

平成 25 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

平成 26 年 3 月

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

本報告書は、経済産業省からの委託研究として、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した平成 25 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）の成果を取りまとめたものです。

# 目次

第1章 事業概要.....	1-1
1.1 事業名.....	1-1
1.2 事業の背景と目的.....	1-1
1.3 全体計画.....	1-1
1.4 実施概要.....	1-2
1.4.1 実証試験計画の見直し.....	1-2
1.4.2 緩衝材除去装置駆動設備の製作.....	1-2
1.4.3 緩衝材除去装置の組立・調整.....	1-2
1.4.4 緩衝材除去装置の機能確認.....	1-2
1.4.5 処分施設における回収維持期間の検討.....	1-2
第2章 実証試験計画の見直し.....	2-1
2.1 実施内容.....	2-1
2.2 平成25年度までに製作した緩衝材除去装置の反映.....	2-2
2.3 実証試験計画を行う地下環境の調査.....	2-3
2.4 地下環境における緩衝材除去試験計画.....	2-5
2.5 まとめ.....	2-11
第3章 緩衝材除去装置駆動設備の製作.....	3-1
3.1 駆動設備の製作.....	3-1
3.1.1 駆動設備の製作設計及び製作.....	3-1
3.1.2 平成25年度に実施した改善.....	3-7
3.1.3 駆動設備の製作状況.....	3-8
3.2 遠隔操作設備の設計及び製作.....	3-15
3.2.1 遠隔操作設備の設計フロー.....	3-15
3.2.2 遠隔操作設備の設計検討.....	3-17
3.2.3 遠隔操作における各設備の要求事項.....	3-23
3.3 まとめ.....	3-32
第4章 緩衝材除去装置の組立・調整.....	4-1
4.1 組立・調整の対象設備.....	4-1
4.2 組立及び調整.....	4-1
4.2.1 緩衝材除去装置の塗装.....	4-1
4.2.2 緩衝材除去装置各設備の構成.....	4-3
4.2.3 緩衝材除去装置の組立.....	4-8
4.3 緩衝材除去装置の動作確認.....	4-16

4.3.1 動作確認の対象設備.....	4-16
4.3.2 動作確認方法 .....	4-16
4.3.3 動作確認試験結果.....	4-31
4.4 まとめ.....	4-36
第5章 緩衝材除去装置の機能確認.....	5-1
5.1 試験対象.....	5-1
5.1.1 機能確認試験計画.....	5-1
5.1.2 試験ケース.....	5-1
5.1.3 取得特性.....	5-3
5.1.4 試験条件.....	5-5
5.2 試験方法・手順.....	5-6
5.2.1 試験方法および手順.....	5-6
5.2.2 試験設備の整備.....	5-10
5.2.3 緩衝材試験体の製作.....	5-16
5.3 試験結果.....	5-30
5.3.1 塩水リユース特性.....	5-30
5.3.2 緩衝材除去特性.....	5-38
5.3.3 遠隔操作の安全性.....	5-65
5.4 まとめ.....	5-66
5.4.1 塩水リユース特性.....	5-66
5.4.2 緩衝材除去特性.....	5-66
5.4.3 緩衝材除去試験の考察および今後の課題.....	5-67
第6章 地層処分施設における回収維持期間の検討.....	6-1
6.1 実施方針と実施内容.....	6-1
6.1.1 実施方針.....	6-1
6.1.2 実施内容.....	6-2
6.2 処分施設を埋め戻さずに一定期間維持することで、処分施設への安全性に及ぼす影響に関する調査・整理及び評価.....	6-4
6.2.1 処分施設を埋め戻さない地下坑道範囲の検討及び設定.....	6-4
6.2.2 埋め戻さない一定期間に対する処分施設の安全性に及ぼす影響の検討・評価.....	6-9
6.2.3 研究開発課題の抽出と集約.....	6-117
6.3 地層処分類似施設の維持に関する国内外の現状調査.....	6-120
6.3.1 国内における地層処分類似施設の維持に関する文献調査.....	6-120
6.3.2 国内における原子力関連施設の安全設計及び維持管理方法の調査.....	6-173
6.3.3 国外の地層処分関連施設の回収維持に関する文献調査.....	6-200
6.3.4 調査結果の回収維持期間の検討への適用性.....	6-203

6.4 抽出した課題の整理と課題解決の方策.....	6-209
6.4.1 周辺岩盤および坑道にかかわる課題と方策.....	6-209
6.4.2 人工バリアにかかわる課題と解決方策.....	6-216
6.5 まとめ.....	6-220
第7章 まとめ.....	7-1

別紙 遠隔操作設備における各設備の設計・製作

## 目次

図 2.1-1	実証試験計画の見直しフロー	2-1
図 2.2-1	緩衝材除去装置の全体図	2-2
図 2.3-1	アクセス坑道および主要坑道の断面仕様	2-3
図 2.3-2	処分坑道および処分孔の断面仕様	2-4
図 2.4-1	緩衝材除去装置の基本的配置例	2-5
図 2.4-2	坑道内における緩衝材除去試験のイメージ	2-6
図 2.4-3	試験設備（塩水リユース設備）の配置例	2-7
図 2.4-4	試験手順（実規模スケール試験）	2-9
図 3.1.1-1	駆動設備の区分	3-1
図 3.1.3-1	【走行部】トラックフレームセンター部製作状況	3-8
図 3.1.3-2	【走行部】トラックフレームサイド部製作状況	3-8
図 3.1.3-3	【走行部】駆動部部品アイドラーホイール他	3-8
図 3.1.3-4	【走行部】駆動部部品スプロケットホイール他	3-9
図 3.1.3-5	【走行部】組立完了 1	3-9
図 3.1.3-6	【走行部】組立完了 2	3-9
図 3.1.3-7	【油圧ユニット部】外部フレーム製作状況	3-10
図 3.1.3-8	【油圧ユニット部】油圧ユニット構成部材電動モーター	3-10
図 3.1.3-9	【油圧ユニット部】油圧ユニット構成部材作動油フィルター	3-10
図 3.1.3-10	【油圧ユニット部】油圧ユニット構成部材電磁バルブ	3-11
図 3.1.3-11	【油圧ユニット部】組立状況	3-11
図 3.1.3-12	【油圧ユニット部】内部配管・配線設置状況	3-11
図 3.1.3-13	【油圧ユニット部】作動油タンクおよび油温計設置状況	3-12
図 3.1.3-14	【油圧ユニット部】作動試験状況 1	3-12
図 3.1.3-15	【油圧ユニット部】作動試験状況 2	3-12
図 3.1.3-16	【駆動設備全体】油圧ユニットフレーム製作状況	3-13
図 3.1.3-17	【駆動設備全体】油圧ユニットフレーム組立状況 1	3-13
図 3.1.3-18	【駆動設備全体】油圧ユニットフレーム組立状況 2	3-13
図 3.1.3-19	【駆動設備全体】油圧ユニット組立状況	3-14
図 3.1.3-20	【駆動設備全体】油圧ユニット組立状況（配管完了）	3-14
図 3.1.3-21	【駆動設備全体】油圧ユニット組立状況（配線完了）	3-14
図 3.2.1-1	遠隔操作設備の設計フロー	3-16
図 3.2.2-1	遠隔操作設備の設計要件	3-17
図 3.2.2-2	駆動設備の構成	3-18
図 3.2.2-3	昇降設備の構成	3-19

図 3.2.2-4	塩水噴射・スラリー吸引設備の構成	3-20
図 3.2.2-5	塩水リユース設備の構成	3-21
図 3.2.2-6	廃棄体埋設処分設計例	3-22
図 3.2.2-7	処分坑道と処分孔の寸法	3-22
図 3.2.3-1	遠隔操作設備における全体システム構成	3-27
図 3.2.3-2	電気システム構成図	3-28
図 3.2.3-3	無線遠隔操作システム構成図	3-29
図 3.2.3-4	Kinect (MicroSoft 社製)	3-30
図 3.2.3-5	Xtion (Asus 社製)	3-30
図 3.2.3-6	取得点群の例	3-30
図 4.2.1-1	装置配色案 (緑色系)	4-2
図 4.2.2-1	塩水噴射・スラリー吸引設備の状況	4-4
図 4.2.2-2	昇降設備の状況	4-5
図 4.2.2-3	駆動設備の状況	4-6
図 4.2.2-4	塩水リユース設備の状況	4-7
図 4.2.3-1	組立手順	4-8
図 4.2.3-2	油圧ユニット組立状況 (製作工場にて実施)	4-9
図 4.2.3-3	昇降設備組立状況 1	4-9
図 4.2.3-4	昇降装置組立状況 2	4-10
図 4.2.3-5	塩水噴射部組立状況	4-10
図 4.2.3-6	組立完了 (正面)	4-11
図 4.2.3-7	組立完了 (裏面)	4-11
図 4.2.3-8	組立完了 (塩水噴射部下面)	4-12
図 4.2.3-9	塩水リユース設備設置前テント内状況	4-13
図 4.2.3-10	塩水リユース設備設置前状況	4-14
図 4.2.3-11	塩水噴射ポンプ搬入状況	4-14
図 4.2.3-12	塩水リユース設備設置完了状況 (テント奥より)	4-15
図 4.2.3-13	塩水リユース設備設置完了状況 (テント入口より)	4-15
図 4.3.2-1	動作確認試験フロー (駆動設備)	4-18
図 4.3.2-2	動作確認試験フロー (昇降設備)	4-20
図 4.3.2-3	動作確認試験フロー (塩水噴射・スラリー吸引設備)	4-21
図 4.3.2-4	動作確認試験フロー (塩水リユース設備)	4-22
図 4.3.2-5	緩衝材除去装置の全体構成	4-23
図 4.3.2-6	試験孔および試験坑道の断面	4-24
図 4.3.2-7	模擬廃棄体外形図	4-25
図 4.3.2-8	模擬廃棄体基本構造案および重心計算結果	4-26

図 4.3.2-9	荒加工後外観図 .....	4-27
図 4.3.2-10	完成後外観図.....	4-27
図 4.3.2-11	最終機械加工後外観図.....	4-27
図 4.3.2-12	試験設備配置.....	4-29
図 4.3.2-13	模擬処分孔および模擬処分坑道に用いる試験設備の詳細構造.....	4-30
図 4.3.3-1	駆動設備の動作確認試験状況.....	4-31
図 4.3.3-2	昇降設備の動作確認試験状況.....	4-33
図 4.3.3-3	塩水噴射・スラリー吸引設備の動作確認試験状況.....	4-34
図 4.3.3-4	塩水リユース設備の動作確認試験状況.....	4-35
図 5.1.2-1	廃棄体回収作業のうち緩衝材除去の位置づけ .....	5-2
図 5.1.2-2	試験ケースの概念.....	5-3
図 5.2.1-1	試験全体概要(緩衝材除去による機能確認試験) .....	5-6
図 5.2.1-2	想定する塩水リユース設備のマスバランス.....	5-7
図 5.2.1-3	緩衝材除去特性のデータ取得に関わる流れ.....	5-8
図 5.2.1-4	塩水リユース特性のデータ取得に関わる流れ .....	5-9
図 5.2.2-1	試験全体イメージ(緩衝材除去による機能確認試験) .....	5-10
図 5.2.2-2	試験設備配置.....	5-11
図 5.2.2-3	試験設備配置全景.....	5-11
図 5.2.2-4	模擬処分坑道および模擬処分孔 .....	5-12
図 5.2.2-5	模擬処分孔および模擬処分坑道に用いる試験設備の詳細構造 .....	5-13
図 5.2.2-6	遠隔操作室.....	5-14
図 5.2.2-7	模擬廃棄体全景 .....	5-14
図 5.2.2-8	塩水リユース設備の構成(塩水・スラリーの循環フロー).....	5-15
図 5.2.3-1	粒度分布測定結果.....	5-18
図 5.2.3-2	現場締固め管理フロー.....	5-19
図 5.2.3-3	コアサンプリング位置.....	5-21
図 5.2.3-4	乾燥密度、飽和度測定結果 (No.2 リング コアサンプリング) .....	5-22
図 5.2.3-5	乾燥密度、飽和度測定結果 (No.3 リング コアサンプリング) .....	5-23
図 5.2.3-6	乾燥密度、飽和度測定結果 (No.5 リング コアサンプリング) .....	5-24
図 5.2.3-7	乾燥密度、飽和度測定結果 (No.6 リング コアサンプリング) .....	5-25
図 5.2.3-8	充填材料と充填位置 .....	5-26
図 5.2.3-9	模擬廃棄体と緩衝材間のペレット充填密度測定手順 .....	5-27
図 5.2.3-10	試験体設置状況 (模擬廃棄体) .....	5-27
図 5.2.3-11	試験体設置状況 (緩衝材) .....	5-28
図 5.3.1-1	塩水噴射・スラリー吸引流量の測定結果状況.....	5-31
図 5.3.1-2	塩水噴射ノズル・スラリー吸引口の配置 .....	5-31

図 5.3.1-3	塩水噴射・スラリー吸引流量の測定結果（ケース 1）	5-32
図 5.3.1-4	塩水噴射・スラリー吸引流量の測定結果（ケース 2）	5-32
図 5.3.1-5	塩水噴射・スラリー吸引流量のバランス状況	5-33
図 5.3.1-6	固液分離設備前後の SS 濃度（ケース 1）	5-34
図 5.3.1-7	固液分離設備前後の SS 濃度（ケース 2）	5-34
図 5.3.1-8	沈降試験状況	5-35
図 5.3.1-9	沈降試験によるスラリーの沈降（濃縮）の経時変化	5-35
図 5.3.1-10	リユース塩水の品質確認（計測器設置状況）	5-36
図 5.3.1-11	固液分離後、成分調整槽における塩分濃度・pH の測定結果（ケース 1）	5-36
図 5.3.1-12	固液分離後、成分調整槽における塩分濃度・pH の測定結果（ケース 2）	5-36
図 5.3.1-13	固液分離後、成分調整槽における水温の測定結果（ケース 1）	5-37
図 5.3.1-14	固液分離後、成分調整槽における水温の測定結果（ケース 2）	5-37
図 5.3.2-1	ケース 1 における緩衝材除去深度測定結果	5-39
図 5.3.2-2	ケース 1 における緩衝材除去状況	5-39
図 5.3.2-3	ケース 1 における緩衝材除去状態の観察結果(1)	5-40
図 5.3.2-4	ケース 1 における緩衝材除去状態の観察結果(2)	5-41
図 5.3.2-5	緩衝材除去形状（累積 1 時間後）	5-42
図 5.3.2-6	緩衝材除去形状（累積 2 時間後）	5-43
図 5.3.2-7	緩衝材除去形状（累積 3 時間後）	5-43
図 5.3.2-8	緩衝材除去形状（累積 4 時間後）	5-44
図 5.3.2-9	除去体積計算（累積 4 時間後）	5-44
図 5.3.2-10	緩衝材除去形状（累積 10 時間後）	5-45
図 5.3.2-11	除去体積計算（累積 10 時間後）	5-45
図 5.3.2-12	緩衝材除去形状（累積 16 時間後）	5-46
図 5.3.2-13	除去体積計算（累積 16 時間後）	5-46
図 5.3.2-14	緩衝材除去形状（累積 22 時間後）	5-47
図 5.3.2-15	除去体積計算（累積 22 時間後）	5-47
図 5.3.2-16	緩衝材除去形状（累積 28 時間後）	5-48
図 5.3.2-17	除去体積計算（累積 28 時間後）	5-48
図 5.3.2-18	緩衝材除去形状（累積 35 時間後）	5-49
図 5.3.2-19	除去体積計算（累積 35 時間後）	5-49
図 5.3.2-20	緩衝材除去形状（累積 42 時間後）	5-50
図 5.3.2-21	除去体積計算（累積 42 時間後）	5-50
図 5.3.2-22	緩衝材除去形状（累積 44 時間後）	5-51

図 5.3.2-23 除去体積計算（累積 44 時間後） .....	5-51
図 5.3.2-24 ケース 2 における試験体の構成 .....	5-52
図 5.3.2-25 ケース 2 における緩衝材除去深度測定結果 .....	5-53
図 5.3.2-26 ケース 2 における緩衝材除去状態の観察結果 .....	5-54
図 5.3.2-27 緩衝材形状（ケース 2 試験開始前） .....	5-55
図 5.3.2-28 緩衝材除去形状（ケース 2 累積 3 時間後） .....	5-56
図 5.3.2-29 緩衝材除去形状（ケース 2 累積 8 時間後） .....	5-57
図 5.3.2-30 除去体積計算（ケース 2 累積 8 時間後） .....	5-57
図 5.3.2-31 緩衝材除去形状（ケース 2 累積 14 時間後） .....	5-58
図 5.3.2-32 除去体積計算（ケース 2 累積 14 時間後） .....	5-58
図 5.3.2-33 緩衝材除去形状（ケース 2 累積 20 時間後） .....	5-59
図 5.3.2-34 除去体積計算（ケース 2 累積 20 時間後） .....	5-59
図 5.3.2-35 緩衝材除去形状（ケース 2 累積 21 時間後） .....	5-60
図 5.3.2-36 除去体積計算（ケース 2 累積 21 時間後） .....	5-60
図 5.3.2-37 廃棄体の把持の把持方法 .....	5-61
図 5.3.2-38 模擬廃棄体の把持・振れ止め状況 .....	5-61
図 5.3.2-39 模擬廃棄体の把持・振れ止め状況（モニター画面） .....	5-62
図 5.3.2-40 緩衝材累積除去量（除去体積計算と SS 濃度計算）の比較（ケース 1） .....	5-64
図 5.3.2-41 緩衝材累積除去量（除去体積計算と SS 濃度計算）の比較（ケース 2） .....	5-64
図 5.3.2-42 時間当たり緩衝材除去量（SS 濃度から算定）と除去速度の比較 .....	5-65
図 6.1.1-1 実施フロー .....	6-1
図 6.2.1-1 検討範囲の検討 .....	6-4
図 6.2.1-2 第 2 次取りまとめにおける処分場概念 .....	6-5
図 6.2.2-1 圧力と応力の違いのイメージ .....	6-11
図 6.2.2-2 初期応力と深度の関係 .....	6-12
図 6.2.2-3 広域応力場の定義 .....	6-13
図 6.2.2-4 地下水とガスの相対透過率に関する VG、BC モデルの一例 .....	6-15
図 6.2.2-5 サクシオンに関する VG モデルの一例 .....	6-15
図 6.2.2-6 放射能の推移から眺めた高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の特徴 .....	6-20
図 6.2.2-7 ガラス固化体の放射能の経時変化 .....	6-20
図 6.2.2-8 埋め戻し材厚さと表面線量当量率 .....	6-21
図 6.2.2-9 放射線分解により供給されるカソード電流密度 .....	6-21
図 6.2.2-10 ガラス固化体の発熱量の経時変化 .....	6-22

図 6.2.2-11 処分深度に対応した廃棄体専有面積と緩衝材温度の関係	6-23
図 6.2.2-12 有効粘土密度と体積膨潤比の関係	6-24
図 6.2.2-13 有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係	6-24
図 6.2.2-14 緩衝材厚さと緩衝材の圧密反力の関係	6-25
図 6.2.2-15 有効粘土密度と透水係数の関係（降水系、海水系）	6-26
図 6.2.2-16 クニゲル V1 と Ca 型化ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係	6-26
図 6.2.2-17 海水／淡水環境下での炭素鋼の腐食深さ	6-27
図 6.2.2-18 処分坑道における標準断面図	6-30
図 6.2.2-19 地層処分システムの構成要素	6-33
図 6.2.2-20 PEM 方式の例	6-34
図 6.2.2-21 塑性圧による代表的な変状形態模式図	6-37
図 6.2.2-22 緩み圧による代表的な変状形態模式図	6-37
図 6.2.2-23 偏圧の発生例と変状の模式図	6-38
図 6.2.2-24 偏圧による代表的な変状形態模式図	6-39
図 6.2.2-25 応力再配分の例	6-39
図 6.2.2-26 試験結果とコンプライアンス可変型構成方程式による計算結果	6-40
図 6.2.2-27 日本列島とその周辺のプレート	6-41
図 6.2.2-28 ひび割れ幅と透水量	6-49
図 6.2.2-29 材齢と Ca 濃度が変化する深さ	6-49
図 6.2.2-30 Ca 固定化による劣化深さの変化	6-50
図 6.2.2-31 中性化深さの経年変化	6-50
図 6.2.2-32 ソーマサイト劣化（写真）	6-51
図 6.2.2-33 低レベル放射性廃棄物余裕深度処分施設	6-52
図 6.2.2-34 塩化物イオンと pH による孔食と隙間腐食	6-53
図 6.2.2-35 コンクリートピットと低拡散層の変形図	6-54
図 6.2.2-36 腐食速度の経年変化	6-55
図 6.2.2-37 ブロック試料浸漬試験方法	6-56
図 6.2.2-38 一次元軸対象拡散モデル	6-56
図 6.2.2-39 一次元移流拡散モデル（2 亀裂）	6-57
図 6.2.2-40 一次元軸対象拡散モデルによる解析結果	6-57
図 6.2.2-41 一次元移流拡散モデル（2 亀裂）	6-58
図 6.2.2-42 溶液型グラウトの体積変化	6-59
図 6.2.2-43 溶脱シリカ量の測定結果	6-60
図 6.2.2-44 溶液型グラウトの溶脱シリカ量の測定結果	6-60
図 6.2.2-45 ホモゲル長期力学的安定性確認試験	6-61

図 6.2.2-46	ホモゲル長期化学的安定性確認試験（試験 1）	6-62
図 6.2.2-47	ホモゲル長期化学的安定性確認試験（試験 2）	6-62
図 6.2.2-48	長期止水効果確認試験装置	6-63
図 6.2.2-49	長期止水効果確認試験結果	6-63
図 6.2.2-50	緩衝材とセメントの相互作用検討例	6-64
図 6.2.2-51	覆工裏面排水の概念	6-66
図 6.2.2-52	湧水対策工の一例	6-67
図 6.2.2-53	ガス検知システムの概念	6-68
図 6.2.2-54	定置前状態と閉鎖後直後の状態（縦置き定置）	6-70
図 6.2.2-55	定置前状態と閉鎖後直後の状態（横置き定置）	6-71
図 6.2.2-56	空洞断面図と AE 計測側線	6-75
図 6.2.2-57	AE 測定結果（放水路側周辺トンネル）	6-76
図 6.2.2-58	土岐花崗岩を対象とした約 3 万年間の空洞の変形の解析例	6-77
図 6.2.2-59	地震に伴う地殻変動の例（東北地方太平洋沖地震）	6-78
図 6.2.2-60	定常状態における坑道周囲の全水頭分布	6-79
図 6.2.2-61	坑道中心からの距離と全水頭の関係	6-80
図 6.2.2-62	東濃鉦山における地下水観測用ボーリング	6-80
図 6.2.2-63	愛知県東部地震における地下水の変化	6-81
図 6.2.2-64	白浜砂岩（上）と来待砂岩（下）を用いた透水試験結果	6-82
図 6.2.2-65	割れ目を対象とした透水試験装置（上）と試験結果	6-83
図 6.2.2-66	拘束圧と温度の一定に保った長期透水試験結果	6-85
図 6.2.2-67	花崗岩の不連続面を対象とした長期透水試験結果	6-86
図 6.2.2-68	花崗岩からの成分溶出の測定結果	6-86
図 6.2.2-69	トンネル近傍の Ca イオン濃度の予測解析結果	6-87
図 6.2.2-70	コンクリートからの水酸化カルシウムの溶脱の概念	6-88
図 6.2.2-71	採取試料からの溶出水の pH 変化	6-88
図 6.2.2-72	立坑掘削による間隙流体圧とガスの飽和度分布の変化	6-89
図 6.2.2-73	瑞浪超深地層研究所における塩化物イオンの濃度変化	6-90
図 6.2.2-74	微生物の添加と酸化還元電位の変化	6-91
図 6.2.2-75	岩石試料の熱伝導率に及ぼす飽和度の影響	6-93
図 6.2.2-76	き裂を含む岩石試料と熱伝導率測定装置	6-94
図 6.2.2-77	岩石試料の線膨張係数と温度、拘束圧の関係	6-94
図 6.2.2-78	一軸載荷試験の応力-ひずみ曲線	6-102
図 6.2.2-79	クラックの進展の例	6-103
図 6.2.2-80	石英供試体表面の顕微鏡観察結果（圧力溶解の様子）	6-104
図 6.2.2-81	応力再配分の例	6-105

図 6.2.2-82	隙間と人工バリアの寸法および解析出力点（処分坑道横置き方式）	6-115
図 6.2.2-83	温度の経時変化（硬岩系岩盤処分横置き方式）	6-115
図 6.2.2-84	部材や材料の劣化特性のイメージ	6-116
図 6.3.1-1	トンネルにおける一般的な維持管理フロー	6-150
図 6.3.1-2	トンネルの一般的な点検と体系	6-156
図 6.3.1-3	一般的なトンネルにおける調査項目	6-161
図 6.3.1-4	ひび割れ発生パターンの進行図の一例	6-166
図 6.3.1-5	対策工選定の手順	6-168
図 6.3.1-6	主な劣化・剥離対策の分類（道路・鉄道トンネルの例）	6-170
図 6.3.1-7	主な漏水対策の分類（道路・鉄道トンネルの例）	6-170
図 6.3.1-8	塩害に対する補修（通信・送電トンネルの例）	6-172
図 6.3.2-1	PSR の流れ（概念図）	6-175
図 6.3.2-2	評価対象期間の考え方（概念図）	6-176
図 6.3.2-3	肉厚測定試験結果に対する評価の流れ	6-180
図 6.3.2-4	目視試験結果に関わる評価の流れ	6-181
図 6.3.2-5	系の漏えい検出試験結果に関わる評価の流れ	6-181
図 6.3.2-6	RE-5330-1 肉厚の使用限界評価	6-182
図 6.3.2-7	コンクリートキャスク概念図	6-189
図 6.3.2-8	コンクリート製貯蔵容器のコンクリート部材の健全性に対する評価のフロー	6-191
図 6.3.4-1	トンネル覆工検査車両（JR東日本）	6-203
図 6.3.4-2	処分坑道における標準断面図	6-204
図 6.3.4-3	（財）鉄道総合技術研究所による開発中または実用化した維持管理技術の例	6-206
図 6.4.1-1	対策方法のイメージ	6-211
図 6.4.1-2	トンネルに作用する水圧と修正された Muskat の式	6-212
図 6.4.1-3	吹付けコンクリート用光ファイバーセンサー	6-213

## 表目次

表 2.3-1	試験坑道において試験に必要となるインフラ .....	2-4
表 2.4-1	塩水リユース設備の必要長さ（1列配置の場合） .....	2-7
表 2.4-2	塩水リユース設備の必要長さ（2列配置の場合） .....	2-7
表 2.4-3	緩衝材除去により確認する機能と取得特性および取得方法 .....	2-8
表 2.4-4	試験条件（緩衝材除去による機能確認試験） .....	2-9
表 2.4-5	試験工程 .....	2-10
表 3.1.1-1	走行装置設計条件一覧 .....	3-3
表 3.1.1-2	油圧ユニット装置設計条件一覧 .....	3-5
表 3.1.1-3	油圧ユニットの仕様一覧 .....	3-6
表 3.2.2-1	駆動設備の機能と仕様 .....	3-18
表 3.2.2-2	昇降設備の仕様と能力 .....	3-19
表 3.2.2-3	塩水噴射・スラリー吸引設備の機能と仕様 .....	3-20
表 3.2.2-4	塩水リユース設備の機能と仕様 .....	3-21
表 3.2.2-5	処分坑道の条件 .....	3-22
表 3.2.3-1	駆動設備に対する遠隔操作設備の要求事項 .....	3-23
表 3.2.3-2	昇降設備に対する遠隔操作設備の要求事項 .....	3-24
表 3.2.3-3	塩水噴射・スラリー吸引設備に対する遠隔操作設備の要求事項 .....	3-25
表 3.2.3-4	塩水リユース設備に対する遠隔操作設備の要求事項 .....	3-26
表 3.2.3-5	XtionProLive 性能諸元 .....	3-31
表 4.2.2-1	構成する設備の一覧 .....	4-3
表 4.3.2-1	動作確認項目と動作確認方法（駆動設備） .....	4-17
表 4.3.2-2	動作確認項目と動作確認方法（昇降設備） .....	4-19
表 4.3.2-3	動作確認項目と動作確認方法（塩水噴射・スラリー吸引設備） .....	4-21
表 4.3.2-4	動作確認項目と動作確認方法（塩水リユース設備） .....	4-22
表 4.3.2-5	試験孔および試験坑道の基本仕様 .....	4-24
表 4.3.3-1	駆動設備の動作確認試験結果一覧 .....	4-31
表 4.3.3-2	昇降設備の動作確認試験結果一覧 .....	4-32
表 4.3.3-3	塩水噴射・スラリー吸引設備の動作確認試験結果一覧 .....	4-34
表 4.3.3-4	塩水リユース設備の動作確認試験結果一覧 .....	4-35
表 5.1.2-1	試験ケース（緩衝材除去による機能確認試験） .....	5-3
表 5.1.3-1	緩衝材除去により確認する機能と取得特性および取得方法 .....	5-4
表 5.1.4-1	試験条件（緩衝材除去による機能確認試験） .....	5-5
表 5.2.2-1	試験孔および試験坑道の基本仕様 .....	5-12
表 5.2.2-2	模擬廃棄体の仕様 .....	5-14

表 5.2.3-1	試験に用いる緩衝材の主要な仕様	5-16
表 5.2.3-2	土粒子密度試験結果	5-17
表 5.2.3-3	機能確認試験に用いた緩衝材の特性	5-20
表 5.2.3-4	乾燥密度、飽和度測定結果 (No.2 リングコアサンプリング)	5-22
表 5.2.3-5	乾燥密度、飽和度測定結果 (No.3 リングコアサンプリング)	5-23
表 5.2.3-6	乾燥密度、飽和度測定結果 (No.5 リングコアサンプリング)	5-24
表 5.2.3-7	乾燥密度、飽和度測定結果 (No.6 リングコアサンプリング)	5-25
表 5.2.3-8	模擬廃棄体と緩衝材間のペレット充填乾燥密度 (有効ベントナイト密度)	5-29
表 5.3.2-1	SS 濃度 (固液分離設備前後の SS 濃度) からの緩衝材の除去量算定	5-63
表 5.3.2-2	SS 濃度 (固液分離設備前後の SS 濃度) からの緩衝材の除去量算定 (ケース 2)	5-63
表 6.2.1-1	縦置き定置における検討対象	6-6
表 6.2.1-2	横置き定置における検討対象	6-6
表 6.2.1-3	硬岩系・縦置き方式における埋め戻されるまでの期間の設定	6-7
表 6.2.1-4	硬岩系・横置き方式における埋め戻されるまでの期間の設定	6-8
表 6.2.2-1	岩種ごとの力学特性 (例)	6-14
表 6.2.2-2	第 2 次取りまとめにおけるオーバーパックに作用する外圧値	6-25
表 6.2.2-3	安全性に係る特性の抽出	6-28
表 6.2.2-4	構成要素と使用材料の抽出例	6-35
表 6.2.2-5	長期状態評価において考慮すべき主要な現象・反応例	6-48
表 6.2.2-6	人工バリア内鋼材の腐食シナリオ	6-53
表 6.2.2-7	腐食速度パラメーター一覧	6-54
表 6.2.2-8	試験に使用したグラウト材料の特性	6-59
表 6.2.2-9	緩衝材と炭素鋼腐食生成物の相互作用検討例 (Fe 型化)	6-65
表 6.2.2-10	使用材料の変状と発生時期	6-69
表 6.2.2-11	ニアフィールド状態の経時変化 (周辺岩盤)	6-72
表 6.2.2-12	ニアフィールド状態の経時変化 (人工バリア)	6-72
表 6.2.2-13	ニアフィールド状態の経時変化 (周辺岩盤、横置き)	6-73
表 6.2.2-14	ニアフィールド状態の経時変化 (人工バリア、横置き)	6-73
表 6.2.2-15	ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理【周辺岩盤・力学的影響】	6-97
表 6.2.2-16	ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理【周辺岩盤・水理学的影響】	6-98
表 6.2.2-17	ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理【周辺岩盤・化学的影響】	6-99

表 6.2.2-18	ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理 【周辺岩盤・熱的影響】 .....	6-100
表 6.2.2-19	ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理 【人工バリア・放射線の影響】 .....	6-100
表 6.2.2-20	ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理 【人工バリア・熱的影響】 .....	6-100
表 6.2.2-21	ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理 【人工バリア・力学的影響】 .....	6-101
表 6.2.2-22	ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理 【人工バリア・水理学的影響】 .....	6-101
表 6.2.2-23	ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理 【人工バリア・化学的影響】 .....	6-101
表 6.2.2-24	一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象 【周辺岩盤・力学的影響】 .....	6-108
表 6.2.2-25	一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象 【周辺岩盤・水理学的影響】 .....	6-109
表 6.2.2-26	一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象 【周辺岩盤・化学的影響】 .....	6-110
表 6.2.2-27	一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象 【周辺岩盤・熱的影響】 .....	6-111
表 6.2.2-28	一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象 【人工バリア・放射線の影響】 .....	6-111
表 6.2.2-29	一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象 【人工バリア・熱的影響】 .....	6-111
表 6.2.2-30	一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象 【人工バリア・力学的影響】 .....	6-112
表 6.2.2-31	一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象 【人工バリア・水理学的影響】 .....	6-112
表 6.2.2-32	一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象 【人工バリア・化学的影響】 .....	6-113
表 6.2.2-33	隙間を考慮したモデルの解析ケース .....	6-114
表 6.2.3-1	研究開発課題および技術開発課題の整理（周辺岩盤・処分坑道） .....	6-118
表 6.2.3-2	研究開発課題および技術開発課題の整理（人工バリア） .....	6-119
表 6.3.1-1	地下坑道施設調査対象一覧 .....	6-120
表 6.3.1-2	各事業者の維持管理フロー（道路トンネル） .....	6-152
表 6.3.1-3	各事業者の維持管理フロー（鉄道トンネル） .....	6-153

表 6.3.1-4	各事業者の維持管理フロー（水路トンネル）	6-154
表 6.3.1-5	各事業者の維持管理フロー（通信・送電トンネル）	6-155
表 6.3.1-6	各事業者の点検の現状（道路トンネル）	6-157
表 6.3.1-7	各事業者の点検の現状（鉄道トンネル）	6-158
表 6.3.1-8	各事業者の点検の現状（水路トンネル）	6-159
表 6.3.1-9	各事業者の点検の現状（通信・送電トンネル）	6-160
表 6.3.1-10	調査に基づく判定区分（国土交通省の場合）	6-162
表 6.3.1-11	外力による変状に対する判定基準（国土交通省の場合）	6-162
表 6.3.1-12	材料劣化による変状に対する半的基準（国土交通省の場合）	6-163
表 6.3.1-13	漏水等による変状に対する判定基準（国土交通省の場合）	6-163
表 6.3.1-14	補強・補修ランクの判定（旧日本道路公団の場合）	6-163
表 6.3.1-15	健全度の区分と判定	6-164
表 6.3.1-16	外力による変状に対する判定基準	6-164
表 6.3.1-17	材料劣化による変状に対する判定基準	6-165
表 6.3.1-18	軌道の保守周期の短縮に対する判定基準	6-165
表 6.3.1-19	健全度の区分と判定（東京電力の場合）	6-166
表 6.3.1-20	総合的健全度ランク判定表（東京電力の場合）	6-166
表 6.3.1-21	補強・補修ランクの判定（東京電力の場合）	6-167
表 6.3.1-22	健全度の区分と判定（NTT 東日本の場合）	6-167
表 6.3.1-23	各変状に対する一般的な対策工の例	6-169
表 6.3.1-24	外力による山岳トンネルの変状原因と対策工（道路・鉄道トンネルの例）	6-171
表 6.3.1-25	下水道トンネル特有の主な対策工	6-172
表 6.3.2-1	原子力関連施設の維持管理に関する文献等	6-173
表 6.3.2-2	試験カテゴリと試験部位及び試験方法	6-178
表 6.3.2-3	再処理設備の使用期間中検査における検査項目と機種区分、腐食区分との関係	6-179
表 6.3.2-4	金属キャスクについて検査段階ごとに行う検査項目	6-184
表 6.3.2-5	輸送容器の故障発生と金属キャスク貯蔵中の故障発生の比較（1/3）	6-185
表 6.3.2-6	輸送容器の故障発生と金属キャスク貯蔵中の故障発生の比較（2/3）	6-186
表 6.3.2-7	輸送容器の故障発生と金属キャスク貯蔵中の故障発生の比較（3/3）	6-187
表 6.3.2-8	輸送容器の性能維持のための検査項目	6-188
表 6.3.2-9	コンクリート製貯蔵容器の主要な設計用特性値	6-190

表 6.3.2-10	コンクリート製貯蔵容器のコンクリート部材に対する検査	6-192
表 6.3.2-11	施設定期自主検査を行う設備及び検査項目 (1/3)	6-195
表 6.3.2-12	施設定期自主検査を行う設備及び検査項目 (2/3)	6-196
表 6.3.2-13	施設定期自主検査を行う設備及び検査項目 (3/3)	6-197
表 6.3.2-14	巡視を行う設備等	6-197
表 6.3.2-15	コンクリート維持管理に関する文献 (指針、論文など) 調査の候補例	6-197
表 6.3.3-1	諸外国の回収維持期間に関する法規制等	6-202
表 6.4.1-1	課題のまとめ (周辺岩盤および坑道)	6-214
表 6.4.1-2	概略開発スケジュール (周辺岩盤および坑道)	6-215
表 6.4.2-1	課題のまとめ (人工バリア)	6-218
表 6.4.2-2	概略開発スケジュール (人工バリア)	6-219

# 第1章 事業概要

## 1.1 事業名

事業名：平成 25 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）

## 1.2 事業の背景と目的

高レベル放射性廃棄物処分における廃棄体の回収可能性に関して、平成 18 年 9 月に取りまとめられた「放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制制度のあり方について」（総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会）においては、基本的に廃棄体を回収するような事態が生ずることはないと考えられるとしながらも、処分場閉鎖までの間は廃棄体の回収可能性を維持することが必要である、と記されている。

また、平成 24 年 12 月 25 日に原子力委員会が発表した「今後の原子力研究開発の在り方について（見解）」においても、回収可能性の合理的な担保のあり方に関する研究開発を継続的に進めることが重要である、と記されている。

これまで、資源エネルギー庁で実施してきた基盤研究開発（具体的には平成 19 年度から 24 年度まで実施した地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発）（以下、処分システム高度化））において、操業技術を構成する要素技術の一つとして、回収技術の中核技術である塩水を利用した緩衝材除去技術について、適用性の検討が行われてきた。

これらを背景として、本事業は、地下環境における高レベル放射性廃棄物の回収技術を整備し、国民の地層処分技術に関する安心感の醸成に資することを目的とする。

## 1.3 全体計画

廃棄体の回収技術の必須技術は、緩衝材の除去技術であることが資源エネルギー庁で実施している基盤研究（平成 20 年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発））において示されており、塩水を用いて緩衝材をスラリー化して除去する方法について検討が進められている。この中で技術の基本的な構成や見通し等が得られているが、地下環境で適用可能な装置を設計し、技術を確認することが必要である。

これらの最新の知見を高度化し、地下環境で実規模の試験を行うための回収装置の開発を平成 23 年度から 4 年程度の期間で行う。対象とする処分方式は、処分孔縦置き方式とする。

## 1.4 実施概要

本年度の実施概要を下記に示す。

### 1.4.1 実証試験計画の見直し

平成 24 年度に実施した地下環境における実規模で行う実証試験の全体計画を緩衝材除去装置の開発状況及び地環境情報の変化に照らして見直し、地下環境での緩衝材除去装置の配置検討及び衝材除去試験の実施に向け具体的に計画を検討した。実施内容の詳細は、第 2 章に示す。

### 1.4.2 緩衝材除去装置駆動設備の製作

平成 24 年度の設計に基づき、緩衝材除去装置駆動設備の製作を行った。製作においては安全かつ効率的な遠隔による装置を目指すとともに、地下特有の環境での使用することに留意した。また、装置の円滑な動作が可能となるよう塩水ホースリールの巻取り方式の変更、塩水ホースの触れ止め部材の位置変更など、改良を実施した。詳細を第 3 章に示す。

### 1.4.3 緩衝材除去装置の組立・調整

平成 24 年度に製作した緩衝材除去装置のうち塩水噴射部、スラリー吸引設備、昇降設備、塩水リユース設備を組立てるとともに、本年度製作した駆動設備への取付・調整を行なった。また組立・調整後、装置の安全性確認を目的とした遠隔操作による装置の動作確認を実施した。詳細を第 4 章に示す。

### 1.4.4 緩衝材除去装置の機能確認

組立・取付けを完了した緩衝材除去装置の機能確認を目的として、地上にて緩衝材及び模擬廃棄体を用いた実規模スケールでの緩衝材除去試験を行い、噴射量、噴射圧力、緩衝材除去量、スラリー化した緩衝材の固液分離特性、リユース塩水性状等に関するデータ取得を行った。また、本装置が地下特有の環境で使用されること留意し、遠隔操作にて緩衝材除去試験を実施した。詳細を第 5 章に示す。

### 1.4.5 処分施設における回収維持期間の検討

処分施設を完全に埋め戻さずに、廃棄体を回収するための維持期間について検討を行った。処分施設を埋め戻さずに一定期間維持することで、処分施設の安全性に及ぼす影響について、周辺岩盤の力学的な観点、水理的な観点及び化学的な観点等から調査・整理し、評価を行った。詳細を第 6 章に示す。

## 第2章 実証試験計画の見直し

### 2.1 実施内容

平成 25 年度における実証試験計画の見直し業務として、平成 24 年度成果（坑道内における緩衝材除去装置の基本的な配置例、坑道内におけるインフラ設備や空間的課題など）を基に「平成 25 年度までに製作した緩衝材除去装置の反映」、「実証試験計画を行う地下環境の調査」及び「地下環境における緩衝材除去試験計画」を実施した。実証試験計画の見直しフローを図 2.1-1 に示す。

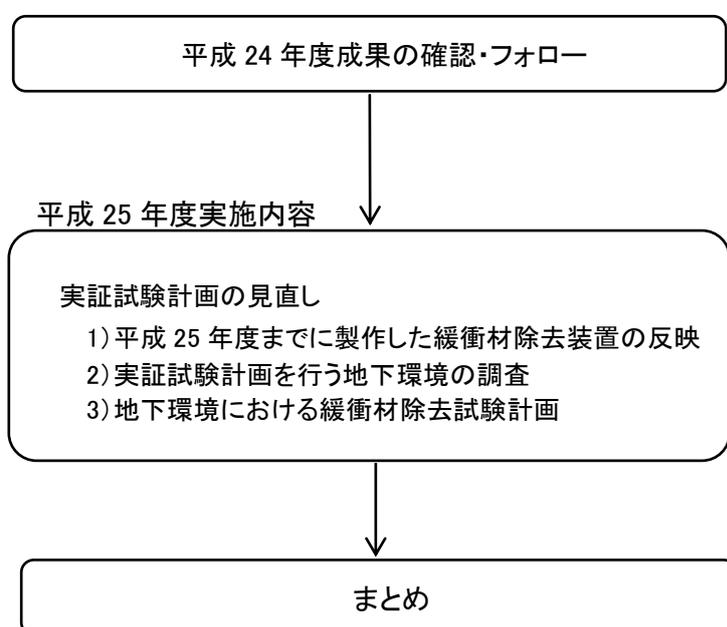


図 2.1-1 実証試験計画の見直しフロー

なお、地下環境における緩衝材除去試験計画では、平成 23 年度、平成 24 年度と同様に第 2 次取りまとめに示される堆積岩系岩盤を対象として、緩衝材除去装置の形状寸法を考慮した具体的な試験設備の配置、試験内容と手順を検討した。

## 2.2 平成 25 年度までに製作した緩衝材除去装置の反映

緩衝材除去装置の全体図を図 2.2-1 に示す。本装置は平成 24 年度までに製作した塩水噴射・スラリー吸引設備及び昇降設備と平成 25 年度に製作した駆動設備等々の装置全体の組立・取付けを行ったものであり、これらの機能と諸元（高さ：約 3.9m、幅：約 3.0m、長さ：約 5.2m、重量：約 14 t）を実証試験計画の見直しに反映するものである。装置の詳細な仕様等は第 3 章に示す。

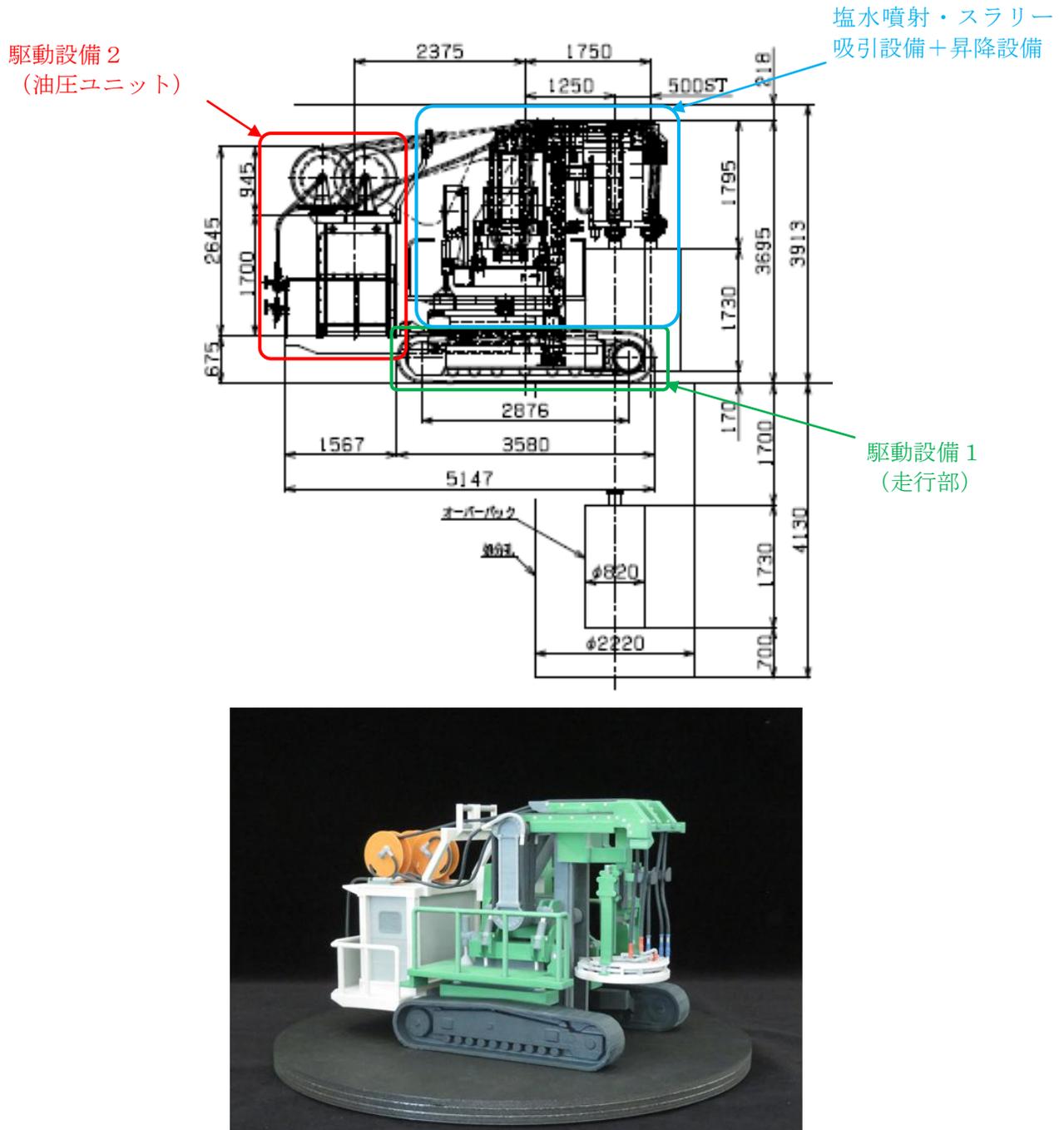


図 2.2-1 緩衝材除去装置の全体図

## 2.3 実証試験計画を行う地下環境の調査

地下環境での実証試験は実規模スケールでの計画であり、装置開発の基本的な坑道断面としている第2次取りまとめにおける堆積岩盤系の坑道断面を例に、実証試験計画を行う地下環境として、検討対象とする坑道条件を整理した。以下に、試験坑道までのアクセス方法と坑道仕様の設定、実規模スケール試験に用いる試験坑道の設定、試験坑道でのインフラ設備の設定について示す。

### (1) 試験坑道までのアクセス方法と坑道仕様の設定

試験坑道までの資機材の搬入出ルートは、地上よりアクセス坑道を使って地下に搬入出し、地下では主要坑道から処分坑道に至るルートと設定する。

なお、これらの搬入出ルートとなる各坑道には、換気のための風管やインフラ設備の配置により、搬入出が可能となる資機材の仕様（寸法や重量）に制約を受けることになるが、現時点ではその詳細が明らかでないため、その存在を考慮せず検討を行った。

### (2) 実規模スケール試験に用いる試験坑道の設定

検討対象とする坑道レイアウトや各坑道の仕様は、第2次取りまとめにおける堆積岩系岩盤に準拠した。資機材の搬出入に用いるアクセス坑道や主要坑道の断面を図2.3-1に示す。また、試験エリアとなる処分坑道と処分孔の断面を図2.3-2に示す。なお、試験坑道として用いる処分坑道の延長は、塩水リユースに必要となる水槽などの設置スペースの確保から、25m程度として計画を立案する。

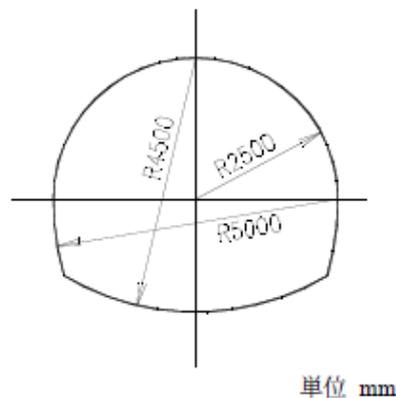


図 2.3-1 アクセス坑道および主要坑道の断面仕様

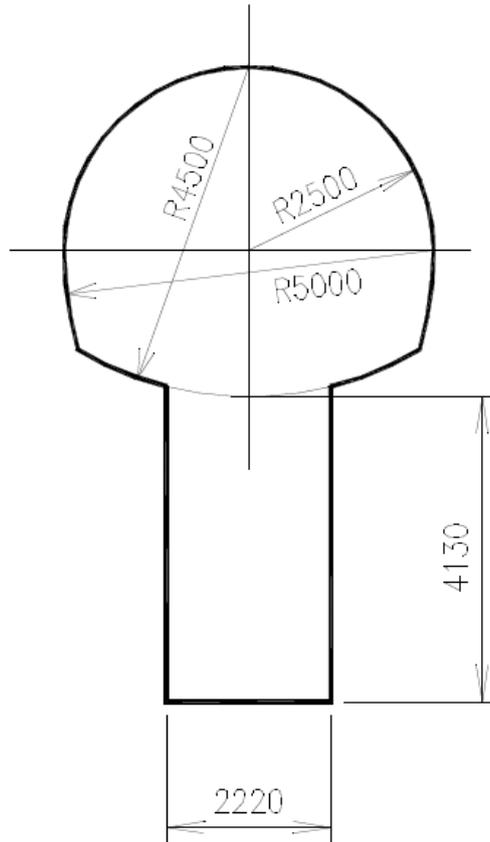


図 2.3-2 処分坑道および処分孔の断面仕様

(3) 試験坑道でのインフラ設備の設定

検討対象とする試験坑道におけるインフラ設備は表 2.3-1 に示すものが既に試験エリアに整備されているものとして検討を行った。なお、これらの設備は、緩衝材除去装置を用いた試験を行うために必要な仕様である。

表 2.3-1 試験坑道において試験に必要なとなるインフラ

坑道	坑道仕様	電気	給排水
試験坑道	高さ H 約 4.0m	100V 4kw 200V 48kw 400V 22kw	給水：23m <sup>3</sup> 排水：23m <sup>3</sup>

## 2.4 地下環境における緩衝材除去試験計画

平成 25 年度までに製作された緩衝材除去装置による基本的配置例と、実証試験計画を行う地下環境調査による坑道条件の設定に基づき、地下環境における実規模スケールでの緩衝材除去試験計画を実施した。以下に、試験体の準備、緩衝材除去装置及び資機材等の組立、試験設備の配置、試験内容、試験工程について示す。

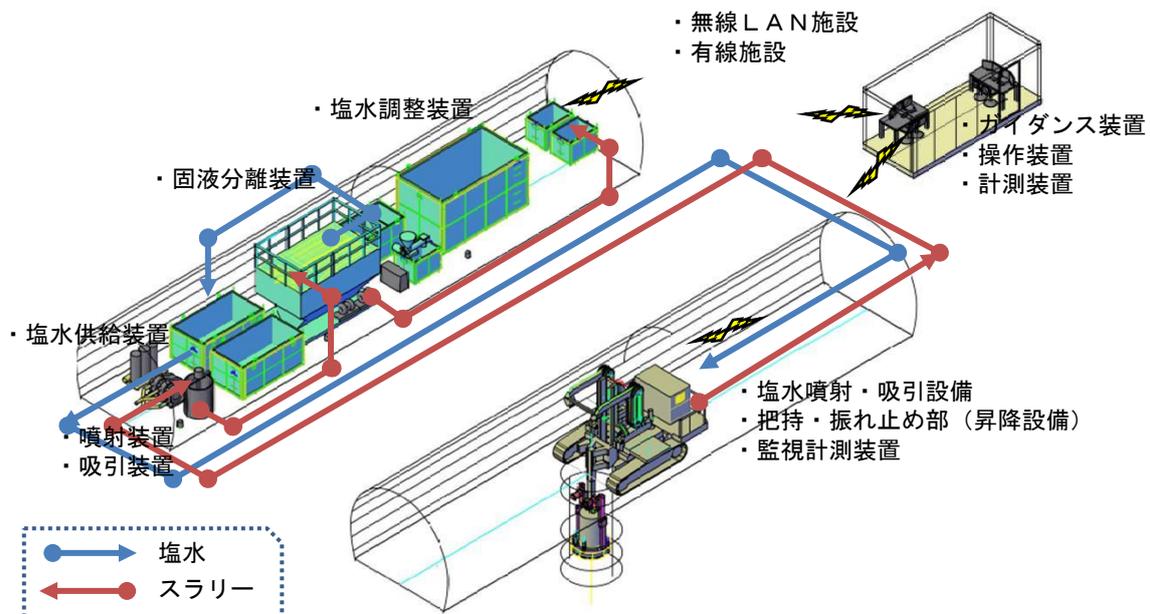


図 2.4-1 緩衝材除去装置の基本的配置例

### (1) 試験体の準備

#### 1) 模擬廃棄体の搬入出と設置

実規模スケール試験に用いる模擬廃棄体の寸法は、設定した坑道への搬入出や設置作業を行うことが可能な寸法である。ただし、地下坑道への搬入出と設置を行うための搬送・定置するための装置を別途準備することが必要である。

#### 2) 緩衝材の搬入出と設置

実規模スケール試験に用いる緩衝材の寸法と重量は、分割することにより坑道への搬入出や設置および試験中の作業を行うことが可能な範囲である。なお、処分孔への設置は、真空把持による設置や、鋼殻リングとして鋼殻部を把持して設置する方法などが考えられる。

### (2) 緩衝材除去装置及び資機材等の組立

平成 25 年度までに製作している緩衝材除去装置について、検討条件とした坑道への搬入および組立について検討を行った。

緩衝材除去装置の高さ（走行面からの高さ）は、3,913mm であり、作動時の安全確保から坑

道壁壁から 100mm 以上の離隔を確保し、坑道天端高さ（走行面からの高さ）として約 4m 以上（円形坑道として約 5.2m）の坑道に適用されることを前提に設計・製作されているものである。

第 2 次取りまとめにおける各坑道の寸法形状は、緩衝材除去装置の搬入出や稼働が可能な仕様であり、緩衝材除去装置は、装置全体を一体のまま立坑により地上から地下へ搬入出して所定の位置へ設置することが可能である。なお、塩水リユース設備の各水槽やポンプ類などは、トラックなどの搬送機器によって所定の位置へ搬送、設置することとなる。

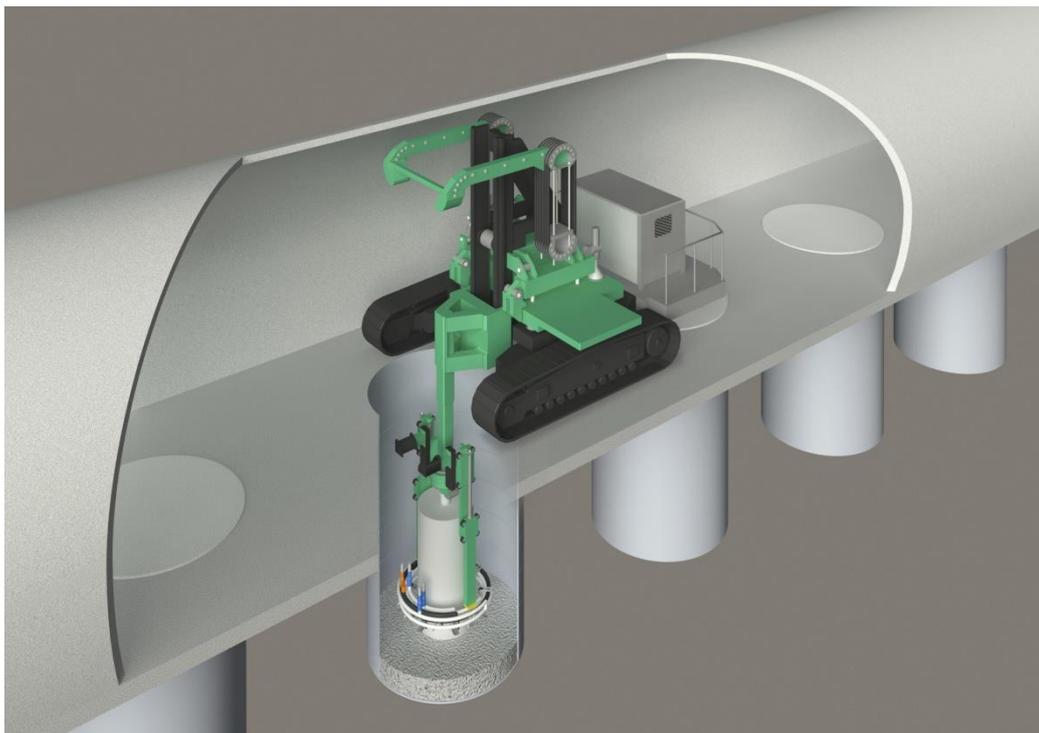


図 2.4-2 坑道内における緩衝材除去試験のイメージ

### (3) 試験設備の配置

地上より搬入出した設備は、試験エリアとなる延長 25m の処分坑道の中に、図 2.4-3 に示すように配置する。地上に比べ、塩水リユース設備の配置スペースの制約を受けることになるが、装置や水槽の配置を 2 列化することにより、緩衝材除去装置（長さ約 6m）と合わせて延長 25m の中で設備の設置が可能となる。

表 2.4-1 塩水リユース設備の必要長さ（1 列配置の場合）

装置・水槽・タンク	長辺	短辺
噴射ポンプ	2,000mm	2,000mm
吸引ポンプ	2,300mm	1,200mm
塩水供給設備	2,900mm	2,050mm
1 次分離装置	4,000mm	(2,300mm)
成分調整槽	2,150mm	1,400mm
給水用タンク	4,300mm	(2,400mm)
塩水製造設備	1,350mm	900mm
廃棄槽	2,700mm	1,850mm
余剰塩水用タンク	2,400mm	1,550mm
回収水槽	1,250mm	900mm
合計長さ	30,350mm	24,340mm

※装置・水層間の離間 500mm を考慮

吸水用タンクと 1 次分離装置は、長辺の制約により、坑道直角方向に設置することが不可能である。

表 2.4-2 塩水リユース設備の必要長さ（2 列配置の場合）

1 列目			2 列目		
装置・水槽	長辺	短辺	装置・水槽	長辺	短辺
噴射ポンプ	2,000mm	2,000mm	吸引ポンプ	2,300mm	1,200mm
塩水供給設備	2,900mm	2,050mm	回収水槽	1,250mm	900mm
余剰塩水用タンク	2,400mm	1,550mm	1 次分離装置	4,000mm	(2,300mm)
廃棄槽	2,700mm	1,850mm	成分調整槽	2,150mm	1,400mm
塩水製造設備	1,350mm	900mm	給水用タンク	4,300mm	(2,400mm)
合計長さ	14,850mm	—	合計長さ	17,000mm	—

※装置・水層間の離間 500mm を考慮

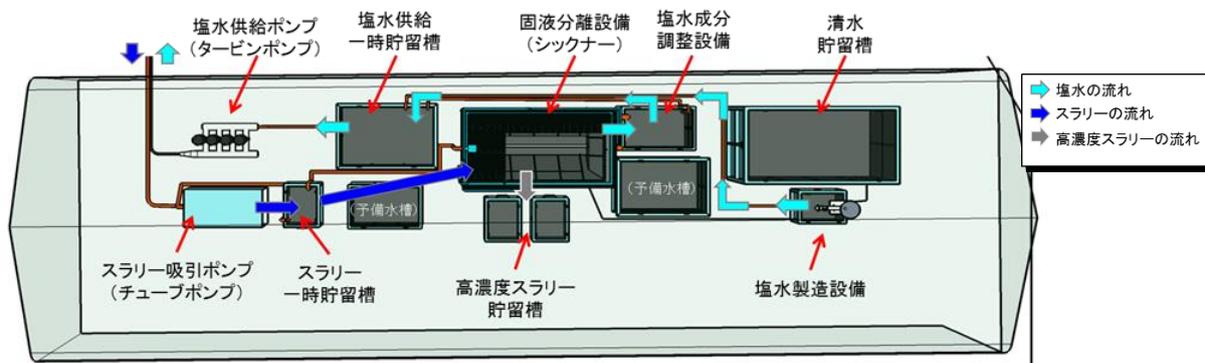


図 2.4-3 試験設備（塩水リユース設備）の配置例

(4) 試験内容

試験内容は、地上において実施した機能確認試験と同様なものとし、試験項目、試験方法などを整理した。

緩衝材除去装置に装備される各設備に求められる機能を踏まえ、実規模スケール緩衝材除去試験で取得する特性を抽出するとともにデータ取得方法を表 2.4-3 に整理した。また、試験条件を表 2.4-4 に整理した。さらに、試験手順を図 2.4-4 に整理した。

表 2.4-3 緩衝材除去により確認する機能と取得特性および取得方法

対象設備	試験により確認する機能	試験により取得する特性	特性の取得方法
塩水噴射・スラリー吸引設備	噴射機能	噴射流量	流量計
		噴射圧力	圧力計
		噴射時間 (運転時間)	時間計測
	スラリー吸引機能	吸引流量	流量計
昇降設備	噴射部・スラリー吸引設備 に対する昇降機能	噴射位置 (揚程)	ストローク記録
塩水リユース設備	塩水リユース機能 ⇒塩水の循環機能	供給流量 (塩水供給量)	流量計
		供給圧力	圧力計
		吸引流量	流量計
		吸引圧力	圧力計
	塩水リユース機能 ⇒スラリー化した緩衝材の 固液分離機能	塩水の濃度	塩分濃度計
		リユース前後の 塩水の SS 濃度 (浮遊物質濃度)	SS 濃度計
共通 (除去特性)	緩衝材除去機能	除去形状	3D スキャナーなど
		緩衝材除去量	重量計測
	廃棄体把持機能	把持力	ひずみ計

表 2.4-4 試験条件（緩衝材除去による機能確認試験）

項目	試験条件	摘要
塩水噴射条件	噴射圧力 0.6MPa±0.5% ノズル径 φ2.2mm ノズル数 下向き：16 ノズル×2 環 横向き：8 ノズル×1 環 揺動速度 1cm/sec	平成 24 年度と同等仕様
スラリー吸引条件	吸引流量 250L/min 以上 (噴射流量×1.5 倍以上)	平成 24 年度と同等仕様

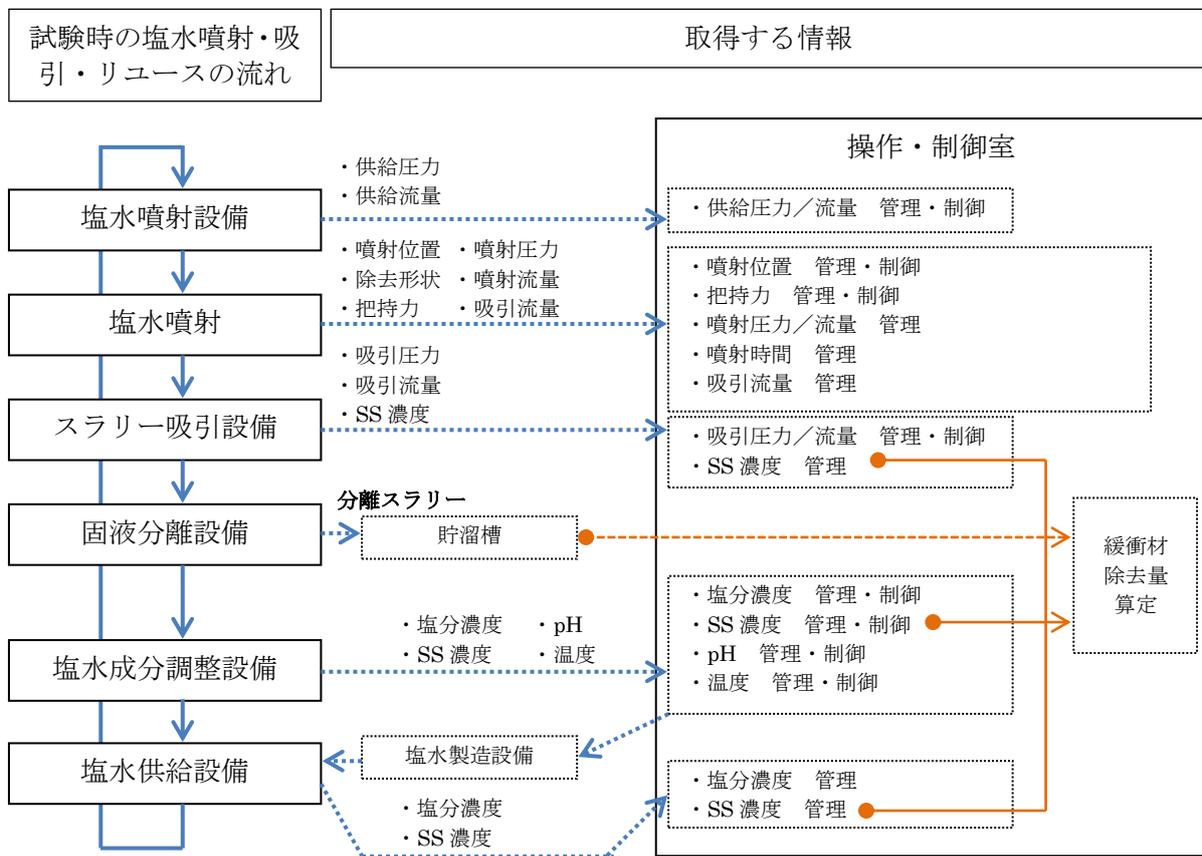


図 2.4-4 試験手順（実規模スケール試験）

(5) 試験工程

概略の試験工程を表 2.4-5 に示す。地下環境における実証試験は 4 年フェーズとして計画を立案した。

初年度には、試験施設の確認を含めた詳細計画を立案する。

2年度目は、詳細計画に基づき、翌年度からの試験に用いる模擬廃棄体や緩衝材の製作や、地下への緩衝材除去装置の搬入に向け、地上施設での最終整備作業を行う。

3年度目は、2年度目で整備された試験坑道へ装置や資機材の搬入および設置とともに、所定の動作が安全に実施可能かを確認する。

最終年度となる4年度目には、実規模スケールでの緩衝材除去試験を実施し、地下環境における緩衝材除去装置の性能を把握するとともに、回収技術としての確証を図るものである。

表 2.4-5 試験工程

実施項目	1年度目	2年度目	3年度目	4年度目
試験計画	■			
模擬廃棄体および緩衝材の準備		■		
資機材の搬入・設置			■	
緩衝材除去装置の整備		■		
緩衝材除去装置の搬入・設置			■	
実規模スケール緩衝材除去試験				■

## 2.5 まとめ

- 地下環境において実規模スケールでの緩衝材除去試験の実施には、試験実施エリアとなる試験坑道だけでなく、地上からの搬入出ルートとなる立坑や水平坑道の搬入出可能な寸法や重量などの準備もしくは作業に必要な空間が確保されていることが重要である。
- 本業務で製作してきた緩衝材除去装置は、第2次取りまとめに準拠した坑道仕様に適用することを条件としたものである。
- 本装置を用いて地下環境における実規模スケール緩衝材除去試験を実現するためには、使用する坑道を拡幅する追加的な整備が必要となる。また、試験に用いる坑道の延長についても、塩水リユースに必要となる水槽などの設置スペースの確保から、延長 25m 程度の整備が必要となる。また、塩水リユース設備について、省スペース化を目指した塩水の循環量（使用量）の見極めや、効率的なリユース方法についても開発していく必要があると考えられる。

## 第3章 緩衝材除去装置駆動設備の製作

緩衝材除去装置のうち駆動設備の製作では、駆動設備の設計・製作、遠隔操作設備の設計・製作を行った。駆動設備については、平成 23 年度及び平成 24 年度に実施した基本設計に基づき製作設計及び製作を行った。遠隔設備については、遠隔操作設備の設計フロー、設計検討、遠隔操作における各設備の要求事項について検討し、製作を行った。以下に詳細を示す。

### 3.1 駆動設備の製作

#### 3.1.1 駆動設備の製作設計及び製作

駆動設備の製作設計及び製作では、走行装置・油圧ユニットの設計及び製作を行った。

##### (1) 製作設計の対象

駆動設備の製作設計及び製作の範囲を図 3.1.1-1 に示す。

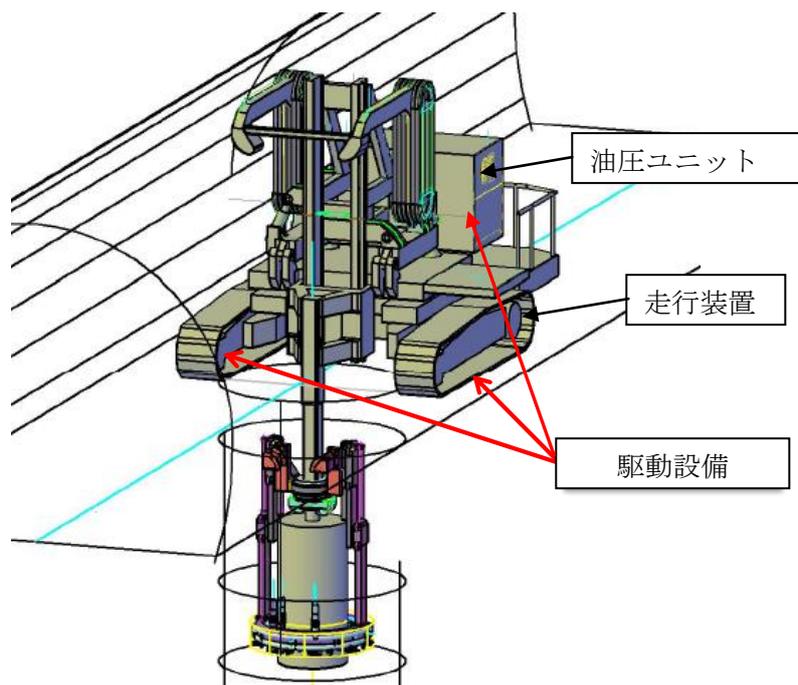


図 3.1.1-1 駆動設備の区分

## (2) 走行装置の設計及び製作

走行装置は、緩衝材除去装置の下部に設置したクローラとその支持フレームにより構成される。走行装置については、平成 23 年度に実施した基本設計において、廃棄体の回収作業段階に想定される走行路の不整地への対応等より、無限クローラ式を用いた走行方式が選定されている。また、平成 24 年本業務において走行装置の基本設計が行われた。

平成 24 年度までに検討された緩衝材除去装置の走行に関する要求性能に基づき、走行装置に対する設計条件を示すし、さらに、設計条件に対し、緩衝材除去装置全体の部材重量や機器配置の変更を考慮し、装置の安定性能と走行性能にかかわる設計と照査を行い、走行装置の仕様を決定した。

### 1) 走行装置の設計条件

走行装置にかかわる設計条件を以下にまとめる。

#### a. 前提条件

走行装置は、平成 23 年度及び平成 24 年度に製作した把持引上げ機構や噴射機構の見直しを含め、自走式とすることを基本とした。

#### b. 使用方法及び使用条件

①処分坑道内の路盤において「遠隔操作」で支障なく決められた作業位置までに自走走行することができること。

②坑道内（中心部内最大幅 5m）想定路盤において、走行により位置の移動ができること。

③坑道内における若干の不陸（凹凸）路盤でも、支障なく走行できること。

④坑道内又は坑道までの搬入路における傾斜路面を想定し斜面走行できること

⑤坑道内での旋回（スピントーン＝両側のクローラを同時に逆方向に動作）は不要とする。

基本的には、片側のクローラを動かし緩やかに旋回するピボットターン動作とする

⑥走行は狭小な坑道内であるため低速度ではあるが、万が一の時に備え「微速動作」が行えるように配慮する。

#### c. 設計条件

前提条件及び使用条件等を考慮した設計条件を表 3.1.1-1 に示す。

表 3.1.1-1 走行装置設計条件一覧

条件項目	条件値	条件設定理由
① 走行速度（最大）	1km/h	<ul style="list-style-type: none"> <li>・狭小な坑道内及び把持移動時の「荷揺れ」を考慮し、クローラクレーンの最低速度とした。</li> <li>・通常の掘削用車両系建設機械（油圧ショベル）は0～5km/h、クローラクレーンは1～1.5km/h。</li> </ul>
② 最大登坂能力（把持物無し）	直進：20度程度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・坑道内斜路を考慮し、クローラの最大登坂能力とした。</li> </ul>
③ ステアリング力	6t 把持して平坦で片側ステアリングができること	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ステアリング動作で一番条件の悪いと想定されることを考慮し、「把持移動」の動作とした。</li> </ul>
④ ブレーキ性能	斜面停止で車体保持すること	<ul style="list-style-type: none"> <li>・処分立坑内の斜路で停止した場合に「急激な落下」を考慮し、停止位置での保持が必要とした。（許容値はメーカー基準値レベル。長期の場合は滑り止めの配置）</li> </ul>
⑤ 平均接地圧	10t/m <sup>2</sup> 以下	<ul style="list-style-type: none"> <li>・坑道内の路盤は、左記条件が確保されていると推定。</li> </ul>
⑥ クローラシュー	トリプルグローサシュー	<ul style="list-style-type: none"> <li>・非舗装の土面締固め路盤を想定。若干のスリップ等も考慮してトリプルグローサシューを選定。</li> </ul>

### (3) 油圧ユニット装置の設計及び製作

平成 24 年度に実施した基本設計を踏まえ、走行装置など、油圧により動作させる全ての装置の仕様から、必要とされる油圧ユニット装置について油圧回路を含めて設計・製作を行った。

#### 1) 油圧ユニット装置の設計条件

平成 24 年度に実施した基本設計に基づき、油圧ユニット装置ならびに油圧回路の設計条件を以下に示す。

##### a. 前提条件

平成 24 年度で製作した引上げ装置及び塩水噴射装置等に加え、本年度製作する走行装置の機能を確保し、所定の動作速度を確保することを前提に動力源となる油圧ユニット装置を設計した。

##### b. 使用方法及び使用条件

- ① 処分坑道内入口に設置予定の動力制御盤から「3 相交流 400V/50Hz」の電源を供給し動作させる。
- ② 油圧ユニットは本体後部に設置するベース上に搭載する。
- ③ 1 次側ケーブルは、試験場の配置を考慮し 30m とする。
- ④ ユニットの始動停止は遠隔で実施するため、動力線と同様に 30m のケーブルとする。
- ⑤ 油圧ユニット内には各動作を遠隔操作(無線)で行えるように主油圧バルブ以外の遠隔操作バルブ等も設置する。
- ⑥ 連続運転でオーバーヒートを起さないように作動油クーラ等を設置する。
- ⑦ 形状は箱型とし、メンテナンスやサービス性を考慮する。
- ⑧ ユニットから各機器への接続性を考慮した配置とする。

##### c. 油圧ユニットの要求機能

###### ① 速度調整機能

必要な部分は速度調整（微速）及び各装置の組み合わせ動作が出来るようにする。

###### ② 噴射部揺動機能

噴射部揺動動作については、リミットスイッチを利用して電気回路と併せて反復運動させる。

###### ③ 操作系油圧回路

操作は油圧パイロット式と電気制御式の 2 通りとした。電気制御式を遠隔操作の基本として、電磁比例制御弁を無線で制御することにより油圧機器を操作する。遠隔操作装置の故障等の時には、除去装置本体の油圧操作レバーによる運転も可能とする。

###### ④ 噴射部昇降機能

噴射部昇降回路には、油圧シリンダによる伸縮回路に加えて、下降時に自重により降下可能な「フリー落下制御」が出来るようにした。

#### d. 設計条件

前提条件及び使用条件および要求機能等を表 3.1.1-2 の設計条件に示す。

表 3.1.1-2 油圧ユニット装置設計条件一覧

条件項目		設計条件	条件設定理由
①	ポンプ吐出量	最大走行速度 1km/h	・緩衝材除去動作と走行動作は同時には行わないが、必要とする動力でみると走行動作が最大必要流量となるため、走行動作に必要な流量をポンプ最大吐出量とした。
②	ポンプ形式と数	可変容量型:2ヶ 定容量型:2ヶ	・走行動作等主な回路は、負荷により流量が変化する高圧型を採用し、ノズル噴射部昇降動作は負荷も小さいことと微速なことから少量型ギヤーポンプを採用した。(油圧パイロット圧用として他にも1ヶ要)
③	バルブ関連	油圧パイロット式及び電磁弁の使用	・遠隔操作を行うために必要な制御用機器を選定。 ・低速動作となるノズル昇降動作等以外は出来るだけ比例制御方式を採用し、微操作が出来るようにする。
④	オーバーパック引上げ回路	2回路を同一レバーで動作させる	・オーバーパックの引上げは「マストの昇降」と「チャック部の昇降」の各シリンダ両方を使用することでフルストロークが確保できることとした。 ・両動作を個別のレバーで動作させると運転しにくいいため、1本のレバーで操作できるようにする。
⑤	ノズル昇降回路	A: 同上 B: フリー落下回路の設置と改善	A: ノズル昇降回路は上記と同様に2回路を1本のレバーで順次動作させる。 B: ノズル部掘削量に併せて自然落下させる回路を改善する。
⑥	油圧回路	各種安全弁	・主ポストの角度調整回路には、安全性を考慮し、チェック弁を設置する。 ・油圧回路各部には、速度調整や回路異常圧を考慮し、絞り弁及び安全弁を設置する。

#### 2) 油圧回路にかかわる製作設計

##### a. ポンプ吐出量の検討

油圧ポンプの吐出量の要求は、緩衝材除去装置の走行速度 1km/h を満たすことを条件とした。

##### b. 速度調整機能

必要な部分は速度調整（微速）及び各装置の組み合わせ動作が出来るようにした。

##### c. 噴射部揺動機能

噴射部揺動動作については、リミットスイッチを利用して電気回路と併せて反復運動させた。

##### d. 操作系油圧回路

操作は油圧パイロット式とした。また、手動操作、無線操作の切替えが出来るようにした。

##### e. 噴射部昇降機能

ノズル部昇降回路には、油圧シリンダ伸縮制御に加えて、自重により降下する「フリー

落下制御」が出来るように回路を構成した。また、所要油量が少ないことと、他の動作制御より高い精度が求められることから、サブポンプ（最大 7.5L/min）から独立して油圧を供給することとした。

### 3) 油圧ユニット装置の仕様

前述の要求性能からの設計条件および、油圧動作機器の機能及び動作設定に基づく、主な油圧ユニット装置の設計仕様を表 3.1.1-3 に示す。

表 3.1.1-3 油圧ユニットの仕様一覧

機器	仕様	適用
電動機	型式	日立 TFOXXA-KK
	出力・回転数	22kW-4P/1500min <sup>-1</sup> (50Hz)
	防爆規格	Exd II BT4
油圧ポンプ	型式（日立純正品）	PKV-2B 型 プランジャポンプ
	容量	50cc/rev
	最大吐出量（理論）	75 L/min
サブポンプ	型式（日立純正品）	ギヤーポンプ
	容量	5cc/rev
	最大吐出量（理論）	7.5 L/min
メインバルブ （ロードセンシングバルブ）	型式	DPK-T04-9P-BA 8連バルブ
	形式	全パイロット圧駆動式
	メインリリーフ設定圧	20.6MPa(210kgf/cm <sup>2</sup> )
電磁弁型式 （DC24V 用）	（ノズル昇降・揺動）	DSG-01-3C2-D24-70 x 2 ケ
	（昇降フリー）	DSG-01-2B8-D24-70
	（2速切替）	DSG-01-2B2-D24-70
油圧タンク	型式	加圧式
	定格容量	200L
作動油クーラ	型式	カムイ AOA-108A 用 0A500
	熱交換容量	7000kcal/h(8kW) 75L/minΔ30℃時
冷却ファン	型式	日立 耐圧防爆型換気扇
	形式	PNXX-304-005SH
	モーター出力	AC100V 単相 30W
	風量	1,020m <sup>3</sup> /h
総重量	（作動油有り）	約 1,550kg

### 3.1.2 平成 25 年度に実施した改善

平成 24 年度に実施した緩衝材除去装置に対する動作確認試験結果を踏まえ、装置の一部について改修を行った。以下に、改修を行った塩水ホース巻取り装置及び手動操作運転席について示す。

#### (1) 塩水ホース巻取り装置の改修

塩水ホース巻取り装置の、塩水供給側ホース巻取り方式、スラリー吸引側巻取り装置及びスラリー側ホース本数について改修を行った。

##### ①塩水供給側ホース巻取り方式について

塩水供給側のホース（下向き 2 系統、横向き 1 系統、計 3 系統）の巻取り方式について、重鎮方式よりホースリール方式に変更した。変更理由は、塩水を含んだホース（自重が重い）を巻取ることができ、かつ塩水噴射部において油圧シリンダからの伸長力がなくても自重で降下する事が出来るため。

##### ②スラリー吸引側ホース巻取り装置について

平成 24 年度に用いた重鎮方式を継続するが、摩擦力を減らすために細部の見直しを実施した。具体的には、ホースと装置側フレームとの摩擦力を減らすために、ホースの滑動を補助する素材を採用し、さらにホースとフレーム間のクリアランスを拡大した。

##### ③スラリー吸引側ホース本数について

平成 24 年度のスラリー吸引側のホースは 1 本（口径 40A）であったが、スラリー吸引力の向上、吸引ノズル部の閉塞等のトラブル発生を配慮し、2 本（口径 40A）に増設した。

#### (2) 手動操作運転席の改修

緩衝材除去装置は、地下環境での基本的な操作は遠隔作業を想定している。しかし、遠隔操作機器のトラブル等により、遠隔での操作が行えなくなった場合（故障時）の事を想定して、装置本体側からも操作することが可能な手動操作運転席を設けているが、本年度において実施した油圧系統の設計及び遠隔操作設備の設計との整合性を図るため、以下に示す改修を行った。

##### ①手動操作運転席について

運転席の用途は、故障時の対応策であるため、長時間の継続運転の必要性はないとの考えから、安全性を配慮しつつコンパクトな手動操作盤として見直しを行い、手動操作盤を緩衝材除去装置の全幅内に収めることとした。

### 3.1.3 駆動設備の製作状況

駆動設備の製作状況を図 3.1.3-1~図 3.1.3-21 に示す。



図 3.1.3-1 【走行部】トラックフレームセンター部製作状況



図 3.1.3-2 【走行部】トラックフレームサイド部製作状況



図 3.1.3-3 【走行部】駆動部部品アイドラーホイール他



図 3.1.3-4 【走行部】駆動部部品スプロケットホイール他



図 3.1.3-5 【走行部】組立完了 1



図 3.1.3-6 【走行部】組立完了 2



図 3.1.3-7 【油圧ユニット部】外部フレーム製作状況



図 3.1.3-8 【油圧ユニット部】油圧ユニット構成部材電動モーター



図 3.1.3-9 【油圧ユニット部】油圧ユニット構成部材作動油フィルター



図 3.1.3-10 【油圧ユニット部】 油圧ユニット構成部材電磁バルブ

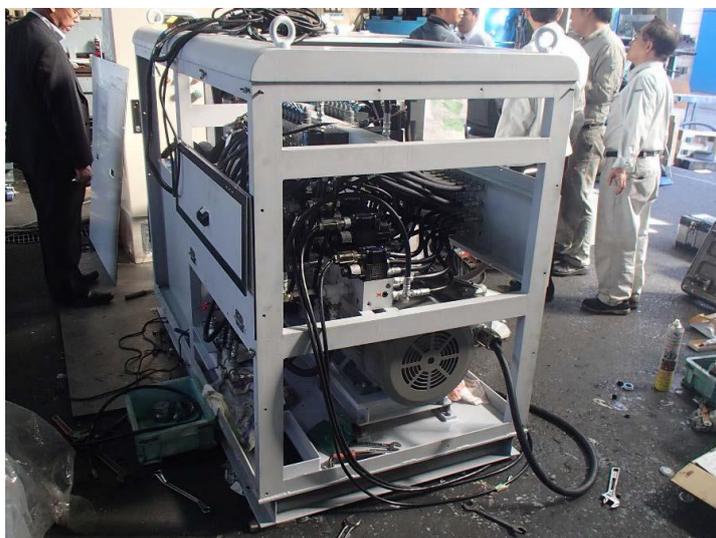


図 3.1.3-11 【油圧ユニット部】 組立状況

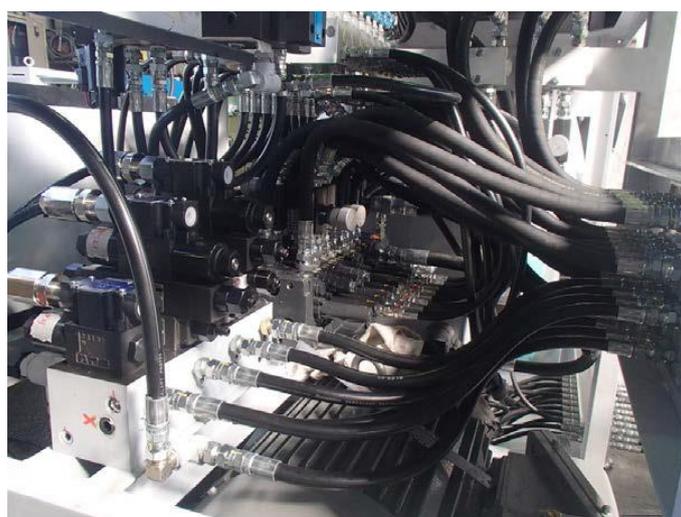


図 3.1.3-12 【油圧ユニット部】 内部配管・配線設置状況



図 3.1.3-13 【油圧ユニット部】 作動油タンクおよび油温計設置状況



図 3.1.3-14 【油圧ユニット部】 作動試験状況 1

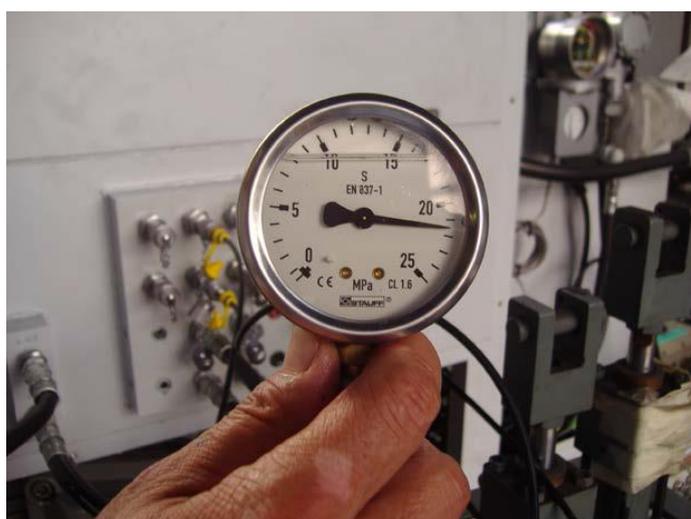


図 3.1.3-15 【油圧ユニット部】 作動試験状況 2



図 3.1.3-16 【駆動設備全体】 油圧ユニットフレーム製作状況



図 3.1.3-17 【駆動設備全体】 油圧ユニットフレーム組立状況 1



図 3.1.3-18 【駆動設備全体】 油圧ユニットフレーム組立状況 2



図 3.1.3-19 【駆動設備全体】油圧ユニット組立状況



図 3.1.3-20 【駆動設備全体】油圧ユニット組立状況（配管完了）



図 3.1.3-21 【駆動設備全体】油圧ユニット組立状況（配線完了）

### 3.2 遠隔操作設備の設計及び製作

遠隔操作設備の設計及び製作では、遠隔操作設備の設計フローを作成し、遠隔設備の設計検討、遠隔操作における各設備の要求事項等について検討し、製作を行った。以下に詳細を示す。

なお、遠隔操作に関する各設備（駆動設備、昇降設備、塩水噴射・スラリー吸引設備、塩水リユース設備、統合システム）の設計・製作については、別紙に取りまとめた。

#### 3.2.1 遠隔操作設備の設計フロー

遠隔操作の対象設備は、駆動設備、昇降設備、塩水噴射・スラリー吸引設備、塩水リユース設備であり、その遠隔操作内容を以下に示す。

- ・ 駆動設備による回収対象となる処分孔までの坑道内の移動
- ・ 駆動設備および昇降設備による処分孔における噴射・吸引設備の位置出し
- ・ 昇降設備による塩水噴射・吸引設備の昇降
- ・ 水噴射・スラリー吸引設備による塩水の噴射とスラリー化した緩衝材の吸引
- ・ 塩水リユース設備によるスラリーの固液分離と塩水の調整と循環
- ・ 塩昇降設備（把持機能）によるオーバーパックの把持

図 3.2.1-1 に遠隔操作設備の設計フローを示す。

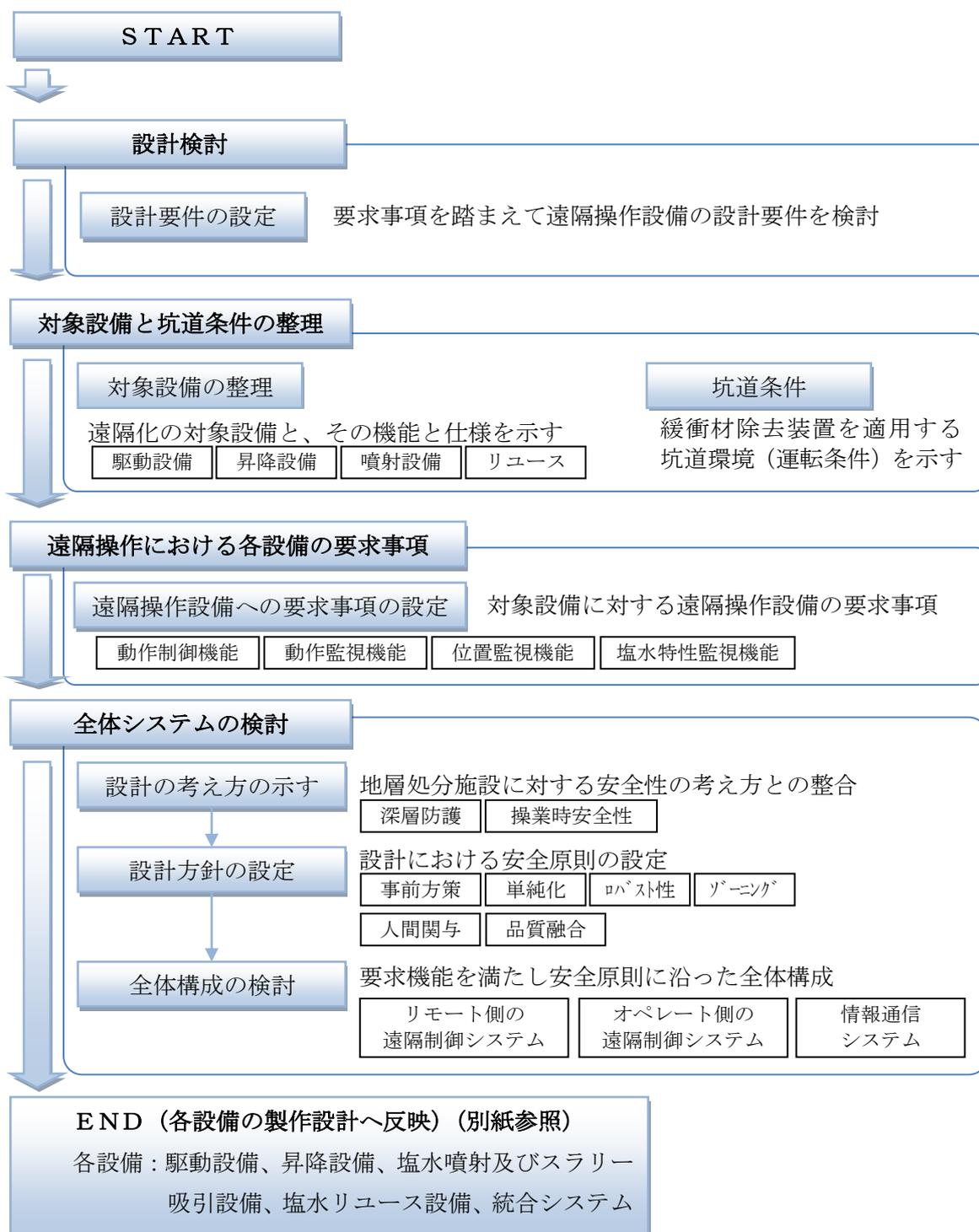


図 3.2.1-1 遠隔操作設備の設計フロー

### 3.2.2 遠隔操作設備の設計検討

緩衝材除去装置の遠隔操作設備の設計検討では、設計要件、対象設備と坑道条件について検討を行った。以下に詳細を示す。

#### (1) 遠隔操作設備の設計要件

安全かつ効率的な作業を実現させるために、遠隔操作設備には次の2要件が求められると考えられる。

駆動設備などが備える機能を用いた動作が安全に離れた距離で実施できること（以下、遠隔制御性と称す）。常に安全な動作が担保されていることを離れた距離において把握できること（遠隔監視性と称す）である。

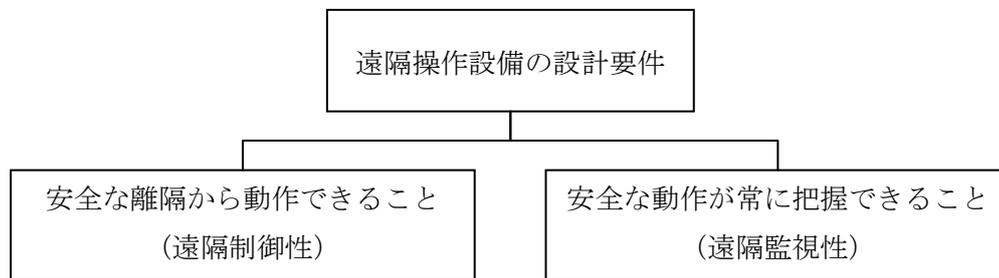


図 3.2.2-1 遠隔操作設備の設計要件

#### (2) 対象設備と坑道条件

##### 1) 対象設備と仕様

平成 24 年度および本年度の設計・製作により整備されている、緩衝材除去装置のうち駆動設備、昇降設備、塩水噴射・スラリー吸引設備、塩水リユース設備の仕様を以下に示す。

##### a. 駆動設備

駆動設備は、塩水噴射・スラリー吸引設備と昇降設備を回収対象となる処分孔へ移動させる機能を有する設備である。駆動設備に装備する機能とその仕様を表 3.2.2-1、設備の構成を図 3.2.2-2 に示す。

表 3.2.2-1 駆動設備の機能と仕様

設備名称	設備が装備する機能	仕様
駆動設備	走行機能	1.0km/hr 以上
		任意に速度調整ができる
	方向変換機能	オーバerpックを把持して方向変換が可能なこと
	登板機能	斜面角度 20 度
	制動機能	50mm/5min 以内

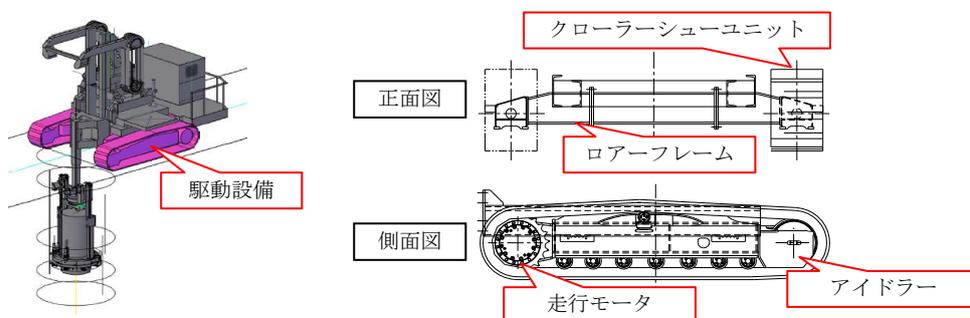


図 3.2.2-2 駆動設備の構成

b. 昇降設備

昇降設備は、塩水噴射・スラリー吸引設備を処分孔内へ昇降させる設備である。また、位置調整機能や緩衝材除去に伴うオーバーパック転倒防止の把持機能も合わせもつ設備である。昇降設備に装備する機能と仕様を表 3.2.2-2、設備の構成を図 3.2.2-3 に示す。

表 3.2.2-2 昇降設備の仕様と能力

設備名称	設備が装備する機能	仕様
昇降設備	位置調整機能	前後スライド機能 前後フルストローク量 600mm (±11mm)
		左右スライド機能 左右フルストローク量 200mm (±7.2mm)
		マスト前後左右傾斜機能 5度 (+1,-0.5度)
	把持部昇降機能	把持部フルストローク量 3,600mm (+36,-10mm)
		把持部最上部高さ GL+2,030 (±28mm)
		把持部最下部深さ GL-1,570 (+19.5,-10mm)
		引上げ力
	噴射部昇降機能	噴射部昇降フルストローク量 (1段目) 725mm (2段目) 925mm 全体で 1,650±23mm
		昇降速度 1,650mm を 120 秒以内
		昇降力 400kg 以上
		噴射部昇降時にホース巻取りが可能であること

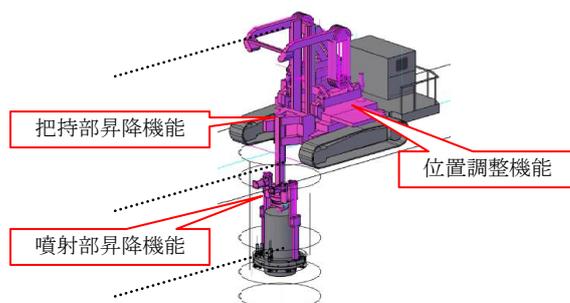


図 3.2.2-3 昇降設備の構成

c. 塩水噴射・スラリー吸引設備

塩水噴射・スラリー吸引設備は、緩衝材を除去するために塩水を噴射し、スラリー化した緩衝材を処分孔から吸引除去する機能をもつ設備である。塩水噴射・スラリー吸引設備に装備する機能と仕様を表 3.2.2-3、設備の構成を図 3.2.2-4 に示す。

表 3.2.2-3 塩水噴射・スラリー吸引設備の機能と仕様

設備名称	設備に装備する機能	仕様
塩水噴射・スラリー吸引設備	塩水噴射機能	噴射圧力 1MPa を満たすこと
		噴射量 ・ 下向き 16 ノズル×2 環 合計 250L/min 以上 ・ 横向き 8 ノズル×1 環 合計 125L/min 以上
	スラリー吸引機能	吸引量 250L/min 以上
噴射部揺動機能	噴射部揺動機能	揺動角度 左右 45±2 度
		揺動速度 周速度 0.6m/min で安定した速度が維持できること

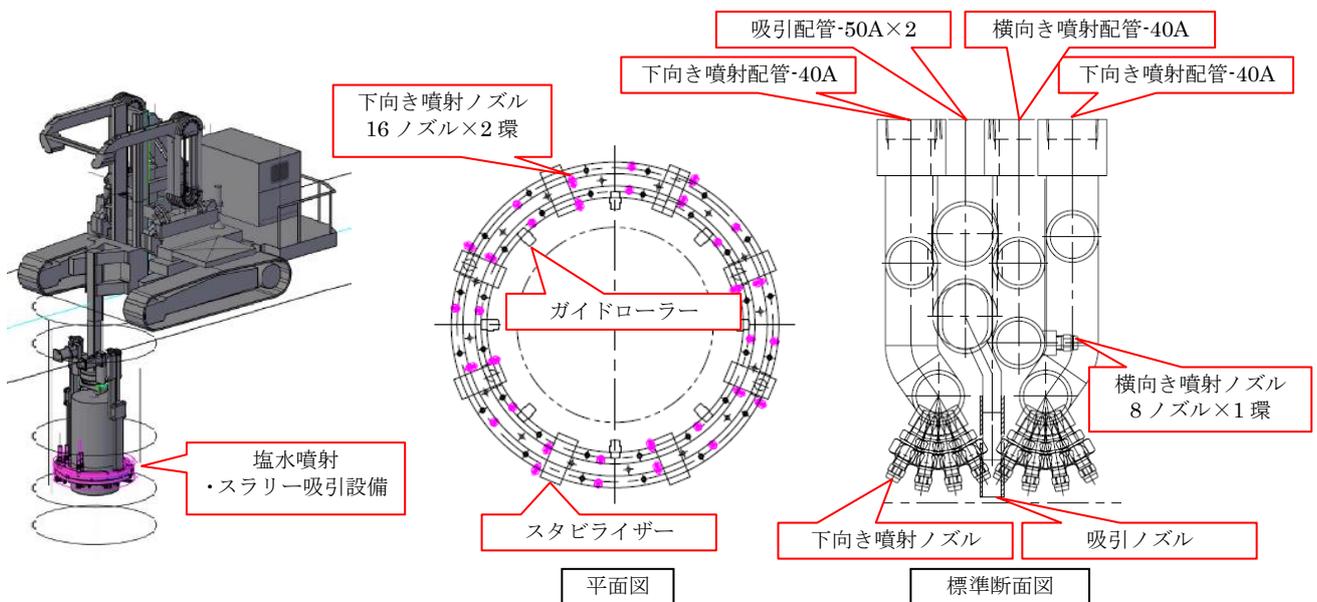


図 3.2.2-4 塩水噴射・スラリー吸引設備の構成

d. 塩水リユース設備

塩水リユース設備は、塩水噴射・スラリー吸引設備により処分孔より除去された緩衝材スラリー固液分離し、緩衝材除去に用いるリユースする塩水として調整を図る機能をもつ設備である。塩水リユース設備に装備する機能と仕様を表 3.2.2-4、設備の構成を図 3.2.2-5 に示す。

表 3.2.2-4 塩水リユース設備の機能と仕様

設備名称	設備が装備する機能	仕様
固液分離設備	固液分離機能	処理流量 15m <sup>3</sup> /hr 以上
		処理塩水の SS 濃度 5,000mg/L 未満

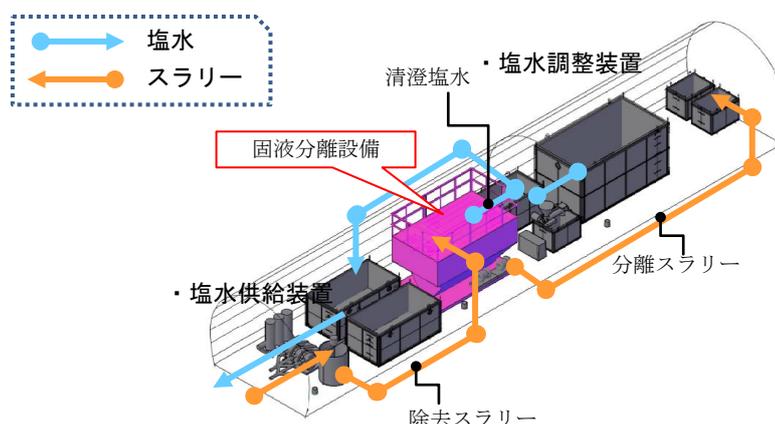


図 3.2.2-5 塩水リユース設備の構成

2) 坑道条件

第 2 次取りまとめにおける軟岩系岩盤での処分孔縦置き方式の概念を図 3.2.2-6 に示した。この処分概念例では、廃棄体は処分坑道の底盤に沿って、連続的に構築された処分孔に埋設処分されている。コンクリート支保やインバート構造物が撤去されていない条件で、処分坑道が埋戻し材にて埋設されているものである。

実規模回収実証試験では、これら処分孔を図 3.2.2-7 の断面寸法において模擬的に構築し、廃棄体は緩衝材で埋設されていること、処分坑道は廃棄体回収の前工程である埋戻し材の撤去は完了されていること、処分坑道は給排水・換気整備条件が完了していること、として表 3.2.2-5 に示すとおり処分坑道の条件を設定した。

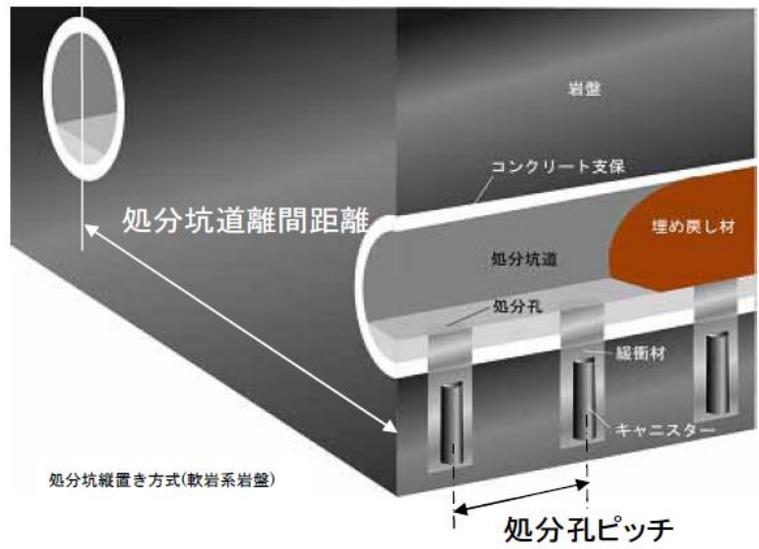


図 3.2.2-6 廃棄体埋設処分設計例

緩衝材除去装置が動作するのは、処分坑道と処分孔が主な坑道となる。

表 3.2.2-5 処分坑道の条件

項目	特性	設定する坑道条件	摘要
空間特性	形状寸法	図 3.2.2-7 に図示	第2次取りまとめ堆積岩系
大気特性	温度	45℃	3℃/100m 上昇と考え、深度 500m と設定
	湿度	100%	地下水環境下でほぼ飽和していると想定
湧水特性	湧水量	有り	
施工特性	不陸	有り	

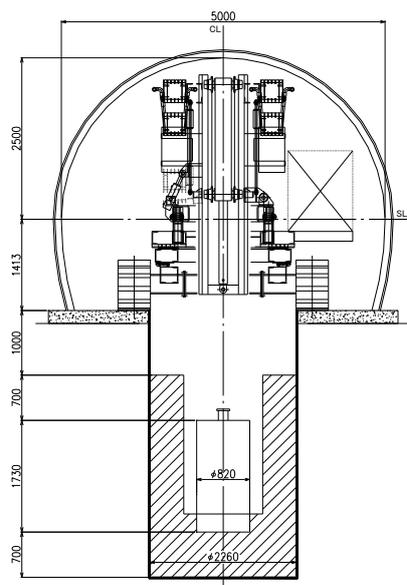


図 3.2.2-7 処分坑道と処分孔の寸法

### 3.2.3 遠隔操作における各設備の要求事項

緩衝材除去装置を構成する各設備側から遠隔操作設備への要求事項を検討した。

#### (1) 駆動設備側からの要求事項

駆動設備が備える機能に対し、前項で設定した遠隔操作設備の設計に基づき要求事項を検討した。

設計のうち、遠隔制御性に対する要求事項は、駆動設備の動作自体にかかわる動力制御機能が挙げられる。これは、駆動設備が装備する走行機能や制動機能などの動作を安全な場所（遠隔操作室）から制御するために必要となる機能である。

遠隔監視性に対する要求事項は、装置自体の状態を常に把握するために必要となるものであり、動作の正常な運転状態を把握するための機能（動作監視機能）とともに、ブラインドとなる坑道内での装置の位置を把握するための機能（位置監視機能）が必要と考えられる。動作監視機能については、異常状態に陥っていないことを常に把握しておくためにも大切な機能であると考えられる。また、位置把握機能については、狭隘かつ直視することができない坑道内において、装置の位置を的確に把握し、回収対象となる処分孔の位置への移動を正確にするために必要となる機能である。

表 3.2.3-1 駆動設備に対する遠隔操作設備の要求事項

対象設備名	設計要件	遠隔操作設備が 装備する機能	機能の説明	装置等
駆動設備	遠隔制御性	動力制御機能	駆動設備による動作が遠隔操作室で制御できること	走行機能
				方向変換機能
				登板機能
				制動機能
遠隔監視性	動作監視機能	駆動設備による動作が遠隔操作室で監視できること	撮像装置	
			位置監視機能	駆動装置の位置が遠隔操作室で監視できること

## (2) 昇降設備側からの要求事項

昇降設備が備える機能に対し、前項で設定した遠隔操作設備の設計に基づき要求事項を検討した。

設計のうち、遠隔制御性に対する要求事項は、昇降設備の動作自体にかかわる動作制御機能が挙げられる。これは、昇降設備が装備する位置調整、把持部・噴射部昇降などの機能を安全な場所（遠隔操作室）から制御するために必要となる機能である。

遠隔監視性に対する要求機能は、装置自体の状態を常に把握するために必要となるものであり、正常な運転状態を把握するための機能（動作監視機能）とともに、把持位置を的確に把握するための機能（位置監視機能）が必要となる機能である。

表 3.2.3-2 昇降設備に対する遠隔操作設備の要求事項

対象設備名	設計要件	遠隔操作設備が 装備する機能	機能の説明	装置等
昇降設備	遠隔制御性	動作制御機能 (位置調整機能)	位置調整動作が遠隔操作室で制御できること  把持部をオーバーパックの中心位置に遠隔操作室でセットできること（前後、左右、傾斜）	油圧シリンダ (ストロークセンサー内蔵型)
		動作制御機能 (把持部昇降機能)	把持部の昇降動作が遠隔操作室で制御できること	油圧シリンダ リニアエンコーダ
		動作制御機能 (噴射部昇降機能)	噴射部の昇降動作が遠隔操作室で制御できること	油圧シリンダ リニアエンコーダ
	遠隔監視性	動作監視機能	位置調整動作、把持部および昇降部の動作が遠隔操作室で監視できること	動作状況計測装置
		位置監視機能	廃棄体把持位置が遠隔操作室で監視できること	位置計測装置

## (3) 塩水噴射・スラリー吸引設備側からの要求事項

塩水噴射・スラリー駆動設備が備える機能に対し、遠隔操作設備の設計に基づき要求事項を検討した。

設計のうち、遠隔制御性に対する要求事項は、塩水噴射・スラリー吸引設備の動作自体にかかわる塩水噴射、スラリー吸引、噴射部揺動に対する動作制御機能が挙げられる。これは、塩水噴射・スラリー吸引設備が装備する塩水噴射や揺動などの機能を安全な場所（遠隔操作室）から制御するために必要となる機能である。

遠隔監視性に対する要求機能は、装置自体の状態を常に把握するために必要となるものであり、

正常な運転状態を常に把握するための機能（動作監視機能）が挙げられる。

表 3.2.3-3 塩水噴射・スラリー吸引設備に対する遠隔操作設備の要求事項

設備名称	設計要件	遠隔操作設備が 装備する機能	機能の説明	装置等
塩水噴射・ スラリー吸 引設備	遠隔制御性	動作制御機能 (噴射制御機能)	噴射ポンプを遠隔操作室 で制御できること	電源制御装置
		動作制御機能 (吸引制御機能)	スラリー吸引ポンプを遠 隔操作室で制御できるこ と	電源制御装置
		動作制御機能 (揺動制御機能)	噴射部揺動動作が遠隔操 作室で制御できること	ロータリアクチュ エータ
	遠隔監視性	動作監視機能	塩水噴射・スラリー吸引設 備の動作緩衝材形状がが 遠隔操作室で監視できる こと	流量計 圧力計 形状測定装置

#### (4) 塩水リユース設備側からの要求事項

塩水リユース設備が備える機能に対し、前項で設定した遠隔操作設備の設計に基づき要求事項を検討した。

設計のうち、遠隔制御性に対する要求事項として、塩水リユース設備の動作自体にかかわる動力制御機能が挙げられる。これは、塩水リユース設備が装備する固液分離するための機能（装置）を遠隔操作室などの安全な場所から制御するために必要となる機能である。なおリユース対象となる塩水の制御においては、塩水噴射スラリー吸引設備による制御に追従する。

遠隔監視性に対する要求機能は、装置の機能により得られる塩水特性の状態を常に把握するために必要となるものであり、正常な運転状態を常に把握するために必要な機能（塩水特性監視機能）が挙げられる。

表 3.2.3-4 塩水リユース設備に対する遠隔操作設備の要求事項

設備名称	設計要件	遠隔操作設備が 装備する機能	機能の説明	装置等
固液分離設備	遠隔制御性	動作制御機能 (塩水供給制御機能)	塩水供給動作が遠隔操作室で制御すること	塩水製造装置
	遠隔監視性	動作監視機能	塩水リユース設備の動作が遠隔操作室で監視できること	撮像装置
		塩水特性監視機能	固液分離前後のSS濃度、塩分濃度が遠隔操作室で監視できること	SS計 塩分濃度計 pH計

(5) 全体システム構成

遠隔操作設備を構成する個別システムに対する設計条件を踏まえ、全体システムを組み立てる。遠隔操作設備の構成であるリモート側の制御システム、情報通信システム、オペレート側の制御システムについては、各設備側からの要求事項を満たす構成とした。仕様および全体システム構成を図 3.2.3-1 に示す。

また、電気システムの全体構成を図 3.2.3-2 に示すとともに、遠隔操作システムの全体構成を図 3.2.3-3 に示す。

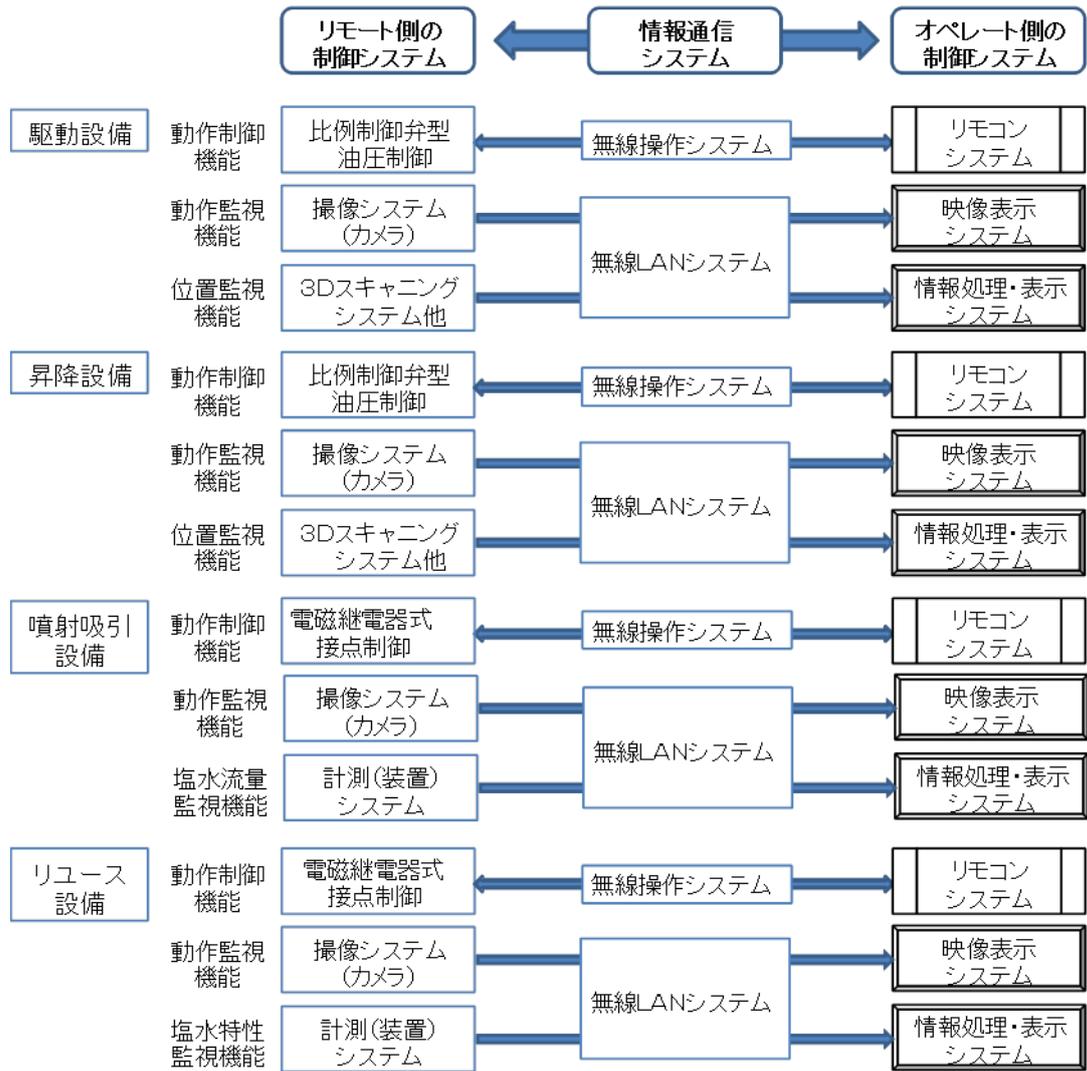


図 3.2.3-1 遠隔操作設備における全体システム構成

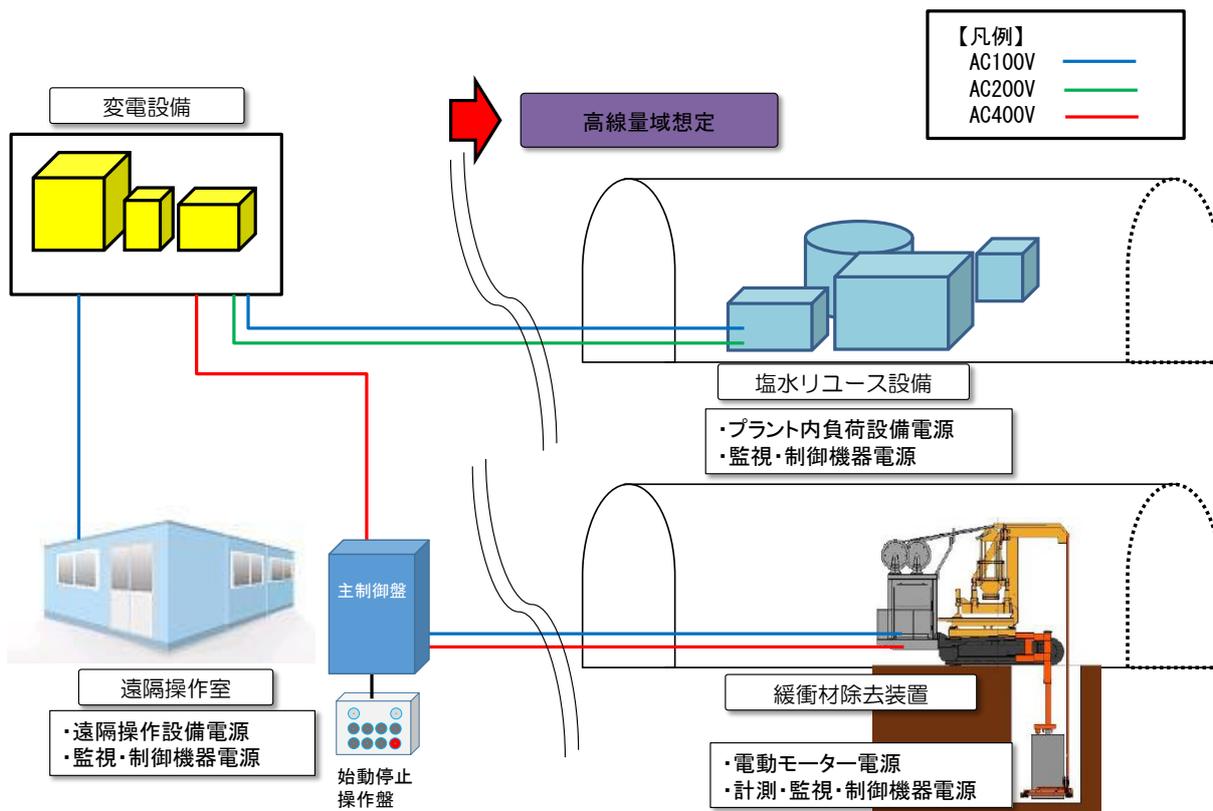


図 3.2.3-2 電気システム構成図

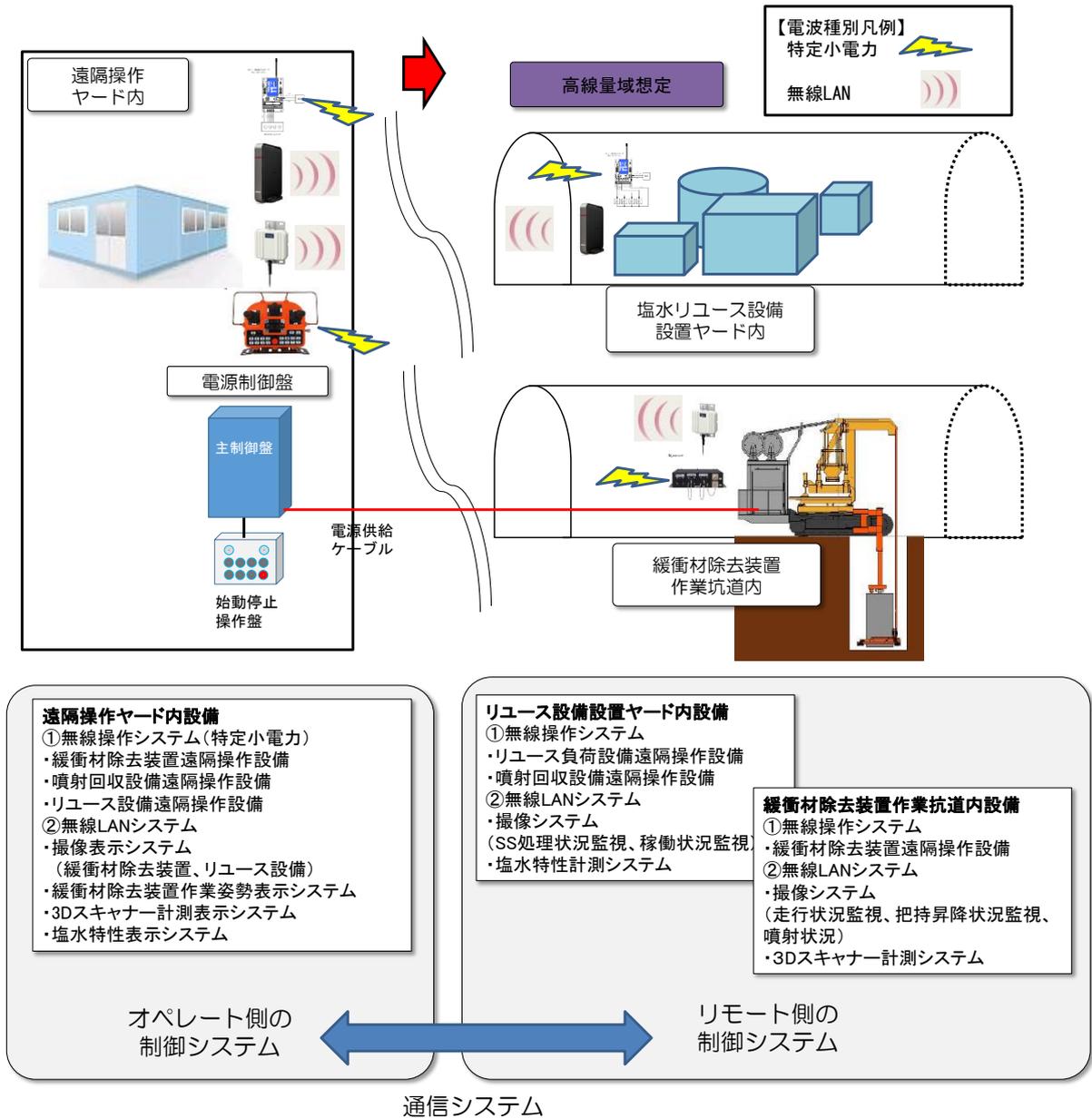


図 3.2.3-3 無線遠隔操作システム構成図

## (6) 3Dスキャニングシステム

3Dスキャニングシステムを全体システムでの、駆動設備、昇降設備等に対する遠隔操作設備の位置監視機能を行うために設計・製作した。ここでは、同システムを導入した設計を進めていくにあたり、作動試験を含めた検討により3Dスキャニングシステムの設計に必要な監視性能（測定精度）にかかわる情報を取得するものとした。

今回、3Dスキャニングシステムの核となるセンサーとしてXtionを採用した。本センサーは近年ロボットや画像処理分野で注目を集めているKinectと同種のPrimeSense社のセンサーを搭載した距離カメラ（Depth Camera）装置である。

Xtionの最大の特徴は、奥行き情報を持った映像情報の取得にある。この情報は一般に点群と呼ばれる形状情報として取得される。Xtionはこの点群情報をRGB色情報と共にリアルタイム（最大60fps）で取得可能なため、観測対象の状態（3次元形状）を遅延なくモニター上に表示することが可能である。



図 3.2.3-4 Kinect (Microsoft 社製)



図 3.2.3-5 Xtion (Asus 社製)

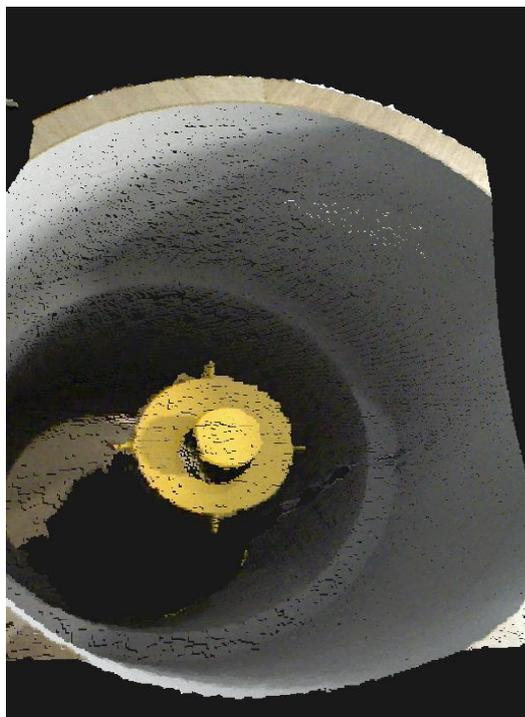


図 3.2.3-6 取得点群の例

表 3.2.3-5 XtionProLive 性能諸元

消費電力	2.5W USB 給電
観測範囲	0.5m ~ 3.5m
観測角度	58° H, 45° V, 70° D (水平, 垂直, 対角)
センサー特徴	距離
距離画像サイズ	VGA (640x480) : 30fps QVGA (320x240) : 60fps
プラットフォームハードウェア	Intel X86 & AMD
サポート OS	Win 32/64:XP/Vista/7 Linux Ubuntu 10.10:X86, 32/64bit Android(by request)
インターフェース	USB2.0
開発ソフト	software development kit (OPEN NI SDK bundled) PCL (Point Cloud Library)
開発言語	C++/C# (Windows) C++(Linux) JAVA
利用環境	屋内 (但し直射日光下は不可)
大きさ 重量	18 x 3.5 x 5 cm 約 500 g

### 3.3 まとめ

緩衝材除去装置駆動設備の製作では、駆動設備のうち走行装置、油圧ユニット装置及び遠隔操作設備に関して設計及び製作を行った。

- ・ 走行装置及び油圧ユニットは、平成 24 年度に実施した基本設計を基に、油圧ユニット、架台及び走行（クローラー）部の設計、製作、動作確認を行った。また、設計・製作にあたっては、他の設備の取り合い（油圧配管、電気配線等）と整合を図った。
- ・ また、平成 24 年度に検討された緩衝材除去装置の走行に関する要求性能に基づき、走行装置に対する設計条件を整理した。さらに緩衝材除去装置の部材重量や機器配置を考慮し、装置の安定性能と走行性能にかかわる設計照査を行い、走行装置の仕様を決定し、製作を行った。油圧ユニット装置については、油圧により動作させる緩衝材除去装置の全ての設備に求められる性能から、油圧回路を含めて設計し、製作を行った。
- ・ 遠隔操作設備は平成 24 年度に実施した基本設計を基に、設計、製作及び動作確認を行った。遠隔設備は緩衝材除去装置のうち駆動設備、昇降設備、塩水噴射・スラリー吸引設備、塩水リユース設備の遠隔操作を行うものであり、以下の作業が遠隔操作により実施できるものとして製作を行った。
  - 駆動設備による回収対象となる処分孔までの坑道内の移動
  - 駆動設備および昇降設備による処分孔における噴射・吸引設備の位置出し
  - 塩水噴射・吸引設備による塩水の噴射とスラリー化した緩衝材の吸引
  - 昇降設備による塩水噴射・吸引設備の昇降
  - リユース設備によるスラリーの固液分離と塩水の調整と循環
  - 昇降設備（把持機能）によるオーバーパックの把持
- ・ 平成 25 年度の設計・製作では、これらの作業を安全に実施していくための要求事項を示すことにより遠隔操作の内容を明確にし、遠隔操作設備に対する設計要件を設定した。また、遠隔操作による緩衝材除去装置の動作を安全なものとするために、遠隔操作設備の全体を統括するシステムと構成を検討し、遠隔操作設備の製作を行った。

なお、緩衝材除去装置の各設備における遠隔操作設備の設計・製作に関する詳細は別紙に取りまとめた。

## 第4章 緩衝材除去装置の組立・調整

平成 24 年度までに製作された緩衝材除去装置の一部と平成 25 年度に製作した設備について、緩衝材除去装置全体の組立・調整を実施した。以下に組立・調整の対象設備、組立・調整及び保管状況、緩衝材除去装置の動作確認について示す。

### 4.1 組立・調整の対象設備

緩衝材除去装置全体として、組立・調整を行なった設備は以下のとおりである。

- ・ 駆動設備
- ・ 昇降設備
- ・ 塩水噴射・スラリー吸引設備
- ・ 塩水リユース設備
- ・ 遠隔操作設備

### 4.2 組立及び調整

緩衝材除去装置全体の組立・調整として以下の内容を実施した。

- ・ 緩衝材除去装置の塗装
- ・ 緩衝材除去装置各設備の構成
- ・ 緩衝材除去装置の組立

#### 4.2.1 緩衝材除去装置の塗装

緩衝材除去装置の塗装色については、緩衝材除去装置のうち本体部の塗装は、図 4.2.1-1 に示す緑色系（塗装色 G45-50T：日本ペイント（株））とした。ただし、油圧ユニットや電源部などについては、他の部位との識別を考慮して灰色系とした。また、キャタピラ部については、試験および走行中の土砂などの汚れを考慮し、黒色系とした。なお、塩水リユース設備については、平成 24 年度において水色系の防食を兼ねた塗装が施されている。

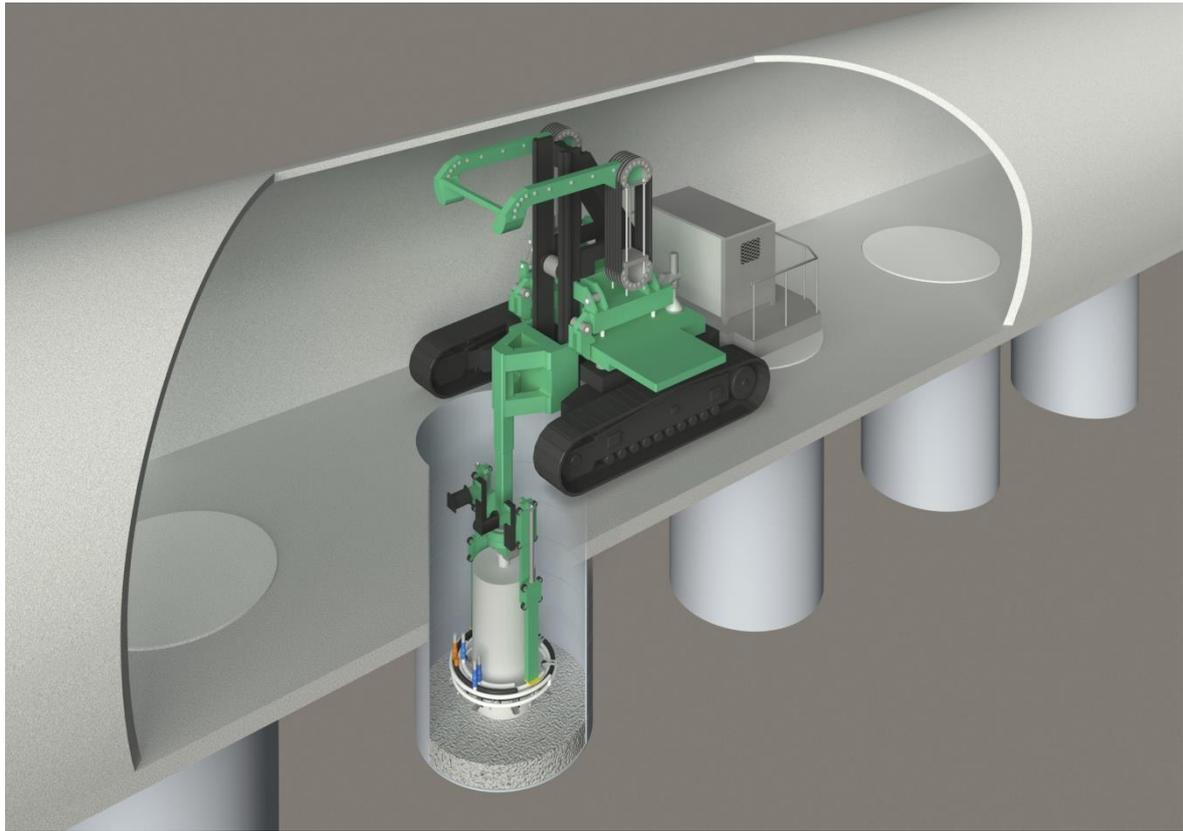


图 4.2.1-1 装置配色案 (綠色系)

#### 4.2.2 緩衝材除去装置各設備の構成

緩衝材除去装置の組立・調整を行なう各設備の構成とその仕様を表 4.2.2-1 に示す。また、現状の状況を図 4.2.2-1 から図 4.2.2-4 に示す。

表 4.2.2-1 構成する設備の一覧

構成する設備	仕様
塩水噴射 スラリー吸引設備 (図 4.2.2-1)	外寸：約 1540φ×h540mm 重量：約 0.2t
昇降設備 (図 4.2.2-2)	外寸：約 W:1,900mm×L:3,450mm×h:2,700mm 重量：約 3.8t
駆動設備 (図 4.2.2-3)	外寸：約 W:3,250mm×L:5,200mm×h:3,290mm 重量：約 10.5t
塩水リユース設備 (図 4.2.2-4)	塩水供給設備 ・塩水貯留槽 5m <sup>3</sup> ・超音波流量計、塩濃度計ほか 緩衝材回収設備 ・攪拌水槽 5m <sup>3</sup> ・超音波流量計、水中攪拌機ほか 固液分離設備 ・シックナー 20m <sup>3</sup> ・制御盤ほか 成分調整設備 ・調整水槽 5m <sup>3</sup> ・自動計測機器、攪拌翼ほか 緊急貯留設備 ・緊急貯留槽 5m <sup>3</sup> 塩水製造設備 ・純塩水溶解槽 1m <sup>3</sup> ・製造用清水貯留槽 20m <sup>3</sup> ・計量定量投入機 20kg/min その他 ・補助水槽、ポンプなど
遠隔操作設備	カメラ、3D スキャナー ：上記設備に取り付け済み パソコン



図 4.2.2-1 塩水噴射・スラリー吸引設備の状況



図 4.2.2-2 昇降設備の状況



図 4.2.2-3 駆動設備の状況



図 4.2.2-4 塩水リユース設備の状況

### 4.2.3 緩衝材除去装置の組立

緩衝材除去装置を構成する塩水噴射・スラリー吸引設備、昇降設備、駆動設備の組立を図 4.2.3-1 に示す手順で実施した。組立の状況を図 4.2.3-2 から図 4.2.3-8 に示す。

なお組立後の調整は、4.3 節に示す緩衝材除去装置の動作確認時に実施した。

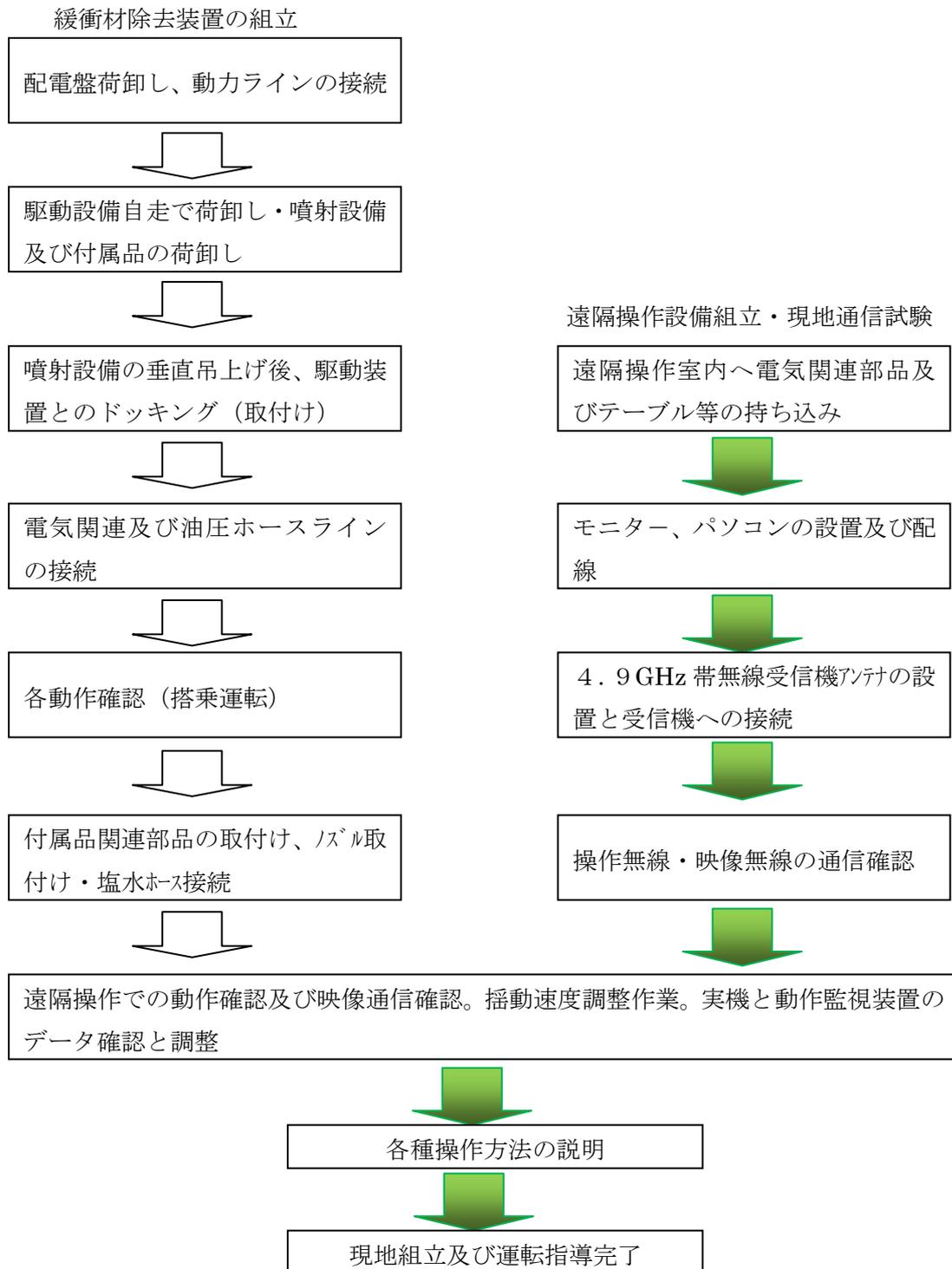




図 4.2.3-2 油圧ユニット組立状況（製作工場にて実施）



図 4.2.3-3 昇降設備組立状況 1



図 4.2.3-4 昇降装置組立状況 2



図 4.2.3-5 塩水噴射部組立状況



图 4.2.3-6 組立完了 (正面)



图 4.2.3-7 組立完了 (裏面)

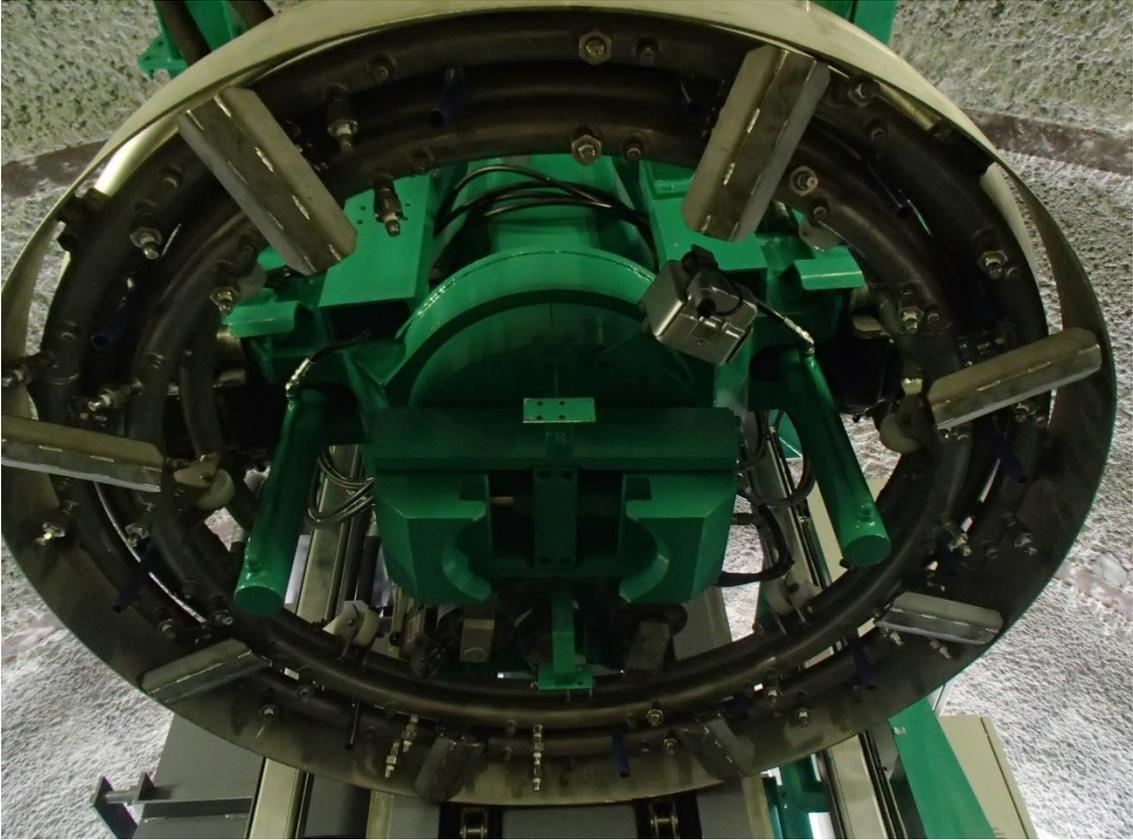


图 4.2.3-8 組立完了（塩水噴射部下面）

また塩水リユース設備は、塩水リユースにおける処理工程を考慮し配置した。また機器の配置後に噴射及び吸引用の配管、電気及び通信等の配線を行い、計測機器の調整を行なった。配置状況を図 4.2.3-9 から図 4.2.3-13 に示す。

なお塩水を通水しての調整は、4.3 節の緩衝材除去装置の動作確認において実施した。



図 4.2.3-9 塩水リユース設備設置前テント内状況



図 4.2.3-10 塩水リユース設備設置前状況



図 4.2.3-11 塩水噴射ポンプ搬入状況



図 4.2.3-12 塩水リユース設備設置完了状況（テント奥より）



図 4.2.3-13 塩水リユース設備設置完了状況（テント入口より）

## 4.3 緩衝材除去装置の動作確認

緩衝材除去装置全体の組立を完了した後、各設備の動作確認を地上にて実施した。以下に動作確認の対象設備、動作確認方法、動作確認結果について示す。

### 4.3.1 動作確認の対象設備

動作確認の対象設備は、以下の5つの設備である。

- ①駆動設備
- ②昇降設備
- ③塩水噴射・スラリー吸引設備
- ④塩水リユース設備
- ⑤遠隔操作設備（上記①から④の各作動試験時に合わせて実施）

### 4.3.2 動作確認方法

#### (1) 動作確認方法の検討

組立を完了した各設備に対し、仕様を満たした動作が出来ることを確認した（以下動作確認試験と称す）。

#### 1) 駆動設備の動作確認試験方法（駆動設備にかかわる遠隔操作設備の動作確認を含む）

駆動設備（走行ユニット，油圧ユニット）の仕様を踏まえた動作確認項目と動作確認方法を表 4.3.2-1 に示す。また動作確認試験フローを図 4.3.2-1 に示す。なお動作確認試験は、遠隔にて実施することにより、駆動設備にかかわる遠隔操作設備の動作確認も併せて実施した。

表 4.3.2-1 動作確認項目と動作確認方法（駆動設備）

試験項目	動作確認項目	動作確認方法
走行力（平地）	走行機能 （無負荷）	所定の距離を走行する時間をストップウォッチにて測定
	速度調整機能	走行レバーで微速⇒最大速度まで動作
ステアリング力	方向変換機能	平坦地でスピントーンおよびピボットターンを実施
登板力 （斜面角度 20 度）	登板機能 （無負荷）	20 度の斜面を走行
制動力	走行装置ブレーキ制動機能	20 度の斜面で走行およびエンジンを停止してスリップ量を測定
遠隔動作確認	遠隔動作機能	上記すべての動作を遠隔操作で実施

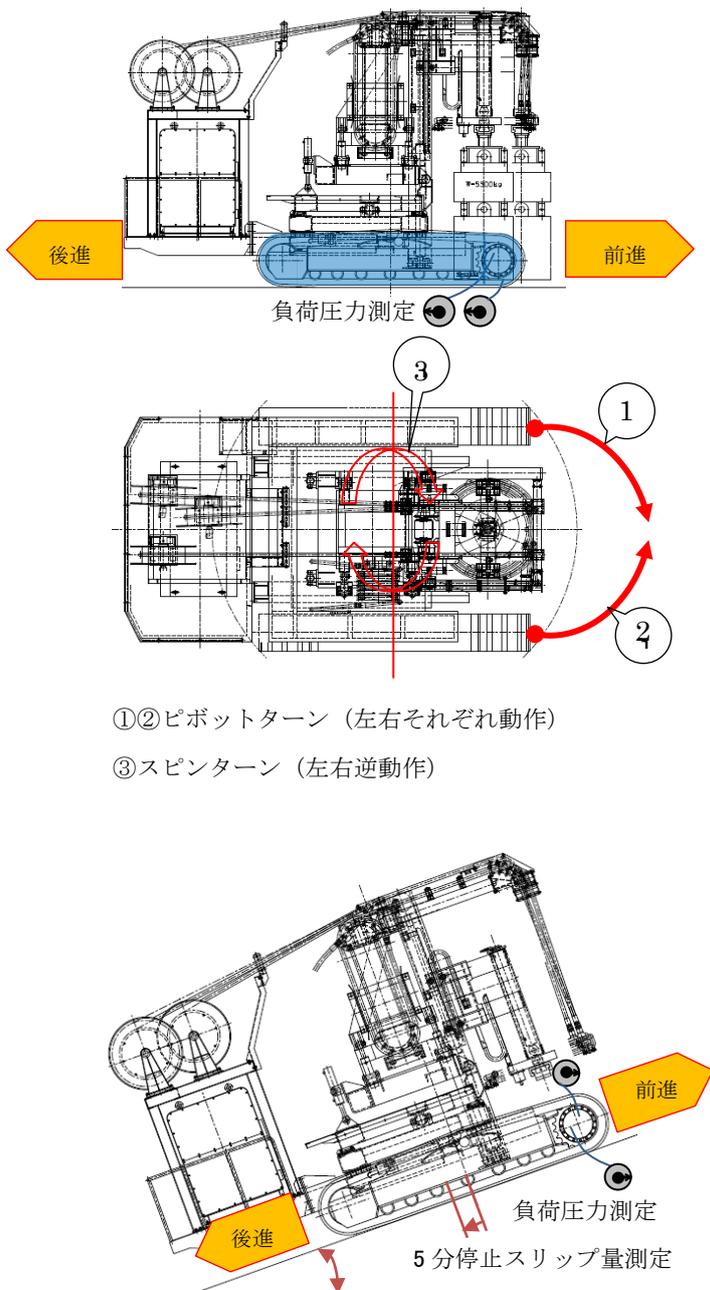
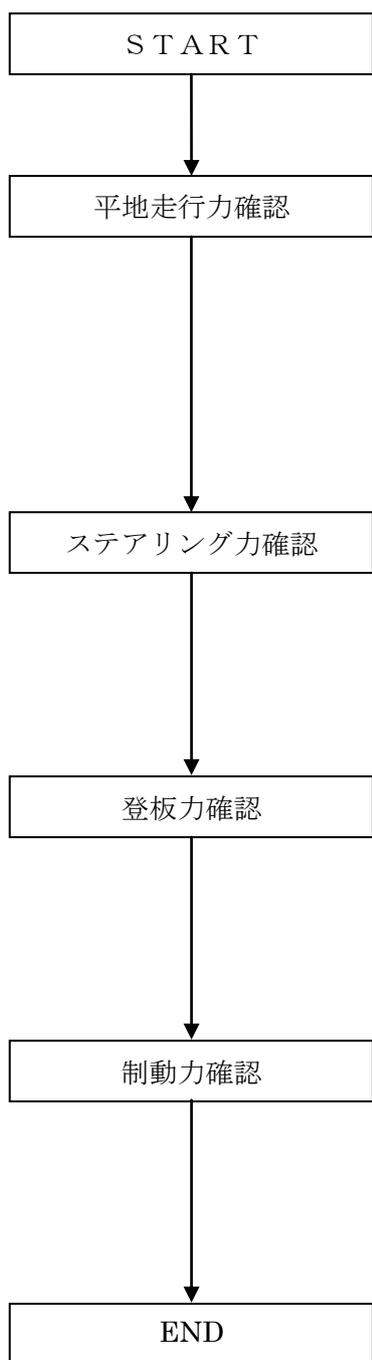


図 4.3.2-1 動作確認試験フロー（駆動設備）

2) 昇降設備の動作確認試験方法（昇降設備にかかわる遠隔操作設備の動作確認を含む）

昇降設備の仕様を踏まえた動作確認項目と動作確認方法を表 4.3.2-2 に示す。また動作確認試験フローを図 4.3.2-2 に示す。なお動作確認試験は、遠隔にて実施することにより、昇降設備にかかわる遠隔操作設備の動作確認も併せて実施した。

表 4.3.2-2 動作確認項目と動作確認方法（昇降設備）

試験項目	動作確認項目	動作確認方法
位置調整	前後スライド量	前後のフルストローク量を巻尺にて測定
	左右スライド量	左右のフルストローク量を巻尺にて測定
	マスト前後左右傾斜角	マスト垂直を出してから前後左右に動作させ傾斜角度を角度計にて測定
把持部昇降	把持部昇降フルストローク量	マスト部、角ロッド部を上下させフルストローク量を巻尺にて測定
	把持部最上部高さ	チャックを最大上げて GL からの高さを巻尺にて測定
	把持部最下部深さ	チャックを最大下げて GL からの深さを巻尺にて測定
	引上げ力	荷重と引上げ圧力を圧力計にて測定し、引上げ力に換算
	昇降速度 (マスト昇降部) (把持昇降部)	フルストロークにおける動作時間をストップウォッチにて測定
噴射部昇降	噴射部昇降フルストローク量	噴射ノズル部を上下させフルストロークを巻尺にて測定
	昇降速度	フルストロークにおける動作時間をストップウォッチにて測定
	昇降力	疑似荷重を掛けて確認する (塩水噴射・吸引設備設置前に実施)
遠隔動作確認	遠隔動作機能	上記すべての動作を遠隔操作で実施

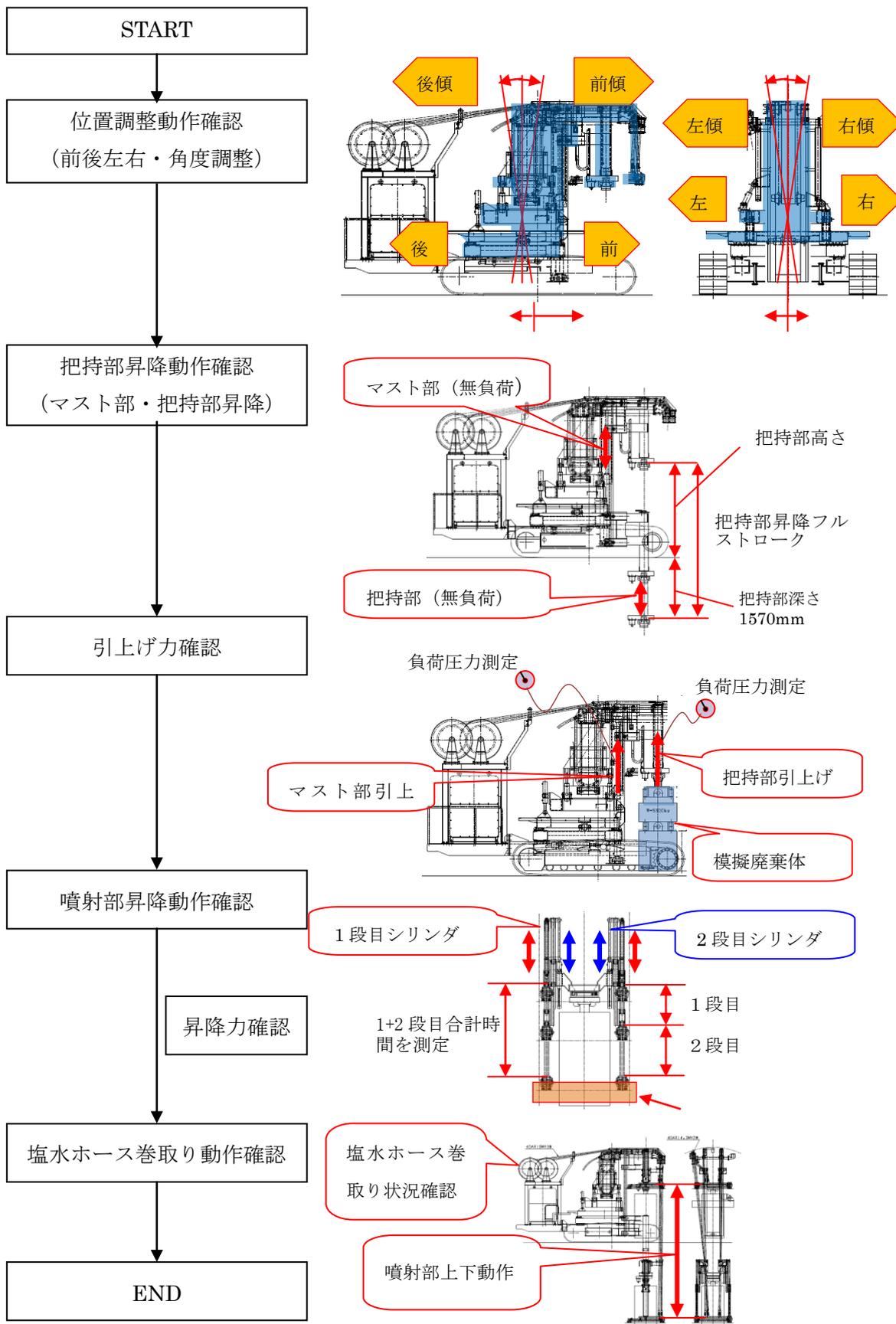


図 4.3.2-2 動作確認試験フロー（昇降設備）

3) 塩水噴射・スラリー吸引設備の動作確認試験方法（塩水噴射・スラリー吸引設備にかかわる遠隔操作設備の機能確認を含む）

塩水噴射・スラリー吸引設備の仕様を踏まえた動作確認項目と動作確認方法を表 4.3.2-3 に示す。また動作確認試験フローを図 4.3.2-3 に示す。なお動作確認試験は、遠隔にて実施することにより、塩水噴射・スラリー吸引設備にかかわる遠隔操作設備の動作確認も併せて実施した。

表 4.3.2-3 動作確認項目と動作確認方法（塩水噴射・スラリー吸引設備）

設計項目	機能確認項目	動作確認方法
塩水噴射	噴射力	噴射圧力を圧力計にて測定
	噴射量	噴射総流量を流量計にて測定
スラリー吸引	吸引量	吸引流量を流量計にて測定
噴射部揺動	揺動角度	揺動角度を地上に簡易定規を設置して確認
	揺動速度	揺動往復 3 回の時間をストップウォッチにて測定し周速度に換算
遠隔動作確認	遠隔動作機能	上記すべての動作を遠隔操作で実施

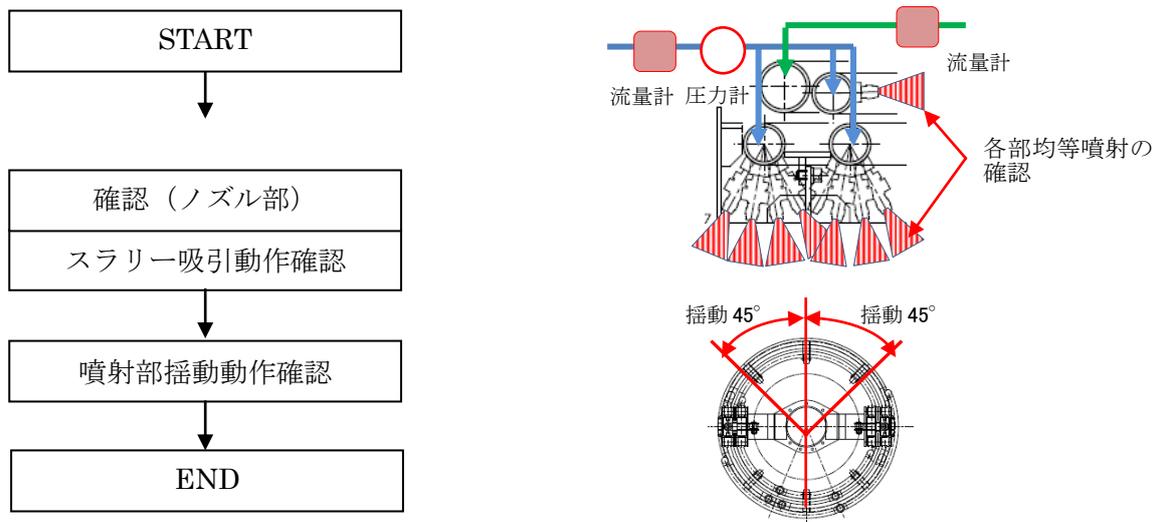


図 4.3.2-3 動作確認試験フロー（塩水噴射・スラリー吸引設備）

4) 塩水リユース設備の動作確認方法（塩水リユース設備にかかわる遠隔操作設備の機構確認を含む）

塩水リユース設備の仕様を踏まえた動作確認項目と動作確認方法を表 4.3.2-4 に示す。また動作確認試験フローを図 4.3.2-4 に示す。

表 4.3.2-4 動作確認項目と動作確認方法（塩水リユース設備）

試験項目	動作確認項目	動作確認方法
固液分離設備	固液分離機能	処理流量を流量計にて測定
		塩水の SS 濃度（浮遊物質濃度）を SS 濃度計にて測定
遠隔動作確認	遠隔動作機能	塩水供給動作を遠隔操作で実施，動作と塩水特性を遠隔操作室で監視

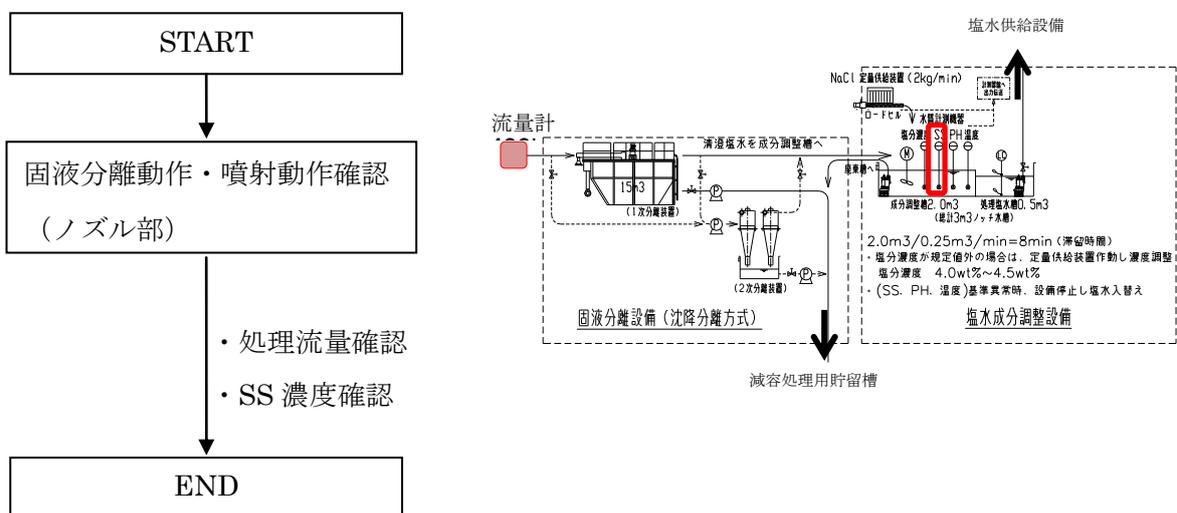


図 4.3.2-4 動作確認試験フロー（塩水リユース設備）

## (2) 動作確認のための試験設備

動作確認を行うために必要となる試験孔・試験坑道等付帯設備及び、試験に使用する模擬廃棄体について検討を行い整備した。

### 1) 緩衝材除去装置

緩衝材除去装置は、塩水噴射部・スラリー吸引設備、昇降設備、塩水リユース設備、駆動設備から構成される。全体構成を図 4.3.2-5 に示す。

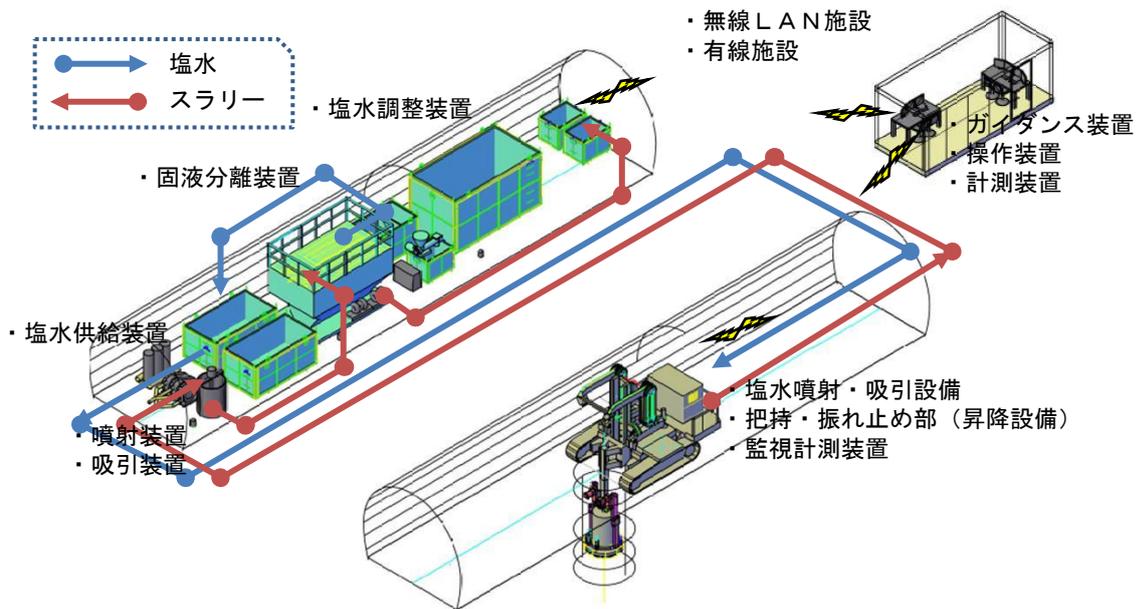


図 4.3.2-5 緩衝材除去装置の全体構成

## 2) 試験孔および試験坑道

試験孔および試験坑道は、HLW 第 2 次取りまとめにおける堆積岩・堅置き処分概念で適用される処分孔と処分坑道の断面および仕様を満足するものとし整備した。断面を図 4.3.2-6 に、仕様を表 4.3.2-5 に示す。

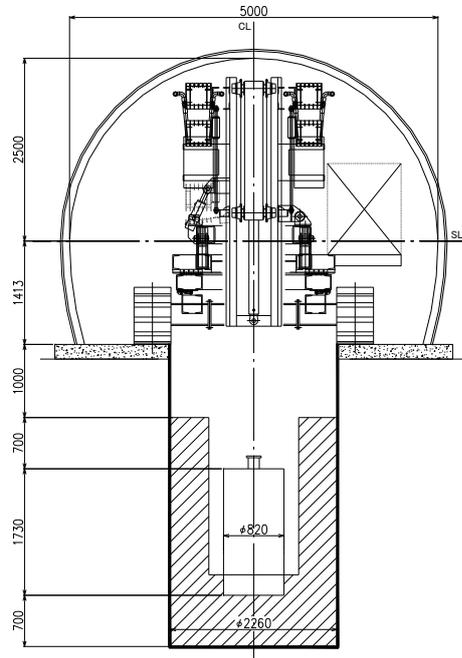


図 4.3.2-6 試験孔および試験坑道の断面

表 4.3.2-5 試験孔および試験坑道の基本仕様

項目	仕様	備考
処分孔	外径：2,260mm 深さ：4,130mm	HLW 第 2 次取りまとめを参考
処分坑道	高さ：3,913mm (床版-天端) 幅：5,000mm (スプリングライン) 延長：30m 程度	HLW 第 2 次取りまとめを参考 延長は各設備の設置および動作確認を実施するために要する延長を想定

## 3) 操作室

オペレーターが緩衝材除去装置を操作する操作盤やモニターを設置する操作室を整備した。実際の作業では処分坑道内、あるいは処分坑道外に設置されることも想定される。

#### 4) 模模擬廃棄体

動作確認及び機能確認に用いる実規模スケールでの模模擬廃棄体を設計・製作した。

##### a. 仕様

###### (a) 寸法

直径  $\phi 820$  mm、全長  $L = 1,730$  mm（把持部を除く）、寸法を図 4.3.2-7 に示す。

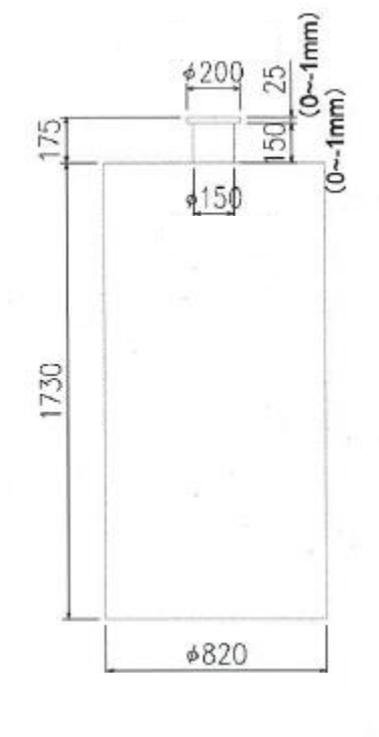


図 4.3.2-7 模模擬廃棄体外形図

###### (b) 重量

- ・総重量：6,100kg
- ・実廃棄体（オーバーパック+ガラス固化体）の重量を模擬した。

###### 材質

- ・炭素鋼
- ・錆対策として、防錆塗装を行った。

##### b. 基本構造及び製作方法

###### (a) 基本構造

「仕様」に示す寸法、重量を確保するための基本構造の検討を行い、図 4.3.2-8 に示す通り、外形は寸法通りに加工し内部空間を設けることで重量を調整する構造とした。模模擬廃棄体の円筒胴体部と蓋の接合方法は、製作性・取扱い性を考慮し、ボルト締結構造とした。上記構造にて、重心位置を計算し実機と比較した結果を図 4.3.2-8 に示す。

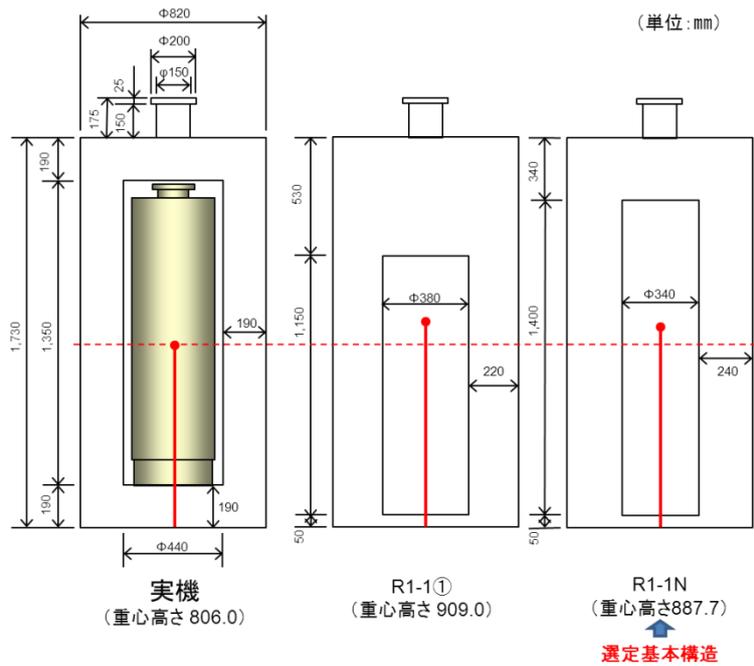


図 4.3.2-8 模擬廃棄体基本構造案および重心計算結果

(b) 製作方法と完成状況

把持部のニアネットシェイプでの製作性に優れ、使用目的に対し十分な品質が得られる製作方法として、鋳造を選定し機械加工で仕上げることにした。また、下蓋は一般鋼材を機械加工で所定寸法に加工することとした。

なお、前項の基本構造を基に、本体上部にはハンドリング用のアイボルトを取り付け可能な構造とした。緩衝材除去試験中はアイボルトをはずし、キャップボルトを取り付けることでボルト孔への緩衝材の侵入を防ぐこととした。完成状況を図 4.3.2-9、図 4.3.2-10、図 4.3.2-11 に示す。



图 4.3.2-9 荒加工後外觀圖



图 4.3.2-10 完成後外觀圖



图 4.3.2-11 最終機械加工後外觀圖

#### 5) 塩水

作動試験に使用する塩水を整備した。整備した塩水の水量は、固液分離装置と成分調整槽のそれぞれの設備を満水とした水量 17m<sup>3</sup>程度（図 4.3.2-4 参照）とした。

#### 6) 使用電源

作動試験に使用する電源を整備した。整備した電源は、駆動設備の動力のための電源 AC400V、遠隔操作機器等に用いる計装のための電源 AC100V および、塩水噴射・吸引設備、塩水リユース設備に用いる各種ポンプや攪拌機の電源 AC200V とした。

#### 7) 除去緩衝材の仮置き場

塩水リユース設備の試験時に発生した泥水（塩水に緩衝材を混合したもの）を一時保管するための仮置き場を整備した。なお、泥水は産業廃棄物として場外処分を行った。

#### 8) 設備保管等倉庫

完成した緩衝材除去装置・付帯する設備等は、風雨を避けて保管するための設備保管倉庫を整備した。なお試験期間中は、装置整備のための備品や各種作業の準備場所として使用した。

### (3) 試験設備配置の検討

安全かつ効率的な動作確認試験および性能試験を実施するために、緩衝材除去装置の設置および試験中の揚重作業に用いるクレーンの配置（作業）スペースを考慮し、各設備の配置検討を行った（5.2.2 項参照）。検討結果を図 4.3.2-12 に示す。また模擬処分孔および模擬処分坑道の詳細を図 4.3.2-13 に示す

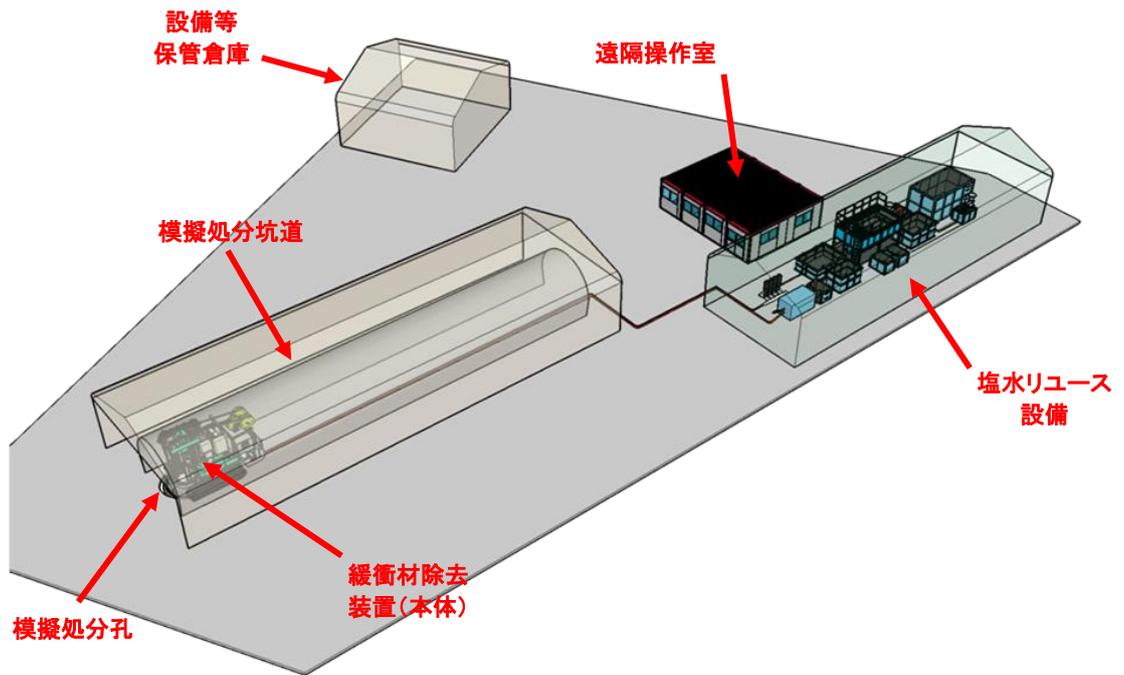


図 4.3.2-12 試験設備配置



### 4.3.3 動作確認試験結果

動作確認試験（4.2.3 項参照）の結果を以下にまとめる。

#### (1) 駆動設備の動作確認結果（駆動設備にかかわる遠隔操作設備の機構確認を含む）

動作確認項目に対し駆動設備の機能が問題なく作動したことを確認した。駆動設備の動作確認試験結果を表 4.3.3-1 に示す。

表 4.3.3-1 駆動設備の動作確認試験結果一覧

動作確認項目	動作確認項目	試験結果
走行機能 (無負荷)	所定の距離を走行する時間をストップウォッチにて測定	所定の走行が可能であることを確認
速度調整機能	走行レバーで微速⇒最大速度まで動作	所定の速度調整が可能であることを確認
方向変換機能	平坦地でスピントーンおよびピボットターンを実施	所定の方向変換が可能であることを確認
登板機能 (無負荷)	20度の斜面を走行	所定の登坂走行が可能であることを確認
走行装置ブレーキ制動機能	20度の斜面で走行およびエンジンを停止してスリップ量を測定	所定のブレーキ制御が可能であることを確認
遠隔動作機能	上記すべての動作を遠隔操作で実施	所定の遠隔操作が可能であることを確認



図 4.3.3-1 駆動設備の動作確認試験状況

(2) 昇降設備の動作確認結果（昇降設備にかかわる遠隔操作設備の機構確認を含む）

動作確認項目に対し昇降設備の機能が問題無く作動したことを確認した。昇降設備の動作確認試験結果を表 4.3.3-2 にまとめる。

表 4.3.3-2 昇降設備の動作確認試験結果一覧

動作確認項目	動作確認項目	試験結果
前後スライド量	前後のフルストローク量を巻尺にて測定	所定の前後ストローク動作が可能であることを確認
左右スライド量	左右のフルストローク量を巻尺にて測定	所定の左右ストローク動作が可能であることを確認
マスト前後左右傾斜角	マスト垂直を出してから前後左右に動作させ傾斜角度を角度計にて測定	所定の傾斜動作が可能であることを確認
把持部昇降フルストローク量	マスト部、角ロッド部を上下させフルストローク量を巻尺にて測定	所定のストローク動作が可能であることを確認
把持部最上部高さ	チャックを最大上げて GL からの高さを巻尺にて測定	所定の最上高さまで動作が可能であることを確認
把持部最下部深さ	チャックを最大下げて GL からの深さを巻尺にて測定	所定の最下深さまでの動作が可能であることを確認
引上げ力	荷重と引上げ圧力を圧力計にて測定し、引上げ力に換算	所定の荷重を引上げる動作が可能であることを確認
昇降速度（マスト昇降部）（把持昇降部）	フルストロークにおける動作時間をストップウォッチにて測定	所定の速度で昇降動作が可能であることを確認
噴射部昇降フルストローク量	噴射ノズル部を上下させフルストロークを巻尺にて測定	所定の噴射ノズル部昇降ストローク動作が可能であることを確認
昇降速度	フルストロークにおける動作時間をストップウォッチにて測定	所定の速度による昇降ストローク動作が可能であることを確認
昇降力	疑似荷重を掛けて確認する (塩水噴射・吸引設備設置前に実施)	所定の昇降力があることを確認
遠隔動作確認	上記すべての動作を遠隔操作で実施	各設備とも遠隔による動作が可能であることを確認



図 4.3.3-2 昇降設備の動作確認試験状況

(3) 塩水噴射・スラリー吸引設備の動作確認結果（塩水噴射・スラリー吸引設備にかかわる遠隔操作設備の機構確認を含む）

動作確認項目に対し塩水噴射・スラリー吸引設備の機能が問題無く作動したことを確認した。塩水噴射・スラリー吸引設備の動作確認試験結果を表 4.3.3-3 に示す。

表 4.3.3-3 塩水噴射・スラリー吸引設備の動作確認試験結果一覧

動作確認項目	動作確認項目	試験結果
噴射力	噴射圧力を圧力計にて測定	所定の噴射圧力で塩水噴射が可能であることを確認
噴射量	噴射総流量を流量計にて測定	所定の噴射量を噴射可能であることを確認
吸引量	吸引流量を流量計にて測定	所定の吸引量を吸引可能であることを確認
揺動角度	揺動角度を地上に簡易定規を設置して確認	所定の揺動動作が可能であることを確認
揺動速度	揺動往復 3 回の時間をストップウォッチにて測定し周速度に換算	所定の速度による揺動動作が可能であることを確認
遠隔動作機能	上記すべての動作を遠隔操作で実施	各動作の遠隔操作が可能であることを確認

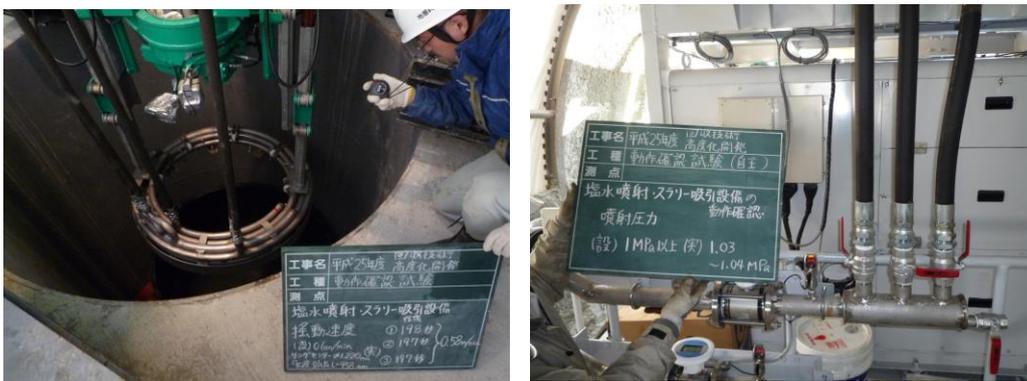


図 4.3.3-3 塩水噴射・スラリー吸引設備の動作確認試験状況

(4) 塩水リユース設備の動作確認結果（塩水リユース設備にかかわる遠隔操作設備の機構確認を含む）

動作確認項目に対し塩水リユース設備の機能が問題無く作動したことを確認した。塩水リユース設備の動作確認試験結果を表 4.3.3-4 に示す。

表 4.3.3-4 塩水リユース設備の動作確認試験結果一覧

動作確認項目	動作確認項目	試験結果
固液分離機能	処理流量を流量計にて測定	所定量の固液分離が可能であることを確認
	塩水の SS 濃度（浮遊物質濃度）を SS 濃度計にて測定	所定の SS 濃度（浮遊物質濃度）に固液分離が可能であることを確認
遠隔動作機能	塩水供給動作を遠隔操作で実施，動作と塩水特性を遠隔操作室で監視	各動作について、遠隔による操作が可能であることを確認



図 4.3.3-4 塩水リユース設備の動作確認試験状況

#### 4.4 まとめ

- ・平成 24 年度に製作された塩水噴射・スラリー吸引設備と昇降設備を組み立てるとともに、平成 25 年度に製作された駆動・遠隔設備との組立、取付け、調整を行った。
- ・組立、取付けを完了した緩衝材除去装置の動作確認を目的として、地上にて駆動設備、昇降設備、塩水噴射・スラリー吸引設備、塩水リユース設備の動作に関するデータを取得した。また、本装置が地下特有の環境で使用されることに留意しながら、遠隔操作による装置の安全性を確認した。

## 第5章 緩衝材除去装置の機能確認

緩衝材除去装置のシステム全体の機能確認を目的として、地上にて緩衝材を用いた実規模での緩衝材除去試験(以下、本試験)を実施する。本試験では緩衝材除去特性および塩水リユース特性等に関するデータを取得し、装置の機能を定量的に評価し想定した機能を有しているか確認する。また、本装置を地下特有の環境で使用されることに留意しながら、遠隔操作性の安全性を確認する。

### 5.1 試験対象

本試験では、これまで個々に製作してきた緩衝材除去装置のシステム一式を用いて緩衝材除去を実施する。緩衝材除去に関わる緩衝材除去装置のシステム(以下の5つの設備で構成)を機能確認試験の対象とする。

- ①塩水噴射・スラリー吸引設備
- ②昇降設備
- ③駆動設備(油圧ユニット)
- ④塩水リユース設備
- ⑤遠隔操作設備

#### 5.1.1 機能確認試験計画

緩衝材除去装置を構成する機器は、これまで個々に機能確認試験として塩水噴射・スラリー吸引設備ではプロトタイプ装置を用いた緩衝材除去試験、塩水リユース設備では模擬スラリーを用いた24時間以上の稼働による塩水リユース試験を実施してきた。

本試験では、緩衝材除去装置のシステムを用いて廃棄体回収作業のうち廃棄体頂部および側部の緩衝材除去を実施し、その際の緩衝材除去状況および機器の動作状況から緩衝材除去特性および塩水リユース特性について機器の既存データと比較し機能の確認を行う。また、これら2つの特性を確認するための操作およびデータ収集を実施することにより遠隔操作に関わる安全性・確実性の確認を行う。本試験は地上に模擬処分坑道および処分孔を用意し、実規模の緩衝材および模擬廃棄体を用いる。

#### 5.1.2 試験ケース

廃棄体回収の作業において緩衝材除去装置を用いて廃棄体の頂部および側部の緩衝材を除去する(図 5.1.2-1)。本試験では実際の緩衝材除去作業を再現するために設定する装置および緩衝材の条件は以下の4項目になる。

- 緩衝材除去装置の塩水噴射・スラリー吸引部の位置(昇降設備)(最小伸張、最大伸張)
- 緩衝材位置(廃棄体頂部:円盤状、側部:リング状)
- 緩衝材除去の連続試験(深さ方向:30cm、60cm)
- 廃棄体の把持振れ止め(有無)

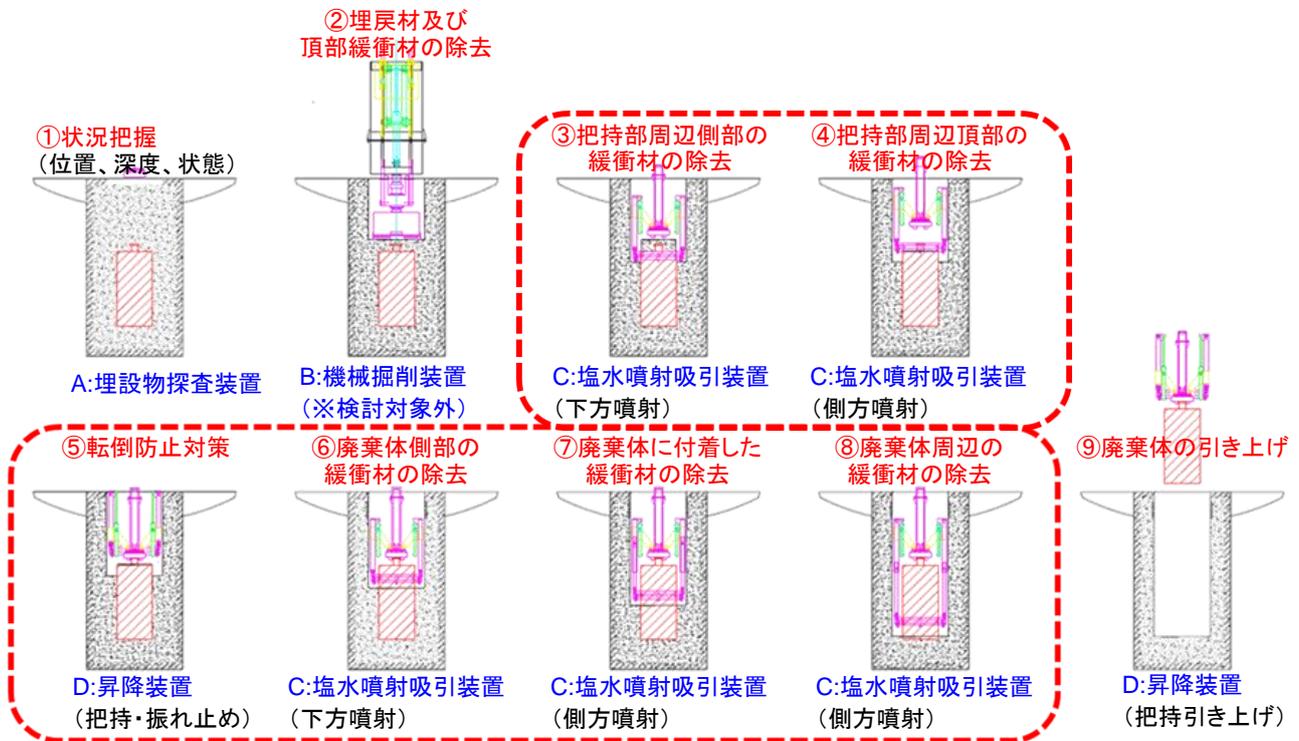


図 5.1.2-1 廃棄体回収作業のうち緩衝材除去の位置づけ

これらの項目を組み合わせ、廃棄体頂部と側部の緩衝材に注目し、2 ケースの実験ケースを実施することとした(表 5.1.2-1、図 5.1.2-2)。

ケース 1 は、廃棄体頂部の緩衝材(円盤状)の中心付近を除去し廃棄体の直径より大きく廃棄体上面が露出した円筒状の空間を生み出すことを目的としている。その際、廃棄体の把持部を露出させる方法と塩水噴射位置の外側になる緩衝材を残しつつ、その内側すべての緩衝材を除去する方法が課題となっている。緩衝材の除去は下向きの塩水噴射によるものが主体になるが必要に応じて横向きの塩水噴射によるものも利用する。また、緩衝材除去後に廃棄体の把持・振れ止め機能の確認を行う。

ケース 2 は、廃棄体側部の緩衝材を除去し廃棄体の拘束を取り除くことを目的としている。塩水噴射位置より内側の緩衝材を効率よく除去することおよび昇降設備の最大伸張によるスラリーの吸引や給排水ホースによる揺動への影響が課題であり、このうち緩衝材除去効率についてはプロトタイプ装置を用いた H24 年度の緩衝材除去試験のデータとの比較検討ができる。

表 5.1.2-1 試験ケース(緩衝材除去による機能確認試験)

試験ケース	緩衝材形状位置		昇降設備		連続除去 (深さ)	廃棄体の 把持・振れ止め
	円盤状	リング状	最小伸長	最大伸長		
ケース 1 (廃棄体頂部)	○	○	○	—	60cm	—
ケース 2 (廃棄体側部)	—	○	—	○	30cm	○

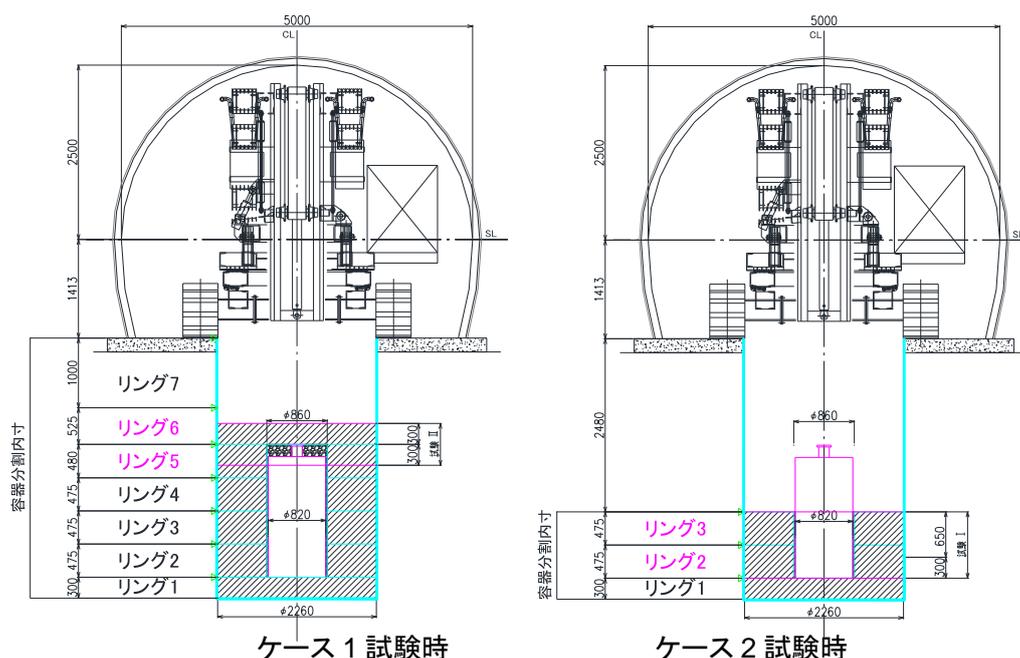


図 5.1.2-2 試験ケースの概念

### 5.1.3 取得特性

本試験により取得するデータは、主として①緩衝材除去状況(緩衝材除去特性)を確認するもの、②塩水リユース設備の稼働状況(塩水リユース特性)を確認するもの、③遠隔操作による安全性を確認するものである。これらの取得特性の詳細項目を表 5.1.3-1 に示す。①については緩衝材除去に関わる安定性および効率性の確認を目的とし、②については緩衝材除去に関わる塩水およびスラリーの処理サイクルの安定性および確実性の確認を目的とし、③については①②に関わる操作・データ取得状況から安全性・確実性の確認を目的とする。

表 5.1.3-1 緩衝材除去により確認する機能と取得特性および取得方法

取得特性	機能	試験により取得する特性	特性の取得方法
①緩衝材除去特性	緩衝材除去機能	緩衝材除去形状	3D スキャナー等※1
		緩衝材除去量	重量計測※2
	昇降機能(噴射部・スラリー吸引部)	噴射位置(高さ)	ストローク記録
		噴射位置(平面)※3	揺動状況、緩衝材除去形状
	廃棄体把持機能	把持力	ひずみ計
②塩水リユース特性	噴射機能 (塩水噴射・スラリー吸引部)	噴射流量	流量計
		噴射圧力	圧力計
		噴射時間 (運転時間)	時間計測
	スラリー吸引機能	吸引流量	流量計
	塩水リユース機能 (塩水の循環機能)	供給流量 (塩水供給量)	流量計
		供給圧力	圧力計
		吸引流量	流量計
		吸引圧力	圧力計
	塩水リユース機能 (緩衝材スラリーの固液分離機能)	塩水の濃度	塩分濃度計
		リユース前後の塩水のSS濃度 (浮遊物質濃度)	SS濃度計
		スラリーの沈降速度	沈降速度の記録※4
③遠隔操作の安全性	遠隔操作機能	動作状況の把握	装置状況モニター、ライブカメラ
	データ取得機能	各種データ	ライブデータ※5

※1: 3D スキャナーは水面下では測定不可能であるため、ケース1の初期段階においては緩衝材除去形状を短い間隔で計測する。その後は連続的な 3D スキャナーによる水面上部の除去形状測定とともに、全体の緩衝材除去形状は適度なロット(1回/日程度)を設けて計測する。

※2: 連続運転となることから、適度なロット(1回/日程度)を設けて把握する。

※3: 揺動速度は緩衝材除去装置の設計性能(1cm/sec)として一定とする。

※4: 固液分離装置(シックナー)の機能確認のためスラリーの沈降試験を実施する。

※5: 装置稼働時における各機能の状態を示すデータを取得する。

#### 5.1.4 試験条件

緩衝材除去による機能確認試験の試験条件を表 5.1.4-1 に示す。

表 5.1.4-1 試験条件(緩衝材除去による機能確認試験)

項目		試験条件	摘要
模擬廃棄体		直径 820mm 高さ 1,730mm 重量 約 6.1t	• 「HLW 第 2 次取りまとめ」に準拠
緩衝材	共通	ベントナイト:ケイ砂=70 : 30 密度 1.6Mg/m <sup>3</sup> 飽和度 60%程度	• 「HLW 第 2 次取りまとめ」に準拠 • 「H24 回収高度化」の緩衝材除去試験と同等仕様
	ケース 1	直径 2,260mm 高さ 600mm <sup>※1</sup>	• 円盤状およびリング状の緩衝材
	ケース 2	直径 2,260mm 高さ 300mm <sup>※1</sup>	• リング状の緩衝材 (廃棄体設置部を有する)
塩水噴射条件		噴射圧力 0.6MPa±0.5% 噴射流量 15m <sup>3</sup> /h ノズル径 φ2.2mm ノズル数 下向き:16 ノズル×2 環 横向き: 8 ノズル×1 環 揺動速度 1cm/sec	• 「H24 回収高度化」の緩衝材除去試験と同等仕様
スラリー吸引条件		吸引流量 15m <sup>3</sup> /h 以上 (噴射流量×1.5 倍以上)	• 「H24 回収高度化」の緩衝材除去試験と同等仕様

※1 試験対象とする緩衝材の下部の状態により取得するデータに影響を及ぼすことが考えられることから、実際の緩衝材の設置状況を模擬し、試験対象の下部にも緩衝材を設置する。(緩衝材の合計高さ:3,130mm)

## 5.2 試験方法・手順

### 5.2.1 試験方法および手順

機能確認試験としての緩衝材除去試験は、処分孔に定置した緩衝材を装置の連続運転により緩衝材を除去する。この際、緩衝材除去特性および塩水リユース特性を取得し、機能の確認を行う。緩衝材除去試験の全体概要を図 5.2.1-1 に、現在想定している塩水およびスラリーのマスバランスを図 5.2.1-2 に示す。

緩衝材除去試験の手順について、緩衝材除去特性(塩水噴射・スラリー吸引の動作)に関わる手順を図 5.2.1-3 に、塩水リユース特性に関わる手順を図 5.2.1-4 に示し、同時に取得するデータおよび目的を示す。

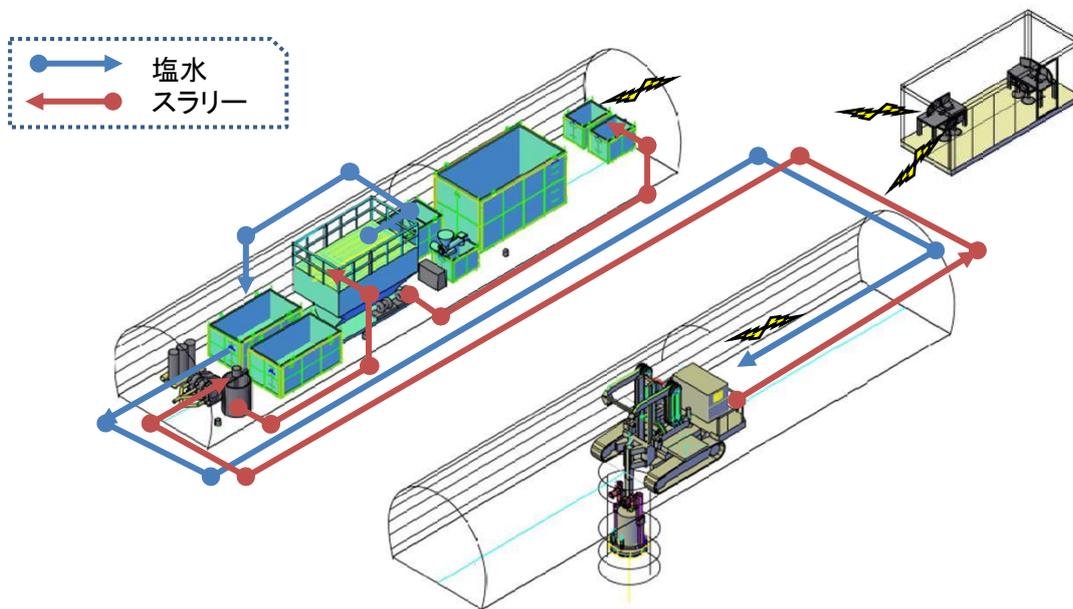


図 5.2.1-1 試験全体概要(緩衝材除去による機能確認試験)

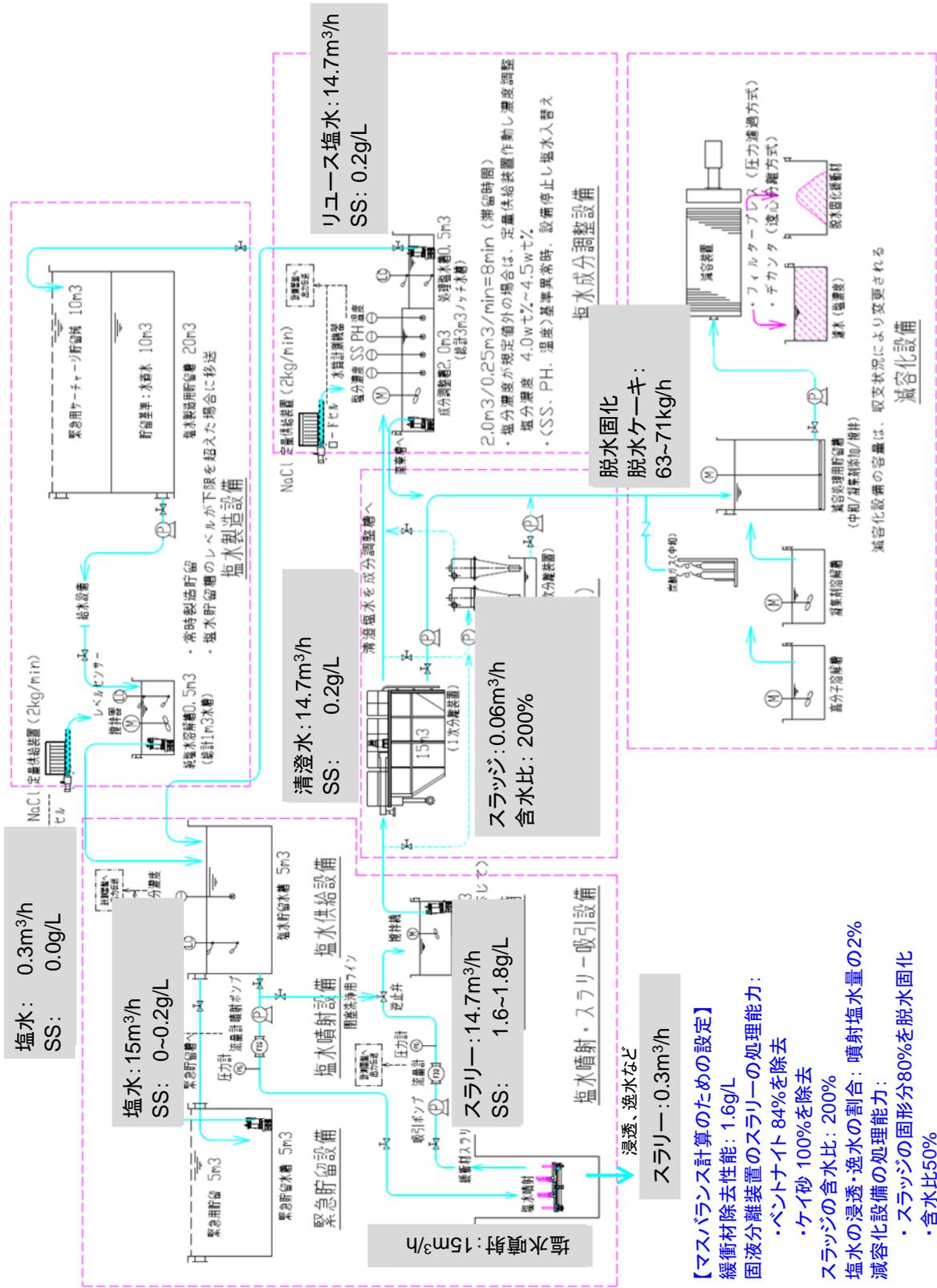


図 5.2.1-2 想定する塩水リユース設備のマスバランス

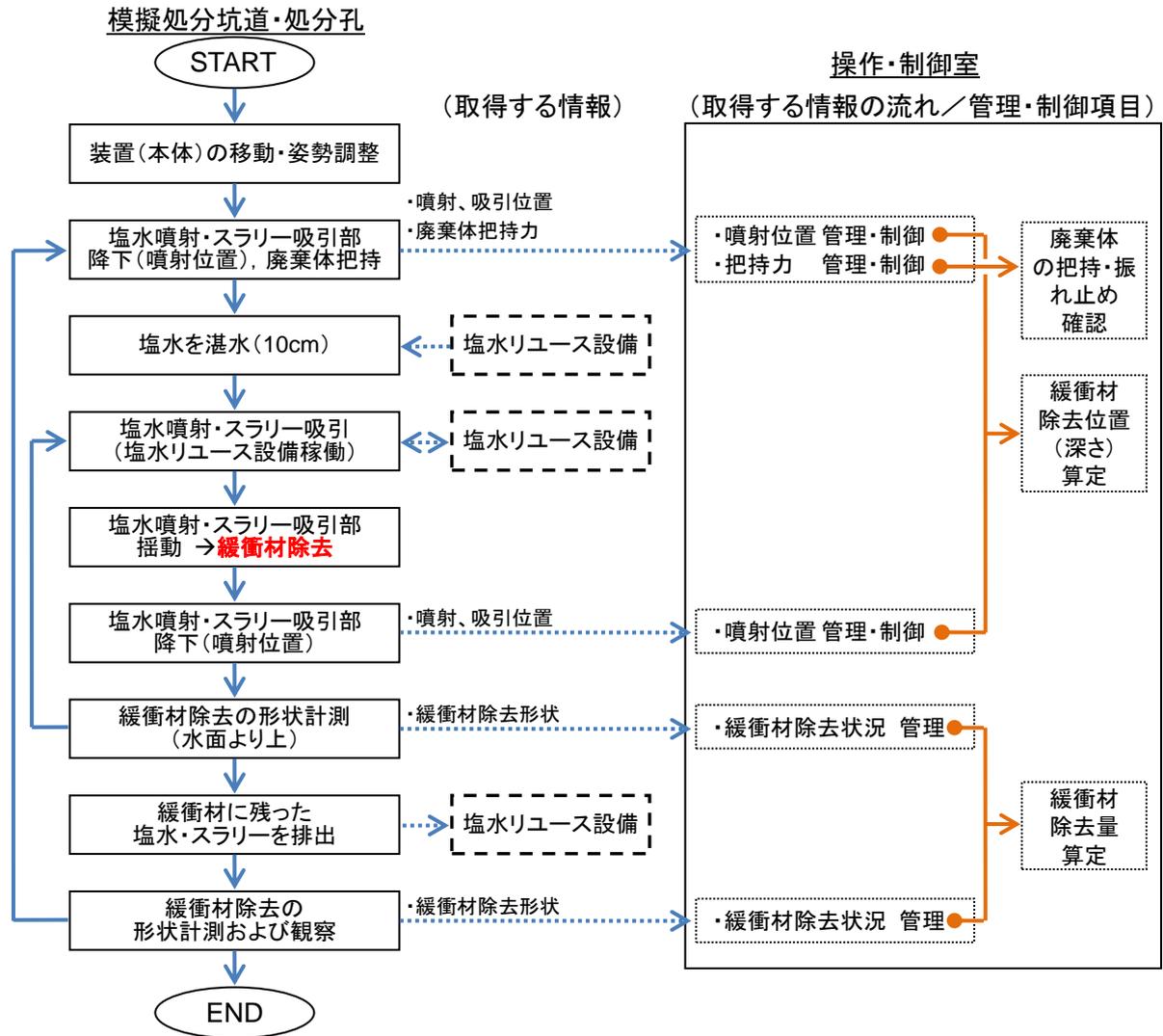


図 5.2.1-3 緩衝材除去特性のデータ取得に関わる流れ

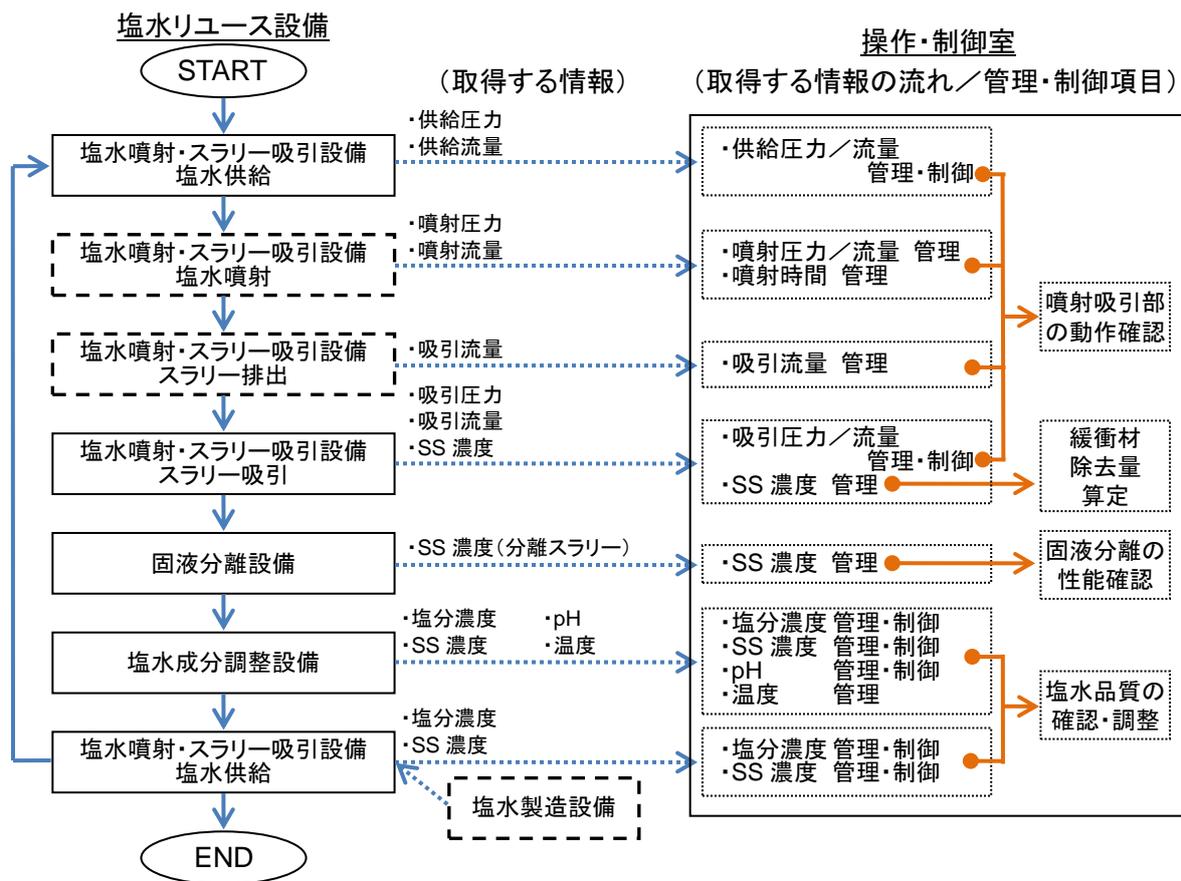


図 5.2.1-4 塩水リユース特性のデータ取得に関わる流れ

## 5.2.2 試験設備の整備

地上において緩衝材除去試験を実施するにあたり、試験設備は「HLW 第 2 次取りまとめ」における堆積岩系・堅置き処分概念に基づいた模擬処分坑道および処分孔を有するものとする。「平成 24 年度 地層処分回収技術高度化開発(以下、H24 回収高度化)」の地下における実証試験計画の見直しの成果(図 5.2.2-1)を基本とし、装置の配置を検討した結果、図 5.2.2-2、図 5.2.2-3 に示す試験設備を用意することとした。

模擬処分坑道および塩水リユース設備は、風雨の影響をなくするためテントを設置し、作業の安全性等の理由により常設もしくは仮設の照明設備を設置することとした。また、設備の支持および塩水やスラリーの逸水や浸透を防止のため底版はコンクリート製床版(厚さ 200mm)とする。

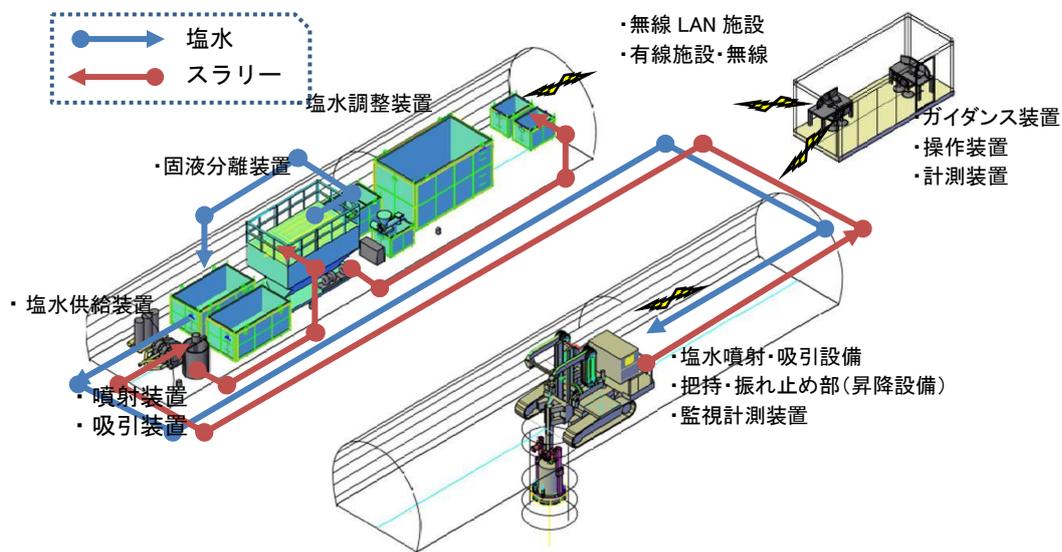


図 5.2.2-1 試験全体イメージ(緩衝材除去による機能確認試験)

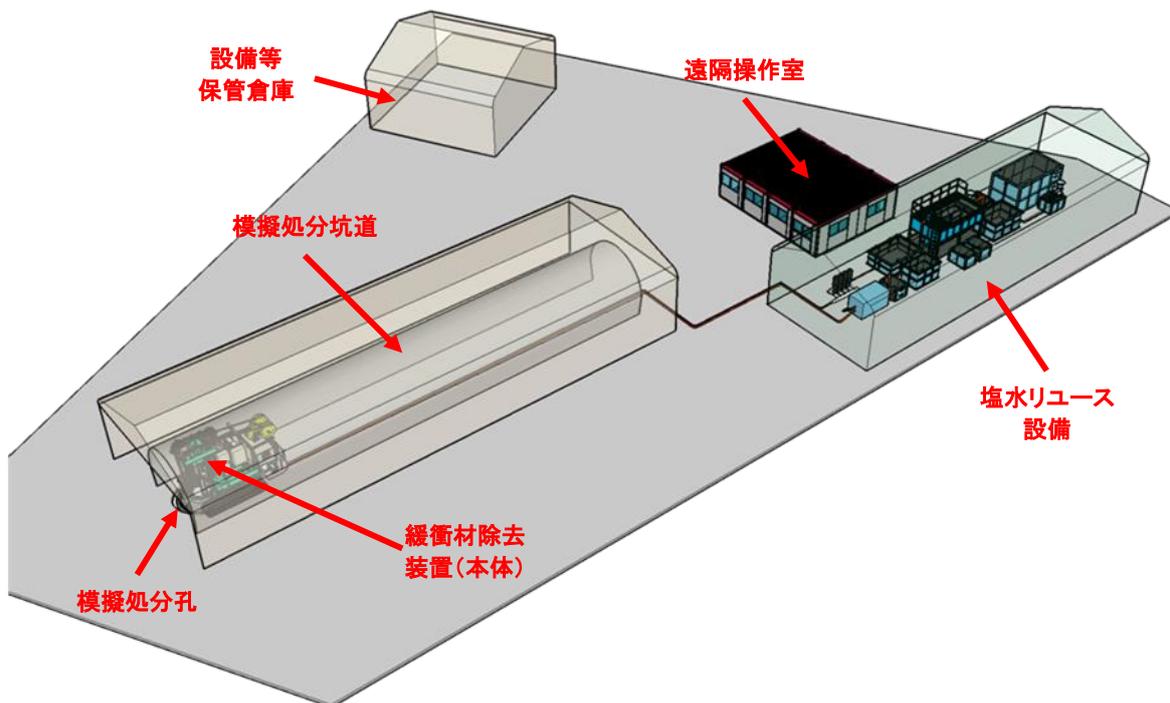


図 5.2.2-2 試験設備配置



図 5.2.2-3 試験設備配置全景

(1) 模擬処分孔および試験坑道

試験坑道の断面サイズは堆積岩系・堅置き処分概念のものとし、処分孔サイズは堅置き緩衝材が定置でき試験の作業性等を考慮し処分概念のサイズよりゆとりのある大きさとした(表 5.2.2-1 および図 5.2.2-4、図 5.2.2-5)。緩衝材と処分孔との隙間は砂を充填することとした。また、模擬処分孔への墜落防止として、試験時以外は開口部養生として安全柵やネット施し、試験準備作業時には、ハシゴなどの昇降設備を設置できるものとした。

表 5.2.2-1 試験孔および試験坑道の基本仕様

項目	仕様	備考
処分坑道	高さ:3,913mm(床版-天端) 幅 :5,000mm(スプリングライン) 延長:30m 程度	「HLW 第2次取りまとめ」に準拠 延長は各設備の設置および動作確認と機能 確認を実施するために要する延長を想定
処分孔	内径:2,596mm 深さ:4,556mm	



図 5.2.2-4 模擬処分坑道および模擬処分孔

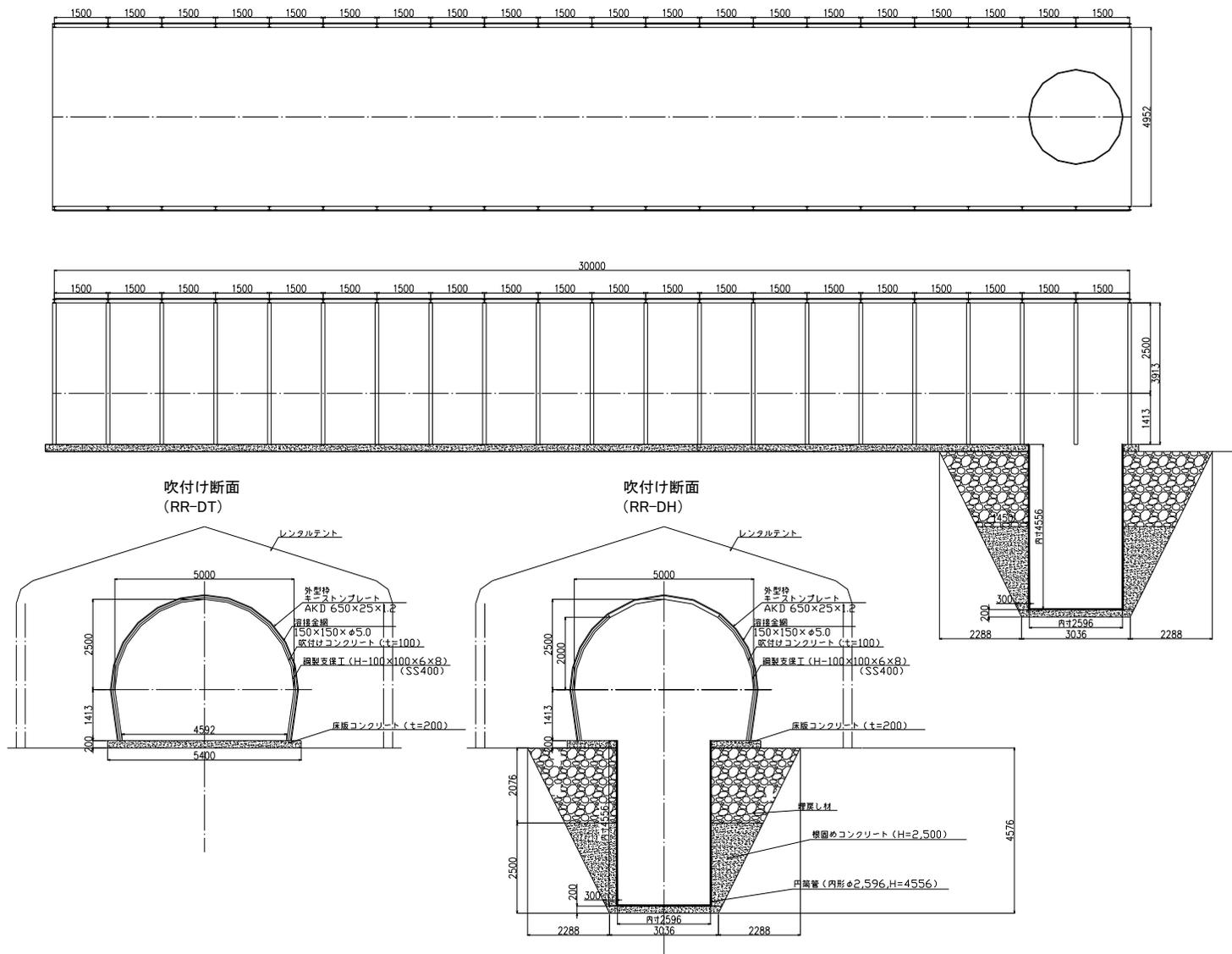


図 5.2.2-5 模擬処分孔および模擬処分坑道に用いる試験設備の詳細構造

(2) 遠隔操作室

本試験のデータ収集および機器操作を一元的に計測・操作・管理するために操作室を設ける(図 5.2.2-6)。



図 5.2.2-6 遠隔操作室

(3) 模擬廃棄体

廃棄体の回収作業の一連の流れの中の緩衝材除去であるので、試験においても緩衝材中に模擬廃棄体を設置する。模擬廃棄体は「HLW 第 2 次取りまとめ」に準拠したサイズと重量を有するものとした(表 5.2.2-2、図 5.2.2-7)。

表 5.2.2-2 模擬廃棄体の仕様

項目	仕様	備考
材料	炭素鋼	「HLW 第 2 次取りまとめ」に準拠
形状	外形 820mm、高さ 1,905mm(そのうち、把持部 175mm)	
重量	約 6.1t	オーバーバック + ガラス固化体 相当



図 5.2.2-7 模擬廃棄体全景

#### (4) 塩水

緩衝材除去に用いる塩水は濃度 4wt%で、塩水リユース設備のうち塩水・スラリーが循環する各水槽（塩水貯留水槽、一次貯留槽、1次分離槽、成分調整槽）を満水とした水量約 23.5m<sup>3</sup> および予備の水量 15.0m<sup>3</sup> を用意する（図 5.2.2-8）。

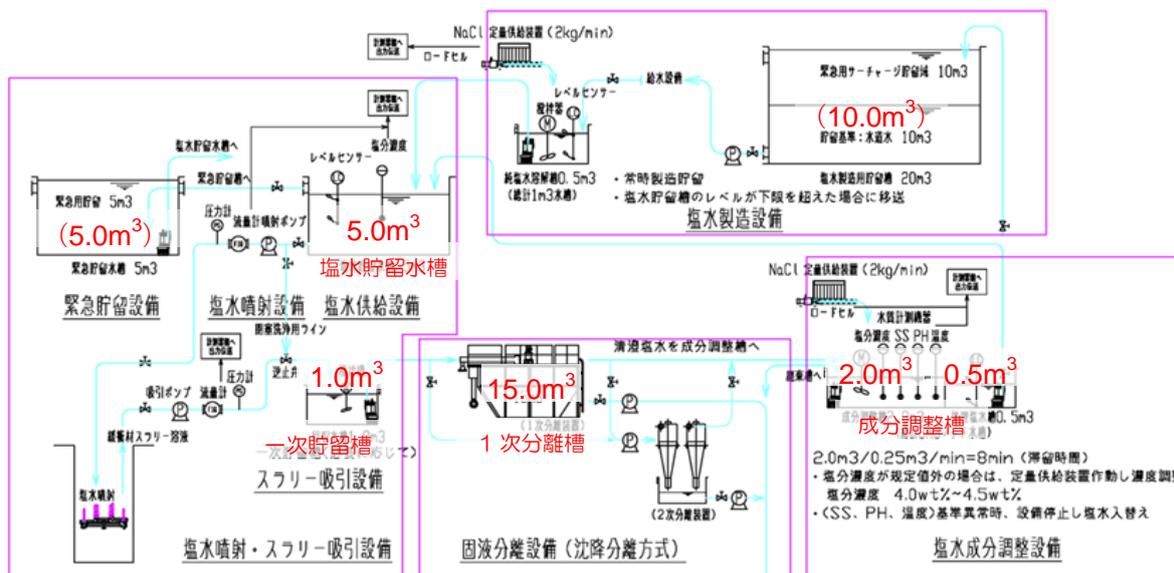


図 5.2.2-8 塩水リユース設備の構成(塩水・スラリーの循環フロー)

#### (5) 使用電源

緩衝材除去試験において以下の電源を用意する。

- AC400V 電源: 緩衝材除去装置の駆動設備の動力(油圧ユニット)
- AC200V 電源: 塩水噴射・吸引設備、塩水リユース設備の各種ポンプや攪拌機
- AC100V 電源: 遠隔操作機器等に関わる計装、その他一般電気機器

#### (6) 除去緩衝材の仮置き場

塩水により除去された緩衝材（ベントナイト+ケイ砂）は、産業廃棄物（汚泥）として場外処分する。試験後の緩衝材を仮置するためのスペースを確保する。

### 5.2.3 緩衝材試験体の製作

#### (1) 緩衝材の仕様

本試験において緩衝材は最も重要な材料であり、これまでの試験成果等から緩衝材の状態により塩水を用いた緩衝材除去性能が大きく変わることが分かっている。このため本試験に用いる緩衝材の仕様は、緩衝材の定置直後に近い状態であり、「H24 回収高度化」における緩衝材除去試験に用いたものと同じ乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  および飽和度 60%程度とした（表 5.2.3-1）。また、緩衝材と模擬廃棄体との隙間（幅  $t=20\text{mm}$ ）はペレットを充填（有効ベントナイト密度  $1.37\text{Mg/m}^3$ ）し、緩衝材と模擬廃棄体を一体化させる。

表 5.2.3-1 試験に用いる緩衝材の主要な仕様

項目	仕様	備考
材料	ベントナイト 70wt% +ケイ砂 30wt%	ベントナイトはクニゲル V1(クミネ工業製)を用いる
品質	乾燥密度 $1.6\text{Mg/m}^3$ 飽和度 60%程度	
形状	外形 2,260mm, 高さ 3,130mm	
重量	21.1t (隙間充填材を除く)	

(2) 使用材料

緩衝材製作に用いた材料（クニゲル V1、ケイ砂 3 号、ケイ砂 5 号）の土粒子の密度試験結果を表 5.2.3-2 に、土の粒度試験結果（粒径加積曲線）を図 5.2.3-1 に示す。

表 5.2.3-2 土粒子密度試験結果

試料番号(深さ)		クニゲル V1			ケイ砂 3 号		
ピクノメーター No.		406	407	408	374	375	376
(試料+蒸留水+ピクノメーター) 質量 $m_b$ g		169.086	170.313	172.066	213.360	209.764	209.750
$m_b$ をはかった時の内容物の温度 $T$ °C		18.0	18.0	18.0	17.0	17.0	17.0
$T$ °Cにおける蒸留水の密度 $\rho_w(T)$ g/cm <sup>3</sup>		0.99860	0.99860	0.99860	0.99877	0.99877	0.99877
温度 $T$ °Cの蒸留水を満たしたときの (蒸留水+ピクノメーター) 質量 $m_a$ g		166.486	167.474	169.234	194.600	191.122	190.472
試料の炉乾燥質量	容器 No.	0439	0388	0323	0318	0353	0530
	(試料+容器)質量 g	111.075	116.115	112.324	136.791	138.800	137.421
	容器質量 g	107.023	111.690	107.915	107.229	109.436	107.030
	$m_s$ g	4.052	4.425	4.409	29.562	29.364	30.391
土粒子の密度 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>		2.787	2.786	2.792	2.733	2.735	2.731
平均値 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>		2.788			2.733		
試料番号(深さ)		ケイ砂 5 号					
ピクノメーター No.		377	378	379			
(試料+蒸留水+ピクノメーター) 質量 $m_b$ g		214.396	182.228	208.869			
$m_b$ をはかった時の内容物の温度 $T$ °C		17.0	17.0	17.0			
$T$ °Cにおける蒸留水の密度 $\rho_w(T)$ g/cm <sup>3</sup>		0.99877	0.99877	0.99877			
温度 $T$ °Cの蒸留水を満たしたときの (蒸留水+ピクノメーター) 質量 $m_a$ g		195.453	163.544	189.826			
試料の炉乾燥質量	容器 No.	0350	0375	0392			
	(試料+容器)質量 g	139.372	136.920	136.616			
	容器質量 g	109.389	107.333	106.471			
	$m_s$ g	29.983	29.587	30.145			
土粒子の密度 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>		2.713	2.710	2.712			
平均値 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>		2.712					

※JIS A 1202 土粒子の密度試験方法、JGS 0111 土粒子の密度試験方法による。

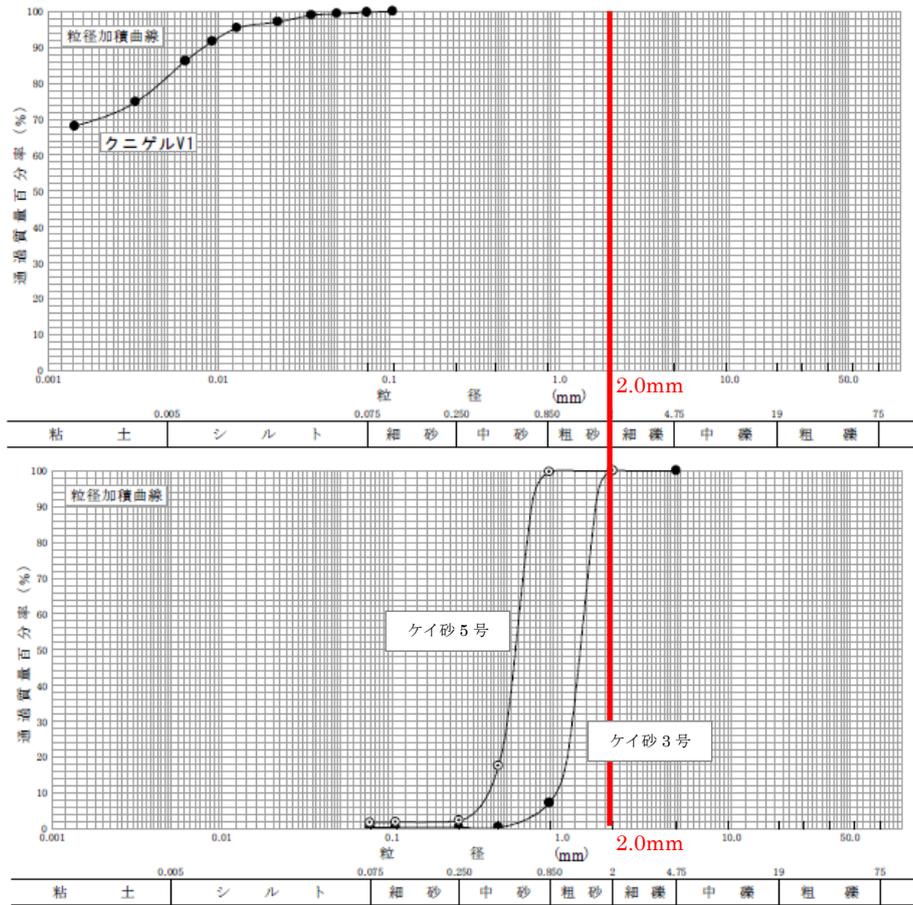


図 5.2.3-1 粒度分布測定結果

### (3) 緩衝材試験体の製作

緩衝材試験体は、多連装ランマーによる動的締固め装置を使用して図 5.2.3-2 に示すフローに従い製作した。

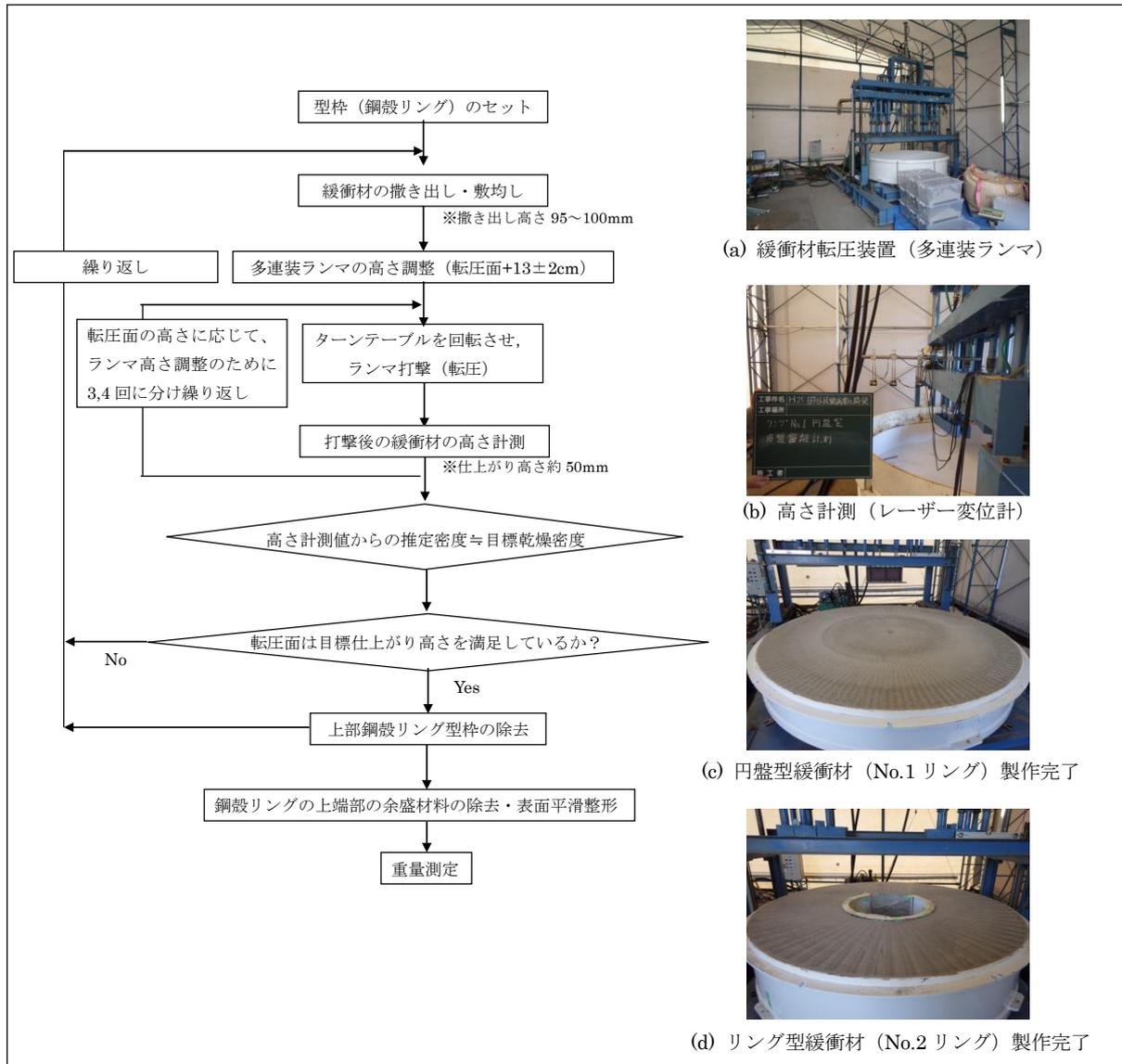


図 5.2.3-2 現場締固め管理フロー

(4) 試験体の品質確認

製作時の各試験体の寸法および物性値を表 5.2.3-3 に示す。試験体において仕様通りに管理され製作していることが確認でき平均緩衝密度 1.596Mg/m<sup>3</sup>、含水比 15.7%、飽和度 59.1%であった。

表 5.2.3-3 機能確認試験に用いた緩衝材の特性

項目	確認結果	備考
材質	配合：ベントナイト 70wt% +ケイ砂 30wt%(3号 15wt%+5号 15wt%)	緩衝材製作前の材料重量測定記録より確認
形状・寸法	No.1 リング：φ 2,259mm×h300mm No.2 リング：φ 2,260mm×h475mm No.3 リング：φ 2,260mm×h475mm No.4 リング：φ 2,260mm×h475mm No.5 リング：φ 2,260mm×h480mm No.6 リング：φ 2,260mm×h500mm 合計：φ 2,260mm×h2,505mm	巻尺による計測 リング状部は φ 860mm ※No.6 リングは製作時の高さ。試験に供する部分は h300mm とした。
重量	No.1 リング：2,220kg No.2 リング：3,000kg No.3 リング：3,005kg No.4 リング：3,040kg No.5 リング：3,020kg No.6 リング：3,705kg 合計：17,990kg	荷重計にて測定
乾燥密度 ・含水比 ・飽和度	No.1 リング：1.595 Mg/m <sup>3</sup> ・15.7%・59.2% No.2 リング：1.589Mg/m <sup>3</sup> ・15.8%・58.8% No.3 リング：1.593Mg/m <sup>3</sup> ・15.7%・59.1% No.4 リング：1.601Mg/m <sup>3</sup> ・15.8%・59.8% No.5 リング：1.596Mg/m <sup>3</sup> ・15.8%・59.4% No.6 リング：1.602Mg/m <sup>3</sup> ・15.4%・58.4% 平均：1.596Mg/m <sup>3</sup> ・15.7%・59.1%	乾燥密度は、各リングの寸法、重量および緩衝材転圧前に採取した含水比より求めた。

また、試験体各リングにおける乾燥密度と飽和度の分布をコアサンプリングにより調査した。対象とする試験体リングは、緩衝材除去による機能確認試験に供する試験体部分（No.2 リング、No.3 リング、No.5 リング、No.6 リング）とした。コアサンプリングは、緩衝材除去試験に影響が少ない位置とした（図 5.2.3-3）。乾燥密度および飽和度の測定結果を表 5.2.3-4～表 5.2.3-7 および図 5.2.3-4～図 5.2.3-7 に示す。乾燥密度および飽和度の分布は極端に変化している箇所は見られないが、底部付近がそれぞれの値が大きくなる傾向が見られる。

また、製作時と比べて乾燥密度は 1%程度高く、含水比は 1%程度小さくなっているが、概ね一致していると考えられる。

これらの結果より、試験体は仕様の品質を確保できていることを確認できた。

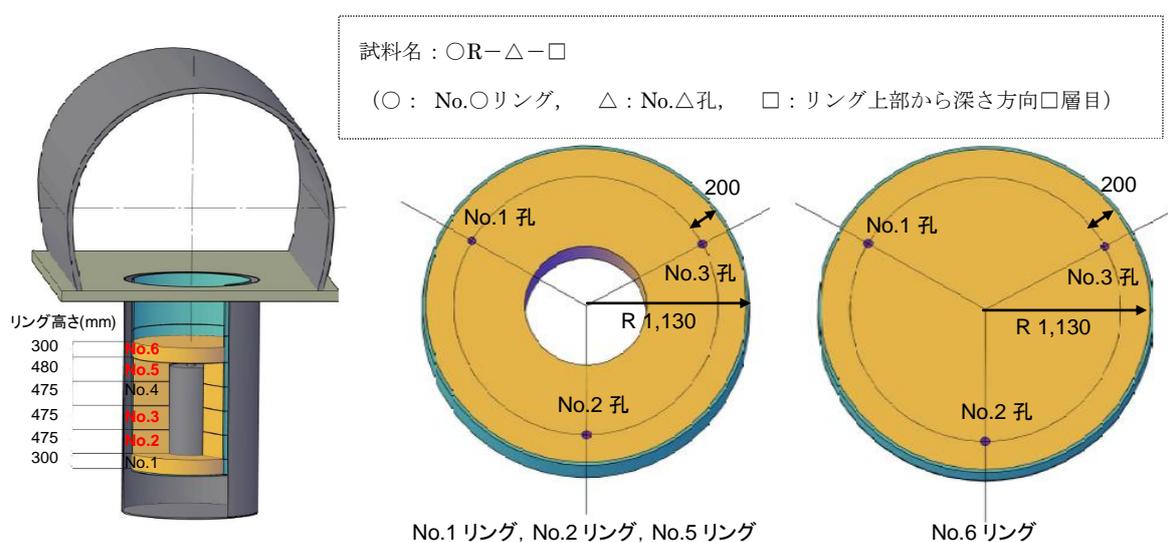


図 5.2.3-3 コアサンプリング位置

表 5.2.3-4 乾燥密度、飽和度測定結果 (No.2 リングコアサンプリング)

孔番号	転圧層	試料番号	深度 (cm)				直径 D (cm)	高さ H (cm)	体積 v (cm <sup>3</sup> )	質量 m (g)	湿潤密度 ρ t (Mg/m <sup>3</sup> )	乾燥密度 ρ d (Mg/m <sup>3</sup> )	乾燥 質量 (g)	含水比 w (%)	飽和度 Sr (%)
			0	～	平均										
No.1	上から1層目	2R-1-1	0	～	38	19	6.78	1.53	55.24	102.17	1.850	1.608	88.83	15.0	57.6
	上から2層目	2R-1-2	38	～	75	57	6.73	1.30	46.24	84.82	1.834	1.596	73.82	14.9	56.2
	上から3層目	2R-1-3	75	～	125	100	6.72	4.23	150.03	272.90	1.819	1.579	236.83	15.2	56.0
	上から4層目	2R-1-4	125	～	175	150	6.71	4.01	141.80	258.24	1.821	1.577	223.60	15.5	56.8
	上から5層目	2R-1-5	175	～	225	200	6.78	4.42	159.58	290.12	1.818	1.573	251.04	15.6	56.7
	上から6層目	2R-1-6	225	～	275	250	6.78	4.44	160.30	295.99	1.846	1.610	258.02	14.7	56.6
	上から7層目	2R-1-7	275	～	325	300	6.74	3.90	139.15	254.75	1.831	1.585	220.48	15.5	57.6
	上から8層目	2R-1-8	325	～	375	350	6.78	4.36	157.41	290.06	1.843	1.602	252.14	15.0	57.2
	上から9層目	2R-1-9	375	～	425	400	6.78	4.08	147.30	274.01	1.860	1.621	238.74	14.8	57.8
	上から10層目	2R-1-10	425	～	475	450	6.78	3.78	136.47	258.00	1.891	1.639	223.69	15.3	61.6
No.2	上から1層目	2R-2-1	0	～	38	19	6.78	2.11	76.18	142.03	1.864	1.619	123.33	15.2	59.1
	上から2層目	2R-2-2	38	～	75	57	6.69	2.30	80.85	148.63	1.838	1.602	129.49	14.8	56.2
	上から3層目	2R-2-3	75	～	125	100	6.71	2.49	88.05	160.81	1.826	1.585	139.60	15.2	56.4
	上から4層目	2R-2-4	125	～	175	150	6.59	3.53	120.40	219.02	1.819	1.581	190.36	15.1	55.5
	上から5層目	2R-2-5	175	～	225	200	6.72	2.18	77.32	141.50	1.830	1.587	122.73	15.3	56.9
	上から6層目	2R-2-6	225	～	275	250	6.78	3.04	109.75	199.74	1.820	1.576	172.98	15.5	56.6
	上から7層目	2R-2-7	275	～	325	300	6.76	4.47	160.43	296.61	1.849	1.609	258.19	14.9	57.2
	上から8層目	2R-2-8	325	～	375	350	6.79	3.92	141.94	264.59	1.864	1.621	230.15	15.0	58.6
	上から9層目	2R-2-9	375	～	425	400	6.72	3.84	136.19	254.68	1.870	1.625	221.28	15.1	59.4
	上から10層目	2R-2-10	425	～	475	450	6.78	3.73	134.67	256.12	1.902	1.649	222.08	15.3	62.5
No.3	上から1層目	2R-3-1	0	～	38	19	6.76	1.84	66.04	123.36	1.868	1.621	107.08	15.2	59.5
	上から2層目	2R-3-2	38	～	75	57	6.62	2.68	92.24	172.38	1.869	1.626	150.02	14.9	58.8
	上から3層目	2R-3-3	75	～	125	100	6.79	4.21	152.31	284.65	1.869	1.626	247.61	15.0	58.9
	上から4層目	2R-3-4	125	～	175	150	6.70	2.21	77.92	144.21	1.851	1.613	125.65	14.8	57.1
	上から5層目	2R-3-5	175	～	225	200	6.69	3.35	117.76	215.05	1.826	1.589	187.06	15.0	55.8
	上から6層目	2R-3-6	225	～	275	250	6.68	3.13	109.70	201.68	1.839	1.596	175.07	15.2	57.3
	上から7層目	2R-3-7	275	～	325	300	6.63	3.99	137.75	257.49	1.869	1.627	224.05	14.9	58.9
	上から8層目	2R-3-8	325	～	375	350	6.65	4.48	155.60	290.09	1.864	1.621	252.30	15.0	58.6
	上から9層目	2R-3-9	375	～	425	400	6.77	4.41	158.75	298.36	1.879	1.636	259.75	14.9	59.5
	上から10層目	2R-3-10	425	～	475	450	6.78	3.40	122.75	233.86	1.905	1.653	202.87	15.3	62.7
平均											1.608	平均	58.0		
※土粒子の密度=2.768Mg/m <sup>3</sup>															

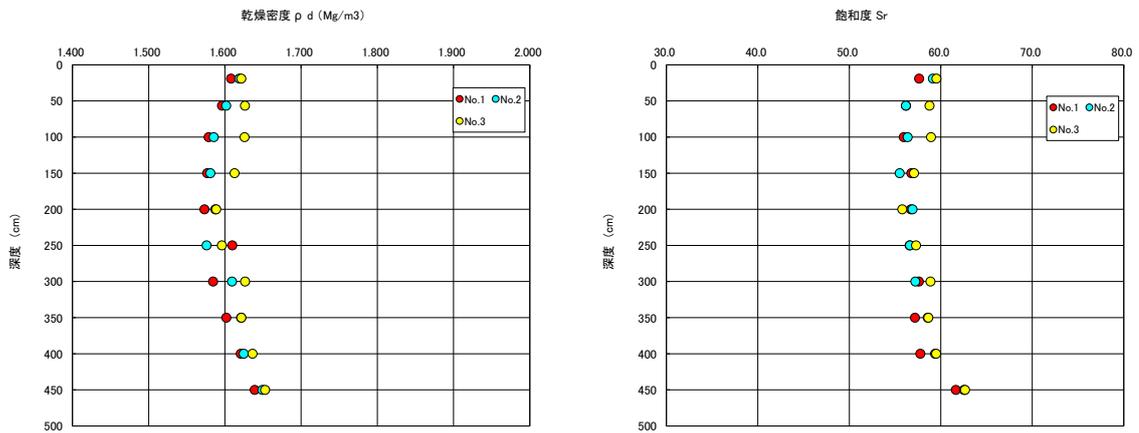


図 5.2.3-4 乾燥密度、飽和度測定結果 (No.2 リング コアサンプリング)

表 5.2.3-5 乾燥密度、飽和度測定結果 (No.3 リングコアサンプリング)

孔番号	転圧層	試料番号	深度 (cm)				直径	高さ	体積	質量	湿潤密度	乾燥密度	乾燥質量	含水比	飽和度
					平均	(cm)	(cm)	(cm <sup>3</sup> )	(g)	(Mg/m <sup>3</sup> )	(Mg/m <sup>3</sup> )	(g)	(%)	(%)	
No.1	上から1層目	3R-1-1	0	~	38	19	6.78	2.49	89.90	165.65	1.843	1.601	143.95	15.1	57.3
	上から2層目	3R-1-2	38	~	75	57	6.78	2.06	74.37	139.29	1.873	1.631	121.30	14.8	58.9
	上から3層目	3R-1-3	75	~	125	100	6.74	3.48	124.16	229.84	1.851	1.606	199.42	15.3	58.4
	上から4層目	3R-1-4	125	~	175	150	6.59	3.51	119.72	222.17	1.856	1.611	192.82	15.2	58.6
	上から5層目	3R-1-5	175	~	225	200	6.77	4.25	152.99	278.68	1.822	1.577	241.19	15.5	56.9
	上から6層目	3R-1-6	225	~	275	250	6.78	3.98	143.69	263.46	1.834	1.593	228.92	15.1	56.6
	上から7層目	3R-1-7	275	~	325	300	6.76	3.84	137.82	261.29	1.896	1.644	226.64	15.3	61.9
	上から8層目	3R-1-8	325	~	375	350	6.77	3.94	141.83	262.63	1.852	1.604	227.54	15.4	58.9
	上から9層目	3R-1-9	375	~	425	400	6.77	3.86	138.95	260.39	1.874	1.625	225.81	15.3	60.3
	上から10層目	3R-1-10	425	~	475	450	6.78	3.98	143.69	272.94	1.899	1.645	236.33	15.5	62.8
No.2	上から1層目	3R-2-1	0	~	38	19	6.78	2.60	93.87	171.52	1.827	1.586	148.92	15.2	56.4
	上から2層目	3R-2-2	38	~	75	57	6.77	2.66	95.75	181.89	1.900	1.648	157.79	15.3	62.2
	上から3層目	3R-2-3	75	~	125	100	6.71	3.87	136.85	255.79	1.869	1.621	221.86	15.3	59.8
	上から4層目	3R-2-4	125	~	175	150	6.72	3.82	135.49	247.80	1.829	1.587	215.02	15.2	56.7
	上から5層目	3R-2-5	175	~	225	200	6.76	4.32	155.05	285.42	1.841	1.595	247.28	15.4	58.0
	上から6層目	3R-2-6	225	~	275	250	6.78	4.27	154.16	288.97	1.874	1.623	250.27	15.5	60.7
	上から7層目	3R-2-7	275	~	325	300	6.75	4.23	151.37	282.65	1.867	1.622	245.48	15.1	59.3
	上から8層目	3R-2-8	325	~	375	350	6.70	2.57	90.61	169.17	1.867	1.620	146.76	15.3	59.6
	上から9層目	3R-2-9	375	~	425	400	6.73	3.86	137.31	252.06	1.836	1.595	219.06	15.1	56.7
	上から10層目	3R-2-10	425	~	475	450	6.78	3.80	137.19	259.15	1.889	1.640	224.95	15.2	61.2
No.3	上から1層目	3R-3-1	0	~	38	19	6.78	1.78	64.26	119.20	1.855	1.613	103.67	15.0	57.9
	上から2層目	3R-3-2	38	~	75	57	6.78	2.45	88.45	164.47	1.859	1.613	142.69	15.3	59.0
	上から3層目	3R-3-3	75	~	125	100	6.77	3.47	124.91	233.11	1.866	1.631	203.70	14.4	57.3
	上から4層目	3R-3-4	125	~	175	150	6.70	3.36	118.46	219.53	1.853	1.605	190.18	15.4	59.0
	上から5層目	3R-3-5	175	~	225	200	6.77	3.38	121.67	228.93	1.882	1.633	198.68	15.2	60.6
	上から6層目	3R-3-6	225	~	275	250	6.77	3.10	111.59	207.55	1.860	1.612	179.85	15.4	59.4
	上から7層目	3R-3-7	275	~	325	300	6.77	3.98	143.27	267.73	1.869	1.620	232.06	15.4	60.0
	上から8層目	3R-3-8	325	~	375	350	6.70	3.73	131.51	245.11	1.864	1.615	212.38	15.4	59.7
	上から9層目	3R-3-9	375	~	425	400	6.76	2.68	96.19	179.38	1.865	1.617	155.51	15.3	59.7
	上から10層目	3R-3-10	425	~	475	450	6.75	2.77	99.12	189.17	1.908	1.659	164.46	15.0	62.2
平均											1.616	平均	59.2		
※土粒子の密度=2.768Mg/m <sup>3</sup>															

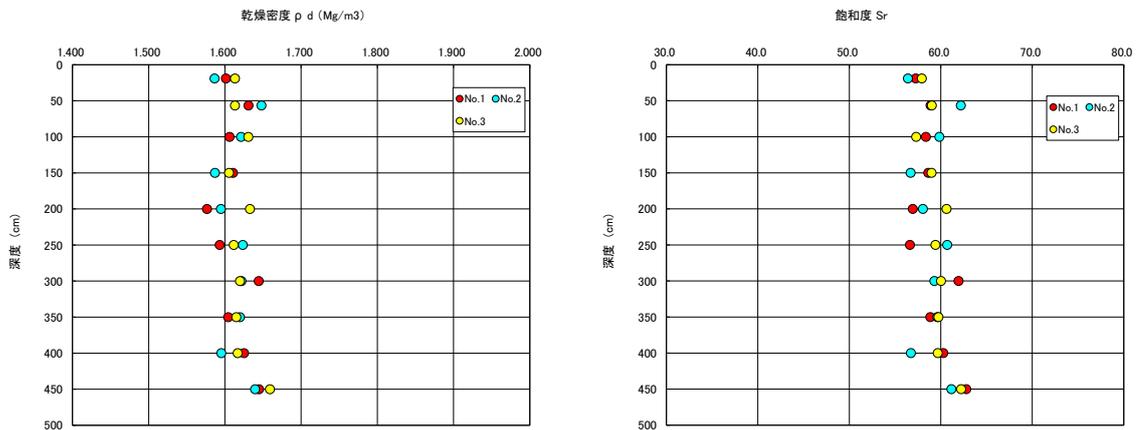


図 5.2.3-5 乾燥密度、飽和度測定結果 (No.3 リング コアサンプリング)

表 5.2.3-6 乾燥密度、飽和度測定結果 (No.5 リングコアサンプリング)

孔番号	転圧層	試料番号	深度 (mm)			直径 D (cm)	高さ H (cm)	体積 v (cm <sup>3</sup> )	質量 m (g)	湿潤密度 ρ t (Mg/m <sup>3</sup> )	乾燥密度 ρ d (Mg/m <sup>3</sup> )	乾燥 質量 (g)	含水比 w (%)	飽和度 Sr (%)	
			0	～	平均										
No.1	上から1層目	5R-1-1	0	～	40	20	6.78	1.60	57.77	105.63	1.829	1.586	91.63	15.3	56.8
	上から2層目	5R-1-2	40	～	80	60	6.67	1.94	67.79	124.72	1.840	1.599	108.36	15.1	57.1
	上から3層目	5R-1-3	80	～	130	105	6.66	3.46	120.54	226.91	1.883	1.633	196.82	15.3	60.9
	上から4層目	5R-1-4	130	～	180	155	6.74	3.75	133.80	254.54	1.902	1.653	221.10	15.1	62.0
	上から5層目	5R-1-5	180	～	230	205	6.74	3.65	130.23	245.12	1.882	1.633	212.61	15.3	60.9
	上から6層目	5R-1-6	230	～	280	255	6.78	4.60	166.08	311.06	1.873	1.626	270.10	15.2	59.8
	上から7層目	5R-1-7	280	～	330	305	6.74	4.09	145.93	271.51	1.861	1.615	235.72	15.2	58.9
	上から8層目	5R-1-8	330	～	380	355	6.78	3.99	144.05	270.45	1.877	1.633	235.30	14.9	59.5
	上から9層目	5R-1-9	380	～	430	405	6.74	3.84	137.01	259.13	1.891	1.643	225.08	15.1	61.1
	上から10層目	5R-1-10	430	～	480	455	6.77	4.80	172.79	327.45	1.895	1.645	284.29	15.2	61.6
No.2	上から1層目	5R-2-1	0	～	40	20	6.74	2.51	89.55	162.81	1.818	1.572	140.79	15.6	56.9
	上から2層目	5R-2-2	40	～	80	60	6.72	2.53	89.73	165.88	1.849	1.606	144.14	15.1	57.7
	上から3層目	5R-2-3	80	～	130	105	6.72	3.74	132.65	246.31	1.857	1.611	213.70	15.3	58.8
	上から4層目	5R-2-4	130	～	180	155	6.78	3.84	138.64	259.15	1.869	1.622	224.85	15.3	59.8
	上から5層目	5R-2-5	180	～	230	205	6.79	4.05	146.65	266.27	1.816	1.575	230.93	15.3	55.9
	上から6層目	5R-2-6	230	～	280	255	6.79	4.20	152.08	282.58	1.858	1.611	245.04	15.3	59.1
	上から7層目	5R-2-7	280	～	330	305	6.78	4.09	147.66	269.46	1.825	1.582	233.59	15.4	56.7
	上から8層目	5R-2-8	330	～	380	355	6.79	4.36	157.88	291.83	1.848	1.603	253.05	15.3	58.4
	上から9層目	5R-2-9	380	～	430	405	6.78	4.04	145.86	273.24	1.873	1.624	236.92	15.3	60.3
	上から10層目	5R-2-10	430	～	480	455	6.76	3.84	137.82	262.09	1.902	1.649	227.28	15.3	62.5
No.3	上から1層目	5R-3-1	0	～	40	20	6.67	2.66	92.94	168.78	1.816	1.579	146.74	15.0	55.2
	上から2層目	5R-3-2	40	～	80	60	6.66	2.73	95.10	172.73	1.816	1.574	149.72	15.4	56.1
	上から3層目	5R-3-3	80	～	130	105	6.71	2.73	96.54	182.00	1.885	1.637	158.01	15.2	60.8
	上から4層目	5R-3-4	130	～	180	155	6.67	3.59	125.44	235.40	1.877	1.629	204.36	15.2	60.1
	上から5層目	5R-3-5	180	～	230	205	6.78	3.98	143.69	266.07	1.852	1.609	231.14	15.1	58.0
	上から6層目	5R-3-6	230	～	280	255	6.79	3.87	140.13	255.90	1.826	1.586	222.30	15.1	56.2
	上から7層目	5R-3-7	280	～	330	305	6.78	4.36	157.41	285.97	1.817	1.575	247.92	15.3	56.1
	上から8層目	5R-3-8	330	～	380	355	6.79	4.02	145.56	267.48	1.838	1.594	232.04	15.3	57.4
	上から9層目	5R-3-9	380	～	430	405	6.73	4.15	147.63	276.05	1.870	1.625	239.95	15.0	59.2
	上から10層目	5R-3-10	430	～	480	455	6.78	3.68	132.86	254.25	1.914	1.661	220.65	15.2	63.2
										平均	1.613	平均	58.9		

※土粒子の密度=2.768Mg/m<sup>3</sup>

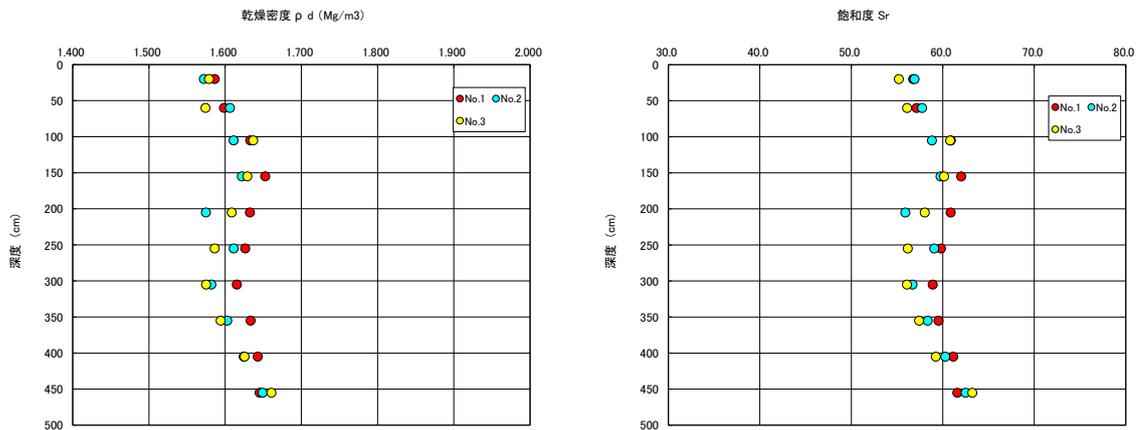


図 5.2.3-6 乾燥密度、飽和度測定結果 (No.5 リング コアサンプリング)

表 5.2.3-7 乾燥密度、飽和度測定結果 (No.6 リングコアサンプリング)

孔番号	転圧層	試料番号	深度 (mm)				直径	高さ	体積	質量	湿潤密度	乾燥密度	乾燥質量	含水比	飽和度
					平均	(cm)	(cm)	(cm <sup>3</sup> )	(g)	(Mg/m <sup>3</sup> )	(Mg/m <sup>3</sup> )	(g)	(%)	(%)	
No.1	上から1層目	6R-1-1	0	~	50	25	6.78	3.53	127.45	238.72	1.873	1.630	207.80	14.9	59.0
	上から2層目	6R-1-2	50	~	100	75	6.79	3.13	113.34	211.58	1.867	1.623	183.90	15.1	59.0
	上から3層目	6R-1-3	100	~	150	125	6.79	4.09	148.10	271.20	1.831	1.592	235.77	15.0	56.3
	上から4層目	6R-1-4	150	~	200	175	6.78	3.44	124.20	226.31	1.822	1.586	196.97	14.9	55.3
	上から5層目	6R-1-5	200	~	250	225	6.78	3.73	134.67	248.06	1.842	1.603	215.85	14.9	56.8
	上から6層目	6R-1-6	250	~	300	275	6.78	3.51	126.72	238.59	1.883	1.635	207.17	15.2	60.6
No.2	上から1層目	6R-2-1	0	~	50	25	6.74	2.99	106.68	195.96	1.837	1.598	170.50	14.9	56.5
	上から2層目	6R-2-2	50	~	100	75	6.78	3.31	119.50	216.93	1.815	1.576	188.38	15.2	55.5
	上から3層目	6R-2-3	100	~	150	125	6.70	3.88	136.80	248.10	1.814	1.577	215.70	15.0	55.0
	上から4層目	6R-2-4	150	~	200	175	6.78	3.78	136.47	248.40	1.820	1.582	215.94	15.0	55.5
	上から5層目	6R-2-5	200	~	250	225	6.78	3.42	123.47	230.48	1.867	1.621	200.18	15.1	59.2
	上から6層目	6R-2-6	250	~	300	275	6.77	3.16	113.75	217.13	1.909	1.658	188.65	15.1	62.5
No.3	上から1層目	6R-3-1	0	~	50	25	6.77	3.36	120.95	222.06	1.836	1.600	193.48	14.8	56.0
	上から2層目	6R-3-2	50	~	100	75	6.77	3.25	116.99	215.24	1.840	1.600	187.23	15.0	56.8
	上から3層目	6R-3-3	100	~	150	125	6.77	3.58	128.87	239.14	1.856	1.613	207.89	15.0	58.1
	上から4層目	6R-3-4	150	~	200	175	6.75	3.94	140.99	261.59	1.855	1.612	227.30	15.1	58.2
	上から5層目	6R-3-5	200	~	250	225	6.75	2.89	103.42	193.60	1.872	1.626	168.11	15.2	59.7
	上から6層目	6R-3-6	250	~	300	275	6.80	3.67	133.28	254.06	1.906	1.654	220.42	15.3	62.7
										平均	1.610	平均	57.9		

※土粒子の密度=2.768Mg/m<sup>3</sup>

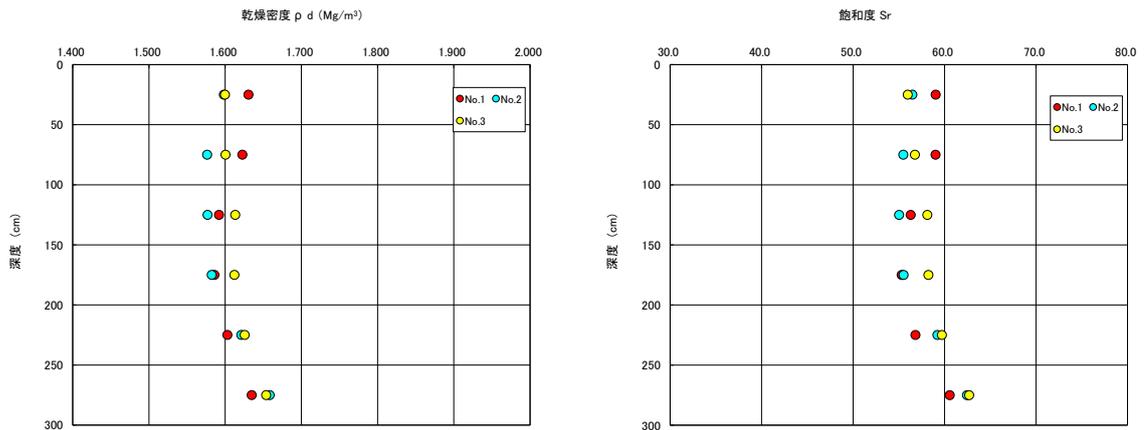


図 5.2.3-7 乾燥密度、飽和度測定結果 (No.6 リング コアサンプリング)

### (5) 試験体の設置

試験体および模擬廃棄体を処分孔に設置し、試験体と模擬廃棄体との隙間にはペレットを自然落下充填（有効ペントナイト密度  $1.37\text{Mg/m}^3$ ）した（図 5.2.3-8）。試験体の設置手順を図 5.2.3-9、設置状況を図 5.2.3-10 および図 5.2.3-11 に示す。

有効ペントナイト密度は、充填する隙間の容積とペレットを充填した重量、含水比から算出した。有効ペントナイト密度の算出結果を表 5.2.3-8 に示す。

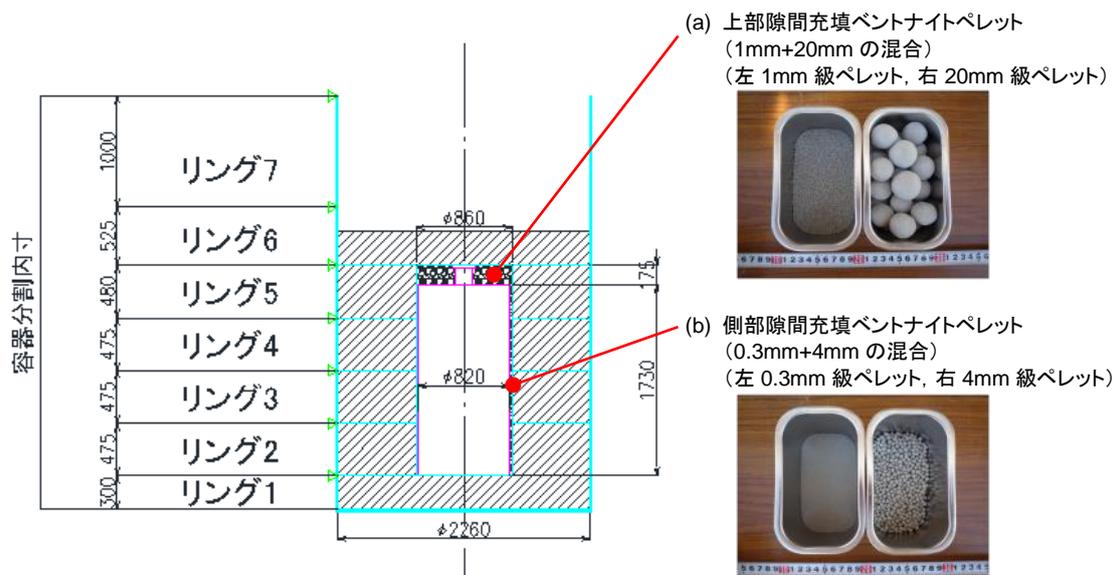


図 5.2.3-8 充填材料と充填位置

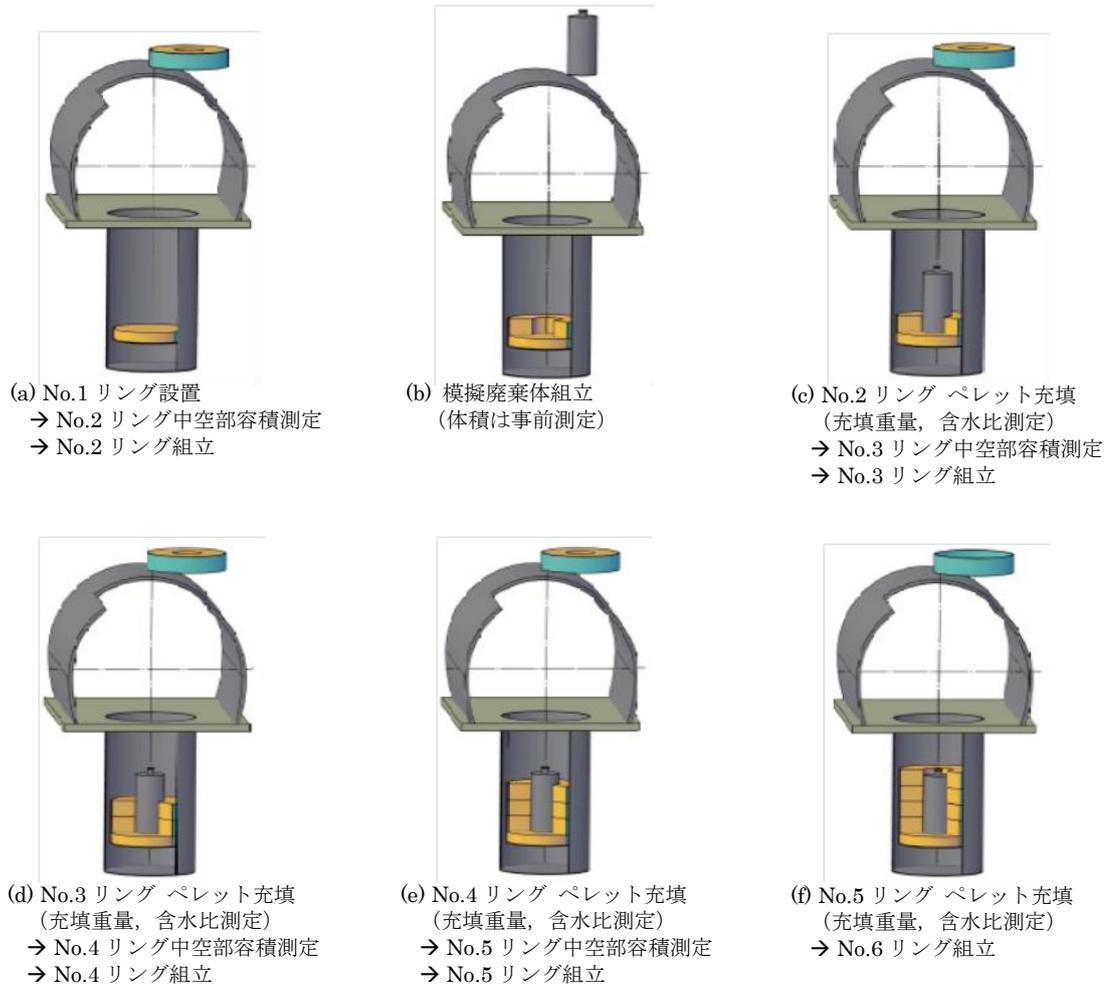


図 5.2.3-9 模擬廃棄体と緩衝材間のペレット充填密度測定手順

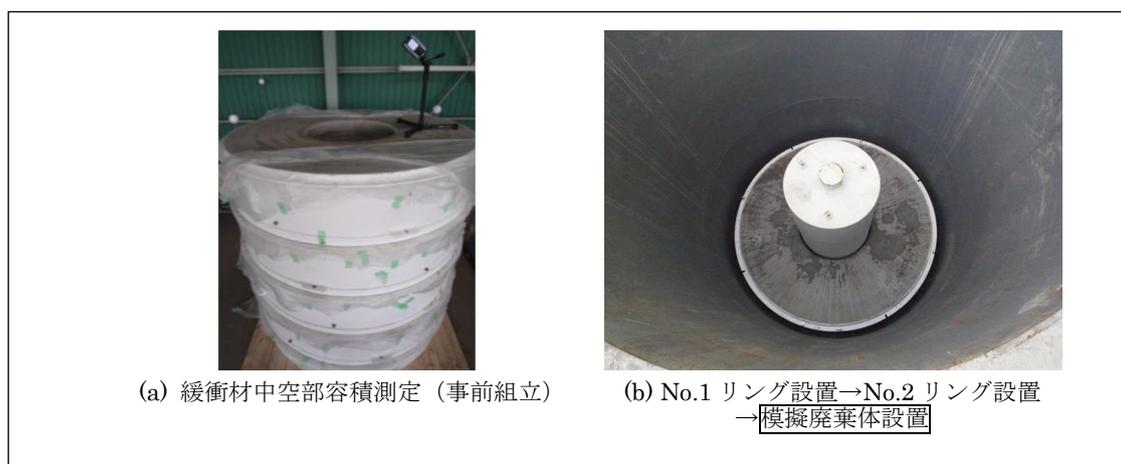


図 5.2.3-10 試験体設置状況 (模擬廃棄体)



(a) No.2 リングペレット充填  
→No.3 リング設置



(b) No.3 リングペレット充填  
→No.4 リング設置



(c) No.4 リングペレット充填  
→No.5 リング設置



(d) No.5 リングペレット充填



(c) No.6 リング設置



(d) No.7 リング設置

図 5.2.3-11 試験体設置状況 (緩衝材)

表 5.2.3-8 模擬廃棄体と緩衝材間のペレット充填乾燥密度（有効ベントナイト密度）

(a) 上部隙間充填

リング No.	投入量 [g]	層厚 [mm]	底面からの高さ※1 [mm]	平均半径 [mm]	容積 [mm <sup>3</sup> ] (廃棄体控除)	上部かさ密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]	重量平均含水比※2 [%]	上部充てん乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]
5	158150	175	1905	430.113	98271560.7	1.609	6.65	1.509

※1) No.1 リング上面を底面としたときの高さ

※2) 1mm 級ペレット (40wt%) : w=5.12% 20mm 級ペレット (60wt%) : w=7.68%

(b) 側部隙間充填

リング No.	投入量 [g]	層厚 [mm]	底面からの高さ※1 [mm]	平均半径 [mm]	容積 [mm <sup>3</sup> ] (廃棄体控除)	側部かさ密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]	重量平均含水比※2 [%]	側部充てん乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]
2	7392	96	96	430.179	5113083.0	1.446	5.56	1.370
	7392	95	191	429.978	5008360.7	1.476	5.56	1.398
	7392	97	288	429.707	5042830.5	1.466	5.56	1.389
	7392	95	383	429.771	4955176.7	1.492	5.56	1.413
2~3	7392	96	479	430.000	5066721.1	1.459	5.56	1.382
3	7392	97	576	429.682	5036131.6	1.468	5.56	1.390
	7392	96	672	429.663	4979366.3	1.485	5.56	1.406
	7392	99	771	429.935	5207768.1	1.419	5.56	1.345
	7392	95	866	430.040	5024153.5	1.471	5.56	1.394
3~4	7392	98	964	430.022	5178025.5	1.428	5.56	1.352
4	7392	97	1061	429.848	5079621.5	1.455	5.56	1.379
	7392	100	1161	429.691	5194353.7	1.423	5.56	1.348
	7392	97	1258	429.616	5018857.9	1.473	5.56	1.395
	7392	98	1356	429.597	5065583.8	1.459	5.56	1.382
	3696	48	1404	430.348	2578528.8	1.433	5.56	1.358
4~5	7392	89	1493	431.285	5006878.6	1.476	5.56	1.399
5	7392	96	1589	430.432	5178931.5	1.427	5.56	1.352
	7392	95	1684	430.316	5095029.6	1.451	5.56	1.374
	3494.7	46	1730	430.107	2441091.3	1.432	5.56	1.356

※1) No.1 リング上面を底面としたときの高さ

※2) 0.3mm 級ペレット (50wt%) : w=6.91% 4mm 級ペレット (50wt%) : w=4.20%

## 5.3 試験結果

緩衝材除去装置の機能確認として緩衝材除去試験を実施した。試験により得られたデータにより緩衝材除去特性、塩水リユース特性について機能を確認する。遠隔操作による安全性については、これら 2 特性に関するデータの取得性および装置動作の安定性・確実性により評価する。

### 5.3.1 塩水リユース特性

緩衝材除去に関わる塩水およびスラリーの処理サイクルの安定性および確実性の確認を目的として以下の 3 項目についてデータを取得した。緩衝材除去試験は、昼間の試験となったので塩水リユース設備の連続稼働時間は最大 7 時間である。

- 塩水噴射・スラリー吸引機能：塩水・スラリーの給排水能力の確認
- 固液分離機能：スラリーの固液分離機能、リユースの SS 品質
- リユース塩水の品質：塩分濃度、pH 等性状の確認

#### (1) 塩水噴射・スラリー吸引機能

本試験における塩水噴射条件は、噴射圧力 0.6MPa、ノズル径  $\phi 2.2\text{mm}$ 、下向き噴射時ノズル数 16 ノズル $\times$ 2 環（横向き：16 ノズル $\times$ 1 環）である。「H24 回収高度化」と同様に緩衝材除去装置に設置した 1 塩水噴射ノズル当たりの能力は、噴射圧力 0.6MPa の時、塩水噴射流量約 7.8L/min（全下向きノズル：32 ノズルで 250L/min=15m<sup>3</sup>/h）である。流量計設置箇所および流量測定（監視）状況および塩水噴射ノズルとスラリー吸引口の配置を図 5.3.1-1、図 5.3.1-2 に示す。

また、試験ケース 1：累積 28 時間以降、吸引流量がバランスしない現象が見られたため、ケース 2 においては一定の噴射流量が確保できるよう別途補助吸引ポンプを追加し使用した。

塩水噴射・スラリー吸引流量の測定結果についてケース 1、ケース 2 を図 5.3.1-3、図 5.3.1-4 に示す。これより得られた知見を以下に示す。

- 試験ケース 1：累積 13 時間までは、塩水噴射流量は概ね 15m<sup>3</sup>/h の流量で推移し、スラリー吸引流量は一時的に 15m<sup>3</sup>/h 以上となっていることから、塩水は一定の水位（10cm）を保持し塩水噴射とスラリー吸引のバランスがとれている（図 5.3.1-5）。このとき、緩衝材除去位置は緩衝材 No.6（0~300mm）に対応する。
- 試験ケース 1：累積 13 時間から徐々に塩水噴射とスラリー吸引のバランスが崩れ、吸引流量が低下している（図 5.3.1-5）。
- 試験ケース 1：累積 28 時間以降、塩水噴射とスラリー吸引のバランスがとれず所定の水位を大幅に超過する傾向が見られたため、塩水噴射を間欠的に使用し流量を抑制する必要がある。
- 試験ケース 2：塩水噴射流量は 15.0m<sup>3</sup>/h を下回るものの平均 14.7m<sup>3</sup>/h で推移しており安

定している。一方、吸引ポンプを追加したもののスラリー吸引は水位が上昇する傾向が見られ塩水噴射とスラリー吸引のバランスがとれていない。

- スラリー吸引の能力不足について、揚程、湛水水位、吸引ホースのサイズ等を考慮してポンプの吸引圧・流量の改善が必要である。

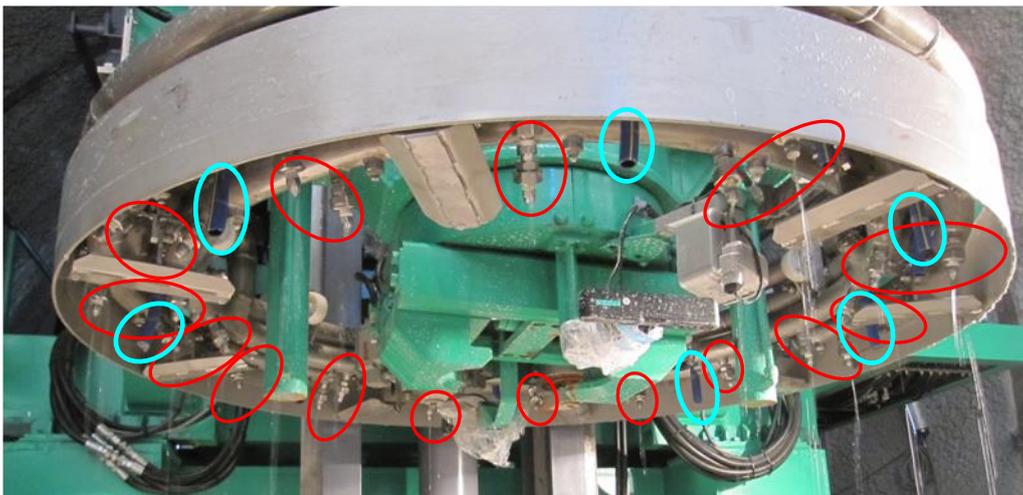


(a) 流量計設置箇所



(b) 流量測定（監視）状況

図 5.3.1-1 塩水噴射・スラリー吸引流量の測定結果状況



○ 塩水噴射ノズル(下向き 32 箇所)

○ スラリー吸引口(散水ホース, 8 箇所)

※一部の吸引口の位置は設定水位 10cm に合わせる

図 5.3.1-2 塩水噴射ノズル・スラリー吸引口の配置

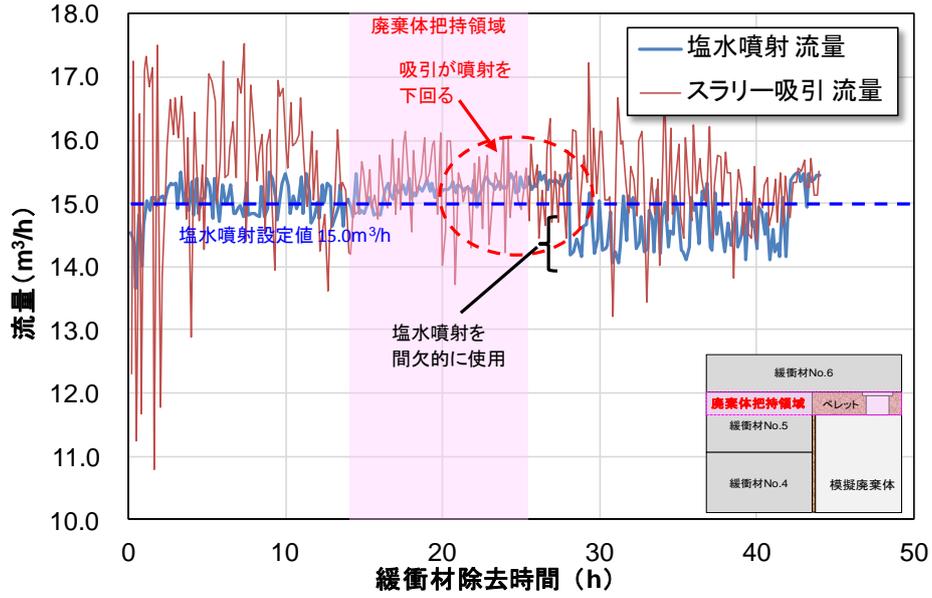


図 5.3.1-3 塩水噴射・スラリー吸引流量の測定結果（ケース 1）

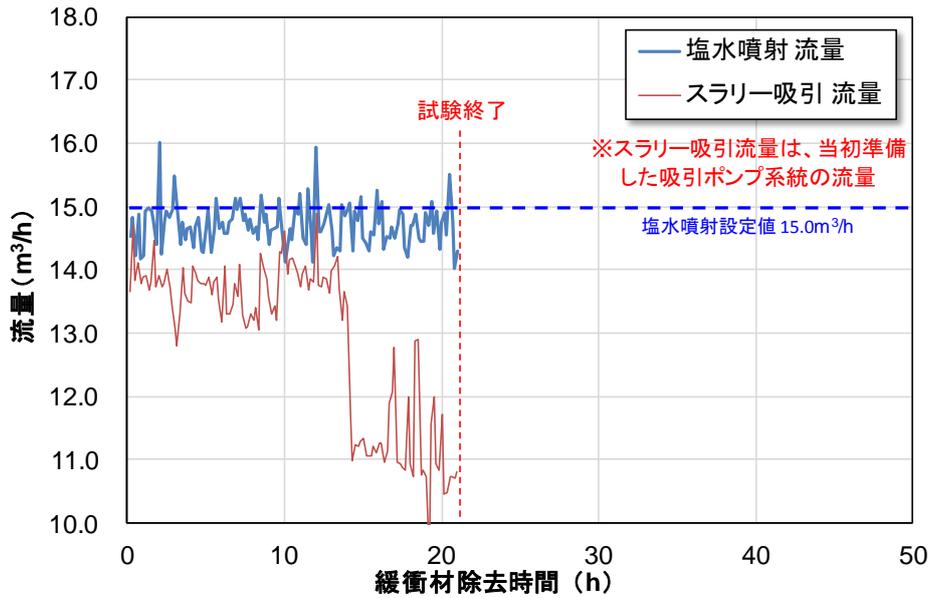


図 5.3.1-4 塩水噴射・スラリー吸引流量の測定結果（ケース 2）

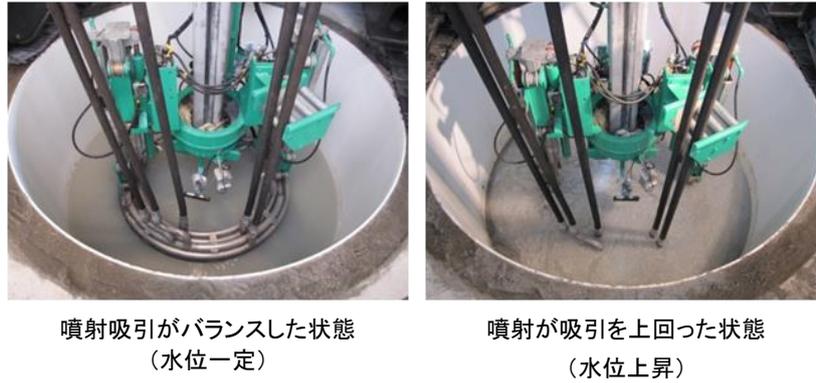


図 5.3.1-5 塩水噴射・スラリー吸引流量のバランス状況

## (2) 固液分離機能

固液分離装置（シックナー）によるスラリーの固液分離機能およびリユースする塩水の SS 濃度の確認を行った。測定結果についてケース 1、ケース 2 を図 5.3.1-6、図 5.3.1-7 に示す。また、吸引排出したスラリーを用いて沈降試験を実施した。試験状況を図 5.3.1-8、スラリーの沈降状況を図 5.3.1-9 に示す。

これらより得られた知見を以下に示す。

- 処理前のスラリーの SS 濃度は 1,000mg/L～6,000mg/L と変化が大きいものの、安定して固液分離処理ができています。
- 1 時間平均の処理前のスラリーの SS 濃度についてケース 1 では平均 3,236mg/L（最大 6,059mg/L）、ケース 2 では平均 2,495mg/L（最大 5,058mg/L）であった。ケース 1 とケース 2 の SS 濃度の違いは対象とする除去する緩衝材の範囲の違い（円盤状とリング状）と考えられる。
- 処理した塩水の SS 濃度についてケース 1 では平均 329mg/L（最大 548mg/L）、ケース 2 では平均 311mg/L（最大 520mg/L）であり塩水をリユースするには十分低い SS 濃度であった。
- スラリー沈降試験では、スラリー濃度により沈降状況が異なり、高濃度の場合沈降圧密が進み、低濃度の場合には沈降量の増加が見られる。
- スラリー沈降試験において、試験開始後 10 分には全体量 1000mL に対し最小の沈降量でも 70mL の位置（高さ 30cm から 2.1cm の位置）となっている。このときの沈降速度は 2.79cm/min である。固液分離装置の設計手法より、装置の水面の面積と流量から沈降速度を下記より計算できる。

$$A = Q/U_{\min}$$

$$A=2.3 \times 8.5=8.05 : \text{シックナーの水面の面積 (m}^2\text{)}$$

$$Q=15.0 : \text{オーバーフローの流量 (m}^3\text{/h)}$$

$U_{\min}$  : 沈降する限界粒子の終末沈降速度

$$U_{\min}=15.0 / 8.05 = 1.86 \text{ (m/h)} = 3.1 \text{ (cm/min)}$$

したがって、実際のスラリーの沈降速度は、設計値に対して1割程度低い。しかし、固液分離した塩水のSS濃度はリユースには影響が少ない範囲にある。

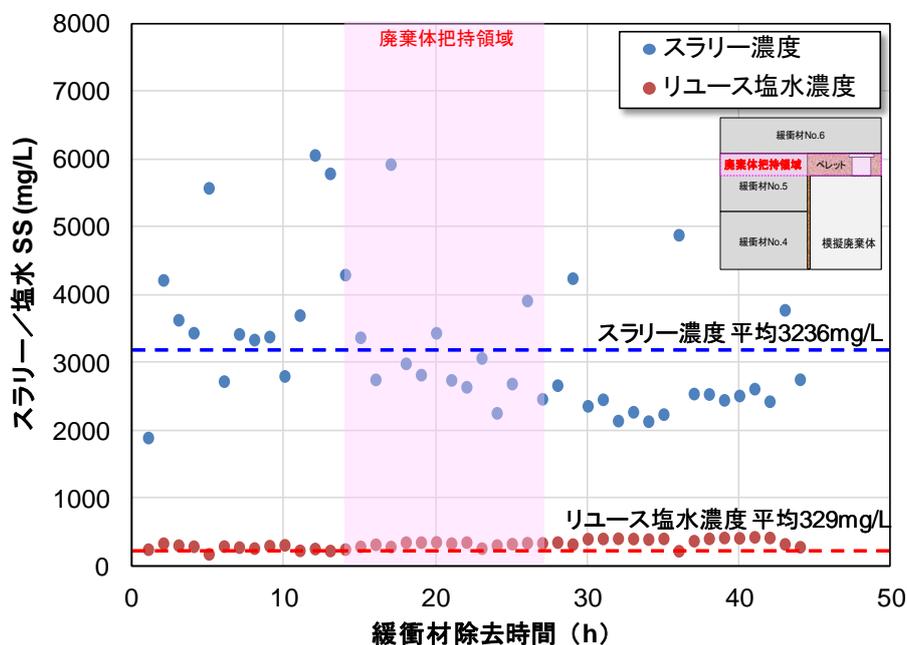


図 5.3.1-6 固液分離設備前後の SS 濃度 (ケース 1)

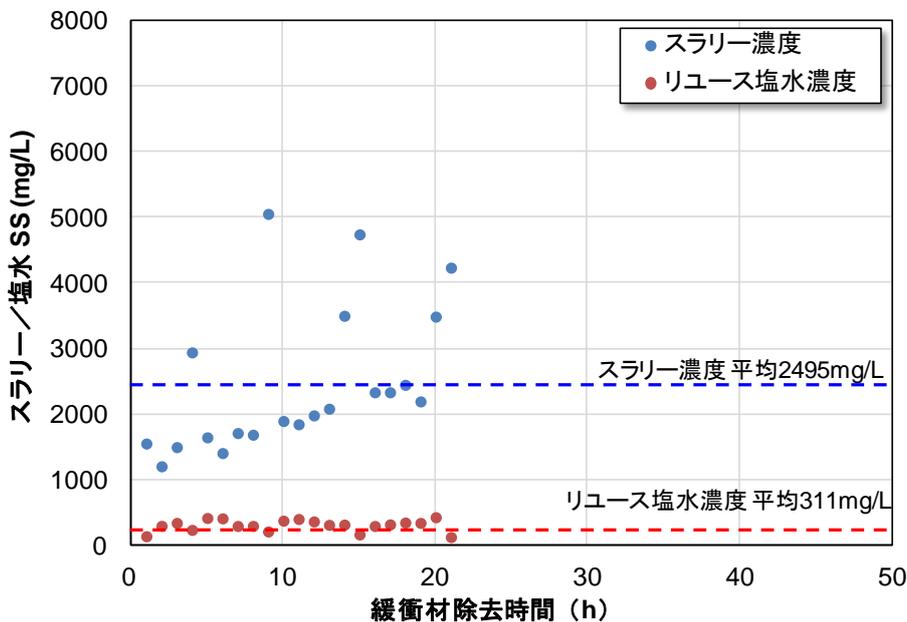


図 5.3.1-7 固液分離設備前後の SS 濃度 (ケース 2)

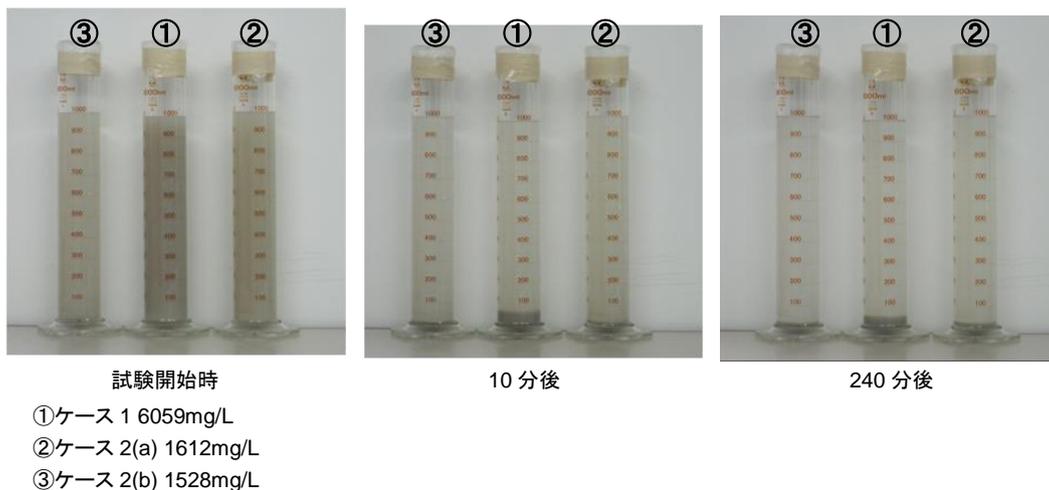


図 5.3.1-8 沈降試験状況

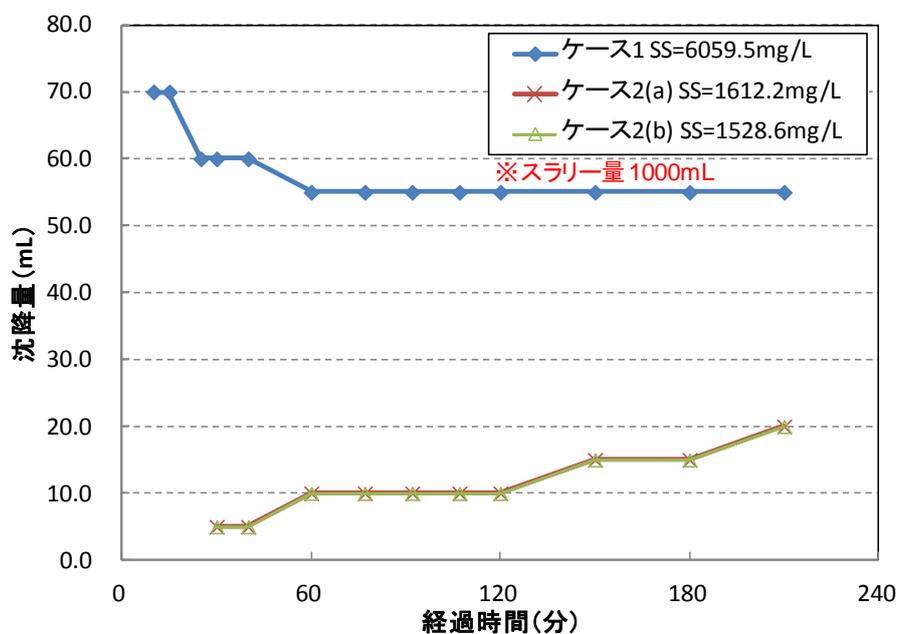


図 5.3.1-9 沈降試験によるスラリーの沈降（濃縮）の経時変化

### (3) リユース塩水の品質

リユース塩水の品質の測定状況を図 5.3.1-10、ケース 1、ケース 2 の測定結果について図 5.3.1-11～図 5.3.1-14 に示す。これより得られた知見を以下に示す。

- リユース塩水の品質は安定おり、調整の必要はなかった。
- 塩分濃度は 4.0%を設定したが、塩水の循環利用にあたり大きな変動は見られなかった。
- pH は、塩水の作成に当たり水道水をしているが、厚生労働省が水道水質基準に定める pH の基準値 5.8 以上 8.6 以下の範囲であり、大きな変動は見られなかった。
- 水温は、日中の気温変化およびポンプ等装置稼働による温度の影響を受け、同一試験日に

において試験開始から試験終了にかけての温度上昇が見られたが、緩衝材の除去速度や除去量との相関性は見られず、その影響は小さいものとみられる。



測定計器設置箇所  
(成分調整槽)

図 5.3.1-10 リユース塩水の品質確認 (計測器設置状況)

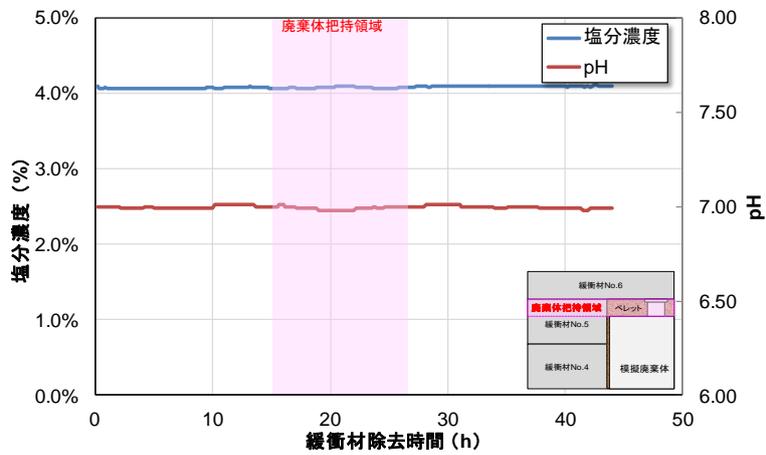


図 5.3.1-11 固液分離後、成分調整槽における塩分濃度・pH の測定結果 (ケース 1)

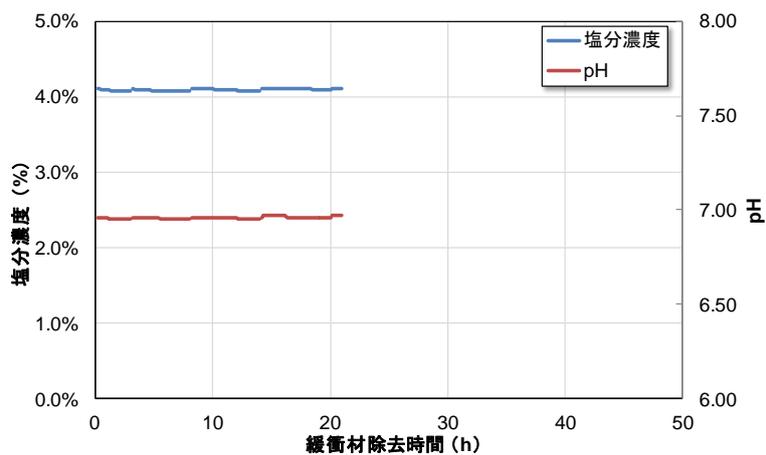


図 5.3.1-12 固液分離後、成分調整槽における塩分濃度・pH の測定結果 (ケース 2)

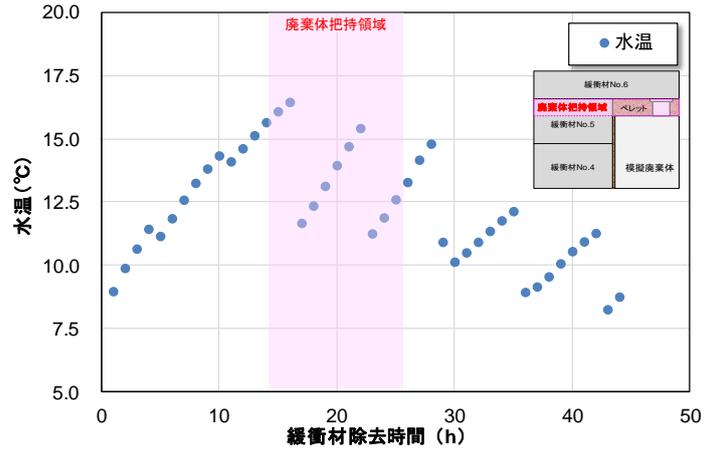


図 5.3.1-13 固液分離後、成分調整槽における水温の測定結果（ケース 1）

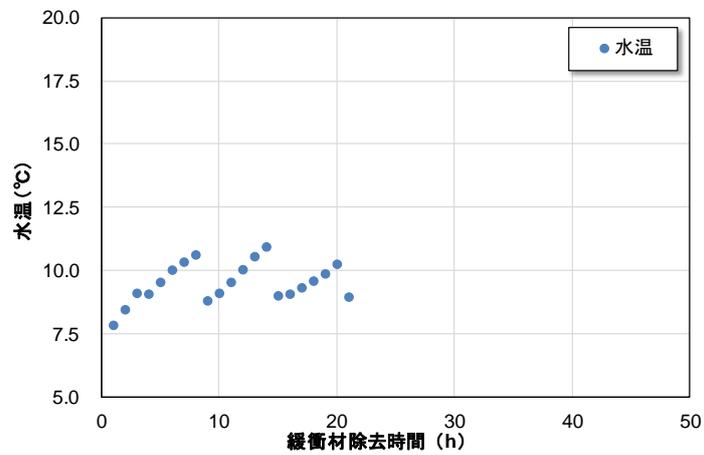


図 5.3.1-14 固液分離後、成分調整槽における水温の測定結果（ケース 2）

### 5.3.2 緩衝材除去特性

#### (1) ケース 1 (廃棄体頂部緩衝材)

ケース 1 として廃棄体頂部付近の緩衝材除去試験を実施した。廃棄体頂部付近は円盤状の緩衝材の範囲、リング状の緩衝材で内側にペレットが充填されている範囲、リング状の緩衝材で内側に廃棄体がある範囲と緩衝材に関わる条件が変化する。このため、緩衝材除去において緩衝材除去速度（深度方向）や緩衝材除去形状に影響があると考えられる。緩衝材 No.6 の上面の位置は、処分坑道の床版より下方 GL-1.225m である。

#### 1) 緩衝材除去状況

緩衝材除去位置は、塩水噴射部下部のスタビライザー下端の位置により評価した。緩衝材位置および経過時間より緩衝材除去速度を算出し、緩衝材と模擬廃棄体およびペレットの位置関係の図に示す（図 5.3.2-1）。また、緩衝材除去状態の観察結果を図 5.3.2-3、図 5.3.2-4 に示す。H24 成果と同等の効率で緩衝材除去は可能であった。試験ケース 1 より得られた知見は以下の通り。

- 円盤状の緩衝材 No.6 (0~300mm) に対する除去では、水流により緩衝材の中心まで除去できている。一方、塩水噴射部の水流抑止板(水流の外側への影響を小さくするための板)により、緩衝材除去範囲の拡大は抑制されていると考えられる。
- 緩衝材 No.6 (0~300mm) の除去速度は平均 22.3mm/h。
- リング状の緩衝材 No.5 のペレット充填部 (300~475mm) では、ペレットの除去は十分できているが緩衝材自体の除去速度は平均 14.2mm/h で速度が低下している。
- 塩水の下向き噴射で模擬廃棄体の頂部の緩衝材とペレットを除去でき、模擬廃棄体が露出した。
- リング状の緩衝材 No.5 の廃棄体側部 (475mm~) の除去速度は平均 11.7mm/h でさらに速度が低下している。
- 緩衝材除去形状の計測のため、スラリーを全て排水すると、ケイ砂が堆積していた（図 5.3.2-3、図 5.3.2-4 の写真の黒い部分がケイ砂）。水流によるスラリーの攪拌でケイ砂が巻き上げられ排出されると想定していたが、これがうまく機能していないと考えられる。塩水噴射とスラリー吸引のバランスがとれず水位が上昇したことによる影響も考えられる。
- 廃棄体側部の緩衝材除去においてペレット充填部を中心に水流による洗掘が見られ、深さは、緩衝材除去位置(塩水噴射部下端)が 685mm に対し、約 1270mm であった(図 5.3.2-2)。

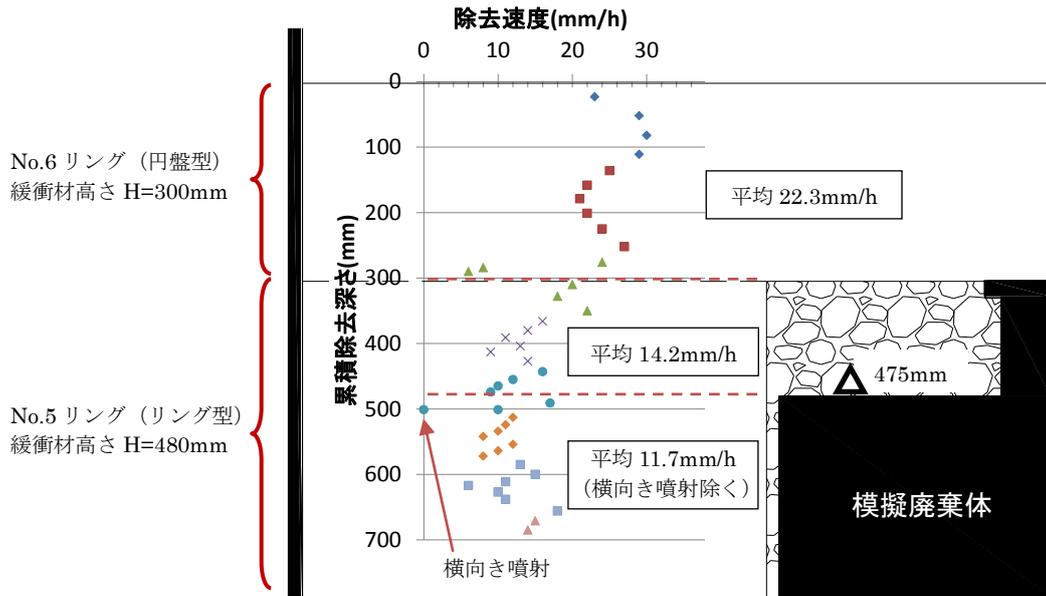


図 5.3.2-1 ケース 1 における緩衝材除去深度測定結果

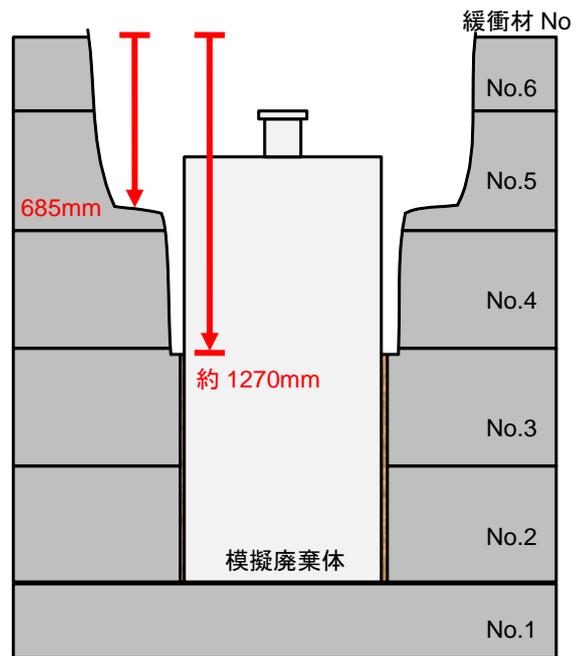


図 5.3.2-2 ケース 1 における緩衝材除去状況

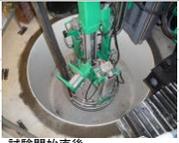
試験番号	日時	噴射時間 (min)	累積時間 (min)	スタビライザー先端位置 (GL-)	緩衝材除去深さ(スタビライザー先端降下量)			噴射方向	備考	写真
					(mm)	(mm/60min)	累積(mm)			
1	2014/1/29 9:54	0	0	1,224	0			下向き	・下向き噴射12分間(噴射リング4往復)における降下量を測定。 ・ノズル位置は12分毎に最下部に配置。	 試験開始直後
	2014/1/29 10:06	12	12	1,230	6					
	2014/1/29 10:18	12	24	1,241	11					
	2014/1/29 10:30	12	36	1,242	1					
	2014/1/29 10:42	12	48	1,245	3					
	2014/1/29 10:54	12	60	1,247	2	23	23			
2	2014/1/29 11:57							下向き	・下向き噴射60分間における降下量を測定。 ・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。 ・60分経過後にインターバル(浸漬塩水の除去、除去形状確認)あり。	 累積4時間後
	2014/1/29 12:57	60	120	1,276	29	29	52			
3	2014/1/29 13:31							下向き	・下向き噴射60分間における降下量を測定。 ・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。 ・360分(6時間)連続下向き噴射。	 累積10時間後
	2014/1/29 14:31	60	180	1,306	30	30	82			
4	2014/1/29 15:09							下向き	・下向き噴射60分間における降下量を測定。 ・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。 ・360分(6時間)連続下向き噴射。	 累積16時間後
	2014/1/29 16:09	60	240	1,335	29	29	111			
5	2014/1/30 9:47							下向き	・下向き噴射60分間における降下量を測定。 ・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。 ・360分(6時間)連続下向き噴射。	 累積22時間後
	2014/1/30 10:47	60	300	1,360	25	25	136			
6	2014/1/30 11:47	60	360	1,382	22	22	158	下向き	・下向き噴射60分間における降下量を測定。 ・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。 ・360分(6時間)連続噴射。 ・途中、周囲堆積緩衝材の流入と思われる進行低下が見られる。	 累積22時間後
7	2014/1/30 12:47	60	420	1,403	21	21	179			
8	2014/1/30 13:47	60	480	1,425	22	22	201	下向き	・下向き噴射60分間における降下量を測定。 ・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。 ・360分(6時間)連続噴射。 ・累積22時間後、吸引により緩衝材の状態を確認。模擬廃棄体把持部と胴部の一部を確認した。充てんしたベレットはほぼ見られず、模擬廃棄体周囲にはケイ砂が堆積。これらの観察結果から、当該サイクルは模擬廃棄体周囲の充てんベレットも除去しながら進行したものと考えられる。	 累積22時間後
9	2014/1/30 14:47	60	540	1,449	24	24	225			
10	2014/1/30 15:47	60	600	1,476	27	27	252	下向き	・下向き噴射60分間における降下量を測定。 ・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。 ・360分(6時間)連続噴射。 ・途中、周囲堆積緩衝材の流入と思われる進行低下が見られる。	 累積22時間後
11	2014/1/31 9:40									
	2014/1/31 10:40	60	660	1,500	24	24	276	下向き	・下向き噴射60分間における降下量を測定。 ・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。 ・360分(6時間)連続噴射。 ・途中、周囲堆積緩衝材の流入と思われる進行低下が見られる。	 累積22時間後
12	2014/1/31 11:40	60	720	1,508	8	8	284			
13	2014/1/31 12:40	60	780	1,514	6	6	290	下向き	・下向き噴射60分間における降下量を測定。 ・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。 ・360分(6時間)連続噴射。 ・累積22時間後、吸引により緩衝材の状態を確認。模擬廃棄体把持部と胴部の一部を確認した。充てんしたベレットはほぼ見られず、模擬廃棄体周囲にはケイ砂が堆積。これらの観察結果から、当該サイクルは模擬廃棄体周囲の充てんベレットも除去しながら進行したものと考えられる。	 累積22時間後
14	2014/1/31 13:40	60	840	1,534	20	20	310			
15	2014/1/31 14:40	60	900	1,552	18	18	328	下向き	・下向き噴射60分間における降下量を測定。 ・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。 ・360分(6時間)連続噴射。 ・累積22時間後、吸引により緩衝材の状態を確認。模擬廃棄体把持部と胴部の一部を確認した。充てんしたベレットはほぼ見られず、模擬廃棄体周囲にはケイ砂が堆積。これらの観察結果から、当該サイクルは模擬廃棄体周囲の充てんベレットも除去しながら進行したものと考えられる。	 累積22時間後
16	2014/1/31 15:40	60	960	1,574	22	22	350			
17	2014/2/3 9:38							下向き	・下向き噴射60分間における降下量を測定。 ・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。 ・360分(6時間)連続噴射。 ・累積22時間後、吸引により緩衝材の状態を確認。模擬廃棄体把持部と胴部の一部を確認した。充てんしたベレットはほぼ見られず、模擬廃棄体周囲にはケイ砂が堆積。これらの観察結果から、当該サイクルは模擬廃棄体周囲の充てんベレットも除去しながら進行したものと考えられる。	 累積22時間後
	2014/2/3 10:38	60	1020	1,590	16	16	366			
18	2014/2/3 11:38	60	1080	1,604	14	14	380	下向き	・下向き噴射60分間における降下量を測定。 ・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。 ・360分(6時間)連続噴射。 ・累積22時間後、吸引により緩衝材の状態を確認。模擬廃棄体把持部と胴部の一部を確認した。充てんしたベレットはほぼ見られず、模擬廃棄体周囲にはケイ砂が堆積。これらの観察結果から、当該サイクルは模擬廃棄体周囲の充てんベレットも除去しながら進行したものと考えられる。	 累積22時間後
19	2014/2/3 12:38	60	1140	1,615	11	11	391			
20	2014/2/3 13:38	60	1200	1,628	13	13	404	下向き	・下向き噴射60分間における降下量を測定。 ・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。 ・360分(6時間)連続噴射。 ・累積22時間後、吸引により緩衝材の状態を確認。模擬廃棄体把持部と胴部の一部を確認した。充てんしたベレットはほぼ見られず、模擬廃棄体周囲にはケイ砂が堆積。これらの観察結果から、当該サイクルは模擬廃棄体周囲の充てんベレットも除去しながら進行したものと考えられる。	 累積22時間後
21	2014/2/3 14:38	60	1260	1,637	9	9	413			
22	2014/2/3 15:38	60	1320	1,651	14	14	427	下向き	・下向き噴射60分間における降下量を測定。 ・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。 ・360分(6時間)連続噴射。 ・累積22時間後、吸引により緩衝材の状態を確認。模擬廃棄体把持部と胴部の一部を確認した。充てんしたベレットはほぼ見られず、模擬廃棄体周囲にはケイ砂が堆積。これらの観察結果から、当該サイクルは模擬廃棄体周囲の充てんベレットも除去しながら進行したものと考えられる。	 累積22時間後

図 5.3.2-3 ケース 1 における緩衝材除去状態の観察結果(1)

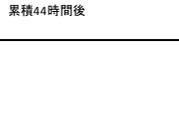
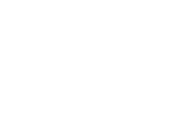
23	2014/2/4 9:28							443	下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・360分(6時間)連続噴射。</li> <li>・水面は限定的に噴射部に位置せず模擬廃棄体上部にも達していることから、模擬廃棄体上部にまで水流が及び、模擬廃棄体把持部上部の緩衝材、および模擬廃棄体把持部周囲のペレット、堆積したケイ砂の除去に寄与している。</li> <li>・累積28時間終了後、模擬廃棄体把持部に向けて横向き噴射を実施(水流を十分に伝えるため、水面下での噴射)。開始10分程度で把持部周りの緩衝材、ペレット、堆積したケイ砂は除去され、把持部が完全に露出した。</li> </ul>	 累積28時間後	 横向き噴射後
	2014/2/4 10:28	60	1380	1,667	16	16						
24	2014/2/4 11:28	60	1440	1,679	12	12	455	下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・420分(7時間)連続噴射。</li> <li>・模擬廃棄体把持部周囲のペレットは横向き噴射によって完全に除去されたものの、水面が把持部に位置しており、水流はこの把持部に及んでいる(中心部に向けた水流)。</li> <li>・累積35時間終了後、吸引により緩衝材の状態を確認。上述の水流により、再び把持部周囲にケイ砂が堆積している。</li> </ul>	 累積35時間後		
25	2014/2/4 12:28	60	1500	1,689	10	10	465					
26	2014/2/4 13:28	60	1560	1,698	9	9	474	下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・420分(7時間)連続噴射。</li> <li>・累積41時間過ぎ辺りから水面は模擬廃棄体胴部に位置する。この1時間は進行が伸びているが、水流の向きが変わったことによる影響かとはさらなる観察が必要。</li> <li>・累積42時間終了後、吸引により緩衝材の状態を確認。模擬廃棄体と緩衝材間に充てんしたペレットが先行的に除去され、次に緩衝材中空側(内側)から徐々に拡幅していくように除去範囲が広がっている。除去された中空側の緩衝材はさらに下層も除去されており、除去面がすり鉢状の形状を成している。</li> </ul>	 累積42時間後		
27	2014/2/4 14:28	60	1620	1,715	17	17	491					
28	2014/2/4 15:28	60	1680	1,725	10	10	501	横向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・420分(7時間)連続噴射。</li> <li>・累積44時間終了後、吸引により緩衝材の状態を確認。模擬廃棄体周囲の除去が進行している様子に変わりはない。水面は模擬廃棄体胴部に位置するが、水流が変わったことによる進行の大きな変化は見られない。</li> </ul>	 累積44時間後		
29	2014/2/4 16:15											
	2014/2/4 16:25	10	1690	1,725	0	0	501	下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・420分(7時間)連続噴射。</li> <li>・累積45時間終了後、吸引により緩衝材の状態を確認。模擬廃棄体周囲の除去が進行している様子に変わりはない。水面は模擬廃棄体胴部に位置するが、水流が変わったことによる進行の大きな変化は見られない。</li> </ul>	 累積45時間後		
30	2014/2/5 9:25	60	1740	1,737	12	12	513					
31	2014/2/5 10:25	60	1800	1,748	11	11	524	下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・420分(7時間)連続噴射。</li> <li>・累積46時間終了後、吸引により緩衝材の状態を確認。模擬廃棄体周囲の除去が進行している様子に変わりはない。水面は模擬廃棄体胴部に位置するが、水流が変わったことによる進行の大きな変化は見られない。</li> </ul>	 累積46時間後		
32	2014/2/5 12:25	60	1860	1,758	10	10	534					
33	2014/2/5 13:25	60	1920	1,766	8	8	542	下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・420分(7時間)連続噴射。</li> <li>・累積47時間終了後、吸引により緩衝材の状態を確認。模擬廃棄体周囲の除去が進行している様子に変わりはない。水面は模擬廃棄体胴部に位置するが、水流が変わったことによる進行の大きな変化は見られない。</li> </ul>	 累積47時間後		
34	2014/2/5 14:25	60	1980	1,778	12	12	554					
35	2014/2/5 15:25	60	2040	1,788	10	10	564	下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・420分(7時間)連続噴射。</li> <li>・累積48時間終了後、吸引により緩衝材の状態を確認。模擬廃棄体周囲の除去が進行している様子に変わりはない。水面は模擬廃棄体胴部に位置するが、水流が変わったことによる進行の大きな変化は見られない。</li> </ul>	 累積48時間後		
36	2014/2/5 16:25	60	2100	1,796	8	8	572					
37	2014/2/6 9:27							下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・420分(7時間)連続噴射。</li> <li>・累積49時間終了後、吸引により緩衝材の状態を確認。模擬廃棄体周囲の除去が進行している様子に変わりはない。水面は模擬廃棄体胴部に位置するが、水流が変わったことによる進行の大きな変化は見られない。</li> </ul>	 累積49時間後		
	2014/2/6 10:27	60	2160	1,809	13	13	585					
38	2014/2/6 11:27	60	2220	1,824	15	15	600	下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・420分(7時間)連続噴射。</li> <li>・累積50時間終了後、吸引により緩衝材の状態を確認。模擬廃棄体周囲の除去が進行している様子に変わりはない。水面は模擬廃棄体胴部に位置するが、水流が変わったことによる進行の大きな変化は見られない。</li> </ul>	 累積50時間後		
39	2014/2/6 12:27	60	2280	1,835	11	11	611					
40	2014/2/6 13:27	60	2340	1,841	6	6	617	下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・420分(7時間)連続噴射。</li> <li>・累積51時間終了後、吸引により緩衝材の状態を確認。模擬廃棄体周囲の除去が進行している様子に変わりはない。水面は模擬廃棄体胴部に位置するが、水流が変わったことによる進行の大きな変化は見られない。</li> </ul>	 累積51時間後		
41	2014/2/6 14:27	60	2400	1,851	10	10	627					
42	2014/2/6 15:27	60	2460	1,862	11	11	638	下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・420分(7時間)連続噴射。</li> <li>・累積52時間終了後、吸引により緩衝材の状態を確認。模擬廃棄体周囲の除去が進行している様子に変わりはない。水面は模擬廃棄体胴部に位置するが、水流が変わったことによる進行の大きな変化は見られない。</li> </ul>	 累積52時間後		
43	2014/2/6 16:27	60	2520	1,880	18	18	656					
44	2014/2/7 9:57							下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・120分(2時間)連続噴射。</li> <li>・模擬廃棄体周囲の除去が進行している様子に変わりはない。水面は模擬廃棄体胴部に位置するが、水流が変わったことによる進行の大きな変化は見られない。</li> </ul>	 累積53時間後		
	2014/2/7 10:57	60	2580	1,895	15	15	671					
45	2014/2/7 11:50							下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・120分(2時間)連続噴射。</li> <li>・模擬廃棄体周囲の除去が進行している様子に変わりはない。水面は模擬廃棄体胴部に位置するが、水流が変わったことによる進行の大きな変化は見られない。</li> </ul>	 累積54時間後		
	2014/2/7 12:50	60	2640	1,909	14	14	685					

図 5.3.2-4 ケース 1 における緩衝材除去状態の観察結果(2)

## 2) 3D スキャナーによる緩衝材除去形状・除去体積

緩衝材除去状況の把握のため 3D スキャナーによる緩衝材除去形状を計測した。3D スキャナーの計測は、水面下の形状は取得できないため試験体に溜まったスラリーをすべて排出してから実施した。この計測の頻度は、試験初日については試験状況の把握のため 1 時間毎、それ以降については 1 日の作業の最後に 1 回とした。

緩衝材除去体積は、3次元データから  $x,y$  軸に沿った断面から平均的な寸法を把握し、除去形状を円錐と円柱の組み合わせにより算定した。

緩衝材の除去形状および除去体積計算結果を図 5.3.2-5～図 5.3.2-23 に示す。これらのデータから得られた知見を以下に示す。

- 累積 22 時間後 (深度 427mm) までは塩水噴射部下面を中心に緩衝材の除去が進み、緩衝材中心部は少し遅れて緩衝材が除去されている (最大差 約 10cm) ことが分かる。
- 累積 28 時間後 (深度 501mm) 以降は模擬廃棄体が現れ、側部の緩衝材が除去され始める。緩衝材除去形状は深くなるにつれて、模擬廃棄体直近の緩衝材が先行的に除去されて急なすり鉢状となっている。
- 3D スキャナーから得られる点群データから直接体積を求める計画 (緩衝材除去量表示システムを利用) であったが、データ量が不足等の理由で実施できなかった。

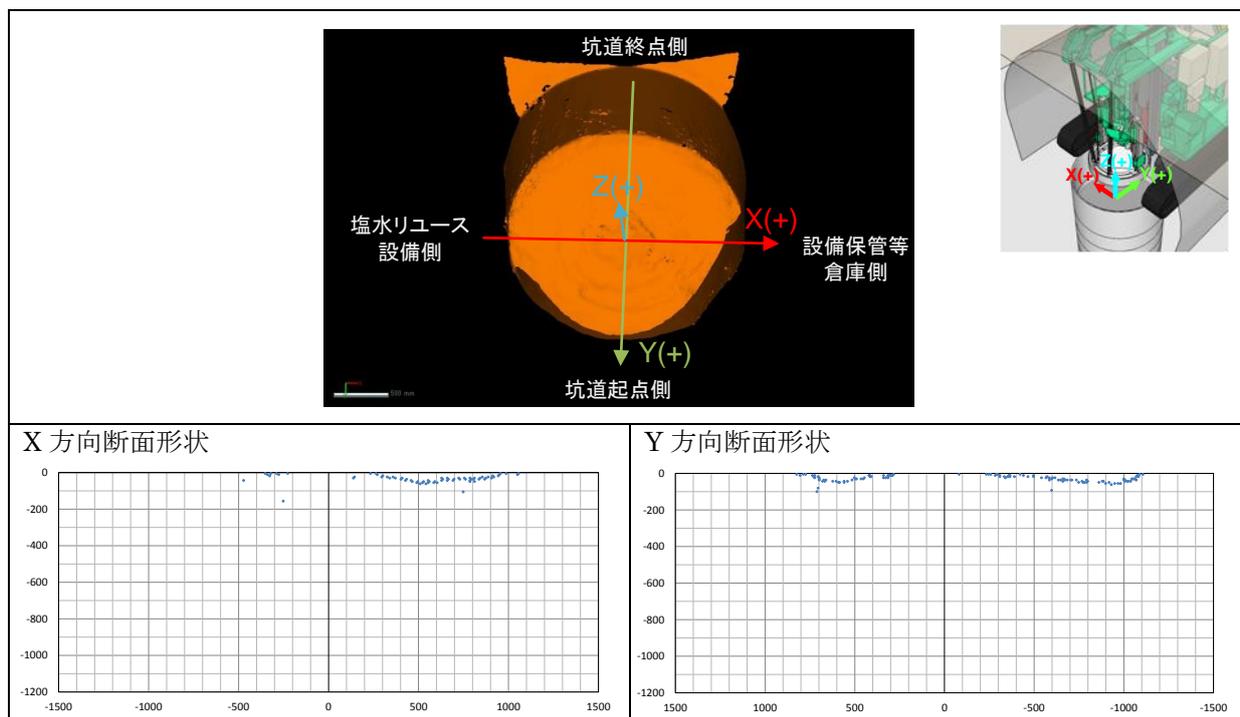
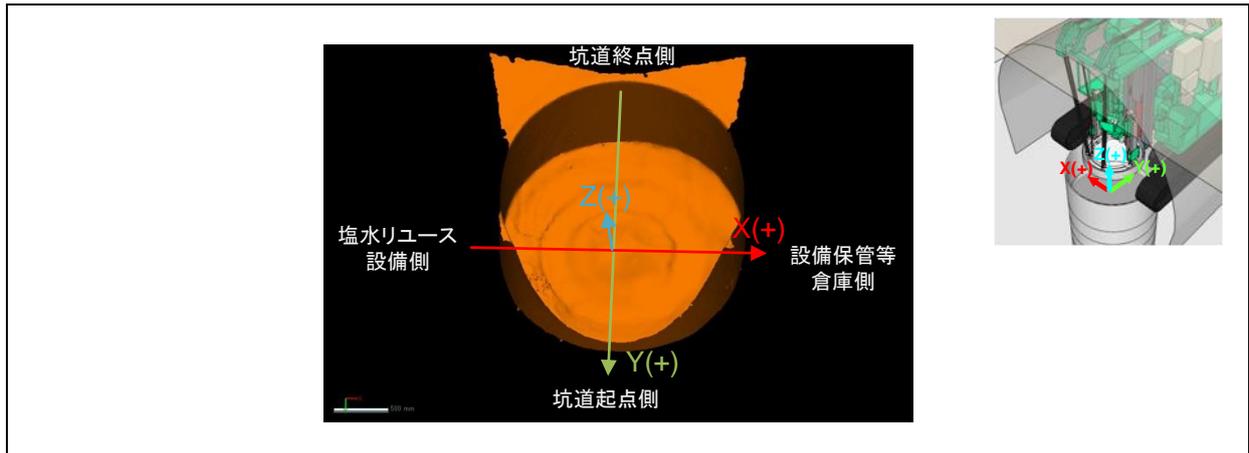
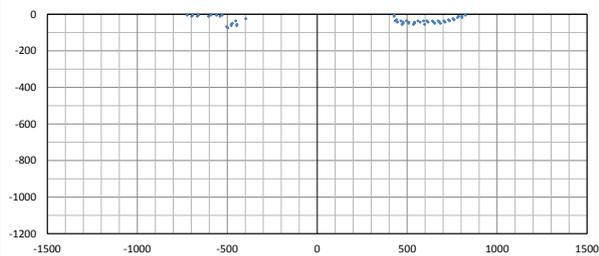


図 5.3.2-5 緩衝材除去形状 (累積 1 時間後)



X 方向断面形状



Y 方向断面形状

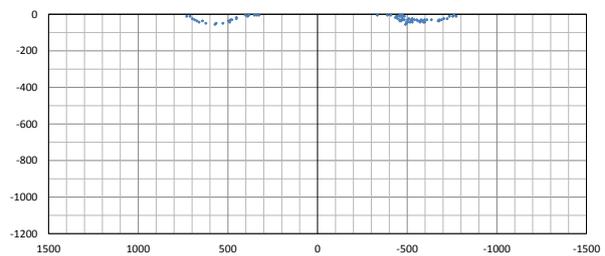
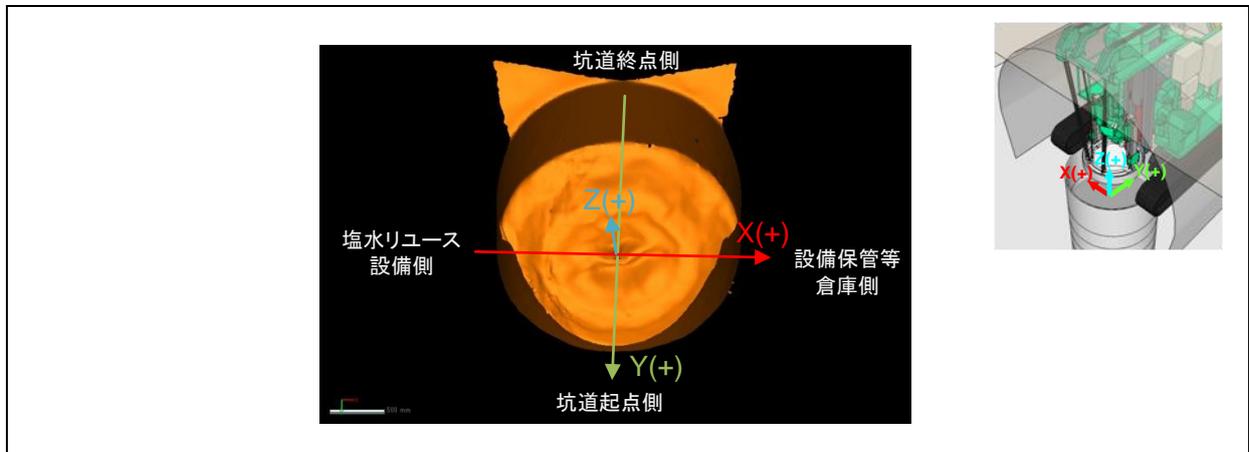
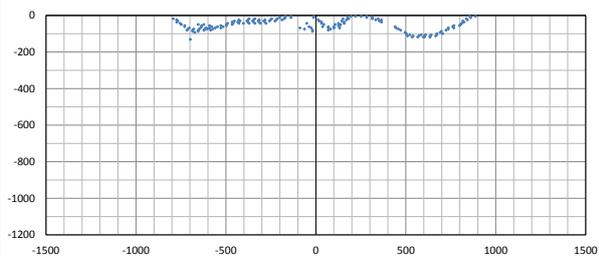


図 5.3.2-6 緩衝材除去形状 (累積 2 時間後)



X 方向断面形状



Y 方向断面形状

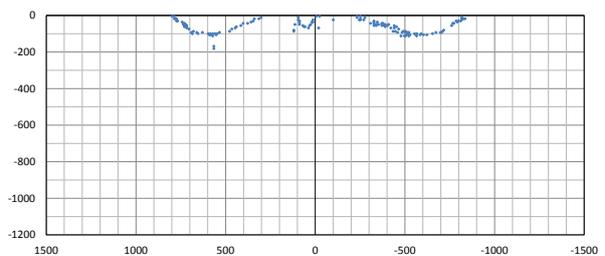


図 5.3.2-7 緩衝材除去形状 (累積 3 時間後)

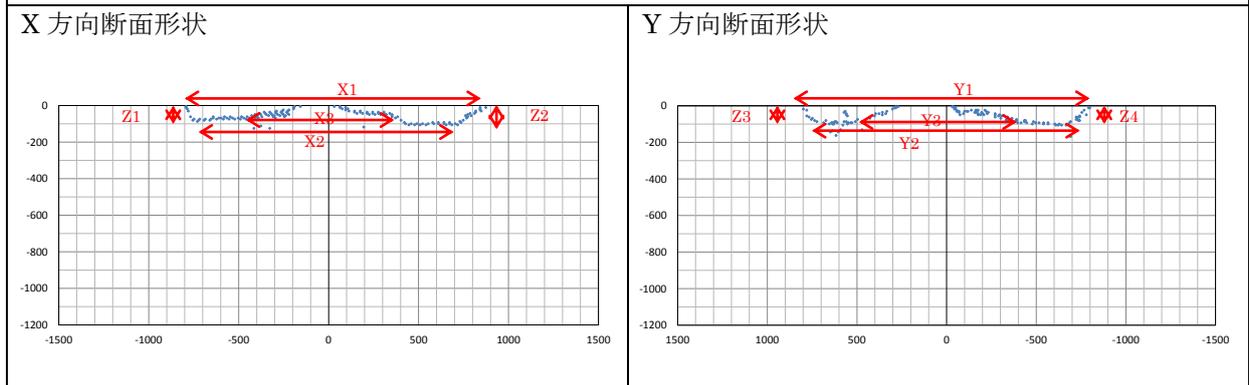
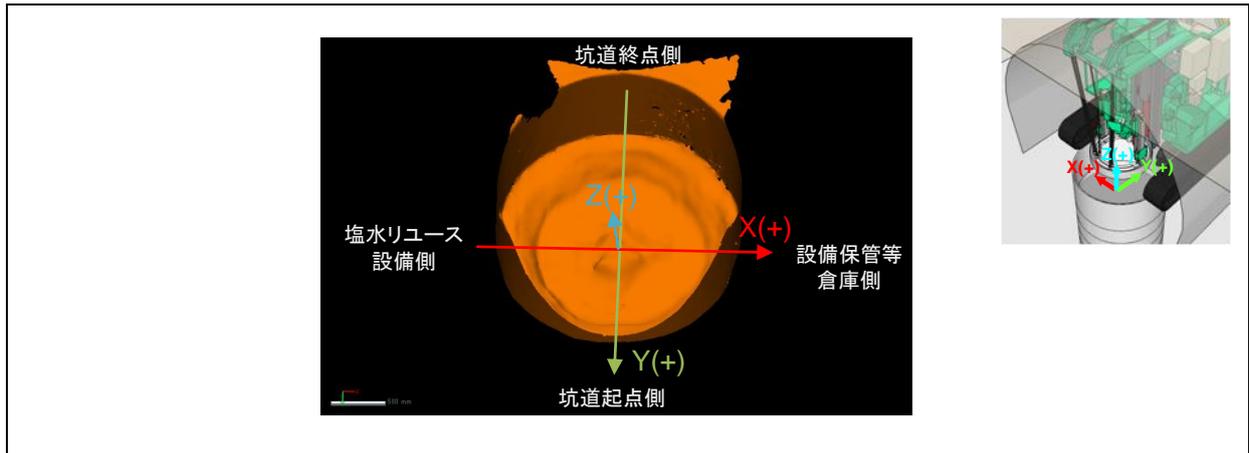
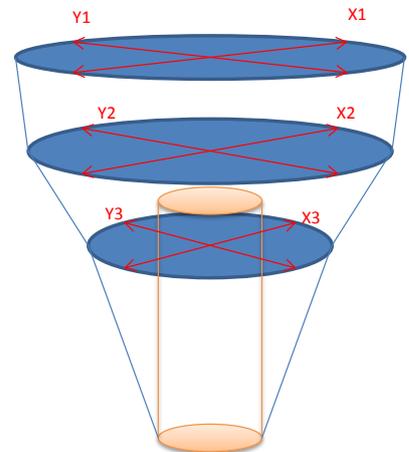


図 5.3.2-8 緩衝材除去形状（累積 4 時間後）

位置	長さ [mm]		位置	高さ [mm]
X1	1666		Z1	86
X2	1471		Z2	105
X3	936		Z3	98
Y1	1598		Z4	105
Y2	1390			
Y3	924			
除去体積 [m <sup>3</sup> ]				0.115



※ここでは、X1 と Y1、X2 と Y2 から平均断面積を、Z1～Z4 から平均高さを算出し円錐台の体積を求めた。また、X3 と Y3、高さ Z1～Z4 の平均値から体積控除分を算出して、除去体積を算出した。

図 5.3.2-9 除去体積計算（累積 4 時間後）

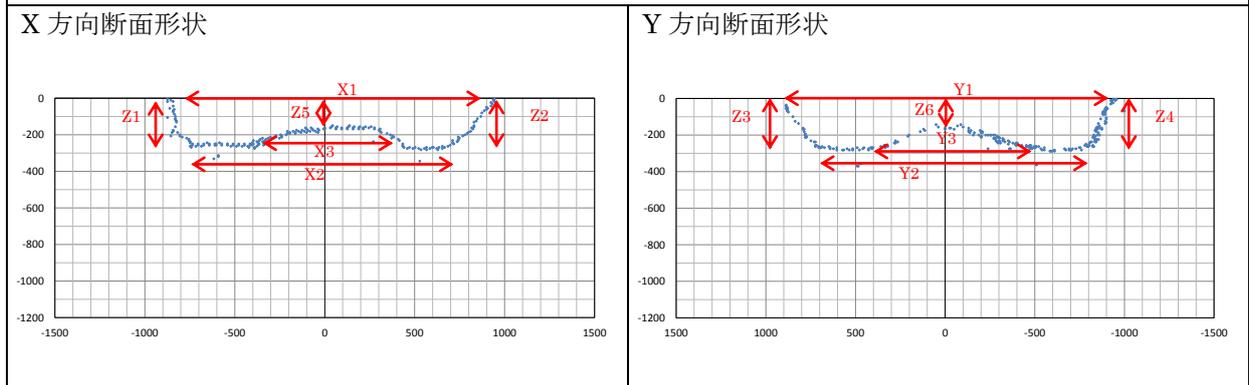
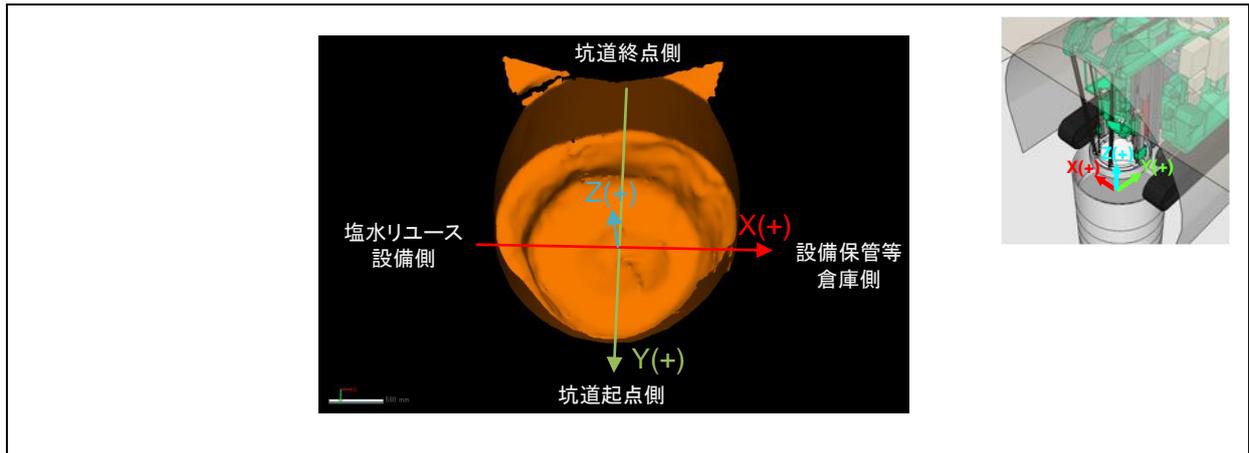
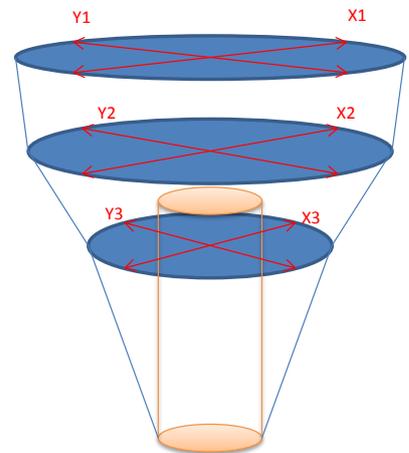


図 5.3.2-10 緩衝材除去形状（累積 10 時間後）

位置	長さ[mm]	位置	高さ[mm]
X1	1817	Z1	275
X2	1405	Z2	281
X3	830	Z3	281
Y1	1843	Z4	287
Y2	1503	Z5	168
Y3	993	Z6	168
除去体積[m <sup>3</sup> ]			0.524



※ここでは、X1 と Y1、X2 と Y2 から平均断面積を、Z1～Z4 から平均高さを算出し円錐台の体積を求めた。また、X3 と Y3、高さ Z1～Z4 の平均値と Z5～Z6 の平均値の差から体積控除分を算出して、除去体積を算出した。

図 5.3.2-11 除去体積計算（累積 10 時間後）

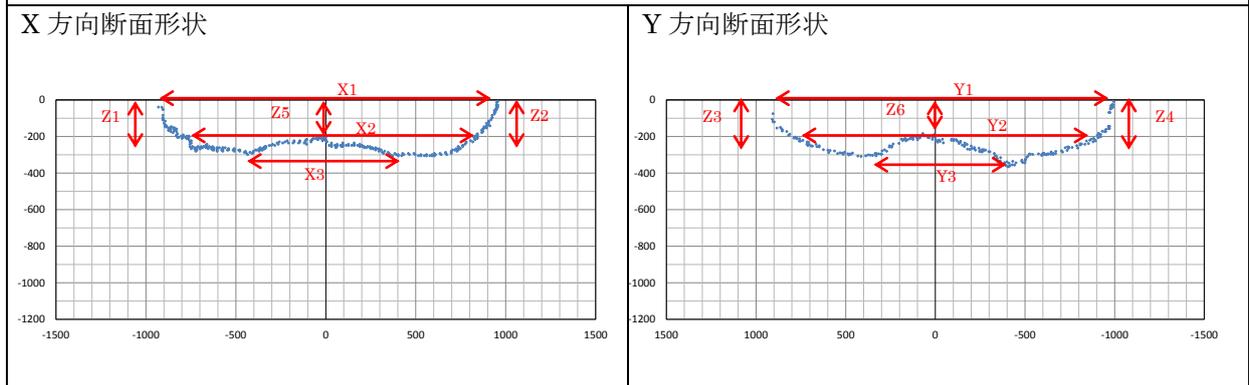
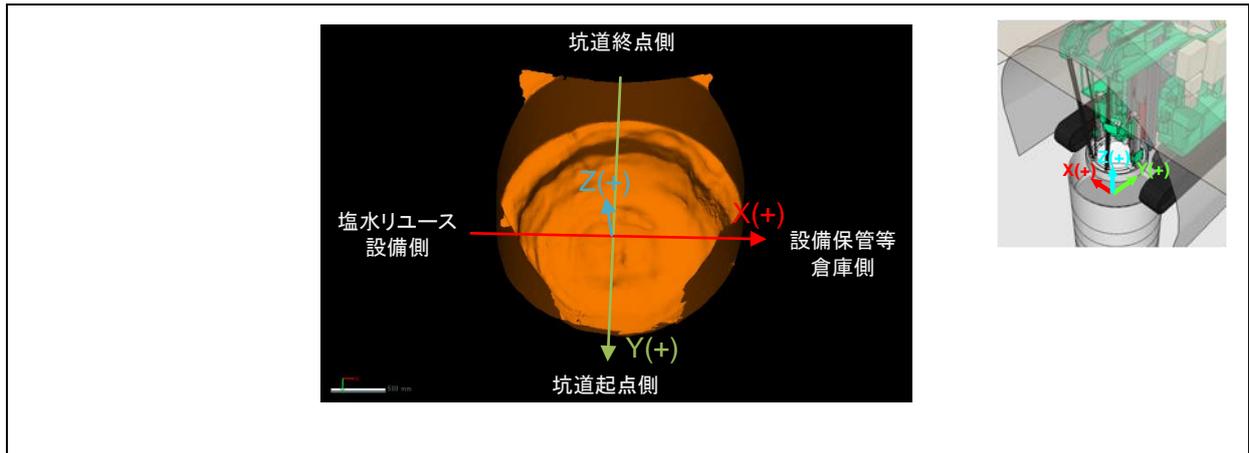
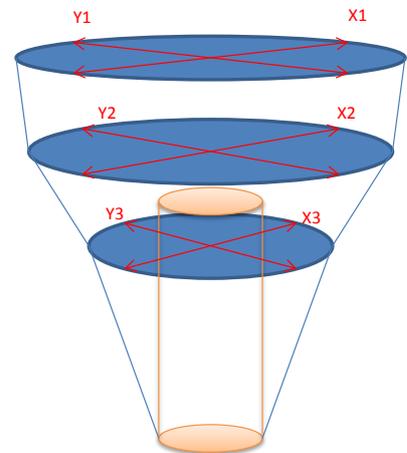


図 5.3.2-12 緩衝材除去形状（累積 16 時間後）

位置	長さ[mm]		位置	高さ[mm]
X1	1885		Z1	298
X2	1640		Z2	305
X3	1024		Z3	364
Y1	1898		Z4	308
Y2	1702		Z5	216
Y3	822		Z6	216
除去体積[m <sup>3</sup> ]				0.592



※ここでは、2つの円錐台を設定。X1とY1、X2とY2から平均断面積、高さ200mmから1つ目(上部)の円錐台の体積を求めた。また、X2とY2、X3とY3から平均断面積、高さZ1~Z4平均値から200mmを引いた高さから2つ目の円錐台の体積を求めた。さらに、X3とY3、高さZ1~Z4の平均値とZ5~Z6の平均値の差から体積控除分を算出して、除去体積を算出した。

図 5.3.2-13 除去体積計算（累積 16 時間後）

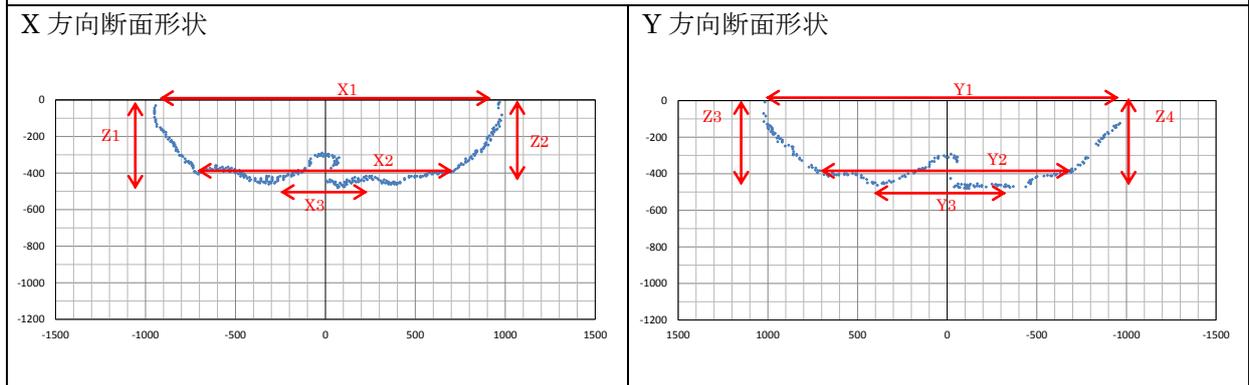
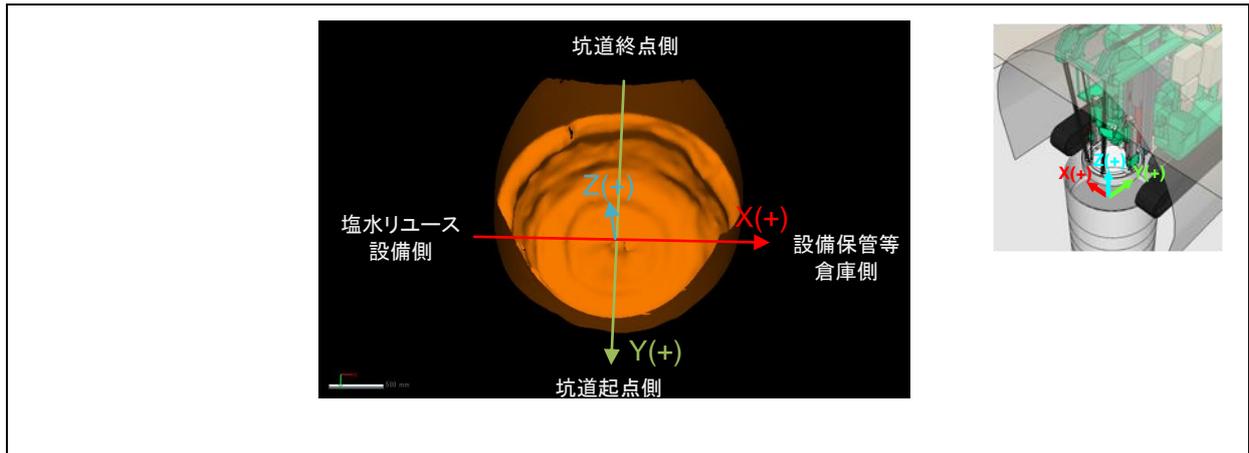
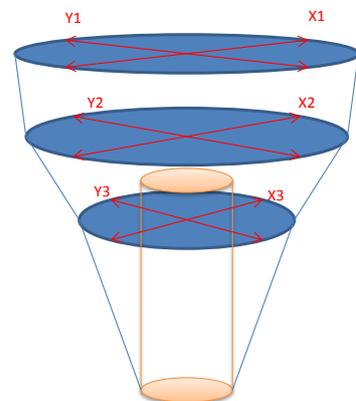


図 5.3.2-14 緩衝材除去形状（累積 22 時間後）

位置	長さ[mm]		位置	高さ[mm]
X1	1911		Z1	447
X2	1440		Z2	441
X3	477		Z3	462
Y1	1980		Z4	473
Y2	1417		除去体積[m <sup>3</sup> ]	
Y3	563		0.933	



※ここでは、2つの円錐台を設定。X1とY1、X2とY2から平均断面積、高さ391mmから1つ目（上部）の円錐台の体積を求めた。また、X2とY2、X3とY3から平均断面積、高さZ1～Z4平均値から391mmを引いた高さから2つ目の円錐台の体積を求めた。模擬廃棄体把持部が体積控除分に該当するが、ここでは極少量であるため控除せずに除去体積を算出した。

図 5.3.2-15 除去体積計算（累積 22 時間後）

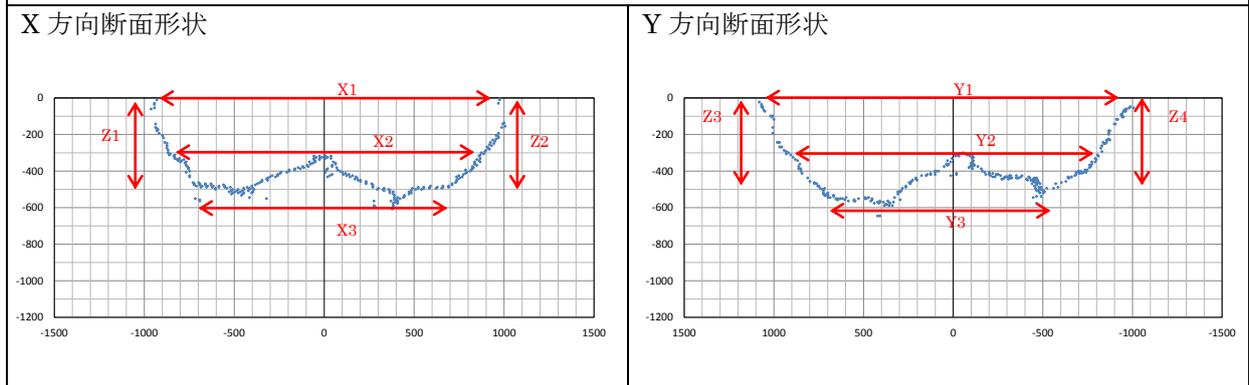
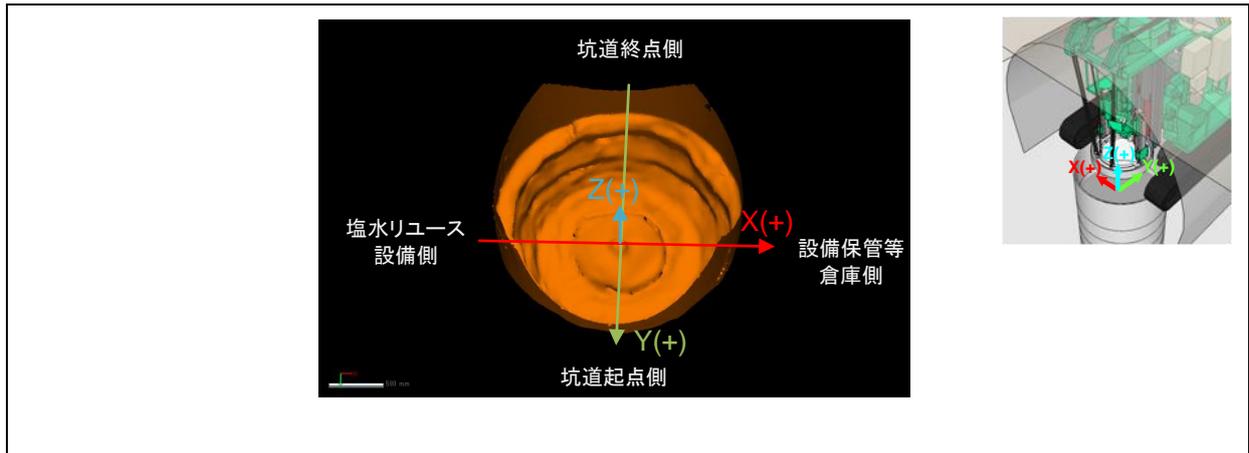
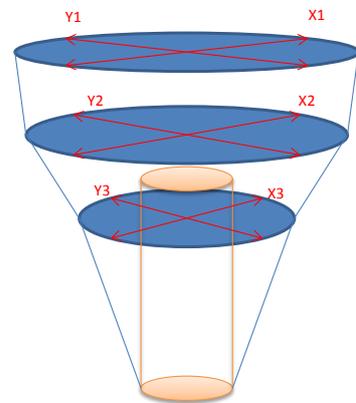


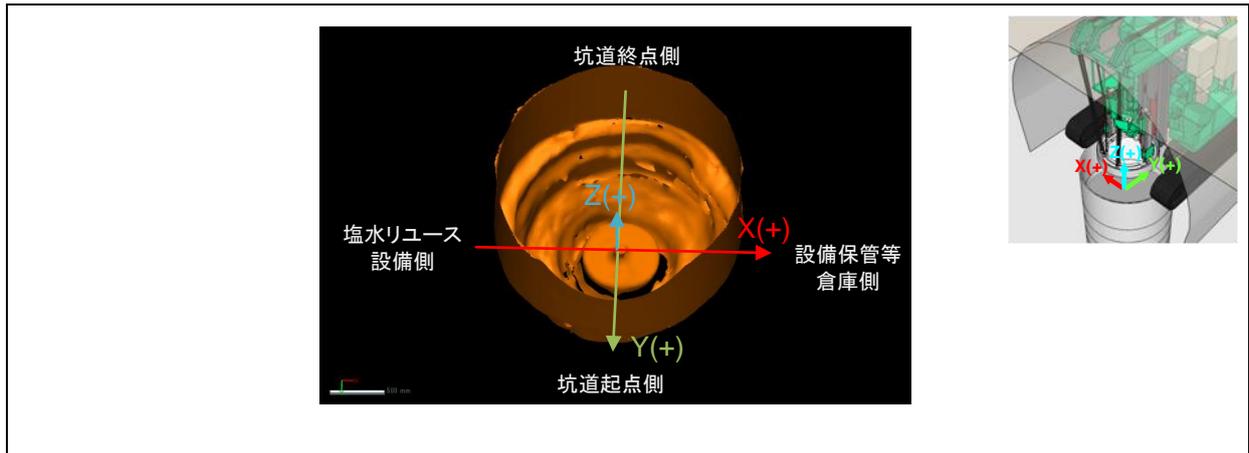
図 5.3.2-16 緩衝材除去形状（累積 28 時間後）

位置	長さ[mm]	位置	高さ[mm]
X1	1904	Z1	575
X2	1703	Z2	509
X3	1377	Z3	576
Y1	2038	Z4	513
Y2	1723	除去体積[m <sup>3</sup> ]	
Y3	1145	1.190	

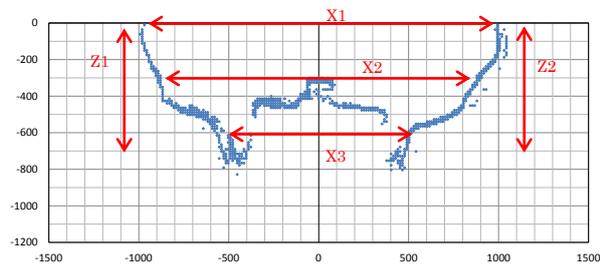


※ここでは、2つの円錐台を設定。X1とY1、X2とY2から平均断面積、高さ300mmから1つ目(上部)の円錐台の体積を求めた。また、X2とY2、X3とY3から平均断面積、高さZ1~Z4平均値から300mmを引いた高さから2つ目の円錐台の体積を求めた。さらに、模擬廃棄体が露出したため、模擬廃棄体φ820、高さZ1~Z4平均値から475mmを引いた高さから体積控除分を求めた。模擬廃棄体把持部は体積控除分に該当するが、ここでは極少量であるため控除せずに除去体積を算出した。

図 5.3.2-17 除去体積計算（累積 28 時間後）



X 方向断面形状



Y 方向断面形状

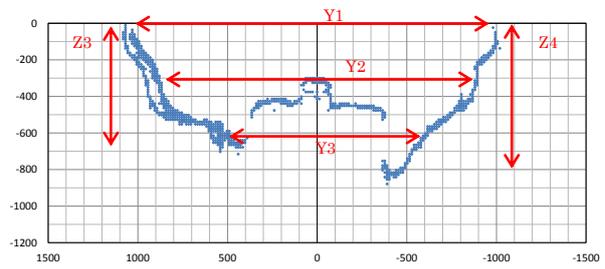
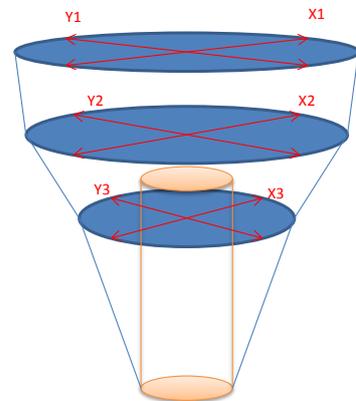


図 5.3.2-18 緩衝材除去形状 (累積 35 時間後)

位置	長さ [mm]		位置	高さ [mm]
X1	1962		Z1	715
X2	1760		Z2	715
X3	980		Z3	640
Y1	2012		Z4	815
Y2	1773		除去体積 [m <sup>3</sup> ]	
Y3	1094		1.257	



※ここでは、3つの円錐台を設定。X1とY1、X2とY2から平均断面積、高さ300mmから1つ目(上部)の円錐台の体積を求めた。また、X2とY2、X3とY3から平均断面積、高さ300mmから2つ目(中部)の円錐台の体積を、X3とY3、模擬廃棄体φ820から平均断面積、高さZ1~Z4平均値から600mmを引いた高さから3つ目(下部)の円錐台の体積を求めた。さらに、模擬廃棄体φ820、高さZ1~Z4平均値から475mm(試験開始高さから模擬廃棄体胴部までの高さ)を引いた高さから体積控除分を求めた。模擬廃棄体把持部は体積控除分に該当するが、ここでは極少量であるため控除せずに除去体積を算出した。

図 5.3.2-19 除去体積計算 (累積 35 時間後)

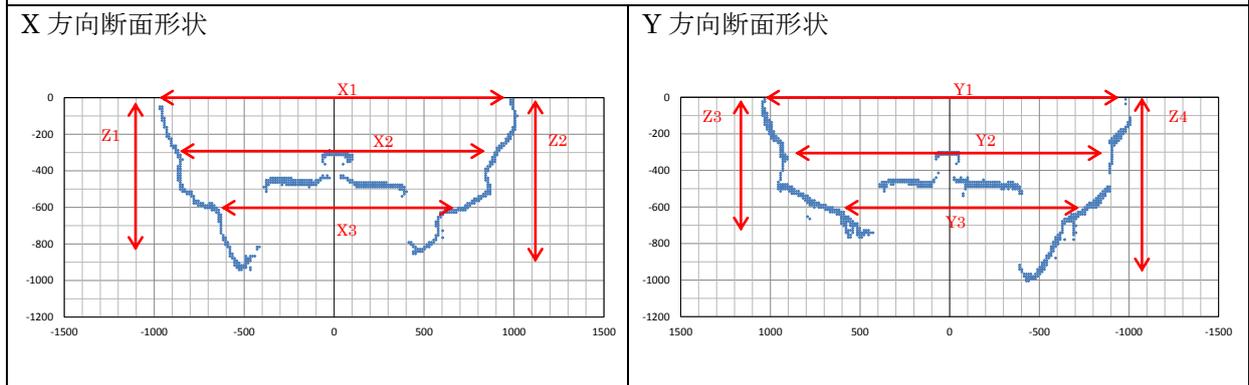
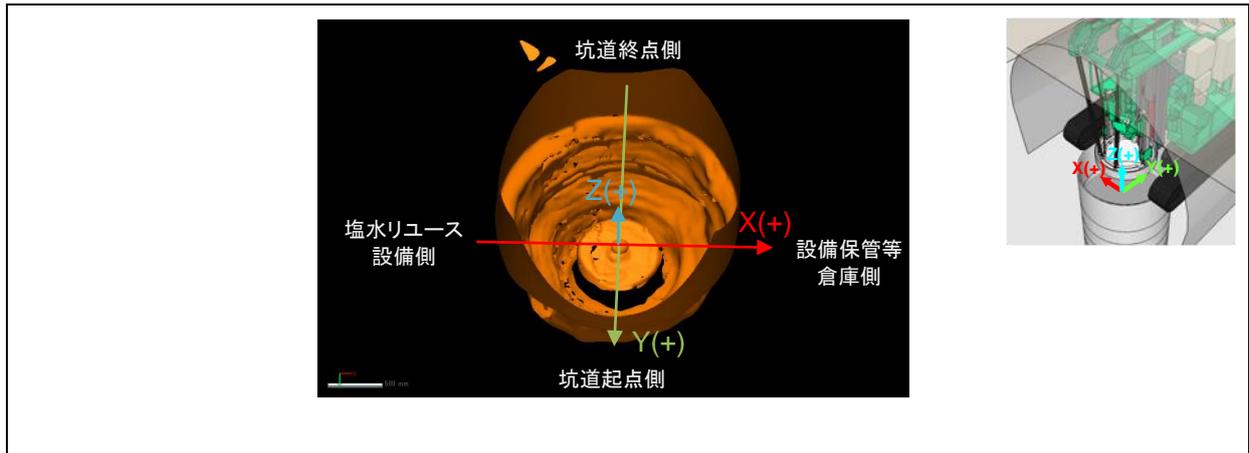
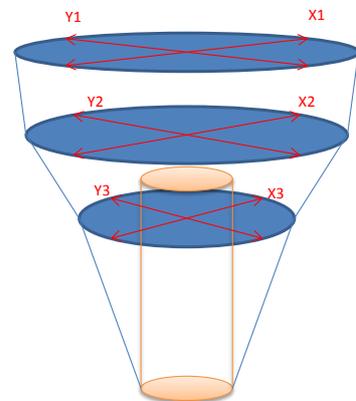


図 5.3.2-20 緩衝材除去形状 (累積 42 時間後)

位置	長さ [mm]	位置	高さ [mm]
X1	1923	Z1	828
X2	1761	Z2	916
X3	1346	Z3	753
Y1	2012	Z4	967
Y2	1836	除去体積 [m <sup>3</sup> ]	
Y3	1409	1.485	



※ここでは、3つの円錐台を設定。X1とY1、X2とY2から平均断面積、高さ300mmから1つ目(上部)の円錐台の体積を求めた。また、X2とY2、X3とY3から平均断面積、高さ300mmから2つ目(中部)の円錐台の体積を、X3とY3、模擬廃棄体φ820から平均断面積、高さZ1~Z4平均値から600mmを引いた高さから3つ目(下部)の円錐台の体積を求めた。さらに、模擬廃棄体φ820、高さZ1~Z4平均値から475mm(試験開始高さから模擬廃棄体胴部までの高さ)を引いた高さから体積控除分を求めた。模擬廃棄体把持部は体積控除分に該当するが、ここでは極少量であるため控除せずに除去体積を算出した。

図 5.3.2-21 除去体積計算 (累積 42 時間後)

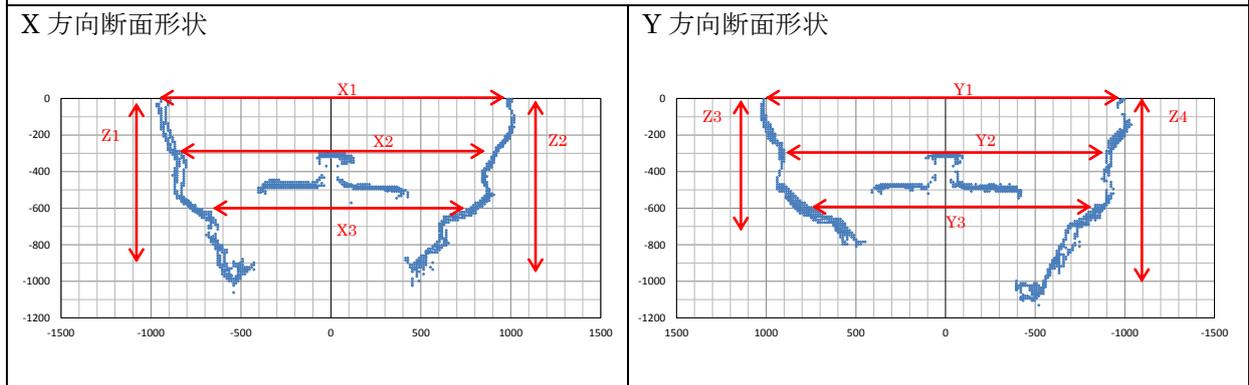
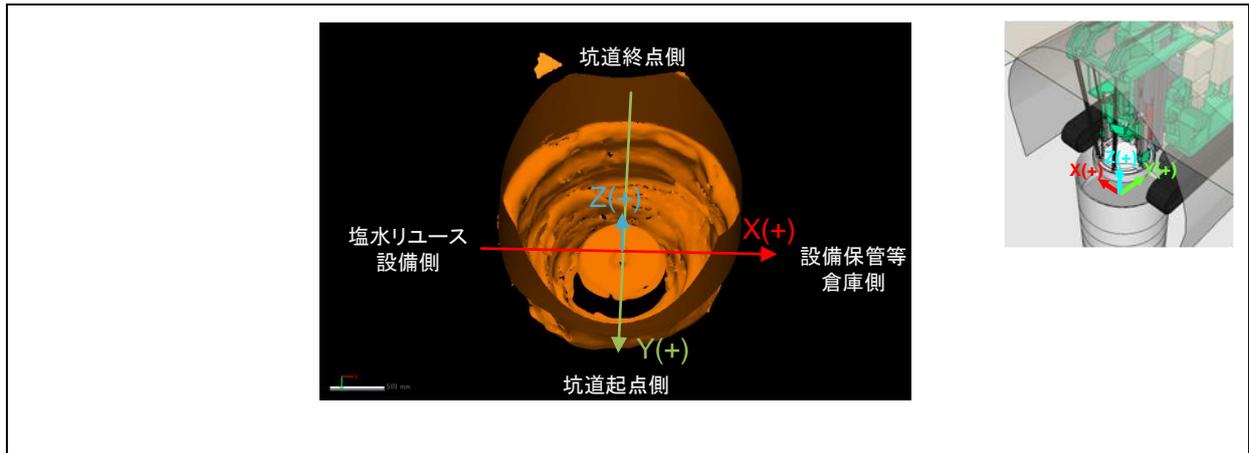
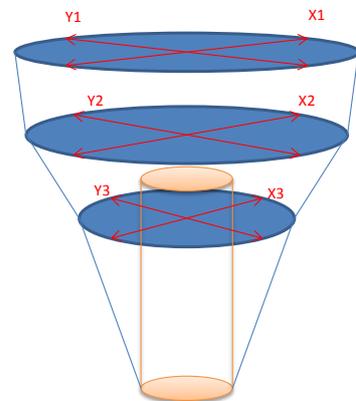


図 5.3.2-22 緩衝材除去形状（累積 44 時間後）

位置	長さ[mm]		位置	高さ[mm]
X1	1924		Z1	904
X2	1748		Z2	985
X3	1496		Z3	784
Y1	2011		Z4	1023
Y2	1798		除去体積[m <sup>3</sup> ]	
Y3	1546		1.587	



※ここでは、3つの円錐台を設定。X1とY1、X2とY2から平均断面積、高さ300mmから1つ目（上部）の円錐台の体積を求めた。また、X2とY2、X3とY3から平均断面積、高さ300mmから2つ目（中部）の円錐台の体積を、X3とY3、模擬廃棄体φ820から平均断面積、高さZ1～Z4平均値から600mmを引いた高さから3つ目（下部）の円錐台の体積を求めた。さらに、模擬廃棄体φ820、高さZ1～Z4平均値から475mm（試験開始高さから模擬廃棄体胴部までの高さ）を引いた高さから体積控除分を求めた。模擬廃棄体把持部は体積控除分に該当するが、ここでは極少量であるため控除せずに除去体積を算出した。

図 5.3.2-23 除去体積計算（累積 44 時間後）

## (2) ケース 2 (廃棄体側部緩衝材)

緩衝材除去試験ケース 2 では、廃棄体側部の緩衝材の下方を対象として廃棄体を把持し塩水噴射部昇降装置を最大伸張した状態で緩衝材の除去を実施した。

緩衝材下部における緩衝材除去は、上部から塩水噴射部よりやや大きいサイズの円筒状の空間の下部での作業となる。この状況を再現するため、図 5.3.2-24 に示す試験体の構成に変更した。具体的には、ケース 1 の試験体における緩衝材 No.3~6 リングを撤去し、緩衝材 No.5 を緩衝材 No.2 リングの上に設置した。除去する緩衝材の上面位置は、処分坑道の床版より下方 GL-2.905m である。

ケース 1 において吸引能力が不足していたため、吸引ポンプを追加した。

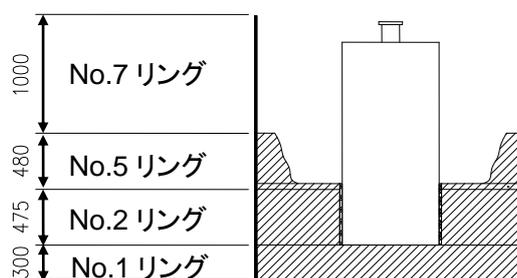


図 5.3.2-24 ケース 2 における試験体の構成

### 1) 緩衝材除去状況

緩衝材位置および経過時間より緩衝材除去速度を算出し、緩衝材と模擬廃棄体およびペレットの位置関係の図に示す (図 5.3.2-25)。また、緩衝材除去状態の観察結果を図 5.3.2-26 に示す。試験ケース 2 より得られた知見は以下の通り。

- 模擬廃棄体を把持・振れ止めを行い、側部の緩衝材除去の作業中において模擬廃棄体の安定性は保たれていた。
- 緩衝材除去の作業中、塩水供給とスラリー排出のバランスが安定せず、間欠的に塩水噴射を行った。
- 試験は塩水噴射部下端 (スタビライザー) が最大深度 GL-3.175m (最大伸張状態) になった後も継続し、最終的に噴射リング直下の除去深さは、270mm (GL-3.201m : 模擬廃棄体底部より 229mm 上方、標尺による測定) であった。
- 除去形状の詳細については後述するが、深度が深くなるにつれて、ケース 1 の廃棄体側部の緩衝材除去の状況と同様にペレット充填部を中心に水流による洗掘が見られず鉢状となり、除去深さは、440mm (GL-3.345m : 模擬廃棄体底部より 85mm 上方、標尺による測定) であった。

った。この状況から、水流が深度の深い方向へ逃げていたため、塩水噴射部直下の緩衝材が除去され難い状況になり結果として除去速度が遅くなったものと考えられる。

- ケイ砂堆積状況は、ケース 2 においても若干見られたものの、ケース 1 ほど除去速度への影響が懸念される状況ではなかった。ケース 2 では塩水が溜まる範囲 (模擬廃棄体から半径方向に+300~400mm 程度) が小さくなり水量が少なくなったため、水流によりケイ砂

が攪拌され吸引派出されたものと考えられる。

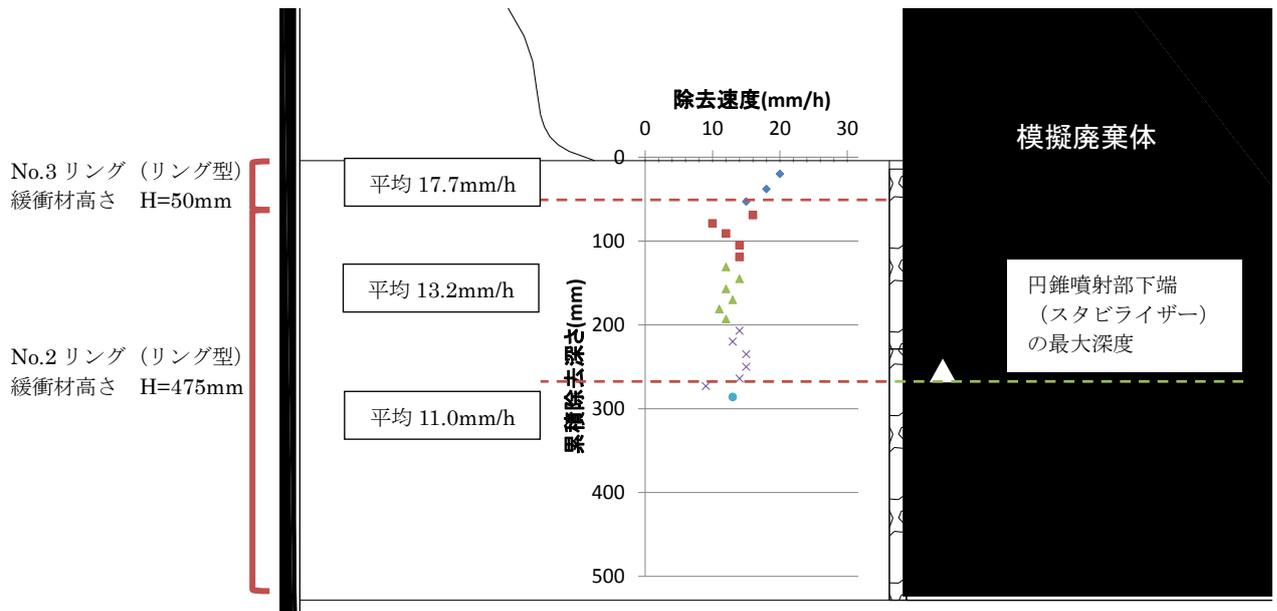


図 5.3.2-25 ケース 2 における緩衝材除去深度測定結果

試験番号	日時	噴射時間 (min)	累積時間 (min)	塩水噴射部先端位置 (GL-)	緩衝材除去深さ(塩水噴射部先端降下量)			最深部深さ(廃棄体周り)		噴射方向	備考	写真
					(mm)	(mm/60min)	累積(mm)	(GL-)	累積除去深さ(mm)			
1	2014/2/17 12:30			2,905						下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・180分(3時間)連続噴射。</li> <li>・噴射された緩衝材に若干の隙が見られるものの、平面的に除去が進む。</li> </ul>	 累積3時間後
	2014/2/17 13:30	60	60	2,925	20	20	20					
2	2014/2/17 14:30	60	120	2,943	18	18	38	—	—			
3	2014/2/17 15:30	60	180	2,958	15	15	53					
4	2014/2/18 10:55									下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・300分(5時間)連続噴射。</li> <li>・累積8時間後、形状確認。模擬廃棄体周りの緩衝材が先行的に除去され始める(ケース1試験でも同様の現象が見られた)。</li> </ul>	 累積8時間後
	2014/2/18 11:55	60	240	2,974	16	16	69					
5	2014/2/18 12:55	60	300	2,984	10	10	79					
6	2014/2/18 13:55	60	360	2,996	12	12	91					
7	2014/2/18 14:55	60	420	3,010	14	14	105					
8	2014/2/18 15:55	60	480	3,024	14	14	119					
9	2014/2/19 10:00									下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・300分(5時間)連続噴射。</li> <li>・累積14時間後、形状確認。模擬廃棄体周りの緩衝材が進み、すり鉢状態を形成。</li> </ul>	 累積14時間後
	2014/2/19 11:00	60	540	3,036	12	12	131					
10	2014/2/19 12:00	60	600	3,050	14	14	145					
11	2014/2/19 13:00	60	660	3,062	12	12	157					
12	2014/2/19 14:00	60	720	3,075	13	13	170					
13	2014/2/19 15:00	60	780	3,086	11	11	181					
14	2014/2/19 16:00	60	840	3,098	12	12	193					
15	2014/2/20 9:26									下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・300分(5時間)連続噴射+60分(1時間)連続噴射。</li> <li>・累積19時間後、ノズル位置確認のため中断。</li> <li>・累積19~20時間でスタビライザー最大深度である、3175mmに到達。累積20時間後の深度は定規にて測定。</li> <li>・累積20時間後、廃棄体周りのすり鉢状底部を定規にて測定。平均3327mmでスタビライザー底部よりも149mm進行している。模擬廃棄体底部までは残り103mm。</li> </ul>	 累積20時間後
	2014/2/20 10:26	60	900	3,112	14	14	207					
16	2014/2/20 11:26	60	960	3,125	13	13	220					
17	2014/2/20 12:26	60	1020	3,140	15	15	235					
18	2014/2/20 13:26	60	1080	3,155	15	15	250					
19	2014/2/20 14:26	60	1140	3,169	14	14	264					
20	2014/2/20 15:12									下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・60分(1時間)連続噴射。</li> <li>・累積21時間後の深度は定規にて測定。</li> <li>・累積21時間後、廃棄体周りのすり鉢状底部を定規にて測定。平均3345mmで、模擬廃棄体底部までは残り85mm。</li> <li>・累積21時間後、模擬廃棄体の引上げを実施。緩衝材による拘束が除去されていることを確認。</li> </ul>	 累積21時間後
	2014/2/20 16:12	60	1200	3,178	9	9	273	3,327	422			
21	2014/2/21 9:20									下向き	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下向き噴射60分間における降下量を測定。</li> <li>・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。</li> <li>・60分(1時間)連続噴射。</li> <li>・累積21時間後の深度は定規にて測定。</li> <li>・累積21時間後、廃棄体周りのすり鉢状底部を定規にて測定。平均3345mmで、模擬廃棄体底部までは残り85mm。</li> <li>・累積21時間後、模擬廃棄体の引上げを実施。緩衝材による拘束が除去されていることを確認。</li> </ul>	 累積21時間後
	2014/2/21 10:20	60	1260	3,191	13	13	286	3,345	440			

図 5.3.2-26 ケース 2 における緩衝材除去状態の観察結果

## 2) 3D スキャナーによる緩衝材除去形状・除去体積

ケース1と同様に緩衝材除去状況の把握のため3D スキャナーによる緩衝材除去形状を計測した。計測の頻度は、1日の作業の最後に1回とした。

緩衝材除去体積は、3次元データからx,y軸に沿った断面から平均的な寸法を把握し、除去形状を円錐と円柱の組み合わせにより算定した。

緩衝材の除去形状および除去体積計算結果を図 5.3.2-27～図 5.3.2-36 に示す。これらのデータから得られた知見を以下に示す。

- 深度が深くなるにつれて、模擬廃棄体直近の緩衝材が先行的に除去されてすり鉢状となっている。累積14時間後の形状(図 5.3.2-31)からその傾向がみられる。
- 3D スキャナーは模擬廃棄体の陰の部分など測定できない範囲があり、緩衝材除去形状を鮮明に得ることはできなかった。

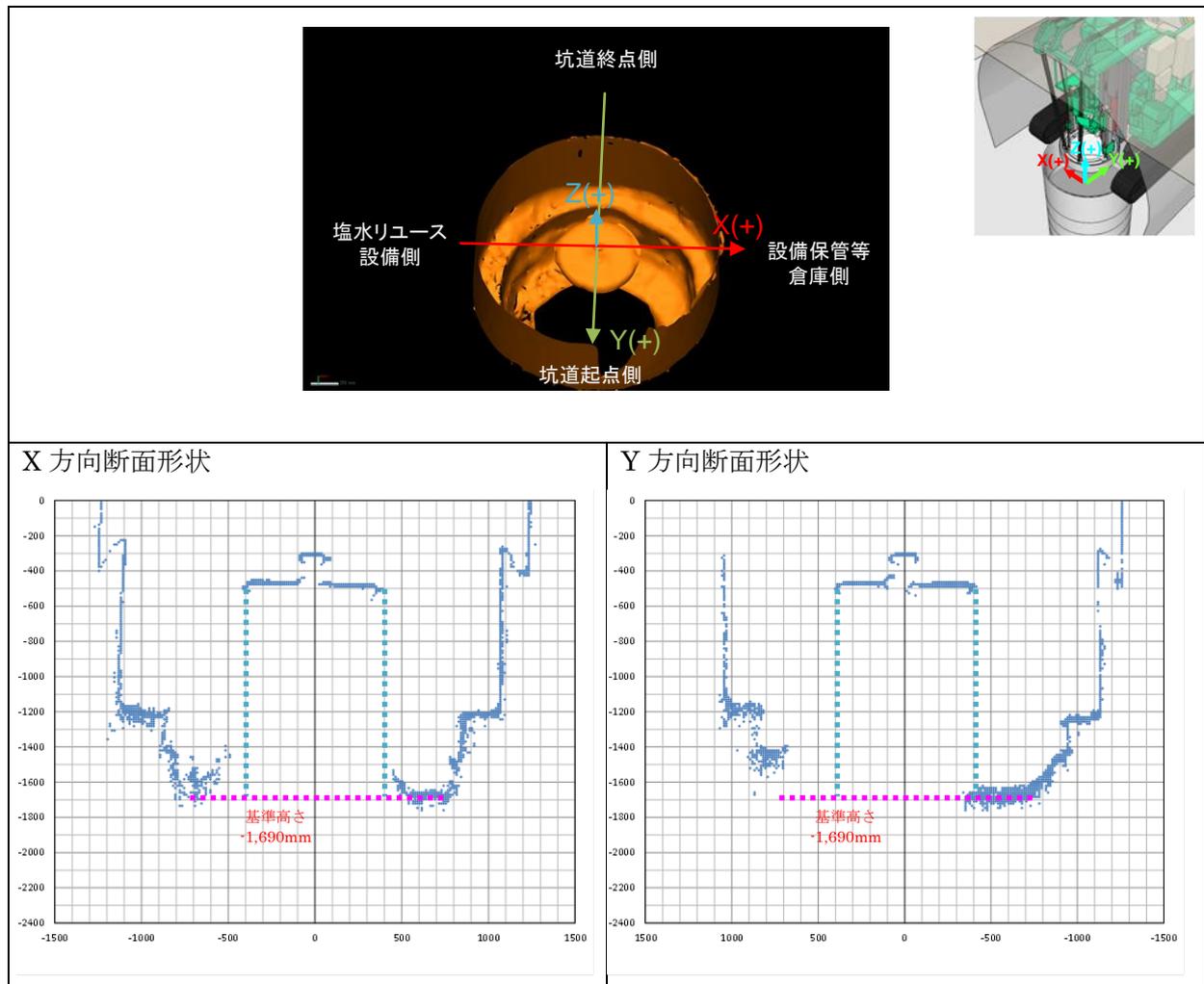


図 5.3.2-27 緩衝材形状 (ケース2 試験開始前)

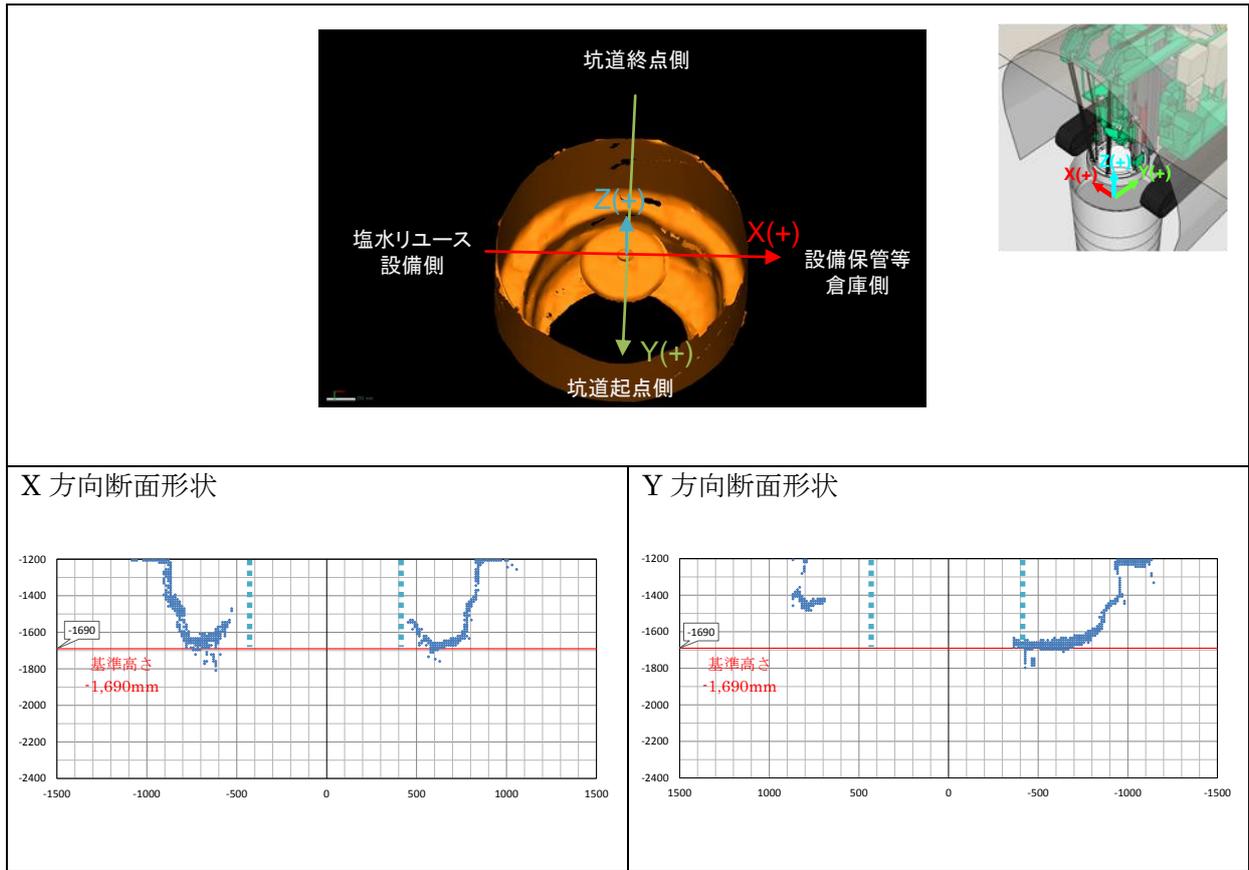


図 5.3.2-28 緩衝材除去形状 (ケース 2 累積 3 時間後)

累積 3 時間では除去量が少なく、除去体積計算が不可能であったため緩衝材除去形状のみ示す。

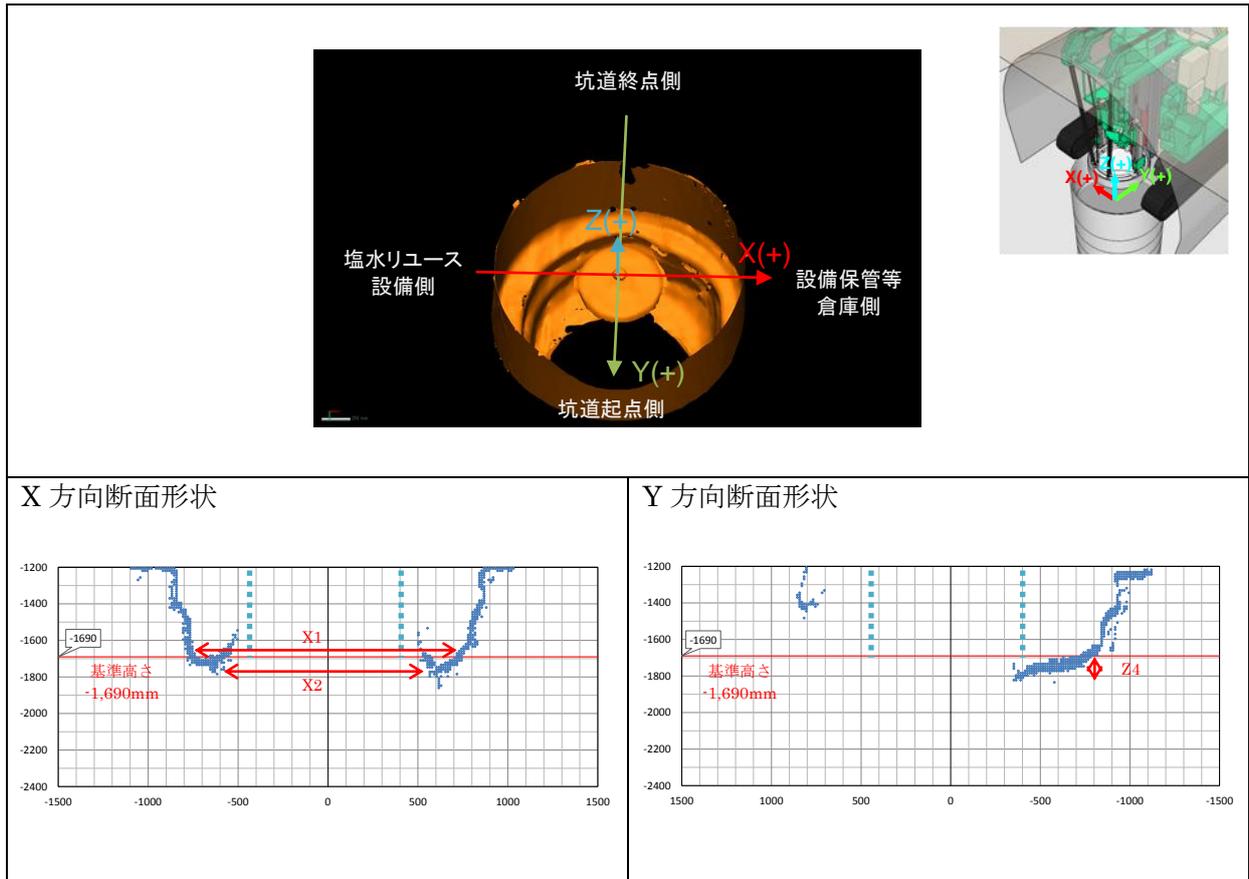
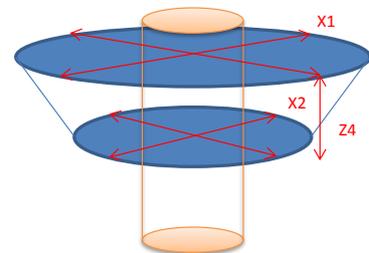


図 5.3.2-29 緩衝材除去形状 (ケース 2 累積 8 時間後)

位置	長さ[mm]		位置	高さ[mm]
X1	1522		Z1	—
X2	1333		Z2	—
X3	—		Z3	—
			Z4	119
除去体積[m <sup>3</sup> ]				0.128



※ここでは、X1 と X2 から平均断面積を算出、Z4 を高さとし円錐台の体積を求めた。また、模擬廃棄体 φ820、高さ Z4 から体積控除分を算出して、除去体積を算出した。

図 5.3.2-30 除去体積計算 (ケース 2 累積 8 時間後)

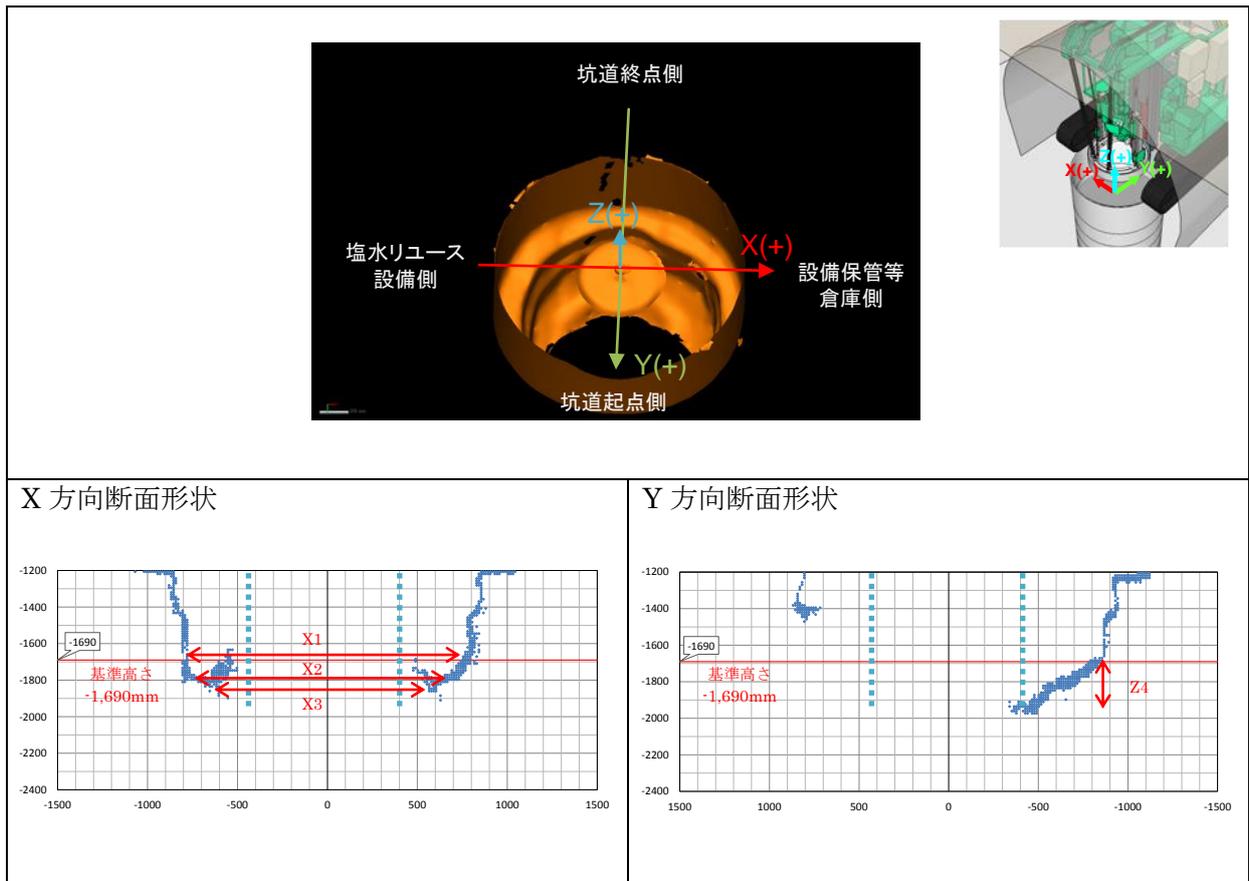
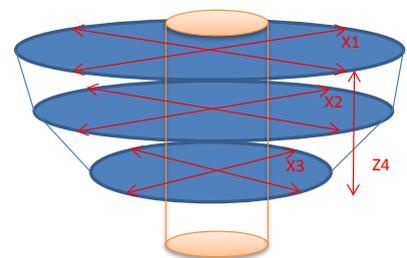


図 5.3.2-31 緩衝材除去形状（ケース 2 累積 14 時間後）

位置	長さ[mm]		位置	高さ[mm]
X1	1622		Z1	—
X2	1521		Z2	—
X3	1182		Z3	—
			Z4	270
除去体積[m <sup>3</sup> ]				0.302



※ここでは、2つの円錐台を設定。X1とX2から平均断面積を算出、高さ110mmとして1つ目（上部）の円錐台の体積を求めた。また、X2とX3から平均断面積を算出、高さ160mm（Z4-110mm）として2つ目（下部）の円錐台の体積を求めた。さらに、模擬廃棄体φ820、高さZ4から体積控除分を算出して、除去体積を算出した。

図 5.3.2-32 除去体積計算（ケース 2 累積 14 時間後）

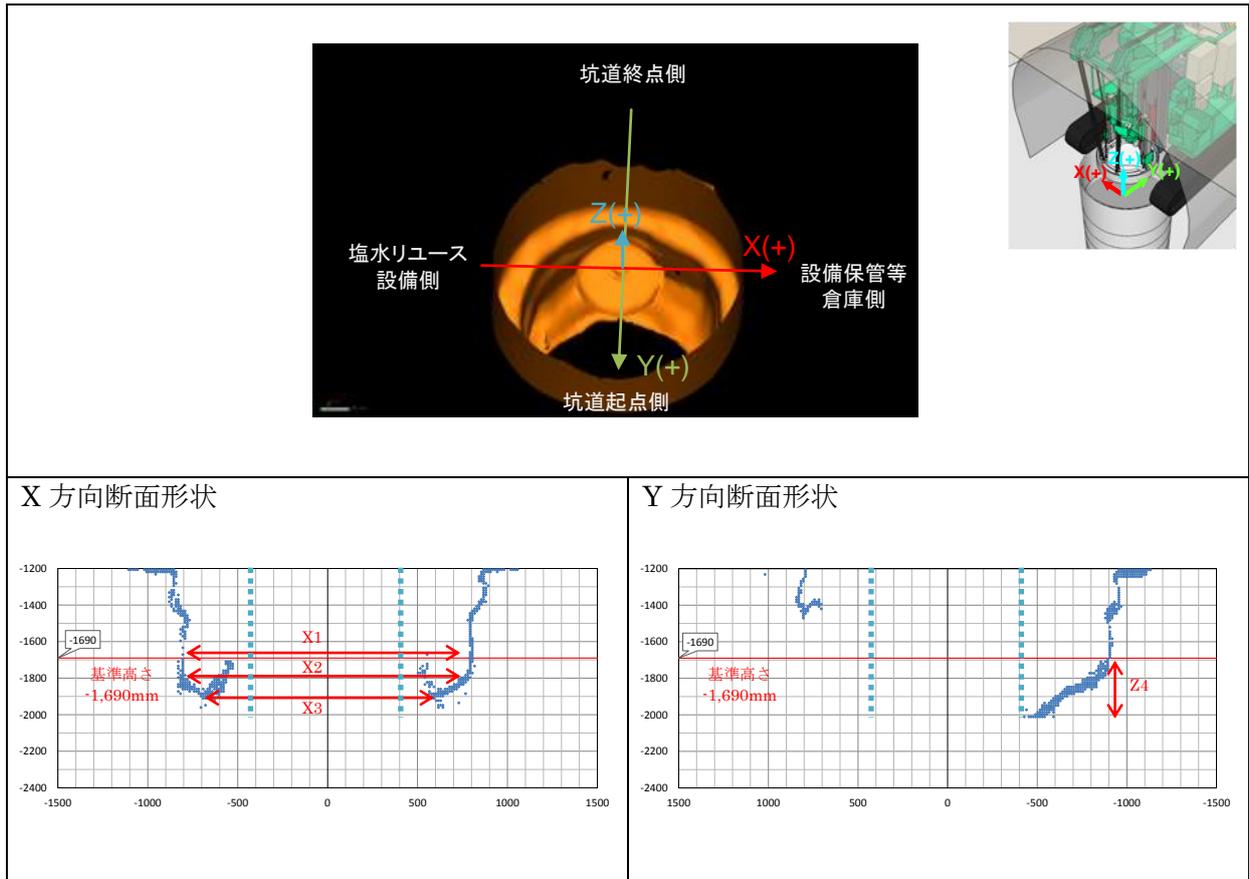
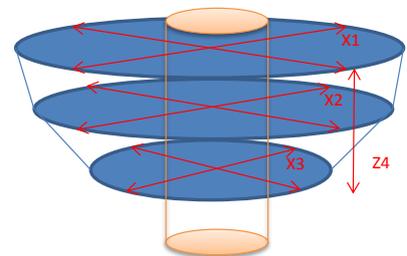


図 5.3.2-33 緩衝材除去形状（ケース 2 累積 20 時間後）

位置	長さ[mm]		位置	高さ[mm]
X1	1608		Z1	—
X2	1609		Z2	—
X3	1300		Z3	—
			Z4	320
除去体積[m <sup>3</sup> ]				0.405



※ここでは、2つの円錐台を設定。X1とX2から平均断面積を算出、高さ110mmとして1つ目（上部）の円錐台の体積を求めた。また、X2とX3から平均断面積を算出、高さ210mm（Z4-110mm）として2つ目（下部）の円錐台の体積を求めた。さらに、模擬廃棄体φ820、高さZ4から体積控除分を算出して、除去体積を算出した。

図 5.3.2-34 除去体積計算（ケース 2 累積 20 時間後）

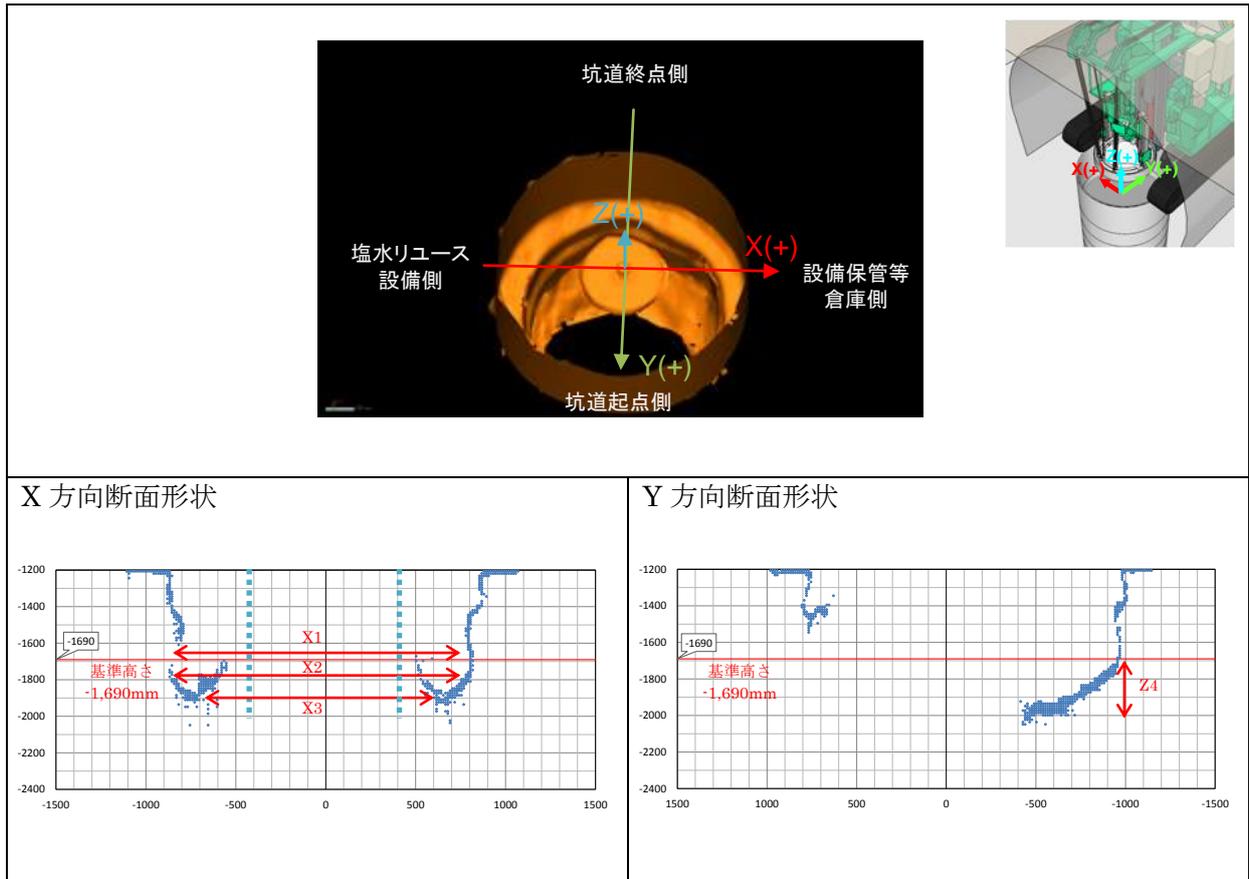
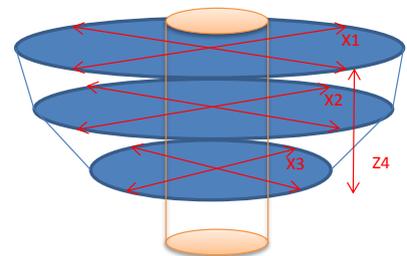


図 5.3.2-35 緩衝材除去形状（ケース 2 累積 21 時間後）

位置	長さ[mm]	位置	高さ[mm]
X1	1621	Z1	—
X2	1647	Z2	—
X3	1350	Z3	—
		Z4	320
除去体積[m <sup>3</sup> ]			0.433



※ここでは、2つの円錐台を設定。X1とX2から平均断面積を算出、高さ110mmとして1つ目（上部）の円錐台の体積を求めた。また、X2とX3から平均断面積を算出、高さ210mm（Z4-110mm）として2つ目（下部）の円錐台の体積を求めた。さらに、模擬廃棄体φ820、高さZ4から体積控除分を算出して、除去体積を算出した。

図 5.3.2-36 除去体積計算（ケース 2 累積 21 時間後）

### 3) 廃棄体の把持・振れ止め機能の確認

緩衝材除去試験中、模擬廃棄体の把持・振れ止め機能について確認を行った。緩衝材除去装置の把持方法を図 5.3.2-37 に示す。把持・振れ止めについて得られた知見を以下に示す。

- 緩衝材除去試験ケース 1 の終了時に把持・振れ止めの装置操作と動作の確認を実施し、操作はモニターカメラにより模擬廃棄体把持部の位置を確認しながら装置の把持装置を平面位置 (xy) および傾きを調整し徐々に下降させ、模擬廃棄体把持部を装置のツメで把持をすることができた (図 5.3.2-38、図 5.3.2-39)。
- ケース 2 の試験時では、模擬廃棄体を把持・振れ止めをした後に緩衝材除去を実施した。試験中、把持部にかかる重量のモニタリングや状態の観察により模擬廃棄体が不安定になることはなく把持・振れ止めの機能が有効であることを確認した。
- ケース 2 の試験終了時に、模擬廃棄体の拘束状態を確認するために模擬廃棄体の引上げを実施した。この結果、昇降設備の引上げ力として具備した最大引上げ力 16.0t の範囲で引上げ可能であることを確認した。

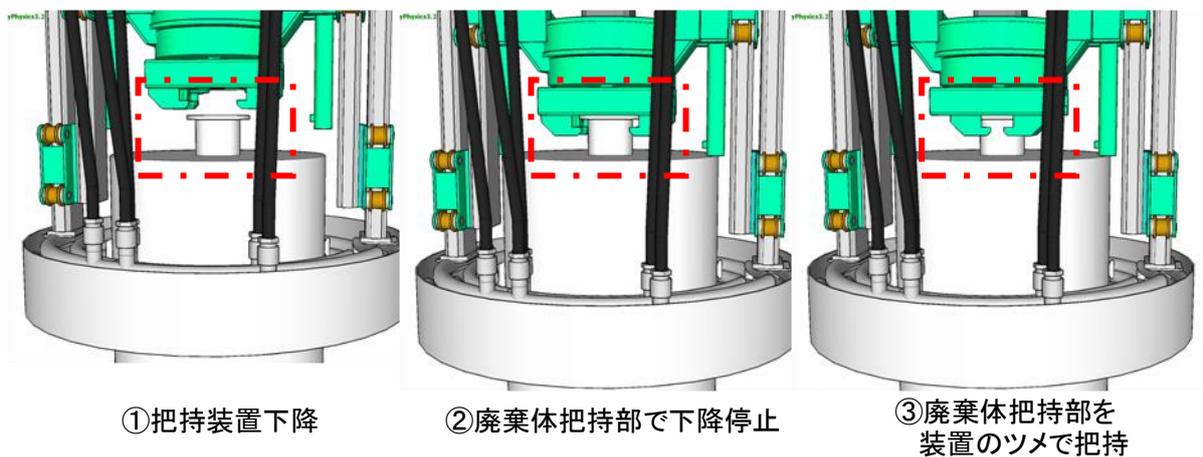


図 5.3.2-37 廃棄体の把持の把持方法

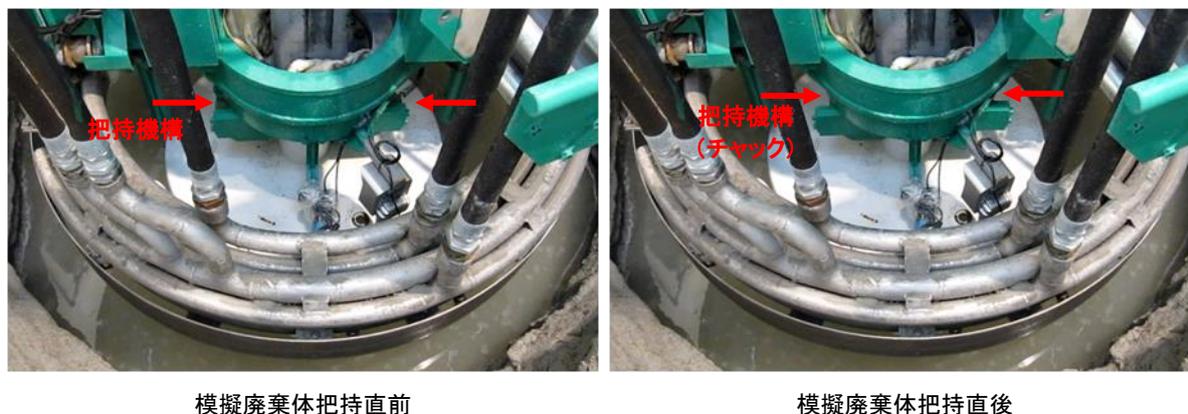


図 5.3.2-38 模擬廃棄体の把持・振れ止め状況

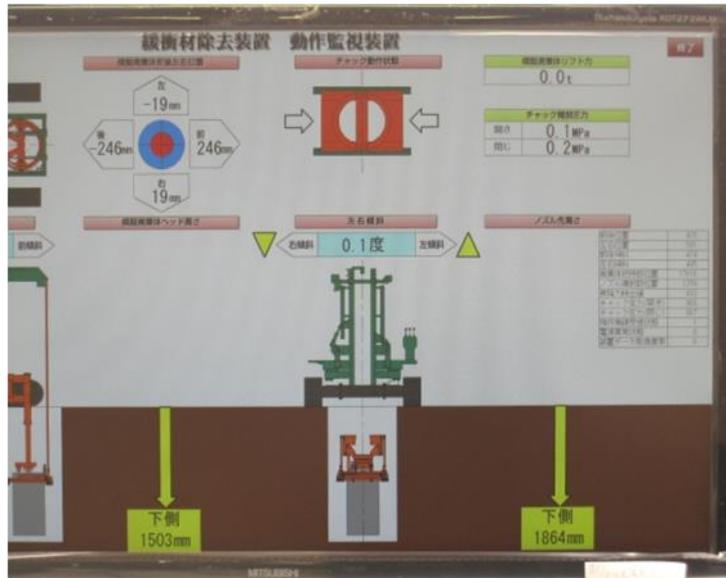


図 5.3.2-39 模擬廃棄体の把持・振れ止め状況（モニター画面）

### (3) 緩衝材除去量の算定

スラリーおよびリユース塩水の SS 濃度と吸引流量から以下の式で緩衝材除去量を算定することができる（表 5.3.2-1、表 5.3.2-2）。

$$\text{緩衝材除去量（重量）} = \{(\text{スラリーSS 濃度}) - (\text{リユース塩水の SS 濃度})\} \times \text{吸引流量}$$

$$\text{緩衝材除去量（体積）} = (\text{緩衝材除去量（重量）}) / (\text{緩衝材の乾燥密度})$$

※本試験では緩衝材の乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>

上記の SS 濃度から算定した緩衝材除去量と 3D スキャナーによる緩衝材除去量の比較をケース 1、ケース 2 それぞれ図 5.3.2-40、図 5.3.2-41 に示す。また、除去深度による緩衝材除去量と除去速度との対比を行った（図 5.3.2-42）。これから得られた知見を以下に示す。

- 各ケースとも両者の除去量は概ね一致している。リアルタイムで緩衝材の除去量を測定する方法として SS 濃度から算定する方法の有効性が示された。
- 各ケースの試験後半では、両者の除去量に差が生じている。これは局所的に残ったスラリーやケイ砂のため、3D スキャナーにより模擬廃棄体直近の除去形状を正確に計測できなかった可能性があると考えられる。
- 除去速度の低下と時間当たりの除去量の低下が概ね一致する傾向（比例関係）が見られる。この関係は緩衝材が除去された穴が横には広がらずに深さ方向に進展していることが分かる。

表 5.3.2-1 SS 濃度（固液分離設備前後の SS 濃度）からの緩衝材の除去量算定

date	time	入口側 SS (時間換算)	出口側 SS (時間換算)	流量	流入 ベントナイト量	初期含有 ベントナイト量	溜り水内 ベントナイト量	除去 ベントナイト量	除去 ベントナイト量 (1時間換算)	累計除去量 (乾燥ベントナイト)	累計除去量 (乾燥ベントナイト+ 砂)	累計除去量 (湿潤ベントナイト+ 砂)	除去体積計算からの除去量 (乾燥密度1.6Mg/m <sup>3</sup> で計算)	備考
		mg/L	mg/L	m <sup>3</sup>	kg	kg	kg	kg	kg/h	kg	kg	kg	kg	
2014/1/29	1	1894.68	249.18	14.35	27.18	3.57	0.58	24.18	24.18	24.18	34.55	39.90		
	2	4217.42	337.01	15.03	63.37	5.06	0.39	58.69	58.69	82.87	118.39	136.74		
	3	3630.91	308.43	15.21	55.24	4.69	0.78	51.33	51.33	134.20	191.72	221.43		
	4	3439.47	292.56	15.13	52.05	4.43	0.29	47.91	47.91	182.12	260.17	300.49	184.0	
2014/1/30	10	21244.98	1633.92	15.05	319.71	24.59	0.46	295.58	49.26	477.70	682.42	788.20	838.4	
2014/1/31	16	25967.02	1582.69	14.99	389.37	23.73	4.00	369.63	61.61	847.33	1210.47	1398.09	947.2	
2014/2/3	22	20558.16	2041.39	15.22	312.84	31.06	1.45	283.22	47.20	1130.55	1615.07	1865.41	1492.8	
2014/2/4	28	17063.02	1943.60	15.31	261.23	29.76	0.60	232.08	38.68	1362.63	1946.61	2248.33	1904.0	
	28.17	1309.99	81.34	7.12	9.33	0.58	1.96	10.71	64.25	1373.34	1961.91	2266.00		横向き噴射
2014/2/5	35	17858.23	2755.69	14.57	260.21	40.15	1.79	221.85	32.47	1595.19	2278.84	2632.06	2011.2	
2014/2/6	42	19971.01	2699.02	14.59	291.45	39.39	1.39	253.46	36.21	1848.64	2640.92	3050.26	2376.0	
2014/2/7	43	3777.00	326.98	15.43	58.28	5.05	0.00	53.23	53.23	1901.88	2716.97	3138.10		
	44	2753.40	284.96	15.34	42.24	4.37	0.70	38.56	38.56	1940.44	2772.06	3201.73	2539.2	

※湿潤ベントナイトは含水比 15.5%として計算した

表 5.3.2-2 SS 濃度（固液分離設備前後の SS 濃度）からの緩衝材の除去量算定（ケース 2）

date	time	入口側 SS (時間換算)	出口側 SS (時間換算)	流量	流入 ベントナイト量	初期含有 ベントナイト量	溜り水内 ベントナイト量	除去 ベントナイト量	除去 ベントナイト量 (1時間換算)	累計除去量 (乾燥ベントナイト)	累計除去量 (乾燥ベントナイト+ 砂)	累計除去量 (湿潤ベントナイト+ 砂)	除去体積計算からの除去量 (乾燥密度1.6Mg/m <sup>3</sup> で計算)	備考
		mg/L	mg/L	m <sup>3</sup>	kg	kg	kg	kg	kg/h	kg	kg	kg	kg	
2014/2/17	3	4267.68	790.38	14.78	63.08	11.68	0.46	51.86	17.29	51.86	74.08	85.56		
2014/2/18	8	9415.49	1676.36	14.70	138.40	24.64	0.29	114.05	22.81	165.90	237.00	273.74	204.8	
2014/2/19	14	16385.51	2007.86	14.71	241.10	29.54	3.45	215.01	35.84	380.91	544.16	628.50	483.2	
2014/2/20	20	18095.71	1923.26	14.67	265.52	28.22	5.84	243.15	40.52	624.06	891.51	1029.70	648.0	
2014/2/21	21	4237.94	130.93	14.68	62.21	1.92	1.07	61.36	61.36	685.42	979.18	1130.95	692.8	

※湿潤ベントナイトは含水比 15.5%として計算した

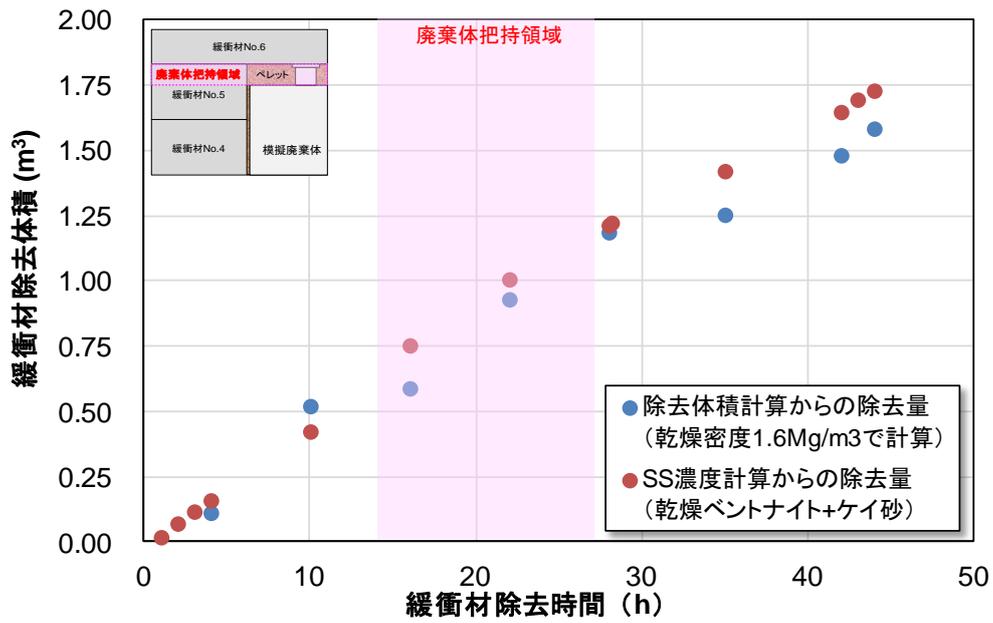


図 5.3.2-40 緩衝材累積除去量（除去体積計算と SS 濃度計算）の比較（ケース 1）

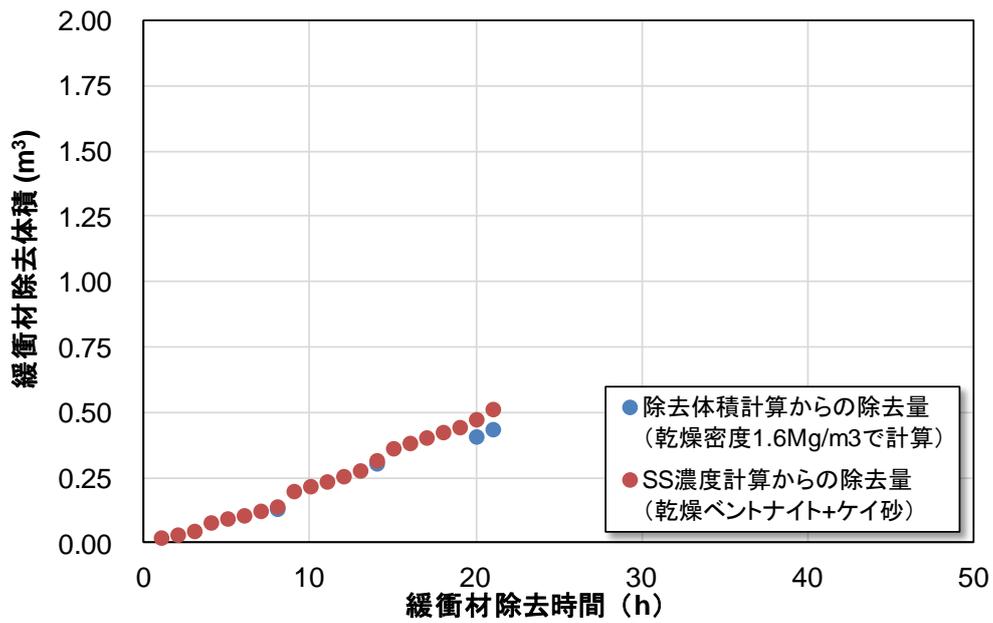


図 5.3.2-41 緩衝材累積除去量（除去体積計算と SS 濃度計算）の比較（ケース 2）

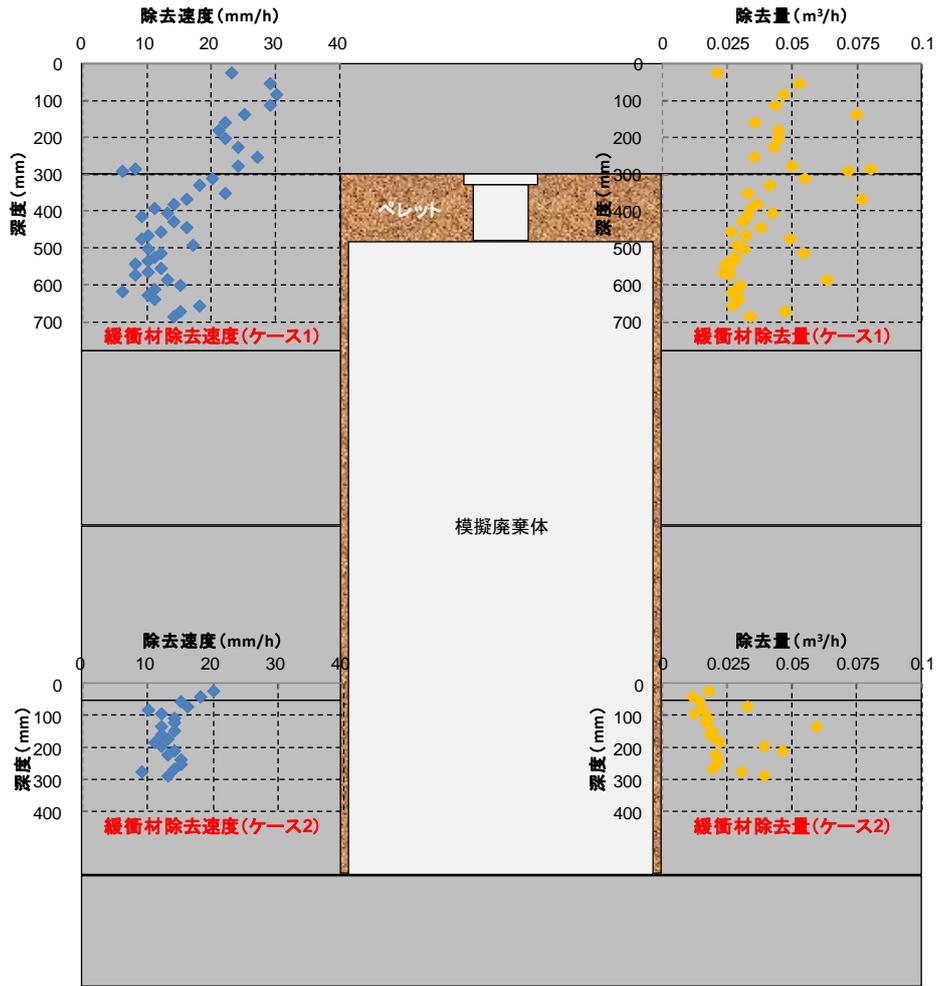


図 5.3.2-42 時間当たり緩衝材除去量（SS 濃度から算定）と除去速度の比較

### 5.3.3 遠隔操作の安全性

緩衝材除去試験において装置を遠隔にて操作し、塩水リユース特性および緩衝材除去特性に関するデータを取得した。試験中、装置の状況や緩衝材除去状況に関するデータの取得ができ、遠隔操作室において試験状況の監視ができた。試験を通して遠隔操作による装置の不具合や誤動作は発生しなかった。今回の試験の条件において遠隔操作による安全性の確認ができた。しかし、試験は装置の日中の連続稼働時間は最大 7 時間程度であったため廃棄体回収のための緩衝材除去にかかる時間（数日/本）に対しては短く、連続稼働に関わる遠隔操作の安全性の確認は十分ではないと考えられる。

## 5.4 まとめ

### 5.4.1 塩水リユース特性

塩水リユース特性に関わる機能確認結果を以下にまとめる。

- 塩水リユース設備（固液分離設備）は、「H24 回収高度化」において SS 濃度 5,000mg/L 以下の塩水供給を満足する機能を備えている。本試験において処理するスラリーの SS 濃度の変化にも対応し、処理した塩水の SS 濃度は平均 320mg/L 程度になり、急激な上昇も見られず、安定した処理できることが分かった。
- 塩水噴射流量とスラリー吸引流量は、試験初期はバランスしたものの、緩衝材除去が進み深度が深くなるにつれてスラリー吸引流量が減少した。
- リユース塩水の品質として塩分濃度、pH は特に調整することなく安定している。

### 5.4.2 緩衝材除去特性

緩衝材除去特性に関わる機能確認結果を以下にまとめる。

- 本試験では、縦置き・ブロック方式（廃棄体と緩衝材間の隙間 20mm にペレットを充填）を設定した。この場合には、廃棄体側面の材料界面に先行的に塩水が浸透し、緩衝材が除去された。結果的に廃棄体側部の緩衝材が 20cm 以上残った状態でも模擬廃棄体の拘束力は除去されていることを確認した。
- 製作した緩衝材除去装置は、乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>、飽和度 60%程度の緩衝材に対して、下向き噴射（塩分濃度 4%、噴射圧力 0.6MPa）のみで模擬廃棄体周囲の緩衝材が除去できることが分かった。
- 緩衝材の除去速度（1時間当たりの除去深さ）は、ケース 1 の模擬廃棄体把持部上部では平均 22mm/h、側部では 14mm/h、模擬廃棄体胴部周りでは 12mm/h である。一方、ケース 2 の模擬廃棄体胴部周りの緩衝材の除去速度は平均 13mm/h であり、本試験条件における緩衝材の除去速度が把握できた。
- 塩水リユース設備の固液分離前後の SS 濃度から推定した緩衝材除去量と、3D スキャナーによる緩衝材除去形状から推定した緩衝材除去量は概ね一致したことから、緩衝材の除去量は SS 濃度を管理することで推定可能であることが分かった。

#### 5.4.3 緩衝材除去試験の考察および今後の課題

試験の考察と今後の課題について述べる。

- 緩衝材除去装置の一連のシステムについて緩衝材除去試験を通じて必要とする機能の確認を実施し、各機能の性能の把握と課題の抽出ができた。
- 今回の緩衝材除去試験において遠隔操作による装置の不具合や動作の異常など危険性は確認されなかった。
- 緩衝材の除去速度（1時間当たりの除去深さ）の結果から、本試験で設定した緩衝材や塩水などの試験条件において緩衝材を除去する範囲を模擬廃棄体把持部上部 300mm、側部 175mm、模擬廃棄体側部 1,730mm（緩衝材を除去する範囲は 1,485mm）と設定した場合、廃棄体回収のための緩衝材除去をするために要する時間は、下式より連続 150 時間（6.2 日間）と算定される。

$$\begin{aligned} T[h] &= (300[\text{mm}] / 22[\text{mm/h}]) + (175[\text{mm}] / 14[\text{mm/h}]) + (1485[\text{mm}] / 12[\text{mm/h}]) \\ &= 13.6 + 12.5 + 123.8 \\ &= 149.9[h] \end{aligned}$$

「H24 回収高度化」における試験結果では、1,730mm の模擬廃棄体側部の除去に要する時間は、連続 156 時間（6.5 日間）と算定しているが、これと同じ高さ寸法を設定した場合、本試験結果からは連続 144 時間（6.0 日間）と算定され、結果はほぼ一致する。

- 本試験のように縦置き・ブロック方式（廃棄体と緩衝材間の隙間にペレットを充填）した条件では、隙間を充填した部分を中心に緩衝材が先行的に除去された。このことは廃棄体回収のための緩衝材除去（廃棄体の拘束除去）に要する時間をさらに短縮できる可能性を示している。
- 機能確認試験の結果から、吸引ノズルの深度増加とともにスラリー吸引流量が低下する現象が生じた。これは吸引ホースの内圧による径の減少、これまでの試験において揺動動作を繰返し実施したことによる吸引ホースの変形のため摩擦損失が大きくなったことが原因の一つと考えられる。今後の対策として、ホースの材質変更や径の大きなホースへの変更が考えられ、これを含めた設備の改良が必要と考えられる。
- 緩衝材除去作業中に塩水噴射部が徐々に下降する状況が発生し、緩衝材に接触し揺動動作が停止した。揺動動作が停止すると均一に緩衝材除去ができない。揺動動作ができるように塩水噴射位置の調整のため、操作者による常時監視と操作が必要であった。今後、装置の安定動作のため塩水噴射部の油圧系昇降動作の改善が必要と考えられる。

- スラリーの SS 濃度等に関してリアルタイムにデータ取得ができると緩衝材除去量の推定につながるため、計測機器の追加が緩衝材除去状況の把握に関する機能強化になると考えられる。
- 回収技術の中核をなす本緩衝材除去装置は、システムとして実証モデルがほぼ完成したものと考えられる。この装置の完成度を上げ、回収の実用的な装置稼働を考えた回収の時間効率の向上や装置規模の最適化が必要である。また同時に、試験により緩衝材に関する装置の適用範囲(密度、飽和度、作成方法など)を確認する必要もあると考えられる。

## 第6章 地層処分施設における回収維持期間の検討

### 6.1 実施方針と実施内容

#### 6.1.1 実施方針

処分施設における回収維持期間の検討では、図 6.1.1-1 実施フローに示すとおり、処分施設を埋め戻さずに一定期間維持することで処分施設の安全性に及ぼす影響について、周辺岩盤の力学的な観点、水理的な観点及び化学的な観点等から調査・整理を行うとともに、地層処分施設類似の地下坑道等の維持に関する国内外の現状に関する文献調査を行った。さらに、この二つの知見から抽出された課題を整理し、課題解決についてとりまとめた。

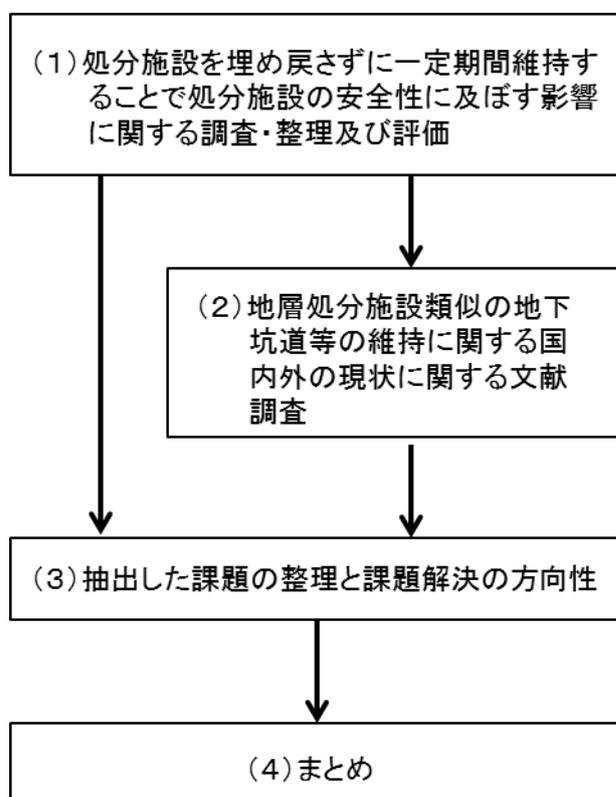


図 6.1.1-1 実施フロー

## 6.1.2 実施内容

前述の実施方針のもと、実施内容について以下に示す。

### (1) 処分施設を埋め戻さずに一定期間維持することで、処分施設への安全性に及ぼす影響に関する調査・整理及び評価

- ① 処分施設を埋め戻さない地下坑道範囲の検討及び設定
  - ・ 検討対象とする地下坑道範囲（埋め戻さない地下坑道）の設定
  - ・ 処分施設を埋め戻さない一定期間の検討
- ② 埋め戻さない一定期間に対する処分施設の安全性に及ぼす影響の検討及び評価
  - ・ 処分施設の安全性に及ぼすニアフィールド要件の抽出と整理
  - ・ 処分施設の安全性の及ぼすニアフィールド特性の抽出と整理
  - ・ ニアフィールドの構成要素とその使用材料の抽出と整理
  - ・ ニアフィールドの変状要因の抽出と整理
  - ・ 使用材料の経時的な変状（変質・劣化現象）の抽出と整理
  - ・ ニアフィールド状態の経時変化の概念検討（ストーリーボードの作成）
  - ・ ニアフィールドに発生する諸現象とその要因の抽出と整理
  - ・ 埋戻し時期の違いによる従来と異なる現象の抽出と整理
  - ・ 処分施設の安全性に及ぼす影響の整理と評価
- ③ 抽出した研究課題の整理と集約
  - ・ ①、②の検討過程により抽出された課題の整理と対応策の提示

### (2) 地層処分類似施設の維持に関する国内外の現状調査

- ① 国内における地層処分類似施設の維持に関する文献調査
  - ・ 調査内容
  - ・ 地下坑道施設を対象とした維持管理方法の例
- ② 国内における原子力関連施設の安全設計及び維持管理方法に関する文献調査
  - ・ 原子力発電所の定期安全レビュー実施基準
  - ・ 再処理設備規格 維持規格
  - ・ 使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準
  - ・ 使用済燃料中間貯蔵施設用コンクリートキャスクの安全設計及び検査基準
  - ・ 廃棄物管理施設の新規制基準骨子（案）
  - ・ 廃棄物管理施設の保安規定(公開版)
  - ・ 高レベル放射性廃棄物貯蔵管理について
- ③ 国外の地層処分関連施設の回収維持に関する文献調査
- ④ 調査結果の適用性について
  - ・ 回収維持期間における設計の考え方への反映
  - ・ 既往維持管理技術の適用性の検討
  - ・ 回収維持期間における安全上具備すべき施設及び機器の検討

・ 諸外国における回収維持期間

(3) 抽出した課題の整理と対応策の提示

- ① 周辺岩盤及び坑道にかかわる課題と対応策
- ② 人工バリアにかかわる課題と対応策

(4) 検討のまとめ

- ① 処分施設を埋め戻さずに一定期間維持することで、処分施設への安全性に及ぼす影響に関する調査・整理及び評価
- ② 地層処分施設類似の地下坑道等の維持に関する国内外の現状調査
- ③ 抽出した課題の整理と対応策の提示

## 6.2 処分施設を埋め戻さずに一定期間維持することで、処分施設への安全性に及ぼす影響に関する調査・整理及び評価

一定期間埋め戻さない状態が処分施設の安全性に及ぼす影響について、以下の3ステップにて検討を行った。

- ・ 処分施設を埋め戻さない地下坑道範囲の検討及び設定
- ・ 埋め戻さない一定期間に対する処分施設の安全性に及ぼす影響の検討・評価
- ・ 抽出した課題の整理

### 6.2.1 処分施設を埋め戻さない地下坑道範囲の検討及び設定

処分施設の建設、操業、閉鎖の事業段階や操業工程（時間軸）と、埋め戻さない地下坑道範囲（空間軸）を図 6.2.1-1 に示すようにリンクさせて、検討対象とする地下坑道範囲の設定、処分施設を埋め戻さない一定期間について検討を行った。

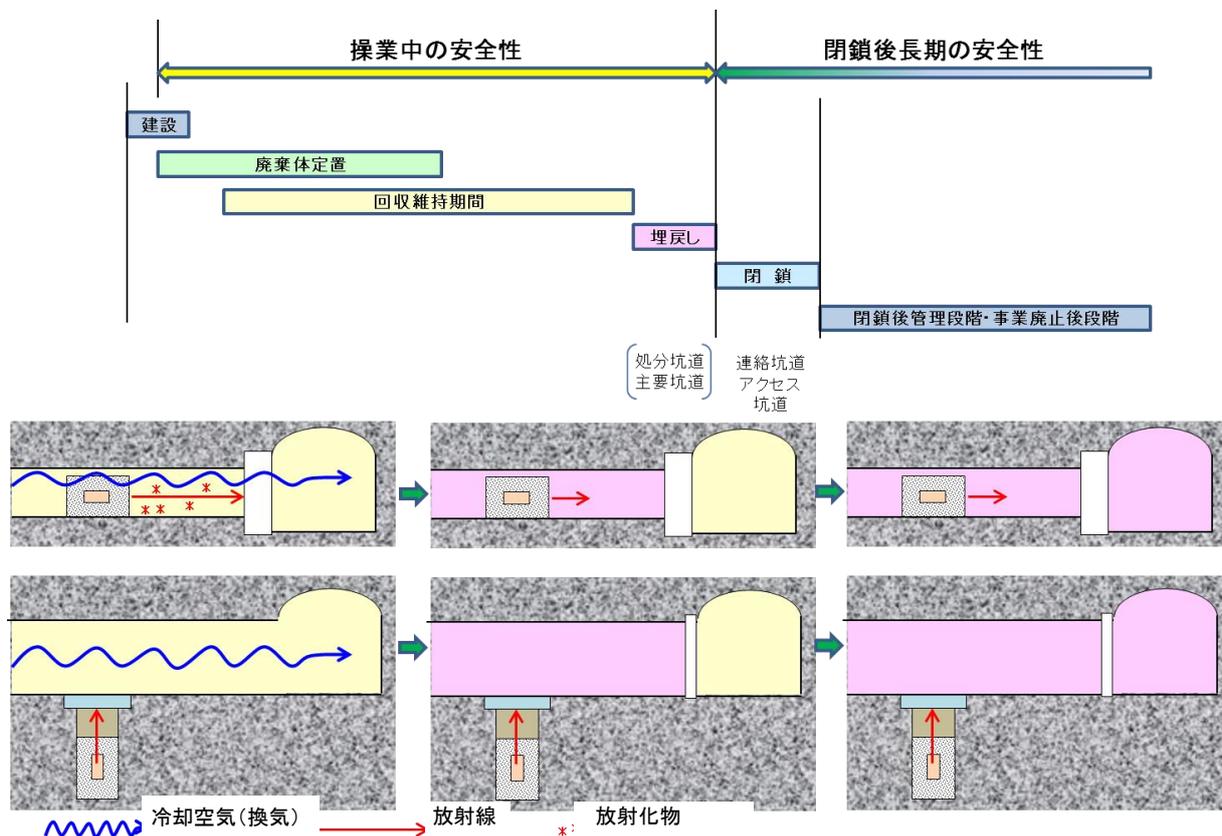


図 6.2.1-1 検討範囲の検討

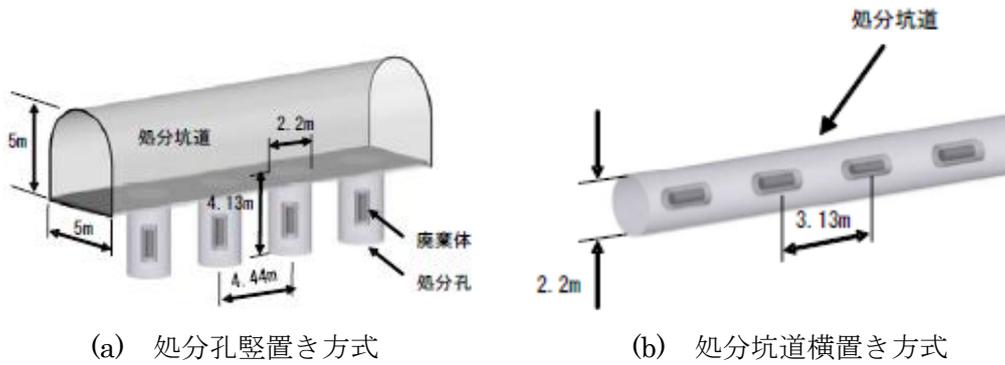
#### (1) 検討対象とする地下坑道範囲の設定

第2次取りまとめにおける処分場概念を図 6.2.1-2 に示す。

本検討では、定置方式として処分孔縦置き方式および処分坑道横置き方式を対象とする。

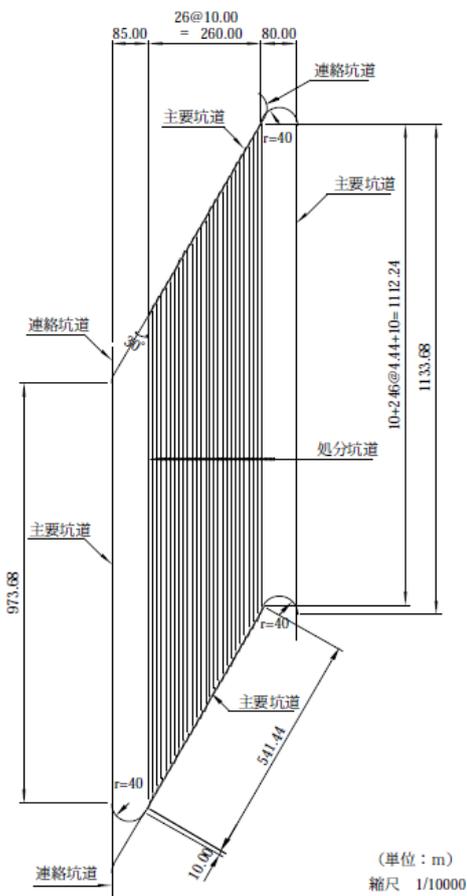
また同様に、第2次取りまとめの地下施設概念における処分パネル概念および処分坑道の入口になるすりつけ部も検討対象とする。

表 6.2.1-1、表 6.2.1-1 に本検討で対象とする地下坑道の範囲について、埋戻し時期を考慮して検討した結果を示す。

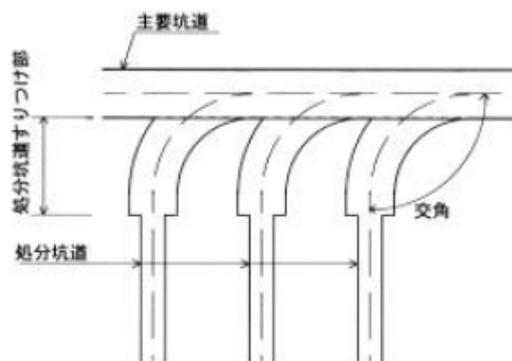


(a) 処分孔縦置き方式

(b) 処分坑道横置き方式



(c) 処分パネル



(d) すりつけ部

図 6.2.1-2 第2次取りまとめにおける処分場概念[5]

表 6.2.1-1 縦置き定置における検討対象

坑道 レファレンス	縦置き					
	処分孔	処分坑道	処分坑道 すりつけ 部	主要坑道	連絡坑道	アクセス 坑道
第2次取りまとめ	操業/定置	操業/埋戻し	操業/埋戻し	操業/埋戻し	閉鎖	閉鎖
本検討での対象	操業行為	<b>対象</b>	<b>対象</b>	<b>対象</b>	閉鎖行為	閉鎖行為

表 6.2.1-2 横置き定置における検討対象

坑道 レファレンス	横置き					
	処分孔	処分坑道	処分坑道 すりつけ 部	主要坑道	連絡坑道	アクセス 坑道
第2次取りまとめ ブロック/隙間小	—	操業/定置 (隙間埋戻しなし)	操業/埋戻し	操業/埋戻し	閉鎖	閉鎖
原環センター PEM/隙間小	—	操業 (隙間埋戻しなし)	未検討	未検討	未検討	未検討
NUMO PEM HS-G/隙間大	—	操業/定置 (隙間埋戻しあり)	未検討	未検討	未検討	未検討
NUMO PEM HS-AB/隙間小	—	操業/定置 (隙間埋戻しあり)	未検討	未検討	未検討	未検討
本検討での対象	—	<b>対象</b>	<b>対象</b>	<b>対象</b>	閉鎖行為	閉鎖行為

(2) 処分施設を埋め戻さない一定期間の検討

第2次取りまとめの操業検討で設定された処分坑道埋戻しの時間[5]を基として、パネルや坑道が掘削後から埋め戻されるまでの期間を算定した。また、閉鎖後処分場における何らかの監視期間を想定した場合やオーバーパックの設計寿命の期間について参考として記載した。

硬岩系・縦置き方式における埋め戻されるまでの期間を算定した結果は、表 6.2.1-3 に示すとおり、6 パネル分の場合、建設開始から埋戻し完了までの期間は、処分孔において約 53 年、処分坑道において、約 56 年となる。

軟岩系・横置き方式における埋め戻されるまでの期間を算定した結果を表 6.2.1-4 に示す。

本検討においては、埋め戻されるまでの期間（空洞存在期間）としては、特に値を設定せず、検討項目毎に考慮する期間を検討することとした。

表 6.2.1-3 硬岩系・豎置き方式における埋め戻されるまでの期間の設定

レファレンス	坑道	硬岩系・豎置き				
		非埋戻し空間あり			非埋戻し空間なし	
		建設開始～埋戻し完了 1パネル分	建設開始～埋戻し完了 6パネル分	立坑掘削開始～立坑埋戻し完了	(想定期間)	オーバーハック設計寿命
第2次取りまとめ処分孔 (参考) (最大開放期間)		約 12 年 (11.2 年)	約 53 年 (52.9 年)	—	—	—
第2次取りまとめ処分坑道 (最大開放期間)		約 14 年 (14.2 年)	約 56 年 (55.8 年)	—	—	—
第2次取りまとめ主要坑道 (最大開放期間)		約 17 年 (16.2 年)	約 57 年 (56.0 年)	—	—	—
第2次取りまとめ立坑掘削～埋戻し (最大開放期間)		—	—	約 71 年 (70.3 年)	—	—
(想定期間)		—	—	—	—	—
(第2次取りまとめオーバーハック設計寿命)		—	—	—	—	1000 年

埋め戻されるまでの期間（回収維持期間）としては、特に値を設定せず、検討項目毎に考慮する期間を検討する。

表 6.2.1-4 硬岩系・横置き方式における埋め戻されるまでの期間の設定

レファレンス	硬岩系・横置き				
	非埋戻し空間あり			非埋戻し空間なし	
	建設開始～ 定置完了 1パネル分	建設開始～ 定置完了 6パネル分	立坑掘削開 始～立坑埋 戻し完了	(想定期間)	オーバーハック 設計寿命
第2次取りまとめ 処分坑道 (最大開放期間)	約 15 年 (14.62 年)	約 57 年 (56.28 年)	—	—	—
第2次取りまとめ 主要坑道 (最大開放期間)	約 15 年 (14.78 年)	約 57 年 (56.45 年)	—	—	—
第2次取りまとめ 立坑掘削～埋戻し (最大開放期間)	—	—	約 70 年 (69.67 年)	—	—
(想定期間)	—	—	—	—	—
(第2次取りまとめ オーバーハック設計寿命)	—	—	—	—	1000 年

## 6.2.2 埋め戻さない一定期間に対する処分施設の安全性に及ぼす影響の検討・評価

処分施設の安全性に及ぼす影響の検討については、処分施設の安全性にかかわるニアフィールド要件の抽出を起点とし、以下の検討を行った。

- ・処分施設の安全性にかかわるニアフィールド要件の抽出と整理
- ・処分施設の安全性にかかわるニアフィールド特性の抽出と整理
- ・ニアフィールドの構成要素とその使用材料の抽出と整理
- ・ニアフィールドの変状要因の抽出と整理
- ・使用材料の経時的な変状（変質・劣化現象）の抽出と整理
- ・ニアフィールド状態の経時変化の概念検討（ストーリーボードの作成）
- ・ニアフィールドに発生する諸現象とその要因の抽出と整理
- ・埋戻し時期の違いによる従来と異なる現象の抽出と整理
- ・処分施設の安全性に及ぼす影響の整理及び評価

### (1) 処分施設の安全性にかかわるニアフィールドの要件の抽出と整理

事業段階・操業中の詳細工程と処分施設の安全性（操業安全性、閉鎖後長期安全性）の観点から、ニアフィールドを構成する要素ごとに、要件を抽出・整理する。

操業中の安全性に係る要件としては、「廃棄体を安全に回収可能なこと」が最上位の要件となると考えられる。これを下記の構成要素に細分化し、それぞれ要件を検討する。

- ① 回収のための「作業環境」の健全性 ⇒ 坑道健全性、温度、湿度、遮へい・閉じ込め等
- ② 回収する「対象物」の健全性 ⇒ オーバーパック、PEM 容器 等
- ③ 回収するための「機器・設備」の確保と維持管理 ⇒ 回収装置、ユーティリティ設備等

閉鎖後の長期安全性に係る要件としては、回収維持期間を経た後においても人工バリアと岩盤（ニアフィールド）の「閉鎖後閉じ込め性が確保されていること」が要件になると考えられる。現状では、施設の状態設定において決めていくことが多くあり、これらの要件について幅広に捉え、閉じ込め性に係る構成要素に細分化し、それぞれ要件を検討する。

- ① 「閉鎖後閉じ込め性」で関係する構成要素 ⇒ 岩盤、オーバーパック、緩衝材
- ② 「閉鎖後閉じ込め性」で関係する環境 ⇒ 地下水特性、地質特性

## (2) 処分施設の安全性にかかわるニアフィールド特性の抽出と整理

処分施設の安全性に影響を及ぼすニアフィールドの特性は多岐にわたり、また相互的に作用することが考えられている。HLW 第 2 次取りまとめなどから処分施設の安全性に影響を及ぼす周辺岩盤の特性について抽出して整理を図る。整理を図る観点、仕様書に示される周辺岩盤の力学的、水理学的、化学的影響だけではなく、定置されている人工バリアから影響（熱的・放射線影響）なども加える。

### 1) 周辺岩盤の特性の抽出と整理

周辺岩盤については、地層処分の観点から重要な地質環境の特性について整理を行った。整理を図る観点は、周辺岩盤の力学的、水理学的、化学的、熱的影響とした。はじめに、それぞれの整理の観点について述べる。

周辺岩盤の力学的な特性は、処分場の建設・操業時における地下空洞の安定性や埋め戻し後のオーバーパックおよび緩衝材の力学的な安定性にとって重要と考えられている。また、水理学的な特性は、緩衝材および岩盤中での核種の移行を支配し、地球化学的な特性とともに、オーバーパックの腐食速度やガラスおよび核種の溶解速度に大きな影響を及ぼすと考えられている。地下水の動きが大きい場合には、緩衝材自体の物理的な安定性にも影響を及ぼすことが考えられている。周辺岩盤および地下水の化学的性質は、オーバーパックの腐食およびガラスや核種の溶解に影響を及ぼし、また、緩衝材の化学的な安定性や緩衝材および岩盤中での核種・鉱物・地下水の相互反応を支配する重要な要素と考えられている。熱的な特性は、処分場の温度環境を支配し、また、人工バリアの性能、特に緩衝材の化学的な安定性にとって重要と考えられている。

周辺岩盤について力学的、水理学的、化学的、熱的影響の観点から整理を行うにあたり、まずは地質構造の特性を考慮する必要がある。地質構造は地下水や物質の移行経路となり得るため、その特性は地下深部での地下水流動特性や地球化学特性に重要な影響を及ぼすと考えられている。第 2 次取りまとめにおいては、周辺岩盤における地質構造の特性は、岩石の生成時から存在する初生的構造要因によるものと、岩石の生成後に発生した二次的構造要因によるものに大別されている。初生的構造要因としては、粒子間の間隙、層理、不整合面、片理などがあり、二次的構造要因としては、断層、割れ目、破砕物質、充填鉱物などが挙げられる。したがって、周辺岩盤について力学的、水理学的、化学的、熱的影響の観点から特性の抽出と整理を行う際には、これらの地質構造について考慮する必要がある。

#### a. 力学的影響

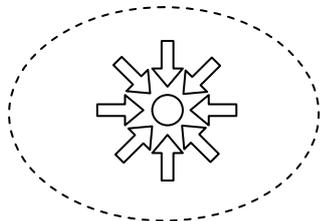
処分施設の安全性に影響を及ぼす周辺岩盤の特性について力学的な観点から考える場合、特性は大きく二つに大別できる。一つは場としての特性である応力分布と、もう一つは岩石自体が有する力学的な特性（強度特性（一軸圧縮強度、三軸圧縮強度）、変形特性（弾性係数、ポアソン比））である[1]。

対象とする領域の応力分布を考える場合、まずは初期応力について検討する必要がある。

初期応力は、大別的には水圧や大気圧などの圧力と同様のものであり、主として岩盤の自重（土被り圧）により初期応力は発生する。ただし、水や大気がせん断応力に抵抗する能力を有していないために、せん断応力の生じるような応力状態は取り得ない。つまり、静水圧状態が取り得る唯一の状態であるのに対し、岩盤はせん断応力に抵抗する能力を有するためせん断応力が発生する[2]。つまり図 6.2.2-1 に示すイメージのように、水圧や大気圧は、方向を待たない量だけ（スカラー）のものであるのに対し、初期応力は方向を持っている（ベクトル）。よって初期応力は全く同じ点であっても方向によって応力値が変化する。

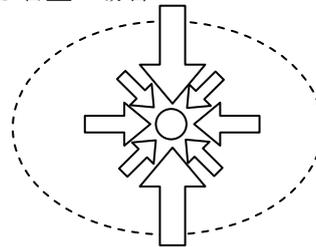
ある点の圧力または応力

○水や大気の場合



あらゆる方向で大きさは同じ  
大きさのみ＝スカラー

○岩盤の場合



方向によって大きさが異なる  
大きさと方向＝ベクトル

図 6.2.2-1 圧力と応力の違いのイメージ

また、水や大気はほぼ均質であるため力学的特性が一様で、かつ割れ目や断層などの不連続構造を含まない連続体と見ることができるので応力分布は一様であると考えられることができるが、岩盤は花崗岩や堆積岩といった岩種によってその力学的特性が異なり不均質であることが多く、また節理や断層など様々なスケールの不連続構造をも含む場合が多いので、応力分布が複雑である場合が多い[3]。ただし、図 6.2.2-2 に示すように鉛直応力はばらつきがあるものの深度とともに増加し、水平応力についても深度とともに増加することが分かっている[1],[3]。

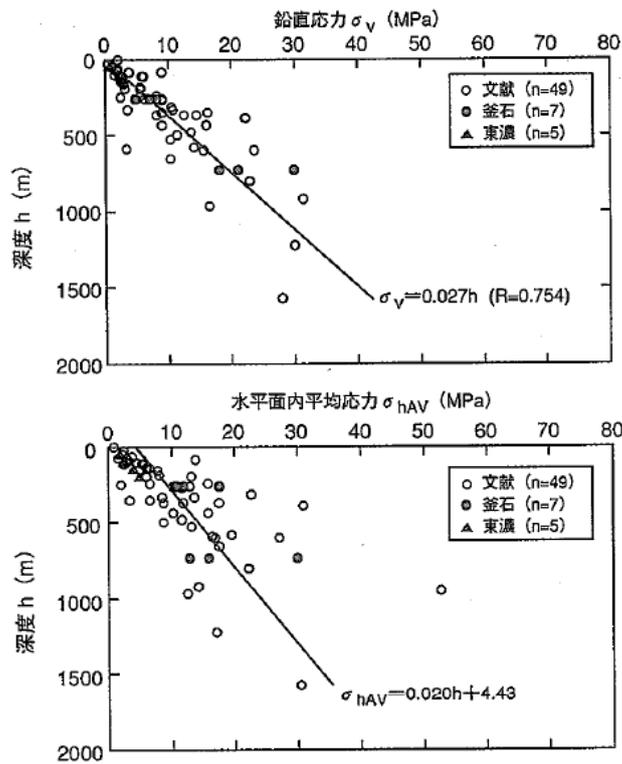


図 6.2.2-2 初期応力と深度の関係

初期応力は、岩盤の自重による土被り圧のほかにプレートテクトニクスによる水平地殻応力にも影響される。原位置での初期応力測定で対象となる岩盤のスケールは数十  $\text{cm}^3 \sim 1\text{m}^3$  程度であり、地下坑道の範囲 (数  $\text{km}^3$ ) や、断層 (数  $\text{km}^3 \sim$  数十  $\text{km}^3$ ) と比較すると点としての情報であり局所的な応力と言える。それに対して、地下坑道や断層を含む大きな領域を対象とした応力は広域的な応力と言える。前者を局所応力、後者を広域応力とよぶ。広域応力場については二通りの考え方がある。一つは、先在的な応力場があり、これが地形や地質の影響を受けてその点の応力になっているとの観点から、特定の地形や地質の影響のない先在的な応力場を広域応力場とする考え方であり、もう一方は注目している領域の応力場を支配している境界条件であるとする考え方である。しかし、これら二つの考え方は、広域応力場を初期条件と考えるか境界条件と考えるかの相違はあるものの解析上の取り扱いは同じである [3]。

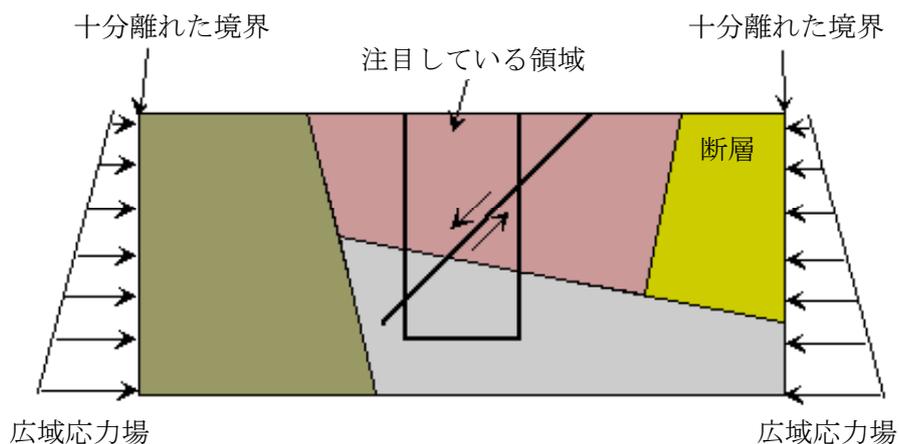


図 6.2.2-3 広域応力場の定義[3]

これら初期応力は坑道に対して周辺から影響を及ぼす外的要因と言える。

一方、強度特性や変形特性等の岩石自体が有する力学的な特性は、大別的には岩石の種類によって異なることが知られており実測データを整備した報告例もある。例として佐藤ら[4]がまとめた結果を表 6.2.2-1 に示す。大別的には結晶質岩と堆積岩に区別している。結晶質岩は酸性岩と塩基性岩、堆積岩は新第三紀と先新第三紀に区分し、さらに砂質岩と泥質凝灰質岩に区分し、一軸圧縮強度、弾性係数、ポアソン比、圧裂引張強度、せん断強度について値がもとめられている。これらの値から力学的な観点においては岩石自体が有する特性は強度や変形といった空洞の安定性に直接的にかかわると想定されるが、岩種によって大きくばらつきがあることがわかる。

周辺岩盤の力学的な特性について、処分場の安全性を左右する因子となるものは、初期応力、強度特性および変形特性である。ただし、坑道掘削時には初期応力状態から岩盤の強度特性および変形特性に応じて坑道周辺の応力分布が変化し、また、岩盤の劣化に伴って強度特性や変形特性も変化することが考えられる。これらをまとめると、処分場の安全性に影響を及ぼす周辺岩盤の力学的特性として、坑道周辺の応力分布、一軸圧縮強度、せん断強度、内部摩擦角、弾性係数、ポアソン比を抽出することができる。

表 6.2.2-1 岩種ごとの力学特性 (例)

岩種	一軸圧縮強度 MPa	三軸圧縮試験		弾性係数 GPa	ポアソン比	
		せん断強度 MPa	内部摩擦角 deg			
結晶質岩 (酸性岩)	個数	493	216	119	495	171
	最大値	405.7	52.2	62.0	136.2	0.56
	最小値	0.4	0.0	4.6	<0.1	0.04
	平均値	115.8	14.7	38.5	35.0	0.25
	中央値	<b>107.8</b>	<b>13.2</b>	<b>40.0</b>	<b>28.1</b>	<b>0.23</b>
	標準偏差	70.5	9.9	11.8	27.3	0.1
結晶質岩 (塩基性岩)	個数	529	191	60	448	68
	最大値	437.5	53.6	55.3	160.7	0.5
	最小値	3.9	1.0	5.5	<0.1	0.07
	平均値	<b>134.0</b>	<b>22.8</b>	<b>36.3</b>	<b>26.5</b>	<b>0.25</b>
	中央値	127.4	20.9	39.0	20.7	0.23
	標準偏差	72.1	9.9	10.0	27.8	0.09
新第三紀 堆積岩 (砂質岩)	個数	78	30	31	70	23
	最大値	205.8	30.0	62.1	82.2	0.45
	最小値	0.2	0.1	22.0	<0.1	0.11
	平均値	31.2	5.2	35.8	11.0	0.32
	中央値	<b>17.2</b>	<b>3.5</b>	<b>32.0</b>	<b>3.2</b>	<b>0.33</b>
	標準偏差	36.8	6.3	10.8	19.6	0.12
新第三紀 堆積岩 (泥質/凝灰質岩)	個数	380	132	149	364	61
	最大値	377.6	98.0	60.0	58.8	0.50
	最小値	<0.1	<0.1	7.0	<0.1	0.07
	平均値	<b>25.8</b>	<b>5.1</b>	<b>25.8</b>	<b>6.7</b>	<b>0.27</b>
	中央値	9.1	1.1	26.0	4.1	0.28
	標準偏差	38.0	11.7	10.8	9.4	0.11
先新第三紀 堆積岩 (砂質岩)	個数	355	92	124	493	25
	最大値	414.5	78.0	61.6	150.9	0.32
	最小値	0.3	<0.1	14.0	<0.1	0.10
	平均値	<b>134.4</b>	<b>16.9</b>	<b>38.4</b>	<b>18.6</b>	<b>0.20</b>
	中央値	127.4	15.8	39.0	13.7	0.20
	標準偏差	83.6	15.5	8.3	19.7	0.07
先新第三紀 堆積岩 (泥質/凝灰質岩)	個数	178	85	78	321	16
	最大値	344.0	98.0	45.0	105.8	0.39
	最小値	1.5	0.4	7.0	0.2	0.06
	平均値	<b>104.9</b>	<b>15.9</b>	<b>25.5</b>	<b>17.8</b>	<b>0.26</b>
	中央値	89.7	1.8	25.5	8.2	0.30
	標準偏差	76.4	20.8	10.9	19.9	0.09

b. 水理学的影響

処分施設の安全性にかかわる周辺岩盤の特性のうち、水理学的影響を考慮すべき現象は間隙流体（地下水、ガス）の移動である。移動が生ずる原因は明確であり、坑道掘削に伴う圧力勾配の発生であるが、移動の速度や量については様々な物性が関与している。最初に、地下水とガスの移動に関する支配方程式の例を示し、現象の大きさを左右する物性値について検討する。

地下水やガスなどの流体が岩盤の間隙を移動する場合は、これらについて質量保存則が満

たされると考える。地下水とガスに関して、飽和度と透過率ならびにサクション圧は、一般に van Genuchten モデルや Brooks and Corey モデルが採用されており、一例を図 6.2.2-4 と図 6.2.2-5 に示す。

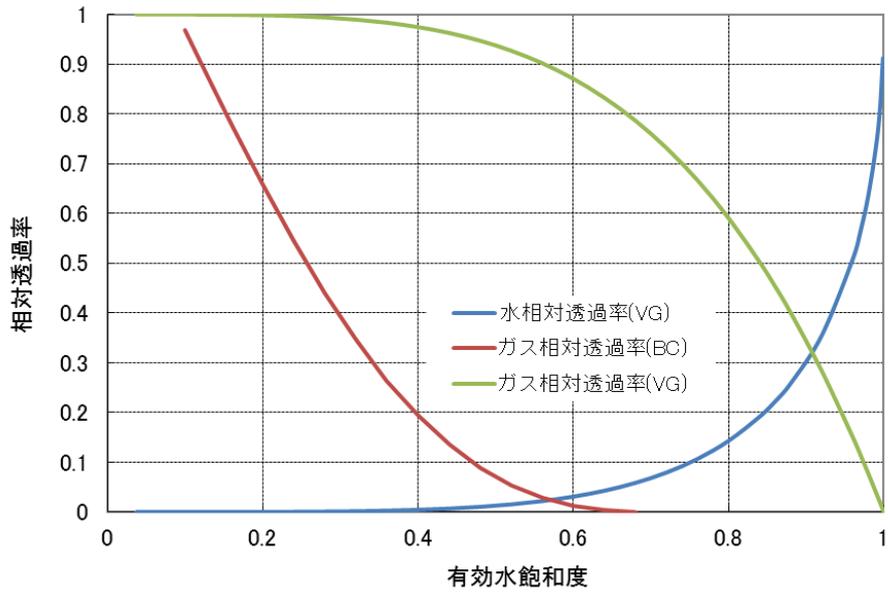


図 6.2.2-4 地下水とガスの相対透過率に関する VG、BC モデルの一例

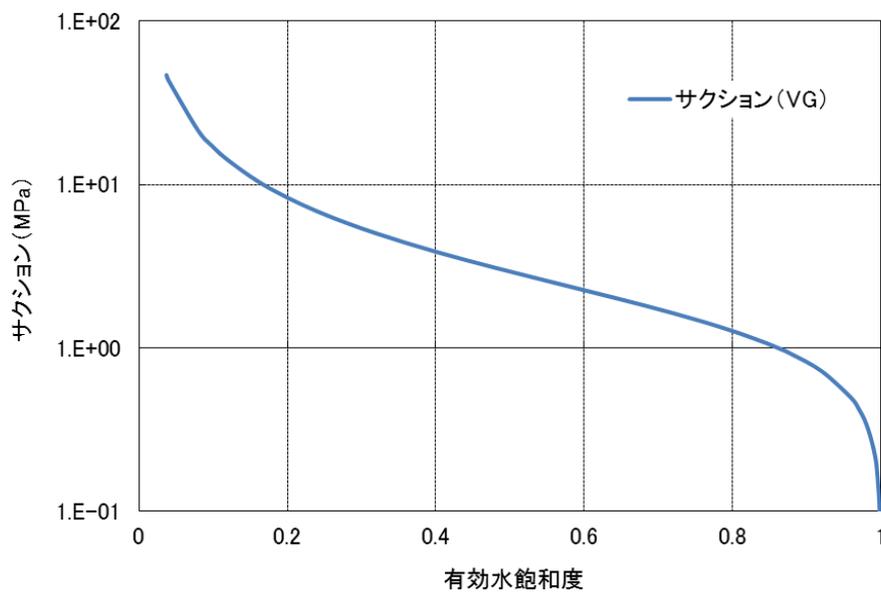


図 6.2.2-5 サクションに関する VG モデルの一例

これまで述べた地下水とガスの移動に関する主な特性について、他の現象に対する依存性も含めてまとめると次のようになる。

(水理の場に関する特性)

- 動水勾配 地下水位や間隙流体圧の分布によって発生
- 間隙水圧 地下水の圧力
- ガス圧 地下水より遊離したガスが存在する場合の圧力

(変化の大きさを左右する物性)

- 絶対透過率 地下水やガスの透過性を表す特性値で、空隙の連続性などに依存
- 相対透過率 地下水やガスの透過性を表す特性値で、地下水の飽和度に依存
- サクシヨン 地下水に発生する負圧で、地下水の飽和度に依存
- 粘性係数 地下水とガスの粘性を表す特性値で、温度と圧力に依存
- 密度 地下水とガスの密度であり温度と圧力に依存
- 溶解度 地下水へのガスの溶解度を定める特性値で、温度と圧力に依存

これらのうち、現象の大きさや処分場の安全性を左右する最も大きな因子となるものは、動水勾配と岩盤の絶対透過率である。動水勾配は、坑道の掘削により坑道内面で間隙流体圧が大気圧となるために、坑道近傍では大きな値となる。坑道近傍では、間隙流体圧が小さくなる領域が発生するが、この領域の大きさや分布形状は、水理学的視点からだけではなく力学的視点からも処分場の安全性を左右する可能性がある。

絶対透過率は、坑道に流入する地下水やガスの量を左右するが、岩盤の空隙の形状や連続性、開口幅などに依存する。また、坑道掘削により坑道周囲の岩盤が損傷を受けることから、この大きさは坑道周囲で大きく変化すると考えられる。さらに、時間の経過とともに、次のような現象が発生し絶対透過性が変化していくと考えられることから、事前に十分な検討と予測が必要となる。

- ・ 岩盤のクリープや劣化による空隙の開口、連続性の増加
- ・ 岩石の溶解と沈殿による空隙の閉塞
- ・ 微生物の活性化による空隙の閉鎖あるいは開口

なお、絶対透過率は透水係数が測定されれば推定することが可能であることから、処分場の安全性を左右する特性としては、動水勾配、間隙水圧、透水係数が抽出できる。

### c. 化学的影響

処分施設の安全性にかかわる周辺岩盤の特性のうち、化学的影響を考慮すべき現象は岩盤、地下水の化学変化であり、酸・塩基反応、酸化還元反応、水溶性錯体の形成、鉱物の溶解／沈殿、ガスの溶解／脱ガス、陽イオン交換などが原因で発生する。また、これらの化学変化は地下水の pH、電気伝導度、溶存気体、溶存イオン、酸化還元電位などに左右される。

以下に、これらの化学反応に関して、現象の大きさを左右する物性について整理する。

(化学反応に及ぼす環境要因)

- pH
- 電気伝導度
- 溶存気体、溶存イオン
- 酸化還元電位

(化学反応)

- 酸、塩基反応
- 酸化還元反応
- 水溶性錯体の形成
- 鉱物の溶解／沈殿
- ガスの溶解／脱ガス
- 陽イオン交換

(化学反応に関する物性)

- |            |               |
|------------|---------------|
| ● 成分濃度     | 地下水の組成に依存     |
| ● 活性度係数    | 地下水の組成に依存     |
| ● 平衡定数     | 温度、圧力、反応対象に依存 |
| ● モル分率     | 鉱物組成に依存       |
| ● 反応速度定数   | 温度、圧力、反応対象に依存 |
| ● 比反応表面積   | 鉱物組成に依存       |
| ● 活性化エネルギー | 反応対象に依存       |
| ● 気体分圧     | 溶存ガス成分に依存     |
| ● フガシティ係数  | 温度、圧力に依存      |
| ● 電荷分率     | 反応対象に依存       |
| ● イオン選択係数  | 反応対象に依存       |

これらのうち、現象の大きさや処分場の安全性を左右する最も大きな因子となるものは、酸化還元反応である。坑道周辺岩盤の化学的性質を変化させるものは、通気による酸素や微生物の供給であり、これに伴う酸化還元反応の継続が坑道周辺岩盤の特性を変化させ、処分場の安全性を左右する可能性がある。また、坑道掘削に伴って遠方の地下水が坑道周辺に流入し、もとの地下水とは水質が変化することが考えられる。地下水が降水起源のものか、あるいは海水起源のものかは水質の分析に重要な事項である。これらのことから、処分場の安全性に影響を及ぼす化学的特性として、pH、電気伝導度、溶存気体および溶存イオン、酸化還元電位、地下水の起源・年代を抽出することができる。

#### d. 熱的影響

処分施設の安全性にかかわる周辺岩盤の特性のうち、熱的影響を考慮すべき現象は熱の移

動（伝導、移流）である。この原因は明確であり、廃棄体の崩壊熱の発生と通気による坑道の冷却に起因する地温勾配の発生である。熱的影響に関する主な物性について、他の現象に対する依存性も含めてまとめると次のようになる。

（熱の移動の場に関する特性）

- 地温分布、地温勾配
- 地下水の温度

（現象の大きさを左右する物性）

- 熱伝導率            岩盤の伝熱性を表す特性値で、空隙の形状や連続性、飽和度に依存
- 比熱                岩盤の温度変化のし易さを定める特性値で、飽和度に依存
- 密度                地下水を含む岩盤の密度で、飽和度に依存
- 流速                地下水の流速で、動水勾配に依存
- 潜熱                地下水の相変化の際に必要な熱量で、飽和度に依存
- 熱膨張率           岩盤の熱膨張の大きさを表す特性値で、き裂密度などに依存

これらのうち、現象の大きさや処分場の安全性を左右する最も大きな因子となるものは、地温分布や地温勾配、地下水の温度分布などの温度環境、岩盤の熱伝導率、比熱、密度、熱膨張率である。これらは、岩盤の空隙の形状などに依存するとともに、地下水の飽和度に影響される。坑道周辺では、時間の経過とともに地下水流れが変化し、岩盤の飽和度が変化していくと考えられることから、事前に十分な検討が必要となる。

## 2) 人工バリアの特性の抽出と整理

人工バリアについては、定置後からの定置環境や人工バリア相互間への影響の観点から重要な特性について整理を行った。整理を行う観点は、人工バリアの「放射線場」、「熱的影響」、「力学的影響」、「水理学的影響」、「化学的影響」とした。はじめに、それぞれの整理の観点について述べる。

### a. 放射線場

オーバーパックはガラス固化体を収納していることから、オーバーパックの周囲における放射線の影響を検討する必要がある。放射線の影響としては、その強さによりオーバーパックの腐食挙動への影響、地下水の放射線分解や作業員への影響が考えられ、影響を低減するために適切な遮へいやモニタリング等による環境中の値の監視が必要となる。

図 6.2.2-6 に放射能の推移から眺めた高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の特徴を示したものである[1]。図 6.2.2-7 には、ガラス固化後のガラス固化体の放射能の経時変化を示す[5]。図から分かるようにガラス固化体が長い期間高い放射能を有していることが分かる。

縦置き定置方式においては、地下施設においてオーバーパックを処分孔に定置した後、処分坑道の管理区域設定を解除するために、坑道埋め戻し作業での作業員への放射線影響を低減するために、処分孔の上部に設置される埋め戻し材の厚さを遮へいに必要な厚さとして設定している[5]。図 6.2.2-8 にオーバーパック表面からの距離（埋め戻し材の厚さ+緩衝材の厚さ）と表面線量当量率の関係を示す。この図から、埋め戻し材の厚さが 1m 程度あれば（緩衝材の厚さ 70cm として）目標の線量当量率（管理区域の解除）を達成でき、埋め戻し材の厚さとして設定された。

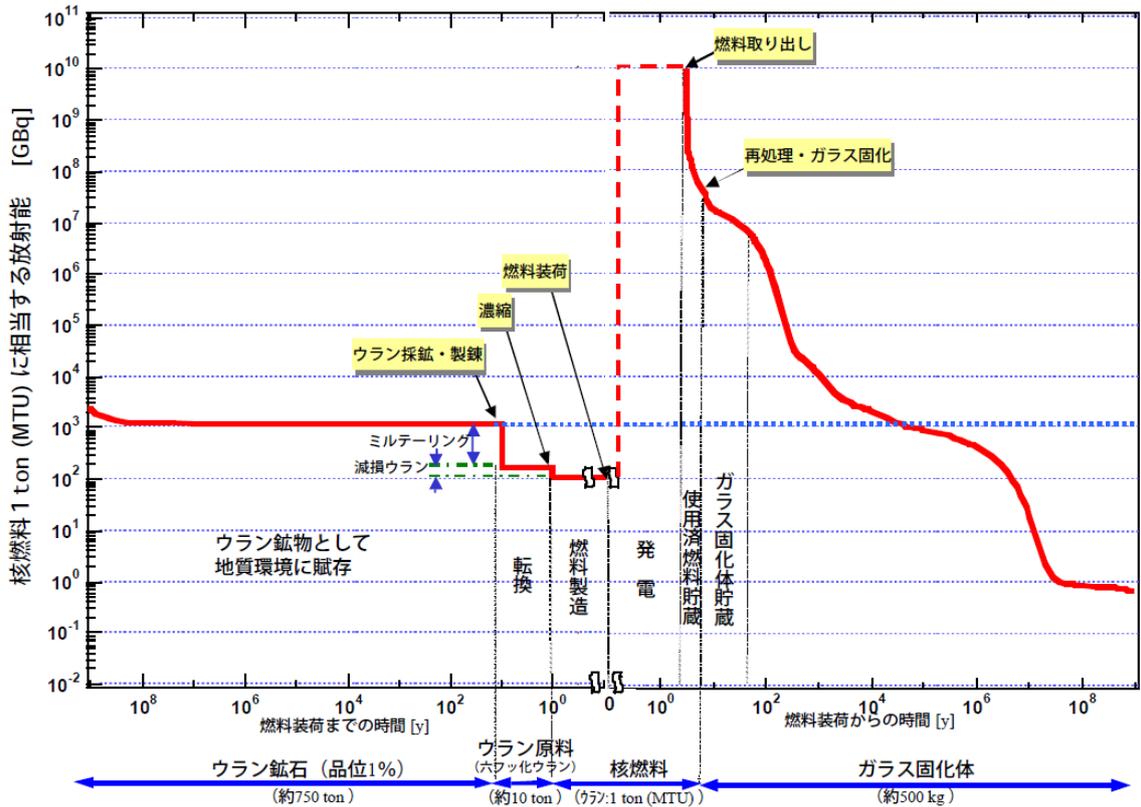


図 6.2.2-6 放射能の推移から眺めた高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の特徴[1]  
 （濃縮度 4.5%の核燃料 1 MTU 相当）

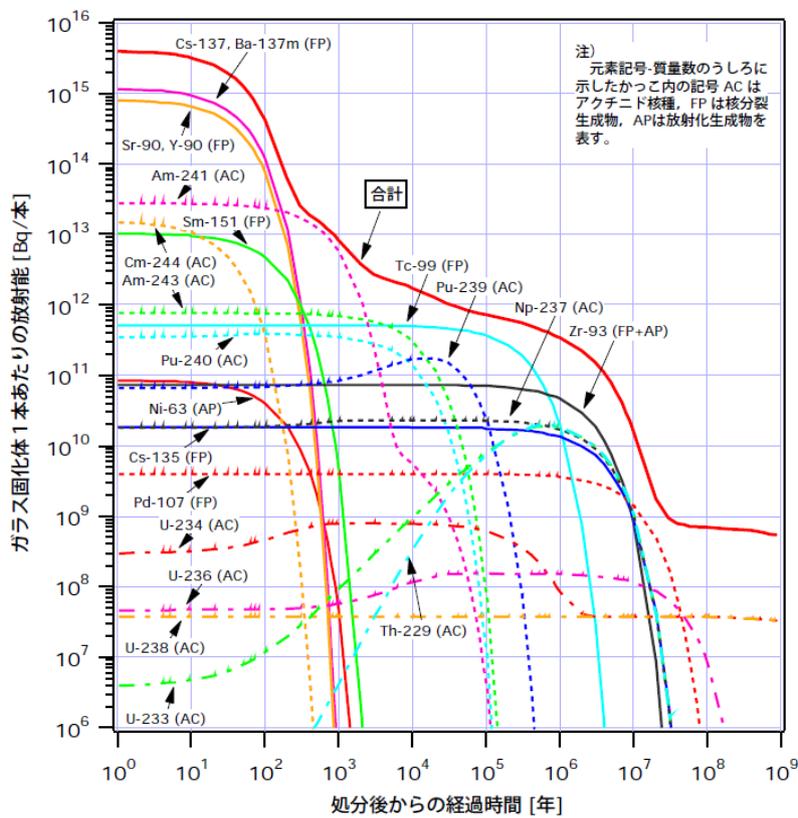


図 6.2.2-7 ガラス固化体の放射能の経時変化[5]

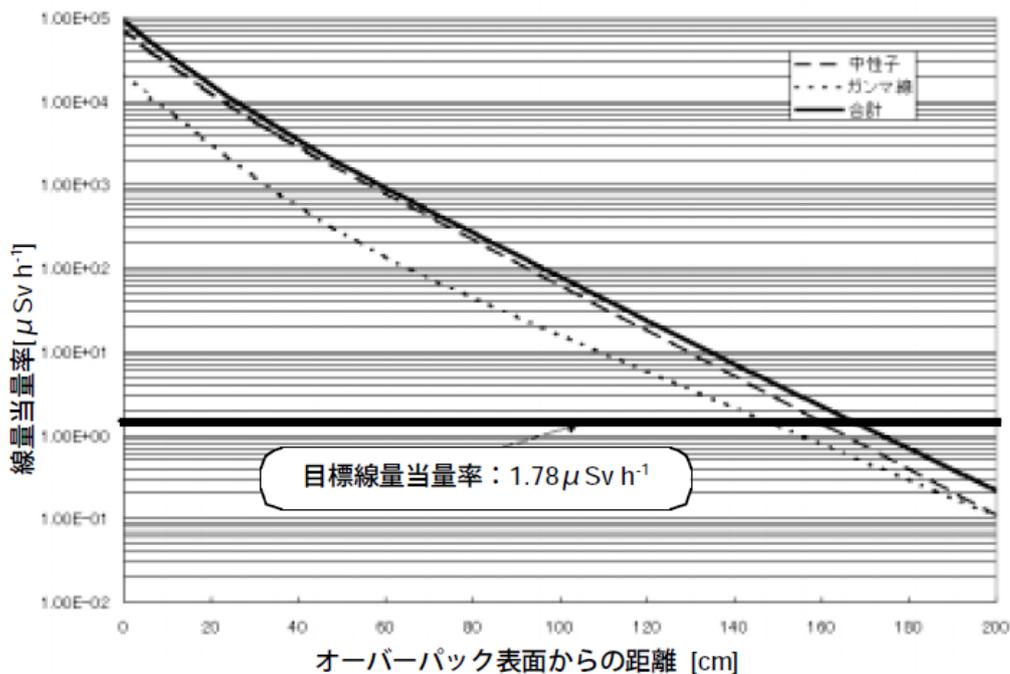


図 6.2.2-8 埋め戻し材厚さと表面線量当量率[5]

また、放射線による水や空気の放射線分解の影響がある。水の放射線分解では、放射線分解により酸化剤が生成しオーバーパックの腐食挙動への影響が第2次取りまとめで評価され、この放射線分解が腐食挙動に影響したくない程度に低減するために必要な厚さが腐食に関わる放射線遮へい代として設定された[5]。図 6.2.2-9 にオーバーパック表面において放射線分解により供給されるカソード電流密度の評価結果を示す。オーバーパックの板厚設定においては、この放射線遮へい代と耐圧厚さが比較され、放射線遮へい代の方が大きい値となったことからオーバーパックの必要板厚の値として採用されている。

本検討では、人工バリアの周りに空間があり空気が存在する酸化性環境であることから、第2次取りまとめでの還元性環境とは異なるため、腐食への影響としては無視できるレベルになると思われるが、影響に対する確認は必要と考えられる。

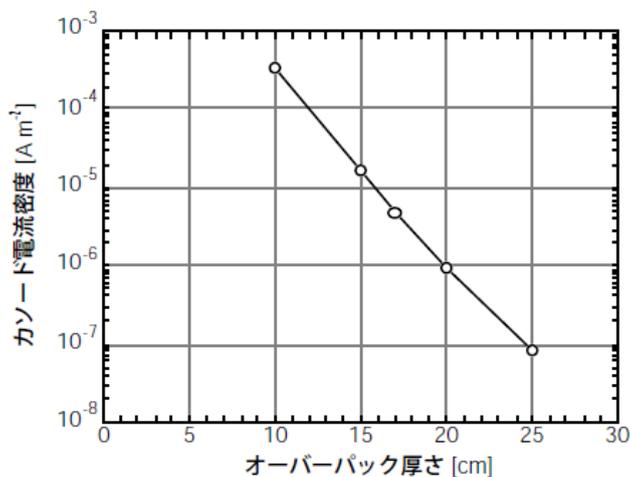


図 6.2.2-9 放射線分解により供給されるカソード電流密度[5]

ガラス固化体の放射能としては、図 6.2.2-7 にあるように時間と共に減衰するが、その時間は非常に長いため、例えば緩衝材中の空隙に閉じ込められる空気や水の放射線による影響が考えられ、空洞が空いている期間はこれらの外部への影響についての評価・考慮が必要と考える。

放射線場における特性をまとめると次のようになる。

- ・ガラス固化体の放射エネルギー、放射能の経時変化、放射線分解
- ・放射線遮へい性

## b. 熱的影響

放射線場の影響と同様にオーバーパックにおいては、ガラス固化体からの発熱によるオーバーパックの周囲に対する熱的な影響を検討する必要がある。熱的影響は、処分場地下施設の温度環境に影響し、人工バリアの性能、特に緩衝材の化学的な安定性にとって重要な特性である。この熱の影響を把握するために、ガラス固化体の発熱量の経時変化が解析により求められている。図 6.2.2-10 に経時変化の解析結果[5]を示す。

処分場の設計においては、緩衝材が温度制限の 100℃を超えないように廃棄体間隔やピッチを設定しており、第2次取りまとめにおいても図 6.2.2-11 に示すように処分場の深さと廃棄体専有面積をパラメータにした解析[5]を実施して、緩衝材の温度制限を超えない設計のためのデータを取得している。

また、熱的影響に対しては人工バリアの熱伝導率や比熱などの熱特性が大きく関係するものとしてあげられる。

熱的影響における特性をまとめると次のようになる。

- ・ガラス固化体の発熱特性とその経時変化
- ・人工バリアの熱特性：熱伝導率，比熱

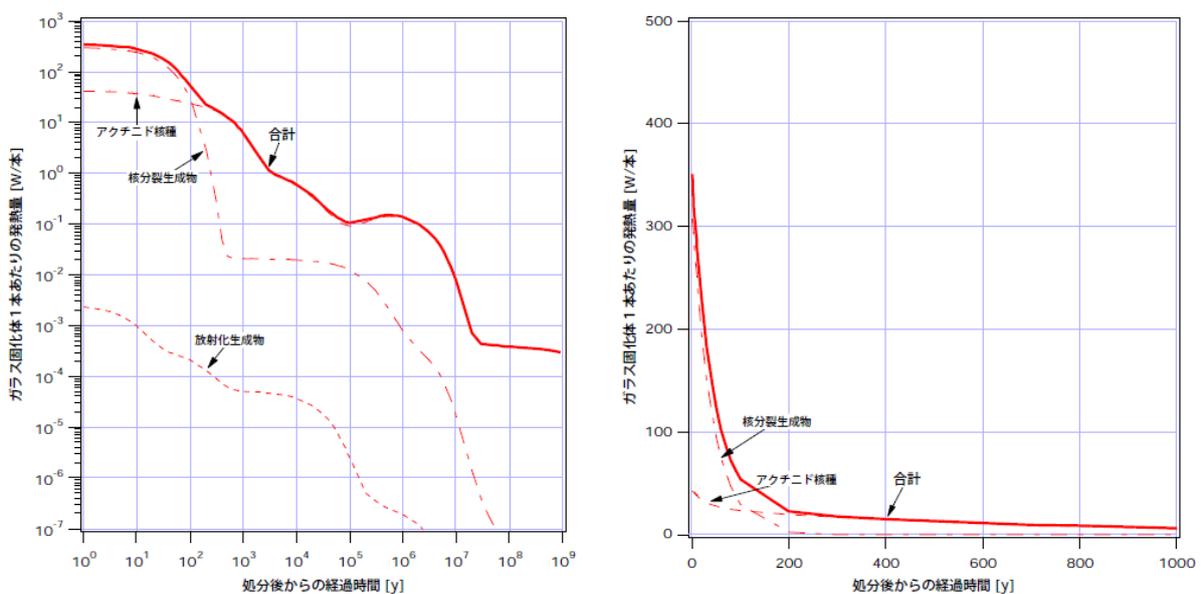


図 6.2.2-10 ガラス固化体の発熱量の経時変化[1]

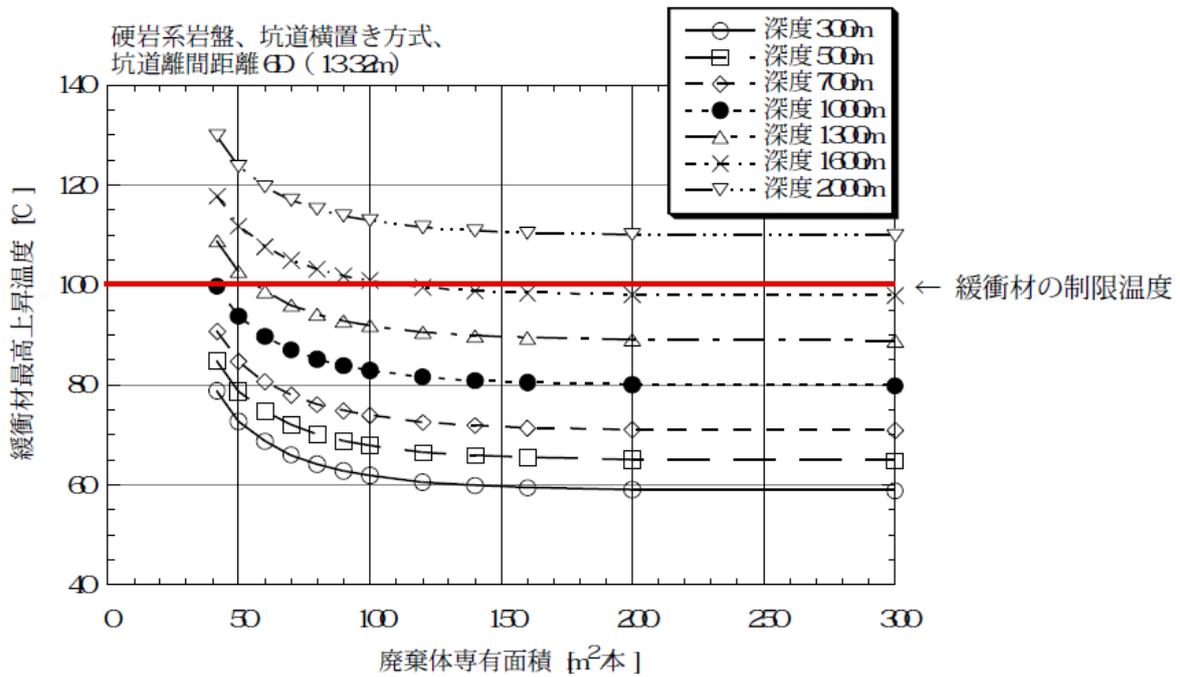


図 6.2.2-11 処分深度に対応した廃棄体専有面積と緩衝材温度の関係[5]  
(硬岩系岩盤、処分坑道横置き方式、坑道離間距離 (13.32m)、廃棄体ピッチ 3.13m)

### c. 力学的影響

処分施設の安全性に関わる人工バリアの力学的な特性としては、緩衝材に関わる特性とオーバーパックに関わる特性がある。また、地下環境で人工バリア以外を起因として想定される力学的影響として、人工バリアの設計においては地下水静水圧と岩盤のクリープ変形が考慮されている。

緩衝材においては、緩衝材の膨潤圧、岩盤クリープおよびオーバーパック腐食膨張による緩衝材の圧密反力が力学的特性として考慮すべき現象となる。緩衝材の重要な特性である膨潤性能に関わる膨潤と膨潤応力についてはこれまでに多くの検討が行われており、地下水の性質や安全評価に関わる緩衝材密度における対する試験データが得られている。例として、緩衝材中のベントナイト密度を表す有効粘土密度と体積膨潤比と膨潤応力の関係を図 6.2.2-12、図 6.2.2-13 に示す[6]。また、直接的ではないが緩衝材では、岩盤のクリープ変形とオーバーパックの腐食による膨張を力学的に緩和する応力緩衝性を有しており、これらの変形により発生する力学的影響として緩衝材の圧密反力として緩衝材の厚さ設計で考慮されている。図 6.2.2-14 に緩衝材の厚さと緩衝材の圧密反力の関係を示す[7]。

オーバーパックについては、自らに関わる力学的影響としてはオーバーパック自身が腐食し鉄の酸化物となることにより体積が腐食前の時より約 3 倍となることから体積膨張が発生し、それによる緩衝材からの圧密反力が作用する。オーバーパックの設計において設定された外圧として、第 2 次取りまとめでの例を表 6.2.2-2 に示す[5]。ここで、緩衝材の膨潤圧は圧密反力に含まれるものとしている。

ここで、地下水の水圧である地下静水圧については、処分坑道が埋め戻されていないこと

から、人工バリアの設計で考慮したように深度に応じた圧力で緩衝材やオーバーパックに作用することは無いと考えた。

上述より、人工バリアにおける力学的特性について、場としての特性（応力場）と人工バリア自体の物性（強度など）に大別して次のようにまとめた。

- ・ 応力場：緩衝材膨潤特性、腐食膨張圧
- ・ 力学物性：膨潤量、膨潤応力、腐食膨張量、圧密特性

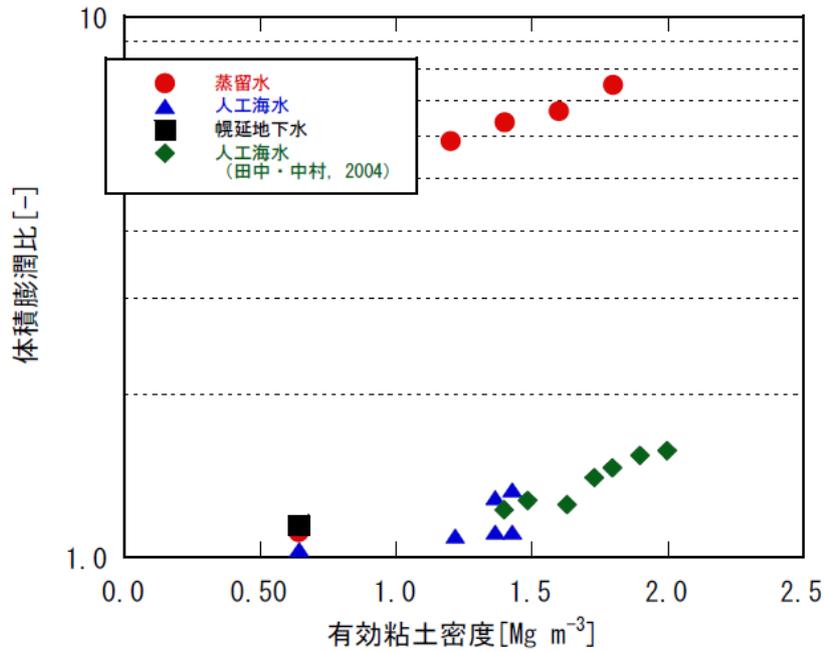


図 6.2.2-12 有効粘土密度と体積膨潤比の関係[6]

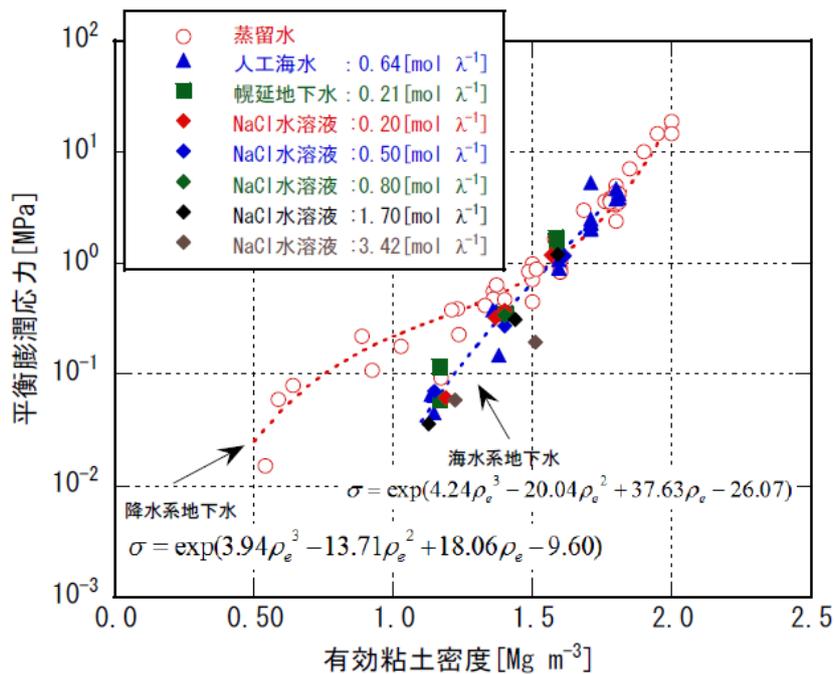


図 6.2.2-13 有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係[6]

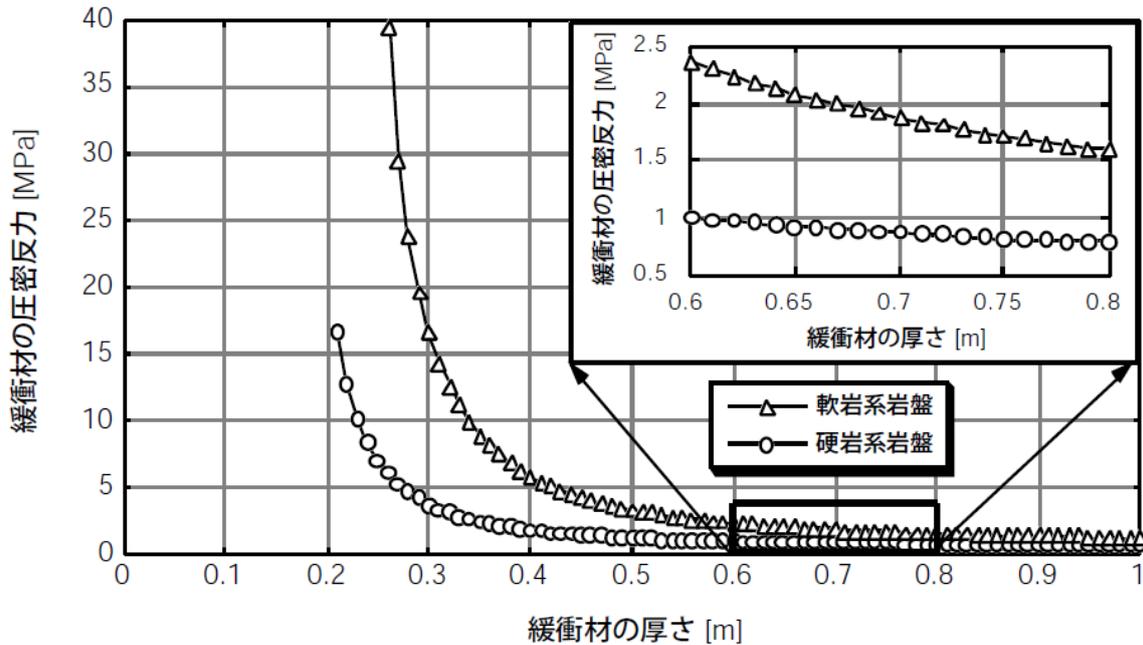


図 6.2.2-14 緩衝材厚さと緩衝材の圧密反力の関係[7]

表 6.2.2-2 第2次取りまとめにおけるオーバーパックに作用する外圧値[5]

	作用外圧値 [MPa]	
	硬岩系岩盤	軟岩系岩盤
地下水静水圧	9.80	4.90
岩盤のクリープ変形および腐食生成物膨潤圧による緩衝材の圧密反力	0.86 (岩盤クリープは考慮しない)	1.87
合計	10.7	6.8

d. 水理学的影響

人工バリアの水理学的な特性としては、緩衝材における止水性能、および緩衝材自体の物理的な安定性にも影響を及ぼすことが考えられる処分場を埋め戻さないことによる湧水の動きによる緩衝材の流出現象が考えられる。緩衝材の止水性能としては、緩衝材の基本的な特性としてデータが取得されており、緩衝材の有効粘土密度と透水係数の関係として得られたデータの例を図 6.2.2-15、図 6.2.2-16 に示す[8]。これらデータは緩衝材の設計や安全評価に反映されており、適切に評価・設計することが可能である。

緩衝材に対して水理学的影響として懸念されるものが緩衝材の流出およびパイピングによる水道の維持に関するものである。人工バリアを定置後埋め戻さない本検討のような場合には、人工バリアの周辺近傍に長期にわたり空間を有することから、湧水の影響により膨潤した緩衝材が湧水の流れによりこの空間より流出することが考えられる。緩衝材の流出現象に関しては、試験やモデルによる評価が実施されている。緩衝材による流出現象が発生した場合には、緩衝材の密度や密度に係わる物性（透水係数、膨潤圧など）に影響す

る。また、パイピングについては、発生した場合には部分的な止水性が低下することとなり止水特性である透水係数に影響することとなる。

上述より、人工バリアにおける水理学的特性については、安全性に係わる特性としては次のようになる。

- ・緩衝材流出量、緩衝材密度、緩衝材透水係数

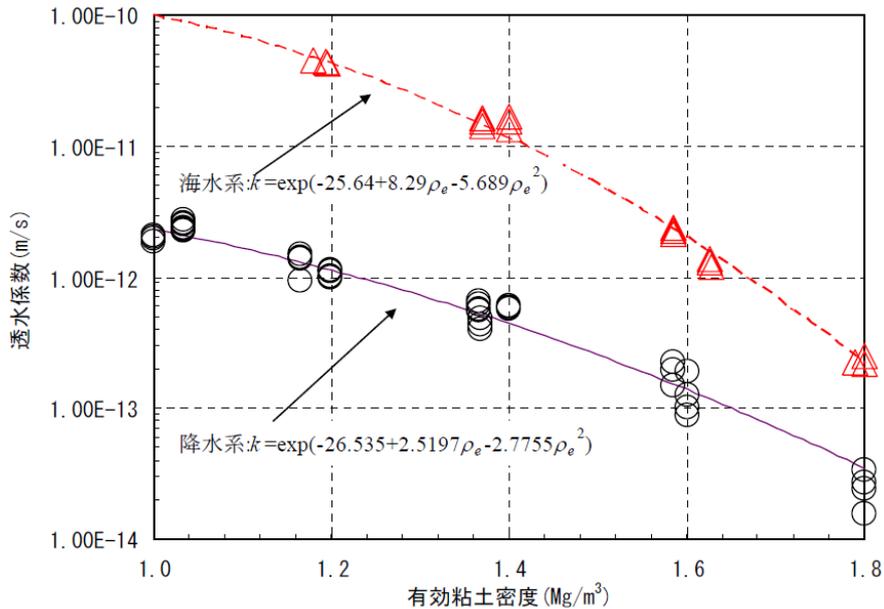


図 6.2.2-15 有効粘土密度と透水係数の関係（降水系、海水系）[8]

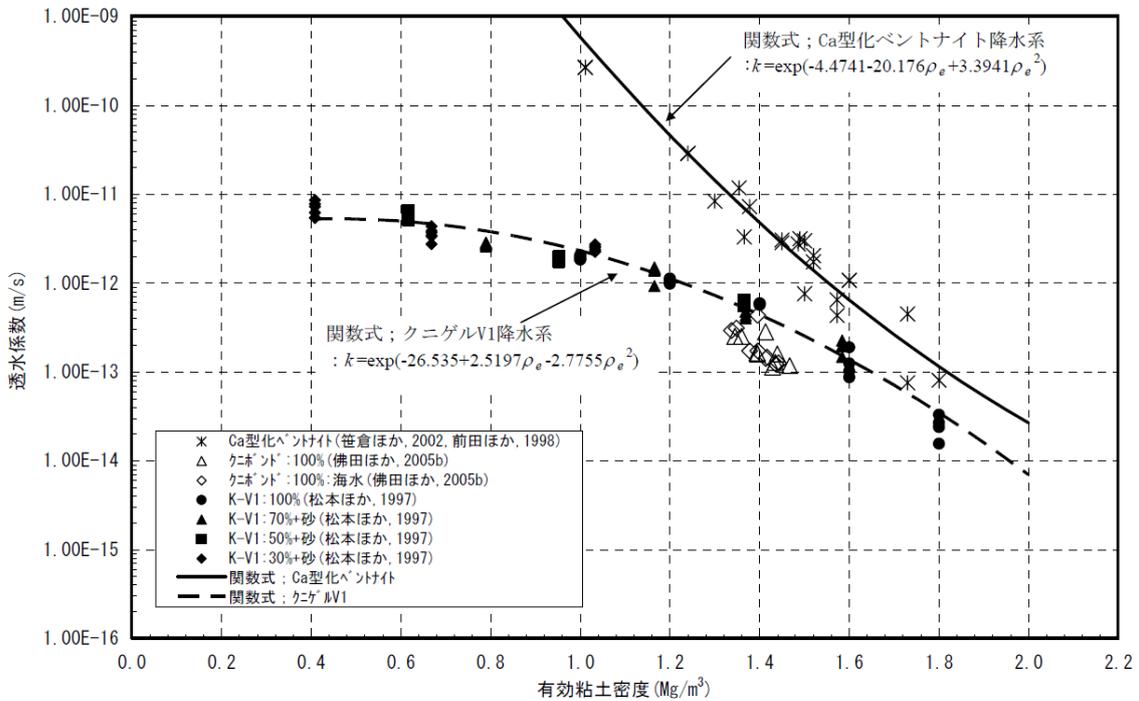


図 6.2.2-16 クニゲル V1 と Ca 型化ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係[8]

e. 化学的影響

人工バリアにおける化学的影響としては、緩衝材に関わるものとオーバーパックに関わるものとなる。

緩衝材に関わるものとしては、緩衝材とセメントの相互作用による緩衝材のカルシウム化、地下水が支保などのコンクリートを通過した高 pH コンクリート透過水による緩衝材中の粘土鉱物の溶解、緩衝材と炭素鋼腐食生成物の相互作用による Fe 型化やセメンテーション、イライト化などが考えられる。

オーバーパックに関わるものとしては、坑道が埋め戻されないことから酸化性環境が継続することから、酸素による腐食が継続する可能性がある。常時大気平衡した海水、河川水などの自然水と接する炭素鋼の腐食進展速度として以下のモデルおよび実測データがある。

- ・平均腐食深さが時間のべき乗に比例するモデル[9]

$$(a+kr)^2=2kr^2t+k^2r^2$$

a は平均腐食深さ(mm)、 t は経過時間(yr)、 r は初期速度(25℃で 0.285mm/yr)、

k は速度定数(0.80yr)

- ・海中構造物（鋼矢板）における実測[10]

集中腐食が発生していない箇所（平均的な腐食深さに相当）における最長 50 年の実測データ（図 6.2.2-17 参照）

オーバーパックの腐食代の設定では、酸化性環境における腐食代を定置後埋戻し時に緩衝材中に存在する酸素量を基に算出しているため、酸化性環境が長期に継続する想定とはしていない。

上述より、人工バリアにおける化学的特性について、水質に係わる特性、腐食に係わる特性場として次のようにまとめた。

- ・水質： pH， 酸素などの溶存気体および溶存イオン
- ・腐食： ガス発生， pH， 酸素、酸化還元電位（Eh）

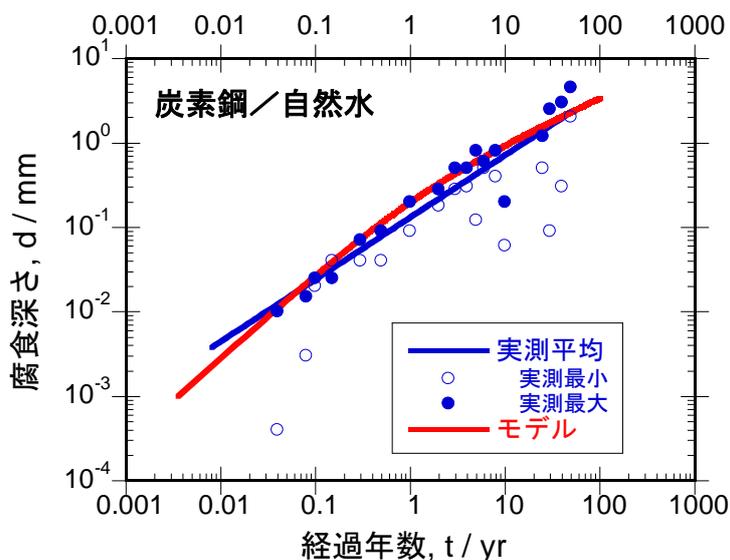


図 6.2.2-17 海水／淡水環境下での炭素鋼の腐食深さ

以上の検討に基づいて、処分施設の安全性にかかわる周辺岩盤と人工バリアの特性について整理した結果を表 6.2.2-3 に示す。

表 6.2.2-3 安全性に係る特性の抽出

整理の観点		周辺岩盤と人工バリアの特性
周辺岩盤	力学的影響	応力分布、一軸圧縮強度、せん断強度、内部摩擦角、弾性係数、ポアソン比
	水理学的影響	動水勾配、間隙水圧、透水係数
	地球化学的影響	pH、電気伝導度、溶存気体および溶存イオン、酸化還元電位 (Eh)、起源・年代
	熱的影響	地温分布、地温勾配、地下水の温度分布、熱伝導率、密度、比熱、線膨張率
人工バリア	放射線場	放射線分解、放射エネルギー、放射能の経時変化、放射線遮へい性
	熱的影響	緩衝材膨潤特性、発熱特性、熱伝導率、比熱
	力学的影響	緩衝材膨潤特性、腐食膨張圧、膨潤量、膨潤応力、腐食膨張量、圧密特性
	水理学的影響	緩衝材流出量、緩衝材密度、透水係数
	化学的影響	水質、腐食によるガス発生、pH、酸素、酸化還元電位 (Eh)

### (3) ニアフィールドの構成要素と構成要素に対する使用材料の抽出と整理

処分施設の安全性を満足するために、建設や操業期間で構築もしくは設置される構成要素について、候補岩種（硬岩系、軟岩系）を考慮して抽出と整理を行った。なお、本検討では、埋め戻しまでの期間の長短が検討ポイントであることを鑑み、建設時に構築される支保などの構成部位だけではなく、埋め戻しまでの期間に設置される人工バリアやその他の構成要素からの影響を受けることも想定し、ここでの抽出範囲とした。構成要素の抽出は、周辺岩盤に影響を及ぼす処分施設の構成要素について、坑道、人工バリア、その他の三つに大別して実施した。ここで、坑道だけではなく、人工バリアを含めた構成部位（と使用材料）を検討対象範囲とすることにより、埋め戻しまでの期間における処分施設への安全性に影響する周辺岩盤への影響について、網羅的かつ使用材料の単位で詳細な課題の抽出に資することを目的としている。

以下に、構成要素の抽出と整理について詳述する。

#### 1) 坑道に関する構成要素の抽出と整理

第2次取りまとめによれば、主要坑道および処分坑道などの水平坑道の主な掘削工法は、

- ・ NATM 工法（発破工法、機械掘削工法である自由断面掘削機工法）
- ・ TBM（全断面掘削機）工法

が検討されており、各処分孔方式（縦置き、横置き）と対象岩盤への適用性について述べられている。これによると、主要坑道、処分孔縦置き方式の処分坑道に対しては、硬岩系岩盤では発破による NATM 工法の適用性が高く、軟岩系岩盤では自由断面掘削機による NATM 工法の適用性が高いと考えられている。また、円形の主要坑道および処分孔縦置き方式の処分坑道に対して、TBM 工法による検討例もある。処分坑道横置き方式における円形の処分坑道に対しては、硬岩系、軟岩系岩盤ともに TBM 工法の適用性が高いと考えられている。

構成要素抽出のため、第2次取りまとめでまとめられている処分坑道の標準断面を図 6.2.2-18 に示す。ただし、本検討ではここで示されている構成要素に加え、一般的なトンネルの構成要素についても抽出の対象とした[11]。坑道に関する構成要素を以下のように大別し、これらについて詳細な整理を行った。

- ・ 支保
- ・ 覆工
- ・ 路盤
- ・ 防水工・排水工
- ・ 湧水対策工
- ・ 換気・空調設備
- ・ その他設備

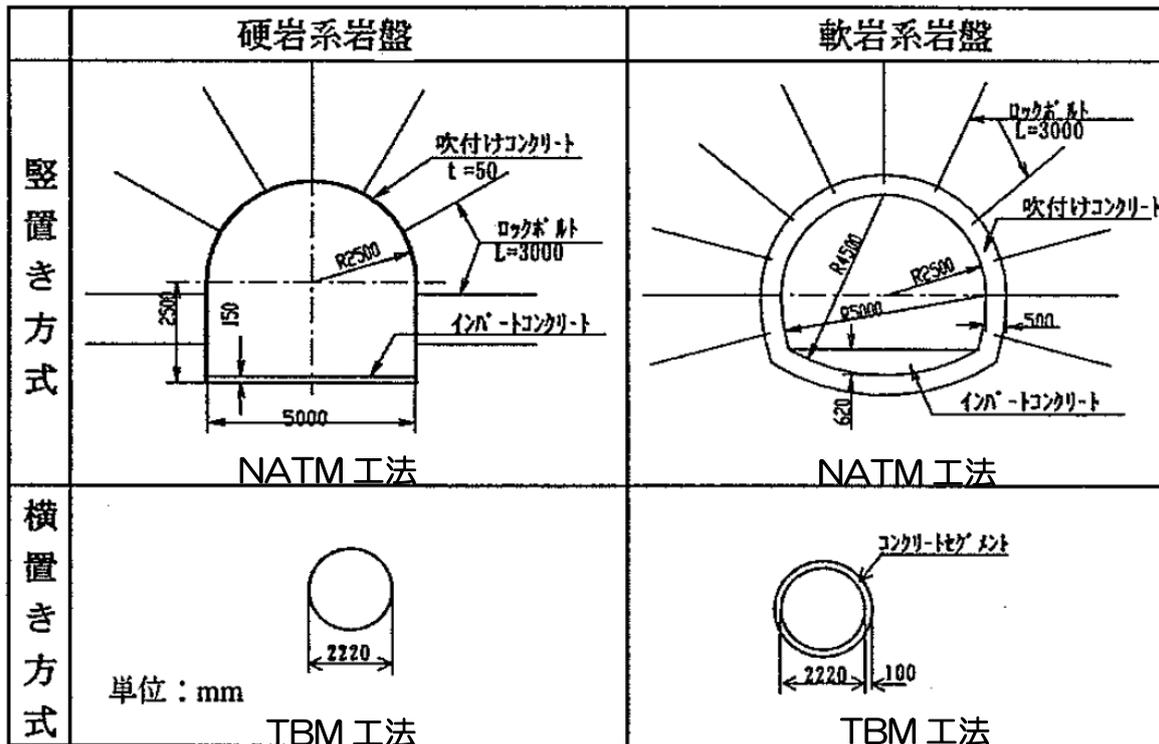


図 6.2.2-18 処分坑道における標準断面図（「第2次とりまとめ」に加筆）

a. 支保

支保は、坑道を掘削することによって発生する応力、変位に対して周辺地山と一体となって作用し、周辺地山の支保機能を有効に活用して、坑道および周辺地山の安定化を図る目的で設置される。NATM 工法の支保工の部材としては、吹付コンクリート、鋼製支保工、ロックボルト、金網などがある。また、TBM 工法の支保工の部材としては、NATM 工法と同じ吹付コンクリート、鋼製支保工、ロックボルトなどのほかに、ライナー類などがある。

- ・吹付コンクリートは、坑道壁面にコンクリートを面的に密着して設置する支保部材である。変形が大きくじん性が必要な箇所や、支保工の応力分布が複雑でじん性や曲げ耐力が必要な箇所では繊維補強吹付けコンクリートが使用される。使用する繊維には、鋼繊維と非鋼繊維がある。非鋼繊維としては、ポリプロピレン繊維、ビニロン繊維等の樹脂が使用されている。
- ・鋼製支保工は、坑道壁面に沿って形鋼等をアーチ状に設置する支保部材である。
- ・ロックボルトは、坑道壁面から地山内部に穿孔された孔のほぼ中心に定置された鋼棒等の芯材、芯材を孔の周囲の地山と一体化するための定着材および頭部で芯材と吹付コンクリート等とを一体化するためのプレートとナットから構成される複合部材である。定着材としては、モルタル、樹脂等がある。
- ・金網は、吹付けコンクリートのせん断補強、施工時と施工後のはく落防止あるいはひびわれ発生後のじん性の向上などを目的に使用される。一般に、金網は土砂地山から硬岩までいろいろな地山条件のもとで使用されている。

- ・ライナー類には、鋼製簡易ライナー、鋼製セグメント、コンクリートセグメントなどがある。

#### b. 覆工

アーチ状の薄いコンクリート構造体であり、坑道としての必要な形状および機能を与え、長期安定性を保持することを目的とする。通常、覆工は無筋コンクリートで設計、施工されるが、力学的機能を付加させる場合には鉄筋コンクリート構造や鋼繊維補強コンクリートなどが採用される。

#### c. 路盤（インバートコンクリート）

覆工とともに必要な内空断面を保持する機能を有する。覆工と一体となり構造的な安定性を向上させる機能や、繰返し荷重等による地山の劣化を防止して坑道の構造体としての耐久性を向上させる機能などもある。

インバートコンクリートは通常無筋コンクリートであるが、インバートに応力が発生するような場合には鉄筋コンクリートや鋼繊維補強コンクリートが使用される。

#### d. 防水工・排水工

坑道の機能を維持し、覆工や坑道内諸設備の機能の劣化を防ぐために設計、施工される。坑道の排水処理方法には、覆工内面に漏水が生じないよう適切な湧水対策を行ったあとに防水シート等を施工する防水工、坑道湧水等を停滞させることなく排水するための裏面排水材、側溝等の排水工がある。

- ・防水工はシート防水工法が多く採用されており、防水シートのおもな材料はプラスチック系のポリ塩化ビニル等の樹脂である。
- ・防水シートは、シート背面にある程度の透水層を形成するために、裏面排水材として不織布、織布等の裏面緩衝材が付いた複合積層シートが用いられることが多い。材質としては、ポリプロピレン、ポリエステル等の樹脂が主に使用されている。
- ・排水工は、排水管等を設置して排水すること多く、排水管の材料としては、鋼管、高密度ポリエチレン管や硬質塩化ビニル管等の樹脂が使用されている。

#### e. 湧水対策工

坑道の湧水対策には、排水工法と止水工法がある。

- ・排水工法には、ボーリング機等を利用して水を抜き、水圧、地下水位を下げる水抜きボーリング等がある。
- ・止水工法で多く採用される注入工法は、切羽前方や周辺地山中にセメントミルク等の非薬液系材料や水ガラス系等の薬液等を注入し、地山の亀裂や空隙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、止水を図るものである。湧水量の低減と地盤改良

効果により切羽安定対策としても確実性の高い工法であり、山岳部では排水工法と併用し水抜きのみでは対処しにくい大量湧水への対策として用いられる。

#### f. 換気・空調設備

坑道の建設や廃棄体の搬送・定置作業が並行して行われることを想定して、それぞれのエリアで換気系統を独立して設けることが検討されている。よって、換気設備および換気扉の使用が検討されている。

また、建設する処分場の地温や廃棄体の設置による温度上昇に対応するため、空調設備として冷暖房設備の検討が必要であると考えられる。

#### g. その他設備

坑道内には作業員が通行するための安全な通路を確保する必要がある。また、作業場所および通路等には十分かつ適切な照明を行い、安全の確保に努めなければならない。これらを含め、一般的なトンネルでは、労働安全および労働衛生を第一として、通路、運搬路、軌道、照明設備、連絡通報設備、緊急避難設備および救護用具等の設備を設ける必要があると考えられている。ただし、これらの設備の大部分は簡単に更新・取替が可能なものが多いため、設備自体の劣化の影響について考慮する必要はないものと考えられる。

## 2) 人工バリアに関する構成要素の抽出と整理

人工バリアの構成要素としては、第2次取りまとめで示された地層処分システムの基本概念となるガラス固化体、オーバーパック、緩衝材となる[5]。これらの概念を図 6.2.2-19 に示す。

この他に人工バリアではないが人工バリアの近傍もしくは接して坑道側に入らない構成要素として、堅置き方式の処分坑道や主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道の埋め戻しで用いられる埋め戻し材や PEM 方式で用いられる鋼製の PEM 容器などがある。PEM 方式の概念の例 [12] を図 6.2.2-20 に示す。また、オーバーパックとしてはレファレンスとなっている炭素鋼単体の概念とする。PEM の材質については、遠隔操作技術高度化開発での搬送・定置試験で試作された材質である炭素鋼とする。

抽出した構成要素を次に示すが、本検討において検討の討対象外として扱うこととした構成要素についてはその旨も示した。

### 【構成要素】

ガラス固化体 : 検討対象外

人工バリアであるが検討対象期間にオーバーパックに封入されていることから外部との接触が全くないことから検討対象外とする。ただし、他の人工バリアへの放射線や熱の影響源としては考慮する。

オーバーパック : 炭素鋼

緩衝材 : ベントナイト (ケイ砂混合 30wt%)

PEM 容器 : 炭素鋼

埋め戻し材 : 検討対象外

埋め戻さない期間が検討対象であることから、埋め戻し材は検討期間では用いられないことから検討対象外とする。

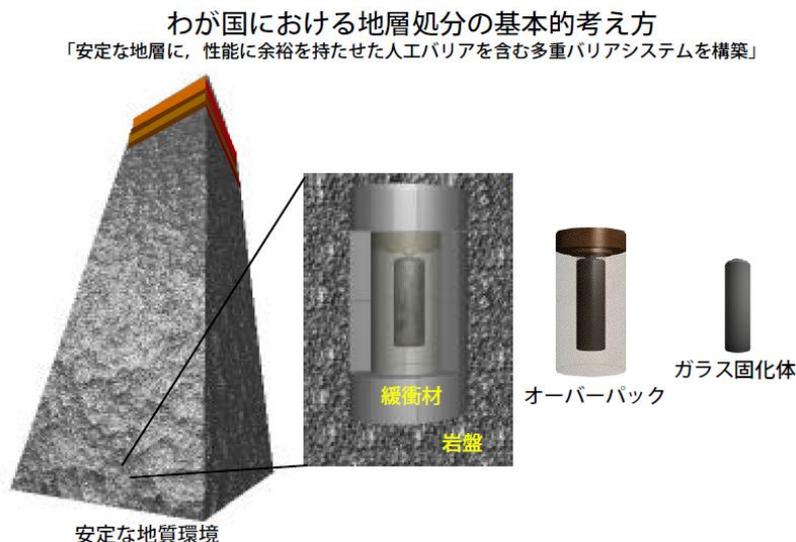


図 6.2.2-19 地層処分システムの構成要素[5]

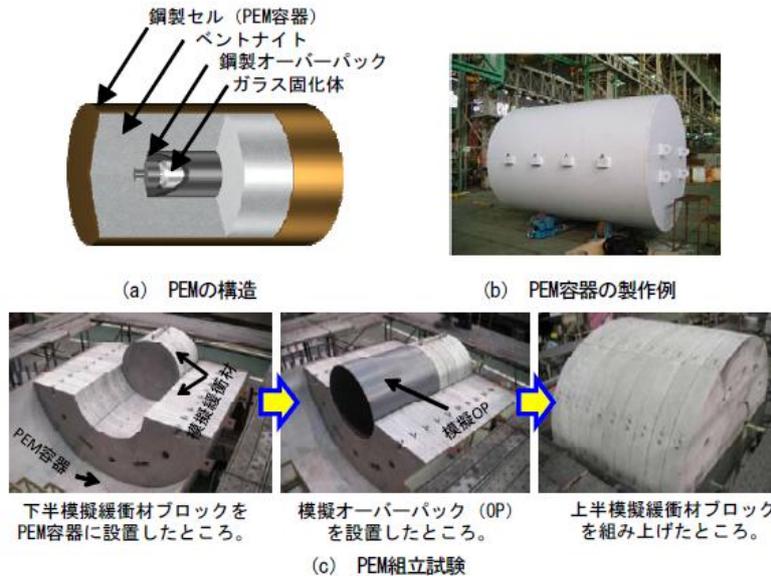


図 6.2.2-20 PEM 方式の例[12]

### 3) その他構成要素の抽出と整理

#### a. 坑道の環境

坑道内の大気は、車両運行、機械および機器の使用などにより、組成が変化することが考えられるため、変化を考慮した大気組成（CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub> など）があげられる。

また、坑道には周辺岩盤の透水性割れ目から地下水の湧水が生じる。湧水は、岩盤に施工されたセメント系のグラウトや吹付コンクリート、覆工、インバートコンクリートとの接触により高 pH となっていることが想定される。このような湧水の状態は、坑道内の排水状態により異なってくると考えられる。

#### b. 監視設備

第2次取りまとめでは、操業段階で取得すべきと考えられる情報の内容と計測項目として、設計・施工上の品質管理、人工バリア周辺および処分施設周辺部の地質環境条件に関するモニタリングとその他の管理(作業安全にかかわる管理など)を目的としたモニタリングのため、下記を挙げている。これらの計測にあたっては、計測項目に対応した計器が必要となり、各計器は鋼材等の複合部材で構成されている。

- ・周辺岩盤の挙動、支保工の健全性：内空変位、支保工応力度など
- ・水理学的特性：地下水位、間隙水圧など
- ・地球化学的特性：pH、Eh など
- ・地質学特性：地温、地震動など
- ・非放射性安全：温度、湿度、ガス、粉じんなど
- ・放射性安全：作業環境放射能

ニアフィールドの構成要素と構成要素に対する使用材料について整理した結果を表 6.2.2-4 に示す。

表 6.2.2-4 構成要素と使用材料の抽出例

ニアフィールドの構成要素			使用材料	
坑道	支保	吹付コンクリート		コンクリート
		鋼製支保工		鋼材
		ロックボルト	鋼棒	鋼材
			充填剤	モルタル
		金網		鋼材
	ライナー類		鋼材、コンクリート	
	覆工	覆工コンクリート		コンクリート
		鉄筋		鋼材
		鋼繊維補強		鋼材
	路盤	インバートコンクリート		コンクリート
		鉄筋		鋼材
		鋼繊維補強		鋼材
	防水工・排水工	防水シート		樹脂他
		裏面排水材		樹脂他
		排水パイプ	横断、縦断	鋼材、樹脂他
湧水対策工	グラウト工	グラウト材	セメント系、水ガラス系	
		注入工材、部品	鋼材	
	水抜き工	水抜きパイプなど	鋼材	
換気・空調設備			鋼材他	
その他設備			鋼材他	
人工バリア	ガラス固化体		— (検討対象外とする)	
	オーバーパック		炭素鋼	
	緩衝材		ベントナイト (ケイ砂混合)	
	PEM容器		炭素鋼	
	埋め戻し材		— (検討対象外とする)	
その他	坑道の環境	大気との接触状態	大気の組成 (CO <sub>2</sub> 、O <sub>2</sub> など)	
		湧水の排水状態	湧水	
	監視設備	モニタリング機器	鋼材他	

ニアフィールドにおける構成要素の使用材料についてまとめると、坑道についてはコンクリート（セメント）、鋼材、グラウトが主要な材料であるということがわかる。他に、樹脂などの複合部材からなる設備などもある。これらの使用材料の経時的な変状（変質・劣化現象）については、(5) 使用材料の経時的な変状（変質・劣化現象）の抽出と整理、にて述べる。

#### (4) ニアフィールドの変状要因の抽出と整理

ニアフィールドの変状は多岐にわたり、また相互的に作用することが考えられている。本項では、ニアフィールドの変状要因について、周辺岩盤と人工バリアを対象として外因と内因に区分して抽出と整理を行った。ここで、外因とは、検討対象に作用する外力などに起因するものであり、内因とは、検討対象自体の変質や劣化に起因するものとする。

##### 1) 周辺岩盤の変状要因の抽出と整理

周辺岩盤の安定性の観点から見た外因とは、岩盤に作用する外力や坑道構成部材の劣化や設計・施工時の不良に起因するものである。また、内因とは、岩盤が内包する地下水・熱などに関連するものや岩盤自体の変質に起因するものであり、内因は外因の作用により生じるものとする。ここでは、周辺岩盤の変状要因について、力学的、水理的、化学的、熱的影響の観点から外因と内因について述べる。

##### a. 力学的影響

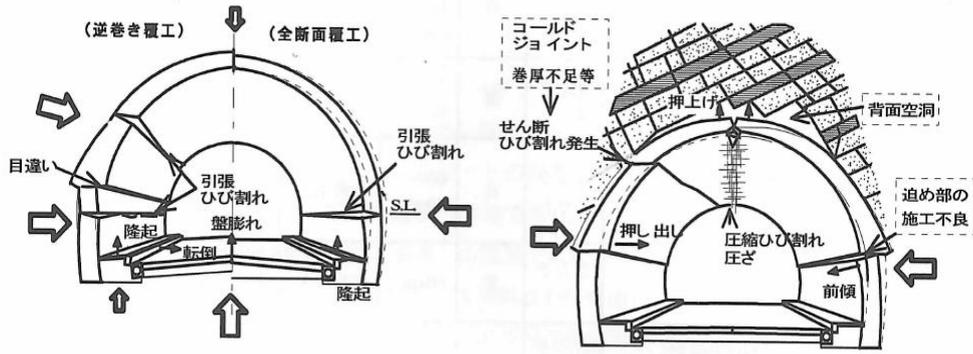
周辺岩盤で発生する変状のうち、力学的影響に関するものは坑道の変形という現象として確認されることが多い。周辺岩盤の変状に関する外的な要因としては、塑性圧、緩み圧、偏圧、応力再配分、また、長期的には岩盤の時間依存性挙動、プレートテクトニクスによる地殻変動や地震が挙げられる。さらに、部材の劣化、設計・施工時の不良などが外的な要因となる。内的な要因としては、外因の作用による岩盤内の割れ目の進展による強度の低下が挙げられる。

##### (a) 外因

###### ア). 塑性圧[13]

塑性圧は、空洞掘削によって周辺岩盤が塑性化し、覆工が施工された後、時間の経過とともに周辺地山に塑性領域が拡大してトンネル内空側に地山が押し出す現象をいう。トンネルの覆工に塑性圧が作用してひび割れ等の変状が発生する場合、トンネルの坑内において確認される特徴としては以下のように要約され、図 6.2.2-21 のような模式図として示すことができる。

- ①側壁あるいはアーチ肩部にトンネル縦断方向に引張ひび割れ（開口ひび割れ）が確認される
- ②側壁の押し出しに伴う内空幅の減少や施工目地のずれが確認される
- ③盤膨れ現象（側溝の持ち上がりや路盤コンクリート、舗装コンクリートのひび割れ、浮き）が確認される
- ④天端部分における圧ぎの発生が確認される
- ⑤待避所、箱抜き部の変状（輪切り上のひび割れ）が確認される



(a) 代表的な変状形態

(b) 構造的な欠陥を有する場合

凡例

➡ : 変位する方向

⇨ : 荷重の作用方向

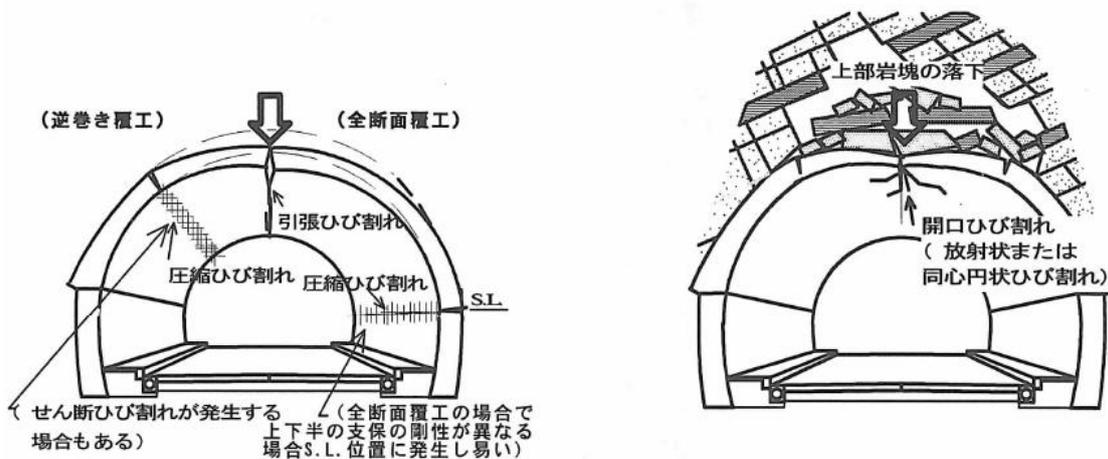
図 6.2.2-21 塑性圧による代表的な変状形態模式図

イ). 緩み圧[13]

緩み圧は、トンネル掘削、支保工の沈下、覆工背面の空洞等によりトンネルの上方の地山が緩み、ある高さ相当の地山重量がトンネルの覆工に直接、鉛直方向に荷重として作用することをいう。トンネル覆工に緩み圧が作用して、ひび割れ等の変状が発生する場合、トンネル坑内において確認される特徴としては以下のように要約され、

図 6.2.2-22 のような模式図として示すことができる。

- ①天端付近に、トンネル縦断方向に引張ひび割れ（開口ひび割れ）が確認される
- ②覆工の変形が進行すると、アーチ肩部から S.L.付近でトンネル縦断方向に圧縮ひび割れが発生する場合がある
- ③以上のようなひび割れは覆工の状態によって、コールドジョイントに規制され位置がずれたり、覆工巻厚が極端に変化する位置でせん断ひび割れとして確認される場合がある



(a) 代表的な変状形態

(b) 局所的に地圧が作用する場合

図 6.2.2-22 緩み圧による代表的な変状形態模式図

ウ). 偏圧[13]

偏圧とは、トンネル横断面において、覆工に左右非対称に作用する地圧の総称であり、地圧の作用する方向を説明するものである。偏圧による変状の特徴としては、左右不均等な荷重がトンネル覆工に作用することから、トンネル内の左右で異なった変状が現れることが挙げられる。トンネル覆工に偏圧が作用した場合の変状現象を要約すると、以下のようになり、図 6.2.2-23 および図 6.2.2-24 のような模式図として示すことができる。

- ①山側アーチ肩部に水平開口ひび割れが発生する
- ②アーチ頂部、またはやや谷側に圧ぎが発生する
- ③山側の逆巻迫め部に目違いが発生する
- ④断面軸が回転するとともに、谷側へトンネルが変形する
- ⑤谷側の側壁部に水平開口ひび割れが発生する

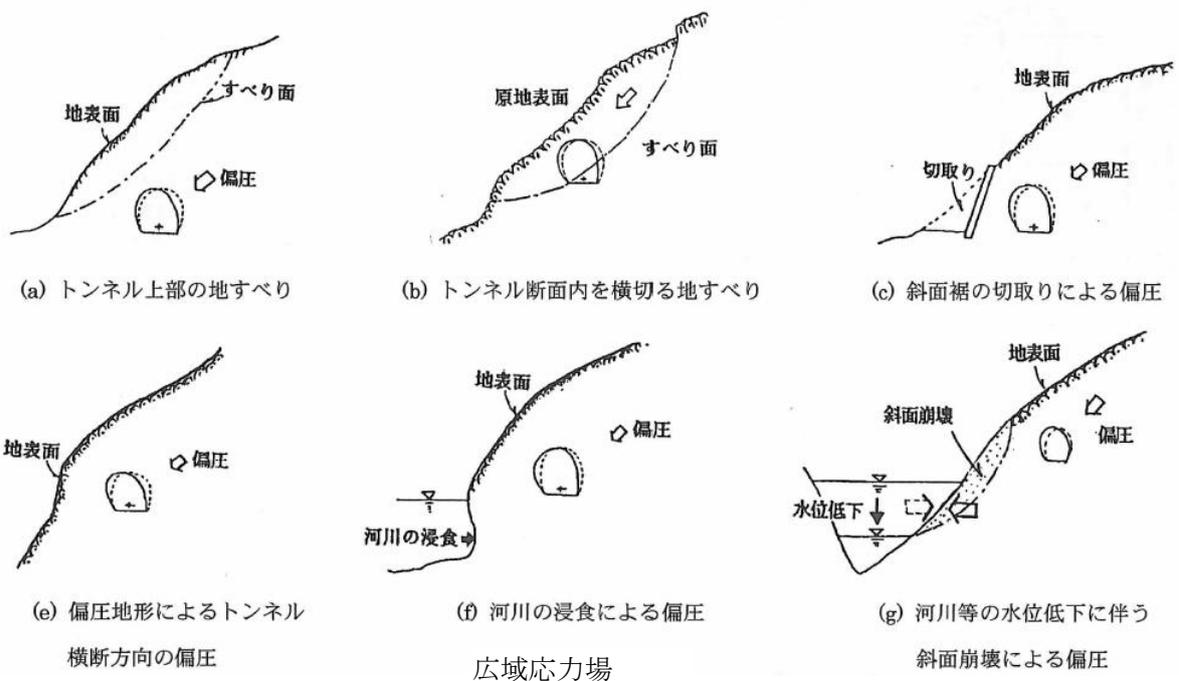


図 6.2.2-23 偏圧の発生例と変状の模式図

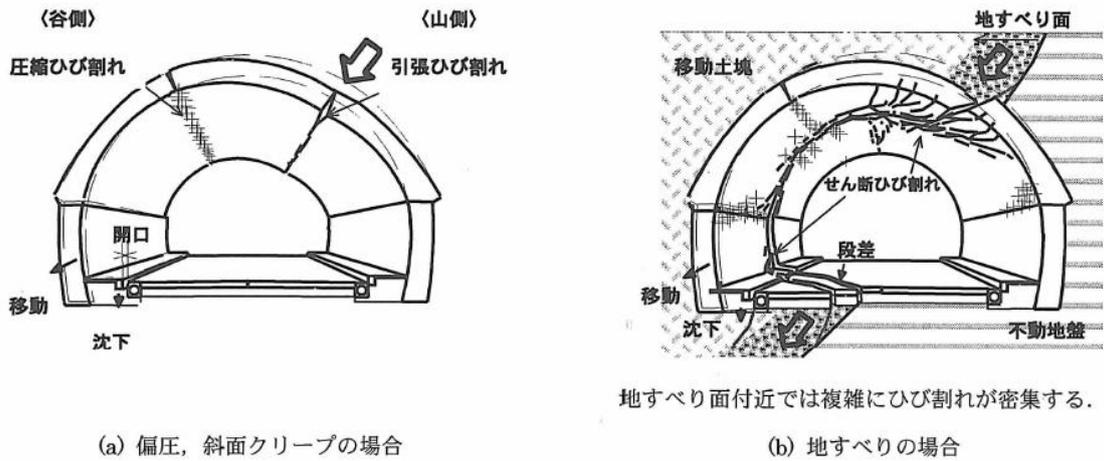
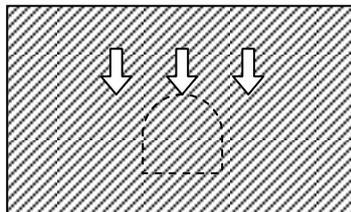


図 6.2.2-24 偏圧による代表的な変状形態模式図

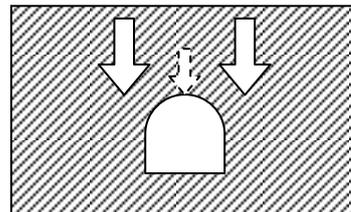
エ). 応力再配分

空洞の掘削などで岩盤の形状が変化したり、あるいは塑性域が変化すると初期応力の分布が変化する。この現象を応力再配分という。例えば図 6.2.2-25 に示すように、空洞の掘削などで今まで空洞部分の岩盤が負担していた応力を空洞部分の岩盤が掘削されたことにより空洞周辺の岩盤がその負担分を担うこととなる。そのため周辺岩盤の地圧が増加する。

○空洞掘削前



○空洞掘削後



空洞掘削前まで負担していた応力を周辺岩盤が負担することになる



周辺岩盤の応力が増大する

図 6.2.2-25 応力再配分の例

オ). 時間依存性挙動

岩石や岩盤は、クリープや応力緩和のような時間依存性挙動を示すことが知られている。高レベル放射性廃棄物の地層処分時においては、建設時および操業時は言うまでもなく、坑道埋め戻し後も長期にわたる坑道の安定性の評価が要求される。このため、長期にわたる岩石や岩盤の時間依存性挙動を把握することは、そのような坑道の長期安定性を評価する上で重要な課題である。

日本原子力研究開発機構が進める委託研究では、岩石や岩盤の時間依存性挙動を、精密な試験や観察・計測から直接的に検討する手法で解明し、岩盤構造物の長期挙動予測評価手法を開発する研究を行っている。この研究では大久保らがコンプライアンス可変型構成方程式[14]を提案し研究を継続している。ここでコンプライアンスとはひずみを応力で除した値であり、変形のしやすさと捉えることができる。このコンプライアンス可変型構成方程式ではコンプライアンスは定数ではなく応力や時間の関数である。つまりコンプライアンスが変化することにより岩盤が有する粘性的な挙動と破壊（ピーク強度）後の塑性挙動を表すものである。コンプライアンス可変型構成方程式では、室内実験により構成方程式中で必要なパラメータを取得することにより、岩石の挙動を説明することが可能である。図 6.2.2-26 に、一軸圧縮試験結果の応力-ひずみ曲線と試験結果から得られたパラメータを用いて、コンプライアンス可変型構成方程式を基に作図した応力-ひずみ曲線を比較した結果を示す。図より破壊応力と破壊の形態が一致し、室内試験における岩石の挙動についてはコンプライアンス可変型構成方程式で説明できることが分かっている[14]。

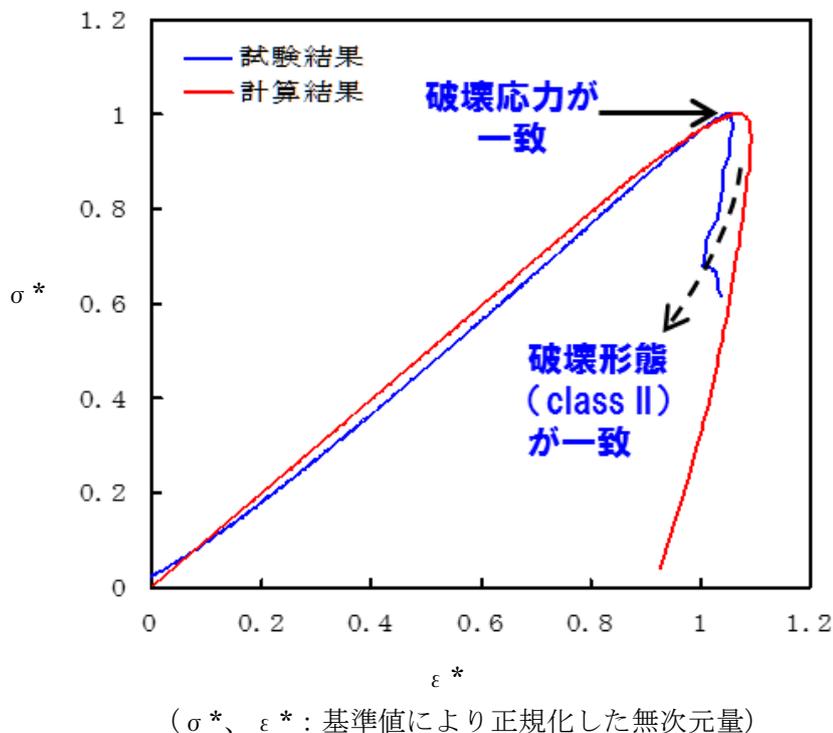


図 6.2.2-26 試験結果とコンプライアンス可変型構成方程式による計算結果

#### カ). プレートテクトニクスによる地殻変動

初期応力は、岩盤の自重による土被り圧のほかにプレートテクトニクスによる水平地殻応力にも影響される。プレートテクトニクスはマンツルの対流がその原動力になっていることが分かっている。そのため地球が存在する限り、過去から未来へ絶えず常にプレートは動き続けると考えられる。図 6.2.2-27 に示すように、特に日本のようなプレートの密集地帯で、かつプレートの沈み込み帯では、水平応力が増大し、その結果鉛直応力成分よりも水平応力成分の方が応力値の大きい地域が多く存在する。

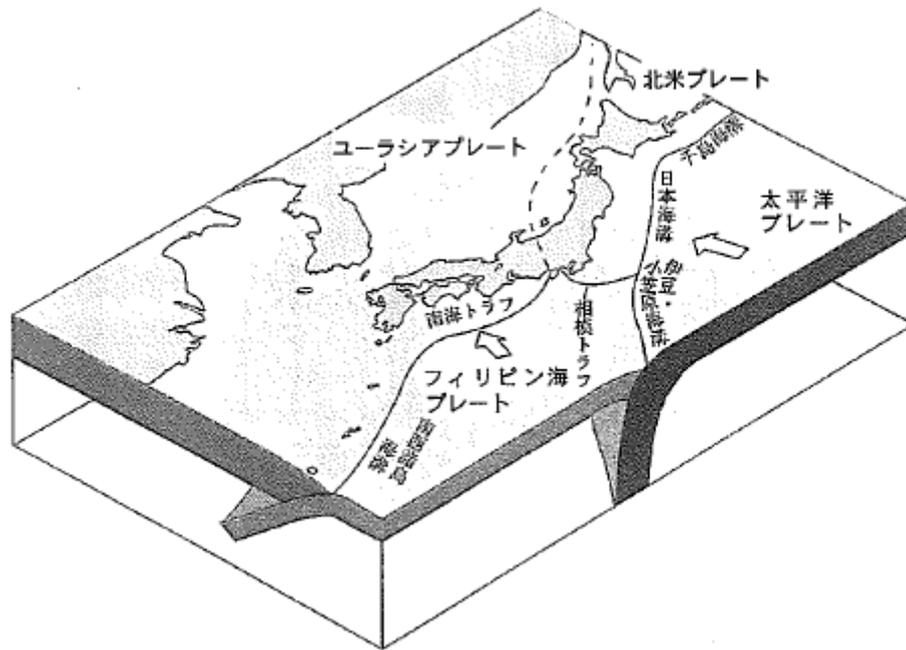


図 6.2.2-27 日本列島とその周辺のプレート[1]

#### キ). 地震

プレートテクトニクスによってプレートは移動し、圧縮場が生じる箇所が出現する。力が加わりひずみが蓄積すると岩盤の強度を超えたり、既存の断層の摩擦の限界を超えたり、変形によりプレート同士の固着域が滑ったりすると、それまで蓄積されたエネルギーが解放され、地震が発生する。よって、地震の発生前は圧縮されて応力が増加していき、地震の発生後は、場所によっては解放されて応力が減少すると考えられる。このように地震は周辺地域の初期応力の状態を変動させることが考えられる。

その他には、漏水（酸性雨や乾湿の繰返し）、アルカリ骨材反応、温度応力等による部材の劣化（腐食）による覆工材料の劣化が挙げられる。材料劣化が進めば覆工片の剥落が生じ、さらには覆工の構造耐力の低下に結びつくと考えられる。鋼製支保等も腐食により劣化し、強度や剛性が低下する可能性が考えられる。また設計・施工時の不良に関して想定されることは、材料自体の強度および剛性が著しく低いことや、割れ目などの形状的な欠陥が考えられる。いずれの場合でも支保が本来の設計通りに機能せず、空洞の変状を促す

可能性が高いと考えられる。

(b) 内因

内的な要因について、力学的観点からは外因の作用によって生じる可能性のある岩盤中の割れ目の進展が挙げられる。割れ目の進展によって強度特性、変形特性の低下や応力分布の変化が生じると考えられ、その結果、空洞が変形する可能性があると考えられる。

b. 水理学的影響

周辺岩盤で発生する変状のうち、水理学的影響に関するものは坑道に流入する地下水やガスに起因するものである。流入する地下水量が排水量を上回る場合には坑道内の水位が上昇、または水没する。局所的な湧水により緩衝材が損傷する可能性もある。また、過大な間隙水圧の作用により覆工コンクリートが損傷することもある。

このような変状を引き起こす外的な要因を大別すると、坑道掘削、地震などの地殻変動、廃棄体や緩衝材の定置、排水設備など停止などが挙げられる。内的な要因としては、外因の作用による岩盤の透過性の変化、飽和度の変化、間隙流体の圧力勾配の変化などが挙げられる。外的な要因として他には、海水準変動や隆起沈降などの超長期的な変動もあるが、ここでは検討しないものとする。

(a) 外因

ア). 坑道掘削

坑道の掘削に伴う発破損傷や岩盤強度を超えた応力集中は、新たな空隙の発生や連続性の増加、開口幅の増大などによる岩盤の透過性増大の要因となる。坑道掘削により発生した圧力勾配により、地下水やガスは坑道内空に向かう流れが発生するが、坑道近傍では圧力が低下するためにガスの気化が発生する。この領域では飽和度が低下しガスの透過性が増加するため、ガスの流入量は増加する。このような変化は、時間に伴う岩盤劣化の進行により拡大する。坑道には吹付コンクリートや覆工などが施工され、坑道の安定性が確保されるが、岩盤の劣化などにより裏面排水機能の障害が発生した場合には、岩盤内の地下水やガスの圧力が増加し、坑道周辺岩盤の有効応力が低下することで、さらなる岩盤の損傷が生じ、地下水やガスの透過性増大の要因となる。

イ). 地殻変動

地殻変動などにより坑道近傍で断層や破碎帯が発生し、地下水やガスの流動場が大きく変化する。また、岩盤のひずみにより岩盤の劣化が促進される。これらの外因により、透過性の増大や圧力勾配の増加が発生する。

地震が発生し、地震動が坑道に伝搬してきた場合には、岩盤の振動に伴い地下水やガスの圧力が増加、あるいは低下する可能性がある。このような現象は地下研究施設などでも認められている。また、岩盤のひずみにより岩盤の劣化が促進される可能性がある。これらの外因により、透過性の増大や圧力勾配の増加が発生する。

#### ウ). 廃棄体および緩衝材の定置

廃棄体の温度上昇により、岩盤中の地下水の体積変化や、坑道壁面の地下水が蒸発することにより、飽和度が変化することが考えられる。

緩衝材の膨潤により坑道近傍の岩盤がひずみ、岩盤に新たな空隙が発生する。また、既存の空隙に緩衝材が侵入し、空隙を押し広げることで透過性が増加することが考えられる。

#### エ). 設備の停止

処分場を管理する施設が、風水害や地震により被害を受け、あるいは人為的なミスにより処分坑道の通電が停止した場合には、換気、空調設備や排水設備が停止し、坑道内からの地下水やガスの排出が困難となる。

### (b) 内因

内的な要因について、水理学的観点からは外因の作用によって生じる可能性のある岩盤の透過性の変化、飽和度の変化、間隙流体の圧力の変化などが挙げられる。これらの内因により坑道内への湧水量の変化、覆工に作用する水圧の変化が生じ、その結果、坑道や人工バリアに変状が発生する可能性があると考えられる。

### c. 化学的影響

処分施設で発生する変状のうち、化学的影響に起因するものについて検討する。なお、岩盤や支保部材が変質、劣化し、坑道の安定性を脅かすなどの力学的影響については、ここでは検討範囲外とする。何らかの化学変化により、有害ガスや有害物質、腐食性の物質などが発生することに起因する変状をここでは対象とする。このような変状を引き起こす外的な要因を大別すると、坑道掘削、廃棄体の定置、換気・空調設備などの停止などが挙げられる。内的な要因としては、外因の作用によるガスの発生、重金属の発生、微生物の活性化などが挙げられる。

### (a) 外因

#### ア). 坑道掘削

坑道の掘削に伴い、通気によって酸素や微生物が坑道内に侵入する。この結果、岩盤の酸化により硫酸が発生する可能性がある。また、地下水に溶存していたメタンガスなどが分離気化し、地下水流れとともに坑道内に湧出する。坑道には安定性確保のために吹付コンクリートや覆工が施工されるが、コンクリートからの成分溶出により坑道や岩盤はアルカリ環境となる。この結果、岩盤より重金属が溶出する可能性がある。メタンガスの濃度によっては、ガス爆発が発生する可能性がある。また、埋め戻し後に還元環境となった場合には支保工やロックボルトの腐食により水素ガスが発生する。

#### イ). 廃棄体の定置

廃棄体の崩壊熱により、岩盤や地下水の温度が上昇する。これにより、微生物活動が促進され、バイオマットのような微生物群集が形成される。また、埋め戻し後に還元環境となった場合にはオーバーパックの腐食によって水素ガスが発生する。

#### ウ). 設備の停止

処分場を管理する施設が、風水害や地震により被害を受け、あるいは人為的なミスにより処分坑道の通電が停止した場合には、換気、空調設備や排水設備が停止し、坑道内からの有毒ガスの排出が困難となる。

### (b) 内因

内的な要因について、化学的観点からは外因の作用によって生じる可能性のあるメタンガスの発生、硫酸の発生、重金属の発生、微生物の活性化などが挙げられる。これらの内因により有害ガスや有害物質、腐食性の物質などが発生し、その結果、坑道や人工バリアに変状が発生する可能性があると考えられる。

### d. 熱的影響

処分施設で発生する変状のうち、熱的影響に関するものは温度上昇による緩衝材の変質、温度上昇による坑道内環境の悪化、化学的変化の促進などが挙げられる。このような変状を引き起こす外的な要因を大別すると、坑道掘削や廃棄体の定置、地震などの地殻変動、設備の停止などが挙げられる。内的な要因としては、外因の作用による岩盤の熱伝導率および比熱の変化、岩盤内間隙流体の温度変化などが挙げられる。

### (a) 外因

#### ア). 坑道掘削や廃棄体の定置

坑道の掘削による地下水やガスの圧力勾配の発生の結果、坑道内空に向かう地下水やガスの流れが発生するが、ガスの存在により坑道近傍には不飽和領域が発生する。この領域では熱伝導率や比熱が小さくなることが考えられ、想定を超えた坑道の温度上昇が懸念される。また、温度によっては地下水が気化し、水蒸気が発生する。

#### イ). 地殻変動

地殻変動によって断層や破碎帯が発生し、地熱や温泉地帯の高温な地下水や水蒸気を含む地層と坑道が連結した場合には、高温の地下水が坑道に侵入し、坑道の温度が上昇して維持管理が困難となる。

#### ウ). 設備停止

処分場を管理する施設が、風水害や地震により被害を受け、あるいは人為的なミスにより

処分坑道の通電が停止した場合には、換気、空調設備が停止し、坑道内の温度上昇により維持管理が困難となる。

#### (b) 内因

内的な要因について、熱的観点からは外因の作用によって生じる可能性のある熱伝導率の低下、比熱の低下、岩盤内間隙流体の温度変化などが挙げられる。

### 2) 人工バリアの変状要因の抽出と整理

#### a. 放射線場

人工バリアで発生する変状のうち、放射線の影響に関するものとしてオーバーパックスの腐食への影響があるが、オーバーパック設計において考慮されておりその考え方が変化するものではないため検討対象外とし、放射線の直接的な影響について検討する。

#### (a) 外因

直接的な影響としては、坑道が開いていることからの坑道の点検や埋戻し作業における作業員への放射線の影響が考えられる。人工バリアの設計においては、堅置きについてはオーバーパック、緩衝材、処分孔上部の埋戻し材により必要な遮へいが確保されているが、埋め戻しまでの期間がある場合には、オーバーパックにおいては腐食の進行による減肉により遮へい厚さが減少し、遮へい厚さが変化する。厚さの変化は、図 6.2.2-17 に示したように 0.1mm/yr オーダーである。放射能の減衰、緩衝材への冠水なども同時に進行することから放射線遮へい性の変状は無視できるものと思われるが、操業安全に関わる事項でありまた腐食深さのばらつきも考慮した評価は必要と考える。

ガラス固化体からの放射線は処分前の中間貯蔵期間の存在やオーバーパックスの遮へいにより、緩衝材外部の空気や水への影響は小さいものと考えられる。しかし、緩衝材の施工により緩衝材中やその周囲に閉じ込められた空気や水は移動しないことが考えられ、そのためある程度の期間照射状態にあるため放射線分解の可能性が無いとは言いきれない。したがって、これまで評価をしていないが、放射線による影響の評価が必要と考える。

#### (b) 内因

放射線によるオーバーパックスの劣化や放射化が考えられる。ガラス固化体からの放射線量は直に影響するような程度では無いと考えられるが、回収を実施する場合にある程度の期間を有している場合には放射線劣化による強度の低下や放射化について考慮する必要があるものと考えられ、変状要因として考えられる。

#### b. 熱的影響

人工バリアで発生する変状のうち、発熱量自体は回収維持により変化することはないため熱的影響として外因と考えられるものは無いと考えられる。ここでは内因について検討する。

(a) 外因

熱的影響として、人工バリアで発生する変状のうち、外因は無いと考えられる。

(b) 内因

内因としては、ガラス固化体の発熱による人工バリアの温度上昇による緩衝材の劣化が変状要因として考えられる。また、温度上昇による緩衝材の含水比の変化による緩衝材の熱伝導率、比熱などの熱物性の変化も考えられる。

c. 力学的影響

人工バリアで発生する変状として、定置後に発生する緩衝材の膨潤やオーバーパックの腐食が力学的影響となって発生し、この影響に伴い人工バリアの形態などが変化する。これらについて、外因、内因として検討した。

(a) 外因

外因としては、地下水の浸潤により緩衝材に発生する体積膨潤や膨潤圧が考えられる。また、この逆として、ガラス固化体からの発熱による緩衝材の水分量の低下による体積収縮も考えられる。これらは、定置される環境での湧水や温度状態により変化するため、環境を考慮した評価が必要である。また、オーバーパックまで水が浸潤した場合には酸化環境における腐食が進行し、オーバーパックの体積膨張が発生し緩衝材における内圧の変化や体積の変化が考えられる。

PEM においては、PEM 容器において地下水が内部に浸入し緩衝材が浸潤した場合には、内部に緩衝材の膨潤圧による内部圧力が発生する。また、ガラス固化体の発熱による緩衝材中の水分が蒸発することが考えられ、その蒸気による内部圧力が発生する。これら内部圧力による変形や破損が考えられる。これに伴い、緩衝材の寸法や密度の維持ができなくなることも変状要因として考えられる。

(b) 内因

内因としては、緩衝材の体積変化や変形などが設計で計画したものと異なる状態で発生し（偏膨潤など）オーバーパックの維持機能が劣化するなどが変状要因として考えられる。

d. 水理学的影響

人工バリアで発生する変状として、水理学的影響として外因的なものは無いと考える。内因としては、定置後の湧水による緩衝材自体の変化が考えられ内因として検討した。

(a) 外因

水理学的影響として、人工バリアで発生する変状のうち、外因は無いと考えられる。

(b) 内因

緩衝材において、湧水による緩衝材の流出やパイピングが考えられる。緩衝材の流出が発生すると緩衝材密度の低下や透水係数の増大が変状要因となる。また、パイピングでは、透水係数の増大が変状要因として考えられる。どちらにおいても、緩衝材の人工バリアとしての止水性能の劣化が発生する。

e. 化学的影響

(a) 外因

緩衝材に関する外因としては、緩衝材とセメントの相互作用による緩衝材のカルシウム化や粘土鉱物の溶解などや、緩衝材と炭素鋼腐食生成物の相互作用による Fe 型化やセメンテーションなどによる緩衝材の劣化などが変状要因として考えられる。

オーバーパックに関する外因としては、埋め戻さないことによる坑道の酸化性環境の継続によりオーバーパックが酸素による腐食が継続し、設計時の酸素による腐食代の変化などが変状要因として考えられる。

(b) 内因

緩衝材の内因としては、上述の相互作用による緩衝材の変質による膨潤性能や止水性能の劣化が変状要因として考えられる。

オーバーパックの内因としては、腐食による強度低下などが変状要因として考えられる。

(5) 使用材料の経時的な変状（変質・劣化現象）の抽出と整理

処分施設の安全性を満足するため、埋め戻しまでの期間において想定される構成部材や使用材料の変状（劣化）に関する最新の研究動向について整理を行った。対象とする材料については、(3) 章において処分施設に影響を及ぼす構成要素として抽出した、セメント、鋼材、グラウト、緩衝材、オーバーパックを対象とする。また、その他の設備に関しても経時的な変状について述べる。

1) セメントの劣化現象に関する最新の研究動向

埋め戻しまでの期間において想定されるセメント系材料の変状（劣化）を対象として、最新研究動向を調査した。このうち、放射性廃棄物処分施設の余裕深度処分施設における研究成果には、本検討において適用可能な知見が多くみられる。

2009年7月(社)土木学会編：「余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方[15]」では、セメント系材料を使用する部材の要求機能（低拡散性、核種収着性）別に、長期状態評価において考慮すべき主要な現象・反応（ここで言う変状（劣化）現象と同義）について表 6.2.2-5 に示すようにまとめられている。

表 6.2.2-5 長期状態評価において考慮すべき主要な現象・反応例[15]

人工バリア機能	主な対応部位	重要度の高いパラメータ (施工時性能・状態)	性能を支配する 主要な物理・化学特性	長期状態評価において考慮すべき 主要な現象・反応	左記現象・反応に影響する 当該部位の主要な特性 (長期状態設定)	考慮すべき特性 ○施工時性能に係る特性 *長期性能に係る特性
低透水性	低透水層	○透水係数	モンモリロナイト 層間イオン組成	・交換性陽イオンの変化	* 鉱物組成 (層間イオン組成) * 密度 (かさ密度)	○ 透水係数 ○ 厚さ * 鉱物組成 * 密度 (かさ密度) * 強度・変形係数 * 膨潤圧
			モンモリロナイト 含有率	・モンモリロナイトの溶解	* 鉱物組成 (モンモリロナイト含有率)	
			乾燥密度	・力学的変形に伴う密度・形状の変化 ・近接部材隙間等へのベントナイト流出	* 強度・変形係数 * 膨潤圧	
		○厚さ	間隙水の水質	・塩水の影響 ・硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響	—	
厚さ	・力学的変形に伴う密度・形状の変化 ・近接部材隙間等へのベントナイト流出		* 強度・変形係数 * 膨潤圧			
	短絡経路の有無	・力学的影響による物理的損傷 ・膨潤による自己シール	* 膨潤圧			
	空洞内充てん材	○強度・変形係数 (低透水層の拘束)	密度	・鉱物変質	* 鉱物組成	○ 強度・変形係数 * 鉱物組成
低拡散性	低拡散層	○実効拡散係数	基質部の空隙構造	・セメント水和物の溶脱、二次鉱物の生成 ・硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響	* 鉱物組成 * 実効拡散係数	○* 実効拡散係数 ○ ひび割れ開口面積 ○ 厚さ * 鉱物組成 * 圧縮強度
		○ひび割れ開口面積	ひび割れ幅、長さ 本数	・二次鉱物の生成によるひび割れ形成 ・硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響 ・微生物活動 ・力学的変形に伴うひび割れの生成、進展 ・低透水層の不等沈下に伴う応力発生によるひび割れ形成	* 鉱物組成 * 圧縮強度	
		○厚さ	厚さ (健全部)	・セメント水和物の溶脱、二次鉱物の生成 ・硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響	* 鉱物組成	
核種収着性	区内充てん材 コンクリートビット 低拡散層	○収着分配係数	鉱物組成	・セメント水和物の溶脱、二次鉱物の生成 ・熱変質による鉱物変質	* 鉱物組成	○ 収着分配係数 ○ 収着体積 * 鉱物組成
			間隙水の水質	・セメント水和物の溶脱、二次鉱物の生成 ・硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響	—	
		○収着体積	当該部位の体積	・セメント水和物の溶脱、二次鉱物の生成	* 鉱物組成	

すなわち、セメント系の劣化現象を整理するには、まず部材の要求機能を整理する必要があるが、ここでは付帯的な機能も含めて広くセメント系材料に期待される機能全般にわたり、劣化現象を示す。

表 6.2.2-5 に示すように、セメント系材料の劣化変質として大きな要因の一つにひび割れ

が挙げられる。ひび割れは、建設時（初期）の温度収縮、自己収縮、乾燥収縮が部材に拘束されることにより発生する材料に起因するもの、鉄筋の腐食膨張によるものや力学的変形、ベントナイトの不等沈下などに起因するもの（比較的長期）が想定される。ひび割れはそれ自体よりもセメント系材料の機能として期待される遮水性に図 6.2.2-28 [16]のように大きく影響すると言われている。遮水性を期待する場合には留意が必要な変状である。

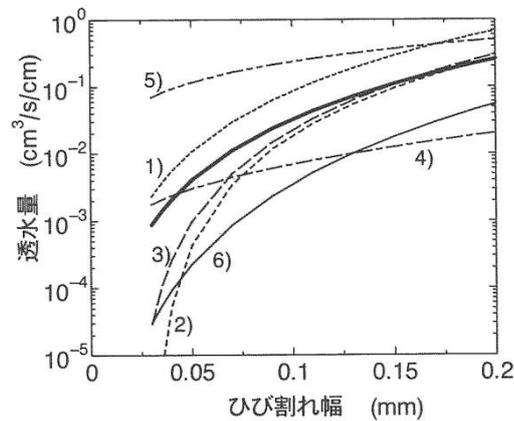


図 6.2.2-28 ひび割れ幅と透水量[16]

次に、セメント系材料の機能に大きな影響をあたえる劣化現象として溶脱が考えられる。溶脱はセメント系材料が雨水や地下水等の水に接触することによりコンクリート中に含まれる水酸化カルシウム等が溶出し、これによりコンクリート中の細孔溶液の pH の低下や空隙構造等が変化する現象である。

図 6.2.2-29 には材齢と Ca 濃度が 1%低下する表面からの深さの研究結果[17]を示す。一般的なコンクリートの場合、100 年程度で 5cm 程度変質することを示している。

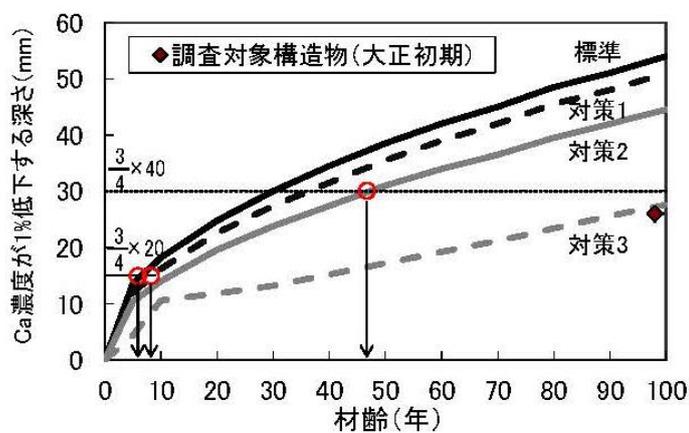


図 6.2.2-29 材齢と Ca 濃度が変化する深さ[3]

また、放射性処分施設に特有なコンクリートとベントナイトとの境界における溶脱による変質深さの研究例を図 6.2.2-30 [18]に示す。図-3 は Ca 固定化能力を考慮した現実的なベントナイト (TypeA : 固定化あり)、Ca 固定化能力を考慮しない仮想ベントナイト (TypeB : 固定化なし)、および純水 (TypeC : 純水浸漬) とした 3 ケースにて、図-3 右図の境界条件で解析を行っている。解析結果は、10,000 年後に固定化ありのベントナイトと接触したときに約 200mm、純水と接触したときに約 260mm となることを示している。

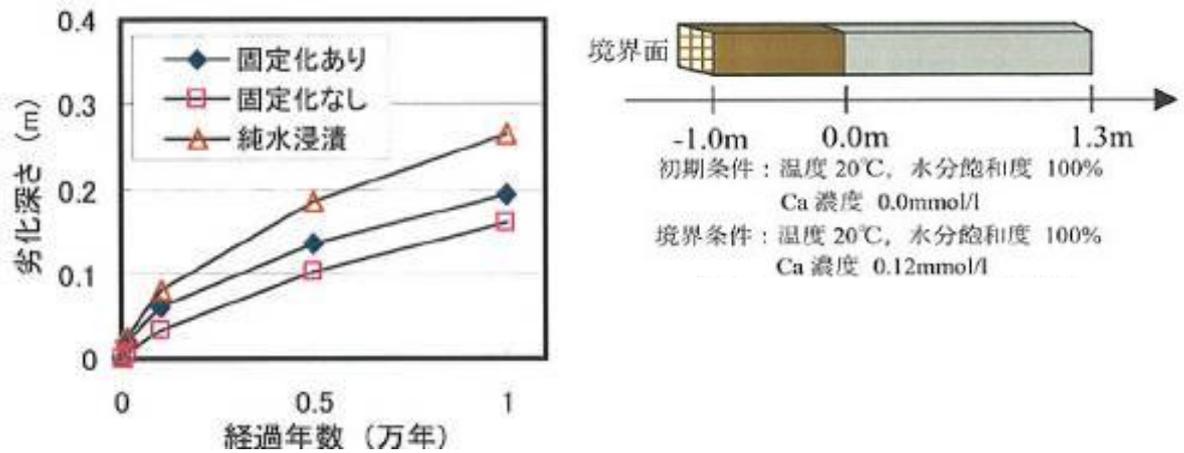


図 6.2.2-30 Ca 固定化による劣化深さの変化[18]

埋戻しまでの期間、セメント系材料は大気に曝され、これにより中性化の影響を受ける。図 6.2.2-31 では余裕深度処分施設で使用が検討されているセメント系材料 (低熱ポルトランドセメントにフライアッシュ、石灰石微粉末、膨張材を使用) の中性化深さを算定しているが、100 年間で 2cm 程度であることから、鉄筋のかぶり深さよりも浅くその影響は小さいとしている。

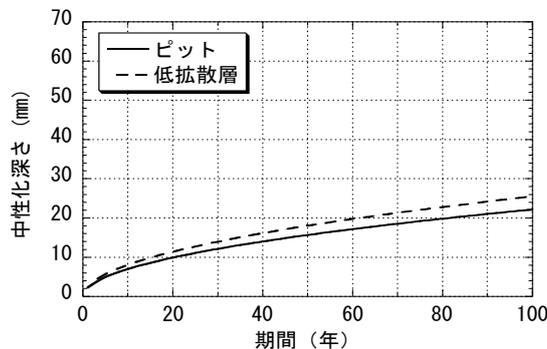


図 6.2.2-31 中性化深さの経年変化[19]

同様にセメント系材料の使用材料の選定などの設計的な対応により、アルカリ骨材反応などはその影響を低減することが可能であることが従来のコンクリート材料で示されてい

る。一方で、図 6.2.2-32 に示すソーマサイト劣化は、硫酸塩が含まれる土壌等からの  $\text{SO}_4^{2-}$  の侵入によりセメントペーストの一部あるいは大部分がソーマサイトに変化し組織が軟化する現象であり、その発生にいたる期間や環境条件については未だ不確かな状況であり留意が必要である。



図 6.2.2-32 ソーマサイト劣化 (写真) [20]

## 2) 鋼材の劣化現象に関する最新の研究動向

埋め戻しまでの期間において想定される鋼材の変状（劣化）として、最新研究動向のうちベントナイト中の鋼材の劣化現象についてはオーバーパックの劣化現象で示すこととして、ここではセメント系材料中の鋼材の腐食に関する研究成果を示す。

セメント系材料中の鋼材の劣化現象については、従来から海岸沿岸部でのコンクリート構造物の塩害による早期劣化現象が広く知られている。一般に、コンクリートの細孔溶液は  $\text{pH} \geq 11.5$  の高アルカリ環境であり、鉄筋は不動態化することによって、腐食の進行はほとんど生じない。しかし、塩化物イオンがコンクリート中の鉄筋に達すると鉄筋の不動態被膜が破壊され、孔食が発生し、この鉄筋の腐食膨張によってコンクリートにひび割れが発生する。この一連のコンクリートの劣化メカニズムを塩害と称し、多岐にわたる研究がされている。従って塩化物イオンが存在する場合のコンクリート中の鋼材腐食劣化現象については、かなり一般的な知見がある。

一方で塩化物イオンが存在しない場合のコンクリート中の鋼材に関する劣化現象については、従来論じられてきていなかった。これは、一般のコンクリート構造物の設計供用期間は 100 年程度であり、この期間内で高アルカリ環境下における鉄筋の腐食はその速度が非常に遅いため、問題にならなかったためである。しかし、処分環境ではその評価年数が数万年におよぶ場合もあり、塩化物イオンの存在しない環境下における腐食が最新の研究では示されるようになってきた。

余裕深度処分施設では図 6.2.2-33 に示すとおり、コンクリートピットが鉄筋コンクリート構造であり、その内側には鋼製の廃棄体が配置される。

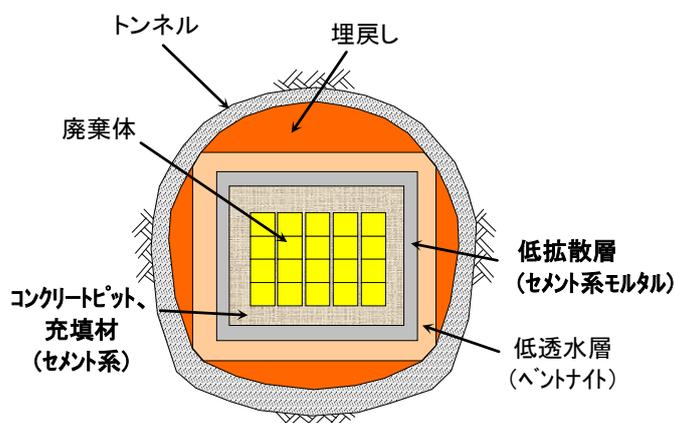


図 6.2.2-33 低レベル放射性廃棄物余裕深度処分施設[21]

これらのコンクリート中の鋼材が腐食膨張し、コンクリートにひび割れが発生すると人工バリアの要求機能に影響を及ぼす可能性があることから、鋼材腐食の状態予測は重要な評価項目となっている。腐食膨張圧によるセメント系人工バリアの状態予測を行なうには、長期における腐食速度等がどのように変化するかが重要である。腐食速度や腐食生成物は、鋼材の置かれる条件（ $\text{pH}$  や塩分、酸素濃度）によって大きく変わることから、鋼材腐食に影響を及ぼす条件が経年でどのように変化するかを表 6.2.2-6 のとおり示している。

表 6.2.2-6 人工バリア内鋼材の腐食シナリオ[21]

腐食環境 ステージ	対象 鋼材	環境 温度	腐食 メカニズム	pH	腐食生成物 腐食形態	腐食速度
ステージⅠ 建設・作業段階～ 再冠水	炭素鋼	10～60℃	酸素 消費型	11.5～13 程度	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 全面腐食	腐食速度 Ⅰ
ステージⅡ 再冠水後～ 鉄筋位置まで溶脱			水素 発生型			腐食速度 Ⅱ
ステージⅢ 鉄筋位置まで溶脱後			10～11.5 程度以下	腐食速度 Ⅲ		

余裕深度処分施設では、埋戻し後再冠水までは飛来塩分や地下水にふれることがないために塩化物イオンによる腐食は考慮する必要がない。図 6.2.2-34[22]は地下水模擬溶液で高還元性環境(O<sub>2</sub><0.1vol.ppm)下における塩化物濃度と pH による鋼材の腐食電位と孔食、隙間腐食発生電位の関係を示したものである。余裕深度処分施設で想定される O<sub>2</sub><10vol.ppm の場合における腐食電位を図-2 に併記すると、隙間腐食や孔食は発生しないと推察される。すなわち、余裕深度処分施設におけるセメント系材料中の鋼材の腐食では、塩化物イオンによる孔食などを考慮していないにも関わらず、その評価期間の長さから腐食の影響を考慮する必要があることが図 6.2.2-35[23]に示すひび割れ解析結果などから示されている。図 6.2.2-35 はコンクリートピット中の鉄筋の腐食膨張によるコンクリートピットと低拡散層の変形を 2 万年後と 5 万年後について解析的に求めたものであり、低拡散層の伸び量は 5 万年後に 127.6mm、部材量に対する伸び量の率が 1.2%程度以下として、その影響の大きさを示している。

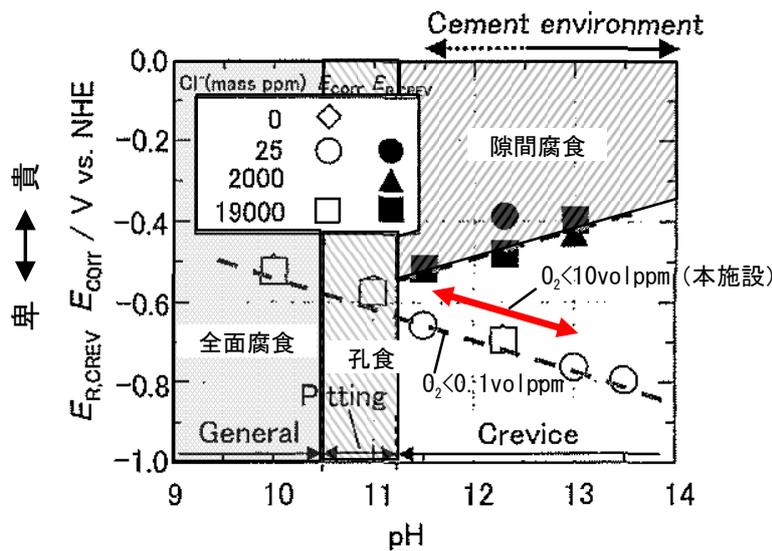


図 6.2.2-34 塩化物イオンと pH による孔食と隙間腐食[22]

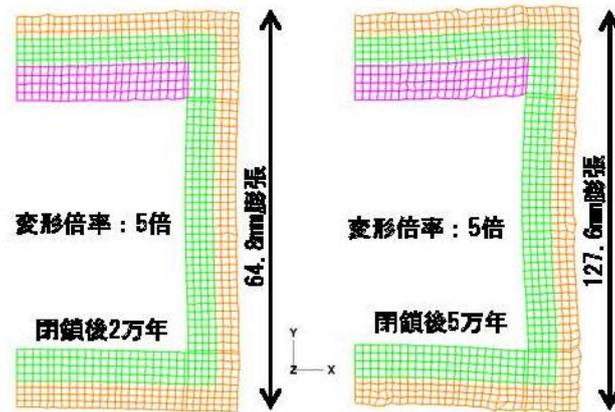


図 6.2.2-35 コンクリートピットと低拡散層の変形図[23]

このようなことから、余裕深度処分施設では塩化物イオンの影響をほとんど受けない、表 6.2.2-6 の条件下における鋼材の腐食速度を文献調査によって表 6.2.2-7[24] のとおり設定している。

表 6.2.2-7 腐食速度パラメーター一覧[24]

	最も確からしいパラメータ ( $\mu\text{m/y}$ )	安全裕度を考慮したパラメータ ( $\mu\text{m/y}$ )	既往の研究		棄却できる範囲
			$\mu\text{m/y}$	論文数	
腐食速度 I	1以下	1	1以下	3	$10\mu\text{m/y} <$
			0.01~1	1	
			0.1以下	1	
			0.4~1	1	
腐食速度 II	0.01	0.02	0.01	3	$1 \times 10^{-4}\mu\text{m/y} >$ , $10\mu\text{m/y} <$
			0.002	2	
			0.004~0.01	1	
			0.02以下	1	
腐食速度 III	0.5	2.0	0.02	1	$1 \times 10^{-4}\mu\text{m/y} >$
			0.3	2	
			0.3~0.39	1	
			0.35	1	
			0.37~2.4	1	
			0.49	1	
1.1	1				
			2.0	1	

余裕深度処分施設では表-1 の腐食速度 II、還元性環境下で高アルカリ環境の条件の期間が最も長い。この間の腐食速度は  $0.01\mu\text{m/y}$  と表 6.2.2-7 で設定している。しかしながら、図 6.2.2-36 に示すように、腐食速度は腐食期間が長くなると低下するとされており、ある期間に対して一定の腐食速度を設定することは期間平均すれば大きい腐食速度を設定していると想定される。

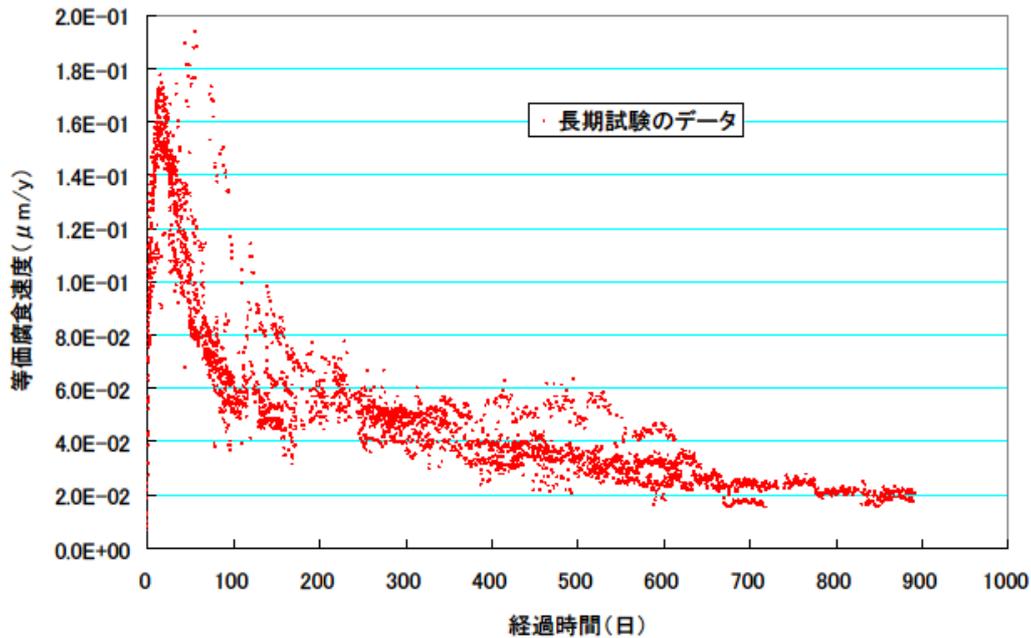


図 6.2.2-36 腐食速度の経年変化[25]

### 3) グラウト劣化現象に関する最新の研究動向

#### a. グラウト材料の種類

グラウト材料は、一般的にはセメント系グラウト等の非薬液系と薬液系に大別され、薬液系は水ガラス系、高分子系などに分類されている。このうち、高分子系注入材については、昭和49年の「薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針」（建設省）により、国内では原則的に使用禁止となっている。

地層処分の分野においては、スウェーデンやフィンランドで地下研究施設を利用したグラウト材料の研究開発が進められている。Brantberger 他[26]によると、現在の設計では、水理学的亀裂開口幅 $\geq 100\sim 150\mu\text{m}$  の大きな亀裂にはセメント系材料を使用し、それ以下の小さな亀裂には溶液型グラウト（コロイダルシリカグラウト）を使用すること、セメント系材料としては、バリア機能への悪影響を避けるため、 $\text{pH} \leq 11$  のグラウト材料（低 pH セメントグラウト）を使用することとされている。

以下では、低 pH セメントグラウトと溶液型グラウトの劣化現象に関する最新研究動向の調査結果を示す。

#### b. 低 pH セメントグラウト

地層処分の分野においては、セメント系材料から生じる高アルカリ成分が、人工バリアの緩衝材（ベントナイト）や周辺岩盤に悪影響を及ぼす可能性があるため、浸出水の pH が 11 以下の低 pH セメントが開発されている[27]。低 pH セメントグラウトとしては、NUMO（日本）・Posiva（フィンランド）・SKB（スウェーデン）による共同研究が過去に実施されており[28]、実用化に至っている。

低 pH セメントグラウトの劣化に関する研究としては、Grandia 他[29]により数値解析に

よる研究が行われている。この研究では、NUMO-電中研による1年間のセメント硬化体のブロック浸出試験(図 6.2.2-37) [27]を参考に、グラウト注入孔におけるセメントグラウトの劣化を2種類のモデル化を行い、シミュレーションにより地層処分環境における1000年後までのセメントグラウトの状態を予測している。一次元軸対象拡散モデルを図 6.2.2-38に、一次元移流拡散モデル(2亀裂)をに示す。また、解析結果を図 6.2.2-40、図 6.2.2-41に示す。1000年後においても、溶解したグラウト量は非常に小さく、一次元軸対象拡散モデルの場合は、変質範囲はわずか0.22cmであるとしている。

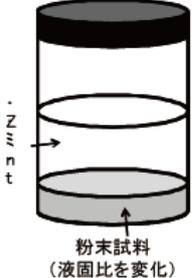
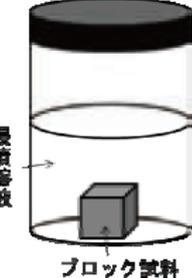
試料	①粉末試料	②薄片試料	③ブロック試料
目的	固相 - 液相間での平衡状態を把握するため	セメント成分の溶脱後の物性変化を把握するため	深さ方向へのセメント溶脱現象を把握するため
状態	 粉末試料 (液固比を変化)	 薄片試料	 ブロック試料
試料形状	108 $\mu$ mの篩を通過するまで粉砕した試料	20mm×20mm×0.3mmの試料	20mm×20mm×20mmの試料

図 6.2.2-37 ブロック試料浸漬試験方法[27]

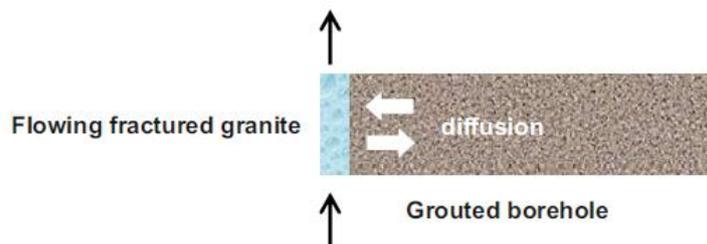


図 6.2.2-38 一次元軸対象拡散モデル[29]

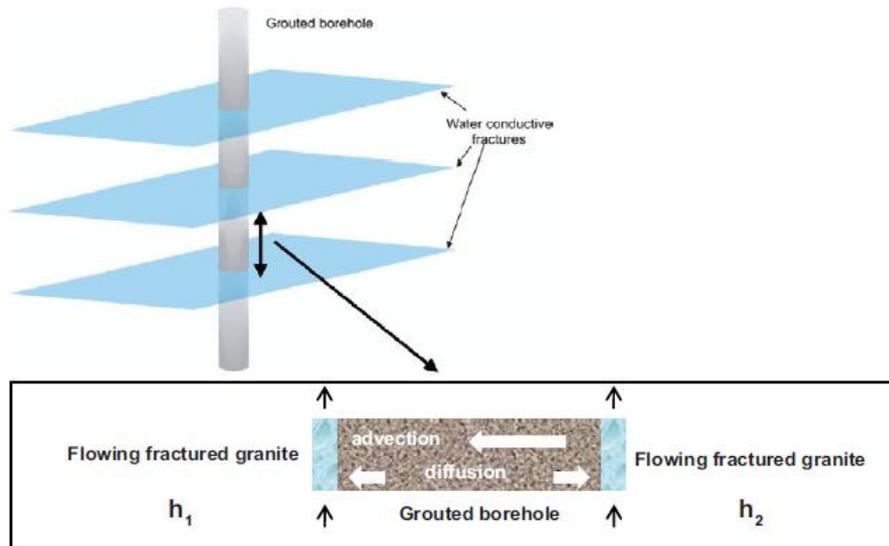


図 6.2.2-39 一次元移流拡散モデル (2 亀裂) [29]

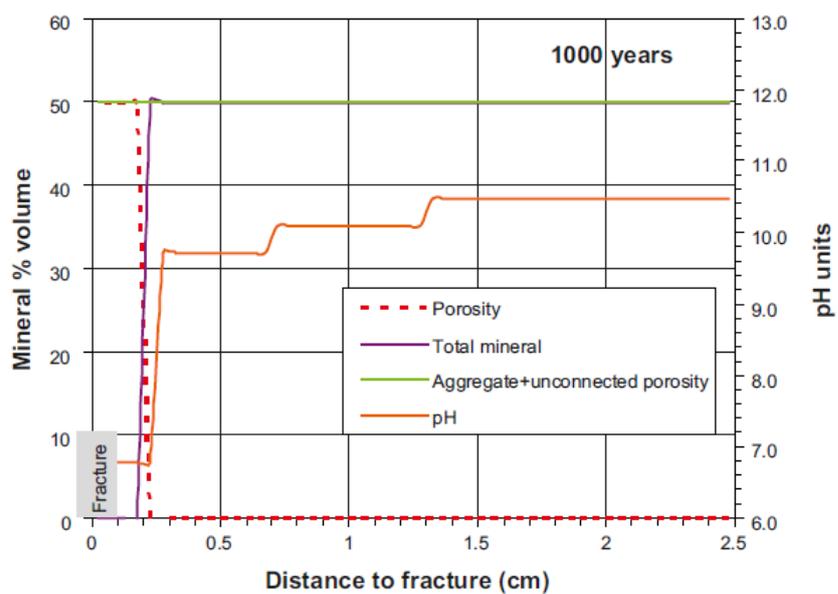


図 6.2.2-40 一次元軸対象拡散モデルによる解析結果[29]

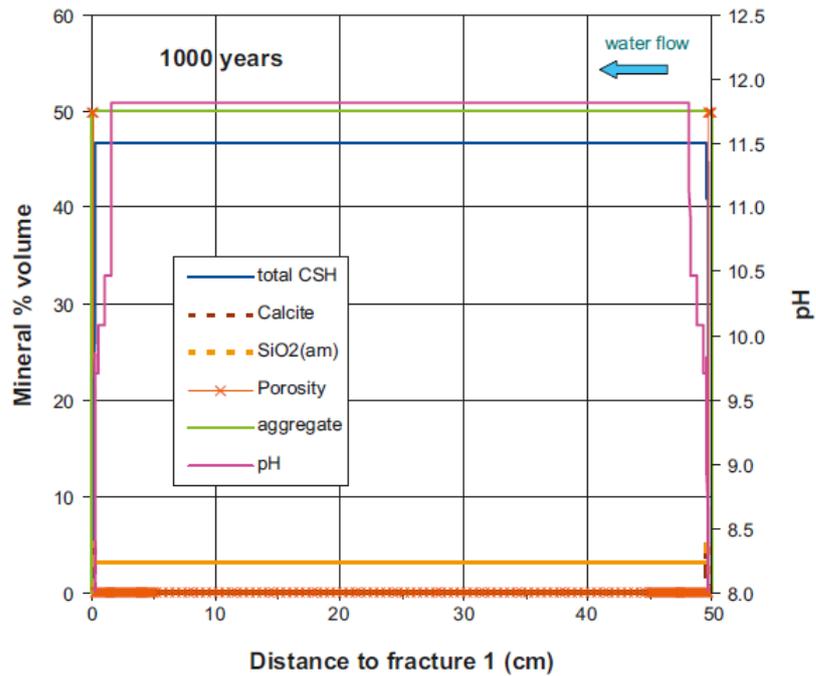


図 6.2.2-41 一次元移流拡散モデル (2 亀裂) [29]

### c. 溶液型グラウト

溶液型グラウト（コロイダルシリカグラウト）は、従来の耐久性に乏しい水ガラス系注入材料のアルカリ分を除去することで、長期耐久性に優れた注入材料として日本で実用化された材料であり、もともとは液状化対策等の砂地盤への注入を目的としている[30]。一方北欧では、溶液型グラウトは微小亀裂への浸透性に優れており、周辺地下環境への影響が小さいことから、岩盤亀裂を対象とした止水材料として、地層処分の分野を中心に研究開発が進められている[31],[32]。

溶液型グラウトの劣化現象については、砂地盤への注入を対象とした長期耐久性試験が参考になる。加賀[33]は、表 6.2.2-8 に示す、溶液型グラウトを含む 3 種類のグラウト材料について、ゲル化した注入材の物理的・化学的安定性と注入固結砂の長期強度の予測法を検討している。

表 6.2.2-8 試験に使用したグラウト材料の特性[33] (加筆)

No	Grout type	Specific gravity	SiO <sub>2</sub> /Volume of grout (g/cm <sup>3</sup> )	Gel time (min)
A20	①	1.239	0.203	10
A15	①	1.181	0.152	20
A06	①	1.072	0.960	120
CH	②	1.130	0.114	240
CSN	③	1.200	0.323	30

- ① Organic reactant grout
- ② Acid silica sol grout (non-alkaline grout)
- ③ Colloidal silica sol grout

注) ①グリオザール有機系、②酸性シリカゾル、③コロイダルシリカ系 (溶液型グラウト)

物理的・化学的安定性試験は、メスフラスコに約 160cm<sup>3</sup> の注入材を入れ、ゲル化後 300cm<sup>3</sup> の目盛りの位置まで蒸留水を満たし恒温室 (20°C) で養生し、蒸留水を 10 日経過までは毎日、その後 100 日経過までは 10~40 日間隔、それ以降は 100~300 日間隔で取り替え、ホモゲルの堆積変化を求めるとともに、JIS K 0101-1979 モリブデン酸策法で溶脱シリカ量が測定したものである。試験結果を図 6.2.2-42、図 6.2.2-43 に示す。これらの図より、溶液型グラウトは少なくとも温度一定の養生条件であれば約 4500 日間 (12 年) は体積変化がなく強度は劣化しない、ゲルの解重合はなく化学的に安定しているとしている。

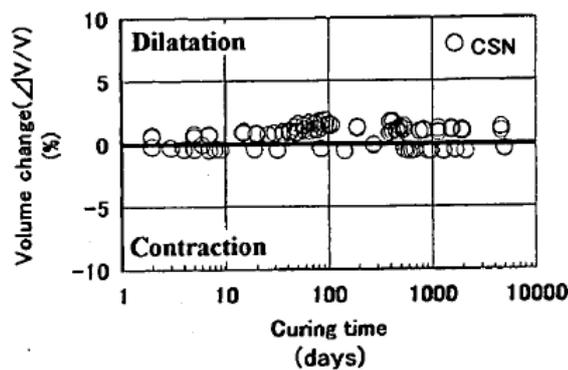


図 6.2.2-42 溶液型グラウトの体積変化[33]

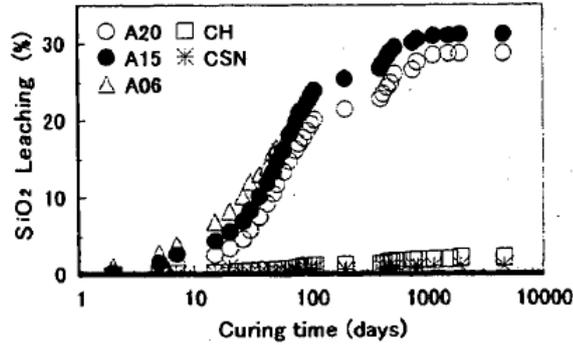


図 6.2.2-43 溶脱シリカ量の測定結果[33]

長期強度については、養生温度を 40℃、55℃、70℃に上げた促進養生を行い、室温 20℃の標準養生強度と比較することにより、長期強度を予測している。試験結果を図 6.2.2-44に示す。なお、各グラフ内の曲線は、測定期間の最も長い 55℃養生の近似曲線である。この図より、標準養生強度と促進養生強度の経時変化は相似しており、重ね合わせが可能であることがわかったとともに、95年（35,000日）までは、強度増加が継続することが予測できたとしている。

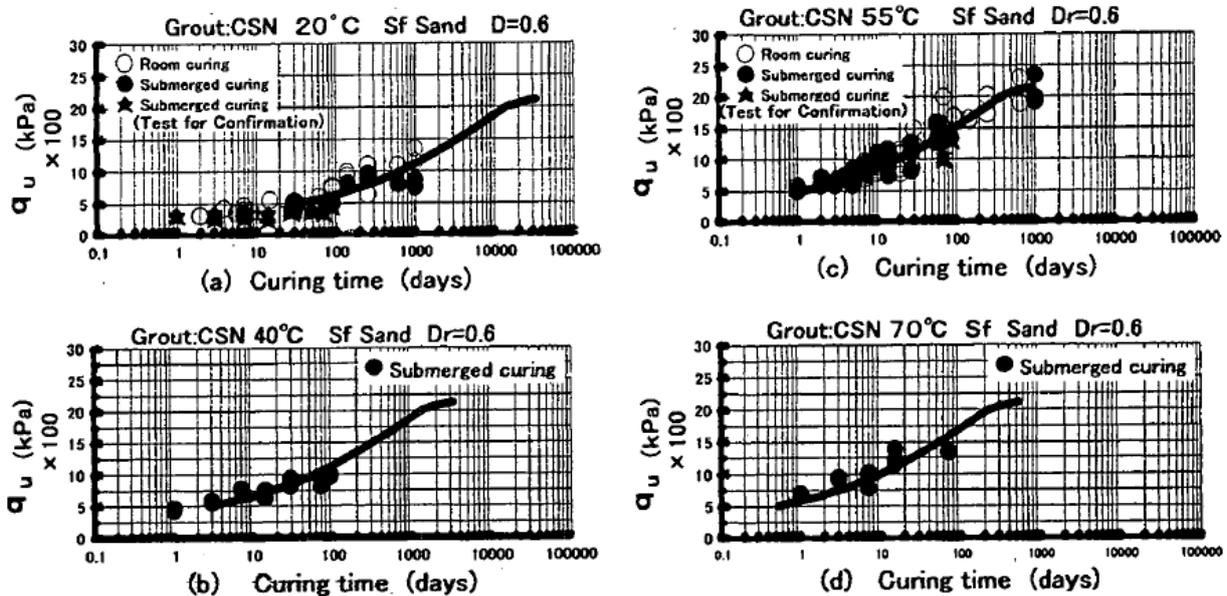


図 6.2.2-44 溶液型グラウトの溶脱シリカ量の測定結果[33]

溶液型グラウトの岩盤注入を対象とした長期安定性試験としては、倉敷 LPG 貯槽建設工事における、現場条件を反映した長期安定性確認試験が参考になる[34]、[35]。倉敷基地では、セメントグラウトによる透水性改良効率が極めて低いマイクロフラクチャ発達部に対して、倉敷基地における長期止水材料としての適用性を確認したうえで補助的に溶液型グラウトが採用し改良目標が達成されている。

ホモゲル長期力学的安定性確認試験では、現地湧水やイオン交換水にて、標準温度 20℃

と促進養生温度 55℃の 2 条件でホモゲルを養生し、一軸圧縮試験が実施されている。試験結果を図 6.2.2-45 に示す。この図より、一軸圧縮強度は、イオン交換水に比べて現地湧水で養生した場合の方が小さいが、現地湧水の場合においても 50 年相当の養生期間において一軸圧縮強度は増加し続けているとしている。

記号	養生水	養生温度
I-N	I	20℃
I-H		55℃
S-N	S	20℃
S-H		55℃

記号	種類	pH
I	イオン交換水	6.66
S	現地湧水	6.29

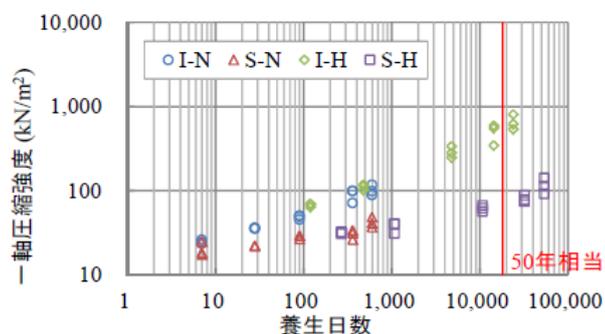


図 6.2.2-45 ホモゲル長期力学的安定性確認試験[34]

ホモゲル長期化学的安定性確認試験では、現地湧水にて養生したホモゲルからのシリカ溶脱量の経時変化を測定するため、2 種類の試験（試験 1：養生水の置換を行わない条件で、養生水中の全シリカ濃度、溶解性シリカ濃度が増加しないことを確認する、試験 2：養生水を繰り返し置換する条件で、養生水中の全シリカ濃度、溶解性シリカ濃度の溶解速度が増加しないことを確認する）が実施されている。試験結果を図 6.2.2-46、図 6.2.2-47 に示す。これらの図より、試験 1 では全シリカ、溶解性シリカ濃度ともに増加していないこと、試験 2 では全シリカ、溶解性シリカともに溶解速度（図中の濃度増分の勾配）が増加していないことがわかり、溶液型グラウトの硬化体は化学的に安定しているものとしている。

記号	養生水	養生温度	実施試験
I-N	I	20℃	試験 1
I-P		20℃*	試験 1
S-N	S	20℃	試験 1, 2
S-P		20℃*	試験 1, 2

\*養生温度は20℃であるが、長期浸漬前に55℃で120日事前養生

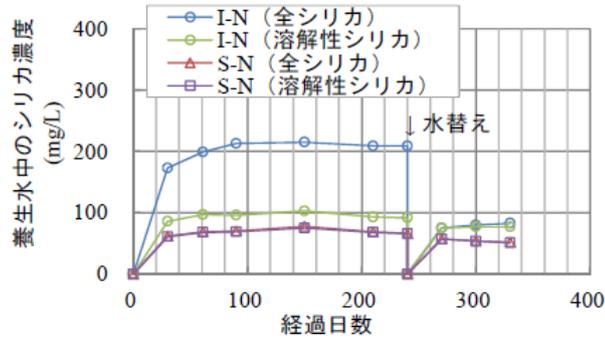


図 6.2.2-46 ホモゲル長期化学的安定性確認試験（試験 1） [34]

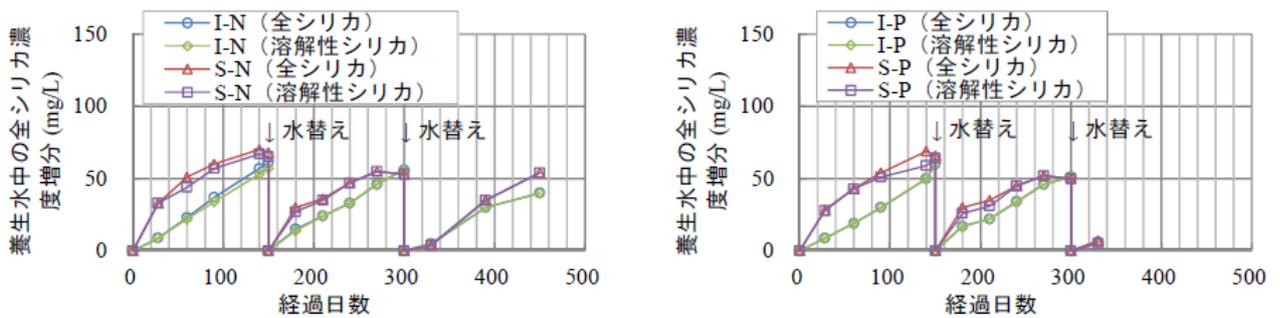


図 6.2.2-47 ホモゲル長期化学的安定性確認試験（試験 2） [34]

長期止水効果確認試験では、図 6.2.2-48 に示す試験装置により、原位置より採取した改良体岩石ブロック（試験体 1：採取のまま、試験体 2：溶液型グラウトを追加注入）を使用して、一定の動水勾配で約 1 ヶ月間載荷した状態での試験と、3 段階の動水勾配を載荷した試験の両試験が交互に実施されている。試験結果を図 6.2.2-49 に示す。この図より、初期段階からの有意な透水量の増加がないことを約 1400 日間確認されたとしている。

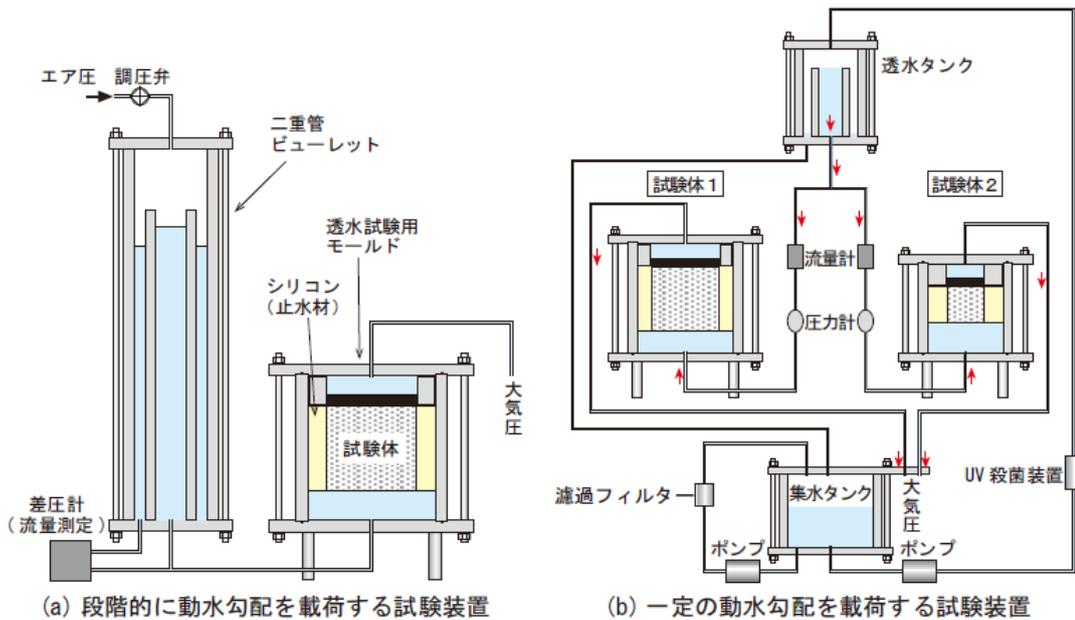


図 6.2.2-48 長期止水効果確認試験装置[34]

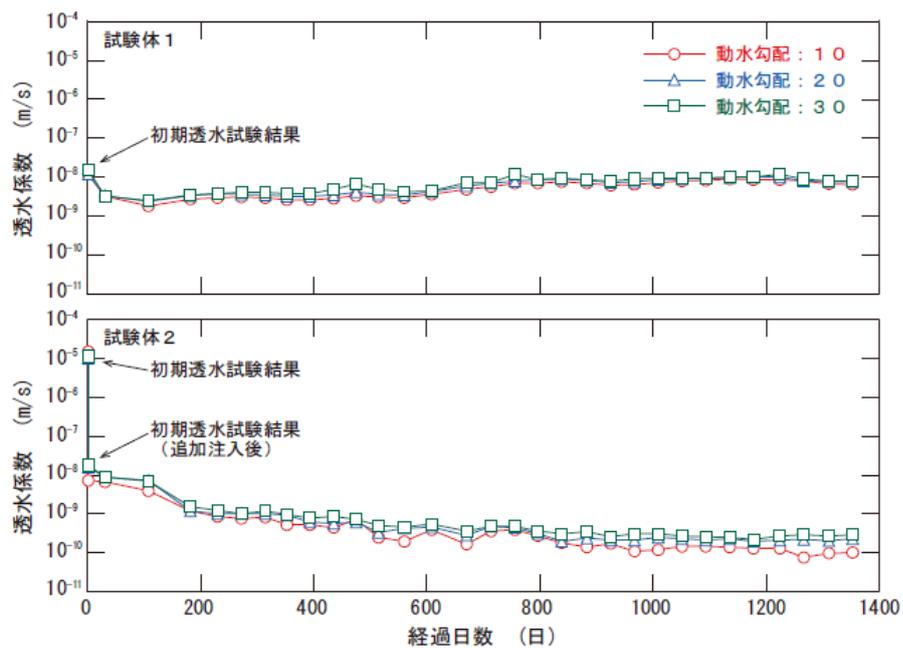


図 6.2.2-49 長期止水効果確認試験結果[34]

#### 4) 緩衝材の劣化現象に関する最新の研究動向

緩衝材の劣化現象については、国による基盤研究である地層処分技術調査等事業の一部である「(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) 人工バリア品質評価技術開発」、「(TRU 廃棄物処分技術：人工バリア長期挙動評価技術開発) 人工バリア長期挙動の評価」等において研究が実施されている。以下に概要を示す。

## a. 緩衝材とセメントとの相互作用

### (a) Ca 型化

緩衝材中の粘土成分であるベントナイトでは、セメント系材料から地下水に溶け出した Ca イオンとスメクタイト層間の Na イオンが置き換わるイオン型の変化として Ca 型化が発生する。OPC セメント硬化体と低 pH セメントであるフライアッシュセメントとベントナイトを接触させた試験を実施し、変質量を確認している[12]。試験の結果を図 6.2.2-50 に示す。検討結果としては、低 pH セメントにおいて Ca 型化の傾向が小さいことが試験データとして得られている。

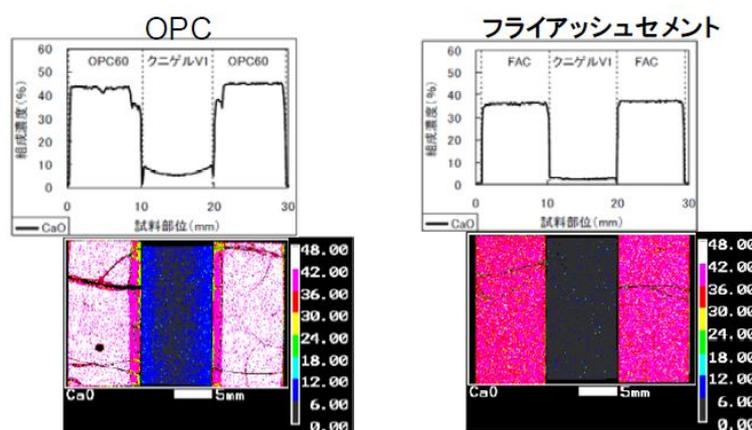


図 6.2.2-50 緩衝材とセメントの相互作用検討例[12]

### (b) 粘度鉱物の溶解および二次鉱物の沈殿

セメント材料共存系において高 pH のセメント通過水が緩衝材に到達し、緩衝材のスメクタイトが溶解し、二次鉱物が沈殿することが確認されている。しかしながら、スメクタイトの変質には pH と温度依存性が認められており、pH11 で温度が 100°C以下の条件では、スメクタイト溶解速度も遅いと報告がされており、2年間までの試験において二次鉱物の生成が認められている[5]。

### (c) セメンテーション

スメクタイトあるいは随伴鉱物の溶解に伴い、アモルファスシリカ等の二次鉱物の沈殿（セメンテーション）が起きる。天然のベントナイト鉱床やストリパ鉱山での原位置試験および室内試験等において顕微鏡レベルでのセメンテーションが観察されているが、これらの条件は 100°Cを超える温度を経験したベントナイトであり、100°Cを超えない条件ではセメンテーションの影響はないと考えられている[5]。

## b. 緩衝材と炭素鋼腐食生成物との相互作用

### (a) Fe 型化

Ca 型化と同様にイオン型の変化となり、炭素鋼オーバーパック腐食などにより生じる Fe イオンと置き換わる Fe 型化が考えられる。炭素鋼の腐食生成物との腐食を模擬した試験と

して、ベントナイトに鉄粉を混ぜた系で実施し変質の状況を観察している。試験の結果を表 6.2.2-9 に示す[12]。

表 6.2.2-9 緩衝材と炭素鋼腐食生成物の相互作用検討例 (Fe 型化) [12]

試験期間	試験温度 (°C)	鉄粉/ベントナイト重量比			
		0.1	0.2	0.5	1.0
45 日 程度	80				○
	100				○
	120		○	○	○
	150	○	○	○	×
90 日 程度	80				○
	100				○
	120		○	○	○
	150	○	○	○	×

○ : 変化が認められない条件 × : 変化が認められた条件

#### c. イライト化

緩衝材の粘土成分のス멕タイトにおいては、埋没続成作用や熱水変質作用によるイライト化が発生することが知られている。ただし、イライト化については、ナチュラルアナログ研究において 100°C を超える条件で 100 万年以上ス멕タイトが安定に存在していた例があり、またス멕タイトのイライト化に関する反応速度式を用いたイライト化率の時間変化の計算により、100°C を超える期間が数十年で最高温度が 130°C 程度になる場合であっても著しいイライト化は生じないことが報告されている。

#### d. 緩衝材の流出

緩衝材の流出現象については、試験によって、湧水の状態によってはエロージョンやパイピング現象が発生する結果が得られており、今後の坑道の止水、緩衝材の施工、維持管理に関する重要な課題として検討されているところである。

#### 5) オーバーパックの劣化現象に関する最新の研究動向

オーバーパックの劣化現象としては、腐食および放射線による劣化が考えられる。

炭素鋼の腐食については、関係研究機関により研究が実施され、その定量的な評価が実施されているところである。また、酸化性環境における定量的評価については、一般の地表や地中の構造物における膨大なデータが存在する。しかし、処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合の検討においては、処分環境の温度、間隙水組成などの条件を整理し、モデルによる評価が必要である。

#### 6) その他の設備の劣化現象について

現時点における検討の視点から考えられる処分場の安全性に影響を及ぼす構成要素とし

て、防水工、排水工、排水設備、水処理設備、ガス検知設備、換気・空調設備が挙げられる。これらはさまざまな材料で構成された複合部材であるため、設備単位での経時的な変状、すなわち劣化による機能不全などについてまとめをおこなった。

#### a. 防水工

防水工として設置される防水シートや裏面排水材、排水パイプなどは、坑道の覆工の背面に作用する水圧を最小化し、覆工の損傷を防ぐことを目的としている（図 6.2.2-51）。処分坑道が埋め戻された後は、坑道内にも地下水が侵入し覆工内面にも水圧が作用することから、覆工前後で水圧はバランスし、覆工に損傷は発生しないと推測される。一方、回収維持期間においては、覆工の背面の水圧はできるだけ小さく保持し続け、覆工の損傷を最低限に抑える必要がある。時間の経過とともに防水工に目詰まりなどによる透水性の低下が生じた場合には、覆工背面の水圧が上昇し、覆工の損傷や、き裂からの地下水の侵入が発生する可能性がある。

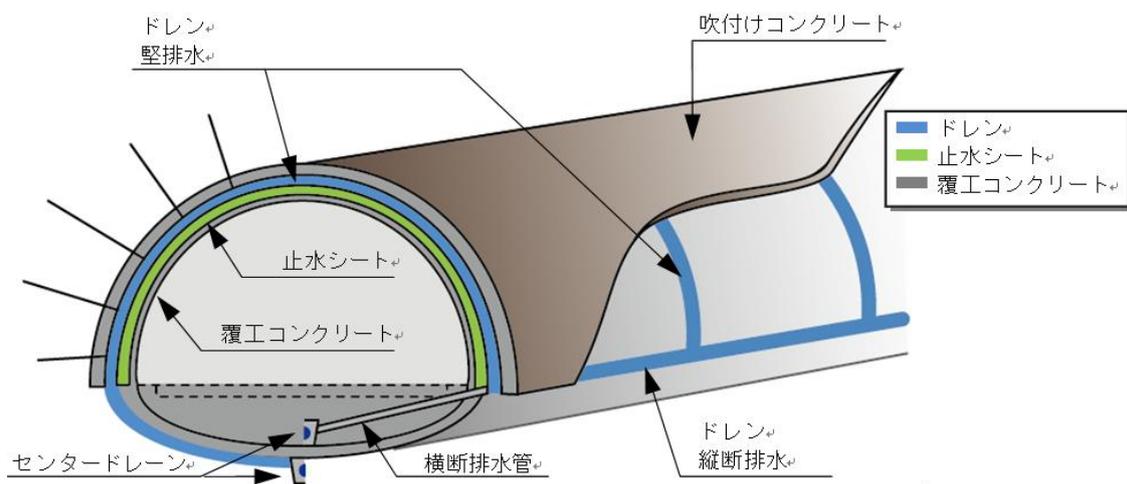


図 6.2.2-51 覆工裏面排水の概念

#### b. 排水工

坑道周辺の岩盤の透水性が高く、湧水が坑道内での作業を困難とする場合には、湧水量を減少させるためにグラウトなどの注入と併せて、水抜きボーリングが施工される（図 6.2.2-52 [36]）。また、排水坑道を設けてここから水抜きボーリングを実施し、水圧を下げることで地下水を排水坑道に導き、処分坑道への湧水を抑制することも考えられる。この場合でも、時間の経過によって水抜きボーリング孔の目詰まりが発生する可能性があり、処分坑道への湧水が増加することとなる。

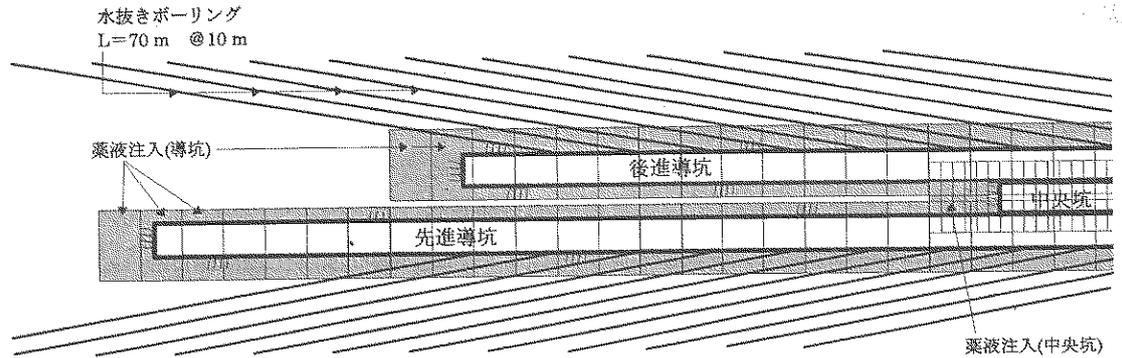


図 6.2.2-52 湧水対策工の一例[36]

c. 排水設備

坑道内への湧水は、立坑に導かれてポンプにより坑外へ排出される。このポンプが停電や機能不全により停止する、あるいはポンプの容量を超えた湧水が発生する場合には、坑道内の水位が上昇し、最終的には水没する可能性がある。

d. 水処理設備

処分坑道では、回収維持期間において長期にわたって酸素が供給されるために、岩盤の種類によっては硫酸が発生する可能性がある。また、コンクリートからの成分溶脱により、岩盤はアルカリ環境となるため、岩盤によっては重金属が発生する。これらは、湧水とともに郊外へ排出され、濃度に応じて処理された後に廃棄される。この水処理設備が、長期間の運転により機能不全となった場合には、施設内に汚染水が蓄積され操業が困難となる。

e. 設備換気・空調設備、ガス検知設備

坑道周囲の岩盤温度が高い場合や、廃棄体からの発熱により坑道内の温度が上昇する場合には、坑道内は換気・空調設備によって操業可能な温度にコントロールされる必要がある。これらが、停電や機能不全によって停止した場合には、高温による緩衝材への影響や、水蒸気や結露により坑道内の電気設備に悪影響を及ぼす可能性がある。

また、坑道からの湧水には、メタンガスなどの可燃性のガスが含まれている場合がある。また、回収維持期間においては長期にわたって空気中の微生物が供給され、メタン発酵菌などの作用によりメタンガスが発生する可能性もある。これらが爆発限界を超えないように、十分な換気により希釈を行う必要があるが、停電や機能不全により換気・空調設備が停止すると、ガス爆発が発生する可能性があるので留意する必要がある。ガス検知設備(図 6.2.2-53)についても、腐食や劣化などにより機能不全を生じた場合には、ガス爆発の予測ができなくなる。

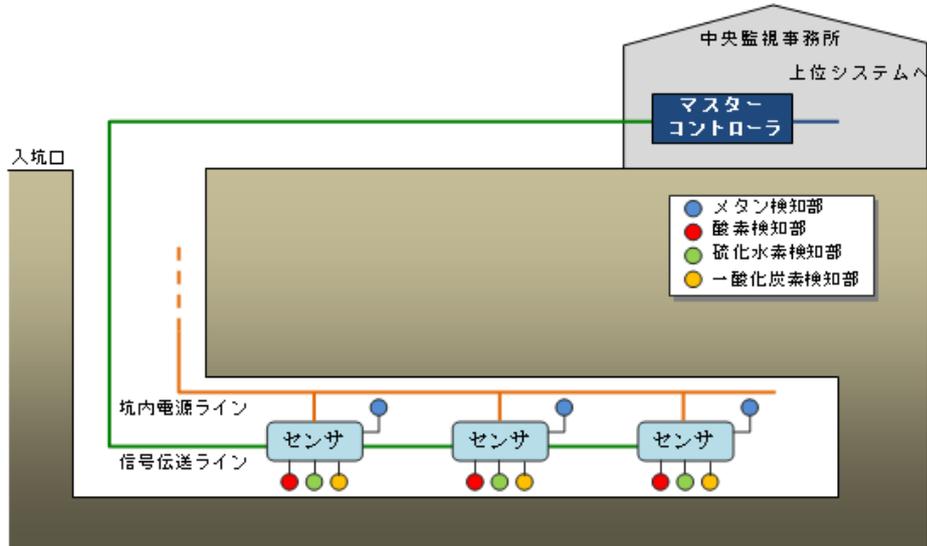


図 6.2.2-53 ガス検知システム概念

#### 7) 構成要素の変状と発生時期の整理

坑道の構成要素に関する使用材料単位での最新の知見では、それぞれの材料の変状とその発生時期については研究が進められているものの、これらは坑道周辺の地質環境の力学的、水理学的、化学的、熱的影響に大きく左右されると考えられるため、現段階で定量的に評価することは難しいといえる。例えば、セメントや鋼材を構成材料とする支保や覆工などの構成要素については、それぞれの材料自体の劣化だけでなく、周辺岩盤の時間依存性挙動が生じることにより岩盤の応力状態の変化の影響を受け、岩盤と同様に時間依存性に関する長期挙動が生じることが予想される。つまり支保や覆工もある応力下において埋め戻し以前、埋め戻し以後ともに時間とともにクリープや応力緩和といった力学的な影響を受ける可能性がある。他の水理学的、化学的、熱的影響についても同様であり、坑道の構成要素は周辺岩盤における時間依存性の変化との相互影響により変状が発生する可能性がある。すなわち、坑道の構成要素の変状は坑道周辺の地質環境に大きく依存するといえよう。

人工バリアに関する使用材料については、オーバーパックとPEM容器材料である炭素鋼材料についてはこれまで蓄積された知見やデータが豊富であるが、緩衝材の劣化については現在研究が進められており新たな知見が得られている段階である。炭素鋼材料については、ある程度の定量的な評価は可能と考えられるが、逆にどのような腐食環境に置かれるのかの評価（設定）が重要となる。緩衝材についてもデータが得られ定量的な評価が行われているが同様に環境の設定が重要である。現段階では、定性的な評価となるが発生し得る変状に対して大きな区分けでの発生時期について示す。

表 6.2.2-10 に概略評価した使用材料の変状と発生時期の検討結果を示す。

表 6.2.2-10 使用材料の変状と発生時期

構成要素			対象材料	変状	変状の発生時期			備考	
					処分場建設時	埋め戻し以前	埋め戻し以降		
周辺岩盤と補助部材	支保	吹付けコンクリート		コンクリート	変形	○	○	○	座金の変形, 腐食, 消失
					ひび割れ	○	○	○	
					圧ざ	△	○	○	
					変質		△	○	
					劣化	△	○	○	
					断面欠損		△	○	
		消失		△	○				
		ロックボルト	鋼棒	鋼材	変形	○	○	○	
					腐食	△	○	○	
			断面欠損		△	○	○		
	消失				△	○			
	充填剤	モルタル	クラック	○	○	○			
			変質	△	○	○			
	消失		△	○					
	金鋼		鋼材	—				腐食、破断	
	路盤	路盤コンクリート		コンクリート	変形	○	○	○	
					クラック	○	○	○	
					変質		○	○	
					劣化	△	○	○	
	防水工	防水シート			—				
裏面排水材			—						
排水パイプ		横断, 縦断	鋼材	—					
湧水対策工	グラウト工	グラウト材	セメント系	変質	△	○	○	溶脱, 溶解	
		消失		○	○				
	水抜き工	水抜きパイプ	鋼材	—					
(弱層部の) 補助工法				—					
人工バリア	オーバーバック		鋼材	腐食		○	○	間隙水・空気	
	緩衝材			ベントナイト	放射線		○	○	スメクタイト
					膨潤、変形		○	○	スメクタイト
					変質、劣化		△	○	
					流出		△	○	
	PEM容器		鋼材	腐食		○	○		
		変形・破損			△	○			
その他	坑道の環境	大気との接触状態	大気の組成 (CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , …)	変動	○	○			
		湧水の排水状態		変動・滞留	○	○			

(6) ニアフィールド状態の経時変化の概念検討（ストーリーボードの作成）

前項までの検討を整理し、特に埋め戻し時期を意識してニアフィールドの概な状態変化を取りまとめる。埋め戻しまでの安全性確保だけではなく、埋め戻し以降の閉鎖後長期の安全確保に対する影響についても検討を加えることで、処分施設としての安全性（操業安全性および閉鎖後長期安全性）への影響とその原因や状態を総括的に整理する効果が期待される。

処分施設の安全性に影響する特性の変化について、所々の現象や発生原因と時期及びそれらの関係などの情報を詳細化しておくことにより、次項の検討（埋め戻し時期の違いによる影響の抽出）結果に対し、網羅性と着実性の担保が可能になるものになると考えられる。

(1)～(5)までの検討結果を基に縦置き・緩衝材ブロック方式における定置前と閉鎖後直後の状態の変化の縦置き定置における概念を図 6.2.2-54 に、横置き定置における概念を図 6.2.2-55 に示す。

さらに、「周辺岩盤」および「人工バリア」のそれぞれについて、期間と影響で整理したストーリーボードを検討した。作成した縦置き定置におけるストーリーボードを表 6.2.2-11、表 6.2.2-12 に、横置き定置におけるストーリーボードを表 6.2.2-13、表 6.2.2-14 に示す。

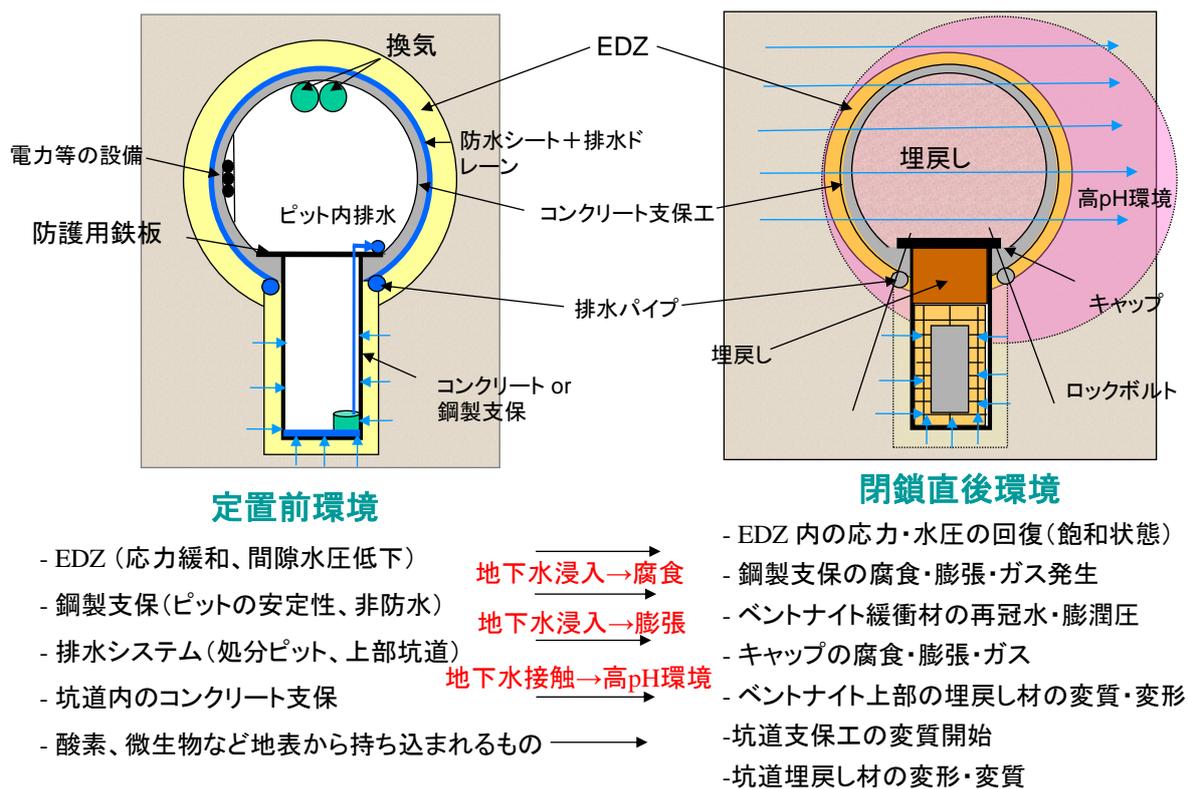
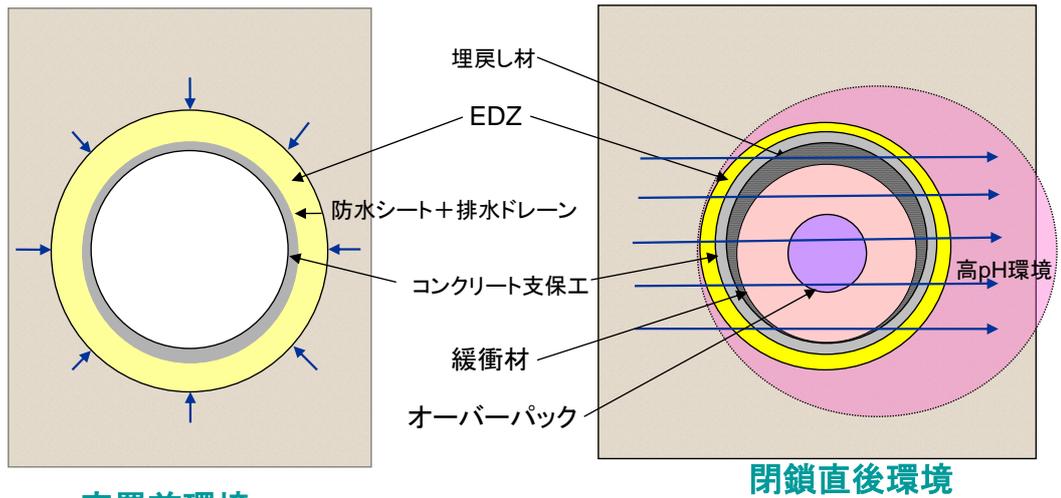


図 6.2.2-54 定置前状態と閉鎖後直後の状態（縦置き定置）



- 定置前環境**
- EDZ (応力緩和、間隙水圧低下)
  - 鋼製支保 (ピットの安定性、非防水)
  - 排水システム (処分ピット、上部坑道)
  - 坑道内のコンクリート支保
  - 酸素、微生物など地表から持ち込まれるもの
- 地下水浸入 → 腐食
- 地下水浸入 → 膨張
- 地下水接触 → 高pH環境
- 閉鎖直後環境**
- EDZ 内の応力・水圧の回復 (飽和状態)
  - 鋼製支保の腐食・膨張・ガス発生
  - ベントナイト緩衝材の浸潤・膨潤圧
  - ベントナイト緩衝材の変質・変形
  - オーバーパックの腐食・膨張・ガス発生
  - 坑道支保工の変質開始
  - 坑道埋戻し材の変形・変質

図 6.2.2-55 定置前状態と閉鎖後直後の状態 (横置き定置)

表 6.2.2-11 ニアフィールド状態の経時変化（周辺岩盤）

初期状態	掘削後	支保設置	覆工設置	人バリ構築	埋め戻しが無い期間	埋め戻し
	空洞の発生 EDZの発生 湧水の発生	セメント材・鋼材持込 排水設備の持込 換気設備の持込 イワ設備の持込	セメント材・鋼材の持込	人工バリア材の持込	埋め戻しが無い期間	埋め戻し材の持込
温度影響	換気による坑内温度の制御	坑内温度低下		オーバーパックの発熱	坑内温度上昇	
水理的影響	排水に伴う掘削影響領域（EDZ）での不飽和層の増大	不飽和層の変化			防水シートの目詰まりによる不飽和層の変化	再冠水によるEDZの不飽和層の減少 間隙水圧の回復
力学的影響	掘削による応力開放	剛性の低下			耐力の低下	
化学的影響	地上から空気持込	酸化環境				還元環境への移行
		セメント材の劣化（溶出）	高アルカリ環境			ガス発生
		鋼材の劣化				

表 6.2.2-12 ニアフィールド状態の経時変化（人工バリア）

初期状態	掘削後	支保設置	覆工設置	人バリ構築	埋め戻しが無い期間	埋め戻し
	空洞の発生 EDZの発生 湧水の発生	セメント材・鋼材持込 排水設備の持込 換気設備の持込 イワ設備の持込	セメント材・鋼材の持込	人工バリア材の持込	埋め戻しが無い期間	埋め戻し材の持込
放射線場					放射線分解、放射化 放射線	
熱的影響				ガラス固化体の発熱	緩衝材の劣化	人工バリア温度上昇
力学的影響				炭素鋼の腐食、緩衝材の浸潤	人工バリアの体積変化	容器剛性低下、腐食膨張
水理学的影響				緩衝材の浸潤	緩衝材の膨潤、流出	緩衝材の膨潤、流出
化学的影響				緩衝材とセメント材、緩衝材と腐食生成物との相互作用	緩衝材の変質	緩衝材の劣化
				オーバーパック腐食	オーバーパックの減肉	オーバーパックの劣化
						還元環境への移行

表 6.2.2-13 ニアフィールド状態の経時変化（周辺岩盤、横置き）

初期状態	掘削後	支保・覆工 設置	人バリ構築	埋め戻しが 無い期間	埋め戻し
	 空洞の発生 EDZの発生 湧水の発生	 セメント材・鋼材の 持込	 人工バリア材の持込	 埋め戻しが 無い期間	 埋め戻し材の持込
温度影響	換気による坑内温度の 制御	坑内温度低下	オーバ-バック の発熱	坑内温度上昇 定置後約10年で最高温度	
水理的影響	排水に伴う掘削影響領 域（EDZ）での不飽 和層の増大	不飽和層の変化			再冠水によるEDZの 不飽和層の減少 間隙水圧の回復
力学的影響	掘削による応力開放	剛性の低下			耐力の低下
化学的影響	地上から空気持込	酸化環境			還元環境への移行
		セメント材の劣化 （溶出）	高アルカリ環境		ガス発生
		鋼材の劣化			

表 6.2.2-14 ニアフィールド状態の経時変化（人工バリア、横置き）

初期状態	掘削後	支保・覆工 設置	人バリ構築	埋め戻しが 無い期間	埋め戻し
	 空洞の発生 EDZの発生 湧水の発生	 セメント材・鋼材の 持込	 人工バリア材の持込	 埋め戻しが 無い期間	 埋め戻し材の持込
放射線場				放射線分解、放射化 放射線	
熱的影響			ガラス固化体の発熱	緩衝材の劣化 人工バリア温度上昇 定置後約10年で最高温度	
力学的影響			炭素鋼の腐食、 緩衝材の浸潤	人工バリアの体積変化 容器剛性低下、腐食膨張	
水理学的影響			緩衝材の浸潤	緩衝材の膨潤、流出 緩衝材の膨潤、流出	
化学的影響			緩衝材とセメント材、 緩衝材と腐食生成物 との相互作用	緩衝材の変質 緩衝材の劣化	
			オーバーパック腐食	オーバーパックの減肉 オーバーパックの劣化	還元環境への移行

## (7) ニアフィールドに発生する諸現象とその要因の抽出と整理

前述したストーリーボードを利用し、処分施設の安全性に影響を及ぼす周辺岩盤や人工バリアを含めたニアフィールドの特性の変化と変化が生じる原因について、考慮すべき時期を含めて評価を加えた。処分施設の安全性に影響する特性の変化について、所々の現象や発生原因と時期及びそれらの関係などの情報を詳細化しておくことにより、次項の検討（埋め戻し時期の違いによる影響の抽出）結果に対し、網羅性と着実性の担保を可能とする。

### 1) 周辺岩盤の特性の変化と変化が生じる原因の抽出と整理

#### a. 力学的影響

前項までの検討で周辺岩盤の力学的特性として、初期地圧、掘削による坑道周辺の応力分布、強度特性（一軸圧縮強度、せん断強度、内部摩擦角）、変形特性（弾性係数、ポアソン比）を抽出した。これらの周辺岩盤の力学的な特性の変化の要因としては、

- ①空洞の掘削による形状の変化および EDZ (Excavation Disturbed Zone) の発生
- ②岩盤の時間依存性挙動（クリープ、応力緩和）
- ③地震による応力状態の変化

が挙げられる。

この応力再配分に関して、神流川地下発電所では発電所本体掘削時の AE 測定結果を基に知見を述べている。図 6.2.2-56 に示すように、神流川地下発電所では周辺坑から発電所本体に向けて掘削したボーリング孔内に AE センサーを設置し、発電所のベンチ掘削ごとの AE 発生数を整理している。図 6.2.2-57 に測定結果を示す。AE は設置レベルである 4 ベンチより上部の 2、3 ベンチ掘削時から発生しており、4、5 ベンチ掘削時には AE 発生数が増加しより空洞壁面深部まで発生範囲が拡大している。6、7 ベンチ掘削時には 4、5 ベンチ掘削時と同等数の AE が発生しており、そのピークは空洞壁面深部に移動していることが分かる。8、9 ベンチ掘削時には AE の発生は沈静化している。以上より、掘削の進捗に伴い、AE 発生数のピークは壁面近傍の浅部から徐々に深部に移行しており、この挙動は掘削による空洞周辺岩盤の応力再配分であると考えられるとしている。

また発破振動の影響で周辺岩盤に微視亀裂が発生、既存亀裂が進展し、力学的な特性（強度特性、変形特性等）が低下することが考えられる。

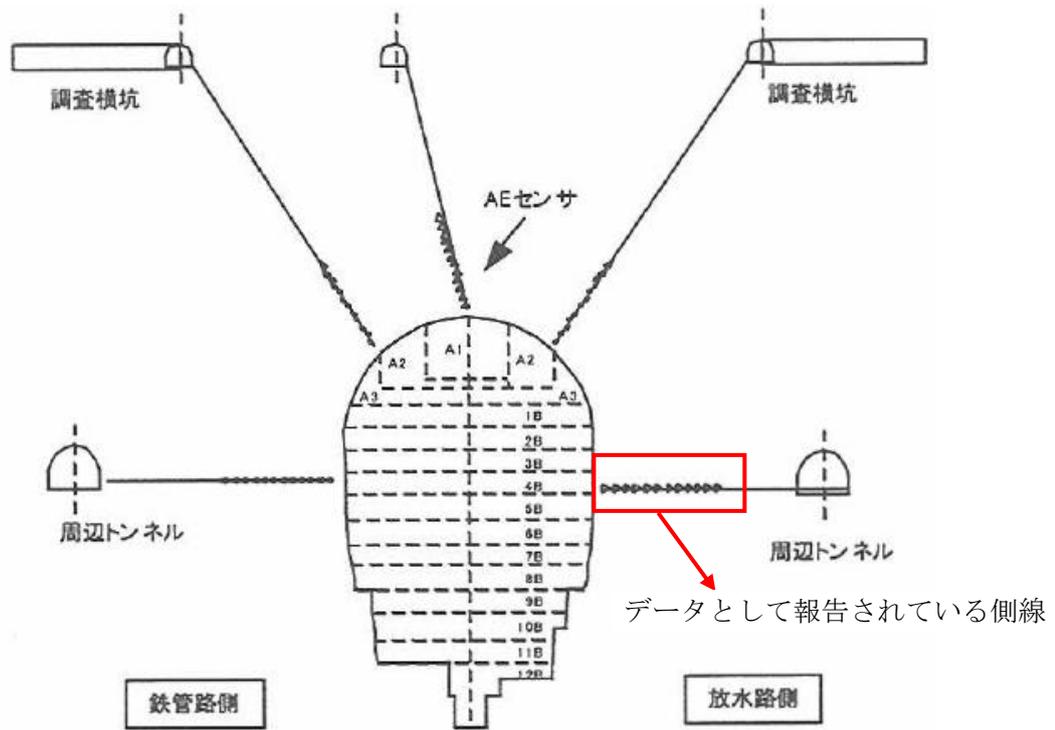


図 6.2.2-56 空洞断面図と AE 計測側線

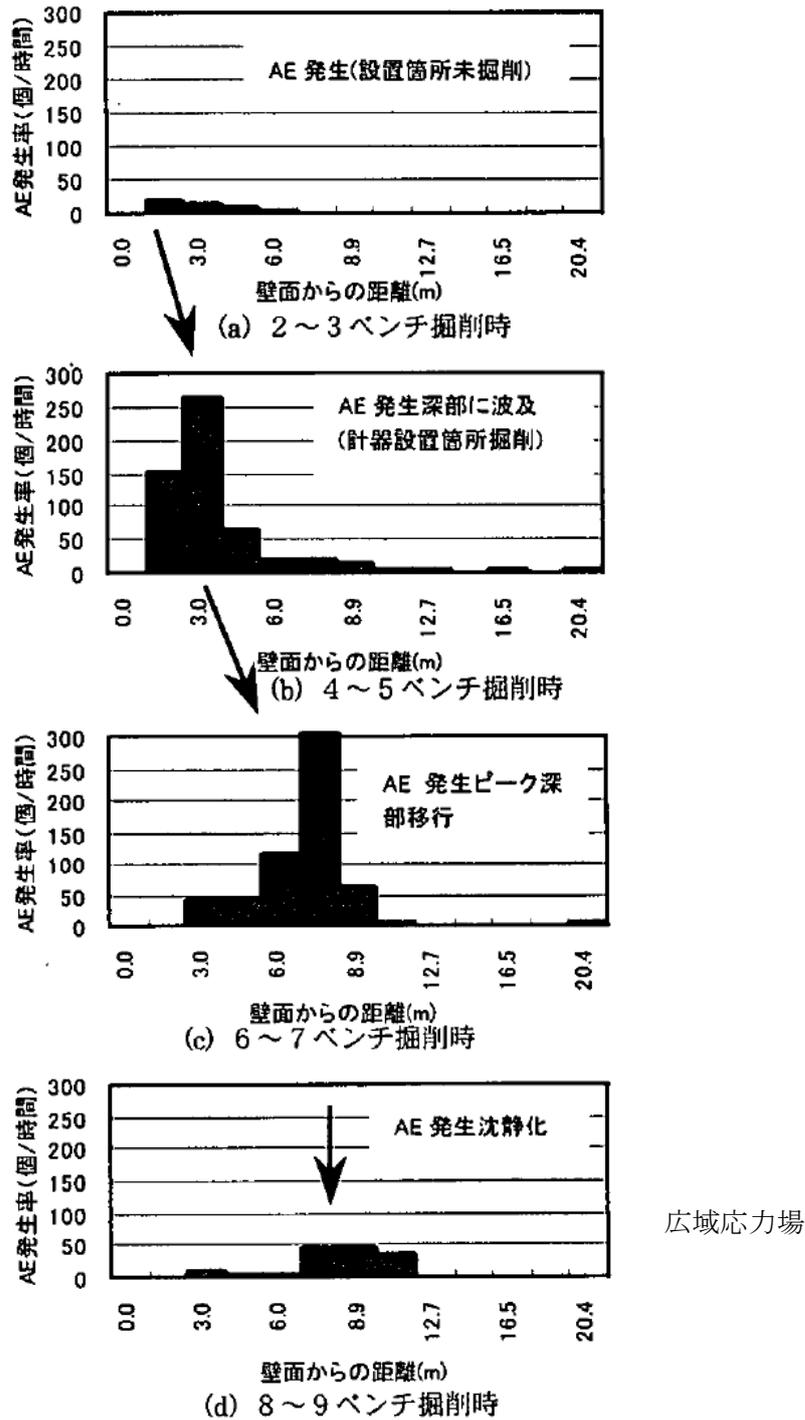


図 6.2.2-57 AE 測定結果 (放水路側周辺トンネル)

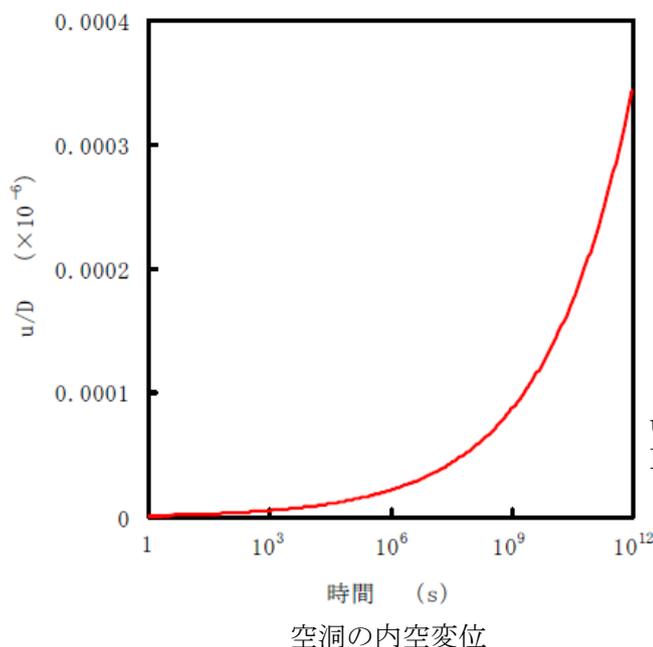
②については岩石が有する粘性的な挙動である。現象自体は時間に依存するので時間の経過とともに進行する。ただし、岩盤の特性や応力場等の条件によってはほとんど挙動が進行しない場合もある。これらは長期的（百年以上）な観点における岩盤の挙動を対象としているので観察的、計測的な研究はほぼ不可能であり、現状では解析モデルによるシミュレーションによる研究のみである。前述したコンプライアンス可変型構成方程式により岐

岐阜瑞浪市で観察される黒雲母花崗岩（土岐花崗岩）を対象とし、約 3 万年程度の岩盤の挙動を解析した結果[14]を図 6.2.2-58 に示す。図に示すように、解析条件（岩盤の時間依存性に関するパラメータ、および初期応力状態）によってはほとんどひずみが進行しない可能性もある。現象の進行によって岩盤は損傷を受け場合によっては塑性化することもあり、力学特性の低下が考えられる。

計算条件	基本
一軸圧縮強度 $\sigma_c$ (MPa)	150
一軸引張強度 $\sigma_t$ (MPa)	7.5
(脆性度 $\sigma_c / \sigma_t$ )	(20)
ヤング率 E (GPa)	50
初期ポアソン比 $\nu_0$	0.3
n	52
$a_1$	$7.0 \times 10^{-8}$
$m_1$	4
$a_3$	$3.0 \times 10^{-4}$
m	60
水平地圧 $\sigma_h$ (MPa)	25
鉛直地圧 $\sigma_v$ (MPa)	25

コンプライアンス可変型構成方程式で使用するパラメータ

岩石の密度を  $2.5\text{g/cm}^3$  とした時の  
深度 1000m に相当する土被り圧



上記計算条件のもとでは  
時間依存性挙動によるひずみは  
約 3 万年でわずか約 4/10000  
マイクロしか挙動しない。

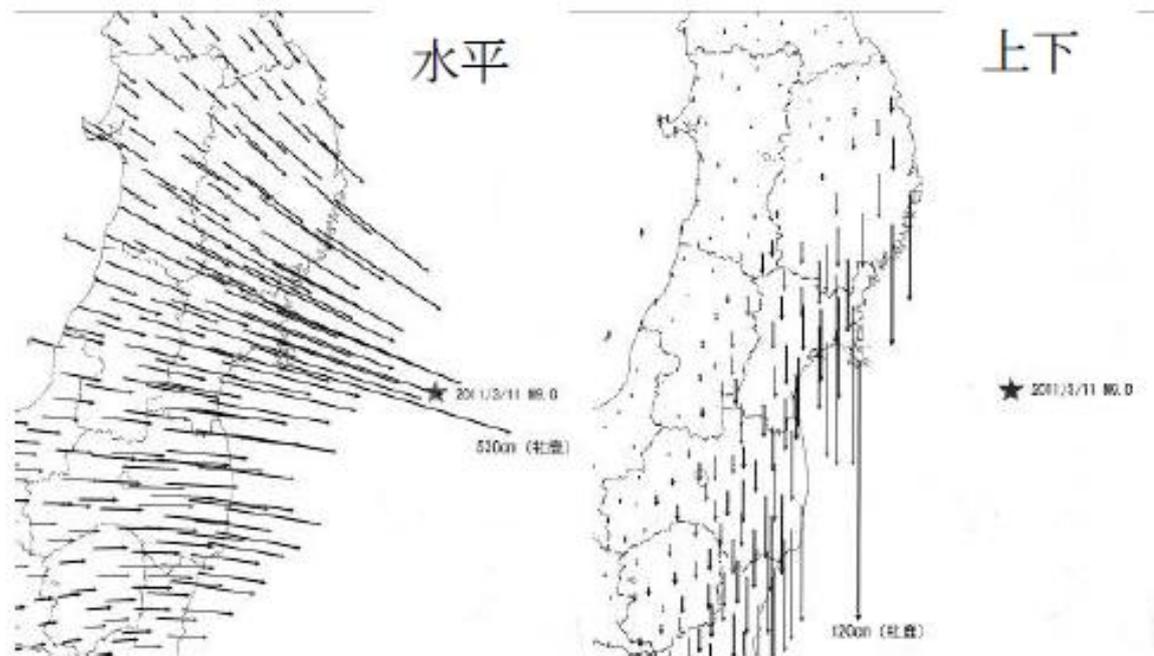
u : 弾性変形分を差し引いた内空変位  
D : 空洞の直径

10<sup>12</sup> 秒 = 約 3 万年

図 6.2.2-58 土岐花崗岩を対象とした約 3 万年間の空洞の変形の解析例

③については、断層（特に活断層）を避けることにより影響を少なくすることができるが、日本のようなプレートの沈み込み帯では、活断層の近傍でなくても、プレート境界地震、プレート内地震の大地震が起こりうる。このような大地震は震源位置周辺の応力状態をも

変化させる可能性がある。地震の規模、震源位置（深度、水平距離）と空洞建設予定位置・深度にもよるが、どの程度の影響があるか現状では不明である。研究例としては坂口らが東北地方太平洋沖地震の前後における地圧測定結果を報告している[37]。その中で、図 6.2.2-59 に示すように、国土地理院 (<http://www.gsi.go.jp/>) の報告として東北地方では水平方向で最大 5.3 m、上下方向（沈下）に最大 1.2 m の変動があったことが記されている。このような大きな変動は、地殻応力場にも大きな擾乱をもたらしていると考えられるとしており、巨大地震により地殻応力場が変動する可能性について記述している。さらに、まとめとして釜石鉱山においては地震の前後では応力値が大きく変動しており、地震後の応力値は地震前の応力値の 2 倍以上であったと報告している。ただし、これらの原因についての明確な解答を見いだせていないとしており、原因については今後の課題としている。



水平方向：最大 5.3m

上下方向：最大 1.2m（沈下）

（国土地理院：<http://www.gsi.go.jp/>）

図 6.2.2-59 地震に伴う地殻変動の例（東北地方太平洋沖地震）

#### b. 水理学的影響

これまでに示した坑道周辺岩盤に生ずる水理学的現象について、現象の大きさを左右する特性としては、動水勾配、間隙水圧、透水係数が抽出できた。これらについて、特性変化が生ずる原因について検討する。

動水勾配に関しては、最も顕著な影響を及ぼすものは坑道の掘削である。掘削により坑道壁面では間隙水圧が 0 となり、坑道より十分離れた場所では初期間隙水圧が保たれること

から、坑道に近づくにつれて間隙水圧が低下していくような動水勾配が発生する。これにより、坑道内空に向かう地下水流れが発生する。

池川[38]は、神岡鉱山の坑道周囲に間隙水圧の計測孔を設けて、坑道周囲の間隙水圧分布を実測している。坑道は水没させた後排水ポンプにより坑道内の水位を一定に保った。水没から10日後には地下水流れが定常状態となり、図6.2.2-60のような間隙水圧分布が得られている。これを壁面からの距離で整理しなおしたものが図6.2.2-61である。なお、それぞれの図では間隙水圧を全水頭として表現している。坑道内面での水頭は約60mであり、空洞から離れるにつれて水頭は大きくなり、10mの距離では約140mとなっている。このように、空洞の存在により動水勾配が発生し地下水流れが発生する。この結果、空洞周囲には圧力低減領域が発生し、この領域は地下水流れが定常状態となるまで、時間とともに拡大していくと考えられる。

処分坑道が埋め戻され、坑道外への地下水の排水が停止すれば、坑道壁面の水圧が再冠水により上昇し動水勾配は徐々に低下する。

間隙水圧の変化は、坑道掘削の影響以外に、地震による地盤変形によりもたらされる場合がある。吾妻ら[39]は、東濃鉱山周囲に設置されたボーリング孔(図6.2.2-62)で、地下水位や間隙水圧の連続モニタリングを実施しており、1997年3月16日の愛知県東部地震(M5.8、深さ39km)の際に、図6.2.2-63に示すような変動を観測している。全ての観測項で地震直後から地下水位や間隙水圧の上昇が見られた。このような変化は数か月継続し、一部の観測点ではその後に間隙水圧の低下が見られている。この例にみられるような間隙水圧変化が、どの程度の空間的な広がりを持っているのかは今後の研究により明らかにされると考えられるが、離れた場所で発生した地震により、処分坑道周辺で間隙水圧の変動が発生する可能性が示唆されている。

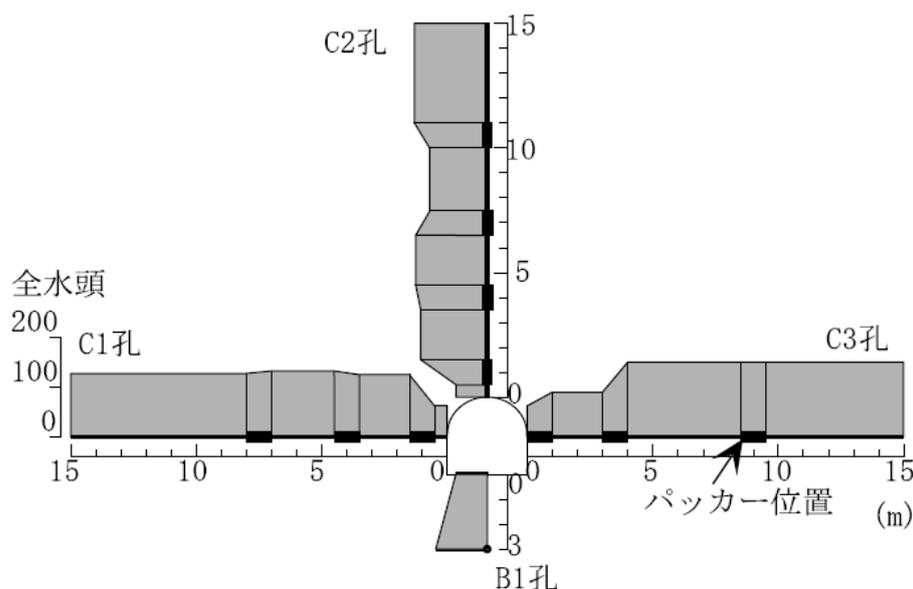


図 6.2.2-60 定常状態における坑道周囲の全水頭分布

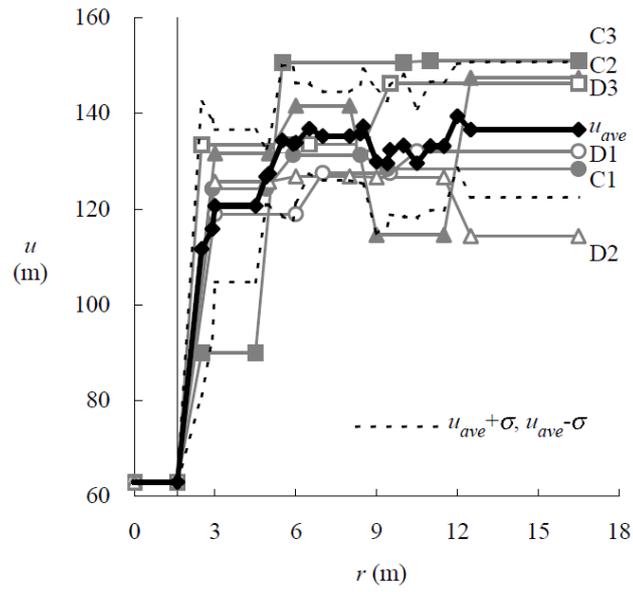


図 6.2.2-61 坑道中心からの距離と全水頭の関係

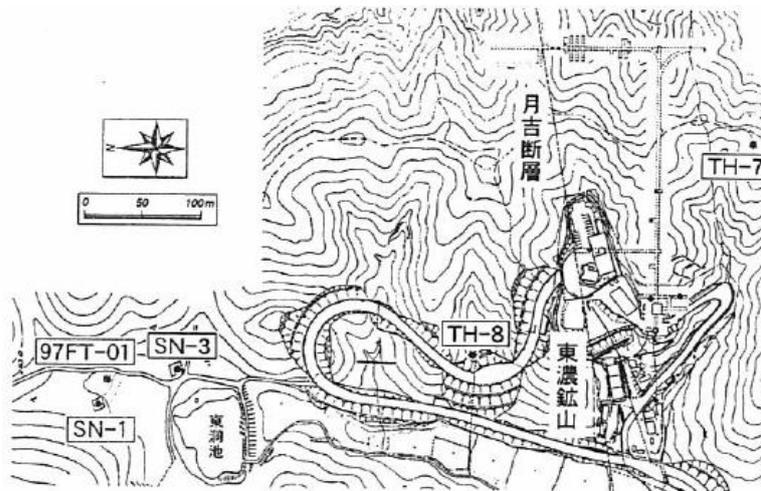


図 6.2.2-62 東濃鉱山における地下水観測用ボーリング

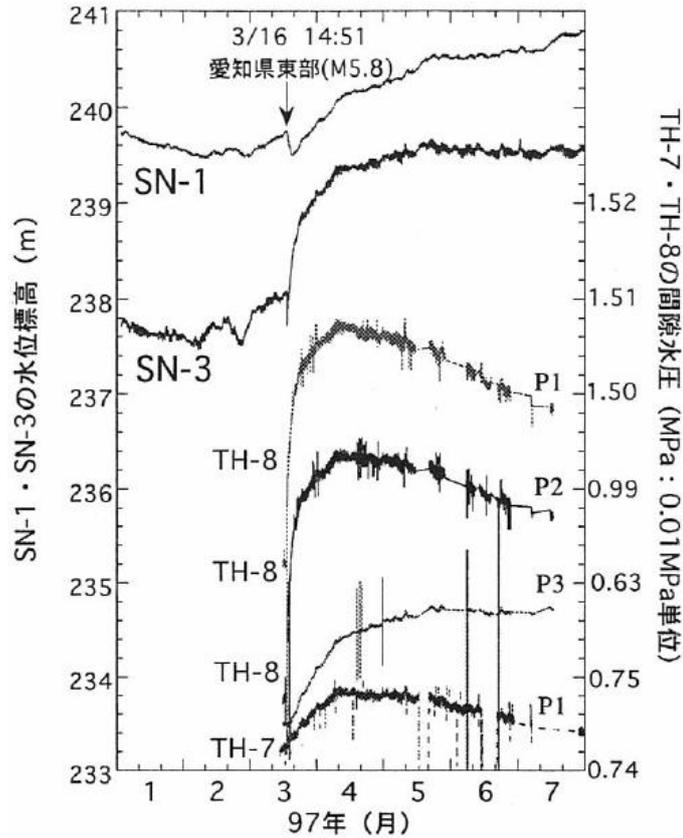


図 6.2.2-63 愛知県東部地震における地下水の変化

透水係数は、周辺岩盤の特性として最も重要なものの一つであり、地下水流れの量や速さを規定する。透水係数は、岩盤内で透水部となる亀裂や空隙の大きさや量、連続性などに依存するが、透水係数は岩盤の応力状態に影響を受けることが知られている。

図 6.2.2-64 は、薛ら[40]が行った透水試験の結果を示している。三軸圧縮試験装置を用い、インタクトな白浜砂岩（図中 a）と来待砂岩（同じく b）の円柱供試体に静水圧を加えながら、透水試験が行われた。図で黒丸は載荷時、黒三角は除荷時の透過率の変化である。いずれも圧力が大きくなると、透水性が低下することがわかる。また、圧力履歴によっても透水性が変化することが示されている。このことは、坑道掘削による応力再配分が周辺岩盤の透水性に影響を及ぼすことを示唆している。

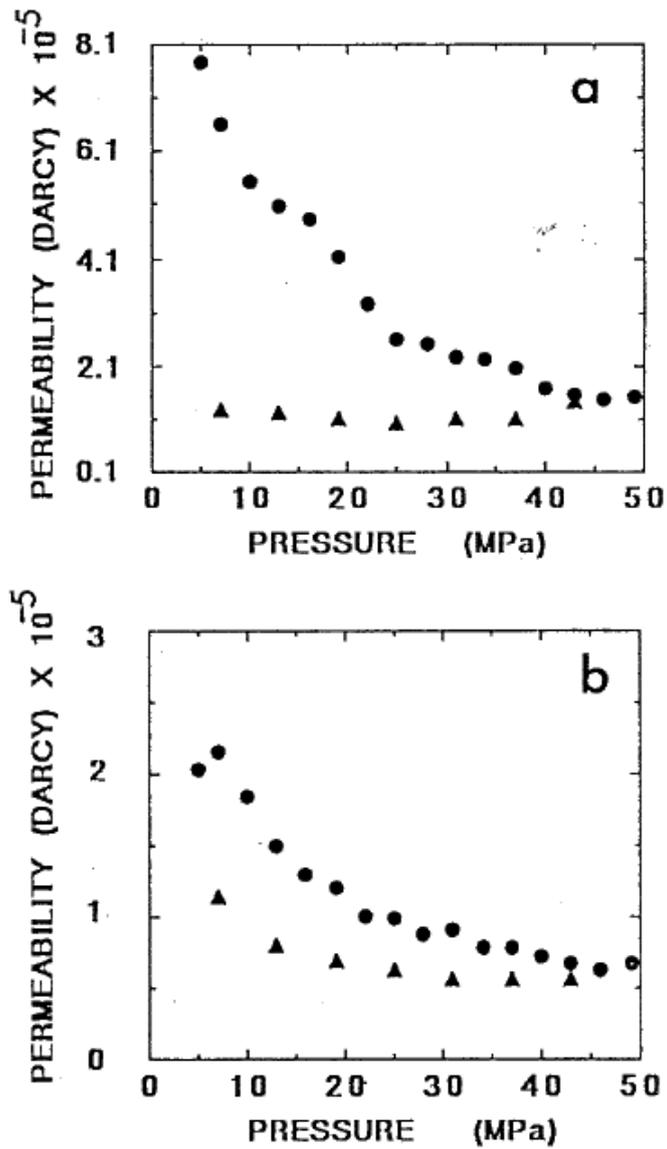


図 6.2.2-64 白浜砂岩（上）と来待砂岩（下）を用いた透水試験結果

結晶質岩では、割れ目における透水が支配的と考えられるが、割れ目の透水性も応力の影響を受ける。透水係数は応力状態の影響も受ける。図 6.2.2-65 は、多田ら[41]による割れ目を対象とした透水試験で、三軸セル内の油圧により割れ目の垂直応力を変化させながら透水係数が測定されている。この場合も、応力が増加することで透水性が低下し、また透水性の変化の大きさは応力履歴の影響を受けることが示されている。

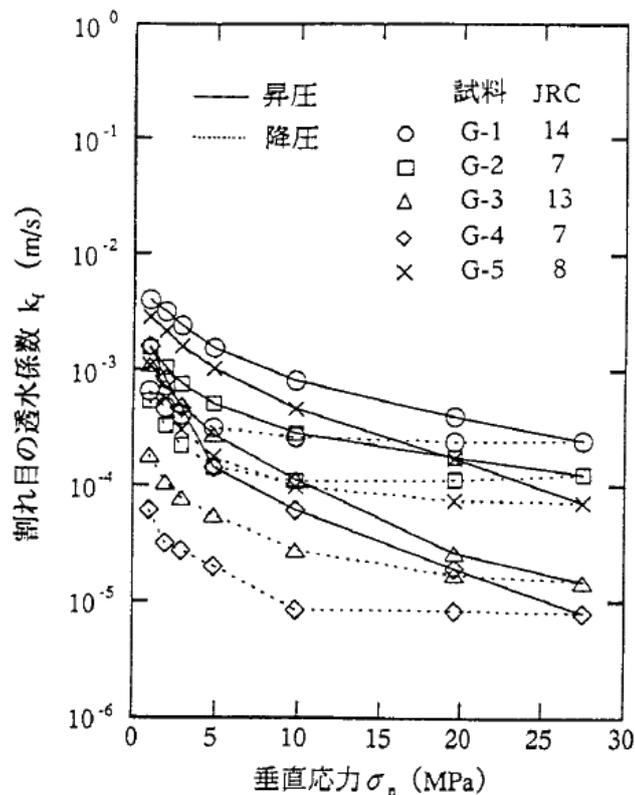
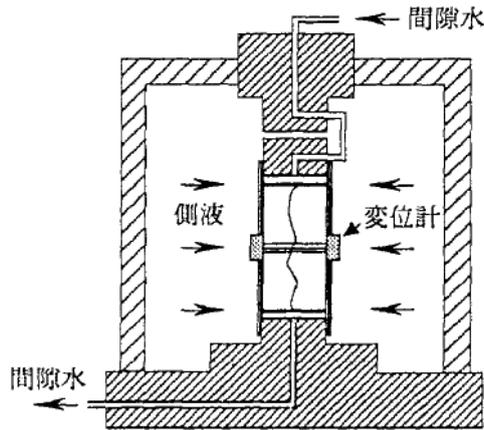


図 6.2.2-65 割れ目を対象とした透水試験装置（上）と試験結果

これまで示したとおり、周辺岩盤の透水性は応力状態の影響を受ける。周辺岩盤の応力状態は、前節で述べたとおり、空洞掘削による応力再配分や地震などが要因となって変化することが考えられる。また、処分坑道における廃棄体定置による影響を考慮すると、廃棄体の熱応力による応力再配分や緩衝材・埋め戻し材の膨潤圧も変化の要因となりうる。これらの応力変化は新たな空隙や割れ目の発生も招く可能性があることにも注意する必要がある。

周辺岩盤の透水性は、透水路にあたる空隙の材質変化や充填物の変化によっても変動する。菊池ら[42]は、等方圧と温度を長時間保持した状態で透水試験を実施し、堆積岩（ベレア砂岩、幌延泥岩）の透水特性変化を観察した。ベレア砂岩では、不連続面を含まない岩石実

部および単一不連続面を有する供試体を対象とし、幌延泥岩では、単一不連続面を有する供試体に対して実験を実施した。図 6.2.2-66 に示すとおり、長期透水試験の結果、ベレア砂岩では初期値から時間の経過とともに透過率が数 100 日間で 2~7 倍程度上昇する結果が得られた。幌延泥岩の場合は、透過率は時間の経過とともに減少したのち上昇に転じ、再び低下傾向を示す複雑な挙動が観察された。

これらの実験の結果では、どの条件においてもある時間の経過後、透水特性は増加に転じるという傾向が得られた。これは、砂岩空隙内部および泥岩亀裂内部の接触部の溶解、自由表面溶解現象によるものと想定される。また、幌延泥岩の透過率はベレア砂岩の透過率上昇時期に比べ速いという結果が得られた。これは幌延泥岩が、ベレア砂岩を構成している石英や長石よりも溶解性が高いシリカ鉱物（オパール CT）で構成されているためと考えられる。

一方、重永ら[43]は花崗岩の不連続面を対象として、長期の透水試験を実施している。三軸試験装置を用いた透水試験で、温度と圧力を一定に保ち透水試験を繰り返し行っている。試験結果を図 6.2.2-67 に示す。なお、図では透水量から平行平板モデルを仮定して水理学的開口幅を求め、この経時変化をプロットしている。図からは、時間の経過とともに透水性が低下していることがわかる。重永らは、不連続面では Si の溶出により接触部が弱体化し、不連続面が閉口していくために透水性が徐々に低下すると説明している。この根拠としては、透水後に回収した水に対して化学分析を行い、図 6.2.2-68 に示すように時間とともに Si の溶出濃度が上昇していることを挙げている。

これらの研究からは、周辺岩盤の透水性は空隙の材料変化や充填物の化学変化の影響も受けることがわかる。このような材料変化は、地下水の化学的性質や微生物の存在に依存すると考えられる。

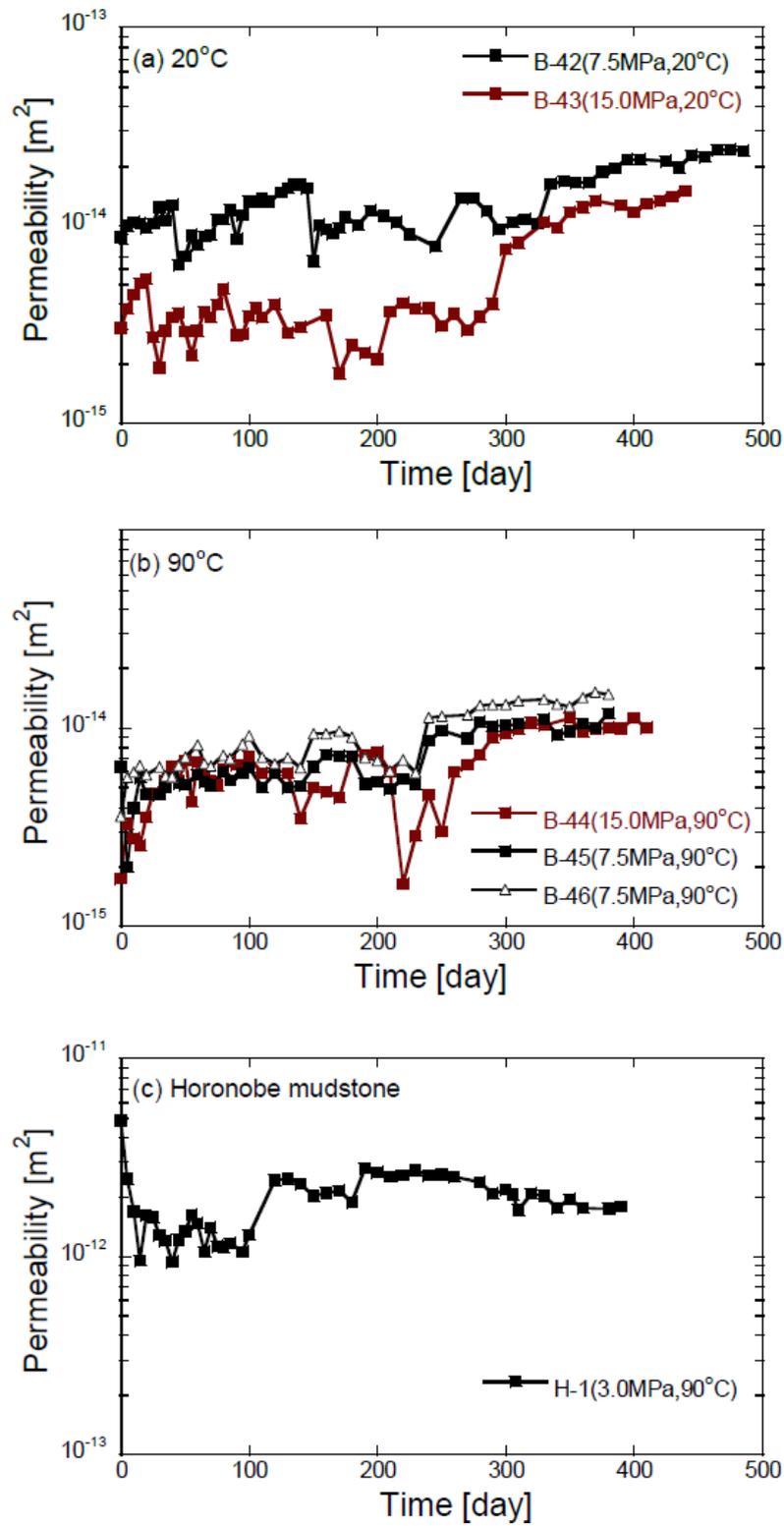


図 6.2.2-66 拘束圧と温度の一定に保った長期透水試験結果 (上から、ベレア砂岩 20°C、ベレア砂岩 90°C、幌延泥岩 90°C)

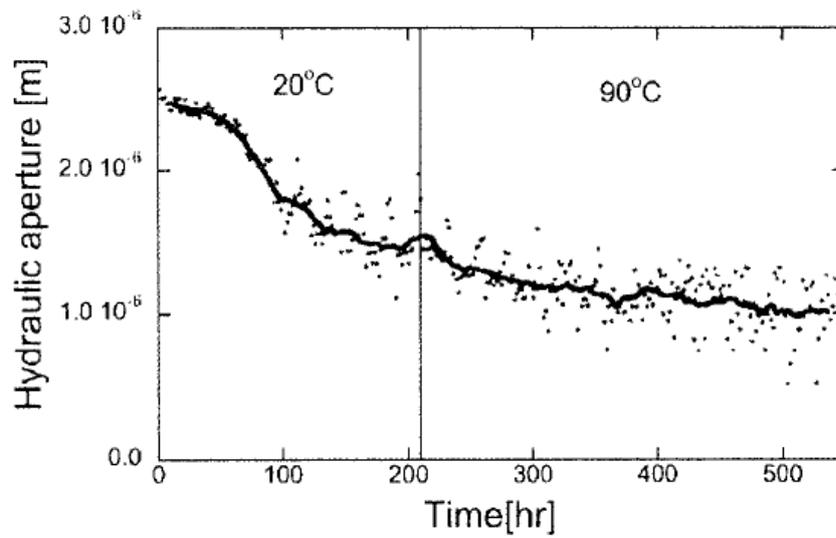


図 6.2.2-67 花崗岩の不連続面を対象とした長期透水試験結果

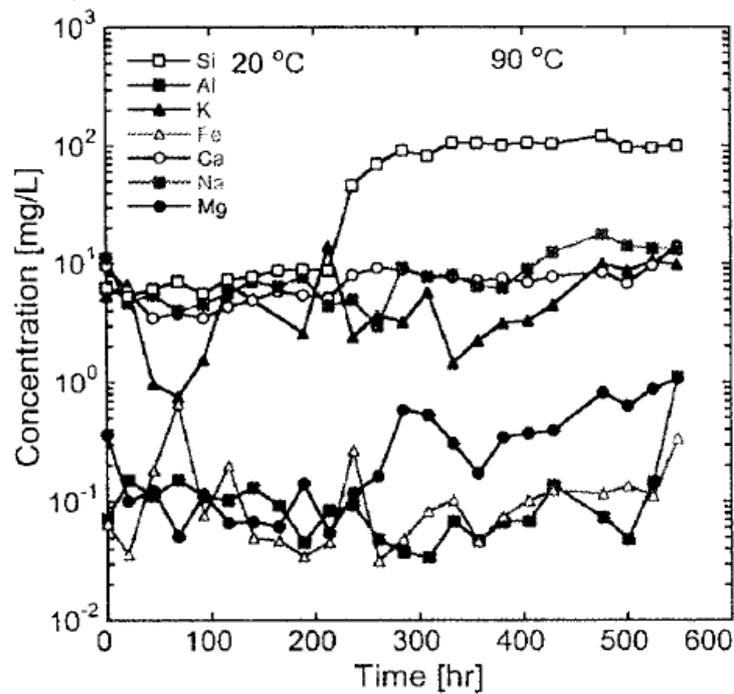


図 6.2.2-68 花崗岩からの成分溶出の測定結果

### c. 化学的影響

これまでに示した坑道周辺岩盤に生ずる化学的現象について、現象の大きさを左右する要因として、pH、電気伝導度、溶存気体、溶存イオン、酸化還元電位を抽出した。ここでは、これらの特性変化の要因を検討する。

pH を変化させる原因としては、コンクリートからのアルカリ成分の溶出を挙げることができる。コンクリートの空隙中には、コンクリートに含まれる水和物から溶解した  $\text{Ca}^{2+}$  と

OH<sup>-</sup>がある一定濃度で共存している。Ca<sup>2+</sup>濃度が周辺地下水より高い場合には、濃度拡散を生じ Ca<sup>2+</sup>と OH<sup>-</sup>は周辺岩盤へ拡散する。熊坂ら[44]は、濃度拡散による Ca イオンの地山への浸透の様子を求めている (図 6.2.2-69)。この例では、地山の Ca イオン濃度は数 10 年の期間で変動し続ける。

辻本ら[45]は、覆工コンクリートの変状に関する観察結果をもとに、図 6.2.2-70 のように水酸化カルシウム の溶脱をモデル化している。コンクリートに発生したひび割れが溶脱を促進し、その結果さらにひび割れが進行することが示されている。

一方、青木ら[46]は北海道中央部に位置するトンネルの排水がアルカリ性であることに注目し、この原因を検討するために、トンネル近傍より採取した試料で溶出試験を実施している (図 6.2.2-71)。試料 No.2~4 は、溶解速度が他の鉱物と比較して大きな方解石を含有しており、これらの試料で pH の変化が大きいことから、方解石の溶解が浸出水の pH を変化させていることを示している。

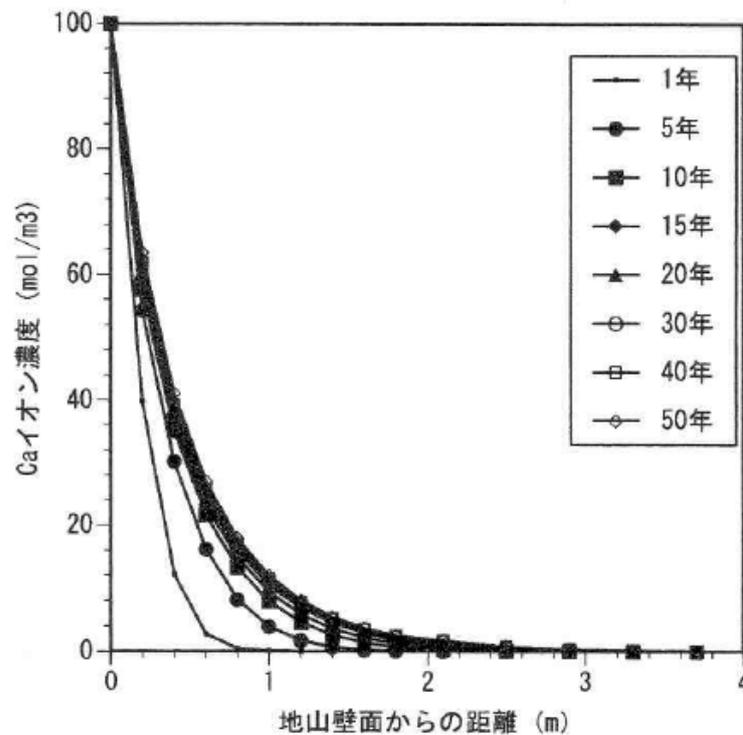


図 6.2.2-69 トンネル近傍の Ca イオン濃度の予測解析結果

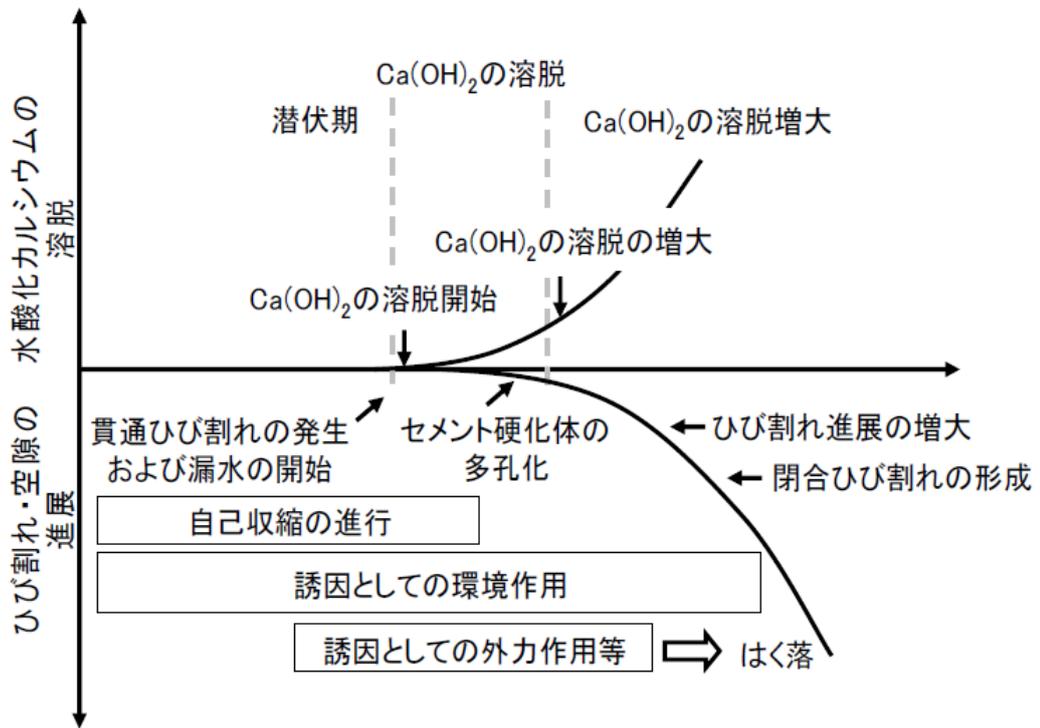


図 6.2.2-70 コンクリートからの水酸化カルシウムの溶脱の概念

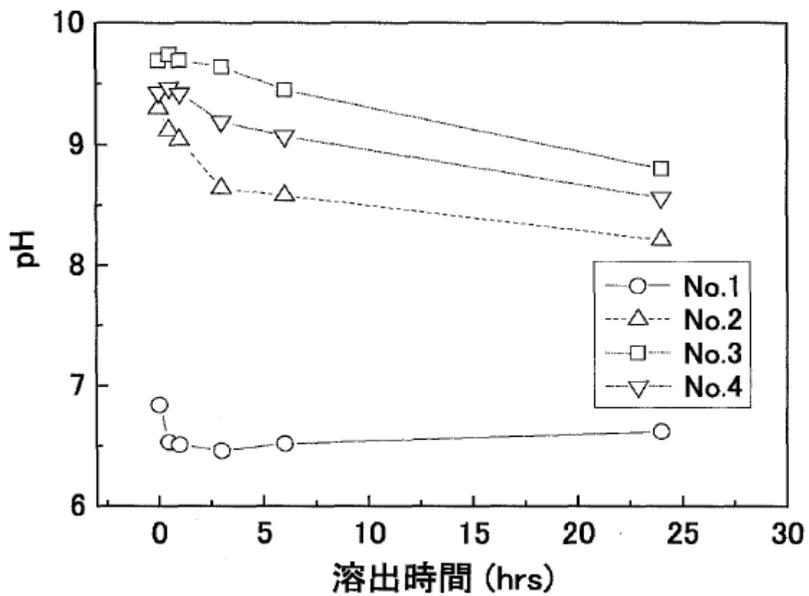


図 6.2.2-71 採取試料からの溶出水の pH 変化

pH や電気伝導度などの水質変化は、地下水に溶存しているガスが気化することによる影響も受ける。先に示したとおり、坑道掘削により発生した動水勾配により、坑道内空に向かう地下水流れが発生するが、坑道近傍では間隙水圧が低下するため、地下水にガスが溶存している場合にはこれが気化する。この結果、地下水に溶存するガスの密度が低下し水質が変化する。山本ら[47]は、幌延の地下施設における立坑を対象として、地下水とガスの移行シミュレーションを実施している（図 6.2.2-72）。溶存ガスの有無や成分によって、地下水中のガス飽和度が変化する様子が示されている。

周辺岩盤の水質は、坑道掘削の結果発生した地下水流れによって、地表部や周辺部から性質の異なる地下水が流入することでも変化する。水野ら[48]は、瑞浪超深地層研究所における立坑掘削時に、立坑に流れ込む地下水の化学分析を実施している。このうち、塩化物イオン濃度変化を示したものが図 6.2.2-73 である。これを見ると、掘削後に高い値を示していた塩化物イオンの濃度は、時間とともに低下していく。この原因は、坑道掘削による湧水に伴って深層地下水が上昇する、あるいは浅層の地下水が浸透し深層の地下水に混入したためであると分析している。

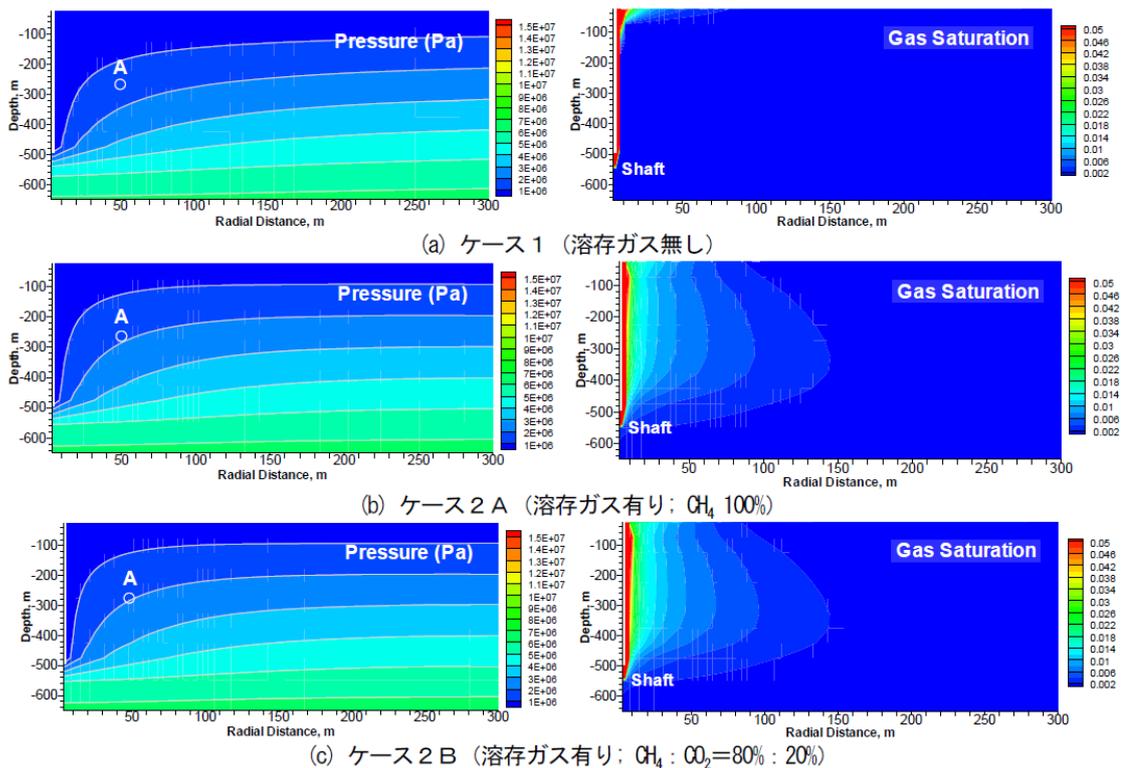


図 6.2.2-72 立坑掘削による間隙流体圧とガスの飽和度分布の変化

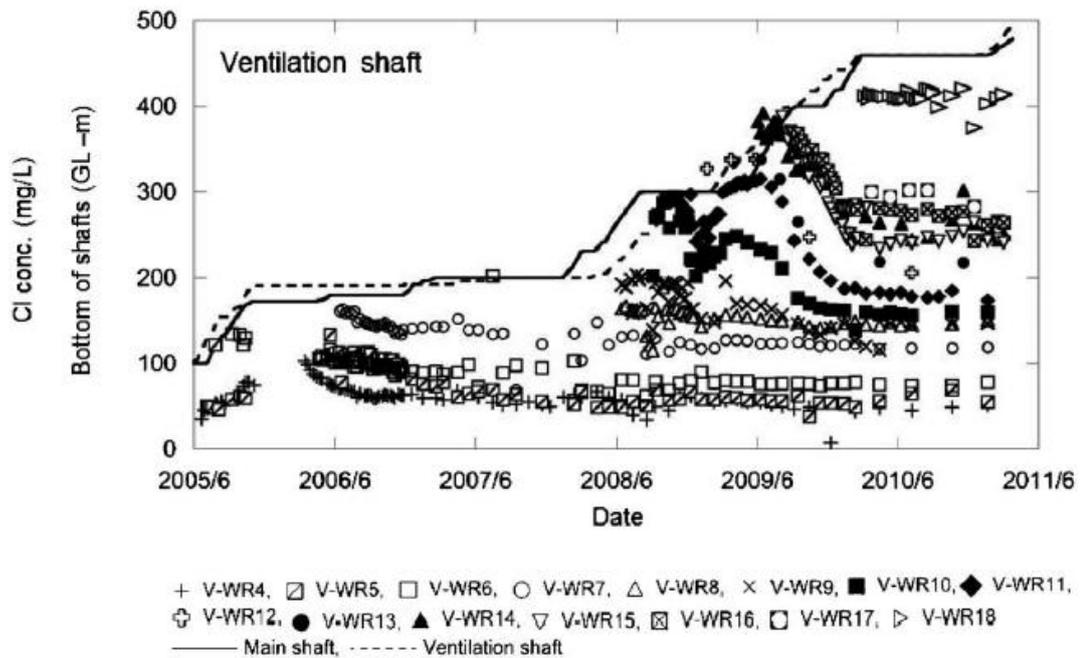
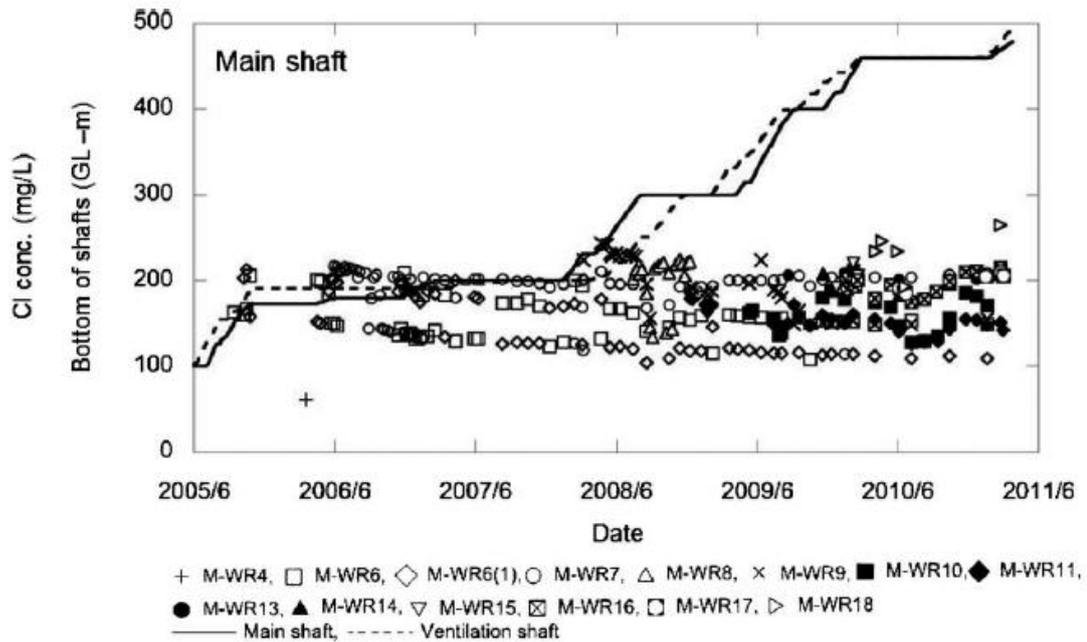


図 6.2.2-73 瑞浪超深地層研究所における塩化物イオンの濃度変化  
(上：主立坑掘削に伴う変化、下：換気立坑掘削に伴う変化)

天野ら[49]は、微生物が地下の酸化還元環境形成に及ぼす影響も指摘している。図 6.2.2-74 は、砂岩や泥岩の粉碎物を用いたバッチ試験で観測された酸化還元電位の変化である。微生物の添加により、酸化還元電位が大きく変化していることがわかる。

これまでに周辺岩盤の化学環境を左右する特性として、pH、電気伝導度、溶存気体、溶存イオン、酸化還元電位を抽出したが、これらを変化させる要因として以下のものを挙げ

ることができる。

- ・ コンクリートからのアルカリ成分の溶脱
- ・ 周辺からの pH などが異なる地下水の流入
- ・ 間隙水圧の低下による溶存気体の脱気、大気からの溶解
- ・ 微生物の影響

これらは、廃棄体の発熱による温度上昇の影響を受ける可能性が高いことから、これについても特性変化の要因として考える必要がある。

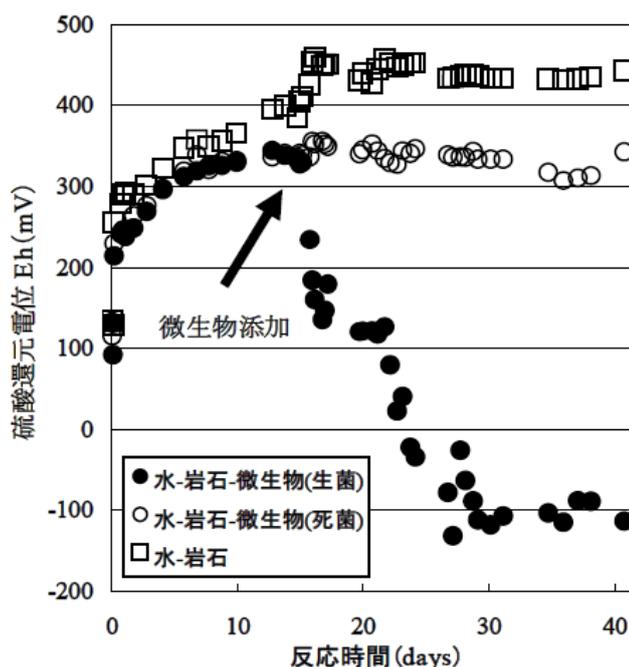


図 6.2.2-74 微生物の添加と酸化還元電位の変化

#### d. 熱的影響

坑道周辺岩盤に生ずる熱学的現象は、廃棄体の発熱と坑道通気による冷却に温度変化に起因する。この温度変化に伴う現象の大きさを左右する特性として、地温分布や地温勾配などの温度環境、岩盤の熱伝導率、比熱、密度、熱膨張率を抽出した。これらのうち、地温分布や地温勾配、地下水の温度分布などは、対象地域の特性として測定が可能である。また、比熱や密度に関しても、間隙率や飽和度に基づいてある程度の推定を行うことができる。

熱伝導率に関しては、周辺岩盤の空隙形状や密度、連続性に影響を受けることから、透水係数と同様に空洞掘削に伴う周辺岩盤の緩みや割れ目の増加などが変化の要因となる。加えて、熱伝導率が飽和度に依存することも知られている。

図 6.2.2-75 は、出口[50]らにより実施された、岩石試料の飽和度を変化させて行われた熱伝導率の測定結果である。飽和度が増加すると熱伝導率が数倍変化することがわかる。坑道の掘削により坑道近傍には不飽和領域が発生すると推定されるが、この部分では熱伝導

率が低下する。廃棄体の発熱により新たな温度勾配が発生し、熱の移動が生ずるが、熱伝導率の小さい領域では熱の伝導が生じにくくなり想定以上の温度上昇が発生する可能性がある。したがって、熱的影響を予測する上では、不飽和領域の形成を推定できる技術開発が課題となる。

また、八田ら[51]は三軸圧縮試験装置を用い、温度と拘束圧を制御してき裂を含む岩石の熱膨張特性を調べている（図 6.2.2-76）。図 6.2.2-77 に示した結果を見ると、熱膨張率は温度とともに変化するが、拘束圧によっても変化することや、き裂内の充填物の有無により変化することがわかる。

これらのことから、岩盤の熱伝導率、比熱、密度、熱膨張率を変化させる要因として、

- ・ 地下水温度、通気温度などの環境変化、廃棄体の発熱
- ・ 坑道掘削時の発破損傷、割れ目やクラックの発生
- ・ 不飽和領域の発生

などを挙げるができる。

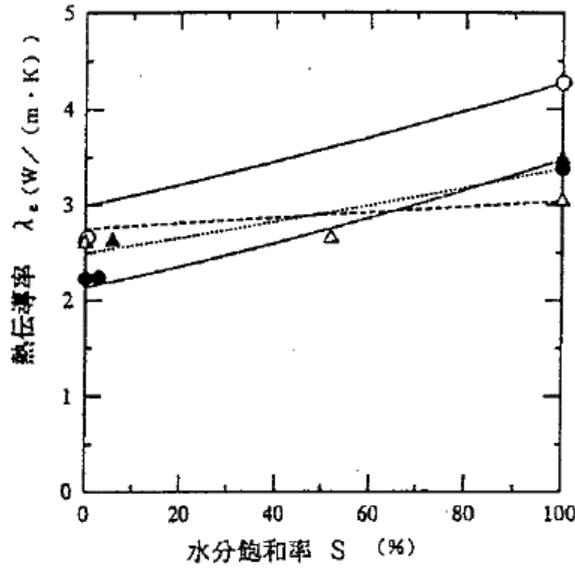


図 6 (a) 水分飽和率と砂岩の熱伝導率との関係

測定値	推算値		測定値	推算値
○	—	ベリア砂岩	△	- - -
●	- · - ·	紀州砥石	▲	- - -
				和泉砂岩
				多胡砥石

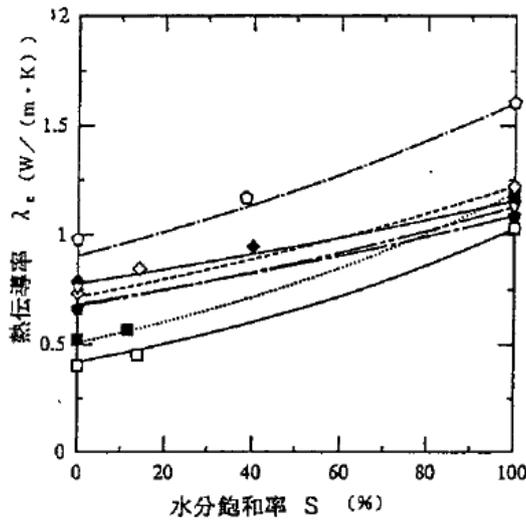


図 6 (b) 水分飽和率とゼオライト岩, クリストバライト岩およびパーライト岩の熱伝導率との関係

測定値	推算値		測定値	推算値
□	—	宮城ゼオライト	◇	- - -
■	- · - ·	熊ヶ根ゼオライト	●	- - -
◇	- - -	萩野凝灰岩	▽	- · - ·
◆	- - -	二ツ井ゼオライト		東通クリストバライト
				喜多方パーライト
				湯八木沢パーライト

図 6.2.2-75 岩石試料の熱伝導率に及ぼす飽和度の影響

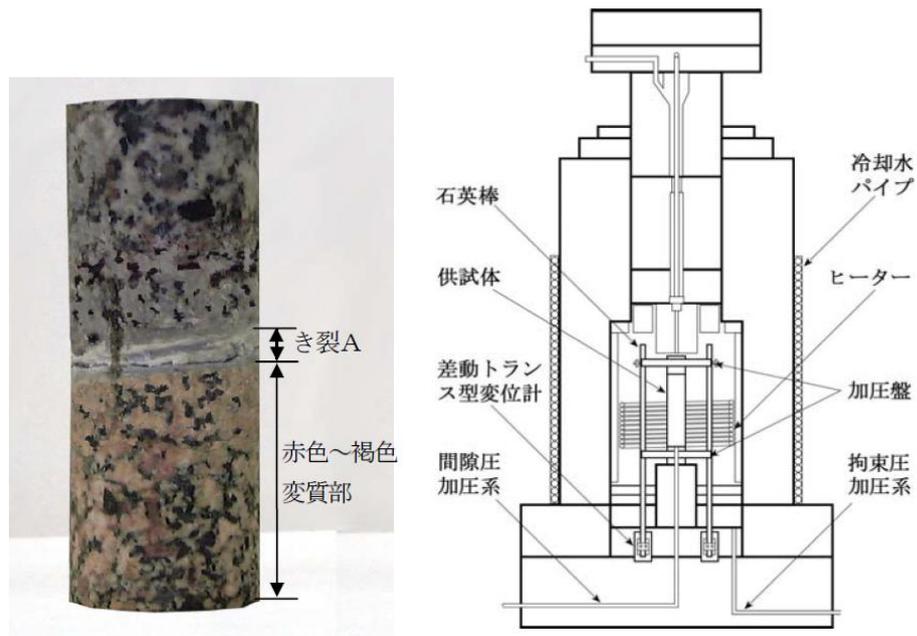


図 6.2.2-76 き裂を含む岩石試料と熱伝導率測定装置

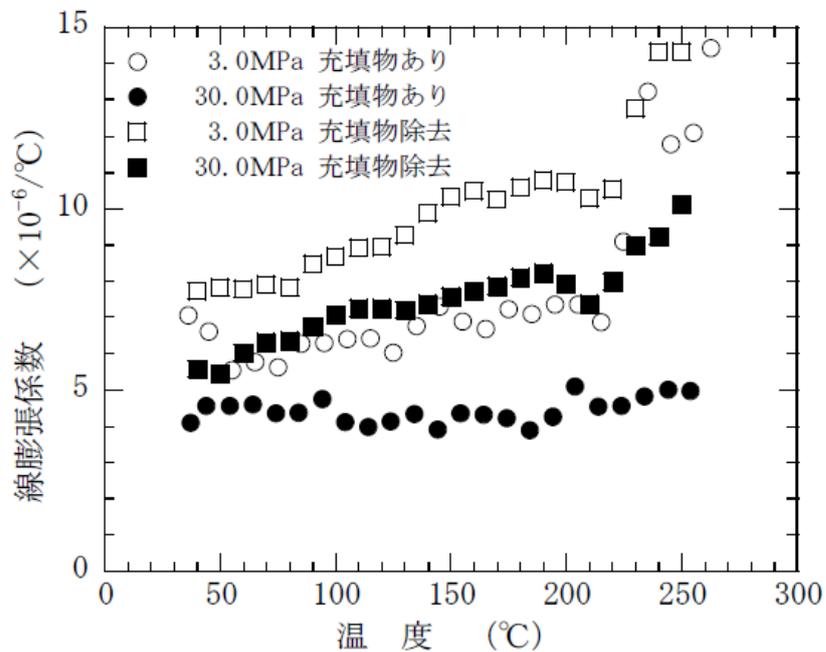


図 6.2.2-77 岩石試料の線膨張係数と温度、拘束圧の関係

## 2) 人工バリアの特性の変化と変化が生じる原因の抽出と整理

人工バリアについては、オーバパックの腐食、緩衝材の膨潤、変形、劣化、変質、流出および間隙中の空気、水の放射線影響、PEM 容器の腐食、変形、破損が特性に係わる変化となる。

### ①オーバパックの腐食

空洞が存在していることにより空気が流入する環境となり、空気中の酸素によるオーバーパックに使用される炭素鋼の腐食が発生する。これにより安全性への影響として次のようなことが考えられる。

- 力学的影響：腐食によるオーバーパックの減肉、腐食膨張による緩衝材の変形、緩衝材圧密反力の発生
- 化学的影響：炭素鋼の腐食により発生する鉄イオンによる緩衝材の変質

これらの影響により、人工バリアにおいて次の特性の変化が考えられる。

- オーバーパック：腐食減肉による構造強度の低下（吊り部等）
- 緩衝材：緩衝材の変形による厚さ寸法の減少、緩衝材の変質による止水性能、応力緩衝性能の劣化、核種吸着性能の低下

## ②緩衝材の膨潤

湧水により緩衝材が膨潤する。横置き方式のブロック緩衝材の場合は、膨潤に伴う変形が発生する。縦置き方式の場合には膨潤が拘束され膨潤圧が発生し、処分孔上部をキャッピング等の防止策が無い場合には処分孔より処分坑道へはらみ出しが発生する。PEM方式の場合には、緩衝材の膨潤が拘束されるため膨潤圧が発生する。PEM容器が膨潤圧に耐えられない場合には構造的に弱い部分で変形・破損が発生し、緩衝材が部分的にはらみ出す。これにより安全性への影響として次のようなことが考えられる。

- 力学的影響：緩衝材の膨潤、変形、PEM容器の変形
- これらの影響により、人工バリアにおいて次の特性の変化が考えられる。
- 緩衝材：緩衝材の変形による厚さ寸法の減少、緩衝材の膨潤・変形による密度低下

## ③緩衝材の変形

緩衝材の膨潤による変形およびオーバーパックの腐食膨張もしくは岩盤のクリープ変形による変形が発生する。これにより安全性への影響として次のようなことが考えられる。ただし、岩盤のクリープ変形は空洞が存在していることからここでは対象としない。

- 力学的影響：緩衝材の膨潤、変形、PEM容器の変形
- これらの影響により、人工バリアにおいて次の特性の変化が考えられる。
- 緩衝材：緩衝材の変形による厚さ寸法の減少、緩衝材の膨潤・変形による密度低下

## ④緩衝材の劣化・変質

コンクリート、腐食生成物、熱などの影響による緩衝材の劣化・変質が発生する。これにより安全性への影響として次のようなことが考えられる。

- 力学的影響：緩衝材の膨潤圧の低下
  - 水理学的影響：緩衝材の止水性の低下
  - 化学的影響：核種吸着性能の低下
- これらの影響により、人工バリアにおいて次の特性の変化が考えられる。
- 緩衝材：緩衝材の膨潤圧の低下、緩衝材の止水性の低下、核種吸着性能の低下

#### ⑤緩衝材の流出

湧水の影響により緩衝材の流出が発生する。これにより安全性への影響として次のようなことが考えられる。

- 力学的影響：緩衝材の膨潤圧の低下
- 水理学的影響：緩衝材の止水性の低下
- 化学的影響：核種吸着性能の低下

これらの影響により、人工バリアにおいて次の特性の変化が考えられる。

- 緩衝材：緩衝材の膨潤圧の低下、緩衝材の止水性の低下、核種吸着性能の低下

#### ⑥緩衝材間隙水・間隙空気の放射線影響

緩衝材中に存在し埋戻し前は動きが少ないと考えられる緩衝材間隙水、間隙中の空気がガラス固化体からの放射線の影響で放射線分解などが発生する。この現象については、人工バリアの特性の変化には起因しないが、操業安全の観点から回収作業時や埋戻し作業時における作業員への影響が無いことを確認する必要がある。

- 放射線場：緩衝材の間隙水・間隙空気の放射線影響

#### ⑦PEM 容器の腐食

①オーバーパックと同様に、空気中の酸素による PEM 容器に使用される炭素鋼の腐食が発生する。ただし、PEM 容器の外側には空間があることから、容器の腐食膨張による緩衝材や岩盤などへの力学的影響はない。これにより安全性への影響として次のようなことが考えられる。

- 力学的影響：腐食による PEM 容器の減肉
- 化学的影響：PEM の腐食により発生する鉄イオンによる緩衝材の変質

これらの影響により、人工バリアにおいて次の特性の変化が考えられる。

- PEM 容器：腐食減肉による構造強度の低下（回収性）
- 緩衝材：緩衝材の変質による止水性能、応力緩衝性能の劣化、核種吸着性能の低下

#### ⑧PEM 容器の変形、破損

緩衝材の膨潤圧等による内圧の発生や PEM 容器の腐食減肉による構造強度の低下により、PEM 容器の変形、破損が発生する。この場合には、②緩衝材の膨潤と同様な状況になるもとと考えられ、緩衝材のはらみ出しが発生する。これにより安全性への影響として次のようなことが考えられる。

- 力学的影響：PEM 容器の変形、破損による緩衝材のはらみ出し

これらの影響により、人工バリアにおいて次の特性の変化が考えられる。

- 緩衝材：緩衝材の変形による厚さ寸法の減少、緩衝材の膨潤・変形による密度低下

処分施設の安全性に影響する特性の変化について、所々の現象や発生原因と時期及びそれらの関係などの情報を詳細化して整理した結果を表 6.2.2-15 ～ 表 6.2.2-23 に示す。この結果をもとにして、次項の検討では、埋め戻し時期の違いによる影響の抽出を行う。

表 6.2.2-15 ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理【周辺岩盤・力学的影響】

整理の観点	周辺岩盤の特性		特性の変化	原因	処分場建設時	埋め戻し以前	埋め戻し以降	
力学的影響	応力場	(坑道周辺) 応力分布		変動	発破損傷	○		
					岩盤・岩石・割れ面の劣化(クリープ+微視的クラックの発達)		○	○
					支保の変質・劣化・消失		○	○
					廃棄体の熱応力		○	○
					廃棄体の腐食膨張圧			○
					緩衝材の膨潤(圧), 変質, 溶解			○
					埋め戻し材の膨潤(圧), 変質, 溶解			○
	力学特性	強度特性	一軸圧縮強度	低下	発破損傷	○		
					劣化(+微視的クラックの発達)		○	○
			せん断強度	低下	発破損傷	○		
					劣化(+微視的クラックの発達)		○	○
		内部摩擦角	低下	発破損傷	○			
				劣化(+微視的クラックの発達)		○	○	
				劣化(+微視的クラックの発達)		○	○	
変形特性	弾性係数	低下	発破損傷	○				
			劣化(+微視的クラックの発達)		○	○		
	ポアソン比	増加	発破損傷	○				
劣化(+微視的クラックの発達)		○	○					

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり

表 6.2.2-16 ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理【周辺岩盤・水理学的影響】

整理の観点	周辺岩盤の特性		特性の変化	原因	処分場建設時	埋め戻し以前	埋め戻し以降
水理学的影響	水理場	動水勾配	動水勾配の増大	坑道が大気圧環境となるため	○	○	
			動水勾配の低下	隣接坑道の構築による間隙水圧の低下 埋め戻し後の再冠水		○	○
		間隙水圧	間隙水圧の変動	坑道周辺は大気圧状態に近い	○	○	○
				隣接坑道の構築による間隙水圧の低下		○	○
				埋め戻し後の再冠水			○
				地震による地下水流動	○	○	○
	(岩盤の透水性) 水理物性	透水係数	坑道周辺岩盤基質部:透水性/透水係数の増加	発破損傷	○		
				掘削に伴う応力再配分による応力低減	○	○	○
				地下水水質の化学的作用(鉱物の溶解)による材料変質		○	○
			坑道周辺岩盤基質部:透水性/透水係数の減少	掘削に伴う応力再配分による応力増加	○	○	○
				地下水中の2次鉱物の沈殿による間隙の減少		○	○
				微生物による酸化物の沈殿	○	○	○
		坑道周辺岩盤割れ目:透水性/透水係数の増加	発破損傷による新規の割れ目の発生	○			
			掘削に伴う応力再配分による割れ目の開口	○	○	○	
			応力再配分による新規の割れ目の発生	○	○	○	
			割れ目内の充填鉱物の溶解による通水性の増加		○	○	
			廃棄体の熱応力による応力再配分		○	○	
			緩衝材・埋め戻し材の膨潤圧		○	○	
		坑道周辺岩盤割れ目:透水性/透水係数の減少	掘削に伴う応力再配分による割れ目の閉合	○	○	○	
			地下水中の2次鉱物の沈殿による割れ目内の通水性の低下		○	○	
			微生物による酸化物の沈殿による割れ目内の通水性の低下	○	○	○	
			廃棄体の熱応力による応力再配分		○	○	
			緩衝材・埋め戻し材の膨潤圧		○	○	

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり

表 6.2.2-17 ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理【周辺岩盤・化学的影響】

整理の観点	周辺岩盤の特性	特性の変化	原因	処分場建設時	埋め戻し以前	埋め戻し以降
化学的影響	水質	pH 値の増加(高アルカリ化)	吹付けコンクリートのアルカリ成分の溶脱	○	○	○
			ロックボルトの定着材のアルカリ成分の溶脱	○	○	○
			グラウト材のアルカリ成分の溶脱	○	○	○
			周辺からの地下水の高 pH の流入	○	○	○
			坑道周辺の間隙水圧の低下による溶存気体の脱気	○	○	○
			廃棄体の熱(温度上昇)による水質の変化		○	○
		pH 値の低下(酸性化)	坑道の大气からの気体(CO <sub>2</sub> 等)の地下水への溶解	○	○	○
			周辺からの地下水の低 pH の流入	○	○	○
			廃棄体の熱(温度上昇)による水質の変化		○	○
		電気伝導度	電気伝導度の変動	水質・溶存イオンの変化	○	○
	溶存気体(酸素など), 溶存イオン	溶存気体(酸素など), 溶存イオンの変化	坑道周辺の水質とは異なる地表水の流入	○	○	○
			坑道周辺の飽和領域における大气との接触	○	○	○
	その他	ガス(水素)の発生	還元環境における鋼材の腐食			○
	酸化還元状態	酸化還元電位(Eh)	酸化還元電位(Eh)の変動	水質・溶存イオンの変化	○	○
廃棄体の熱(温度上昇)による影響					○	○
大气からの微生物の進入と酸化反応の促進			○	○	○	
	酸化還元フロントの変動	不飽和領域の変化	○	○	○	
起源・年代		水質変化	異なる起源・年代の地下水の流入	○	○	○

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり

表 6.2.2-18 ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理【周辺岩盤・熱的影響】

整理の観点	周辺岩盤と人工バリアの特性		特性の変化	原因	処分場建設時	埋め戻し以前	埋め戻し以降	
熱的影響	温度環境	地温分布, 地温勾配	変動	流入する地下水の温度	○	○	○	
				坑道の大気温度の影響	○	○	○	
				廃棄体の熱		○	○	
		地下水の温度	変動	地表水の流入による低下	○	○	○	
				季節変動	○	○	○	
				坑道の大気温度の影響	○	○	○	
	熱伝導性	熱物性	熱伝導率	変動	発破損傷	○		
					応力再配分による緩み領域の発達	○	○	○
					飽和度の低下	○	○	○
			密度	変動	発破損傷	○		
					応力再配分による緩み領域の岩盤・岩石の体積増加	○	○	○
					比熱	変動	発破損傷による割れ目・微小クラックへの水, 空気の進入	○
		応力再配分による割れ目・微小クラックへの水, 空気の進入	○	○	○			
		線膨張率	変動	割れ目・微小クラックによる膨張変形の吸収	○	○	○	

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり

表 6.2.2-19 ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理【人工バリア・放射線の影響】

整理の観点	人工バリアの特性		特性の変化	原因	処分場建設時	埋め戻し以前	埋め戻し以降
放射線影響	緩衝材(間隙)	間隙水		ガラス固化体からの放射線の影響		○	
		空気		ガラス固化体からの放射線の影響		○	

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり

表 6.2.2-20 ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理【人工バリア・熱的影響】

整理の観点	人工バリアの特性		特性の変化	原因	処分場建設時	埋め戻し以前	埋め戻し以降
熱的影響	緩衝材	膨潤特性	劣化	熱によるベントナイトの変質		○	
		比熱	変動	熱による緩衝材含水比の変動		○	○
		熱伝導率	変動	熱による緩衝材含水比の変動		○	○

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり

表 6.2.2-21 ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理【人工バリア・力学的影響】

整理の 観点	人工バリアの特性		特性の 変化	原因	処分場 建設時	埋め戻し 以前	埋め戻し 以降
力学的 影響	オーバー パック	強度	劣化	オーバーパック腐食による減肉		○	○
		遮へい性	劣化	オーバーパック腐食による減肉		○	○
	緩衝材	膨潤特性	劣化	緩衝材膨潤および腐食膨張による 緩衝材変形による密度低下		○	
		止水性	劣化	緩衝材膨潤および腐食膨張による 緩衝材変形による密度低下		○	
		核種吸着性	劣化	緩衝材膨潤および腐食膨張による 緩衝材変形による密度低下		○	
	PEM 容器	強度	劣化	PEM 容器の腐食による減肉		○	○

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり

表 6.2.2-22 ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理【人工バリア・水理学的影響】

整理の 観点	人工バリアの特性		特性の 変化	原因	処分場 建設時	埋め戻し 以前	埋め戻し 以降
水理学的 影響	緩衝材	膨潤特性	劣化	湧水による緩衝材の流出による密 度低下		○	
		止水性	劣化	湧水による緩衝材の流出による密 度低下		○	
		核種吸着性	劣化	湧水による緩衝材の流出による密 度低下		○	
		透水係数	劣化	湧水による緩衝材の流出による密 度低下		○	

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり

表 6.2.2-23 ニアフィールドに発生する現象とその時期の整理【人工バリア・化学的影響】

整理の 観点	人工バリアの特性		特性の 変化	原因	処分場 建設時	埋め戻し 以前	埋め戻し 以降
化学的 影響	オーバー パック	耐食性	変動	地下水質の変化による腐食速度の 変動		○	○
		緩衝材	膨潤特性	劣化	地下水質および腐食生成物による 緩衝材の劣化		○
	止水性		劣化	地下水質および腐食生成物による 緩衝材の劣化		○	○
	核種吸着性		劣化	地下水質および腐食生成物による 緩衝材の劣化		○	○
	PEM 容器	耐食性	劣化	地下水質の変化による腐食速度の 変動		○	○

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり

(8) 埋め戻し時期の違いによる従来と異なる現象の抽出

埋め戻さない時期が長くなることにより、従来の処分概念で考慮されてきた変化が加速する現象や、新たに生じる現象が存在する可能性がある。そのため、一定期間埋め戻さない場合に、特に留意することが必要な事項について抽出と整理を行う必要があると考える。ここでは、前項までの検討で整理してきた情報を用いて、一定期間埋め戻さない時期が存在した場合の影響について評価を行った。評価は、埋め戻さない期間の影響（操業安全性）と一定期間埋め戻さない期間を経た後の長期の影響（閉鎖後長期安全性）の両面から言及することとした。

1) 周辺岩盤に発生する現象とその時期の整理

a. 力学的影響

埋め戻さない期間の影響については、埋め戻した場合と比較すると、空洞周辺に作用する応力が大きいことが予想され、時間依存性挙動も大きくなることが予想される。具体的には時間依存性挙動の進行により 3 次クリープが始まりひずみの急激な増大により周辺岩盤の塑性化が始まり、さらに領域も拡大することが考えられる。ただし、時間依存性挙動は岩盤の力学的特性と周辺の応力場によって決定されるため、挙動が収束することもある。

岩盤の変形や破壊に関わる力学的な挙動は、微視亀裂の進展が起点となっていることが分かっている[52]。一般的に、花崗岩の一軸荷重試験の応力-ひずみ曲線は、図 6.2.2-78 に示すように 4 つの段階（Stage I, II, III, IV）に分けて考えることができる[53]。市川らはこの 4 つの段階を念頭に置いて顕微鏡観察下の一軸荷重試験を実施し微視亀裂の進展を確認している[54]。例として Stage I から Stage II における亀裂の進展の様子を図 6.2.2-79 に示す。図に示すように、微視亀裂の進展が確認される。

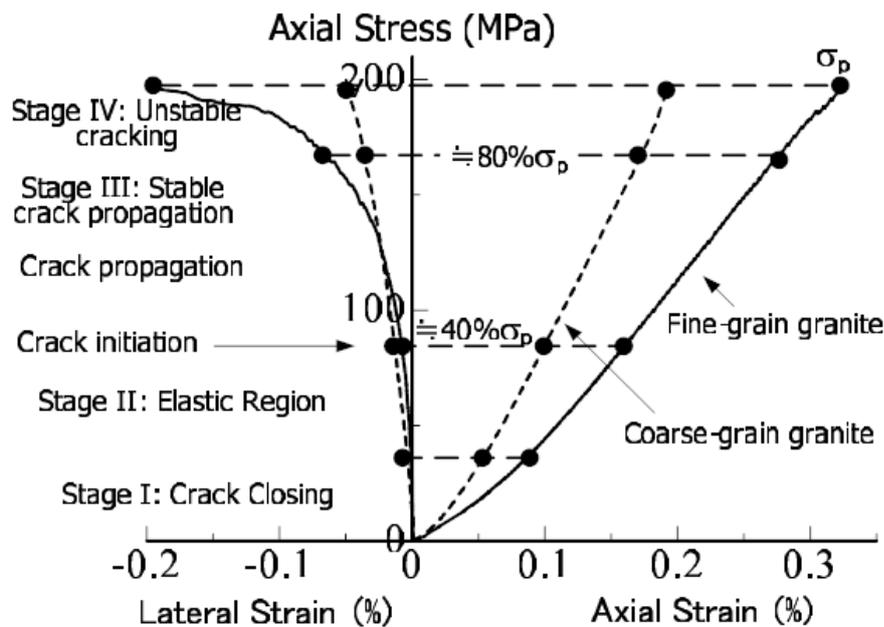


図 6.2.2-78 一軸荷重試験の応力-ひずみ曲線

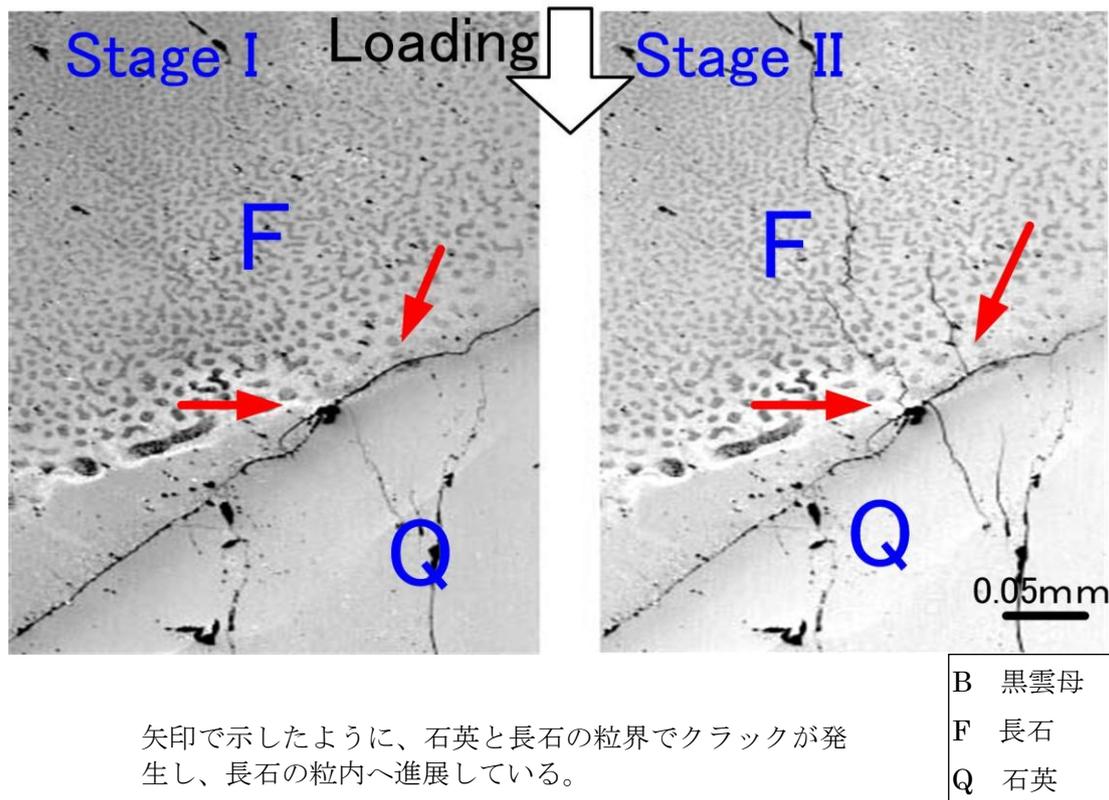


図 6.2.2-79 クラックの進展の例

また破壊を対象とした破壊力学では、力学的な観点から基礎理論が既に体系づけられており、材料の理論強度に関しても原子間力を基に明らかにされている。亀裂の進展の基準として、理論的には亀裂先端における応力分布に関する応力拡大係数（亀裂先端付近の応力分布を表す係数）に基づき破壊靱性値（亀裂進展のしきい値）が求められ、この破壊靱性値を超えると亀裂が進展すると言われている。しかし実際には破壊靱性値よりも小さい応力でも亀裂が進展することが室内実験の結果より分かってきた。この現象を亜臨界亀裂進展（subcritical crack growth）と言う。亜臨界亀裂進展では亀裂先端における水と鉱物の反応などによる化学的な要因により亀裂の進展が促進されることが分かってきた。このように微視亀裂の進展には、力学的要因のほか、化学的な要因が確認されている。岩盤のクリープや応力緩和といった時間依存性における長期挙動では、瞬間的な弾性挙動に対して化学反応が進行する時間が充分にあるため、化学的要因が微視亀裂の進展に寄与する割合が大きい。よって、岩盤の長期挙動の研究では、応力と化学反応が連成した現象を理解することが重要である。一定期間埋め戻さない期間を得た後の長期の影響については、埋め戻さない期間中に進行した塑性域に水が侵入することによって亜臨界亀裂進展が加速される可能性がある。亜臨界亀裂進展の主要なメカニズムについてはいくつかあるが、本研究に関するものでは鉱物の圧力溶解が挙げられる。岩盤に含まれるケイ酸塩鉱物は一定以上の応力が作用すると溶解が促進される。この現象を圧力溶解という[54]。市川らは、結晶質岩の微視レベルの挙動に深く関わっている鉱物の圧縮応力下の溶解現象を確認するために、

石英単結晶供試体を用いた圧縮試験を実施し、溶解および再沈殿した石英表面の形状を走査型共焦点レーザー顕微鏡で観察した[54]。その結果例を図 6.2.2-80 に示す。下図は一定応力下で載荷した後の石英供試体の表面図であり、その上の図は点線で切った表面の断面図の起伏を表している。溶解した部分が深くえぐられていることが分かる。溶解した石英は外部に拡散現象によって運ばれるが、外部水中では容易に溶解限度を超えるので、周囲に再沈殿する。その様子が捉えられている。

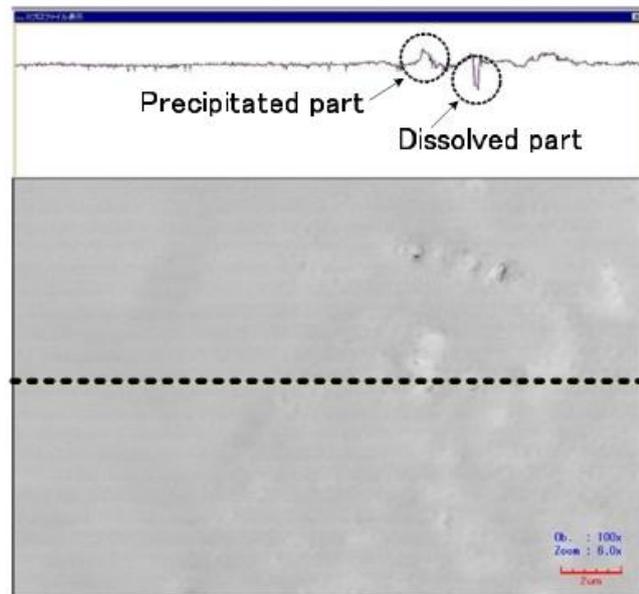


図 6.2.2-80 石英供試体表面の顕微鏡観察結果（圧力溶解の様子）

圧力溶解は水の供給量に応じて溶解が制御されるため、水の供給量が多いとある応力下では圧力溶解が進行する。よって水の供給が絶えず行われると亜臨界亀裂進展が促進される可能性がある。

さらに市川は圧力溶解速度について応力、温度、間隙水圧、 $\text{pH}$  をパラメータとした圧力溶解速度式を構築した[54]。この研究はまだ途上であり、圧力溶解速度と亀裂の進展を結び付ける式は未だ研究段階である。しかしながら、冒頭で記述した通り、岩盤の変形や破壊に係る挙動は、微視亀裂の進展が起点となっていることから、圧力溶解が進行すると微視亀裂が進展し岩盤の変形や破壊が進行すると考えることができる（図 6.2.2-81）。

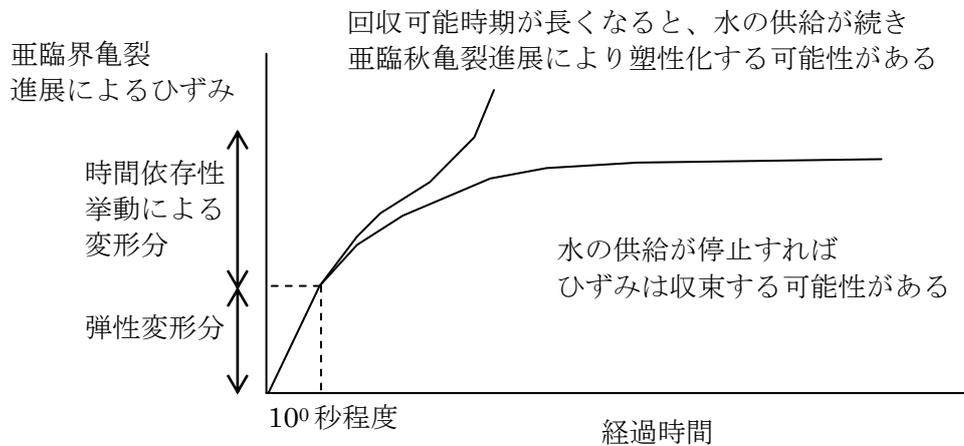


図 6.2.2-81 応力再配分の例

以上から、埋め戻さない時期に空洞周辺岩盤の奥から空洞側の方に水の流入（供給）が絶えず起これば、鉱物の圧力溶解が進み、微視亀裂の進展を基にした時間依存性挙動による長期挙動はより進行すると考えられ、微視亀裂の進展による応力場の変化や力学特性の変化が大きくなると考えられる。

#### b. 水理学的影響

回収維持期間を設けずに埋め戻す場合と、長期にわたり回収維持を可能とするために坑道を埋め戻さない場合との、水理的影響の観点からの最も大きな違いは、坑道への排水の継続により坑道周辺での水圧低下の影響が広範囲に及ぶことである。

先に示したとおり、坑道周辺の水圧が低下した領域では、水理学的影響の観点からは次のような特性変化が生ずると予測される。

坑道掘削時の発破損傷や応力再配分による透水性の変化

異なった性質の地下水の流入による岩石成分の溶解などによる透水性の変化

このような影響を受ける領域がどの程度となるかは、回収維持期間の長さや地形や地質などの影響を受ける可能性があることから、十分な検討が必要である。

また、その後の埋戻しによって、水圧低下の影響を受けた領域が坑道掘削前の状態に復帰するかについても検討課題となる。処分坑道の回収維持期間が長い場合には、水圧の低下領域が極めて広範囲に及ぶ可能性があり、特に立坑周辺では地下水の岩盤からの排水が継続されることで大きな動水勾配が保たれ、周囲の透水性の分布によっては圧力低下領域の拡大が続くことも想定される。仮に、広範囲にわたって圧力低下領域が発達してしまった場合には、処分坑道の冠水に要する時間が長くなり、緩衝材や埋戻し材の膨潤によるシール性や、廃棄体の発熱に伴う温度分布などが想定と異なってくる可能性がある。また、緩衝材の埋戻し材の膨潤圧や廃棄体の発熱による温度応力が、水圧低下領域に対してどのよ

うな影響を及ぼすのかについても検討しておく必要がある。

これらのことから、処分坑道を一定期間埋め戻さない期間を経た後の長期の影響として、以下の点に注意すべきである。

- 再冠水の影響
- 緩衝材、埋戻し材の膨潤圧
- 廃棄体の発熱の影響

#### c. 化学的影響

長期にわたり坑道を埋め戻さない場合には、酸素や微生物が供給され続けることから、想定以上の腐食や有害物質の発生などが懸念される。また、水圧低下の領域が拡大し続ける場合には、遠方の地下水を坑道内に導くこととなり、地下水の化学的性質が想定と異なる変化をすることも考えられる。ただし、地下水やガスなどの間隙流体の流れが坑道内空に向かうものとなることから、このような流れが維持されている限りは、岩盤内部へ酸素や微生物が浸入することは考えにくく、岩盤に関しては化学的影響が岩盤表面で起こる変化に限定されると推定できる。また、回収維持期間では異なった性質の地下水が周辺岩盤に侵入し、種々の化学変化を生ずる可能性があるものの、処分坑道埋戻しによる再冠水後は地下水流れの変動が終了し、地下水は一定の化学的平衡に達することから、長期的には化学的影響は小さくなると推定できる。

一方で、廃棄体の発熱に伴う周辺岩盤に生ずる化学変化に注目すると、坑道周辺に発達すると予想される不飽和領域の大きさによっては、想定と異なる酸化還元環境や微生物の影響が生ずることも考えられる

これらのことから、処分坑道を一定期間埋め戻さない期間を経た後の長期の影響として、以下の点に注意すべきである。

- 不飽和領域の変化
- 廃棄体の発熱の影響

#### d. 熱的影響

周辺岩盤の熱的性質に影響を及ぼす特性のうち、最も影響の大きいものは熱伝導率であることは先に述べたとおりである。熱伝導率は、岩盤実質部の熱伝導率と空隙の形状や密度、連続性などに依存するほか、岩盤の飽和度の影響を受け、飽和度が低い場合には熱伝導率が低下する。

廃棄体の発熱に伴う影響を評価する際に、長期にわたり坑道を埋め戻さない場合を想定すると、坑道の空気が断熱材の役割をすることから、埋め戻さない場合に比べて温度上昇が大きくなることが2次取りまとめでも解析的に示されている。また、蒸気が発生などにより坑道の維持に支障をきたすことも考えられる。

一方で、処分坑道埋戻し後の再冠水について考えると、坑道周辺に発達すると予想される不飽和領域の大きさによっては、想定より再冠水の速度が小さくなることが推定できる。このような場合には、熱伝導率が小さい状態に保たれ、廃棄体の発熱による温度変化が想

定を超えることも予想される。

これらのことから、処分坑道を一定期間埋め戻さない期間を経た後の長期の影響として、以下の点に注意すべきである。

- 不飽和領域の変化
- 廃棄体の発熱の影響

## 2) 人工バリアに発生する現象とその時期の整理

坑道が一定期間埋め戻されない場合、オーバーパックにおいては、腐食環境として酸性環境における期間が長くなることである。

緩衝材においては、温度の影響として坑道があいていることにより、人工バリアの温度が 100℃以上に上昇する可能性があり対策が必要であること、湧水の影響による緩衝材の変状およびオーバーパックの腐食膨張による緩衝材の変状がある場合、密度低下に起因する緩衝材膨潤特性、止水性、核種吸着性能が低下する可能性があり対策が必要となる。

PEM 容器においては、緩衝材の膨潤による内圧の発生により変形する可能性もあり、設計時点において坑道内の環境や状態を考慮しておく必要がある。

処分施設の安全性に影響する特性の変化について、一定期間埋め戻ししない場合に留意することが必要な現象について検討を行った。これらに基づき、埋め戻さない時期が長くなることにより、従来の処分概念と比べて特性の変化が増大する事項について整理した結果を表 6.2.2-24 ～表 6.2.2-32 に示す。

表 6.2.2-24 一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象【周辺岩盤・力学的影響】

整理の 観点	周辺岩盤の特性		特性の 変化	原因	処分場 建設時	埋め戻し 以前	埋め戻し 以降	
力学的影響	応力場	(坑道周辺) 応力分布		変動	発破損傷	○		
					岩盤・岩石・割れ面の劣化(クリープ+微視的クラックの発達)		◎	◎
					支保の変質・劣化・消失		◎	◎
					廃棄体の熱応力		○	○
					廃棄体の腐食膨張圧			○
					緩衝材の膨潤(圧), 変質, 溶解			○
					埋め戻し材の膨潤(圧), 変質, 溶解			○
	力学特性	強度特性	一軸圧縮強度	低下	発破損傷	○		
					劣化(+微視的クラックの発達)		◎	◎
			せん断強度	低下	発破損傷	○		
					劣化(+微視的クラックの発達)		◎	◎
		内部摩擦角	低下	発破損傷	○			
				劣化(+微視的クラックの発達)		◎	◎	
		変形特性	弾性係数	低下	発破損傷	○		
劣化(+微視的クラックの発達)						◎	◎	
ポアソン比	増加		発破損傷	○				
			劣化(+微視的クラックの発達)		◎	◎		

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり，◎：特性の変化増大の可能性あり

表 6.2.2-25 一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象【周辺岩盤・水理学的影響】

整理の 観点	周辺岩盤の特性		特性の変化	原因	処分場 建設時	埋め戻し 以前	埋め戻し 以降	
水理学的影響	水理場	動水勾配	動水勾配の増大	坑道が大気圧環境となるため	○	○		
			動水勾配の低下	隣接坑道の構築による間隙水圧の低下 埋め戻し後の再冠水		○	○	
		間隙水圧	間隙水圧の変動	坑道周辺は大気圧状態に近い	坑道周辺は大気圧状態に近い	○	○	○
				隣接坑道の構築による間隙水圧の低下	隣接坑道の構築による間隙水圧の低下		○	○
				埋め戻し後の再冠水	埋め戻し後の再冠水			◎
				地震による地下水流動	地震による地下水流動	○	◎	◎
	(岩盤の透水性) 水理物性	透水係数	坑道周辺 岩盤基質部 :透水性/透水係数 の増加	発破損傷	発破損傷	○		
				掘削に伴う応力再配分による応力低減	掘削に伴う応力再配分による応力低減	○	◎	◎
				地下水水質の化学的作用(鉱物の溶解)による材料変質	地下水水質の化学的作用(鉱物の溶解)による材料変質		◎	◎
			坑道周辺 岩盤基質部 :透水性/透水係数 の減少	掘削に伴う応力再配分による応力増加	掘削に伴う応力再配分による応力増加	○	◎	◎
				地下水中の2次鉱物の沈殿による間隙の減少	地下水中の2次鉱物の沈殿による間隙の減少		◎	◎
				微生物による酸化物の沈殿	微生物による酸化物の沈殿	○	◎	◎
		坑道周辺 岩盤割れ目 :透水性/透水係数 の増加	発破損傷による新規の割れ目の発生	発破損傷による新規の割れ目の発生	○			
			掘削に伴う応力再配分による割れ目の開口	掘削に伴う応力再配分による割れ目の開口	○	◎	◎	
			応力再配分による新規の割れ目の発生	応力再配分による新規の割れ目の発生	○	◎	◎	
			割れ目内の充填鉱物の溶解による通水性の増加	割れ目内の充填鉱物の溶解による通水性の増加		◎	◎	
			廃棄体の熱応力による応力再配分 緩衝材・埋め戻し材の膨潤圧	廃棄体の熱応力による応力再配分 緩衝材・埋め戻し材の膨潤圧		○	○	
		坑道周辺 岩盤割れ目 :透水性/透水係数 の減少	掘削に伴う応力再配分による割れ目の閉合	掘削に伴う応力再配分による割れ目の閉合	○	◎	◎	
			地下水中の2次鉱物の沈殿による割れ目内の通水性の低下	地下水中の2次鉱物の沈殿による割れ目内の通水性の低下		◎	◎	
			微生物による酸化物の沈殿による割れ目内の通水性の低下	微生物による酸化物の沈殿による割れ目内の通水性の低下	○	◎	◎	
廃棄体の熱応力による応力再配分	廃棄体の熱応力による応力再配分			○	○			
緩衝材・埋め戻し材の膨潤圧	緩衝材・埋め戻し材の膨潤圧			○	○			

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり，◎：特性の変化増大の可能性あり

表 6.2.2-26 一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象【周辺岩盤・化学的影響】

整理の 観点	周辺岩盤の特性		特性の変化	原因	処分場 建設時	埋め戻し 以前	埋め戻し 以降
化学的 影響	水質	pH	pH 値の増加(高アルカリ化)	吹付けコンクリートのアルカリ成分の溶脱	○	◎	◎
				ロックボルトの定着材のアルカリ成分の溶脱	○	◎	◎
				グラウト材のアルカリ成分の溶脱	○	◎	◎
				周辺からの地下水の高 pH の流入	○	◎	◎
				坑道周辺の間隙水圧の低下による溶存気体の脱気	○	◎	◎
				廃棄体の熱(温度上昇)による水質の変化		◎	◎
			pH 値の低下(酸性化)	坑道の大气からの気体(CO <sub>2</sub> 等)の地下水への溶解	○	◎	◎
				周辺からの地下水の低 pH の流入	○	◎	◎
				廃棄体の熱(温度上昇)による水質の変化		◎	◎
	電気伝導度	電気伝導度の変動	水質・溶存イオンの変化	○	◎	◎	
	溶存気体(酸素など), 溶存イオン	溶存気体(酸素など), 溶存イオンの変化	坑道周辺の水質とは異なる地表水の流入	○	◎	◎	
			坑道周辺の飽和領域における大气との接触	○	◎	◎	
	その他	ガス(水素)の発生	還元環境における鋼材の腐食			○	
	酸化還元状態	酸化還元電位(Eh)	酸化還元電位(Eh)の変動	水質・溶存イオンの変化	○	◎	◎
廃棄体の熱(温度上昇)による影響					◎	◎	
酸化還元フロントの変動			大气からの微生物の進入と酸化反応の促進	○	◎	◎	
不飽和領域の変化		○	◎	◎			
起源・年代		水質変化	異なる起源・年代の地下水の流入	○	◎	◎	

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり，◎：特性の変化増大の可能性あり

表 6.2.2-27 一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象【周辺岩盤・熱的影響】

整理の観点	周辺岩盤と人工バリアの特性		特性の変化	原因	処分場建設時	埋め戻し以前	埋め戻し以降	
熱的影響	温度環境	地温分布, 地温勾配	変動	流入する地下水の温度	○	◎	◎	
				坑道の大気温度の影響	○	◎	◎	
				廃棄体の熱		◎	◎	
		地下水の温度	変動	地表水の流入による低下	○	◎	◎	
				季節変動	○	◎	◎	
				坑道の大気温度の影響	○	◎	◎	
	熱伝導性	熱物性	熱伝導率	変動	発破損傷	○		
					応力再配分による緩み領域の発達	○	◎	◎
					飽和度の低下	○	◎	◎
			密度	変動	発破損傷	○		
					応力再配分による緩み領域の岩盤・岩石の体積増加	○	◎	◎
					比熱	変動	発破損傷による割れ目・微小クラックへの水, 空気の進入	○
		応力再配分による割れ目・微小クラックへの水, 空気の進入	○	◎	◎			
		線膨張率	変動	割れ目・微小クラックによる膨張変形の吸収	○	◎	◎	

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり，◎：特性の変化増大の可能性あり

表 6.2.2-28 一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象【人工バリア・放射線の影響】

整理の観点	人工バリアの特性		特性の変化	原因	処分場建設時	埋め戻し以前	埋め戻し以降
放射線影響	緩衝材(間隙)	間隙水		ガラス固化体からの放射線の影響		◎	
		空気		ガラス固化体からの放射線の影響		○	

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり，◎：特性の変化増大の可能性あり

表 6.2.2-29 一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象【人工バリア・熱的影響】

整理の観点	人工バリアの特性		特性の変化	原因	処分場建設時	埋め戻し以前	埋め戻し以降
熱的影響	緩衝材	膨潤特性	劣化	熱によるベントナイトの変質		◎	
		比熱	変動	熱による緩衝材含水比の変動		◎	○
		熱伝導率	変動	熱による緩衝材含水比の変動		◎	○

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり，◎：特性の変化増大の可能性あり

表 6.2.2-30 一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象【人工バリア・力学的影響】

整理の 観点	人工バリアの特性		特性の 変化	原因	処分場 建設時	埋め戻し 以前	埋め戻し 以降
力学的 影響	オーバー パック	強度	劣化	オーバーパック腐食による減肉		◎	○
		遮へい性	劣化	オーバーパック腐食による減肉		◎	
	緩衝材	膨潤特性	劣化	緩衝材膨潤および腐食膨張による 緩衝材変形による密度低下		◎	
		止水性	劣化	緩衝材膨潤および腐食膨張による 緩衝材変形による密度低下		◎	
		核種吸着性	劣化	緩衝材膨潤および腐食膨張による 緩衝材変形による密度低下		◎	
	PEM 容器	強度	劣化	PEM 容器の腐食による減肉		◎	○

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり，◎：特性の変化増大の可能性あり

表 6.2.2-31 一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象【人工バリア・水理学的影響】

整理の 観点	人工バリアの特性		特性の 変化	原因	処分場 建設時	埋め戻し 以前	埋め戻し 以降
水理学的 影響	緩衝材	膨潤特性	劣化	湧水による緩衝材の流出による密 度低下		◎	
		止水性	劣化	湧水による緩衝材の流出による密 度低下		◎	
		核種吸着性	劣化	湧水による緩衝材の流出による密 度低下		◎	
		透水係数	劣化	湧水による緩衝材の流出による密 度低下		◎	

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり，◎：特性の変化増大の可能性あり

表 6.2.2-32 一定期間埋め戻ししない場合に特性の変化が増大する現象【人工バリア・化学的影響】

整理の 観点	人工バリアの特性		特性の 変化	原因	処分場 建設時	埋め戻し 以前	埋め戻し 以降
化学的 影響	オーバー バック	耐食性	変動	地下水質の変化による腐食速度の変動		◎	○
	緩衝材	膨潤特性	劣化	地下水質および腐食生成物による緩衝材の劣化		◎	○
		止水性	劣化	地下水質および腐食生成物による緩衝材の劣化		◎	○
		核種吸着性	劣化	地下水質および腐食生成物による緩衝材の劣化		◎	○
	PEM 容器	耐食性	劣化	地下水質の変化による腐食速度の変動		◎	○

凡例 ○：特性の変化が生じる可能性あり

### (9) 処分施設の安全性に及ぼす影響の抽出と整理

前述の(1)～(8)において、一定期間埋め戻さない状態が継続した場合における処分施設の安全性に及ぼす影響について、可能な限り詳細に検討と評価を実施した。

- ・岩盤や人工バリアそのものの力学的・水理学的・化学的・熱的な変化について、個々の特性まで詳細化して抽出と整理

- ・坑道内で使用する構成要素を拾い出すとともに、その使用材料の単位まで詳細化した長期的な挙動の整理

これらの検討により抽出された埋め戻し時期の違いにより考慮すべき現象を踏まえ、一定期間埋め戻ししない期間がある場合の処分施設の安全性に及ぼす影響を以下に述べる。

#### 1) 周辺岩盤

周辺岩盤の力学的、水理学的、化学的、熱的影響の各観点から、処分施設の安全性に及ぼす影響を以下にまとめる。

周辺岩盤の力学的影響としては、岩盤の時間依存性挙動による剛性の低下や、支保や覆工の劣化に伴う坑道の耐力の低下などが考えられる。水理学的影響としては、不飽和層の変化や裏面排水工の劣化による周辺岩盤の間隙水圧の変化、力学的影響と関連した岩盤の時間依存性挙動や岩盤の劣化による透水性の変化による水理場への影響などが挙げられる。化学的な影響としては、酸化環境が継続することによる支保材料など鋼材の腐食が考えられる。また、支保や覆工などに用いられるセメントによる高アルカリ環境の継続の影響を受け、緩衝材の変質が進行していくことも考慮する必要がある。熱的な影響として、坑道内に空気が存在し続けることによる坑内温度の上昇は第2次取りまとめにおいて既に示されているが(表 6.2.2-33[1]、図 6.2.2-82、図 6.2.2-83)、岩盤の熱的な特性は時間的依存性挙動によって変化することも考えられるため、坑内温度の上昇は力学的影響による熱的特性の変化を考慮する必要があると考えられる。一方で、熱的影響は地下水の流れに変化を与え、また温度上昇による化学反応の促進などを生じさせるため、これらの影響も検討

の視野に入れる必要がある。

このように一定期間埋め戻ししない期間がある場合、周辺岩盤の各観点からの変化が増大していく可能性がある。また、それぞれの変化は相互に影響し合う。これらの変化の度合いは岩盤の種類や物性の不均質性、応力分布や温度分布などの場に左右されることが考えられる。

表 6.2.2-33 隙間を考慮したモデルの解析ケース[1]

ケース名	隙間の位置		
	ガラス固化体 - オーバーパック間	オーバーパック - 緩衝材間	緩衝材 - 岩盤間
CASE.A	空気	空気	空気
CASE.B	空気	粉末ベントナイト	粉末ベントナイト
CASE.W	空気	水	水

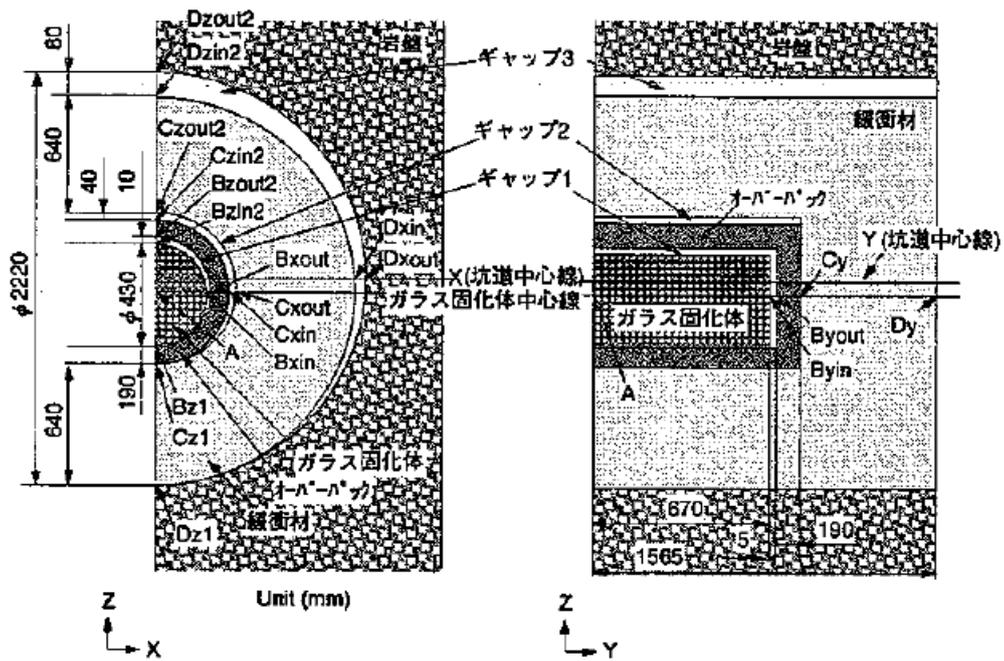


図 6.2.2-82 隙間と人工バリアの寸法および解析出力点 (処分坑道横置き方式) [1]

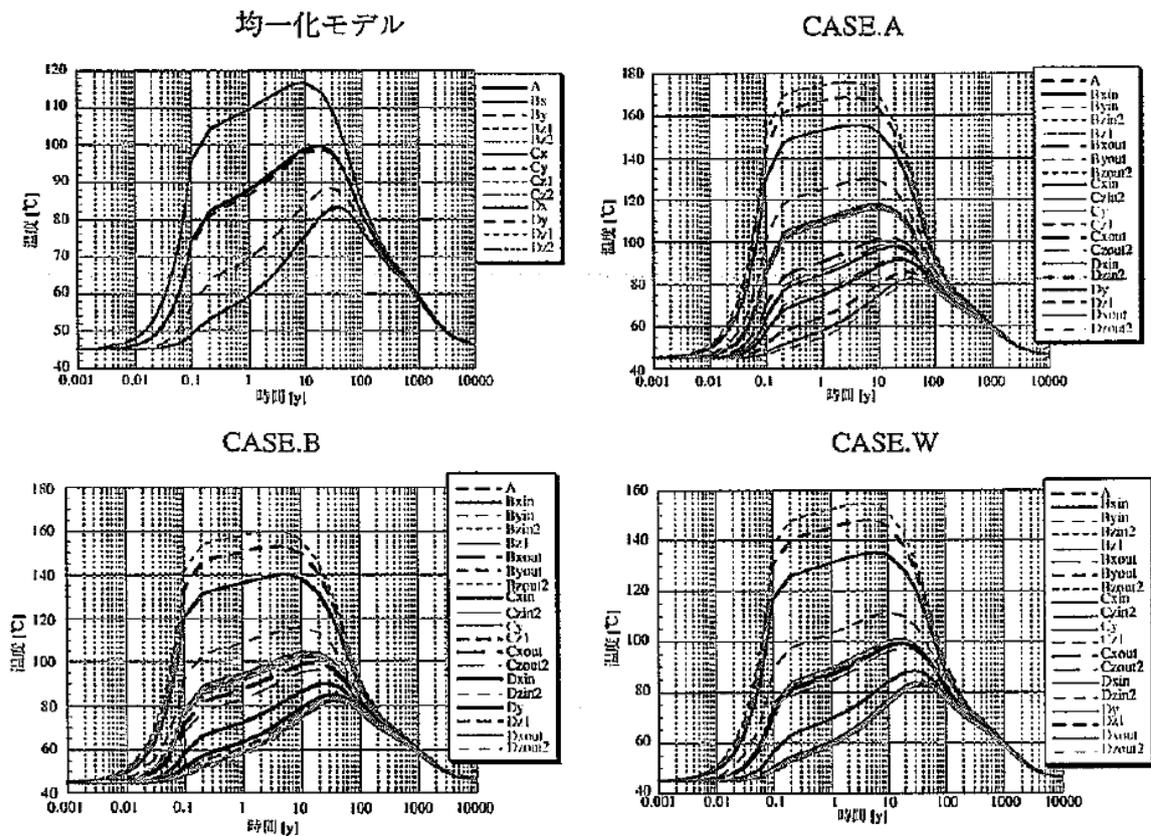


図 6.2.2-83 温度の経時変化 (硬岩系岩盤処分横置き方式) [1]

(処分坑道離間距離 : 13.32m, 廃棄体ピッチ : 3.13m, 廃棄体占有面積 : 41.69m<sup>2</sup>/本)

## 2) 人工バリア

処分坑道が一定期間埋め戻されない場合、オーバーパックにおいては、酸化性環境における腐食評価となる。

緩衝材においては、温度の影響として人工バリアの温度が 100℃以上に上昇する可能性があり対策が必要であること、湧水の影響による緩衝材の変状およびオーバーパックの腐食膨張による緩衝材の変状がある場合、密度低下に起因する緩衝材膨潤特性、止水性、核種吸着性能に影響する可能性があり対策が必要となる。

PEM 容器においては、酸化性環境における腐食評価となる。また、PEM 容器内部の緩衝材の湧水による膨潤による内圧が発生し PEM 容器の変形や破損の可能性があるとともに、緩衝材の変形などへの影響が考えられ、設計時点において坑道内の環境状態を考慮する必要がある。

以上より、処分施設における部材・材料の単位で考えられる変化（劣化）の性状は、周辺岩盤、人工バリアともに図 6.2.2-84 のような概念になると考えられる。

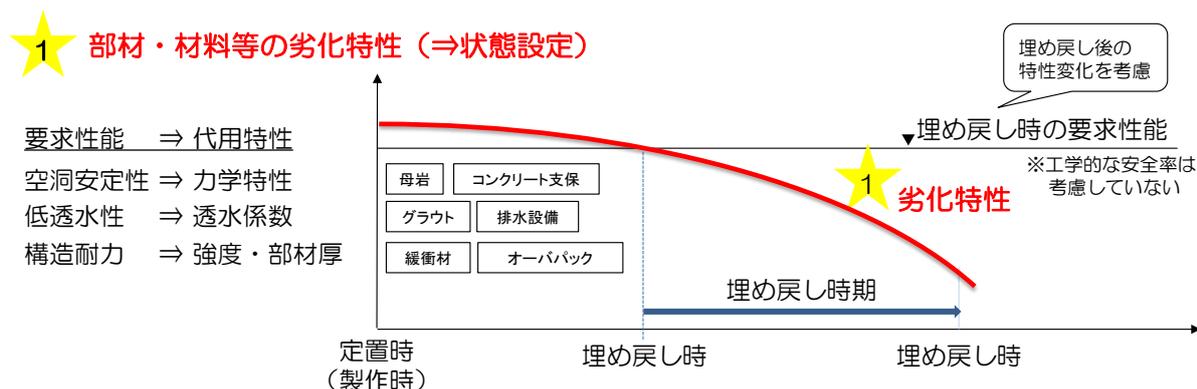


図 6.2.2-84 部材や材料の劣化特性のイメージ

一定期間埋め戻ししない期間がある場合の処分施設の安全性に及ぼす影響と、それらを考慮した処分施設の安全性確保についてまとめると以下のとおりである。

- ①一定期間埋め戻さない状態が継続した場合、基本的に処分施設の安全性を損なう方向の状態変化が進行するが、これらは従来(短い期間埋め戻さない状態)と同様な因子と考えられる。したがって、状態変化の増大が問題となるものとする。
- ②不確実性の大きな岩盤内での状態変化は、力学的・水理的・化学的・熱的な連成した挙動となり、処分施設の(操業時)安全性確保のためには、その変化を継続的に把握し、対策を施す維持管理が重要であるとする。

### 6.2.3 研究開発課題の抽出と集約

前項までで実施した処分施設への安全性に及ぼす影響の検討を踏まえ、研究開発課題を集約し、表 6.2.3-1～表 6.2.3-2 に示す。これらから、一定期間埋め戻さないことを前提とした場合、処分施設への安全性に及ぼす影響の論点から抽出された課題は多種、多岐にわたることがわかる。また、様々な現象が相互に影響し合うことから、複雑な連成現象のメカニズムの解明、評価手法の確立や各種技術の向上により、処分施設に及ぼす影響の予測の精度を向上させていくことが必要である。

ここで挙げられた課題は、JAEA の超深地層研究所をはじめとする各種研究機関で既に取り組みが行われているものも多くあり（例えば[14][52][54][67][69]）、一定期間埋め戻さない状態が継続した場合の空洞安定性の検討にあたっては、これらの研究成果を取り入れながら検討を実施していく必要がある。しかしながら、問題となる現象や挙動の多くは岩盤の特性に依存するため、処分場の対象となる岩盤が決まっていない現時点で詳細な検討や予測を行うことは難しいと考えられる。そこで、坑道に関する安全確保について考えると、既に供用中の施設において国交省等の関与のもと各事業者が維持管理（補修や補強，点検，モニタリング方法）に関する方法・手段を確立しており、これらを参考に計画することが安全を確保していく方策の一つと考えられる。また同様に、人工バリアについても原子力関連施設において実施されている維持管理に関する方法・手段を参考に計画することが安全確保のための方策の一つと考えられる。

表 6.2.3-1 研究開発課題および技術開発課題の整理（周辺岩盤・処分坑道）

No.	課題名称	課題の概要	課題が生じる要因と原因
1	破壊規準の設定と塑性域の評価	適切な破壊規準を設定することにより、より正確に塑性域を評価する	岩石の亀裂の挙動および破壊に関して不明点が多い
2	コンプライアンス可変型構成方程式の原位置実証試験	原位置において長期試験を行い、コンプライアンス可変型構成方程式の原位置岩盤への適用性を評価する	測定器の選定、測定条件の設定および測定条件の現位置適用性の検討が必要
3	圧力溶解が寄与する長期挙動評価	鉱物の圧力溶解を考慮し、微視亀裂の進展とひずみの挙動を結び付けて定量的に評価する	実験データの不足、原位置試験の計画が困難
4	コンプライアンス可変型構成方程式の発展	鉱物の圧力溶解理論をコンプライアンス可変型構成方程式に組み込む	コンプライアンス可変型構成方程式には水などの化学的要素が未考慮
5	支保、覆工材料の時間依存性挙動	支保、覆工材料について時間依存性挙動を明らかにする	岩盤の時間依存性挙動に関する理論、モデルについて研究段階
6	岩盤の劣化と透水性の関係	坑道周囲の岩盤の劣化現象と岩盤の透水性との関連性を明らかにする	岩盤の時間依存性挙動を考慮した透水性に関する理論、モデルは研究段階
7	坑道周囲の不飽和領域の評価	地下水にガスが含まれている場合などにおいて、坑道周辺岩盤に生ずる不飽和領域を予測する	岩盤の劣化による透過率の変化、湧ガス量が増加する多相流問題に関して不明点が多い
8	地震時の地下水挙動評価	排水設備の設計および覆工設計に資するため、地震時における湧水量変化および間隙水圧変化を予測する	地震時の地下水挙動は研究段階
9	湧水抑制対策工の評価と地震時予測	グラウト施工による改良効果の評価と地震時の変化を予測する	上記課題（No. 8）実施時に併せて必要
10	岩盤内部の酸化還元領域の評価	坑道が埋め戻さない状態で酸素が供給され続けた場合の岩盤の酸化還元領域を予測する	地下水流れと化学変化の連成問題
11	埋め戻さない状態での温度変化の予測	坑道が埋め戻さない状態で廃棄体が発熱した場合の換気・空調設備を考慮した周辺岩盤の温度変化を予測する	断熱効果、不飽和領域、移流・対流の発生、換気・空調設備の機能不全
12	裏面排水が停止した場合の影響予測	覆工の裏面排水が目詰まり・損傷した場合に、覆工や周辺岩盤に及ぼす影響を推定する	坑道の安定、地下水流れと変形の連成問題
13	岩盤からの硫酸、重金属の発生予測	岩盤の酸化やアルカリ環境によって岩盤から発生する有害物質の量を予測する	空気侵入による酸化、コンクリートの成分溶脱によるアルカリ環境化は研究段階
14	酸化還元、腐食への微生物の関与	支保部材、覆工、岩盤などの酸化や腐食に及ぼす微生物の影響を評価する	化学環境に及ぼす微生物の影響評価技術は研究段階

表 6.2.3-2 研究開発課題および技術開発課題の整理 (人工バリア)

No.	課題名称	課題の概要	課題が生じる要因と原因
1	オーバーパック、PEM 容器の腐食評価	処分場における酸化性環境における炭素鋼材料の腐食挙動を把握し、設計に資するために定量評価する。	これまである程度の期間、酸化性環境が継続する場合の検討は未実施である
2	緩衝材の変形・流出現象影響	緩衝材の膨潤による変形や流出挙動を評価し、緩衝材の長期挙動への影響を把握する。	緩衝材の膨潤挙動や流出挙動は定量化が難しく、検討段階である。
3	人工バリアの温度影響	人工バリアの熱解析により温度履歴、分布を把握し、坑道の換気設計を実施して、温度管理が可能かどうか検討する。	空間を有することにより人工バリアの温度が上昇するため、強制換気が必要である。
4	回収のためのオーバーパック、PEM 容器の機械的健全性検討	回収までのある期間経過後の炭素鋼材料の腐食評価を実施し、機械的健全性に対する評価を実施する。	回収までの期間における劣化状態を検討し、回収時の健全性を定量的に評価する必要がある。
5	人工バリアのモニタリング項目・技術の検討	人工バリアの変化の状態を把握するためのモニタリング項目、技術を検討する。	回収および埋戻しにおいて、人工バリアを安全に回収できること、または埋戻しを行っても長期安全性に問題がないことを評価する必要がある。
6	放射線影響の検討	操業安全の観点から、緩衝材間隙中に存在する空気、水における放射線の影響を把握する。	ある期間、放射線下にあった地下水や空気が外部（人工バリア外）に放出されることとなる。
7	回収の観点からの定置手順の検討	回収維持期において発生する人工バリアの変状を考慮した回収性のやり易さ（柔軟性）の観点から、合理的な人工バリアの定置手順を設定する。	湧水の影響による緩衝材の膨潤など避けることが困難な課題に対して、回収もしくは埋戻しまでの期間、変状自体を起こさない方策を検討する。
8	腐食への微生物の関与	オーバーパック、PEM 容器における微生物腐食の影響を評価する	微生物腐食の評価技術は研究段階
9	回収を考慮した PEM 容器、オーバーパックの設計的検討	回収を考慮した場合に想定される腐食などの経時変化を考慮して、PEM 容器、オーバーパックの肉厚、把持方法を検討する。	回収を想定した設計検討は実施していない。

### 6.3 地層処分類似施設の維持に関する国内外の現状調査

地層処分関連施設や代表的な地質における地下坑道施設の維持の現状について、研究レポートや学会や公的機関から発刊されている指針や規準などについて、以下の文献調査と調査結果の適用性の検討を行った。

- ・国内における地層処分類似施設の維持に関する文献調査
- ・原子力関連施設の安全設計及び維持管理方法の調査
- ・国外の地層処分関連施設の回収維持に関する文献調査
- ・調査結果の回収維持期間への適用性の検討

#### 6.3.1 国内における地層処分類似施設の維持に関する文献調査

##### (1) 調査内容

代表的な地質に対する地下坑道施設の変状と対策に対する文献調査を実施した。文献調査は表 6.3.1-1 の施設を対象として実施し、力学的、水理的、化学的、熱的観点について整理した。また、これらの相互作用についても整理し、劣化現象、変状要因や現象の連関との関係についてまとめた。さらに、地質の化学的変質、水分変化に伴う変質などに関する論文についても必要に応じて調査を行った。

表 6.3.1-1 地下坑道施設調査対象一覧

	地下坑道施設
(1)地層処分関連施設	① 瑞浪超深地層研究所 ② 幌延深地層研究所
(2)道路トンネル	① うれしのトンネル ② 浅間山トンネル ③ 御園トンネル ④ 杉坂トンネル ⑤ 三国トンネル ⑥ 安房トンネル
(3)鉄道トンネル	① 鍋立山トンネル ② 総武トンネル ③ 六十里越トンネル ④ 青函トンネル ⑤ 札文浜トンネル ⑥ 洞口トンネル
(4)水路トンネル	① ダム基礎部、水路トンネル
(5)地下空洞	① 久慈国家石油備蓄基地 ② 倉敷国家石油ガス備蓄基地 ③ 串木野国家石油ガス備蓄基地 ④ 菊間国家石油ガス備蓄基地 ⑤ 澄川地熱発電所
(6)鉱山	① 釜石鉱山 ② X立坑、Y立坑（九州） ③ 鉱滓堆積場
(7)その他	① 海成堆積物 ② 道路施工、トンネル建設のための残土置き場

事例調査の結果を力学的、水理学的、化学的、熱的観点および相互作用の観点からまとめると以下のとおりである。

・力学的観点：地山と支保の長期的な変状、劣化などが及ぼす力学的な影響

坑道変状の事例は、路盤コンクリートの隆起や覆工コンクリートの剥落などが代表的なものとして挙げられる。これらの変状の原因としては、粘土鉱物を含んだ膨張性地山における塑性圧、破碎帯など弱層部における緩み圧、地すべり地形や切土によって生じる偏圧などの作用が挙げられる。化学的作用による支保の腐食と外力増大との連成により、覆工の剥離が生じた事例もある。

・水理学的観点：周辺地山の透水や排水性能の劣化などによる水理学的な影響

変状の現象は、覆工コンクリート、路盤コンクリートにクラックが発生、路盤コンクリート隆起などが代表的な事例である。これらの現象に対する原因は、裏面排水機能の低下、豪雨直後の水圧の作用や地下水が要因となり地山劣化に伴う緩み圧の発生などである。無普請の場合、き裂を水みちとした湧水の増加や、溶存酸素濃度の上昇といった報告もある。

・化学的観点：地下構造物の建設（掘削、支保敷設）に伴う周辺地質環境への化学的な影響

地下構造物の建設による周辺環境への影響としては、覆工コンクリートから溶出したカルシウムイオンと地下水中の重炭酸イオンとの反応による炭酸カルシウムの沈殿（例えば排水チューブの閉塞）、またそれらの溶出イオンと地山中の粘土鉱物の反応による岩盤の風化・劣化などが代表的な事例である。

また、周辺地質環境から地下構造物への影響の事例としては、酸性の湧水によるコンクリートの劣化、塩害およびアルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化やレール（鉄道トンネル）の腐食などがある。

・熱的観点：周辺地山の地熱などによる周辺地質環境や坑道への熱的な影響

熱水変質による影響事例として、粘板岩質の岩盤がホルンフェルス化し、断層の影響との相互作用によりき裂が発達することで覆工コンクリートに影響を及ぼした例や、頁岩が熱水作用により珪化黄鉄鉱化を受けて、これらが酸性化を促進することで覆工コンクリートの劣化を誘発させた事例が挙げられる。地熱の影響により、覆工コンクリート壁面の温度が上昇する例もある。

・上記の相互作用の観点

事例調査により、トンネルの変状は、力学的、水理学的、化学的、熱的な影響の複雑な相互作用により生じていることが分かった。これらの変状現象は複合的な作用から生じていることが多いため、変状現象から原因を特定することは困難なことも多い。このような理由から、国内の施設では、地形・地質環境、周辺環境、坑道の構造や施工法などを考慮した維持管理を実

施している。適切な維持管理のための具体的な方法については次項で述べる。

表 6.3.1-1 に示した各地下坑道施設の調査内容をまとめた文献調査票を次ページ以降に示す。

なお、文献調査票の空欄は文献中に該当事項について記載が無かったことを示す。

< 文献調査票 >

文献調査番号：地層処分関連施設-①

事例の時期	<input checked="" type="checkbox"/> 施工中 <span style="margin-left: 200px;"><input type="checkbox"/> 施工後</span>	
施設名称	瑞浪超深地層研究所	
完成年	2010年度までに[延長]に示す深度まで掘削完了	
用途	地層処分研究開発の基盤となる深地層の科学的研究	
主な岩盤種類	花崗岩	
形状寸法	主立坑 φ=6.5m、換気立坑 φ=4.5m、水平坑道 φ=3m 幌型	
延長	2010年度までに主立坑-481.3m、換気立坑-497.7m まで掘削	
施工方法	立坑：ショートステップ、水平坑道：NATM	
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	立坑：0.1~0.15m
	鋼製支保工	H-100、H-125
	ロックボルト	立坑：2~3m
	覆工コンクリート	立坑：0.4m
	その他	
維持管理方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高精度傾斜計での岩盤・地下水挙動、水圧計での水圧モニタリング</li> <li>・ 立坑壁面および集水リングを用いた坑内湧水の地下水水質観測</li> <li>・ 坑内排水を排水する河川における水質モニタリング</li> </ul>	
引用文献	地層処分関連施設文献[55],[56],[57],[58],[59],[60],[61]	
変状の現象	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>a.</b> 立坑掘削開始から GL-170m 到達までに、立坑側に約 40 μ rad の傾斜</li> <li><b>b.</b> 換気立坑内 2 深度 (GL-265.0m および-331.2m) で、集水リングから各予備ステージへ排水するチューブ内で炭酸カルシウムの沈殿物によるチューブの閉塞</li> <li><b>c.</b> 坑内排水中のフッ素とホウ素濃度の上昇 (環境基準値超過⇒河川への排水停止⇒坑内冠水 H17.10)</li> <li><b>d.</b> グラウト材と母岩境界にグラウト材からの溶出物と見られるカルシウムを含む領域発生</li> </ul>	
変状の原因	力学的観点	
	水理的観点	<b>a.</b> 立坑掘削時における排水に伴う立坑付近の岩盤の体積変化 (⇒体積ひずみ⇒地表傾斜)
	化学的観点	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>b.</b> セメント系材料による地下水のアルカリ化により溶出したカルシウムが地下水中の重炭酸イオンと反応し、炭酸カルシウムが沈殿</li> <li><b>c.</b> 全岩分析の結果、花崗岩中のフッ素濃度が 150mg/kg~5,000mg/kg の範囲に分布していることから、フッ素は、花崗岩中のフッ素を含む蛍石や黒雲母が起源と考えられ、これらの鉱物と地下水の反応により、地下水中にフッ素が供給されていると考えられる。ホウ素は、明確ではないが、研究所用地周辺の深部で、熱水もしくは海水起源と考えられる溶存成分濃度の高い地下水が確認されていることから、これらの溶存成分濃度の高い地下水、および花崗岩が供給源と考えられる</li> <li><b>d.</b> EM-EDS の分析では母岩の輪郭が明瞭に観察され、カルシウムの溶出はごくわずかかほとんどないと考えられた。数 μ m 程度までのオーダーでは、母岩側へのカルシウム成分の溶出は認められなかった。</li> </ul>
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>a.</b> 観測孔深さは地表から約 10m。岩盤の体積変化は地表傾斜データを用いた逆解析に基づき推定</li> <li><b>b.</b> チューブの定期交換を実施し、排水を確保</li> <li><b>d.</b> マルチスケール的な分析により、割れ目周辺のグラウト浸透状況と、その位置での元素分析等による母岩への拡散状況を把握</li> </ul>	

<文献調査票>

文献調査番号：地層処分関連施設-②

事例の時期	<input checked="" type="checkbox"/> 施工中 <span style="float: right;"><input type="checkbox"/> 施工後</span>	
施設名称	幌延深地層研究所	
完成年		
用途	地質環境特性調査評価技術の研究・開発	
主な岩盤種類	新第三系の珪藻質泥岩および硬質頁岩	
形状寸法	換気立坑：D=4.5m、東・西立坑：D=6.5m、 水平坑道：内空高さ約3.1m、幅4m（上半R=2m、下半R=4m）	
延長	Ⅱ期工事予定 立坑：360m 水平坑道：約60m	
施工方法	立坑：ショートステップ、水平坑道：NATM	
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	0.15～0.25m
	鋼製支保工	H-154、H-150
	ロックボルト	L=2m
	覆工コンクリート	立坑のみ0.4～0.5m
	その他	
維持管理方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>高精度傾斜計による岩盤・地下水挙動、水圧計による水圧モニタリング</li> <li>グラウト注入、メタンガス検知器設置、防爆使用機器導入、メタンガス非滞留構造の採用</li> </ul>	
引用文献	地層処分関連施設文献[62],[63],[64],[65],[66],[67],[68],[69]	
変状の現象	<p><b>a.</b> 立坑掘削時に立坑周辺で立坑側に約60～300μradの傾斜</p> <p><b>b.</b> メタンガス濃度の上昇（検知器指示値1.5%超え）および湧水の増加（総排水量として一時的に約60m<sup>3</sup>/h程度まで増加）</p>	
変状の原因	力学的観点	
	水理学的観点	<p><b>a.</b> 立坑掘削に起因する地下水の排水による岩盤圧密挙動の変化</p> <p><b>b.</b> メタンガス濃度上昇と湧水の増加は、火山灰や粘土で充填された地下水をほとんど含まない断層（S1断層）とメタンガスを溶存する地下水を伴う断層（F1断層）が交差する近傍で発生することから、湧水の発生要因として次が考えられる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>メタンガス濃度の上昇：試験坑道1における研究ボーリング掘削中に湧水の増加に伴いメタンガス濃度が上昇したことから、掘削に伴う地下水圧の低下によって脱ガスが生じたと推測される。</li> <li>湧水の増加：切羽がS1断層に到達し大気圧に解放されたことにより、S1断層中の軟質な火山灰や粘土が、F1断層等からの地下水やガスの圧力により押し出された。これにより、S1断層が水道となり、F1断層からの湧水の増加を招いたと考えられる。</li> </ul>
	化学的観点	
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)	<p><b>a.</b> 立坑周辺に9点、バックグラウンド魚道計測用に約0.9km離れた地点に1点高精度傾斜計を設置。地表部での計測から地下深部の岩盤挙動を高精度傾斜計で捉えることができれば、深層ボーリング等で地下を擾乱することなく、調査やモニタリングの効率化が可能となる</p> <p><b>b.</b> 湧出ガス対策として、以下の管理を実施している。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>事前調査（地層、地下水に含まれるメタンガス量、濃度の把握</li> <li>通気解析による送風機、集塵機、風管仕様の決定</li> <li>止水グラウト工によるメタンガスの湧出低減対策</li> <li>内燃機械の使用禁止、防爆機器の採用</li> <li>メタンガス湧出状況の監視モニタリング</li> </ul>	

<文献調査票>

文献調査番号：道路トンネル-①

事例の時期	<input type="checkbox"/> 施工中 <input checked="" type="checkbox"/> 施工後	
施設名称	長崎自動車道 うれしのトンネル	
完成年	平成 2 年 1 月	
用途	高速道路	
主な岩盤種類	凝灰角礫岩、安山岩、頁岩	
形状寸法	二車線トンネル	
延長	683m	
施工方法	NATM	
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	0.1～0.25m
	鋼製支保工	H-125（上半）、H-125、H-150、H-200
	ロックボルト	3m、4m
	覆工コンクリート	0.1、0.15、0.2、0.25m
	その他	
維持管理方法	水準測量、内空変位測定、地中変位測定、クラック調査、室内試験	
引用文献	トンネル関連文献[70],[71]	
変状の現象	<p><b>a.</b> 舗装版の隆起（約 8 年間で舗装路盤の隆起が最大 160mm）</p> <p><b>b.</b> 覆工、舗装版面のクラックおよび剥離（内空変位 20mm 以上）</p>	
変状の原因	力学的観点	<b>a.</b> 、 <b>b.</b> 周辺地山は膨張性粘土鉱物（モンモリロナイト）を含んでおり、膨張しやすい岩盤であったため塑性圧が発生。
	水理学的観点	<b>a.</b> 、 <b>b.</b> 一部区間においてトンネル内の裏面排水が十分に効かず、側壁部が弱体化して変状が発生。下向きロックボルトによる対策工を実施した後も変状は収まらなかった。
	化学的観点	
	熱的観点	<b>a.</b> 、 <b>b.</b> 比較的岩盤が良好な安山岩の区間においても、熱水変質作用を受けている
その他 (特筆すべき事項)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 供用後の対策工として、ロックボルト工、マイクロパイル工を実施したが、長期計測により変状が収まらないことが確認された。</li> <li>• 恒久対策工として、全線インバート工を実施。</li> <li>• インバート工施工完了後、覆工の変形・応力ともに安定。</li> </ul>	

<文献調査票>

文献調査番号：道路トンネル-②

事例の時期	<input type="checkbox"/> 施工中 <input checked="" type="checkbox"/> 施工後	
施設名称	上信越自動車道 浅間山トンネル	
完成年	平成 5 年 3 月	
用途	高速道路	
主な岩盤種類	泥岩、安山岩、凝灰岩	
形状寸法	二車線トンネル	
延長	684m	
施工方法	NATM	
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	0.1～0.25m
	鋼製支保工	H-125（上半）、H-125、H-150、H-200
	ロックボルト	3m、4m
	覆工コンクリート	0.1、0.15、0.2、0.25m
	その他	
維持管理方法	水準測量、内空変位測定、地中変位測定、クラック調査、室内試験	
引用文献	トンネル関連文献[70]	
変状の現象	<p><i>a.</i> 舗装版の隆起</p> <p><i>b.</i> 覆工、舗装版面のクラックおよび剥離</p>	
変状の原因	力学的観点	<i>a.</i> 、 <i>b.</i> 路盤下の地山の塑性化、膨張性粘土鉱物等による膨張性地圧の発生。
	水理学的観点	<i>a.</i> 、 <i>b.</i> 舗装版に雨水などの浸透圧による影響と思われる変状が発見される。 湧水の処理が不十分であり、劣化しやすい地質と湧水および交通振動により、路盤下の地山が塑性化し、膨張性粘土鉱物等により膨張性地圧が発生した。
	化学的観点	
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)	<ul style="list-style-type: none"> <li>文献中では、対策工としてインバート工、ロックボルト工およびマイクロパイル工の 3 案が検討され、インバート工が最も有利であると判断されている。</li> <li>インバート工について、R=10.0m かつ覆工と同程度の耐力を有する構造が適していると判断されている。</li> </ul>	

<文献調査票>

文献調査番号：道路トンネル-③

事例の時期	<input type="checkbox"/> 施工中 <input checked="" type="checkbox"/> 施工後	
施設名称	山陽自動車道 御園トンネル	
完成年	昭和 63 年 3 月	
用途	高速道路	
主な岩盤種類	粘板岩	
形状寸法	二車線トンネル	
延長	上り 564m、下り 555m	
施工方法	NATM	
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	0.1～0.2m
	鋼製支保工	H-125、H-150、H-200
	ロックボルト	3m、4m
	覆工コンクリート	0.3、0.35、0.4m
	その他	
維持管理方法	クラック調査、覆工コアリング、ボーリング調査、内空断面測定、地中変位測定、室内試験等	
引用文献	トンネル関連文献[70]	
変状の現象	覆工コンクリートにクラック発生	
変状の原因	力学的観点	覆工コンクリートへの地圧作用
	水理学的観点	
	化学的観点	
	熱的観点	トンネル線形が大竹断層に沿っており、トンネル地質が粘板岩質である。このため熱水変質によりホルンフェルス化し、大武断層の影響に伴い亀裂が発達し、さらに亀裂には粘性土を挟在するというような、崩落性に富んだ地質であることが、覆工クラック発生の原因である、とされている。
その他 (特筆すべき事項)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• クラック幅は 3mm 以下で背面空洞および巻厚不足が認められないため、早急な補修対策の必要性は低いと考えられている。</li> <li>• 今後、継続して、クラックの進行性調査や非破壊検査およびコア抜き観察を実施することが望ましい、と考察されている。</li> </ul>	

<文献調査票>

文献調査番号：道路トンネル-④

事例の時期	<input type="checkbox"/> 施工中 <input checked="" type="checkbox"/> 施工後	
施設名称	中国自動車道 杉坂トンネル	
完成年	昭和 50 年 10 月	
用途	高速道路	
主な岩盤種類	蛇紋岩、閃緑岩、花崗岩、頁岩	
形状寸法	二車線トンネル	
延長	上り 650m、下り 516m	
施工方法	サイロット工法	
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	なし
	鋼製支保工	H-200 (1m ピッチ区間、0.75m ピッチ区間)
	ロックボルト	なし
	覆工コンクリート	0.5m、0.7m
	その他	
維持管理方法	地表地質調査、レーダー探査、覆工スケッチおよびコアリング、室内試験など	
引用文献	トンネル関連文献[70]	
変状の現象	覆工コンクリートにクラック発生	
変状の原因	力学的観点	岩盤の亀裂進展による緩み土圧の増加
	水理学的観点	トンネル内の大半に漏水がみられ、地下水が覆工コンクリートに及ぼす影響としては、地山の劣化（風化）を助長し、緩み土圧を増加させることがあげられる。この他、豪雨直後に大量の水がトンネル周辺に集まって水圧が作用する、といったことが亀裂の進展に寄与しているものと考えられている。
	化学的観点	
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)	変状対策工として、裏込め注入工、炭素繊維補強工、割れ目止水工、線導水工、地山排水工の検討がされている。	

<文献調査票>

文献調査番号：道路トンネル-⑤

事例の時期	<input type="checkbox"/> 施工中	<input checked="" type="checkbox"/> 施工後
施設名称	三国トンネル	
完成年	1957年	
用途	一般道	
主な岩盤種類	硬質頁岩が主体	
形状寸法	幅員 7.6m、縦断勾配 0.6%、3心円半卵形	
延長	1.218km	
施工方法		
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	
	鋼製支保工	
	ロックボルト	
	覆工コンクリート	地質に応じて 0.25, 0.30, 0.50m の 3 種
	その他	コンクリート骨材は掘削によるズリを使用
維持管理方法		
引用文献	トンネル関連文献[72]	
変状の現象	<p><i>a.</i> 吹付モルタルの表面からの漏水（特に継ぎ目付近）</p> <p><i>b.</i> 漏水の冬季結氷に伴う氷柱形成とモルタル層の剥離</p> <p><i>c.</i> 本体コンクリートの劣化（覆工継ぎ目、側壁、クラウンなどでのコンクリートの欠落）</p>	
変状の原因	力学的観点	
	水理学的観点	
	化学的観点	<p><i>a.</i>、<i>b.</i>、<i>c.</i> 酸性の湧水</p> <p>三国トンネル付近の地質である硬質頁岩へ、火山活動により半深成岩、火山岩に分類される石英閃緑玢岩または閃緑玢岩が岩床状に貫入し、その後石英粗面岩が岩床あるいは岩株状に貫入しているといわれ、これらの貫入岩は硬質頁岩などを無数に包含している。頁岩は熱水作用により、珪化黄鉄鉱化を受け、これらが酸性化を促進。</p>
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)	<p>【漏水と第1次酸食対策】</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>薬液注入 <ul style="list-style-type: none"> <li>巻き立て完了後に覆工裏側の空隙に薬液注入</li> <li>一時的に止水したが間もなく漏水し、経済的な理由によりトンネル全長の施工は断念</li> </ul> </li> <li>モルタル吹付 <ul style="list-style-type: none"> <li>覆工側壁および一部地山を掘削して縦排水溝を設置して排水路を確保</li> <li>排水処理後に厚さ 3cm で吹き付け</li> <li>施工 4 年後から再び漏水</li> </ul> </li> </ol> <p>【補強工事】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>既設トンネルの内側に新しく巻き立てを行う</li> <li>防水工として湧水の排水処理のための配水管の設置</li> <li>酸食防護のための既設覆工面への合成ゴムのシートを張る</li> <li>H 形鋼を 1m 間隔に建て込み、これを基に鉄筋の組み立て、型枠の設置を行い、コンクリート（厚さ 20～25cm）の巻き立てを行う</li> </ul>	

<文献調査票>

文献調査番号：道路トンネル-⑥-1

事例の時期	<input checked="" type="checkbox"/> 施工中 <span style="float: right;"><input type="checkbox"/> 施工後</span>	
施設名称	安房トンネル	
完成年	1995 年貫通	
用途	一般国道 158 号	
主な岩盤種類	中・古生層の頁岩/チャート/石灰岩、これを貫く新生代第三紀の貫入岩、およびこれらを覆う第四紀の火山噴出物/扇状地堆積物等	
形状寸法	φ 6.3m	
延長	4350m	
施工方法	NATM	
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	
	鋼製支保工	
	ロックボルト	
	覆工コンクリート	
	その他	
維持管理方法	換気設備の導入、補助工法、調査坑からの水抜き、ガス抜き井戸	
引用文献	トンネル関連文献 [71],[73],[74],[75],[76],[77],[78],[79],[80],[81],[82],[83],[84]	
変状の現象	<p>【本坑】</p> <p><b>a.</b> 平湯坑口から 300m 付近で下半に 35℃の湧水、400m 付近からは上半にも熱水、その先 120m にわたり熱水帯に遭遇し、565m では最高温度 73℃を記録し、切羽の自立性低下</p> <p><b>b.</b> コンクリート打設から 4 ヶ月経過後、天端付近でトンネル延長方向に幅 1mm 程度のクラック発生</p> <p>【調査坑】</p> <p><b>c.</b> 中ノ湯坑口から 100m 付近から岩盤温度が上昇し、TD465m で湧水温度 52℃、切羽気温 32℃、650m 地点で湧水温度 75℃</p> <p><b>d.</b> 高被圧区間では 840m 地点で、最大湧水量が 180t/分に達し、約 3,000m<sup>3</sup> の土砂が流出し坑内約 120m が埋没</p> <p><b>e.</b> 坑口から 785m において支保工圧壊、天端から出水 (150t/分)</p> <p><b>f.</b> 地下水位低下 (出水後 1 ヶ月間 1m/日の水位低下)</p> <p><b>g.</b> 水蒸気爆発</p>	
変状の原因	力学的観点	
	水理学的観点	<p><b>a.</b>、<b>d.</b> 湧水に伴う流砂</p> <p><b>b.</b> 火山からの熱の影響による温度を下げるための多量の換気による乾燥収縮および坑内温度の低下に伴う乾燥</p> <p><b>e.</b>、<b>f.</b> 掘削による地下水の湧出</p>
	化学的観点	
	熱的観点	<b>a.</b> 、 <b>c.</b> 、 <b>g.</b> 火山からの熱の影響
その他 (特筆すべき事項)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高熱の原因は、地温勾配によるものではなく、火山の影響 (焼岳火口からトンネルの離間は 3km)によるもの。</li> <li>• 火山帯を通過するため、50℃を超える高熱帯が広く分布する。</li> <li>• 平湯坑口から             <ul style="list-style-type: none"> <li>465～585m：70℃を超える熱水帯</li> <li>850～1,450m：深い谷地形に火山噴出物が層厚 300～500m で堆積した被圧湧水のある平湯低速度帯 (弾性波速度 2.5～2.9km/秒、高被圧区間)</li> </ul> </li> <li>3,100～4,000m：岩盤温度が 50℃を超える高熱帯</li> </ul>	

<文献調査票>

文献調査番号：道路トンネル-⑥-2

事例の時期	<input type="checkbox"/> 施工中	<input checked="" type="checkbox"/> 施工後
施設名称	安房トンネル	
完成年	1995 年貫通	
用途	一般国道 158 号	
主な岩盤種類	頁岩/チャート/石灰岩、火山噴出物/扇状地堆積物	
形状寸法	φ 6.3m	
延長	4350m	
施工方法	NATM	
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	
	鋼製支保工	
	ロックボルト	
	覆工コンクリート	
	その他	
維持管理方法		
引用文献	トンネル関連文献[85]	
変状の現象	【本坑】 3,600m 地点において最高壁面温度 34.5℃まで上昇	
変状の原因	力学的観点	
	水理的観点	
	化学的観点	
	熱的観点	貫入岩体からの地熱の影響
その他 (特筆すべき事項)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高熱の原因は、地温勾配によるものではなく、火山の影響（焼岳火口からトンネルの離間は 3km)によるもの。</li> <li>• 火山帯を通過するため、50℃を超える高熱帯が広く分布する。</li> <li>• 平湯坑口から             <ul style="list-style-type: none"> <li>465～585m：70℃を超える熱水帯</li> <li>850～1,450m：深い谷地形に火山噴出物が層厚 300～500m で堆積した被圧湧水のある平湯低速度帯（弾性波速度 2.5～2.9km/秒、高被圧区間）</li> <li>3,100～4,000m：岩盤温度が 50℃を超える高熱帯</li> </ul> </li> </ul>	

<文献調査票>

文献調査番号：鉄道トンネル-①

事例の時期	<input checked="" type="checkbox"/> 施工中 <span style="float: right;"><input type="checkbox"/> 施工後</span>	
施設名称	北越北線鍋立山トンネル	
完成年	1992年	
用途	鉄道トンネル（新潟県松代町～大島村間）	
主な岩盤種類	細粒凝灰質砂岩、塊状泥岩、泥岩（砂岩と互層）	
形状寸法		
延長	総延長 9、116.5 m	
施工方法	東工区・西工区：ショートベンチ 中工区：ショートベンチおよびミニベンチ（単線区間）	
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	中工区：17cm（上半部にφ6mm×150mm×150mm 溶接金網取り付け）〔20cm〕
	鋼製支保工	中工区：上半支保工（鋼管φ216mm、ピッチ0.75m）
	ロックボルト	片側3m×3本打設（根足の押し出し量著しきところは、片側4本ずつ増し打設）
	覆工コンクリート	0.33～0.6m
	その他	
維持管理方法	ガス調査	
引用文献	トンネル関連文献[86],[87],[88],[89]	
変状の現象	<p><b>a.</b> 中工区での超膨張性地圧と高压ガスによる押し出しと崩壊</p> <p><b>b.</b> 切羽安定化のために施工したアンカーの押し出し（1m/時で5m）</p>	
変状の原因	力学的観点	<p><b>a.</b> 岩盤の膨張性地圧の発生</p> <p><b>b.</b> 地山のせん断破壊</p>
	水理学的観点	<p><b>a.</b> 低透気性地山（透気係数=1×10<sup>-6</sup>）におけるメタンを主成分とした可燃性ガスの内在（最大16kgf/cm<sup>2</sup>）。岩盤中に圧縮された気体がせん断強度を下げ、結果として膨張をもたらす。</p> <p><b>b.</b> 地山のせん断破壊とそれに伴う破壊面における岩の吸水膨張、具体的には、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 褶曲活動による繰り返しせん断から生じる一軸圧縮強度の低下</li> <li>• ダイレイタンスーによる体積膨張から生じる単位体積重量の現象⇒空隙の増加⇒高含水比</li> </ul>
	化学的観点	
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)	要因は明記されていないが、切羽押し出し盤ぶくれ、切羽崩壊、異常な押し出し、ガス湧出が確認されている。	

<文献調査票>

文献調査番号：鉄道トンネル-②

事例の時期	<input type="checkbox"/> 施工中 <input checked="" type="checkbox"/> 施工後	
施設名称	総武トンネル	
完成年	1976年	
用途	鉄道トンネル	
主な岩盤種類		
形状寸法		
延長	12.4km	
施工方法		
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	
	鋼製支保工	
	ロックボルト	
	覆工コンクリート	
	その他	
維持管理方法		
引用文献	トンネル関連文献[90]	
変状の現象	<p><i>a.</i> セグメントの鉄筋・ボルト等の腐食、コンクリートの剥離</p> <p><i>b.</i> レールや電気設備の腐食による各種機能障害</p>	
変状の原因	力学的観点	<i>a.</i> セグメントの耐力低下および外水圧の上昇。
	水理学的観点	
	化学的観点	<i>a.</i> 、 <i>b.</i> 東京都による地下水くみ上げ規制がトンネル建設中に行われ、地下水位が上昇。トンネル内への漏水が多発。漏水量は4700m <sup>3</sup> /日。塩化物イオン濃度は4100ppm。
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)		

<文献調査票>

文献調査番号：鉄道トンネル③

事例の時期	<input type="checkbox"/> 施工中 <input checked="" type="checkbox"/> 施工後	
施設名称	只見線六十里越トンネル	
完成年	1973年	
用途	鉄道トンネル	
主な岩盤種類	緑色凝灰岩、流紋岩、一部に蛇紋岩と頁岩	
形状寸法		
延長		
施工方法		
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	
	鋼製支保工	
	ロックボルト	変状区間で施工
	覆工コンクリート	0.45m
	その他	
維持管理方法	裏込注入、ロックボルト打設、ストラット	
引用文献	(3) 鉄道トンネル[91]	
変状の現象	<i>a.</i> 盤ぶくれ <i>b.</i> 側壁押出し	
変状の原因	力学的観点	
	水理学的観点	
	化学的観点	<i>a.</i> 、 <i>b.</i> 覆工コンクリートのカルシウムイオンが溶出して地山中の粘土鉱物に影響を与える（仮定） <ul style="list-style-type: none"> <li>地下水と粘土鉱物間のイオン交換反応による地山中の膨潤圧の減少による支持力低下</li> <li>粘土鉱物のイオン交換によるコンシステンシーの変化が地山の變形性に及ぼす影響</li> <li>地下水の高アルカリ化に伴う粘土鉱物の溶解による地山のマトリクスの変質の影響</li> </ul>
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)		

<文献調査票>

文献調査番号：鉄道トンネル-④

事例の時期	<input checked="" type="checkbox"/> 施工中 <span style="float: right;"><input type="checkbox"/> 施工後</span>	
施設名称	青函トンネル	
完成年	1988年開業	
用途	鉄道トンネル	
主な岩盤種類	新第三紀の火山岩、堆積岩	
形状寸法	本坑：上半 R=4.85m、SL 高さ 2.6~3.56m 作業坑上半 R=2.3m、SL 高さ 1.6m 先進導坑上半 R=2.3m、SL 高さ 1.72m	
延長	トンネル延長 53.850km、うち海底部 23.3km	
施工方法		
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	
	鋼製支保工	
	ロックボルト	
	覆工コンクリート	本坑：0.7m 作業坑：0.2m 先進導坑：0.15m
	その他	先進導坑・作業坑 りょう盤コンクリート：0.2m
維持管理方法	坑内調査：覆工外観（コンクリートひび割れ・うき・剥離、漏水、鋼材腐食）、湧水（湧水量、水温、成分分析）、外荷重（地震加速度、覆工ひずみ、覆工背面水圧（湧水圧）、ロックボルト軸力）、変位（トンネル内空変位、りょう盤コンクリート変位、覆工き裂変位、地中変位）、材料物性（覆工コンクリート物性、吹付コンクリート物性、止水注入材、覆工補修材）、坑内環境（気温、湿度、気圧、空気中塩分・粉塵、発生物（バクテリア））	
引用文献	トンネル関連文献 [92],[93],[94],[95],[96],[97],[98],[99],[100],[101],[102],[103]	
変状の現象	<p><b>a.</b> りょう盤コンクリートに隆起最大 9.5mm、湧水突出後沈下 42~47mm</p> <p><b>b.</b> 25m<sup>3</sup>/分の湧水（1996年、1997年時点）10m<sup>3</sup>/分の湧水（1993年）</p> <p><b>c.</b> 湧水量の減少</p> <p><b>d.</b> 精密機器への影響発生</p> <p><b>e.</b> 竜飛斜坑における覆工コンクリートの劣化</p> <p><b>f.</b> 先進導坑、作業坑における盤ぶくれ</p> <p><b>g.</b> レールの腐食</p> <p><b>h.</b> 軌道スラブにおけるクラック</p>	
変状の原因	力学的観点	
	水理的観点	<p><b>a.</b> 被圧水の影響（坑道そのものには影響なし）</p> <p><b>b.</b> 原因についての明記なし</p> <p><b>c.</b> き裂の目詰まりあるいは排水システムの見詰まり</p> <p><b>f.</b> 竜飛先進導坑 438m 地点で変位計設置の際に行ったボーリングの結果では、路盤コンクリートの下部に敷均しされた層が被圧滞水層となっており、相当の圧力で約 1m<sup>3</sup>/分の湧水が噴出した箇所があった（約 1 時間後、40L/分に減少）。その直後の水準測定では 42mm の沈下が発生した。このことから、水圧が盤ぶくれの一因と推察される（滞水防止の水抜き対策実施）。</p>
	化学的観点	<p><b>d.</b> 塩分を含んだ湿気による塩害</p> <p><b>e.</b> 覆工コンクリートの漏水防止工の補修材のモルタルが海水により劣化</p> <p><b>g.</b> ほぼ海水に近い水との反応</p> <p><b>h.</b> アルカリ骨材反応</p>
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 覆工補修材暴露試験実施</li> <li>• 湧水水質分析実施—現地：気温、水温、外観、色相、PH、電導度、湧水量、室内（P7Mカリ、M7Mシリ、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、実測 PH、SiO<sub>2</sub>）</li> <li>• 深度は海面下最大 240m、海底下最大 100m</li> <li>• 湧水成分には供用開始から大きな変動はなく、海水との接触による覆工・注入材料の劣化はみとめられていない</li> <li>• 覆工コンクリート歪：潮位変化と相関をもって変化している</li> <li>• トンネル内空変位：全般的に小さく急激な進行性は認められていない、本坑・作業坑・先進導坑何れにも問題となる変化はない</li> <li>• 吹付コンクリート：中性化深さ最大 49mm で中性化は進んでいるが強度は落ちておらず、材質的な劣化は進んでいない</li> <li>• 1997年 10月の目視観察で、吉田先進導坑において吹付コンクリートにひび割れを確認</li> </ul>	

<文献調査票>

文献調査番号：鉄道トンネル-⑤

事例の時期	<input type="checkbox"/> 施工中 <input checked="" type="checkbox"/> 施工後	
施設名称	室蘭本線札文浜トンネル	
完成年	1975年	
用途	鉄道トンネル	
主な岩盤種類	変朽安山岩、凝灰岩類	
形状寸法	上半 R=4.27m	
延長	1,236m	
施工方法	矢板工法	
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	
	鋼製支保工	
	ロックボルト	
	覆工コンクリート	45～80cm
	その他	インバート無し、路盤コンクリート（鉄筋 30cm、スラブ軌道）
維持管理方法	・計測管理：内空変位、地中変位計、ロックボルト軸力計による効果確認 ・変状対策工：インバート鉄筋コンクリート、路盤鉄筋コンクリート、ロックボルト補強工（側壁部はプレストレス導入）	
引用文献	トンネル関連文献[91]	
変状の現象	覆工コンクリート剥落	
変状の原因	力学的観点	部分的に存在した破碎帯に沿って熱水変質を受けた二次鉱物が存在。崩落部分の地質ボーリング結果では相対的に軟質な地山の分布を確認。地山の緩みにより局所的な地圧が覆工に作用して覆工コンクリートに破断面が形成されたことが原因。
	水理学的観点	
	化学的観点	
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)		

< 文献調査票 >

文献調査番号：鉄道トンネル-⑥

事例の時期	<input type="checkbox"/> 施工中 <input checked="" type="checkbox"/> 施工後	
施設名称	内房線洞口トンネル	
完成年	1916 年	
用途	鉄道トンネル	
主な岩盤種類	新第三紀堆積岩	
形状寸法		
延長	57m	
施工方法		
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	
	鋼製支保工	
	ロックボルト	
	覆工コンクリート	坑口部 46cm、トンネル中間部 30cm
	その他	
維持管理方法	内巻補強、セントル補強	
引用文献	トンネル関連文献[91]	
変状の現象	トンネルの直上部の地山にトンネルにほぼ平行した亀裂が発生。その後 20 年間で亀裂幅は数十 mm となり、大きいところでは最大 300mm に達した。	
変状の原因	力学的観点	トンネルの完成後、トンネルの海側に国道が建設された際にトンネル側方の地山が切り取られたことによる極端な偏圧状態。
	水理学的観点	
	化学的観点	
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)		

<文献調査票>

文献調査番号：水路トンネル-①

事例の時期	<input type="checkbox"/> 施工中	<input checked="" type="checkbox"/> 施工後
施設名称	ダム	
完成年		
用途	基礎および水路トンネル	
主な岩盤種類		
形状寸法		
延長		
施工方法		
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	
	鋼製支保工	
	ロックボルト	
	覆工コンクリート	
	その他	
維持管理方法		
引用文献	トンネル関連文献[104],[105],[106],[107]	
変状の現象	水和組織の空疎化など	
変状の原因	力学的観点	
	水理学的観点	
	化学的観点	長期間地下水と接触したことによる水和生成物の溶脱
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)		

<文献調査票>

文献調査番号：地下空洞-①

事例の時期	<input checked="" type="checkbox"/> 施工中 <span style="float: right;"><input type="checkbox"/> 施工後</span>	
施設名称	久慈国家石油備蓄基地	
完成年	1993年	
用途	石油備蓄	
主な岩盤種類	花崗岩	
形状寸法	卵型断面 幅：18m 高さ：22m (3ユニット)	
延長	540m	
施工方法	NATM	
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	
	鋼製支保工	
	ロックボルト	
	覆工コンクリート	なし
	その他	水封式地下岩盤タンク方式
維持管理方法		
引用文献	地下空洞関連文献[108]	
変状の現象	湧水の発生と湧水に伴う地下水の低下（着工前に実施した調査坑を用いた調査による予測）	
変状の原因	力学的観点	
	水理学的観点	掘削による、断層を中心とした亀裂帯からの湧水
	化学的観点	
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• セメントグラウトを施工した場合、工費、工期が膨大となる可能性が考えられたため、地下水の上流側において粘土グラウトを実施した（目詰まり効果を誘発）。結果、水位上昇および湧水量の低下が示された。</li> <li>• 地表より-100m以深、海面より-20m以深</li> </ul>	

<文献調査票>

文献調査番号：地下空洞-②

事例の時期	<input type="checkbox"/> 施工中 <input checked="" type="checkbox"/> 施工後	
施設名称	倉敷国家石油ガス備蓄基地	
完成年	2013年	
用途	ガス備蓄	
主な岩盤種類	花崗岩	
形状寸法	卵型 幅：18m 高さ：24m	
延長	640m	
施工方法		
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	施工
	鋼製支保工	
	ロックボルト	
	覆工コンクリート	
	その他	水封式地下岩盤タンク方式
維持管理方法	温度および圧力の点検（気密性の維持）を1回/1年実施	
引用文献	地下空洞関連文献[109]	
変状の現象		
変状の原因	力学的観点	
	水理的観点	
	化学的観点	
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)	<p>液化石油ガスは相変化を示す可能性があるため、温度および圧力の点検を実施。</p> <p>岩盤貯槽の機密性が維持され、漏えいが無いことを確認する。直接視認することは困難であること、大容量であるため圧力変化の検知は現実的ではないことから、次の方法で実施。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>貯槽内圧の状況 貯槽内圧は受払がなければ岩盤温度の平衡圧力で安定している。安定していなければ漏れている可能性がある。</li> <li>金属管第一フランジ部への発泡液の塗布 岩盤貯槽と外部との接点のうち金属管第一フランジは、直接目視することが可能で発泡の有無を確認する</li> <li>配管堅固坑内の水面の状況 岩盤貯槽と外部との接点の内、配管堅固坑内の水面は、直接目視することが可能で金属管からの連続した気泡の有無を確認する</li> <li>貯槽液位に異常な低下がないこと 貯槽内温度は受払がなければ、岩盤温度が一定であるため、液位の変化はない。貯槽液位が受払以外で低下すれば漏えいする可能性がある。</li> </ul>	

<文献調査票>

文献調査番号：地下空洞-③

事例の時期	<input type="checkbox"/> 施工中 <input checked="" type="checkbox"/> 施工後	
施設名称	串木野国家石油ガス備蓄基地	
完成年	1995年	
用途	石油備蓄	
主な岩盤種類	安山岩、自破状安山岩、礫岩	
形状寸法	幅：18m 高さ：22m	
延長	555m	
施工方法		
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	
	鋼製支保工	
	ロックボルト	
	覆工コンクリート	
	その他	水封式地下岩盤タンク方式
維持管理方法	日常点検：地下水位、岩盤タンク湧水量、水封水位、水封水供給量、降雨、河川流量、気圧 定期点検：地下水位、岩盤タンク湧水量、水封水位、水封水供給量、降水量、蒸発量	
引用文献	地下空洞関連文献[110],[111]	
変状の現象	間隙水圧の上昇および湧水量（15%）の増加	
変状の原因	力学的観点	
	水理学的観点	地震発生に伴う周辺岩盤き裂の相対変形（開閉）による間隙水圧の増減
	化学的観点	
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)	<ul style="list-style-type: none"> <li>「三陸はるか沖地震」時に発現したタンク内湧水量の増加を受け、維持管理の一環として、間隙水圧計を設置した。</li> <li>深度 5～6 程度の地震直後に湧水量が 15%増加した。しかし、時間の経過とともに岩盤タンク内湧水量、水封水供給量、地下水位は元の状態に回復した。</li> <li>これまでは、大小の地震に対し、計測値は直後に大きな変化を観測しているものの、時間とともに回復する結果となっていることから対策は行っていない。</li> </ul>	

<文献調査票>

文献調査番号：地下空洞-④

事例の時期		<input checked="" type="checkbox"/> 施工中 <span style="float: right;"><input type="checkbox"/> 施工後</span>
施設名称		菊間国家石油ガス備蓄基地
完成年		1995年
用途		石油備蓄
主な岩盤種類		花崗岩類、安山岩
形状寸法		幅：20.5m 高さ：30m
延長		448m
施工方法		
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	施工
	鋼製支保工	
	ロックボルト	施工
	覆工コンクリート	
	その他	水封式地下岩盤タンク方式
維持管理方法		地下水挙動計測：地下水位（貯槽近傍および遠方）、間隙水圧、湧水量、水封水供給水量、水封水位、降雨量、蒸発量、地表流出量、地表湧水量 岩盤挙動計測：内空変位、岩盤内変位、ロックボルト軸力、ゆるみ域判定用透水試験、地震加速度、地震ひずみ
引用文献		地下空洞関連論文[112],[113],[114]
変状の現象		
変状の原因	力学的観点	
	水理学的観点	
	化学的観点	
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)		実証実験により、貯槽天盤付近の岩盤内地下水の鉛直動水勾配が1.0以上となるように水封を機能させることが、漏えい防止の条件であることが得られた。 貯槽内への流入量に起因する要因を把握するため、水収支が確認できる項目についての測定が行われる。

<文献調査票>

文献調査番号：地下空洞-⑤

事例の時期	<input checked="" type="checkbox"/> 施工中 <span style="float: right;"><input type="checkbox"/> 施工後</span>	
施設名称	澄川地熱発電所	
完成年	1995年	
用途	地熱発電	
主な岩盤種類	安山岩	
形状寸法		
延長	2500m	
施工方法		
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	
	鋼製支保工	
	ロックボルト	
	覆工コンクリート	
	その他	
維持管理方法	<p>【生産井】 坑口圧力、坑口温度、蒸気流量、熱水流量、トレーサ希釈法による二相流流量測定、比エンタルピー</p> <p>【還元井】 坑口圧力、還元温度、還元流量</p> <p>【噴出流体の化学性状】 蒸気、熱水、比凝縮性ガス</p>	
引用文献	地下空洞関連文献[115]	
変状の現象	蒸気流量の低下に伴い、所定の熱量が確保できず、タービン通気が困難になったことによる井戸の生産休止	
変状の原因	力学的観点	
	水理学的観点	
	化学的観点	坑内にスケールが生成
	熱的観点	還元井からの還元熱水（低温水）の還流
その他 (特筆すべき事項)	<p>スケール対策：キレート材を用いた化学洗浄</p> <p>還元対策：注水洗浄、改修工事（浚渫工事、ストレーナ設置、増堀）、補充還元井掘削</p>	

<文献調査票>

文献調査番号：鉱山-①

事例の時期	<input type="checkbox"/> 施工中 <input checked="" type="checkbox"/> 施工後	
施設名称	釜石鉱山	
完成年		
用途		
主な岩盤種類	石炭紀～二畳紀の堆積岩、白亜紀堆積岩、火成岩（花崗閃緑岩）	
形状寸法	H=約 3.2m、W=約 3.0m のほぼ矩形	
延長		
施工方法		
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	
	鋼製支保工	
	ロックボルト	
	覆工コンクリート	
	その他	無支保
維持管理方法	19本の試錐孔を利用した間隙水圧観測	
引用文献	鉱山関連論文[116],[117],[118],[119],[120],[121]	
変状の現象	<p><b>a.</b> 550m レベル坑道側壁・天端、250m レベル坑道天端における湧水（水中ポンプによる排水量は約 1000cm<sup>3</sup>/min）</p> <p><b>b.</b> 新山の 250m レベル坑道、350m レベル坑道、500m レベル坑道、550m レベル坑道、日峰 530m レベル坑道、680m レベル坑道坑口での定常的な水の流出（250m レベル坑道からの流出量が最多であり、次に 350m、500m レベル）</p> <p><b>c.</b> 孔壁から 2m 程度までの溶存酸素濃度上昇</p>	
変状の原因	力学的観点	
	水理学的観点	<p><b>a.</b> 方解石を含むき裂を水みちとした湧水</p> <p><b>b.</b> 掘削によるき裂を水みちとした湧水</p> <p><b>c.</b> 岩盤中への大気の拡散</p>
	化学的観点	
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)		

<文献調査票>

文献調査番号：鉦山-②

事例の時期		<input type="checkbox"/> 施工中 <input checked="" type="checkbox"/> 施工後
施設名称		X 立坑、Y 立坑（九州）
完成年		X 立坑：上部 S20 年代半ば、下部 S40 年代前半に開削 Y 立坑：S41 年
用途		X 立坑：入気 Y 立坑：排気、昇降、搬出、排水等
主な岩盤種類		X 立坑：砂岩と砂質泥岩の互層 Y 立坑：玄武岩
形状寸法		X 立坑：φ 6.0m、Y 立坑：φ 6.2m
延長		X 立坑：790m、Y 立坑 640m
施工方法		
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	X 立坑：上部 30～50cm、下部 40cm Y 立坑：本体 30～40cm、接続部 60～120cm
	鋼製支保工	なし
	ロックボルト	不明
	覆工コンクリート	なし
	その他	
維持管理方法		
引用文献		鉦山関連文献[122]
変状の現象		立坑覆工コンクリートの表層剥離
変状の原因	力学的観点	
	水理的観点	
	化学的観点	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 中性化と表面部での経年劣化（風化）、中性化がさらに進んだ炭酸化によるセメント水和物の変質による劣化。</li> <li>• EPMA マッピング分析の結果から、覆工表面部では、けい酸カルシウム水和物の分解や溶脱などによるセメント水和物の変質の可能性と中性化が確認されていることから、風化・劣化（炭酸化）が考えられる。</li> <li>• 中性化深さは、X 立坑上部で 2mm（約 52 年間）、下部で 28mm（約 34 年間）、Y 立坑では 8mm（約 37 年間）であった。</li> <li>• また、X 立坑においては、鋼材腐食発生限界濃度（一般的に 1.2kg/m<sup>3</sup>）を超える塩化物イオンが確認された（促進剤として塩化カルシウムを使用した可能性あり）。</li> </ul>
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)		アルカリ骨材反応（骨材中に含まれる反応性シリカ鉱物や炭酸岩塩を有する骨材がコンクリート中のアルカリ性水溶液と反応して、コンクリートに異常膨張やひび割れを発生させる劣化現象）や地下水などの作用による化学的侵食（酸化性物質や硫酸イオンとの接触によりコンクリート硬化体が分解したり、化合物生成時の膨張圧によってコンクリートが劣化する現象）などの劣化は、今回の調査では確認されていない。

<文献調査票>

文献調査番号：鉍山-③

事例の時期	<input checked="" type="checkbox"/> 施工中 <span style="float: right;"><input type="checkbox"/> 施工後</span>	
施設名称	鉍滓堆積場	
完成年		
用途	金属鉍山残土集積場	
主な岩盤種類		
形状寸法		
延長		
施工方法		
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	
	鋼製支保工	
	ロックボルト	
	覆工コンクリート	
	その他	
維持管理方法		
引用文献	鉍山関連論文[123]	
変状の現象	<p><i>a.</i> ヒ素を含む汚濁水の発生</p> <p><i>b.</i> ヒ素鉍物の析出</p>	
変状の原因	力学的観点	
	水理学的観点	
	化学的観点	<p><i>a.</i> ヒ素を含む一次鉍物（黄鉄鉍や硫ヒ鐵鋼）が酸化還元反応・微生物反応により溶解し、ヒ素が溶出</p> <p><i>b.</i> その後、二次鉍物として沈殿。さらにその後、還元環境下で再放出</p>
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)		

<文献調査票>

文献調査番号：その他-①

事例の時期	<input type="checkbox"/> 施工中 <span style="margin-left: 150px;"><input type="checkbox"/> 施工後</span>	
施設名称	東京、大阪、名古屋の泥質堆積物	
完成年		
用途		
主な岩盤種類	海成砂質堆積物、泥質堆積物	
形状寸法		
延長		
施工方法		
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート	
	鋼製支保工	
	ロックボルト	
	覆工コンクリート	
	その他	
維持管理方法		
引用文献	その他文献[124]	
変状の現象	溶出水の酸性化、金属元素の溶出	
変状の原因	力学的観点	
	水理学的観点	
	化学的観点	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 黄鉄鉱の酸化・分解</li> <li>• 斜長石・方解石などのカルシウム鉱物の分解</li> <li>• 石膏の分解・析出による水質の規制</li> <li>• 水酸化第二鉄の分解・析出による水質の規制</li> </ul>
	熱的観点	
その他 (特筆すべき事項)		

<文献調査票>

文献調査番号：その他-②

事例の時期		<input type="checkbox"/> 施工中	<input type="checkbox"/> 施工後
施設名称		道路施工、トンネル建設のための残土置き場	
完成年			
用途			
主な岩盤種類		花崗岩	
形状寸法			
延長			
施工方法			
支保・覆工仕様	吹付けコンクリート		
	鋼製支保工		
	ロックボルト		
	覆工コンクリート		
	その他		
維持管理方法		その他文献[125]	
引用文献			
変状の現象		酸性水による法面の損傷および溜池の酸性化	
変状の原因	力学的観点		
	水理学的観点		
	化学的観点	黄鉄鉱を含む花崗岩が水・酸素と反応して硫酸鉄を硫酸を生じ、その硫酸鉄がさらに水・酸素と反応して水酸化鉄と硫酸を生成する。	
	熱的観点		
その他 (特筆すべき事項)			

## (2) 地下坑道施設を対象とした維持管理方法の例[126]

地下坑道施設を対象とした具体的な維持管理方法について調査を行った。調査文献は、供用中のトンネルに関する維持管理方法が整理されていることから、土木学会編：「トンネルの維持管理」[126]を対象とした。本項ではこの文献を参照し、道路トンネル、鉄道トンネルおよび水路トンネル等を対象とした維持管理手法について調査した結果をまとめて示す。これらのトンネルは、その施工方法の違いにより覆工または躯体、あるいはトンネル構造そのものに要求される機能が異なっており、それぞれの維持管理は工法の違いに応じた取り扱いが必要である。

### 1) 維持管理上の制約

トンネルの用途により、点検や補修・補強における制約が異なるため、維持管理の計画策定や実施にあたっては、それらを考慮しておく必要がある。

#### a. 道路トンネル

原則として常時供用が前提であり、点検作業や補修作業を実施するためには、日時を特定して部分的もしくは全面的な交通規制が必要となる。ただし、天候によっては交通規制が行えない場合があり、気象条件も制約条件の一つとなる。

#### b. 鉄道トンネル

原則として終電から始発までの限定された時間帯での作業となる。大規模な作業を要する場合は、日時を特定して列車を運休しての全面作業も可能であるが、線区によっては列車運休による社会的影響が大きい。そのため、作業方法を決定するにあたっては、効率のみならず、影響度等も十分検討した上で適切な方法を選択する必要がある。

#### c. 水路トンネル

下水道トンネルでは「水替え」をしない限り、原則として、下水道を供用しながらの作業となる。そのため、大規模な補修・補強が必要な場合には、施工箇所の上下流で水替えを確保する必要がある。同様に電力水路トンネル（導水路や放水路等）についても、定期的なメンテナンス時や補修・補強が必要な場合には、「空水」状態（供用停止して水を抜いた状態）とした上で作業を行う必要があり、電力の安定供給の点からも作業日数は限定される。地下河川や雨水貯留管に使用される水路トンネルは、坑内への水の流入の懸念がない渇水期に作業を実施すれば、「水替え」の必要がなく作業が可能である。また、上水道（充填式）トンネルは、基本的に人が入坑できないため、作業は坑内ロボット調査もしくは地上からの作業に限定される。

#### d. 通信・送電トンネル

点検作業や補修作業を常に実施することが可能である。しかしながら、ケーブル・配管等の通信・送電設備はトンネル内面に敷設されており、トンネル覆工面の点検や補修作業ではこれらの設備が支障となる。また、敷設状況によっては、通信・送電設備の移設を伴う

場合もある。

## 2) 一般的な維持管理の手順

一般に、トンネルは完成後の改築が困難であるため、長期間にわたり供用する必要があり、維持管理の役割は重要なものとなっている。トンネルにおける一般的な維持管理のフローを図 6.3.1-1 に示す。

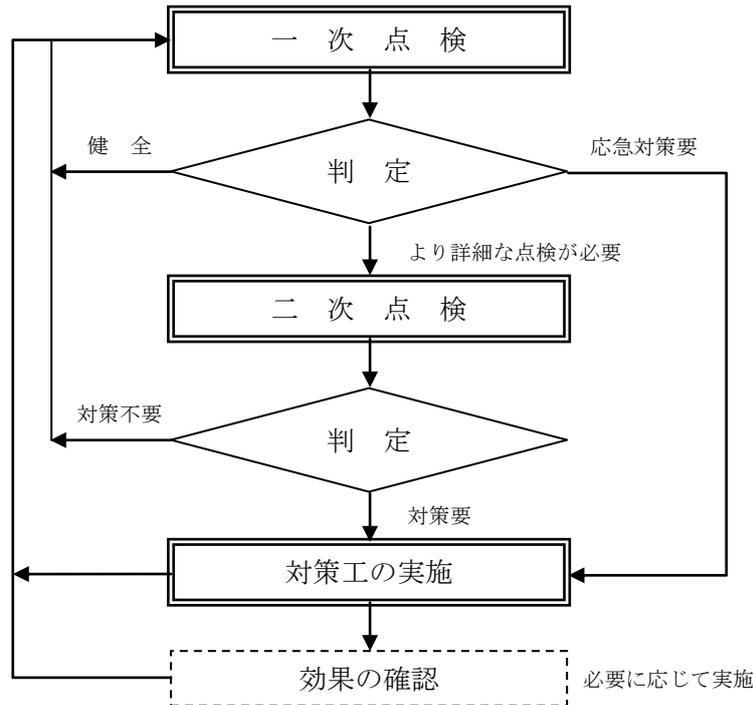


図 6.3.1-1 トンネルにおける一般的な維持管理フロー

- 一次点検  
一次点検の頻度は、各事業者により異なるが、概ね 2～5 年に 1 回である。
- 二次点検  
一次点検で確認された変状に対して、その原因、対策の要否および対策の時期を判定する目的で実施され、個々の変状により実施されているために調査方法も異なっている。
- 判定  
点検時の変状程度の判定方法は、各事業者により異なるが概ね 3～6 段階に分類されている。定量的基準に基づいて分類できるようになっているが、多くは定性的基準に基づく分類となっている。
- 対策工  
応急対策は、一次点検および二次点検時に応急的に実施する対策であり、剥離・剥落に対するはつり落としや当て板工などである。恒久対策は、二次点検結果に基づき、長期的な効果を期待して実施される対策であり、補修と補強に区分される。
- 効果の確認

必要に応じて一定期間が経過した後に、変状の再発の有無や健全度効果の回復について確認する。また、再診断する場合には、その効果や対策に至るまでの点検結果、調査結果および対策工実施状況等の記録を踏まえなければならない。

### 3) 維持管理手順の事例

維持管理手順については、各事業者におけるトンネルの用途・機能に基づき、具体的な維持管理の流れや点検項目が設定されている。以下に各事業者の具体事例について示す。

#### a. 道路トンネルの場合

国土交通省、NEXCO（旧道路公団）の事例を示すと、表 6.3.1-2 のとおりとなる。

点検種別としては、国土交通省では、日常点検、定期点検、異常時点検、臨時点検、NEXCO（旧道路公団）では、初期点検、日常点検、定期点検、詳細点検、臨時点検となっている。

#### b. 鉄道トンネルの場合

表 6.3.1-3 のとおりであり、国土交通省の通達により各社共通の方法により行っている。点検種別としては全般検査と個別検査に大別され、全般検査はさらに定期検査と不定期検査に区分されている。また、鉄道トンネルの維持管理においては、剥離に対する判定が義務づけられている。

#### c. 水路トンネルの場合

水路トンネルのうち、東京電力における発電用水路トンネルの維持管理手順は、表 6.3.1-4 のとおりであり、点検種別は定期点検、臨時点検、詳細点検となっている。

#### d. 通信・送電トンネルの場合

通信トンネルの維持管理手順として、NTT 東日本の事例を示すと表 6.3.1-5（左）のとおりであり、点検種別は定期点検、精密点検、日常点検、特別点検となっている。

地中送電トンネルの維持管理手順として、東京電力の事例を示すと表 6.3.1-5（右）のとおりであり、点検種別は定期点検と詳細点検になっている。



表 6.3.1-3 各事業者の維持管理フロー（鉄道トンネル）

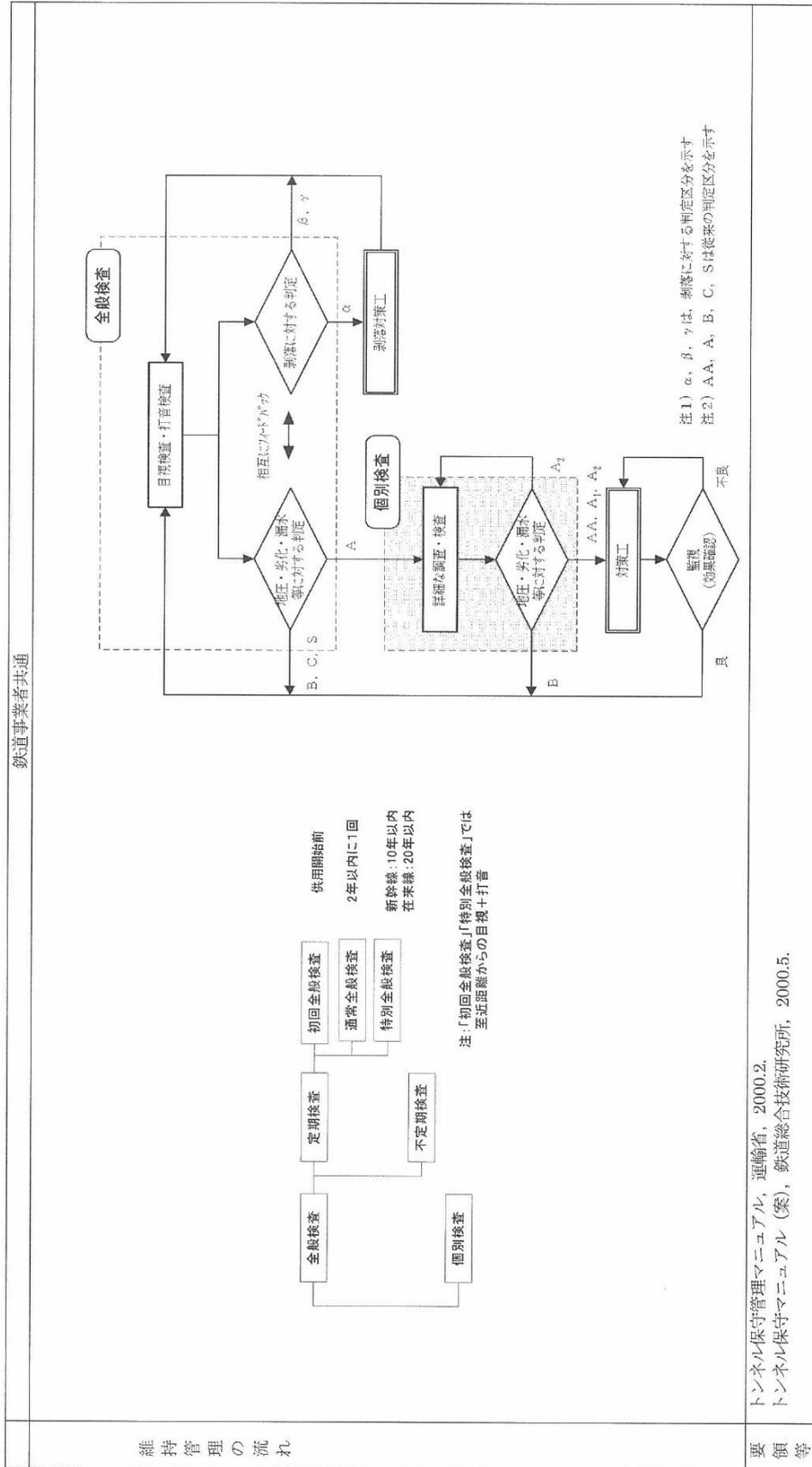


表 6.3.1-4 各事業者の維持管理フロー（水路トンネル）

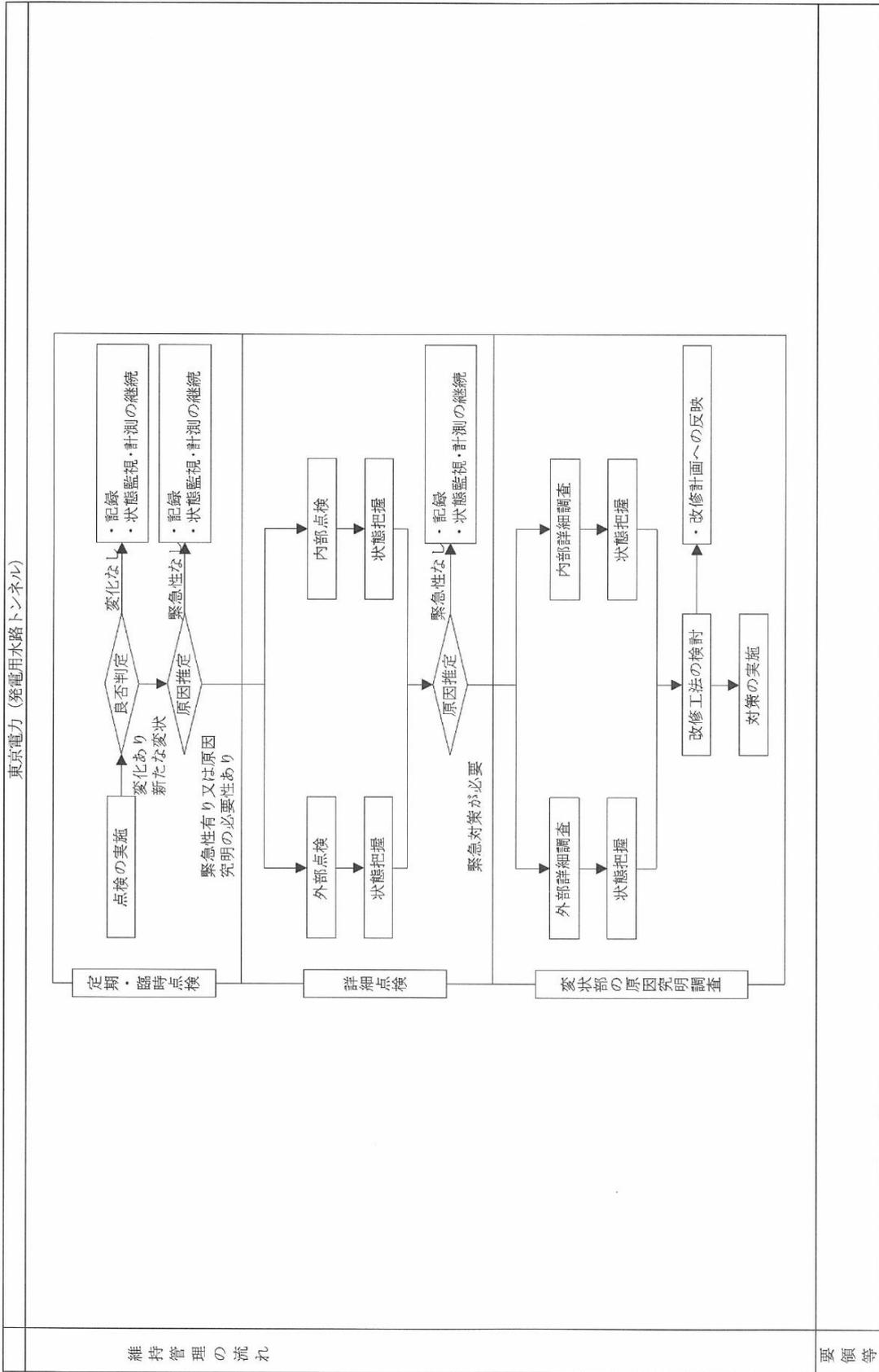
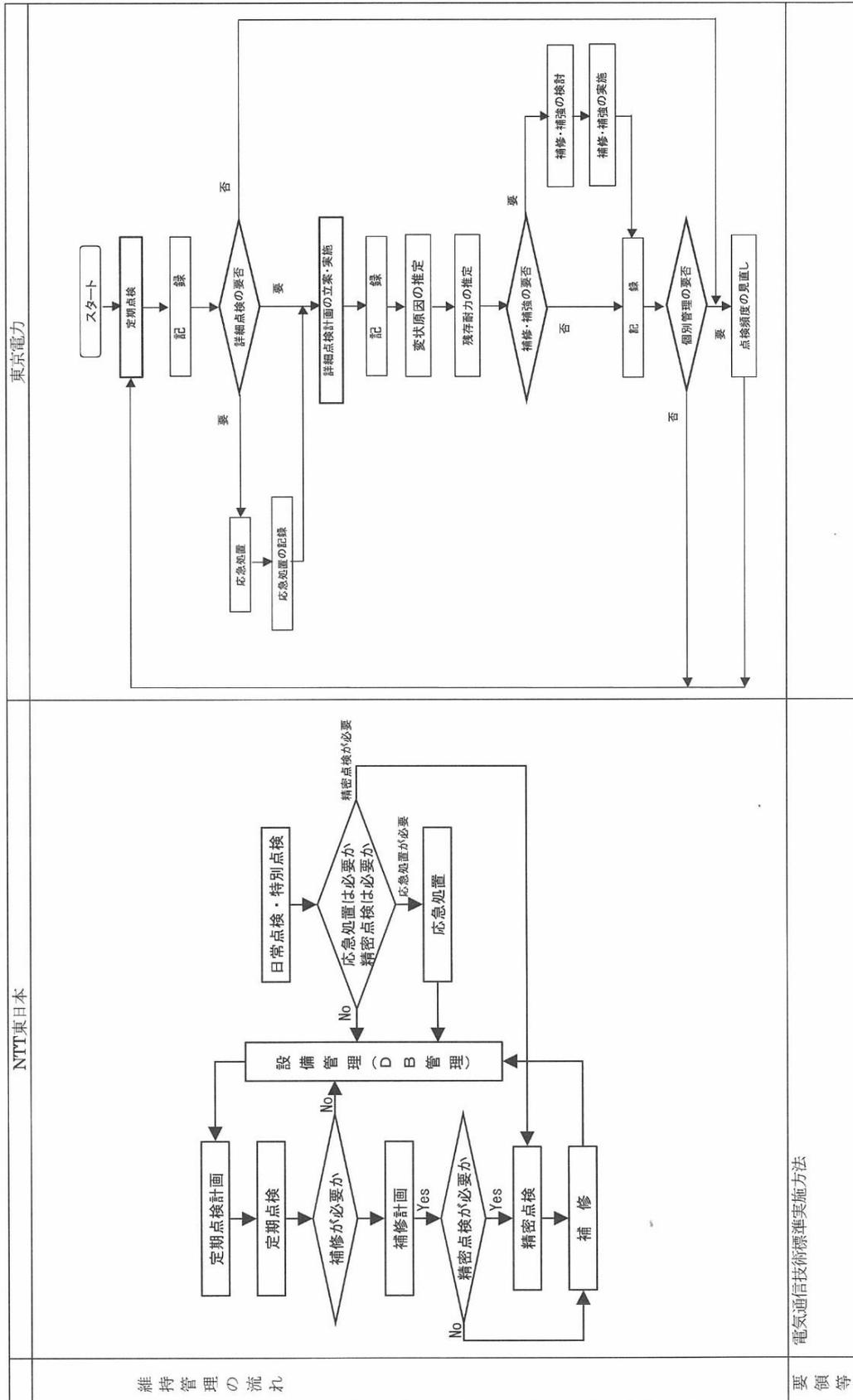


表 6.3.1-5 各事業者の維持管理フロー（通信・送電トンネル）



#### 4) 一次点検および二次点検

点検の内容は、トンネルを管理する各事業者が作成した維持管理マニュアルごとに若干の相違がある。その中でも、一次点検は変状の有無に関わらず全てのトンネルを対象に、原則として目視を中心に構造物の異常、損傷か否かを把握するもので、トンネル内の安全性を確保するための予防的な意味合いが強い。その内容は定期点検と、変状の発生が懸念されるような場合に実施される不定期点検に大別される。さらに、一次点検と、一次点検の結果により健全度の判定が困難な場合や、詳細な調査が必要と判断した場合に実施される二次点検にも大別することができる。トンネルの一般的な点検の体系を図 6.3.1-2 に示す。

一次点検においては、変状の現れを早期に捉えてその状態を把握することが主たる目的である。したがって、その方法は覆工コンクリート表面を直接観察する目視調査とハンマーで表面を打撃しコンクリートの剥離状況等を調べる打音調査が主であり、これらの点検により変状が認められた場合は点検日時や位置、範囲、種類等について記録し、その後実施する二次点検における基礎資料にできるよう、変状写真とともに変状展開図等に記録整理するというのが一般的である。

二次点検は、一次点検結果の判定に基づいて行われるものであり、変状状況の把握、変状原因の推定、構造物としての健全性、対策工の必要性や緊急性の評価・判定のために、変状に関する詳細な情報を得ることを目的とする。

一次点検および二次点検の目的や種別等について、トンネル用途別の代表的な各事業者における考え方を表 6.3.1-6～表 6.3.1-9 に示す。

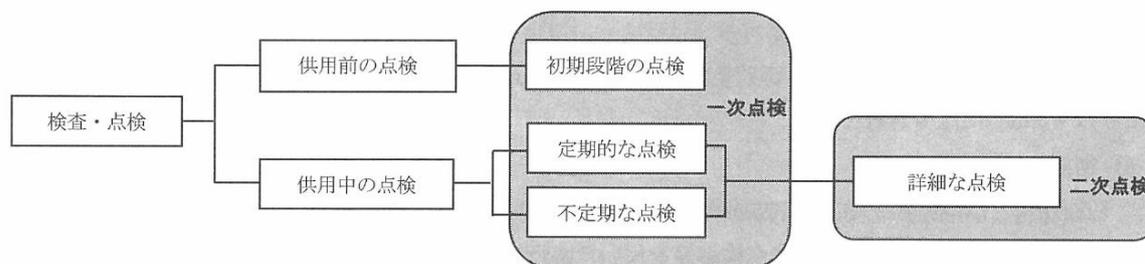


図 6.3.1-2 トンネルの一般的な点検と体系

表 6.3.1-6 各事業者の点検の現状 (道路トンネル)

		国土交通省 (一般国道)	日本道路公団
一次点検	名称	点検	点検
	目的	安全で円滑な交通を確保するとともに第三者被害の発生を未然に防止するため、構造物の状況を的確に把握するとともに、構造物の計画的な補修を行うための基礎資料を得る。	安全で円滑な交通を確保するとともに、第三者被害の発生を未然に防止するため、構造物の状況を的確に把握し、構造物の計画的な補修を行うための基礎資料を得る。
	頻度	日常点検 (道路の通常巡回, 1回/日), 定期点検 (初回点検: 建設後2年以内, 2回目以降の点検: 1回/2~5年), 異常時点検 (日常点検で異常があった場合の実施), 臨時点検 (必要の都度)	初期点検, 日常点検 (本線内: 交通量を目安に設定, 本線外: 2~4回程度/年), 定期点検 (1回/年), 詳細点検 (最大5年間隔を標準), 臨時点検 (必要の都度)
	手法	目視 (遠望/近接), 打音, 漏水調査等	目視 (遠望/近接), 打音
	適用基準	道路トンネル維持管理便覧 (1993年11月) 日本道路協会 道路トンネル定期点検要領(案) (2002年4月) 国土交通省道路局国道課 道路トンネル変状対策マニュアル (案) (2003年2月) 土木研究所資料	道路構造物点検要領(案) (2003年8月) 日本道路公団
	点検項目	ひび割れ, 浮き・剥離・剥落, 打継目の目地切れ・段差, 漏水・遊離石灰, 材料劣化, 変形など	ひび割れ・角落, 浮き・剥離・剥落, 打継目の目地切れ・段差, 漏水・遊離石灰, 材料劣化, 変形など
	判定基準	判断指標に応じて3段階の区分で評価 (A, B, S)	機能面: 4段階の定性的評価, 第三者被害: 緊急補修必要性の定性的評価
	名称	調査	調査
	目的	恒久的措置・対策の要否および時期の判定ほか	恒久的措置・対策の要否および時期の判定ほか
	頻度	点検結果に応じて実施	点検結果に応じて実施
二次点検	手法	非破壊検査 (局部), ひび割れ計測, 内空変位測定, 調査ポーリング, 強度試験 (覆工/地山), 劣化試験など	非破壊検査 (局部), ひび割れ計測, 内空変位測定, 調査ポーリング, 強度試験 (覆工/地山), 劣化試験など
	適用基準	道路トンネル維持管理便覧 (1993年11月) 日本道路協会 道路トンネル定期点検要領(案) (2002年4月) 国土交通省道路局国道課 道路トンネル変状対策マニュアル (案) (2003年2月) 土木研究所資料	道路構造物点検要領(案) (2003年8月) 日本道路公団
	点検項目	外力による変状 (進行性, クラックの状態, 浮き・剥落, 落下の恐れ), 材質劣化による変状 (浮き・剥落, 落下の恐れ, 覆工巻厚, 鉄筋の腐食の程度), 漏水による変状 (量, 車面への影響)	変位速度, 背面空洞の有無, 巻厚, ひび割れ寸法・密度, 盤ぶくれにり建築眼界が侵されているかなど
	判定基準	判定指標に応じて4段階の区分で判定 (3A, 2A, A, B)	補修・補強ランクを各々3段階・4段階の定性的評価で設定, 塑性圧・偏圧・地山の緩みによる鉛直圧などに関する内空変位速度の目安あり。

表 6.3.1-7 各事業者の点検の現状 (鉄道トンネル)

		JR東日本	東京地下鉄
一次点検	名称	検査	定期検査 (通常全般検査, 特別全般検査)
	目的	変状の早期発見および調査・措置の必要性の判定	建造物の変状や既変状の進行の有無, 建造物の周辺環境の変化を捕捉し, 機能が低下しているものやその恐れのあるものを抽出することで, 現時点および将来における建造物の性能を確認する。
	頻度	一般検査: 1回/2年, 特別検査: 新幹線は10年, 在来線は20年, 不定期検査: 必要の都度	通常全般検査: 2年に1回 特別全般検査: 20年に1回
	手法	目視 (遠望/近接), 打音	通常全般検査: 徒歩等により十分な照明を用いて目視を行い, 必要と判定された箇所について打音検査。 特別全般検査: 至近距離からの目視を行い, 必要と判断された箇所について打音検査。
	適用基準	土木建造物等全般検査マニュアル (2001年7月) JR東日本	鉄道土木施設構造および整備実施基準 (2004年4月) 東京地下鉄 建造物検査細則 (2004年2月) 東京地下鉄 工務部
	点検項目	地圧・劣化・漏水等に対する健全度 剥落に対する健全度	コンクリート建造物の状態, シールドトンネルセグメントの状態, 漏水の状態, 鋼構造物の状態
	判定基準	地圧・劣化・漏水: 6段階の健全度判定 (機能障害) 剥落: 3段階の健全度判定	健全度判定区分: 4段階 (A, B, C, S) 剥落に対する判定区分: 3段階 ( $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ )
	名称	個別検査	不定期検査 (個別検査)
	目的	変状の原因究明, 対策方法の検討	性能の低下もしくはその恐れがある建造物に対して, 変状の原因や機能程度を把握し, 措置の方法, 施工時期等を判断する。
	頻度	全般検査結果に応じて実施	定期検査の結果等に応じて実施
二次点検	手法	内空変位測定, 調査ボーリング, 強度試験 (覆工/地山)	詳細な目視検査, 内空断面測定, 非破壊試験 (鉄筋位置及び腐食状態), コア採取による強度試験及び中性化深さの測定, 固有振動数測定などを必要に応じて実施。
	適用基準	—	—
	点検項目	変形速度, 圧さ, 巻厚, 目地切れ, ひび割れ, 背面空洞の有無ほか	ひび割れ・漏水・変位の有無, 圧縮強度, 中性化深さ, 固有振動数低下幅など
	判定基準	変形速度等により変状の進行性を判断	健全度判定区分: A (AA, A1, A2), B, C, S

表 6.3.1-8 各事業者の点検の現状（水路トンネル）

		東京電力	東京都下水道局
一次点検	名称	点検	点検
	目的	発電用導水路トンネルとしての機能維持、事故未然防止のための欠陥の有無、進行状況を把握	管渠の老朽度、ひび割れ、ひび割れ、損傷等の安全性と適切な維持管理を行い、管渠の改良、補修計画の資料とする
	頻度	定期点検：1回/3年	通常は2～5年に1度
	手法	目視、打音、観察・測定	TVカメラ、目視・浮上式TVカメラによるTV調査
	適用基準	トンネル点検手引ほか	下水道局内規 TVカメラ判定基準
	点検項目	ひび割れ、剥落、食い違い、打継目の目地切れ、遊離石灰、材料劣化、変形、漏水など	ひび割れ・角落、浮き・剥離・剥落、打継目の目地切れ・段差、漏水・材料劣化、変形など
	判定基準	機能（健全度）面：3段階の定性的評価 設備重要度、第三者被害：緊急補修必要性評価	A、B、Cの3段階
	名称	調査	調査
	目的	確認された変状に対し、原因究明を実施し対策要否の詳細判定、改修工法の検討などの基礎情報収集	改良、補修の判定と施工範囲調査
	頻度	点検結果に基づき実施	点検結果に応じて実施
二次点検	手法	非破壊検査(局部)、ひび割れ計測、内空変位測定、調査ポータリング、強度試験(覆工/地山)、劣化試験等	ひび割れ計測、劣化度、段差、損傷範囲など
	適用基準	—	—
	点検項目	変位速度、背面空洞の有無、巻厚、ひび割れ状況、覆工コンクリート強度、周辺地盤状況など	劣化度の高い場合は強度計算を行い改良、補修等の判断資料とする。
	判定基準	調査に基づき、変状の進行性、周辺の地形・地質、覆工の劣化状況から個別に詳細評価を実施し判定。	当局判断基準

表 6.3.1-9 各事業者の点検の現状（通信・送電トンネル）

		NTT東日本	東京電力
一次点検	名称	定期点検	定期点検
	目的	トンネル本体の劣化状況を定量的に把握し、トンネルの機能を維持するため。	トンネル本体の変状の有無を確認し、応急処置等の要否を判定して、トンネルの機能を維持するため。
	頻度	3年周期で点検することを基本とし、過去の点検結果、補修履歴に基づき個別に点検の時期を決定する。劣化状況により、2年を限度とし点検周期を短縮して進展度をチェックする。	6年周期で点検することを基本とし、過去の点検結果（詳細点検等）補修・補強履歴等に基づき個別に点検の時期を決定する。補修・補強後は、効果の確認と処理不備の有無の確認のために、1年以内に1回点検を行う。
	手法	目視、打音、スケール等による計測	目視、距離計、クラックスケール等による計測
	適用基準	電気通信技術標準実施方法	洞道とマンホールの点検・管理に関する手引
二次点検	点検項目	ひび割れ（幅、長さ等）、漏水、鉄筋（露出・腐食）、浮き・剥離、段差、目開き、変形など	鉄筋（露出・腐食）、コンクリートのひび割れ（幅、長さ等）・浮き・剥離・段差・目開き、漏水、躯体の異常変形など
	判定基準	劣化の進展度合いに合わせ、A～Fランクに6段階区分	二次点検の結果から変状の進展度合いに合わせ、大、中、小、軽微の4ランクに4段階区分
	名称	精密点検	詳細点検
	目的	目視では原因が解明できない劣化事象や、劣化原因を究明する必要がある事象を詳細に調査し、抜本的対策の必要性を判断するために実施する。	詳細調査を行い、劣化の著しい部分の現状把握、劣化の原因推定、補修・補強の要否を判定するために実施する
	手法	必要に応じて 成分分析、X線回析、コア採取、非破壊診断、中性化深さ測定、変位置計測など	定期点検により必要と判断された場合に随時実施 鉄筋試験片による強度試験、コンクリートコア採取によるひび割れ深さ、中性化深さ測定、強度試験、成分分析や非破壊診断、変位置、漏水量計測など
適用基準	電気通信技術標準実施方法	洞道とマンホールの点検・管理に関する手引	
点検項目	一次点検の判断指標に準じる。	一次点検の判断指標に準じる。	
判定基準	劣化状況により個別に判断することを基本とする。	劣化状況により個別に判断（補修、補強、継続監視）することを基本とする。	

5) 調査の種類

図 6.3.1-3 にトンネルにおける一般的な調査項目を示す。調査の種類は、資料・文献調査、環境・気象調査、構造物調査および地形・地質調査に大別される。



図 6.3.1-3 一般的なトンネルにおける調査項目

6) 点検に基づく判定とその結果に基づく対応

点検でトンネルの変状が確認された場合、その点検結果に基づいて変状の判定を行うことになる。判定の目的は、変状が機能に与える影響の程度や危険性を判断することにある。判定にあたっては機械的に判定せず、諸現象を総合的に見て判断すべきである。変状原因を推定し判定を行う際、できる限り以下の点に留意する必要がある。

- ・ 変状区間ごとに判定
- ・ 判定基準の評価が異なる場合は最も危険度の高い判定項目により判定
- ・ 原因推定が困難かつ重大な変状の兆候が見られた場合には、専門家の指導を受けるとともにできるだけ早期に計測を開始する

健全度判定結果（点検結果）に基づく対応については、機能上不具合を生じる恐れがあるものに対して、状況に適した補修・補強を実施する必要がある。そのためには、変状の現象を調査してその原因を明らかにすることが基本となる。具体的な補修・補強は、トンネルの健全と評価により判定される補修・補強ランクを基本に選定される。

a. 道路トンネルの場合

調査に基づく判定区分は表 6.3.1-10 に示すとおりである。ここで、変状の程度については、さらに要因別に、①外力によるもの、②材料劣化によるもの、③漏水によるものに区分され、判定基準の目安をあげており表 6.3.1-11～表 6.3.1-13 に示すとおりである。

補修・補強ランクの区分は、補強工と補修工に大別され、さらにその中で緊急性の度合いによってランク分けされている。補修・補強ランクの判定表を表 6.3.1-14 に示す。

表 6.3.1-10 調査に基づく判定区分（国土交通省の場合）

判定区分	判定の要素				対策の緊急度
	通行者、車両の安全走行に及ぼす影響	構造物としての安全性に及ぼす影響	維持管理作業に及ぼす影響	変状の程度	
3A	危険	重大	著しい	重大	直ちに対策を施す。
2A	早晚脅かす、異常時に危険となる	早晚重大となる。	大きい	進行中、機能低下も進行する。	早急に対策を施す。
A	将来危険となる	将来重大となる	中程度	進行中、機能低下の恐れがある。	重点的に監視をし、計画的に対策を施す。
B	現状は影響がない	同左	ほとんどない	軽微	監視をする。

表 6.3.1-11 外力による変状に対する判定基準（国土交通省の場合）

変状の種類 判定区分	通常の変状・崩壊			突発性の崩壊 (突発性の崩壊とは、あまり変状が発展しない状況で、突然崩壊が発生することである。)
	覆工コンクリートの変形、移動、沈下	覆工コンクリートのひび割れ	覆工コンクリートの浮き、剥落	
3A	変形、移動、沈下などしており、構造物の機能が著しく低下しているもの。	ひび割れが大きく密集している。また、せん断ひび割れが生じ、進行が大きいと認められるもの。	アーチ上部のひび割れの密集・圧による浮き、剥落が生じコンクリート塊が落下する恐れのあるもの。	アーチ部の覆工背面に大きな空隙があり、有効な覆工厚が少なく、背面の地山が岩塊となって落下する可能性があるもの。
2A	変形、移動、沈下などしており、近いうちに構造物の機能低下が予想されるもの。	ひび割れが大きく密集している。また、せん断ひび割れが生じ、進行が認められるもの。	側壁部のひび割れ密集・圧による浮き、剥落が生じ、コンクリート塊が落下する恐れのあるもの。	アーチ部の覆工背面に大きな空隙があり、背面の地山が岩塊となって落下する可能性があるもの。
A	変形、移動、沈下などしているが、進行が緩慢であるもの。	ひび割れがあり、進行が認められるもの。	—	覆工側面に空洞があり、今後水による洗い出しなどにより、背面の空洞が拡大する可能性があるもの。
B	変形、移動、沈下などしているが、進行が停止しており、変状が再発する恐れのないもの。	ひび割れがあるが、進行が認められないもの。	—	—

表 6.3.1-12 材料劣化による変状に対する半的基準（国土交通省の場合）

変状の種類 判定区分	覆工コンクリートなどの 断面強度の低下	覆工コンクリートの浮き、剥落	鋼材腐食
3A	材料劣化などにより断面強度が著しく低下し、構造物の機能が著しく損なわれたもの。	アーチ上部の材料劣化により、浮きが生じ、コンクリート塊が落下する恐れのあるもの、あるいは既に剥落が認められるもの。	—
2A	材料劣化などにより断面強度が相当程度低下し、構造物の機能が損なわれたもの。	側壁部の材質劣化による浮きが生じ、コンクリート塊が落下する恐れのあるもの、あるいは既に剥落が認められるもの。	腐食により、鋼材の断面欠損が著しく、構造用鋼材として機能が損なわれているもの。
A	材料劣化などにより断面強度が低下し、構造物の機能が損なわれる可能性があるもの。	—	孔食あるいは、鋼材全周の浮き錆が見られるもの。
B	材料劣化などが見られるが、断面強度への影響がほとんどないもの。	浮き、剥落が認められないもの。	表面的あるいは小面積の腐食。

表 6.3.1-13 漏水等による変状に対する判定基準（国土交通省の場合）

変状の種類 判定区分	漏 水	側氷、土砂流出
3A	コンクリートのひび割れなどから、漏水が噴出し、そのため通行車両の安全性を損なうもの。	寒冷地において、漏水などにより、つららや側氷が生じ、所定の限界を損なうもの。漏水に伴う土砂流出があり、舗装が陥没したり沈下する恐れのあるもの。
2A	コンクリートのひび割れなどから、湧き水が落下し、そのため通行車両の安全性を損なう恐れのあるもの。	排水不良により、舗装面に滞水があるもの。
A	覆工のコンクリートのひび割れなどから、湧水が滴下し、そのため近い将来、通行車両の安全性を損なう恐れのあるもの。	排水不良により、舗装面の滞水を生じる恐れのあるもの。
B	覆工のコンクリートのひび割れなどから、湧水が浸出しているが、通行車両の安全性にほとんど影響がないもの。	漏水はあるものの。現在はほとんど影響がないもの。

表 6.3.1-14 補強・補修ランクの判定（旧日本道路公団の場合）

種別と目的	補修・補強ランク	対策工の緊急性の目安
補強工 トンネル構造上の耐力 向上	A	変状の規模が大きくかつ進行し、進行車両に対して危険であるため、早急に何らかの補強が必要なもの。
	B	変状が大きくかつ進行し、進行車両に対して危険であるため、早急に何らかの補強が必要なもの。
	C	変状があり、それらが進行して、近い将来通行車両に対して危険を与えるため速やかな補強が必要なもの。
	D	変状があり、将来、通行車両に対して危険を与える可能性があるため重点的に監視し、計画的に補強が必要なもの。
補修工 通行車両の安全確保・ 美観と保守の軽減	I	通行車両の安全に対して、危険な状態であり、早急に何らかの補修が必要なもの。
	II	通行車両の安全に対し、近い将来危険な状態になることが予想されたり、美観上の問題がある場合で、計画的に補修が必要なもの。
	III	早急な補修が必ではないが、材料劣化などが認められ監視および場合によっては軽微な補修が必要なもの。

b. 鉄道トンネルの場合

鉄道トンネルでは全般検査を行い、必要に応じて個別検査も実施している。健全度の区分と判定は表 6.3.1-15 に示すとおりである。ここで、変状の程度については、さらに要因別に、①外力、②覆工材料劣化、③軌道の保守周期の短縮に対するものに区分され判定基準の目安をあげており表 6.3.1-16～表 6.3.1-18 に示すとおりである。

健全度判定結果(点検結果)に基づく対応は、構造の安全性と剥落に分けて判断している。

表 6.3.1-15 健全度の区分と判定

判定区分	運転保安等に対する影響	変状の程度	措置
AA	危険	重大	直ちに措置
A <sub>1</sub>	早晚脅かす 異常外力の作用時危険	変状が進行し、機能低下も進行	早急に措置
A <sub>2</sub>	将来脅かす	変状が進行し、機能低下の恐れ	必要な時期に措置
B	進行すればAランクになる	進行すればAランクになる	監視(必要に応じて措置)
C	現状では影響なし	軽微	重点的に検査
S	影響なし	なし	——

表 6.3.1-16 外力による変状に対する判定基準

判定基準	健全度
覆工の変形、移動、沈下などにより変形が進行しており、その進行度が高く、破壊に達する推定時間が対策工事のための必要時間に近いと考えられるもの	AA
変形が進行し、近いうちに限界を支障することが予想され、これにより重大な運転支障が生じる恐れのあるもの	AA
アーチ付近のひび割れなどによりブロック化した覆工が突出して内空断面を侵し、落下する恐れのあるもの	AA
変状の著しい進行はないが、ひび割れや目地切れのため覆工がブロック化し、わずかな外力で崩落や剥落の予想されるもの	A <sub>1</sub>
新たな変状の発生または既往の変状が再発し、引き続き変状の進行が認められるもの	A <sub>2</sub>
覆工の変形で、現在変状に著しい進行はないが、なお、引き続き変状の進行が認められるもの	A <sub>2</sub>
剥落の規模は極めて小さいが、列車に支障する恐れのあるもの	A <sub>2</sub>
変状はあるが、その速度が極めて緩慢なもの。或いは進行が停止したと認められる再発する恐れがあるもの	B
変状の進行は認められないが、既往の変状が著しいため再発した場合直ちに列車運転に支障すると予想されるもの	B
変状はあるが、進行が停止しており、今後再発することがないと判断されるもの	C

表 6.3.1-17 材料劣化による変状に対する判定基準

判定基準	健全度
アーチ付近の覆工が落下する恐れがあるもの	AA
覆工の材料が劣化し、僅かな外力で崩落または剥落が予想され、重大な影響が考えられるもの	A <sub>1</sub>
覆工の剥落、材料劣化が単純または競合して断面強度の著しく低下したもの	A <sub>1</sub>
覆工の剥落、材料劣化が単純または競合して断面強度の相当低下したもの	A <sub>2</sub>
覆工の材料劣化が進んでおり、原因も明らかで放置すると劣化が急速に進行する恐れのあるもの	A <sub>2</sub>
覆工の剥落、材料劣化などが認められるが、急速な進行の恐れのないもの	B

表 6.3.1-18 軌道の保守周期の短縮に対する判定基準

判定基準	健全度
漏水により、つららが発生したり、側壁部が氷結して、限界支障など列車の運転を支障するもの	AA
電化区間においてアーチ部からの漏水が直接架線や碼子を伝わるもの	AA
路盤噴泥、盤ぶくれのため、軌道狂いが大きく、保守期間が極めて短く正常運転の確保が困難なもの	A <sub>1</sub>
排水阻害や漏水で路盤状態が悪化しているもの	B

c. 水路トンネルの場合

健全度区分については、表 6.3.1-19 に示すとおりである。さらに健全度の判定は健全度診断システムを活用し、無筋コンクリートを対象として、①残余耐力、②変状の進行性、③荷重の増大の可能性を考慮して総合的に実施されている。ここで、残余耐力の評価は、覆工面内のひび割れ発生パターンによる評価と、解析による評価を組み合わせ実施されている。ひび割れパターンによる評価の一例を図 6.3.1-4 に示す。また健全性を総合的に評価するための判定表を表 6.3.1-20 に示す。

補修・補強ランクの区分は、発電所重要度と社会的重要度のどちらかの条件選定により設定される。補修・補強ランクの判定表について表 6.3.1-21 に示す。

表 6.3.1-19 健全度の区分と判定（東京電力の場合）

ランク	設備健全度評価（設備劣化状況）
Aランク	食い違い、はらみ出し、クラック等の変状が著しく、かつ進行があり、早急に対策工を実施しないと陥没、落盤などの設備破壊の恐れがあるもの 覆工背面地山が未個結層または地山破りが小さい等のために、地山陥没、落盤、地すべりなどが発生する可能性が高いもの
Bランク	食い違い、はらみ出し、クラック等の変状が発生しており、陥没、落盤などの設備破壊の恐れがあるが、仮受支保工等の設置ならびに監視の強化により当面对策工の繰り延べが可能なもの 覆工背面地山が未個結層または地山破りが小さい等のために、地山陥没、落盤、地すべりなどの恐れがあるものの、監視の強化により、当面对策工の繰り延べが可能なもの
Cランク	食い違い、はらみ出し、クラック等の変状があり、当面監視を必要とするもの 覆工背面地山が未個結層または地山破りが小さい等のために、当面監視を必要とするもの

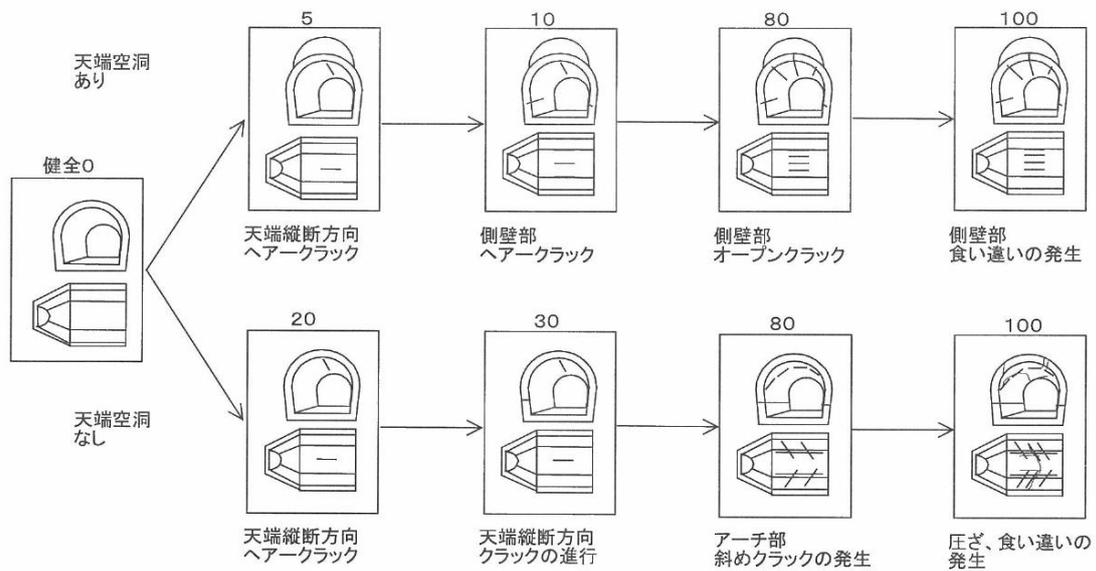


図 6.3.1-4 ひび割れ発生パターンの進行図の一例

表 6.3.1-20 総合的健全度ランク判定表（東京電力の場合）

			A				B				C				D (無)				
			荷重増大の可能性評価				荷重増大の可能性評価				荷重増大の可能性評価				荷重増大の可能性評価				
			a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	
60以上	解折評価	80以上	I				I				II				II	III			
		60以上	I				I				II				II	III			
		40以上	II				II				II				II	III			
		0~40	II	III			II	III			II	III	IV	II	III	IV			
40~60	解折評価	80以上	I				II				II	III			V				
		60以上	I				II				II	III							
		40以上	II	III	IV		II	III	IV	II	III	IV	II	III					IV
		0~40	II	III	IV		II	III	IV	II	III	IV	II	III					IV
40未満	解折評価	80以上	II				II				V				V				
		60以上	II	III	IV		II	III	IV										
		40以上	II	III	IV		II	III	IV										
		0~40	II	III	IV		II	III	IV										

表 6.3.1-21 補強・補修ランクの判定（東京電力の場合）

		発電所重要度評価	社会的影響度評価
A ラ ン ク	A-1ランク	揚水発電所もしくは大規模一般水力発電所など、設備の損傷時に発電停止により、店所収支に極めて大きな影響を及ぼす発電所	JR、国道等の主要公共設備、住宅等は付近にあり損傷時に人命等、重大な公衆災害が発生する可能性が高いもの
	A-2ランク	シリーズ上流部発電所もしくはピーク発電運用を実施している発電所	損傷時に田畑の流失等、社外への影響が大きいもの
	A-3ランク	上記以外の発電所	損傷時に社外への影響が小さいもの

d. 通信・送電トンネル

通信トンネルの健全度の判定においては、変状・劣化状況およびその進行度にもとづき判定区分が設定される。開削とう道および立坑の判定区分は表 6.3.1-22 に示すとおりである。

健全度判定結果（点検結果）に基づく対応については、表 6.3.1-22 に示した健全度の区分と判定（劣化判定基準表）および補修履歴をもとに、構造上の安全性やサービスに与える影響などを総合的に評価し、また緊急を有する状況に至るか否かを判断基準として優先順位を付け、その補修方法と補修時期を決定している。

表 6.3.1-22 健全度の区分と判定（NTT 東日本の場合）

劣化判定 ランク	変状・劣化状況	変状・劣化の進行度	対応
A	ひび割れの発生 ・乾燥収縮 ・鉄筋伸び不足 ・力学的要因によるひび割れ (車両荷重、覆水、地震等)	緊急性を有する状況ではないと判断できる	3年周期で定期点検
B	漏水、結露等による水分の侵入により鉄筋の腐食発生	緊急性を有する状況に至るまでには時間がかかると判断できる	
C	継続的な水分の浸入または乾湿の繰り返しにより鉄筋の腐食が進行し、コンクリート表面に錆または錆汁を確認		
D	鉄筋腐食によりコンクリート内部にひび割れが発生し、錆汁の増加または亀裂周囲の盛り上がりを確認	亀裂周辺に盛り上り確認される場合には剥離の危険がある	2年を限度とし、点検周期を短縮して進展度をチェック ①～④については精密点検を実施し原因の究明および結果に対する対応が必要
	①斜めひび割れの発生	①～④について、ひび割れが規則的に発生している場合または亀裂状のひび割れが集中して発生している。力学的に設計上の強度を有していない可能性がある	
	②交差するひび割れの発生		
	③縦断方向に連続するひび割れの発生		
④集中して発生する亀甲状のひび割れの発生			
E	間断なく流れる漏水、あるいは土砂の流入を確認 金物や電気設備等のとう道内設備に影響を与える場合	緊急性を有する状況に近い	補修
	鉄筋腐食による錆の膨張により、コンクリートが剥落		
	露出した鉄筋腐食の進行（鉄筋断面の減少）	鉄筋腐食の進行速度が加速し、放置した場合、緊急性を有する状況に至る可能性が高い	
F	更なる鉄筋腐食が進行し、構造物の耐力が低下	緊急性を有する状況であり、早急な対策が必要である	補修又は補強
	腐食鉄筋の完全露出と更なる鉄筋断面の減少し、コンクリートのひび割れも増加	放置した場合、構造物の崩壊により地上部での第三者災害の発生が懸念される	

## 7) 対策工の選定

点検の結果、トンネルが機能を満たしていない場合や近い将来機能を満足しなくなると判断された場合、補修・補強を行い、または改良・改築することで、トンネルの機能を回復・向上させる必要がある。

対策工選定の選定は、図 6.3.1-5 に示すように(1)対策工選定に必要な資料の収集・整理、(2)トンネルの施工方法と覆工・躯体材料、(3)トンネルの用途と機能、(4)変状状況の把握、原因の推定および健全度の判定、(5)対策工の選定の手順で行われる。

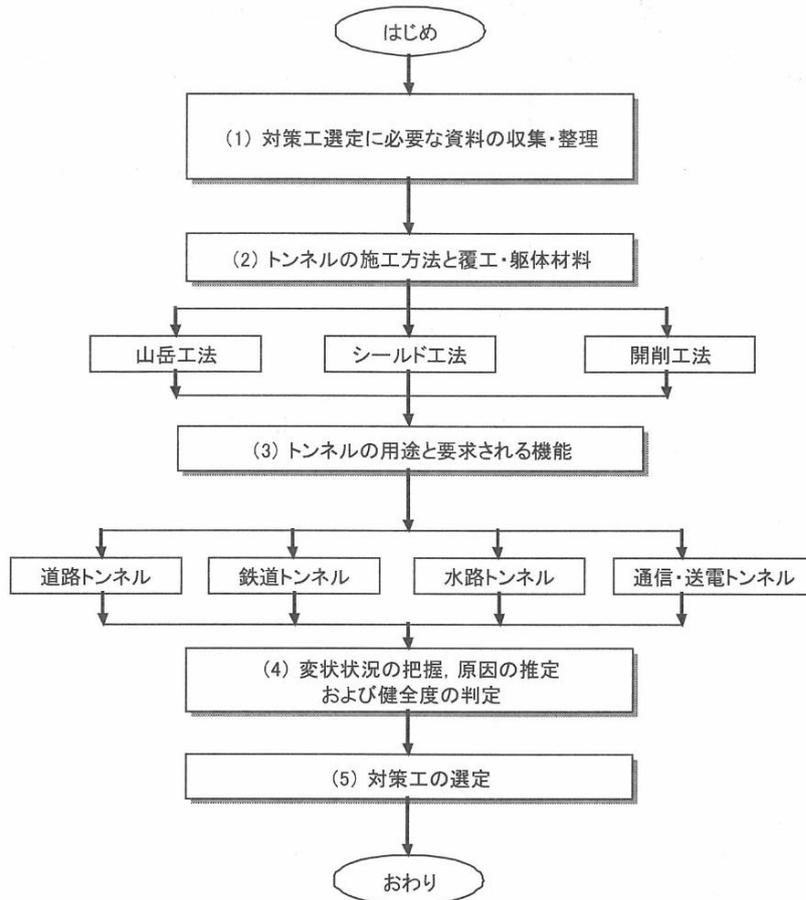


図 6.3.1-5 対策工選定の手順

対策工の選定にあたっては、以下を十分考慮する必要がある。

- ① 変状状況（変状の内容、規模、程度、進行性）
- ② 変状原因（外力、材料劣化、漏水、その他）
- ③ トンネルの環境条件（トンネル周辺の地形・地質、気象、土地利用）
- ④ トンネルの構造、形状、経歴など
- ⑤ 施工性（施工条件、施工の安全性）
- ⑥ 耐久性、経済性など

表 6.3.1-23 には各変状に対する一般的な対策工を示す。また、トンネル別の対策工法について一般的である方法の一部を図 6.3.1-6～図 6.3.1-8 および表 6.3.1-24～表 6.3.1-25 に示す。

表 6.3.1-23 各変状に対する一般的な対策工の例

部位	形態	変状現象	工法 区分 <sup>※</sup>	対策工法																					
				劣化・剥落対策					漏水・凍結対策					外方対策											
				ひび割れ補修工法	断面修復工法	表面被覆工法	電気化学的補修工法	電気防食工法	電氣防食工法	項書対策工法	剥離防止工法	内面補強工法	地山と一体化	止水工法	背面注入工法	地下水位低下工法	断熱工法	加除工法	重込注入工法	ロックボルト補強工法	内巻工法	セントール補強工法	内面補強工法		
覆工・躯体	損傷	目地切れ、目違い、段差、目閉き	山・都	○	○	○	○	○											○	○	○	○	○	○	
		ひび割れ、コールドジョイントの開口	山・都	○	○	○	○	○											○	○	○	○	○	○	○
		剥離・剥落	山・都	○	○	○	○	○											○	○	○	○	○	○	○
		押し出し・横断面変形	山・都																						
路面・地盤	変形	移動、側壁転倒、沈下	山																						
	材料劣化・材質不良	石区分の露出、断面欠損	山・都	○	○	○	○	○																	
		ジャンカ	山・都	○	○	○	○	○																	
	排水溝	漏水・凍結	鉄筋の露出、鉄筋腐食	山・都	○	○	○	○	○																
		ツララ、御水	山	○	○	○	○	○																	
		漏水	山・都	○	○	○	○	○																	
		埃面付着物	山・都	○	○	○	○	○																	
坑口・開口部	損傷	パクテリアスライム、煤煙、黒鉛、カビ、汚泥	山・都	○	○	○	○	○																	
		ひび割れ	山・都	○	○	○	○	○																	
		隆起、沈下	山・都																						
		トンネル軸方向の変形(動道狂い)	山・都																						
付帯設備	流入水	排水溝の縁石の転倒	山																						
		氷壁	山																						
		滞水	山・都	○	○	○	○	○																	
		噴泥、沈砂	山・都	○	○	○	○	○																	
補修・補強材	流入物	パクテリアスライム、汚泥	山・都	○	○	○	○	○																	
	損傷	ひび割れ、食い違い	山・都	○	○	○	○	○																	
		前傾、沈下、移動	山	○	○	○	○	○																	
		ひび割れ	山・都	○	○	○	○	○																	
地山	損傷	目地切れ、目違い、段差、目閉き	山・都	○	○	○	○	○																	
		横断面変形、縦断面変形	山・都																						
		漏水	山・都	○	○	○	○	○																	
		支持金物の腐食	山・都																						
備考	腐食	取付部の緩み、脱落	山・都																						
	変形	汚き、ひび割れ、剥離・剥落	山・都	○	○	○	○	○																	
	劣化	腐食	山・都																						
	損傷	トンネル周辺の押し出し	山																						
変形	地表面沈下・隆起	山・都																							

※ 山・・・山岳トンネル(山岳工法によるトンネル) / 都・・・都市トンネル(シールド工法または開削工法によるトンネル)  
この区分は、構造的特徴上比較的生じやすい変状現象を載すものであり、区分されていない工法では該当する変状が生じないというわけではない。  
※※ 具体的には、既設トンネルと新設トンネルの接合部、トンネルの分岐部、工法の変化部など。



注) \*1 : ブロック積み覆工のみ  
 \*2 : RC覆工のみ

図 6.3.1-6 主な劣化・剥離対策の分類 (道路・鉄道トンネルの例)



図 6.3.1-7 主な漏水対策の分類 (道路・鉄道トンネルの例)

表 6.3.1-24 外力による山岳トンネルの変状原因と対策工（道路・鉄道トンネルの例）

変状原因 対策工		地圧									近接施工
		塑性圧	偏圧・斜面	地すべり	地山の緩み による鉛直圧	水圧	凍上圧	地盤沈下	支持力不足	地震	
1	ポインティング	△	△	△	○	△	△	△	△	○	○
2	当て板, ネット	△	△	△	○	△	△	△	△	○	○
3	裏込注入	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
4	内巻	吹付けコンクリート	○	○	○	△	△	△	-	○	◎
		場所打ちコンクリート	○	○	○	△	△	△	-	○	◎
5	セントル補強工	○	○	○	○	△	△	◎	-	○	◎
6	繊維シート接着工	○	○	○	○	△	△	-	-	○	○
7	鋼板接着工	○	○	○	○	△	△	-	-	○	○
8	ロックボルト補強工	◎	◎	○	△	△	○	△	○	○	○
9	ストラット工	○	○	○	-	△	△	△	△	△	△
10	インバートコンクリート	○	○	○	-	△	○	○	◎	○	△
11	路盤下補強工	△	-	-	-	-	-	△	○	-	-
12	アンカー補強工	◎	◎	○	△	-	△	△	△	○	○
13	地山注入工	-	△	-	△	△	-	△	○	○	△
14	排水溝改良・新設	△	△	○	△	◎	◎	-	○	△	-
15	断熱工	-	-	-	-	-	◎	-	-	-	-
16	斜面安定工	-	○	◎	-	-	-	-	-	◎	-
17	部分改築	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
18	改築	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

凡例 ◎：変状に対して最適と考えられる対策  
 ○：変状に対して適合すると考えられる対策  
 △：変状に対して場合によっては有効な対策

表 6.3.1-25 下水道トンネル特有の主な対策工

対策工	工法詳細	適用	
局部補修工法	グラウティング	①パッカー方式 補修箇所へ薬液注入用パッカーを設置し、グラウトを圧送してグラウトのホモゲルにてクラック・継手などを固結止水する	中小口径管の継手部ゆるみ 取付部ゆるみ ゴムリングはずれ クラックなど
		②ロッド方式 補修箇所の路面上より、ロッド注入を行い、問題箇所外部をグラウトのホモゲルにて固結止水する	小口径管から大口径管、人孔などの浸入箇所など
	シーリング	粘着性と弾性のあるシール材を、継手、浸入箇所貼付け止水させる方法で、定型と不定型がある	管渠・シールドの継手コンクリートのうち継目
	止水パット	管の内部から止水バンドをジャッキなどで圧着させ、止水させる工法	大口径（φ700～φ2000）の目地切れやクラック箇所
	コーキング	専用のガンで漏水箇所へ直接填充する	継手目地、クラック、小破損箇所
	レベル修正工法	補修する管の下に固結体を充填し、管を上昇させ修正する	小口径管から大口径管の乱勾配、たるみの不陸修正
	断面修復工法	微生物腐食などの劣化により元の断面を喪失した管路に対し、断面修復を行うもの	大口径管の断面欠損部分など
開削工法	開削により、破損管を新しい管に布設替える	破損管、老朽管、大破損管路	
ライニング工法	管内に既製のパイプを挿入したり、樹脂系の材料で内面をライニング固結成形する	中小口径管	

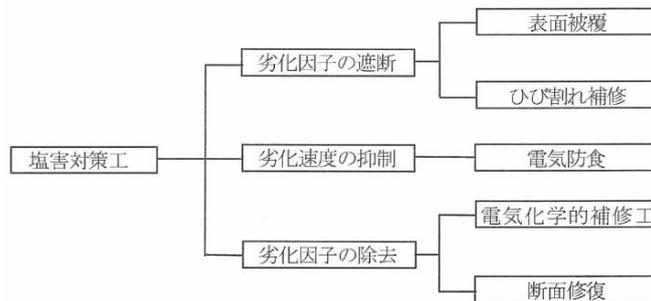


図 6.3.1-8 塩害に対する補修（通信・送電トンネルの例）

### 6.3.2 国内における原子力関連施設の安全設計及び維持管理方法の調査

原子力関連施設として、原子力発電所、再処理施設等の核燃料サイクル施設、関連機器として使用済燃料の貯蔵キャスク等を調査対象とした。

これらの調査対象施設の維持管理に関する公開文献を調査する。有効と考えられる対象文献を表 6.3.2-1 に挙げる。

表 6.3.2-1 原子力関連施設の維持管理に関する文献等

書名	発行年月	目的及び概要
原子力発電所の定期安全レビュー実施基準：2009[127]	2009年10月	発電用軽水炉型原子炉施設において、電気事業者が品質保証活動の一環として実施する定期安全レビュー(Periodic Safety Review)における、実施計画の策定、調査の実施、有効な追加措置の抽出及び報告書の作成の方法を規定
再処理設備規格 維持規格(2012年版)[128]	2012年9月	商業用再処理設備使用開始後の設備維持のための規程を定めたものであり、検査及び評価についての方法を規定
使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準：2010[129]	2010年7月	使用済燃料の中間貯蔵施設での静置・保管だけでなく、原子力発電所からの輸送、及び中間貯蔵施設からの輸送に一貫して使用する輸送容器に対して、保管及び輸送上の基本的安全機能及び構造上の設計要求、並びに各過程での検査項目及び検査方法を規定
使用済燃料中間貯蔵施設用コンクリートキャスクの安全設計及び検査基準：2007[130]	2007年7月	燃料詰替設備を設置しない使用済燃料中間貯蔵施設に用いるコンクリートキャスク及びキャニスタ詰替装置について、安全設計及び検査の要求事項を規定
廃棄物管理施設の新規制基準骨子(案)[131]	2013年8月	原子力規制委員会では「核燃料施設等の新基準に関する検討チーム」にて廃棄物管理施設の新規制基準の骨子(案)が報告
廃棄物管理施設の保安規定(公開版)[132]	2011年10月	原子炉等規制法 第51条の18第1項に基づき、「再処理事業所 廃棄物管理施設保安規定」が制定されており、第4章の保守管理において、施設定期自主検査の実施が規定
高レベル放射性廃棄物貯蔵管理について[133]	1995年10月	廃棄物管理施設の操業にあたり、事業者である日本原燃株式会社より施設の概要が報告

原子力発電所の安全性を維持するための経年劣化評価、定期安全レビュー(Periodic Safety Review: PSR)方法、原子力規制委員会で議論されている、新安全基準における保安規定の改正動向等、公開されている技術基準、委員会資料をもとに調査を行う。

## (1) 原子力発電所の定期安全レビュー実施基準[127]

### 1) 概要

「原子力発電所の定期安全レビュー実施基準：2009」は(社)日本原子力学会が、システム安全専門部会及び標準委員会での審議を経て策定・発行したものである。

発電用軽水炉型原子炉施設において、電気事業者が品質保証活動の一環として実施する定期安全レビュー(Periodic Safety Review：以下“PSR”という)における、実施計画の策定、調査の実施、有効な追加措置の抽出及び報告書の作成の方法を規定したものである。

### 2) 実施の概要

#### a. 実施計画の策定

PSRの実施時期は、1回目はプラントの営業運転を開始した日以降10年を経過する日までに実施する。2回目以降は、PSRの実施後10年を超えない日までに実施する。

実施計画では、評価対象期間、実施体制及び具体的な実施手順を定める。PSRの流れの概念図を図6.3.2-1に示す。

評価対象期間の考え方は、図6.3.2-2に示すとおり前回PSRの評価対象期間後(又は営業運転開始時点)から評価を開始する資金の時点までとし、評価実施期間(評価に要する期間)を考慮して実施計画を策定する。

実施体制においては、責任を明確にするために、統括責任者、実施責任者及び確認責任者を定める。統括責任者はPSRの実施に係る責任を有し、実施計画及び実施結果(報告書)を承認する。

#### b. 保安活動の実施状況の調査・評価

中長期的な視点に立脚して実績指標と改善活動について調査し、評価する。」改善活動には不適合が発生し、改善を行った場合と、更なる安全性の向上をめざして改善を行った場合がある。

#### c. 保安活動への最新の技術的知見の反映状況の調査・評価

評価対象期間中の最新の技術的知見を抽出し、一連の保安活動へ反映された状況を調査する。また調査に関連して、未だ具体的な安全規制、規格基準等に反映されていないもののうち、プラントの安全性又は信頼性の逸走の向上を図る上で、保安活動への反映を検討することが重要な最新の技術的知見についても調査する。

#### d. 確率論的安全評価

評価対象期間中の設備変更及び運用変更を考慮し、プラント出力運転状態及び停止状態における内的事象に係る確率論的安全評価(Probabilistic Safety Assessment)を実施することにより、当該プラントの安全性が十分確保されているかを確認するとともに、安全性の特徴を定量的に把握する。

e. 有効な追加措置の抽出とその実施計画の策定

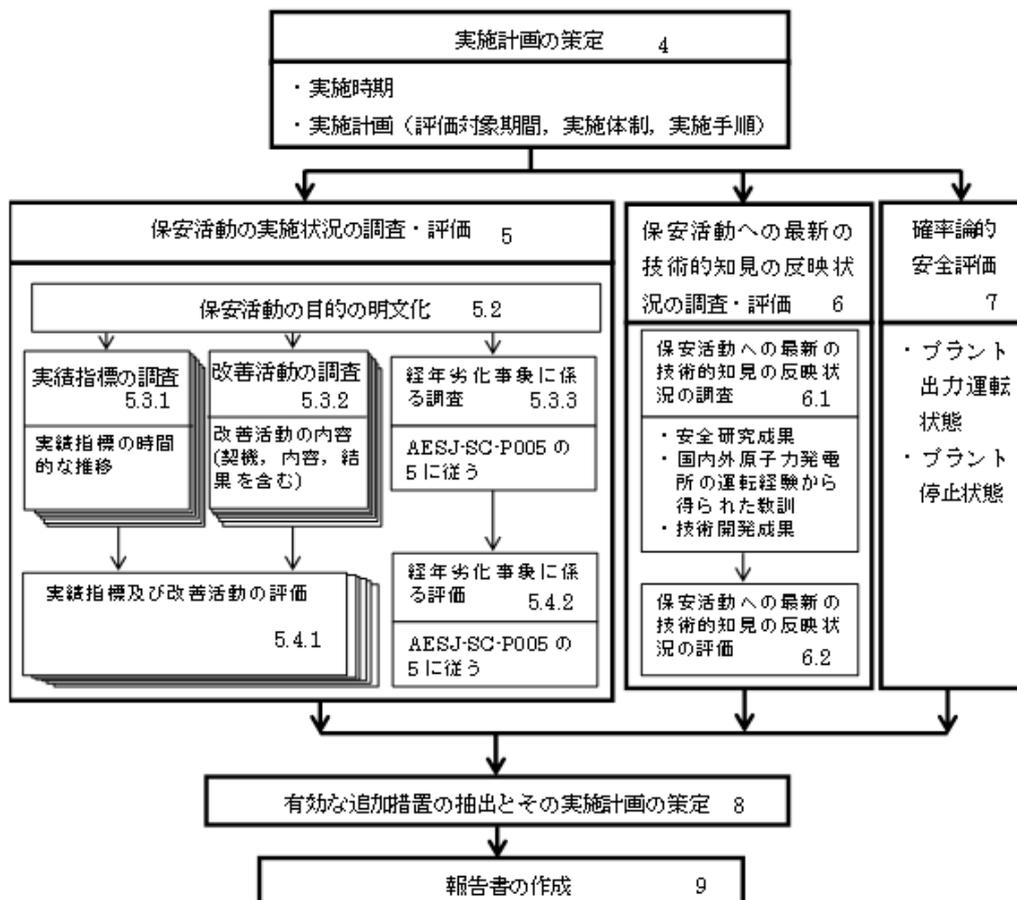
一連の活動により、プラントの安全確保上必要な措置又は安全性若しくは信頼性の一層の向上の観点から有効な追加措置を抽出する。

有効な追加措置が抽出された場合には、品質保証計画に反映させるために、実施内容、実施時期を含めた実施計画を策定する。

3) 適用性

定期安全レビュー(PSR)のねらいは、年度単位の活動について改善の必要性を評価する“短期的な評価 (マネジメントレビューなど)”と異なり、中長期的な視点に立脚して評価対象期間の保安活動を評価し、必要に応じて安全性向上のために有効な追加措置を抽出することにより、今後、当該プラントが最新のプラントと同等の高い水準を維持しつつ安全運転を継続できる見通しを得るためのものである。

この中長期的な視点に経った保安活動は、「処分施設における回収維持期間の検討」において有効であり、この考えに沿った維持管理方法を検討していくことも必要と考えられる。



注 数字は本体の章又は節の番号を表す。

図 6.3.2-1 PSR の流れ (概念図)

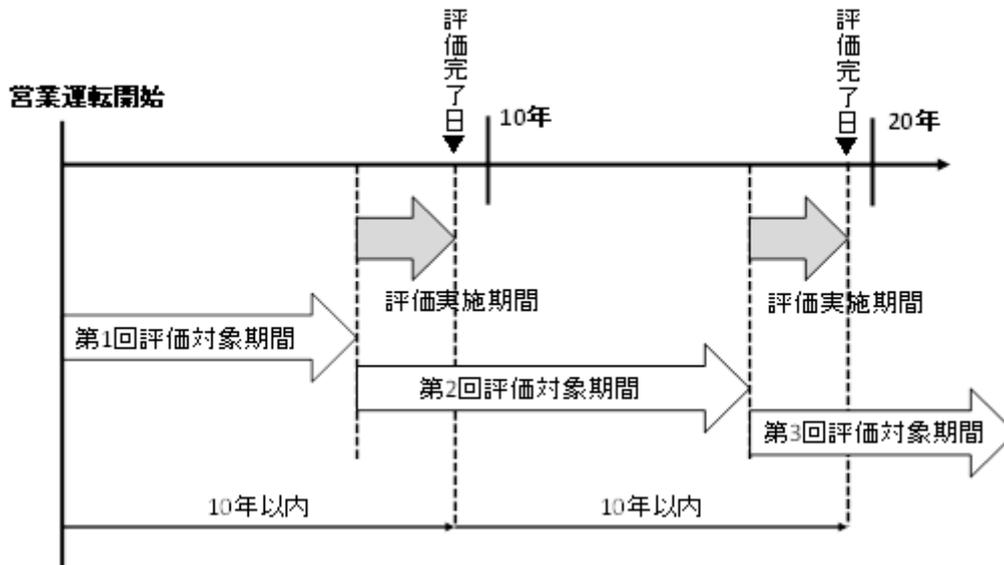


図 6.3.2-2 評価対象期間の考え方（概念図）

## (2) 再処理設備規格 維持規格[128]

### 1) 概要

「再処理設備規格 維持規格：2012」は(社)日本機械学会発電用設備規格委員会が運営規約に従う審議を経て制定したものである。

商業用再処理設備使用開始後の設備維持のための規程を定めたものであり、検査及び評価についての方法を規定したものである。

### 2) 実施概要

#### a. 検査

運転段階における商業用再処理設備の維持においては、全面腐食減肉の進展による漏えいのおそれが小さいことに加え、万一局部腐食等により一時閉じ込めを担う危機から漏えいが生じても、閉じ込めのための多重の設備により、閉じ込め機能の喪失に至るまでの余裕を有していることから、著しい漏えいに至らなければ、再処理設備の安全性は維持できるものとしている。

このため、使用期間中検査としては、対象機器全般に対して、著しい漏えいに至らないよう、万一の漏えいを早期に検出するための試験として、「系の漏えい検出試験」を実施することを基本としている。その中で、漏えいをより早期に発見するため、腐食環境が厳しく、かつ設計腐食速度の大きい機器及び、腐食環境が厳しく、かつ重要度の高い機器に対して、「目視検査」を実施する。更に腐食環境が厳しく、かつ設計腐食速度が大きい一部の機器に対しては、全面腐食減肉の進展が速いことから、目視試験に加えて、腐食の進展度合いを確認するために「肉厚測定試験」を実施する。

まとめとして、試験カテゴリと試験部位及び試験方法を表 6.3.2-2、再処理設備の使用期間中検査における検査項目と機種区分、腐食区分との関係を表 6.3.2-3 に示す。

#### b. 評価

評価は、図 6.3.2-3 に示す肉厚測定試験結果に対する評価を行う行為、図 6.3.2-4 に示す目視試験結果に対する評価を行う行為、図 6.3.2-5 に示す系の漏えい検出試験結果に対する評価を行う行為、及び肉厚測定試験結果をもとに減肉進展評価を行う行為をさす。

#### 3) 適用性

再処理設備規格 維持規格は、商業用再処理設備の設備維持のためのもので、使用環境も、主に硝酸または硝酸化合物を想定し「系の漏えい検出試験」を実施することを基本としている。

「処分施設における回収維持期間の検討」への適用は限定され、有益なフィードバックは少ないと考えられる。

表 6.3.2-2 試験カテゴリと試験部位及び試験方法

試験カテゴリ	項目番号	試験方法	試験部位	試験の範囲
腐食環境が厳しく、かつ、設計腐食速度が大きい機器又は部位	I-1	肉厚測定試験	閉じ込め部	腐食速度が大きい部位 <sup>(1)</sup>
	I-2	目視試験	閉じ込め部	外表面 <sup>(2)</sup>
	I-3	系の漏えい検出試験	閉じ込め部または耐圧部	試験機器直下の床面または漏えい検知装置等 <sup>(3)</sup>
腐食環境が厳しく、かつ、重要度の高い機器又は部位	II-1	目視試験	閉じ込め部	外表面 <sup>(2)</sup>
	II-2	系の漏えい検出試験	閉じ込め部または耐圧部	試験機器直下の床面または漏えい検知装置等 <sup>(3)</sup>
試験カテゴリ I 及び II 以外の機器又は部位	III	系の漏えい検出試験	閉じ込め部または耐圧部	試験機器直下の床面または漏えい検知装置等 <sup>(3)</sup>
<p>注：</p> <p>(1) RI-2530 の試験方法に従って試験を行う。試験範囲は、蒸発缶内部の伝熱コイル、伝熱管、伝熱ジャケットに覆われた伝熱部とする。各検査間隔における試験程度は、下記のとおりとする。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・幾何学的に対称性のある機器形状であり、抜き取りの代表性がある場合：10%程度（運転初期段階）</li> <li>・幾何学的に対称性のある機器形状ではない場合：100%</li> </ul> <p>ここで試験不可部位については、他の部位の試験結果からの評価により代替できる。</p> <p>(2) RI-2520 の試験方法に従って試験を行う。試験対象部位への接近性を考慮し、試験可能な部位を試験範囲として選定する。各検査間隔における試験程度は、100%とする。</p> <p>(3) RI-2700 の試験方法に従って試験を行う。各検査間隔における試験程度は、100%とする。</p>				

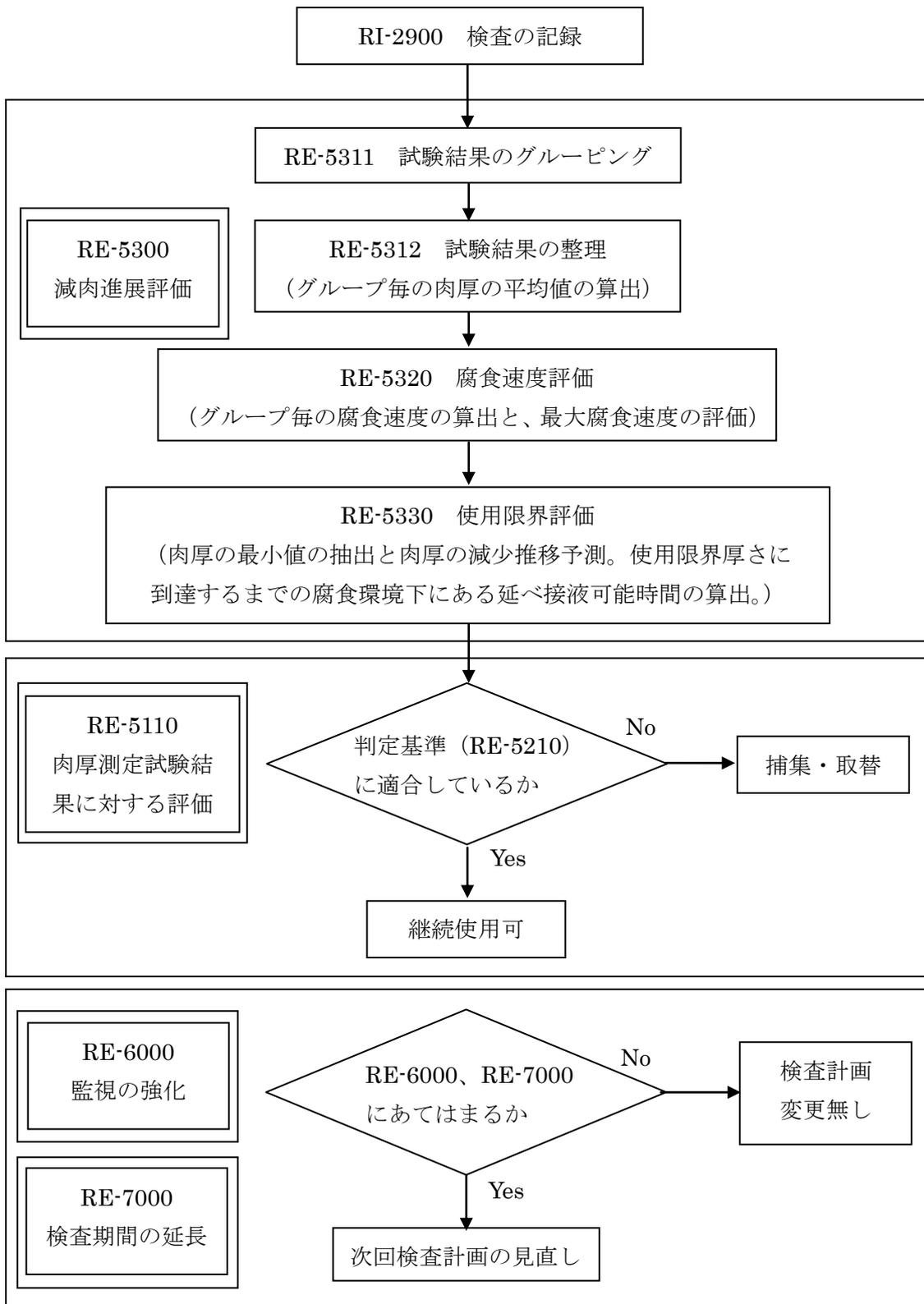
表 6.3.2-3 再処理設備の使用期間中検査における検査項目と機種区分、腐食区分との関係

記号		A	B-1	B-2	C	D		
溶液等による腐食区分		放射性物質を含まない水、蒸気、空気などの環境にある系統の設備	放射性物質を含む水、気体、紛体または薬品環境にあるが腐食を考慮しなくてもよい系統の設備		薬品環境で腐食を考慮する必要がある系統のうち、腐食挙動に影響を与える腐食加速因子を考慮しなくてよい系統設備	薬品環境で腐食を考慮する必要がある系統のうち、不足挙動に影響を与える腐食加速因子を考慮する必要がある系統の設備		
内包溶液等の種類 (例)		・水 ・上記 ・空気	・硝酸および硝酸化合物以外の薬品 ・放射性物質を含む水、気体、紛体	硝酸濃度 ≤0.2mol/L	・硝酸または硝酸化合物 硝酸濃度>0.2mol/L			
腐食加速因子の影響		腐食加速因子の影響なし				腐食加速因子の影響あり		
設計腐食速度による区分 (注1)		0.1mm/年 未満					0.1mm/年 以上	
試験 (注2)	再処理クラス1	—	—	—	—	系の漏えい検出試験  目視確認 (重要度が高い機器)	系の漏えい検出試験  目視試験  肉厚測定試験	
	再処理クラス2 (腐食環境の厳しい)							
	再処理クラス2 (上記以外の範囲)	系の漏えい検出試験	系の漏えい検出試験	系の漏えい検出試験				
	再処理クラス3				系の漏えい検出試験			
	再処理クラス4							
	再処理クラス5	—	系の漏えい検出試験	系の漏えい検出試験	系の漏えい検出試験			
	再処理クラスSF							
試験カテゴリ区分		III	III	III	III	II (注3)、III	I	
補修		補修または取替						

(注1) 設計腐食速度 0.1mm/年は、材料の耐食性に係る一般的な目安値としている腐食速度の水準である。

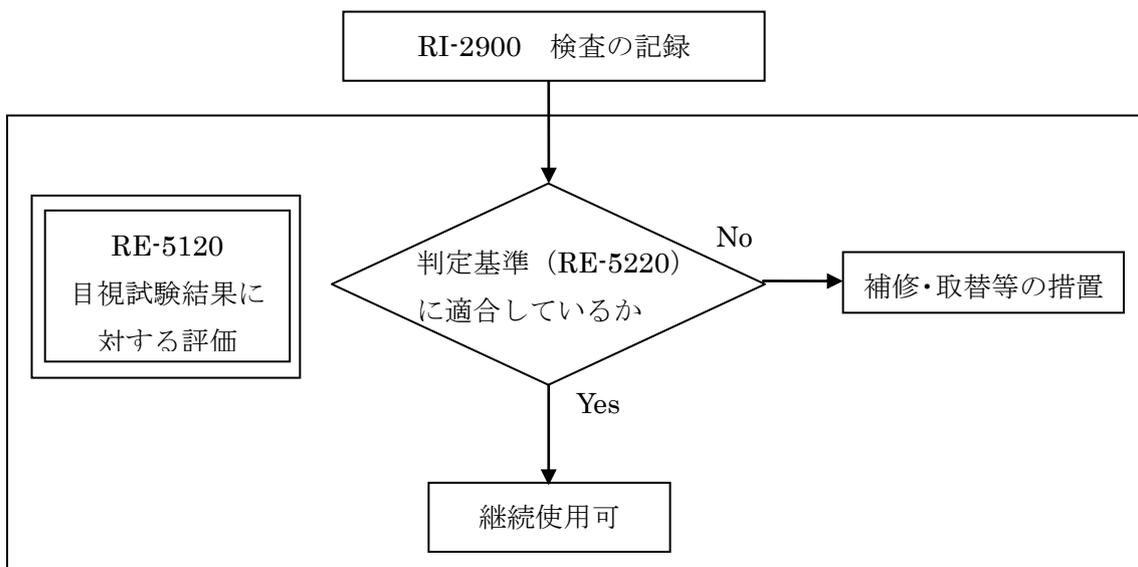
(注2) 「—」は当該の腐食区分に該当するクラス (機器) がないことを示す。

(注3) 重要度が高い機器のみに試験カテゴリ II を適用する。



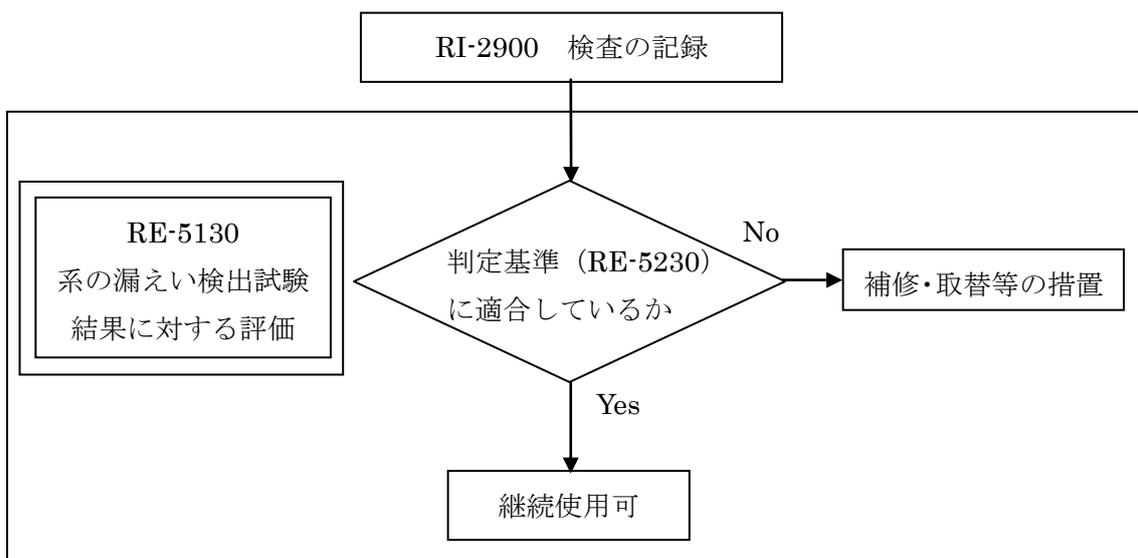
注 数字は本体の章又は節の番号を表す。

図 6.3.2-3 肉厚測定試験結果に対する評価の流れ



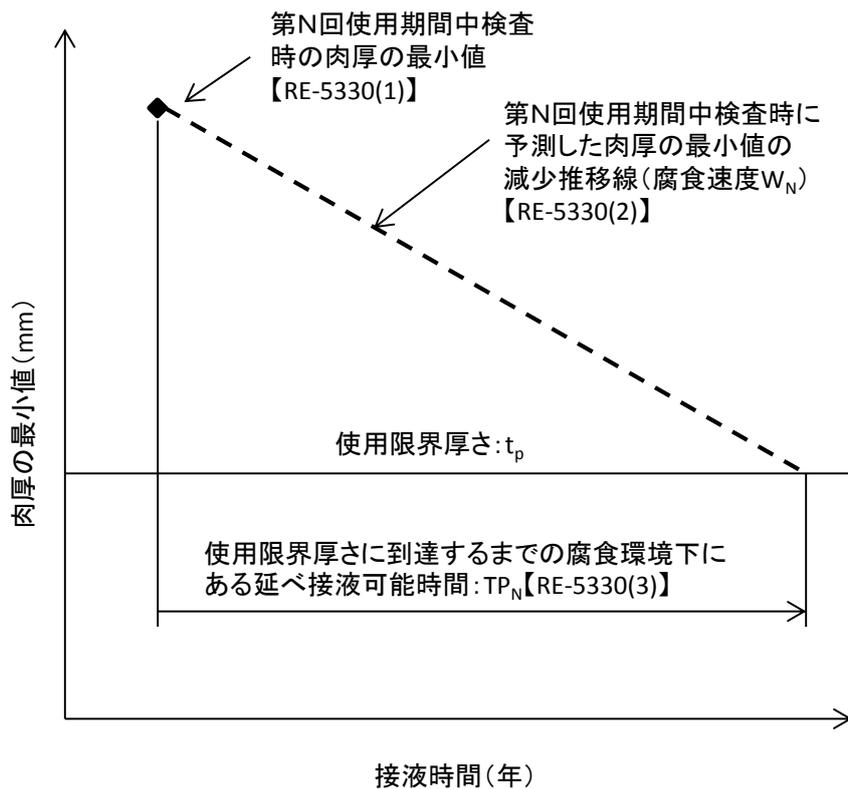
注 数字は本体の章又は節の番号を表す。

図 6.3.2-4 目視試験結果に関わる評価の流れ



注 数字は本体の章又は節の番号を表す。

図 6.3.2-5 系の漏えい検出試験結果に関わる評価の流れ



注 数字は本体の章又は節の番号を表す。

図 6.3.2-6 RE-5330-1 肉厚の使用限界評価

### (3) 使用済み燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準[129]

#### 1) 概要

「使用済み燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準：2010」は(社)日本原子力学会が、原子力学会標準委員会原子燃料サイクル専門部会リサイクル燃料貯蔵分科会、同専門部会及び同委員会の審議を経て改訂したものである。

燃料サイクルにおける中間貯蔵は、再処理施設の操業に柔軟に対応するための手段と考えられている。この観点から 1999 年 6 月に原子炉等規制法が改訂され、使用済み燃料の貯蔵の事業が追加されたことを受け、日本原子力学会が標準を制定・改訂を進めているものである。

この標準とする金属キャスクは、使用済み燃料の中間貯蔵施設での静置・保管だけでなく、原子力発電所からの輸送、及び中間貯蔵施設からの輸送に一貫して使用するものである。このためこの標準では保管及び輸送上の基本的安全機能及び構造上の設計要求、並びに各過程での検査項目及び検査方法を規定したものである。

#### 2) 実施の概要

金属キャスクの検査は、製造時、発電所出荷前、貯蔵前、貯蔵期間中、貯蔵後搬出前の各段階において、輸送物又は金属キャスクが基本的安全機能及び構造強度を持

つことを確認する。

また発電所搬出以降の段階においては、収納する使用済燃料が健全性を維持していることも確認する。検査要領の詳細を表 6.3.2-4、表 6.3.2-5、表 6.3.2-6、表 6.3.2-7、表 6.3.2-8 に示す。

### 3) 適用性

金属キャスクの中間貯蔵施設で貯蔵する使用済燃料は、貯蔵期間の経過につれてその発熱量及び放射線強度が一途に低下する特性を持っており、また使用済み燃料は、不活性ガス雰囲気中で静的に貯蔵する。

金属キャスクは設計評価期間にわたって、環境変化、経年変化を考慮した安全設計及び材料選定を行っており、基本的安全機能に影響を及ぼすような構成部材及び使用済燃料の劣化は考えられない。したがって、貯蔵終了までの間、金属キャスク及び使用済み燃料に有意な変化が生じる可能性は小さい。

このような環境の金属キャスクの検査に係る考え方は、「処分施設における回収維持期間の検討」においても有効であり、この考えに沿った維持管理方法を検討していくことも必要と考えられる。

表 6.3.2-4 金属キャスクについて検査段階ごとに行う検査項目

検査を行う場所		製造工場	原子力発電所	中間貯蔵施設			
確認項目 (安全機能等)	検査の段階 検査で確認する機能	製造時 貯蔵・輸送	発電所 搬出前 輸送	貯蔵前 貯蔵	貯蔵期間中		貯蔵後 搬出前 輸送
	検査項目				貯蔵	輸送	
全般	材料検査 a)	◎	—	—	—	—	—
	寸法検査 a)	◎	—	—	—	—	—
	外観検査 a)	◎	◎	◎	◎ <sup>e)</sup>	○	◎
	溶接検査 b)	◎	—	—	—	—	—
密封機能	気密漏えい検査	◎	◎	○, ◎ <sup>f)</sup>	—	○	◎
	圧力測定検査	—	◎	○, ◎ <sup>f)</sup>	—	—	◎
	二重蓋間圧力検査	—	—	◎	○	—	—
遮へい機能	遮へい性能検査 c)	◎	—	—	□	○	—
	線量当量率検査	—	◎	◎	—	—	◎
臨界防止	未臨界検査	◎	◎	○	○	○ <sup>g)</sup>	○
除熱機能	伝熱検査 d)	□	—	—	□	○	—
	温度計測検査	—	◎	◎	—	—	◎
	表面温度検査	—	—	◎	◎	—	—
構造強度	耐圧・漏えい検査 b)	◎	—	—	—	—	—
	吊上げ荷重検査 b)	◎	—	—	—	—	—
	吊上げ検査 b)	—	◎	◎	—	○	◎
	重量検査 b)	◎	○	○	—	—	○
	据付検査 b)	—	—	◎	—	—	—
使用燃料	収納物検査	—	◎	○	○	—	○
その他	取扱検査	◎	—	—	—	—	—
	作動確認検査	◎	—	—	—	—	—
	表面密度検査	—	◎	◎	—	—	◎

注記 ◎：直接確認するもの ○：記録確認によるもの  
□：代表キャスクについて直接確認するもの —：検査対象外

注 a) 一部は JSME S FA1-2007 に従って検査を行う。  
b) JSME S FA1-2007 に従って検査を行う（同規格では据付検査は外観検査に含まれている）。  
c) 製造時の材料、寸法、外観及び溶接検査記録により、設計に適合する遮へい性能を持つことを確認し、貯蔵期間中に遮へい性能を維持していることを、代表キャスクの表面線量当量率測定値と解析値の比較により確認する。  
d) 製造時の材料、寸法、外観及び溶接検査記録により、設計に適合する除熱性能を持つことを確認し、貯蔵期間中に除熱性能を維持していることを、代表キャスクの各部温度測定値又は表面温度測定値と解析値の比較により確認する。また、製造時には代表キャスクについて模擬発熱体を用いた伝熱検査を行う。  
e) 金属キャスク支持架台（使用する場合）の目視検査を含む。  
f) 該当する部分がある場合、検査を行う。  
g) バスケットの外観検査、寸法検査及び中性子吸収検査について行う

表 6.3.2-5 輸送容器の故障発生と金属キャスク貯蔵中の故障発生と比較 (1/3)

輸送容器 (NFT型の例)										金属キャスク(貯蔵中)							
構成部位	部品	箇所	故障モード	故障原因	影響	故障等級	頻度等級	故障検知方法	燃料輸送の頻度	3~5年次点検	5~10年次点検	頻度等級	故障検知方法	3~5年次点検	5~10年次点検	備考	
容器本体 (除く蓋)	胴内筒、底板、フランジ (溶接部部品)	本体	傷・変形	取扱時貫傷	・除染性の低下	II-①	1	外観検査	○	○	○	5	外観検査	-	-	・貯蔵中取扱作業がほとんど発生しないため、取扱に伴う故障頻度低い、 ・密封性能継続監視	
				取扱時貫傷(蓋シール部)	・密封機能不全	II-②	2	外観・気密漏えい検査	○	○	○	5	外観・気密漏えい検査	-	-		
				異物の付着・堆積等	・密封機能不全 ・取扱不能		2	外観・気密漏えい検査	○	○	○	5	外観・気密漏えい検査	-	-		
			表面のあれ	腐食	異物付着による発錆	・除染性の低下	II-①	1	外観検査	○	○	○	4	外観検査	-		○
					腐食	・構造強度低下	I-② I-③	5	しゃへい検査	-	-	○	5	しゃへい検査	-		○
			疲労	繰り返し使用	・密封機能 しゃへい機能不全	5		外観検査	-	-	○	5	外観検査	-	-		
			割れ	SCC	・取扱不能	5		非破壊検査	-	-	○	5	非破壊検査	-	-		
		変質	熱・照射			5	耐圧検査	-	-	○	5	耐圧検査	-	-			
		ガasketシール面	傷	取扱時貫傷 異物の付着	・密封機能不全	II-②	2	外観検査 気密漏えい検査	○	○	○	5	外観検査	-	-	・一次蓋二次蓋間不適合性ガスが充填され、密封性能継続監視される	
		蓋ボルト穴	変形	取扱時貫傷 異物の付着・堆積 ヘリサートのゆるみ	・蓋ボルト縮孔不良 ・汚染物質の蓄積による隙間からの外部への漏れ ・ヘリサート交差時の下穴貫傷による挿入不良	II-②	2	外観検査	○	○	○	5	外観検査	-	-	・輸送用追加蓋を装着する場合は送付前外観及び気密漏えい検査を行う ・貯蔵中取扱作業がほとんど発生しないため、取扱に伴う故障頻度低い	
緩衝材対用ボルト穴	変形	取扱時貫傷 異物の付着・堆積 ヘリサートのゆるみ	・緩衝材用ボルト縮孔不良 ・ヘリサート交差時の下穴貫傷による挿入不良	II-①	2	外観検査	○	○	○	5	外観検査	-	-	・貯蔵中取扱作業がほとんど発生しないため、取扱に伴う故障頻度低い			
中間筒及び外筒 (溶接部部品(内筒含)、 しゃへい材充填 (しゃへい材:鉛、レジ)	本体	傷・変形	取扱時貫傷	・取扱不能	II-①	1	外観検査	○	○	○	5	外観検査	-	-	・貯蔵中取扱作業がほとんど発生しないため、取扱に伴う故障頻度低い、 ・腐食、SCC に対しては材料選定、塗装により防止されている		
		変形	腐食	・構造強度低下、しゃへい機能不全	I-③	5	外観検査(外部露出部)	-	-	○	5	外観検査(外部露出部)	-	○			
		疲労	繰り返し使用	・取扱不能													
		割れ	SCC														
	変質	熱・照射															
	鉛・レジ	変質	熱・照射	・外部線量当量率の上昇(しゃへい性能低下)	I-③	5	しゃへい性能検査	-	-	○	5	しゃへい性能検査	-	○	・同一環境で長期保管されることから代表キャスクにより実施		
伝熱フィン	変質	熱・照射	・除熱機能低下	I-③	5	伝熱性能確認検査	-	-	○	5	伝熱性能確認検査	-	○	・同一環境で長期保管されることから代表キャスクにより実施			
変形	腐食																
レジカバー	外表面	変形・割れ	取扱時貫傷	・除染性の低下(傷からの滲み)	II-①	4	外観検査	-	-	○	5	外観検査	-	○	・貯蔵中取扱作業がほとんど発生しないため、取扱に伴う故障頻度低い、 ・腐食、SCC に対しては材料選定、塗装により防止されている		
			腐食	・取扱不能	I-①	5											
		変質	熱・照射	・プール水流入、流出による汚染	I-①	5											
トランニオン (ステンレス鋼)	本体	傷・変形	取扱時貫傷	・除染性の低下	II-①	1	吊上げ検査(外観検査)	○	○	○	5	吊上げ検査(外観検査)	-	-	・繰り返し使用がないためPTは不要である		
		変形	腐食・取扱貫傷	・構造強度低下、取扱不能	II-①	5	非破壊検査(PT)	-	○	○	5		-	○			
		割れ	SCC														
		変質	熱・照射														
		疲労	繰り返し使用														
	シリコンシーラント 充填部	変形	取扱時貫傷	・プール水の潤滑部への浸入及び外部への滲みによる汚染	II-①	2	外観検査	○	○	○	2	外観検査	-	-	・搬入先で対応するため検査不要		
	変質	熱・照射			5	密閉検査	○	○	○	5	密閉検査	-	-				
	取付ボルト(合金鋼)	変形	取扱時貫傷	・ボルト縮孔不良	II-①	5	外観検査(取付点検)	-	○	○	5	外観検査	-	○	・繰り返し使用がないため取付点検は不要である		
	取付ボルト穴	変質	熱・照射														
	疲労	繰り返し使用															

注 a)故障頻度 I:安全性能に影響を及ぼすもの II:安全性能に影響があるが、補修及び部品交換により容易に回復するもの III:安全上、直接的な影響を及ぼさないもの  
 b)頻度等級 1:非常にしばしば発生する(取扱の頻度) 2:ごく普通に発生する(1回/1年) 3:少ないけれども発生する(1回/数年程度) 4:めったに発生しない(1回/10年) 5:発生しない(設計評価期間)  
 安全性 ①:容器の取扱い ②:密封性能 ③:しゃへい性能/伝熱性能 ④:臨界防止性能

表 6.3.2-6 輸送容器の故障発生と金属キャスク貯蔵中の故障発生と比較 (2/3)

輸送容器 (NFT型の例)										金属キャスク(貯蔵中)							
構成部位	部品	箇所	故障モード	故障原因	影響	故障等級	頻度等級	故障検知方法	燃料輸送の頻度	3~5年次点検	5~10年次点検	頻度等級	故障検知方法	3~5年次点検	5~10年次点検	備考	
蓋板	蓋板 (ステンレス鋼 炭素鋼)	本体	傷・変形	取扱時異傷	・除染性の低下	II-①	1	外観検査	○	○	○	5	外観検査	-	-	・貯蔵中取扱作業がほとんど発生しないため、取扱に伴う故障頻度低、 ・密封性能も連続監視され、一次蓋も不活性ガス雰囲気中であり外観検査も不要	
				取扱時異傷(蓋シール部)	・密封性能不全		2	外観・気密検査	○	○	○		5	外観・気密漏れ検査	-		-
				異物の付着・堆積等	・密封性能不全 ・取扱不能		2	外観・気密漏れ検査	○	○	○		5	外観・気密漏れ検査	-		-
			表面のあれ	腐食	異物付着による発錆	・除染性の低下	II-②	1	外観検査	○	○	○	5	外観検査	-		○
					腐食	・構造強度低下		5	しゃへい検査	-	-	○	5	しゃへい検査	-		○
			疲労	繰り返し使用	・密封性能 しゃへい 機能不全	I-②	5	外観検査	-	-	○	5	外観検査	-	-		・繰り返し使用による
			割れ	SCC	・取扱不能		I-③	5	非破壊検査・耐圧検査	-	-	○	5	非破壊検査・耐圧検査	-		-
		変質	熱・照射			5					○	5					
		緩衝材取付用ボルト穴	変形	取扱時異傷 異物の付着・堆積 ヘリサートのゆるみ	・ブール入水用ボルトの締付不良によるボルト穴汚染及びS/A取付用ボルトの汚染 ・ヘリサートのゆるみによる、ボルト締付不良 ・ヘリサート交換時のF穴異傷による挿入不良	II-①	2	外観検査	○	○	○	5	外観検査	-	-	・貯蔵中取扱作業がほとんど発生しないため、取扱に伴う故障頻度低、	
		ガスケット溝部	傷・変形	取扱時異傷 異物の付着	・漏れ(送前等各種リークテスト)	II-②	2	外観・気密漏れ検査	○	○	○	5	外観・気密漏れ検査	-	○	・貯蔵中取扱作業がほとんど発生しないため、取扱に伴う故障頻度低、 ・密封性能も連続監視 ・輸送用追加蓋を装着する場合は送前外観及び気密漏れ検査を行う	
ガスケット(密着部)	変形 変質	取扱時異傷 照射・熱		5					○	5							
蓋ボルト	本体	表面のあれ	腐食	・取扱性能低下	II-②	5	外観検査	-	-	○	5	外観検査	-	○	・一次蓋ボルトも不活性ガス雰囲気中であり外観検査も不要 ・貯蔵中取扱作業がほとんど発生しないため、取扱に伴う故障頻度低、 ・輸送用追加蓋を装着する場合は送前外観検査を行う		
			疲労	繰り返し		・構造強度低下・密封性能不全	5				○	5					
			変質	熱・照射		・取扱不能	5				○	5					
		ねじ部	傷・変形	取扱時異傷 メッキ剥離部の発錆	・ボルト締付不良 ・ボルト穴への締付	II-①	2	外観検査	○	○	○	5	外観検査	-		-	
ハレブカバープレート	本体(ボルト穴含む)	変質	熱・照射	・除染性の低下	II-①	1	外観検査・ねじ確認	○	○	○	5	外観検査・ねじ確認	-	-	・一次蓋に設けられるハレブカバープレートは不活性ガス雰囲気中であり外観検査も不要 ・貯蔵中取扱作業がほとんど発生しないため、取扱に伴う故障頻度低、		
		ガスケット溝部	傷・変形	取扱時異傷 異物の付着		III	2	外観検査	○	○	○	5	外観検査	-		-	
		ガスケットシール面	変形	取扱時異傷			5	外観検査	○	○	○	5	外観検査	-		-	
		ガスケット	変質	照射・熱			5				○	5					
	取付ボルト 取付ボルト用穴	傷・変形	取扱時異傷	・ブール入水時カバーの取付不良 ・ヘリサートのゆるみによる、ボルト締付不良 ・ヘリサート交換時のF穴異傷による挿入不良	II-①	2	外観検査・ねじ確認	○	○	○	5	外観検査・ねじ確認	-	-			
バスケット	主要構材 (ステンレス鋼) ボロン入りステンレス鋼 ボロン入りアルミニウム合金 アルミニウム合金	本体	変形	取扱時異傷	・取扱不能	I-④	5	外観検査(キャスク収納状態)	-	-	○	5	外観検査(キャスク収納状態)	-	-	・貯蔵中取扱作業がほとんど発生しないため、取扱に伴う故障頻度低、 ・密封性能も連続監視により確認され貯蔵中不活性ガス雰囲気中での発生は、腐食、SCCの発生による、 ・収納物に表面温度検査による熱・照射による影響の懸念を確認することを確認される	
			変形	腐食	・構造強度低下、取扱不能			外観検査(単体)	-	-	○		外観検査(単体)	-	-		
			割れ	SCC				スルーゲージ確認	-	-	○		スルーゲージ確認	-	-		
			変質	熱・照射				外観検査	-	-	○		(収納物検査、表面温度検査)	-	○		
	ボロン入りアルミ鋼 ボロン入りアルミニウム合金	変質	照射					○	○	○	5	中子線照射材の確認	-	○	・設置申請書参照		

注 a)故障頻度 I: 安全性能に影響を及ぼすもの  
II: 安全性能に影響があるが、補修及び部品交換により容易に回復するもの  
III: 安全上、直接的な影響を及ぼさないもの  
安全性能 ①: 容器の取扱い ②: 密封性能 ③: しゃへい性能/伝熱性能 ④: 臨界防止性能

b)頻度等級 1: 非常にしばしば発生する(取扱の頻度) 2: ごく普通に発生する(1回/1年)  
3: 少ないけれども発生する(1回/数年程度) 4: めったに発生しない(1回/10年)  
5: 発生しない(設計評価期間)

表 6.3.2-7 輸送容器の故障発生と金属キャスク貯蔵中の故障発生と比較 (3/3)

輸送容器 (NFT型の例)											金属キャスク(貯蔵中)				備考	
構成部位	部品	箇所	故障モード	故障原因	影響	故障等級	頻度等級	故障検知方法	燃料輸送の頻度	3~5年次点検	5~10年次点検	頻度等級	故障検知方法	3~5年次点検		5~10年次点検
上部罐体 下部罐体	カバープレート (ステンレス鋼:溶接組立部品)	本体	傷・変形	取扱時損傷	・割れ腐食等の誘発	II-①	1	外観検査	○	○	○	X				
			割れ	SCC	・取扱不能	II-①	5	非破壊検査 (PT)	-	-	○					
			変質 (溶接)	熱・照射												
	充填材 (木材)	被覆材部品	変質	熱・照射		II-③	5	内部の気密性試験	-	-	○					
	緩衝材ボルト (ステンレス鋼)	本体	表面の割れ	腐食	・構造強度低下・取扱不能	II-③	5	外観検査	-	-	○					
疲労			繰り返し													
変質			熱・照射													
	ねじ部	傷・変形	取扱時損傷	・ボルト締付不良 ・ボルト穴への錆着	II-①	2	外観検査	○	○	○						
収納物 (燃料集合体)			変形	取扱時損傷	・未臨界性能の低下 ・構造強度低下 ・燃料リーク及びキャスクの除熱性低下	I-② I-③ I-④	-	送前収納物検査				5	外観検査	-	-	・貯蔵中取扱作業がほとんど発生しないため、取扱に伴う故障頻度低下、 ・密封性能の連続監視により確認される貯蔵中不活性ガス雰囲気中で静置されるため、腐食、SCCの発生は少ない、 ・収納物検査、表面温度検査により、熱・照射による影響が設計想定範囲内であることが確認される
			外観検査	-									-			
			外観検査	-									-			
			(収納物検査、表面温度検査)	-									○			
<p>注 a)故障頻度 I : 安全性能に影響を及ぼすもの II : 安全性能に影響があるが、補修及び部品交換により容易に回復するもの III : 安全上、直接的な影響を及ぼさないもの 安全性能 ① : 容器の取扱い ③ : シャヘイ性能/伝熱性能 ② : 密封性能 ④ : 臨界防止性能</p> <p>b)頻度等級 1 : 非常にしばしば発生する(取扱の頻度) 2 : ごく普通に発生する(1回/1年) 3 : 少ないけれども発生する(1回/数年程度) 4 : めったに発生しない(1回/10年) 5 : 発生しない(設計評価期間)</p>																

表 6.3.2-8 輸送容器の性能維持のための検査項目

“輸送容器定期点検基準”に記載された輸送容器の性能維持のための検査			中間貯蔵施設で行う輸送容器性能維持のための検査						
項目	対象機器・要素	実施区分			中間貯蔵施設での状態	輸送容器の性能維持確認検査の実施			
		定期検査 <sup>a)</sup>	中期検査	長期検査		中期検査 <sup>d)</sup>	長期検査	説明	
外観検査	輸送容器	○			貯蔵時の基本的安全機能維持確認のため定期検査する（トラニオンを含む）。	—	—	貯蔵時の定期検査（外観検査）に包絡される。（トラニオンを含む）。緩衝体、三次蓋は、保管中を含めて定期検査を実施し、実輸送前には輸送前検査を実施する。	
	本体、蓋、緩衝体及び輸送準備作業時解体部品	—	○	○		(○)	(○)		
	弁部等の密封境界を構成する要素の構成部品	—	○	○		× <sup>o)</sup>	× <sup>o)</sup>		密封監視装置の弁部は輸送時の密封境界とはならないので、検査不要。
気密漏えい検査		輸送容器密封装置	—	○	○	貯蔵時の密封機能維持確認のため、二重蓋間圧力モニタリング結果に基づき定期検査する。	(○)	(○)	貯蔵時の定期検査（二重蓋圧力検査）に包絡される。
吊上げ検査	外観検査	輸送容器本体吊上げ装置（トラニオン）	—	○	○	荷重は作用しない。固縛にしようするばあいは、貯蔵時の安全機能維持確認のため定期外観検査を実施する。	(○)	(○)	貯蔵時の定期検査（外観検査）に包絡される。
	浸透探傷検査		—	○	○	×	×	荷重は作用しないので検査不要。	
未臨界検査	外観検査	収納物収納装置（バスケット）	—	○ <sup>b)</sup>	○ <sup>b)</sup>	貯蔵時の臨界防止機能維持確認のため、定期的な代替検査を実施する。	(○)	(○)	貯蔵時の定期検査（未臨界検査）に包絡される。
	寸法検査		—	—	○ <sup>b)</sup>	貯蔵時の臨界防止機能維持確認のため、定期的な代替検査を実施する。	—	(○)	貯蔵時の定期検査（未臨界検査）に包絡される。
	中性子吸収剤検査		—	—	○ <sup>b)</sup>	貯蔵時の臨界防止機能維持確認のため、定期的な代替検査を実施する。	—	(○)	貯蔵時の定期検査（未臨界検査）に包絡される。
作動確認検査		輸送容器の弁、安全装置	—	○ <sup>b)</sup>	○ <sup>b)</sup>	弁、安全装置のない構造である。ただし、密封監視装置が弁を持つことがある。	× <sup>o)</sup>	× <sup>o)</sup>	密封監視装置の弁部は輸送時の密封境界とはならないので、検査不要。
伝熱性能検査（この標準では伝熱検査という。）		輸送容器	—	—	○ <sup>b)</sup>	貯蔵時の除熱機能維持確認のため、表面温度測定結果に基づき定期検査を実施する。	—	(○)	貯蔵時の定期検査（除熱性能確認検査）で代替できる。
遮へい性能検査		輸送容器	—	—	○ <sup>b)</sup>	貯蔵時の遮へい機能維持確認のため、線量当量率測定結果に基づき定期検査を実施する。	—	(○)	貯蔵時の定期検査（遮へい性能確認検査）で代替できる。
耐圧検査		輸送容器密封境界	—	—	○ <sup>b)</sup>	貯蔵時は、負荷が小さいので不要である。	—	×	貯蔵時と同じ理由で検査不要。
その他	密閉検査	耐浸水性を持つ要素	—	○ <sup>b)</sup>	○ <sup>b)</sup>	汚染水に接することはない。	×	×	汚染水に接することはないので検査不要。
	浸透探傷検査	蓋吊金具等	—	○ <sup>b)</sup>	○ <sup>b)</sup>	荷重は作用しない。	×	×	荷重は作用しないので検査不要。
<b>注記</b> ○：実施するもの (○) 実施するが、貯蔵時の検査に包絡されるもの —：輸送用検査として実施していないもの ×：貯蔵の様態から実施不要のもの <b>注</b> a) 1年に1回以上実施する。 b) 輸送容器の特性及び共用状況により必要に応じて実施するもの。 c) 密封監視装置が弁を持ち、かつ、輸送時の密封境界を構成する場合には実施する。 d) 貯蔵時の中期検査は、年次検査として実施する。									

#### (4) 使用済燃料中間貯蔵施設用コンクリートキャスクの安全設計及び検査基準[130]

##### 1) 概要

「使用済燃料中間貯蔵施設用コンクリートキャスク及びキャニスタ詰替装置の安全設計及び検査基準：2007」は、(社)日本原子力学会が策定、発行したものである。

コンクリートキャスクの概念図を図 6.3.2-7 に示す。コンクリートキャスクにおけるコンクリート製貯蔵容器の安全機能は「放射線遮蔽」「除熱」「キャニスタの支持（構造強度）」となり、これらの機能別に必要な部位・部品の特性を表 6.3.2-9 に示す。これら特性に対して、耐熱性、耐放射線性、耐食性について評価を実施するための値が必要となる。

個々の材料について、長期貯蔵の環境条件の影響及び負荷条件を考慮して、経年変化の影響を考慮する必要の有無を文献や試験データに基づき判定する。考慮する必要ありと判定したのものについては、経年変化の影響を低減・防止するかそれを織り込んだ設計対応を行う。例として以下が挙げられる。

- ・材質、構造の変更
- ・使用環境の緩和措置
- ・防食措置
- ・腐食代の考慮
- ・定期点検・保守
- ・予想寿命での部品交換

これら設計対応を考慮した上でも、経年変化により基本的安全機能及び構造強度に影響が生じると考えられるものについては、経年変化の評価を行うこととしている。

このコンクリート部材の健全性に対する評価のフローを図 6.3.2-8 に示す。

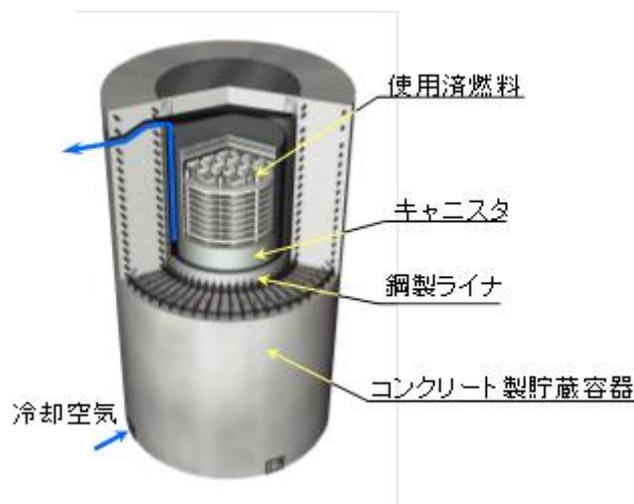


図 6.3.2-7 コンクリートキャスク概念図

表 6.3.2-9 コンクリート製貯蔵容器の主要な設計用特性値

機器・部位・部品		遮蔽	除熱	構造強度*1
コンクリート部	本体胴	寸法・形状、密度、 元素組成	寸法・形状、密度、 熱的物性値	寸法・形状、密度、 機械的物性値 熱膨張係数 強度
	蓋			
鋼製部	本体胴構成部材	寸法・形状、密度、 元素組成	寸法・形状、密度、 熱的物性値	寸法・形状、密度、 機械的物性値 熱膨張係数 強度
	その他鋼製部材	—		

\*1：コンクリート製貯蔵容器のタイプによっては強度を要しない場合がある。

## 2) 実施概要

### a. 経年劣化の評価

コンクリート製貯蔵容器の形態としては、鋼製のケーシング内にコンクリートを充填するものと鉄筋コンクリート製のものがある。ここではコンクリート表面が直接大気に触れる鉄筋コンクリート製貯蔵容器を調査対象とする。鉄筋コンクリート製貯蔵容器の強度を確保する観点からは、経年劣化により鉄筋に腐食が及ばないことが重要となる。

コンクリート製貯蔵容器は供用期間中、その内部に使用済燃料を収納したキャニスタを格納し、内側温度が高くなるが、コンクリートの健全性を維持できる温度範囲に制限することが必要となる。さらに、コンクリート打設後の養生中及び貯蔵中の温度勾配によって生じる応力によるひび割れを許容限度内とする必要がある。

熱的影響の他に放射線照射によるコンクリート強度低下及び腐食の影響について評価する必要がある。腐食については、コンクリート表面が大気中の二酸化炭素に触れることにより生じる中性化及び腐食及びひび割れ箇所からの塩化物イオンの浸入による鉄筋等の腐食が考えられる。

コンクリート部材の健全性に対する評価のフローを図 6.3.2-8 に示す。ひび割れについては外観検査による検知と補修が前提となる。

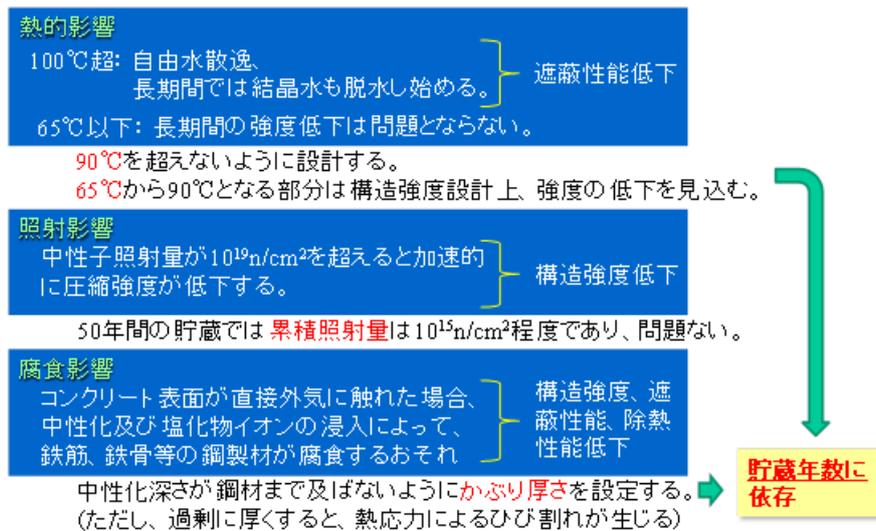


図 6.3.2-8 コンクリート製貯蔵容器のコンクリート部材の健全性に対する評価のフロー

b. 検査

コンクリート製貯蔵容器の検査は以下によるものとする。

①検査段階

- ・ 製造時
- ・ 貯蔵前
- ・ 貯蔵期間中

②検査の方法

以下のいずれかの方法によるものとする。

・ 直接確認

目視または計測器による実測により直接検査結果が判定基準に適合することを確認する。材料証明書及び作業記録の確認を含む。

・ 記録確認

先に実施した別の検査の記録に基づき、その結果が当該検査の判定基準に適合することを確認する。

コンクリート製貯蔵容器のコンクリート部材に対する検査項目と検査を行う場所について表 6.3.2-10 に示す。

表 6.3.2-10 コンクリート製貯蔵容器のコンクリート部材に対する検査

検査を行う場所		製造工場	中間貯蔵施設	
確認項目	検査段階	製造時	貯蔵前	貯蔵期間中
	検査項目			
全般	材料検査	◎	—	—
	寸法検査	◎	—	—
	外観検査	◎	◎	◎
遮蔽機能	遮蔽性能検査	○	◎	○ (◎:代表キャスク)
除熱機能	除熱性能検査	○	○	○
構造強度	据付検査	—	◎	— (外観検査)

◎：直接確認するもの、 ○：記録確認によるもの、 —：検査対象外

c. 検査要領

(a) 材料検査

材料検査は製造時に行うものであり、コンクリート製貯蔵容器に用いる材料が設計どおりのものであることを確認する。

(b) 寸法検査

寸法検査は製作中及び製作完了後に行うものであり、コンクリート製貯蔵容器各部の主要寸法が設計どおりのものであることを確認する。

(c) 外観検査

外観検査は、製造時、貯蔵前及び貯蔵期間中に、それぞれ以下の目的で実施する。

・製造時

コンクリート製貯蔵容器の外観に基本的安全機能及び構造強度に影響を及ぼすような異常のないことを確認する。

・貯蔵前

コンクリート製貯蔵容器の外観に基本的安全機能及び構造強度に影響を及ぼすような異常のないことを確認する。

・貯蔵期間中

コンクリートキャスクの基本的安全機能及び構造強度が維持されていることを確認する。

#### (d) 遮蔽性能検査

遮蔽性能検査は、製造時、貯蔵前及び貯蔵期間中に、それぞれ以下の目的で実施する。

- ・ 製造時  
コンクリート製貯蔵容器の遮蔽体が設計どおりの遮蔽機能を有することを確認する。
- ・ 貯蔵前  
コンクリート製貯蔵容器が遮蔽機能を維持していることを確認する。
- ・ 貯蔵期間中  
コンクリート製貯蔵容器が遮蔽機能を維持していることを確認する。

#### (e) 除熱性能検査

除熱性能検査は、製造時、貯蔵前及び貯蔵期間中に、それぞれ以下の目的で実施する。

- ・ 製造時  
コンクリート製貯蔵容器が設計どおりの除熱機能を有することを確認する。
- ・ 貯蔵前  
コンクリート製貯蔵容器が除熱機能を維持していることを確認する。
- ・ 貯蔵期間中  
コンクリート製貯蔵容器が除熱機能を維持していることを確認する。

#### (f) 据付検査

据付検査は貯蔵前に実施するものでコンクリート製貯蔵容器が設計どおりに設置されていることを確認する目的で実施する。

### 3) 適用性

コンクリートキャスクにおいて、環境条件を考慮した経年変化の影響を考慮した設計対応を行うが、安全機能および構造強度に影響するようなものについては、経年変化の評価を行うこととしている。コンクリート部材の健全性に対する評価や検査方法等について、放射線に関わる影響についても考慮することから放射性廃棄物を取り扱う施設におけるコンクリート材料に共通する部分があり、適用される可能性があるものと考えられる。

## (5) 廃棄物管理施設の新規制基準[131]

### 1) 概要

原子力規制委員会では「核燃料施設等の新基準に関する検討チーム」にて廃棄物管理施設の新規制基準の骨子（案）が報告されており、ここでは後段規制（廃棄物管理規則の改正）が求められている。

### 2) 実施概要

現行の廃棄物管理施設では、他のサイクル施設と違い定期的な評価が求められていない。このため他の原子力施設と違い定期的な評価が求められておらず、他の原子力施設と同様に、経年劣化に関する評価を含む定期的な評価を保安のために講ずべき措置として追加す

ることが求められた。

これにより、定期的な評価は、他のサイクル施設と同様に保安活動に係る評価について、10年を超えない期間ごとに実施すること、および経年変化に関する評価は事業開始から20年を経過する日までに実施し、その後10年を超えない期間ごとに再評価を行うことが後段規制として追加される。

### 3) 適用性

後段規制として追加される「廃棄物管理施設の定期的な評価」は、「原子力発電所の定期安全レビュー実施基準：2009」の考え方を取り込んだものである。

よってこの中長期的に視点に経った保安活動は、「回収維持期間の検討」においても有効であり、この考えに沿った維持管理方法を検討していくことも必要と考えられる。

## (6) 廃棄物管理施設の保安規定(公開版)

### 1) 概要

原子炉等規制法 第51条の18第1項の規定に基づき、事業者にて「再処理事業所 廃棄物管理施設保安規定」が制定されている。

### 2) 実施概要

保安規定における保守管理において、施設定期自主検査の実施が規定され、表 6.3.2-11～表 6.3.2-13 に示す項目について施設定期自主検査を実施することが規定されている。

保安規定において廃棄物管理施設に係る保安に関する事項を定め、核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物による災害の防止を図っている。

また第3章の廃棄物管理施設の操作及びガラス固化体の管理において、巡視点検を行うことが規定され、表 6.3.2-15 に示す項目について毎日一回以上巡視・点検を行うことが規定されている。

### 3) 適用性

表 6.3.2-11～表 6.3.2-13 に示す設備及び機器について、施設定期自主検査を行うことにより、適切な保守管理が行われている。

コンクリート躯体を含めた廃棄物管理施設本体として、線量当量率検査及び空気中の放射性物質の濃度測定試験を行うことで、安全上重要な設備であるしゃへい壁の欠陥等がないことを確認している。また表 6.3.2-15 に示すように、建屋の外観を含めて日々の巡視点検が行われており、建物を含めた維持管理を行う仕組みが維持されている。

なお、コンクリートの健全性を確認する文献等の例を表 6.3.2-15 に示す。

表 6.3.2-11 施設定期自主検査を行う設備及び検査項目 (1/3)

設備及び機器	検査項目	頻度
ガラス固化体の冷却空気温度の測定等を行う計測制御設備	[冷却性能検査] ・冷却空気出口温度を実測値と計算値で比較して適切な冷却空気流量が得られていることを確認する	1回/年
	[校正検査] ・校正装置を用いて、当該計器の校正を行う	1回/年
収納管排気設備の入口圧力の測定等を行う計測制御設備	[警報検査] ・制御盤に模擬信号を入力し、警報装置が正常に作動することを確認する	1回/月
	[警報検査] ・差圧発信機に模擬信号を入力し、警報装置が正常に作動することを確認する	1回/年
	[校正検査] ・校正装置を用いて、当該計器の校正を行う	1回/年
廃水貯槽の漏えい水の検知装置	[警報検査] ・制御盤に模擬信号を入力し、警報装置が正常に作動することを確認する	1回/月
	[警報検査] ・漏えい検知ピットの電極式液位計の下に容器を置き、その中に水を注ぎ正常に警報が作動することを確認する	1回/年
廃水貯槽の水位の測定を行う計測制御設備	[校正検査] ・校正装置を用いて、当該計器の校正を行う	1回/年
放射線管理用固定式モニタ*	[校正検査] ・標準線源等を用いて放射線モニタの校正を行う [警報検査] ・モニタの検出部に模擬信号を入力し、警報装置が正常に作動することを確認する	1回/年
受入れ建屋天井クレーン	[輸送容器つり上げ高さの制限のインターロック機能検査] ・輸送容器のつり上げ高さが9m以上となる範囲に移動しないように、クレーンが停止することを確認する [電源喪失時の輸送容器保持検査] ・電源喪失時にも水平つり具を保持できることを確認する	1回/年
輸送容器搬送台車	[過走行防止のインターロック機能検査] ・輸送容器搬送台車を走行させ所定の位置で停止することを確認する [ガラス固化体の抜き出しに係るインターロック機能検査] ・ガラス固化体検査室天井クレーンによる抜き出し確認信号の有無による輸送容器搬送台車の走行可否を確認する	1回/年

\* : ガンマ線エリアモニタ (9 台)、ベータ線ダストモニタ (1 台)、ガラス固化体受入れ・貯蔵建屋換気筒モニタ (2 台)、冷却空気出口シャフトモニタ (2 台)

表 6.3.2-12 施設定期自主検査を行う設備及び検査項目 (2/3)

設備及び機器	検査項目	頻度
ガラス固化体検査室天井クレーン	<p>[ガラス固化体つり上げ高さの制限のインターロック機能検査]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ガラス固化体のつり上げ高さが9m以上となる範囲に移動しないように、クレーンが停止することを確認する</li> </ul> <p>[つり具のガラス固化体着脱検査及び電源喪失時のガラス固化体保持検査]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・つり具が模擬ガラス固化体を掴むことができること及び離すことができることを確認する。また、電源喪失時にも模擬ガラス固化体を保持できることを確認する</li> </ul>	1回/年
貯蔵建屋床面走行クレーン	<p>[つり具のガラス固化体着脱検査及び電源喪失時のガラス固化体保持検査]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・つり具が模擬ガラス固化体を掴むことができること及び離すことができることを確認する。また、電源喪失時にも模擬ガラス固化体を保持できることを確認する</li> </ul> <p>[過走行防止のインターロック機能検査]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・貯蔵建屋床面走行クレーンが所定の位置に停止していない限りしゃへい容器付トロリを移動できないことを確認する</li> </ul>	1回/年
ガラス固化体受け入れ・貯蔵建屋換気筒	<p>[処理能力検査（排気風量検査）]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ガラス固化体受け入れ・貯蔵建屋換気筒における排気風量が所定の値以上であることを確認する</li> </ul>	1回/年
換気設備	<p>[高性能粒子フィルタ粒子除去効率検査]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・汚染のおそれのある区域の排気系統を構成している高性能粒子フィルタの粒子除去効率が所定の値以上であることを確認する</li> </ul> <p>[負圧試験]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・汚染のおそれのある区域内が、負圧に維持されていることを確認する</li> <li>また汚染のおそれのある区域の対象室の測定値（外気に対する差圧）が、正常区域の対象室の測定値よりも低いことを確認する。</li> </ul>	1回/年
収納管排気設備	<p>[高性能粒子フィルタ粒子除去効率検査]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・汚染のおそれのある区域の排気系統を構成している高性能粒子フィルタの粒子除去効率が所定の値以上であることを確認する</li> </ul> <p>[負圧試験]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・収納管排気設備の入口圧力を計測し、収納管内が負圧に維持されていることを確認する</li> </ul>	1回/年

表 6.3.2-13 施設定期自主検査を行う設備及び検査項目 (3/3)

設備及び機器	検査項目	頻度
廃棄物管理施設	<p>[線量当量率測定検査]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・廃棄物管理施設中人が常時立ち入る場所、廃棄物管理施設の使用時特に人が立ち入る場所その他放射線管理を特に必要とする場所における線量当量率を測定し、所定の値以下であることを確認する</li> </ul> <p>[空気中の放射性物質の濃度測定検査]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・廃棄物管理施設中人が常時立ち入る場所、廃棄物管理施設の使用時特に人が立ち入る場所その他放射線管理を特に必要とする場所における空気中の放射性物質の濃度を計測し、所定の値以下であることを確認する。</li> </ul>	1回/年

表 6.3.2-14 巡視を行う設備等

対象設備	巡視・点検項目
1 ガラス固化体受入れ設備	<p>(1) 輸送容器一時保管区域における輸送容器の保管状況等（異常の有無）</p> <p>(2) ガラス固化体検査室内の状況</p>
2 ガラス固化体貯蔵設備	(1) 貯蔵ピットの状況（搬送室床面の収納管ふた等の状況）
3 計測制御設備	(1) 現場設置の計測制御設備の状況、現場計測器の指示値及び外観
4 放射線監視設備	(1) 放射線監視盤の状態及び指示値（異常の有無）
5 気体廃棄物の廃棄設備	<p>(1) 送風機、排風機の運転状態（異常の有無）</p> <p>(2) フィルタの差圧状態</p>
6 液体廃棄物の廃棄設備	(1) 漏えいの有無
7 固化地廃棄物の廃棄設備	(1) 固体廃棄物の保管状況
8 その他	<p>電気設備</p> <p>(1) 電源盤の状況（異常の有無）</p> <p>建物</p> <p>(1) 外観（建物の損傷の有無、冷却空気入口シャフトの異物の有無）</p> <p>(2) 負圧の状態</p>

表 6.3.2-15 コンクリート維持管理に関する文献（指針、論文など）調査の候補例

書名	発行年月	発刊元
コンクリート構造物の目視試験方法	2005.5	(社) 日本非破壊検査協会
鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断及び補修指針（案）・同解説	1997.1	(社) 日本建築学会
コンクリート標準示方書 [維持管理編]	2013.10	(社) 土木学会

(7) 高レベル放射性廃棄物貯蔵管理について[133]

1) 概要

海外から返還されるガラス固化体を貯蔵するための廃棄物管理施設は、1995年1月に施設の使用前検査合格証が交付されて操業運転を開始している。

事業者である日本原燃株式会社より「高レベル放射性廃棄物貯蔵管理について」(1)として施設の概要が報告されている。

## 2) 実施概要

廃棄物管理施設の安全設計の実施概要として以下が報告されている。

### a. 放射性物質の閉じ込め

ガラス固化体は高レベル廃液をガラスとともに固化し、ステンレス製の容器に封入しているので、長期間にわたり放射能を安定して閉じ込めることができる。

また、ガラス固化体を取り扱うガラス固化体検査室やガラス固化体を収納する収納管は、気体廃棄物の廃棄施設に接続し、負圧に維持することにより、空気が汚染のおそれのある区域から清浄区域に流れないようにしているので放射性物質を閉じ込めることができる。

さらに、それらのガラス固化体を取り扱う区域からの排気は、気体廃棄物の廃棄施設において適切にろ過された後、排気モニタリング施設で放射性物質の濃度を監視しながらガラス固化体受入れ・貯蔵建屋換気筒の排気口から大気に放出される。

### b. 放射線の遮蔽

ガラス固化体を貯蔵する貯蔵区域やガラス固化体検査室は、地下に配置し、厚さ約 1.5～2m のコンクリート壁等で放射線を遮蔽している。

このため、施設からの放射線の線量は最大でも敷地境界で年間約 0.007mSv であり、法令に定める線量限度値（年間 1mSv）を十分下回っている。

### c. 耐震設計

廃棄物管理施設は、鷹架層と呼ばれる堅固な地盤の上に設置されている。重要な施設は一般のビルを設計する場合の3倍の地震力にも耐えられ、かつ、過去の地震で当敷地内にもっとも大きな影響を与えた地震（1902年三戸地方の地震、1931年の青森県南東沖の地震、1978年青森県東岸の地震等）を上回る地震を想定し、これに対しても施設が損傷することはない設計としている。

### d. 航空機に対する考慮

廃棄物管理施設は、三沢対地訓練区域で訓練飛行中の航空機が墜落することを想定しても、安全確保上支障がないよう防護設計をしている。防護対象施設は、一般に与える放射線被ばくのリスクの観点からガラス固化体を保管しているガラス固化体貯蔵建屋の貯蔵区域、およびガラス固化体検査室としている。

なお建物・構築物は、航空機の墜落に伴う火災も考慮して設計している。

またガラス固化体輸送容器は、航空機の衝撃荷重に対して健全性が確保できる構造のものを受け入れる。

### e. 施設の安全管理

廃棄物管理事業を安全に行うため、巡視・点検や定期自主検査等の保守管理ならびに放射線管理等を実施する。これらは保安規定に定め、国の認可を受けている。

### 3) 適用性

前述 2)で述べたように、高レベル放射性廃棄物貯蔵管理施設に関して実施されている安全設計の概要を示した。地層処分の地上施設においてガラス固化体を直接扱うガラス固化体受入れ検査・封入施設に対する安全設計についても a.~c.については、同様な考え方が適用されるものとする。d.についても場所が特性された段階で、場所特有の考慮事項がある場合には安全設計としての対応が求められることが分かる。

### 6.3.3 国外の地層処分関連施設の回収維持に関する文献調査

平成 23 年度地層処分回収技術高度化開発において調査した「諸外国の放射性廃棄物の回収可能性に対する考え方」[134]を基に、回収維持期間について表 6.3.3-1 に示すとおり整理した。また同年度に取りまとめられた NEAR&R プロジェクト (2007 年～2011 年) 最終報告書[135]においても、各国の回収について、可逆性・回収可能性に関する現状が記述されている。以下に概要を示す。

回収に関して可逆性・回収可能性を法令にて規定している国は以下に示す 3 ヶ国である。

フランス :

可逆的な地層処分基本とする法律 (放射性廃棄物等管理計画法,2006) を制定している。地層処分場の可逆性が保証されない限り設置許可はおりない。処分プロセスの可逆性を担保する最低限の期間を規定しており、その期間は少なくとも 100 年以上としている。

米 国 :

操業期間中に回収可能なように設計・建設することを法令 (放射性廃棄物政策法,1982) に定めている。定置期間中及びその後の期間を通じて、性能確認プログラムや同プログラムで得られた情報に関する NRC (原子力規制委員会) の審査が完了するまで、廃棄物の回収を可能とする、としている。

スイス :

回収可能性を維持した監視付き長期地層処分を法令 (原子力法・令,2005) に定めている。地層処分場は主処分施設とパイロット施設および試験施設から構成されており、処分施設が閉鎖前にモニタリングされ、回収可能な比較的長い期間としている。

法令に規定されていないが、安全基準・指針類によって、回収可能性のあり方を示している国は以下のとおりである。

フィンランド :

回収可能性に関しては、今の STUK の基準では記述されていない。ただし国会で承認された原則決定では、回収可能性が優遇されており、これが生きている。ポシヴァは、この原則決定が上位であることから回収可能性を検討している。また、長期安全性は回収可能性等によるべきではないとしている。

スウェーデン :

回収を容易にするために講じられる措置が処分場の安全性に与える影響については、それを評

価し放射線安全機構（SSM）に報告しなければならない（SSM 最終処分規則,2008）。また、操業中・閉鎖後に廃棄物の回収を容易にするために建設時・創業時に適切な措置を講じることができる、としている。

カナダ：

操業期間の処分概念には、不測の事態への対策として廃棄物の回収方法がくみ込まれていないなければならない（R-71 概念評価段階に関する背景情報および規制要件,1985）、とされている。また、適応性のある段階的管理（APM）は、3つの段階を経て実現される予定であり、最終的な処分場の閉鎖は300年後とすることが想定されている。

日本：

安全規制の考え方として、閉鎖までは回収可能性を維持する必要があるとしている。分施設の閉鎖に際しては、建設段階及び操業段階に得られたデータを追加し、安全評価の結果が妥当であることを確認する。その妥当性を確認するまでの期間は、高レベル放射性廃棄物の回収の可能性を維持する、としている。

その他：

NEA R&R プロジェクト最終報告書[135]において、各国の要件の現状では、上記の国以外について「他のほとんどの国では可逆性と回収可能性は国内の議論で、現時点では話題になっていないものの、専門家の間では重要になる可能性のある課題として認識されている」と記述されている。

また、R&R プロジェクト作業グループ内で到達した主な結論と集約意見[135]の中では、「回収可能性をとるか、安全をとるかの問題がある場合、一般には、まず安全を優先させるということに合意がある。非常に長期に見ると、処分場を必要以上に長期間、開放したままにしておくことで回収可能性を高めようとする、安全性を低下させる可能性がある（例：適切に閉塞し、閉鎖した時の状態が安全であるように設計された施設は、閉塞・閉鎖されずに放棄される場合において安全ではないといえる。そして、長期間、処分場を解放したままにしておく、これが発生するリスクを高めることになる。）」と記述されている。

表 6.3.3-1 諸外国の回収維持期間に関する法規制等

国名	基本的な考え方（法規制等）	具体的な内容
フィンランド	回収に関わる法的な規定はない	回収可能性に関しては、今の STUK の基準では記述されていない。ただし国会で承認された原則決定では、 <u>回収可能性が優遇されており、これが生きている</u> 。ポシヴァは、この原則決定が上位であることから回収可能性を検討している。また、長期安全性は回収可能性等によるべきではないとしている。
スウェーデン	回収に関わる法的な規定はない 回収を容易にするために講じられる措置が処分場の安全性に与える影響については、それを評価し放射線安全機構（SSM）に報告しなければならない【SSM 最終処分規則, 2008】	処分場の健全性保証のためモニタリングを行う <u>操業中・閉鎖後に廃棄物の回収を容易にするために建設時・創業時に適切な措置を講じることができる。</u>
フランス	可逆的な地層処分を基本とする法律を制定する。【放射性廃棄物等管理計画法, 2006】 放射性廃棄物の深地層処分は「可逆性の原則を順守して」実施する【深地層における放射性廃棄物の最終処分に関する安全指針, 2008】	地層処分場の許可申請後、可逆性の条件を定める法律を制定。地層処分場の可逆性が保証されない限り設置許可はおりない。処分プロセスの可逆性を担保する最低限の期間を規定（その期間は少なくとも 100 年以上）。
米国	処分場は操業期間中に使用済燃料が回収可能なように設計・建設する。【放射性廃棄物政策法, 1982】	<u>操業期間中に安全性・使用済燃料からの有用物の回収目的で使用済燃料を回収できることを設計・建設に求めている</u> 定置期間中及びその後の期間を通じて、性能確認プログラムや同プログラムで得られた情報に関する NRC（原子力規制委員会）の審査が完了するまで、廃棄物の回収を可能とする。
スイス	回収可能性を維持した監視付き長期地層処分を採用【原子力法・令, 2005】	地層処分場は主処分施設とパイロット施設および試験施設から構成される <u>モニタリング期間は処分施設閉鎖前に監視され、回収可能な比較的長い期間。</u> 廃棄物の回収が、処分施設の閉鎖まで多額の費用をかけずに可能であることが、操業許可の一つの条件。
カナダ	操業期間の処分概念には、不測の事態への対策として廃棄物の回収方法がくみ込まれていなければならない。【R-71 概念評価段階に関する背景情報および規制要件, 1985】	適応性のある段階的管理（APM）は、3つの段階を経て実現される予定であり、 <u>最終的な処分場の閉鎖は 300 年後とすることが想定されている。</u> この期間中、使用済燃料は監視され、回収可能な状態とすることが示されている（核燃料廃棄物管理機関 NWMO）。
日本	処分施設の閉鎖までは、廃棄物の回収を可能とすることが処分施設の要件とされている。	処分施設の閉鎖に際しては、建設段階及び操業段階に得られたデータを追加し、 <u>安全評価の結果が妥当であることを確認。</u> また、その妥当性を確認するまでの期間は、 <u>高レベル放射性廃棄物の回収の可能性を維持する。</u>

### 6.3.4 調査結果の回収維持期間の検討への適用性

類似施設の調査結果が地層処分施設の操業安全性や回収維持期間の検討においてどのように適用できるか、回収維持期間における既往設計の考え方の適用性、既往維持管理技術の適用性、回収維持期間における安全上具備すべき施設・機器の検討・整理、諸外国における回収維持期間の考え方、について整理を行った。

#### (1) 回収維持期間における既往設計の考え方の適用性（国内）

##### 1) 地下坑道施設に関する知見による検討

処分坑道を埋め戻さない時期が存在した場合、空洞安定性を確保するための維持管理を長期間にわたり実施する必要がある。例えば、現在 J R 東日本ではトンネルの覆工検査実施にあたり、図 6.3.4-1 に示すような車両を用いることにより、効率的かつ効果的な維持管理を実施している[136]。

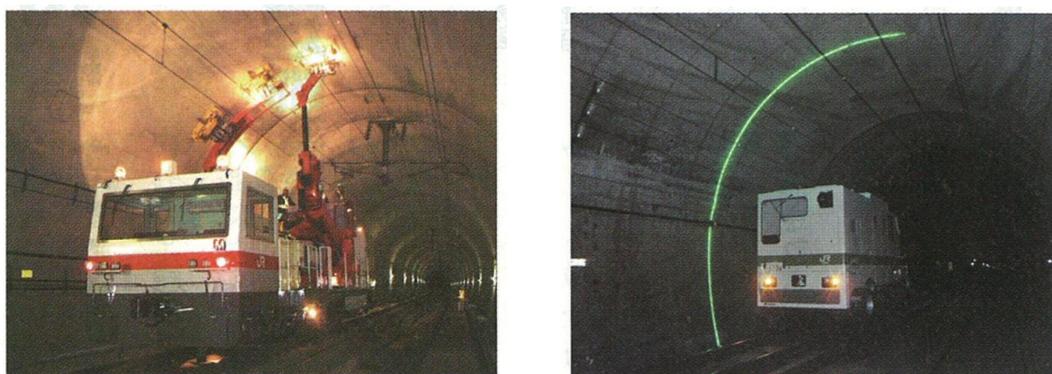


図 6.3.4-1 トンネル覆工検査車両（J R 東日本）[136]

処分坑道の維持管理においても、これらの手法が適用可能であると考えられる。このため、処分坑道の標準設計断面は、点検車両および補修・補強工工事車両の通行、モニタリング設備の設置、その他の管理のための空間などを考慮する必要がある。ここで、第2次取りまとめでまとめられている処分坑道における標準断面図を図 6.3.4-2 に再掲し、各処分孔方式ごとに設計断面について整理すると以下ようになる。

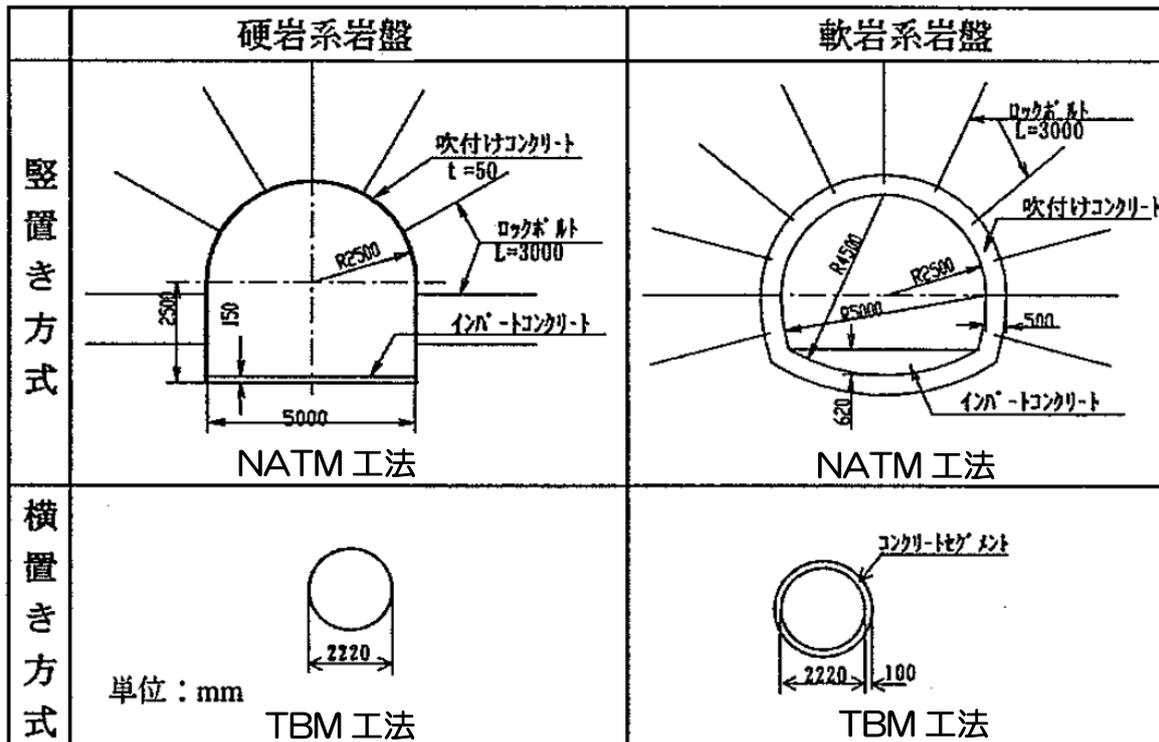


図 6.3.4-2 処分坑道における標準断面図（「第2次とりまとめ」に加筆）

・ 縦置き方式

第2次取りまとめで示されたNATM工法による標準断面について、前述した維持管理を実施するための断面積を確保した設計を実施する必要があると考えられる。また、空洞安定性確保および人工バリア保護の観点から、覆工コンクリートの設置も検討する必要があると考えられる。繰返し車両が通行することなどを踏まえ、インバートコンクリートの厚さを確保することも検討する必要があると考えられる。

・ 横置き方式

第2次取りまとめで示されたTBM工法の円形断面については、廃棄体定置後に緩衝材が膨潤するまでの期間、坑道壁面と緩衝材の間に生じる隙間の安定性を確保することが重要になると考えられる。隙間に充填材を充填しない場合、緩衝材が膨潤を完了するまでの期間（第2次とりまとめによると再冠水までは50年程度）に緩衝材が損傷を受けないような維持管理が重要となる。また、処分坑道を一定期間埋め戻さない場合、その期間中、緩衝材の人工バリア性能について、確認していく必要があると考えられることから、緩衝材の状態に関するモニタリングの継続が重要となる。これらの維持管理については、現在、各事業者が地下坑道施設において実施している維持管理方法をそのまま適用することは難しいと考えられる。

地下坑道施設において実施されている維持管理手法を適用する場合には、標準断面の大きさを見直し、維持管理のための空間を確保することが考えられる。しかし、円形断面で維持管理に必要な空洞高さや幅を確保する場合、無駄な空間が発生し、合理性・経済性が

劣る可能性がある。

## 2) 原子力関連施設に関する知見による検討

原子力施設、関連機器における安全性に関わる考え方としては、前述したように、施設などにおいては保安活動により中長期的な安全運転管理を実施するものと、キャスクなどにおいては設計により安全を確保するものとなる。

設計においては、設計評価期間を設けてこの期間における環境変化、経年変化を考慮した安全設計及び材料選定を行う。このような考え方においては、基本的安全機能に影響を及ぼすような構成部品の劣化は無いものと考え、使用期間における有意な変化が生じる可能性は小さいとしている。

このような設計の考え方は、回収維持期間や埋戻し期間の限界期間が設定されれば有効と考えられる。

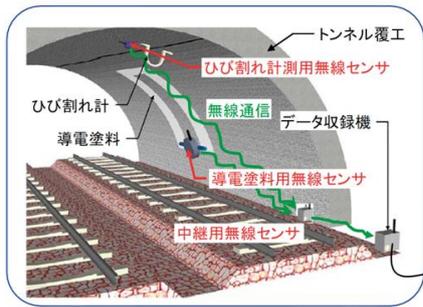
## (2) 既往維持管理技術の適用性の検討・整理（国内）

### 1) 地下坑道施設に関する知見による検討

わが国における高速道路や新幹線などのトンネルは、供用からすでに約 50 年が経過しており、このような地下坑道施設で用いられてきた維持管理技術を処分坑道に適用することは実績から十分可能であると考えられる。

しかしながら、JRやNEXCOなどの各事業者は、この数年のうちに大量の構造物の更新時期を迎える問題に対応して、構造物の劣化や長期保全、更新のあり方に関する技術について、さまざまな技術開発や研究を推進しているところである。これらには、日常管理のための維持管理計測技術、非破壊検査などの点検技術、劣化機構の推定および劣化予測技術、性能評価と対策の要否判定技術、補修・補強工法技術などがある。また、これらを統合したうえでライフサイクルを勘案したストックマネジメント技術についても研究・開発が行われている。図 6.3.4-3 に（財）鉄道総合技術研究所において開発中または実用化した維持管理技術の例を示す[137]。処分施設の安全性と回収可能性を確保するために、処分坑道についても常にこれらの最新の知見を取り入れた検討を行っていく必要があると考える。

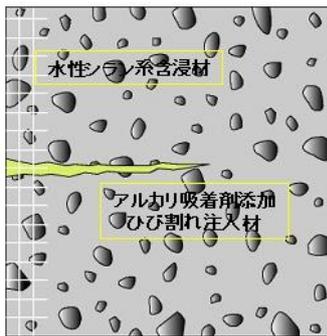
また、前項で述べたとおり処分坑道の断面によっては、各事業者で実施している計測、点検、補修・補強に関する各技術が適用できない場合もあるので留意する必要がある。



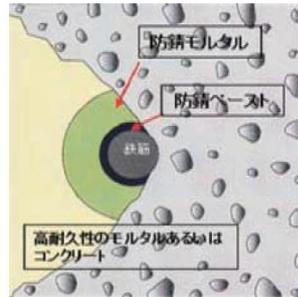
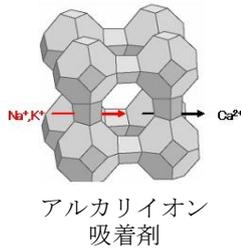
無線センサーを活用したトンネル変状監視システム



トンネル健全度診断システム



SAAR 工法による補修  
(アルカリ骨材反応の進行を抑制)



SSI 工法による補修  
(塩害による鋼材の腐食を抑制)

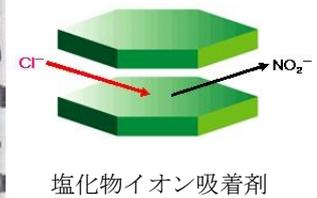


図 6.3.4-3 (財) 鉄道総合技術研究所による開発中または実用化した維持管理技術の例[137]

## 2) 原子力関連施設に関する知見による検討

原子力施設における定期安全レビュー(PSR)のねらいは、年度単位の活動について改善の必要性を評価する“短期的な評価 (マネジメントレビューなど)”と異なり、中長期的な視点に立脚して評価対象期間の保安活動を評価し、必要に応じて安全性向上のために有効な追加措置を抽出することにより、今後、当該プラントが最新のプラントと同等の高い水準を維持しつつ安全運転を継続できる見通しを得るためのものである。

このような中長期的に視点に経った保安活動は、空洞安定性の検討においても有効であり、この考えに沿った管理が適用可能であると想定される。

また、廃棄物管理施設などのコンクリート躯体を含めた施設本体として、線量当量率検査及び空気中の放射性物質の濃度測定試験を行うことで、安全上重要な機能であるしゃへい壁の欠陥等がないことが確認され、建屋の外観を含めて日々の巡視点検が行われており、建物を含めた維持管理を行う仕組みが維持されている。

## (3) 回収維持期間における安全上具備すべき施設・機器の検討・整理 (国内)

一定期間埋め戻さない維持期間を考慮したこれまでの検討結果を踏まえ、処分施設において安全上具備すべき施設・機器の検討および整理を行った。ここでは、第2次取りまとめで示されている施設・機器との違いを検討の観点とした。

## 1) 坑道

以下に、回収維持期間における坑道に関して、安全上具備すべき施設・機器を挙げる。

- ・長期間の空洞安定性保持および人工バリアへの影響をなくすための覆工コンクリートの設置
- ・覆工コンクリートに作用する水圧を低減させる裏面排水設備やドレーン設備
- ・維持管理（計測、検査、補修・補強工など）を可能とする空間を確保した内空断面
- ・空洞安定性を長期間評価可能（更新可能または超長寿命）なモニタリング設備
- ・地震時等の湧水量増大に対応可能な排水設備
- ・処分坑道全線の健全度を管理するシステム

## 2) 人工バリア

以下に、人工バリアに係わる安全上具備すべき施設・機器を挙げる。

- ・回収維持期間における坑道内の放射線管理のためのモニタリング設備
- ・人工バリアへの影響を評価するための人工バリア周辺の環境モニタリング設備
- ・緩衝材の変形・流出状況を確認するためのモニタリング設備

## (4) 諸外国における回収維持期間の考え方

諸外国の回収維持期間に関する調査結果(表 6.3.3-1)に基づき、我が国への適用性について、以下に整理した。

回収に関して、可逆性・回収可能性を法令にて規定している国は以下に示す3ヶ国である。期間に関しては、唯一フランスが処分プロセスの可逆性を担保する最低限の期間として、その期間は少なくとも100年以上と規定(放射性廃棄物等管理計画法,2006)している。米国は回収可能なように設計・建設することを法令(放射性廃棄物政策法,1982)に定めているが、定置期間中及びその後の期間を通じて、性能確認プログラムや同プログラムで得られた情報に関するNRC(原子力規制委員会)の審査が完了するまで、廃棄物の回収を可能とする、としており、期間そのものは設定されていない。スイスでは、回収可能性を維持した監視付き長期地層処分を法令(原子力法・令,2005)に定めており、地層処分場は主処分施設とパイロット施設および試験施設から構成されており、処分施設が閉鎖前にモニタリングされ、期間については回収可能な比較的長い期間、としている。

法令に規定されていないが、安全基準・指針類によって、回収可能性のあり方を示している国は以下に示すとおりである。フィンランドでは、回収可能性に関して、今のSTUKの基準では記述されていない。ただし国会で承認された原則決定では、回収可能性が優遇されており、これが生きている。ポシヴァは、この原則決定が上位であることから回収可能性を検討している。また、長期安全性は回収可能性等によるべきではないとしている。スウェーデンでは、回収を容易にするために講じられる措置が処分場の安全性に与える影響については、それを評価し放射線安全機構(SSM)に報告しなければならない(SSM最終処分規則,2008)。また、操業中・閉鎖後に廃棄物の回収を容易にするために建設時・操業時に適切な措置を講じることが

できる、としている。カナダでは、操業期間の処分概念には、不測の事態への対策として廃棄物の回収方法がくみ込まれていなければならない（R-71 概念評価段階に関する背景情報および規制要件,1985）、とされており、適応性のある段階的管理(APM)は、3つの段階を経て実現される予定であり、最終的な処分場の閉鎖は300年後とすることが想定されている。

日本では安全規制の考え方として、閉鎖までは回収可能性を維持する必要があるとしている。分施設の閉鎖に際しては、建設段階及び操業段階に得られたデータを追加し、安全評価の結果が妥当であることを確認する。その妥当性を確認するまでの期間は、高レベル放射性廃棄物の回収の可能性を維持する、としており、回収維持期間に関する検討を行っている。

このような諸外国の可逆性・回収可能性における法令や安全指針等の中から、回収維持期間に係ると思われる基本的な考え方を以下に整理した。

- 調査した7か国のほとんどの国が、地層処分に関する法令や安全指針等において回収可能性を維持する、としている。
- 調査した7か国のうちほとんどの国（フランス以外）は、それぞれの国の背景や諸事情から、回収維持期間について明確な期間を定めていない。
- 可逆性・回収可能性のために講じられる措置が、処分場の長期安全性の妨げになってはならない、としている。
- 処分場を必要以上に長期間、開放したままにしておくことで回収可能性を高めようとすると、安全性を低下させる可能性がある、としている。

## 6.4 抽出した課題の整理と課題解決の方策

これまでに抽出された課題について、周辺岩盤及び坑道と人工バリアにおいて「抽出した課題の整理」と「課題解決の方策」を以下に取りまとめた。

### 6.4.1 周辺岩盤および坑道にかかわる課題と方策

これまでに抽出された周辺岩盤及び坑道における課題について、次に示す分類を試みる。分類 a.として「設計（仕様設定）の段階において解決方策が必要な課題」、分類 b.として「埋め戻さない維持期間（操業中）において解決方策が必要な課題」である。これより、方策の検討における解決の観点を明確にする。

#### (1) 抽出した課題の整理

周辺岩盤および坑道の劣化現象は対象岩盤の特性に依存し、力学的、水理学的、化学的、熱的影響の相互作用による複雑な連成現象が生じることがわかった。また、支保部材を構成するコンクリートや鋼材に関する劣化現象については、6.2.2 項 (5) 使用材料の経時的な変状において整理したように余裕深度処分施設において長期状態評価に関する研究が進められている。これらの最新研究動向の調査結果をみると、とりわけ周辺岩盤については、現時点で現象の定量的な評価は非常に困難であると考えられる。しかし、これらの調査結果は、坑道を一定期間埋め戻さない時期が存在した場合に基本的には処分施設の安全性を損なう方向への状態変化が進行することを示唆している。このことから、空洞の安定性確保のためには岩盤や坑道の複雑な挙動や劣化現象を解明・予測する研究に加えて、工学的な対策としての適切な維持管理が重要であることは明らかである。ここで、維持管理については、既存の施設で実施されている技術を処分坑道に適用することの可能性を 6.3.4 項調査結果の回収維持期間の検討への適用性においてまとめた。すなわち維持管理によって、坑道および周辺岩盤の変化を継続的に把握し、その状態に応じて適宜対策を施していくことにより空洞の安定性を保持していくことは可能であると考えられる。よって、回収維持期間に係わる研究開発課題及は、支保や周辺岩盤の劣化などの処分施設の安全性に影響を及ぼす方向への状態変化を遅らせる耐久性向上の観点、および、人工バリア性能へ及ぼす影響を防ぐための坑道環境の維持管理の観点から以下のとおりまとめた。

##### a 設計（仕様設定）の段階において解決方策が必要な課題

設計段階において解決方策が必要な課題としては、以下が挙げられる。

- ・覆工および水圧低減のための排水工に関する適用性および設計方法の検討
- ・更新可能または高耐久性な維持管理計測設備の検討
- ・上記を踏まえた維持管理（計測、検査、補修・補強工等）を可能とする坑道断面の検討

覆工は、支保や岩盤の劣化防止および坑道の形状・機能確保など、坑道の供用中の安定性を保持することを目的として、道路トンネルや鉄道トンネルなどの重要施設において設置されているものである。第2次取りまとめで示された標準断面では覆工は示されていないが、これまで検討してきた「坑道を一定期間埋め戻さない時期」が存在した場合の状態変化を考えると、支保や岩盤の劣化を防止することによる構造体としての耐久性向上や坑道環境の維持の観点から覆工の設置について検討する必要があると考えられる。ただし、処分坑道のように大深度に覆工を設置する場合には高い水圧が作用することが考えられるため、裏面排水設備やドレーンなどの排水工によって覆工に作用する水圧を低減させる対策を併せて検討する必要がある。加えて、長期にわたる稼働によって排水工が目詰まりを起こすことが考えられるため、排水機能が失われた場合に覆工や周辺岩盤に及ぼす影響、または目詰まり防止策についても設計段階で検討すべき課題といえる。

維持管理計測設備については、坑道の状態を把握するために欠かせないものであり、第2次取りまとめにおいても作業段階で取得すべき情報の内容と計測項目が挙げられている。「一定期間埋め戻さない時期」が存在した場合の処分坑道を対象とした維持管理のためには、これらの計測項目に対応した具体的な計測方法を検討する必要がある。このとき、総延長が非常に長い坑道を計測すること、長期の連続測定とリアルタイムでのデータ転送が求められること、計測点を連続的に配置する必要があること、等を考慮した更新可能または高耐久性な維持管理計測設備の検討が課題となると考えられる。

坑道の断面については、前述の覆工の設置やモニタリング設備を考慮したものにする必要がある。すなわち、計測、検査、補修・補強工等の維持管理を可能とする内空断面を確保した坑道を検討する必要がある。

#### **b 埋め戻さない維持期間（作業中）において解決策が必要な課題**

埋め戻さない維持期間において解決策が必要な課題としては、以下が挙げられる。

- ・地震時の力学的挙動と地下水挙動の予測および対策の検討
- ・坑道全線を対象とした総合的な維持管理システムの構築

地下構造物が地上構造物に比べて耐震性に優れていることは過去の地震時の被害状況から明らかである。しかし、地下は全く地震の影響がないということではない。既存の地下構造物の地震時挙動に関する報告を鑑みると、地震が坑道に及ぼす影響は力学的影響と水理学的影響に大別することができる。力学的影響については、処分施設に対する耐震性評価法の検討が現在実施されているところである。一方、水理学的な影響については、既往の地下施設における地震時の水圧や湧水量の挙動が報告されているものの、挙動のメカニズム解明には至っておらず、地震時の間隙水圧の変化が坑道へもたらす影響や湧水量の変化に対応するための評価法の確立が課題であるといえる。また、地震時の力学的・水理学的影響については、設計段階での評価が不可欠であるが、地震の影響は地形・地質条件により大きく変わることが予想されるため、施工時に得られた調査・計測結果を反映させた詳細検討の実施が重要であると考えられる。よって、埋め戻さない維持期間において、施工時および施工後の情報を反映させた地震時の挙動

予測および対策に関する検討が課題となる。なお、地震時の力学的、水理学的影響から坑道内環境を防護するという観点からも、前述した覆工の設置による効果について検討することが望ましい。

処分坑道を含めた地下施設は、数 km 四方、坑道の総延長百数十 km にも及ぶ大規模な構造物となることが計画されているが、このように非常に長い坑道を対象とした維持管理を実施した例は過去に無い。坑道全線について、地質調査や施工実績等を踏まえた日常的な計測および定期的な検査を実施し、健全度を判定し、補修・補強工を実施し、またそれらの追加対策工の履歴等を管理しながら、長期間坑道の維持管理を実施するための総合的なシステムの構築が課題と考えられる。

## (2) 課題解決の方策

前項で整理した回収維持期間における課題について、課題解決の方策について検討する。これまでの検討結果から、周辺岩盤および坑道の劣化現象は、変化が発生する時間やその変化量を現時点で定量的に評価することは困難であることをすでに述べた。これを踏まえて前項では、坑道の耐久性向上などの初期性能を向上させる観点に加えて、適切な維持管理により不均質な地山条件下において長期間にわたって要求性能を確保していく観点から、回収維持期間に係わる研究開発課題をまとめた。本項におけるこれらの課題解決方策の概略検討にあたっては、図 6.4.1-1 に示す対策方法のイメージに基づき、まず国内の既存の地下坑道で用いられている技術について地層処分施設への適用可能性について検討し、さらにそれらの技術の応用性や発展性について検討を行うこととする。以下に前項でまとめた課題を再掲し、それぞれの課題解決方策の概略検討を行う。

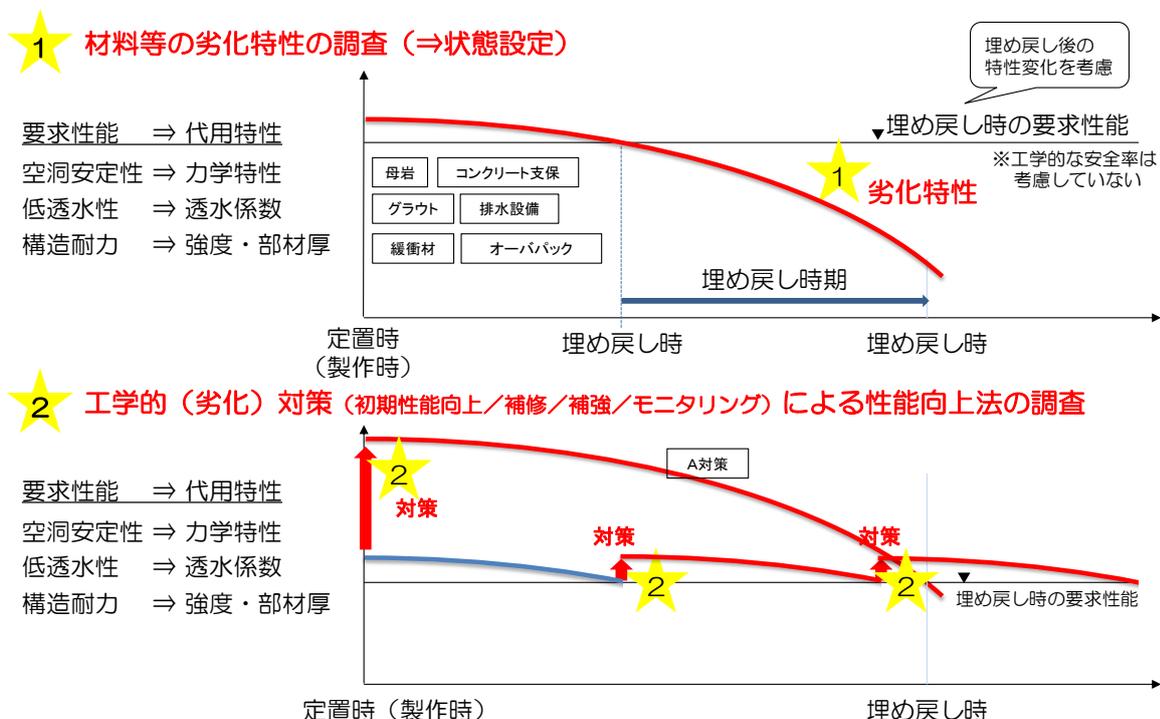


図 6.4.1-1 対策方法のイメージ

①覆工および水圧低減のための排水工に関する適用性および設計方法の検討

- ②更新可能または高耐久性な維持管理計測設備の検討
- ③維持管理（計測、検査、補修・補強工等）を可能とする坑道断面の検討
- ④地震時の挙動の予測および対策の検討
- ⑤坑道全線を対象とした総合的な維持管理システムの構築

①覆工および水圧低減のための排水工に関する適用性および設計方法の検討

覆工および排水工の適用性および設計方法については、既往の大土被りトンネルの例などを参考に検討することが考えられる。また、前出の青函トンネルなどをはじめとして長期間湧水をトンネル外に排水するための揚水費のコスト低減や地下水位低下による周辺環境への影響低減のため、止水構造としたトンネルの設計・施工例例えば[138],[139]もあり、これらの検討事例も併せて参考に検討する。これらの止水構造のトンネル事例によると、図 6.4.1-2 に示すように覆工に過大な水圧が作用することを防ぐために坑道周辺岩盤の透水性をグラウトなどにより低透水に改良し、グラウトした地山に水圧を負担させる方法が取られている。また、非常に簡易な方法であるが、覆工や改良地山の透水性などを考慮して修正された Muskat の式から、目標湧水量や必要なグラウト改良範囲の検討が可能であることが示されている。実際の岩盤に対するグラウトの改良効果については、国家石油ガス備蓄基地などでの実績や、JAEA の深地層研究所で実施されているグラウト技術の開発及び高度化に関する研究成果を参考に検討を行う。このような排水設備と止水構造を併用させることによる覆工の検討にあたっては、地山の水理地質構造、坑道、排水工、グラウト改良部等を有限要素法等によりモデル化し、浸透流解析によって覆工に作用する水圧を算定し、得られた水圧を加味した力学解析により覆工の断面を設計する手法などが検討方法として考えられる。ただし、排水工の目詰まり作用の経時変化の評価やモデル化については、事例を調査したうえで今後新たに検討する必要があると思われる。

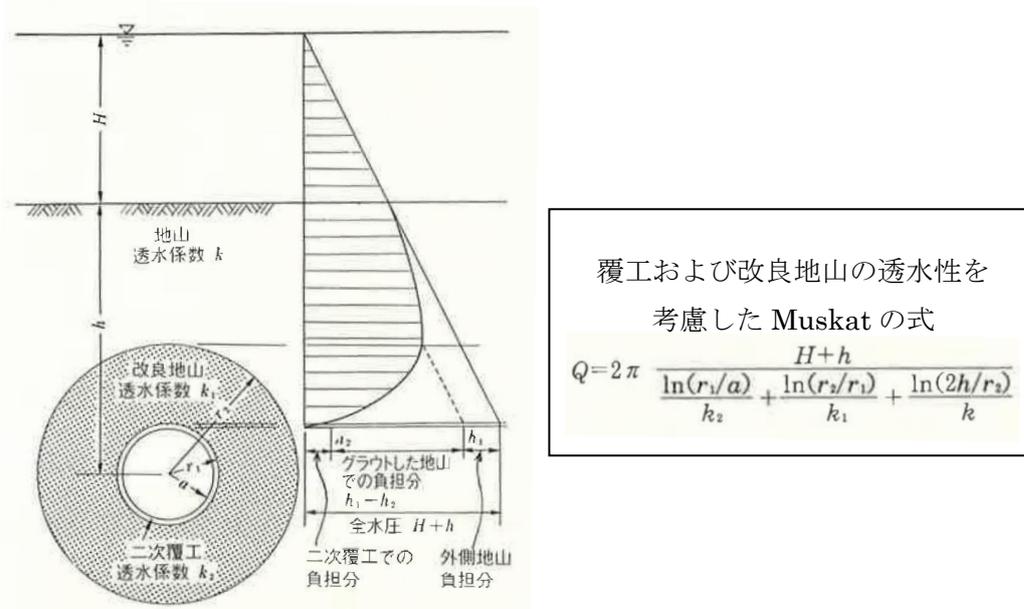


図 6.4.1-2 トンネルに作用する水圧と修正された Muskat の式[138]

## ②更新可能または高耐久性な維持管理計測設備の検討

維持管理計測設備の検討についても、既往の事例をもとに維持管理のための計測項目に対応した検討を進めることが必要である。処分坑道における維持管理では、非常に長い坑道に対して長期間計測を実施していく必要があることから、光ファイバーセンサーを用いた計測が有用であることが考えられる。光ファイバーは、高耐久性で劣化に強く、水や電磁誘導ノイズの影響を受けることなく長距離の信号伝送が可能であり、また電源が不要という特徴がある。この光ファイバーを用いてひずみや温度を線的に連続して測定することが可能であり、トンネルなど様々な構造物の変状を計測するための技術開発が進められている[140],[141]。トンネルの吹付コンクリートへの適用事例を図 6.4.1-3 に示す。また、近年では光ファイバーセンサーを用いた間隙水圧計も開発されており[142]、これらの適用も検討する。他に、地山の水分量や汚染度の計測への応用について技術開発が進められており、これらの適用可能性についても併せて検討を行う。

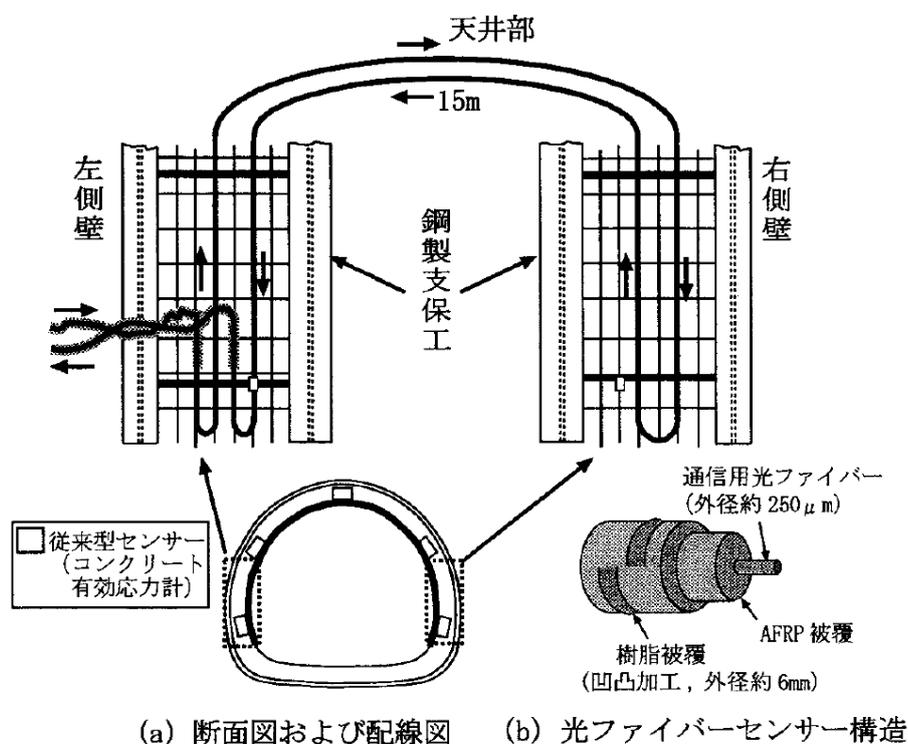


図 6.4.1-3 吹付けコンクリート用光ファイバーセンサー[140]

## ③維持管理（計測、検査、補修・補強工等）を可能とする坑道断面の検討

坑道の断面については、定置方式に応じて前述の課題①、課題②の検討結果を考慮し、計測、検査、補修・補強工等の維持管理を可能とする内空断面を確保した断面となるよう検討を行う必要がある。

## ④地震時の挙動の予測および対策の検討

地震時の力学的影響については、深地層における工学技術に関する研究として地震時の実測データの分析と設計時の耐震解析等との比較・検討が実施されているところであり[143]、これ

らの成果を反映した検討をさらに推進する必要がある。一方、水理学的な影響については、現象のメカニズムに未解明な点が多いため、深地層における地震時の地下水挙動の分析が現在実施されており[144]、今後は現象についての研究を推進し、地震時の地下水挙動の評価方法を確立する必要がある。また、水封式岩盤石油備蓄基地においても、地震時の地下水挙動の分析に加えて、解析的な検討も実施されており[145]、これらを参考にして処分坑道における地震時の地下水挙動評価方法について検討を行っていく必要がある。

#### ⑤坑道全線を対象とした総合的な維持管理システムの構築

坑道全線の総合的な維持管理システムについては、JR や NEXCO などの各事業者が研究開発を進めている維持管理システムの適用可能性について検討を行う。各事業者においては今後数年のうちに大量の構造物の更新時期を迎えることから、現在、構造物の劣化や長期保全、更新のあり方などに関して維持管理技術の研究開発を進めているところである。これらの維持管理技術の処分施設への適用可能性については、常に最新の研究成果や知見を取り入れた検討を実施していくことが必要である。特に、処分施設においては、既存のトンネルなどの地下坑道施設と比較して非常に大規模かつ長期間の維持管理が求められることに留意し、個々の維持管理技術を統合した総合的な維持管理システムの構築を検討することが肝要と考える。

ここで示した課題解決策の概略検討結果から、各課題について本業務の開発課題としてまとめたものを表 6.4.1-1 に示す。

表 6.4.1-1 課題のまとめ（周辺岩盤および坑道）

課題	課題の特徴	本業務での開発課題
①覆工および水圧低減のための排水工に関する適用性および設計方法の検討	本検討において新たに抽出された課題であり、空洞安定性の維持に関する重要項目である。	○
②更新可能または高耐久性な維持管理計測設備の検討	処分坑道の特性を考慮した検討が必要な課題であり、空洞安定性の維持に関する重要項目である。	○
③維持管理（計測、検査、補修・補強工等）を可能とする坑道断面の検討	①、②の検討結果およびその他で実施されている成果を踏まえた総合的な検討となる。	—
④地震時の力学的挙動と地下水挙動の予測および対策の検討	地震時の力学的挙動と地下水挙動の評価については JAEA 等の基盤研究開発機関が実施しており [143][144]、予測および対策についてはそれらの研究成果を反映した検討が必要。	—
⑤坑道全線を対象とした総合的な維持管理システムの構築	JR,NEXCO 等の事業者が実施している成果を反映することが合理的である。	—

また、提示した 5 件の開発課題のうち、当面、優先的に検討していく必要がある課題として、処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合の「空洞安定性の維持」に関する検討が重要であると考え、本業務における開発課題としては、

- ①覆工および水圧低減のための排水工に関する適用性および設計方法の検討
  - ②更新可能または高耐久性な維持管理計測設備の検討
- の二つの課題を対象とすることとする。次に概略開発スケジュールについて述べる。

ここまで検討してきたとおり、覆工コンクリートの必要性、長い期間にわたる排水工の健全性、維持管理システムの重要性など、第 2 次取りまとめなどでは詳細に取り扱うことのなかった構成部材が、回収維持の不確実性を低減させるために着目すべき検討課題であることを整理してきた。

様々な課題の中で、地下施設を設置する深地層における様々な岩盤の挙動については、JAEA（瑞浪や幌延）において精力的なデータ取得と分析・評価が進められており、今後詳細な挙動が解明されるものと期待される。

一方で、現時点で想定される回収維持の期間とその期間における坑道環境のもと、回収維持に向けて必要となる工学技術の適用性や成立性を示しておくことは、本事業（基盤研究開発）の目的に沿った大切な使命であると考えられる。

以上を踏まえて、5 年間を開発期間とし概略の開発スケジュールを検討した結果を表 6.4.1-2 に示す。

表 6.4.1-2 概略開発スケジュール（周辺岩盤および坑道）

検討項目	1 年度	2 年度	3 年度	4 年度	5 年度
課題抽出 開発計画	計画立案				
①-a 覆工の適用性		実情調査と解析的評価			
①-b 排水工の適用性			実情調査と解析的評価		
②-a 維持管理計測の適用性		試験含む検討			
②-b 坑道環境と構成要素の提示				処分概念とシステム提示	
↓ 最新情報の入手と展開 ↑					
JAEA 深地層研究	深地層における岩盤挙動				

## 6.4.2 人工バリアにかかわる課題と解決方策

これまでに抽出された課題について、次に示す分類を試みる。分類 a.として「設計（仕様設定）の段階において解決方策が必要な課題」、分類 b.として「埋め戻さない維持期間（操業中）において解決方策が必要な課題」である。これより、方策の検討における解決の観点を明確にする。

### (1) 抽出した課題の整理

#### a 設計（仕様設定）の段階において解決方策が必要な課題

人工バリアにおける設計段階において解析方策が必要な課題としては、オーバーパットの腐食量の設計および腐食に伴い回収作業時の強度低下による不安全性が懸念されるオーバーパット把持部の構造、同様に PEM 容器の設計となる。

緩衝材においては、湧水の影響による流出や変形に対する設計、また坑道側での湧水対策になる。

放射線影響については、どの程度の影響があるかをまずは把握することである。

#### b 埋め戻さない維持期間（操業中）において解決方策が必要な課題

人工バリアにおける埋め戻さない維持期間において解決方策が必要な課題としては、前述したように緩衝材における坑道側での湧水対策があげられる。また、放射線影響については、影響の程度によっては維持期間における解決が必要な課題になるものとする。

### (2) 課題解決の方策

前項で整理した課題について、その解決方策を検討する。

人工バリアにおいては、埋戻しまでの期間の設定に資するために、坑道を開けておくことによる人工バリアへの影響について既存データ等に基づく定量的な評価を実施することが必要である。さらに、関連する人工バリアの挙動に対するモニタリング方法や環境条件に対する評価も重要な課題として検討することが必要と考える。以下に、

#### ①オーバーパットおよび PEM 容器の腐食挙動に関する評価

オーバーパットおよび PEM 容器において、一定期間埋め戻さないことにより想定される環境（酸化性環境など）に対する腐食量や腐食速度などの腐食挙動や、回収時の人工バリアの状態に係わる課題でもあり、回収技術への反映も必要である。

- ・オーバーパットおよび PEM 容器材料に対する腐食等に対する健全性の評価

想定される環境からオーバーパット、PEM 容器の腐食評価を実施する。また、回収性の観点からオーバーパットや PEM の構造健全性に関する対策を検討し設計に資する。

#### ②緩衝材の劣化評価

緩衝材において、一定期間埋め戻さないことで化学的影響やその影響による劣化程度の変化を定性・定量的に評価する課題であり、長期安全性にも係わる重要な課題である。影響に関す

る検討が基盤研究において実施されており、知見の反映など総合的な検討となる。

### ③人工バリア温度の把握と対策の検討

埋め戻さないことで存在する空間の影響により、熱伝導性の低下から人工バリアの温度が上昇し緩衝材の制限温度に影響する。したがって、操業期間中の人工バリアの温度を把握し、坑道換気や空調の実現可能性、実現するための条件など、地下施設設計や操業安全にも係わる検討が必要である。

#### ・温度環境の把握

空間が存在する場合の定置方式毎の温度の経時変化を把握する。

#### ・換気方法の検討

横置き定置において緩衝材の制限温度を超えないように人工バリアを冷却するための換気や空調の実現可能性を検討する。

\*熱解析、(換気量の算出)

### ④人工バリアのモニタリングに関する検討

回収維持期間を設けることで、①～③の検討を基に人工バリアの状態に対してモニタリングすべき項目を抽出し、モニタリングする場合の適用技術の有無を調査・検討する課題である。

#### ・モニタリング項目等の検討

人工バリアの要件に対してモニタリングすべき項目、回収や埋戻し時の判断材料に資する項目等を整理・検討する。

#### ・モニタリング技術の検討

モニタリングする場合の適用技術の有無を調査・検討するとともにモニタリング項目等との総合的な検討が必要である。

### ⑤処分概念（定置概念）に対する回収性の検討

各定置概念に対して、維持期間における影響の大小、回収のやり易さ・難さ（柔軟性）などの観点から比較評価し、回収性を考慮した場合の合理的な定置概念も考えられる。しかし、本検討では既存の定置概念を基本とするものとし、処分概念に対する検討は今後の課題として本検討の対象外と考える。

ここで示した課題解決方策の概略検討結果から、各課題について本業務の開発課題としてまとめたものを表 6.4.2-1 に示す。

表 6.4.2-1 課題のまとめ (人工バリア)

課題	課題の特徴	本業務での 開発課題
①オーバーパックおよびPEM容器の腐食挙動に関する評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・オーバーパックおよびPEM容器において、一定期間埋め戻さないことで検討が必要となった課題であり、想定される環境に対する腐食量や腐食速度などの腐食挙動や、回収時の人工バリアの状態に係わる課題でもあり、回収技術への反映も必要である。</li> </ul>	○
②緩衝材の劣化評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材において、一定期間埋め戻さないことで化学的影響やその影響による劣化程度の変化を定性・定量的に評価する課題であり、長期安全性にも係わる重要な課題である。影響に関する検討が基盤研究が実施されており、知見の反映など総合的な検討となる。</li> </ul>	○
③人工バリア温度の把握と対策の検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>・埋め戻さないことで存在する空間の影響により、熱伝導性の低下から人工バリアの温度が上昇し緩衝材の制限温度に影響する課題である。</li> <li>・操業期間中の人工バリアの温度を把握し、坑道換気や空調の実現可能性、実現するための条件など、地下施設設計や操業安全にも係わる課題である。</li> </ul>	○
④人工バリアのモニタリングに関する検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>・回収維持期間を設けることで、①～③の検討を基に人工バリアの状態に対してモニタリングすべき項目を抽出し、モニタリングする場合の適用技術の有無を調査・検討する課題である。モニタリング技術の検討との総合的な検討が必要である。</li> </ul>	○
⑤処分概念(定置概念)に対する回収性の検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>・各定置概念に対して、維持期間における影響の大小、回収性のやり易さ・難さ(柔軟性)などの観点から比較評価し、回収性を考慮した場合の合理的な定置概念を提案する。</li> </ul>	—

前述した、人工バリアにかかわる課題について、5年間で概略の開発スケジュールを作成した。表 6.4.2-2 に示す。

表 6.4.2-2 概略開発スケジュール（人工バリア）

検討項目	1年度	2年度	3年度	4年度	5年度
課題抽出 開発計画	計画立案				
①オーバーパックおよびPEM容器の腐食挙動に関する評価		影響の評価と対策			
②緩衝材の劣化評価		影響の評価と対策			
③人工バリア温度の把握と対策の検討			解析的評価、検討		
④人工バリアのモニタリングに関する検討				調査、検討	
↓ 最新情報の入手と展開 ↑					
国の基盤研究、JAEA、NUMO におけ研究開発	技術情報				

## 6.5 まとめ

本検討では、「地下環境における高レベル放射性廃棄物の回収技術を整備し、国民の地層処分技術に関する安心感の醸成に資すること」とする本事業の目的に対する理解のもと、処分施設を埋め戻さずに一定期間維持することで、処分施設の安全性に及ぼす影響について、ニアフィールド（周辺岩盤と人工バリア）を対象とした力学的観点、水理学的観点、化学的観点および熱的観点から調査・整理及び評価することを目的に「回収維持期間の検討」を行った。

(1) 処分施設を埋め戻さない一定期間を維持することによる、処分施設への安全性に及ぼす影響に関する調査・整理及び評価

### ①周辺岩盤および坑道

処分施設を埋め戻さずに一定期間維持することによる処分施設の安全性に及ぼす影響について検討するため、周辺岩盤および坑道において生じる現象について整理した。

周辺岩盤については、力学的、水理学的、化学的、熱的影響について、地層処分の観点から重要な地質環境の特性について整理を行い、それぞれの特性について発生する現象とその要因をまとめた。その結果、周辺岩盤において生じる現象はその岩盤の特性に依存し、力学的、水理学的、化学的、熱的影響の相互作用による複雑な連成による劣化が生じることがわかった。これらの現象については JAEA の超深地層研究所などで結晶質岩、堆積岩などの岩種別に現在研究が進められているところであるが、最新の研究結果では、周辺岩盤の劣化現象についての定量化は不確定性が多く、困難を極める状況にあると考えられる。

坑道については、構成要素を抽出・整理し、それぞれの構成要素で使用されている材料の変状について調査結果をまとめた。坑道の支保部材を構成するセメントや鋼材に関する劣化現象については、余裕深度処分施設において長期状態評価に関する研究が進められており、劣化の原因と経時変化について定量的な評価に関する検討がされている。しかしながら、劣化現象の発生に至る期間や環境条件については未だ不確かな状況もあり、本検討への適用については今後のさらなる研究成果を期待するところである。グラウトについては、スウェーデンやフィンランドなど海外の地下研究施設での研究事例や国内の試験事例から、長期安定性が示される調査結果となった。

これらの周辺岩盤および坑道に関する調査結果から、坑道を一定期間埋め戻さない時期が存在した場合、基本的には処分施設の健全性を損なう方向への状態変化が進行することが考えられ、且つその挙動や現象は非常に複雑であることがわかった。このことから、空洞の安定性確保のためには複雑な挙動や現象を解明・予測する研究に加えて、工学的な対策としての適切な維持管理が重要であることを示した。

### ②人工バリア

人工バリアについては、力学的、水理学的、化学的、熱的影響について、地層処分の観点から重要な特性について整理を行い、それぞれの特性について発生する現象とその要因をまとめ

た。その結果、人工バリアにおいて生じる現象はオーバーパックの腐食、緩衝材の変形、PEMの腐食などによる劣化が生じる可能性があることがわかった。オーバーパックの腐食現象については、関係研究機関や既存の研究成果を基本として検討が可能であるが、定量化などのより信頼性のある評価のためには環境に応じた試験データの取得が必要と考えられる。

また、緩衝材については、現在、変形や流出などの検討が進められているものであるが、研究成果において定量化が困難な内容を多く含んでいることから、これらの研究開発成果との整合が必要になり、今後の課題として整理した。

## (2) 地層処分類似施設の維持に関する国内外の現状調査

### ① 周辺岩盤および坑道

国内の代表的な地質に対する地下坑道施設の変状と対策に対する文献調査を実施し、力学的、水理学的、化学的、熱的観点について整理した。また、地下坑道施設を対象とした具体的な維持管理方法について調査を行った。これらの調査結果から、地下坑道施設において生じている変状はさまざまであるが、適切な維持管理を実施することによりその機能を保持していることが示された。さらに、既往の技術だけではなく、現在開発中の維持管理技術について処分坑道への適用可能性について設計・技術的な観点から検討を行い、空洞の安定性を保持していくことの可能性を示した。その上で、維持管理のために安全上具備すべき施設・機器の検討・整理を行った。

### ② 人工バリア

国内における原子力関連施設として、原子力発電所、再処理施設等の核燃料サイクル施設、関連機器として使用済燃料の貯蔵キャスク等に調査した。原子力施設における定期安全レビュー(PSR)の考え方など中長期的な視点に立脚して評価対象期間の保安活動が実施されており、本検討のような中長期的に視点に経った検討においても有効であると考えられた。また、廃棄物管理施設などのコンクリート躯体を含めた施設本体については、線量当量率検査及び空気中の放射性物質の濃度測定試験を行うことで、安全上重要な機能であるしゃへい壁の欠陥等がないことが確認され、建屋の外観を含めて日々の巡視点検より建物を含めた維持管理を行う仕組みが維持されていることがわかった。

### ③ 諸外国における回収維持

回収維持期間に関して7か国（フランス、米国、スイス、フィンランド、スウェーデン、カナダ、日本）を調査した。可逆性・回収可能性を法令に規定している国は3ヶ国であり、フランスでは処分プロセスの可逆性を担保する最低限の期間として、その期間は少なくとも100年以上としている。米国は回収可能なように設計・建設することを法令に定めており、定置期間中及びその後の期間を通じて、NRC（原子力規制委員会）の審査が完了するまで、廃棄物の回収を可能とする、としている。また、スイスでは、回収可能性を維持した監視付き長期地層処分を法令に定めており、地層処分場は主処分施設とパイロット施設および試験施設から構成さ

れており、期間については回収可能な比較的長い期間、としている。他の4か国（フィンランド、スウェーデン、カナダ、日本）においても回収可能性を維持することを安全指針等において示しているが、期間については具体的に示されていない。

諸外国の可逆性・回収可能性における法令や安全指針等の中から、回収維持期間に関する基本的な考え方を以下に整理した。

- 調査した7か国のほとんどの国は、地層処分に関する法令や安全指針等において回収可能性を維持する、としている。
- 調査した7か国のほとんどの国（フランス以外）は、それぞれの国の背景や諸事情から、回収維持期間について明確な期間を定めていない。
- 調査した7か国のほとんどの国は、可逆性・回収可能性のために講じられる措置が、処分場の長期安全性の妨げになってはならない、としている。
- 処分場を必要以上に長期間、開放したままにしておくことで回収可能性を高めようとすると、安全性を低下させる可能性がある、としている。

### (3) 抽出した課題の整理と課題解決の方策

#### ① 周辺岩盤および坑道

周辺岩盤および坑道に関する研究開発課題及び技術開発課題について、支保や周辺岩盤などの耐久性向上の観点および坑道環境の維持管理の観点から整理を行った。さらに、それぞれの課題についての課題解決方策の概略検討を行った。ここで、本検討において新たに抽出された課題であること、処分坑道の特性を考慮した検討が必要であること、およびJAEAなどの研究機関で実施されている研究動向との合理性等を鑑み、以下に示す2つの課題を本業務の開発課題とした。さらに、事業者の技術開発ロードマップで示されている事業段階を踏まえて、本業務の開発課題について開発期間を5年間とした概略の開発スケジュールについて検討した。

- 覆工および水圧低減のための排水工に関する適用性および設計方法の検討
- 更新可能または高耐久性な維持管理計測設備の検討

#### ② 人工バリア

人工バリアに関する研究開発課題については、回収維持期間を具体的に検討するために新たに検討が必要と考えられるものを以下に整理した。

- オーバーパック及びPEM容器の腐食挙動に関する評価
- 緩衝材の劣化評価
- 人工バリア温度の把握と対策の検討
- 人工バリアのモニタリングに関する検討

課題解決には、定性的な検討および定量化の検討を仕分けし、整理して進める。また、他の研究機関で実施中の課題もあり、それらの知見を反映することにより進めるていくことが合理的であるとして、今後の方策を整理した。

## 参考文献

---

- [1] 核燃料サイクル機構：“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－総論レポート”，核燃料サイクル機構，JNC TN1400 99-020 (1999)
- [2] 石島洋二：“岩石力学 1.総説”，<http://rock.eng.hokudai.ac.jp/ishijima/text/kaisetsu.htm>
- [3] 社団法人 資源・素材学会：“3次元応力場道程に関する研究（その 2）核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書”，核燃料サイクル機構，JNC TJ7400 2003-004 (2002)
- [4] 佐藤稔紀ほか：“文献調査によるわが国の岩石の物理的特性に関するデータの収集（その 2）”，核燃料サイクル機構，JNC TN7400 99-011 (1999)
- [5] 核燃料サイクル機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処理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”，核燃料サイクル機構，JNC TN1400 99-022 (1999)
- [6] 核燃料サイクル機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 平成 17 年取りまとめ 一分冊 2 工学技術の開発－”，核燃料サイクル機構，JNC TN1400 2005-015 (2005)
- [7] 本間信之、千葉恭彦、棚井憲治、“オーバーパック設計の考え方”、JNC TN8400 99-047 (1999)
- [8] 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構：“TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－”、JNC TY1400 2005-013 (2005)
- [9] 腐食防食協会編：“金属の腐食・防食 Q&A”、丸善、1988
- [10] 善一章：“海中構造物 腐食の実体と対策”、鹿島研究出版会、1974
- [11] 土木学会，トンネル標準示方書 山岳工法・同解説，2006
- [12] 原子力発電環境整備機構：“地層処分事業の安全確保（2010 年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－”、NUMO-TR-11-01、2011
- [13] 土木学会：“トンネルの変状メカニズム”，土木学会，(2003)
- [14] 大久保 誠介、引間 亮一、平野 享、松井 裕哉：“結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価のための現象論的研究（委託研究）”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2010-031 (2010)
- [15] 土木学会編：余裕深度処分における地下施設の設計，品質管理および検査の考え方，p.40,2009.7
- [16] 土木学会編：2002 年制定 コンクリート標準示方書 改定資料，p.89-90，2002
- [17] 横関康祐：一万年コンクリートへの挑戦，セメント・コンクリート，pp.1-6，2005.5
- [18] 臼井達哉ほか：熱力学連成モデルによる人工バリアの性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，2006
- [19] 杉橋直行ほか：余裕深度処分施設におけるセメント系人工バリア内の鋼材腐食に関する一考察，土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集，2008

- 
- [20] T.I.Longworth : Proceedings of the First International Conference on Thaumassite in Cementitious Materials, Paper No14,2002
- [21] 杉橋直行ほか：余裕深度処分施設におけるセメント系人工バリア内の鋼材腐食に関する一考察，土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集，2008
- [22] 加藤淳ほか：アルカリ・還元性の模擬地下水環境下における炭素鋼の腐食挙動，Vol.56, No.5, Page.198-207
- [23] 山本 修一ほか：鉄筋の腐食膨張を考慮した余裕深度処分施設の長期力学挙動解析，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，pp197-198,2009
- [24] 杉橋直行ほか：余裕深度処分施設におけるセメント系人工バリア内の鋼材腐食速度について，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，2009
- [25] 金子昌章他：還元性環境での金属腐食に起因するガス発生量評価，原環センター技術報告書，pp.106，2004.3
- [26] M. Brantberger et al., Underground design Forsmark, Layout D2 Grouting, SKB R-08-114, 2008
- [27] 植田他，低アルカリ性セメントの処分場における長期適用性に関する検討，NUMO-TR-08-02、2008
- [28] Bodén, A., Low-pH injection grout for deep repositories -Summary report from a co-operation project between NUMO (Japan), Posiva (Finland) and SKB (Sweden), SKB R-05-40, 2005
- [29] Grandia F., Quantitative modelling of the degradation processes of cement grout -Project CEMMOD, SKB TR-10-25, 2010
- [30] 米倉亮三，島田俊介，木下吉友：“恒久グラウト注入工法”，山海堂，2000
- [31] Emmelin, A. et al., Rock grouting -Current competence and development for the final repository, SKB R-07-30, 2007
- [32] Butrón, C., Gustafson, G., Funehag, J., A Swe-dish grouting design concept: grouting with silica sol in the Nygård and Tränskog tunnels, Proc. of 4th In-ternational Conference on Grouting and Deep Mix-ing, 2012
- [33] 加賀宗彦，水ガラス系注入材の安定性と注入固結砂の長期強度の予測，土木学会論文集 No.652/III-51, 2000
- [34] 延藤他，倉敷 LPG 貯槽建設工事における溶液型グラウトによる止水対策（その 2）－溶液型グラウトの現場条件を考慮した溶液型グラウトの長期安定性確認試験－，土木学会第 68 回年次学術講演会，2013
- [35] 中谷他，倉敷 LPG 貯槽建設工事における溶液型グラウトによる止水対策（その 3）－溶液型グラウト改良体の長期止水効果確認試験－，土木学会第 68 回年次学術講演会，2013
- [36] 山岳トンネルの補助工法 - 2009 年版 - 土木学会

- 
- [37] 坂口清敏ほか：“原位置測定に基づく東日本大震災前後における釜石鉦山周辺応力場の変動”，第13回岩の力学国内シンポジウム，(2003)
- [38] 池川洋二郎：トンネル近傍の弾性域の間隙水圧に関する弾塑性理論を用いた評価、電力中央研究所報告、N06002、2006
- [39] 吾妻瞬一他：東濃鉦山周辺における地震に対する地下水位・間隙水圧の変動特性、日本応用地質学会研究発表会講演論文集、21-24、1998
- [40] 薛自求他：静水圧下における砂岩の透水特性について、第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、393-398、1990
- [41] 多田浩幸他：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回岩の力学シンポジウム講演論文集、139-144、1994
- [42] 菊池紗帆他：拘束圧・温度制御下における堆積岩の長期透水試験、岩の力学国内シンポジウム講演論文集、2012
- [43] 重永三郎他：花崗岩不連続面の透水性と鉦物溶解機構、日本材料学会学術講演会講演論文集、No.58、11-12、2009
- [44] 熊坂博夫：コンクリートからの溶出イオンの影響を考慮したトンネル変状解析、トンネル工学報告集、第15巻、41-48、2005
- [45] 辻本剛士他：トンネル覆工コンクリート中の水酸化カルシウムの溶脱に関する一考察、土木学会第66回年次学術講演会概要集、V-165、2011
- [46] 青木卓也他：アルカリ性トンネル排水の性状と自然浄化作用による中和過程、応用地質、Vol.50、No.5、273-279、2009
- [47] 山本肇他：幌延深地層研究計画における立坑掘削時の地下水からの脱ガスの予察解析、第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、論文番号54、2007
- [48] 水野崇他：瑞浪超深地層研究所の建設に伴う地下水水質の変化、日本原子力学会和文論文誌、Vol.12、No.1、89-102、2013
- [49] 天野由記他：微生物が地下の酸化還元環境形成に及ぼす影響、原子力バックエンド研究、Vol.14、No.1、61-67、2007
- [50] 出口衛他：三相系相乗平均モデルに基づいた相関式の導出と多孔質の熱伝導率の解析、資源と素材、Vol.111、1007-1013、1995
- [51] 八田敏行他：天然の亀裂を含む花崗岩質岩石の熱膨張特性、土木学会論文集、No.750/III-65、182-191、2003
- [52] 市川康明：“長期岩盤挙動評価のための微視的観点による基礎的研究（核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書）（2002年度）”，名古屋大学，JNC TJ7400 2003-002 (2003)
- [53] 鄭教徹，市川康明：“花崗岩のマイクロクラックに関する実験的研究”，材料 43(486)，(1994)
- [54] 市川康明ほか：“結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価のための理論的研究（2009年度）（委託研究）”，日本原子力研究開発機構，JAEA 2011-007 (2011)

- 
- [55] 大山卓也他：地表傾斜データを用いた水理地質構造の推定手法の有効性について，第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，245-250，2008
- [56] 國丸貴紀他：超深地層研究所計画 年度報告書(2010 年度)，JAEA-Review 2012-020，178p，2012
- [57] 水野崇他：瑞浪超深地層研究所の建設に伴う地下水水質の変化，日本原子力学会和文論文誌，vol.12，No.1，89-102，2013
- [58] 草野隆司他：瑞浪超深地層研究所における湧水対策工の現状と課題，土木学会第 63 回年次学術講演概要集，509-510，2008
- [59] 水野崇他：瑞浪超深地層研究所における地球化学研究；地下施設建設が周辺環境へ与える影響の把握，日本地球惑星科学連合 2010 年大会，2p，2010
- [60] 鶴山雅夫他：グラウト施工を行った花崗岩におけるセメント成分の影響調査手法，土木学会第 68 回年次学術講演概要集，95-96，2013
- [61] 人見尚他：グラウト施工を行った花崗岩におけるセメント成分の影響の観察，土木学会第 68 回年次学術講演概要集，97-98，2013
- [62] 名合牧人他：高精度傾斜計による立坑掘削に伴う岩盤挙動のモニタリング，土土木学会第 62 回年次学術講演概要集，861-862，2007
- [63] 井尻裕二他：幌延深地層研究所施設工事における高精度傾斜計データの分析，土木学会第 63 回年次学術講演概要集，269-270，2008
- [64] 羽出山吉裕他：立坑掘削に伴う岩盤挙動に関する高精度傾斜計測結果と弾性解析の比較，土木学会第 63 回年次学術講演概要集，271-272，2008
- [65] 井尻裕二他：高精度傾斜計による応力-水連成解析挙動のモニタリング，土木学会第 65 回年次学術講演概要集，115-116，2010
- [66] 名合牧人他：大深度立坑における湧出ガス対策について，第 49 回全国建設業労働災害防止大会研究論文集，77-80，2012
- [67] (独)日本原子力研究開発機構：深度 350m 周回坑道（東）で発生した湧水の増加及びメタンガス濃度の上昇に対する原因の考察と今後の対策について，<http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/forum/13/0501.html>，2013，2013
- [68] (独)日本原子力研究開発機構：幌延深地層研究計画の成果と今後の予定，[http://as4729.http.sasm3.net/04/tisou/iinkai/hyouka\\_iinkai/16-4.pdf](http://as4729.http.sasm3.net/04/tisou/iinkai/hyouka_iinkai/16-4.pdf)，2013，2013
- [69] 北海道：幌延深地層研究センターにおけるメガス及び湧水の 幌延深地層研究センターにおけるメガス及び湧水の一時的な増加並びに情報公開の改善について，<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/kz/kke/besshi1.pdf>，2013，2013
- [70] 日本道路公団試験研究所トンネル研究室：トンネル変状事例集，試験研究所資料第 357 号，1998
- [71] 松下敏郎：高熱帯と高水圧低速度帯を克服して調査坑が貫通，トンネルと地下，第 23 巻，第 3 号，191-198，1992

- 
- [72] 鈴木道雄他：三国トンネルにおける酸性湧水による巻き立てコンクリートの浸食とその対策，セメント・コンクリート，292，20-27，1971
- [73] 石河信一他：一般国道158号安房トンネル平湯調査坑熱水帯に於ける薬液注入工法について，建設省技術研究会報告，40巻，471-478，1987
- [74] 鈴木和夫他：北アルプス火山地帯（大湧水帯）を貫いた調査工事 中部縦貫自動車道安房トンネル建設工事，熊谷技報，50号，105-113，1991
- [75] 若杉芳昭他：高熱帯を貫く長大トンネル・安房トンネル，土木学会誌，第77巻，第7号，12-15，1992
- [76] 成瀬清他：安房トンネルの本坑が貫通 高熱帯水火山噴出物層と高熱帯を克服，トンネルと地下，第26巻，第11号，927-933，1995
- [77] 麻生博憲：安房トンネル（平湯調査坑）熱水帯における薬液注入工法について，建設省中部地方建設局技術報告会資料 道路編，35巻，95-102，1986
- [78] 土木学会：トンネルライブラリー第20号 山岳トンネルの補助工法-2009年版-，364p，2009
- [79] 石河信一：火山噴出物の低速度帯に挑む 国道158号安房トンネルの調査工事，トンネルと地下，第17巻，第6号，59-65，1986
- [80] 武藤章他：北アルプスの大湧水（平湯低速度帯）に挑む 国道158号安房トンネル調査坑，トンネルと地下，第20巻，第6号，427-434，1989
- [81] 小井土由光：火山[23] 安房トンネル，岐阜の地学・よもやま話，  
[http://chigaku.ed.gifu-u.ac.jp/chigakuhp/html/kyo/chisitsu/gifunochigaku/volcanos/awa\\_tunnel/index.html](http://chigaku.ed.gifu-u.ac.jp/chigakuhp/html/kyo/chisitsu/gifunochigaku/volcanos/awa_tunnel/index.html)，200
- [82] 柴田省三他：中ノ湯火山ガス観測の自動化システム，横河技報，第47巻，第2号，53-56，2003
- [83] 中谷洋明：地熱発電施設の地盤変動リスク～土砂災害を事例に～，地熱発電の可能性と環境影響評価に関するシンポジウム，講演資料3，2012
- [84] 武藤章他：北アルプスの大湧水（平湯低速度帯）に挑む 国道158号安房トンネル調査坑，トンネルと地下，第20巻，第6号，427-434，1989
- [85] 吉城高校地学部：6．安房トンネル壁面温度・地殻熱流量，平成14年度飛騨における地温・地熱の研究，<http://www.geocities.co.jp/HiTeens-Panda/4284/6.htm>，2002
- [86] 工藤明他：高圧ガスを有する膨張性地山の注入工法，トンネル工学研究発表会論文・報告集，第2巻，203-208，1992
- [87] 柴田剛志他：19年ぶりに導坑貫通の鉄道トンネル 北越北線鍋立山トンネル，第24巻，1号，17-24，1993
- [88] 足立紀尚他：トンネル掘削における岩盤内の圧縮気体の影響とその対策，土木学会論文集，No.457，III-21，23-31，1992
- [89] 柴田剛志他：19年ぶりに導坑貫通の鉄道トンネル 北越北線鍋立山トンネル，第24巻，1号，17-24，1993

- 
- [90] 稲永浩一他：膨張性地山における NATM の施工，西松建設技報，vol.4，137-146，1981
- [91] 山口高嶺他：東京トンネルの変状と対策について，土木学会年次学術講演会講演概要集，59 巻，Disk2，4-131，2004
- [92] 熊坂博夫：コンクリートからの溶出イオンの影響を考慮したトンネル変状解析、トンネル工学報告集第 15 巻、41-48，2005
- [93] 坂井五郎他：青函トンネル維持管理における内空断面測定，土木学会北海道支部論文報告集，52A，744-749，1996
- [94] 坂井五郎他：青函トンネル海底部の維持管理法，鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL' 96) 講演論文集，1997
- [95] 蕪澤憲吉：世界最長トンネルを検診する 青函トンネルの維持管理，土木学会誌，第 82 巻，第 1 号，2-5，1997
- [96] 坂井五郎他：青函トンネルの挙動計測—海底部区間の維持管理—，土と基礎，45 巻，5 号，5-8，1997
- [97] ビッグプロジェクトのその後 青函トンネルと瀬戸大橋の 10 年，日経コンストラクション，190 号，32-41，1997
- [98] 小幡利男他：青函トンネル海底部の維持管理について，JREA，第 41 巻，7 号，1998
- [99] 北川修三他：青函トンネル海底部の維持管理，トンネルと地下，1990
- [100] 豊島茂：—これからが正念場—青函トンネル海底部の維持管理，JRCC ラポール，1992
- [101] 前田憲一他：青函トンネル海底部の維持管理，トンネルと地下，1992
- [102] 前田憲一他：開業後 5 年後を迎えた青函トンネルの維持管理，日本鉄道施設協会誌，1994
- [103] 大貫富夫他：トンネルの保守・維持管理 (最終回) 青函トンネルの場合，トンネルと地下，1994
- [104] 蓮本清二他：水和生成物の地下水への溶脱に伴うコンクリートの長期劣化に関する調査，土木学会第 56 回年次学術講演概要集，70-71，2001
- [105] 蓮本清二他：水和生成物の地下水への溶脱に伴うコンクリートの長期劣化に関する調査 (その 2)，土木学会第 57 回年次学術講演概要集，501-502，2002
- [106] 蓮本清二他：水和生成物の地下水への溶脱に伴うコンクリートの長期劣化に関する調査 (その 3)，土木学会第 58 回年次学術講演概要集，289-290，2003
- [107] 蓮本清二他：水和生成物の地下水への溶脱に伴うコンクリートの長期劣化に関する調査 (その 4)，土木学会第 59 回年次学術講演概要集，69-70，2004
- [108] 蒔田敏昭：日本初の大規模地下石油備蓄基地建設—久慈・菊間・串木野基地—，石油の開発と備蓄，第 28 巻，第 1 号，43-52，1995
- [109] 経済産業省：  
[http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/hoan/koatsu\\_gas/hoankensa\\_wg/pdf/002\\_s01\\_04.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/hoan/koatsu_gas/hoankensa_wg/pdf/002_s01_04.pdf)
- [110] 長谷川誠他：地震による岩盤水理挙動—地下石油備蓄串木野基地の事例—，土木学会論文

- 
- 集, No.631, III-48, 481-494, 1999
- [111] 長谷川誠, 第 4 章 地震時の岩盤中の水理挙動と水封式岩盤タンク維持管理への影響, 博士論文, 162-175, 2001
- [112] 宮下国一郎他: 岩盤内原油備蓄タンクの計測技術, 土木学会論文集, 第 355 号, 30-37, 1985
- [113] 桜井俊夫: 石油地下備蓄 菊間実証プラントについて, 土と基礎, 第 29 卷, 1 号, 15-22, 1981
- [114] 星野一男: 菊間石油地下備蓄実証プラント (その 2), 地質ニュース, 353 号, 48-62, 1984
- [115] 有木和春他: 澄川地熱発電所の地熱貯留槽管理, 地質ニュース, 665 号, 20-27, 2010
- [116] 石山宏二他: 釜石鉱山における岩盤凍結・融解試験 (その 2), 第 24 回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, 1992
- [117] 石山宏二他: 原位置凍結・融解試験による岩盤の伝熱特性の研究, 西松建設技報, 1994
- [118] 新見健他: 釜石鉱山における地層科学研究 -第一フェーズ総括報告書-, PNC-TN7410 94-022, 1994
- [119] 笹本 広他: 釜石鉱山における地下水の地球化学的研究(I), PNC-TN8410 96-203, 1996
- [120] 坪田浩二: 釜石原位置試験総括報告書, JNC-TN7410 99-001, 1999
- [121] 仙波毅: 釜石原位置試験テクニカルノート(平成 6 年度), JNC-TN7440 2005-001, 2005
- [122] 三井住友建設株式会社: 瑞浪超深地層研究所における立坑覆工コンクリートの健全性調査, JNC-TJ7410 2005-001, 2004
- [123] 富岡祐一他: ヒ素含有鉱物に由来する環境汚染と修復に関する研究の動向ー特に鉱滓堆積場 におけるヒ素の溶出と固定についてー, 環境資源工学, 52, 145-150, 2005
- [124] 太田岳洋: 自然地盤中の重金属類等の周辺環境への影響評価に関する検討, 22.1, 47-52, 2008
- [125] 小笠原洋他: 黄鉄鉱起源の酸性浸出水による水質汚染の調査・対策事例、応用地質学会中部 四国支部講演会要旨, 9, 2005
- [126] 土木学会編: トンネルの維持管理, 2005
- [127] 定期安全レビュー分科会: “原子力発電所の定期安全レビュー実施基準: 2009”、日本原子力学会 標準委員会、AESJ-SC-P004:2009、2009
- [128] 日本機械学会: “再処理設備規格 維持規格 (2012 年版)”、JSME SRC1-2012、2012
- [129] リサイクル燃料貯蔵分科会: “使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準: 2010”、日本原子力学会 標準委員会、AESJ-SC-F002:2010、2010
- [130] リサイクル燃料貯蔵分科会: 使用済燃料中間貯蔵施設用コンクリートキャスク及びキャニスタ詰替装置の安全設計及び検査基準: 2007 “、日本原子力学会 標準委員会、AESJ-SC-F009:2007、2007
- [131] 核燃料施設等の新基準に関する検討リーム: “廃棄物管理施設の新規制基準骨子案”、原子力規制委員会、2013
- [132] 日本原燃株式会社: “廃棄物管理施設の保安規定”、2011
- [133] 船谷敏郎: “高レベル放射性廃棄物貯蔵管理について “、原子力工業 第 41 卷 第 10 号、1995

- 
- [134] 原環センター：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 第 2 章 2-7
- [135] NEA R&R プロジェクト：高レベル放射性廃棄物および使用済燃料の深地層処分のための可逆性と回収可能性（R&R）（2007 年～2011 年）最終報告書 79-81, 83-85：2011
- [136] 土木学会誌,2013.7
- [137] (財) 鉄道総合技術研究所：<http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd43/rd4340.html>
- [138] 福島啓一：わかりやすいトンネルの力学，土木工学社
- [139] 千場洋：超高水圧,硬岩地山を克服した八王子城跡トンネルの止水構造について，国土交通省国土技術研究会報告，pp.211-214, 2007
- [140] 若林成樹他：光ファイバーセンサーを用いたトンネル支保の計測，土と基礎，50(6)、pp.16-18, 2002
- [141] 川野勝他：光ファイバセンシングとカメラ監視の併用による構造物モニタリング，国土交通省近畿地方整備局管内技術研究発表会，2004
- [142] 西垣誠他：光ファイバーセンサーを用いた間隙水圧計の開発，日本地下水学会講演会講演要旨，pp.146-149, 2011
- [143] 濱克宏ほか：“超深地層研究所計画 年度報告（2012 年度）”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Review 2013-050（2014）
- [144] 堀内泰治ほか：“瑞浪超深地層研究所における地震時の湧水量変化と水圧応答について”，第 42 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，（2014）
- [145] 山田俊子他：地震時の水封式岩盤タンク周辺の地下水挙動について，土木学会第 58 回年次学術講演会，III-461, 2003

## 第7章 まとめ

### 第1章（事業概要）

平成25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）における、事業の背景と目的、全体計画、実施概要を示した。

### 第2章（実証試験計画の見直し）

平成24年度成果を基に「平成25年度までに製作した緩衝材除去装置の反映」、「実証試験計画を行う地下環境の調査」及び「地下環境における緩衝材除去試験計画」について検討し取りまとめた。

- ・地下環境における実規模スケールでの緩衝材除去試験の実施においては、試験実施エリアとなる試験坑道だけではなく、地上からの搬入ルートとなる立坑や水平坑道の搬入出可能な寸法や重量など、作業に必要な空間と設備が必要となる。本検討では装置の配置や設備の形状寸法について調査を行い、地下環境における実証試験内容を具体的に取りまとめた。
- ・塩水リユース設備については、省スペース化を目指した塩水の循環量（使用量）の見極めや、効率的なリユース方法についても開発していく必要があると考えられ、引続き、装置の開発状況を実証試験計画に反映していくことが重要である、との視点から今後の実証試験計画の方向性を示した。

### 第3章（緩衝材除去装置駆動設備の製作）

緩衝材除去装置のうち駆動設備の製作は、走行装置、油圧ユニット装置及び遠隔操作設備であり、それぞれについて製作設計及び製作を実施した。

- ・走行装置及び油圧ユニット装置は、平成24年度に実施した基本設計を基に、油圧ユニット、架台及び走行（クローラー）部の設計、製作、動作確認を行った。また、設計・製作にあたっては、他の設備の取り合い（油圧配管、電気配線等）と整合を図った。
- ・遠隔設備の製作は、平成24年度に実施した基本設計を基に、設計、製作及び動作確認を行った。遠隔設備は緩衝材除去装置のうち駆動設備、昇降設備、塩水噴射・スラリー吸引設備、塩水リユース設備の遠隔操作を行うものであり、以下の作業が遠隔操作により実施できるものとして製作を行った。
  - 駆動設備による回収対象となる処分孔までの坑道内の移動
  - 駆動設備および昇降設備による処分孔における噴射・吸引設備の位置出し
  - 塩水噴射・吸引設備による塩水の噴射とスラリー化した緩衝材の吸引
  - 昇降設備による塩水噴射・吸引設備の昇降
  - リユース設備によるスラリーの固液分離と塩水の調整と循環
  - 昇降設備（把持機能）によるオーバーパックの把持

#### 第4章（緩衝材除去装置の組立・調整）

- ・平成24年度に製作された塩水噴射・スラリー吸引設備と昇降設備を組み立てるとともに、平成25年度に製作された駆動・遠隔設備との組立、取付け、調整を行った。
- ・組立、取付けを完了した緩衝材除去装置の動作確認を目的として、地上にて駆動設備、昇降設備、塩水噴射・スラリー吸引設備、塩水リユース設備の動作に関するデータを取得した。また、本装置が地下特有の環境で使用されることに留意しながら、遠隔操作による装置の安全性を確認した。

#### 第5章（緩衝材除去装置の機能確認）

- ・緩衝材除去装置の一連のシステムについて緩衝材除去試験を通じて必要とする機能の確認を実施し、各機能の性能の把握と課題の抽出がされた。
- ・緩衝材除去特性として「円盤状の緩衝材除去方法」、「廃棄体把持部周辺の緩衝材除去方法」、「緩衝材除去効率」「廃棄体の把持・振れ止め」の確認を行い、データを取得した。緩衝材除去効率は「H24回収高度化」における結果とほぼ同等であることが確認された。廃棄体と緩衝材の隙間にペレットを充填した試験条件では、廃棄体側部直近のペレットを充填した部分中心に緩衝材が除去されることが観察された。
- ・塩水リユース特性として「塩水噴射・スラリー吸引機能」「固液分離機能」「リユース塩水の品質」の確認を行い、データを取得した。塩水噴射・スラリー吸引機能は、緩衝材除去が進行するにつれて噴射吸引のバランスがとれなくなることもあり、吸引能力に関して、今後取り組むべき課題として整理した。固液分離機能はスラリーのSS濃度が変化するものの処理した塩水のSS濃度は低いままであり、安定した処理が可能であることが確認された。
- ・今回の緩衝材除去試験において遠隔操作による装置の不具合や動作の異常など危険性は確認されなかった

#### 第6章（処分施設における回収維持期間の検討）

本検討では、処分施設を埋め戻さずに一定期間維持することで、処分施設の安全性に及ぼす影響について、ニアフィールド（周辺岩盤と人工バリア）を対象とした力学的観点、水理的観点、化学的観点および熱的観点から調査・整理及び評価することを目的に「回収維持期間の検討」を行った。また、地層処分類似施設の維持に関する国内外の現状調査を行い、回収維持期間の検討から抽出した課題の整理と課題解決の方向性について取りまとめた。

(1) 処分施設を埋め戻さない一定期間を維持することによる、処分施設への安全性に及ぼす影響に関する調査・整理及び評価

(周辺岩盤および坑道)

- ・検討するため、周辺岩盤および坑道において生じる現象について整理した。

- ・周辺岩盤については、力学的、水理学的、化学的、熱的影響について、地層処分の観点から重要な地質環境の特性について整理を行い、それぞれの特性について発生する現象とその要因をまとめた。その結果、周辺岩盤において生じる現象はその岩盤の特性に依存し、力学的、水理学的、化学的、熱的影響の相互作用による複雑な連成による劣化が生じることがわかった。これらの現象については、最新の研究結果では、周辺岩盤の劣化現象についての定量化は不確定性が多く、困難を極める状況にある、として整理した。
- ・坑道については、構成要素を抽出・整理し、それぞれの構成要素で使用されている材料の変状について調査結果をまとめた。坑道の支保部材を構成するセメントや鋼材に関する劣化現象については、余裕深度処分施設において長期状態評価に関する研究が進められており、劣化の原因と経時変化について、定量的な評価に関する検討がされているものの、劣化現象の発生に至る期間や環境条件については未だ不確かな状況もあることから、本検討への適用については今後の研究成果との整合を図っていく必要がある、として整理した。グラウトについては、スウェーデンやフィンランドなど海外の地下研究施設での研究事例や国内の試験事例から、長期安定性が示される知見が得られた。
- ・これらの周辺岩盤および坑道に関する調査結果から、坑道を一定期間埋め戻さない時期が存在した場合、基本的には処分施設の健全性を損なう方向への状態変化が進行することが考えられ、且つその挙動や現象は非常に複雑であることがわかった。このことから、空洞の安定性確保のためには複雑な挙動や現象を解明・予測する研究に加えて、工学的な対策としての適切な維持管理が重要であることを示した。

#### (人工バリア)

- ・人工バリアについては、力学的、水理学的、化学的、熱的影響について、地層処分の観点から重要な特性について整理を行い、それぞれの特性について発生する現象とその要因をまとめた。その結果、人工バリアにおいて生じる現象はオーバーパックスの腐食、緩衝材の変形、PEMの腐食などによる劣化が生じる可能性があることがわかった。オーバーパックスの腐食現象については、関係研究機関や既存の研究成果を基本として検討が可能であるが、定量化などのより信頼性のある評価のためには環境に応じた試験データの取得が必要であり、今後の課題として整理した。
- ・緩衝材については、現在、変形や流出などの検討が進められているものであるが、研究成果において定量化が困難な内容を多く含んでいることから、これらの研究開発成果との整合が必要になり、今後の課題として整理した。

## (2) 地層処分類似施設の維持に関する国内外の現状調査

### (周辺岩盤および坑道)

- ・国内の代表的な地質に対する地下坑道施設の変状と対策に対する文献調査を実施し、力学的、水理学的、化学的、熱的観点について整理した。
- ・地下坑道施設を対象とした具体的な維持管理方法について調査を行った。これらの調査結果から、地下坑道施設において生じている変状はさまざまであるが、適切な維持管理を実施するこ

とによりその機能を保持していることが示された。

- ・さらに、既往の技術だけではなく、現在開発中の維持管理技術について処分坑道への適用可能性について設計・技術的な観点から検討を行い、空洞の安定性を保持していくことの可能性を示した。

#### (人工バリア)

- ・国内における原子力関連施設として、原子力発電所、再処理施設等の核燃料サイクル施設、関連機器として使用済燃料の貯蔵キャスク等に調査した。原子力施設における定期安全レビュー(PSR)の考え方など中長期的な視点に立脚して評価対象期間の保安活動が実施されており、本検討のような中長期的に視点に経った検討においても有効であることを示した。
- ・廃棄物管理施設などのコンクリート躯体を含めた施設本体については、線量当量率検査及び空气中の放射性物質の濃度測定試験を行うことで、安全上重要な機能であるしゃへい壁の欠陥等がないことが確認され、建屋の外観を含めて日々の巡視点検より建物を含めた維持管理を行う仕組みが維持されており、これらについて整理した。

#### (諸外国における回収維持)

- ・回収維持期間に関して7か国(フランス、米国、スイス、フィンランド、スウェーデン、カナダ、日本)を調査した。
- ・可逆性・回収可能性を法令に規定している国は3ヶ国であり、フランスでは処分プロセスの可逆性を担保する最低限の期間として、その期間は少なくとも100年以上としている。米国は回収可能なように設計・建設することを法令に定めており、定置期間中及びその後の期間を通じて、NRC(原子力規制委員会)の審査が完了するまで、廃棄物の回収を可能とする、としている。また、スイスでは、回収可能性を維持した監視付き長期地層処分を法令に定めており、地層処分場は主処分施設とパイロット施設および試験施設から構成されており、期間については回収可能な比較的長い期間、としている。
- ・他の4か国(フィンランド、スウェーデン、カナダ、日本)においても回収可能性を維持することを安全指針等において示しているが、期間については具体的に示されていない。
- ・諸外国の可逆性・回収可能性における法令や安全指針等の中から、回収維持期間に関する基本的な考え方を整理した。

### (3) 抽出した課題の整理と課題解決の方策

#### (周辺岩盤および坑道)

- ・周辺岩盤および坑道に関する研究開発課題について、支保や周辺岩盤などの耐久性向上の観点および坑道環境の維持管理の観点から整理を行った。それぞれの課題についての課題解決の方策の概略検討を行った。
- ・処分坑道の特性を考慮した検討が必要であること、および他の研究機関で実施されている研究動向との合理性等を鑑み、課題を以下のとおり整理した。
  - 覆工および水圧低減のための排水工に関する適用性および設計方法の検討

- 更新可能または高耐久性な維持管理計測設備の検討

(人工バリア)

人工バリアに関する研究開発課題については、回収維持期間を具体的に検討するために新たに検討が必要と考えられる課題を以下のとおり整理した。

- オーバーパック及びPEM容器の腐食挙動に関する評価
- 緩衝材の劣化評価
- 人工バリア温度の把握と対策の検討
- 人工バリアのモニタリングに関する検討

課題解決には、定性的な検討および定量化の検討を仕分けし、整理して進める。また、他の研究機関で実施中の課題もあり、それらの知見を反映することにより進めていくことが合理的であるとして、今後の方策を整理した。

## 別紙

### 緩衝材除去装置駆動設備の製作のうち 遠隔操作設備における各設備の設計・製作

1. 駆動設備に対する遠隔操作設備の設計・製作
2. 昇降設備に対する遠隔操作設備の設計・製作
3. 塩水噴射・スラリー吸引設備に対する遠隔操作設備の設計・製作
4. 塩水リユース設備に対する遠隔操作設備の設計・製作
5. 統合システムの設計・製作

# 1. 駆動設備に対する遠隔操作設備の設計・製作

駆動設備に対する遠隔操作設備の設計を図 1 に示す手順にて実施した。

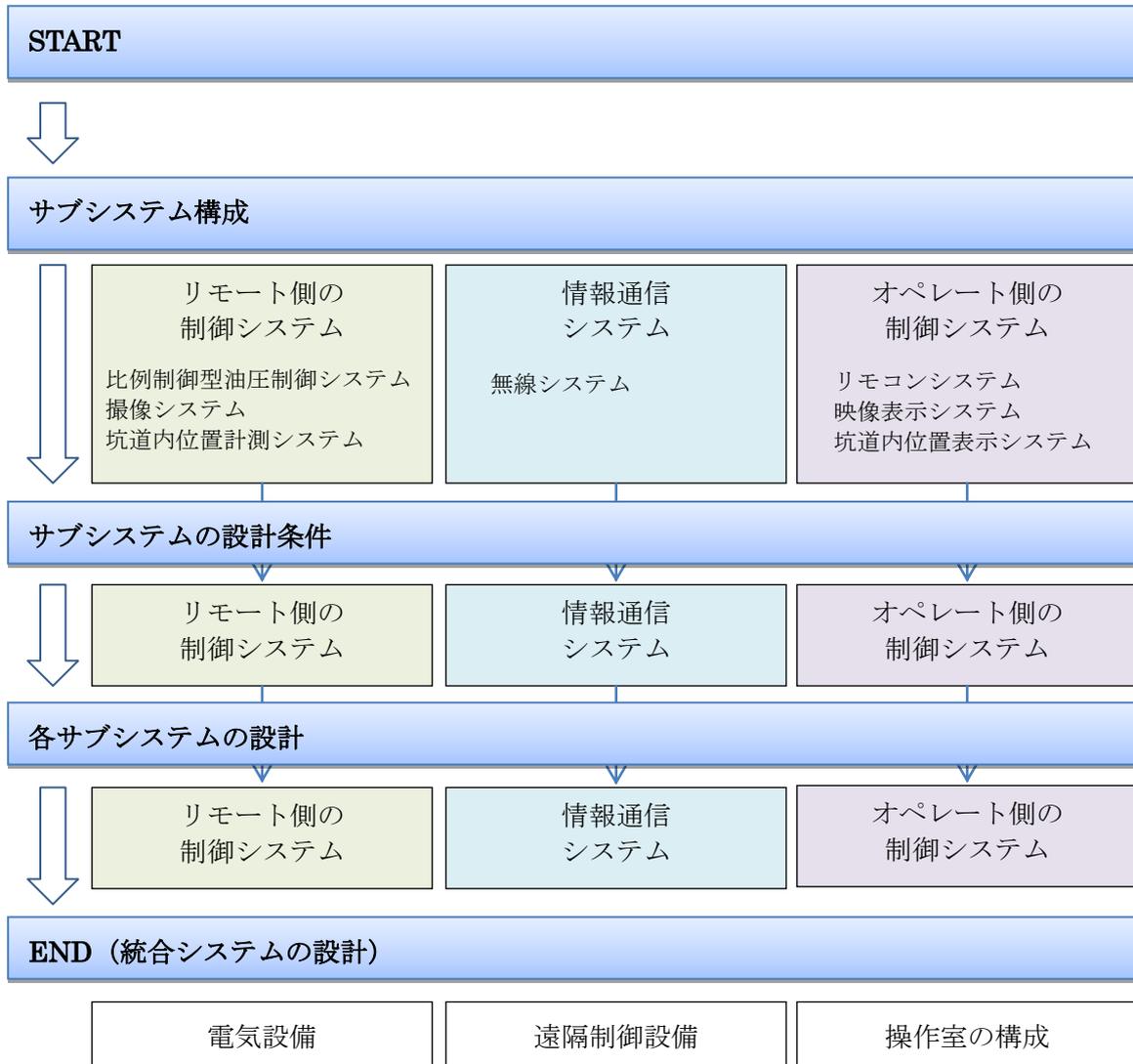


図 1 駆動設備に対する遠隔操作設備の設計手順

## (1) 設計条件

駆動設備に対する遠隔操作設備に要求される機能は、以下に示す 3 つに集約される。

- ・動力制御機能
- ・動力監視機能
- ・位置監視機能

また、遠隔による操作を可能とするには、以下に示す 3 つのシステムが必要になる。

- 1) リモート側の制御システム
- 2) 情報通信システム
- 3) オペレート側の制御システム

装備する機能とシステムの組み合わせた、サブシステムの設計結果を表 1 に示す。

表 1 駆動設備に対する遠隔操作設備として設計が必要なサブシステム

装備する機能	動力制御機能	動作監視機能	位置監視機能
1) リモート側の制御システム	比例制御型油圧制御システム	撮像システム	坑道内位置計測システム
2) 情報通信システム	無線操作システム	無線 LAN システム	無線 LAN システム
3) オペレート側の制御システム	リモコンシステム	画像表示システム	坑道内位置表示システム

以下に、各サブシステムの設計を実施していくための設計条件を示すした。

### 1) リモート側の制御システムの設計条件

リモート側の制御システムに対して要求する機能と、その機能を満足させるために装備するサブシステムの設計条件を検討した。

#### a. 油圧制御システムの選定条件

動作制御機能の選定条件として、油圧機械に対する遠隔での制御方式について検討した。制御方式は、大きく二つの方式があり、

##### ①直接配管型

パイロット（操作用）油圧配管を、操作位置から作業装置まで操作系統数分配管する方式

##### ②比例制御型

電氣的な制御信号を操作位置から作業装置まで送信し、パイロット油圧の制御を作業装置側油圧ユニット内にて行う方式（図 2）

直接配管方式は、一般的に遠隔での操作距離が短く、操作が単純な油圧機械で用いる方式であり、駆動装置へ適用した場合には、油圧ホースの本数、長さが莫大となり、また、リタ

ーン側油圧減衰による距離的な制限があるため、非合理的な方式であると判断し、駆動装置に整備する制御システムは比例制御型とし、その設計条件を表 2 に示す。

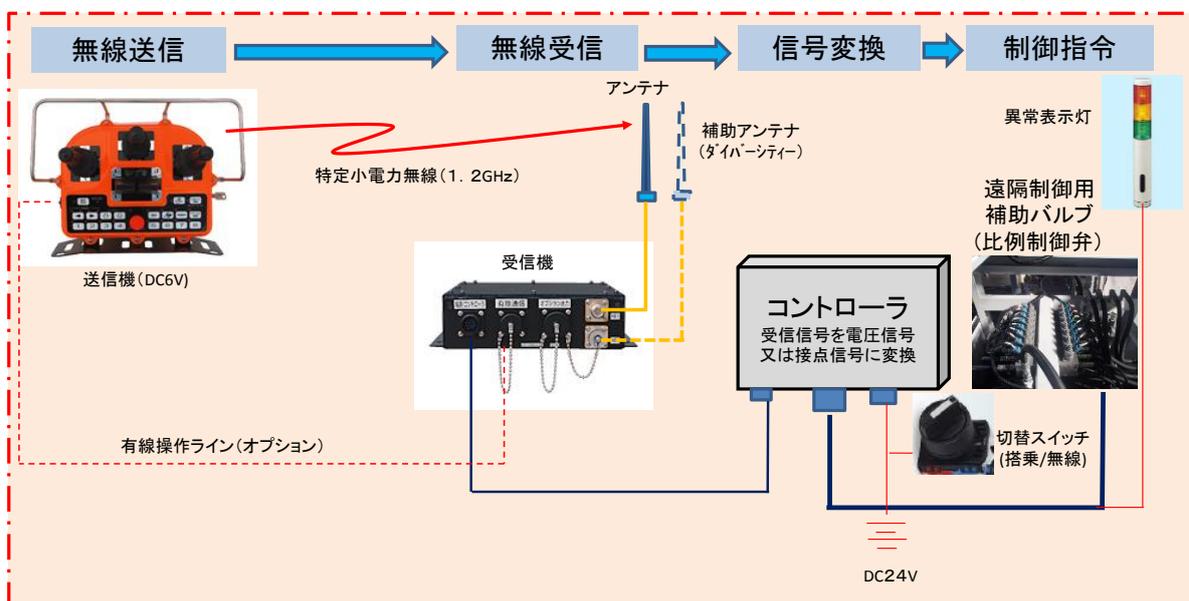


図 2 比例制御型油圧制御システムの概要

表 2 比例制御型油圧制御システムの設計条件

項目		設計条件	摘要
制御方式		比例弁による主バルブパイロット圧制御方式 (間接方式)	
制御電源		DC24V	
制御圧		30kg/cm <sup>2</sup> 以下	制御圧により流量を変化
使用環境	温度	-10℃～+40℃	地下環境を想定
	湿度	湿度 80%程度	同上
複合動作		可能なこと	基本的に複合なし
要求機能		無線/搭乗運転が切り替え可能なこと	
		速度状況に応じて比例制御のこと	1部 ON-OFF 制御可
		遠隔制御が可能な回路であること	

b. 撮像システムの設計条件

動作確認機能に対し、撮像システムを採用し、駆動設備の動作を監視するために、必要な数量の撮像装置（カメラ）を搭載した。画像システムへ要求する設計条件を表 3 に示す。

表 3 撮像システムの設計条件

項目		設計条件	摘要	
撮像機能	撮像部位	走行時	前方 2 ヶ所、後方 2 ヶ所	水平面－地面範囲
		作業時	模擬廃棄体頭部周辺 1 ヶ所	
			ノズル噴射部 1 ヶ所	
	撮像部照度	走行時	2.0lux 以上	
		作業部	0.7lux 以上	
	撮像部調整	走行時	固定	
		作業時	パン・チルト及びズーム機能	
	防水性能		IP×4 以上	
	カメラ画素数		30 万画素以上	
	カメラ焦点		オートフォーカス	
	出力ネットワーク		LAN	
	使用環境	温度	-5℃～+50℃	地下環境想定
		湿度	80%程度	
カメラ電源		DC12V, 24V 又は AC 電源		

c. 坑道内位置計測システムの設計条件

位置監視機能に対し、坑道面を映すカメラ画像だけでは、装置の走行位置などを定量的に把握することは不可能と考えられ、また、狭隘な処分坑道内での安全な駆動を実現するためには、撮像による主観的な情報に加え、客観的な情報が必要と考えられる。客観的な情報を取得する方法には、非接触型（レーザー距離計など）や、接触型（接触センサーなど）などのシステムの適用が考えられるが、本装置の走行が不陸などの不画一な坑道内で動作となることから、リアルタイムで 3 次元的に情報を把握する必要があると考えられることから、3D スキャナーを用いた定量的な坑道表面の測定を用い、詳細マッピングから位置を監視する機構を採用した。

カメラを中心とした動作監視機能と、3D スキャナーによる位置監視機能を両備することにより、3D スキャナーによる定量的な数値の裏付けのもと、映像に基づいた遠隔操作が可能であると考えられる。

表 4 に 3D スキャナーを用いた坑道内位置計測システムの設計条件を示す。

表 4 坑道内位置計測システムの設計条件

項目		設計条件	適用
スキャニング対象		走行前面の坑道（走行面と坑壁）	後退時も考慮
坑道環境	撮像面	路盤や吹付コンクリート	一定間隔（予定 5m）毎に距離マーカ配置
	温度	-10～+40 度	
	湿度	一般生活環境	
	照度	約 100Lx 以上。但し日光が当たらないこと 照明設備の影響を受けないこと	
スキャニング精度		位置管理の目標精度 10 cm	30m先の目標位置に到達できること
サンプリング間隔		1 秒以下	緩衝材除去装置の移動を把握できること

## 2) 情報通信システムの設計条件

情報通信システムには、有線方式と無線方式が挙げられ、有線方式の方が情報通信の安定性が高い。しかし、坑道内に通信線の敷設が必要となり、本装置の適用先である狭隘かつ長い坑道内での柔軟性が損なわれると考えられる。一方、無線方式は、通信量によっては情報通信の安定性は劣るものの、必要となる通信量と通信距離に応じて適切に周波数を割り当てることにより、実用面では問題のない遠隔操作が可能になるとともに、狭隘かつ長い坑道での適用に際し、柔軟性を確保できるものと判断されることから、情報通信システムは無線方式を採用した。表 5 に情報通信システムの設計条件を示す。使用する周波数帯は、大容量情報通信が必要となる撮像データ及び 3D スキャナーによる位置計測データの通信に対して、それぞれ 4.9GHz 帯、2.4GHz 帯を割り付けることとした。それぞれ独立した周波数帯での通信帯域とすることにより大容量の無線通信環境下での安定性を確保した。

なお、無線遠隔操作における緩衝材除去装置制御機能に対しては 1.2GHz 帯を用いることとし、オペレート側のリモコンシステムとして次項に記載した。

表 5 情報通信システムの設計条件

項目		設計条件	摘要
通信方式		無線 LAN	
周波数帯	カメラ	4.9GHz 帯	
	3D スキャナー	2.4GHz 帯	
通信データ	カメラ	アナログカメラ 4 台より取得した映像データ	
	3D スキャナー	スキャナー 7 台より取得した 3D 座標データ	
変換方式	カメラ	機側でデジタルデータに変換	
	3D スキャナー	機側で演算処理、画像データに変換	
使用環境	温度	-10℃～+40℃	地上操作室を想定
	湿度	70%程度	
電源		AC100V	PC、デコーダ他
通信距離		100m 程度	

3) オペレート側の制御システムの設計条件

オペレート側の制御システムに対して、要求する機能を満足させるために装備するサブシステムの設計条件を検討した。

a. リモコンシステムの設計条件

動力制御機能に対するオペレート側の制御システムは、災害復旧工事等で実績がある、リモコンシステムを採用した。リモコンシステムの設計条件を表 6 に示す。

表 6 リモコンシステムの設計条件

項目		設計条件	摘要
通信方式		特定小電力無線送信 1.2MHz	
使用チャンネル		20 チャンネル以上	
使用環境	温度	-10℃～+40℃	地上操作室を想定
	湿度	70%程度	
電源		AC100V 又は DC24V	操作器は電池式とする
通信距離		100m 以上 (今回 30m 程度)	
制御方式		比例制御及び ON・OFF 制御	比例制御
安全機能	転倒時非常停止機能有すること		作業者転倒等
	通信異常表示機能有すること		

b. 映像表示システムの設計条件

動作監視機能に対するオペレート側の制御システムは、装置前後に2台ずつ設置したカメラ画像をリアルタイムにモニターへ映し出すことが可能なシステムとし、走行路上の障害物や不陸等の情報を遠隔操作室内のオペレーターに伝達できるようにした。なお、出力モニターは操作性（視認性）を考慮して27インチ以上を設計条件とした。

映像表示システムの設計条件を表7に示す。

表7 映像表示システムの設計条件

項目		設計条件	備考
表示内容		4台のカメラからの映像を表示	
表示媒体		27インチモニター	
使用環境	温度	-10℃～+40℃	地上操作室を想定
	湿度	70%程度	
電源		AC100V	

c. 坑道内位置情報表示システムの設計条件

位置監視機能に対するオペレート側の制御システムは、パーソナルコンピューターによる画像処理や数値処理を介したリアルタイムな情報（画像と数値）をモニターへ映し出すことが可能なシステムとした。坑道内位置情報表示システムの設計条件を表8に示す。

表8 坑道内位置情報表示システムの設計条件

項目		設計条件	適用
通信方式		無線方式	無線LAN
表示情報		坑道内位置情報（数値） マップ表示	
処理PC要求性能		Windows系64bitOS CPU第3世代Core i以上 メモリ8G以上 GPUの併用も可	大規模点群処理をリアルタイムに実現できること
使用環境	温度	-10℃～+40℃	地上操作室内を想定
	湿度	湿度70%程度	同上
電源		AC100V	同上

(2) 駆動設備に対する遠隔操作設備の製作

前項で設定した設計条件を基に、各サブシステムの製作を行った。駆動設備に対する遠隔操作設備の仕様を以下に示す。

1) リモート側の制御システムの仕様

a. 比例制御型油圧制御システムの仕様

比例制御型の遠隔操作設備に対する、リモート側の比例制御型油圧制御システムの仕様を表 9 に、油圧制御システム系統を図 3 に示す。

表 9 比例制御型油圧制御システムの仕様

項目	仕様	詳細	備考
遠隔操作必要回路数	11 系統		
比例弁制御回路数	8 系統	主ポンプ回路で使用	
電磁弁制御回路数	3 系統	少流量回路	ノズル昇降、揺動、フリー
比例制御指令圧	0~28kg/cm <sup>2</sup>		
比例制御弁仕様	シヨハルメーカー標準品	—	実績多数あり
比例弁指令電圧	0~5V	—	

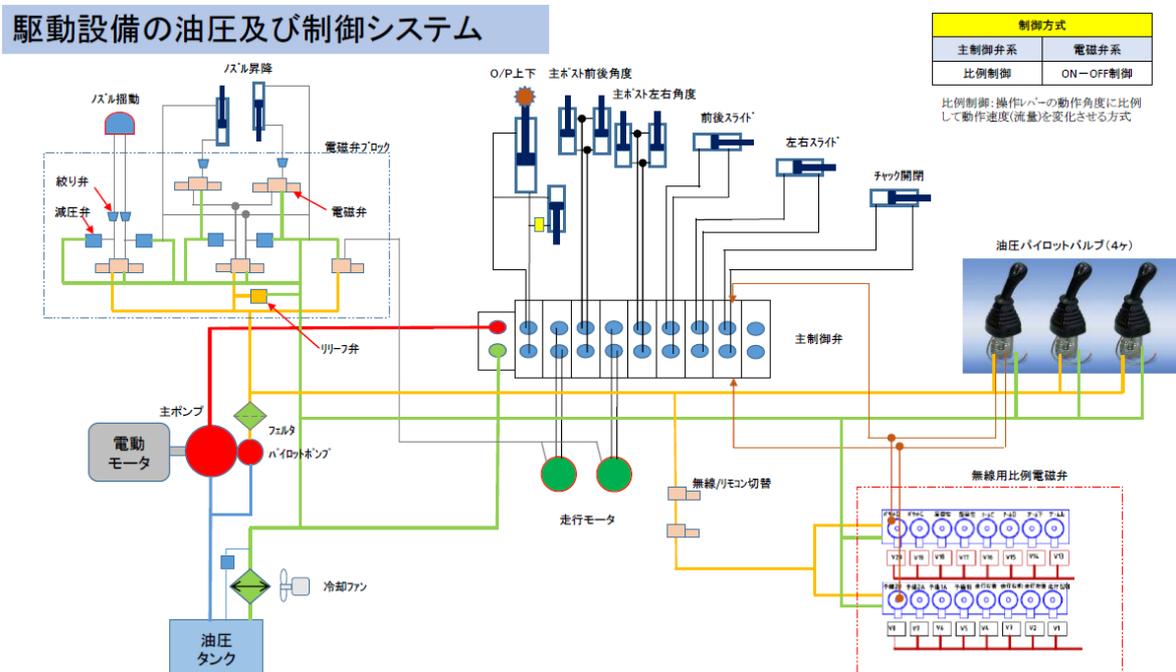


図 3 油圧制御システム系統図

b. 撮像システムの仕様

映像システムの遠隔操作設備に対する、リモート側の映像システムの仕様を表 10 に、撮像システム（カメラ）の配置を図 4 に示す。

表 10 撮像システムの仕様

項目	型式仕様	備考
型式	耐圧防爆型カメラ RD - 211D	ビレノデータコム製
防爆性能	ExD II CT6	
防塵防水性能	IP65 (JIS0920 防噴流形)	
電源	DC12V 消費電力 1.2W	
カメラ性能	撮像素子 1/4 インチカラー CCD	
	有効画素 38 万画素	
	最低被写体照度 0.07lux(ナイトモード時)	
	レンズ 3~9mm (89.1° ~29.8° )	
実用温度条件	-20°C~60°C	

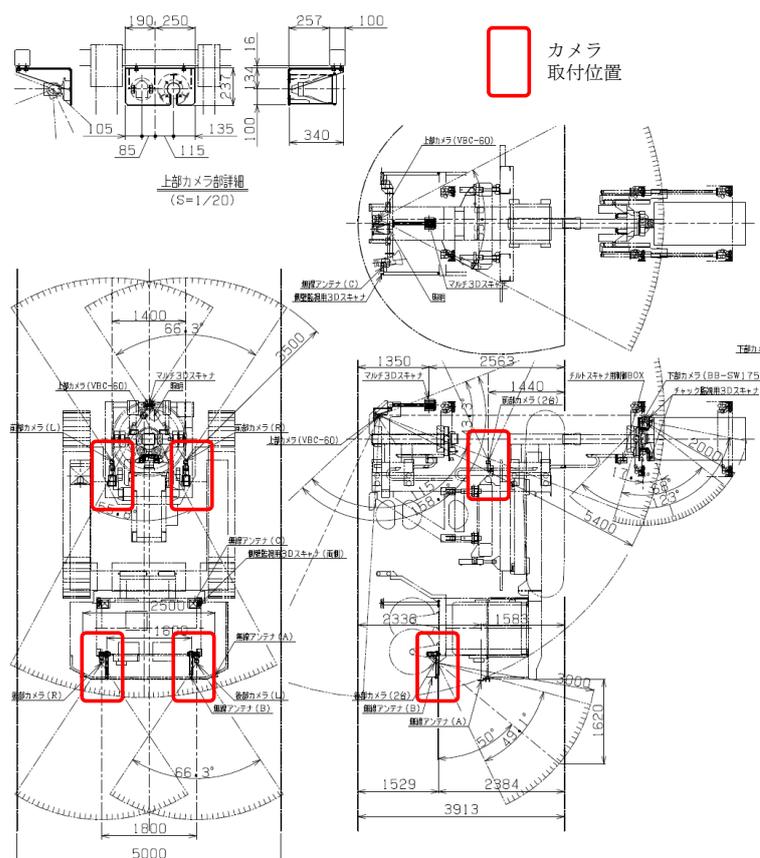


図 4 走行用カメラ取り付け位置

c. 坑道内位置計測システムの仕様

坑道内位置計測システムの遠隔操作設備に対する、リモート側の3Dスキャナーを用いた把持部位置計測システムの仕様を表 11 に、3Dスキャナーの取り付け位置を図 5 に示す。

表 11 坑道内位置計測システムの仕様

項目	設計条件	適用
位置計測	マルチ Xtion による周辺環境観測。	坑道壁面を十分にとらえること
観測範囲	台車前方に設置し、極力死角がない状態（視野角 180° 以上）で観測する。 Xtion 視野角を 40° とした場合、3 台以上にてカバーする。	
スキャニング精度	キャリブレーション修正観測範囲の 1 % 位置管理の目標精度は 10 cm	目標位置に到達できること。
サンプリング間隔	1 秒以下	把持台車の移動を把握できること。

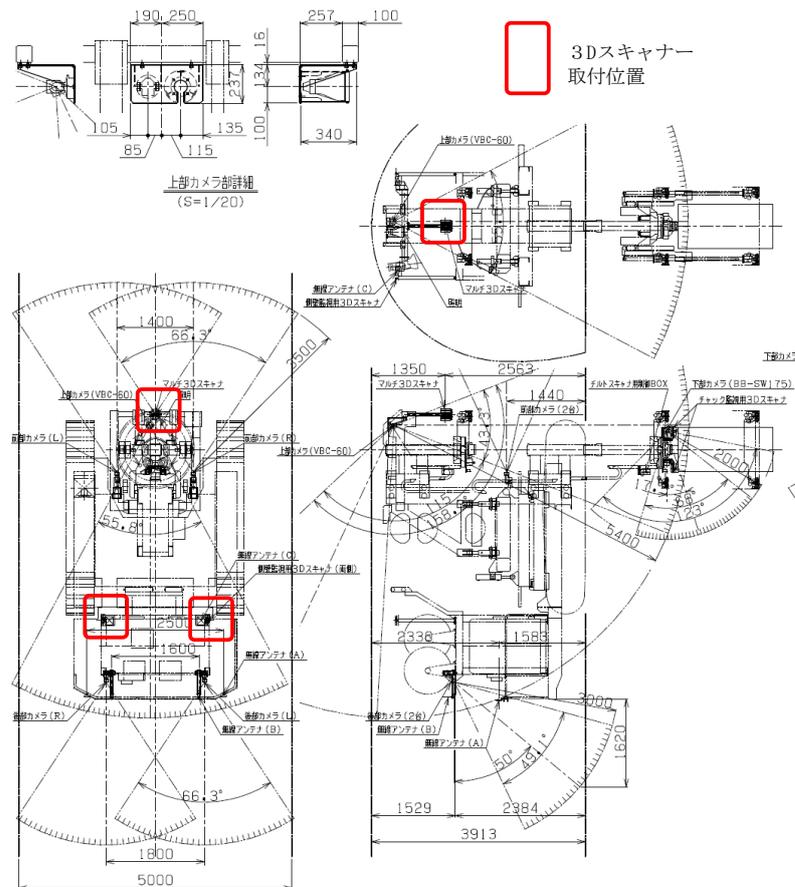


図 5 3Dスキャナー取り付け位置

## 2) 情報通信システムの仕様

情報通信システムの遠隔操作設備に対する、無線システムの仕様を表 12、表 13 に、無線システムの構成を図 6 に示す。

表 12 無線システムの仕様 (4.9GHz)

項目	仕様等
無線 LAN サポート規格	IEEE802.11b/g/j 対応
伝送方式	11j : 直交周波数分割多重方式 (OFDM) 単信 11b : 直接スペクトラム拡散方式 (DSSS) 単信 11g : 直交周波数分割多重方式 (OFDM) 単信
使用周波数範囲	11j : 4.9GHz 帯, 11b/g : 2.4GHz 帯
通信速度	11g/j : 最大 54Mbps , 11b : 最大 11Mbps
空中線電力	11b/g : 10mW/MHz 以下, 11j : 250mW 以下
有線 LAN サポート規格	IEEE802.3/3u 準拠 (10Base-T, 100base-TX), インターフェース : RJ-45 型
電源	AC100V
消費電力	最大 65W (モジュール構成による)
外形	OWS-2400 310 (H) x 254 (W) x 152 (D) mm
環境条件/適用規格	-30°C ~ +55°C
ウェザーレーティング	IP67 weather tight
周波数一覧	無線バックボーン 11J 5040Mhz、5060Mhz、5080Mhz アクセスサービス 11g 2412Mhz、2442Mhz、2472Mhz
無線バックボーンの帯域	最大 54Mbpsx3

表 13 無線システムの仕様 (2.4GHz)

項目	仕様等
無線 LAN サポート規格	IEEE802.11a/b/g/n/ac 対応
伝送方式	11b：直接拡散方式(DSSS) 11g/n：直交周波数分割多重方式(OFDM) 11a/n：直交周波数分割多重方式(OFDM) 11ac：直交周波数分割多重方式(OFDM) 11n/ac：3x3MIMO(3空間ストリーム)
使用周波数範囲	11b/g/n：2.4GHz帯、11a/ac/n：5.0GHz帯
通信速度	11b：最大11Mbps、11a/g：最大54Mbps、11n：6.5～450Mbps、 11ac：6.5～1,300Mbps
空中線電力	2.4GHz：23dBm(200mW)、5GHz：23dBm(200mW)以下
有線 LAN サポート規格	10/100/1000BASE-T Ethernet (RJ-45)x2
電源	802.3af または 802.3at (PoE)、DC 直接給電：12
消費電力	最大15W (モジュール構成による)
外形	(幅)203mm x (奥行)203mm x (高さ)65mm
環境条件/適用規格	-10℃～+50℃
ウェザーレーティング	なし
周波数一覧	無線バックボーン 11ac アクセスサービス 11g
無線バックボーンの帯域	最大1,300Mbps

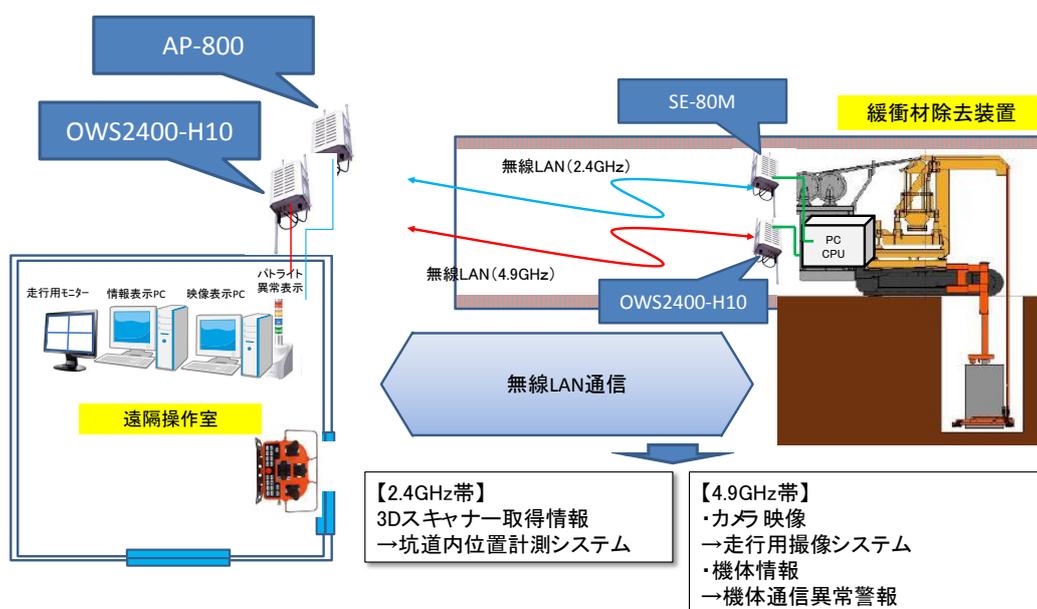


図 6 無線システム構成図

3) オペレート側の制御システムの仕様

a. リモコンシステムの仕様

リモコンシステムの遠隔操作設備に対する、オペレート側のリモコンシステムの仕様を表 14 に、遠隔操作システム及びリモコンレバー配置を図 7 に示す。

表 14 リモコンシステムの仕様

送信機(操作側機器仕様)

1.無線伝送方式	特定小電力無線 ARIB STD-T67 10W 単向連続送信
2.無線周波数	1252MHz 帯 19 波 (1252.0375～1252.4875)
3.無線チャンネル	固定/グループ/オール 切替え
4.構造	PC/ABS 樹脂
5.質量	約 2.4kg
6.温度・湿度	動作温度：-15～60℃ 湿度：RH90%以下
7.保護等級	IP55
8.電源	ニッケル水素電池 (単 3 型×2 本) ACアダプタ
9.電池使用時間	8 時間以上 (新品充電後、単 3 型 2 本 1900mAh)
10.通信速度	高速モード(4800bps)/遠隔モード(2400bps)切替え
11.有線出力	RS422(4800bps)/MSK(2400bps,600Ω,0dBm)切替え

受信機

1.無線伝送方式	特定小電力無線 ARIB STD-T67
2.無線周波数	1252MHz 帯 19 波 (1252.0375～1252.4875)
3.無線チャンネル	固定/グループ/オール 切替え
4.構造	アルミニウム板金構造
5.質量	約 1.5kg
6.温度・湿度	動作温度：-15～60℃ 湿度：RH90%以下
7.保護等級	IP43
8.電源	DC12～24V
9.電池使用時間	8 時間以上 (新品充電後、単 3 型 2 本 1900mAh)
10.通信速度	高速モード(4800bps)/遠隔モード(2400bps)切替え
11.有線入力	RS422(4800bps)/MSK(2400bps,600Ω,0dBm)切替え
12.主電源出力	フォト MOS リレー出力(無電圧出力) 2 出力
13.オプションスイッチ出力	フォト MOS リレー出力(無電圧出力) 2 出力(制御信号と並列に出力)

共通 (フェールセーフ等)

1.信号誤り検出	無線区間信号を CRC(16ビット)にて誤りチェック
2.ID 符号	操作器(送信機)と受信機は、一対の固有 ID 符号で管理

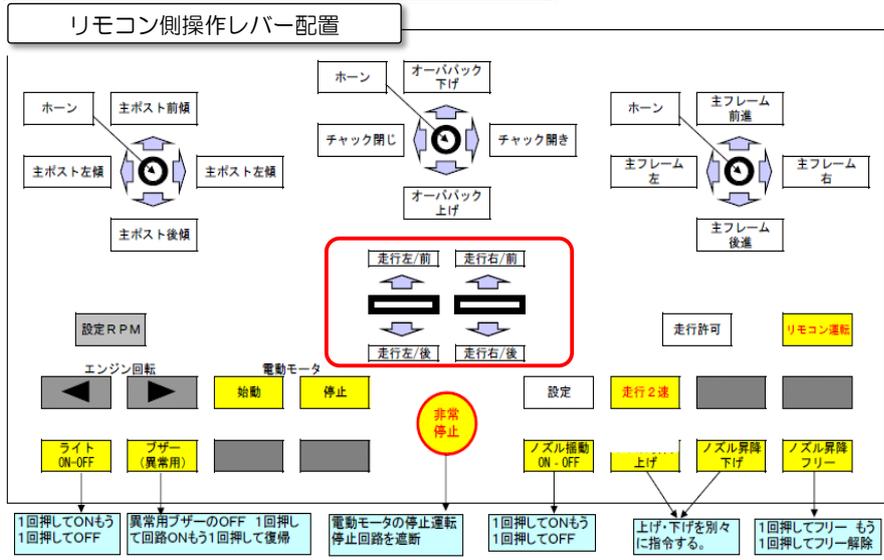
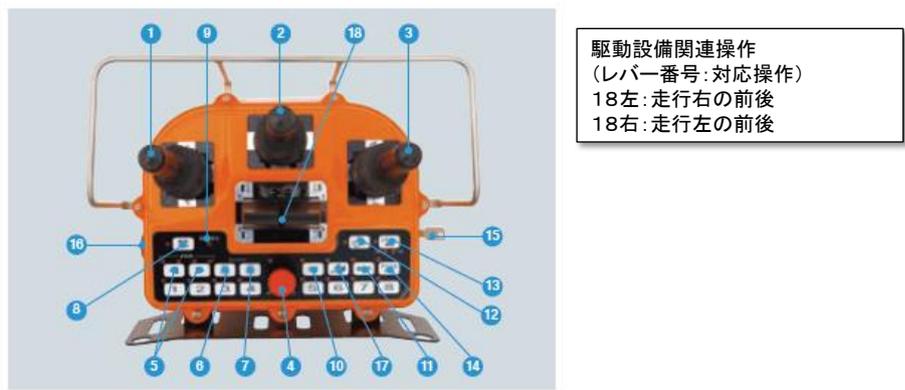
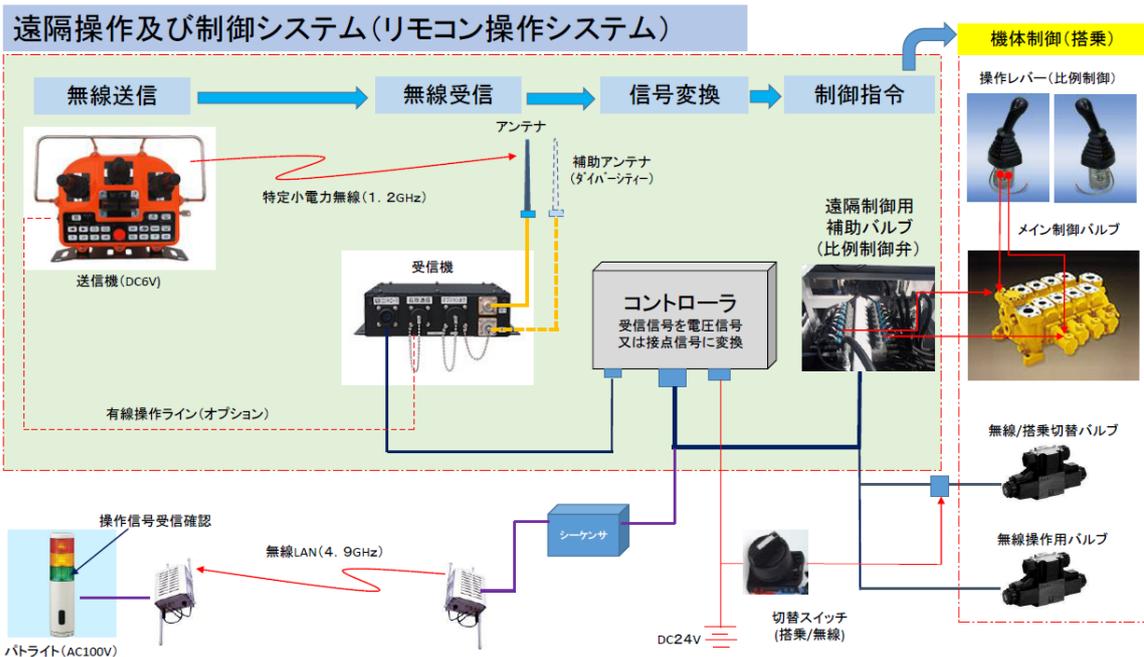
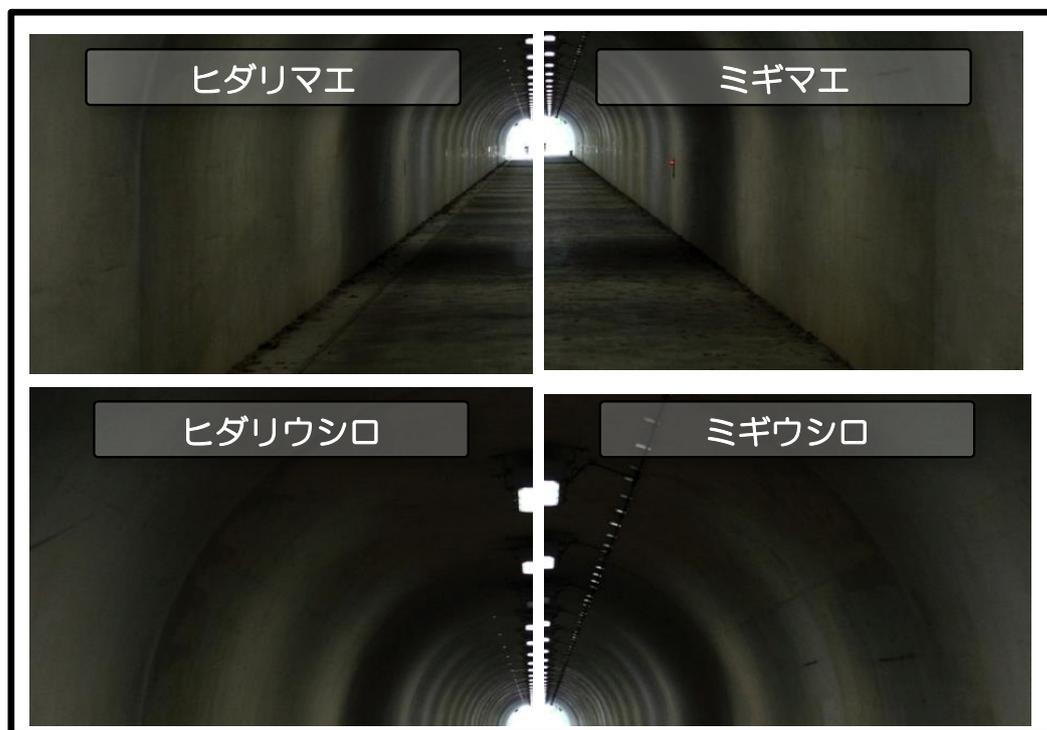


図 7 遠隔操作システム及びリモコンレバー配置

b. 撮像表示システムの仕様

映像表示システムの遠隔操作設備に対する、映像オペレート側の映像表示システムの画面仕様を図 8 に示す。



(注) 画像は模擬で実際の画像ではありません

図 8 撮像表示システムの画面仕様

c. 坑道内位置情報表示システム

坑道内位置情報表示システムの遠隔操作設備に対する、映像オペレート側の緩衝材除去装置の坑道内位置情報表示システムの画面仕様を図 9 に示す。

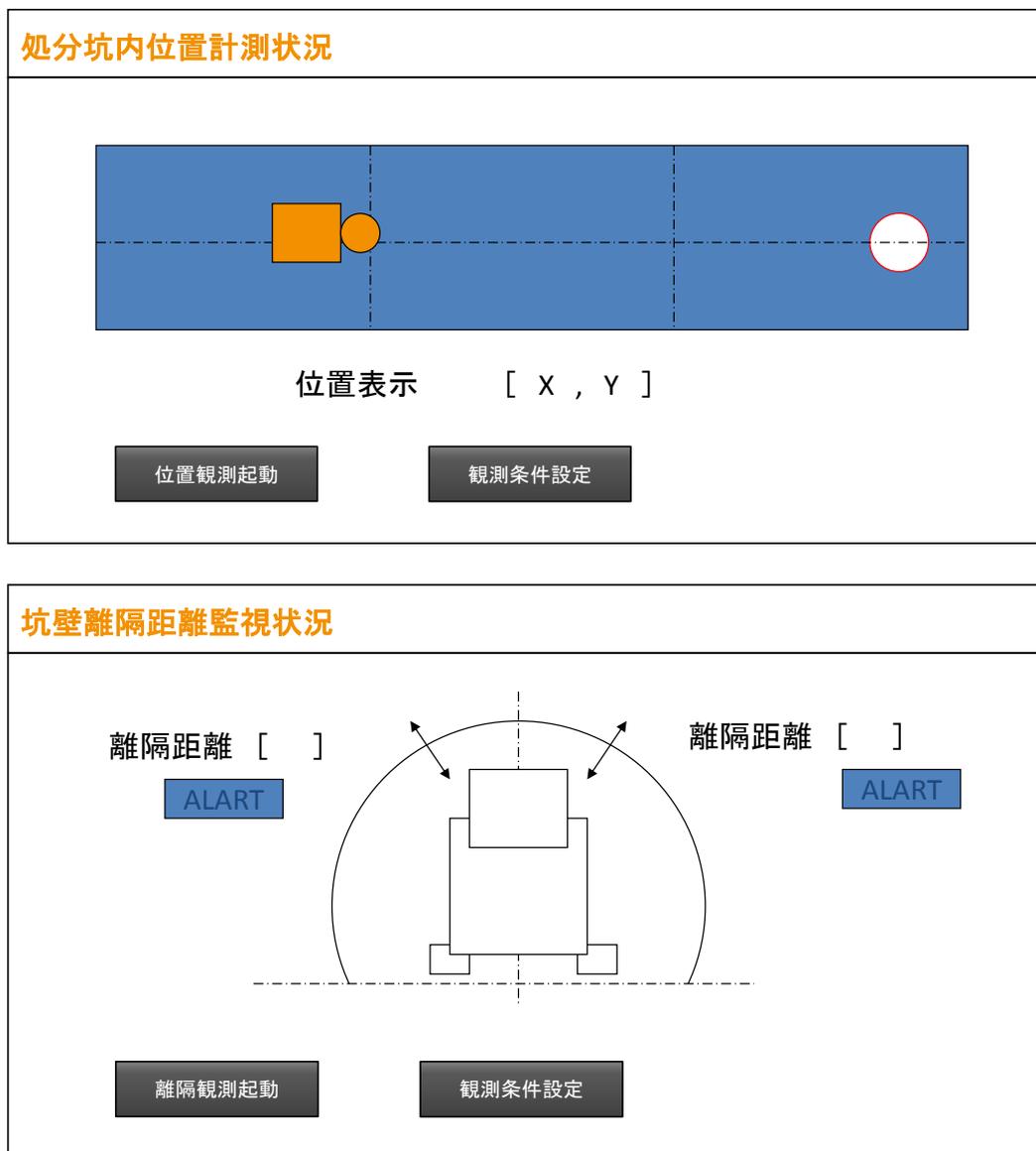


図 9 坑道内位置情報表示システムの画面仕様

## 2. 昇降設備に対する遠隔操作設備の設計・製作

昇降設備に対する遠隔操作設備の設計・製作は、図 10 に示す手順にて実施した。

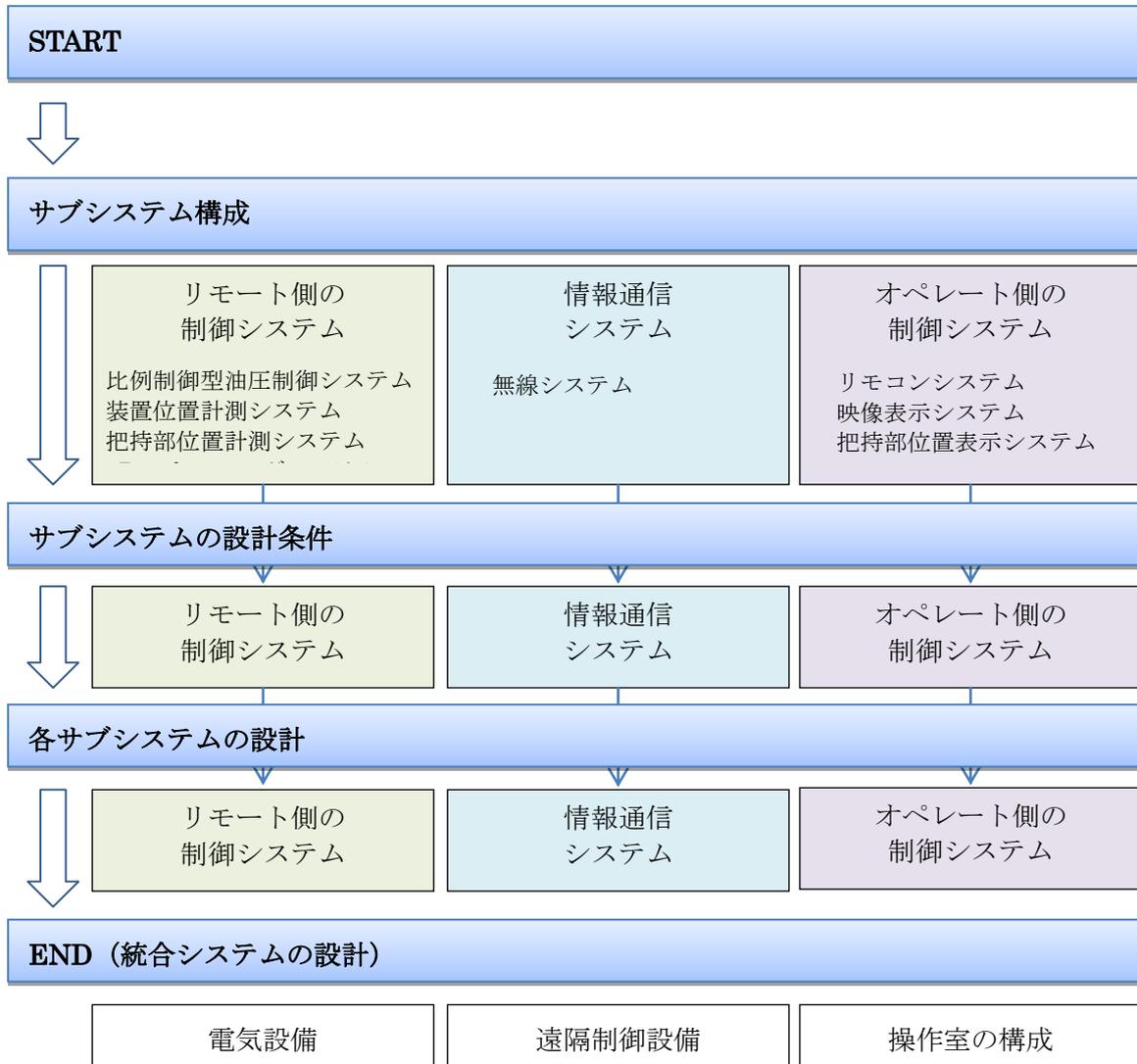


図 10 昇降設備に対する遠隔操作設備の設計手順

### (1) 設計条件

昇降設備に対する遠隔操作設備に要求される機能は、以下に示す 3 つに集約される。

- ・動力制御機能
- ・動力監視機能
- ・位置監視機能

また、遠隔による操作を可能とするには、以下に示す 3 つのシステムが必要になる。

- 1) リモート側の制御システム
- 2) 情報通信システム
- 3) オペレート側の制御システム

装備する機能とシステムの組み合わせた、サブシステムの設計結果を表 15 に示す。

表 15 昇降設備に対する遠隔操作設備として設計が必要なサブシステム

装備する機能	動力制御機能	動作監視機能	位置監視機能
1) リモート側の制御システム	比例制御型油圧制御システム 作業姿勢計測システム	撮像システム	把持部位置計測システム
2) 情報通信システム	無線操作システム	無線 LAN システム	無線 LAN システム
3) オペレート側の制御システム	リモコンシステム 作業姿勢表示システム	映像表示システム	把持部位置表示システム

以下に、各システムの設計を実施していくための設計条件を示す。

1) リモート側の制御システムの設計条件

リモート側の制御システムに対して要求する機能と、その機能を満たすために装備するサブシステムの設計条件を検討した。

a. 作業姿勢計測システムの設計条件

リモート側の遠隔操作設備は、比例制御型油圧制御システムに加え、装置の作業姿勢情報を把握するためのシステムが必要である。

作業姿勢計測システムの設計条件を表 16 に示す。

表 16 作業姿勢計測システムの設計条件

計測項目	設計条件	摘要
昇降装置水平位置	走行体と昇降装置の位置	前後左右
昇降装置垂直性	垂直を基本に倒れ量	前後左右傾き
模擬体負荷荷重	引上げ時荷重確認	
チャック開閉状態	最閉じ、最開きを把握	
チャック開閉圧力	正常な作動を確認	
チャック部高さ	模擬廃棄体把持部との相対位置確認	
ノズル先端高さ	噴射部除去深さ確認	

b. 撮像システムの設計条件

駆動設備と同様の撮像システム（表 3）を採用した。

c. 把持部位置計測システムの設計条件

駆動設備と同様に 3D スキャナーを用いた詳細な 3 次元座標マッピングによる模擬廃棄体把持部の位置計測方式を採用した。把持部位置計測システムの設計条件を表 17 に示す。

表 17 把持部位置計測システムの設計条件

項目		設計条件	適用
スキャニング対象		処分孔壁面 模擬廃棄体頭頂部周辺	
観測環境	撮像面	孔壁面、OP 塗装面	
	温度	-10~+40 度	
	湿度	一般生活環境	
	照度	約 100Lx 以上。 但し日光が当たらないこと	
スキャニング精度	観測範囲に対して 1%	把持装置のガイドとして十分であること。	
サンプリング間隔	0.1 秒以下		

2) 情報通信システムの設計条件

駆動設備と同様に無線方式とし、情報通信システムの設計条件を表 18 に示す。

なお、無線遠隔操作における緩衝材除去装置制御機能に対しては 1.2GHz 帯を用いることとし、オペレート側のリモコンシステムとして次項に記載した。

表 18 情報通信システムの設計条件

項目		設計条件	摘要
通信方式		無線方式	
周波数帯	カメラ	4.9GHz 帯	
	3D スキャナー	2.4GHz 帯	
通信データ	カメラ	デジタルカメラ 1 台より取得した映像データ	
	3D スキャナー	スキャナー 2 台より取得した 3D 座標データ	
変換方式	カメラ	機側でデジタルデータに変換	
	3D スキャナー	機側で演算処理、画像データに変換	
使用環境	温度	-10℃～+40℃	地上操作室を想定
	湿度	70%程度	
電源		AC100V	PC、デコーダ他
通信距離		100m 程度	

3) オペレート側の制御システムの設計条件

オペレート側の制御システムに対して、装備する機能を満たすために装備するサブシステムの設計条件を検討した。

a. リモコンシステムの設計条件

駆動設備と同様にリモコンユニット（表 6）を採用した。

b. 映像表示システムの設計条件

動作監視機能に対するオペレート側の制御システムは、パーソナルコンピューターによる画像処理や数値処理を介したリアルタイムな情報（画像と数値）をモニターへ映し出すことを可能なシステムとし、設映像表示システムの設計条件を表 19 に示す。

表 19 映像表示システムの設計条件

項目		設計条件	備考
表示内容	映像	1 台のカメラからの映像を表示	昇降設備付近
	作業姿勢	作業姿勢情報画面を表示	図 4.2.6-7
表示媒体		27 インチモニター	
使用環境	温度	-10℃～+40℃	地上操作室を想定
	湿度	70%程度	
電源		AC100V	

c. 把持部位置情報表示システムの設計条件

位置監視機能に対するオペレート側の制御システムは、駆動設備と同様にパーソナルコンピューターによる画像処理や数値処理を介したリアルタイムな情報（画像と数値）をモニターへ映し出すことを可能なシステムとし、把持部位置情報表示システムの設計条件を表 20 に示す。

表 20 把持部位置情報表示システムの設計条件

項目	設計条件	適用
通信方式	無線通信 (2.4GHz)	情報通信システムより
表示情報	OP 状態 (点群表示) OP 位置座標 (数値)	
処理 PC 要求性能	Windows 系 64bitOS CPU 第 3 世代 Core i 以上 メモリ 8 G 以上 GPU の併用も可	大規模点群処理をリアルタイムに実現できること
使用環境および電源	映像表示システム同等	

(2) 昇降設備に対する遠隔操作設備の製作

前項で設定した設計条件を基に、各サブシステムの製作を行った。昇降設備に対する遠隔操作設備の仕様を以下に示す。

1) リモート側の遠隔操作システムの仕様

a. 作業姿勢計測システムの仕様

作業姿勢計測システムの遠隔操作設備に対する、リモート側の作業姿勢計測システムの仕様を表 21 に、計測するセンサー類の取り付け位置を図 11 に示す。

表 21 作業姿勢計測システムの仕様

計測項目	計測機器名称	型式	性能
昇降装置位置	ストロークセンサー (前後用)	—	出力 0~10V
	ストロークセンサー (左右用)	—	出力 0~10V
昇降装置角度	2軸リニア 傾斜センサー	B2N10H-Q20L60-2LU 3-H1151	- 10~+10° 測定 IP67
廃棄体リフト力	圧力計	VESVM-35	35Mpa 用 出力 1~5V
チャック開閉等	圧力計	VESVM-20	20MPa 用 出力 1~5V
チャック部高さ	リニアエンコーダ	MUTOH DL-07	5パルス/1mm IP63
ノズル部高さ	リニアエンコーダ	MUTOH DE-04	5パルス/1mm IP63

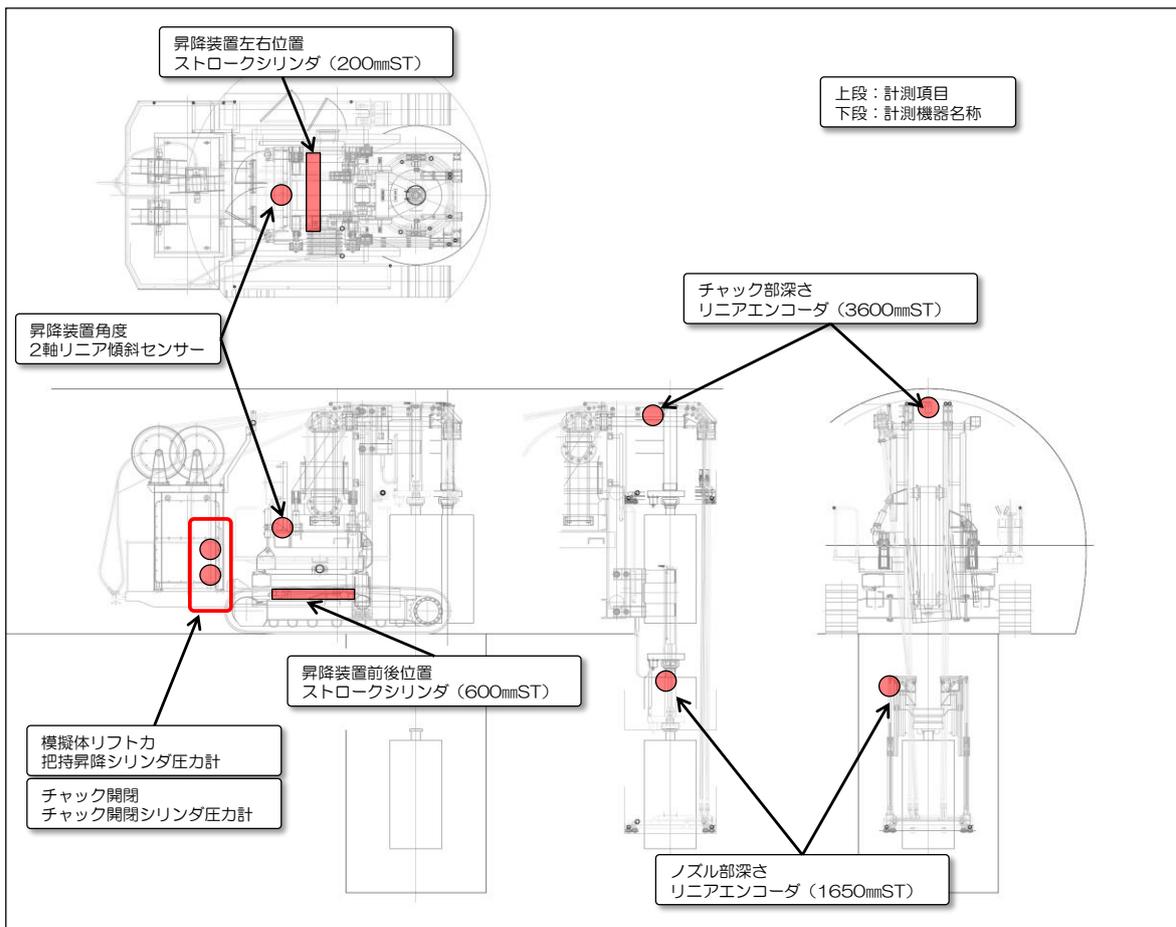


図 11 センサー類取付位置図

b. 撮像システムの仕様

撮像システムの遠隔操作設備に対する、リモート側の撮像システムの仕様を表 22 に、撮像システム（カメラ）の配置を図 12 に示す。

表 22 撮像システムの仕様

項目	型式仕様	備考
型式	ネットワークカメラ SNC - ER520	ソニー製
防水性能	(屋外仕様)	
画像圧縮	JPEG	
電源	AC24V	
カメラ性能	有効画素 38 万画素	
	最低被写体照度 1.4lux 0.61lux(ナイトモード)	
	ズーム性能 36 倍 デジタルズーム; 12 倍	
	レンズ焦点: オートフォーカス 0.5m~∞	
	焦点距離 3.4~122.4mm	
パン(水平)機能	360°	
チルト(垂直)機能	-105° ~+105°	
ネットワーク	LAN	
温度条件	-5°C~50°C	
湿度条件	20~80%	

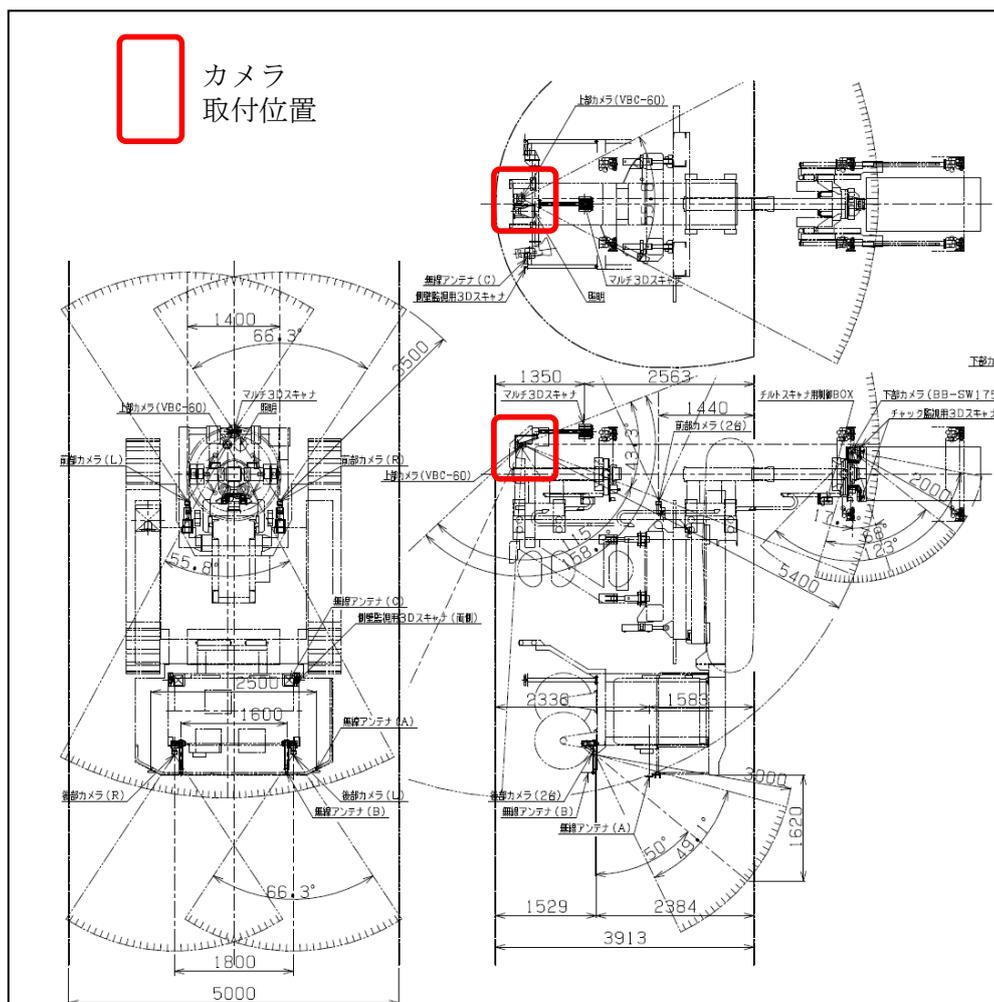


図 12 撮像システム (カメラ) 配置

c. 把持部位置計測システムの仕様

把持部位置計測システムの遠隔操作設備に対する、リモート側の3Dスキャナーを用いた把持部位置計測システムの仕様を表 23 に、3Dスキャナーの配置を図 13 に示す。

表 23 3Dスキャニングシステムの仕様

項目	設計条件	適用
通信方式	無線通信 (2.4G)	情報通信システムより
表示情報	OP 状態 (点群表示) OP 位置座標 (数値)	
処理 PC 要求性能	Windows 系 64bitOS CPU 第 3 世代 Core i 以上 メモリ 8 G 以上 GPU の併用も可	大規模点群処理をリアルタイムに実現できること
使用環境および電源	映像表示システム同等	

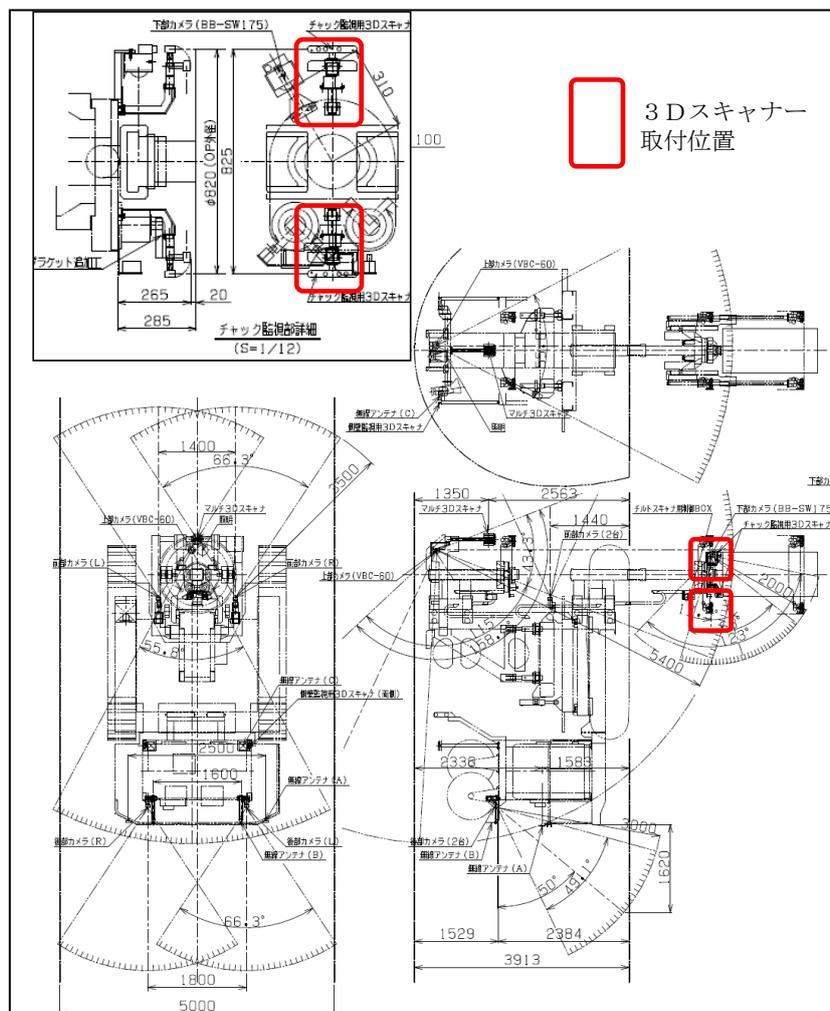


図 13 3Dスキャナー取付位置

## 2) 情報通信システムの仕様

昇降設備に対する遠隔操作設備の仕様は駆動設備と同様（表 12、表 13）とした。無線システム構成図を図 14 に示す。

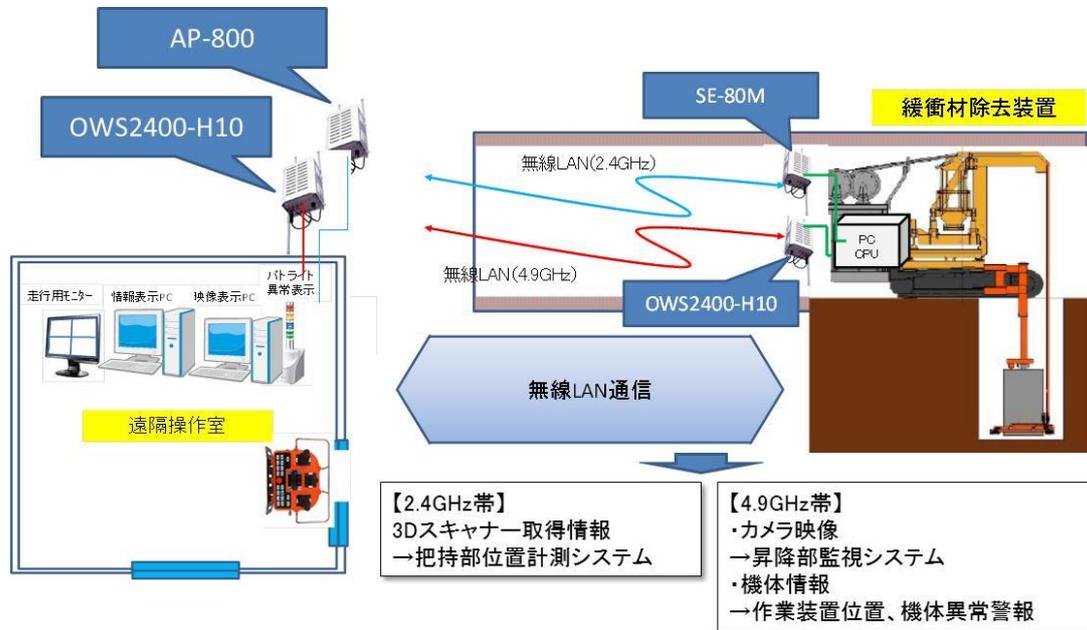
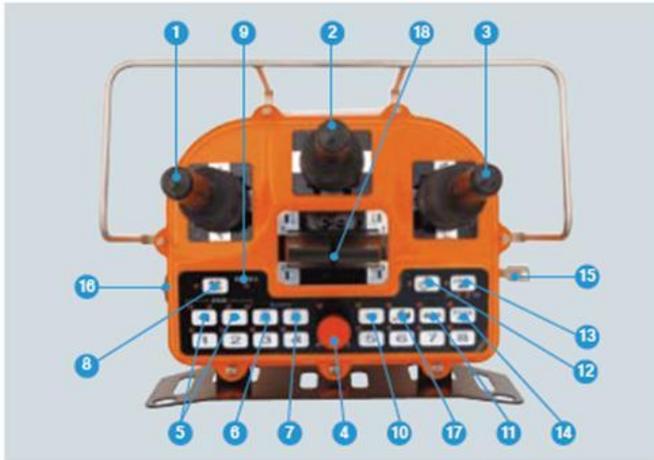


図 14 無線システム構成図

## 3) オペレート側の制御システムの仕様

### a. リモコンシステムの仕様

昇降設備に対する遠隔操作設備のうち、オペレート側の制御システムは 1 項で述べたリモコンシステムと共通とする。機器仕様については表 14 を参照、昇降設備に関するリモコンシステムの操作レーバー配置を図 15 に示す。



昇降設備関連操作  
(レバー番号:対応操作)  
1:主ポストの前後左右傾動  
2:把持昇降部の昇降  
チャック部の開閉  
3:位置調整フレームの前後左右

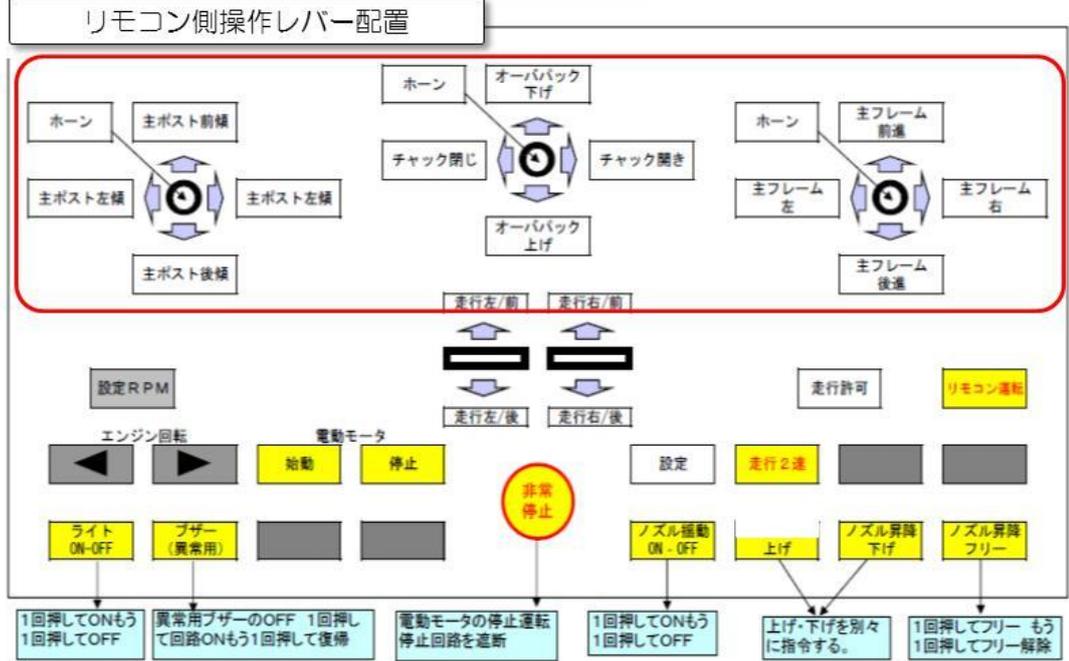


図 15 遠隔操作システムリモコンレバー配置

b. 映像表示システムの仕様

映像表示システムの遠隔操作設備に対する、映像オペレート側の映像表示システムの画面仕様を図 16 に、作業姿勢計測システムの計測結果の表示画面仕様を図 17 に示す。なお、表示に用いるモニターは、認識性から 27 インチとした。

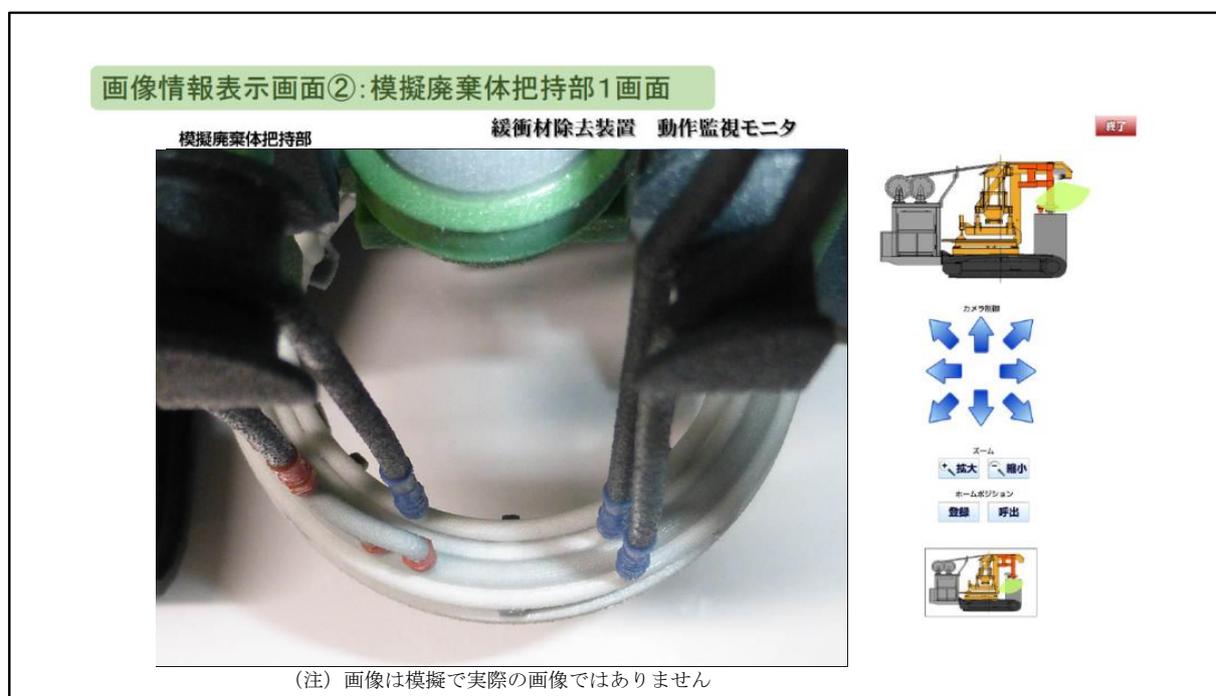


図 16 撮像表示システムの画面仕様

## 施工情報画面

### 把持部動作情報表示部

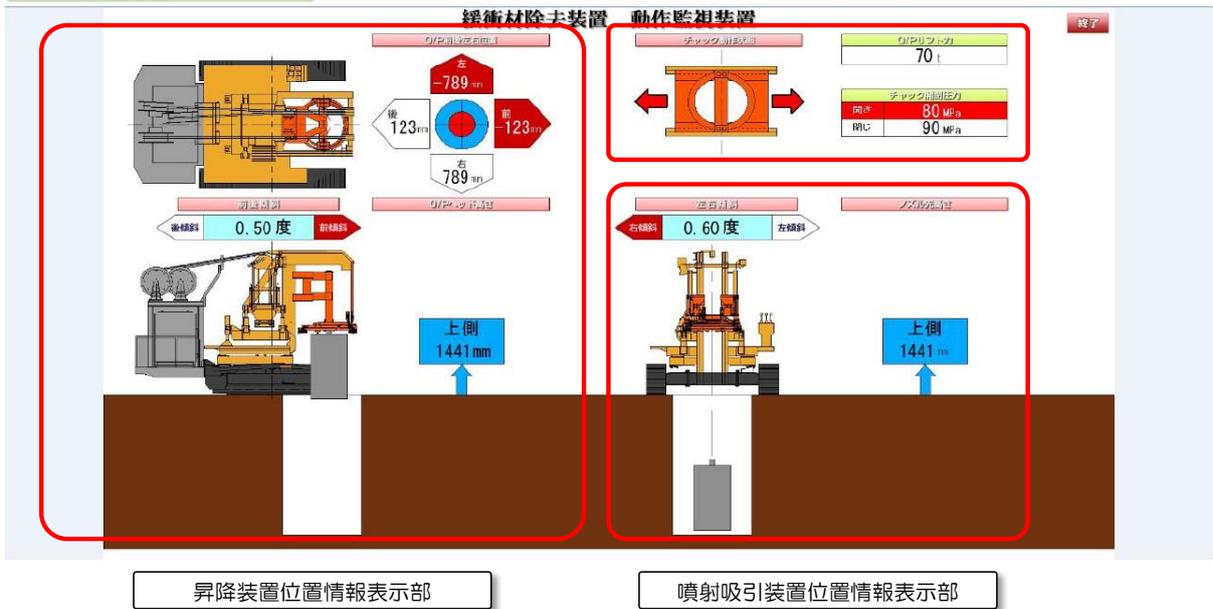


図 17 作業姿勢表示システムの画面仕様

### c. 廃棄体把持部位置表示システムの仕様

廃棄体把持部位置表示システムの遠隔操作設備に対する、映像オペレート側の廃棄体把持部位置計測システムの表示画面仕様を図 18 に示す。

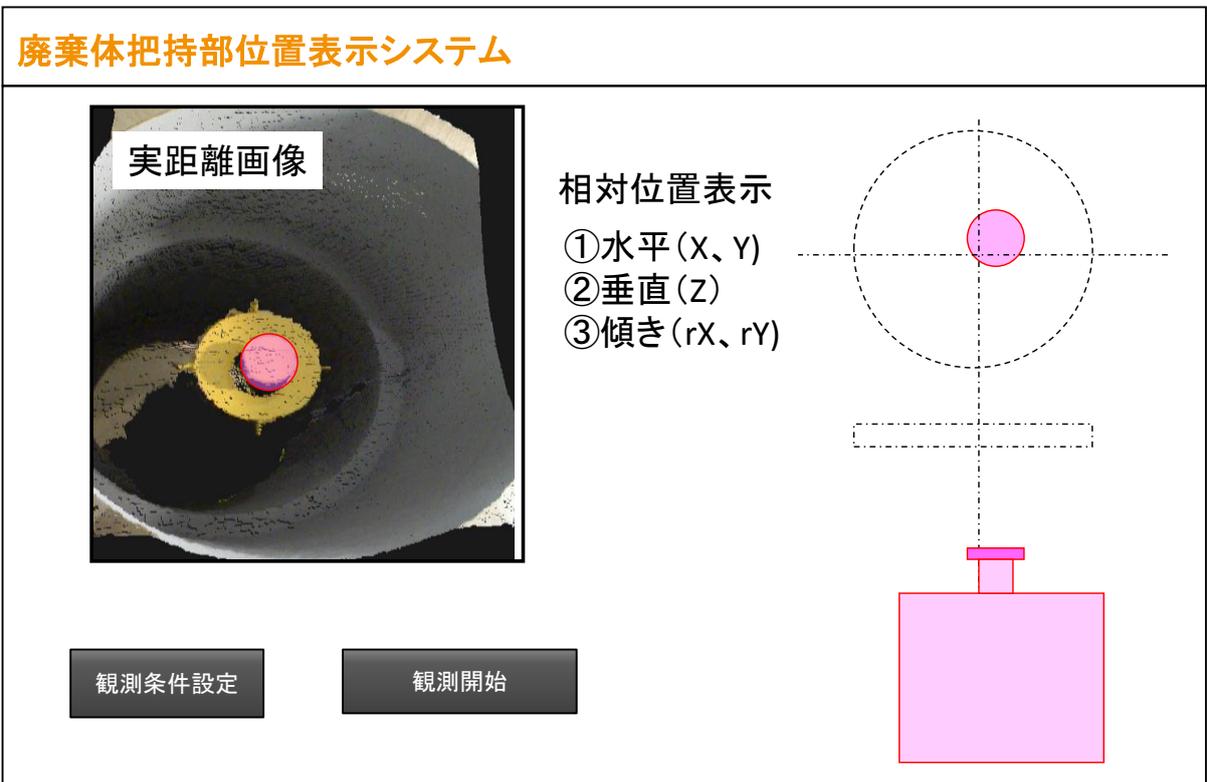


図 18 廃棄体把持部位置表示システムの画面仕様

### 3. 塩水噴射・スラリー吸引設備に対する遠隔操作設備の設計・製作

塩水噴射・スラリー吸引設備に対する遠隔操作設備の設計・製作は、図 19 に示す手順にて実施した。

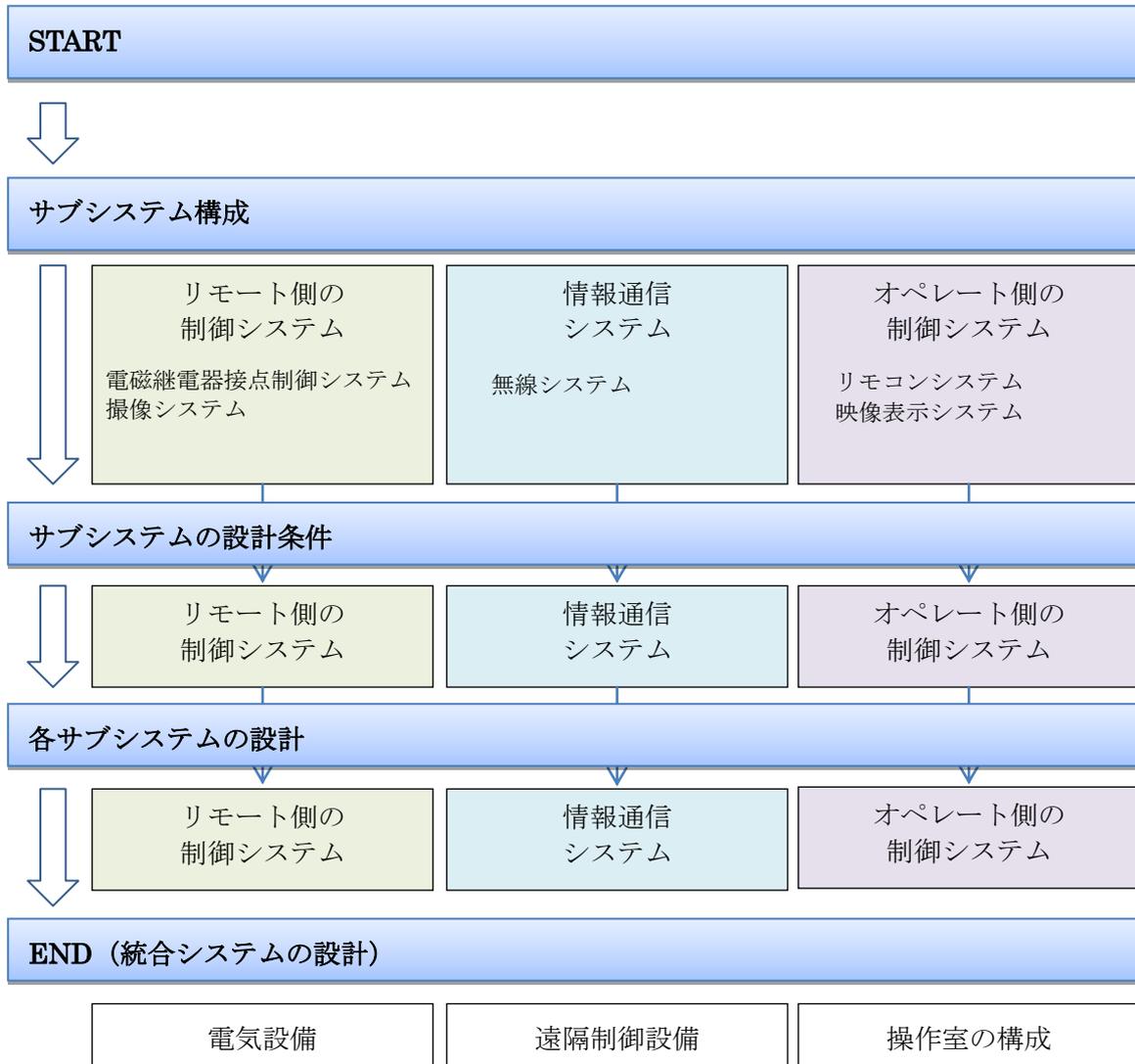


図 19 塩水噴射スラリー吸引設備に対する遠隔操作設備の設計手順

## (1) 設計条件

塩水噴射・スラリー吸引設備に対する遠隔操作設備に要求される機能は、以下に示す 2 つに集約される。

- ・動力制御機能
- ・動力監視機能

また、遠隔による操作を可能とするには、以下に示す 3 つのシステムが必要になる。

- 1) リモート側の制御システム
- 2) 情報通信システム
- 3) オペレート側の制御システム

装備する機能とシステムを組み合わせ、サブシステムの設計結果を表 24 に示す。

表 24 塩水噴射・スラリー吸引設備に対する遠隔操作設備として設計が必要なサブシステム

装備する機能	動力制御機能	動作監視機能	位置監視機能
1) リモート側の制御システム	電磁継電器接点制御システム	撮像システム	緩衝材除去量計測システム
2) 情報通信システム	無線システム	無線システム	無線システム
3) オペレート側の制御システム	リモコンシステム	映像表示システム	緩衝材除去量表示システム

以下に、サブシステムの設計を実施していくための設計条件を示す。

### 1) リモート側の制御システムの設計条件

リモート側の制御システムに対して要求する機能と、その機能を満たすために装備するサブシステムの設計条件を検討した。

#### a. 電磁継電器接点制御システムの設計条件

塩水噴射・スラリー吸引設備における主要機器は、塩水噴射ポンプおよびスラリー回収ポンプであり、これら機器の制御については、通常制御盤に設置される手元スイッチにより行われる。遠隔操作対応の方法としては、通常人間の手で行うスイッチ操作を、電磁継電器を介して遠隔無線操作する方法が考えられる。この方法は、機器内制御回路の改造を必要とせず、遠隔操作向け無線制御回路を増設することで対応ができる、最も信頼性が高い制御方式である。

これらの理由より、塩水噴射・スラリー吸引設備の遠隔操作システムは電磁継電器接点制御方式とした。その設計条件を表 25 にまとめた。

表 25 電磁継電器接点制御システムの設計条件

項目	設計条件	適用
制御対象	塩水噴射ポンプ スラリー回収ポンプ	制御盤からの電源制御
使用環境	温度	-10℃～40℃程度
	湿度	70%程度
遠隔操作距離	100m 程度	
制御方式	制御盤内既設スイッチにおける 並列接点回路増設	

b. 撮像システムの設計条件

駆動設備（表 3）や昇降設備（表 19）と同様撮像システムを採用した。

c. 緩衝材除去量計測システムの設計条件

駆動設備と同様に 3D スキャナーを用いた詳細な 3 次元座標マッピングによる模擬廃棄体把持部の位置計測とした。把持部位置計測システムの設計条件を表 26 に示す。

表 26 緩衝材除去量計測システムの設計条件

項目	設計条件	適用
スキャニング対象	処分抗壁面 OP 頭頂部周辺	
観測環境	撮像面	抗壁面、OP 塗装面
	温度	-10～+40 度
	湿度	一般生活環境
	照度	約 100Lx 以上。但し日光が当たらないこと
スキャニング精度	観測範囲に対して距離精度 1 % 体積は 3 %精度	
計測実施	作業指示によるオフライン処理	

2) 情報通信システムの設計条件

駆動設備同様に塩水噴射・スラリー回収設備に用いる情報通信システムも無線方式とした。情報通信システムの設計条件を表 27 に示す。

なお、遠隔無線操作における塩水噴射・スラリー回収設備の制御機能に対しては、429MHz 帯を用いることとした。こちらについてはオペレート側のリモコンシステムとして次項で記載する。

表 27 情報通信システムの設計条件

項目		設計条件	摘要
通信方式		無線 LAN	
周波数帯	カメラ	4.9GHz 帯	
	3D スキャナー	2.4GHz 帯	
通信データ	カメラ	デジタルカメラ 1 台より取得した映像データ	
	3D スキャナー	スキャナー 2 台より取得した 3D 座標データ	
変換方式	カメラ	機側でデジタルデータに変換	
	3D スキャナー	機側で演算処理、画像データに変換	
使用環境	温度	-10℃～+40℃	地上操作室を想定
	湿度	70%程度	
電源		AC100V	PC、デコーダ他
通信距離		100m 程度	

## 3) オペレート側の制御システムの設計条件

オペレート側の制御システムに対して、要求する機能を満たすために装備するサブシステムの設計条件を検討した。

## a. リモコンシステムの設計条件

動力制御機能に対するオペレート側の制御システムは、駆動設備や昇降設備と同様にリモコンユニット（表 14）を採用した。リモコンシステムの設計条件を表 28 に示す。

表 28 リモコンシステムの設計条件

項目		設計条件	摘要
通信方式		特定小電力無線送信 429MHz	
使用チャンネル		4 チャンネル以上	
使用環境	温度	-10℃～+40℃	地上操作室を想定
	湿度	70%程度	
電源		AC100V	対応した規格に変換
通信距離		100m 程度	
制御方式		接点開閉を無線にて制御	
入力方式		押しボタン方式	
安全対策		運用管理による	

b. 映像表示システムの設計条件

動力制御機能に対するオペレート側の制御システムは、駆動設備や昇降設備と同様にリモコンユニット（表 14）を採用した。映像表示システムの設計条件を表 29 に示す。

表 29 映像表示システムの設計条件

項目		設計条件	備考
表示内容		1 台のカメラからの映像を表示	昇降設備付近
表示媒体		27 インチモニター	
使用環境	温度	-10℃～+40℃	地上操作室を想定
	湿度	70%程度	
電源		AC100V	

c. 緩衝材除去量表示システムの設計条件

動作監視機能に対するオペレート側の制御システムは、駆動設備や昇降設備と同様にパーソナルコンピュータによる画像処理や数値処理を介したリアルタイムな情報（画像）をモニターへ映し出すことを可能なシステムとした。緩衝材除去量表示システムの設計条件を表 30 に示す。

表 30 緩衝材除去量表示システムの設計条件

項目	設計条件	適用
通信方式	無線通信（2.4G）	情報通信システムより
表示情報	除去形状体積（数値） 除去状態（点群）	
処理 PC 要求性能	Windows 系 64bitOS CPU 第 3 世代 Core i 以上 メモリ 8 G 以上 GPU の併用も可	大規模点群処理をリアルタイムに実現できること
使用環境 電源	映像表示システム同等	

(2) 塩水噴射・スラリー吸引設備に対する遠隔操作設備の製作

設計条件を基に、各サブシステムの製作を実施した。塩水噴射・スラリー吸引設備に対する遠隔操作設備の仕様を以下に示す。

1) リモート側の制御システムの仕様

a. 電磁継電器型接点制御システムの仕様

塩水噴射・スラリー回収設備の遠隔操作設備に対する、リモート側の電磁継電器型接点制御システムの主要構成機器である接点出力ボードの機器仕様を表 31 に、システム制御回路図を図 20 に示す。

表 31 リモート側制御機器の仕様

適用機種: MU1N-OUT8-429

1、一般仕様

温度条件: +25℃±5℃、標準値

項目	MU1N-OUT8-429
出力接点数	8ビット
インターフェース※1	フォト MOS リレー
入出力間応答時間	150ms 以内
使用温度※2	-20～+60℃
使用湿度	80%RH 以下(結露無き事)
保存温度	-25℃～+70℃
保存湿度	80%RH 以下(結露無き事)
動作電源電圧	4.0V 以上～12.0V 以下
消費電流※3	送信: 54mA 受信: 108mA※5
EEPROM 書換え回数	10 万回(データ保持時間約 10 年)
外形寸法※4	53mm×90mm×14mm(W×D×H)
本体重量	62g

※1: 48V, 100mA(AC/DC)

※2: 温度条件によって到達距離は変動します

※3: 電源電圧 4.0v 時 フォト MOS 全駆動

※4: アンテナ含まず。H は取り付け面からの高さ。

※5: フォト MOS 全駆動時

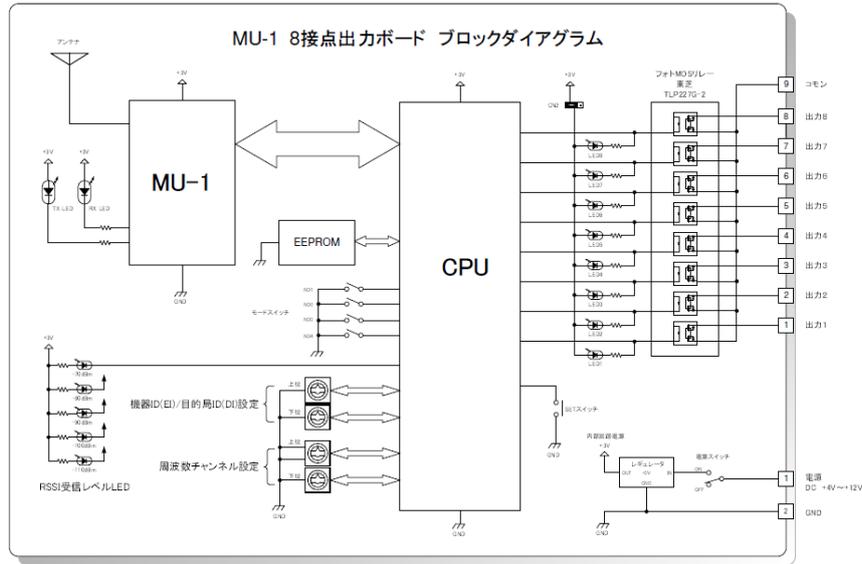
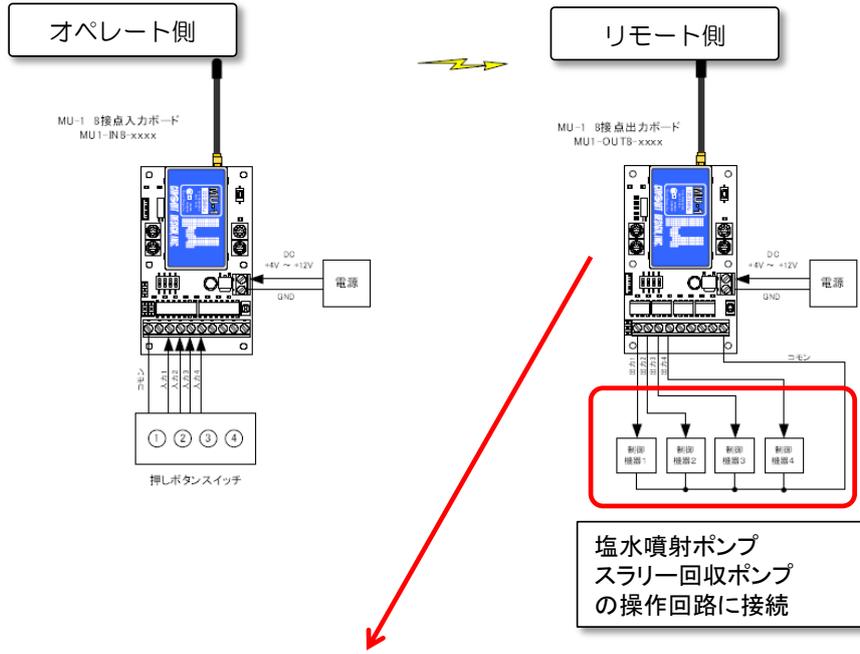


図 20 リモート側システム制御回路図



c. 緩衝材除去量計測システムの仕様

塩水噴射・スラリー回収設備の遠隔操作設備に対する、リモート側の3Dスキャナーを用いた緩衝材除去量計測システムの仕様を表 33 に、3Dスキャナーの取り付け位置を図 22 に示す。

表 33 緩衝材除去量計測システムの仕様

項目	設計条件	適用
除去状態観測	姿勢制御機構付 Xtion 除去の進行に合わせて観測範囲を変更できる。	OP と抗壁の観測ができること。
計測	除去量体積	
スキャニング精度	観測範囲に対して距離精度 1 % 体積は 3 % 精度	
計測実施	作業者指示によるオフライン処理	

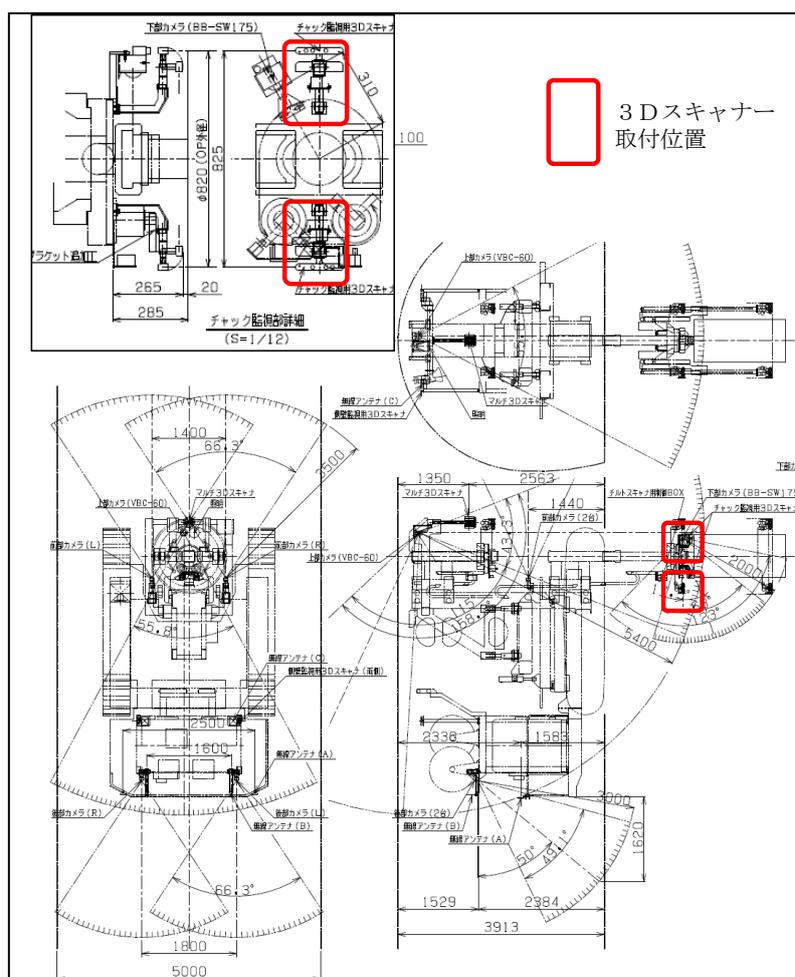


図 22 3Dスキャナー取り付け位置

## 2) 情報通信システムの仕様

塩水噴射・スラリー回収設備の仕様は、駆動設備（表 12、表 13）と同様とした。

なお、塩水噴射・スラリー回収設備の無線システム構成図を図 23 に示す。

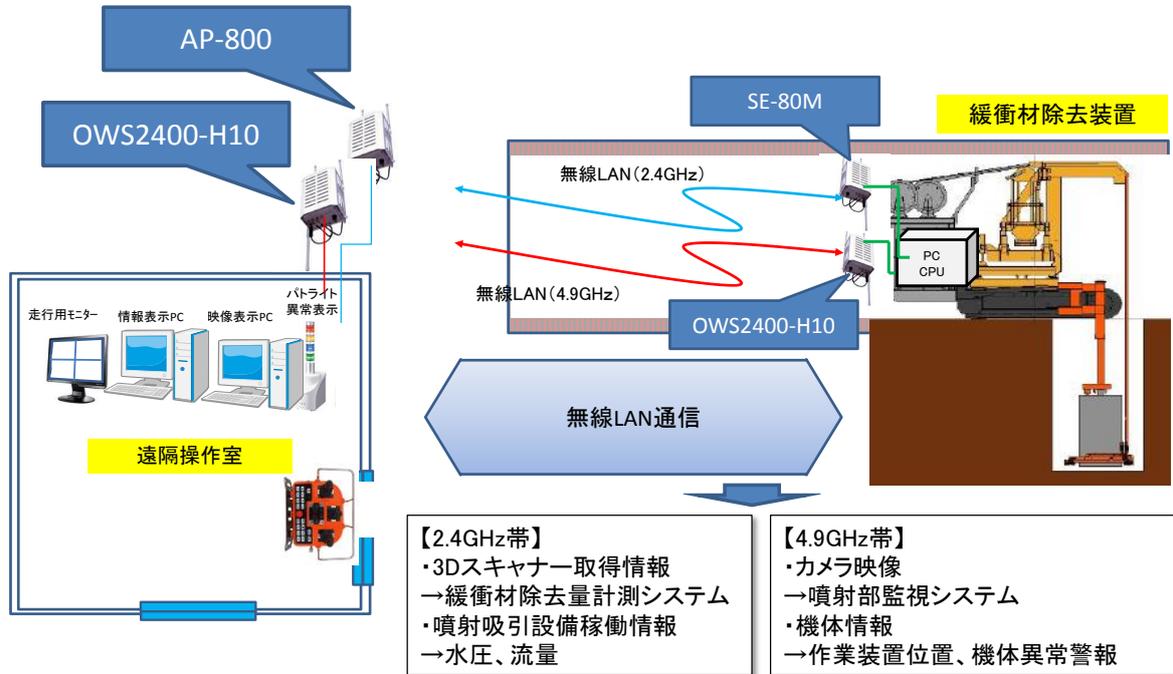


図 23 無線システム構成図

### 3) オペレート側の制御システムの仕様

#### a. リモコンシステムの仕様

塩水噴射・スラリー回収設備の遠隔操作設備に対する、オペレート側の主要構成機器である接点入力ボード及び無線伝送ボードの仕様を表 34 に示す。

表 34 オペレート側制御の仕様

適用機種: MU1N-IN8-429

#### 1、一般仕様

温度条件: +25°C±5°C、標準値

項目	MU1N-IN8-429
入力接点数	8ビット
インターフェース	フォトカプラ
入出力ボード間応答時間	150ms
使用温度※1	-20~+60°C
使用湿度	80%RH以下(結露無き事)
保存温度	-25°C~+70°C
保存湿度	80%RH以下(結露無き事)
動作電源電圧	4.0V以上~12.0V以下
消費電流※2	送信:70mA 受信:40mA
EEPROM 書換え回数	10万回(データ保持時間約10年)
外形寸法※3	53mm×90mm×14mm(W×D×H)
本体重量	62g

※1:温度条件によって到達距離は変動します

※2:電源電圧 4.0V時、全入力 ON時 ※3:アンテナ含まず。Hは取付面からの高さ

温度条件: +25°C±5°C、標準値

項目	仕様	備考
技術基準	ARIB 標準規格 STD-T67	
電波型式	F1D	
空中線電力	10mW +20% -50%以内 1mW(空中線電力低下装置使用時)	+5°C~+35°C コンタクト(50Ω) コマンドにより切り替え
周波数安定度	±3.5ppm 以内(-10°C~+55°C) ±5.5ppm 以内(-20°C~+65°C)	25°Cの値を基準とする
アンテナ	1/4λワイヤアンテナ	ゲイン 2.14dBi 以下
通信方式	単信又は単向	
変調方式	2値FSK	
発振方式	PLLシンセサイザ方式	
無線間通信速度	4800bps	
周波数範囲	429.2500MHz~429.7375MHz	
チャンネル数	40ch	ch間隔 12.5kHz
受信時副次発射強度	-60dBm 以下	
受信感度	-115dBm(標準プロトコル) -118dBm(エラー訂正プロトコル)	パケットエラー率 0.1%(1packet=255byte)
キャリアセンス閾値	7μV <sub>EMF</sub> 以下	7μV <sub>EMF</sub> = -96.1dBm(50Ω)
使用温度	-20°C~+65°C(結露無き事)	温度条件によって到達距離は変動します。
保存温度	-25°C~+70°C(結露無き事)	
動作電源電圧	3.0V以上~5.0V以下	絶対最大定格電圧 5.5V
消費電流	10mW時 送信:46mA 受信:30mA 1mW時 送信:35mA 受信:30mA	電源電圧 3V時
スタンバイモード消費電流	Mode1=13mA, Mode2=0.9mA, Mode3=45μA	電源電圧 3V時
EEPROM 書換え回数	100000回	データ保持時間:約10年
誤り訂正方式	リードソロモン符号	RS(255,247)
外形寸法	50mm×30mm×9mm(W×D×H)	アンテナ含まず。Hは取付面からの高さ。
本体重量	23.5g	

#### 参考データ

\*実効無線間通信速度: 約 3400bps 条件: 単向通信、エラー訂正無し、25°C

\*到達距離: 約 1000m 条件: 単向通信、エラー訂正無し、25°C、見通し距離、地上高 1.5m、アンテナ垂直

b. 撮像表示システムの仕様

塩水噴射・スラリー回収設備の遠隔操作設備に対する、映像オペレート側の映像表示システムの画面仕様を図 24 に示す。なお、表示に用いるモニターは、認識性から 27 インチとした。

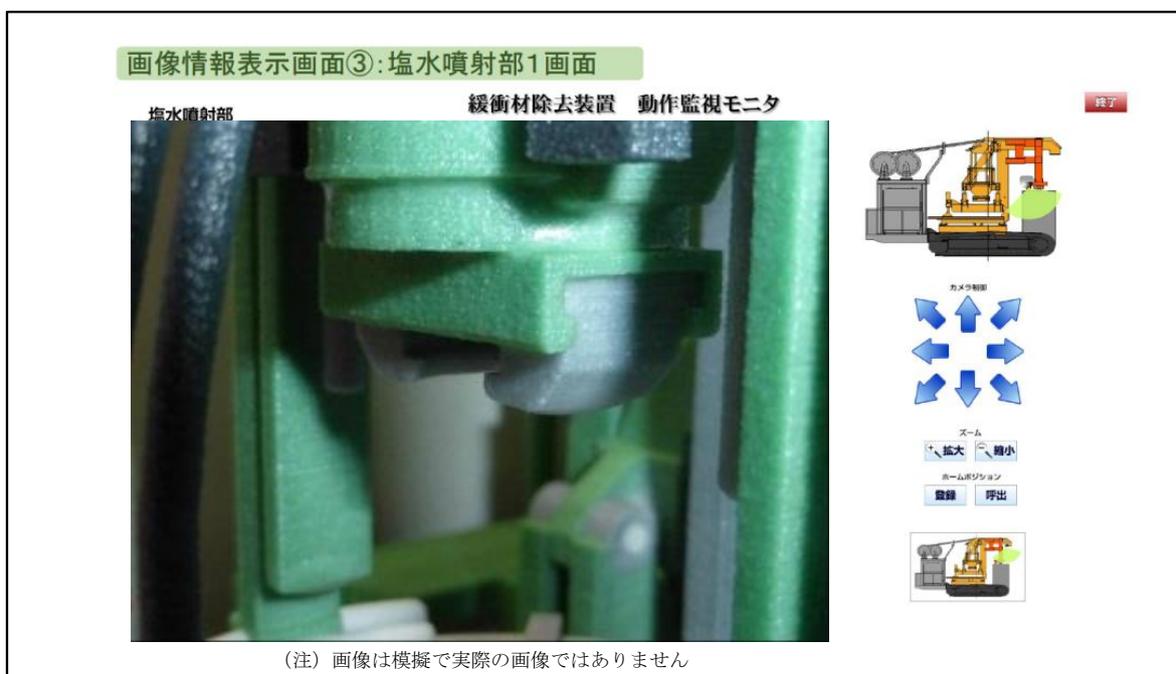
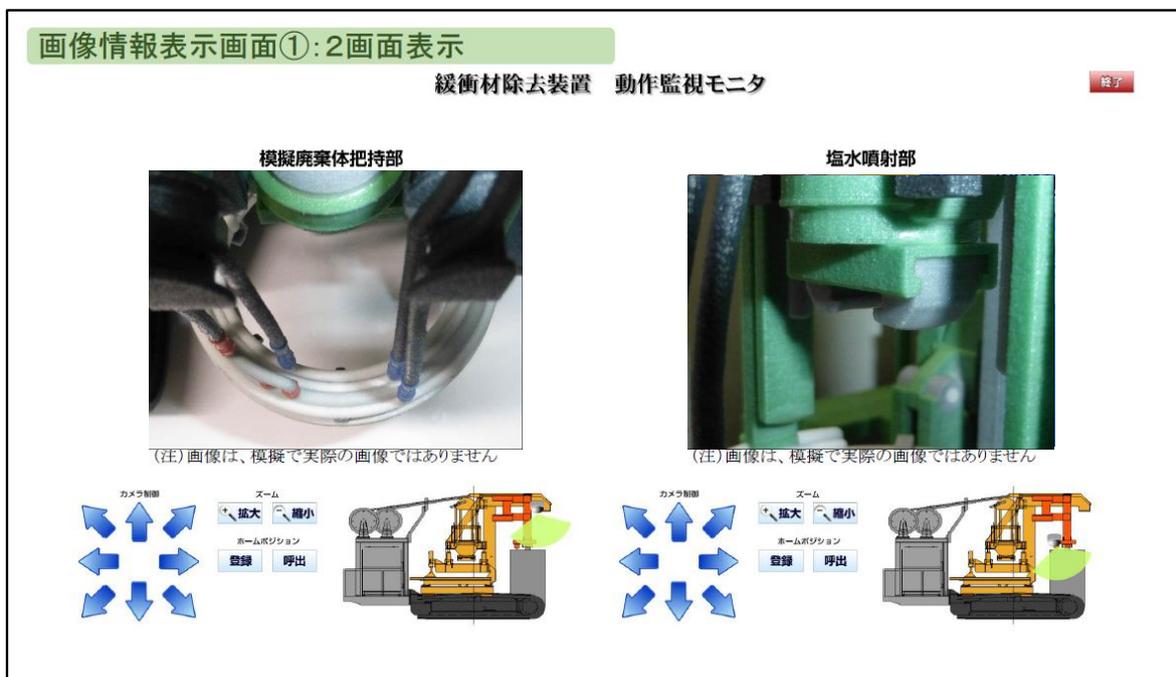


図 24 撮像表示システムの画面仕様

c. 緩衝材除去量表示システムの仕様

塩水噴射・スラリー回収設備の遠隔操作設備に対する、映像オペレート側の緩衝材除去量計測システムの仕様画面を図 25 に示す。

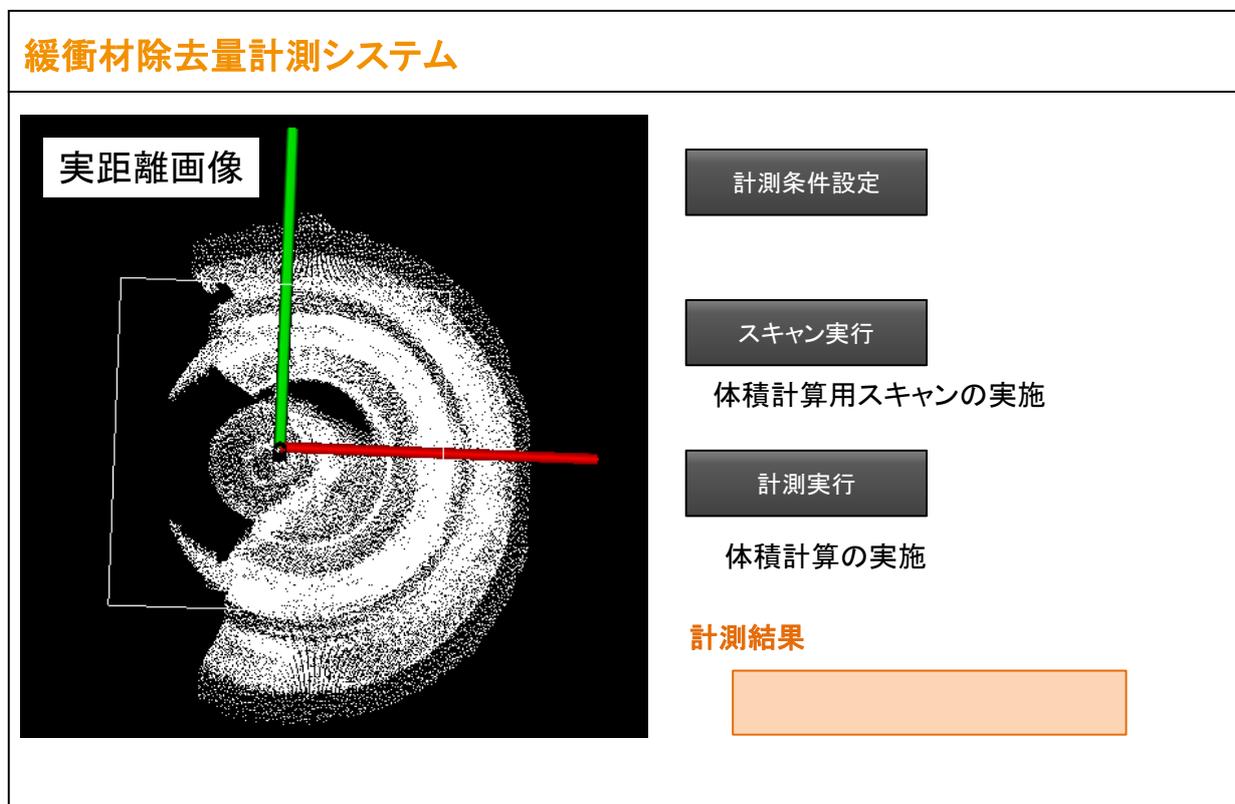


図 25 緩衝材除去量計測システムの画面仕様

#### 4. 塩水リユース設備に対する遠隔操作設備の設計・製作

塩水リユース設備に対する遠隔操作設備の設計・製作は、図 26 に示す手順にて実施した。

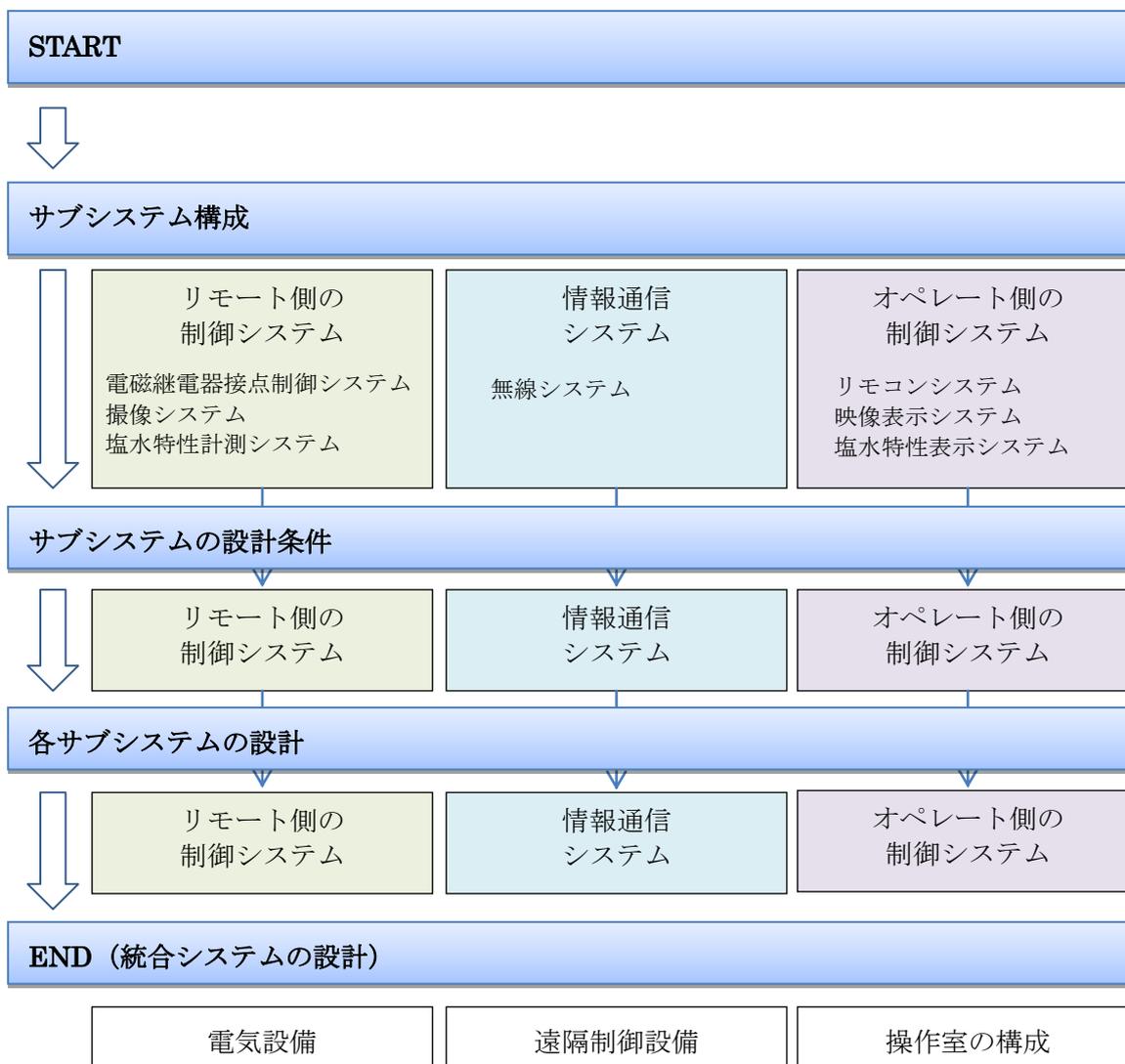


図 26 塩水リユース設備に対する遠隔操作設備の設計手順

##### (1) 設計条件

塩水リユース装置に対する遠隔操作に要求される機能は、以下に示す 3 つに集約される。

- ・ 動力制御機能
- ・ 動力監視機能
- ・ 塩水特性監視機能

また、遠隔による操作を可能とするには、以下に示す 3 つのシステムが必要になる

- 1) リモート側の制御システム
- 2) 情報通信システム
- 3) オペレート側の制御システム

装備する機能とシステムの組み合わせた、サブシステムの構成結果を表 35 に示す。

表 35 塩水リユース設備に対する遠隔操作設備として設計が必要なサブシステム

装備する機能	動力制御機能	動作監視機能	塩水特性監視機能
1)リモート側の制御システム	電磁継電器接点開閉システム	撮像システム	塩水特性計測システム
2)情報通信システム	無線システム	無線システム	無線システム
3)オペレート側の制御システム	リモコンシステム	映像表示システム	塩水特性表示システム

以下に、各システムの設計を実施していくための設計条件を示すした。

1) リモート側の制御システムの設計条件

リモート側の制御システムに対して供給する機能と、その機能を満すために装備するサブシステムの設計条件を検討した。

a. 電磁継電器型接点制御システムの設計条件

塩水噴射・スラリー吸引設備と同様の動作電磁継電器型を採用した。電磁継電器型接点制御システムの設計条件を表 36 に示す。

表 36 電磁継電器接点制御システムの設計条件

項目	設計条件	適用
制御対象	リユース設備負荷設備	塩水供給設備等
使用環境	温度	-10℃～40℃程度
	湿度	70%程度
遠隔操作距離	100m 程度	
制御方式	制御盤内既設スイッチにおける 並列接点回路増設	

b. 撮像システムの設計条件

駆動設備等と同様の撮像システムを採用した。撮像システムの設計条件は、撮像対となるSS処理状況と塩水リユース設備全体稼働状況を監視できる視認性、適用する環境による制約等が挙げられる。撮像システムの設計条件を表 37 に示す。

表 37 撮像システムの設計条件

項目		設計条件		摘要	
撮像機能	撮像部位	SS 処理	シックナ上部	水平面－地面範囲	
		稼働状況	設備上部		
	撮像部照度	SS 処理	10lux 以上		
		稼働状況	10lux 以上		
	撮像部調整	SS 処理	パン・チルト及びズーム機能		
		稼働状況	パン・チルト及びズーム機能		
	防水性能		屋外仕様		
	カメラ画素数		30 万画素以上		
	カメラ焦点		オートフォーカス		
	出力ネットワーク		LAN		
	使用環境	温度	-5℃～+50℃		地下環境想定
		湿度	80%程度		
カメラ電源		DC12V, 24V 又は AC 電源			

c. 塩水特性計測システムの設計条件

塩水特性監視機能として、塩水圧力や流量などの特性を把握することが必要となることから、遠隔でこれらの特性を把握するために必要な装置に対する設計条件を表 38 に示すした。

表 38 塩水特性計測システムの設計条件

項目		設計条件 (測定レンジ)	摘要
SS (濁度)		～10000ppm 程度	H24 試験結果より
塩濃度		6%程度	H24 試験結果より
PH		6.0～8.0 程度	H24 試験結果より
水温		-10℃～50℃程度	H24 試験結果より
塩水流量		～250mL/min 程度	H24 試験結果より
圧力	噴射側	～1.0Mpa 程度	H24 試験結果より
	回収側	～0.1Mpa 程度	H24 試験結果より

2) 情報通信システムの設計条件

駆動設備等と同様に塩水リユース装置に用いる情報通信システムも無線方式とし、その設計条件を表 39 に示すように設定した。使用する周波数は、昇降時の情報通信量が少ない動力制御機能に対しては 1.2GHz 帯、大容量となる撮像データの情報通信が必要となる動作監視機能に対しては 4.9GHz 帯 (表 12)、位置監視機能については 2.4GHz 帯 (表 13)、動力制御に対しては 1.2GHz 帯を割り付けることとし、独立した通信ルートとすることにより安全性と安定性を確保した。1.2GHz 帯の設計条件を表 39 に示す。

表 39 情報通信システムの設計条件

項目		設計条件	摘要
通信方式		無線 LAN	
周波数帯		2.4GHz 帯	
通信データ	画像データ	デジタルカメラ 2 台より取得した映像データ	
	塩水特性データ	計測機器からの取得データ	
変換方式		一部アナログ出力データをデジタルデータに変換	
使用環境	温度	-10℃～+40℃	地上操作室を想定
	湿度	70%程度	
電源		AC100V	PC、デコーダ他
通信距離		100m 程度	

3) オペレート側の制御システムの設計条件

オペレート側の制御システムに対して、装備する機能を満たすために装備するサブシステムの設計条件を検討した。

a. リモコンシステムの設計条件

動力制御機能に対するオペレート側の制御システムは、駆動設備等と同様にリモコンユニットを採用した。設計条件を表 40 に示す。

表 40 リモコンシステムの設計条件

項目		設計条件	摘要
通信方式		特定小電力無線送信 429MHz	
使用チャンネル		2 チャンネル以上	
使用環境	温度	-10℃～+40℃	地上操作室を想定
	湿度	70%程度	
電源		AC100V	対応した規格に変換
通信距離		100m 程度	
制御方式		接点開閉を無線にて制御	
入力方式		押しボタン方式	
安全対策		運用管理による	

b. 映像表示システムの設計条件

動作監視機能に対するオペレート側の制御システムは、昇降設備等と同様にパーソナルコンピュータによる画像処理を介したリアルタイムな情報（画像）をモニターへ映し出すことを可能なシステムとした。

映像表示システムの設計条件を表 41 に示す。

表 41 映像表示システムの設計条件

項目	設計条件	備考
表示内容	1台のカメラからの映像を表示	昇降設備付近
表示媒体	27インチモニター	
使用環境	温度	-10℃～+40℃
	湿度	70%程度
電源	AC100V	

c. 塩水特性表示システムの設計条件

塩水噴射特性監視機能に対するオペレート側の制御システムは、駆動設備などと同様に、パーソナルコンピュータによる数値処理を介したリアルタイムな情報（数値）をモニターへ映し出すことを可能なシステムとした。塩水特性表示システムの設計条件を表 42 に示す。

表 42 塩水特性表示システムの設計条件

項目	設計条件	適用
通信方式	無線通信（2.4G）	情報通信システムより
表示情報	リユース設備塩水特性 緩衝材除去装置側塩水特性	圧力 流量 SS濃度 塩濃度 水温
処理 PC 要求性能	カメラ映像 塩水特性データ表示	
使用環境 電源	映像表示システム同等	

## (2) 塩水リユース設備に対する遠隔操作設備の製作

前項で設定した設計条件を基に、各サブシステムの製作を実施した。塩水リユース設備に対する遠隔操作設備の仕様を以下に示す。

### 1) リモート側の制御システムの仕様

#### a. 電磁継電器型接点制御システムの仕様

塩水リユース設備に対するリモート側の電磁継電器型接点制御システムの主要構成機器である接点出力ボードの機器仕様を表 43、リシステム制御回路図を図 27 に示す。

表 43 リモート側制御機器の仕様

適用機種: MU1N-OUT8-429

#### 1、一般仕様

温度条件: +25℃±5℃、標準値

項目	MU1N-OUT8-429
出力接点数	8ビット
インターフェース※1	フォト MOS リレー
入出力間応答時間	150ms 以内
使用温度※2	-20~+60℃
使用湿度	80%RH 以下(結露無き事)
保存温度	-25℃~+70℃
保存湿度	80%RH 以下(結露無き事)
動作電源電圧	4.0V 以上~12.0V 以下
消費電流※3	送信:54mA 受信:108mA※5
EEPROM 書換え回数	10 万回(データ保持時間約 10 年)
外形寸法※4	53mm×90mm×14mm(W×D×H)
本体重量	62g

※1:48V,100mA(AC/DC)

※2:温度条件によって到達距離は変動します

※3:電源電圧 4.0v 時 フォト MOS 全駆動

※4:アンテナ含まず。H は取り付け面からの高さ。

※5:フォト MOS 全駆動時

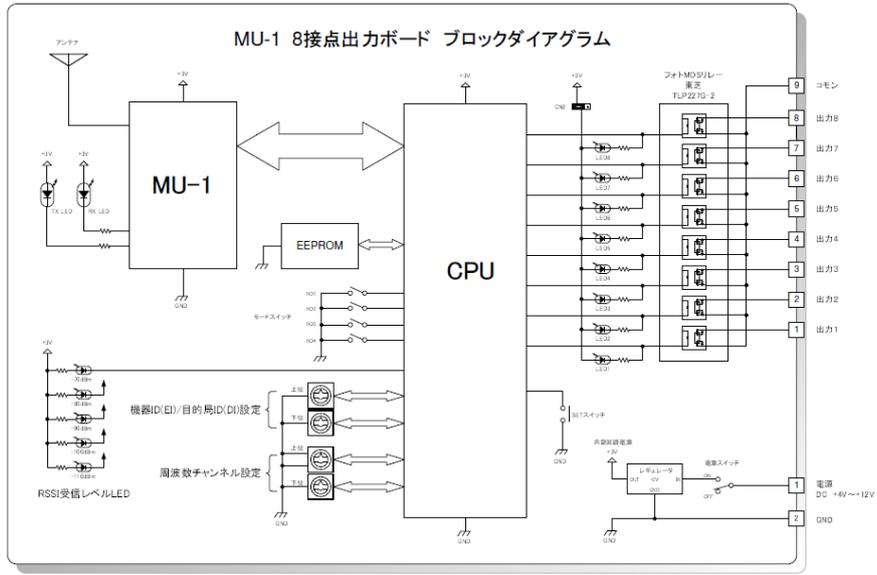
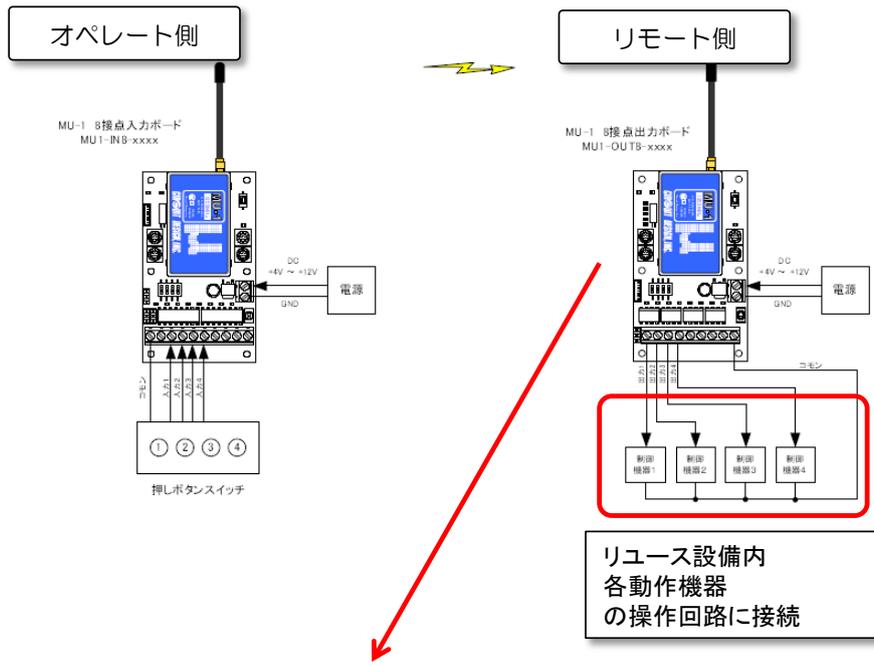


図 27 リモート側システム制御回路図

### b. 撮像システムの仕様

塩水リユース設備の遠隔操作設備に対する、リモート側の撮像システムのカメラ仕様は塩水噴射・スラリー回収設備と同様（表 32）とした。塩水リユース設備を監視するカメラの取り付け位置を図 28 に示す。



計画カメラ配置位置



カメラ①映像



カメラ②映像

図 28 リユース設備内カメラ取り付け位置

### c. 塩水特性計測システムの仕様

塩水リユース設備の遠隔操作設備に対する、リモート側の塩水特性計測システムの仕様を表 44 に、配置を図 29 に示す。

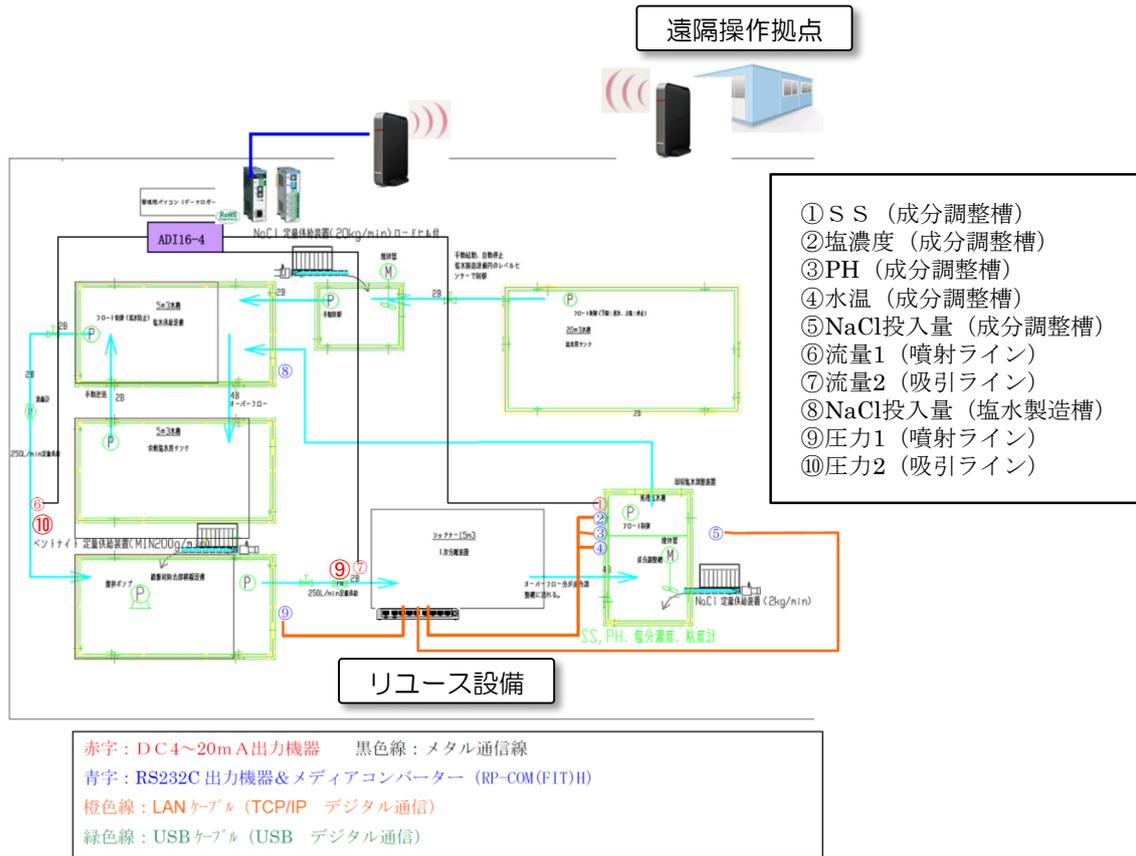
表 44 塩水特性計測システムの仕様

リユース設備側

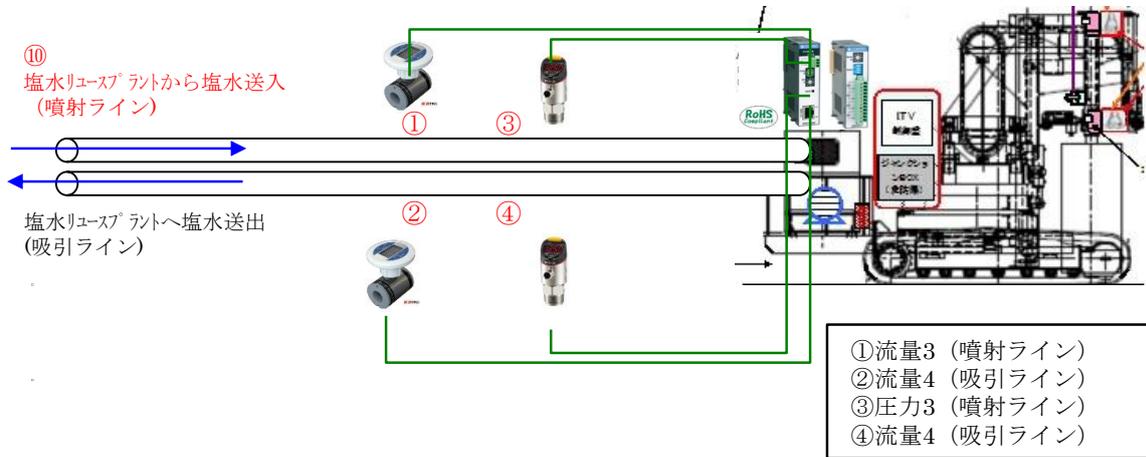
項番	計測物名称	単位	計測間隔	数値表示	グラフ表示	データ保存 (ロガー間隔)	出力形式
1	SS (成分調整槽)	mg/L	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	アナログ 4-20mA /MODBUS
2	塩濃度 (成分調整槽)	%	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	RS-232C
3	PH (成分調整槽)	PH	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	RS-232C
4	水温 (成分調整槽)	度	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	RS-232C
5	NaCl 投入量 (成分調整槽)	Kg	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	RS-232C
6	流量 1 (噴射ライン)	m <sup>3</sup> /h	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	アナログ 4-20mA
7	流量 2 (吸引ライン)	m <sup>3</sup> /h	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	アナログ 4-20mA
8	NaCl 投入量 (塩水製造槽)	Kg	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	RS-232C
9	圧力 1 (噴射ライン)	MPa	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	アナログ 4-20mA
10	圧力 2 (吸引ライン)	MPa	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	アナログ 4-20mA

緩衝材除去装置側

項番	計測物名称	単位	計測間隔	数値表示	グラフ表示	データ保存 (ロガー間隔)	出力形式
1	流量 1 (噴射ライン)	m <sup>3</sup> /h	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	アナログ 4-20mA
2	流量 2 (吸引ライン)	m <sup>3</sup> /h	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	アナログ 4-20mA
3	圧力 3 (噴射ライン)	MPa	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	アナログ 4-20mA
4	圧力 4 (吸引ライン)	MPa	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	アナログ 4-20mA



### リユース設備側システム配置



### 緩衝材除去装置側システム配置

図 29 塩水特性計測システム配置

2) 情報通信システムの仕様

塩水リユース設備の遠隔操作設備に対する、無線システムの仕様を表 45 に、無線システム構成図を図 30 に示す。

表 45 無線システムの仕様

項目	仕様等
無線 LAN サポート規格	IEEE802. 11ac(Draft)/n/a/b/g
伝送方式	直接拡散型スペクトラム拡散(DS-SS 方式) 直交波周波数分割多重変調(OFDM 方式) 単信
使用周波数範囲 (ch)	11a : 5.2~5.7GHz 帯 ( 36 / 40 / 44 / 48 / 52 / 56 / 60 / 64 / 100 / 104 / 108 / 112 / 116 / 120 / 124 / 128 / 132 / 136 / 140ch ) 11g / 11b : 2.4GHz 帯(1~13ch)
データ転送速度 (規格値)	11acDraft : 最大 1300Mbps、11n : 最大 450Mbps、 11a/11g : 最大 54Mbps、 11b : 最大 11Mbps
空中線電力	11b/g : 10mW/MHz 以下
有線 LAN サポート規格	IEEE802. 3ab(1000BASE-T), IEEE802. 3u(100BASE-TX), IEEE802. 3 準拠(10BASE-T) インターフェース : RJ-45 型
電源	AC100V 50/60Hz
外形	34×212×183mm (アンテナ、スタンド含まず)
環境条件/適用規格	温度 0~40℃ / 湿度 10~85%
ウェザーレーティング	なし
周波数一覧	無線バックボーン 11ac アクセスサービス 11g/n
無線バックボーンの帯域	最大 1300Mbps

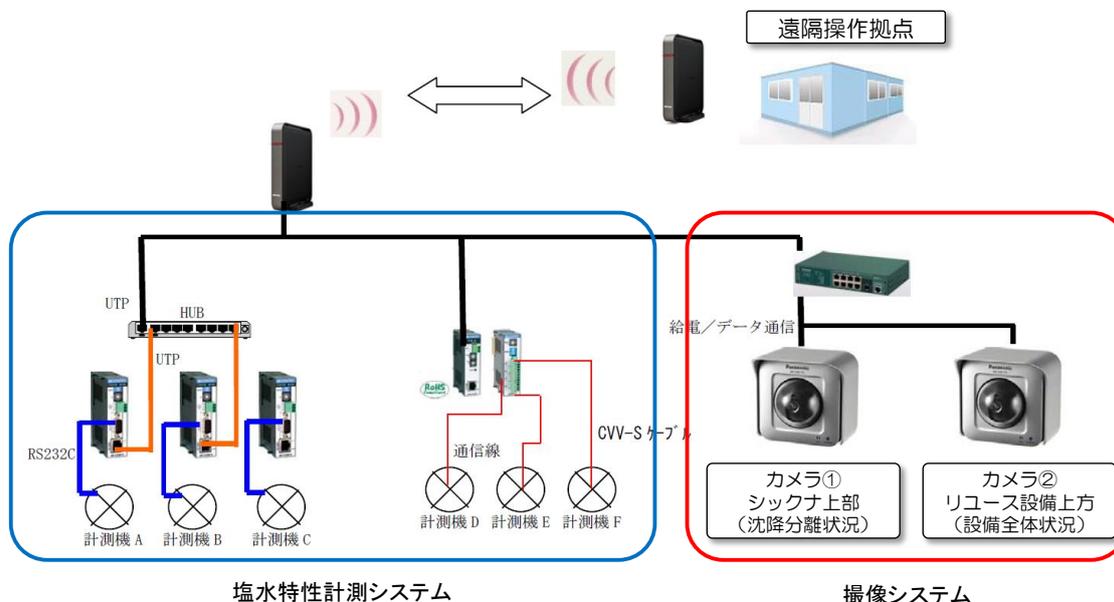


図 30 無線システム構成図

### 3) オペレート側の制御システムの仕様

#### a. リモコンシステムの仕様

塩水リユース設備の遠隔操作設備に対する、オペレート側の主要構成機器の仕様を表 46 に示す。

表 46 オペレート側制御機器の仕様

適用機種: MU1N-IN8-429

#### 1、一般仕様

温度条件: +25°C±5°C、標準値

項目	MU1N-IN8-429
入力接点数	8ビット
インターフェース	フォトカプラ
入出力ボード間応答時間	150ms
使用温度※1	-20~+60°C
使用湿度	80%RH以下(結露無き事)
保存温度	-25°C~+70°C
保存湿度	80%RH以下(結露無き事)
動作電源電圧	4.0V以上~12.0V以下
消費電流※2	送信:70mA 受信:40mA
EEPROM 書換え回数	10万回(データ保持時間約10年)
外形寸法※3	53mm×90mm×14mm(W×D×H)
本体重量	62g

※1:温度条件によって到達距離は変動します

※2:電源電圧 4.0v時、全入力 ON時 ※3:アンテナ含まず。Hは取付面からの高さ

温度条件: +25°C±5°C、標準値

項目	仕様	備考
技術基準	ARIB 標準規格 STD-T67	
電波型式	F1D	
空中線電力	10mW +20% -50%以内 1mW(空中線電力低下装置使用時)	+5°C~+35°C コンタクト(50Ω) コマンドにより切り替え
周波数安定度	±3.5ppm 以内(-10°C~+55°C) ±5.5ppm 以内(-20°C~+65°C)	25°Cの値を基準とする
アンテナ	1/4λワイヤーアンテナ	ゲイン 2.14dBi 以下
通信方式	単信又は単向	
変調方式	2値FSK	
発振方式	PLL シンセサイザ方式	
無線間通信速度	4800bps	
周波数範囲	429.2500MHz~429.7375MHz	
チャンネル数	40ch	ch間隔 12.5kHz
受信時副次発射強度	-60dBm 以下	
受信感度	-115dBm(標準プロトコル) -118dBm(エラー訂正プロトコル)	パケットエラー率 0.1%(1packet=255byte)
キャリアセンス閾値	7μV <sub>EMF</sub> 以下	7μV <sub>EMF</sub> = -96.1dBm(50Ω)
使用温度	-20°C~+65°C(結露無き事)	温度条件によって到達距離は変動します。
保存温度	-25°C~+70°C(結露無き事)	
動作電源電圧	3.0V以上~5.0V以下	絶対最大定格電圧 5.5v
消費電流	10mW時 送信:46mA 受信:30mA 1mW時 送信:35mA 受信:30mA	電源電圧 3v時
スタンバイモード消費電流	Mode1=13mA, Mode2=0.9mA, Mode3=45μA	電源電圧 3v時
EEPROM 書換え回数	100000回	データ保持時間:約10年
誤り訂正方式	リードソロモン符号	RS(255,247)
外形寸法	50mm×30mm×9mm(W×D×H)	アンテナ含まず。Hは取付面からの高さ。
本体重量	23.5g	

#### 参考データ

\*実効無線間通信速度: 約 3400bps 条件: 単向通信、エラー訂正無し、25°C

\*到達距離: 約 1000m 条件: 単向通信、エラー訂正無し、25°C、見通し距離、地上高 1.5m、アンテナ垂直

b. 映像表示システムの仕様

塩水リユース設備の遠隔操作設備に対する、オペレート側の映像表示システムの画面仕様を 図 31 に示す。



沈降分離状況画像(シクナ上部)



リユース設備全体状況画像

(注) 画像は模擬で実際の画像ではありません

図 31 撮像表示システムの画面仕様

c. 塩水特性表示システムの仕様

塩水リユース設備の遠隔操作設備に対し、オペレート側で塩水成分監視を行うための塩水特性表示システムについて、システムの実出力画面仕様を 図 32 に示す。

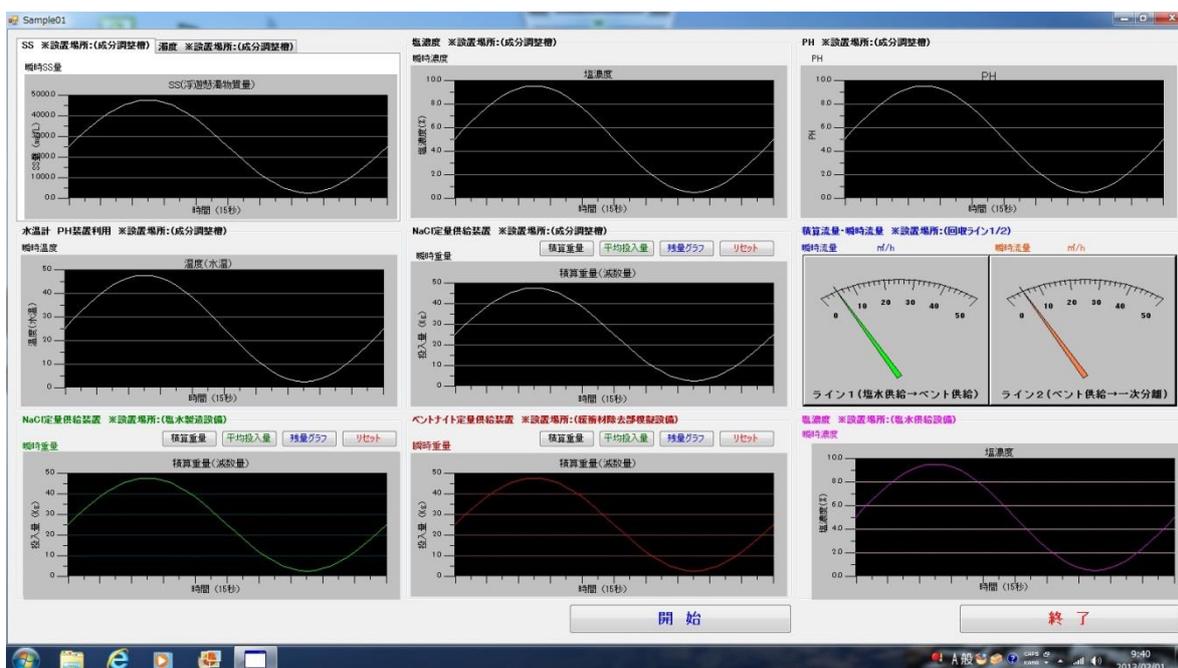


図 32 塩水特性表示システムの画面仕様

## 5. 統合システムの設計・製作

遠隔操作設備について、設計・製作の取りまとめを行い、電気設備及び遠隔操作制御設備の仕様を示した。

電気設備の仕様を表 47 に、装置全体の電気制御システム系統図を図 33 に示す。

遠隔操作設備の仕様を表 48 に、装置全体の遠隔操作設備システム図を図 34 に示す。

オペレート側の制御システム情報表示システム系統図を図 35 に、遠隔操作室内の装置配置を図 36 に示す。

表 47 電気設備設計仕様

項目	仕様	
主電源	入力電源	3 相交流 400V 50Hz
	入力ケーブル	3PNCT 14SQ-4C 30m
主制御盤	仕様	屋外型非防爆仕様
	機能	始動停止操作盤からの電源回路制御
	寸法	縦 1,600×横 700×奥行 380mm
始動停止操作盤	仕様	耐圧防爆型、携帯可能（肩掛け）
	機能	電源入-切、ライト入-切、電動機運転、停止非常停止、ブザー停止 他
	寸法	縦 300×横 360×奥行 127mm
電動モータ	仕様	防爆型 22 kW-4P AC400V3 φ
	機能	油圧ユニット動力源
	ユニット外寸	縦 1400×横 1800×奥行 1000mm
ジャンクションボックス①	仕様	防爆型
	機能	遠隔操作用接点開閉、ライト、ファン等電源
	寸法	縦 300×横 360×奥行 160mm
ジャンクションボックス②	仕様	防雨型
	機能	遠隔操作用接点開閉、ホーン、LS 他
	寸法	縦 550×横 750×奥行 250mm
ITV 盤	仕様	防雨型
	機能	カメラアナログデータ変換、センサー信号変換
	寸法	縦 500×横 700×奥行 250mm
シーケンサボックス	仕様	防雨型
	機能	CPU 演算
映像無線送受信機	仕様	防雨型
	機能	無線 LAN (4.9GHz) 親機
パソコン盤	仕様	防雨型
	機能	3D スキャナー取得座標データ演算
	寸法	縦 520×横 520×奥行 250mm
モニター盤	仕様	防雨型
	機能	パソコン盤内 PC 出力画面
	寸法	縦 950×横 650×奥行 300mm

表 48 遠隔操作設備設計仕様

項目	仕様	
緩衝材除去装置用遠隔操作送信機	構造	PC/ABS 樹脂
	無線伝送方式	特定小電力無線局 1252.0375MHz~1252.4875MHz
	電源	充電式電池(ニッケル水素単三型×2)
緩衝材除去装置用遠隔操作受信機	構造	アルミ製板金構造
	受信出力	制御信号 シリアル RS422: 4800 bps
	電源	DC 24 V 1 A 以下
噴射回収設備・リユース設備無線接点制御装置	型式	サーキットデザイン、MU-1N
	無線伝送方式	特定小電力無線局 429.2500MHz~429.7375MHz
	電源	ACDC 48 V ,100m A
ワイヤ式リニアエンコーダ	型式	ムーエンジニアリング、DE-04 及び DL-07
	仕様	出力パルス 5パルス/mm
2軸リニア傾斜センサー	型式	TURCK、B2N
	仕様	測定傾斜角範囲±10°、応答速度 0.1 秒以下
ストロークセンサー (X 方向、Y 方向)	型式	アサダテック、特注仕様
	仕様	計測ストローク 600 mm及び 200 mm
圧力センサー	型式	VESVM-35 (昇降)、VESVM-35 (把持)
	仕様	35MPa,20MPa
カメラ (走行用)	型式	ビビノデータコム、RD-211
	仕様	有効画素数 38 万画素、防爆
カメラ (昇降設備)	型式	Sony、SNC-ER520
	仕様	有効画素数 38 万画素、36 倍ズーム
カメラ (噴射設備)	型式	パナソニック、BB-SW175
	仕様	有効画素数 38 万画素、16 倍ズーム
3D スキャナー	型式	Asus、Xtion Pro Live
	仕様	観測範囲 0.5m~3.5m
映像データ表示システム	適用	駆動装置、昇降装置、噴射装置、リユース設備
	機能	映像情報による遠隔操作支援及び状況監視
施工情報表示システム	適用	昇降装置、噴射装置、リユース設備 (塩水特性)
	機能	数値データによる遠隔操作支援及び設備監視
3D スキャナーデータ表示システム	適用	駆動装置、昇降装置、噴射装置
	機能	3次元点群データで構成される映像情報および数値データ (距離情報) による遠隔操作支援及び緩衝材除去状況把握

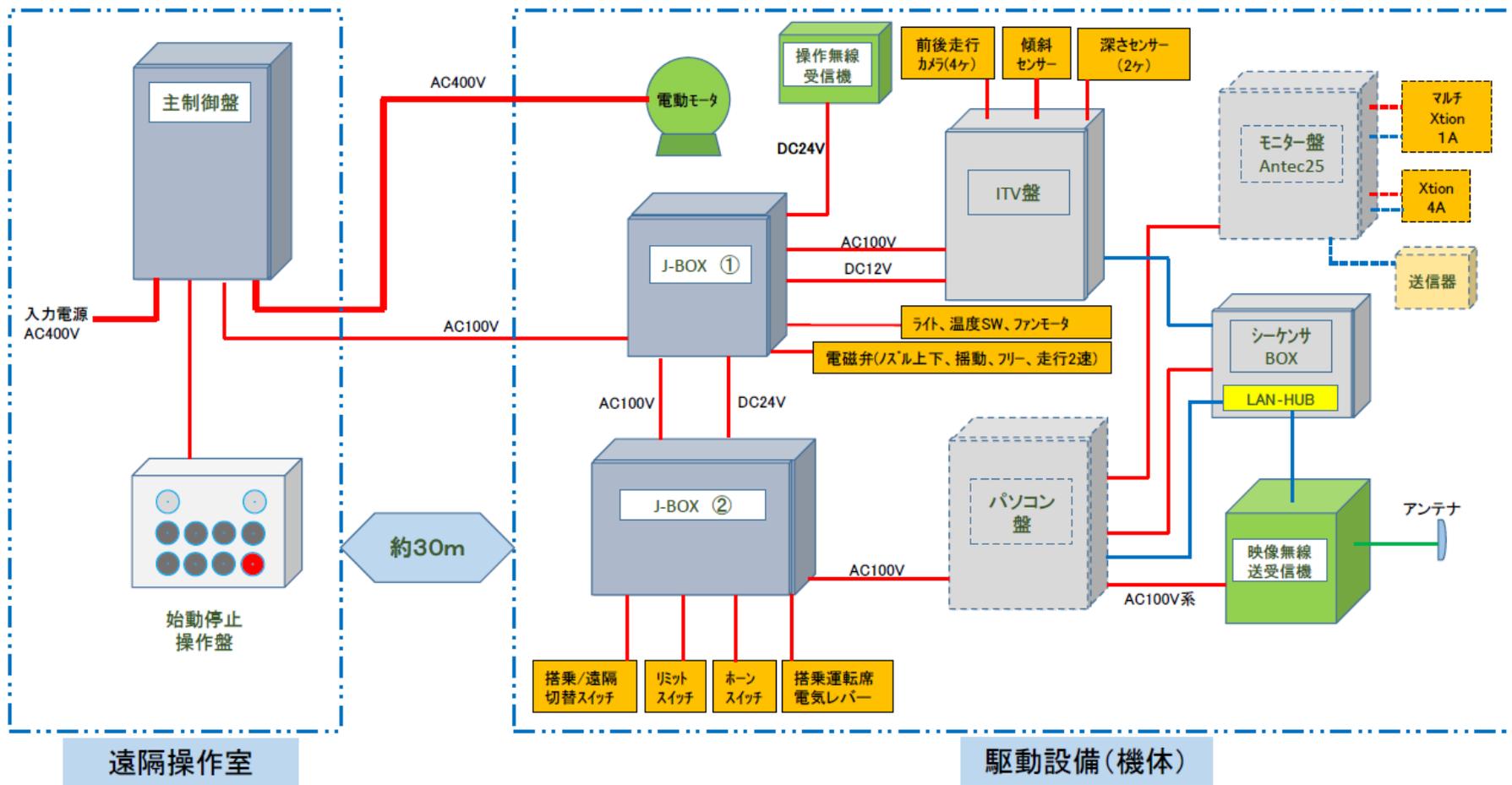


図 33 電気制御システム系統図

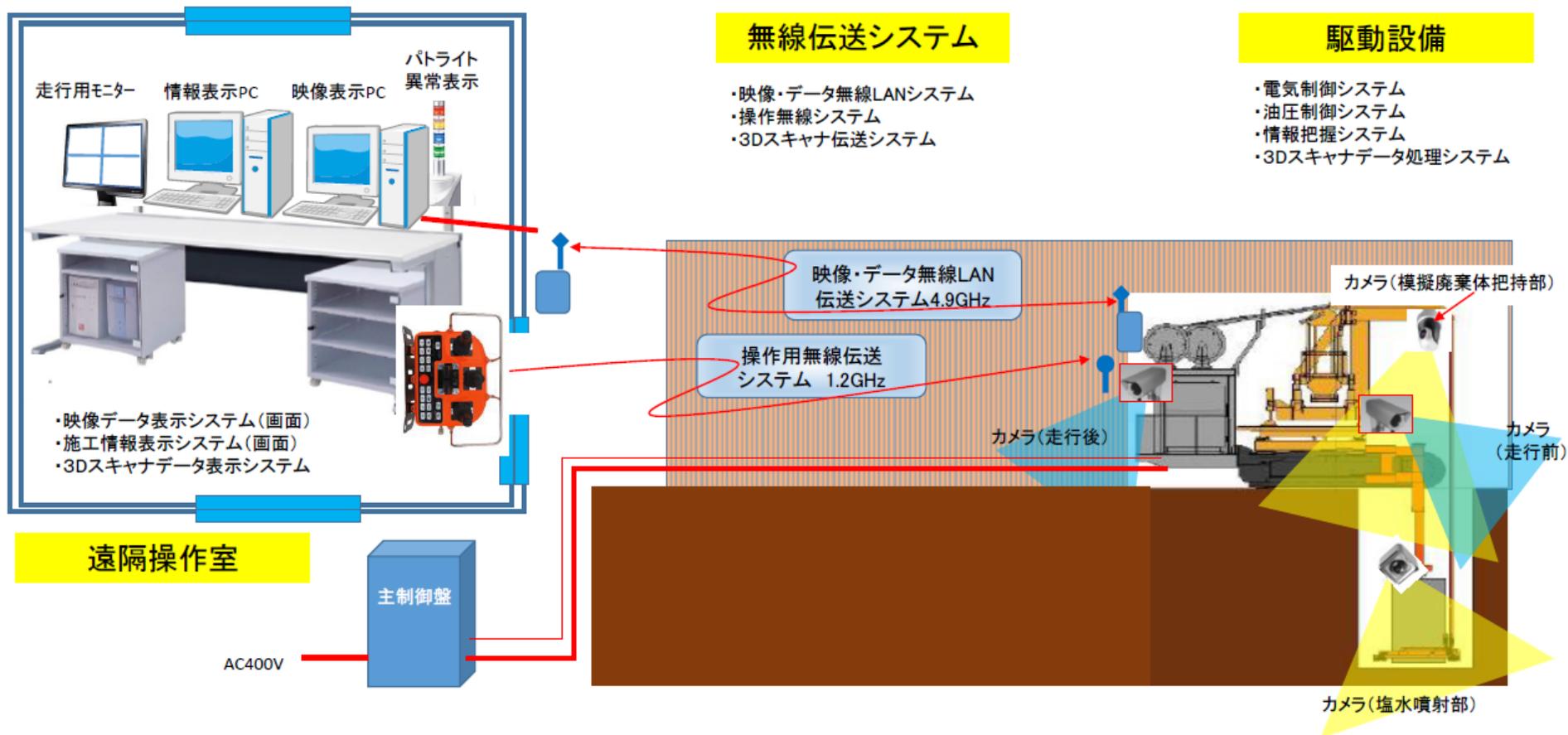


図 34 遠隔操作システム系統図

# 作業時及び走行時の情報把握システム

## 作業時画像情報システム

映像表示PC



映像表示S/W

## 施工情報システム

- ・機械作動情報
- ・故障(異常)情報

パトライト  
異常表示

情報表示PC



情報表示S/W

## 走行時画像情報システム



前後左右 4画面分割

無線伝送  
システム

LAN

シーケンサ

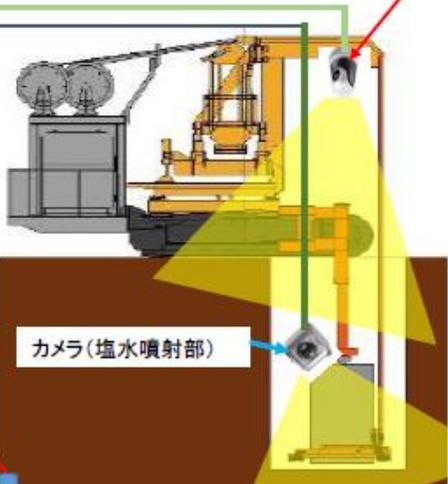
ITV盤

姿勢情報

作動情報

異常情報

カメラ(模擬廃棄体把持部)



カメラ(塩水噴射部)

カメラ(走行後)

カメラ  
(走行前)

O.P.把持高さ(mm)

ノズル噴射高さ(mm)

図 35 情報表示システム系統図

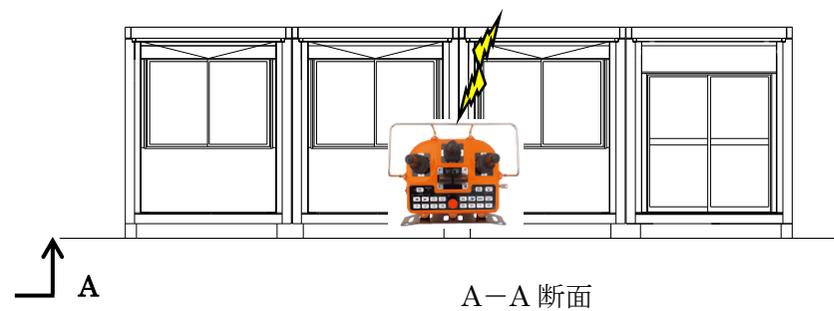
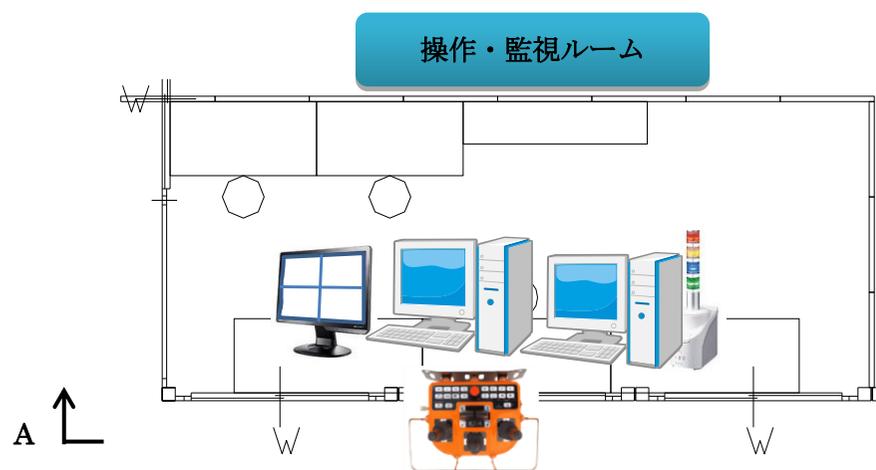


図 36 遠隔操作室内配置図