食の可能性は状態オプション1が最も懸 念されるが、上述のように状態オプション1 では坑道の維持管理がなされるものと予想される。 状態オプション2、3 では坑道が埋め戻されることから、坑道周辺の岩盤や緩衝材、埋め戻し材 への水理的、化学的影響は状態オプション1 に比較して小さくなるものと予想される。ただし、 再掘削時に周辺の劣化がどの程度進んでいるかを評価し、再掘削時の安全性を担保する必要があ る。したがって、回収可能性維持の状態オプション間の比較の際には、これらを考慮したシナリ オ化や定量化の必要がある。

考慮するプロセス	影響
アクセス立坑:坑道は回収可能性維持期間中開放	
・金属材料の腐食に伴う周辺鉱物組成の変化 金属部品の機能劣化	・透水性、坑道の変形・崩落
・金属材料の腐食に伴うひび割れの生成 金属部品のせん断 腐食による耐圧代の喪失	・透水性、坑道の変形・崩落
・コンクリート中の <mark>コンクリートの変質</mark> びび割れの生成	・透水性、坑道壁面の剥離
・コンクリート中の <mark>高 pH プルーム源の枯渇</mark>	
・クリープの進展による岩盤クリープによる荷重の変化 金属部品のせん断	・透水性、岩盤の変形、崩落
・経過時間が長いことによる <mark>廃棄体からの発熱</mark>	
・補強材の繊維の劣化によるコンクリートの強度低下	・透水性、坑道の変形・崩落
・防水シート劣化による <mark>防水機能の喪失</mark>	・坑道内への流水
・微生物活動による <mark>コロニーの発生</mark>	·透水性
・地下水と母岩の反応による岩盤の変質	·透水性、強度低下
アクセス斜坑、連絡坑道、主要坑道:坑道は回収可能性維持期間中開放	
・金属材料の腐食に伴う <mark>周辺鉱物組成の変化</mark> 金属部品の機能劣化	・透水性、坑道・路盤の変形・崩落
・金属材料の腐食に伴うひび割れの生成 金属部品のせん断 腐食による耐圧代の喪失	・透水性、坑道・路盤の変形・崩落
・コンクリート中の <mark>コンクリートの変質</mark> ひび割れの生成	・透水性、坑道壁面の剥離
・コンクリート中の <mark>高 pH プルーム源の枯渇</mark>	
・クリープの進展による岩盤クリープによる荷重の変化 金属部品のせん断	・透水性、坑道・路盤の変形・崩落
・経過時間が長いことによる <mark>廃棄体からの発熱</mark>	
・補強材の繊維の劣化によるコンクリートの強度低下	・透水性、坑道の変形・崩落
・防水シート劣化による <mark>防水機能の喪失</mark>	・坑道内への流水
・微生物活動による <mark>コロニーの発生</mark>	
・地下水と母岩の反応による岩盤の変質	·透水性、強度低下
処分坑道:坑道は回収可能性維持期間中開放	
・金属材料の腐食に伴う <mark>周辺鉱物組成の変化</mark> 金属部品の機能劣化	・透水性、掘削時の崩落
・金属材料の腐食に伴うひび割れの生成 金属部品のせん断 腐食による耐圧代の喪失	・透水性、掘削時の崩落
・コンクリート中のコンクリートの変質 ひび割れの生成	・透水性、掘削時の剥離
・コンクリート中の <mark>高 pH プルーム源の枯渇</mark>	
・クリープの進展による岩盤クリープによる荷重の変化 金属部品のせん断	・透水性、掘削時の崩落
・クリープの進展による埋め戻し材の変形 坑道の変形	
・経過時間が長いことによる <mark>廃棄体からの発熱</mark>	·透水性
・補強材の繊維の劣化によるコンクリートの強度低下	・坑道の変形・崩落
・防水シート劣化による <mark>防水機能の喪失</mark>	・透水性、坑道内への流水
・緩衝材の膨張、流出に起因する <mark>パイピング</mark>	·透水性、密度低下
・微生物活動による <mark>コロニーの発生</mark>	·透水性
・地下水と母岩の反応による <mark>岩盤の変質</mark>	·透水性、強度低下
・アルカリプルーム、地下水との反応による緩衝材の鉱物組成変化	・透水性、緩衝材物性の変化
・緩衝材、埋め戻し材の鉱物組成の変化に伴う膨潤圧の低下	・透水性、緩衝材物性の変化

表 4.6-1 回収可能性維持期間中または終了後に廃棄体全量を回収する場合に考慮するプロセスとその影響



4.7 本章の成果と今後の展開

4.7.1 本章の成果

回収可能性維持期間と操業期間中及び閉鎖後長期の安全性が確保される期間に、回収可能性の 維持に伴う安全性への影響の定量化手法の整備として、既に NUMO によって閉鎖後長期の安全 評価に用いられているストーリーボードの適用を試みた。

昨年度までに、回収可能性の維持に伴う安全性への影響の定量化手法の整備に向けたストーリ ーボードの全体開発計画を作成し、それに基づき、建設・操業の工程分析、国内外の FEP データ ベースの調査、回収可能性の維持に伴う影響を受ける期間や影響が波及する期間のタイムスケー ル、構成要素、部材、使用材料を含めた空間スケールの把握を行った。

本年度は、処分場の建設・操業の期間及び処分場閉鎖から再冠水完了までの期間を対象に、第 1段階のストーリーボードの作成方法を提案するとともに、その方法に従いストーリーボードを 作成し、回収可能性維持期間を設けた場合や回収可能性維持の状態オプションの異なる場合につ いて、回収可能性維持期間を設けない場合の工程との違いを提示した。

ストーリーボードの作成方法の提案及びストーリーボードの作成については、客観性、追跡性 及び透明性を確保する観点から、土木学会、OECD/NEA 等が監修する複数の専門家による議論 がなされた資料を用いるとともに、ストーリーボード作成に際し、判断に至ったプロセスが追跡 できるよう処分場構成要素のふるまい(環境変遷)を坑道別、時間別の表をまとめ、取り扱うプ ロセスの分野(熱(T)、水理(H)、力学(M)、化学(C))に偏りがないことを示した。また、 ストーリーボード作成経験がある研究者を含め、第三者からの客観的な意見を取り入れた。さら に、回収可能性維持期間を設けたことにより、坑道解放時間が長くことによる影響や回収可能性 維持の状態オプションの異なる場合に現れるプロセスの違いについては、ストーリーボードとと もに比較表によって提示することで、網羅的に視覚的に示すことができた。以上のように、作成 方法とともに第1段階のストーリーボードを提示することができ、本年度の目標は当初の予定通 り達成できた。

4.7.2 今後の展開

今後、第2段階のストーリーボード作成に向け、さまざまな分野専門家との議論に基づき、第 1段階のストーリーボードを改善する。さらに、ストーリーボードを使用した専門家の議論を通 して、シナリオ化や重要な事象の抽出を行い、坑道そのものが機能を喪失するか否かといった、 要素の変遷に係る定量化手法の構築やデータの収集を実施していく。

参考文献

- 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
- 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.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター・日本原子力研究開発機構,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,2021.
- 原子力発電環境整備機構,地層処分事業のための安全評価技術の開発(I)-シナリオ構築技術の高度 化, NUMO-TR-10-09, 2011.
- 原子力発電環境整備機構,包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の実現―適切なサ イト選定に向けたセーフティケースの構築―,2021.
- 土木学会,トンネル標準示方書[共通編/山岳工法編],土木学会 トンネル工学委員会,2016年 度制定,丸善出版,2016.
- 株式会社 日建設計, 幌延深地層研究計画 地下施設実施設計--設計報告書--(核燃料サイクル開発 機構 契約業務報告書), JNC TJ5410 2005-002, 2005.
- 農業土木事業協会,農業水利施設の機能保全の手引き,平成27年8月,2015.

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 背景及び目的

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、並びに定置後の過渡的期間における人工バリアの 状態変遷など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並びに定量 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など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	н	(トレードオフの関係にある4項日)	処分孔竪置き方式 横置き・PEM方式					方式
定里109~2項			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つの小項目	(2)	②回収作業時の安全性への影響(回収を実施する場合)						
		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

坑道開放状態下の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、本検討の初年度で あった 2020 年は、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 (図 5.2-1)。

2021年は、坑道内に定置したサンプルを採取し、それを用いた室内物性試験や詳細な分析などを実施するとともに、2020年の初期状態での試験結果と比較・検討した。



箱吹きした吹付けコンクリートからのコアサンプル採取

図 5.2-1 試験イメージ

5.2.1 実施内容

(1) 供試体の養生状況

図 5.2・2 に 2020 年に幌延深地層研究所内に定置した供試体の状況を示す。定置は 2021 年 1 月 14 日から開始している。コンクリート供試体は、幌延の試験坑道の支保工として用いられている HFSC(低アルカリ性コンクリート)であり、すべて φ 5 cm×高さ 10 cmの大きさで統一してい る。坑道開放状態におけるコンクリート支保工の状況を考慮し、気乾状態と水浸状態の 2 種類の 状態下で養生を行い、かつ定置装置には、水浸状態の供試体は常に新鮮な地下水中に水没するよ うな工夫をしている。

図 5.2-3 に養生環境の経時変化を示す。気中供試体は、季節変動や他の原位置試験などの影響 はあるものの気温が 15~25 ℃、相対湿度が 30~80%、水温が 10~20 ℃程度の環境下で養生し ている状況となっている。

図 5.2-4 は、後述の試験・分析に用いたサンプルの採取方法を示している。養生開始後最初の サンプリングとなるため、今後の試験・分析の参考となるよう以下に配慮して採取した

・採取場所は定置装置内で場所による供試体の変化の影響の有無が確認できるようにする。

・特に水中養生供試体は、定置装置内で地下水の流入・流出があるため、その影響も確認で きるようにする。

なお、水中養生などで用いている原位置地下水の分析も実施した。結果を表 5.2-1 に示す。



a) 供試体養生用定置装置設置場所(幌延深地層研究所深度 350m 試験坑道 3 内)



b) 定置装置の概要と供試体養生状況

図 5.2-2 幌延深地層研究所内での吹付けコンクリート供試体養生状況



図 5.2-3 養生環境の気温、湿度、水温の経時変化



周回坑道側



a) 気中養生供試体のサンプリング





b) 水中養生供試体のサンプリング

図 5.2-4 定置装置からのサンプル採取(2021年)

=+***1 夕	.11	Na	К	Ca	Mg	Si	AI	SO4 ²⁻	Cl⁻	HCO ₃ [−]
<u> </u> 武科名	рН	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)						
地下水① (槽流入前)	7.9	5100	82	49	74	21	<0.5	630	6500	870
地下水② (槽内上手前)	8.0	5200	85	52	76	22	<0.5	630	6800	840
地下水③ (槽内上奥)	7.9	5300	86	50	75	22	<0.5	640	6800	830
地下水④ (槽内下手前)	8.2	5900	97	52	82	23	<0.5	700	7900	910
地下水⑤ (槽内下奥)	8.2	5900	95	52	82	23	<0.5	710	7600	910
地下水⑥ (槽流出後)	8.2	5800	95	52	82	23	<0.5	710	7500	900

表 5.2-1 地下水分析結果

(2) 試験概要

前項でサンプリングしたコンクリート供試体を用いて、室内物性試験と各種分析を実施した。 試験項目一覧を表 5.2-2 に示す。また、試験に供する供試体の概要を図 5.2-5 に示す。弾性波測 定は、 ϕ 50 mm×H100 mmの供試体を用いて測定し、同一試料を用いて一軸圧縮試験を行った。 圧裂試験及び空隙率測定、水和物などの分析は同一の供試体を用いて実施した。高さ半分に供試 体を切断し、 ϕ 50 mm×H50 mmの供試体で圧裂試験を行い、もう一方の供試体から空隙率、水 和物定量及び SEM/EDS 用試料を採取した。透水試験については、 ϕ 50 mm×H100 mmの供試 体を半分に切断し、暴露面から通水するケースと切断面から通水ケースを実施した。

	試験項目	寸法	合計試料数							
物性試験	一軸圧縮試験	ϕ 50 mm × H100 mm	18							
	弾性波測定(P、S 波)	ϕ 50 mm × H100 mm	18							
	透水試験	ϕ 50 mm × H50 mm	18							
	圧裂試験	ϕ 50 mm × H50 mm	18							
	空隙率測定	2.5~5 mm 角のモルタル部	18							
分析	面分析測定試料用供試体作製	20 × 20 × 10 mm	18							
	EPMA による面分析	上記試料による分析	18							
	SEM/EDS による分析	上記試料及び破断面による分析	12							
	水和生成物の定量分析	モルタル部を必要量採取	6							
	地下水の分析	_	6							

表 5.2-2 試験項目一覧



図 5.2-5 試験用供試体の作成方法

(3) 試験方法

(a) 分析対象試料

コンクリート供試体は、気中養生及び水中養生試料ともに各 24 試料である。供試体受け入れ時 の写真を図 5.2-6 に示す。このうち 23 検体を気中養生及び水中養生試料ともに室内試験と分析 に用い、残り1 試料は、フェノールフタレインによる試料状態の確認及び透水試験の予備検討に 用いた。



a) 気中養生試料



b) 水中養生試料 図 5.2-6 受入れ時の供試体の状況

(b) フェノールフタレインの呈色による試料状態の確認

供試体は、幌延深地層研究所坑道内の水中及び気中で養生されていたものであり、供試体表層 部分においては、中性化やセメント成分の溶出などの変質が生じていることが想定された。この 場合、強度試験などの1検体の供試体をすべて用いる試験においては、大きな影響はないと考え られるが、空隙率測定や SEM/EDS による分析などの小さい試料を用いて行う分析については、 分析対象とする試料の採取位置により、測定結果に大きく影響される可能性が考えられため、分 析試料の採取位置などを決定するために、フェノールフタレインの呈色の状態から各試料の表層 の変質状態を確認した。

具体的には、円柱供試体の1本を高さ方向で半分に切断したものを割裂し、断面にフェノール フタレインを噴霧した。その後、呈色の様子を観察し、試料の変質状態を判断した。切断した半 分の試料については後述の透水試験の予備検討に用いた。フェノールフタレインにより呈色した 試料の断面写真を図 5.2-7 に示す。なお、同図の写真は骨材などを識別しやすいように色調を加 工している。

気中養生した試料は、表層数 mm 程度の範囲にフェノールフタレインが赤く呈色しない領域が 確認された。赤く呈色しない領域は、気中養生中に中性化した範囲である。水中養生の場合は、 赤く呈色しない範囲は1 mm 以下とごく狭い領域であることが確認された。水中養生の場合は、 中性化の他にセメント成分の溶脱による変質も想定されたが、いずれの変質もほとんど進んでい ないものと考えられる。

ここで、コンクリートの中性化深さは、経過時間の平方根に比例する以下の式で表される。

 $X = A \sqrt{t}$

ここで、X:中性化深さ,t:経過時間,A:中性化速度係数

中性化速度係数については、参考文献(土木学会,2018)において普通ポルトランドセメント (以下、OPC と称す)を用いたコンクリートなどの実験データに基づいた回帰式で表されている。 2020年に作成したコンクリート供試体の、コンクリート配合の単位水量及び単位結合材量から中 性化深さを予測すると約4mmと算出される。今回の気中養生のHFSC コンクリートも表層から 3mm 程度の中性化深さであると判断され、OPC コンクリートと比較しても、中性化の進行が速 いなどの特異的な現象は生じていないものと考えられる。



(a) 気中養生の供試体[色調を加工]



⁽b) 水中養生の供試体[色調を加工]

図 5.2-7 フェノールフタレインにより呈色した試料の断面写真

(c) 室内物性試験・分析項目と数量

前項で述べた通り、供試体の変質状況を確認した結果、水中養生では、養生中の中性化及びセ メント成分の溶脱はほとんど認められないものの、気中養生では表層約3mmが中性化している ものと判断された。このため、図 5.2-5 に示すように、小さい試料を用いて分析を実施する空隙 率測定、SEM/EDS分析及び水和物定量については、表層から5mm程度から試料を採取する変 質部と内部から試料を採取する健全部に分けて分析を実施した。また、透水試験については、暴 露面から透水させた場合と切断した健全面から透水させた場合に分けて試験を行った。室内物性 試験・分析項目及び供試体の識別番号の一覧を表 5.2-3 に示す。

項目			供試体の識別番号と分析項目(気中養生供試体・水中養生供試体共通)													分析点数													
試料 形状	試料 形状 試験項目		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24 ※2	気中養生	水中 養生	計
		試験※1			0		\circ	\sim	\sim	0	0																0	0	18
100 mm	弾性波	[測定*1]		U	0	0	0	0	0																		ษ	9	18
ϕ 50 × 50 mm	圧裂	試験										0	0	0	0	0	0	0	0	0							9	9	18
φ50× 50 mm から試採 取 オ	灾险支	変質部	変質部									0	0	0	0	0	0										6	6	12
	至原平	健全部										0	0	0													3	3	6
	EPMA マ	ッピング										0	0	0	0	0	0	0	0	0							9	9	18
	SEM/ EDS	変質部										0	0	0													3	3	6
		健全部										0	0	0													3	3	6
	水和物 定量	変質部																0	0								2	2	4
		健全部																0									1	1	2
φ 50 × 50 mm	透水	暴露面																			0	0	0	0	0	検	5	5	10
	試験	健全面																			0	0	0	0		討	4	4	8

表 5.2-3 供試体の識別番号と分析項目の一覧

※1:弾性波測定及び一軸圧縮試験は同一供試体を使用 ※2:供試体 No.24 は予備検討用として使用

(d) 試験方法

(i) 一軸圧縮試験

コンクリート供試体は、試験に供するまで 20±3 ℃の恒温室にて水中養生及び気中養生した。 なお、水中養生には原位置地下水を用いた。また、一軸圧縮強度に用いた供試体は、弾性波測定 と同一の供試体を用いた。一軸圧縮試験の方法及び使用した装置を表 5.2-4 に示す。

項目	内容							
	JISA1107「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							
平田/工和日7田/支	法」に準拠							
静弾性係数及びポアソン比	JIS A1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠							
	・耐圧試験機 : (株)前川試験機製作所 ACA-100A-B2							
装置	・データロガー : (株)東京測器研究所 TDS-303							
	・ひずみゲージ : (株)東京測器研究所 PFL-30-11							

表 5.2-4 一軸圧縮試験方法及び使用装置

(ii) 弾性波測定(P、S 波)

弾性波測定を JGS2110-2009「パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法」に準拠し実施 した。以下に使用装置を示す。

・装置:超音波速度測定装置 応用地質(株) ソニックビューアーSX MODEL-5251C

(iii) 圧裂試験

φ50×100 mm の供試体をφ50×50 mm の半分に切断し、切断した半分の供試体を用いて圧 裂試験を実施した。圧裂試験はJISA1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準拠した。 なお、供試体の半分は後述の空隙率測定及び水和物定量などの分析に供した。以下に使用装置を 示す。

・装置:耐圧試験機(株)前川試験機製作所 ACA-100A-B2

(iv) 透水試験

分析対象の気中養生試料においては、(3)の(b)で述べたように、表層数 mm 程度が中性化してい ることが確認された。この数 mm 程度の中性化した層が透水係数に影響を及ぼすか明確ではない ことから、本試験においては、図 5.2-8 に示すように円柱供試体を半分に切断し、暴露面(中性 化層を含む)から通水した場合と切断面(健全面)から通水した場合の2ケースについて実施し た。



図 5.2-8 透水試験試料

1) 予備検討

コンクリート試料においては、アウトプット法による透水試験を行うと、定常状態となり透水 係数を取得するまでかなりの期間を要する場合がある。そこで、1 試料を用いて予備検討を行っ た結果から、透水試験方法を決定することとした。試料は気中養生試料(表 5.2-3 試料 No.24) を健全面から通水できるようにセットした。0.8 MPaの通水圧で開始し、7 日後に通水できたこ とを確認した。試料を通水方向に割裂し、内部の状態を確認したところ、試料全体が濡れている 状態であり、水が局所的に通過したのではなく、試料全体を通り底部から出水した判断された(図 5.2-9)。以上の予備検討の結果、アウトプット法により透水試験を実施することとした。



図 5.2-9 透水試験の予備検討結果

2) アウトプット法による透水試験

アウトプット法による透水試験の状況を図 5.2-10 に示す。すべての試料についてアウトプット 法で開始した。なお、底部からの出水が確認されない場合は、インプット法に切り替えることと した。

透水試験は、アウトプット法、インプット法ともに参考文献(技術書院,1998)の水密性の解説 に関する項を参考に実施した。



図 5.2-10 透水試験の状況

(i) 空隙率測定

JISR 1655-2003「ファインセラミックの水銀圧入法による成形体気孔分布試験方法」を参考に 水銀圧入法による空隙率を測定した。空隙率の測定は、変質部及び健全部を対象に実施した。

測定では、コンクリートコアから粗骨材を除去したモルタル部分2.5 ~5mm角に調製した後、 真空乾燥デシケータ中で乾燥処理した。乾燥した試料を水銀圧入式ポロシメータで測定した。以 下に測定条件を示す。

・装置:オートポアIV9500 (マイクロメリティクス社製)
・条件:測定範囲 0.5~60,000 psi (孔径 0.03~300 µm 相当),水銀表面張力 484 mN/m 接触角=130°

(ii) 元素濃度分布測定

コンクリート供試体から表層を含めた約4×4mmの領域の元素濃度分布を測定した。

分析試料を約 20×20 mm 角の大きさに切り出し、樹脂包埋した後に分析面を鏡面研磨した。 分析面には導電性を付与するため炭素蒸着後、EPMA(電子線マイクロアナライザー)による面 分析を実施し、表層を含めた 4×4 mm の領域の元素濃度分布を測定した。EPMA の測定条件を 表 5.2-5 に示す。

装置	条件
使用装置	JXA-8100(日本電子社製)
加速電圧	15 kV
照射電流	10 nA
測定時間	40 m sec/ピクセル
分析元素	Ca, Si, Al, Fe, Mg, S, Na, K, Cl, C
プローブ径	5 μm
ピクセルサイズ	$10 \times 10 \ \mu \mathrm{m}$
ピクセル数	400×400(面分析範囲 4×4 mm)

表 5.2-5 EPMA 測定条件

(iii) SEM/EDS 分析

上述(vi)で作製した研磨試料を用いて SEM/EDS 分析による元素分析を実施した。SEM/EDS 分析においては、C-S-H の Ca/Si モル比を主に分析した。

また、研磨試料とは別に、各部位より5mm角程度の試料を採取し、二次電子像による水和物の形態観察を実施した。観察する破断面には導電性を付与するためPt/Pd 蒸着を施した。 SEM/EDSの測定条件を以下に示す。

- ・装置:日本電子株式会社製 IT-300HR
- ・条件:加速電圧 15 kV, プローブカレント (P.C.) 60 mA, ワーキングディスタンス (WD): 10.0mm

(iv) 水和生成物の定量

既往の研究(鈴木ほか,1990)を参考に試料中の Ca(OH)₂、CaCO₃、AFm 相、C-S-H などの水 和生成物の定量を実施した。なお、取得した結果より、C-S-H の CaO/SiO₂ モル比、H₂O/CaO モル比、(Al₂O₃+SiO₂)/Al₂O₃のモル比を算出した。

(v) 地下水の分析

表 5.2-1 で示した地下水の分析方法を表 5.2-6 に示す。

項目	分析方法	装置名
pН	JIS K 0102:2019 12.1 ガラス電極法	HORIBA 社製 pH 計 LAQUA act
Na	JIS K 0102:2019 48.2 フレーム原子吸光法	アジレントテクノロジー社製
К	JIS K 0102:2019 49.2 フレーム原子吸光法	原子吸光光度計 240FS AA
Ca	JIS K 0102:2019 50.3 ICP 発光分光分析法	
Mg	JIS K 0102:2019 51.3 ICP 発光分光分析法	SII ナノテクノロジーズ社製 ICP 発光分光分析装置
Si	ICP 発光分光分析法	SPECTRO BLUE EOP
AI	JIS K 0102:2019 58.4 ICP 発光分光分析法	
Cl⁻	JIS K 0102:2019 35.3 イオンクロマトグラフ法	サーモフィッシャーサイエンティフィック社製
SO4 ²⁻	JIS K 0102:2019 41.3 イオンクロマトグラフ法	イオンクロマトグラフ INTEGRION
HCO3 ⁻	JIS K 0102-1:2021 24.3 赤外線分析法	島津社製 全有機体炭素計 TOC-V CSH/CSN

表 5.2-6 地下水の分析方法

(4) 試験結果

(a) 強度変形特性

(i) 一軸圧縮試験

圧縮試験及び変形特性試験の測定結果を表 5.2-7~表 5.2-10 に示す。また、一軸圧縮強度、静 弾性係数、ポアソン比の各供試体データ及び平均値などのデータをまとめたものと、一軸圧縮試 験時の応力--ひずみ曲線を図 5.2-11~図 5.2-14 に示す。

ー軸圧縮強度及び静弾性係数ともに平均値は、気中養生よりも水中養生の方が大きくなった。 気中養生よりも水中養生の方が間隙に水分が満たされた環境であるため、水和反応が促進され、 強度増加に寄与したことが考えられる。

試験実施日				20	21年11月18	日			
供試体番号	乾-1	乾-2	乾-3	乾-4	乾-5	乾-6	乾-7	乾-8	乾-9
	49 6	49 8	49 6	49 7	49 9	49 7	49 7	49 7	49 7
	49 7	49 8	49 7	49 7	49 9	49 7	49 7	49 7	49 7
古 汉(mm)	49 8	49 8	49 6	49 7	49 9	49 6	49 7	49 7	49 7
旦任(11111)	49 7	49 8	49 6	49 7	49 8	49 7	49 7	49 7	49 7
	49 7	49 8	49 6	49 7	49 8	49 7	49 7	49 7	49 7
	49 7	49 8	49 7	49 7	49 9	49 6	49 7	49 7	49 7
平均直径(mm)	49 7	49 8	49 6	49 7	49 9	49 7	49 7	49 7	49 7
断 面 積(mm ²)	1940	1948	1932	1940	1956	1940	1940	1940	1940
· · · · ·	101 0	101 9	101 0	101 1	101 4	100 6	100 8	100 4	100 9
古 * ()	100 9	101 9	101 0	101 1	101 4	100 5	100 9	100 4	100 9
同 C (mm)	101 0	102 0	101 0	101 1	101 5	100 5	100 8	100 4	100 9
	100 8	101 9	100 9	101 1	101 4	100 6	100 8	100 4	100 9
高さ 最大値(mm)	101 0	102 0	101 0	101 1	101 5	100 6	100 9	100 4	100 9
高さ 最小値(mm)	100 8	101 9	100 9	101 1	101 4	100 5	100 8	100 4	100 9
平均高さ(mm)	100 9	102 0	101 0	101 1	101 5	100 6	100 9	100 4	100 9
気 中 質 量(g)	457 1	468 1	455 3	465 0	467 9	457 7	458 2	466 2	456 4
見掛けの密度(g/cm ³)	2 34	2 36	2 33	2 37	2 36	2 35	2 34	2 39	2 33
見掛けの密度 平均値					2 35				
最大荷重(kN)	144	158	144	137	156	148	137	159	125
圧 縮 強 度(N/mm ²)	74 2	81 1	74 5	70 6	79 8	76 3	70 6	82 0	64 4
高さと直径との比	2 03	2 05	2 04	2 03	2 03	2 02	2 03	2 02	2 03
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(N/mm ²)	74 2	81 1	74 5	70 6	79 8	76 3	70 6	82 0	64 4
補正圧縮強度 平均(N/mm ²)					74 8				

表 5.2-7 一軸圧縮強度試験結果 (気中養生)

表 5.2-8 一軸圧縮強度試験結果(水中養生)

試験実施日	2021年11月18日								
供試体番号	湿-1	湿-2	湿-3	湿-4	湿-5	湿-6	湿-7	湿-8	湿-9
	49 6	49 7	49 6	49 9	49 7	49 7	49 7	49 7	49 7
	49 6	49 7	49 6	49 8	49 7	49 6	49 7	49 7	49 7
直径(mm)	49 6	49 7	49 6	49 8	49 7	49 7	49 7	49 7	49 7
	49 7	49 7	49 7	49 8	49 7	49 7	49 7	49 6	49 7
	49 6	49 7	49 7	49 8	49 7	49 6	49 7	49 7	49 7
	49 6	49 7	49 7	49 8	49 7	49 7	49 7	49 6	49 7
平 均 直 径(mm)	49 6	49 7	49 7	49 8	49 7	49 7	49 7	49 7	49 7
断 面 積(mm ²)	1932	1940	1940	1948	1940	1940	1940	1940	1940
	100 0	101 3	100 1	100 0	100 6	100 4	100 8	100 4	101 6
<u>声</u> た(mm)	100 0	101 2	100 1	100 0	100 4	100 4	100 8	100 4	101 7
同己(川川)	100 1	101 1	100 1	100 1	100 5	100 4	100 8	100 4	101 6
	100 1	101 2	100 1	100 1	100 4	100 4	100 8	100 4	101 5
高さ 最大値(mm)	100 1	101 3	100 1	100 1	100 6	100 4	100 8	100 4	101 7
高さ 最小値(mm)	100 0	101 1	100 1	100 0	100 4	100 4	100 8	100 4	101 5
平 均 高 さ(mm)	100 1	101 2	100 1	100 1	100 5	100 4	100 8	100 4	101 6
気 中 質 量(g)	461 9	469 6	465 8	467 6	463	465 3	471 3	451 2	474 7
見掛けの密度(g/cm ³)	2 39	2 39	2 40	2 40	2 37	2 39	2 41	2 32	2 41
見掛けの密度 平均値					2 39				
最 大 荷 重(kN)	136	140	141	170	154	169	154	160	155
圧 縮 強 度(N/mm ²)	70 4	72 2	72 7	87 3	79 4	87 1	79 4	82 5	79 9
高さと直径との比	2 02	2 04	2 01	2 01	2 02	2 02	2 03	2 02	2 04
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(N/mm ²)	70 4	72 2	72 7	87 3	79 4	87 1	79 4	82 5	79 9
補正圧縮強度 平均(N/mm²)					79 0				

• 圧縮強度:最大荷重÷断面積

・補正圧縮強度=圧縮強度×補正係数

試験実施日				202	21年11月18	日			
供試体番号	乾-1	乾-2	乾-3	乾-4	乾-5	乾-6	乾-7	乾-8	乾-9
見掛けの密度(g/cm ³)	2.34	2.36	2.33	2.37	2.36	2.35	2.34	2.39	2.33
見掛けの密度 平均値(g/cm ³)	2.35								
圧 縮 強 度(N/mm ²)	74.2	81.1	74.5	70.6	79.8	76.3	70.6	82	64.4
高さと直径との比	2.03	2.05	2.04	2.03	2.03	2.02	2.03	2.02	2.03
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(N/mm ²)	74.2	81.1	74.5	70.6	79.8	76.3	70.6	82.0	64.4
補正圧縮強度 平均值(N/mm²)					74.8				
静弹性係数(kN/mm ²)	35.8	32.5	38.1	44.1	40.3	39.8	33.9	38.7	33.8
静弹性係数 平均值(kN/mm ²)					37.4				
ポアソン比	0.194	0.207	0.226	0.247	0.232	0.276	0.197	0.204	0.198
ポアソン比 平均値					0.220				

表 5.2-9 一軸圧縮強度試験 変形特性試験結果 (気中養生)

表 5.2-10 一軸圧縮強度試験 変形特性試験結果(水中養生)

試験実施日				202	21年11月18	日			
供試体番号	湿-1	湿-2	湿-3	湿-4	湿-5	湿-6	湿-7	湿-8	湿-9
見掛けの密度(g/cm ³)	2.39	2.39	2.40	2.40	2.37	2.39	2.41	2.32	2.41
見掛けの密度 平均値(g/cm ³)					2.39				
圧 縮 強 度(N/mm ²)	70.4	72.2	72.7	87.3	79.4	87.1	79.4	82.5	79.9
高さと直径との比	2.02	2.04	2.01	2.01	2.02	2.02	2.03	2.02	2.04
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(N/mm ²)	70.4	72.2	72.7	87.3	79.4	87.1	79.4	82.5	79.9
補正圧縮強度 平均值(N/mm²)					79.0				
静弹性係数(kN/mm ²)	44.3	38.6	39.7	45.3	39.2	43.4	43.0	38.5	44.0
静弹性係数 平均值(kN/mm ²)	41.8								
ポアソン比	0.217	0.226	0.213	0.253	0.225	0.239	0.202	0.228	0.241
ポアソン比 平均値					0.227				



	補正圧縮強度 (N/mm ²)
最大値	82.0
最小值	64.4
平均值	74.8
中央値	74.5
標準偏差	5.4

(a) 気中養生



	補正圧縮強度 (N/mm²)
最大値	87.3
最小値	70.4
平均值	79.0
中央値	79.4
標準偏差	5.8

(b) 水中養生図 5.2-11 一軸圧縮強度(補正後)



	静弾性係数 (kN/mm²)
最大値	44.1
最小値	32.5
平均值	37.4
中央値	38.1
標準偏差	3.5





	静弾性係数 (kN/mm²)
最大値	45.3
最小值	38.5
平均值	41.8
中央値	43.0
標準偏差	2.6

(b) 水中養生 図 5.2-12 静弾性係数



	ポアソン比
最大値	0.276
最小値	0.194
平均值	0.220
中央値	0.207
標準偏差	0.026





	ポアソン比
最大値	0.253
最小值	0.202
平均值	0.227
中央値	0.226
標準偏差	0.015

(b) 水中養生 図 5.2-13 静ポアソン比



図 5.2-14 各試験体の一軸圧縮試験時の応力—ひずみ関係

(ii) 弾性波測定(P、S 波)

弾性波測定の結果を表 5.2-11 及び表 5.2-12 に示す。また、各供試体のデータ及び平均値など をまとめたものを図 5.2-15~図 5.2-19 に示す。動せん断弾性係数、動弾性係数ともに平均値は 気中養生より水中養生の方が大きくなり、一軸圧縮強度及び静弾性係数と整合する結果となった。

2021年10月29日 試験実施日 供試体番号 乾-1 乾-2 乾-3 乾-4 乾-5 載-6 乾-7 乾-8 乾-9 平均 直 径(cm) 4 97 4 98 4 96 4 97 4 98 4 97 4 97 4 97 4 97 平均高さ(cm) 10 10 10 20 10 10 10 11 10 15 10 05 10 08 10 04 10 09 195 94 198 68 195 15 197 7 194 97 195 55 194 78 195 75 196 13 体 積(cm³) 気 中 質 量(g) 458 30 469 22 456 36 456 24 469 01 458 90 459 62 467 41 457 53 見掛けの密度 2 339 2 362 2 3 3 8 2 326 2 372 2 354 2 350 2 400 2 337 見掛けの密度の平均値(g/cm³) 2 353 19 80 19 90 P波透過時間 (µsec) 20 00 19 90 20 20 20 10 20 20 20 10 20 70 20 70 19 80 19 90 20 00 19 90 20 30 20 20 20 20 20 10 P波速度(km/sec) 5 10 5 08 5 10 5 13 5 00 5 02 5 00 5 03 4 90 4 90 4 95 4 98 5 09 5 07 5 02 5 05 5 00 5 02 5 08 P波速度 平均 值(km/sec) 5 09 5 12 5 01 5 02 4 90 4 97 5 04 5 01 40 00 38 60 39 80 39 80 39 80 39 80 40 20 40 20 39 00 39 20 39 20 39 20 37 40 38 80 40 60 40 80 S波透過時間(µsec) 40 00 40 20 S波速度(km/sec) 2 53 2 62 2 73 2 63 2 54 2 54 2 54 2 54 2 52 2 52 2 48 2 46 2 52 2 51 2 57 2 56 2 57 2 57 S波速度 平均 值(km/sec) 2 57 2 58 2 68 2 54 2 52 2 47 2 52 2 57 2 54 動ポアソン比 0 327 0 311 0 327 0 328 0 320 0 336 0 337 0 324 0 321 0 326 動ポアソン比平均値 1 56 E+04 1 70 E+04 1 51 E+04 1 50 E+04 1 51 E+04 1 44 E+04 1 49 E+04 1 59 E+04 1 54 E+04 動 せん 断 弾 性 係 数(MN/m²) 1 54 E+04 動せん断弾性係数平均値(MN/m²) 動 弹 性 係 数(MN/m²) 4 13 E+04 4 45 E+04 4 00 E+04 3 99 E+04 3 98 E+04 3 84 E+04 3 99 E+04 4 20 E+04 4 08 E+04 動弹性係数平均值(MN/m²) 4 07 E+04

表 5.2-11 弾性波測定結果 (気中養生)

表 5.2-12 弹性波測定結果(水中養生)

試験実施日		2021年10月29日																
供試体番号	湿	-1	湿	-2	湿	-3	湿	-4	酒	-5	湿	-6	湿	-7	湿	-8	湿	-9
平 均 直 径(cm)	4	96	4	97	4 96		4 98		4 97		4 96		4 97		4 97		4 97	
平 均 高 さ(cm)	10	00	10	12	10 01		10 01		10	05	10	04	10	08	10	04	10	16
体 積(cm ³)	193	22	196	33	193	3 41	194	1 98	194	197	193	99	195	5 55	194	194 78 197 1		71
気 中 質 量(g)	463	08	471	18	46	74	46	8 2	46	47	466	33	472	2 77	452	452 88 476 17		5 17
見掛けの密度	2 3	897	2	4	2 4	417	2 4	401	2	383	2 4	104	2 4	418	23	2 325 2 416		416
見掛けの密度の平均値(g/cm ³)									2	396								
P波透過時間 (μsec)	19 70	19 80	19 20	19 10	19 10	19 10	19 30	19 30	19 80	19 70	19 60	19 70	19 40	19 30	19 70	19 70	19 10	19 00
P波速度(km/sec)	5 08	5 05	5 27	5 30	5 24	5 24	5 19	5 19	5 08	5 10	5 12	5 10	5 20	5 22	5 10	5 10	5 32	5 35
P波速度 平均 值(km/sec)	5	07	5	29	5	24	5	19	5	09	5	11	5	21	5	10	5	34
S波透過時間(µsec)	37 4	37 6	39 0	39 0	38 4	38 2	35 8	37 6	36 2	37 8	36 4	36 8	37 6	37 8	37 6	36 2	35 6	36 6
S波速度(km/sec)	2 67	2 66	2 59	2 59	2 61	2 62	28	2 66	2 78	2 66	2 76	2 73	2 68	2 67	2 67	2 77	2 85	2 78
S波速度 平 均 值(km/sec)	2	67	2	59	2	62	2	73	2	72	2	75	2	68	2	72	2	82
動ポアソン比	0 3	308	03	42	12 0 333 0 309 0 300 0 296		296	0 320		03	801	0 3	307					
動ポアソン比平均値									0	313								
動 せん 断 弾 性 係 数(MN/m ²)	1 71	E+04	1 61	E+04	1 66	E+04	1 79	E+04	1 76	E+04	1 82	E+04	1 74	E+04	1 72	E+04	1 92	E+04
動せん断弾性係数平均値(MN/m ²)		1 75 E+04																
動 弹 性 係 数(MN/m ²)	4 47	E+04	4 4 32 E+04 4 42 E+04 4 68 E+04 4 58 E+04 4 71 E+04				4 59	E+04	4 48	E+04	5 02	E+04						
動弾性係数平均值(MN/m ²)									4 59	E+04								

動せん断弾性係数=10³×見かけの密度×(S波透過速度)²

動弾性係数=2(1+動ポアソン比)×動せん断弾性係数

P 波速度= $10 \times \frac{ac}{P$ 波透過時間

S 波速度= $10 \times \frac{ac}{s x x}$



P 波速度
(km/sec)
5.12
4.90
5.03
5.02
0.06





	P 波速度(km/sec)
最大値	5.34
最小値	5.07
平均值	5.18
中央値	5.19
標準偏差	0.09

(b) 水中養生図 5.2-15 P 波速度



	S 波速度(km/sec)
最大値	2.68
最小值	2.47
平均值	2.55
中央値	2.54
標準偏差	0.05





	S 波速度(km/sec)
最大値	2.82
最小值	2.59
平均值	2.70
中央値	2.72
標準偏差	0.07

(b) 水中養生図 5.2-16 S 波速度



	動ポアソン比
最大値	0.337
最小值	0.311
平均值	0.330
中央値	0.327
標準偏差	0.008

(a) 気中養生



	動ポアソン比
最大値	0.342
最小値	0.296
平均值	0.313
中央値	0.308
標準偏差	0.015

(b) 水中養生 図 5.2-17 動ポアソン比



	動せん断弾性係数(MN/m²)
最大値	1.70.E+04
最小値	1.44.E+04
平均值	1.54.E+04
中央値	1.51.E+04
標準偏差	0.07E+04



	動せん断弾性係数(MN/m²)
最大値	1.92.E+04
最小值	1.61.E+04
平均值	1.75.E+04
中央値	1.74.E+04
標準偏差	0.09.E+04

(b) 水中養生 図 5.2-18 動せん断弾性係数



	動弾性係数(MN/m²)
最大値	4.45.E+04
最小値	3.84.E+04
平均值	4.07.E+04
中央値	4.00.E+04
標準偏差	0.16.E+04

(a) 気中養生



	動弾性係数(MN/m²)
最大値	5.02.E+04
最小値	4.32.E+04
平均值	4.59.E+04
中央値	4.58.E+04
標準偏差	0.19.E+04

(b) 水中養生 図 5.2-19 動弾性係数

(iii) 圧裂試験

割裂引張強度試験の結果を表 5.2-13 及び表 5.2-14 に、各供試体の結果及び平均値などの値を 図 5.2-20 に示す。割裂引張強度においても平均値が気中養生より水中養生の方が大きくなり、そ の他の強度特性試験と整合する結果であった。

試験実施日		2021年11月17日								
供試体番号	乾-10	乾-11	乾-12	乾-13	乾-14	乾-15	乾-16	乾-17	乾-18	
直径(mm)	49.6	49.8	49.7	49.6	49.6	49.7	49.6	49.6	49.6	
但1主(IIIII)	49.5	49.8	49.6	49.6	49.6	49.6	49.7	49.6	49.6	
平均 直径(mm)	49.6	49.8	49.7	49.6	49.6	49.7	49.7	49.6	49.6	
断 面 積(mm ²)	1932	1948	1940	1932	1932	1940	1940	1932	1932	
破壊脈声長さ()	56.8	50.4	53.9	52.6	55.3	54.8	52.1	54.7	54.1	
戦策町 固 及 さ (1111)	56.1	50.8	53.9	52.3	55.8	54.5	52.4	54.5	53.9	
平均 破壊断面長さ(mm)	56.5	50.6	53.9	52.5	55.6	54.7	52.3	54.6	54.0	
質 量(g)	253.8	228.1	246.4	241.6	254.9	244.2	241.5	245	248.9	
見かけの密度(g/cm ³)	2.33	2.31	2.36	2.38	2.37	2.30	2.38	2.32	2.39	
見かけの密度 平均値(g/cm ³)					2.35					
最 大 荷 重(kN)	13.6	24.0	19.7	17.2	18.7	18.7	17.4	20.1	14.7	
割裂引張強度 (N/mm ²)	3.09	6.06	4.68	4.21	4.32	4.38	4.26	4.72	3.49	
割裂引張強度 平均值 (N/mm ²)					4.36					

表 5.2-13 割裂引張強度試験結果 (気中養生)

表 5.2-14 割裂引張強度試験結果(水中養生)

試験実施日		2021年11月17日							
供試体番号	湿-10	湿-11	湿-12	湿-13	湿-14	湿-15	湿-16	湿-17	湿-18
直径(*****)	49.7	49.6	49.8	49.8	49.7	49.8	49.8	49.8	49.9
但.1±(IIIII)	49.7	49.6	49.8	49.7	49.7	49.8	49.6	49.8	49.8
平均 直径(mm)	49.7	49.6	49.8	49.8	49.7	49.8	49.7	49.8	49.9
断 面 積(mm ²)	1940	1932	1948	1948	1940	1948	1940	1948	1956
破壊断面長さ(mm)	53.3	53.3	53	53.6	52.5	53.4	53.7	54	52.7
戦策町面及さ(1111)	53.1	53.2	53.2	53.4	52.7	53.8	53.4	53.6	53.5
平均 破壊断面長さ(mm)	53.2	53.3	53.1	53.5	52.6	53.6	53.6	53.8	53.1
質 量(g)	247.2	249	246.2	250.2	245	250.1	246	250.6	244.6
見かけの密度(g/cm ³)	2.40	2.42	2.38	2.40	2.40	2.40	2.37	2.39	2.36
見かけの密度 平均値(g/cm ³)					2.39				
最大荷重(kN)	27.8	18.2	21.4	24.6	24.0	17.6	25.4	26.4	18.4
割裂引張強度 (N/mm ²)	6.69	4.38	5.15	5.88	5.84	4.20	6.07	6.27	4.42
割裂引張強度 平均值 (N/mm ²)					5.43				

割裂引張強度 = $\frac{2 \times \frac{1}{8} \times \frac{1}{1}}{\pi \times \frac{1}{1} \times \frac{1}{1}}$



	割裂引張強度
	(N/mm²)
最大値	6.06
最小値	3.09
平均值	4.36
中央値	4.32
標準偏差	0.78





	割裂引張強度
	(N/mm²)
最大値	6.69
最小値	4.20
平均值	5.43
中央値	5.84
標準偏差	0.87



(iv) 強度・変形特性に関するまとめ

本年度取得した材齢約1年の強度特性(平均値)を、昨年度の材齢28日の試験結果とともに表 5.2-15に示す。

一軸圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度については、材齢 28 日のデータと比較して、気中養 生及び水中養生いずれの試料とも大きな値を示しており、セメントの水和反応の進行によりコン クリートが緻密化し、強度増加に寄与したものと判断される。気中養生試料の動せん断弾性係数 及び動弾性係数については、材齢 28 日よりも材齢1年で若干低い値を示している。本試験では動 せん断弾性係数及び動弾性係数を超音波(P波、S波)の透過時間(透過速度)から算出してい る。超音波の速度は固体>液体>気体の順に大きいため、試験体中の空隙量や空隙内の状態(飽 水状態や乾燥状態)によって速度は変わり、動せん断弾性係数及び動弾性係数に影響を及ぼす。 材齢1年まで気中養生した供試体の水分は徐々に減少し、空隙内が乾燥状態となる傾向にあった ため、動せん断弾性係数及び動弾性係数が材齢28日より低下したと推察される。しかし、その他 の強度データが材齢28日よりも高い値を示していることから、乾燥の影響などにより供試体内 部に欠陥が生じているとは考えにくい。一方、材齢28日のP波速度が材齢1年の気中養生試験 体及び水中養生試験体より大きくなっており、その要因として、材齢28日の試験体が緻密であっ たことが挙げられる。材齢28日の見掛けの密度は気中養生試験体より大きく、緻密であるため、 伝播速度が大きくなったと考えられ、材齢 28 日の P 波及び S 波速度は想定より大きくなり、それに伴って動せん断弾性係数及び動弾性係数も大きくなったと推察される。

		口2 年時	王剑中※	R3 年度測定データ					
試験項目	単位	NZ 43	之间在	気中	養生	水中養生			
		材齢 28 日	標準偏差	材齢1年	標準偏差	材齢1年	標準偏差		
一軸圧縮強度	N/mm ²	53.9	3.3	74.8	5.4	79.0	5.8		
静弾性係数	kN/mm²	35.8	1.2	37.4	3.5	41.8	2.6		
ポアソン比	-	0.21	0.02	0.220	0.026	0.227	0.015		
見掛けの密度	~ (a m ³	2.20	0.01	0.05	0.02	2.40	0.02		
(弾性波測定時)	g/ cm	2.30	0.01	2.30	0.02	2.40	0.02		
P 波速度	km/sec	5.61	0.18	5.03	0.06	5.18	0.09		
S 波速度	km/sec	2.58	0.05	2.55	0.05	2.7	0.07		
動ポアソン比	_	0.37	0.01	0.327	0.008	0.308	0.015		
動せん断弾性係数	MN/m²	1.59E+04	0.06E+04	1.54E+04	0.07E+04	1.75E+04	0.09E+04		
動弾性係数	MN/m ²	4.33E+04	0.15E+04	4.07E+04	0.16E+04	4.59E+04	0.19E+04		
割裂引張強度	N/mm ²	3.70	0.35	4.36	0.78	5.43	0.87		

表 5.2-15 強度特性試験結果の一覧

※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,2020

(b) 透水性

(i) アウトプット法による透水試験結果

水中養生試験体9点、気中養生試験体9点の計18点に対し、アウトプット法による透水試験 を実施した(図 5.2-21)。流出液は試験体の排出面に配したビニール容器で回収して、1週間ご とに流出液の回収重量を計測した。透水係数は、3週間(3点)分を平均値として算出した。透 水係数の算出結果を表 5.2-16に、気中養生試験体の透水係数の比較結果を図 5.2-22に、各試験 体の透水試験の状況(アウトプット法)を図 5.2-23にそれぞれ示す。また、透水係数の算出に は、参考文献(技術書院, 1998)に記される式(式 5.2-1)を用いた。

なお、図表に記載した試験体名は、気中養生試験体は「気」、水中養生試験体は「湿」と略 し、続けて「試験体№」を示した。さらには、透水液の浸透面を変質部とした試験体を「①」、 透水液の浸透面を健全部とした試験体を「②」とし、枝番で示した。

透水試験を実施した結果、気中養生試験体では加圧1週間程度で全ての試験体で溶液の流出を 確認した。No.19~23の5試験体間の透水係数の差は、オーダーレベルでは確認されず、同一条 件で養生した試験体の変動の範囲であると判断した。溶液の浸透面の状態が透水係数に与える影 響を同一№の試験体で比較すると、同一 No.の4試験体全てで、浸透面を変質部とした方が、浸 透面を健全部とした試験体より透水係数が小さい結果となった。しかし、その差は前述の同一条 件で養生した試験体の変動の範囲と同程度であり、明らかな影響ではなかった。全ての試験体で 変質部は極表層だけであることから、透水係数の変化に与える影響も小さかったと推測した。 一方、水中養生試験体では、透水試験を実施した約1ヶ月の期間中に、全ての試験体で溶液の 流出が確認できなかった。後述する空隙構造の評価で、水中養生試験体は、気中養生試験体より、 小径側の空隙分布が多いことが確認されており、この密実な空隙構造が溶液の移動を制限した結 果、本試験の圧力、試験期間では溶液が流出しなかったものと推測された。本試験では、アウト プット法で透水係数が得られなかった水中養生試験体に対し、インプット法による再評価を実施 した。



図 5.2-21 各試験体の透水試験の状況

試験体名		試料寸法		試験水圧	流	流出量(kg/s)			透水係数(m/s)			
		直径(mm) ^{※1}	高さ(mm) ^{※2}	(Mpa)	1	2	3	1	2	3	3点平均	
	気19-①	49.8	50.1	0.5	3.6E-09	3.5E-09	3.3E-09	1.8E-12	1.8E-12	1.7E-12	1.7E-12	
	気19-②	49.8	48.3	0.5	4.1E-09	4.0E-09	3.8E-09	2.0E-12	1.9E-12	1.8E-12	1.9E-12	
	気20-①	49.7	51.2	0.5	1.7E-09	5.1E-09	1.5E-09	9.1E-13	2.6E-12	7.7E-13	1.4E-12	
与由姜生	気20-②	49.8	48.6	0.5	3.3E-09	3.4E-09	3.5E-09	1.6E-12	1.7E-12	1.7E-12	1.7E-12	
メー 後エ 試験休	気21-①	49.7	48.2	0.5	2.7E-09	2.6E-09	2.6E-09	1.3E-12	1.3E-12	1.3E-12	1.3E-12	
山川市大下中	気21-②	49.8	51.3	0.5	3.0E-09	2.9E-09	2.8E-09	1.5E-12	1.5E-12	1.5E-12	1.5E-12	
	気22-①	49.8	50.7	0.5	2.3E-09	2.3E-09	2.3E-09	1.2E-12	1.2E-12	1.2E-12	1.2E-12	
	気22-②	49.8	48.4	0.5	4.1E-09	4.0E-09	3.9E-09	2.0E-12	1.9E-12	1.9E-12	1.9E-12	
	気23-①	49.9	48.5	0.5	2.6E-09	2.6E-09	2.6E-09	1.3E-12	1.3E-12	1.3E-12	1.3E-12	

表 5.2-16 透水係数の算出結果

※1 コア供試体の上下高さの 1/4 付近及び高さの中央付近で,互いに直交する 2 方向の直径を 0.1mm まで測定し,その平均値を供試体の平均直径とした。

※2 コア供試体の高さは、4 か所において 0.1mm まで測定し、最大値と最小値の平均値を供試体の平均高さとした。

 $\mathbf{K} = \rho \times ((\mathbf{Q} \times \mathbf{h}) / (\mathbf{P} \times \mathbf{A}))$

式 5.2-1

K:透水係数(cm/s) *本試験では「m/s」で示す。
ρ:水の単位質量(kg/cm³) *本試験では「0.001 kg/cm³」とする。

Q:流入量または流出量(cm ³/s) h:試験体長さ(cm)

P:試験水圧(kgf/cm²) A:供試体の断面積(cm²)



図 5.2-22 気中養生試験体の透水係数(3点平均)の比較結果

(ii) インプット法による透水試験結果

アウトプット法でのデータ取得が困難であった水中養生試験体 9 点を対象にインプット法による透水試験を実施した。各試験体の透水試験(インプット法)の状況を図 5.2-23 に、水の浸透深 さの計測方法を図 5.2-24 にそれぞれ示す。

0.5 MPa の水圧を2週間保持し、接液面(加圧面)から浸透した溶液の深さを計測し、拡散係数を算出した。水中養生試験体は透水試験で溶液が流出しないため、アウトプットした溶液の重量より直接、透水係数を算出することができない。そこで、本試験では2つの方法を用いて透水係数を算出した。

1つ目の算出方法は参考文献(技術書院,1998)に記載されている浸透水量法を参考にし、溶液 が浸透した深さを試験体の長さ、透水試験で試験体に浸透した水の重量を移動する水の体積とす る、仮定条件を設けた上での透水係数を算出した。この方法では、定常状態として透水係数を算 出していることとなるため、実際より大きくなる傾向にある。2 つ目の算出方法は、既往の研究 (村田,2002)を参考にし、本試験の静弾性係数、ポアソン比及び空隙率の平均値と各試験体の拡 散係数から透水係数を算出した。

拡散係数及び仮定条件を設け算出した透水係数の結果を表 5.2-17 に、水中養生試験体の拡散係 数の比較の結果を図 5.2-25 に、仮定条件を設け算出した透水係数の結果を図 5.2-26 に示す。な お、拡散係数の算出には、参考文献(技術書院, 1998)に記される式(式 5.2-2)を用いた。仮定 条件を設け算出した透水係数の算出には式 5.2-3、拡散係数から算出した透水係数の算出には式 5.2-4 を用いた。

透水試験を実施した結果、全ての試験体で水の浸透も目視で確認できた。水の浸透深さはNo.22 の②で、他の試験体より若干深く、拡散係数は大きな値となったが、その他の試験体では、同オ ーダーの拡散係数であり、同一条件で養生した試験体の変動の範囲であると判断した。また、溶 液の浸透面の状態(健全部または変質部)が拡散係数に与える影響も確認されなかった。全ての 試験体で変質部は極表層だけであることから、拡散係数の変化に与える影響も小さかったと推測 した。

本試験では、気中養生試験体と水中養生試験体の水密性を比較するために、水中養生試験体で も2つの方法を用いて、透水係数を算出した。比較の結果、水中養生試験体の方が気中養生試験 体より、浸透水量法から算出した透水係数(式 5.2-3)では1桁、拡散係数から算出した透水係数 (式 5.2-4) では 2 桁低い値となった。実際、同条件下で透水試験(アウトプット法)を実施した 結果、気中養生試験体では溶液が流出し、水中養生試験体では溶液が流出していないことからも 水密性が異なることは明白である。ただし、水中養生試験体はインプット法の試験結果から算出 した透水係数であり、アウトプット法による気中養生試験体の透水係数とは条件が異なるため、 参考値の範囲と考えている。

算出方法の違いを比較すると、浸透水量法から算出した透水係数の方が拡散係数から算出した 透水係数より1桁高い値となった。浸透水量法から透水係数を算出する方法では、流速を一定と した定常状態と仮定しているため、浸透深さまでの圧力も一定となる。一方、拡散係数から透水 係数を算出する方法は、時間や場所によって流速が変化することとしており、試験開始直後は水 の浸透が速いが、深部に向かうにつれて圧力が低下していき、水の浸透が遅くなることを反映し ている(添付資料2)。以上の違いにより、流速を一定として算出した浸透水量法による透水係数 の方が拡散係数から算出する方法より大きい値となったと推察される。



図 5.2-23 各試験体の透水試験(インプット法)の状況



図 5.2-24 水の浸透深さの計測方法

表 5.2-17 拡散係数及び仮定条件を設け算出した透水係数の結果

				拡散係	数の算出	条件			扩勘区粉	透水係数への換算条件			透水係数(m/s)	
試験体名		試験水圧	水の浸透深さ(mm)					(m ² /a)	直径	流入量	試験期間	式3から	式4から	
		(Mpa)	1	2	3	4	5	平均	(11 / 5)	(mm)※1	(g) ※2	(秒)	算出※3	算出※4
	湿19-①	0.5	25.72	27.43	25.50	24.60	29.51	26.55	1.1E-07	49.8	2.45	1209600	5.4E-13	7.9E-14
	湿19-②	0.5	18.20	15.62	17.22	18.39	14.98	16.88	4.5E-08	49.8	1.89	1209600	2.7E-13	3.2E-14
	湿20-①	0.5	20.59	18.67	17.14	19.65	21.03	19.42	6.0E-08	49.9	2.12	1209600	3.4E-13	4.2E-14
汨涸姜井	湿20-②	0.5	15.83	15.42	15.00	19.61	18.01	16.77	4.5E-08	50.1	1.67	1209600	2.3E-13	3.2E-14
/业/用1愛工 試除/★	湿21-①	0.5	26.07	24.69	23.23	24.72	22.84	24.31	9.4E-08	49.8	2.30	1209600	4.7E-13	6.6E-14
武则大学	湿21-②	0.5	25.54	21.83	20.09	23.66	21.37	22.50	8.1E-08	49.9	2.25	1209600	4.2E-13	5.7E-14
	湿22-①	0.5	16.93	16.23	13.87	17.47	15.48	16.00	4.1E-08	49.8	1.63	1209600	2.2E-13	2.9E-14
	湿22-②	0.5	38.61	37.36	36.67	34.18	36.67	36.70	2.1E-07	49.9	2.42	1209600	7.4E-13	1.5E-13
	湿23-①	0.5	23.75	24.98	23.50	23.06	21.55	23.37	8.7E-08	49.9	1.97	1209600	3.8E-13	6.1E-14

※1 コア供試体の上下高さの 1/4 付近及び高さの中央付近で,互いに直交する 2 方向の直径を 0.1mm まで測定し,その平均値を供試体の平均直径とする。

※2 透水試験後に試験体重量が増加した分(計算上はgをcm³と仮定する)

※3 溶液が浸透した深さを供試体の高さ、浸透した水の重量を移動する水の体積と仮定して算出した透水係数。

※4 本試験結果の静弾性係数、ポアソン比、空隙率の平均値と各試験体の拡散係数から算出した透水係数。

 $\beta_{i^2} = \alpha \times (D_{m^2} / (4 \times t \times \xi^2))$

β_i²: 拡散係数(cm ²/s) *本試験では「m²/s」で示す。
α:水圧を加えた時間に関する係数(=t^{3/7})
D_m: 水の浸透深さ(cm)
t:水圧を加えた時間(s)
ξ:水圧の大きさに関する係数(=0.5MPaの時、0.724)

 $K = \rho \times (q/s) \times (Dm/(P \times A))$

K:透水係数 (cm/s) *本試験では「m/s」で示す。 ρ:水の単位質量 (kg/cm³) *本試験では「0.001 kg/cm³」とする。 P: 圧力(kgf/cm²) A: 断面積(cm²) q: 流入量(cm³) s: 試験期間(s)

$$\beta_{i^2} = kK \rho$$

式 5.2-4

式 5.2-3

式 5.2-2

k:平均体積弾性率(kgf/cm²)

$$\frac{1}{k} = \frac{v}{k_c} + \frac{(1-v)}{k_w} \quad k_c = \frac{E_c}{3(1-2\gamma)}$$

 kc:コンクリートの体積弾性係数(kN/mm²)
kw:水の体積弾性係数(kN/mm²) *本試験では「2.45k/mm²」とする。
v:コンクリートの体積比 *本試験では「1-空隙量」とし、「0.9117」とする (空隙量は空隙率の平均)
Ec:コンクリートの静弾性係数(kN/mm²) *本試験では「41.8k/mm²」とする(試験結果)。
y:ポアソン比 *本試験では「0.227」とする(試験結果)。





図 5.2-25 水中養生試験体の拡散係数の比較結果

図 5.2-26 拡散係数及び仮定条件を設け算出した透水係数の結果

(c) 空隙率分布

水銀圧入式ポロシメータの測定結果を表 5.2-18 に、各試料のトータルの空隙率を図 5.2-27 に、 養生条件の違いによる空隙径分布の違いを図 5.2-28 に示す。また、No.10~No.11 の試料につい ては、表層の変質部と内部の健全部の 2 ヵ所から試料を採取し、測定した。No.10~No.11 試料の 部位による空隙径分布の違いを図 5.2-29 及び図 5.2-30 に示す。

図 5.2-28 から、2020 年の測定結果では、空隙率は 9.08~13.01%であった。表 5.2-18 から気 中養生供試体は、9.79~11.44%、水中養生供試体については 9.17~10.62%となっており、どちら の養生条件でもわずかではあるが全体の空隙率が小さくなっている。

健全部の空隙率を養生条件で比較すると、差異は小さいが水中養生試料の方が小さい値となった。これは、物理特性と整合する結果となっている。図 5.2-28 より、水中養生試料では、空隙径 0.01~0.1µm の空隙がほとんど見られないが、気中養生ではこの範囲の径の空隙が存在する。この分布の違いが全体の空隙率の違いとなっている。気中養生より水中養生の方がセメントの水和反応が進み、より緻密な構造となっているものと推定される。

変質部と健全部の部位の差を比較すると、気中養生条件の空隙率では、No.10 及び No.11 で変 質部の方が小さいが、No.12 では大きくなっており、同一の傾向が見られなかった。図 5.2-29 よ り、空隙径分布を比較すると、変質部では空隙径 0.01~0.1 µm の空隙が健全部よりも多く、0.01 µm 以下の微細な空隙が健全部よりも減少していた。空隙率では同一の傾向は見られないものの、 空隙径分布では、変質部は健全部に比べ、微細な空隙が減少し、大きな空隙が増加する同一の傾 向が確認された。HFSC の主要な水和物 C-S-H は、数 nm の微細な空隙を有する。気中養生の変 質部は、中性化部であり、C-S-H が中性化し分解したことにより、C-S-H が有する 0.01 µm の空 隙が減少し、それ以上の大きな空隙が増加したと考えられる。

水中養生条件では、No.10、No.11、No.12 のいずれの試料も変質部では健全部よりも空隙率が 大きくなった。図 5.2-30 より、わずかではあるが、変質部において空隙径 0.01~0.1 μm の範囲 の空隙が増加した。変質部が狭い範囲に限られているため、差異が小さくなっているものと考え られる。水中養生条件では、表層からセメント成分の溶脱したことが影響し、空隙が増加したも のと考えられる。

			健全部			変質部	
試料 No.	養生条件	空隙率	見かけ密度	かさ密度	空隙率	見かけ密度	かさ密度
		(%)	(g/cm³)	(g/cm³)	(%)	(g/cm³)	(g/cm³)
No.10		11.34	2.42	2.14	10.27	2.50	2.24
No.11	気中養生	11.20	2.42	2.15	10.99	2.48	2.21
No.12		7.80	2.50	2.30	9.79	2.51	2.26
No.13			—	_	11.44	2.49	2.20
No.14			—	_	10.69	2.49	2.22
No.15			—	_	9.88	2.50	2.25
平均		10.11	2.44	2.20	10.51	2.49	2.23
No.10		7.66	2.51	2.32	9.17	2.47	2.25
No.11		9.53	2.45	2.22	10.51	2.42	2.17
No.12		9.30	2.47	2.24	10.27	2.42	2.17
No.13	水中養生		—	_	9.71	2.45	2.21
No.14	-	—	—	_	10.12	2.43	2.18
No.15			—	_	10.62	2.42	2.16
平均		8.83	2.48	2.26	10.06	2.44	2.19

表 5.2-18 水銀圧入式ポロシメータの測定結果

-: 測定なし



図 5.2-27 各試料の空隙率



(上図:累積空隙率(2020年測定、初期値)、中図:累積空隙率(2021年),下図:微分細孔容 積(2021年))



(上図:累積空隙率,下図:微分細孔容積)



(上図:累積空隙率,下図:微分細孔容積)

(d) 元素濃度分布

気中養生試料の元素分布測定結果を図 5.2-31 及び図 5.2-32 に、水中養生試料の元素分布測定 結果を図 5.2-33 及び図 5.2-34 に示す。なお、元素濃度は酸化物として示している。

図 5.2·31 及び図 5.2·32 から、気中養生試料では、フェノールフタレインによる呈色範囲から 変質範囲が 3mm 程度あり、元素分布の測定範囲(4×4mm)はほとんど変質部に相当するため、 健全部との濃度差が見えにくくなっている。CaO 濃度は、試料内部から表層に向かって濃度が低 下している。気中養生であるため、Ca が外部へと浸出しているのでなく、組織が粗な状態となり、 空隙が増加したため Ca 濃度が低下して見えていることが考えられる。SO3 濃度は、内部よりも 表層の方が低くなっている。中性化部では、Ca(OH)2や C-S-H の炭酸との反応の他に、エトリン ガイトなどのカルシウム硫酸塩水和物も炭酸との反応により分解し、溶解した S が健全部へと移 動し、中性化していない領域において S の濃縮が見られると報告されている (小林, 1991)。SO3 の濃縮部は本試験結果では確認できないが、S の濃度低下部は、CO2 濃度分布における濃度増加 が見られる領域と対応し、中性化が生じている範囲において SO3を含む水和物の分解が生じてい ることが推定される。CO2 濃度は内部より表層の変質部において濃度が高くなっている。測定試 料は樹脂で包含されているため、樹脂に起因する炭素も CO2 として検出するが、CO2 濃度が内部 より高くなっている範囲においては、水和物が炭酸と反応し、CO2 濃度が増加して見えているも のと考えらえる。

図 5.2-33 及び図 5.2-34 から、水中養生試料では、表層数 100µm 程度の範囲で、CaO 濃度の 低下が見られた。この範囲では、Ca が養生水へ浸出しているものと考えられる。一方、MgO、 Na2O 及び K2O は同様な範囲で濃度が高くなっている。地下水成分がコンクリートへと浸透して いるもの考えられる。また、気中養生試料では、0.2%以下であった Cl 濃度が、水中養生試料で は、0.4%程度と気中養生試料よりも濃度が高く現れている。これも養生水である地下水成分の Cl がコンクリートへ浸透したものと考えられる。

	No.10-気中養生	No.11-気中養生	No.12-気中養生
反射 電子像 (40 倍)	CCMP 15.0kV ×40 180,m	CCMP 15.0KV ×40 100,m	COMP 15.0kV x48 100,m
CaO	90.00 35.00 30.00 25.00 20.00 15.00 10.00 5.00 0.00 5.00 0.00	40, 00 35, 00 25, 00 20, 00 15, 00 10, 00 5, 00 0, 00 5, 00 0, 00	40.00 35.00 30.00 22.00 20.00 15.00 15.00 15.00 15.00 0.00 5.00 0.00
SiO2	B80, 90 70, 90 60, 90 50, 00 30, 90 30, 90 3	80.00 60.00 50.00 40.00 30.00 20.00 10.00 10.00 8.00 20.00 10.00 0.00	B80.00 70.00 60.00 50.00 40.00 30.00 30.00 20.00 10.00 0.00 0.00
Al ₂ O ₃	20.00 17.50 15.00 12.50 10.00 7.50 5.00 2.50 0.00	A1203 l Im	A 1203
Fe ₂ O ₃	8.00 7.00 5.00 4.00 3.00 2.00 1.00 0.00	Fe203 lmm	8.00 7.00 5.00 5.00 3.00 2.00 1.00 0.00
MgO	2.00 1.75 1.50 1.25 1.00 0.75 0.50 0.25 0.00	Hg0 jam	Hg0 lan

図 5.2-31 気中養生試料の元素濃度分布 (1/2) (カラーバーの単位は mass%)

	No.10-気中養生	No.11-気中養生	No.12-気中養生
SO₃	8.00 7.00 5.00 5.00 3.00 2.00 1.00 0.00	8.00 7.00 6.00 5.00 4.00 3.00 2.00 1.00 0.00	8.00 7.00 6.00 5.00 4.00 3.00 2.00 1.00 0.00
Na₂O	2.90 1.75 1.50 1.25 1.20 1.00 0.75 0.50 0.90	2.00 1.75 1.50 1.25 1.00 0.75 0.50 0.25 0.00	Na20 1 mm
K ₂ O	2:00 1.75 1.50 1.25 1.25 1.00 0.75 0.50 0.55 0.00	2.00 1.75 1.50 1.25 0.50 0.25 0.00	K20 Len
CI	C1 1mm	1.60 1.40 1.20 1.00 0.80 0.60 0.40 0.20 0.00	C1 1.60 1.40 1.20 1.00 0.80 0.60 0.40 0.40 0.40 0.20 0.00
CO2	40.00 35.00 30.00 25.00 15.00 15.00 15.00 15.00 15.00 0.00 0	40.00 35.00 30.00 25.00 25.00 15.00 15.00 10.00 15.00 0.00	49.00 35.09 39.09 27.09 28.09 15.09 15.09 15.09 15.09 9.09

図 5.2-32 気中養生試料の元素濃度分布(2/2)(カラーバーの単位は mass%)

	No.10-水中養生	No.11-水中養生	No.12−水中養生
反射 電子像 (40 倍)	CDKP 15.81/ ×48 188,m	CLMP 15.8K2 x48 1885m	CUMP 15.86V x48 1885m
CaO	40.00 35.00 25.00 25.00 15.00 10.00 6.00	40.00 35.00 25.00 25.00 15.00 10.00 10.00 0.00	40.00 35.00 25.00 25.00 25.00 15.00 10.00 5.00 0.00
SiO2	B80,00 70,00 60,00 50,00 10,00 10,00 10,00 10,00 10,00 10,00 10,00 10,00 10,00	180.00 70.00 60.00 50.00 40.00 20.00 10.00 10.00 0.00 10.00 0.00	B80.00 76.09 60.09 58.00 49.00 30.09 20.00 10.09 20.00 10.00 0.00 0.00
Al ₂ O ₃	20.00 17.50 12.50 10.00 2.50 0.00 2.50 0.00	28.00 17.50 12.50 12.50 10.00 2.50 6.00 2.50 0.00	A L203 Lm
Fe ₂ O ₃	8.00 7.00 6.00 5.00 4.00 3.00 2.00 1.00 0.00 8.00 2.00 1.00 0.00	8.00 7.00 6.00 5.00 4.00 3.00 2.00 1.00 0.00 6.00	8.00 7.00 6.00 5.00 4.00 3.00 2.00 1.00 0.00 Fc203
MgO	2.00 1.75 1.50 1.75 1.50 0.75 0.50 0.75 0.50 0.75 0.50 0.75 0.50	Hg ⁰ L Im	2.00 1.75 1.50 1.25 1.00 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50

図 5.2-33 水中養生試料の元素濃度分布(1/2)(カラーバーの単位は mass%)

	No.10−水中養生	No.11−水中養生	No.12-水中養生		
SO₃	8.00 7.00 6.00 5.00 4.00 2.00 1.00 0.00	8.00 7.00 6.00 5.00 4.00 3.00 2.00 1.00 0.00	8. 00 7. 00 6. 00 5. 00 4. 00 2. 00 1. 00 0. 00 0. 00		
Na₂O	1.75 1.50 1.25 1.00 1.25 1.00 1.25 1.00 1.25 0.00	1.75 1.50 1.25 1.00 1.25 1.00 1.25 1.00 1.25 1.00 1.25 1.00 1.25 0.00	2.00 1.75 1.50 1.25 1.00 0.75 0.50 0.25 0.00		
K ₂ O	2.00 1.75 1.50 1.25 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.09	2.00 1.75 1.50 1.25 1.00 1.25 1.00 0.75 0.50 0.25 0.00	1.75 1.75 1.75 1.25 1.09 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 <t< td=""></t<>		
CI	Cl 1.60 1.40 1.20 1.00 0.80 0.60 0.40 0.20 0.00	Cl 1.69 1.40 1.28 1.00 0.89 0.60 0.49 0.20 0.00	C1 1.60 1.40 1.20 1.00 0.80 0.60 0.40 0.20 0.00		
CO2	40.00 35.00 30.00 25.00 20.00 15.00 20.00 15.00 20.00 15.00 20.00 15.00 20.00 16.00 5.00 0.00 5.00 0.00	40.00 35.00 30.00 25.00 20.00 15.00 16.00 15.00 0.00 5.00 0.00	49.00 35.00 30.00 25.00 20.00 15.00 10.00 5.00 0.00		

図 5.2-34 水中養生試料の元素濃度分布(2/2)(カラーバーの単位は mass%)

(e) SEM/EDS 分析

(i) EDS による分析結果

研磨面の反射電子像及び EDS による気中養生試料の分析結果を図 5.2-36~図 5.2-38 に、水中 養生試料の分析結果を図 5.2-39~図 5.2-40 に示す。

気中養生試料において、500 倍の反射電子像を変質部と健全部で比較すると、健全部には空隙 が少なく密実な組織となっているのに比べ、変質部は数 µm 程度の空隙が目立つ組織となってい る。C-S-H の Ca/Si モル比(以下、C/S)では、変質、健全部ともに 1.0 前後の値となっており、 差異は見られなかった。変質部では組織が粗になり、C-S-H が分解していると考えられるが、分 解していない C-S-H については健全部と同一の C/S となっていることがわかった。

水中養生試料の 500 倍反射電子像を変質部及び健全部で比較すると、変質部ではフライアッシュの粒子以外の部分で暗いグレーとなっている。密実な健全部より、空隙が多くなっているが、 それに加え、C-S-H の C/S も 0.1 付近とかなり低い値となり、C-S-H の化学組成が変化している ことが分かった。水中養生試料の変質部では、Ca が浸出し、空隙の増加や化学組成が変化してい ることが確認された。

(ii) SEM による水和物の形態観察

気中養生試料の SEM による水和物の形態観察結果を図 5.2-41~図 5.2-43 に、水中養生試料 の結果を図 5.2-44~図 5.2-46 に示す。養生条件や部位に因らず、いずれの試料もマトリクスは HFSC コンクリートの主要な水和物である C-S-H となっている。その C-S-H の中に HFSC に多 く含有するフライアッシュ粒子が見られた。フライアッシュは表面からポゾラン反応により水和 するが、HFSC コンクリート中のフライアッシュ粒子はポゾラン反応がほとんど進んでいない印 象であった。また、シリカフューム粒子は 0.2 µm とかなり小さく、今回の倍率 15,000 倍では確 認しにくいが、反応していない粒子の有無については、この程度の倍率でも確認は可能である。 今回の試料では、シリカフューム粒子については確認されなかったため、ほとんど反応している ため粒子が確認できなかったものと考えられる。

次に、変質部と健全部で水和物を比較すると、気中養生試料においては、健全部にはマトリク スである C-S-H の他に球状のフライアッシュと針状結晶のエトリンガイトが見られた。変質部に おいては、エトリンガイトが見られなかった。変質部においてエトリンガイトが確認されないこ とは、前述の元素濃度分布の結果を裏付ける結果となっている。健全部の C-S-H は水和物の組織 があまり明確ではなく、緻密な状態である。それに比較して変質部においては、丸く粒状になっ ており、組織に違いが見られた。前述の研磨面による反射電子像観察でも変質部は健全部に比較 して粗な状態となっており、中性化により組織が変化していることが確認された。

水中養生試料では、健全部及び変質部のいずれも C-S-H、フライアッシュ粒子及びエトリンガ イトが確認された。前述の研磨面による反射電子像では、健全部と変質部で明らかに違いが見ら れたが、SEM 像からは C-S-H の形態などの明確な違いは判断できなかった。





	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO3	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	鉱物名
EDS_1	27.83	32.75	3.15	1.63	0.13	0.54	0.11	-	66.14	0.91	C-S-H
EDS_2	27.51	30.24	3.46	1.88	0.28	0.54	0.11	-	64.02	0.97	C-S-H
EDS_3	29.47	32.36	4.92	1.77	0.42	0.41	0.13	0.37	69.85	0.98	C-S-H
EDS_4	30.99	26.79	3.69	1.90	0.13	0.54	0.08		64.12	1.24	C-S-H
EDS_5	27.27	26.86	4.16	1.55	0.37	0.50	0.05	_	60.76	1.09	C-S-H

(a) 変質部(左図:500倍,右図:500倍)



	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe_2O_3	合計	C/S	鉱物名
EDS_1	27.78	28.55	4.06	3.14	0.21	0.30	0.05	-	64.09	1.04	C-S-H
EDS_2	28.96	24.33	3.36	2.44	0.27	0.40	0.05	0.54	60.35	1.28	C-S-H
EDS_3	29.38	23.18	6.05	4.84	0.27	0.39	N.D.	0.42	64.53	1.36	C-S-H
EDS_4	32.53	27.21	5.85	4.16	0.12	0.21	0.03	0.15	70.26	1.28	C-S-H
EDS_5	26.04	33.27	5.05	2.45	0.40	0.58	N.D.	0.63	68.42	0.84	C-S-H

(b) 健全部(左図:500倍,右図:500倍)

図 5.2-35 気中養生 No.10の EDS 分析結果





	CaO	SiO ₂	AI_2O_3	SO3	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe_2O_3	合計	C/S	鉱物名
EDS_1	27.16	32.51	5.2	1.97	0.32	0.68	—		67.84	0.90	C-S-H
EDS_2	27.07	35.1	3.62	1.96	_	0.67	—		68.42	0.83	C-S-H
EDS_3	28.54	29.1	5.59	2.19	0.4	0.69	—	_	66.51	1.05	C-S-H
EDS_4	23.12	36.44	4.13	1.52	0.3	0.76	—		66.27	0.68	C-S-H
EDS_5	8.01	49.49	22.36	0.62	1.11	1.67	0.64	4.44	88.34	—	FA

(a) 変質部(左図:500 倍,右図:500 倍)



	CaO	SiO ₂	AI_2O_3	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe_2O_3	TiO ₂	合計	C/S	鉱物名
EDS_1	26.08	36.10	5.11	2.71	0.36	0.62	0.08	0	_	71.06	0.77	C-S-H
EDS_2	27.49	34.71	5.19	2.27	0.43	0.55	0.14	1.32	_	72.10	0.85	C-S-H
EDS_3	29.12	35.68	4.34	2.50	0.34	0.44	0.23	-	_	72.65	0.87	C-S-H
EDS_4	28.35	31.74	5.54	2.45	0.76	0.55	0.08	1.30	H	70.77	0.96	C-S-H
EDS_5	31.11	30.58	4.34	2.32	0.16	0.44	0.13	0.50	1.06	70.64	1.09	C-S-H

(b) 健全部(左図:500倍,右図:500倍)

図 5.2-36 気中養生 No.11の EDS 分析結果



	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO3	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	鉱物名
EDS_1	29.02	25.72	5.13	1.06	0.45	0.56	0.16	0.87	62.97	1.21	C-S-H
EDS_2	21.01	29.43	5.18	1.07	0.36	0.81	0.15	-	58.01	0.76	C-S-H
EDS_3	24.78	36.98	3.91	1.93	0.48	0.38	0.11	-	68.57	0.72	C-S-H
EDS_4	26.04	31.84	6.07	1.37	0.34	0.47	0.15	-	66.28	0.88	C-S-H
EDS_5	30.85	28.43	4.63	1.8	0.36	0.49	0.11	—	66.67	1.16	C-S-H

(a) 変質部(左図:500倍,右図:500倍)



	CaU	3102	A1203	303	NgO	R ₂ 0	Na ₂ O	16203	ΠĒΙ	0/5	虱的石
EDS_1	28.68	30.94	5.09	3.57	0.36	0.52	0.01	1.4	70.57	0.99	C-S-H
EDS_2	29.61	25.38	5.42	2.98	0.34	0.29	0.12	0.79	64.93	1.25	C-S-H
EDS_3	27.44	28.19	5.25	3.15	0.26	0.43	0.01	0.93	65.66	1.04	C-S-H
EDS_4	27.20	27.85	6.55	2.99	0.15	0.43	0.07	1.29	66.53	1.05	C-S-H
EDS_5	28.00	26.46	5.40	3.91	0.21	0.53	0.15	N.D.	64.66	1.13	C-S-H

(b) 健全部(左図:500倍,右図:500倍)

図 5.2-37 気中養生 No.12の EDS 分析結果



-								-		-	-	
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO3	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	合計	C/S	鉱物名
EDS_1	5.23	57.67	9.48	_	0.77	1.52	2.22	2.05	_	78.94	0.10	C-S-H
EDS_2	4.14	50.31	11.90	_	0.85	1.64	1.20	2.01	_	72.05	0.09	C-S-H
EDS_3	1.85	68.62	20.16	_	0.90	1.86	1.59	3.51	0.82	99.31	-	FA
EDS_4	3.14	55.52	12.47	_	1.15	1.41	1.64	1.16	_	76.49	0.06	C-S-H
EDS_5	5.13	51.72	7.70	_	0.83	1.44	1.44	1.70	_	69.96	0.11	C-S-H

(a) 変質部(左図:500倍,右図:500倍)



	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO3	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	鉱物名
EDS_1	27.01	27.75	3.55	1.75	0.28	0.35	0.10	-	60.79	1.04	C-S-H
EDS_2	24.17	33.98	4.09	3.00	0.27	0.36	0.12	0.85	66.84	0.76	C-S-H
EDS_3	21.40	25.98	9.71	2.60	0.41	0.79	0.26	2.06	63.21	0.88	C-S-H
EDS_4	28.69	28.97	4.95	4.40	0.52	0.46	0.10	1.12	69.21	1.06	C-S-H
EDS_5	25.95	31.45	4.51	1.70	0.25	0.61	0.10	0.69	65.26	0.88	C-S-H

(b) 健全部(左図:500倍,右図:500倍)

図 5.2-38 水中養生 No.10の EDS 分析結果



	CaO	SiO ₂	AI_2O_3	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe_2O_3	合計	C/S	鉱物名
EDS_1	5.07	48.72	8.86	_	0.54	1.21	0.97	1.44	66.81	0.11	C-S-H
EDS_2	5.69	52.09	7.59	-	0.74	1.15	1.14	0.86	69.26	0.12	C-S-H
EDS_3	4.81	50.69	9.90	_	0.53	1.49	1.46	1.29	70.17	0.10	C-S-H
EDS_4	4.19	52.45	9.98	-	0.53	1.28	0.87	2.11	71.41	0.09	C-S-H
EDS_5	4.76	53.64	9.95	_	0.73	1.41	1.02	1.64	73.15	0.10	C-S-H

(a) 変質部(左図:500 倍,右図:500 倍)



	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO3	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	鉱物名
EDS_1	29.35	29.48	6.98	4.06	1.02	0.30	0.15	_	71.34	1.07	C-S-H
EDS_2	29.26	24.08	5.26	5.13	0.38	0.49	0.11	—	64.71	1.30	C-S-H
EDS_3	27.62	31.38	5.44	3.90	0.20	0.49	0.24	-	69.27	0.94	C-S-H
EDS_4	29.99	29.93	4.72	3.93	0.35	0.49	0.16	_	69.57	1.07	C-S-H
EDS_5	28.55	22.28	6.01	4.51	0.26	0.36	0.10	-	62.07	1.37	C-S-H

(b) 健全部(左図:500倍,右図:500倍)

図 5.2-39 水中養生 No.11の EDS 分析結果



	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO3	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	合計	C/S	鉱物名
EDS_1	4.81	54.63	8.41	—	0.71	0.98	0.49	—	—	70.03	0.09	C-S-H
EDS_2	4.23	51.97	8.59	_	0.99	0.94	0.37	0.70	_	67.79	0.09	C-S-H
EDS_3	5.64	46.25	8.45	_	0.58	1.10	0.53	0.60	1.14	64.29	0.13	C-S-H
EDS_4	4.99	50.07	7.97	_	0.60	1.20	0.50	0.70	_	66.03	0.11	C-S-H
EDS_5	4.92	49.16	7.00	_	1.27	0.90	0.60	0.98	_	64.83	0.11	C-S-H

(a) 変質部(左図:500倍,右図:500倍)



	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO3	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	鉱物名
EDS_1	17.88	35.35	7.83	2.75	0.22	0.75	0.12	1.34	66.24	0.54	C-S-H
EDS_2	28.85	21.44	5.63	5.16	0.40	0.29	0.10	0.91	62.78	1.44	C-S-H
EDS_3	20.71	33.13	5.12	2.85	0.25	0.92	0.21	0.81	64.00	0.67	C-S-H
EDS_4	28.28	23.81	5.63	4.84	0.59	0.39	0.17	0.81	64.52	1.27	C-S-H
EDS_5	25.35	25.28	6.84	4.79	0.72	0.66	0.18	1.47	65.29	1.07	C-S-H

(b)健全部(左図:500倍,右図:500倍)

図 5.2-40 水中養生 No.12の EDS 分析結果



図 5.2-41 気中養生 No.10の SEM 像 (上:6,000倍、中:6,000倍、下:15,000倍)


図 5.2-42 気中養生 No.11 の SEM 像 (上:6,000 倍,中:6,000 倍,下:15,000 倍)



図 5.2-43 気中養生 No.12の SEM 像 (上:6,000倍、中:6,000倍、下:15,000倍)



図 5.2-44 水中養生 No.10の SEM 像 (上:6,000倍,中:6,000倍,下:15,000倍)



図 5.2-45 水中養生 No.11 の SEM 像 (上:6,000 倍,中:6,000 倍,下:15,000 倍)



図 5.2-46 水中養生 No.12の SEM 像 (上:6,000 倍,中:6,000 倍,下:15,000 倍)

(f) 水和生成物の定量

水中養生試験体 3 点、気中養生試験体 3 点の計 6 点に対し、水和生成物の定量を実施した。定 量対象鉱物は、Ca(OH)₂、CaCO₃、エトリンガイト(AFt)、モノサルフェート(AFm)、C-S-H と した。また、これら取得した結果より、C-S-H の CaO/SiO₂ モル比、H₂O/CaO モル比、 (Al₂O₃+SiO₂)/Al₂O₃のモル比を算出した。

まず、粉末 X 線回折にて試料に含まれる結晶性の鉱物の同定を実施した。粉末 X 線回折の測定 結果を図 5.2-47 に示す。また、TG-DTA 測定結果より、試料に含有する Ca(OH)2 量及び CaCO3 量を定量した。TG 曲線を図 5.2-48 に示す。なお、図表に記載した試験体名は、気中養生試験体 は「気」、水中養生試験体は「湿」と略し、続けて「試験体No.」を示した。さらには、変質部を含 む試料を「変質部」、健全部のみの試料を「健全部」として示した。

粉末 X 線回折の測定結果より、全ての試料で主要鉱物はクオーツ、アルバイト、カルサイト (CaCO₃)であり、その他、緑泥石、雲母、ドロマイトを含んでいることを確認した。これらの 鉱物は全て、コンクリート試料中の7~8割を占める骨材に起因する鉱物であり、定量対象鉱物の Ca(OH)₂、エトリンガイト(AFt)、モノサルフェート(AFm)は同定されなかった。このことか ら、セメント鉱物起因の鉱物は結晶性が低く、粉末 X 線回折測定では同定し難い C-S-H が占める 割合が多いと推測した。

TG-DTAの測定結果より、全ての試料でCa(OH)₂は定量されなかった。ベースセメントのHFSC に含まれるシリカフューム及びフライアッシュのポゾラン反応により Ca(OH)₂が消費され、 Ca(OH)₂が検出されなかったものと推定される。なお、前述の SEM/EDS の結果より、シリカフ ュームについてはかなり反応していると考えられるが、フライアッシュの反応率については、あ まり高くないものと推測された。なお、最も多く定量されたのは、600 ℃~800 ℃付近で脱炭酸 による減量が示す CaCO₃であった。これは、コンクリートに石灰石骨材を使用していることから 骨材起因の鉱物である。本分析に供した気中養生試験体の変質部については、フェノールフタレ インによる呈色試験より、外周部が中性化(炭酸化)していることを確認している。この試料に ついては、骨材起因の CaCO₃とともにセメントの中性化に起因する CaCO₃も含有し、検出され ている。図 5.2-48(a)の TG 曲線において CaCO₃の脱炭酸する温度範囲 500~800 ℃の変化に注 目すると、健全部の場合 600 ℃~800 ℃付近にかけて減量が見られるが、気中養生試験体では、 600 ℃~800 ℃付近の大きな減量の前の 500 ℃~600 ℃付近にわずかな減量が見られ、2 段階 の減量が現れている。この 500 ℃~600 ℃付近の減量を本試験では、セメントペーストが中性化 したことにより生成した CaCO₃と仮定し、骨材起因の CaCO₃と分けて後述する水和物定量を行 った。 Ch:緑泥石, Mu:雲母, Q:クォーツ, Ab:アルバイト, CC:カルサイト, D:ドロマイト



水和物の定量結果を分析した試料の骨材を含めた鉱物組成として算出した結果を表 5.2-19 に 示す。全ての試料で骨材起因の鉱物が占める割合は 70 ~80 wt%であった。今回分析対象とした 試料では、コンクリート供試体の一部から試料を採取しているため、分析試料に含まれる骨材割 合はコンクリートの配合とも異なり、さらに試料ごとに異なっている。そのため、分析結果を比 較するためには、骨材を含まないペースト部の鉱物量として算出することが有効である。

ペースト部の鉱物組成として算出した定量結果を表 5.2-20 に、ペースト部の鉱物組成及び C-S-Hの C/S を図 5.2-49 に示す。なお、表 5.2-20 では、C-S-H とシリカゲルは区別せず、シリカゲルを C-S-H 量としてペースト部の鉱物組成を算出した。同表より、全ての試料でシリカゲルが 2 wt% 以上定量された。シリカゲルは、C-S-H が中性化(炭酸化)した際に、CaCO₃とシリカゲルに分解し、生成することが考えられる。本試験では炭酸化、溶脱の影響を受けていない健全部

でも変質部と同程度のシリカゲルが定量されたことから、精度よくシリカゲルが定量されていない可能性がある。この要因の一つとして、HFSCに含まれるシリカフューム、フライアッシュなどの影響が考えられる。両者とも非晶質のSi相が主要な材料であり、水和物定量の分析過程において一部はシリカゲルと同様に定量された可能性がある。HFSCコンクリートについて鈴木法による水和物定量を適用するためには、コンクリート材料についても同様の処理をするなど、様々な検証が必要である。

ペースト部の鉱物組成は、全ての試料で C-S-H が 90wt%前後を占めていた。また、C-S-H に 次いで多くの試料で定量されたエトリンガイト (AFt) は、CaCO₃ が生成した気中養生試験体の 変質部で他の試料より少ない結果となった。別途測定した EPMA による元素濃度分布の測定結果 でも、変質部では、エトリンガイトを構成する成分の SO₃が、減少していることが確認されてお り、ペースト部の炭酸化により、エトリンガイトの一部が分解した可能性が確認された。本試験 では、C-S-H の CaO/SiO₂ モル比や H₂O/CaO モル比など、C-S-H を構成する成分の特性値に 関しても算出しているが、今回、CaO 量、SiO₂ 量に関連する CaCO₃ とシリカゲルの定量値に仮 定を設けていることから、結果は参考値とし、養生の異なる試験体間の値の差には言及しない。

試料名			コンクリート部の鉱物組成(wt%)								
		骨材起因			セメントペースト起因						
		不溶性骨材	CaCO ₃	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	シリカゲル	AFt	AFm	C-S-H		
	気16健全部	39.6	40.6	0.0	0.0	2.8	1.9	0.0	15.0		
気中養生試験体	気16劣化部	56.8	17.4	0.0	2.8	3.7	0.4	0.0	18.8		
	気17劣化部	65.9	6.7	0.0	1.6	2.8	1.1	0.0	21.9		
	湿16健全部	37.6	40.8	0.0	0.0	2.6	1.4	0.0	17.6		
湿潤養生試験体	湿16劣化部	60.7	11.5	0.0	0.0	2.7	2.4	0.0	22.8		
	湿17劣化部	54.1	19.2	0.0	0.0	2.2	2.3	0.0	22.3		

表 5.2-19 骨材を含めた分析試料の鉱物組成

不溶性骨材≒不溶残分

試料名			ペーストき	部の鉱物組成	C-S-H中の各組成mol比				
		Ca(OH) ₂	CaCO3	AFt	AFm	C-S-H	CaO/SiO ₂	Al ₂ O ₃ +SiO ₂ /Al ₂ O ₃	H ₂ O/CaO
	気16健全部	0.0	0.0	9.4	0.0	90.6	0.83	10.63	2.55
気中養生試験体	気16劣化部	0.0	11.0	1.7	0.0	87.3	0.71	7.75	3.55
	気17劣化部	0.0	5.9	4.0	0.0	90.1	0.93	8.52	2.65
	湿16健全部	0.0	0.0	6.3	0.0	93.7	1.10	8.75	2.40
湿潤養生試験体	湿16劣化部	0.0	0.0	8.5	0.0	91.5	1.07	8.46	2.28
	湿17劣化部	0.0	0.0	8.5	0.0	91.5	1.09	8.59	2.31

表 5.2-20 ペースト部の鉱物組成(シリカゲルを C-S-H に含む)



(5) まとめ

(a) 物理特性における気中養生試験体と水中養生試験体の相違点

気中養生試験体と水中養生試験体の相違点を表 5.2・21 に示す。水中養生試験体の方が、気中養 生試験体よりセメントの水和反応が進み、コンクリートの空隙構造が緻密になるため、圧縮強度、 割裂引張強度及び静弾性係数は大きくなり、透水係数は小さくなった。また、超音波の透過速度 は空隙量に加えて、試験体の含水状態の影響を受け、固体>液体>気体の順に透過速度が大きく なる。そのため、透過速度を用いて算出する動せん断弾性係数及び動弾性係数においては、水和 反応による空隙構造の緻密化(空隙率の低下)及び含水状態によって、水中養生試験体の方が気 中養生試験体より大きくなった。なお、材齢1年までの養生によって、気中養生については、表 層3mm程度の範囲で中性化の影響があり、水中養生については表層1mm程度の範囲で溶脱の 影響があるものの、これらの変質は強度特性に大きく影響を及ぼしていない。

項	E	気中養生試験体と水中養生試験体の相違点				
一种口炉改度		圧縮強度及び静弾性係数:気中<水中				
一軸上施强度		⇒セメントの水和反応による緻密化				
		P 波速度及び S 波速度 : 気中 < 水中				
	速度	⇒セメントの水和反応による緻密化(空隙率の低下)、試験体の含水				
弾性波測定		状態による伝播速度の差(気体中の透過速度<液体中の透過速度)				
	谣作这类	動せん断弾性係数及び動弾性係数:気中<水中				
	1年11年9月	⇒P 波速度及び S 波速度から算出するため、速度に依存				
厂列計砼		割裂引張強度:気中<水中				
工表武殿		⇒セメントの水和反応による緻密化				
添せ書段		透水係数:気中>水中				
迈尔武殿		⇒セメントの水和反応による緻密化				
		健全部の空隙率:気中>水中				
空隙率測定		0.01~0.1μの空隙:気中では空隙が存在、水中ではほとんどない				
		⇒セメントの水和反応による緻密化				

表 5.2-21 各試験における気中養生試験体と水中養生試験体の相違点

(b) 養生条件による変質挙動の違い(変質部と健全部の相違点)

養生条件の違いによる変質挙動の違いを整理するため、EPMA、SEM/EDS 及び水和生成物の 定量分析結果を変質部と健全部の相違にて養生別で記載した。各試験により確認された変質部と 健全部の相違点を表 5.2・22 に示す。透水試験については浸透面の違いによる影響はほとんど見ら れなかった。気中養生及び水中養生とも変質部が表層のみであったため、その影響がなかったも のと判断される。空隙率(空隙径分布)、EPMA 及び SEM/EDS による微小部の分析のようなミ クロな領域の分析においては健全部と変質部の相違点が確認された。気中養生における中性化(炭 酸化)と水中養生における溶脱変質で、その化学的変化は異なるものの、微細構造としては粗と なる結果が確認された。

また、HFSC コンクリートの既往の研究(鈴木ほか,1990)を参考に水和物定量を実施したが、

その結果について考察できるほどの定量精度はないものと考えられる。骨材に石灰石骨材を使用 していること、シリカフューム及びフライアッシュが多く含まれていることが定量を難しくして いる。水和物を定量するためには HFSC コンクリートに適用できる手法を開発する必要がある。

	項目	気中養生試験体	水中養生試験体		
		浸透面の違いによる影響は小さ	浸透面の違いによる影響は小さ		
透水試験		い	い		
		⇒変質部が表層のみのため	⇒変質部が表層のみのため		
	立 哈 李	試料によって異なる	健全部<変質部		
	上原平		⇒表層からのセメント成分の溶脱		
空隙率測定		変質部では 0.01~0.1μmの空隙	変質部では 0.01μm~0.1μmの		
	空隙径分布	が多く、0.01μm以下が減少	空隙増加		
		⇒C−S−H の中性化・分解	⇒表層からのセメント成分の溶脱		
		濃度低下(健全部>変質部):CaO	濃度低下(健全部>変質部):		
		⇒組織が粗な状態となったため	CaO(表層数百 <i>μ</i> m)		
		濃度低下(健全部>変質部):SiO ₂	⇒養生水へ浸出		
EPMA 元素源	農度分布	⇒炭酸化による SO₃ 水和物の分	濃度上昇(健全部<変質部):		
		解	MgO,Na₂O,K₂O,Cl(表層数百		
		濃度上昇(健全部<変質部):CO ₂	⇒地下水成分の浸透		
		⇒水和物の炭酸化			
		空隙量:健全部<変質部	空隙量:健全部<変質部		
	EDS による分析	⇒変質部では組織が粗になり、	⇒変質部では Ca の浸出による空		
		C-S-H が分解	隙の増加、化学組成の変化		
		健全部:C-S-H,FA,エトリンガイト	健全部, 変質部:C-S-H,FA,エトリ		
SEM/EDS		を確認, C-S-H が明確でなく、緻	ンガイトを確認		
	SEM による水和	密	⇒明確な違いは見られず		
	物の形態観察	変質部:エトリンガイトは確認でき			
		ず, C−S−H が丸く粒状			
		⇒炭酸化による組織の変化			
水和生成物の空景公析		ペースト部のエトリンガイトの組	健全部と変質部では明確な違い		
		成∶健全部>変質部	は見られず		
///iu_/////////////////////////////////	人主/1/1	⇒炭酸化によるエトリンガイトの			
		分解			

表 5.2-22 各試験により確認された変質部と健全部の相違点

(c) 既存の知見との比較

吹付けコンクリートには設計基準強度が 18 N/mm² と 36 N/mm²の 2 種類あり、材齢 28 日の 圧縮強度が設計基準強度以上となるように配合設計される。また、吹付けコンクリートは初期の 強度発現が重要であることから、参考文献(土木学会, 2005)では、材齢 24 時間の圧縮強度(プ ルアウト試験による推定強度)を設定することを標準としており、その強度は概ね5N/mm²また は8N/mm²とすることが多いとされている。さらに、細骨材率が場所打ちコンクリートに比べて 大きいため、施工性を考慮して単位水量を大きくする傾向にある。

OPC コンクリートに比べてセメント量が少なく、初期における強度発現が低い HFSC コンク リートは、圧縮強度を設計基準強度以上とするために、OPC コンクリートより低水結合材比に設 定する。また、低水結合材比による流動性の低下を、高性能 AE 減水剤の添加によって抑制する ことが多い。本試験の HFSC コンクリートは材齢 28 日で 53.9 N/mm²であり、吹付けコンクリ ートの強度特性としては十分な性能を有している。さらに、HFSC コンクリートは、シリカフュ ーム及びフライアッシュを含んでおり、長期に渡って強度発現が継続し、コンクリートが密実に なるため、空隙率や透水係数は OPC コンクリートより小さくなると推察される。

吹付けコンクリートが用いられる構造物は、吹付け後に覆工コンクリートが施工されることが 多いため、吹付けコンクリートに対する長期強度や耐久性などを確認することがほとんどない。 そのため、参考文献(土木学会,2005、土木学会,2018)においても長期に関する要求性能を 設定しておらず、吹付けコンクリートの施工性能や吹付け直後の強度、覆工コンクリートの施工 までの短期強度に関する要求性能が主となっている。したがって、本試験のように材齢1年経過 した吹付けコンクリートの特性や変質を確認することは、社会の信頼感を更に高めていく上で、 重要なデータの蓄積となる。

5.3 坑道周辺地質環境の長期的な変化に関する解析

5.3.1 予察的解析で得られた課題への対応方法の検討

本節では、2020年に実施した予察的解析の成果や課題(原環センター・原子力機構, 2021;以降, 予察的解析と称す)を踏まえ、課題に対する検討を実施した。そして、その結果を踏まえ、次節 の坑道周辺地質環境の長期的な変化に関する解析を行っている。具体的には、以下の課題につい て個別に検討を実施しており、以降その結果の概要を述べる。

- 引張破壊が生じた場合の岩盤の透水係数変化に関する室内試験
- ・ 力学的なモデル化・解析手法の妥当性の評価
- 水理学的長期変化解析における境界条件の評価と設定方法の提示

(1) 引張破壊が生じた場合の岩盤の透水係数変化に関する室内試験

(a) 試験の目的

予察的解析では、周辺岩盤の長期的な変形や破壊の進行によって周辺岩盤の透水性も変わって いるものと考えた。そして、解析で得られた岩盤のひずみや応力から透水係数の変化に変換する ために、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(郷家ほか,2011)から、岩盤のひずみ一透水係数の関係を整理し、その関係 式を力学的変化解析に用いた。このことは、坑道掘削に伴い周辺岩盤中にせん断破壊によって亀 裂が生じ、掘削損傷領域(以下、EDZ)に透水性の増加に繋がっていることを暗に仮定している ことになる。一方、予察的解析において構築した幌延の深度350m坑道周辺の力学的な概念モデ ルでは、EDZ内は引張破壊によって生じた亀裂が卓越する部分であり、それによって透水係数が 大きく増加していたことが示されている(図 5.3-1)。よって、EDZ内の透水性変化に対しては、 引張破壊で生じた亀裂に対する透水係数の変化をモデルに組み込んだ方が適切であると考えられ る。この EDZ内の応力の経時変化により EDZ内の通裂の開口幅が変化し、それに伴った EDZ 内の透水係数が変化すると考えられる。よって、EDZ内の透水性の経時変化の予測を行うために 引張亀裂を対象とした応力一透水係数関係が必要となるため、事例としている幌延の深度350 m 付近に分布する岩石を用い人工的に引張亀裂を生成した上で、その亀裂を対象とした室内透水試 験を実施した。



(原環センター・原子力機構, 2021)

(b) 試験試料

試験試料は、稚内層の珪質泥岩で、ボーリングコアとして深度 350 m の調査坑道で採取された 室内試験用岩石コア(φ 65 mm)を用いた。

図 5.3-2 に使用した試料と供試体の作成状況を示す。本試験で使用する試験試料としては、直径 50 mm、高さ 100 mm の円柱形の試料が必要となるが、ボーリングコアは連続したコアではなかったため、亀裂などのない健全な部分のコアの中で試験体試料に必要な長さ 100 mm 以上となるコアを抽出して試験体試料として使用した。

またボーリングコアは直径 65 mm であることから、本試験で使用する直径 50 mm 試料とする ためにリボーリングを行う必要がある。ボーリングコアをそのままリボーリングするにはコアの 径が短く、リボーリングの際にコア自体の回転や破損などが起きる可能性がある。そこで、リボ ーリングでの十分な径を確保するために、図 5.3・2 に示すようにコンクリートテストピース作製 用のモールドにラップとガムテープで保護したコア試料を入れて、その周りにセメントを埋めて リボーリングするための径を確保するようにした。そしてセメントが硬化した後に、φ50 mm の ロッドでリボーリングを行った。

人工亀裂は、圧裂引張で亀裂を作成する場合、亀裂面が変形して不自然な形になることがある ことから、くさびを打ち込んで作製することとした。くさびを打ち込む際に試験試料が局部的に 破壊するのを防ぐために、リボーリングした試験試料の側面にエポキシ樹脂を塗布し、さらに側 面の軸方向にくさびがはまる程度の溝を対面になるように2つ入れ、図 5.3-3 に示すようにくさ びを打ち込むことで人工亀裂を作製した。その後、作製した亀裂面や試験試料本体が破損しない ように固定をした状態で、本試験で使用する高さ100 mm とするためにコア切断機で試験試料を カットして、平面研削盤にて端面成形を行い、試験試料を作製した。

試験試料は複数試料作製し、人工亀裂の作製状態が良い試料を透水試験に使用する試料として 3 試料選定した。試験に使用した試料名及び試験試料の寸法を表 5.3-1 に示す。また各試験試料 の写真を図 5.3-4 に示す。各試料の亀裂面は全体的に滑らかであり、風化や変質などは認められ なかった。



a)ボーリングコアの状況





b) リボーリングのためのコア試料周りのセメント打設状況

c) リボーリングの状況

図 5.3-2 供試体及びリボーリングの状況



図 5.3-3 人工亀裂の作製状況

	試験1本目	試験2本目	試験3本目	W
試料 No.	No.5	No.1	No.3	
長さ $L(mm)$	100.1	106.5	99.8	7
亀裂の幅 w(mm)	45.5	45.7	47.3	



図 5.3-4 供試体の外観及び作成した亀裂面の状況

(c) 試験方法

(i) 試験装置

亀裂透水試験には、MTS 社製の三軸圧縮型透水試験装置(図 5.3-5、図 5.3-6)を用いて行った。本試験装置は、載荷装置、三軸セル、液圧発生装置(2 台)、貯留槽、拘束圧発生装置、送水・ 排水装置から構成されており、定水位法及びトランジェントパルス法による透水試験が可能であ る。今回は定水位法のみで透水試験を行うので、貯留槽は使用しない。液圧発生装置と拘束圧発 生装置の最大圧力は 80 MPaで、液圧発生装置の2台はそれぞれ試験試料両端の間隙水圧を制御 する。また各液圧発生装置には、ピストンの変位を測定するための変位計が備えられており、こ の変位を測定することにより流量が求められる。試験に用いた計測器を表 5.3-2 に記す。

装置	仕様
圧力計(拘束圧用)	MTS 社製、容量 80 MPa
圧力計(間隙水圧用)	MTS 社製、容量 80 MPa
間隙水圧計	㈱共和電業製 PG-50KU、容量 5.0MPa
送・排水ピストン変位計	SENSOTEC 社製、容量 88.9 mm
送・排水用ピストン・タンク	MTS 社製、ストローク 88.9 mm、容積 328 cm ³
差圧計	MTS 社製社製、容量 20 MPa
変位計	㈱東京測器研究所製 RAW-2-50、容量2mm

表 5.3-2 亀裂透水試験に使用する計測器



図 5.3-5 三軸圧縮型透水試験装置1 (載荷装置及び三軸セル)



図 5.3-6 三軸圧縮型透水試験装置 2 (左:液圧発生装置と貯留槽、右:拘束圧発生装置)

(ii) 透水係数の求め方

本試験では定水位法による透水試験を行った。定水位透水試験では、所定の差圧を試験体に与え、上流側と下流側の流量が等しくなった時を定常と見なし、その時の流量Qを計測する。そして、ダルシーの法則、平行平板の一様流の透水係数の理論式から、亀裂の水理学的開口幅t_fを求めて、 亀裂の透水係数k_fを得ることができる。

ここで、Q:流量、 k_f : 亀裂の透水係数、w: 亀裂の幅、L: 試験体の長さ、 t_f : 亀裂の水理学的 開口幅、h: 水頭差、 ρ_w : 水の密度、g: 重力加速度、 μ : 水の粘性係数である。

(iii) 試験条件

亀裂に作用させる有効拘束圧(垂直応力)の範囲は 0.3 ~20 MPa とした。有効拘束圧の最小 値 0.3 MPa はこれまでの実績値より設定し、有効拘束圧の最大 20 MPa は 2020 年度の解析結果 から設定した。載荷経路は、0.3 MPa→20 MPa→0.3MPa の昇圧過程 1 回、降圧過程 1 回とし、 それぞれ 0.3 MPa、1.0 MPa、3.0 MPa、10 MPa、20 MPa、10 MPa、3.0 MPa、1.0 MPa、0.3MPa の時に透水試験を行い(9回/試験試料の透水試験)、単一亀裂の垂直応力-透水係数関係を取得し た。昇圧速度、降圧速度は、15 ~60 分間で所定の圧力に達した後、約 60 分放置し、試料内の間 隙水圧分布が一様になってから試験を実施した。間隙水圧は、深度 350 m の調査坑道にて採取さ れたことを考慮して 3.5 MPa とし、透水試験時の差圧については、試験時の流速(流量)を見て 設定することとした。透水試験時の計測項目は、拘束圧、間隙水圧、送水・排水量、差圧である。

また透水試験時には亀裂の開口幅の変化量を測定するために、図 5.3-7 に示すひずみゲージ式 リング型変位計を試料の上下端面からそれぞれ 3.3 cm の位置に設置した(図 5.3-8)。



図 5.3-7 ひずみゲージ式リング型変位計



概略図

(iv) 試験手順

亀裂透水試験の試験手順の詳細を以下及び図 5.3-9 に示す。

- (a) 亀裂を発生させた試験試料の側面にシリコンシーラントを塗布し、メンブレンを装着する。 そして、シリコンシーラントが固まるまで試験試料が乾燥しないように静置し、その上から 2 枚目のメンブレンを装着する。
- (b)ひずみ変位計アタッチメントをメンブレンに開けられた穴から試験試料に直接取り付け、外 部からの油の滲入、内部からの水の滲出を防ぐため、このアタッチメントと穴の周囲にシリ コンシーラントを塗布する。

(c)真空ポンプを使用してデシケータ内にて真空脱気を行いながら試験試料を 24 時間以上水浸 させる。

(d)試験装置の配管及び送・排水用タンクに脱気水を入れる。

(e)試験試料の乾燥防止と空気の混入を防ぐため、有孔板やペデスタルなどの装着は水中で行い、 試験試料にひずみ変位計を取りつけ三軸セルに設置する。そして、拘束圧を0.2 MPa かける。

(f)配管及び試験試料端面付近の空気を取り除くため、真空ポンプを装置に接続し、10 分間真空 脱気を行った。

(g)注水タンクから大気圧にて、配管及び試験試料に脱気水を注水させる。

(h)拘束圧を 0.5 MPa、間隙水圧を 0.2 MPa にすることにより、有効拘束圧を 0.3 MPa とし、 その状態で 12 時間以上静置した。そして、間隙水圧用注水タンクの送水ピストンが安定した こと確認した後、昇圧速度 30 分で拘束圧を 3.8 MPa、間隙水圧を 3.5 MPa にすることによ り、有効拘束圧を 0.3 MPa にし、60 分以上静置した。

(i)有効拘束圧 0.3 MPa で 60 分以上保持し、送水側、排水側の水圧は、それぞれ 3.6 MPa 及び 3.4 MPa とし、差圧を 0.2 MPa として透水試験を行った。

(j)透水試験後、次の有効拘束圧まで昇圧後 60 分放置し、透水試験を行う。この作業を所定の有 効拘束圧について繰返し行う。



図 5.3-9 試験時の供試体設置状況など

(d) 試験結果

透水試験を実施した 3 試験試料の亀裂の透水試験結果を表 5.3·3~表 5.3·5 に、各試験試料の 有効拘束圧と透水係数、亀裂の水理学的開口幅、亀裂の透水係数、試験試料のひずみゲージ変位 量と有効拘束圧の各関係図を図 5.3·10~図 5.3·13、図 5.3·15~図 5.3·18、図 5.3·19~図 5.3·22 に示す。なお、試験試料のひずみゲージ変位量と有効拘束圧の関係図では、試験開始前の初期値 を 0 とし、各有効拘束圧で実施した透水試験終了時の変位量を示している。以降、各供試体の試 験結果の概要を示す。

(i) 試験1本目試料 No.5 透水試験結果

試験試料 No.5 の亀裂の透水係数は、昇圧過程では約 1.8E-5 m/s から約 1.9E-6 m/s へと徐々に 小さくなった。一方、降圧過程では徐々に透水係数が大きくなると考えられたが、約1.9E-6 m/s から約 4.0E-6 m/s の間で推移して大局的には透水係数が大きくなるものの、10 MPa から 3 MPa への降圧時において透水係数が小さくなる結果が認められた。この10 MPa から3 MPa への降圧 時では、3MPaへの降圧後は週末の土日の2日間拘束圧を保持した状態であったことから、亀裂 が閉じる方向に動いたことが考えられた。しかし、図 5.3-13 に示すひずみゲージ変位量と有効拘 東圧の関係を見ると、実際は亀裂が開く方向に動いており、亀裂が閉じる方向には動いていない かったことが分かる。さらに、図 5.3-14 に示す降圧時 3 MPa 状態維持のひずみゲージ変位量の 経時変化からも亀裂が閉じる方向には動いていないかったことが分かる。従って、この 10 MPa から3MPa への降圧時で透水係数が減った理由としては、目詰まり、あるいは、試験途中で土日 を挟んだことにより浮遊物が亀裂内に沈着した可能性が考えられる。また、図 5.3-13 から、昇圧 過程で亀裂が閉じる方向に動いており、変位量の変化の推移は透水係数の変化の推移と整合して いる。一方で、降圧過程で亀裂が開く方向に動いているが、前述した通り、目詰まり、あるいは 沈着が生じたことから、変位量の変化の推移と透水係数の変化の推移で整合性が認められなかっ たと考えられる。なお、上部と下部の変位量の違いを見ると、下部に設置した変位計の方が変位 量は大きかった。また、透水試験後の変位量は初期値より開く結果となった。初期値より変位量 が開く原因については定かではないが、試験時の岩石内部の水圧が抜けきれずに、岩石自体が膨 らんだままとなっていた可能性が考えられる。

		有効	間隙水圧	差圧	流量	透水係数	亀裂開口幅	亀裂 透水係数	ひずみゲージ 変位量	
	測定日	拘未圧							下部	上部
		MPa	MPa	MPa	m³/s	m/s	mm	m/s	mm	mm
		0	0	0	0	-	-	-	0	0
	2021/10/20	0.3	3.5	0.2234	9.03E-10	2.02E-09	4.74E-03	1.84E-05	0.024	0.027
	2021/10/21	1.0	3.5	0.2018	3.96E-10	9.81E-10	3.73E-03	1.14E-05	0.040	0.025
昇圧	2021/10/21	3.0	3.5	0.4013	2.87E-10	3.57E-10	2.66E-03	5.79E-06	0.101	0.076
	2021/10/21	10.0	3.5	0.7984	2.76E-10	1.73E-10	2.09E-03	3.57E-06	0.238	0.159
	2021/10/22	20.0	3.5	0.9997	1.30E-10	6.50E-11	1.51E-03	1.86E-06	0.345	0.185
	2021/10/22	10.0	3.5	0.8001	1.44E-10	8.98E-11	1.68E-03	2.31E-06	0.184	0.105
降圧	2021/10/25	3.0	3.5	0.4027	2.30E-11	2.86E-11	1.15E-03	1.08E-06	0.000	0.009
	2021/10/25	1.0	3.5	0.5935	6.72E-11	5.67E-11	1.44E-03	1.70E-06	-0.076	-0.031
	2021/10/25	0.3	3.5	0.1951	7.90E-11	2.02E-10	2.20E-03	3.97E-06	-0.118	-0.060

表 5.3-3 試験1本目試料 No.5 透水試験結果



係数と有効拘束圧の関係





図 5.3-14 試験1本目試料 No.5の降圧時3 MPa 維持でのひずみゲージ変位量の経時変化

(ii) 試験 2 本目試料 No.1 透水試験結果

試験試料 No.1 の亀裂の透水係数は、昇圧過程では約 1.9E-5 m/s から約 3.3E-7 m/s へと徐々に 小さくなり、降圧過程では約 3.3E-7 m/s から約 1.2E-6 m/s へと徐々に透水係数が大きくなり、 試験結果としては、土岐花崗岩で実施した既往の透水試験結果と似た結果となっている。図 5.3-18 に示すひずみゲージ変位量と有効拘束圧の関係を見ると、上部に設置した変位計では、1本 目の No.5 の試験試料と同様に、昇圧過程で亀裂が閉じる方向に、降圧過程で亀裂が開く方向に動 いており、変位量の変化の推移は透水係数の変化の推移と整合していることが分かる。しかし、 下部に設置した変位計では、上部とは異なる推移を示しており、昇圧過程の 3 MPa までは亀裂が 閉じる方向に動いていたが、それ以降では亀裂が開く方向に動き、試験後の変位量は初期値より 大きく開く結果となった。No.5 試験試料の試験結果でも試験後の変位量が初期値より開く結果と はなっていることから、同様に試験時の岩石内部の水圧が抜けきれずに、岩石自体が膨らんだま まとなっていた可能性が考えられる。ただし、試験試料 No.1 では 3 MPa から 10 MPa への昇圧 過程の時点で開く方向に変位量が変化しており、この昇圧過程時においては試験時の岩石内部の 水圧が抜けきれないといった現象とは関係ないことから他の現象が生じていたと考えられるが、 今回取得したデータでは原因については把握できなかった。

	測定日	有効	明治シロ	ᆇ┍╴	达旦	透水 低粉 鱼 刻 問 口 恒		亀裂	ひずみ	ゲージ
		拘束圧 ^{回除小圧} 差圧 流重		流里	迈小桥致	电发用口幅	透水係数	下部	上部	
		MPa	MPa	MPa	m³/s	m/s	mm	m/s	mm	mm
	2021/11/9	0.3	3.5	0.2149	8.86E-10	2.19E-09	4.87E-03	1.94E-05	0.115	0.213
	2021/11/9	1.0	3.5	0.4145	5.27E-10	6.76E-10	3.29E-03	8.83E-06	0.181	0.239
昇圧	2021/11/9	3.0	3.5	0.6155	1.29E-10	1.11E-10	1.80E-03	2.65E-06	0.344	0.328
	2021/11/10	10.0	3.5	1.0126	6.15E-11	3.23E-11	1.19E-03	1.16E-06	0.107	0.451
	2021/11/10	20.0	3.5	2.0044	1.83E-11	4.86E-12	6.35E-04	3.29E-07	0.045	0.496
	2021/11/11	10.0	3.5	2.0031	2.24E-11	5.94E-12	6.78E-04	3.76E-07	-0.158	0.415
降圧	2021/11/11	3.0	3.5	2.0047	4.11E-11	1.09E-11	8.31E-04	5.64E-07	-0.299	0.296
	2021/11/11	1.0	3.5	0.8088	3.58E-11	2.35E-11	1.07E-03	9.42E-07	-0.339	0.217
	2021/11/12	0.3	3.5	0.2113	1.31E-11	3.30E-11	1.20E-03	1.18E-06	-0.420	0.134

表 5.3-4 試験 2 本目試料 No.1 透水試験結果



係数と有効拘束圧の関係



25.0

25.0

(iii) 試験 3 本目試料 No.3 透水試験結果

試験試料 No.3の亀裂の透水係数は、昇圧過程では約3.7E-5 m/sから徐々に小さくなるものの、 10 MPa から 20 MPa への昇圧時では、約7.8E-7 m/s から約8.5E-7 m/s へと僅かに大きくなる 結果が得られた。降圧過程では約8.5E-7m/sから約2.5E-6m/sの間で推移して大局的には透水係 数が大きくなるものの、3 MPa から1 MPa への降圧時において透水係数が小さくなる結果が認 められた。図 5.3-22 に示すひずみゲージ変位量と有効拘束圧の関係を見ると、3 MPa から 1 MPa への降圧時の変位量は亀裂が開く方向に動いており、亀裂が閉じる方向には動いていなかった。 従って、試験試料 No.1 の時と同様に、この 3 MPa から 1 MPa への降圧時で透水係数が減った 理由としては、目詰まりが生じていたと考えられる。また、降圧時の10MPaの透水係数は約1.2E-6 m/s で、昇圧時の 10 MPa の約 7.8E-7 m/s の透水係数よりも大きい値となり、他の試験試料と は異なる結果が認められた。図 5.3-23 に示す既往の堆積岩亀裂試料の透水試験の結果(郷家ほか、 2011)においては、拘束圧がある値以上になるとほぼ一定となり、亀裂のない試料の透水係数に 近づくようになる結果が認められている。また、図 5.3-24 に示すように、同じ岩石試料でも亀裂 によって透水係数や拘束圧に対する依存性が異なることが分かる(酒井ほか,2009)。本試験結果 において有効拘束圧が 10 MPa 以上では透水係数の変化は小さいことから、図 5.3-23 に示すよ うな結果が現れている可能性があり、亀裂のない試料の透水係数に近づいている可能性があるこ とが考えられる。また他の試料と同様に本試料でも、透水試験後の変位量が初期値より開く結果 となった。

	測定日	有効	明治セロ	辛亡	法旦	ふしんち	鱼列門口后	亀裂	ひずみ	ゲージ
		拘束圧	间隙小庄	左仁	加里	迈小桥銊	电贫用口帼	透水係数	下部	上部
		MPa	MPa	MPa	m³/s	m/s	mm	m/s	mm	mm
	2021/11/17	0.3	3.5	0.2075	2.50E-09	6.00E-09	6.73E-03	3.70E-05	0.057	0.047
	2021/11/17	1.0	3.5	0.4085	3.15E-09	3.84E-09	5.80E-03	2.75E-05	-0.003	0.136
昇圧	2021/11/17	3.0	3.5	0.6077	5.30E-10	4.35E-10	2.80E-03	6.43E-06	0.024	0.273
	2021/11/18	10.0	3.5	1.0066	3.72E-11	1.84E-11	9.77E-04	7.81E-07	0.049	0.331
	2021/11/18	20.0	3.5	2.0051	8.44E-11	2.10E-11	1.02E-03	8.52E-07	0.094	0.408
	2021/11/19	10.0	3.5	1.0084	6.78E-11	3.35E-11	1.19E-03	1.16E-06	-0.018	0.295
降圧	2021/11/19	3.0	3.5	1.0093	9.70E-11	4.79E-11	1.34E-03	1.48E-06	-0.098	0.234
	2021/11/19	1.0	3.5	0.6118	3.38E-11	2.76E-11	1.12E-03	1.02E-06	-0.133	0.193
	2021/11/19	0.3	3.5	0.2142	4.55E-11	1.06E-10	1.75E-03	2.51E-06	-0.150	0.143

表 5.3-5 試験 3 本目試料 No.3 透水試験結果









図 5.3-21 試験3本目試料No.3の亀裂の透水 係数と有効拘束圧の関係





図 5.3-22 試験3本目試料 No.3のひずみゲー ジ変位量と有効拘束圧の関係



図 5.3-23 亀裂を含んだ堆積岩の透水係数と拘束圧の関係(酒井ほか, 2009)



図 5.3-24 亀裂を含んだ結晶質岩の透水係数と拘束圧の関係(酒井ほか, 2009)

(iv) 亀裂透水試験結果の比較

各試験試料の亀裂の透水係数と有効拘束圧の関係、透水係数と有効拘束圧の関係、ひずみゲージ変位量上部・下部と有効拘束圧の関係の比較図をそれぞれ図 5.3-25~図 5.3-28 に示す。

本試験で実施した3試料の亀裂の透水係数は、E-7~E-4 (m/s)のオーダーであり、瑞浪の土岐 花崗岩の人工亀裂の例(E-5~E-3(m/s)オーダー)(郷家ほか,2005)よりも小さかった。また、 図 5.3-27 に示すように、上部に設置した変位計の閉合量は約 0.1~0.5 mm であり、瑞浪の土岐 花崗岩の人工亀裂の例(約0.06~0.36 mm)(郷家ほか, 2005)よりも大きい傾向となった。本試 験で実施した3 試料の亀裂の透水係数の変化率は昇圧過程、降圧過程のいずれにおいても、試験 試料 No.1 が最も大きく、試験試料 No.5 が最も小さかった。一方で、図 5.3-27 に示す上部に設 置した変位計の閉合量は、試験試料 No.1 が最も大きく、試験試料 No.5 が最も小さいことから、 透水係数の変化率と上部に設置した変位計の閉合量の関係が整合的な結果となっていることが分 かる。従って、本試験では上部に設置した変位計の閉合量が透水係数の変化に大きく寄与してい ることが考えられる。しかし、図 5.3-28 に示す下部に設置した変位計の閉合量と透水係数の変化 率には関係性が認められなかった。透水試験後の変位量が初期値より開く結果は、いずれの試料 でも下部に設置した変位計で顕著に現れている。前述したように、初期値より変位量が開く原因 については、試験時の岩石内部の水圧が抜けきれずに、岩石自体が膨らんだままとなっていた可 能性が考えられたが、透水試験では試料の底面から上面に向かうように差圧をかけて通水してお り、底面側の方が高い水圧であることから、試験試料の下部の方が岩石内部の水圧は抜けきれず に、岩石自体が膨らんだままとなっていたとしてもおかしくはないと考えることができる。また、 図 5.3-26 には、幌延の深度 350 m 地点において採取された泥岩試料に巨視亀裂を導入させて実 施した透水試験(鎌田ほか,2021)の結果(1.3E-10 m/s、5.4E-10 m/s)も記載しているが、この 値と比較すると、本試験における昇圧過程の 0.3MPa の時の透水係数(E-9~E-8(m/s)のオー ダー)は大きい値となった。







図 5.3-27 各試験試料のひずみゲージ変位量 (上部)と有効拘束圧の関係の比較図



図 5.3-26 各試験試料の透水係数と有効拘束 圧の関係の比較図



図 5.3-28 各試験試料のひずみゲージ変位量 (下部)と有効拘束圧の関係の比較図

(2) 力学的なモデル化・解析手法の妥当性の評価

ここでは、予察的解析で課題された力学的モデル化・解析手法の妥当性確認の一環として、幌 延深地層研究所の東立坑 GL-159.3 m に設置されている光ファイバー式地中変位計の計測結果を 検証データとした力学的なモデル化手法及びパラメータの設定方法の妥当性の検討を実施すると ともに、事例としている深度 350 m 調査坑道の坑道周辺の地中変位計測結果について、長期変化 解析の検証データの観点からその品質などについて可能な範囲での検討を行った。以降にそれら の結果を示す。

(a) 光ファイバー式地中変位計の計測結果に基づく力学的なモデル化手法とパラメータ設定 方法の妥当性の検討

(i) 光ファイバー式地中変位計の計測結果

対象となる光ファイバー式地中変位計の設置状況を図 5.3・29 に示す。この地中変位計は、原子 力機構が開発した FBG 方式のものであり、岩盤変位の長期モニタリング性能及び計測結果の妥 当性の検証のために設置されている(青柳ほか, 2020)。なお、図中の■印は、アンカーの設置位 置を示している。

原子力機構より提供された光ファイバー式地中変位計により得られた岩盤の経時変化の計測結 果を図 5.3-30 に示す。図 5.3-30 では区間 1 から区間 7 の変位の値が示されているが、これらの 区間は、図 5.3-31 に示された区間 1 から区間 7 と対応している。また、区間変位量とは、その区 間における伸縮を示しており、圧縮変位が負となっている。図 5.3-30 の計測期間は、2009 年 11 月 2 日から 2021 年 8 月 2 日となっていて、途中、データの欠損はあるものの、計測器設置後 10 年以上経過後も、計測結果に異状は見られず、適切な計測が行われていることが分かる。また、 文献(青柳ほか, 2020)) によると、計測結果を見ると計測器設置直後から、区間 3 以外の区間で は、時間とともに区間変位量が増加していて、2014 年以降、区間変位量は微増しているが、収束 する傾向であることも分かったとしている。



図 5.3-29 光ファイバー式地中変位計の設置状況 (青柳ほか, 2020)





図 5.3-31 光ファイバー式地中変位計の区間(青柳ほか, 2020)

(ii) 東立坑 GL-159.3m を対象とした解析の条件設定

予察的解析では、過去に行われた研究事例からパラメータなどを設定したことから、同様に東 立坑 GL-159.3 m を対象とした研究事例や過去に行われた試験結果などから、解析に必要なパラ メータなどを設定する。

水平方向の地中変位計測結果を対象とした解析であるため、解析モデルは水平面内の二次元と し、光ファイバー式地中変位計による計測期間を考慮して、解析対象期間は12年間程度とした。

1) 解析対象の坑道の断面と支保工の仕様

妥当性の検討対象は、図 5.3-32 に示す光ファイバー式地中変位計が設置されている東立坑 GL-159.3mの断面である(原子力機構,2011)。立坑の内径は 6.5 m、掘削径は 7.3 m となっている。 また、覆エコンクリートの厚さは 0.4 m、設計基準強度は 40 N/mm²、鋼製支保工として H-150 ×150 が 1m ピッチで配置されていて、材質は SS400 となっている。また、ロックボルトは打設 されていない。



図 5.3-32 東立坑 GL-159.3m の断面及び覆工(原子力機構, 2011)

2) 岩盤のクリープ変形の構成則

予察的解析において岩盤の長期的な変形挙動において、時間依存性を考慮できる構成則として、 大久保・金(1993)が考案したモデル(以下、大久保モデル)を使用したことから、ここでも、 岩盤のクリープ変形を表す構成則として、この大久保モデルを用いる。

大久保モデルは、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、及び 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。なお、図 5.3-33 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。



図 5.3-33 応力-ひずみ曲線

コンプライアンス λ 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、 λ 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

$$a = \frac{1}{t_0} \left(\frac{m}{n_0 + 1}\right)^{\frac{m}{(n_0 - m + 1)}}$$
 If 5.3-4

$$\Delta \varepsilon^* = \lambda^* \Delta \sigma^*$$

式 5.3-5

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、 λ_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、大久保・金(1993)は to = 120 (s)を 標準としている。さらに、m と no 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Δσoが増加すると、次式にしたがって増加する。

ここに、 n_0 は一軸圧縮応力下でのnの値、 σ_c 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、予察的解析と同様に、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、νoは、弾性領域で求められたポアソン比である。

3) 物性值

a) 岩盤

岩盤の変形特性や強度特性の物性値については、予察的解析の中で示されている東立坑 GL-159.3 m 付近の声問層の値から引用した。また、声問層に対する大久保モデルのパラメータ no と m についても、同様に予察的解析時の検討結果を参照した(図 5.3-34、表 5.3-6)

これらを見ると、声問層の大久保モデルの時間依存性を示すパラメータ no は、21 から 66 の範 囲にあり、平均値は 48 となっている。一方、予察的解析で対象とした珪質泥岩では、標準的な場 合で no = 30、クリープ変形が速い場合で no = 18 とした。時間依存性を示すパラメータ no 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(図 5.3-35)。よって、声問層のパラメー タ no に対して、平均値の 48 を採用すると、2020 年度の予察的解析の結果よりも、クリープ変形 が起きにくくなる可能性があり、計測結果と異なる挙動になると考えられた。そこで、まず、no が最小値となる組合せとして、声問層の大久保モデルのパラメータの基本パターンとして no = 21 と m = 20 を選択することにした。この組合せで光ファイバー式地中変位計の計測結果をうまく 再現できなかった場合は、大久保モデルのパラメータ no と m のパラメトリックスタディを行う ことにした。解析による区間変位量の経時変化の結果は後述するが、基本パターンである no=21 と m = 20 の組合せでは、解析による区間変位量の経時変化は、変位の収束時期が計測結果とは異 なるものになったことから、結果的には、大久保モデルのパラメータ no と m の組合せによるパ ラメトリックスタディを行うことにして、それぞれの値を設定した。解析に用いた声問層の物性 値を表 5.3-7 に示す。



図 5.3-34 稚内層・声問層の一軸圧縮強度と大久保モデル定数 noの比較

グループ	亀裂の傾き	試験体No	初期ヤング率	初期コンプライア ンス	ピーク強度	時間依存性の 定数	ピーク強度以降 の傾きの定数	ピーク強度を 決める定数
			E ₀ (MPa)	λ1 (1/MPa)	σc (MPa)	n _o	m	а
		7-1-3	305	0.00328	5.78	66	66	1.33E+107
グループ①	なし	11-2-3	228	0.00439	4.64	21	20	6.13E+26
		11-3-3	262	0.00382	5.34	31	29	1.26E+41
グループ②	0°	12-3-3	258	0.00388	5.16	54	45	3.65E+63
グループ③		11-3-2	253	0.00395	5.02	51	41	2.55E+56
グループ④	30°	7-1-2	319	0.00313	4.27	61	51	9.55E+82
グループ⑤		4-2-3	267	0.00374	4.78	52	48	4.77E+74
グループ⑥	40°	2-1-1	311	0.00322	5.18	47	28	7.16E+29
グループ⑦	60°	9B-4-1	277	0.00361	4.49	47	46	2.64E+75
平均值			276	0.00367	4.96	48	42	1.48E+106
						:最大値	:最小	直

表 5.3-6 声問層の大久保モデルのパラメータ


図 5.3-35 時間依存性の程度を示すパラメータ no の概念図(平本ほか, 2008)

	声問層
岩級区分	CL-M(Hr.)
単位体積重量(kN/m ³)	15.1
ヤング率(MPa)	450
ポアソン比	0.17
粘着力(MPa)	0.6
内部摩擦角(°)	15
時間依存性を表すパラメータ n ₀	21、25、30
破壊進行性を表すパラメータ m	5、10、20

表 5.3-7 東立坑 GL-159.3m における声問層の物性値

b) 覆工と応力解放率

覆工については、予察的解析と同様に、線形弾性体としてモデル化し、計測期間中のコンクリートの硬化の進行や劣化などの時間変化については考慮しないことにした。覆工の物性値については、既往の検討(松永ほか,2005)に示されている値を基に設定した。覆工コンクリートと鋼製支保工の物性値を表 5.3-8 に示す。

X OIO C		
	覆エコンクリート	鋼製支保工
ヤング率(GPa)	10.6	200
ポアソン比	0.2	0.3

表 5.3-8 覆エコンクリートと鋼製支保工の物性値

本解析では、鋼製支保工は、覆工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。

$$A = A_S + A_C$$

式 5.3-11

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。

合成要素の等価ヤング率 E は、E = 12.5 GPa となった。同様にして、合成要素の等価ポアソン 比 v を求めると、v = 0.20 となった。また、覆工の設置のタイミングは、既往の検討(松永ほか, 2005) と同様に、応力解放率 50 %のときとした。

4) 初期応力

初期応力も、既往の文献(津坂ほか,2012)と同様に設定することにした。土被り圧と岩盤の単 位体積重量の積から推定される鉛直応力に対して、水平面内の最大主応力は 1.3 倍、その最小主 応力は 0.9 倍とした。また、最大主応力の方向は東西方向とした。

既往の文献(森岡ほか,2006)に示される岩級区分の深度分布を図 5.3-36に示す。GL-25 m までは岩級区分は D であり、また、この文献では、岩級区分 D の単体体積重量は 14.8 kN/m³ であることが示されている。さらに、GL-25 m 以深の声問層の単位体積重量は、岩級区分が異なっていても表 5.3-7 と同じ値となっている。

よって、鉛直応力σνは、以下のようになった。

 $\sigma_{\rm V} = 14.8 \,({\rm kN/m^3}) \times 25.0 \,({\rm m}) + 15.1 \,({\rm kN/m^3}) \times (159.3 \cdot 25.0) = 2.40 \,({\rm MPa})$

また、水平面内の最大主応力σH_max、水平面内の最小主応力σH_minは、以下のようになった。

σ_{H_max} = 1.3×σ_V = 1.3×2.40 (MPa) = 3.12 (MPa)【東西方向】

σ_{H_min} = 0.9×σv = 0.9×2.40 (MPa) = 2.16 (MPa) 【南北方向】



(出典:森岡ほか:幌延深地層研究計画における地下研究坑道の支保設計,第35回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p71,2006)

図 5.3-36 岩級区分の深度分布(森岡ほか, 2006)

5) 解析モデル

東立坑 GL-159.3 m を対象とした解析に用いたモデルを図 5.3-37 に示す。要素には二次元の平 面ひずみ要素を用いた。対称性と光ファイバー式地中変位計の設置位置を考慮した、水平面の南 側半分をモデル化した。掘削径 D を 7.3 m として、壁面から東西側の境界までを 5D 相当、南側 の境界までを 5D 相当の領域を設定した。境界条件は、モデルの東西側、南側、対称軸のそれぞれ の面に対して垂直方向の変位を固定とした。また、図 5.3-29 に示した光ファイバー式地中変位計 のアンカーの位置と節点が一致するように要素分割を行っている。



図 5.3-37 東立坑 GL-159.3m の解析モデル

6) 解析ケース

解析ケースに関して、3)の a)でも述べたように、始めに、声問層の大久保モデルのパラメー タの基本パターンとして、no=21 と m=20 を選択した。しかし、後述に示す通り、この組合せで は変位の収束時期が計測結果とは異なるものになったことから、表 5.3-7 に示したように、大久 保モデルのパラメータ no と m をそれぞれ 3 つ設定し、それら全ての組合せとして 9 ケースの感 度解析を行った。

7) 解析コード

予察的解析と同様に、解析には、市川・亀村(1988)による有限要素法の解析コードを基にして、大久保モデルの構成則を組み込んだ自社開発のものを用いた。

8) 計測結果との比較による妥当性の検討

解析上、区間変位量はアンカー位置に対応する節点間の距離の変化から求めることができる。 解析ケースごと区間変位量の経時変化を表 5.3-9 に示す。

この表において、左下のグラフが、基本パターンである no=21、m=20 の場合の結果である。これを見ると、区間変位量は、概ね 1~2 年程度で収束し、その後の変位量の経時変化は、図 5.3-30 に示された計測結果よりも小さいことが分かった。

また、計測結果では、3年目以降の定常クリープのような変位量の微増の状態が示されているが、これに対しては、表 5.3-9の基本パターン(no=21、m=20)以外の結果に示されているように、大久保モデルのパラメータ no と m を適切に設定することで、表現できることが確認できた。

ただし、室内試験の結果から得られた声問層の大久保モデルのパラメータは、表 5.3-9 に示さ れているように、no=20~66、m=20~66となっている。今回、パラメトリックスタディを行っ た結果、計測結果と調和的であった大久保モデルのパラメータの範囲は、時間依存性を表すパラ メータ no は 21~30 であり、室内試験結果の範囲の下限側となっている。また、破壊進行性を表 すパラメータ m は 5~20 となっていて、その範囲からは外れているものもあった。よって、パラ メータの設定方法については今後検討の余地があると考えられる。



表 5.3-9 解析ケースごとの区間変位量の経時変化

(b) 深度 350m 坑道周辺の地中変位計測結果の品質などの検討

ここでは、予察的解析にて解析対象とした深度 350 m の試験坑道 3 の坑道周辺の地中変位計測 結果について、長期変化解析の検証データの観点から、その品質などの検討を行った。

幌延深地層研究所では、岩盤や支保工の安定性のモニタリングのために、従来型の多段式岩盤 変位計、覆工・吹付コンクリート応力計、鋼製支保工応力計が 39 断面に設置されている(青柳ほ か,2020)。深度 350 m 試験坑道 3 も、その断面の 1 つとなっている。ただし、その地中変位の計 測結果を見ると、いずれの計測値もノイズを多く含んでいる様に見えるため、そのままでは、長 期変化解析の検証データに適用することができない状態となっている。そこで、物理探査や脳計 測などでノイズ除去、複数話者の音声信号の分離、通信分野における混線信号の分離などに用い られる独立成分分析を用いて、試験坑道 3 で計測された地中変位計測結果のノイズ除去を試みた。

独立成分分析とは、原信号は統計的に独立しているという仮定のもとに、信号の統計的な性質 を利用して多次元信号を分離して復元する手法として特徴づけられる(村田, 2004)。

独立成分分析は、統計的に独立なn個の信号源から発生する未知の信号

 $\mathbf{s}(t) = (s_1(t), s_2(t) \cdot \cdot \cdot s_n(t))^T, \quad t=0,1,2,\cdots$

を考える。信号源は互いに干渉し合わず、各信号 *S*(*t*)は互いに統計的に独立であるとあるとすると、この信号源から発生した信号を n 個のセンサーで測定した結果、得られた観測信号を

$$\mathbf{x}(t) = (x_1(t), x_2(t) \cdot \cdot \cdot , x_n(t))^T, \quad t=0,1,2,\cdots$$

と書くことにし、原信号と観測信号の関係は、未知の作用素 Aを用いて、

 $\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t)^T$

と記述されると仮定している。

通常の独立成分分析の定式化では、観測信号の次元は原信号の次元よりも大きいか、原信号と 同じと仮定される。しかし、不要な混乱を避けて議論を簡単にするために、観測点の数と原信号 の数は同じとすることが多い。これは作用素とその逆作用素を用いて原信号、観測信号、及び復 元された信号の関係をしやすくするための措置となっている。特に、作用素そのもの、あるいは その一部が行列で表される場合には、その逆行列の計算が必要となるが、逆行列が存在するため には対象とする行列が正則な正方行列でなくてならず、そのためには少なくとも原信号と観測信 号の次数が一致してなくてはいけないからである。

独立成分分析には、いくつかのアルゴリズムが提案されている(村田, 2004)。ここでは、Python のライブラリである scikit-learn (サイキットラーン)に実装されている FastICA (Cournapeau et al., 2022) を用いることにした。

なお、独立成分分析は、混信して観測された信号から原信号を復元する手法であることと、 FastICA では計測された信号の数と原信号の数は同じとしている。よって、n 個の原信号に対し て、外から1 個以上のノイズ成分が混入して、n 個の観測信号として地中変位計のデータが得ら れたのではなく、元々のクリアであった n 個の地中変位の原信号が、混信して観測されてしまっ たことによって、n 個の地中変位の観測信号がノイズを含んだように見えていると想定している ことを、前提条件としていることに留意する必要がある。

(i) 深度 350 m 調査坑道の地中変位の計測結果

深度 350m 試験坑道 3 の計測器のレイアウトを図 5.3-38 に示す。当該断面には、5 つの方位に E1、E4、E5、E6、E7 の地中変位計が設置されている(青柳ほか, 2020)。



図 5.3-38 深度 350m 試験坑道 3 の計測器のレイアウト(青柳ほか, 2020)

全地中変位計による計測結果を図 5.3-39 に示す。地中変位計による計測データとしては、2013 年8月22日17時から2019年3月31日23時までの分が公開されている。この図を見ると、いずれの計測値もノイズを多く含んでいるために、正常な計測ができていない状態と評価される。

ここでは、5本の地中変位計のうち、E1の計測結果に対して独立成分分析によるノイズ除去を 試みることにした。天端部に設置されている E1 地中変位計による計測結果を図 5.3-40 に示す。



図 5.3-39 深度 350 m 試験坑道 3 の地中変位計による計測結果(青柳ほか, 2020 に加筆)



図 5.3-40 E1 地中変位計による計測結果(青柳ほか, 2020 に加筆)

(ii) 独立成分分析の結果と考察

図 5.3-40 に示した区間 1 から区間 5 までの計測値を観測された信号とみなした、FastICA (Caurnapeau et al., 2022) による独立成分分析を行った。復元された5つの信号(x1~x5)を 図 5.3-41 に示す。なお、独立成分分析によって復元された信号の番号には不定性があることから、 便宜的なものであり、原信号の番号とは必ずしも対応しないことに留意が必要であるとされてい る (村田, 2004)。

図 5.3-41 を見ると、復元されたいずれの信号もノイズ成分が含まれていて、地中変位の計測結 果に対して、独立成分分析によってノイズ成分を除去することはできなかった。

独立成分分析を適用する前提条件として、元々クリアだった地中変位のデータを混信して計測 してしまったことによって、ノイズが入ったように見えているということを想定していた。しか し、結果的にノイズを除去できなったことから、この前提条件は成り立たず、地中変位のデータ は、外部からのノイズが混じって計測していたと解釈した方がよいと考えられる。



図 5.3-41 E1 地中変位に対する独立成分分析の結果

(3) 水理学的長期変化解析における境界条件の影響の評価と設定方法の提示

予察的解析では、概念化された深度 350 m 調査坑道の地質モデルに基づいて解析モデルを構築 し、水理学的長期変化解析を実施した。その結果、モデル境界までの距離が近いことにより解析 結果がその影響を与えている可能性が考えられた。そこで、適切なモデル領域を検討するための 解析を実施した。加えて、適切な領域を確保したモデルを用いて坑道壁面(本解析では、EDZ2の 表面を指す)からの蒸発を考慮した解析を実施しその影響を確認した。

(a) 解析コード

解析には、予察的解析と同様に多成分三相系の流体解析コードである TOUGH3 の TMVOC モジュールを用いた。

(b) 解析モデルの概念図

水理解析では、力学解析と同様に二次元解析モデルを用いた。図 5.3-42 に解析モデルの概念図 を示す。モデルは坑道中心を軸とした左右対称形であるため、同図に示す赤の破線で囲った右半 分をモデル化した。モデル上端は地表面とした。なお、後述するように、坑道中心からモデル下 端までの距離を可変とし、モデル側方までの距離は 1,000 m で一定とした。



図 5.3-42 解析モデル概念図

(c) 物性值

モデル化した各材料の移動物性及び水分特性について記述する。

(i) 移動物性

表 5.3-10 にモデル化した各材料の移動物性を示す。移動物性値は 2020 年度の予察的解析(原 環センター・原子力機構, 2021)と同一の設定とした。

パラメータ	EDZ1	EDZ2	母岩	
透過係数[m ²]	9.50E-14	9.50E-17	9.50E-19	
透水係数[m/s]	8.20E-07	8.20E-10	8.20E-12	
比貯留係数[1/m]	6. 76E-06			
有効間隙率	4. 00E-01			

表 5.3-10 移動值物性

(ii) 水分特性

各材料の水分特性曲線は、式 5.3-12 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、*S*は飽和度であり、α、λが水分特性パラメータである。αは保水性に寄与するパラメー タであり、保水性が EDZ1 < EDZ2 < 母岩となるように設定した。設定した水分特性パラメー タを表 5.3-11 に示す。支保工については、母岩と同一の設定とした。また、EDZ1、EDZ2、母岩 それぞれの水分特性曲線を図 5.3-43 に示す。

表 5.3-11 水分特性曲線(VG モデル)のパラメータ

	EDZ1	EDZ2	母岩
α[1/Pa]	5.000E-05	1.667E-05	5.000E-06
λ	0. 455	0. 455	0. 455



比透水係数及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 5.3-13 及び式 5.3-14 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。透気係数及び透水係数曲線を図 5.3-44 に示す。



図 5.3-44 比透水係数及び透気係数曲線

(d) 解析ケース

解析ケースを表 5.3-12 に示す。モデル領域の検討のため、坑道からモデル下端境界までの距離 を 150 m、500 m、1,000 m とした 3 ケース (Case a-L、Case a-M、Case a-S) を設定した。モデル側方境界までの距離は 1,000 m で一定とした。モデル上端までの距離は、地表面までの 350 m とした。なお、これらのケースでは、母岩のみをモデル化し、支保工及び EDZ1, EDZ2 は考慮していない。

これら3ケースの結果から、境界の影響のない十分大きな領域のモデルを最適なものとして選択し、そのモデルで坑道周辺を細分割して EDZ2 を考慮した解析(Case b)を実施した。また、 Case b と同一のモデルで坑道壁面からの蒸発を考慮した解析(Case c)を実施した。

ケース名	側方境界		下端境界		上端境界		坑道内	ED70	
	条件	距離 W[m]	条件	距離 H⊾[m]	条件	距離[m]	条件	EDZZ	
Case a-S	不透過	1,000	不透過	150	不透過	350	大気相当	なし	
Case a-M	不透過	1,000	不透過	500	不透過	350	大気相当	なし	
Case a-L	不透過	1,000	不透過	1, 000	不透過	350	大気相当	なし	
Case b	不添過	1 000			350	十年相坐	┺비		
Gase D	个返迴	1,000	1,000 102310	리 데 것	(液相のみ)	350	EBUXY	6 20	
Case c	不透過 1,000	1 000	1,000 不透過	最適値	不透過	350	350 蒸発を考慮可能な条件	あり	
		1,000			(液相のみ)				

表 5.3-12 解析ケース一覧

(e) 解析メッシュ

(i) モデル領域検討のための解析(Case a-S、M、L)

モデル領域の検討解析に用いたメッシュを図 5.3・45~図 5.3・47 に示す。坑道近傍を細かくし、 坑道からモデル境界に向かって要素サイズが大きくなるように作成した。坑道内の領域の要素は 大気相当の要素とした。なお、坑道壁面での気相圧力とガス組成を実質的に固定境界条件とする ため、坑道内の領域の要素については、計算上の体積を実体積の 10⁵⁰倍、すなわち体積を無限大 と仮定した。







図 5.3-46 Case a-M の解析メッシュ図



図 5.3-47 Case a-L の解析メッシュ図

(ii) EDZ2 を考慮した解析(Case b、Case c)

最適な領域のモデルで EDZ2 を考慮した解析に用いたメッシュを図 5.3-48 に示す。EDZ2 を モデル化するために、坑道近傍を細分割し、坑道からモデル境界に向かって要素サイズが大きく なるように作成した。坑道内の領域の要素は大気相当の要素とした。なお、坑道壁面での気相圧 力とガス組成を実質的に固定境界条件とするため、坑道内領域の要素の計算上の体積を実体積の 10⁵⁰ 倍とした。また、モデル上端には地表面に接する大気相当の要素をつけ、地表面での気相圧 力とガス組成を実質的に固定境界条件とするため、この要素についても計算上の体積を実体積の 10⁵⁰ 倍とした。



図 5.3-48 Case b 及び Case c の解析メッシュ図

(f) 初期·境界条件

(i) 初期条件

1) モデル領域検討のための解析(Case a-S、Case a-M、Case a-L)

初期条件の設定を表 5.3-13 に示す。初期圧力については、岩盤の領域全体で水位が G.L.-10 m としたときの静水圧分布とした。坑道内及びモデル上端の領域は大気圧相当の圧力とした。

初期飽和度については、岩盤の領域で飽和状態とし、坑道内及びモデル上端の大気に相当する 領域では飽和度0とした。

液相中及び気相中の初期モル分率については、岩盤にあたる領域で液相(地下水)へのメタン 及び二酸化炭素の溶解を考慮し、既往の研究(Miyakawa et al., 2019)による組成の設定を参考に、 深度に比例した設定とした。坑道内の要素では気相中の窒素及び酸素を考慮し、窒素が0.79、酸 素が0.21のモル分率とした。

a) 最適なモデル領域で EDZ2 を考慮した解析 (Case b、Case c)

最適なモデル領域で EDZ2 を考慮した解析についても、表 5.3-13 に示す初期条件とした。モデル上端の大気に相当する要素は、坑道内の要素と同一の初期条件とした。

	坑道	EDZ2	母岩	
初期溶解量 CH4 (モル分率)		(初期圧力) / (ヘン	·リー定数)×0.922	
初期溶解量 CO ₂ (モル分率)		(初期圧力) / (ヘン	リー定数)×0.0177	
初期溶解量 O2(モル分率)	0.21			
初期溶解量 N2(モル分率)	0.79			
初期圧力(Pa)	1.013E+5	ρ g(350-10)- ρ gz+(1.013E5)		
温度(℃)	25.5			

表 5.3-13 初期条件

2) 境界条件

境界条件の区分を図 5.3-49 に示す。以下、設定について述べる。

a) モデル領域検討のための解析(Case a-S、Case a-M、Case a-L)

坑道面を除く境界は気相及び液相に対して不透過境界とした。坑道面は、液相及び気相に対し て浸透可能な境界とした。

b) 最適なモデル領域で EDZ2 を考慮した解析 (Case b、Case c)

坑道面とモデル上端を除く境界は、気相及び液相に対して不透過境界とした。坑道面は、液相 及び気相に対して浸透可能な境界とした。モデル上端は、気相のみが浸透可能で、液相に対して は不透過な境界とした。

Case c の坑道壁面からの蒸発を考慮した解析では、坑道内の相対湿度に対応する水ポテンシャルをケルビンの式(式 5.3-15)で算出し坑道内の要素に設定した。

$$\Psi = \frac{RT}{V_w} \ln\left(\frac{e}{e_0}\right)$$

式 5.3-15

ここで、Ψが水ポテンシャル [Pa]、*R*が気体定数 [J mol-1 K]、*e*/*e*₀が相対湿度、*T*が絶対温度 [K]、*V*_wが水のモル容積 [m³ mol-1]である。坑道内の相対湿度は、既往の研究(宮川ほか, 2021)に より 50%とした。



- #1 Case b及びCase cでは液相のみを不透過とした。 #2 Case cでは蒸発を考慮した。

図 5.3-49 境界条件

(g) 解析結果

(i) Case a-L, Case a-M, Case a-S

1) 圧力(全圧)分布

図 5.3-50~図 5.3-52 にそれぞれ、Case a-L、Case a-M、Case a-S の圧力分布図を示す。いず れのケースも、時間の経過とともに同心円状に圧力の低下領域が拡大する。また、モデル側方境 界付近では、いずれのケースも圧力分布に時間変化が見られない結果となっている。モデル下端 境界については、およそ 500 年まではいずれのケースにも差異は見られないが、1,000 年後の結 果では Case a-S において、モデル下端で圧力の低下領域が他のケースに比べて拡大していること が分かる。



(c) 470 年

(d) 1,000 年

図 5.3-50 Case a-L: 圧力分布の変化 (150 年後から 1,000 年後、解析領域全体)



(c) 487 年

(d) 1,000 年

図 5.3-51 Case a-M: 圧力分布の変化 (150 年後から 1,000 年後、解析領域全体)











2) 飽和度分布

図 5.3-53~図 5.3-55 にそれぞれ、Case a-L、Case a-M、Case a-S における坑道周辺の飽和度 分布を示す。

解析開始からおよそ 200 年までは、いずれのケースも圧力の低下により気体が溶脱し不飽和領 域が坑道を中心に同心円状に拡大した。およそ 300 年以降は、徐々に不飽和領域が上方へと移動 し、坑道下方の不飽和領域が縮小する結果となった。1,000 年後の結果は Case a-L と Case a-M は不飽和領域の形状が似通っているが Case a-S については不飽和領域の拡大範囲が広くなって いる。Case a-S では坑道下方の圧力低下領域が境界まで達し、水平方向へ拡大しているために、 坑道下方からの水の供給が他のケースに比べて少なくなったためと推察される。このことよりモ デル下端までの距離を充分に確保しない場合には坑道周辺の不飽和領域に影響すると考えられる。 よって、モデル下端までの距離を 1,000m 確保したモデル領域を最適とすることとした。







(b)282 年









(a) 150 年







(c) 487 年

Time:1000.0yr saturation 1.000 0.995 0.990 0.985 0.980 0.975 0.970 0.965 0.960 0.955 0.950 0.945 0.940 0.935 0.930 0.925 0.920 0.915 0.910 0.905 0.900

(d) 1,000 年

図 5.3-54 Case a-M: 飽和度分布の変化 (150 年後から 1,000 年後、坑道周辺拡大図)











(ii) Case b

1) 圧力分布

図 5.3-56 及び図 5.3-57 に解析領域全体の圧力分布と坑道周辺の圧力分布をそれぞれ示す。時間の経過とともに坑道を中心に圧力低下領域が拡大する。坑道周辺拡大図では、同心円状に発生した圧力低下領域は、さらに坑道上方へと拡大することが確認できる。また、圧力勾配は坑道下方の領域で大きくなっており、モデル下方から坑道に向かう流れが卓越すると考えられる。





(d) 1,000 年

図 5.3-56 Case b : 圧力分布の変化(1) (202 年後から 1,000 年後、解析領域全体)



(a) 202 年









(c) 434 年
(d) 1,000 年
図 5.3-57 Case b : 圧力分布の変化(2)
(202 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 100m の範囲)

2) 飽和度分布

図 5.3-58 に飽和度の坑道周辺拡大図を示す。圧力の低下に伴う脱ガスの影響で、坑道を中心に 不飽和領域が発生し、時間経過とともに同心円状に拡大する。さらに解析開始から 300 年以降は、 不飽和領域がモデル上方へと遷移し、坑道下方の不飽和領域は縮小する。また、EDZ2 の領域に 着目すると、比較的飽和度が高くなっていることが分かる。この高飽和度の領域は時間の経過に 伴い重力の影響により移流し、坑道下部に高飽和度の領域が偏って形成される。



(a) 202 年



(b) 323 年







3) 気相の CH₄ 及び CO₂ のモル分率

図 5.3-59 及び図 5.3-60 に気相の CH4のモル分率と CO2のモル分率をそれぞれ示す。いずれ も坑道周辺の拡大図である。

気相のCH4のモル分率は坑道から同心円状に分布しており、坑道付近で値が小さくなっている。 CH4は、初期状態で飽和に近い量が液相に溶解しているため、圧力低下により発生する気体のほ とんどが CH4 である。この CH4 は坑道への気相の流れと分散の影響により減少していると考え られる。一方で CO2のモル分率は坑道付近で相対的に高い値となっていることが分かる。これは、 CH4と CO2のヘンリー定数の違いによるものと考えられる。また、気相の存在しない領域で CH4 のモル分率のコンター図に乱れが見られるが、これは数値誤差の影響によるものと考えられる。













(a) 202 年









(c) 434 年
(d) 1,000 年
図 5.3-60 Case b: 気相における CO₂ のモル分率
(202 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 100m の範囲)

4) 気相の O2 のモル分率

図 5.3-61 に、坑道周辺の気相の O_2 モル分率を示す。気相の O_2 モル分率に時間変化は見られず、岩盤への移動は見られない。





0.02

0.01

0.02

0.01

5) 気相及び液相の流向分布

図 5.3-62 及び図 5.3-63 に、気相及び液相の流向分布図を示す。気相及び液相のいずれも坑道 に向かう流れが形成されており、坑道から岩盤に向かう気相及び液相の流れは見られず、いずれ も時間変化は見られない。この坑道に向かう気相と液相の流れは、気相の O₂が岩盤に存在しない ことと整合的である。これは、既往の研究(Mochizuki,A. et. al., 2020)により提案された、溶脱 した気体が岩盤への O₂の侵入を妨げるというモデルと矛盾しない結果である。

また、気相の矢印が欠落している領域が見られるが、この領域では気相が存在しないため、数 値誤差の影響によるものと判断される。











(c) 434 年
(d) 1,000 年
図 5.3-62 Case b: 気相の流束分布
(202 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 100m の範囲)



Time:322.6yr Pressure [Pa] 2.50E+06 2.40E+06 2.30E+06 2.20E+06 2.10E+06 2.00E+06 1.90E+06 1.80E+06 1.70E+06 1.60E+06 1.50E+06 1.40E+06 1.30E+06 1.20E+06 1.10E+06 1.00E+06 9.00E+05 8.00E+05 7.00E+05 6.00E+05 5.00E+05

(b) 323 年

Pressure [Pa]

2.50E+06

2.40E+06

2.30E+06

2.20E+06

2.10E+06

2.00E+06

1.90E+06

1.80E+06

1.70E+06

1.60E+06

1.50E+06

1.40E+06

1.30E+06

1.20E+06

1.10E+06

1.00E+06

9.00E+05

8.00E+05

7.00E+05

6.00E+05

5.00E+05

Time:1000.0yr







VIEW

and the second

A CONTRACTOR

図 5.3-63 Case b:液相の流束分布 (202 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 100m の範囲)

(iii) Case c

1) 圧力分布

図 5.3-64 及び図 5.3-65 に解析領域全体の圧力分布図と坑道周辺の圧力分布図をそれぞれ示す。 圧力低下領域は時間経過とともに坑道を中心に同心円状に拡大し、さらに坑道上方へと拡大する。 これは、Case b と同様の傾向である。また、モデル領域全体及び坑道周辺拡大図のいずれにおい ても、Case b との圧力分布に差異は見られない。したがって、坑道壁面からの蒸発の有無は坑道 周辺及び解析領域全体の圧力分布に影響しないことが分かる。







図 5.3-64 Case c: 圧力分布の変化 (1) (140 年後から 1,000 年後、解析領域全体)



(c)490年

(d)1,000 年

図 5.3-65 Case c: 圧力分布の変化 (2) (140 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 100m の範囲)

2) 飽和度分布

ime:486.7yr

図 5.3-66 に坑道周辺の飽和度分布図を示す。不飽和領域が坑道を中心に同心円状に拡大し、時間の経過とともに上方へと拡大していく。この不飽和領域の拡大範囲と時間経過によるふるまいについては Case b との差異は見られない。ただし、Case b においては、EDZ2 に比較的に高飽和度な領域が形成されるが、Case c では解消されている。これは坑道壁面からの蒸発の影響と考えられる。蒸発の影響は EDZ2 の領域で顕著であり、母岩の不飽和領域には影響を与えないことが分かる。





(b) 310 年

saturation

1.000

0.995

0.990 0.985

0.980

0.975 0.970

0.965

0.955

0.950

0.940

0.935 0.930

0.925

0.920 0.915

0.910

0.905

0.900




3) 気相の CH₄ 及び CO₂ のモル分率

図 5.3-67 に気相の CH4 モル分率、図 5.3-68 に CO2 のモル分率をそれぞれ示す。この両者と もに Case b の結果との差異は見られない。また、CH4 モル分率については、飽和領域でコンター に乱れが見られるが、これについては数値誤差の影響によるものと考えられる。



(140年後から 1,000年後、坑道壁面から水平方向に 100mの範囲)



(a) 140 年











4) 気相の O2 のモル分率

図 5.3-69 に気相の O_2 のモル分率を示す。坑道壁面からの蒸発を考慮した Case c においても Case b と同様に岩盤の気相に O_2 は見られない。





5) 気相及び液相の流向分布

図 5.3-69 及び図 5.3-71 に気相と液相の流向分布図をそれぞれ示す。蒸発を考慮した Case c で も Case b と同様に、気相及び液相のいずれも、坑道に向かう流れの向きとなっており、坑道から 岩盤に向かう流れは見られない。





(a) 140 年









(140年後及び 1,000年後、坑道壁面から水平方向に 100m の範囲)



Time:310.0yr Pressure [Pa] 2.50E+06 2.40E+06 2.30E+06 2.20E+06 2.10E+06 2.00E+06 1.90E+06 1.80E+06 1.70E+06 1.60E+06 1.50E+06 1.40E+06 1.30E+06 1.20E+06 1.10E+06 1.00E+06 9.00E+05 8.00E+05 7.00E+05 6.00E+05 5.00E+05

(b) 310 年



(c) 490 年

Time:1000.0yr Pressure [Pa] 2.50E+06 2.40E+06 2.30E+06 2.20E+06 2.10E+06 2.00E+06 1.90E+06 1.80E+06 170E+06 1.60E+06 1.50E+06 1 (WINNESS) 1.40E+06 A STATISTICS 1.30E+06 1.20E+06 1.10E+06 1.00E+06 9.00E+05 8.00E+05 7.00E+05 6.00E+05 5.00E+05



図 5.3-71 Case c:液相の流束分布 (140 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 100m の範囲)

(4) まとめ

5.3.1 で実施した、予察的解析で得られた課題に対する検討結果を以下にまとめる。

(a) 引張破壊が生じた場合の岩盤の陶酔係数変化に関する室内試験

幌延の深度 350 m 付近に分布する岩石を用いた引張破壊時の透水係数変化に関する室内透水試験を実施して、単一亀裂の垂直応力-透水係数関係を取得した。試験を実施した 3 試料の亀裂の透水係数は、E-7~E-4 m/s のオーダーであり、瑞浪の土岐花崗岩の人工亀裂の例(E-5~E-3 m/s オーダー)(郷家ほか,2005)よりも小さかった。試験試料 No.5 と No.3 では、降圧過程で透水係数が小さくなる事例があった。この室内透水試験結果は、後述の力学的長期変化解析における透水性変化のモデルに反映させた。

(b) 力学的なモデル化・解析手法の妥当性の評価

(i) 光ファイバー式地中変位計の計測結果に基づく力学的なモデル化手法とパラメータ設定 方法の妥当性の検討

2020年の予察的解析と同様にして、東立坑 GL-159.3 m 断面を対象とした岩盤の長期的な変形 挙動の解析を行い、東立坑 GL-159.3 m に設置されている光ファイバー式地中変位計の計測結果 と比較することで、2020年度適用した力学的なモデル化手法及びパラメータの設定方法の妥当性 の検討を行った。解析に必要なパラメータなどは、東立坑 GL-159.3 m を対象とした研究事例や 試験結果などから設定した。また、岩盤の構成則には大久保モデルを用いて、大久保モデルのパ ラメータに関するパラメトリックスタディを行った。

区間変位量の経時変化を比較した結果、大久保モデルのパラメータを適切に設定することで、 計測結果に表れた定常クリープのような変位量の微増の状態を表現できることを確認した。ただ し、そのパラメータは、室内試験の結果の範囲から外れたものもあることから、パラメータの設 定方法に検討の余地があると考えられる。

(ii) 深度 350 m 坑道周辺の地中変位計測結果の品質などの検討

2020年度の予察的解析にて解析対象とした深度 350 m の試験坑道 3 の坑道周辺の地中変位計 測結果について、長期変化解析の検証データの観点から、その品質等について可能な範囲で検討 を行った。具体的には、物理探査や脳計測等でノイズ除去に用いられる独立成分分析を用いて、 試験坑道 3 で計測された地中変位計測結果のノイズ除去を試みたが、独立成分分析で復元された 信号にもノイズが含まれていて、ノイズを除去することはできなかった。このことから、地中変 位のデータは、混信したためにノイズがあるように見えているのではなく、外部からのノイズを 拾って計測していたと解釈される結果となった。

(c) 水理学的長期変化解析における境界条件の影響の評価と設定方法の提示

(i) 境界条件の影響の評価

解析上の制約によりモデルの領域を小さくする必要がある場合は、領域を坑道掘削による影響 が及ばない程度のなるべく小さいものとした上で、周面境界には状態が変化しないよう、固定条 件を与える必要があると考えられる。一方、制約が小さい場合は、領域をなるべく大きく取り、 境界を不透過とすることで条件設定の煩雑さを回避することが可能であると考えられる。

上記の観点から、モデルの領域を大きくしていき、掘削による影響が境界に影響を及ぼさなく

なる大きさを調べた。本業務では気液二相多成分(但し、多成分なのは気相のみであり、液相に ついては水のみ)の浸透流解析を実施しているが、坑道掘削の影響は圧力に最も顕著に表れると 考えられることから、影響の有無の検討は圧力を指標として行った。その結果、坑道中心から側 方、底面までの距離を1,000 m とすることにより、解析結果に対する境界の影響を無視できる程 度まで低減することが可能であると判断された。

(ii) 境界条件の設定方法

前述の通り、坑道壁面からの蒸発を考慮する場合、相対湿度に相当する水のポテンシャルを一 定の毛管圧として坑道内の要素に与えることにより、ポテンシャル勾配の寄与分については設定 可能であると考えられる。本業務で使用した解析モデルについて、この設定の有無による解析結 果の差異を確認したところ、設定した場合に母岩の飽和度には差異が認められないものの、EDZ の飽和度は、より低下することが分かった。このことから、前述の条件設定により蒸発の影響の 一部を考慮可能であると判断される。なお、母岩の飽和度に影響が見られなかったのは、EDZの 飽和度が低下することにより同領域の水の透過度が著しく低下し、大きな動水勾配が形成されて、 母岩の水の圧力低下がわずかであったためであると考えられる。

ただし、相対湿度は蒸発の影響因子の一つであるものの、影響因子には他にも風速、温度勾配、 境界層などが考えられる。今後はこれらその他の影響因子についても、影響を考慮するための設 定方法の検討が必要である。

5.3.2 坑道周辺地質環境の力学的・水理学的長期変化に関する解析

本節では、予察的解析及び 5.3.1 の結果を踏まえ、事例として幌延の深度 350 m 坑道(試験坑 道 3)周辺を対象とし、坑道開放状態における周辺環境の長期変化を実施した結果を述べる。解析 は、以下の条件で行うこととした。

- ・解析対象時間:2020年の予察的解析と同様に、回収可能性維持の期間を念頭におき、坑道掘 削直後を初期状態として最大1,000年までの時間変化を非定常計算する。
- ・モデル化の考え方:解析は二次元解析とし、モデル化及び入力パラメータについては、2020
 年度の予察的解析と同様に設定する。なお、透水係数変化のモデル化については 5.3.1(1)にて 取得した情報を考慮する。
- ・ 解析ケース数:最長の解析時間の1ケース以上とするが、解析結果は、4つ程度の時間断面 で区切って整理を行う。

また、力学・水理解析に使用する解析コードには、5.3.1の検討結果も踏まえ、坑道周辺地質環境の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(掘削損傷領域の範囲の長期変化、 圧力解放による溶存メタンの気化とその移動、坑道通気による岩盤への酸素の侵入など)を考慮 できる予察的解析と同じものを使用した。さらに、今年度の解析では、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、解析を実施した。

(1) 力学的長期変化解析の条件設定

幌延の深度 350 m 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ものと考えられる。

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、5.3.1の検討で モデル化・解析手法について一定の妥当性が示されたことから、予察的解析同様に周辺岩盤のク リープ変形に着目することにした。

力学的長期変化解析の条件に関して、岩盤や支保工の物性値、解析メッシュ、境界条件、初期 状態については、基本的に予察的解析と同じとするが、EDZ1 と EDZ2 については、5.3.1 の結果 も考慮し、物性値及び透水性変化のモデル化を見直した。具体的には、予察的解析では、EDZ1 と EDZ2 の物性値を母岩と同じとしていたが、EDZ1 と EDZ2 の弾性波速度は母岩よりも低下して いることから、弾性係数や強度定数も母岩よりも低下していると考えられるため、それらの物性 値を新たに検討・設定した。また、坑道掘削時の EDZ1 と EDZ2 の透水性の増加は、予察的解析 時に実施した概念モデルの検討結果を踏まえ、引張破壊によって生じた亀裂に起因すると考えら れるために、5.3.1 にて得られた亀裂を含む岩石の室内透水試験の結果からモデル化を行った。

(a) 解析対象の坑道の断面と支保工の仕様

解析の対象は、昨年度の予察的解析と同様、幌延深地層研究センター地下施設深度 350 m の試験坑道 3 とした。試験坑道 3 の断面と縦断を図 5.3-72 と図 5.3-73 に示す。吹付けコンクリートの厚さを 20 cm、鋼製支保工を H-150×150×7×10、材質を SS400 となっている。また、鋼製支保工の設置間隔は、予察的解析と同様に、L = 1.5 m とした。



図 5.3-72 試験坑道3の断面図



図 5.3-73 試験坑道3の縦断図

(b) 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の構成則には、いくつか提案されているが、ここでは、 予察的解析及び 5.3.1 の検討において、岩盤の変形の経時的な変化が適切に表現できると考えら れる大久保モデルを用いる。大久保モデルの詳細については、5.3.1(2)の中で示した通りである。

(c) 物性值

(i) 岩盤

母岩となる深度 350 m の試験坑道の珪質泥岩の変形特性や強度特性については、予察的解析と同じ値を用いた。

一方、EDZ1 と EDZ2 の変形特性、強度特性については設定値を見直すことにしたが、深度 350 m の試験坑道 3 では坑道壁面近傍の弾性波速度の調査は行われていないようなので、深度 350 m の pump station の底盤を対象とした弾性波速度の調査結果(Tsusaka,K., et al., 2014)を参考にして EDZ の強度・変形特性を推定することにした。深度 350 m の pump station の底盤の弾性波速度の分布を図 5.3-74 に示す。この図によると、1st. Layer(橙色)の厚さが 0~0.3 m 、2nd.

Layer(黄色)の厚さが0.3~0.4 m となっていることが示されている。これらの厚さは、予察的 解析で設定された概念モデルに示された EDZ1 と EDZ2 の幅とほぼ等しい。よって、1st. Layer が EDZ1 に、2nd. Layer が EDZ2、3rd. Layer(緑色)が母岩に相当するとしてモデル化を行っ た。



(出典 Tsusaka,K et al, An Investigation on Mechanical Properties of In-situ Rock Mass at the Horonobe Underground Research Laboratory, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, , Proc of 8th Asian Rock Mechanics Symposium,,p 594, 2014)

図 5.3-74 深度 350mの pump stationの底盤の弾性波速度分布 (Tsusaka,K., et al., 2014)

弾性波速度 Vpの比とヤング率 Eの比の関係は、次式のように表される。

$$\left(\frac{V_{p_EDZ}}{V_{p_Host}}\right)^2 = \frac{E_{EDZ}}{E_{Host}}$$
 \vec{z} 5.3-16

ここに、V_{p_EDZ}は EDZ1 または EDZ2 の弾性波速度、V_{p_Host}は母岩の弾性波速度、E_{EDZ}は EDZ1 または EDZ2 のヤング率、 E_{Host} は母岩のヤング率である。

図 5.3-74 と式 5.3-16 より、EDZ1 と EDZ2 のヤング率を表 5.3-14 のように設定した。なお、 EDZ1 と EDZ2 の弾性波速度の値は、幅を持って示されていることから、ヤング率も幅を持った 値となるが、ここでは、平均値を採用することにした。

部位	$V_{p_Host}, V_{p_EDZ}(km/s)$	$(V_{p_EDZ}/V_{P_Host})^2$	E(GPa)
母岩	1.8~ (⇒1.8 とする)	_	1.82(青柳ほか, 2017)
EDZ1	$0.5{\sim}0.6$	$0.0772 \sim 0.111$	0.141~0.202 ⇒ 0.172 とする
EDZ2	0.8~1.0	0.198~0.309	0.360~0.562 ⇒ 0.461 とする

表 5.3-14 EDZ1 と EDZ2 のヤング率の設定

強度定数については、表 5.3-14 のヤング率 E(MPa)を基にして、アイダンほか(1992)がまとめた一軸圧縮強度 σ_{c} (MPa)、内部摩擦角 ϕ (°)の回帰式から設定することにした。アイダンらの回帰式を以下に示す。また、粘着力 C は式 5.3-8 から設定することにした。

$$E = 80\sigma_{c}^{1.4}$$

式 5.3-17

$\phi = 20\sigma_c^{0.25}$

式 5.3-18

得られた EDZ1 と EDZ2 の強度定数を表 5.3-15 に示す。なお、EDZ2 の内部摩擦角 ϕ を式 5.3-17 より計算すると、 ϕ =27.3[°] となるが、母岩の内部摩擦角 ϕ =26[°] よりも増えることは想定 しづらいことから、ここでは、母岩と同じ値とした。以上をまとめた最終的な解析に用いた物性 値を表 5.3-16 に示す。

部位	ヤング率 E(MPa)	一軸圧縮強度σc(MPa)	内部摩擦角 ϕ (°)	粘着力 C(MPa)	
EDZ1	172	1.73	22.9	0.577	
EDZ2	461	3.49	26.0	1.09	

表 5.3-15 EDZ1 と EDZ2 の強度定数の設定

	母岩	EDZ1	EDZ2
一軸圧縮強度(MPa)	15.4	1.73	3.49
ヤング率(GPa)	1.82	0.172	0.461
ポアソン比(-)	0.17	0.17	0.17
粘着力(MPa)	5.9	0.577	1.09
内部摩擦角(°)	26.0	22.9	26.0
時間依存性を示すパラメータ n ₀	30	30	30
破壊進行性を表すパラメータ m	20	20	20
透水係数の初期値(m/s)	8.2E-12	8.2E-7	8.2E-10

表 5.3-16 坑道周辺岩盤の物性値

(ii) 支保工と応力解放率

予察的解析と同様に、支保工ついては、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。また、支保工の物性値についても予 察的解析と同様とし、等価剛性を E = 22.5 Gpa 、等価ポアソン比vは、v = 0.20 とした。支保 工設置のタイミングも、予察的解析と同様応力解放率 78 %のときとした。

(d) 初期応力

初期応力も、予察的解析において設定した値を用いることにし、初期鉛直応力 σ_z =5.63 MPa 、 初期水平応力 σ_x =5.06 MPa と設定した。また、主応力の方向に傾きはない。

(e) 力学的長期変化解析の初期状態

力学的長期変化解析の初期状態も、予察的解析にて設定したものを用いた。力学的変化解析の 初期状態を図 5.3-75 に示す。

岩盤面から 0.4 m 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。また、EDZ1の外側で 1.0 m までの領域が EDZ2 であり、透水係数は2桁増加しているとしている。さらに、EDZ2 の外側は掘削による損傷がない母岩部であり、透水係数の増加はないとしている。EDZ1 と EDZ2 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ている。



図 5.3-75 力学的長期変化解析の初期状態

(f) 透水性変化のモデル化

周辺岩盤の長期的な変形の進行によって、周辺岩盤の透水性も変化することが考えられる。予 察的解析では、母岩、EDZ1、EDZ2のいずれに対しても、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(郷家ほか,2011)から得ら れた、ひずみ-透水係数の関係を整理することで得られた関係式を用い、透水性変化を求めた。 このことは、変形の進行に伴い周辺岩盤中にせん断破壊が起きることによって亀裂が生じ、EDZ の透水性の増加に繋がることを暗に仮定している。

一方、深度 350 m 坑道周辺の力学的な概念モデルでは、EDZ 内は引張破壊によって生じた亀 裂が卓越していて、それによって透水係数が大きく増加したことが示されている。よって、今年 度の力学的長期変化解析における透水性変化には、母岩に対しては、せん断破壊透水試験から得られたひずみ-透水係数の関係式を、EDZ1と EDZ2 は、坑道掘削直後には引張亀裂が入っていることを考慮し、5.3.1(1)で示した引張亀裂を対象とした亀裂透水試験の結果を整理することで得られる関係式を当てはめることとした。

(i) 母岩

予察的解析では、せん断破壊透水試験の結果から、正規化した軸ひずみと透水係数の増加率の 関係を図 5.3-76、式 5.3-19~式 5.3-21 のように設定している。



図 5.3-76 正規化軸ひずみー透水係数の増加率の関係(郷家ほか, 2011 に加筆)

ここに、k は岩盤の透水係数、k₀は透水係数の初期値、 ϵ_{c1} はせん断破壊透水試験の Case3 にお けるピーク強度到達時の軸ひずみ (=0.83%)、 ϵ_{c2} はせん断破壊透水試験の Case3 において透水係 数の増加が頭打ちになったときの軸ひずみ (=1.00%)、 $\epsilon_{1_{max}}$ は最大主ひずみ ϵ_{1} の履歴最大値で ある。

(ii) EDZ1とEDZ2

5.3.1(1)に示した亀裂透水試験を行った 3 本の透水係数の結果はばらつきを持っていることから、対数平均によって平均化すると、図 5.3.77 のようになった。



図 5.3-77 亀裂透水試験によって得られた透水係数の対数平均値

そして、対数平均値の内、透水性変化が大きかった昇圧過程に対して、拘束圧と透水係数の回 帰式を作ることにした。回帰式には、既往の研究(多田ほか,1994)において、坑道周辺岩盤の透 水性変化の予測のために、亀裂の透水係数 kf と亀裂に作用する垂直応力σnの関係を表すために 提案された式 5.3-22 を用いた。

ここに、α、β、γは定数である。

図 5.3-77の昇圧過程の対数平均値に対して、式 5.3-22を適用した場合の回帰式を図 5.3-78 と 式 5.3-23 に示す。



図 5.3-78 有効拘束圧-透水係数の回帰式

ここに、kは亀裂のある供試体の透水係数(m/s)である。

そして、本解析における EDZ1 と EDZ2 における透水性変化については、掘削後の応力状態の 変化に応じて亀裂に作用する応力が変化して、透水係数が変化するものと考えた。つまり、力学 的長期変化解析において、掘削直後(経過時間0年)の応力状態に対応する供試体の透水係数と、 x 年後の応力状態に対応する供試体の透水係数を比較して、何倍に変わったのかを求める。これ が、x 年後の EDZ の透水性変化とする。

例えば、掘削直後の平均主応力($(\sigma_1+\sigma_2)/2$)が5MPaとすると、それに対応する供試体の透水 係数は1.21E-10 m/sとなる。そして、x年後の平均主応力が17MPaになったとすると、供試体 の透水係数は2.30E-11 m/sとなり、よって、この間の応力の変化による透水係数の変化率は、 2.30E-11/1.21E-10 = 0.190倍となる。そして、x年後のEDZ1の透水係数は、掘削直後の透水 係数に、この変化率を乗ずることにより、8.2E-7 m/s×0.190倍 = 1.56E-7 m/sと求められる(図 5.3-79)。



図 5.3-79 EDZ1 と EDZ2 における透水性変化の概念

(g) 解析ケース

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。予察的解析では、クリープ変形の速度が標準 的な場合と、速い場合を想定した場合の2ケースを設定していることから、今年度の解析でも、 クリープ速度が標準的な場合と、速い場合の2ケースを設定することにした。

EDZ1 と EDZ2 の大久保モデルのパラメータ no と m については、母岩とは強度特性などが異 なっているために、母岩の大久保モデルのパラメータとは異なる可能性もあるが、それを示すよ うな試験データなどはないために、母岩と同じ値であるとした。よって、EDZ1 と EDZ2 のいず れも、標準的な場合の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 を設定した。

(h) 解析モデル

力学的長期変化解析に用いる解析モデルを図 5.3-80 に示す。この解析モデルは予察的解析と同じものである。

要素には二次元の平面ひずみ要素を用いている。内空の代表寸法 D を 4.0 m 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ている。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、及び側面は、それぞれの面に対して垂直方向の変位を固定となっている。



図 5.3-80 力学的長期変化解析の解析モデル

(i) 解析コード

解析コードは、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、予察的解析 及び 5.3.1 の解析と同じ有限要素法解析コードを用いた。

(2) 水理学的長期変化解析の条件設定

(a) 力学的長期変化解析の結果を引き継いだ移動物性の算定方法

(i) 絶対浸透率

絶対浸透率については、前述した平均主応力と室内透水試験より得られた有効拘束圧と透水係 数の関係から、力学的長期変化解析で得られた平均主応力の変化を用いて母岩に対する浸透率の 倍率を解析領域全体で算出し、絶対浸透率の分布を作成した。

(ii) 比貯留係数

比貯留係数については、力学的長期変化解析で得られたヤング率E及びポアソン比vをもとに、 以下の式 5.3-24 から式 5.3-27 により算出した。

比貯留係数Ssは、固体粒子が非圧縮の場合、式 5.3-24のように表すことができる。

ここで、 ρ_f は水の密度、gは重力加速度、 ϕ 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 5.3-25 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及びポアソン比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 5.3-26
 $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ 式 5.3-27

(b) 移動物性の設定方法

カ学解析結果から算出した絶対浸透率及び比貯留係数のそれぞれについて、変化率が大きい領 域を調べ、それらについて値の変化の違いにより必要に応じて領域を分割し、移動物性を設定し た。具体的な設定方法や値については、後述する。

(c) 初期・境界条件

(i) 初期条件

初期条件は、表 5.3-13 に示す条件とした。

(ii) 境界条件とモデル化の領域

境界条件は、図 5.3-49 に示す Case c と同様の条件とし、坑道壁面の蒸発を考慮した条件とした。また、5.3.1の検討結果から、モデル化の領域として、坑道からモデル荷担までの距離を 1,000 m とした。

(d) 解析コード

解析には、5.3.1の検討でも用いた多成分三相系の流体解析コードである TOUGH3 の TMVOC モジュールを用いた。

(3) 解析ケースと解析対象時間の設定

2020年の予察的解析では、幌延の深度深度 350 m 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。このため今年度の解析においても、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。各因子の組合せと解析ケースを表 5.3-17 に示 す。なお、解析ケースを Case 4 から番号付けを行ったのは、2020年の予察的解析からの継続を 考慮したためである。

本解析では、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、Case 4 と Case 6 の力学的長期変化解析は同じものである。また、水理 学的長期変化解析では、支保工のある場合とない場合を考慮しているが、力学的長期変化解析で は、いずれのケースでも支保工があることが前提となっているので、Case4 及び Case5 では、図 5.3-80 に示した通り、支保工は存在している。

水理学的長期変化解析について、EDZ1 の透水係数は、母岩の透水係数の 10 万倍と母岩に比べ 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、予察的解析と同様に、Case4 及び Case5 では EDZ2 のみを考慮したモデルで解析を行うことにした。なお、Case 6 の一次元解析は、今後予定 している坑道埋め戻し後の環境回復の解析に先立ちその境界条件などの検討を行うために実施し たものである。

解析対象時間としては、予察的解析と同様に、回収可能性維持期間を念頭においていることか ら、最大 1,000 年間と設定した。

	力学的長期変化解析註)	水理学的長期変化解析 水理学的因子: 支保工の有無・EDZの考慮		備考
	力学的因子:クリープ変形			
Case 4	標準的な場合 (n ₀ =30、m=20)	支保工 なし	EDZ1 省略、 EDZ 2 考慮	クリープ変形が標 準的なケース
Case 5	クリープ変形が速い場合 (n ₀ =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
Case 6	標準的な場合 (n ₀ =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 5.3-17 長期変化解析の解析ケース

註)力学的長期変化解析では、いずれのケースにおいても支保工は存在している。

(4) 深度 350 m 坑道周辺を対象とした力学的長期変化解析の結果

(a) Case 4

Case 4 は、周辺岩盤のクリープ変形が標準的とした場合のものである。

周辺岩盤の天端と側壁部の変位を図 5.3-81 に示す。天端部及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。この図から天端部及び側壁部の変位は、初期段階で 10⁻³ m オーダ ーで発生し、その後の経時変化は小さい。2020 年の予察的解析の Case1 における天端の最終的 な沈下量は 3.8E-5 m となっていたことと比較すると、Case4 の結果はそれよりも大幅に増加し た。これは、EDZ1 と EDZ2 の変形特性や強度特性を見直し、これらの物性値が母岩よりも小さ くなったためでる。

周辺岩盤の透水係数の増加率を図 5.3-82 に示す。ここでは、EDZ1、EDZ2、母岩のいずれの領 域においても、母岩の透水係数の初期値(8.2E-12 m/s)に対する倍率となっている。同図から、 掘削後 1 年までの間に EDZ1 全体と隅角部の EDZ2 において、透水係数の増加が見られた。ま た、50 年までに底盤部や側壁部の EDZ2 でも透水係数の増加が見られたが、その後の経時変化は あまり見られなかった。また、母岩部では透水係数の増加は見られなかった。

試験坑道 3 では、坑道周辺岩盤の透水係数の経時変化を調べるための調査が行われている(青 柳ほか,2017)。このため、その調査時の計測点を意識して、側壁部の EDZ1 の要素を取り出し、 その透水係数の経時変化を調べた。着目した EDZ1 内の要素と要素の透水係数の経時変化を図 5.3-83 a),b)に示す。図 5.3-83b)から、壁面近傍の EDZ1 内の要素の透水係数は母岩の透水係数の 1.0E5 倍から 1.4E5 倍程度まで増加したが、増加後の経時変化はほとんどなく、この経時変化は 側壁部の周辺岩盤の変位の経時変化と整合している。また、透水係数にあまり経時変化が見らな かったことは、図 5.3-83c)に示した既存の調査結果(青柳ほか,2017)とも整合している。

周辺岩盤のヤング率の経時変化を図 5.3-84 に示す。この図において、EDZ1、EDZ2、母岩の境 界を桃色の線で区分している。また、ヤング率の絶対値ではなく、母岩、EDZ1、EDZ2 の各領域 のヤング率の初期値に対する倍率を示している。倍率で示したのは、大久保モデルでは破壊が進 むとヤング率が低下するため、どの箇所で破壊が進行しているかが分かるようにしたいと考えた ためである。同図から、掘削後1年までの間に、EDZ1全体でヤング率の低下が生じ、特に、底 盤部の EDZ1 が顕著であることがわかる。その後、底盤部の EDZ1においてヤング率が低下する 領域が徐々に拡大したが、天端部や側壁部の EDZ1では、あまり経時変化は起きていない。

周辺岩盤の平均主応力の経時変化を図 5.3-85 に示す。同図から、掘削後1年までの間に、底盤 部の EDZ1、隅角部、天端部や側壁部の EDZ1 で平均主応力が低下していることがわかる。これ らの平均主応力の低下は、ヤング率の経時変化から分かるように、底盤部や側壁部の EDZ1 で応 力集中により破壊基準を超えたため、それにより応力レベルが低下して、結果的に透水係数の増 加に繋がっている。

図 5.3-82 に示し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 5.3-86 に示す。同図から、初期段階で天端部の支保工の最大主応力は 18 MPa、側壁部は 11 MPa となり、その後の経時変化は見られなかった。この変化の傾向は、図 5.3-81 に示した変位と同じ 結果である。ただし、吹付けコンクリートの設計基準強度が 36 MPa であることから、天端部の 応力は、許容応力度の 50 %までに達することが分かった。

解析との比較のために、深度 350 m の試験坑道 3 における吹付けコンクリートの応力測定結果 (青柳ほか, 2020)を図 5.3-87 に示す。天端部(SC1)は計測値が計測範囲を逸脱したとあるの で、直接的な比較はできないが、側壁部(SC6、SC7)の結果を見てみると、計測開始時から徐々 に圧縮応力が増加し、最大で10~12 MPa 程度まで増えている。解析では、経時変化は計測値の 挙動とは異なる部分もあるが、側壁部(SC6、SC7)の測定結果に近い値となったことが分かった。



図 5.3-81 Case 4 における周辺岩盤の変位





図 5.3-83 Case 4 における解析結果及びの原位置計測結果の比較例(EDZ の透水係数)



図 5.3-85 Case 4 における周辺岩盤の平均主応力の経時変化



図 5.3-86 Case 4 における支保工着目要素の最大主応力の経時変化



(青柳ほか, 2020)

(b) Case 5

Case 5 は、周辺岩盤のクリープ変形が速い場合と想定したものである。

周辺岩盤の天端及び側壁部の変位を図 5.3・88 に示す。天端部の変位、及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。天端部及び側壁部の変位は、初期段階で 10⁻³ m オーダ ーで発生し、その後の経時変化は小さい。変位量は Case 4 と同程度である。また、2020 年の予 察的解析の Case 2 における天端の最終的な沈下量は 6.1E-4 m 、側壁部の変位は 8.9E-4 m であ ったことと比較すると、Case 5 の結果は、その 2 倍程度に増加していた。変位量が 2020 年度の 予察的解析の Case 2 よりも増えたのは、Case 4 と同様に、EDZ1 と EDZ2 の変形特性や強度特 性が再設定されて母岩に比べ小さくなったことによるものである。

周辺岩盤の透水係数の増加率を図 5.3-89 に示す。この図も EDZ1、EDZ2、母岩のいずれの領域においても、母岩の透水係数の初期値(8.2E-12 m/s)に対する倍率となっている。同図から、掘削後 1 年までの間に EDZ1 全体、隅角部と底盤部の EDZ2 において透水係数の増加が見られた。Case 4 と比較すると、透水係数の増加のタイミングは速いようである。これは、Case 5 で

はクリープ変形が速い場合を想定したために、その影響が表れたと考えられる。そして、50年まで底盤部や側壁部の EDZ2 の透水係数が増加した領域が拡大したが、その後の経時変化はあまり 見られなかった。さらに、Case 4 と同様に、母岩部では透水係数の増加は見られなかった。

図 5.3-83 に示した EDZ1 内の着目要素における透水係数の経時変化を図 5.3-90 に示す。この 図によると、壁面近傍の EDZ1 内の要素の透水係数は、母岩の透水係数の 10 万倍から 14 万倍程 度まで増加した後、徐々に低下し、最終的には 12 万倍となったが、経時変化は大きくなかった。 この結果は、Case4 と同様に、図 5.3-83 に示された試験坑道 3 における透水係数の経時変化の 調査結果(青柳ほか, 2017)とも整合している。

周辺岩盤のヤング率の経時変化を図 5.3-91 に示す。この図において、EDZ1、EDZ2、母岩の境 界を桃色の線で区分している。この図によると、掘削後1年までの間に、底盤部の EDZ1 と EDZ2 のヤング率の低下が顕著である。また、側壁部や天端部の EDZ1 でもヤング率の低下が見られた。 その後も底盤部では EDZ1 と EDZ2 共に低下域が拡大し続けていった。さらに、側壁部の EDZ1 と EDZ2 の境界付近でもヤング率の低下した領域が広がっていった。

周辺岩盤の平均主応力の経時変化を図 5.3-92 に示す。この図によると、掘削後 1 年までの間 に、底盤部の EDZ1 と EDZ2、隅角部、天端部や側壁部の EDZ1 で平均主応力が低下しているこ とが分かった。その後も底盤部は EDZ1 と EDZ2 共に平均主応力の低下域が拡大していることが 分かった。これは、先のヤング率の経時変化と対応してした結果となっている。

さらに、図 5.3・84 に示し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・93 に示す。この図によると、初期段階で天端部の最大主応力は 18 MPa で、最終的に は 20 MPa まで増加した。また、側壁部では、初期段階で 11 MPa 程度となり、両者とも経時変 化はほとんど見られなかった。この変化の傾向は、Case 4 と同様なものとなった。側壁部の応力 を図 5.3・87 の計測結果と比較すると、側壁部(SC6、SC7)の測定結果に近い値であったことが 分かった。ただし、1,000 年後の天端部の応力は、解析上、設計基準強度に対して、20/36=56% までに達した。







図 5.3-89 Case 5 における周辺岩盤の透水係数の増加率



図 5.3-90 Case 5 における着目要素の透水係数の経時変化



図 5.3-91 Case 5 における周辺岩盤のヤング率の変化



図 5.3-92 Case 5 における周辺岩盤の平均主応力の経時変化



図 5.3-93 Case 5 における支保工着目要素の最大主応力の経時変化

(5) 深度 350m 坑道周辺を対象とした水理学的長期変化解析の結果

(a) 力学的長期変化解析を受けた移動物性の設定

力学的長期変化解析のクリープ変形が標準の Case 4 と、クリープ変形が速い Case 5 の力学解 析結果から、5.3.2(3)で述べた方法により移動物性を算定し設定した解析を実施した。これらの解 析は、予察的解析と同様 EDZ2 と母岩のみがモデル化されている。また、Case 6 として、クリー プ変形が標準の力学解析結果を引き継いだ形で、支保工と EDZ1 を追加した一次元解析を実施し た。

(i) EDZ2の領域分割(Case 4)

Case 4 で用いた解析メッシュの坑道近傍拡大図を図 5.3-94 に示す。また、領域分割の基にした絶対浸透率及び比貯留係数の分布図をそれぞれ図 5.3-95 及び図 5.3-96 に示す。

絶対浸透率と比貯留係数の変化は、平均主応力の変化が相対的に大きい EDZ2 のみで確認された。絶対浸透率については、坑道下方領域で変化率が大きく、坑道の隅角部で絶対浸透率が上昇し、坑道下部で減少している。この変化を反映するために、EDZ2 の坑道下部を領域 1~3 の 3 つの領域に分割し、それ以外を領域 4 とした。比貯留係数については、500 年以降で坑道下部の中央部と坑道側方の一部で変化が見られるが、変化している領域がわずかであるため、領域分割には反映させていない。



図 5.3-94 水理解析(Case 4)で用いたメッシュ図(坑道周辺拡大図)









(ii) EDZ2の領域分割(Case 5)

Case 5 で用いた解析メッシュの坑道近傍拡大図を図 5.3-97 に示す。また、領域分割の基にした絶対浸透率及び比貯留係数の分布図をそれぞれ図 5.3-98 及び図 5.3-99 に示す。

絶対浸透率と比貯留係数の変化は、Case 4 と同様に、EDZ2 のみで確認された。絶対浸透率に ついては、坑道下方領域で変化率が大きく、特に、坑道下部で増加している。また、坑道の側方 の一部で増加している。比貯留係数については、坑道下部と坑道側方の一部の領域で増加してい る。これらは、クリープ変形が早いために坑道周辺部の平均主応力の変化が Case 4 よりも大きか ったことによる。

これらの変化を反映するために坑道下方を Case 4 と同様に領域 1~3 の 3 つの領域に分割し、 それ以外を領域 4 とした。さらに絶対浸透率と比貯留係数の両方が比較的大きく変化している坑 道側方の一部を領域 5 とした。















500年

1,000年 図 5.3-99 比貯留係数の分布図(Case 5)(50年から 1,000年)

(iii) 一次元解析モデル概念図(Case 6)

Case6の解析で用いた、一次元解析モデルの概念図を図 5.3-100 に示す。本解析は、坑道埋め 戻しに伴う解析を行うにあたり、EDZ1 を考慮した時の解析条件を検討するため便宜的に実施し たものである。解析領域は坑道中心から 3,000 m 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 0.2 m 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 1 m とし、うち坑道中心側 0.4 m の範囲を EDZ 1 に、残りの 0.6 m を EDZ 2 として設定した。坑道壁面は、大気圧固定とし、Case c と同 様の条件で坑道壁面からの蒸発を考慮した。また、モデル周端は静水圧固定とした。



図 5.3-100 一次元解析モデルの概念図

(b) 物性値の設定

(i) Case 4

図 5.3-94 の各領域に力学解析から算出した絶対浸透率を設定した。設定する値は、図 5.3-101 に示す白丸の要素から抽出した値を設定した。ただし、領域 4 については変化の小さい坑道上部 の要素から抽出した値を設定した。

各要素の絶対浸透率の経時変化を図 5.3-102 に示す。赤線が力学変化なしの EDZ2 の絶対浸透率の値である。力学変化なしの絶対浸透率から値が増加しているのは坑道角の領域 3 のみでそれ 以外は減少している。また、いずれの要素についても 100 年以降で変化率が小さくなっている。 これを踏まえ、水理解析は、0 年~100 年と 100 年~1,000 年の区間に分けた 2 ステップでの解 析を実施した。具体的には、図 5.3-103 に示す 0 年~100 年と 100 年~1,000 年の各区間の平均 値をそれぞれのステップの解析に設定した。



図 5.3-101 各領域に与える絶対浸透率を抽出した要素(Case 4)



図 5.3-102 絶対浸透率の経時変化(Case 4)



図 5.3-103 平均化した絶対浸透率の経時変化(Case 4)

(ii) Case 5

図 5.3-97 の各領域に力学解析から算出した絶対浸透率と比貯留係数を設定した。絶対浸透率 は、各領域に対して図 5.3-104 に示す白丸の要素から抽出した値を設定した。比貯留係数は、領 域 1、領域 2 及び領域 5 に対して、図 5.3-105 に示す白丸の要素から抽出した値を設定した。た だし、領域 2 に関しては、要素 299 と要素 262 から抽出した値の平均値を設定した。

各要素の絶対浸透率の経時変化を図 5.3-106 に示す。赤線が力学変化なしの EDZ2 の絶対浸透率の値である。力学変化なしの絶対浸透率から値が減少しているのは領域 4 のみでそれ以外の領域は増加している。

各要素の比貯留係数の経時変化を図 5.3-107 に示す。坑道下部の領域1 が最も増加しており2 倍程度増加している。坑道下部の領域1 及び領域2 では、2 年後から一定値で推移している。坑 道側方の領域2 については100 年以降で変化率が小さくなりほぼ一定で推移している。領域3 及 び領域4 では比貯留係数の力学変化はない。

これらのことから、水理解析は、Case 4 と同様に 0 年~100 年と 100 年~1,000 年の区間に分けた 2 ステップの解析を実施した。具体的には、図 5.3-108 及び図 5.3-109 に示す 0 年~100 年

と 100 年~1,000 年の各区間の絶対浸透率及び比貯留係数の平均値をそれぞれのステップの解析 で設定した。



図 5.3-104 各領域に与える絶対浸透率を抽出した要素(Case 5)



図 5.3-105 各領域に与える比貯留係数を抽出した要素 (Case 5)







図 5.3-107 比貯留係数の経時変化(Case 5)



図 5.3-108 平均化した絶対浸透率の経時変化(Case 5)


図 5.3-109 平均化した比貯留係数の経時変化(Case 5)

(iii) Case 6

力学変化が見られた EDZ1 及び EDZ2 に対して力学解析結果から算出した絶対浸透率と比貯留 係数を設定した。具体的には、力学解析結果は絶対浸透率の変化が比較的大きい坑道の隅角部の 要素から抽出した。EDZ1 には、図 5.3-110 に示す自丸の要素 45 から力学解析結果を抽出し、 EDZ2 には要素 301 の力学解析結果を抽出した。

図 5.3-111 及び図 5.3-112 に EDZ1 及び EDZ2 の絶対浸透率の経時変化をそれぞれ示す。赤線 が力学変化なしの絶対浸透率の値である。EDZ1 及び EDZ2 のいずれも力学変化なし値から増加 している。

比貯留係数に関しては、要素 45 と要素 301 のいずれにおいても力学変化は見られなかったので、力学変化なしの値を設定した。

水理解析は、Case 4 及び Case 5 と同様に 0 年~100 年と 100 年~1,000 年の区間に分けた 2 ステップの解析を実施した。図 5.3-113 及び図 5.3-114 に示す 0 年~100 年と 100 年~1,000 年 の各区間の絶対浸透率の平均値をそれぞれのステップの解析に設定した。



図 5.3-110 各領域に与える絶対浸透率を抽出した要素(Case 6)



図 5.3-111 要素 45 の絶対浸透率の経時変化(Case 6)







図 5.3-113 要素 45 の平均化した絶対浸透率の経時変化(Case 6)



図 5.3-114 要素 301 の平均化した絶対浸透率の経時変化 (Case 6)

(c) 解析結果

(i) Case 4

1) 圧力分布図

図 5.3-115 及び図 5.3-116 にモデル領域全体の圧力分布図と坑道周辺拡大図の圧力分布図をそれぞれ示す。圧力分布図は、5.3.1(3)の Case b 及び Case c と差異は見られない。







(a) 100 年











2) 飽和度分布

図 5.3-117 及び図 5.3-118 に坑道周辺の飽和度分布と EDZ2 のみに着目した飽和度分布を示 す。坑道周辺の飽和度分布は蒸発を考慮した 5.3.1(3)の Case c の飽和度分布図と大きな差異は見 られない。EDZ2 のみに着目した飽和度分布図では、坑道の内側に飽和度の低い領域が形成され ている。これは蒸発の影響で形成されたものと考えられる。











3) 気相の CH₄ 及び CO₂ のモル分率

図 5.3-119 及び図 5.3-120 に気相の CH₄のモル分率と CO₂のモル分率をそれぞれ示す。CH₄ 及び CO₂のモル分率ともに、5.3.1(3)の Case c の分布と差異は見られない。解析開始から 1,000 年後の解析結果では、CH₄のモル分率及び CO₂のモル分率ともに坑道下部で、数値誤差の影響と 考えられる領域が見られる。



(c) 450 年
(d) 1,000 年
図 5.3-119 Case 4 : 気相の CH₄ モル分率
(100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 100 m の範囲)



(a) 100 年

Time:270.1yr X_CO2_gas 0.090 0.085 0.080 0.080 0.075 0.070 0.065 0.060 0.055 0.050 0.045 0.040 0.035 0.030 0.025 0.020 0.015 0.010 0.005





(c) 450 年
(d) 1,000 年
図 5.3-120 Case 4:気相の CO₂ モル分率
(100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 100 m の範囲)

4) 気相の O2 のモル分率

図 5.3-121 に気相の O₂のモル分率を示す。5.3.1(3)の Case c と同様に 1,000 年後においても 岩盤での気相の O₂は見られない。





5) 気相及び液相の流向分布

図 5.3-122 及び図 5.3-123 にそれぞれ気相と液相の流向分布図をそれぞれ示す。 両者ともに、5.3.1(3)の Case c と同様に岩盤から坑道に向かった液相及び気相の流れとなって おり、坑道から岩盤への流れは見られない。





(a) 100 年







(c) 450 年
(d) 1,000 年
図 5.3-122 Case 4:気相の流向分布
(100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 100 m の範囲)





(b) 270 年

Time:450.5yr Pressure [Pa] 2.50E+06 2.40E+06 2.30E+06 2.20E+06 2.10E+06 2.00E+06 1.90E+06 1.80E+06 1.70E+06 1.60E+06 1.50E+06 1.40E+06 A CONTRACTOR 1.30E+06 1.20E+06 1.10E+06 1.00E+06 9.00E+05 8.00E+05 7.00E+05 6.00E+05 5.00E+05

(a) 100 年

(c) 450 年





図 5.3-123 Case 4:液相の流向分布 (100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 100 m の範囲)

(ii) Case5

1) 圧力分布図

図 5.3-124 及び図 5.3-125 にモデル領域全体の圧力分布図と坑道周辺の圧力分布図をそれぞれ 示す。モデル領域全体と坑道周辺のいずれも、5.3.1(3)の Case c や Case4 との差異は見られない。



(c) 446 年

(d) 1,000 年

図 5.3-124 Case 5: 圧力分布の変化(1) (100 年後から 1,000 年後、解析領域全体)



(a) 100 年









(c) 446年
(d) 1,000年
図 5.3-125 Case 5: 圧力分布の変化(2)
(100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 100 m の範囲)

2) 飽和度分布

図 5.3-126 及び図 5.3-127 に坑道周辺の飽和度分布と EDZ2 のみに着目した飽和度分布を示 す。坑道周辺の飽和度分布図は Case 4 の飽和度分布図と差異は見られない。EDZ2 に着目した飽 和度分布図では、坑道下部の飽和度の低い領域が、5.3.1(3)の Case c や Case 4 に比べて拡大して いる。これは、EDZ2 の坑道下部で絶対浸透率を大きく設定した影響で蒸発時に液相の移動が速 くなり低飽和度の領域が拡大したと考えられる。



(a) 100 年













3) 気相の CH₄ 及び CO₂ のモル分率

図 5.3-128 及び図 5.3-129 に気相の CH₄のモル分率と CO₂のモル分率をそれぞれ示す。CH₄ 及び CO₂のモル分率ともに、5.3.1 の Case 4 の分布との差異は見られない。解析開始から 1,000 年後の解析結果では、CH₄のモル分率及び CO₂のモル分率ともに坑道下部で、数値誤差の影響と 考えられる領域が見られる。



(c) 446年
(d) 1,000 年
図 5.3-128 Case 5 : 気相の CH₄ のモル分率
(100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 100 m の範囲)



Time:270.5yr X_CO2_gas 0.090 0.085 0.080 0.080 0.075 0.070 0.065 0.060 0.055 0.050 0.045 0.040 0.035 0.030 0.025 0.020 0.015 0.010 0.005

(a) 100 年





(c) 446年
(d) 1,000 年
図 5.3-129 Case 5 : 気相の CO₂ モル分率
(100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 100 m の範囲)

4) 気相の O2 のモル分率

図 5.3-130 に気相の O₂のモル分率を示す。5.3.1(3)の Case c 及び Case 4 と同様に 1,000 年後 においても岩盤での気相の O₂は見られない。





5) 気相及び液相の流向分布

図 5.3-131 及び図 5.3-132 にそれぞれ気相と液相の流向分布図をそれぞれ示す。 両者ともに、5.3.1(3)の Case c や Case 4 と同様に岩盤から坑道に向かった液相及び気相の流れ となっており、坑道から岩盤への流れは見られない。





(b) 270 年











(b) 270 年

Time:446.0yr Pressure [Pa] 2.50E+06 2.40E+06 2.30E+06 2.20E+06 2.10E+06 2.00E+06 1.90E+06 1.80E+06 1.70E+06 1.60E+06 1.50E+06 1.40E+06 1.30E+06 1.20E+06 1.10E+06 1.00E+06 9.00E+05 8.00E+05 7.00E+05 6.00E+05 5.00E+05

(a) 100 年

(c) 446 年





図 5.3-132 Case 5:液相の流向分布 (100 年後から 1,000 年後、坑道壁面から水平方向に 100 m の範囲)

(iii) Case6

1) 圧力分布

図 5.3-133 に坑道中心から 10 m の範囲の圧力(全圧)分布の変化を示す。比較的透水性の高い支保工、EDZ1 及び EDZ2 では、100 年以降、大気圧相当の値でほぼ一定となっている。母岩の領域では、時間とともに圧力が低下する。



図 5.3-133 Case 6: 圧力分布の変化 (100 年から 1,000 年後、坑道中心から 10 m)

2) 飽和度分布

図 5.3-134 に坑道中心から 10 m の範囲の飽和度分布の変化を示す。岩盤領域では、飽和度が EDZ1 < EDZ2 < 母岩の順に大きくなっている。これは、保水性の大小関係と一致している。 支保工の飽和度は、2020 年度の一次元解析(原環センター・原子力機構, 2021)では坑道内の飽 和度を 1 としたため、高い飽和度であったが、本年度の解析では坑道壁面に蒸発条件を与えてお り、その影響で飽和度が低下している。また、圧力低下に伴う脱ガスの影響により、主に EDZ2 から母岩の範囲で時間の経過とともに飽和度の低下が見られる。





3) 気相の CH₄ 及び CO₂ のモル分率

図 5.3-135 及び図 5.3-136 に、気相の CH₄ 及び CO₂ のモル分率の変化を示す。坑道中心から 10 m の範囲の気相の CH₄ モル分率は時間とともに増加する傾向にあるが、反対に CO₂ モル分率 は減少している。これは、二次元解析の Case 4 及び Case 5 の結果とは逆の傾向にある。一次元 解析は軸対称モデルであり、圧力の低下量が平面の二次元解析に比べて小さいため、液相から溶 脱する CH₄ 及び CO₂ の量に差があるためと推察される。



図 5.3-135 Case 6:気相の CH₄ モル分率の変化 (100 年から 1,000 年後、坑道中心から 10 m)





4) 気相の O2 のモル分率

図 5.3-137 に O₂のモル分率の変化を示す。支保から岩盤領域には気相の O₂は存在せず、坑道 からのガスの浸入はないことが分かる。また、時間変化も見られない。



図 5.3-137 Case 6:気相の O₂ モル分率 (100 年から 1.000 年後、坑道中心から 10 m)

(6) まとめ

これまで示してきた、坑道周辺地質環境の力学的・水理学的長期変化に関する解析の結果を以下にまとめる。

(a) 深度 350 m 坑道周辺を対象とした力学的長期変化解析の結果と課題

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、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・劣化などが挙げられるが、5.3.1の検討でモデ ル化手法に関する一定の妥当性が示されたことから、2020年の予察的解析と同様に、周辺岩盤の クリープ変形に着目した。

カ学的長期変化解析の条件に関しては、岩盤などの物性値、解析メッシュ、境界条件、初期状態については、基本的には予察的解析と同じとしたが、EDZ1 と EDZ2 については、物性値及び透水性変化のモデルを見直した。EDZ1 と EDZ2 の変形特性や強度特性については、弾性波速度の計測結果からその値を推定した。また、EDZ1 と EDZ2 の透水性変化のモデル化は、5.3.1 で示した引張亀裂の室内透水試験の結果に基づき実施した。また、解析ケースは、予察的解析と同様に、標準的な場合(Case 4)とクリープ変形が速い場合(Case 5)の2 つを設定した。これらの

解析結果の概要は以下の通りである。

- ・ クリープ変形による 1,000 年後の岩盤の変位は、Case 4 と Case 5 共に、初期段階で 10⁻³(m)オ ーダーで発生し、その後の経時変化は小さかった。予察的解析の結果よりも増加したが、これ は、EDZ1 と EDZ2 の物性値を見直したことが影響している。
- ・ Case4 では、底盤部の EDZ1 の破壊の進行が顕著で、応力レベルが低下した結果として、透水 係数の増加に繋がった。側壁部の EDZ1 でも透水係数は増加したが、経時変化は小さく、計測 結果と整合的であった。
- ・ Case 5 では、クリープ変形が速い分、底盤部の EDZ2 内でも破壊が進行し、応力レベルが低下 した結果、底盤部の EDZ2 でも透水係数の増加が見られた。側壁部の EDZ1 でも透水係数は増 加しが、経時変化は小さく、計測結果と整合的であった。
- ・ 吹付けコンクリートの応力は、Case 4 と Case 5 共に、経時変化は小さく、側壁部の応力は計 測結果に近い値であったことが分かった。ただし、Case 5 では天端部の応力は、解析上、設計 基準強度(36 MPa)の 56%に達した。

なお、本解析では、EDZ1 と EDZ2 の変形特性や強度特性の推定値や周辺岩盤の変位などの解 析結果に対する妥当性の確認が今後の課題として考えられる。

(b) 深度 350 m 坑道周辺を対象とした水理学的長期変化解析の結果と課題

水理学的モデルについての境界条件の影響の評価と設定方法の検討結果を踏まえ、同検討で用 いた最終的なモデルを用い、力学的長期解析の結果を水理学的物性値の変化に反映させた長期解 析を実施した。力学的長期解析の結果として浸透率、ヤング率及びポアソン比の変化を用い、浸 透率については直接、後者 2 つは貯留係数の変化として物性値に反映させた。物性値の変化は、 100 年後まで、100 年後から 1,000 年後の 2 段階とした。物性値を変化させる領域は変化の見ら れた EDZ2 内のみとし、主に坑道底盤を対象に 3 領域に区分して設定した。解析ケースは、力学 的長期解析と同様に、クリープ変形が標準的な場合と、早い場合、及び支保工と EDZ1 の存在を 考慮した場合の 3 ケースとした。

解析の結果、クリープ変形の影響を考慮した Case 4、Case 5 の 2 ケースでは、考慮しない場合 と比べて、全体的な圧力分布、飽和度、気相成分の分布などの差異はほとんどなかったものの、 わずかに、EDZ2 内の底盤の飽和度分布に差異が見られ、これは力学解析の結果に基づき同領域 に与えた浸透率の差異に起因するものと考えられた。

力学解析と水理解析では、現状、解析メッシュが異なるため、力学解析の結果を直接反映する ことは困難であり、また結果の反映には手動による平均化を要する。今後は両解析間のインター フェースを改善することにより、より詳細かつ簡便な解析結果の反映を目指す方向性が考えられ る。

5.3.3 坑道埋め戻しによる地質環境回復に関する解析のための境界条件などの検討

本節では、5.3.2 で得られた解析結果を用いて、次年度以降に実施予定の坑道埋め戻しによる地 質環境の回復に関する解析的評価を合理的に行うための条件設定などに関する検討を実施した。

具体的には、地質環境の回復を解析的に評価するために使用する解析コードは、5.3.2の解析と 同様に、坑道周辺地質環境の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(掘削損傷 領域の範囲の長期変化、圧力解放による溶存メタンの気化とその移動、坑道通気による岩盤への 酸素の侵入など)を考慮できるものを適用することを想定する。また、5.3.2の解析同様に、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坑道周辺環境の結果を水 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することを考えていることから、こ こでは、力学的長期変化解析の条件と、水理学的長期変化解析の条件を分けて検討する。

(1) 力学的長期変化解析の境界条件などの検討

解析対象としては、本業務と同様に幌延深地層研究所の深度 350m の試験坑道 3 とし、二次元の平面ひずみ条件とすることが考えられる。

(a) 解析を行うための問題設定と初期状態

今回の解析では、回収可能性維持期間や廃棄体定置後の安全評価の初期状態の把握と処分シス テムの安全性の影響に関する概念検討を最終的な目標とし、予察的解析で得られた知見などを踏 まえ、まず坑道開放期間を 1,000 年間まで想定した場合の地質環境の経時変化を見るために解析 を行った。

一方、坑道開放状態が閉鎖により終了した後の地質環境の回復に関する解析では、掘削後、何 年間は開放し、その後、埋め戻し、地質環境の回復の経時変化を見ることが必要である。つまり、 回復に関する解析の初期状態を掘削後 x 年間開放していた状態から、坑道を埋め戻した後閉鎖後 の環境回復状態を解析することになる。ただし、現在、回収可能性維持期間は規定されていない ため、開放している期間については、パラメトリックスタディとすることが想定される。このよ うな解析のイメージを図 5.3-138 に示すが、埋め戻しのタイミングや解析対象期間の設定は、今 後の解析時に検討することとなる。





(b) 地質環境の回復の解析に考慮する要素

これまでの坑道開放状態の解析において考慮してきた要素としては、境界条件としての初期地 圧、母岩、坑道周辺の EDZ1 と EDZ2、支保工であるが、これらは地質環境の回復状況の解析で も引続き考慮することになると考えられる。また、母岩、EDZ1、EDZ2 のクリープ変形や透水性 変化も考慮したてきたが、地質環境の回復の解析でもそれらを同様に考慮することになると考え られる。

地質環境の回復の力学解析において、新たに加わる要素は埋め戻し材である。埋め戻し材には 低透水性が求められており、NUMOの包括的技術報告書(原子力発電環境整備機構, 2021)によ ると、埋め戻し材にはベントナイト混合材料が検討されている。埋め戻し材に地下水が浸潤し始 めると、ベントナイトの膨潤に伴い、坑道壁面に膨潤圧が作用することが考えられる。

既往の研究(原環センター,2018)では、埋め戻し材の膨潤圧の影響に関して、坑道埋め戻し後の周辺岩盤変形挙動の経時変化に関する解析例を示している。この結果では、埋め戻し材は坑道 掘削後10年に設置したと仮定して、その直後から一定値の膨潤圧が発生したとしている。また、 埋め戻し材に膨潤圧を考慮しない場合と考慮する場合とで、周辺岩盤の挙動に違いが見られると している。なお、この解析でも岩盤は大久保モデルのよるクリープ変形を考慮している。

膨潤圧の作用位置と方向を図 5.3-139 に、岩盤の最大せん断ひずみの経時変化を見るために着 目した要素の位置を図 5.3-140 に示す。また、緩衝材の膨潤圧を考慮しない場合と考慮した場合 の最大せん断ひずみの比較を図 5.3-141 に示す。図 5.3-141 から、膨潤圧を考慮した場合、岩盤 のせん断変形は埋め戻し材の膨潤圧によって抑制される結果が得られており、このことは、膨潤 圧を考慮の有無により、周辺岩盤の応力やひずみの経時変化に違いが現れて、結果的に地質環境 の回復に違いが現れることを示唆している。よって、坑道埋め戻しによる地質環境の回復に関す る力学的長期変化解析を合理的に行うためには、膨潤圧の設定が重要と考えられる。



図 5.3-139 膨潤圧の作用位置と方向 (原環センター, 2018)



図 5.3-140 周辺岩盤における着目要素 (原環センター, 2018)



図 5.3-141 着目要素における最大せん断ひずみの経時変化(原環センター, 2018)

(c) 埋め戻し材による膨潤圧の設定例

(b)で述べたように、埋め戻し材の膨潤圧の効果により、周辺岩盤の挙動に違いが生じうること が示唆されたため、ここでは、一例として、埋め戻し材として NUMO の包括的技術報告書(原子 力発電環境整備機構, 2021)の仕様を例として、坑道壁面に作用する膨潤圧の検討を行った。

包括的技術報告書によると、施工方法別に2種類の仕様が設定されている。埋め戻し材の仕様 を表 5.3-18に示す。施工方法によってベントナイト配合率が異なるため、有効粘土密度に差が見 生じ発生する膨潤圧が異なることが想定される。

表 5.3-18 NUMUによる理の戻し材の仕様(原十刀発電境項整偏機傾	i. 2021
--------------------------------------	---------

	1			
施工方法	配 合	乾燥密度	有効粘土 密度	対象となる坑道
締固め工法	ベントナイト 15% 掘削土 85%	1.8 Mg/m ³	0.6 Mg/m ³	処分坑道(高レベル放射性廃棄物処 分場の竪置き・ブロック方式,TRU 等廃棄物処分場),連絡坑道,取付 坑道(TRU等廃棄物処分場),主要 坑道,アクセス坑道
吹付工法	ベントナイト 50% 掘削土 50%	1.6 Mg/m ³	1.2 Mg/m ³	処分坑道(高レベル放射性廃棄物処 分場の横置き・PEM 方式)

※ 上記の仕様は掘削土の物性をケイ砂の物性で代用した場合の例であり、掘削土の物性によって配合などの 仕様は変わることになる。

例えば、締固め工法の場合、有効粘土密度が 0.6 Mg/m³ となっている。これに対して、有効粘 土密度 0.634 Mg/m³ の埋め戻し材仕様の材料に対して膨潤圧を計測した例(菊池ほか, 2005)を 見ると、幌延地下水を透過液として使った場合、膨潤圧は測定不可であったことが示されている (表 5.3-19、図 5.3-142)。よって、幌延を事例とした場合、締固め工法が適用されると想定する と、膨潤圧はゼロと設定することができる。

	透過液	体積膨潤比[-]	乾燥密度 [Mg/m ³]	有効粘土密度 [Mg/m ³]	平衡膨潤応力 [MPa]
埋め戻し材仕様	蒸留水	体積膨潤比 1.00 (隙間 0mm)	1.80	0.642	0.079
		体積膨潤比 1.04 (隙間 2mm)	1.73	0.586	0.060
		体積膨潤比 1.08 (隙間 4mm)	1.67	0.540	0.013
	人工海水	体積膨潤比 1.00 (隙間 0mm)	1.81	0.651	#
	幌延地下水	体積膨潤比 1.00 (隙間 0mm)	1.79	0.634	×

表 5.3-19 埋め戻し材仕様の材料に対する膨潤圧の計測結果(菊池ほか, 2005)

※人工海水および幌延地下水において膨潤応力は測定不可



図 5.3-142 幌延地下水に対する膨潤圧の経時変化(菊池ほか, 2005)

一方、吹付け工法の場合、有効粘土密度は 1.2 Mg/m³ となっている。この有効粘土密度に近い 有効粘土密度 1.156~1.165 Mg/m³ の緩衝材仕様の材料に対して膨潤圧を計測した例(菊池ほか, 2005)を見てみると、0.06~1.17 MPa の膨潤圧が発生している(表 5.3・20)。よって、吹付け工 法の埋め戻し材の場合は、明らかに膨潤圧が発生し、壁面に作用することになる。膨潤圧の具体 的は値としては、最大値で設定する場合や平均値で設定する場合があると考えられる。

地下水の浸潤に伴う膨潤圧の経時変化に関して、計測例(菊池ほか,2005)では、平衡に達する 時間が200時間程度であった(図 5.3-143)。よって、解析の対象時間の範囲によっては、埋め戻 し材の膨潤圧は瞬間的に平衡状態に達するものとみなし、時間変化は考慮しないという設定も可 能である。

また、埋め戻し材の膨潤圧よる効果に関して、埋め戻し材からの内圧の影響を把握するために は、最も膨潤圧が大きくなるベントナイト 100%とすることも考えられ、ここまで述べたような、 埋め戻し材の仕様の設定は、今後の検討課題である。

試験水	イオン強度 [mol/l]	乾燥密度 [Mg/m ³]	ケイ砂 混合率 [wt%]	有効粘土密度 [Mg/m ³]	飽和度 [%]	平衡膨潤応力 [MPa]
		1.40		1.165	99.72	1.170
幌延地下水	0.207	1.39	30	1.156	100.96	1.097
		1.40		1.165	99.93	0.060

表 5.3-20 緩衝材仕様の材料に対する膨潤圧の計測結果(菊池ほか, 2005)



図 5.3-143 膨潤圧の経時変化 (菊池ほか, 2005)

(2) 水理学的長期変化解析の境界条件などの検討

埋戻し後の坑道内は、初期不飽和の埋め戻し材が充填された状態であり、周辺岩盤からは、こ の埋め戻し材に向かって地下水や析出したガスが徐々に浸潤・流入していき、坑道内の圧力や飽 和度が上昇していくものと推察される。このような現象の水理解析は、坑道開放状態の水理モデ ルから、坑道内の体積を有限とし、かつ坑道内のメッシュに埋め戻し材などの水理物性及び初期 条件を設定することにより、実施可能と考えられる。

予察的解析及び今年度の解析において、坑道開放状態が続く場合の二次元の水理学的長期変化 解析では、母岩の 10 万倍の非常に高い透水性となる EDZ1 の存在は、解析結果に有意に影響を しないとして考慮していなかった。一方、埋戻し後の回復の解析では、モデル上この EDZ1 の存 在も考慮することになると考えられるが、EDZ1 のような透水性の高い領域があると、時間増分 が非常に細かくなり解析に時間を要することが危惧され、解析対象時間を数 100 年から 1,000 年 とした場合、現実的な解析時間となるか懸念された。そこで、これまで用いた二次元のモデルに より EDZ1 も考慮した埋戻し後の回復の試解析を行って、解析に関する見通しなどを検討した。

(a) 解析条件

(i) 解析メッシュ

解析メッシュの分割は、5.3.1 の Case b 及び Case c と同一である。埋戻し後の解析で用いた解 析メッシュの坑道付近拡大図を図 5.3-144 に示す。本解析では、岩盤側のモデル化として、これ まで考慮していた EDZ2 に加え EDZ1 を新たに追加した上で、坑道内部が埋め戻し材で充填され ていると仮定した。



図 5.3-144 埋戻し後の解析メッシュ図(坑道周辺拡大図)

(ii) 物性値

岩盤の移動物性値及び、不飽和特性については、今年度の解析と同様としたが、埋め戻し材に ついては、既往の研究事例(核燃料サイクル開発機構, 1999)より、絶対浸透率を 6.0E-19 m²、 有効間隙率を 0.333、固相密度を 2,700 kg/m³ とした。また、水分特性曲線は VG モデルで表現 し、不飽和浸透曲線は、VG モデルと同一のパラメータを用いる Mualem-VG モデルとした。パ ラメータは $\alpha = 1.5 \times 10^{-6}$ (1/Pa)、 $\lambda = 0.67$ とした(核燃料サイクル開発機構, 1999)。

埋め戻し材の水分特性曲線と不飽和浸透曲線をそれぞれ図 5.3-145 及び図 5.3-146 に示す。



図 5.3-145 埋め戻し材の水分特性曲線





(iii) 初期・境界条件

1) 初期条件

ここでは、5.3.1 の Case c (力学変化非考慮、蒸発考慮) の 100 年後の解析結果を、埋め戻し 時の初期条件としてモデル領域全体に設定した。EDZ1 の初期条件は、EDZ2 の領域で坑道底盤 と坑道側方で若干の圧力差が生じることから、図 5.3-147 に示すように坑道底盤の領域①と坑道 天端から側面の領域②の2つの領域に分けて設定した。具体的には、それぞれ EDZ2 の最も坑道 側の要素2箇所から毛管圧、気相圧及びガス成分組成を抽出し設定した。埋め戻し材の初期飽和 度は、既往の研究事例(核燃料サイクル開発機構,1999)を参照し、0.542 とした。埋め戻し材の 初期圧力は大気圧と同一とした。また、埋め戻し材の初期ガス成分組成は大気と同一とした。埋 め戻し材と EDZ1 の各領域に設定した初期値を表 5.3-21 に示す。



図 5.3-147 初期条件を与える EDZ1 の領域分割及び初期値の抽出位置

	埋め戻し材	EDZ1(領域①)	EDZ2(領域②)		
圧力[Pa]	1.013×10⁵	1.014437×10⁵	1.014827×10⁵		
飽和度[-]	0. 542	0. 1259	0. 1264		
温度(°C)	25. 5	25. 5	25. 5		
気相の 0_2 モル分率	0. 21	8. 42×10 ⁻²³	8. 19×10 ^{−23}		
気相の N ₂ モル分率	0. 79	1. 16×10 ⁻²²	1.25×10 ⁻²²		
気相の CO ₂ モル分率	0	0. 04815	0. 04857		
気相の CH ₄ モル分率	0	0. 9197	0.919		

表	5.3-21	埋め戻し材と	EDZ1	の各領域におけ	る初期設定値
---	--------	--------	------	---------	--------

2) 境界条件

境界条件は、坑道面を除いて 5.3.1 に示す Case b 及び Case c と同一の条件とした。

(b) 解析結果

図 5.3-148 に坑道壁面から水平方向に7mの範囲の坑道近傍の圧力分布を示す。分布図中の時 刻は、坑道掘削後を基準としたものであり、埋め戻し後からの解析時刻に100年を加えた値であ る。

坑道近傍は、埋め戻し後 10 年から 60 年の期間で圧力が約 1.4×10⁶ Pa 増加しており、坑道掘 削後に低下した圧力が回復する傾向が見られる。また、圧力が回復するにつれて圧力勾配は緩慢 になっている。



埋め戻し後10年





図 5.3-148 埋め戻し後の圧力分布

(ii) 飽和度分布

1) 坑道周辺

図 5.3-149 に坑道壁面から水平方向に 100 m の範囲の飽和度分布を示す。母岩周辺に形成された不飽和領域は、圧力の回復に伴い気相が液相に溶解することで縮小する。



埋め戻し後 10 年



埋め戻し後 20 年

saturation

1.000 0.995

0.990

Time:159.6yr



埋め戻し後 40 年





図 5.3-149 埋め戻し後の飽和度分布(坑道壁面から水平方向に 100 m の範囲)
2) 坑道近傍

図 5.3-150 に坑道近傍の飽和度分布を示す。埋め戻し後、母岩の領域の不飽和領域が縮小し、 EDZ1 及び EDZ2 の飽和度が上昇している。この図において、EDZ1 の飽和度は 0.5 以下である ことから濃い青色のままで、一見変化がないように見えるが、例えば、隅角部の EDZ1 の飽和度 の値は、埋め戻し後 10 年時点で 0.285、60 年時点で 0.321 と上昇している。また、埋め戻し材の 飽和度の方が EDZ1 よりも大きくなっている。これは、EDZ1 と埋め戻し材の不飽和浸透特性の 違いが影響していると考えられる。隣接する EDZ1 と埋め戻し材との間で、液相圧に大きな差は ない状態となっている。この同じような水ポテンシャル(液相圧)の状態において、母岩側から の地下水に対して、EDZ1 は透水性が高いために水分量が少なくても水が通ることができるのに 対して、埋め戻し材は EDZ1 よりも透水性が低いために、水分量が多くならないと水が通りにく くなっている。これによって、埋め戻し材の飽和度の方が大きくなったと推察される。

埋め戻し後、約10年後以降で坑道の隅角部から埋め戻し材への浸潤が進行し、埋め戻し後40年には、坑道天端からの浸潤も見られるようになる。埋め戻し後60年にはさらに浸潤が進行し、 坑道中心部に気相が残存している。なお、埋め戻し後40年以降に坑道上方の母岩の不飽和領域が 若干拡大しているが、これは坑道及びEDZ内の気相が地下水との密度差により上方へ移動し、母 岩に侵入したものと推察される。





埋め戻し後 10 年





埋め戻し後 40 年



埋め戻し後 60 年

図 5.3-150 埋め戻し後の飽和度分布

(iii) 気相の CH4 のモル分率

図 5.3-151 に坑道近傍の埋め戻し後の気相の CH4 モル分率を示す。埋め戻し材と坑道周辺岩盤 では、埋め戻し後 60 年までに CH4 のモル分率が増加している。後述の図 5.3-154 において、埋 め戻し材内のある要素に着目して、気相の CH4 のモル分率の経時変化を示している。これによる と、埋め戻し直後の CH4 のモル分率は 0 であるが、2 年後には 0.863、5 年後には 0.916 となっ ている。そして、図 5.3-151 に示している 10 年後では 0.942 まで増加している。

これは、幌延を事例としているため CH₄ に富んだ気相が埋め戻し材に急激に浸入したことと、 周辺岩盤では圧力の増加に伴い気相の CO₂ が液相に溶解し、相対的に CH₄ のモル分率が増加す ることの効果によると推察される。



埋め戻し後10年





埋め戻し後 40 年

埋め戻し後 60 年



(iv) 気相の CO₂のモル分率

図 5.3-152 に埋め戻し後の気相の CO₂のモル分率分布を示す。先に述べたように、圧力の増加 に伴い気相の CO₂が液相に溶解するため、モル分率が低下していると推察される。



(v) 気相のO2のモル分率

図 5.3・153 に気相の O₂のモル分率分布を示す。先述の通り CH₄に富んだ気相が埋め戻し材に 浸入することで、気相の O₂のモル分率は相対的に減少する。後述の図 5.3・154 において、埋め戻 し材内のある要素に着目して、気相の O₂のモル分率の経時変化を示している。この図によると、 CH₄ に富んだ気相が流入することで、解析後 0.1 年までに CH4 のモル分率は急激に増加する一 方で、O₂のモル分率は急激に低下している。

埋め戻し後 40 年以降、O₂のモル分率が比較的高い領域が坑道上方の母岩へ徐々に拡大している。これは、埋め戻し材と EDZ の領域にある気相が、地下水との密度差により上方に移動するためと推察される。また、埋め戻し後 40 年以降に母岩の領域に O₂の濃度勾配が形成されていき、坑道上方でコンターの幅が広くなっている。一方、坑道周辺岩盤中の CH₄のモル分率は、前掲図 5.3-151 に示したように、O₂ とは逆の濃度勾配を形成している。これらの濃度勾配形成要因については、今後の検討を要する。









図 5.3-153 埋め戻し後の気相の O2 モル分率

(vi) 坑道内の気相組成の時間変化

図 5.3-154 に埋め戻し後6年までの埋め戻し材中の気相組成の時間変化を示す。

CH4については、岩盤から埋め戻し材に CH4に富む気相が流入することにより、解析後 0.1 年 までに濃度(モル分率)はおよそ 0.7 まで上昇する。その後も CH4に富む気相の流入は続くが、 その量は圧力勾配が緩慢になるに従って減少していくため、CH4濃度の増加速度は低下していく。

CO₂の濃度は、0.1 年後までは CH₄と同様に岩盤からの気相の流入により増加するが、0.1 年後 以降は徐々に減少していく。これは、坑道内の圧力上昇に伴う液相への溶解によるものと推察さ れる。

最初に埋め戻し材内だけに存在した O₂及び N₂については、CH₄に富んだ気相が流入して混合 し、EDZ 中の間隙へ移動することにより、解析後 0.1 年までに濃度が急激に低下する。その後は、 CH₄濃度の増加とともに相対的に低下する。



(a) データを抽出した要素位置

(b) 気相における各成分のモル分率の時間変化

図 5.3-154 データを抽出した要素位置及び気相における各成分のモル分率の時間変化

(3) まとめ

本節では、5.3.1 で得られた解析結果を用いて、次年度実施予定の幌延を事例とした坑道埋め戻 しによる地質環境の回復に関する解析的評価を合理的に行うための条件設定などに関する検討を 行った。

具体的には、坑道埋め戻しによる地質環境の回復に関する解析を行う前に、今年度と同様のプロセス、すなわち、力学的長期変化解析と水理学的長期変化解析を組み合わせて実施することを前提とし、想定される問題の設定と初期状態の検討を行い、地質環境の回復に関わる力学的長期 変化解析において、考慮する要素を抽出するとともに、新たに加わる埋め戻し材とその膨潤圧について考慮する必要があることを示した。

また、水理学的長期変化解析では、埋戻し後の水理解析条件と具体的解析手順について検討し、 力学的影響による水理的物性の変化を考慮しない場合の水理解析を試行した。水理解析は、坑道 開放状態の水理モデルから、坑道内の体積を有限とし、かつ坑道内のメッシュに埋め戻し材など の水理物性及び初期条件を設定することにより、実施可能と考えられる。

埋戻し後の水理解析の実施可能性を検討するため、本節の試解析では、今年度の解析と同様に 坑道掘削後の解析結果を引き継ぐ形で実施した。すなわち、埋戻し後の状態の解析モデルは、坑 道開放状態のモデルの坑道内に埋め戻し材及び EDZ1 の物性を設定することにより作成した。具 体的には、埋め戻し時の初期状態は坑道開放状態の 100 年後とし、新たに追加した EDZ1 の初期 状態は、隣接する EDZ2 のセルの飽和度、圧力(全圧)及び化学組成から設定した。埋め戻し材 の水理的物性と初期条件は、第2次取りまとめを参考に設定した。

上記の試解析の結果では、幌延を事例としているため、埋戻し後は坑道及び周辺の圧力が上昇 していき、坑道内の埋め戻し材へは、まず岩盤内に析出したメタンに富むガスが流入していくこ と、それに続く地下水の浸潤は坑道の隅角部から進行し、その後周面全体から浸潤することが分 かった。また、埋め戻し材内及び岩盤中のガス組成の変化の傾向を予察することができた。

今後の検討課題としては、水理学的長期変化解析に要する時間が、坑道解放時と比べると長大 になる傾向にあることから、埋め戻しのタイミングと解析対象期間の設定、埋め戻し材の仕様の 設定、解析に要する時間の短縮が挙げられる。

参考文献

- 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.
- David Cournapeau et. al. (2022): scikit-learn User Guide, 2.5.6. Independent component analysis (ICA), https://scikit-learn.org/stable/modules/decomposition.html#ica (2022 年 21 月 28 日閲覧).
- 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.
- Mochizuki, A., Ishii, E., Miyakawa, K., Sasamoto, H.: Mudstone redox conditions at the Horonobe Underground Research Laboratory, Hokkaido, Japan: Effects of drift excavation, Engineering Geology, 267, p.1-p.11, 2020.
- Tsusaka, K., Inagaki, D., Niunoya, S., Jo, M(2014).: An Investigation on Mechanical Properties of In-situ Rock Mass at the Horonobe Underground Research Laboratory, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, p.591-p.599.
- アイダン・オメール,赤木知之,伊藤孝,川本朓万(1992):スクィーズィーング地山におけるトンネルの変形挙動とその予測方法について,土木学会論文集,No.448/III-19, p.73-p.82.
- 青柳和平,櫻井彰孝,宮良信勝,杉田裕(2020):幌延深地層研究センターの地下施設における坑 道安定性の長期モニタリング,JAEA-Research 2020-004.
- 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, p.25-p.33.
- 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.
- 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ン,資源と素材, Vol.109, No.3, pp.209-214.
- 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.
- 鎌田健人,奈良禎太,松井裕哉,尾崎裕介(2021):破壊した幌延泥岩の透水係数測定,第15回岩の力学国内シンポジウム講演集, pp.205-209.
- 菊池広人,棚井憲治(2005):幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験(試験報告), 核燃料サイクル開発機構 東海事業所,JNC TN8430 2004-005.
- 技術書院(1998):コンクリート総覧
- 原子力発電環境整備機構(2021):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-,第4章処分場の設計と工学技術, NUMO-TR-20-03.
- 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター(2018):高レベル放射性廃棄物等の地層処 分に関する技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書(第3分冊) 可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理/回収可能性の維持についての検討.
- 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(2021):2020年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, p.5-25 p.5-98, 2021.
- 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, p.282-p.287.

- 郷家光男,堀田政國,若林成樹,中谷篤史(2005):クラックテンソル・仮想割れ目モデルによる 瑞浪超深地層研究所研究坑道の掘削影響予測解析,JNC TJ7400 2005-058.
- 小林一輔(1991):コンクリートの炭酸化に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 433, V-15, p. 1p. 14
- 酒井隆太郎, 宗像雅広, 大岡政雄, 亀谷裕志(2009): 広域地下水流動解析モデルの水理パラメー タの不確実性評価手法の検討, JAEA-Research 2009-038.
- 鈴木、西川、山出、谷口(1990):コンクリートの耐久性評価を目的とした水和組織の分析手法に 関する研究,コンクリート工学論文集, Vol. 34, p. 39-p. 49, 1990
- 多田浩幸,木下直人,若林成樹(1994):岩石割れ目の透水係数と応力の関係を用いた空洞周辺岩 盤の透水特性変化の予測手法,第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p.139-p.144.
- 津坂仁和,稲垣大介,羽出山吉裕,小池真史,島田智浩,井尻裕二(2012):ショートステップ工 法による立坑掘削に伴う支保部材の力学挙動に関する研究,土木学会論文集 F1(トンネル工 学), Vol.68, No.1, p.7-p.20.
- 土木学会(2018): コンクリート標準示方書【設計編】
- 土木学会(2018):コンクリート標準示方書【施工編】
- 土木学会(2005): 吹付けコンクリート指針(案) 【トンネル編】
- 日本原子力研究開発機構(2011):東立坑一般部標準断面図・支保パターン図(DIII-1[ロックボル ト無し]),幌延深地層研究計画地下工事(第 I 期 2 次),第 8 号図.
- 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.
- 松永浩一,田村彰教,村川史朗,西山誠治,青木七郎,布施正人,與三智彦,高橋剛弘(2005): 幌延深地層研究計画 地下施設実施設計-設計報告書-(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書),株式会社日建設計,JNC TJ5410 2005-002.
- 宮川和也,青柳和平,赤木俊文,山本肇(2021):幌延深地層研究センター地下施設における坑道 周辺の堆積岩を対象とした不飽和領域の形成及び 岩盤中への酸素の侵入要因に関する数値 解析データ, JAEA-Data 2021-002.
- 村田二郎(2002):コンクリートの水密性とコンクリート構造物の水密設計,技報堂
- 村田昇(2004):入門 独立成分分析,東京電機大学出版局.
- 森岡宏之,尾留川剛,村川史朗,菅原健太郎,小林隆志(2006):幌延深地層研究計画における地 下研究坑道の支保設計,第35回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p.69-p.74.

6. 地層処分実規模試験施設を活用した情報発信

6.1 実施内容

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人工バリア材の性質、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・体感することで、来館者 が地層処分に対する理解を促進するための施設である。

本事業において、本施設を活用した情報発信、並びに来館者の反応を踏まえた展示物の説明方法の更新を実施した。

6.2 地層処分実規模試験施設の運営

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にあり、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。2010年4月から一般公開を開始し、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,2019)。開館当初から実規模・実物の炭素鋼オー バーパック、「処分孔竪置き・ブロック方式」に対応する人工バリアのカットモデルの展示を実施 している。2020年度からは、前述の人工バリアの展示に加え、幌延深地層研究センター地下350 mで2019年度までに実施した「処分坑道横置き・PEM 方式」に対応する操業(定置、隙間充填) 及び回収技術の実証試験の成果(原環センター,2020)である、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・回収装置の公開を開始した。

以上のように、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」 及び「処分坑道横置き・PEM 方式」の二つの定置概念に対応する人工バリアや開発装置の展示を 本施設のスペースの制約に留意しつつ行い来館者の理解増進に役立てている。本施設の外観およ び施設内全景を図 6.2-1 に示す。





(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

(1) 施設内の主な展示物

高レベル放射性廃棄物の地層処分の人工バリアとして、処分孔竪置き・ブロック方式の人工バ リア構成を例に、人工バリアのカットモデルを展示している(図 6.2-2)。実規模・実物のオーバ ーパックや緩衝材ブロックは実際に触ることができ、厚さや大きさならびに重量感を体感するこ とができる。





(a) 人工バリアカットモデルとオーバーパック
 (b) 緩衝材ブロック
 図 6.2-2 施設内の主な展示物①

2020年度から、処分坑道横置き・PEM 方式の操業技術として、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・回収装置の展示を開始した(図 6.2-3)。これらの装置は、幌延深地層研究センター地下 350 m にて回収実証試験で実際に使用したものであり、我が国における操業技術の開発に関する着実な進展や技術の実用性や信頼性を来館者に理解して頂くうえで重要な役割を担っている。

エアベアリング方式の定置・回収装置による機構の仕組みを分かりやすく理解して頂くために、 PEM カットモデルを上部に設置して廃棄体の定置作業時の装置の全体構成が理解出来るように 工夫している。また、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、地上での試験で使用した要素試験装置も同時に展示している。



(a) 隙間充填装置



(b) 横置き PEM 定置・回収装置



(c) エアベアリング要素試験装置図 6.2-3 施設内の主な展示物②



(d) オーガ方式除去装置



(e) ウォータージェット方式除去装置 図 6.2-4 施設内の主な展示物③

その他に、回収技術の開発の一環として整備し、地下環境での実証試験で使用したオーガ方式 並びにウォータージェット方式の隙間充填材除去装置もパネルや映像モニタと共に展示している (図 6.2-4)。

(2) 体感展示物の展示

本施設で展示している装置は、施設内で実際に動かすことができないため、来館者の理解促進・ 説明の補助として、来館者自身が実際に動かすことができる体感展示物を用意した(図 6.2.5)。 隙間充填装置のスクリューフィーダ部を模擬したスクリュー模型は、鞘管を透明アクリル製と することで、スクリューの回転とともにペレットが移送される状況を目視・体感できる。ウォー タージェット方式の隙間充填装置の噴射ノズルの動作を制御した空気弁コントローラー、遠隔操 作による PEM の搬送・定置試験で使用した複数台の監視カメラシステムは、地下での実証試験 において実際に使用した機材の一部を安全に配慮した上で本施設内に再構築している。

処分孔堅置き方式に対する緩衝材除去装置は、2020 年度に実施した展示装置のリプレースに 伴い実機の一般公開を終了したため、説明パネルと試験映像を再生するモニタでの情報発信とな っている。これらの2次元的な情報を補助するものとして、3次元で視認できる小型模型を作成 して展示している。実物の装置とは異なり大きさは体感できないが、モニタ映像から得られた装 置の仕組みや動作について、装置全体からイメージすることを可能としている。

以上のような展示物をとおして実際に体感することにより、本施設に展示している展示物への 興味・関心を更に深めて頂けることを期待している。

(3) 体感試験の実施

本施設では、図 6.2-6 に示すようなベントナイト体感試験コーナーを設置し、直接触れること ができる展示中の実物の緩衝材ブロックの特性や性能・機能の説明情報だけではなく、緩衝材ブ ロックの原材料であるベントナイトを使用した止水試験やベントナイト色水体験コーナーを用意 して来館者が参加できる体感試験を実施している。ベントナイトの特性について、試験をとおし て実際に体験・実感することで、理解や関心を深めながら親近感を抱くことにより、地層処分事 業への理解へと繋がる足がかりとしている。





(a) スクリュー模型

(b) 空気弁コントローラー



(c) 遠隔操作用カメラモニタ



(d) 除去装置小型模型

図 6.2-5 体感展示物の展示



(a) ベントナイト体感試験コーナー(b) ~図 6.2-6 ベントナイト体感試験



(b) ベントナイト止水試験体験

6.2.2 本施設の一般公開の計画

本施設を活用した情報発信に係る運営の計画や方法について述べる。なお、2021 年度も 2020 年度に引き続き、新型コロナウイルス感染症対策のため、通常の開館時の運営方法から一部内容 を変更して運営を行った。

(1) 開館計画と実績

本施設は隣接する「ゆめ地創館」と一体となった運営を行うことを基本として、両施設の開館 日時を整合させている。2021年度の開館の当初計画を表 6.2-1示す。

開館期間	2021年4月1日~2022年3月31日	
開館時間	9:00~16:00	
休館日	毎週月曜日(休館日が祝日または振替休日の場合は水曜日)	
	年末年始(12月29日~1月3日)	
年間開館日数	309 日	

表 6.2-1 2021 年度の実規模試験施設の開館計画(当初)

一方、新型コロナウイルス感染症対策のため、本施設が位置する北海道では、表 6.2-2 の期間 に緊急事態宣言の発令や、まん延防止等重点措置の適用がなされた。これに伴い臨時閉館や、来 館者対応の内容の変更等、状況に応じて柔軟に施設運営を実施した。

期間	状況	対応
4.1~	リニューアルオープン	通常開館
5/16~6/20	北海道 緊急事態宣言 発令	5月16日~6月20日は臨時閉館
		6/22~通常開館
8/27~9/30	北海道 緊急事態宣言 発令	8月27日~9月30日は臨時閉館
		10/1~通常開館
1/27~3/21	北海道 まん延防止等重点措置 適用	見学予約停止、粘土試験の中止など

表 6.2-2 2021 年度の新型コロナウイルス感染症対策に伴う対応

(2) 来館者への対応

2021 年度の来館者への対応について、以下の内容を当初計画として設定した。なお、これらは 2010 年 4 月の本施設開館当初から継続して実施しているものである。

- 施設、試験、事業概要等の説明
 施設来館者に本事業の概要、展示物、実施中の試験等の説明を行う。
- 対話内容の記録と整理
 説明時のやり取り、来館者からの質問等、対話内容を記録し、来館者記録として整理する。
- ・ 体感型試験の実施、補助 図 6.2-5、図 6.2-6に示した、来館者体感型試験の実施、補助を行う。

これらの対応計画については、表 6.2-2 に示した新型コロナウイルス感染症対策に伴う対応に 伴い、飛沫感染が懸念される実施内容を取り止めるなど、一部を変更して実施した。特に、来館 者への説明は、通年を通してフィジカルディスタンスを確保した対応となるため、積極的な説明 および質疑応答をベースとした対話記録の収集は来館者の要請がない限り、自粛することとした。 このような対応の見直し、また、感染症対策に伴う対応期間中の来館者が近隣の限定的な方々で あったことを踏まえれば、新型コロナウイルス感染症が広がる 2018 年度以前と比較して対話記 録の分析に用いる情報としての活用には留意が必要である。

6.2.3 来館状況

(1) 来館者数の推移

2021 年度の来館者数は、表 6.2-2 に示すような新型コロナウイルス感染症対策に伴う対応により、2020 年度と同様に、通常時とは異なる運営形態となった。

2021 年 4 月 1 日から 2022 年 2 月 28 日までの来館者総数は 2,143 人であり、2020 年度に続いて大幅な来館者数の減少となった。なお、2010 年 4 月の施設開館からの累計来館者数は 65,387 人となった。



図 6.2-7 来館者数の推移(2010年4月~2022年2月)

(2) 来館者の属性

2021年度の分析対象である 2020年度の来館者との対話記録より得られた来館者の属性及び居 住地の割合を図 6.2-8及び図 6.2-9にそれぞれ示す。新型コロナウイルス感染症の影響を受けた 2020年度は、それまでと比較して構成が大きく変化している。特に来館者の居住地が道内の割合 が 30%から 60%に増加している。来館者数の大幅な減少は、臨時閉館による開館日数自体の減 少、まん延防止等重点措置による不要不急の外出の自粛が要因として考えられるが、本施設の来 館者の多くを占めた旅行者のうち、道外からの旅行者の減少が顕著に現れたと考えられる。また、 子供の割合も低下しているが、これは毎年夏期に開催されていた"おもしろ科学館 in ほろのべ" の中止が要因として挙げられる。2021年度も新型コロナウイルス感染症の影響を受け、来館者の 属性や居住地についても同様の傾向となると考えられる。

このように、対話記録の分析の標本の構成が新型コロナウイルス感染症により大きく変化した。 対話記録の分析は、この影響に留意して実施する必要がある。



図 6.2-8 来館者数の属性(2010年4月~2021年3月)



図 6.2-9 来館者数の居住地(2013年4月~2021年3月)

6.3 施設運営方針の検討

6.3.1 来館者の動向調査

本施設では通常2名の説明員を配置し、来館者対応や対話記録の作成を行っている。本年度は 新型コロナウイルス感染症対策により声掛けの自粛等の対策を講じる必要があったため、作成さ れた対話記録のみでは来館者の動向について正確に把握できない可能性が懸念された。そのため、 例年来館者が増加し繁忙期とされる7月から8月の週末や夏季休暇中の期間に合わせ、複数の担 当者が順次、現地にて来館者対応を行うことで来館者の動向について調査することとした。また、 2020年度に展示物の更新を行った本施設の展示物について、来館者から直接質問や意見を聞く ことにより、新設した展示物の更に有効な活用方法の検討及び本施設での理解促進活動における 改善点の抽出を行った。

(1) 来館者の見学ルートの動線について

本施設では段階的な理解促進となるよう、展示物の配置を考慮した上で、推奨する見学ルート の設定を行っている。施設入口から見学ルート①である右側へと向かい、人工バリアのカットモ デルや、実規模の装置を見ることにより、大きさや仕組みについて実感するための展示エリアで ある見学ルート②を見学後、ベントナイトの性質について、実物に触れることで理解することが できる体感エリアであるルート③へ移動するルートをモデルコースとした。施設内の現在の展示 状況と主要ルートについては図 6.3-1 に示す。



図 6.3-1 施設内の展示状況

(2) 来館者の動向調査

実際に来館者への対応を行う中で、現時点での本施設における来館者の動向を把握した。来館 者は当初設定したモデルコースとは反対方向である入口から左側である見学ルート③(図 6.3-1) 方面に向かう傾向が多く見られた。この傾向については、新型コロナウイルス感染症対策として、 入口での声掛けを自粛したことによる影響や、入口から左側方向については展示物の高さが低い 配置レイアウトとなっているため、視界が広く周囲が見渡せることで、立ち入りやすい環境とな っていることが要因として考えられた。当初計画における、段階的な理解促進へと繋げるため、 入口周辺に配置している解説モニタを利用し、モデルルートである右側へと誘導するための映像 コンテンツの作成を行った。また、物理的に順路を明示するなどの措置も施すなど、来館者を誘 導するための措置を講じることとした。(図 6.3-2)



⁽a) 施設入口



(b) モデルルート(右側)

図 6.3-2 施設入口での誘導措置

(3) 展示方法の検討と次年度以降の取り組み

新設した装置は実物、実物大であり来館者の目に留まることから、「これは何の装置なのか?」 といった質問が多く見られた。展示物およびパネルやモニタ映像により公開している装置の個々 に関する技術開発に関わる成果を解説しているが、初めて本施設を見学する来館者にとって、地 層処分事業全体(地下施設の全体レイアウトやパネル・坑道展開など)への理解や認識がないま まに個別要素技術や装置が展示され理解が追いつかないのではという懸念が生じた。一例ではあ るが、地層処分場のレイアウト案を掲示し、地層処分事業の全体構成を理解した後に、本施設で 公開している個々の技術開発について紹介していく。このような段階的な情報の明示を行うなど、 広く理解を得られるための配慮が必要であると考える。また、パネル等の設置場所により、来館 者自らが選択した順番でパネルを見たことで、断片的な情報として捉えられ、意図がつかめない 情報として認識されないためにも、実物の展示物との均整を鑑みつつ、配置位置の検討を行い、 施設内の設備の改善を継続していく。

以上のように、実際に来館者の対応を行い動向の調査を行ったことで、技術開発サイドからの 情報発信の意図と来館者の動向や関心を抱く事項についての相違を知ることが出来た。今後も定 期的に現地での状況を確認することが多角的な視点での運営を行う事に繋がると考える。

6.4 本年度の成果(結論:まとめ)

本年度は、2020年度に施設の展示物をリプレースし、リニューアルオープンした後の初年度の 運営となることから、当施設の個々の展示物への理解や来館者の関心の方向性などを来館者の動 向から考察した。リプレースした装置に関しては、実際の装置を見ることによって装置の動作に かかわる具体的な質問などが多く見られたことから、来館者の反応を考慮しつつ、今後の説明マ ニュアルの作成や展示方法の改善に係る検討を継続して行う事が必要である。また、来館者から 多く寄せられた質問については、関心が高い項目として、何を知りたいかを運営側が認識してい く事により、必要とされる情報を的確に提供できる準備を進めるなど、得られた情報を有効活用 していく。

また、複数の担当者が説明員として来館者への対応を行った。来館者との会話の内容や来館者 の反応の捉え方については担当者により相違する可能性もあるため留意が必要であるが、これら 来館者からの多様な質問や意見などを反映し、展示物やモニタ映像の更新、展示物の配置場所の 工夫、展示物の追加などの措置や検討を行うことで、本施設をより有効に活用するための改善点 を抽出することができた(一部は改善を実施済み)。

さらに、社会情勢の変化に伴う地層処分事業全般についての関心の方向性について、来館者で ある不特定多数の人から意見を直接聞くことができる貴重な場であることを認識しつつ、今、必 要とされている情報を把握し、地層処分事業全体を見据えた情報発信にも対応できるような運営 面での工夫を継続していく必要がある。

参考文献

原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 30 年度地層処分技術調査等事業 (可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発)報告書, 2019.

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. 結言

7.1 廃棄体の回収可能性を確保する技術の整備

7.1.1 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の回収技術は、処分孔竪置き方式と処分坑道横置き・PEM 方 式*のそれぞれに対し、廃棄体周囲の緩衝材や隙間充填材の除去技術や廃棄体の取り出し技術の 開発・整備が進められており、地上・地下施設での実寸大の試験を通して回収作業の技術的実現 性が示されている。一方で廃棄体の回収に時間を要するため、回収作業自体や作業空間の健全性 確保といった作業安全性や、処分事業の可逆性を技術的に担保する回収技術の整備状況に対する 国民への説明性向上等の観点から、回収作業の迅速化が必要である。この課題に対し、回収技術 の高度化と回収の容易性を高める詳細設計オプションの検討の2方向から取り組んだ。(*PEM: Prefabricated Engineered barrier system Module)

(1) 回収技術の高度化

オーバーパックや PEM の回収工程における緩衝材や隙間充填材の除去技術は、回収対象物へ 与える影響を最小限に留めることを念頭に置いた第一段階の技術開発によって、回収の技術的実 現性(回収可能であること)を実規模スケールの試験で示した。一方、除去作業は一体あたりの 数十時間を要するので、第二段階の技術開発として、一定の期間で回収作業を実施するために除 去技術を含めた回収工程の迅速化に向けた技術開発を実施した。

(a) オーバーパックの回収に係る技術の高度化

処分孔竪置き方式の回収作業手順の具体化と作業時間の分析により抽出された回収作業の迅速 化を図る上でのボトルネックは、オーバーパック周囲の緩衝材の除去作業である。ボトルネック 解消のため、過年度事業(平成26年度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 テムを改良し、除去時間を77時間からの短縮に向けた技術開発を計画した。時間短縮のための 緩衝材除去システムの改良点・課題として、噴射吸引設備の高圧化、塩水リユース設備の増強、 遠隔操作設備の改良を抽出した。フルスケールの除去試験による除去時間短縮の実現性の提示に 向け、令和3年度は要素試験により、緩衝材除去システムを構成する各装置の高度化に必要なデ ータを取得した。

噴射吸引設備の高圧化の課題は、除去作業の短縮に向けた噴射条件の特定と高圧化に対応した 噴射リングの製作である。これに対し、ノズル種、噴射離隔、揺動速度、作業時の水深をパラメ ータとした噴射要素試験を実施し、各パラメータが時間当たりの除去量に及ぼす影響を把握した。 これに基づき、除去作業時の装置の動作条件を設定するとともに、高圧化対応の噴射リングを製 作した。塩水リユース設備の増強の課題は、除去作業の短縮に伴う除去生成物(スラリー)の高 濃度化への対応である。これに対し、スラリー中の固形物の沈降速度が固液分離槽の設計におけ る基本情報となることから、沈降速度を取得するための要素試験を実施し、スラリー濃度や溶液 種をパラメータとした界面沈降曲線を取得した。遠隔操作設備の改良については、噴射要素試験 時の噴霧による視界不良による除去の状態把握など具体的な改善点を抽出・整理した。

(b) PEM の回収に係る技術の高度化

処分坑道横置き・PEM 方式(デッドエンド型)の迅速化については、隙間充填材を広範囲に効率よく除去することを念頭に、機械的除去技術の適用を選択した。全量回収する場合の具体的な 工程の検討を行い、隙間充填材除去作業の迅速化の目安時間を設定した。過年度事業(平成 31 年 度可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発)において、機械的な方法による隙間充填時の除去 において、半固体状のベントナイト混合土の除去装置への付着や閉塞が作業効率に大きな影響を 与えることが明らかになっている。よって除去対象である隙間充填材の配合比や密度、回収作業 の実施時期より変化する含水比に対する技術の適用性の評価も念頭に開発に取り組んだ。

土質材料に対する機械的除去技術の適用範囲を評価するため、ベントナイトと珪砂の配合比、乾 燥密度、含水比などをパラメータとした土質試験や切削試験・付着試験を実施し、切削性と土質 材料の物性値の関係を整理した。機械的除去技術の開発では、適用する切削機構の選定から着手 した。切削機構を選定するため、隙間充填材を再現した供試体に対する切削要素試験を実施し、 自由断面方式と固定断面方式それぞれの切削効率や、排出される除去生成物の形状等の情報を収 集した。切削要素試験をとおして得られた除去生成物の性状を踏まえ、切削により発生する除去 生成物を効率良く排出するための排土方法として、吸引方式の適用性を確認するための排土要素 試験を実施し、除去生成物の寸法や含水比の違いが排土効率に与える影響を整理した。

(2) 回収の容易性を高めた代替設計オプションの検討

処分孔竪置き方式と処分坑道横置き・PEM 方式の 2 つの定置方式に対して、具体的な回収作 業を想定した工程の検討をとおして、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、回収の容易性を高めた詳細設計オプションの構築手法を整備している。 令和3年度は回収作業時間を定量的に示すための方法ならびに有望な詳細設計オプションの技術 的実現性について検討した。

処分場の建設・操業期間中の作業動線・換気経路の考え方に基づき、別区画での同時かつ独立 作業を前提とした回収作業時間の試算方法を整理した。これにより、現行の定置概念や施設設計 に対する回収作業時間の見積りが可能となり、回収技術の高度化、施設運用の在り方、施設設計 等における技術的な対応など、回収容易性を高める詳細設計オプションの位置付けや適用時の効 果を定量的に扱えるようになった。

現行の2つの定置方式をベースとして、安全性への影響を考慮した詳細設計オプションの適用 事例について、技術的な実現性の検討を実施した。処分坑道堅置き方式に対しては、坑道の短尺 化による再開放期間の短縮、回収作業時間の短縮を可能とする緩衝材の除去範囲の合理化・引抜 きによるオーバーパック回収方法を提案した。種々の条件で試算した引抜力に対して耐力を有す るオーバーパック把持部の太さ、フランジ厚、製作方法を提示した。処分坑道横置き・PEM 方式 に対しては、PEM 内の緩衝材の密度から周囲の隙間への膨出/シールが許容される量(隙間幅) を設定し、埋戻し材の施工・除去が不要な狭隘坑道定置方式を提案した。狭隘な処分坑道の建設 技術の調査および狭隘空間で重量物の移送を可能とするための技術(摺動による定置・回収技術) を調査・研究開発課題として抽出した。後者の技術に関して要となるセラミックス製スライダ部 材について、PEM 荷重と摺動時の負荷を考慮した強度評価により、摺動による重量物移送の実 現性の見通しを得た。

7-2

7.1.2 回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備

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およ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した。

(1) 回収可能性の維持に伴う影響の定量化技術の高度化

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。 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性など、より包括的な視点で取り組む必要がある。 そこで、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 できるようにするため、ストーリーボードの整備を進めた。これまでに、閉鎖後長期の安全性評 価と同様に、建設・操業期間中の地層処分場の状態変遷をストーリーボードとして表現するため、 処分坑道竪置き定置方式(新第三紀堆積岩類、パネル型)の建設・操業工程を分析し、地層処分 場の構成要素と使用材料、建設・操業のタイムラインの整理を実施した。

この整理に基づき、令和3年度は、安全機能の割り当てがない処分場の構成要素も含めて、操 業期間中から定置後の維持期間、維持期間経過後の回収作業期間中までの地層処分場の状態変遷 を表現するストーリーボードを作成した。これにより、回収可能性の維持に伴う影響を丁寧に記 述する手段としてのストーリーボードの適用性を確認した。

(2) 定量化に必要な物性値の取得

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、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こととし、次の2つの項目を設定し て技術開発を進めた。

(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

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、幌延深地層 研究所深度 350m 坑道内に気乾状態、原位置地下水での水没状態で定置養生したコンクリート供 試体からサンプルを採取し、それらの供試体を用いた物性試験を実施し、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取得した。

(b) 実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理

令和 2 年度に実施した予察的解析の成果を踏まえ、EDZ の物性等をより現実に即した形で設 定しなおすとともに、力学的長期変化解析と水理学的長期変化解析の組み合わせにより、幌延を 事例として、1000 年間の坑道開放時の周辺地質環境変化に関する解析を実施し、変化の程度や範 囲等に関する知見を得た。また、次年度に予定している坑道閉鎖後の坑道周辺地質環境の回復現 象に関する解析評価に先立ち、今年度の坑道開放時の解析結果を用いた埋め戻し後の回復現象に 関する試解析を実施し、解析を進める上で必要な情報を抽出した。

7.1.3 情報発信

(1) 地層処分実規模試験施設を活用した理解促進活動

令和 2 年度に地層処分実規模試験施設に設置した処分坑道横置き・PEM 方式の実証試験資機 材を活用した施設の一般公開を通して、わ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・整理を行った。また、 効果的な理解促進活動のあり方に留意して同施設の運用を行うとともに、維持・管理に必要とな る措置を講じた。

7.2 まとめ

以上のように、本事業では、「(1) 安全性への影響」として、ストーリーボードによる回収可能 性維持期間を設けた場合に影響する要因やシナリオを包括的に整理し、要因・シナリオの一部(支 保等のセメント系材料)について地下研の知見の活用による整備を実施するとともに、「(2)回収 の容易性(回収作業時間)」として、2つの候補概念(定置概念)を対象とした回収技術の高度化 と、回収の容易性を高めることに寄与できる詳細設計オプションの開発・整備の観点から、回収 作業の技術的実現性の提示、確実かつ合理的な時間内での回収作業の実施に向けた技術開発を行 え、本年度の目標は当初の予定通り達成できた。

次年度は、「地層処分研究開発に関する全体計画(平成 30 年度~令和 4 年度)」の最終年度と なることから、個別課題に着実に取り組むとともに、本事業の 3 か年の取りまとめを行う。