平成 26 年度地層処分技術調査等事業

（地層処分回収技術高度化開発）

報　告　書

平成27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 26 年度 地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）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 回収技術の高度化開発 1-2
1.4.2 処分施設における回収維持期間の検討 1-2
第 2 章　緩衝材除去装置の改良 2-1
2.1 改良方法および対象設備 2-1
2.2 事象および原因 2-1
2.2.1 噴射・吸引設備のうち塩水噴射・スラリー吸引装置 2-1
2.2.2 噴射・吸引設備のうち昇降装置 2-2
2.2.3 遠隔操作設備 2-5
2.3 塩水噴射・スラリー吸引設備の改良に係る検討 2-7
2.3.1 スラリー吸引装置の改良検討 2-7
2.3.2 塩水噴射・スラリー吸引装置の検証 2-8
2.3.3 改良設計 2-9
2.4 昇降装置の改良に係る検討 2-10
2.4.1 昇降設備の改良検討 2-10
2.4.2 昇降装置の検証 2-10
2.4.3 昇降装置の改良設計 2-11
2.5 遠隔操作設備の改良に係る検討 2-11
2.5.1 遠隔作設備の改良検討 2-11
2.5.2 遠隔操作設備の検証 2-12
2.5.3 遠隔操作設備の改良設計 2-15
2.6 改良の実施 2-17
2.6.1 スラリー吸引装置 2-17
2.6.2 巻取り装置の機能確認 2-18
2.6.3 巻取り装置確認結果 2-19
2.7 緩衝材除去装置の動作確認 2-21
2.7.1 動作確認検査対象 2-21
2.7.2 噴射・吸引設備のうち塩水噴射・スラリー吸引装置の動作確認 2-21
2.7.3 噴射・吸引設備のうち昇降装置の動作確認 2-23

2.7.4 遠隔操作設備の動作確認検査方法 2-25
2.8 動作確認結果 2-27
2.8.1 噴射・吸引設備のうち塩水噴射・スラリー吸引装置の動作 2-27
2.8.2 噴射・吸引設備のうち昇降装置の動作 2-28
2.8.3 遠隔操作設備の動作 2-30
2.9 まとめ 2-32
2.9.1 緩衝材除去装置の原因調査・設計 2-32
2.9.2 緩衝材除去装置の改良 2-32
2.9.3 緩衝材除去装置の動作確認 2-33
第 3 章 緩衝材除去システムの総合動作確認 3-1
3.1 試験対象 3-1
3.1.1 試験ケース 3-1
3.1.2 取得特性 3-3
3.1.3 試験条件 3-5
3.1.4 試験場の整備 3-6
3.2 試験方法・手順 3-11
3.2.1 試験方法および手順 3-11
3.2.2 緩衝材除去システムの遠隔による制御・監視機能 3-13
3.2.3 緩衝材の製作 3-15
3.3 試験結果 3-30
3.3.1 塩水リユース特性 3-30
3.3.2 緩衝材除去特性 3-33
3.3.3 緩衝材除去システムの遠隔による制御・監視機能 3-49
3.4 異なる特性を有する緩衝材に対して緩衝材除去システムの適用性の検討 3-51
3.4.1 試験対象 3-51
3.4.2 試験条件 3-52
3.4.3 試験方法 3-55
3.4.4 試験結果 3-57
3.5 まとめ 3-60
3.5.1 塩水リユース特性 3-60
3.5.2 緩衝材除去特性 3-60
3.5.3 緩衝材除去システムの遠隔による制御・監視機能 3-61
3.5.4 異なる特性を有する緩衝材に対して緩衝材除去システムの適用性 3-61
3.5.5 今後の課題 3-61
第 4 章 実証試験計画の見直し 4-1
4.1 検討フロー 4-1

4.2 実証試験サイトの設定 4-1
4.2.1 地下坑道の仕様 4-2
4.3 緩衝材除去システムの仕様の整理 4-5
4.3.1 噴射・吸引設備の概要 4-5
4.3.2 塩水リユース設備の概要 4-6
4.3.3 遠隔操作設備の概要 4-7
4.4 地下環境における緩衝材除去システムの搬送計画の検討 4-8
4.4.1 搬出入計画 4-8
4.4.2 搬出入計画 4-9
4.5 地下環境における緩衝材除去システムの配置計画の検討 4-14
4.5.1 配置計画 4-15
4.6 実証試験に必要な設備の検討 4-22
4.6.1 インフラ設備の検討 4-22
4.6.2 試験坑道内における設備の運搬、組立設備の検討 4-23
4.6.3 試験坑道 2 に配置するその他設備 4-26
4.7 実証試験に必要な坑道断面の検討 4-26
4.7.1 噴射・吸引設備組立エリアの設定 4-26
4.7.2 拡幅断面の形状検討 4-28
4.8 坑道断面の構造解析（基本設計） 4-31
4.8.1 構造解析の断面設定 4-31
4.8.2 岩盤および支保工のモデル化 4-32
4.8.3 解析領域と解析メッシュ 4-32
4.8.4 解析用物性値 4-34
4.8.5 許容値 4-36
4.8.6 解析手順 4-36
4.8.7 解析結果 4-37
4.9 まとめ 4-45
4.9.1 実証試験サイトの設定 4-45
4.9.2 地下環境における緩衝材除去システムの搬送計画 4-45
4.9.3 地下環境における緩衝材除去システムの配置計画 4-45
4.9.4 実証試験に必要な設備 4-45
4.9.5 実証試験に必要な坑道断面 4-46
4.9.6 坑道断面の構造解析 4-46
4.9.7 今後の課題 4-46
第 5 章 処分施設における回収維持期間の検討 5-1
5.1 検討方針 5-1

5.1.1 背景と目的.....5-1
5.1.2 検討内容と手順.....5-1
5.2 処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合における人工バリア性能に及ぼす影響の程度の定量的把握.....5-4
5.2.1 処分施設を埋め戻さない状態における影響因子の整理.....5-4
5.2.2 各定置方式における人工バリア等の状態設定.....5-6
5.2.3 環境条件の設定.....5-15
5.2.4 人工バリアに対する影響の定量化（程度の検討）.....5-78
5.2.5 整理とまとめ.....5-113
5.3 人工バリアの状態と回収維持期間の例示.....5-115
5.3.1 人工バリアの状態と期間.....5-115
5.3.2 回収維持期間の例示.....5-135
5.4 処分施設の回収維持期間に対する維持管理方策の検討.....5-137
5.4.1 維持管理を見据えた環境条件の調査.....5-137
5.4.2 維持管理のための具体的な方策.....5-144
5.4.3 維持管理の具体的方策のまとめ.....5-164
5.5 まとめと課題の整理.....5-165
5.5.1 処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合における人工バリア性能に及ぼす影響の程度の定量的把握.....5-165
5.5.2 人工バリアの状態と回収維持期間の例示.....5-166
5.5.3 処分施設の維持管理方法の検討.....5-167
5.6 参考文献.....5-169
第 6 章 まとめ.....6-1
第 1 章（事業概要）.....6-1
第 2 章（緩衝材除去装置の改良）.....6-1
第 3 章（緩衝材除去システムの総合動作確認）.....6-2
第 4 章（地下での実証試験計画の見直し）.....6-3
第 5 章（処分施設における回収維持期間の検討）.....6-4

別紙-1 第 3 章 緩衝材除去システムの総合動作確認
別紙-2 第 4 章 実証試験計画の見直し

図目次

図 2.1-1　調査・設計・製作フロー……2-1
図 2.2.1-1　平成 25 年度機能確認試験における塩水噴射・スラリー吸引流量の測定結果……2-2
図 2.2.2-1　平成 25 年度機能確認試験における緩衝材除去深度測定結果……2-3
図 2.2.2-2　昇降装置の自然降下量測定結果……2-4
図 2.2.2-3　昇降油圧回路……2-5
図 2.3.2-1　改良効果事前確認用吸引ラインにおける吸引流量と損失水頭の関係（計算値）……2-8
図 2.4.1-1　昇降油圧回路の改良……2-10
図 2.5.2-1　平成 25 年度機能確認試験における緩衝材除去形状（ケース 1：模擬廃棄体上部）……2-13
図 2.5.2-2　平成 25 年度機能確認試験における緩衝材除去形状（ケース 2：模擬廃棄体側方下部）……2-13
図 2.5.2-3　方向表示図……2-14
図 2.5.3-1　廃棄体把持機能の改良プログラムフロー図（プログラム設計図）……2-15
図 2.5.3-2　緩衝材除去形状計測機能の改良プログラムフロー図（プログラム設計図）……2-16
図 2.6.3-1　巻取り装置の完成状況……2-20
図 2.7.2-1　塩水噴射・スラリー吸引装置の動作確認検査フローおよび検査概念……2-22
図 2.7.3-1　昇降装置の動作確認検査フローおよび検査概念……2-23
図 2.7.3-2　昇降装置の動作確認例……2-24
図 2.7.4-1　遠隔操作設備の動作確認検査フローおよび検査概念……2-25
図 2.7.4-2　遠隔操作設備の動作確認例（3D 観測装置側の構成）……2-26
図 2.8.1-1　塩水噴射・スラリー吸引装置の動作確認フロー……2-27
図 2.8.2-1　の昇降装置の動作確認フロー……2-28
図 2.8.2-2　昇降装置の自然降下量（左：改良前　右：改良後）……2-29
図 2.8.3-1　遠隔操作設備の動作確認検査フローおよび検査概念……2-30
図 2.8.3-2　遠隔操作設備の動作確認検査結果……2-31
図 2.9.2-1　噴射・吸引設備の改良後全景……2-33
図 3.1.1-1　廃棄体回収作業のうち緩衝材除去の位置づけ……3-2
図 3.1.1-2　試験ケースの概念……3-3
図 3.1.4-1　試験全体イメージ（緩衝材除去による機能確認試験）……3-6
図 3.1.4-2　試験設備配置……3-7

図 3.1.4-3　試験設備配置全景 3-7
図 3.1.4-4　模擬処分坑道および模擬処分孔 3-8
図 3.1.4-5　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 3-9
図 3.1.4-6　遠隔操作室 3-10
図 3.1.4-7　模擬廃棄体全景 3-10
図 3.2.1-1　試験全体概要（緩衝材除去による機能確認） 3-11
図 3.2.1-2　塩水リユース設備の構成（スラリーの循環フロー） 3-12
図 3.2.1-3　緩衝材除去試験手順 3-12
図 3.2.2-1　遠隔操作設備の機能 3-13
図 3.2.2-2　遠隔操作システム 3-13
図 3.2.3-1　粒度分布測定結果 3-17
図 3.2.3-2　現場締固め管理フロー 3-18
図 3.2.3-3　コアサンプリング位置 3-20
図 3.2.3-4　乾燥密度、飽和度測定結果（No.2 リング コアサンプリング） 3-21
図 3.2.3-5　乾燥密度、飽和度測定結果（No.3 リング コアサンプリング） 3-22
図 3.2.3-6　乾燥密度、飽和度測定結果（No.4 リング コアサンプリング） 3-23
図 3.2.3-7　乾燥密度、飽和度測定結果（No.5 リング コアサンプリング） 3-24
図 3.2.3-8　乾燥密度、飽和度測定結果（No.6 リングコアサンプリング） 3-25
図 3.2.3-9　充填材料と充填位置 3-26
図 3.2.3-10　模擬廃棄体と緩衝材間のペレット充填密度測定手順 3-27
図 3.2.3-11 模擬廃棄体、館所在設置およびペレット充填状況 3-28
図 3.3-1　平成 26 年度および平成 25 年度緩衝材除去対象エリア 3-30
図 3.3.1-1　噴射ノズル・吸引口および流量計の配置箇所 3-31
図 3.3.1-2　塩水噴射・スラリー吸引流量の測定結果 3-31
図 3.3.1-3　固液分離設備前後の SS 濃度 3-32
図 3.3.1-4　リユース塩水の品質確認（計測器設置状況） 3-33
図 3.3.1-5　固液分離後、成分調整槽における塩分濃度・pH・水温の測定結果 3-33
図 3.3.2-1　緩衝材除去対象断面図 3-34
図 3.3.2-2　緩衝材除去深度測定結果 3-35
図 3.3.2-3　緩衝材除去状態の観察結果(1) 3-36
図 3.3.2-4　緩衝材除去状態の観察結果(2) 3-37
図 3.3.2-5　緩衝材除去状態の観察結果(3) 3-38
図 3.3.2-6　緩衝材除去形状と除去深度(1) 3-39
図 3.3.2-7　緩衝材除去形状と除去深度(2) 3-40
図 3.3.2-8　形状計測結果を用いた緩衝材除去体積の算出方法 3-41
図 3.3.2-9　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 4 時間後） 3-42

図 3.3.2-10　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 10 時間後）.....3-42
図 3.3.2-11　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 17 時間後）.....3-43
図 3.3.2-12　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 30 時間後）.....3-43
図 3.3.2-13　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 42 時間後）.....3-44
図 3.3.2-14　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 53 時間）.....3-44
図 3.3.2-15　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 58 時間）.....3-45
図 3.3.2-16　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 68 時間）.....3-45
図 3.3.2-17　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 77 時間後）.....3-46
図 3.3.2-18　緩衝材累積除去量（除去堆積計算と SS 濃度計算）の比較.....3-47
図 3.3.3-1　模擬廃棄体の把持方法.....3-49
図 3.3.3-2　模擬廃棄体の把持・引上げ状況.....3-49
図 3.3.3-3　塩水リユース設備の監視状況.....3-50
図 3.4-1　廃棄体引き抜き時に発生する抵抗力のイメージ図.....3-51
図 3.4.1-1　定置概念（NUMO、2011）.....3-52
図 3.4.2-1　炭素鋼の表面粗さ測定結果(プロファイルグラフ、平均粗さ、最大粗さ).....3-53
図 3.4.2-2　試験体の形状.....3-53
図 3.4.2-3　試験装置詳細図.....3-54
図 3.4.2-4　試験装置全景.....3-55
図 3.4.3-1　緩衝材、ペレットおよび炭素鋼の設置.....3-56
図 3.4.3-2　引き抜き試験用モールドのアクリル製蓋装着状況.....3-56
図 3.4.3-3　引き抜き試験状況.....3-56
図 3.4.4-1　引き抜き抵抗力－変位の関係（試験体タイプ A）.....3-57
図 3.4.4-2　引き抜き抵抗力－変位の関係（試験体タイプ B）.....3-58
図 3.4.4-3　各側圧条件における表面摩擦応力の最大値と側圧の関係.....3-59
図 4.1-1　実証試験計画の見直し検討フロー.....4-1
図 4.2.1-1　地下坑道の配置概要[1].....4-2
図 4.2.1-2　周回坑道の断面仕様[1].....4-3
図 4.2.1-3　試験坑道 2 の断面仕様[1].....4-3
図 4.2.1-4　トロリーおよび巻上機.....4-4
図 4.3-1　緩衝材除去システムの設備概要.....4-5
図 4.3.1-4　噴射・吸引設備の全体図.....4-6
図 4.3.2-1　塩水リユース設備による塩水・スラリー処理フロー.....4-6
図 4.3.3-1　遠隔操作設備の全体図[2].....4-7
図 4.4.1-1　資機材搬入出ルート.....4-8
図 4.4.2-1　搬出入に用いる東立坑の断面仕様[1].....4-10
図 4.4.2-2　水供給槽の搬入検討図（クレーン利用）.....4-12

図 4.4.2-3　水供給槽の搬入検討図（ターンテーブル利用）.....4-13
図 4.5-1　処分坑道および処分孔の仕様例[4].....4-14
図 4.5-2　塩水噴射・スラリー吸引装置の全体図[3].....4-15
図 4.5.1-1　配置案 1（平面図）.....4-17
図 4.5.1-2　配置案 1（断面図）.....4-18
図 4.5.1-3　配置案 2（平面図）.....4-20
図 4.5.1-4　配置案 2（断面図）.....4-21
図 4.6.1-1　電気及び給水の供給ライン.....4-22
図 4.7.1-1　塩水ホース巻き取り装置および装置の吊代の検討.....4-27
図 4.7.1-2　組立エリアの最小寸法（横断方向）.....4-27
図 4.7.2-1　拡幅断面の検討ケース.....4-28
図 4.7.2-2　噴射・吸引設備組立エリア（馬蹄型）を含む試験坑道縦断図.....4-29
図 4.7.2-3　噴射・吸引設備組立エリア（幌型）を含む試験坑道縦断図.....4-30
図 4.8.1-1　解析断面位置.....4-31
図 4.8.3-1　メッシュ分割図.....4-33
図 4.8.7-1　支保工応力分布（Case1）.....4-37
図 4.8.7-2　岩盤の塑性領域分布と最大せん断ひずみ分布（Case1）.....4-38
図 4.8.7-3　支保工応力分布（Case2）.....4-39
図 4.8.7-4　岩盤の塑性領域分布と最大せん断ひずみ分布（Case2）.....4-40
図 4.8.7-5　支保工応力分布（Case3）.....4-41
図 4.8.7-6　岩盤の塑性領域分布と最大せん断ひずみ分布（Case3）.....4-42
図 4.8.7-7　支保工応力分布（Case4）.....4-43
図 4.8.7-8　岩盤の塑性領域分布と最大せん断ひずみ分布（Case4）.....4-44
図 5.1.2-1　影響の程度の定量的把握における検討手順.....5-2
図 5.1.2-2　回収維持期間の例示の検討手順.....5-2
図 5.1.2-3　処分施設の維持管理方策の検討手順.....5-3
図 5.2.2-1　定置概念[7].....5-7
図 5.2.3-1　熱伝導解析による検討フロー.....5-15
図 5.2.3-2　処分坑道断面形状（竪置き方式および横置き方式）[5].....5-16
図 5.2.3-3　人工バリアの基本仕様（竪置き方式および横置き方式）[5].....5-16
図 5.2.3-4　処分坑道断面形状（PEM 方式）[6].....5-17
図 5.2.3-5　人工バリアの基本仕様とモデル化（PEM 方式）[6].....5-17
図 5.2.3-6　第 2 次取りまとめの解析モデル[5].....5-18
図 5.2.3-7　ガラス固化体中間貯蔵期間後の発熱量時系列変化[5].....5-19
図 5.2.3-8　有限要素モデル（竪置き方式）.....5-22
図 5.2.3-9　有限要素モデル（横置き方式）.....5-23

図 5.2.3-10　有限要素モデル（PEM 方式）.....5-24
図 5.2.3-11　解析ケースごとの隙間の状態（竪置き方式）.....5-28
図 5.2.3-12　解析ケースごとの隙間の状態（横置き方式）.....5-29
図 5.2.3-13　解析ケースごとの隙間の状態（PEM 方式）.....5-30
図 5.2.3-14　ケース v-1 の温度経時変化（図 5.2.3-8 参照）.....5-31
図 5.2.3-15　ケース v-2-1 の温度経時変化（図 5.2.3-8 参照）.....5-31
図 5.2.3-16　ケース v-2-2 の温度経時変化（図 5.2.3-8 参照）.....5-32
図 5.2.3-17　ケース v-3 の温度経時変化（図 5.2.3-8 参照）.....5-32
図 5.2.3-18　ケース h-1 の温度経時変化（図 5.2.3-9 図 5.2.3-8 参照）.....5-33
図 5.2.3-19　ケース h-2-1 の温度経時変化（図 5.2.3-9 参照）.....5-33
図 5.2.3-20　ケース h-2-2 の温度経時変化（図 5.2.3-9 参照）.....5-34
図 5.2.3-21　ケース p-2 の温度経時変化（図 5.2.3-10 参照）.....5-35
図 5.2.3-22　ケース p-3 の温度経時変化（図 5.2.3-10 参照）.....5-35
図 5.2.3-23　ケース v-1 の温度分布.....5-36
図 5.2.3-24　ケース v-2-1 の温度分布.....5-37
図 5.2.3-25　ケース v-2-2 の温度分布.....5-38
図 5.2.3-26　ケース v-3 の温度分布.....5-39
図 5.2.3-27　ケース h-1 の温度分布.....5-40
図 5.2.3-28　ケース h-2-1 の温度分布.....5-41
図 5.2.3-29　ケース h-2-2 の温度分布.....5-42
図 5.2.3-30　ケース p-2 の温度分布.....5-43
図 5.2.3-31　ケース p-3 の温度分布.....5-44
図 5.2.3-32　ケース v-1 における期間の抽出結果.....5-47
図 5.2.3-33　ケース v-2-1 における期間の抽出結果.....5-48
図 5.2.3-34　ケース v-2-2 における期間の抽出結果.....5-48
図 5.2.3-35　ケース v-3 における期間の抽出結果.....5-49
図 5.2.3-36　ケース h-1 における期間の抽出結果.....5-49
図 5.2.3-37　ケース h-2-1 における期間の抽出結果.....5-50
図 5.2.3-38　ケース h-2-2 における期間の抽出結果.....5-50
図 5.2.3-39　ケース p-2（オーバーパック）における期間の抽出結果.....5-51
図 5.2.3-40　ケース p-2（PEM 容器）における期間の抽出結果.....5-51
図 5.2.3-41　ケース p-3（オーバーパック）における期間の抽出結果.....5-52
図 5.2.3-42　ケース p-3（PEM 容器）における期間の抽出結果.....5-52
図 5.2.3-43　炭酸塩水溶液（0.1mol/l）における試験溶液の pH と間隙水の pH の関係[5].....5-57
図 5.2.3-44　ボーリング孔および立坑の位置関係[11].....5-57

図 5.2.3-45　研究坑道における水圧・水質観測孔と観測方式（2012 年度末時点）[11].....5-58
図 5.2.3-46　コンクリートライナーの概略[11].....5-59
図 5.2.3-47　コンクリートライナー周辺の地下水（集水リング）の pH の経時変化[11] 5-59
図 5.2.3-48　深度 200m 予備ステージにおけるグラウト領域とモニタリングの概略[11].....5-60
図 5.2.3-49　グラウト領域周辺の地下水の pH の経時変化[11].....5-60
図 5.2.3-50　09MI21 号孔（深度 300m 水平孔）より採取した地下水の pH 観測結果[11].....5-61
図 5.2.3-51　09MI21 号孔（深度 300m 水平孔）より採取した地下水の水質観測結果[11].....5-61
図 5.2.3-52　研究坑道内の調査位置図[12].....5-62
図 5.2.3-53　緩衝材間隙水中の pH 測定方法の模式図[13].....5-65
図 5.2.3-54　信頼率 0.99 での最大腐食深さ推定値の経時変化[14] 5-66
図 5.2.3-55　平均腐食深さと信頼率 0.99 での最大腐食深さ推定値の関係および既往の経験的モデルから得られる値との比較[14] 5-66
図 5.2.3-56　採水場所[18].....5-69
図 5.2.3-57　各採水におけるトレーサ濃度と pH[19].....5-70
図 5.2.3-58　各採水における溶存イオン濃度[19].....5-70
図 5.2.3-59　研究坑道から掘削された観測孔における水質の経時変化[11]に追記.....5-76
図 5.2.3-60　コンクリートライナー周辺の地下水(集水リング)の pH の経時変化[11]に追記 5-76
図 5.2.3-61　グラウト領域周辺の地下水の pH の経時変化に[11]追記 5-77
図 5.2.4-1　炭素鋼の全面腐食と不働態・局部腐食(模式図) 5-79
図 5.2.4-2　炭素鋼の実測電位-pH 図[24].....5-80
図 5.2.4-3　アルカリ自然水-ベントナイト系における炭素鋼の局部腐食生起[25].....5-80
図 5.2.4-4　代表的な腐食速度[26] 5-81
図 5.2.4-5　腐食の原理と機構.....5-82
図 5.2.4-6　炭素鋼の腐食速度の溶存酸素濃度依存性(模式図)[29] 5-82
図 5.2.4-7　日本各所の水道水、自然水、ミネラルウオーターなどの酸化還元電位 5-82
図 5.2.4-8　腐食速度の温度依存性 5-83
図 5.2.4-9　キャニスタの環境変化と腐食特性評価(模式図)[33] 5-84
図 5.2.4-10　すきま腐食の原理[34] 5-84
図 5.2.4-11　炭素鋼のベントナイト混濁水環境における腐食[25].....5-85
図 5.2.4-12　河川水環境に設置したステンレス鋼製箱型試験体の状況.....5-85
図 5.2.4-13　地下埋設環境における腐食の予測.....5-86

図 5.2.4-14　海水/淡水環境下での炭素鋼の腐食深さ[39] 5-87
図 5.2.4-15　炭素鋼の全面腐食の進展による凹凸[40] 5-88
図 5.2.4-16　腐食速度におよぼす試験体表面積の影響[41] 5-88
図 5.2.4-17　炭素鋼の全国等腐食線図[47] 5-91
図 5.2.4-18　炭素鋼の大気腐食の進展[37] 5-91
図 5.2.4-19　化学プラントにおける保温材下腐食の実測腐食速度の確率による整理[49] 5-92
図 5.2.4-20　流動水中における炭素鋼の腐食速度におよぼす合金元素の影響[54][55] 5-94
図 5.2.4-21　護岸用鋼矢板の腐食[37] 5-95
図 5.2.4-22　海底トンネルの鉄道レールの腐食[59][60][61] 5-95
図 5.2.4-23　船齢 55 年の経年船の船体外板(塗装)の腐食深さ[62] 5-96
図 5.2.4-24　汎用ステンレス鋼の中性域における SCC 発生限界線図[64]と感受性ランク[65] 5-98
図 5.2.4-25　腐食データベースによる腐食判定ホーム[66] 5-98
図 5.2.4-26　腐食評価の観点から埋戻状態(模式図) 5-99
図 5.2.4-27　炭素鋼の腐食の進展予測例[63] 5-100
図 5.2.4-28　地下水の pH 変化(例) 5-100
図 5.2.4-29　オーバーパックの埋設環境における温度解析(例) 5-100
図 5.2.4-30　Evans 図のアノードとカソードの交点から求めた腐食速度の DO 依存性[29] 5-102
図 5.2.4-31　ベントナイト埋設環境における炭素鋼の腐食挙動 5-104
図 5.2.4-32　クニゲル V1 の総湧水量とエロージョン量の関係[85] 5-111
図 5.3.1-1　オーバーパックのみを定置したケースにおける人工バリアの状態イメージ 5-116
図 5.3.1-2　緩衝材を定置したケースにおける人工バリアの状態イメージ 5-119
図 5.3.1-3　処分坑道を埋め戻したケースにおける人工バリアの状態イメージ 5-122
図 5.3.1-4　オーバーパックのみを定置したケースにおける人工バリアの状態イメージ 5-123
図 5.3.1-5　緩衝材を定置したケースにおける人工バリアの状態イメージ 5-126
図 5.3.1-6　処分坑道を埋め戻したケースにおける人工バリアの状態イメージ 5-129
図 5.3.1-7　PEM のみを定置したケースにおける人工バリアの状態イメージ 5-131
図 5.3.1-8　処分坑道を埋め戻したケースにおける人工バリアの状態イメージ 5-134
図 5.4.1-1　一般的なトンネルの維持管理の手順 5-137
図 5.4.1-2　アクセス坑道における標準断面[5] 5-138
図 5.4.1-3　主要・連絡坑道における標準断面[5] 5-139
図 5.4.1-4　処分坑道における標準断面[5] 5-139

図 5.4.1-5　対策工選定の手順[95] 5-140
図 5.4.1-6　測定・計測技術の例[96][97] 5-142
図 5.4.1-7　内巻き補強工法の例[96][97] 5-142
図 5.4.2-1　湧水抑制対策 5-146

表目次

表 2.3.1-1　改良効果調査用吸引ラインの構成.....2-7
表 2.3.2-1　改良効果事前確認結果 2-9
表 2.6.1-1　寸法許容公差.....2-17
表 2.6.1-2　重量許容公差.....2-18
表 2.6.2-1　巻取り装置確認項目 2-18
表 2.6.3-1　巻取り装置寸法確認結果.....2-19
表 2.6.3-2　ホース送出し機能試験結果 2-19
表 2.6.3-3　ホース巻取り機能試験結果 2-20
表 2.7.2-1　塩水噴射・スラリー吸引装置の動作確認項目と動作確認方法.....2-21
表 2.7.3-1　昇降装置の動作確認項目と動作確認方法.....2-23
表 2.7.4-1　遠隔操作設備の動作確認項目と動作確認方法.....2-25
表 2.8.1-1　塩水噴射・スラリー吸引装置の動作確認項目一覧.....2-27
表 2.8.2-1　昇降装置の動作確認項目一覧.....2-28
表 2.8.2-2　昇降装置の自然降下量測定結果（改良後） 2-29
表 2.8.3-1　遠隔操作設備の動作確認項目一覧.....2-30
表 2.9.1-1　緩衝材除去システムを構成する各設備の改良.....2-32
表 3.1-1　緩衝材除去システムの構成 3-1
表 3.1.2-1　緩衝材除去試験により確認する機能と取得特性および取得方法 3-4
表 3.1.3-1　試験条件（緩衝材除去による機能確認試験） 3-5
表 3.1.4-1　試験孔および試験坑道の基本仕様.....3-8
表 3.1.4-2　模擬廃棄体の仕様.....3-10
表 3.2.2-1　昇降装置に対する遠隔操作設備の機能 3-14
表 3.2.2-2　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 3-14
表 3.2.2-3　塩水リユース設備に対する遠隔操作設備の要求事項.....3-15
表 3.2.3-1　試験に用いる緩衝材の主要な仕様.....3-15
表 3.2.3-2　土粒子密度試験結果.....3-16
表 3.2.3-3　機能確認試験に用いた緩衝材の特性.....3-19
表 3.2.3-4　乾燥密度、飽和度測定結果（No.2 リングコアサンプリング） 3-21
表 3.2.3-5　乾燥密度、飽和度測定結果（No.3 リングコアサンプリング） 3-22
表 3.2.3-6　乾燥密度、飽和度測定結果（No.4 リングコアサンプリング） 3-23
表 3.2.3-7　乾燥密度、飽和度測定結果（No.5 リングコアサンプリング） 3-24
表 3.2.3-8　乾燥密度、飽和度測定結果（No.6 リングコアサンプリング） 3-25
表 3.2.3-9　試験に用いる緩衝材の主要な仕様.....3-26

表 3.2.3-10 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） 3-29
表 3.3.2-1 緩衝材除去速度の比較 3-35
表 3.3.2-2 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 3-48
表 3.4.2-1 試験体に使用する材料仕様 3-52
表 3.4.2-2 ベントナイトペレット含水比および単体の乾燥密度測定結果....3-52
表 3.4.2-3 各試験体の規格および試験条件 3-53
表 3.4.2-4 引き抜き試験に使用した機器仕様....3-54
表 3.4.4-1 各側圧条件における表面摩擦応力....3-59
表 4.2.1-1 資機材搬入出に用いる設備および坑道仕様[1] 4-4
表 4.3.1-1 噴射・吸引設備主要部の重量....4-5
表 4.3.2-1 塩水リユース設備の仕様....4-7
表 4.4.1-1 噴射・吸引設備の分割検討結果 4-9
表 4.6.1-1 緩衝材除去試験に必要となるインフラ仕様 4-22
表 4.6.2-1 吊り上げ方法の比較....4-24
表 4.6.2-2 巻上機の比較....4-25
表 4.8.4-1 深度 350m の初期応力[5]....4-34
表 4.8.4-2 解析用地山物性値[5][6]....4-34
表 4.8.4-3 吹付けコンクリートの物性値....4-34
表 4.8.4-4 鋼製支保工物性値....4-35
表 4.8.4-5 Case3 既設断面に使用する支保の物性値....4-35
表 4.8.4-6 ライナープレートの物性値（Case4）[7]....4-35
表 4.8.5-1 許容応力度[5] 4-36
表 4.8.6-1 解析ステップ....4-36
表 4.8.7-1 支保部材の仕様および応力照査結果（Case1） 4-37
表 4.8.7-2 支保部材の仕様および応力照査結果（Case2） 4-39
表 4.8.7-3 支保部材の仕様および応力照査結果（Case3） 4-41
表 4.8.7-4 支保部材の仕様および応力照査結果（Case4） 4-43
表 5.2.1-1 人工バリア等に発生する現象とその時期の整理（RWMC（2014）の表を編集） 5-4
表 5.2.1-2 人工バリア等に発生する現象とその時期の整理（RWMC（2014）の表を編集） 5-5
表 5.2.2-1 竪置き方式における状態のイメージと説明 5-9
表 5.2.2-2 横置き方式における状態のイメージと説明 5-10
表 5.2.2-3 PEM 方式における状態のイメージと説明....5-11
表 5.2.2-4 竪置き方式における状態のイメージと影響因子の整理 5-12

表 5.2.2-5　横置き方式における状態のイメージと影響因子の整理 5-13
表 5.2.2-6　PEM 方式における状態のイメージと影響因子の整理.....5-14
表 5.2.3-1　人工バリアおよび岩盤の熱特性[5].....5-20
表 5.2.3-2　解析ケース（竪置き方式） 5-25
表 5.2.3-3　解析ケース（横置き方式） 5-26
表 5.2.3-4　解析ケース（PEM 方式） 5-27
表 5.2.3-5　第 2 次取りまとめ解析結果との比較（竪置き方式） 5-46
表 5.2.3-6　第 2 次取りまとめ解析結果との比較（横置き方式） 5-46
表 5.2.3-7　地下水水質に係わる文献.....5-54
表 5.2.3-8　地下水とセメント系材料との接触影響に係わる影響.....5-55
表 5.2.3-9　地質環境変更ケースで設定したモデル地下水組成の計算値[10].....5-56
表 5.2.3-10　採水場所一覧[12] 5-62
表 5.2.3-11　予察的に推定された研究所設置地区での深部地下水組成幅[13].....5-63
表 5.2.3-12　試験項目と使用した試験溶液[13] 5-64
表 5.2.3-13　試験溶液の pH と緩衝材中の pH[13].....5-64
表 5.2.3-14　浸漬試験条件[14] 5-65
表 5.2.3-15　200m 以深の酸化還元電位が測定された地下水データ[17].....5-67
表 5.2.3-16　主要溶存成分濃度の集計結果[17] 5-68
表 5.2.3-17　温泉等を除くデータ（7,969 件）の集計結果[17] 5-68
表 5.2.3-18　降水起源と考えられる地下水（5,127 件）の集計結果[17].....5-68
表 5.2.3-19　地質環境変更ケースで設定したモデル地下水組成の計算値 5-71
表 5.2.3-20　瑞浪深地層研究所(2011~2012)における地下水組成 5-72
表 5.2.3-21　瑞浪超深地層地下研究所(2008)における地下水組成 5-73
表 5.2.3-22　幌延地層研究所(2003)における地下水組成(元素濃度は空気中に
おけるもの) 5-73
表 5.2.3-23　幌延深地層研究所(2001~2010)における地下水組成.....5-74
表 5.2.4-1　炭素鋼の代表的な腐食形態 5-78
表 5.2.4-2　異種金属接触による腐食の加速[42].....5-88
表 5.2.4-3　保温材下腐食(CUI)判定テクニカルモジュール[50] 5-93
表 5.2.4-4　保温材下腐食テクニカルモジュールに用いられている腐食速度[51][52] ..5-93
表 5.2.4-5　個別腐食劣化機構に関する腐食診断の因子[63].....5-97
表 5.2.4-6　空気と接する場合の腐食見積(温度、湿度) 5-101
表 5.2.4-7　水と接する場合の腐食見積(温度、DO).....5-102
表 5.2.4-8　ベントナイトと接する場合の腐食見積(温度、海洋／非海洋).....5-103
表 5.2.4-9　腐食深さの定置条件、および時間依存性比較.....5-104

表 5.2.4-10　緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用に関する科学的な知見の整備状況（1/2）[7]....5-106
表 5.2.4-11　緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用に関する科学的な知見の整備状況（2/2）[7]....5-107
表 5.2.4-12　ベントナイトの変質と試験条件[7]....5-109
表 5.3.1-1　人工バリア性能維持への影響が懸念される事象（1）....5-116
表 5.3.1-2　人工バリア性能維持への影響が懸念される事象（2）....5-119
表 5.3.1-3　人工バリア性能維持への影響が懸念される事象（3）....5-122
表 5.3.1-4　人工バリア性能維持への影響が懸念される事象（4）....5-123
表 5.3.1-5　人工バリア性能維持への影響が懸念される事象（5）....5-126
表 5.3.1-6　人工バリア性能維持への影響が懸念される事象（6）....5-129
表 5.3.1-7　人工バリア性能維持への影響が懸念される事象（7）....5-131
表 5.3.1-8　人工バリア性能維持への影響が懸念される事象（8）....5-134
表 5.3.2-1　人工バリアに及ぼす主な影響の程度と期間（表 5.2.4-6～表 5.2.4-8 より）....5-135
表 5.3.2-2　我が国におけるトンネルの共用期間の例[4]....5-135
表 5.3.2-3　我が国における鉱山の稼働期間の例....5-136
表 5.4.1-1　変状に対する対策工の例[95][96]....5-141
表 5.4.2-1　処分施設を持管理するための方策（1）....5-145
表 5.4.2-2　処分施設を持管理するための方策（2）....5-148
表 5.4.2-3　処分施設を持管理するための方策（3）....5-150
表 5.4.2-4　処分施設を持管理するための方策（4）....5-153
表 5.4.2-5　処分施設を持管理するための方策（5）....5-156
表 5.4.2-6　処分施設を持管理するための方策（6）....5-158
表 5.4.2-7　処分施設を持管理するための方策（7）....5-160
表 5.4.2-8　処分施設を持管理するための方策（8）....5-163

第1章　事業概要

1.1　事業名

事業名：平成 26 年度地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）

1.2　事業の背景と目的

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って既に放射性廃棄物が発生しており、その処理処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物の地層処分に係わる研究開発について、国、研究開発機関等が、それぞれの役割分担を踏まえつつ、密接な連携の下で、基盤研究開発を着実に進めていくことが重要である。

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わ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を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。平成26年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」においては、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等について調査・研究を進め、処分場閉鎖までの間の高レベル放射性廃棄物の管理の在り方を具体化する、と記されている。また、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針改定案、パブリックコメント募集中：締切期限、平成27年3月20日」においては、特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性（回収可能性）を確保するものとする、と記されている。

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 年から 24 年まで実施した地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発）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ところであり、今後実証試験等を通じて適用性の確認を行う必要がある。

これらを背景として、本事業は、これまで開発してきた緩衝材除去技術の適用性を確認し、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することにより、国民の地層処分技術に関する安心感の醸成に資するとともに、将来世代に対し、高レベル放射性廃棄物の処分方法の選択肢について柔軟性を持たせ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た過去の基盤研究（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、この中で塩水を用いて緩衝材をスラリー化して除去する

方法についての技術の基本的な構成や見通し等が得られていたが、地下環境で適用可能な装置を設計し、技術を確証する段階まで至っていない。本事業は、これらの知見を高度化し、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 年程度の期間で行っている。対象とする処分方式は、処分孔竪置き方式とする。

1.4 実施概要

1.4.1 回収技術の高度化開発

(1) 緩衝材除去装置の総合動作確認

平成 25 年度までに製作した緩衝材除去装置の総合動作確認を目的として、地上にて緩衝材除去試験を行い、緩衝材の除去機能、装置全体のシステム成立性、操作性、地下環境への展開性について確認した。緩衝材除去試験では実規模スケールでの緩衝材を用いて、噴射量、噴射圧、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を取得した。総合動作確認では必要となる地上設備を整備し、実規模スケールの試験体（模擬廃棄体と緩衝材）を用いた。また、総合動作確認に先立ち、緩衝材除去装置の調整、改良を実施した。さらに、異なる特性を有する緩衝材に対して緩衝材除去装置の適用性を検討した。緩衝材除去装置の改良について詳細を第 2 章、総合動作確認について詳細を第 3 章に示す。

(2) 実証試験計画の見直し

平成 25 年度に策定した地下環境における実規模で行う実証試験計画に基づき、開発中の緩衝材除去装置を利用する場合の作業環境について、調査・検討するとともに、その結果に基づき実証試験に必要となる設備及び坑道について基本設計を行い取りまとめた。詳細を第 4 章に示す。

1.4.2 処分施設における回収維持期間の検討

平成 25 年度に実施した「処分施設における回収維持期間の検討」において抽出した処分施設の安全性能に影響を及ぼす要因について整理し、人工バリアの性能維持が可能な期間の観点から分析を行い、主たる影響要因について、その影響の程度を定量的には把握するとともに回収維持期間の設定（例示）について検討を行った。さらに、検討（例示）した維持期間に対し、処分施設を維持管理するための具体的な方策を検討するとともに残される課題を整理した。詳細を第 5 章に示す。

第2章　　緩衝材除去装置の改良

平成 25 年度の動作確認試験結果および機能確認試験結果を踏まえた緩衝材除去装置の改良について記載する。

2.1　改良方法および対象設備

平成 25 年度に実施した動作確認試験結果および機能確認試験結果を基に改良に係る実施フローを図 2.1-1 に示す。

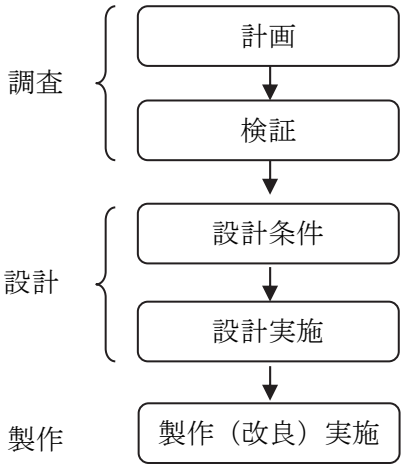


図 2.1-1　調査・設計・製作フロー

また、改良の必要となる設備は以下の通りである。

① 噴射・吸引設備のうち塩水噴射・スラリー吸引装置
② 噴射・吸引設備のうち昇降装置
③ 遠隔操作設備
　A) 3D 観測システムを用いた廃棄体の把持機能
　B) 3D 観測システムを用いた緩衝材除去形状計測機能

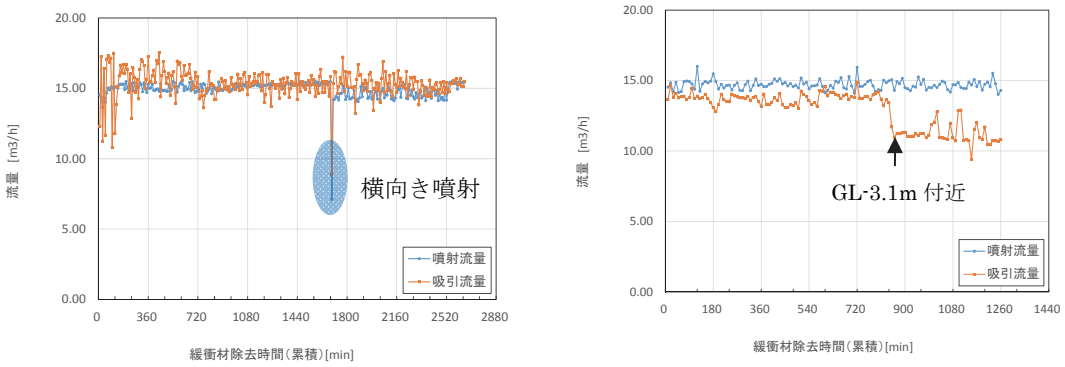
2.2　事象および原因

各設備について、改良が必要となる事象と原因を記載する。

2.2.1　噴射・吸引設備のうち塩水噴射・スラリー吸引装置

塩水噴射・スラリー吸引装置のうち、スラリー吸引装置については動作確認試験において所定の吸引流量を満足する結果を得たが、機能確認試験において緩衝材除去の進捗に合わせ模擬処分

孔への下降深さの増加に伴い吸引流量が低下する現象が発生した（図 2.2.1-1 参照）。



ケース 1（GL-1.224～-1.909m）　　ケース 2（GL-2.905～-3.175m）

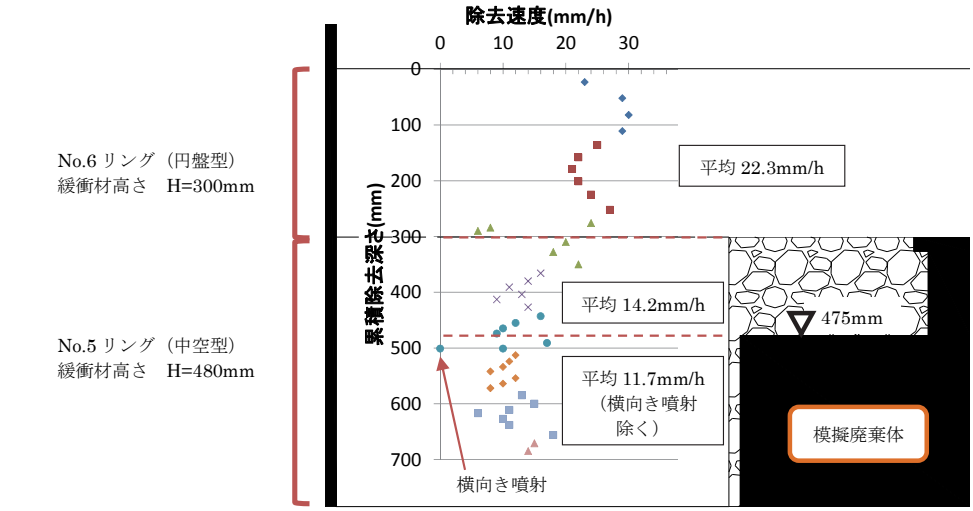
図 2.2.1-1　平成 25 年度機能確認試験における塩水噴射・スラリー吸引流量の測定結果

この事象の発生原因としては、吸引ラインに使用したグラウトホースは正圧に対する耐圧性能は優れているが、負圧に対する耐圧性が劣っていた。(負圧が大きくなると変形を起こす)。また、噴射・吸引ループ配管の降下に伴う引張り、塩水噴射部の揺動に伴うねじれが加わり、グラウトホースが変形し、圧力損失が大きくなり流量が低下したものと考えられる。

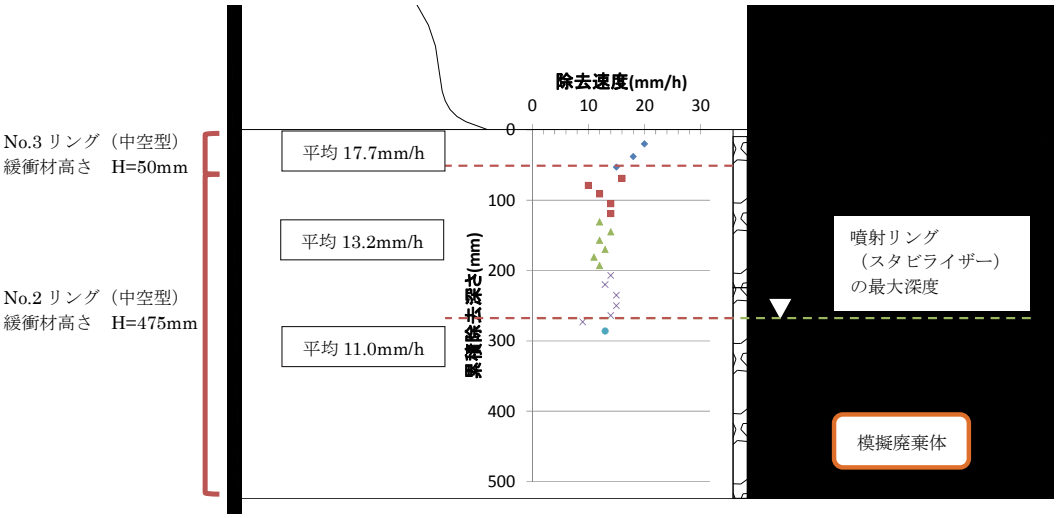
2.2.2　噴射・吸引設備のうち昇降装置

昇降装置運転については、1 時間毎に実施するノズル位置設定後、オペレーターが常時ノズル位置を観察し、昇降装置が自然降下した場合には所定の高さまで戻す操作を行うこととしていた。

機能確認試験の結果から図 2.2.2-1 に示した通り、緩衝材の深度方向除去速度の区間平均は 11.7mm/h であった。昇降装置の自然降下量が 11.7mm/h を下回れば、オペレーターの操作性が良くなるのと同時に、安定した除去機能が期待できるようになるが、図 2.2.2-2 に示すよう機能確認とは別に、噴射・吸引・揺動動作を行ないながら昇降装置の自然降下量を測定した結果、噴射部昇降装置の自然降下量は 1mm/h、把持部昇降装置の自然降下量は 49mm/h であり、昇降装置全体で 50mm/h の自然降下が発生していることが判明した。



(a) ケース 1（最小伸長時）における緩衝材除去深度測定結果



(b) ケース 2（最大伸長時）における緩衝材除去深度測定結果

図 2.2.2-1　平成 25 年度機能確認試験における緩衝材除去深度測定結果

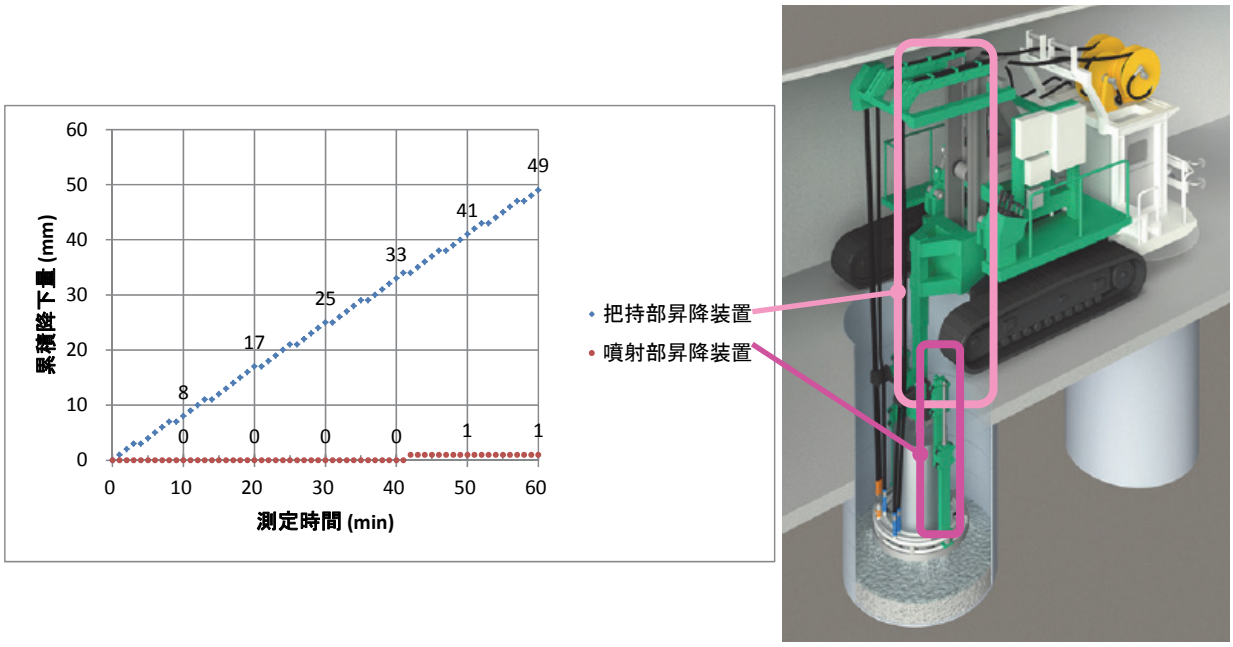
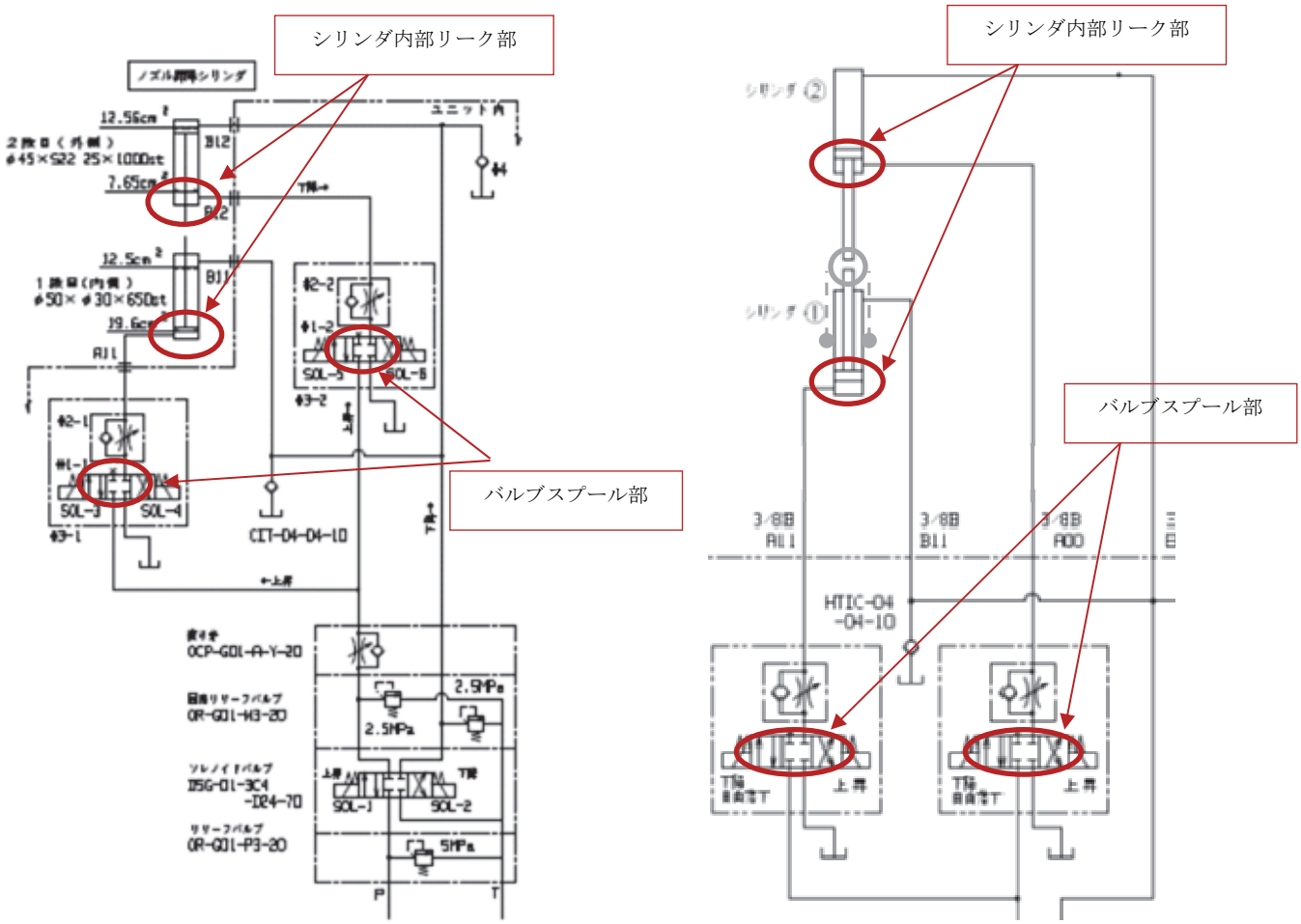


図 2.2.2-2　昇降装置の自然降下量測定結果

この原因としては、噴射部および把持部の昇降油圧回路に内部リークよる自然落下防止対策をとっていなかった事による「切替えバルブスプールからの油圧漏れ」と「シリンダの内部リーク」が考えられる。図 2.2.2-3 参照



(a) 噴射部昇降油圧回路　　(b) 把持部昇降油圧回路

図 2.2.2-3　昇降油圧回路

2.2.3　遠隔操作設備

(1) 3D 観測システムを用いた廃棄体の把持機能

緩衝材除去装置の操作性や安全性を確保するためには、模擬廃棄体頭頂部と把持装置に対する相対位置を自動検出し、その情報を的確に操作画面に表示する必要がある。平成 25 年度は 3D 観測装置 Xtion（Asus 社製）を活用し、さらにパンチルト機能を実装することにより、模擬廃棄体頭頂部を的確に観測できるようにした。また、模擬廃棄体頭頂部を自動認識しその座標を計算するアプリケーションを制作した。これは Xtion によって得られる点群形状情報から模擬廃棄体頭頂部を検出し、把持装置に対する模擬廃棄体頭頂部の相対位置を求めるものである。

平成 25 年度に制作したアプリケーションは作業者の指示により模擬廃棄体頭頂部を検出し相対位置を求めた後は、作業者自ら操作画面上の緩衝材除去装置の位置情報と照らし合わせ、操作するものであった。この観測結果（相対位置）の受け渡しは軽度ではあるが作業者の空間認識能力が必要であり、熟練度を必要した。一方、平成 25 年度の 3D 観測装置は実験室内での検証の結果、検出データの精度は概ね 1%の誤差範囲に入っており、機能確認試験において

も模擬廃棄体頭頂部の検出、相対位置の計算、把持・振れ止めに至るまでの一連の操作を確認できている。

(2) 3D 観測システムを用いた緩衝材除去形状計測機能

緩衝材除去装置での緩衝材除去が実施されていることを確認するためには、的確な除去形状の把握が必要となる。平成 25 年度は 3D 観測装置 Xtion（Asus 社製）を活用し、実装するソフトウェアとして、①形状の自動合成を行う Kinect Fusion（Kinect センサーを動かして人体や部屋全体を含む大きな範囲を 3D モデル化する技術)を核としたスキャンアプリケーション、②パンチルトを制御するアプリケーションを製作し、これらを連動することで対象となる物体の形状を点群データとして取得する装置とした。さらに、取得した点群形状からオフライン処理にて緩衝材の除去形状を測定し、体積などの情報を取得した。

平成 25 年度は 3D 観測装置 1 台を用いて実験室内での検証を実施した結果、設計値に対して 0.4%の誤差で体積が推定できることを確認できた。一方、機能確認試験においては、①3D 観測装置（スキャナー）の適用限界とも言える水面以下の測定ができないこと、②3D 観測装置 1 台のみの運用によって形状評価を実施したことにより、模擬廃棄体の陰となる部分に死角が発生したことによって、深度方向の除去進行とともに形状取得範囲を含めた測定精度に影響を及ぼすことが確認された。

緩衝材の除去形状は、塩水噴射・スラリー吸引装置の昇降に影響を及ぼすものであり、水面より上部の形状（同設備と緩衝材除去壁面との定量的な距離）が取得されていれば、操作上の影響はない。一方、緩衝材除去中は塩水噴射・スラリー吸引装置の揺動に伴い、同設備の昇降フレーム、塩水噴射ホース、スラリー吸引ホースが 3D 観測装置下で常に揺動している状態となる。3D 観測装置が移動することによってこのような死角を排除することは可能と考えられるが、除去装置全体のレイアウト変更が必要となるため、本年度は平成 25 年度と同様に撮像システム（カメラ）と動作監視モニターにその役割を担わせることとした。

緩衝材除去装置の除去性能の確認については、平成 25 年度は一定の頻度（1 回/日）で塩水噴射・スラリー吸引装置を引上げ、緩衝材表面の塩水を吸引し形状計測を実施した。ここで、いわゆる除去形状から算出した除去量と SS 濃度計算から算出した除去量が除去深度の増加とともに差が大きくなったことから、前述の通り、模擬廃棄体の陰が死角となり除去量に影響したものと考えた。

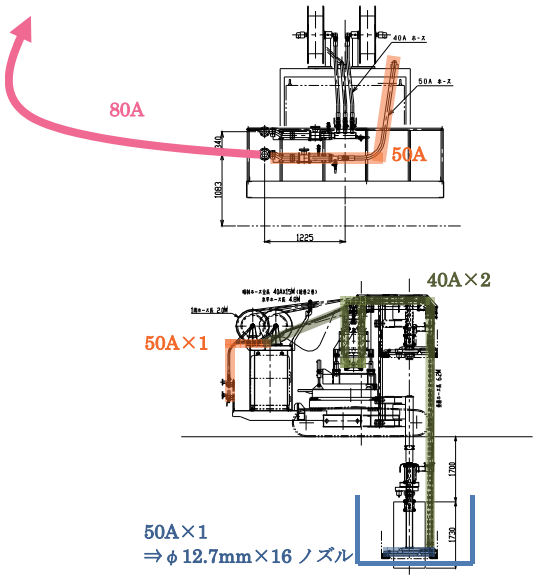
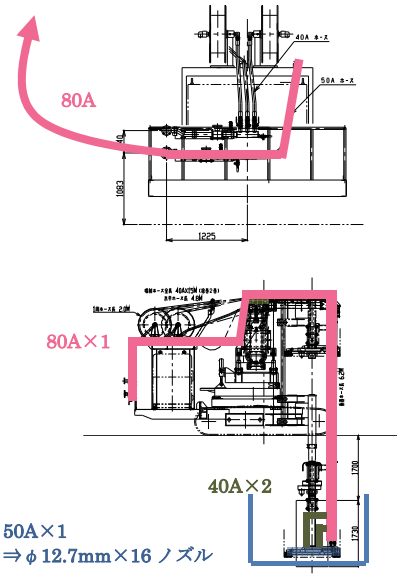
2.3　塩水噴射・スラリー吸引設備の改良に係る検討

2.3.1　スラリー吸引装置の改良検討

スラリー吸引装置の見直しにあたっては「巻取り装置の改良」と「揺動トルクの改良」を伴うため、事前の確認試験によって改良項目に対する効果を確認しておく必要がある。表 2.3.1-1 に「既存の吸引ライン」と、改良効果を事前確認するための「改良効果調査用吸引ライン」の構成を示す。

「改良効果事前確認用吸引ライン」は「既存の吸引ライン」のうち、50A×1 系統および 40A×分岐 2 系統の部分を、すべて 80A の補強コード入り耐圧ホース（変形防止）とし、吸引流量を測定する計画である。この時の吸引流量はリユース設備の水槽を用い、吸引時間と水槽面積、水位によって算定する。ただし、吸引圧力は測定しない。

表 2.3.1-1　改良効果調査用吸引ラインの構成

既存の吸引ライン	改良効果事前確認用吸引ライン
	

2.3.2　塩水噴射・スラリー吸引装置の検証

「改良効果事前確認用吸引ライン」の吸引流量と損失水頭の関係を、前節と同様に計算によって求めると図 2.3.2-1 のようになり、常時損失水頭が全損失水頭の上限を十分に下回っていることから、現状のポンプで 0.30m³/min の吸引流量が確保できると考える。

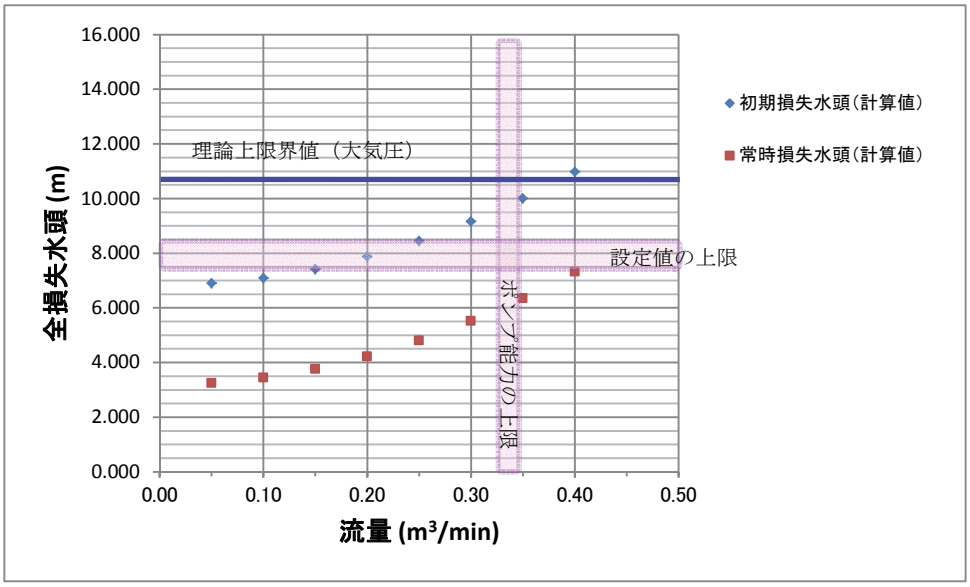
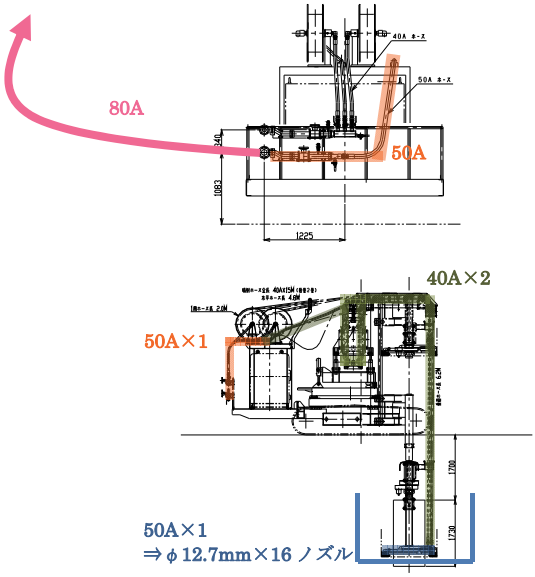
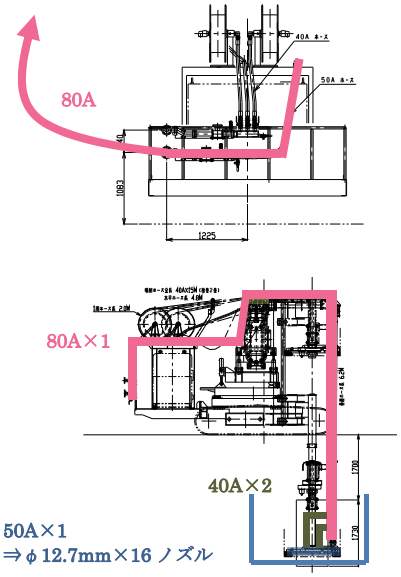


図 2.3.2-1　改良効果事前確認用吸引ラインにおける吸引流量と損失水頭の関係（計算値）

事前確認試験計画にもとづき実施した確認結果を表 2.3.2-1 に示す。なお、吸引流量は吸引ホース内の満水状態を目視で確認した後に測定した値であり、満水状態まで 2 分程度を要した。また、表には比較のために既存の吸引ラインで実施した結果（表 2.3.1-1 の結果）も併せて示す。

表 2.3.2-1　改良効果事前確認結果

	既存の吸引ライン	改良効果事前確認用吸引ライン
装置側 吸引圧力	0.081～0.082MPa（圧力計）	－ （圧力計取外しのため測定不可）
吸引流量	0.25m³/min（流量計）	0.29m³/min（手動計測）
		

この結果、改良効果事前確認用吸引ラインは 0.29m³/min の吸引流量が確保できていることが確できた。また、事前確認試験中、負圧や揺動によるホースのつぶれ・ねじれは確認されず、所定の管径が確保できていることも確認できた。以上より、検討した「管径の増大」「変形の防止」による損失水頭の改良効果が検証された。

2.3.3　改良設計

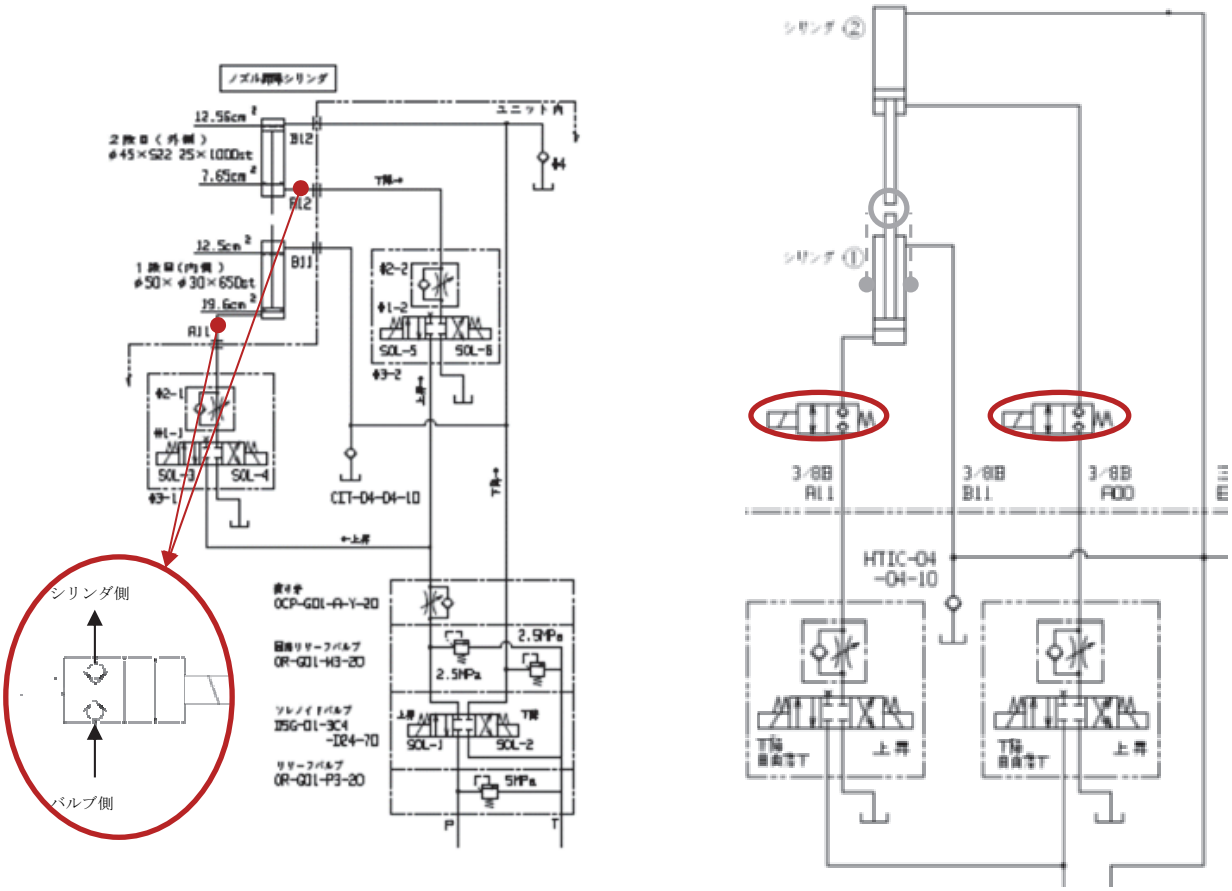
「改良項目の整理」、「調査による検証結果」を踏まえた、スラリー吸引装置の改良項目に対する設計条件および設計項目を以下に示す。

・スラリー吸引流量 0.25m³/min 以上を確保する
　(1) 吸引ラインの管径を増大する（40A×2 本から 80A×1 本）
　(2) 吸引ラインの変形を防止する（補強コード入り耐圧ホース）
　(3) その他圧力損失をできるだけ小さくする（吸引ノズルの増加：16 ノズル→24 ノズル）
・スラリー吸引装置改良に伴うその他装置の機能低下を防止する
　(4) 巻取り装置を改良する
　(5) 揺動トルクを改良する
　(6) 走行装置の仕様検討

2.4　昇降装置の改良に係る検討

2.4.1　昇降設備の改良検討

昇降装置の見直しは、噴射部および把持部の昇降油圧回路に逆止弁を追加することで、油圧のリークを防止して自然降下事象の防止対策となる。対策効果の確証は、装置全体の「動作確認検査」として実施する。測定項目は図 2.2.2-2 と同様に、時間に伴う自然降下量を測定する。また、図 2.2.2-1 から深度方向の除去速度は区間平均で 10mm/h 以上であることから、自然降下量 10mm/h 以下をひとつの設計条件とする。図 2.4.1-1 に具体的な改良対策を示す。



(a) 噴射部昇降油圧回路
シャットオフバルブ追加

(b) 把持部昇降油圧回路
シャットオフバルブ追加

図 2.4.1-1　昇降油圧回路の改良

2.4.2　昇降装置の検証

ここでは逆止弁の中立時における油漏れ量を設定し、時間あたりの自然降下量を計算によって求める。

逆止弁の中立時の油圧漏れは、一般的には油量 0.1cc/min 以下である。ここで、計算上の油漏れ量を 0.1cc/min と設定すると、以下の式によって時間当たりの自然降下量が算定できる。

$v = \Delta Q / S$

v ：自然降下量 [cm/min]
ΔQ：油漏れ量 [cc/min]
S ：面積 [cm²]

(1) 噴射部昇降装置改良後の自然降下量（計算値）

- シリンダ 1 段目（ΔQ = 0.1[cc/min]，S = 39.3[cm²]（2 本計））
  v = (0.1[cc/min] / 39.3[cm²] = 0.0025[cm/min] = 1.5[mm/h]
- シリンダ 2 段目（ΔQ = 0.1[cc/min]，S = 15.3[cm²]（2 本計））
  v = 0.1[cc/min] / 15.3[cm²] = 0.0065[cm/min] = 3.9[mm/h]

(2) 把持部昇降装置改良後の自然降下量（計算値）

- シリンダ 1 段目（ΔQ = 0.1[cc/min]，S = 132.7[cm²]（2 本計））
  v = (0.1[cc/min] / 132.7[cm²]) ×2(*1)= 0.0015[cm/min] = 0.9[mm/h]
  *1：チェーン 2 本掛けのため、シリンダが 1 下がると降下量は 2 倍となる。
- シリンダ 2 段目（ΔQ = 0.1[cc/min]，S = 66.7[cm²]（2 本計））
  v = 0.1[cc/min] / 66.7[cm²] = 0.0015[cm/min] = 0.9[mm/h]

以上より、噴射部昇降装置改良後の最大自然降下量（計算値）は 5.4[mm/h]、把持部昇降装置改良後の最大自然降下量（計算値）は 1.8[mm/h]となり、昇降装置合計の自然降下量は 7.2[mm/h]以下になるものと考えられる。

2.4.3　昇降装置の改良設計

「改良項目の整理」、「調査による検証結果」を踏まえた、昇降装置の改良項目に対する設計条件および設計項目を以下に示す。

・自然降下量は 10mm/h 以下とする。
1) 噴射部昇降油圧回路にシャットオフバルブを追加する
2) 把持部昇降油圧回路にシャットオフバルブを追加する

2.5　遠隔操作設備の改良に係る検討

2.5.1　遠隔作設備の改良検討

(1) 3D 観測システムを用いた廃棄体の把持機能

3D 観測装置によって相対位置を検出し、その情報を操作画面に表示する際のデータ連携（受け渡し）について、現在模擬廃棄体頭頂部検出プログラムの実行は 10～20 秒かかることから、10 秒以内にデータの受け渡しができることを設計条件とし、また、ファイル書き込み、読み込みのタイミングが一致した場合のエラー対策として、操作画面側（読み込み側）にリトライ機能を装備させることとする。

3D 観測装置による相対位置の自動検出については、連続計測アプリケーションの自動実行ループを製作する。

これら一つ一つのプログラム実行は、ダミープログラム上での検証が可能であり、ダミープログラムによる事前確認によって改良効果を検証できる。

なお、システムとして統合した際の改良効果については、装置全体の「動作確認試験」として実施する。

(2) 3D 観測システムを用いた緩衝材除去形状計測機能

3D 観測装置 2 台を用いて形状情報を合成する方法について、1 台のみの場合よりも観測可能範囲が拡大することが想定されるが、事前にプログラムの製作前に机上での観測可能範囲検証を試みることとする。

なお、システムとして統合した際の改良効果については、装置全体の「動作確認試験」として実施する。

2.5.2　遠隔操作設備の検証

(1) 3D 観測システムを用いた廃棄体の把持機能

ダミープログラムでの検証では、受け渡しデータとして 3 次元座標と 2 方向の角度情報の 5 つの数値を表記した 1kb のファイルサイズのテキストファイルを想定した。受け渡しの結果、ファイル転送はほぼ瞬時に完了する結果となった。

また自動検出については、連続計測アプリケーションのプログラムが設定した時間に実行すること、リトライ機能については、リトライ実行プログラムが即時に実行することをダミープログラム上で確認した。

(2) 3D 観測システムを用いた緩衝材除去形状計測機能

平成 25 年度の 3D 観測装置 1 台使用による観測可能範囲は、図 2.5.2-1 および図 2.5.2-2 に示す通り、深度が深くなるにつれて死角の範囲が増えていることが分かる。

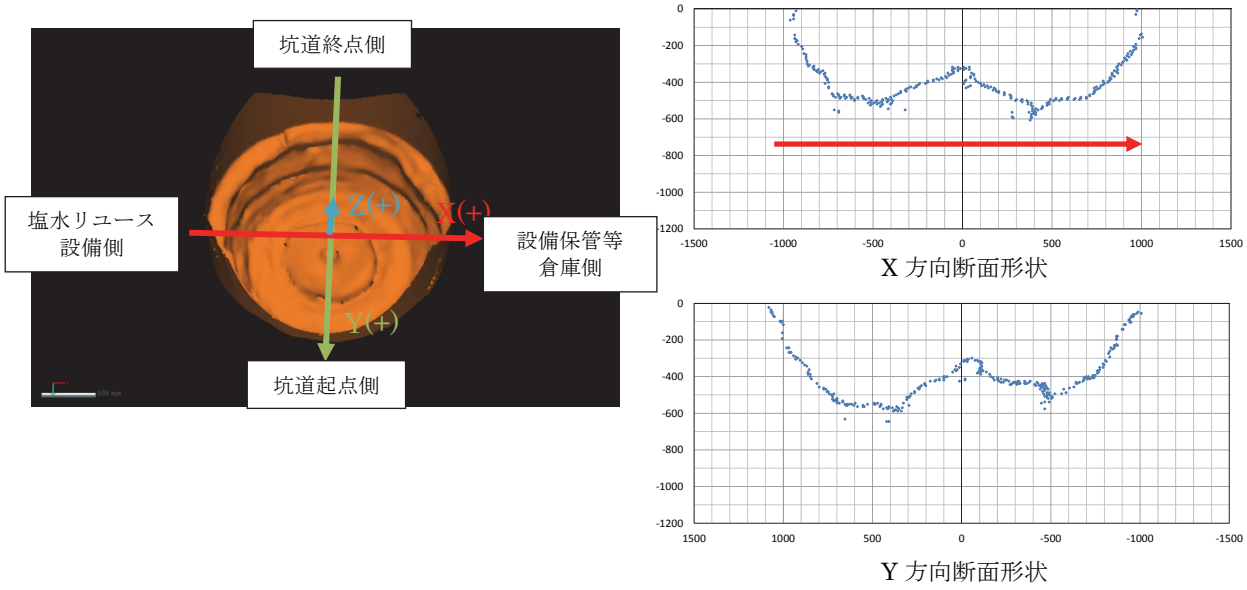


図 2.5.2-1　平成 25 年度機能確認試験における緩衝材除去形状（ケース 1：模擬廃棄体上部）

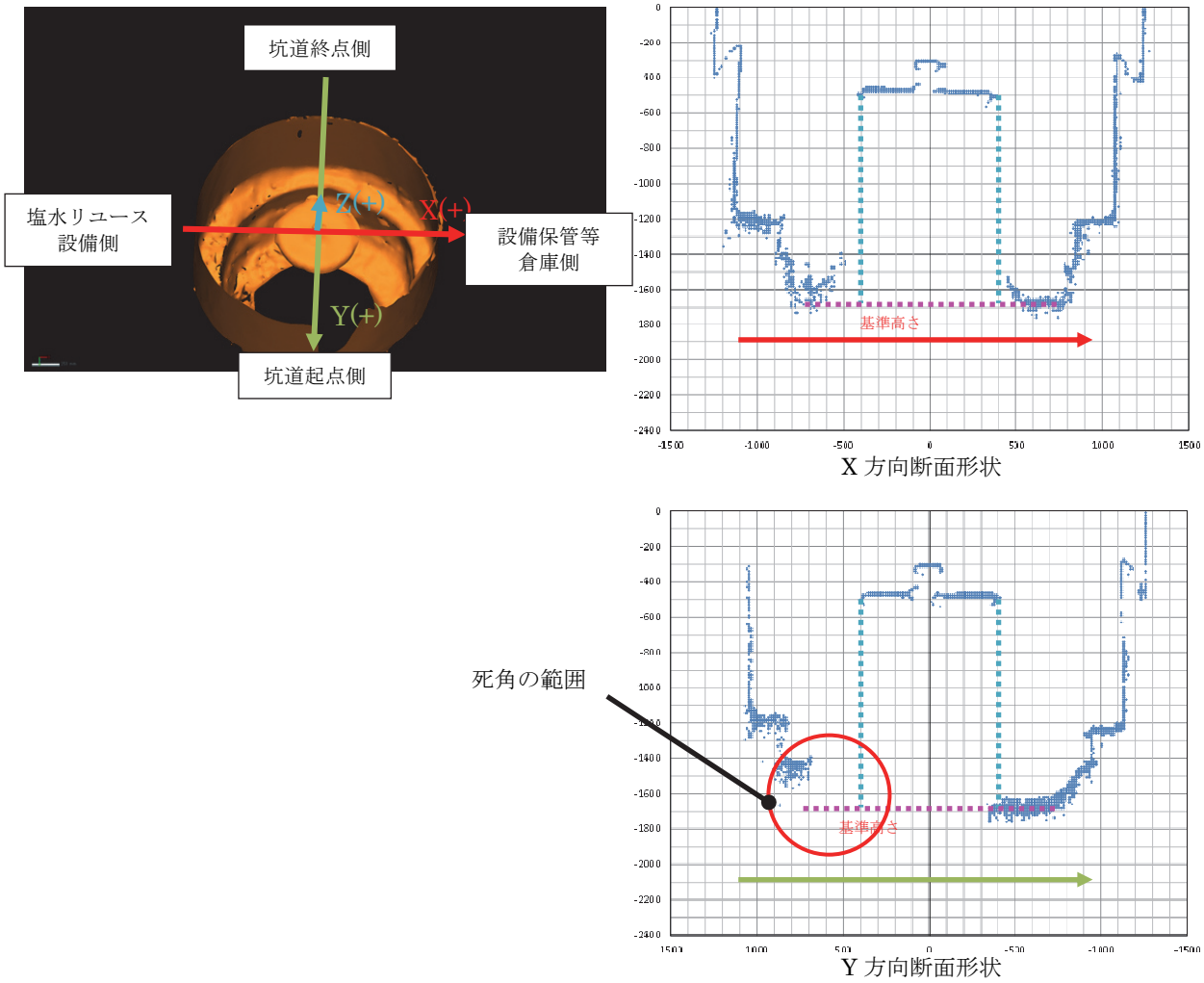


図 2.5.2-2　平成 25 年度機能確認試験における緩衝材除去形状（ケース 2：模擬廃棄体側方下部）

なお、図中に示す 4 方向については図 2.5.2-3 参照。

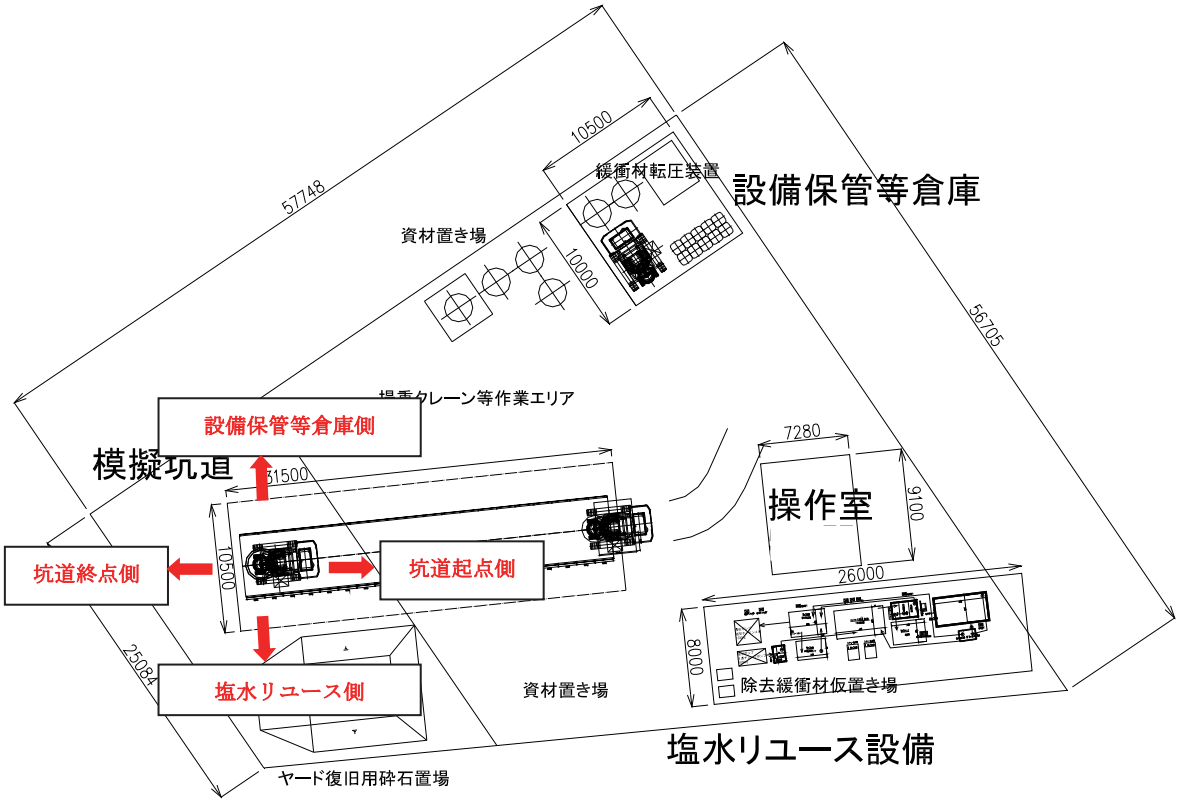

57748
10500
緩衝材転圧装置
設備保管等倉庫
資材置き場
10000
56705
揚重クレーン等作業エリア
設備保管等倉庫側
模擬坑道
31500
7280
操作室
9100
坑道終点側
10500
坑道起点側
26000
8000
25084
塩水リユース側
資材置き場
除去緩衝材仮置き場
塩水リユース設備
ヤード復旧用砕石置場

図 2.5.2-3　方向表示図

2.5.3　遠隔操作設備の改良設計

(1) 3D 観測システムを用いた廃棄体の把持機能

「廃棄体の把持追加機能の整理」、「調査による検証結果」を踏まえた、遠隔操作設備の改良項目に対する設計条件を以下に、プログラムフロー図（プログラム設計図）を図 2.5.3-1 に示す。なお、操作画面インターフェースは、平成 25 年度のものを引き継ぐものとする。

・10 秒以内に相対位置情報を操作画面に受け渡す（表示する）
・情報の受け渡しはファイルベースとする
・自動実行ループを装備し、連続計測をする
・ファイル書き込み、読み込み時のエラー対策として読み込み側にリトライ機能を装備する

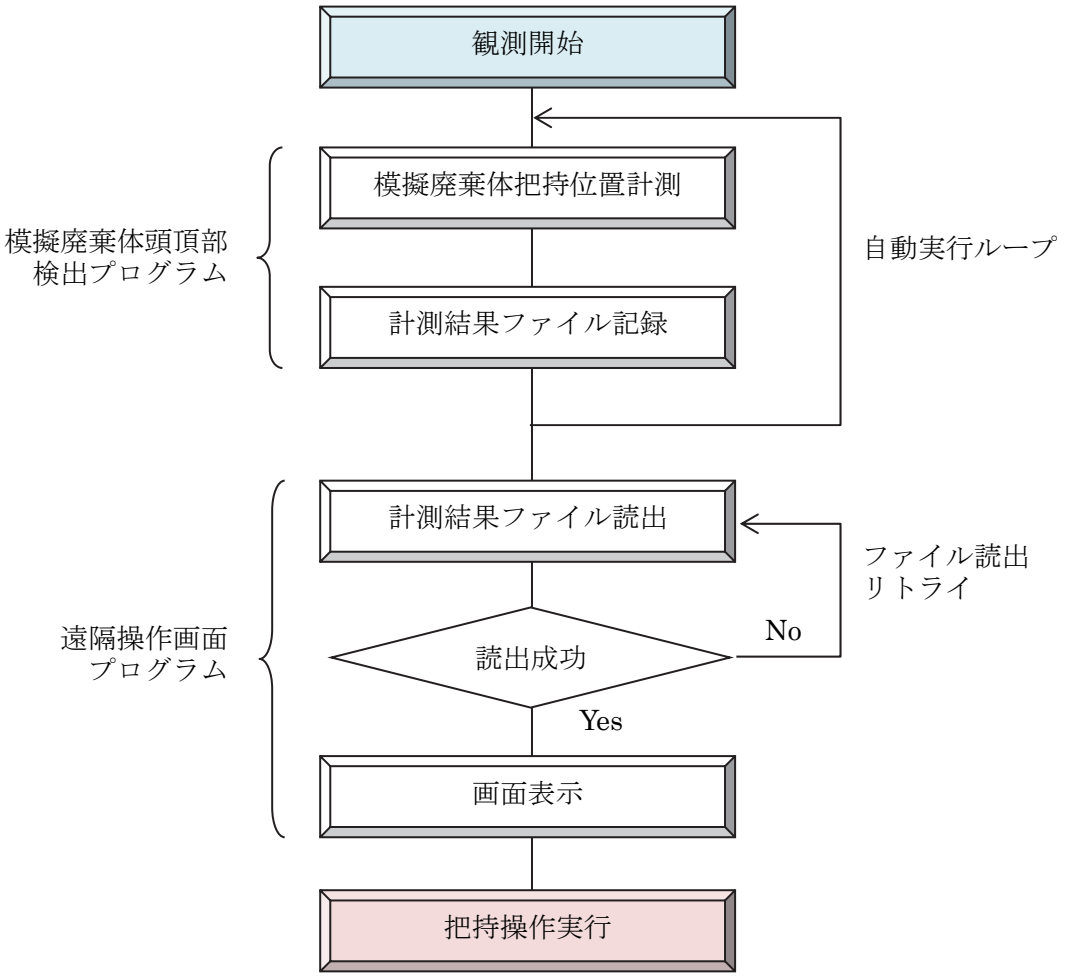


図 2.5.3-1　廃棄体把持機能の改良プログラムフロー図（プログラム設計図）

(2) 3D 観測システムを用いた緩衝材除去形状計測機能

「緩衝材除去形状計測追加機能の整理」、「調査による検証結果」を踏まえた、遠隔操作設備の改良項目に対する設計条件を以下に、プログラムフロー図（プログラム設計図）を図 2.5.3-2 に示す。なお、操作画面インターフェースならびに出力形式は、平成 25 年度のものを引き継ぐものとする。

・3D 観測装置 2 台を用いて形状計測を実施する
・計測結果は自動合成し、計測履歴として保存する
・形状計測結果は、その後のデータ処理に際する利便性を考慮し CAD 形式で保存する

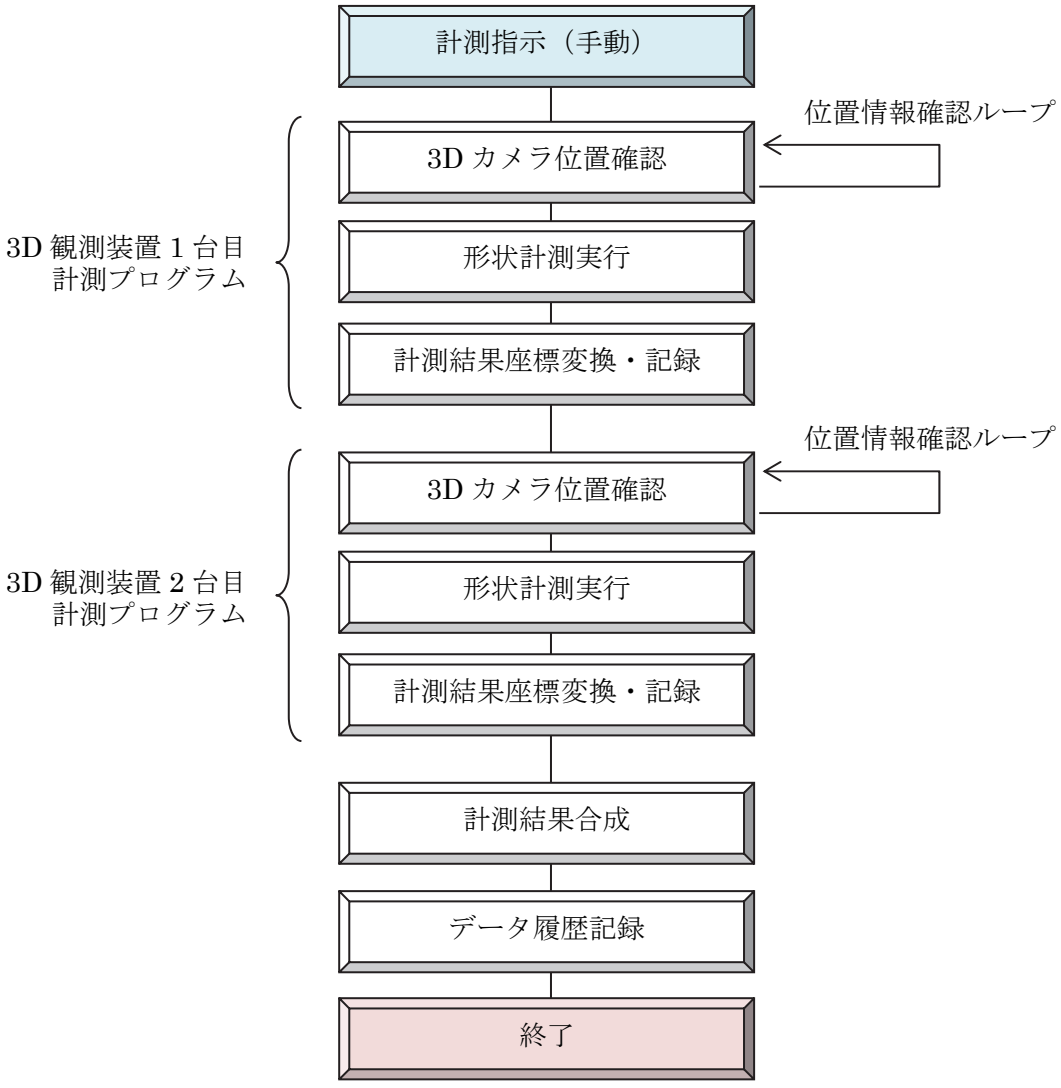


図 2.5.3-2　緩衝材除去形状計測機能の改良プログラムフロー図（プログラム設計図）

3D カメラ位置確認においては、カメラの計測高さ位置を遠隔操作画面制御プログラムから受け取る。情報の受け渡しについては、把持位置計測と同様にファイルベースで実施する。

2.6　改良の実施

2.6.1　スラリー吸引装置

既設のグラウトホース 40A×2 本を補強コード入りサクションホース 80A×1 本に改良した。また、ホース径変更に伴う巻き取り装置の製作も行った。

巻取り装置の工場内検査項目は、①寸法・重量検査、②ホース送出し機能検査、③ホース巻取り機能検査である。なお、判定基準は「平成 24 年度塩水噴射部昇降設備現地検査要領書」にて承認を得ている、JISB0401-1_IT18 に準じた許容公差を用いるものとする。

表 2.6.1-1　寸法許容公差

寸法区分（mm）		許容公差（±）
1　以上	30　以下	3.3
30　を超え	50　以下	3.9
50　を超え	80　以下	4.6
80　を超え	120　以下	5.4
120　を超え	180　以下	6.3
180　を超え	250　以下	7.2
250　を超え	315　以下	8.1
315　を超え	400　以下	8.9
400　を超え	500　以下	9.7
500　を超え	630　以下	11.0
630　を超え	800　以下	12.5
800　を超え	1000　以下	14.0
1000　を超え	1250　以下	16.5
1250　を超え	1600　以下	19.5
1600　を超え	2000　以下	23.0
2000　を超え	2500　以下	28.0
2500　を超え	3150　以下	33.0
3150　以上		対象寸法の 1%

※1mm 以上、3150mm 以下：JIS B0401-1_IT18 に準じる

※3150mm を超える長さ：メーカー社内基準

表 2.6.1-2　重量許容公差

項目	対象物重量	許容公差	備考
組立品の 重量許容公差	100kg 以下	±5%	メーカー社内基準
	100～500kg	±4%	メーカー社内基準
	501～1,000kg	±3%	メーカー社内基準
	1,001kg 以上	±2%	メーカー社内基準

※製缶品を主とした新規開発品の完成品重量公差でメーカー社内基準を採用

2.6.2　巻取り装置の機能確認

改慮した巻取り装置の確認項目について、表 2.6.2-1 に示す。

表 2.6.2-1　巻取り装置確認項目

確認項目		確認方法	判定基準
①巻取り装置寸法・重量	全長	巻取り装置の全長を巻尺にて測定	4,600mm（±46mm）
	全高	巻取り装置の全高を巻尺にて測定	950mm（±14mm）
	スライドストローク（最大）	巻取り装置のスライドストローク（最大）を巻尺にて測定	2,660mm（±33mm）
	重量	巻取り装置の重量を荷重計にて測定	520kg（±16kg）
②ホース送出し機能※1	ホースの引張力	ホース先端の引張荷重を荷重計にて測定	70-100kg※2
③ホース巻取り機能※1	ホースの巻取り性	ホース満水時における巻取り性を目視確認	ホース自重（満水時 42kg）～70kg で巻取り良好であること※3
	ホースのたわみ	ホースドラムを 0 点とし、最大巻上げ時のたわみ最大値を巻尺にて測定	325mm 以下※4

※1）ホース送出し機能、巻取り機能確認時は実作業を想定し、満水状態で確認する。

※2）スプリングバランサー設定荷重 70kg にドラムスライド時の摩擦力と傾きによる抵抗力が加わった値となる。引張力の値が小さい場合には巻取り機能に影響し、値が大きい場合には送出し機能に影響する。スライド動作のスムーズさから 70-100kg を最適値として社内基準値を設定した。

※3）ホース満水時の自重とフランジの荷重を考慮した状態において、巻取り良好、すなわち自動巻取り状態になることを基準として設定した。自動巻取り状態とならない場合には、スプリングバランサーの巻取り能力不足によってホース垂直部（噴射リング直上）にたわみが発生する可能性がある。

※4）巻取り装置内の上側ホースが下側ホースに接触しない距離（650mm）であれば機能上の問題はない。見た目を考慮し、ホース間距離の半分を社内基準値として設定した。

2.6.3　巻取り装置確認結果

改良した巻取り装置について、寸法確認および機能確認試験を行った。以下、確認結果について、表 2.6.3-1～ 表 2.6.3-3 に示す。各項目ともに、判定基準値内であった。

表 2.6.3-1　巻取り装置寸法確認結果

確認項目	判定基準	測定値
全長	4,600mm（±46mm）	4,595mm（-5mm）
全高	950mm（±14mm）	943mm（-7mm）
スライドストローク（最大）	2,660mm（±33mm）	2,659mm（-1mm）
重量	520kg（±16kg）	508kg（-12kg）

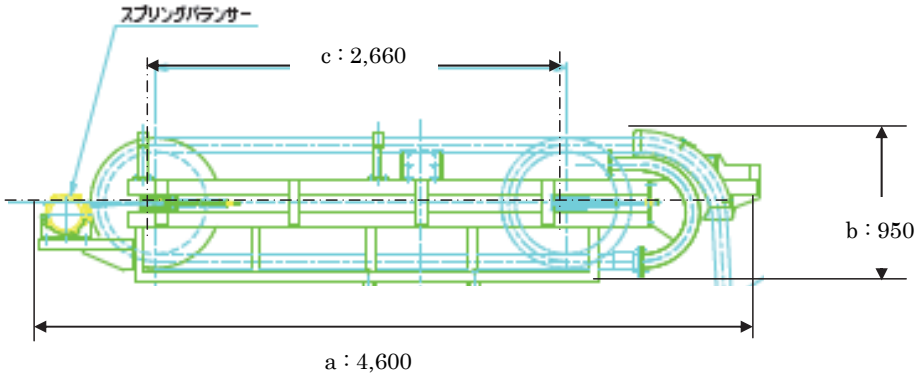


表 2.6.3-2　ホース送出し機能試験結果

確認項目	判定基準	測定値
ホースの引張力	70-100kg	a 75kg
		b 76kg
		c 86kg
		d 88kg
		e 90kg
		f 94kg

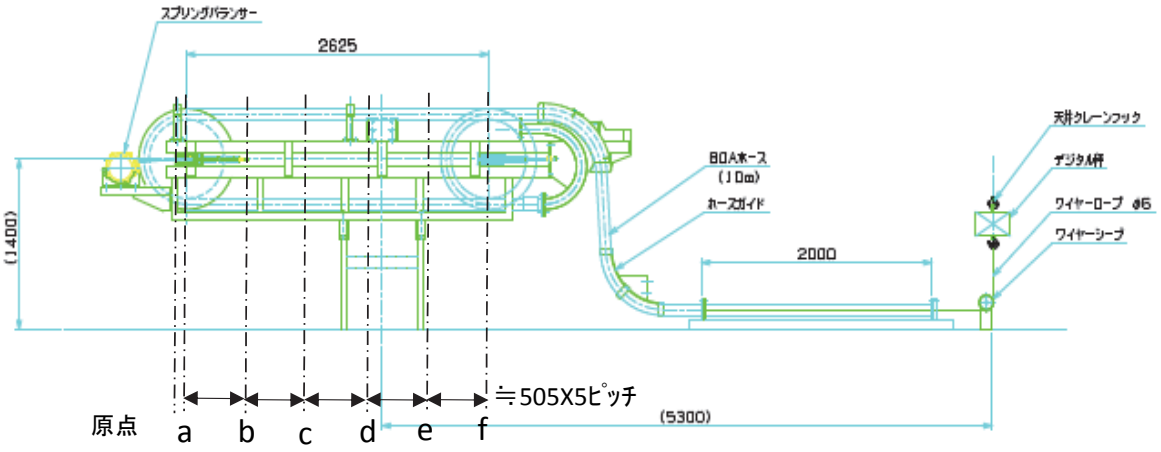


表 2.6.3-3　ホース巻取り機能試験結果

確認項目	判定基準	測定値
ホースの巻取り性	ホース自重（満水時 42kg）～70kg で巻取り良好であること	巻取り良好（ホース満水自重＋フランジ＋α=49kg）
ホースのたわみ	325mm 以下	0mm（最大送出し時）
		0mm（最大巻取り時）

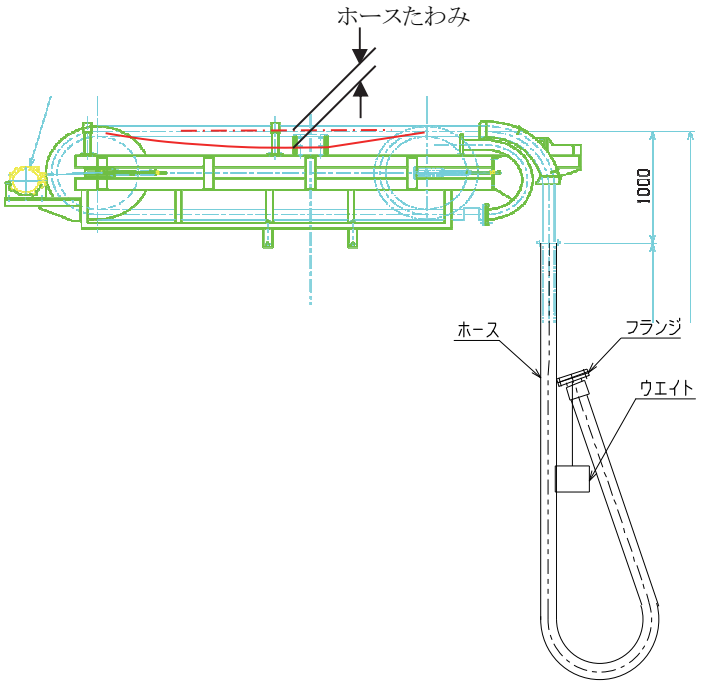


図 2.6.3-1　巻取り装置の完成状況

2.7　緩衝材除去装置の動作確認

装置改良を完了した緩衝材除去装置の動作確認を目的として、噴射・吸引設備、遠隔操作設備の動作に関するデータ取得および検査を実施した。

2.7.1　動作確認検査対象

以下の 2 設備（3 つの装置）である。

①噴射・吸引設備のうち塩水噴射・スラリー吸引装置

②噴射・吸引設備のうち昇降装置

③遠隔操作設備

2.7.2　噴射・吸引設備のうち塩水噴射・スラリー吸引装置の動作確認

塩水噴射・スラリー吸引装置の改良を踏まえた動作確認項目と動作確認方法は表 2.7.2-1 に、検査フローと検査概念を図 2.7.2-1 に示す。なお、動作確認は、遠隔にて実施することにより、塩水噴射・スラリー吸引装置にかかわる遠隔操作設備の動作も合わせて確認する。

表 2.7.2-1　塩水噴射・スラリー吸引装置の動作確認項目と動作確認方法

改良項目	動作確認項目	動作確認方法	判定基準
①スラリー吸引	最大伸長時、揺動時の吸引量	流量計及び水槽貯水による吸引流量測定	・250L/min 以上（吸引流量が噴射流量 250L/min を上回ること）
	吸引ホースの変形	目視による確認	・吸引流量を損なうほどの吸引ホース変形の有無
②噴射部揺動	揺動角度	地上に簡易定規を設置して揺動角を確認する	・揺動角：左右 45±2 度
	揺動速度	揺動往復 3 回の時間を測定し周速度に換算	・周速度 0.6m/min で安定した速度を維持できること
③遠隔動作	遠隔動作機能	上記すべての動作を遠隔操作で実施	・各動作とも遠隔で操作できること

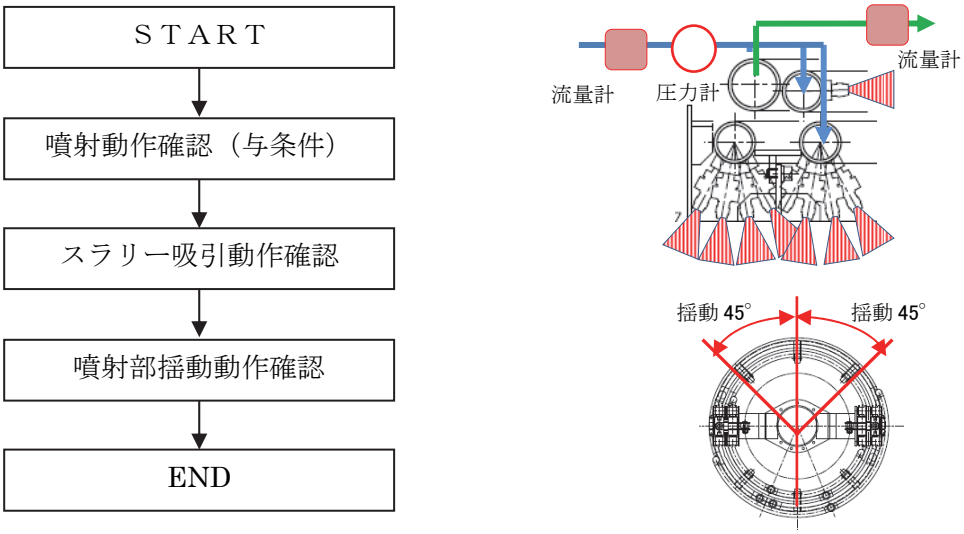


図 2.7.2-1　塩水噴射・スラリー吸引装置の動作確認検査フローおよび検査概念

①スラリー吸引

吸引ホースの改良、巻取装置の改良に伴う吸引流量の改良効果を確認する。試験は圧力損失がもっとも大きくなる条件、すなわち昇降装置の最大伸長時において揺動動作を伴って実施する。なお、塩水噴射は改良を伴わないが、与条件として噴射流量が仕様の 250L/min で噴射できていることを確認する。

②噴射部揺動

吸引ホースの改良、巻取装置の改良、揺動トルクの改良に伴う、揺動動作を確認する。揺動速度は引張力がもっとも大きくなる条件、すなわち昇降装置の最大伸長時において確認する。

③遠隔動作

スラリー吸引、噴射部揺動がすべて遠隔操作で実施できることを確認する。

2.7.3　噴射・吸引設備のうち昇降装置の動作確認

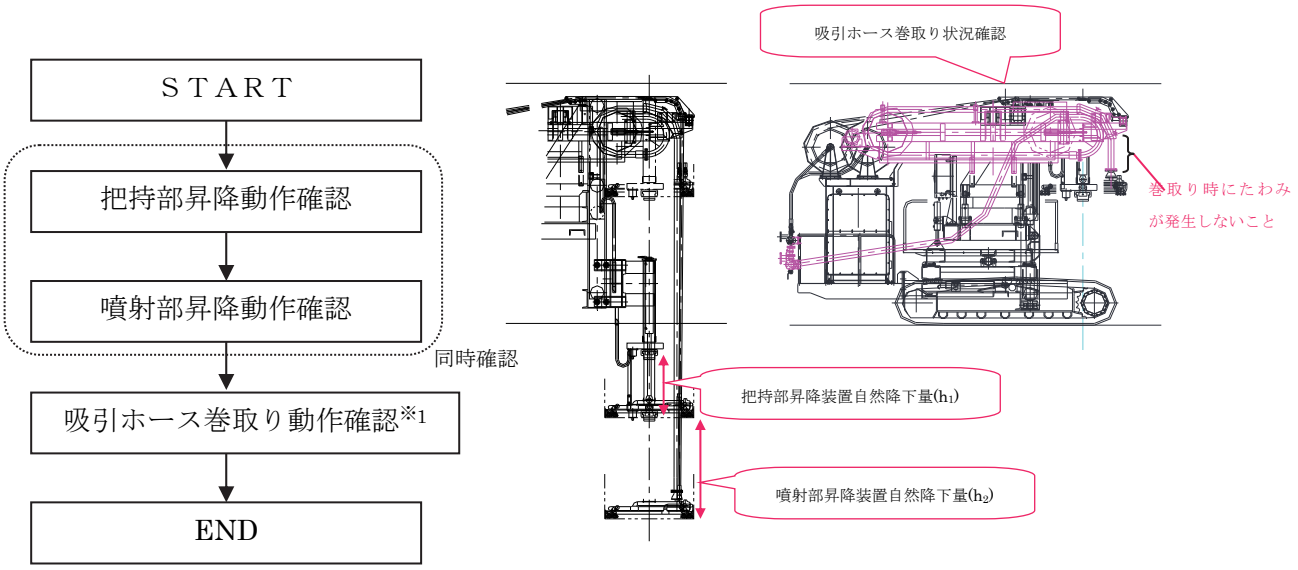
昇降装置の改良項目を踏まえ、動作確認項目と動作確認方法を表 2.7.3-1 に、動作確認方法を図 2.7.3-2 に示す。なお、動作確認は、遠隔にて実施することにより、昇降装置にかかわる遠隔操作設備の動作を確認する。

表 2.7.3-1　昇降装置の動作確認項目と動作確認方法

改良項目	動作確認項目	動作確認方法	判定基準
①把持部昇降	最大伸長時付近※1、揺動時の自然降下量	エンコーダーによる降下量（h_1）を測定	・昇降装置全体の降下量 10mm/h 以下 (全体の降下量 $h=h_1+h_2$)
②噴射部昇降	最大伸長時付近※1、揺動時の自然降下量	エンコーダーによる降下量(h_2)を測定※2	
③吸引ホース巻取り	吸引ホース巻取り動作	目視による確認	・吸引ホース巻取り時のホースのたわみの有無
④遠隔動作	遠隔動作確認	上記すべての動作を遠隔操作で実施	・各動作とも遠隔で操作できること

※1）最大伸長時では自然降下量が測定できないため試験は少し上昇させた位置から開始する

※2）噴射部昇降におけるエンコーダーの表示値(h)は GL からの絶対量であるため、把持部昇降における自然降下量(h_1)との差から h_2 を求める。



※1）昇降装置を上下させた際の、吸引ホースの巻取り動作を確認する。定量的な判定基準がないため、昇降装置を上下させた際の吸引ホースの巻取り状況を目視で確認する。

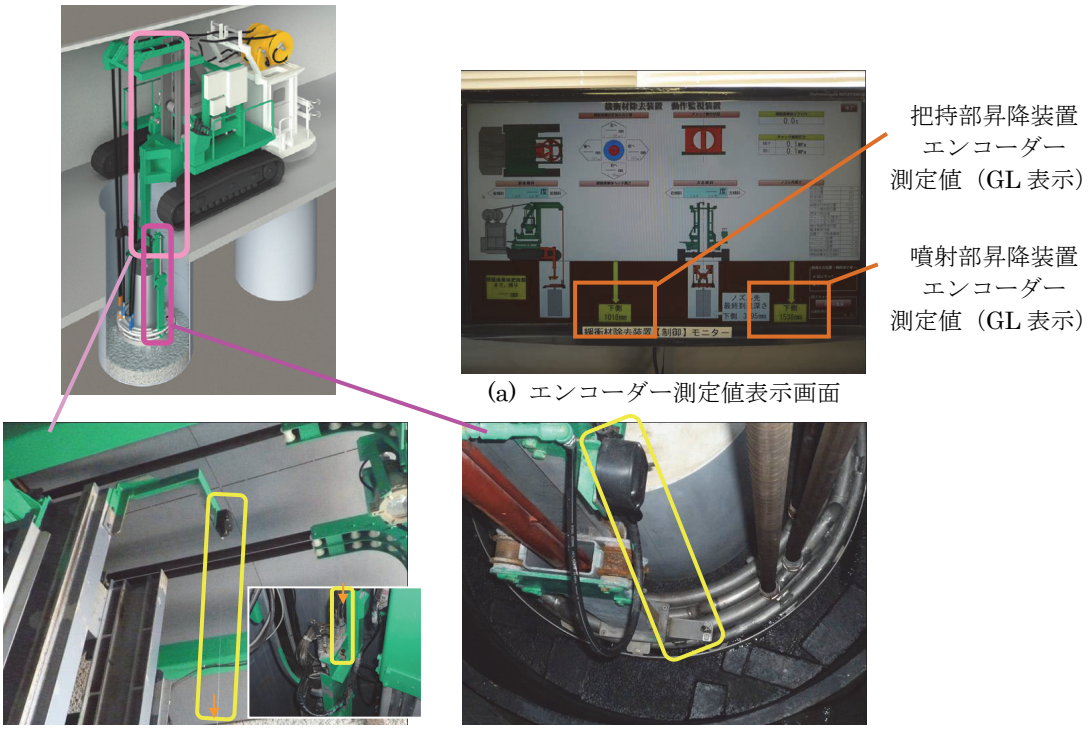
図 2.7.3-1　昇降装置の動作確認検査フローおよび検査概念

①把持部昇降および②噴射部昇降

把持部昇降装置および噴射部昇降装置の改良に伴う装置全体の自然降下量の改良効果を確認する。試験は荷重がもっとも大きくなる条件、すなわち昇降装置の最大伸長時において噴射動作および揺動動作を伴って実施する。

③遠隔動作

把持部昇降および噴射部昇降がすべて遠隔操作できることを確認する。



(a) エンコーダー測定値表示画面

(b) 把持部昇降装置エンコーダー

(c) 噴射部昇降装置エンコーダー

図 2.7.3-2　昇降装置の動作確認例

2.7.4　遠隔操作設備の動作確認検査方法

遠隔操作設備の改良項目を踏まえ、動作確認項目と動作確認方法を表 2.7.4-1 に、動作確認方法を図 2.7.4-1 に示す。

表 2.7.4-1　遠隔操作設備の動作確認項目と動作確認方法

改良項目	動作確認項目	動作確認方法	判定基準
3D 観測システム	①廃棄体把持部の自動連続計測	計測画面と操作画面のデータ連携確認	・データ連携 10 秒以内 ・エラー時のリトライ機能の実行
		計測画面での自動連続計測確認	・自動連続計測の実行
	②形状計測	模擬廃棄体を配置し、計測出力確認	・3D 観測装置の 2 台計測および自動合成の実行 ・AutoCAD 読取り可能形式保存の実行

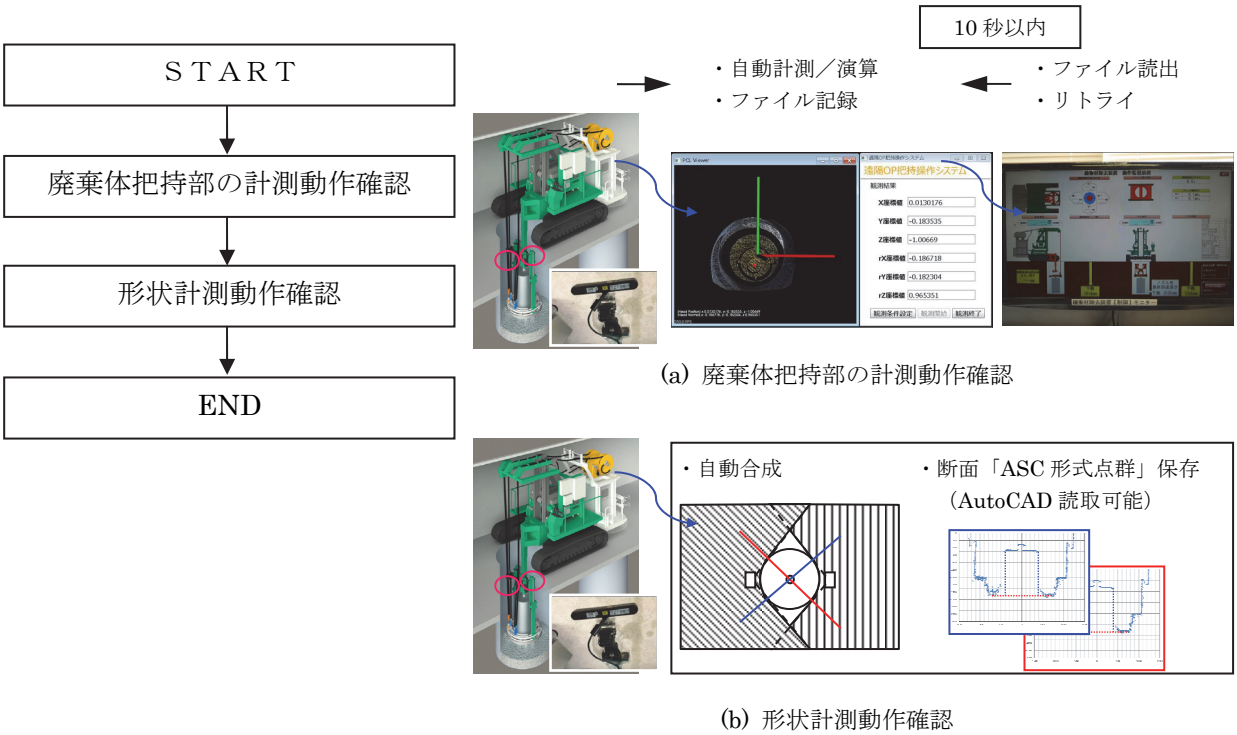


図 2.7.4-1　遠隔操作設備の動作確認検査フローおよび検査概念

①廃棄体把持部の自動連続計測

模擬処分孔に模擬廃棄体を設置し、動作試験を実施する。試験は模擬廃棄体把持部計測から模擬廃棄体把持までの一連の動作を実施し確認する。

②形状計測

模擬処分孔に実際の緩衝材と同程度の位置となるように容器を設置する。さらに容器中央部には模擬廃棄体を設置し、形状計測を実施する。

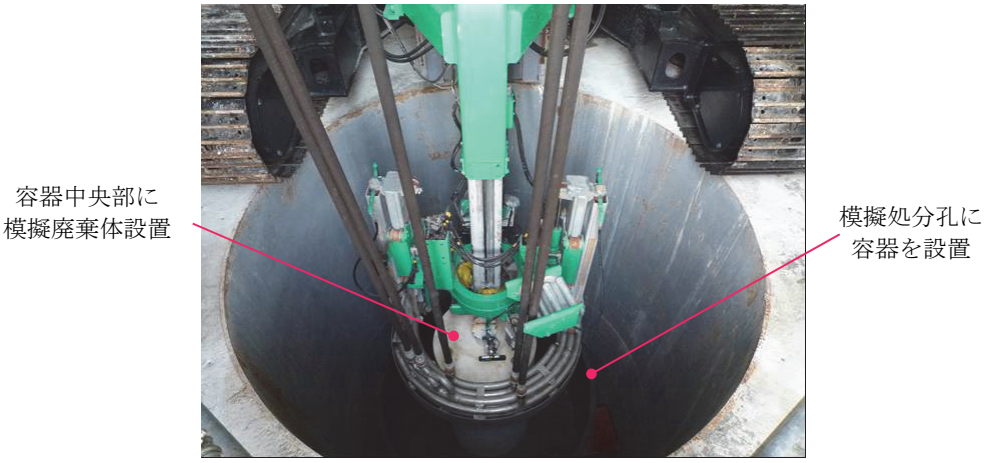


図 2.7.4-2　遠隔操作設備の動作確認例（3D 観測装置側の構成）

2.8　動作確認結果

動作確認検査の結果を以下にまとめる。

2.8.1　噴射・吸引設備のうち塩水噴射・スラリー吸引装置の動作

噴射・吸引設備のうち、塩水噴射・スラリー吸引装置の各機能は、全ての判定基準を満足していることを確認した。

表 2.8.1-1　塩水噴射・スラリー吸引装置の動作確認項目一覧

動作確認項目	動作確認方法	判定基準	測定値
スラリー吸引量	流量計及び水槽貯水による吸引流量測定	250L/min 以上 （吸引流量が噴射流量 250L/min を上回ること）	流量計 300L/min 水槽貯水 300.1L/min （3 回平均）
吸引ホースの変形	目視による確認	吸引流量を損なうほどの吸引ホース変形の有無	変形は認められず
揺動角度	地上に簡易定規を設置して揺動角を確認する。	揺動角：左右 45±2 度	44.3 度 （測定角度 88.6 度/2）
揺動速度	揺動往復 3 回の時間を測定し周速度に換算	周速度 0.6m/min で安定した速度を維持できること	往復 3 回 0.59m/min
遠隔動作機能	上記すべての動作を遠隔操作で実施	各動作とも遠隔で操作できること	遠隔操作可能

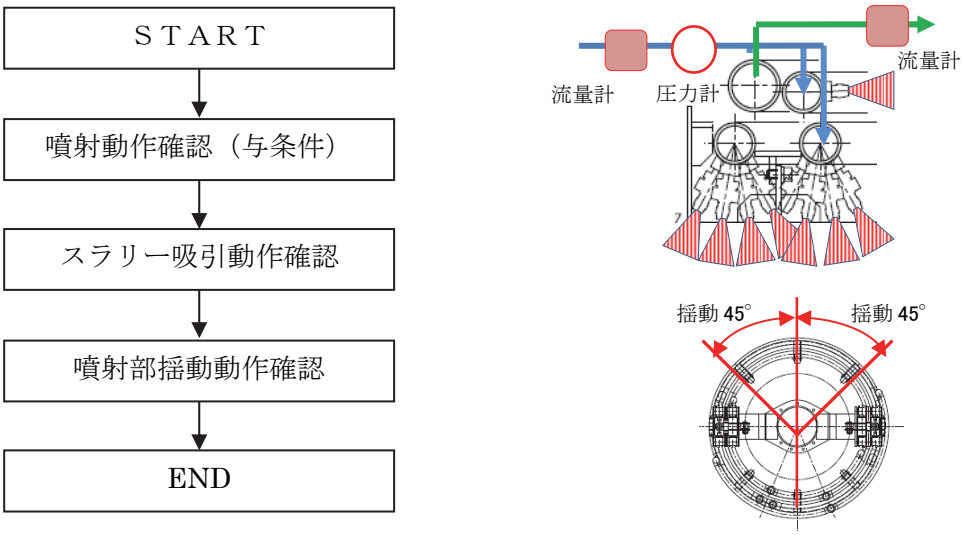


図 2.8.1-1　塩水噴射・スラリー吸引装置の動作確認フロー

2.8.2　噴射・吸引設備のうち昇降装置の動作

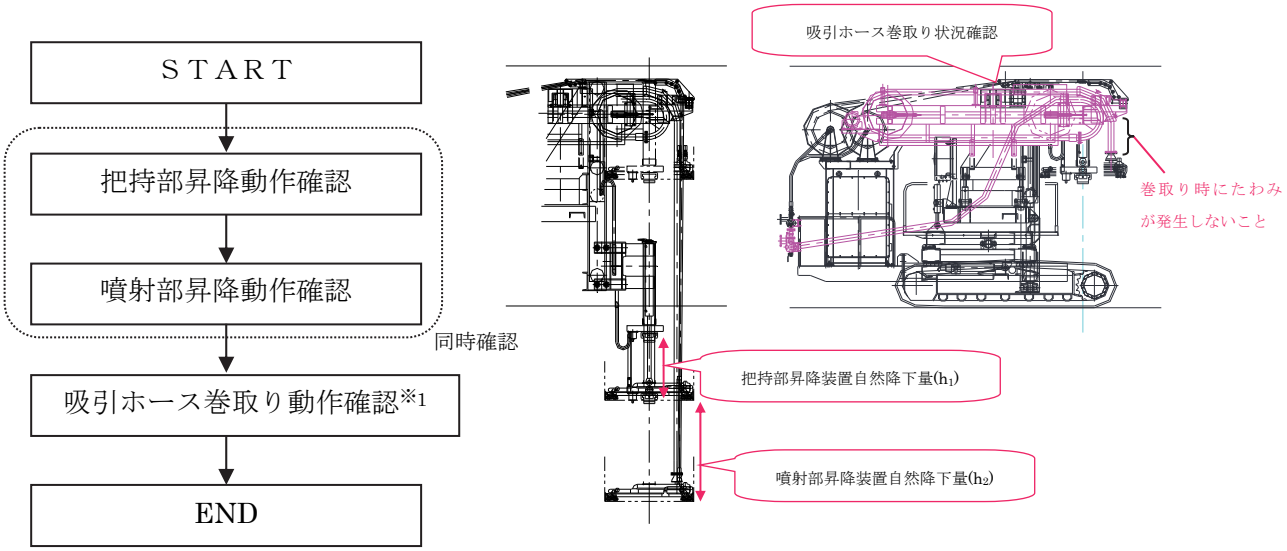
噴射・吸引設備のうち、昇降装置の各機能は、全ての判定基準を満足していることを確認した。

表 2.8.2-1　昇降装置の動作確認項目一覧

動作確認項目	動作確認方法	判定基準	測定値
把持部昇降装置自然降下量※1	エンコーダーによる降下量（h_1）を測定	昇降装置全体の降下量 10mm/h 以下（全体の降下量 $h=h_1+h_2$）	h=3mm h_1=1mm h_2=2mm
噴射部昇降装置自然降下量※1	エンコーダーによる降下量（h_2）を測定※2		
吸引ホース巻取り動作	目視による確認	吸引ホース巻取り時のホースのたわみの有無	たわみなく巻取り可能
遠隔動作機能	上記すべての動作を遠隔操作で実施	各動作とも遠隔で操作できること	遠隔操作可能

※1）最大伸長時では自然降下量が測定できないため試験は少し上昇させた位置から開始する

※2）噴射部昇降におけるエンコーダーの表示値(h)は GL からの絶対量であるため、把持部昇降における自然降下量(h_1)との差から h_2 を求める。



※1）昇降装置を上下させた際の、吸引ホースの巻取り動作を確認する。定量的な判定基準がないため、昇降装置を上下させた際の吸引ホースの巻取り状況を目視で確認する。

図 2.8.2-1　の昇降装置の動作確認フロー

表 2.8.2-2　昇降装置の自然降下量測定結果（改良後）

測定時間	操作画面読み値（GL−）mm		自然降下量		
(min)	把持部	スタビライザー先端	昇降装置全体	把持部昇降装置	噴射部昇降装置
	H1	H	h	h_1	$h_2=(h-h_1)$
0	1,389	3,019	0	0	0
10	1,390	3,020	1	1	0
20	1,390	3,020	1	1	0
30	1,390	3,021	2	1	1
40	1,390	3,021	2	1	1
50	1,390	3,021	2	1	1
60	1,390	3,022	3	1	2

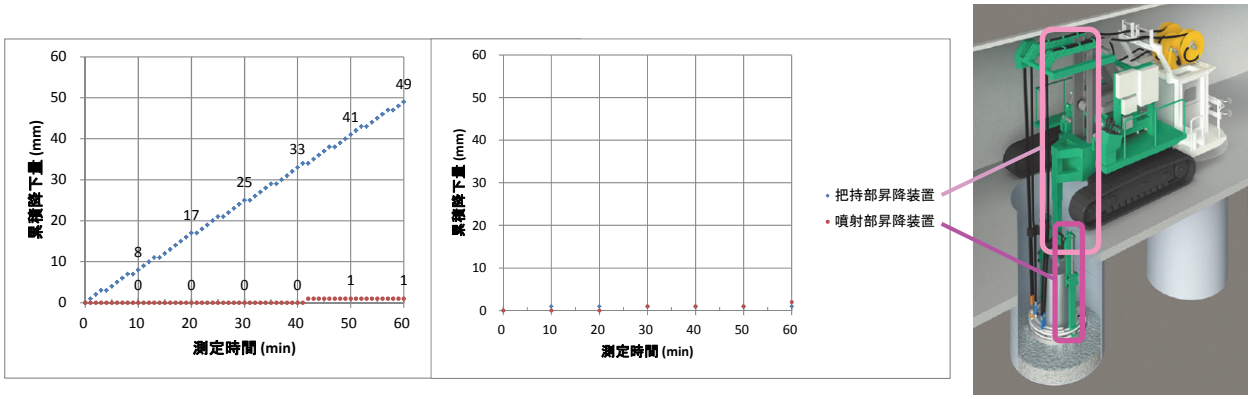


図 2.8.2-2　昇降装置の自然降下量（左：改良前　右：改良後）

2.8.3　遠隔操作設備の動作

遠隔操作設備の各機能は、全ての判定基準を満足していることを確認した。

表 2.8.3-1　遠隔操作設備の動作確認項目一覧

動作確認項目	動作確認方法	判定基準	測定値
廃棄体把持部の自動連続計測	計測画面と操作画面のデータ連携確認	・データ連携 10 秒以内 ・エラー時のリトライ機能の実行	・データ連携瞬時 ・リトライ機能実行確認
	計測画面での自動連続計測確認	自動連続計測の実行	自動連続計測の実行確認
形状計測	模擬廃棄体を配置し、計測出力確認	・3D 観測装置の 2 台計測および自動合成の実行 ・AutoCAD 読取り可能形式保存の実行	・2 台計測および自動合成の実行確認 ・「ASC 形式点群」保存確認

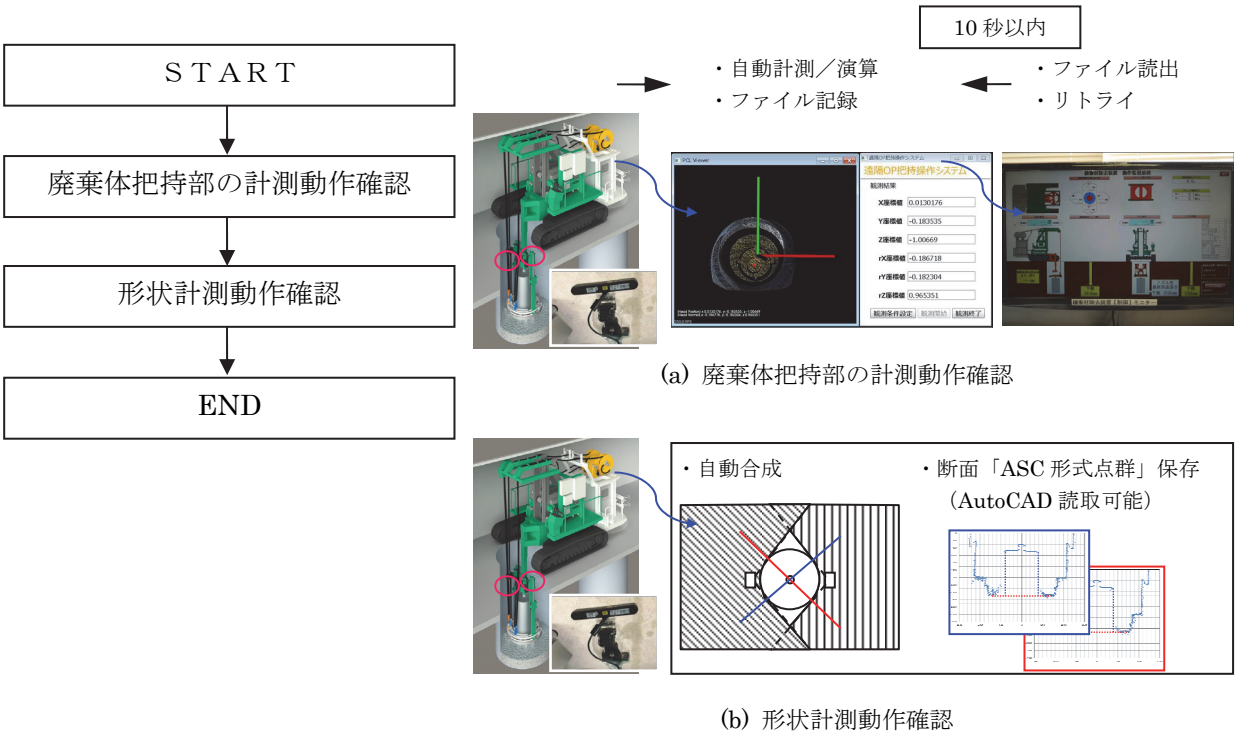
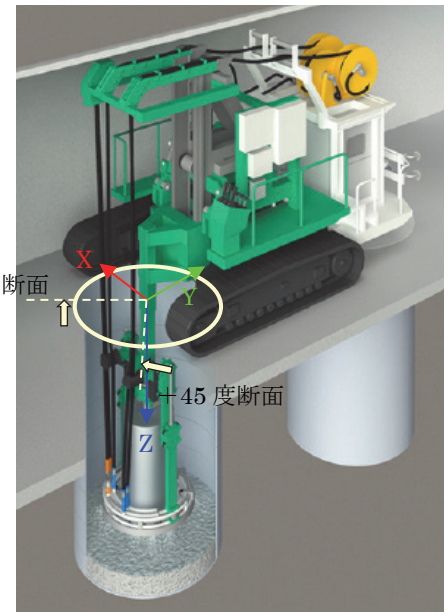
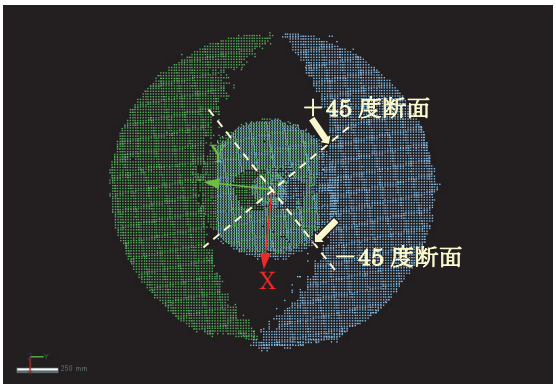


図 2.8.3-1　遠隔操作設備の動作確認フロー

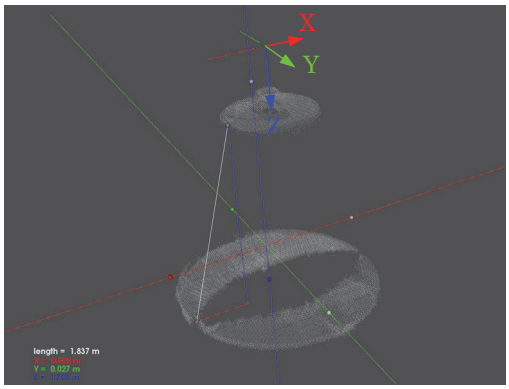
（１）X 軸、Y 軸、Z 軸の説明



（２）3D 観測装置の 2 台計測自動合成結果

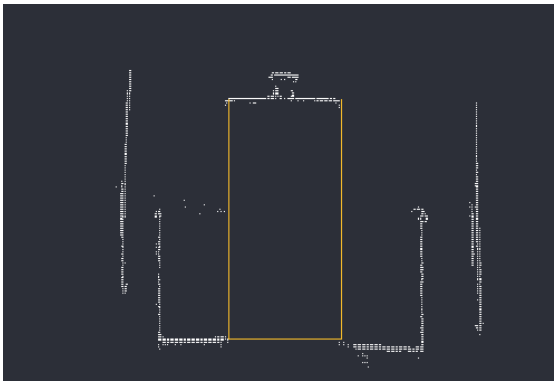


(a) 平面表示
（2 台の 3D 観測装置計測結果を色分け）

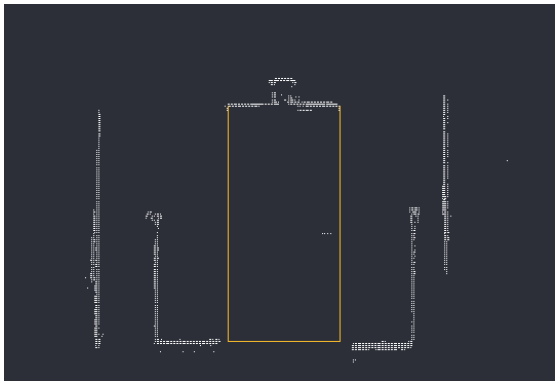


(b) 3 次元表示

（３）AutoCAD 出力断面図（黄色：模擬廃棄体寸法 φ820・H1,730 を上書き）



(a) ＋45 度断面



(b) －45 度断面

図 2.8.3-2　遠隔操作設備の動作確認検査結果

2.9 まとめ

緩衝材除去装置の改良では、「総合動作確認」を滞りなく実施するため、平成 25 年度までの課題に対して、「原因調査・設計」、「改良」、「動作確認」の 3 つの段階を設け改良を行った。ここでは、各段階における実施内容及びその成果について取りまとめる。

2.9.1 緩衝材除去装置の原因調査・設計

- 噴射・吸引設備（塩水噴射・スラリー吸引装置、および昇降設備）、遠隔操作設備（3D 観測システム）について、発生原因の調査を実施し、改良項目の抽出を実施し、それぞれの改良項目に対する改良方法を選定し設計を行った。また、各設備・装置の改良に伴う、関連設備・装置への影響についても検討した。

表 2.9.1-1 緩衝材除去システムを構成する各設備の改良

	評価項目	各設備の改良
課題の整理	緩衝材除去機能の安定性	(1) 噴射・吸引設備のうち塩水噴射・スラリー吸引装置の改良 設計条件：スラリー吸引流量 0.25m³/min 以上の確保およびスラリー吸引装置改良に伴うその他装置の機能低下防止 ・吸引ホースの改良（40A×2 本→補強コード入り 80A×1 本） ・吸引ノズルの増加（16 ノズル→24 ノズル） ・吸引ホース巻取り装置の改良 ・揺動トルクの改良（トルク力アップ） ・重心変更に伴う機体の安定性評価（問題なし）、走行力評価（問題なし）
	緩衝材除去機能の安定性 オペレーターの遠隔操作性	(2) 噴射・吸引設備のうち昇降装置の改良 設計条件：自然降下量 10mm/h 以下 ・噴射部昇降油圧回路の改良（シャットオフバルブ追加） ・把持部昇降油圧回路の改良（シャットオフバルブ追加）
	装置・設備の安全性 オペレーターの遠隔操作性	(3) 遠隔操作設備の改良 設計条件：廃棄体の把持自動連続計測 ・ファイル方式によるデータ連携（リトライ機能付き） ・連続計測アプリケーションの自動実行ループの制作 設計条件：緩衝材除去形状取得範囲の拡大、取得データの即時確認 ・3D 観測装置 2 台計測および自動合成 ・形状計測結果の ASC 形式点群保存（AutoCAD 読取可能形式）

2.9.2 緩衝材除去装置の改良

- 噴射・吸引設備の改良にあたっては、装置全体の組立段階における不適合発生を防ぐことを目的に、工場における装置改良段階での動作確認を繰返し実施した。調整作業後、工場内検査において各装置・動作に設けた基準をすべて満足することを確認し、装置全体の組立現場へ輸送、組立を完了した。

図 2.9.2-1　噴射・吸引設備の改良後全景

2.9.3　緩衝材除去装置の動作確認

- 噴射・吸引設備のうち塩水噴射・スラリー吸引装置については、スラリー吸引量、吸引ホースの変形、揺動角度、揺動速度、遠隔動作を主たる動作確認項目とし、それぞれに設けた判定基準をすべて満足することを確認した。
- 噴射・吸引設備のうち昇降装置については、把持部昇降装置自然降下量、噴射部昇降装置自然降下量、吸引ホース巻取り動作、遠隔動作を主たる動作確認項目とし、それぞれに設けた判定基準をすべて満足することを確認した。
- 遠隔操作設備のうち 3D 観測システムについては、廃棄体把持部の自動連続計測、形状計測を主たる動作確認項目とし、それぞれに設けた判定基準をすべて満足することを確認した。

第3章　緩衝材除去システムの総合動作確認

第 2 章で改良を実施した緩衝材除去システムの総合動作確認を目的とし、地上にて実規模スケールでの緩衝材除去試験（以下、本試験）を行った。本試験では、緩衝材の除去機能、緩衝材除去システムの成立性、操作性について確認した。さらに、異なる特性を有する緩衝材に対して緩衝材除去システムの適用性を確認した。地下環境への展開性については第 4 章にて確認する。

3.1　試験対象

本試験では、緩衝材除去システムを用いて緩衝材除去を実施し、緩衝材除去に係わるシステム機能を確認する(表 3.1-1)。

表 3.1-1　緩衝材除去システムの構成

緩衝材除去システム			
構成設備	噴射・吸引設備	塩水リユース設備	遠隔操作設備
構成装置 （機能）	・油圧ユニット ・走行装置 ・昇降装置 ・把持装置 ・塩水噴射・スラリー吸引装置	・吸引ポンプ ・噴射ポンプ ・一時回収槽 ・固液分離槽 ・成分調整槽 ・水供給槽 ・塩水補給槽 ・塩水貯留槽 ・緊急貯留槽	・操作制御装置 ・操作監視装置

3.1.1　試験ケース

廃棄体回収の作業では、緩衝材除去システム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 3.1.1-1)。本試験では、実際の緩衝材除去作業を再現し、緩衝材除去システムに関する以下の項目を確認した。

・噴射・吸引設備の廃棄体把持特性および除去した緩衝材形状
・噴射・吸引設備の塩水噴射・スラリー吸引特性
・塩水リユース設備に関する特性
・遠隔操作によるシステムの動作

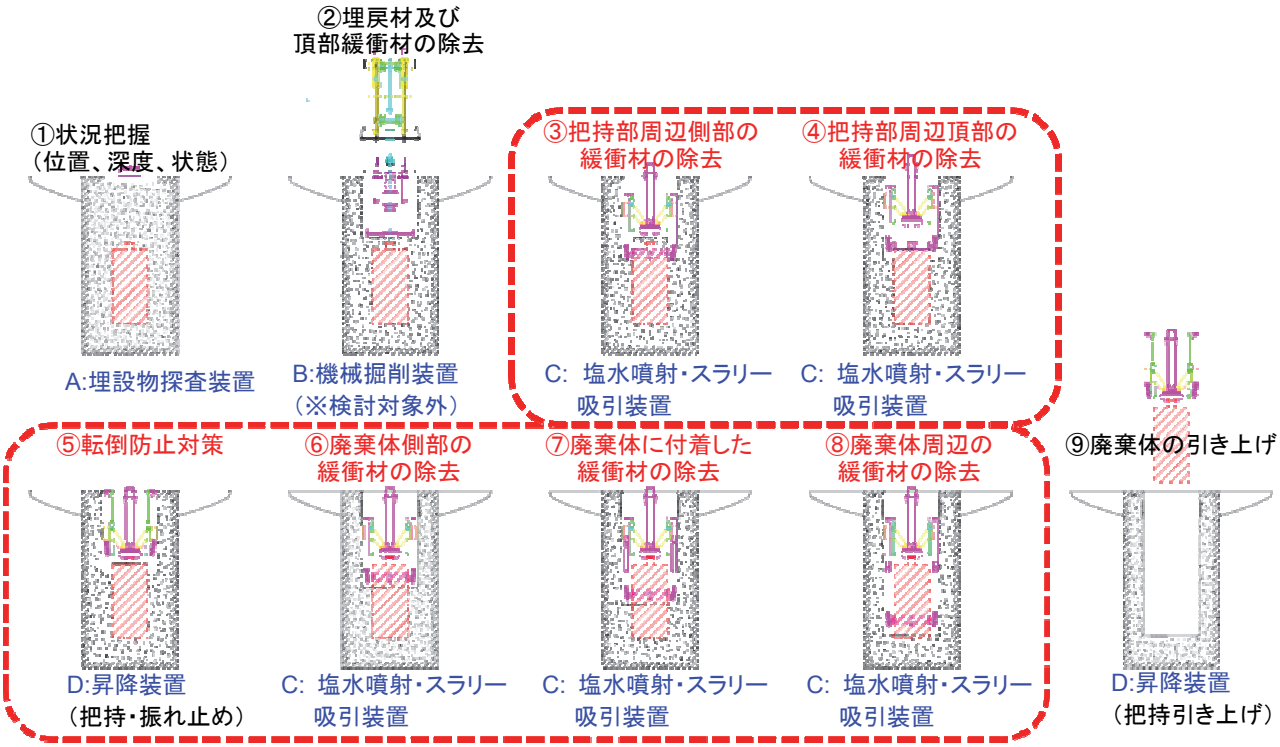


図 3.1.1-1　廃棄体回収作業のうち緩衝材除去の位置づけ

平成 25 年度は、模擬廃棄体頂部の緩衝材（ケース 1）と模擬廃棄体側方下部の緩衝材（ケース 2）を対象に 2 ケースの除去試験を実施し、緩衝材除去システムの機能を確認した[1]。本年度は、図 3.1.1-2 に示すように模擬廃棄体頂部から側方下部までの緩衝材を、物理的連続性をもって除去し、安全に緩衝材除去ができることおよび緩衝材除去システムの機能について確認した。このうち緩衝材除去効率については H25 年度の緩衝材除去試験のデータを比較検討した。

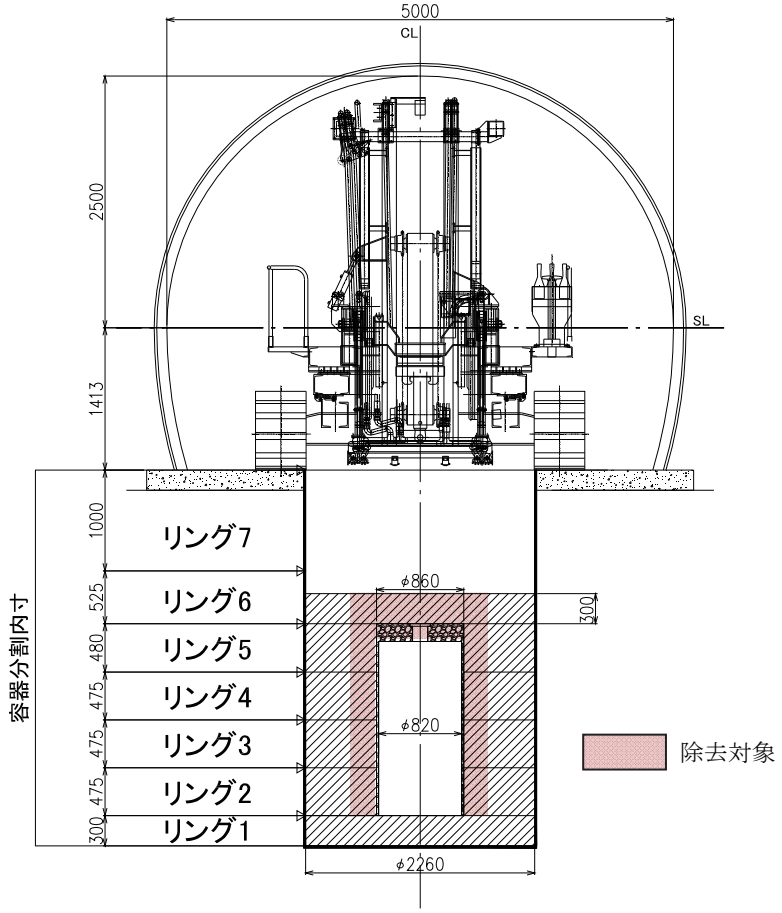


図 3.1.1-2　試験ケースの概念

3.1.2　取得特性

緩衝材除去システムの総合動作確認に向けて、各設備に求められる機能を踏まえ、緩衝材除去試験で取得する特性を抽出するとともに、データ取得方法を検討した。検討結果を表 3.1.2-1 に示す。ここで、緩衝材除去システムの改良に伴う動作確認については、本試験よりも前に別途動作確認を行った（第 2 章参照）。

表 3.1.2-1　緩衝材除去試験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	設備
①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・吸引設備
		噴射圧力	圧力計	噴射・吸引設備
		噴射時間（運転時間）	時間計測	噴射・吸引設備
	スラリー吸引機能	吸引流量	流量計	噴射・吸引設備
	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	塩水リユース設備
		供給圧力	圧力計	塩水リユース設備
		吸引流量	流量計	塩水リユース設備
		吸引圧力	圧力計	塩水リユース設備
	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	塩水リユース設備
		リユース前後の塩水の SS 濃度（浮遊物質濃度）	SS 濃度計	塩水リユース設備
②緩衝材除去特性	緩衝材除去機能	緩衝材除去形状	3D スキャナ等※1	噴射・吸引設備
		緩衝材除去量	重量計測※2	噴射・吸引設備
	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※3	噴射・吸引設備
		噴射位置（平面）※4	揺動状況、緩衝材除去形状	噴射・吸引設備
	廃棄体把持機能	把持力	ひずみ計	噴射・吸引設備
③遠隔による操作性	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	遠隔操作設備
	データ取得機能	各種データ	ライブデータ※5	遠隔操作設備

※1：3D スキャナーは水面下では測定不可能であるため、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：昇降装置のストロークおよびスタビライザーとスラリー吸引口の関係から、緩衝材除去中の底面位置を把握する。また、塩水噴射位置移動速度は、運転時間と噴射位置の関係から求める。
※4：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。
※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。

3.1.3　試験条件

緩衝材除去試験の試験条件を表 3.1.3-1 に示す。今回の緩衝材除去試験では、下向きノズルのみを使用し実験を実施した。

表 3.1.3-1　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」[2]に準拠
緩衝材	直径　2,260mm 高さ※　円盤型：300mm 中空型：1,905mm ベントナイト:ケイ砂=70：30 密度　1.6Mg/m^3 飽和度　60%程度	・「HLW 第 2 次取りまとめ」に準拠 ・「H25 回収高度化」[1]の緩衝材除去試験と同等仕様 ・模擬廃棄体頂部は円盤型、側部は中空型（模擬廃棄体設置部を有する）の緩衝材
塩水噴射条件	噴射圧力　0.6MPa±0.5% 噴射流量　15m^3/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	・「H25 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^3/h 以上	・「H25 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）

3.1.4　試験場の整備

地上において緩衝材除去試験を実施するにあたり、必要な設備として、試験場所、模擬処分孔、付帯設備の整備および電源（配線を含む）、給水および排水設備、遠隔操作設備を設置する遠隔操作室、試験に使用した緩衝材や塩水を適切に保管できる容器、試験資材の仮置スペースなどの整備を行った。

試験設備は、「H25 回収高度化」の成果（図 3.1.4-1）を基本とし、図 3.1.4-2、図 3.1.4-3 に示す設備を用意した。

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。

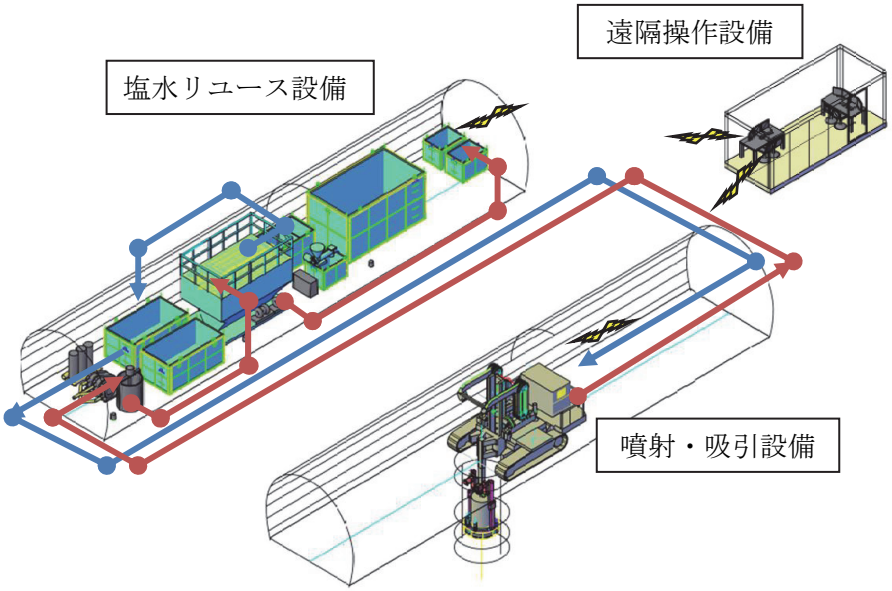


図 3.1.4-1　試験全体イメージ（緩衝材除去による機能確認試験）

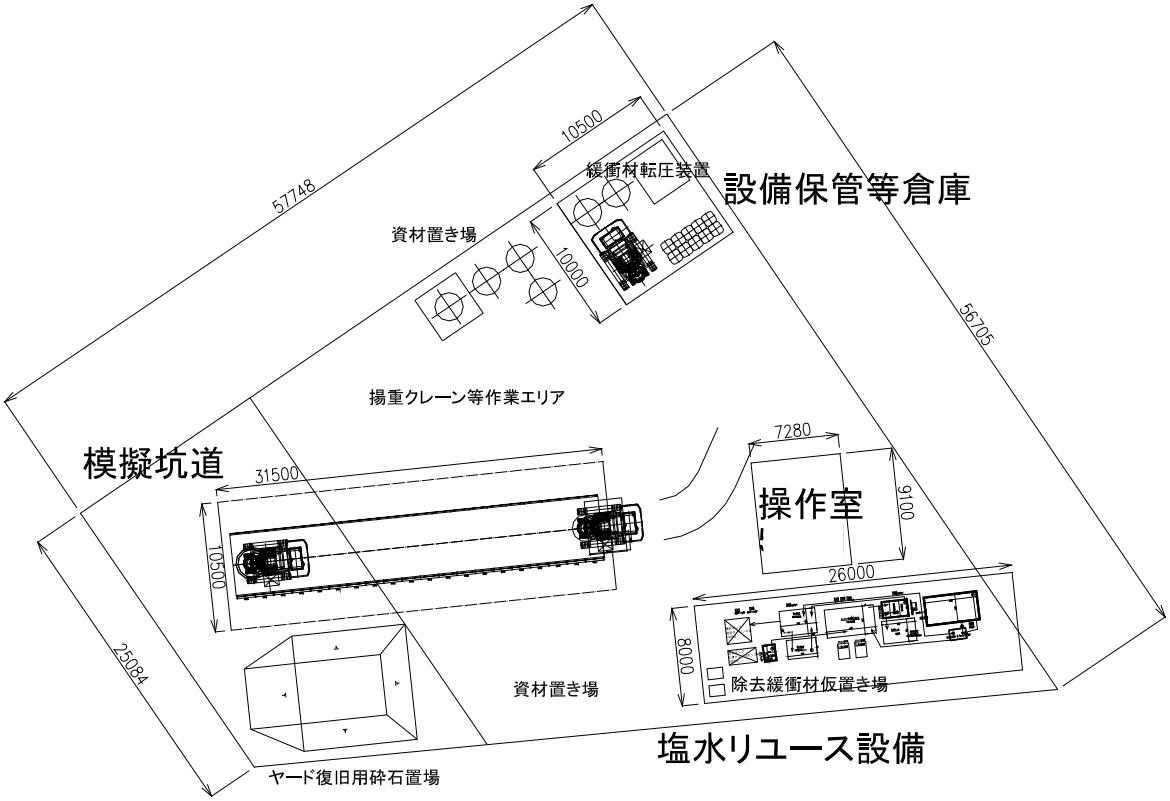


図 3.1.4-2　試験設備配置

図 3.1.4-3　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・竪置き処分概念のものとし、処分孔サイズは竪置きの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。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 3.1.4-1 および図 3.1.4-4、図 3.1.4-5）。

表 3.1.4-1　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 3.1.4-4　模擬処分坑道および模擬処分孔

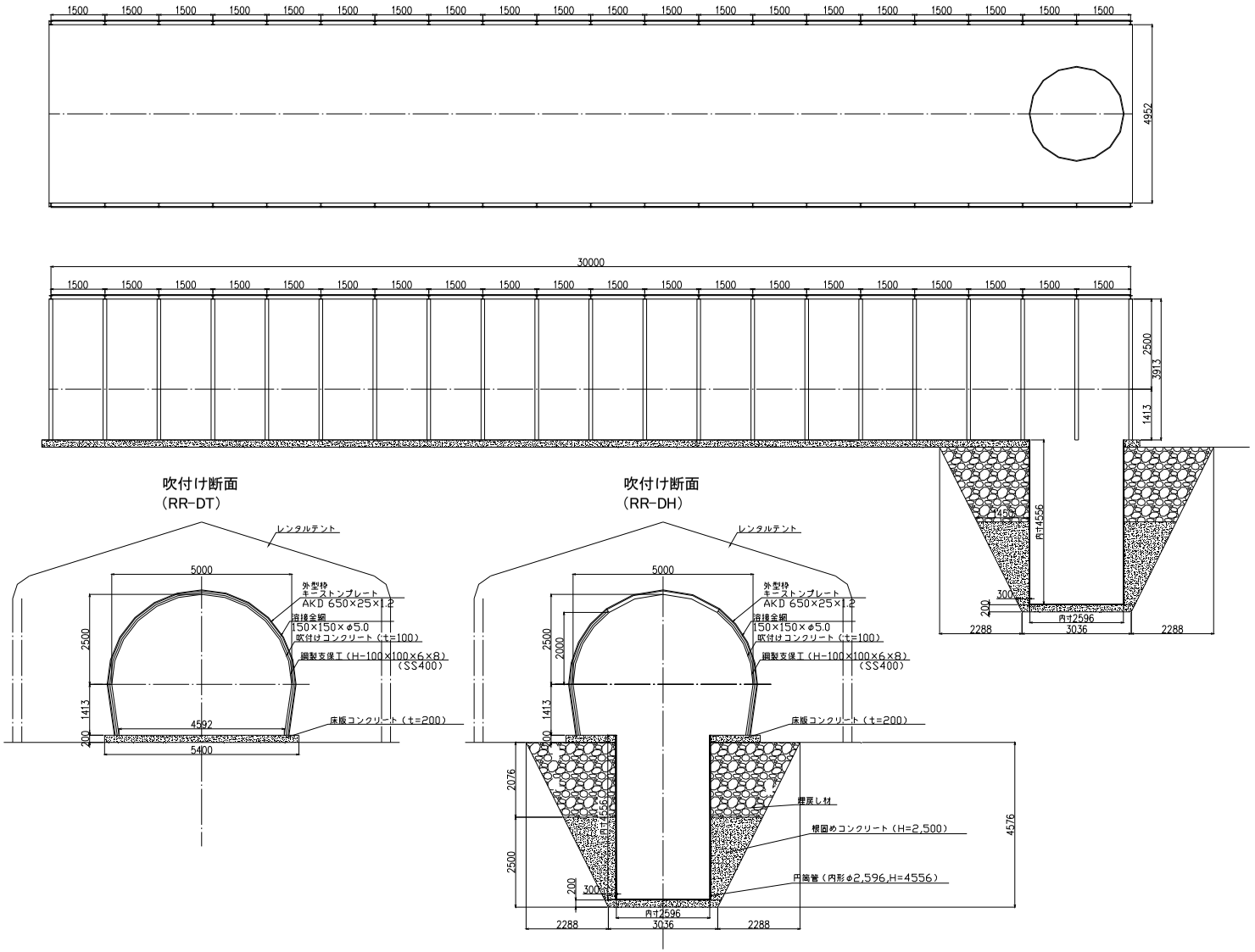


図 3.1.4-5　模擬処分孔および模擬処分坑道に用いる試験設備の詳細構造

(2) 遠隔操作室

本試験のデータ取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た図 3.1.4-6）。

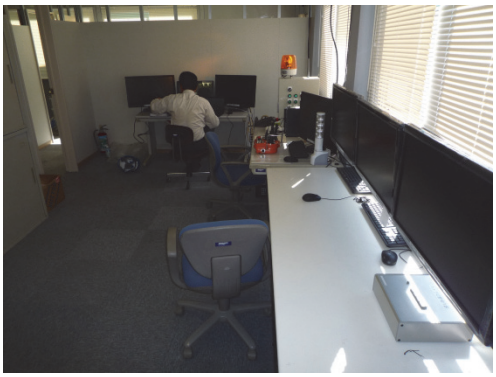


図 3.1.4-6　遠隔操作室

(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 3.1.4-2、図 3.1.4-7）。

表 3.1.4-2　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	オーバーパック ＋ ガラス固化体 相当

図 3.1.4-7　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^3 および予備の水量 15.0m^3 を用意した。

(5) 使用電源

緩衝材除去試験において以下の電源を用意した。

- AC400V 電源：緩衝材除去システムの駆動設備の動力（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撹拌機
- 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した。

3.2 試験方法・手順

3.2.1 試験方法および手順

緩衝材除去システムの総合動作確認として行う緩衝材除去試験は、処分孔に定置した緩衝材をシステムの連続運転により緩衝材を除去する。この際、および塩水リユースの特性を取得し、機能の確認を行う。緩衝材除去試験の全体概要を図 3.2.1-1 に、塩水リユース設備の構成を図 3.2.1-2 に示す。

緩衝材除去試験の手順について図 3.2.1-3 に示し、同時に取得するデータおよび目的を示す。

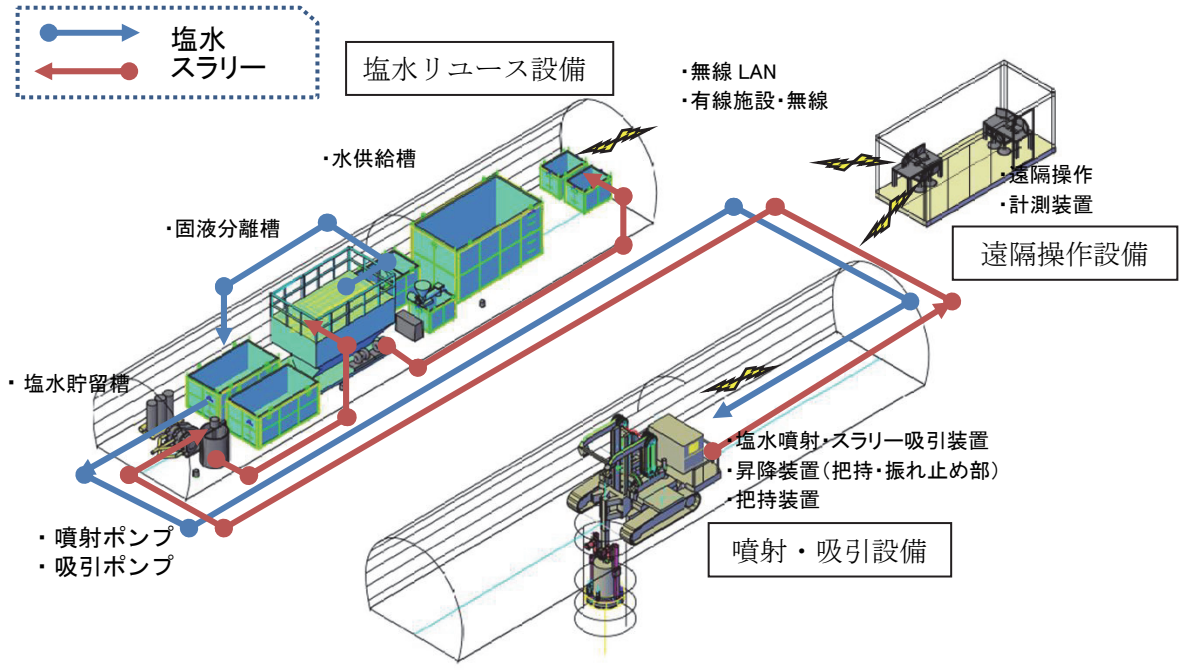


図 3.2.1-1 試験全体概要（緩衝材除去による機能確認）

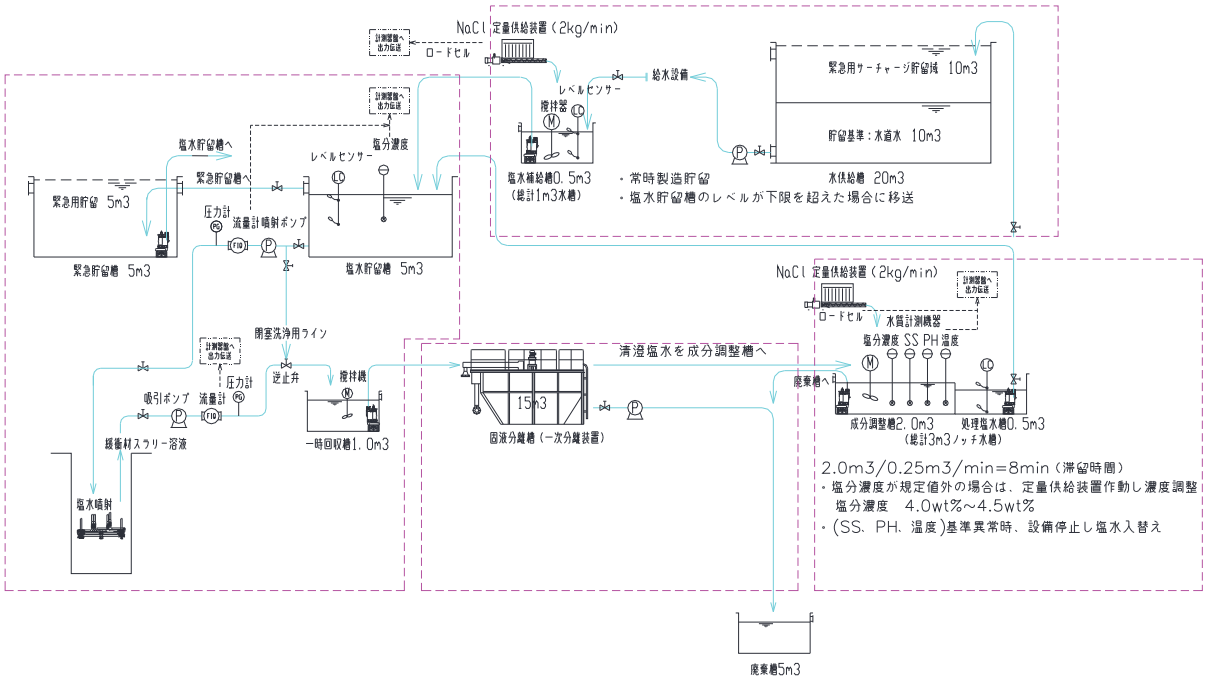
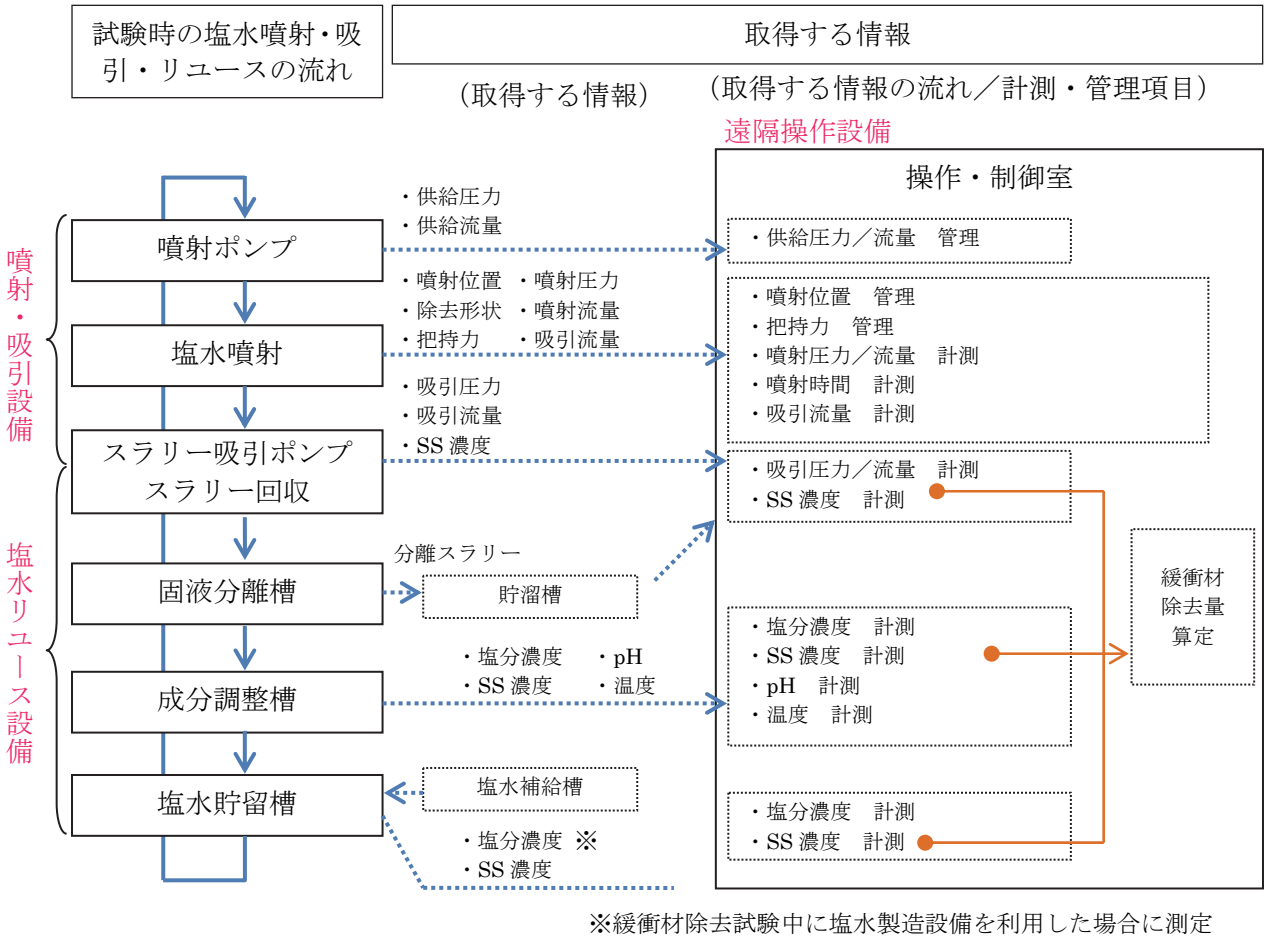


図 3.2.1-2 塩水リユース設備の構成（スラリーの循環フロー）



※緩衝材除去試験中に塩水製造設備を利用した場合に測定

図 3.2.1-3 緩衝材除去試験手順

3.2.2　緩衝材除去システムの遠隔による制御・監視機能

緩衝材除去システムでは、安全な作業を実現させるために、遠隔操作設備において図 3.2.2-1 に示すように、噴射・吸引設備の動作が安全に離れた距離で実施できる（以下、遠隔制御性）、常に動作が離れた距離において把握できる（以下、遠隔監視性と称す）ように開発を行った。緩衝材システムの遠隔操作システムを図 3.2.2-1 に示す。

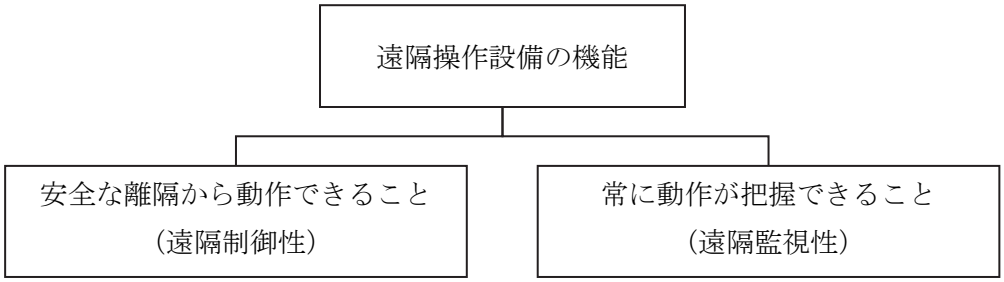


図 3.2.2-1　遠隔操作設備の機能

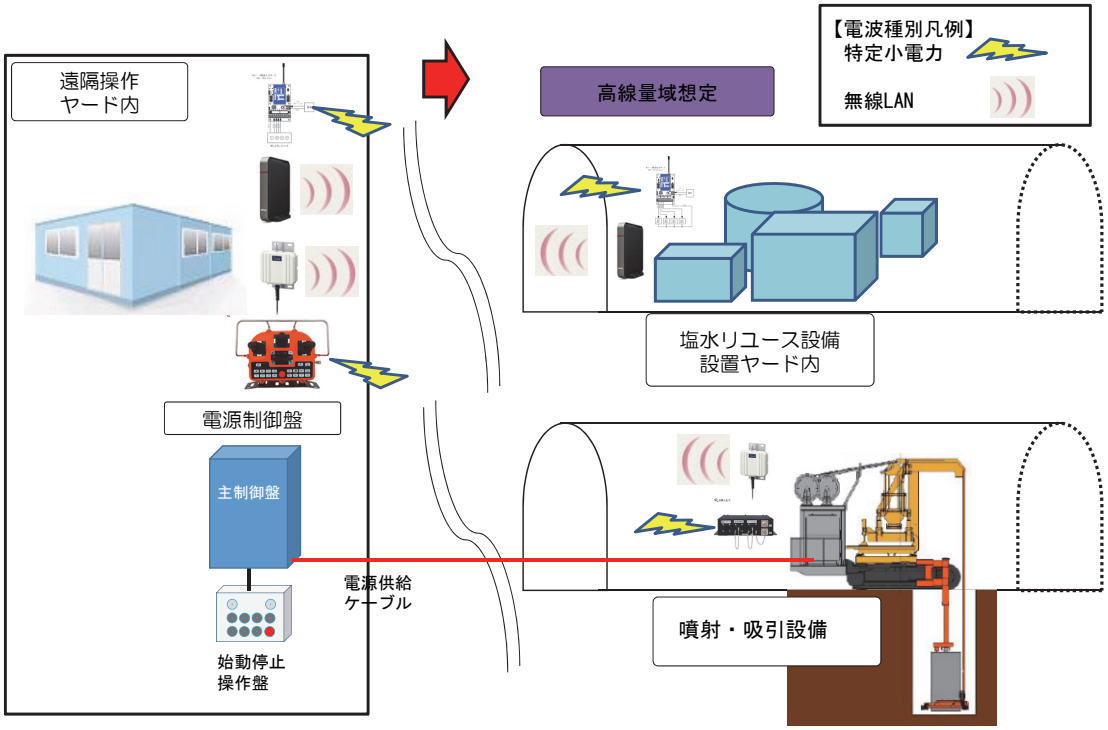


図 3.2.2-2　遠隔操作システム

緩衝材除去試験では、噴射・吸引設備（昇降装置、塩水噴射・スラリー吸引設備）、塩水リユース設備について、以下の内容を確認する。

(1) 噴射・吸引設備

噴射・吸引設備では、緩衝材除去試験において昇降装置、塩水噴射・スラリー吸引装置の遠隔に夜操作性を確認する。表 3.2.2-1、表 3.2.2-2 に各装置の確認事項を示す。

表 3.2.2-1　昇降装置に対する遠隔操作設備の機能

対象装置名	機能	詳細機能	機能の説明	装置等
昇降装置	遠隔制御性	動作制御機能 （位置調整機能）	位置調整動作を遠隔操作設備で制御 把持部を模擬廃棄体の中心位置に遠隔操作室でセット（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）	把持部の昇降動作を遠隔操作設備で制御	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）	噴射部の昇降動作を遠隔操作設備で制御	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を遠隔操作設備で監視	動作状況計測装置
		位置監視機能	廃棄体把持位置を遠隔操作設備で監視	位置計測装置

表 3.2.2-2　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

対象装置名	機能	詳細機能	機能の説明	装置等
塩水噴射・スラリー吸引装置	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設備で制御	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設備で制御	電源制御装置
		動作制御機能 （揺動制御機能）	噴射部揺動動作を遠隔操作設備で制御	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・スラリー吸引装置の動作、緩衝材除去形状を遠隔操作設備で監視	流量計 圧力計 形状測定装置

(2) 塩水リユース設備

塩水リユース設備では、塩水リユース設備が装備する固液分離するための機能を遠隔操作設備で制御する。なお、リユース対象となる塩水の制御においては、噴射・吸引設備による制御に追従する。

表 3.2.2-3　塩水リユース設備に対する遠隔操作設備の要求事項

対象装置名	機能	詳細機能	機能の説明	装置等
固液分離槽	遠隔制御性	動作制御機能 （塩水供給制御機能）	塩水供給動作を遠隔操作設備で制御	成分調整槽
	遠隔監視性	動作監視機能	塩水リユース設備の動作を遠隔操作設備で監視	撮像装置
		塩水特性監視機能	固液分離前後の SS 濃度、塩分濃度を遠隔操作設備で監視	SS 計 塩分濃度計 pH 計

3.2.3　緩衝材の製作

(1) 緩衝材の仕様

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、「H25 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 1.6Mg/m^3 および飽和度 60%程度とした（表 3.2.3-1）。また、緩衝材と模擬廃棄体との隙間（幅 t=20mm）はペレットを充填（有効ベントナイト密度 1.37Mg/m^3）し、緩衝材と模擬廃棄体を一体化させる。

緩衝材の移動および試験作業、組立作業を用意にするため、緩衝材は容器（以下、鋼殻リング）と一体型で製作した。緩衝材の材料（クニゲル V1、ケイ砂 3 号・5 号）は材料試験によって品質（土粒子の密度、粒度分布）を確認した。また、緩衝材転圧後の品質として乾燥密度・含水比を確認した。

表 3.2.3-1　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(クニミネ工業製)を用いる
品質	乾燥密度 1.6Mg/m^3 飽和度 60%程度	－
形状	外形 2,260mm、高さ 3,130mm	－
重量	21.1t	－

(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 3.2.3-2 に、土の粒度試験結果（粒径加積曲線）を図 3.2.3-1 に示す。

表 3.2.3-2　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.		381	383	384	389	390	392
(試料＋蒸留水＋ﾋﾟｸﾉﾒｰﾀｰ) 質量 m_b g		197.320	188.773	197.257	223.417	211.113	212.656
m_bをはかった時の内容物の温度 T ℃		23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0
T ℃における蒸留水の密度 $\rho_w(T)$ g/cm³		0.99754	0.99754	0.99754	0.99754	0.99754	0.99754
温度 T ℃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		194.510	185.917	194.241	204.326	191.480	192.997
試料の炉乾燥質量	容器 No.	0517	0308	0554	0432	0499	0353
	(試料＋容器)質量 g	113.032	111.840	115.361	134.231	136.092	140.334
	容器質量 g	108.657	107.410	110.668	104.145	105.246	109.436
	m_s g	4.375	4.430	4.693	30.086	30.846	30.898
土粒子の密度 ρ_s g/cm³		2.789	2.808	2.792	2.730	2.744	2.742
平均値 ρ_s g/cm³		2.796			2.739		

試料番号（深さ）		ケイ砂 5 号					
ピクノメーター No.		393	394	396			
(試料＋蒸留水＋ﾋﾟｸﾉﾒｰﾀｰ) 質量 m_b g		216.452	212.137	200.090			
m_bをはかった時の内容物の温度 T ℃		23.0	23.0	23.0			
T ℃における蒸留水の密度 $\rho_w(T)$ g/cm³		0.99754	0.99754	0.99754			
温度 T ℃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		197.326	192.837	180.807			
試料の炉乾燥質量	容器 No.	0341	0578	0335			
	(試料＋容器)質量 g	142.990	142.134	142.084			
	容器質量 g	112.683	111.646	111.635			
	m_s g	30.307	30.488	30.449			
土粒子の密度 ρ_s g/cm³		2.704	2.718	2.720			
平均値 ρ_s g/cm³		2.714					

※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。

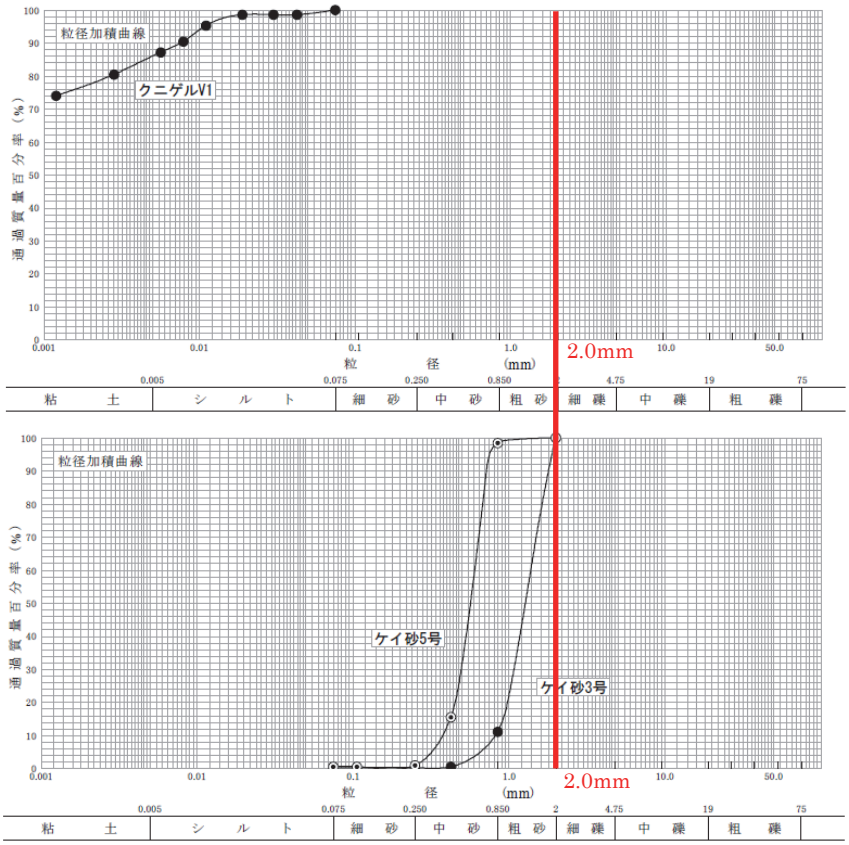


図 3.2.3-1　粒度分布測定結果

(3) 緩衝材の製作

緩衝材は、多連装ランマーによる動的締固め装置を使用して図 3.2.3-2 に示すフローに従い製作した。

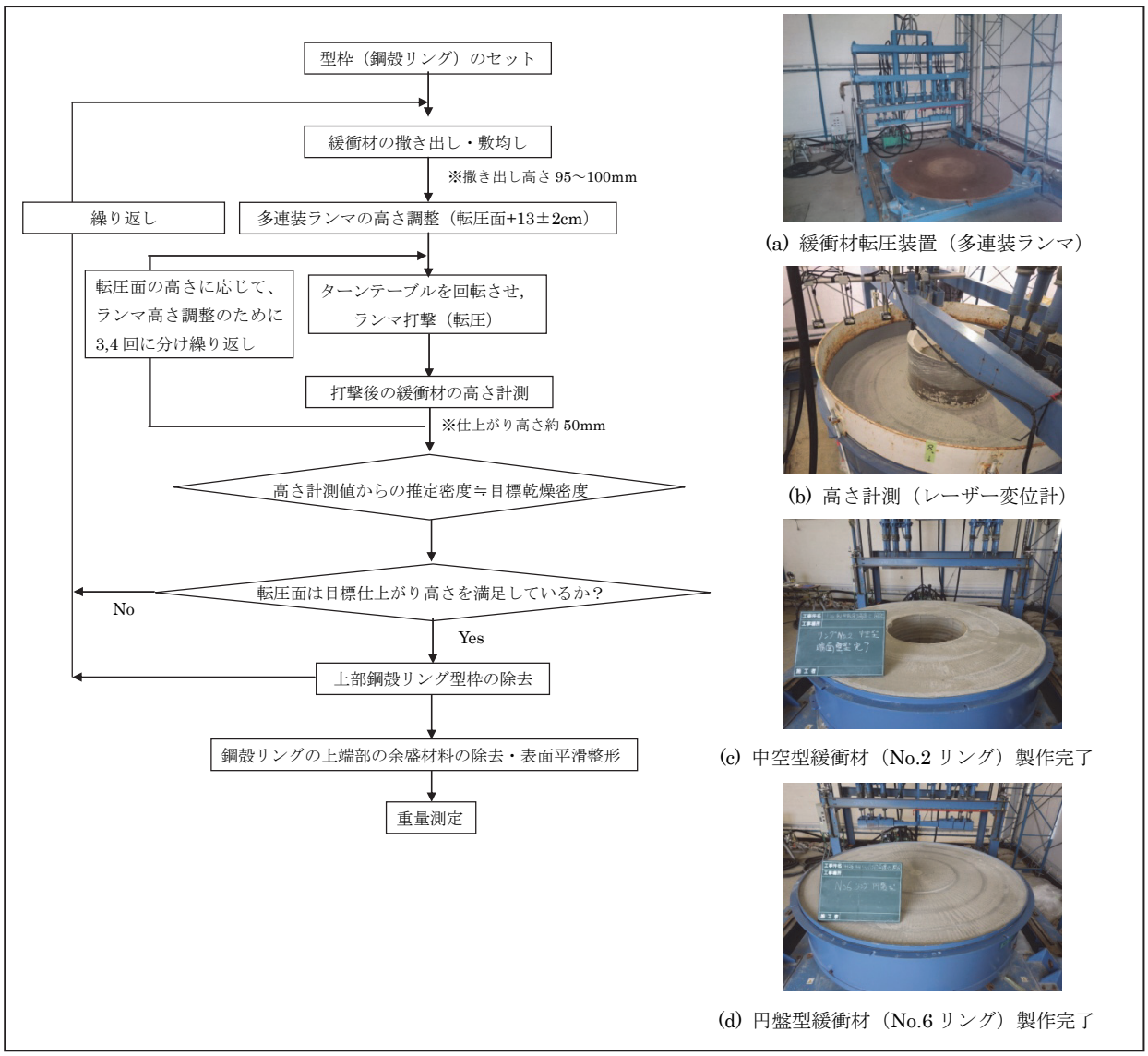


図 3.2.3-2　現場締固め管理フロー

(4) 緩衝材の品質確認

製作時の各緩衝材の寸法および物性値を表 3.2.3-3 に示す。緩衝材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 1.608Mg/m3、含水比 15.3%、飽和度 58.4%であった。

表 3.2.3-3　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：φ2,260mm×h300mm No.2 リング：φ2,259mm×h475mm No.3 リング：φ2,259mm×h475mm No.4 リング：φ2,260mm×h475mm No.5 リング：φ2,260mm×h480mm No.6 リング：φ2,261mm×h500mm 合計：φ2,260mm×h2,705mm	巻尺による計測 中空部はφ860mm ※No.6 リングは製作時の高さ。試験に供する部分は h300mm とする。
重量	No.1 リング：2,230kg No.2 リング：3,035kg No.3 リング：3,035kg No.4 リング：3,005kg No.5 リング：3,050kg No.6 リング：3,700kg 合計：18,055kg	荷重計にて測定
乾燥密度 ・含水比 ・飽和度	No.1 リング：1.605 Mg/m³・15.5%・58.7% No.2 リング：1.615Mg/m³・15.4% ・59.5% No.3 リング：1.617Mg/m³・15.3%・59.2% No.4 リング：1.600Mg/m³・15.3%・57.6% No.5 リング：1.607Mg/m³・15.3%・58.0% No.6 リング：1.600Mg/m³・15.2%・57.4% 平均：1.608Mg/m³・15.3%・58.4%	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、緩衝材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。対象とする緩衝材リングは、緩衝材除去による機能確認試験に供する緩衝材部分（No.2 リング、No.3 リング、No.4 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 3.2.3-3）。乾燥密度および飽和度の測定結果を表 3.2.3-4～表 3.2.3-8 および図 3.2.3-4～図 3.2.3-8 に示す。乾燥密度および飽和度は、試験条件として求められる仕様を満足していることが確認できた。

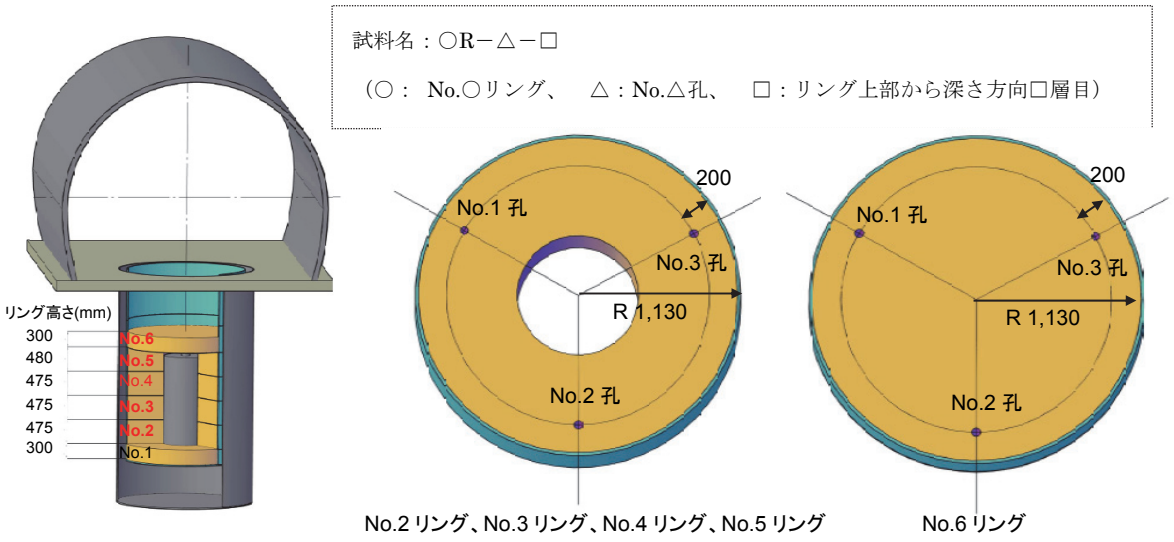


図 3.2.3-3　コアサンプリング位置

表 3.2.3-4　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^3)	質量 m (g)	湿潤密度 ρt (Mg/m^3)	乾燥密度 ρd (Mg/m^3)	乾燥質量 (g)	含水比 w (%)	飽和度 Sr (%)
						平均									
No.1	上から1層目	2R-1-1	0	～	45	23	6.76	3.40	122.03	226.98	1.860	1.621	197.77	14.8	57.5
	上から2層目	2R-1-2	45	～	85	65	6.77	3.04	109.43	200.83	1.835	1.593	174.30	15.2	56.9
	上から3層目	2R-1-3	85	～	125	105	6.70	2.87	101.19	187.66	1.855	1.614	163.29	14.9	57.6
	上から4層目	2R-1-4	125	～	175	150	6.76	3.58	128.49	234.32	1.824	1.585	203.62	15.1	55.7
	上から5層目	2R-1-5	175	～	225	200	6.72	2.61	92.57	175.09	1.891	1.642	152.01	15.2	61.1
	上から6層目	2R-1-6	225	～	275	250	6.56	3.37	113.90	213.78	1.877	1.631	185.82	15.0	59.6
	上から7層目	2R-1-7	275	～	325	300	6.75	3.80	135.98	254.84	1.874	1.631	221.81	14.9	58.9
	上から8層目	2R-1-8	325	～	375	350	6.77	3.48	125.27	233.18	1.861	1.620	203.00	14.9	57.9
	上から9層目	2R-1-9	375	～	425	400	6.78	4.40	158.86	292.78	1.843	1.604	254.83	14.9	56.6
	上から10層目	2R-1-10	425	～	475	450	6.77	4.18	150.47	283.01	1.881	1.640	246.72	14.7	59.0
No.2	上から1層目	2R-2-1	0	～	45	23	6.77	3.01	108.35	200.70	1.852	1.615	174.98	14.7	56.8
	上から2層目	2R-2-2	45	～	85	65	6.61	2.58	88.53	163.07	1.842	1.603	141.94	14.9	56.5
	上から3層目	2R-2-3	85	～	125	105	6.70	2.10	74.04	138.11	1.865	1.618	119.81	15.3	59.3
	上から4層目	2R-2-4	125	～	175	150	6.63	3.38	116.69	216.97	1.859	1.618	188.82	14.9	57.9
	上から5層目	2R-2-5	175	～	225	200	6.70	3.80	133.98	252.35	1.884	1.637	219.34	15.0	60.1
	上から6層目	2R-2-6	225	～	275	250	6.77	3.56	128.15	242.53	1.893	1.646	210.93	15.0	60.6
	上から7層目	2R-2-7	275	～	325	300	6.77	1.65	59.40	110.00	1.852	1.608	95.50	15.2	58.0
	上から8層目	2R-2-8	325	～	375	350	6.77	4.04	145.43	274.81	1.890	1.642	238.80	15.1	60.6
	上から9層目	2R-2-9	375	～	425	400	6.79	3.93	142.31	264.53	1.859	1.615	229.83	15.1	58.3
	上から10層目	2R-2-10	425	～	475	450	6.79	3.99	144.48	269.08	1.862	1.621	234.24	14.9	58.0
No.3	上から1層目	2R-3-1	0	～	45	23	6.79	3.64	131.80	240.61	1.826	1.589	209.40	14.9	55.4
	上から2層目	2R-3-2	45	～	85	65	6.78	2.49	89.90	164.94	1.835	1.593	143.18	15.2	56.8
	上から3層目	2R-3-3	85	～	125	105	6.79	2.45	88.71	163.38	1.842	1.598	141.81	15.2	57.3
	上から4層目	2R-3-4	125	～	175	150	6.71	2.52	89.11	163.30	1.833	1.591	141.80	15.2	56.6
	上から5層目	2R-3-5	175	～	225	200	6.72	2.42	85.83	158.00	1.841	1.599	137.25	15.1	57.0
	上から6層目	2R-3-6	225	～	275	250	6.70	3.09	108.94	201.92	1.853	1.613	175.76	14.9	57.4
	上から7層目	2R-3-7	275	～	325	300	6.78	3.75	135.39	250.49	1.850	1.608	217.65	15.1	57.7
	上から8層目	2R-3-8	325	～	375	350	6.79	3.70	133.98	253.10	1.889	1.640	219.76	15.2	60.9
	上から9層目	2R-3-9	375	～	425	400	6.79	4.40	159.32	293.14	1.840	1.598	254.63	15.1	57.0
	上から10層目	2R-3-10	425	～	475	450	6.79	4.01	145.20	266.32	1.834	1.593	231.38	15.1	56.5
										平均		1.614	平均		58.0
												※土粒子の密度=2.775Mg/m^3			

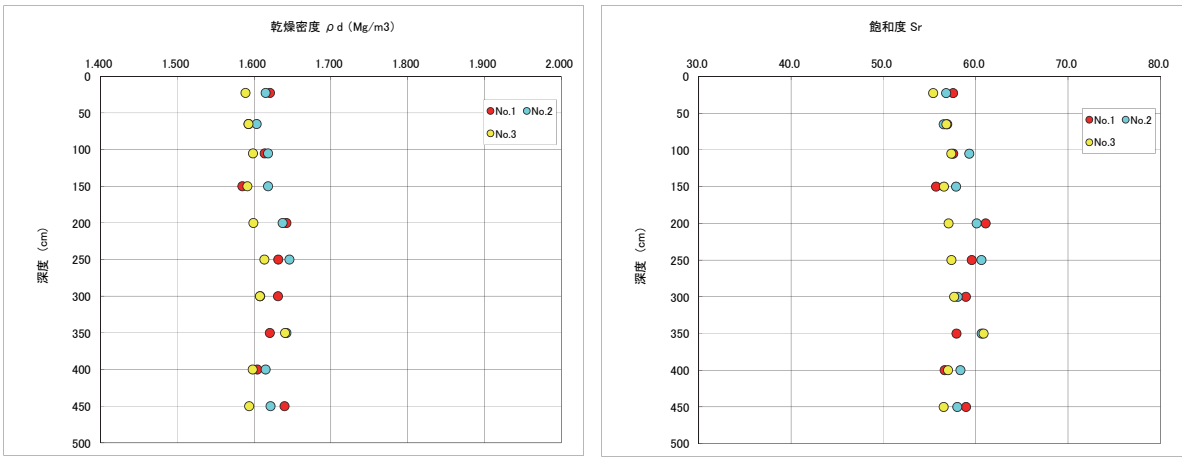


図 3.2.3-4　乾燥密度、飽和度測定結果（No.2 リング コアサンプリング）

表 3.2.3-5　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 D (cm)	高さ H (cm)	体積 v (cm^3)	質量 m (g)	湿潤密度 ρt (Mg/m^3)	乾燥密度 ρd (Mg/m^3)	乾燥質量 (g)	含水比 w (%)	飽和度 Sr (%)
						平均									
No.1	上から1層目	3R-1-1	0	～	45	23	6.79	3.69	133.62	247.32	1.851	1.613	215.46	14.8	56.9
	上から2層目	3R-1-2	45	～	85	65	6.76	2.29	82.19	150.81	1.835	1.594	131.02	15.1	56.6
	上から3層目	3R-1-3	85	～	125	105	6.77	2.58	92.87	171.85	1.850	1.608	149.30	15.1	57.7
	上から4層目	3R-1-4	125	～	175	150	6.77	3.76	135.35	256.80	1.897	1.648	223.03	15.1	61.4
	上から5層目	3R-1-5	175	～	225	200	6.76	4.03	144.64	273.55	1.891	1.643	237.71	15.1	60.8
	上から6層目	3R-1-6	225	～	275	250	6.76	4.18	150.02	285.72	1.904	1.657	248.59	14.9	61.4
	上から7層目	3R-1-7	275	～	325	300	6.77	4.37	157.31	295.46	1.878	1.632	256.80	15.1	59.7
	上から8層目	3R-1-8	325	～	375	350	6.69	4.32	151.85	284.40	1.873	1.635	248.25	14.6	57.9
	上から9層目	3R-1-9	375	～	425	400	6.73	4.58	162.92	310.09	1.903	1.660	270.44	14.7	60.6
	上から10層目	3R-1-10	425	～	475	450	6.76	2.95	105.88	198.00	1.870	1.627	172.25	14.9	58.8
No.2	上から1層目	3R-2-1	0	～	45	23	6.77	3.34	120.23	227.18	1.890	1.642	197.45	15.1	60.6
	上から2層目	3R-2-2	45	～	85	65	6.76	3.35	120.23	222.48	1.850	1.610	193.63	14.9	57.2
	上から3層目	3R-2-3	85	～	125	105	6.77	3.40	122.39	230.23	1.881	1.638	200.48	14.8	59.3
	上から4層目	3R-2-4	125	～	175	150	6.76	3.83	137.46	257.44	1.873	1.627	223.59	15.1	59.5
	上から5層目	3R-2-5	175	～	225	200	6.76	2.64	94.75	174.15	1.838	1.597	151.36	15.1	56.7
	上から6層目	3R-2-6	225	～	275	250	6.67	3.08	107.62	200.63	1.864	1.624	174.79	14.8	57.9
	上から7層目	3R-2-7	275	～	325	300	6.73	3.81	135.53	253.82	1.873	1.632	221.21	14.7	58.4
	上から8層目	3R-2-8	325	～	375	350	6.76	3.85	138.18	262.12	1.897	1.656	228.82	14.6	59.8
	上から9層目	3R-2-9	375	～	425	400	6.76	3.45	123.82	233.84	1.888	1.645	203.72	14.8	59.7
	上から10層目	3R-2-10	425	～	475	450	6.66	4.52	157.46	293.44	1.864	1.623	255.63	14.8	57.9
No.3	上から1層目	3R-3-1	0	～	45	23	6.74	2.80	99.90	184.05	1.842	1.605	160.34	14.8	56.3
	上から2層目	3R-3-2	45	～	85	65	6.64	2.46	85.18	161.14	1.892	1.644	140.06	15.1	60.7
	上から3層目	3R-3-3	85	～	125	105	6.73	2.79	99.25	182.94	1.843	1.604	159.23	14.9	56.6
	上から4層目	3R-3-4	125	～	175	150	6.75	3.28	117.37	223.20	1.902	1.659	194.77	14.6	60.3
	上から5層目	3R-3-5	175	～	225	200	6.75	2.62	93.76	173.44	1.850	1.610	150.99	14.9	57.1
	上から6層目	3R-3-6	225	～	275	250	6.77	3.20	115.19	216.76	1.882	1.638	188.70	14.9	59.5
	上から7層目	3R-3-7	275	～	325	300	6.66	3.05	106.25	196.22	1.847	1.608	170.87	14.8	56.7
	上から8層目	3R-3-8	325	～	375	350	6.76	3.52	126.34	238.09	1.885	1.643	207.60	14.7	59.2
	上から9層目	3R-3-9	375	～	425	400	6.78	3.42	123.47	234.97	1.903	1.656	204.42	14.9	61.3
	上から10層目	3R-3-10	425	～	475	450	6.77	3.65	131.39	246.69	1.878	1.634	214.70	14.9	59.2
										平均		1.630	平均		58.9
															※土粒子の密度=2.775Mg/m^3

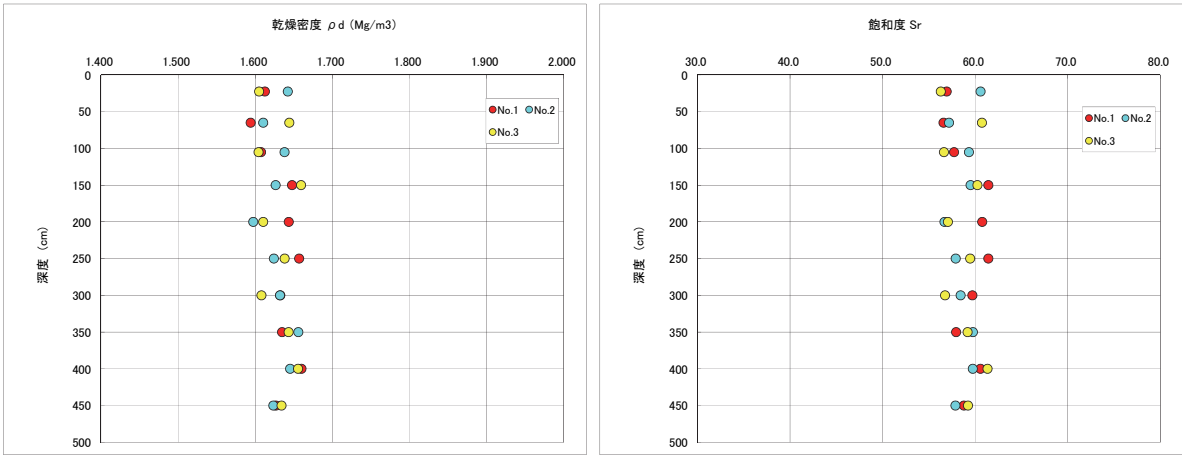


図 3.2.3-5　乾燥密度、飽和度測定結果（No.3 リング コアサンプリング）

表 3.2.3-6　乾燥密度、飽和度測定結果（No.4 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	高さ H	体積 v	質量 m	湿潤密度 ρt	乾燥密度 ρd	乾燥質量	含水比 w	飽和度 Sr
						平均	(cm)	(cm)	(cm^3)	(g)	(Mg/m^3)	(Mg/m^3)	(g)	(%)	(%)
No.1	上から1層目	4R-1-1	0	～	45	23	6.78	2.97	107.23	198.98	1.856	1.617	173.35	14.8	57.3
	上から2層目	4R-1-2	45	～	85	65	6.73	2.57	91.42	168.06	1.838	1.597	146.04	15.1	56.8
	上から3層目	4R-1-3	85	～	125	105	6.78	1.84	66.43	124.25	1.870	1.626	108.03	15.0	59.0
	上から4層目	4R-1-4	125	～	175	150	6.65	3.36	116.70	215.78	1.849	1.607	187.58	15.0	57.4
	上から5層目	4R-1-5	175	～	225	200	6.76	2.45	87.93	166.78	1.897	1.651	145.15	14.9	60.7
	上から6層目	4R-1-6	225	～	275	250	6.77	2.44	87.83	163.43	1.861	1.621	142.37	14.8	57.7
	上から7層目	4R-1-7	275	～	325	300	6.70	2.10	74.04	138.14	1.866	1.619	119.90	15.2	59.2
	上から8層目	4R-1-8	325	～	375	350	6.72	3.22	114.21	217.18	1.902	1.653	188.79	15.0	61.5
	上から9層目	4R-1-9	375	～	425	400	6.78	3.54	127.81	236.10	1.847	1.607	205.37	15.0	57.1
	上から10層目	4R-1-10	425	～	475	450	6.77	3.46	124.55	232.13	1.864	1.623	202.20	14.8	57.9
No.2	上から1層目	4R-2-1	0	～	45	23	6.73	3.08	109.56	204.91	1.870	1.627	178.28	14.9	58.8
	上から2層目	4R-2-2	45	～	85	65	6.65	2.61	90.65	171.37	1.890	1.645	149.14	14.9	60.2
	上から3層目	4R-2-3	85	～	125	105	6.69	2.73	95.96	182.70	1.904	1.656	158.93	15.0	61.4
	上から4層目	4R-2-4	125	～	175	150	6.76	3.20	114.85	214.92	1.871	1.631	187.32	14.7	58.3
	上から5層目	4R-2-5	175	～	225	200	6.77	4.19	150.83	288.09	1.910	1.665	251.10	14.7	61.3
	上から6層目	4R-2-6	225	～	275	250	6.72	2.04	72.35	133.47	1.845	1.606	116.18	14.9	56.7
	上から7層目	4R-2-7	275	～	325	300	6.79	2.00	72.42	134.80	1.861	1.616	117.04	15.2	58.7
	上から8層目	4R-2-8	325	～	375	350	6.80	3.47	126.02	236.54	1.877	1.634	205.86	14.9	59.2
	上から9層目	4R-2-9	375	～	425	400	6.78	3.54	127.81	243.77	1.907	1.657	211.72	15.1	62.2
	上から10層目	4R-2-10	425	～	475	450	6.78	3.60	129.97	243.68	1.875	1.632	212.10	14.9	59.0
No.3	上から1層目	4R-3-1	0	～	45	23	6.72	2.88	102.15	187.87	1.839	1.598	163.28	15.1	56.8
	上から2層目	4R-3-2	45	～	85	65	6.78	2.25	81.23	154.12	1.897	1.653	134.30	14.8	60.4
	上から3層目	4R-3-3	85	～	125	105	6.74	2.88	102.76	196.50	1.912	1.664	170.99	14.9	62.0
	上から4層目	4R-3-4	125	～	175	150	6.77	3.12	112.31	210.36	1.873	1.634	183.47	14.7	58.2
	上から5層目	4R-3-5	175	～	225	200	6.77	3.72	133.91	254.83	1.903	1.658	222.08	14.7	60.8
	上から6層目	4R-3-6	225	～	275	250	6.78	3.72	134.31	251.23	1.871	1.630	218.96	14.7	58.2
	上から7層目	4R-3-7	275	～	325	300	6.77	3.19	114.83	220.23	1.918	1.672	192.00	14.7	61.9
	上から8層目	4R-3-8	325	～	375	350	6.78	3.65	131.78	250.09	1.898	1.655	218.10	14.7	60.2
	上から9層目	4R-3-9	375	～	425	400	6.78	3.38	122.03	229.20	1.878	1.636	199.65	14.8	59.0
	上から10層目	4R-3-10	425	～	475	450	6.79	3.59	129.99	242.15	1.863	1.621	210.78	14.9	58.1
										平均		1.634	平均		59.2
												※土粒子の密度=2.775Mg/m^3			

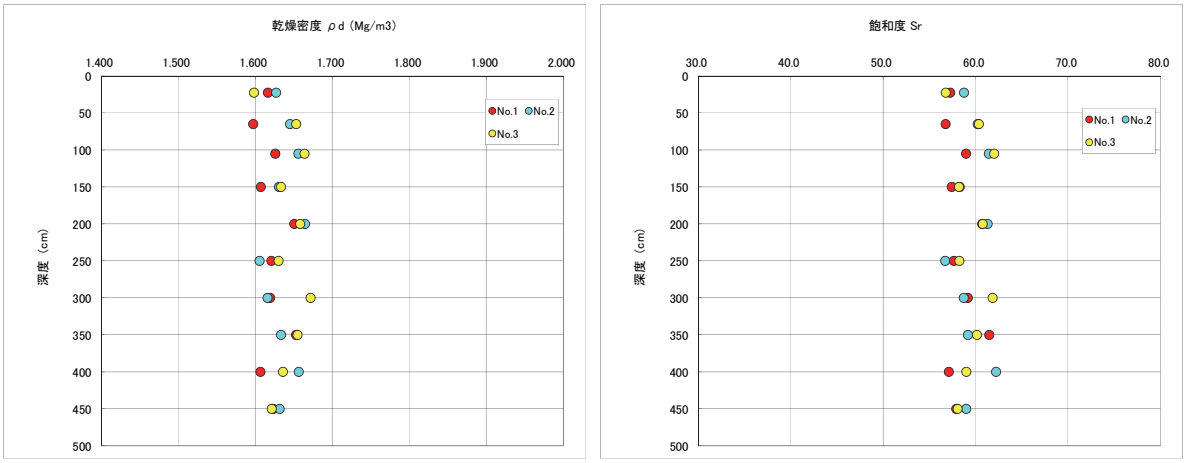


図 3.2.3-6　乾燥密度、飽和度測定結果（No.4 リング コアサンプリング）

表 3.2.3-7　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	高さ H	体積 v	質量 m	湿潤密度 ρt	乾燥密度 ρd	乾燥質量	含水比 w	飽和度 Sr
						平均	(cm)	(cm)	(cm^3)	(g)	(Mg/m^3)	(Mg/m^3)	(g)	(%)	(%)
No.1	上から1層目	5R-1-1	0	～	40	20	6.79	2.26	81.83	148.81	1.818	1.580	129.26	15.1	55.5
	上から2層目	5R-1-2	40	～	85	63	6.74	2.47	88.13	164.13	1.862	1.619	142.69	15.0	58.4
	上から3層目	5R-1-3	85	～	130	108	6.78	2.47	89.18	166.28	1.865	1.621	144.55	15.0	58.6
	上から4層目	5R-1-4	130	～	180	155	6.77	2.85	102.59	188.92	1.841	1.601	164.26	15.0	56.8
	上から5層目	5R-1-5	180	～	230	205	6.77	3.02	108.71	201.26	1.851	1.607	174.67	15.2	58.1
	上から6層目	5R-1-6	230	～	280	255	6.68	2.97	104.09	193.29	1.857	1.616	168.23	14.9	57.7
	上から7層目	5R-1-7	280	～	330	305	6.68	2.59	90.77	168.75	1.859	1.617	146.76	15.0	58.0
	上から8層目	5R-1-8	330	～	380	355	6.67	3.22	112.51	209.23	1.860	1.620	182.27	14.8	57.6
	上から9層目	5R-1-9	380	～	430	405	6.66	3.07	106.95	203.42	1.902	1.654	176.88	15.0	61.4
	上から10層目	5R-1-10	430	～	480	455	6.76	3.31	118.80	218.79	1.842	1.602	190.27	15.0	56.8
No.2	上から1層目	5R-2-1	0	～	40	20	6.75	2.14	76.58	144.88	1.892	1.644	125.87	15.1	60.9
	上から2層目	5R-2-2	40	～	85	63	6.73	3.08	109.56	208.47	1.903	1.653	181.12	15.1	61.7
	上から3層目	5R-2-3	85	～	130	108	6.75	3.67	131.33	243.81	1.856	1.615	212.08	15.0	57.8
	上から4層目	5R-2-4	130	～	180	155	6.74	3.63	129.51	242.95	1.876	1.633	211.44	14.9	59.1
	上から5層目	5R-2-5	180	～	230	205	6.75	2.52	90.18	167.88	1.862	1.620	146.13	14.9	58.0
	上から6層目	5R-2-6	230	～	280	255	6.75	3.37	120.59	220.49	1.828	1.592	191.94	14.9	55.5
	上から7層目	5R-2-7	280	～	330	305	6.62	2.32	79.85	149.10	1.867	1.623	129.64	15.0	58.7
	上から8層目	5R-2-8	330	～	380	355	6.78	3.16	114.09	208.36	1.826	1.589	181.27	14.9	55.6
	上から9層目	5R-2-9	380	～	430	405	6.75	3.57	127.75	240.78	1.885	1.643	209.87	14.7	59.3
	上から10層目	5R-2-10	430	～	480	455	6.75	3.58	128.11	242.10	1.890	1.645	210.77	14.9	60.1
No.3	上から1層目	5R-3-1	0	～	40	20	6.76	2.38	85.42	158.67	1.858	1.617	138.11	14.9	57.7
	上から2層目	5R-3-2	40	～	85	63	6.71	2.40	84.87	161.27	1.900	1.654	140.39	14.9	60.9
	上から3層目	5R-3-3	85	～	130	108	6.72	3.17	112.43	214.60	1.909	1.661	186.79	14.9	61.6
	上から4層目	5R-3-4	130	～	180	155	6.74	2.48	88.48	165.99	1.876	1.632	144.42	14.9	59.2
	上から5層目	5R-3-5	180	～	230	205	6.75	2.34	83.74	155.15	1.853	1.615	135.20	14.8	57.0
	上から6層目	5R-3-6	230	～	280	255	6.74	3.65	130.23	239.16	1.836	1.595	207.76	15.1	56.7
	上から7層目	5R-3-7	280	～	330	305	6.76	2.64	94.75	180.87	1.909	1.661	157.36	14.9	61.8
	上から8層目	5R-3-8	330	～	380	355	6.75	3.53	126.32	238.80	1.890	1.646	207.93	14.8	60.1
	上から9層目	5R-3-9	380	～	430	405	6.74	2.33	83.13	153.35	1.845	1.603	133.26	15.1	57.2
	上から10層目	5R-3-10	430	～	480	455	6.75	3.42	122.38	229.63	1.876	1.634	200.02	14.8	58.9
										平均		1.624	平均		58.6
													※土粒子の密度=2.775Mg/m^3		

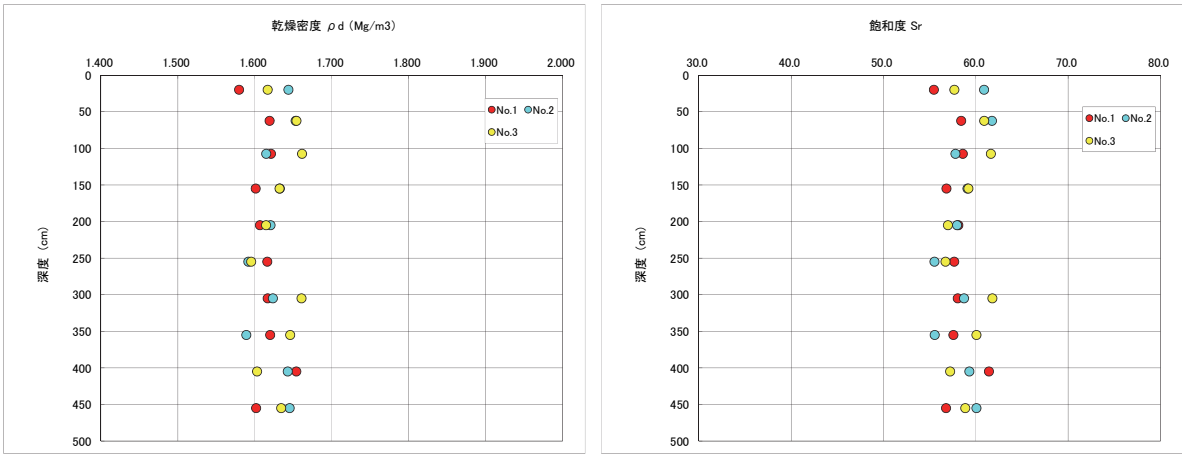


図 3.2.3-7　乾燥密度、飽和度測定結果（No.5 リング コアサンプリング）

表 3.2.3-8　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 D (cm)	高さ H (cm)	体積 v (cm^3)	質量 m (g)	湿潤密度 ρt (Mg/m^3)	乾燥密度 ρd (Mg/m^3)	乾燥質量 (g)	含水比 w (%)	飽和度 Sr (%)
						平均									
No.1	上から1層目	6R-1-1	0	～	50	25	6.75	3.51	125.60	231.77	1.845	1.607	201.83	14.8	56.6
	上から2層目	6R-1-2	50	～	100	75	6.77	3.30	118.79	223.46	1.881	1.639	194.66	14.8	59.2
	上から3層目	6R-1-3	100	～	150	125	6.73	3.61	128.42	242.02	1.885	1.640	210.63	14.9	59.8
	上から4層目	6R-1-4	150	～	200	175	6.78	3.00	108.31	202.39	1.869	1.626	176.15	14.9	58.5
	上から5層目	6R-1-5	200	～	250	225	6.77	3.58	128.87	247.11	1.918	1.667	214.88	15.0	62.7
	上から6層目	6R-1-6	250	～	300	275	6.77	3.93	141.47	263.62	1.863	1.621	229.31	15.0	58.3
	上から7層目	6R-1-7	300	～	350	325	6.74	3.28	117.03	215.94	1.845	1.604	187.75	15.0	57.1
	上から8層目	6R-1-8	350	～	400	375	6.74	3.30	117.74	218.99	1.860	1.619	190.65	14.9	57.8
	上から9層目	6R-1-9	400	～	450	425	6.75	3.35	119.88	225.81	1.884	1.641	196.71	14.8	59.4
	上から10層目	6R-1-10	450	～	500	475	6.76	2.98	106.95	202.64	1.895	1.647	176.16	15.0	60.9
No.2	上から1層目	6R-2-1	0	～	50	25	6.77	3.42	123.11	226.11	1.837	1.597	196.57	15.0	56.5
	上から2層目	6R-2-2	50	～	100	75	6.78	3.12	112.64	210.84	1.872	1.629	183.47	14.9	58.8
	上から3層目	6R-2-3	100	～	150	125	6.77	4.22	151.91	280.25	1.845	1.604	243.68	15.0	57.1
	上から4層目	6R-2-4	150	～	200	175	6.76	3.99	143.20	262.45	1.833	1.593	228.06	15.1	56.4
	上から5層目	6R-2-5	200	～	250	225	6.77	3.87	139.31	257.90	1.851	1.612	224.59	14.8	57.1
	上から6層目	6R-2-6	250	～	300	275	6.74	3.85	137.36	255.12	1.857	1.616	221.96	14.9	57.8
	上から7層目	6R-2-7	300	～	350	325	6.77	3.69	132.83	246.67	1.857	1.618	214.94	14.8	57.3
	上から8層目	6R-2-8	350	～	400	375	6.77	3.98	143.27	271.19	1.893	1.649	236.19	14.8	60.2
	上から9層目	6R-2-9	400	～	450	425	6.77	3.48	125.27	237.88	1.899	1.653	207.13	14.8	60.7
	上から10層目	6R-2-10	450	～	500	475	6.78	2.85	102.90	196.58	1.910	1.663	171.14	14.9	61.7
No.3	上から1層目	6R-3-1	0	～	50	25	6.75	2.74	98.05	183.65	1.873	1.631	159.92	14.8	58.7
	上から2層目	6R-3-2	50	～	100	75	6.77	3.68	132.47	247.85	1.871	1.629	215.77	14.9	58.6
	上から3層目	6R-3-3	100	～	150	125	6.78	3.68	132.86	247.33	1.862	1.619	215.10	15.0	58.2
	上から4層目	6R-3-4	150	～	200	175	6.77	3.96	142.55	267.41	1.876	1.631	232.46	15.0	59.5
	上から5層目	6R-3-5	200	～	250	225	6.78	3.04	109.75	206.85	1.885	1.640	180.00	14.9	59.8
	上から6層目	6R-3-6	250	～	300	275	6.78	3.47	125.28	237.30	1.894	1.647	206.34	15.0	60.8
	上から7層目	6R-3-7	300	～	350	325	6.73	3.54	125.93	236.58	1.879	1.635	205.84	14.9	59.4
	上から8層目	6R-3-8	350	～	400	375	6.77	3.34	120.23	225.69	1.877	1.634	196.46	14.9	59.1
	上から9層目	6R-3-9	400	～	450	425	6.76	3.85	138.18	265.01	1.918	1.667	230.34	15.1	62.8
	上から10層目	6R-3-10	450	～	500	475	6.77	3.67	132.11	254.83	1.929	1.677	221.59	15.0	63.6
										平均		1.632	平均		59.1
												※土粒子の密度=2.775Mg/m^3			

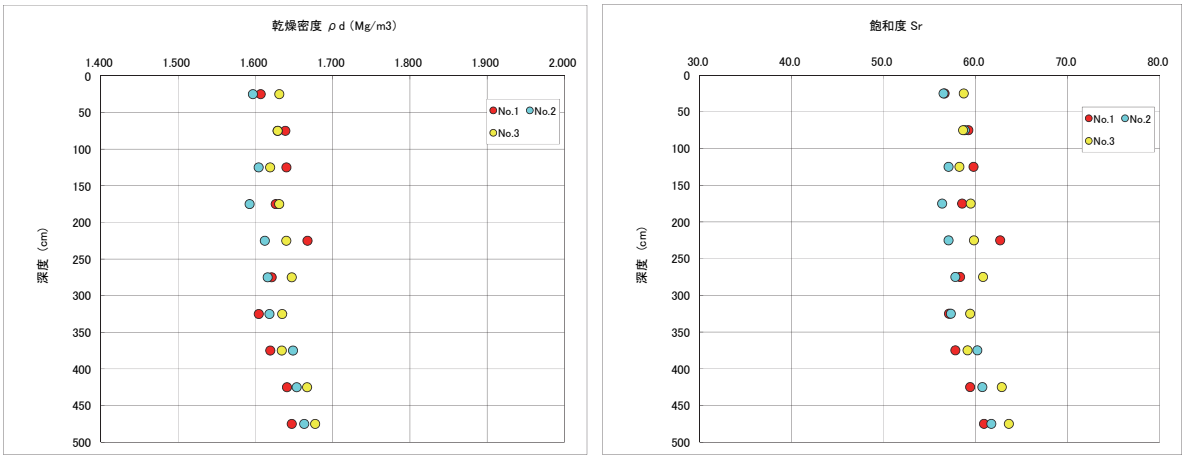


図 3.2.3-8　乾燥密度、飽和度測定結果（No.6 リングコアサンプリング）

(5) 隙間充填材（ベントナイトペレット）

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（有効ベントナイト密度 1.37Mg/m³）した（図 3.2.3-9）。

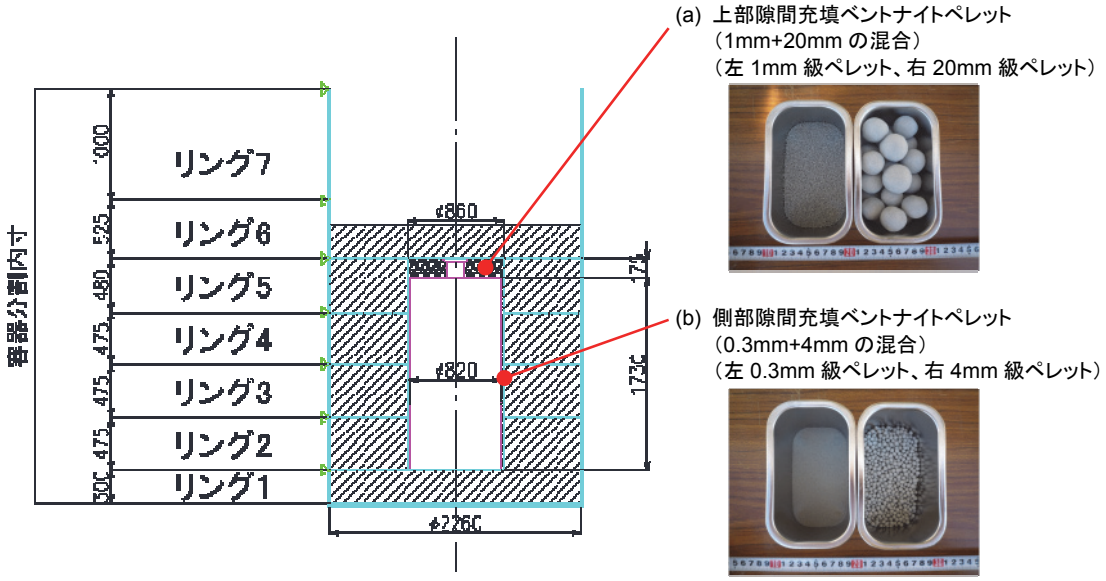


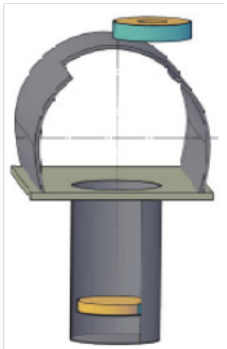
図 3.2.3-9　充填材料と充填位置

表 3.2.3-9　試験に用いる緩衝材の主要な仕様

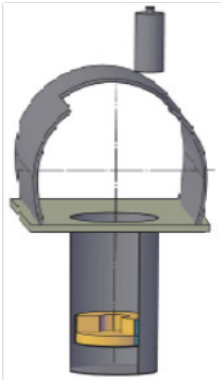
項目	仕様	備考
材料	ベントナイト 100wt%	ベントナイトはクニゲル V1(クニミネ工業製)を用いる
品質	乾燥密度 1.37Mg/m³	―
形状	粒状	20mm 級、4mm 級、1mm 級、0.3mm 級を組み合わせて隙間へ充填する。
重量	約 13kg	―

(6) 試験体の設置

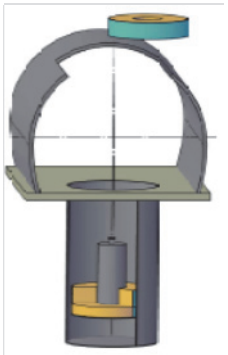
試験体の設置手順を図 3.2.3-10、設置状況を図 3.2.3-11 に示す。設置時のベントナイトペレットの有効ベントナイト密度は、充填する隙間の容積とペレットを充填した重量、含水比から算出した。有効ベントナイト密度の算出結果を表 3.2.3-10 に示す。また、緩衝材と処分孔との隙間は砂を充填することとした。



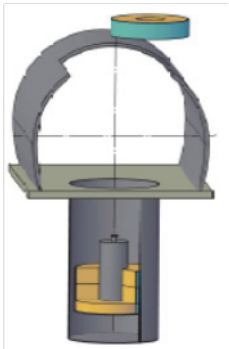
(a) No.1 リング設置
→ No.2 リング中空部容積測定
→ No.2 リング組立



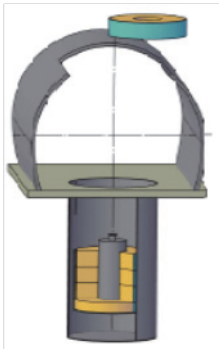
(b) 模擬廃棄体組立
（体積は事前測定）



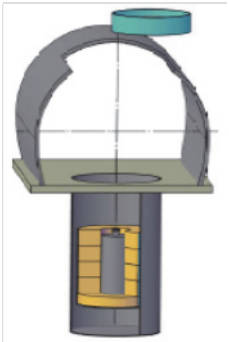
(c) No.2 リング ペレット充填
（充填重量、含水比測定）
→ No.3 リング中空部容積測定
→ No.3 リング組立



(d) No.3 リング ペレット充填
（充填重量、含水比測定）
→ No.4 リング中空部容積測定
→ No.4 リング組立



(e) No.4 リング ペレット充填
（充填重量、含水比測定）
→ No.5 リング中空部容積測定
→ No.5 リング組立



(f) No.5 リング ペレット充填
（充填重量、含水比測定）
→ No.6 リング組立

図 3.2.3-10　模擬廃棄体と緩衝材間のペレット充填密度測定手順

(a) No.2 リング設置

(b) 模擬廃棄体設置

(c) No.5 リング設置、ペレット充填

(d) No.5 リング上部ペレット充填

(e) No.5 リング上部ペレット充填完了

(f) No.6 リング設置

図 3.2.3-11 模擬廃棄体、館所在設置およびペレット充填状況

表 3.2.3-10　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

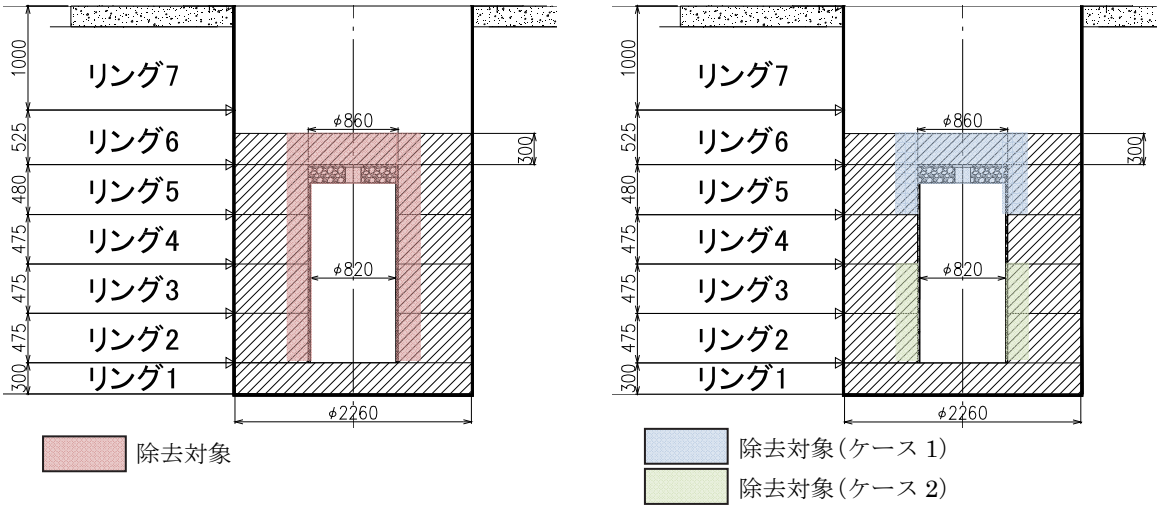
リング No.	投入量 [g]	層厚 [mm]	底面からの高さ [mm]	平均半径 [mm]	容積 [mm^3]（廃棄体控除）	上部かさ密度 [Mg/m^3]	重量平均含水比 [%]	側部充てん乾燥密度 [Mg/m^3]
5	159680	175	1905	429.640	98047671.19	1.629	6.26	1.533

(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 [mm]	平均半径 [mm]	容積 [mm3]（廃棄体控除）	側部かさ密度 [Mg/m^3]	重量平均含水比 [%]	側部充てん乾燥密度 [Mg/m^3]
2	7392	95	95	430.038	5023648.4	1.471	6.33	1.384
	7392	92	187	430.944	5090631.2	1.452	6.33	1.366
	7392	98	285	429.839	5129808.8	1.441	6.33	1.355
	7392	99	384	429.526	5098514.5	1.450	6.24	1.365
2~3	7392	100	484	429.008	5010083.0	1.475	6.43	1.386
3	7392	99	583	429.651	5131844.7	1.440	6.43	1.353
	7392	95	678	429.851	4975778.3	1.486	6.43	1.396
	7392	96	774	430.123	5098737.7	1.450	6.43	1.362
	7392	97	871	430.221	5177367.2	1.428	6.19	1.345
3~4	7392	95	966	430.175	5058902.8	1.461	6.20	1.376
4	7392	99	1065	429.095	4983340.0	1.483	6.20	1.397
	7392	98	1163	429.938	5155985.4	1.434	6.06	1.352
	7392	95	1258	429.646	4923197.2	1.501	6.06	1.416
	7392	99	1357	429.529	5099310.7	1.450	6.10	1.366
4~5	7392	100	1457	429.643	5181435.5	1.427	5.74	1.349
5	7392	97	1554	429.914	5097105.7	1.450	5.74	1.372
	7392	99	1653	429.661	5134570.8	1.440	5.74	1.362
	5775	77	1730	429.561	3972655.9	1.454	5.74	1.375
							平均	1.371

3.3　試験結果

緩衝材除去システムの総合動作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塩水リユース特性、緩衝材除去特性について、「平成 25 年度回収高度化」の結果と比較し確認する。図 3.3-1 に平成 26 年度と平成 25 年度に実施した緩衝材除去試験の対象エリアを示す。平成 25 年度は、模擬廃棄体上部（ケース 1）と模擬廃棄体下部（ケース 2）を対象とし除去試験を行った。今回の緩衝材除去試験では、下向きノズルのみを使用し実験を実施した。なお、遠隔操作による操作性については、取得した特性に関するデータおよび装置動作の安定性・確実性により評価する。



(a) 平成 26 年度　　(b) 平成 25 年度

図 3.3-1　平成 26 年度および平成 25 年度緩衝材除去対象エリア

3.3.1　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、連続稼働時間は最大 7 時間である。

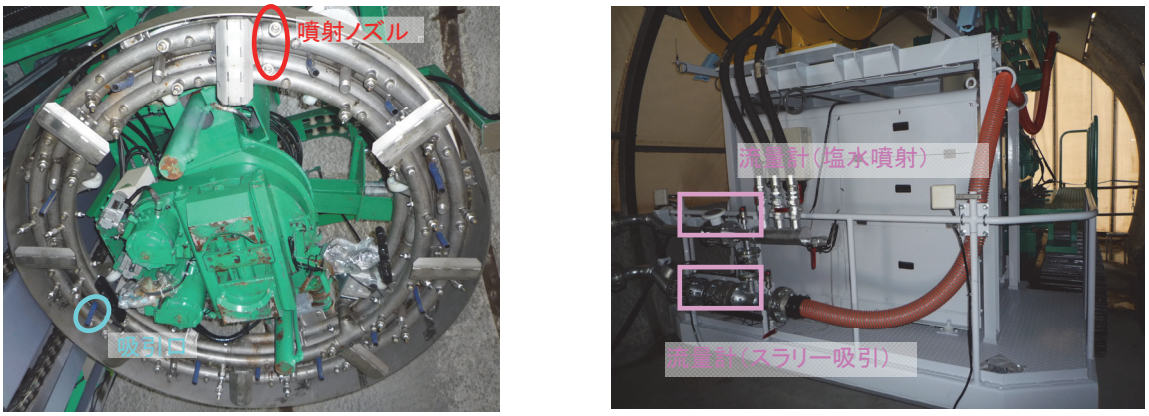
- 塩水噴射・スラリー吸引装置：塩水・スラリーの給排水能力の確認
- 固液分離槽：スラリーの固液分離機能、リユースの SS 濃度（浮遊物質濃度）
- リユース塩水の品質：塩分濃度、pH 等性状の確認

(1) 塩水噴射・スラリー吸引装置

本試験における塩水噴射条件は、噴射圧力 0.6MPa、ノズル径φ2.2mm、下向き噴射時ノズル数 16 ノズル×2 環（横向き：8 ノズル×1 環）である。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^3/h）である。流量計設置箇所および噴射ノズル、吸引口の配置を図 3.3.1-1 に

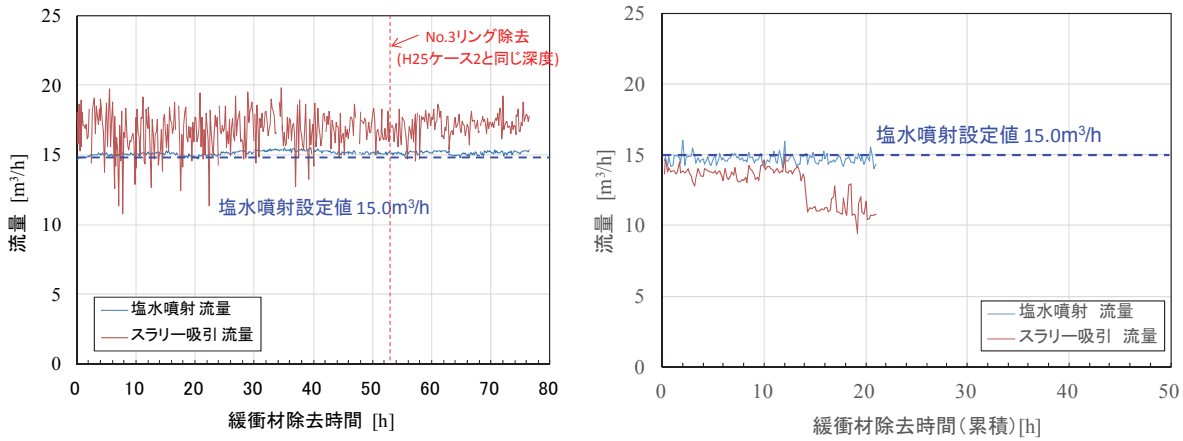
示す。

塩水噴射・スラリー吸引流量の測定結果と平成25年度ケース2の結果を図 3.3.1-2に示す。図に示すように、平成 25 年度は噴射流量と吸引流量とのバランスが悪くなり、噴射流量のコントロールおよび別途補助吸引ポンプの利用を行った。平成 26 年度は、塩水噴射流量は概ね15m3/h の流量で推移し吸引流量はそれを上回る数値となっており、平成 26 年度に改良を実施した塩水噴射・スラリー吸引装置が、十分な機能を発揮できていることが確認できた。



(a) 噴射ノズル・吸引口箇所　　(b) 流量計設置箇所

図 3.3.1-1　噴射ノズル・吸引口および流量計の配置箇所



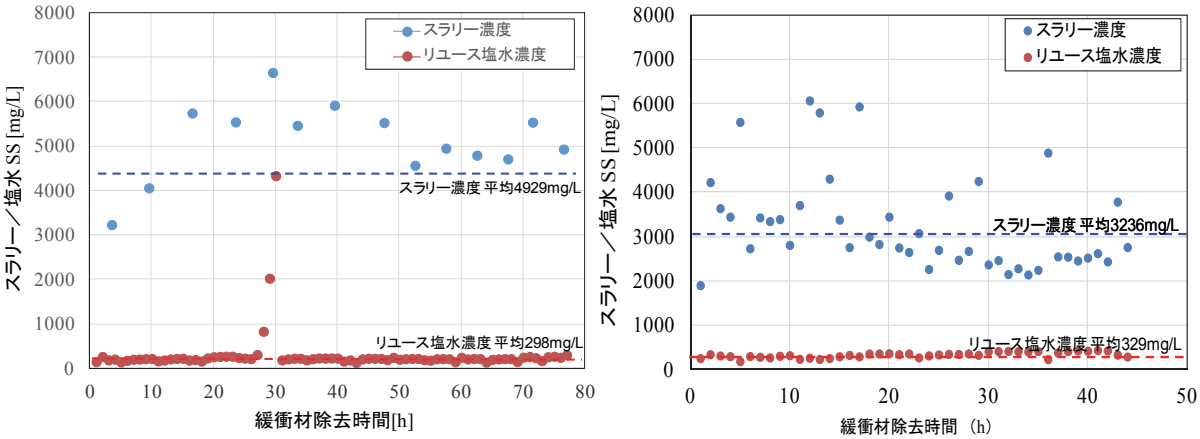
(a) 平成 26 年度　　(b)平成 25 年度　ケース 2

図 3.3.1-2　塩水噴射・スラリー吸引流量の測定結果

(2) 固液分離槽

固液分離槽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。測定結果について平成 25 年度ケース 1 の結果とともに図 3.3.1-3 に示す。平成 26 年度のリユース塩水濃度上昇部は、固液分離槽から廃棄槽への沈澱物輸送（ポンプによる引き抜き）を実施しなかった際に、どの程度の時間固液分離後の SS 濃度が安定した値を示すかを超過するかを調査した結果である。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 3,000mg/L～8,000mg/L 程度と幅があるが、安定して固液分離処理ができた。
- 1 時間平均の処理前のスラリーの SS 濃度は平均 4,929mg/L（最大 8,052mg/L）であった。
- 処理した塩水の SS 濃度は平均 298mg/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。
- 本年度のスラリー濃度は平成 25 年度より濃度が高いことから、改良により除去効率が向上したことが考えられる。
- 試験開始から累積 36 時間程度固液分離槽の沈殿物を除去しない場合、固液分離機能に影響することがわかった。



(a) 平成 26 年度　　(b)平成 25 年度　ケース 1

図 3.3.1-3　固液分離設備前後の SS 濃度

(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 3.3.1-4、測定結果について図 3.3.1-5 に示す。これより得られた知見を以下に示す。

- 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（最大約 7 時間）において試験開始から試験終了にかけて温度上昇が見られた。今回のような連続 7 時間程度の試験では、水温の上昇と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考えられる。

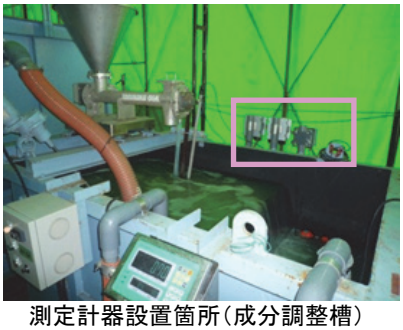


図 3.3.1-4 リユース塩水の品質確認（計測器設置状況）

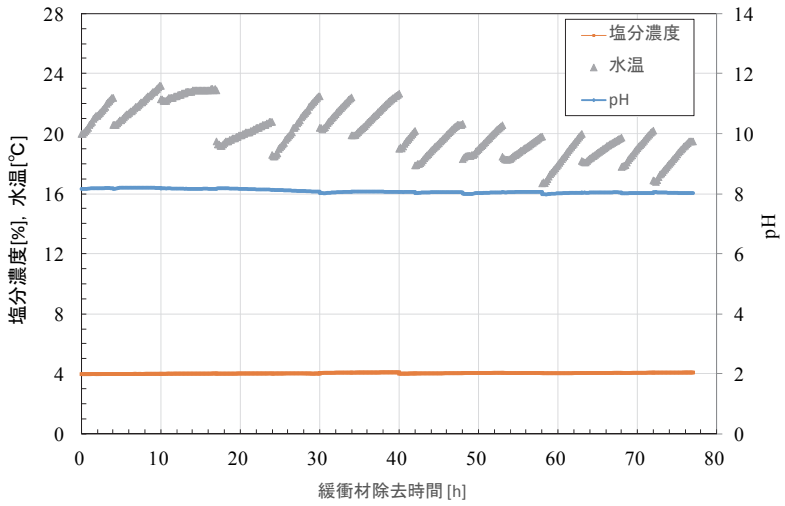


図 3.3.1-5 固液分離後、成分調整槽における塩分濃度・pH・水温の測定結果

3.3.2 緩衝材除去特性

(1) 除去状況

緩衝材除去は、図 3.3.2-1 に示すように模擬廃棄体頂部の円盤状の緩衝材の範囲（No.6 リング）、リング状の緩衝材で内側に上部ペレットが充填されている範囲（N0.5 リング）、リング状の緩衝材で内側に側部ペレットが充填され廃棄体がある範囲（No.2～4 リング）と緩衝材に係わる条件が変化する。これらの状況の変化を踏まえ、平成 25 年度の緩衝材除去特性ともに結果を示す。緩衝材 No.6 の上面の位置は、処分坑道の床版より下方 GL-1.220m である。

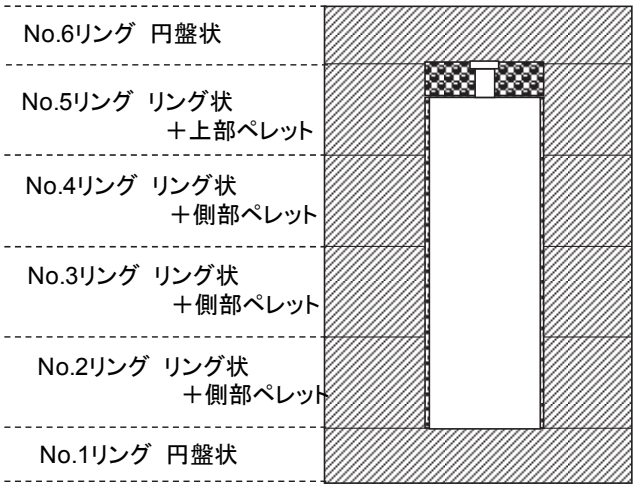


図 3.3.2-1　緩衝材除去対象断面図

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。図 3.3.2-2、に緩衝材除去時の緩衝材の位置と経過時間より算出した緩衝材除去速度と緩衝材の位置の関係を平成25年度の結果とともに示す。表 3.3.2-1に各緩衝材位置における緩衝材除去速度を平成 25 年度の算出した除去速度とともに示す。また、緩衝材除去状態の観察結果を図 3.3.2-3、図 3.3.2-4、図 3.3.2-5 に示す。3D スキャナにより計測した除去形状と除去深度の関係を図 3.3.2-6、図 3.3.2-7 に示す。緩衝材除去試験より得られた知見を以下に示す。

- 緩衝材 No.6（0~300mm）の除去速度は平均 16.2mm/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おり、緩衝材自体の除去速度は平均 17.1mm/h で速度が上昇している。
- リング状の緩衝材 No.4 の廃棄体側部（475mm~）の除去速度は平均 22.9mm/h でさらに速度が上昇している。
- 平成 25 年度の除去速度は除去深度が進むにつれて速度が低下したが、平成 26 年度の結果は除去深度が進むにつれて除去速度は上昇し、スラリー噴射・塩水吸引装置の改良により、除去深度が進んでも吸引・噴射バランスが一定に保たれたことがわかった。
- 除去深度 475mm 以深の除去速度の上昇は、除去対象部位に模擬廃棄体の胴体部が存在するため、この深度以降は塩水の接触面が限定され集中的に緩衝材が除去されたためと考えらえる。
- 除去深度 475mm 以深の除去速度 50mm/h 以上の急上昇（5 箇所）は、スタビライザー先端の緩衝材の塊が除去され、除去深度が増加したと考えられ、一定の深度以深ではこのような大幅な緩衝材除去が除去速度を増加する要因になるものと考えられる。
- 全ての緩衝材について塩水の下向き噴射で緩衝材とペレットを除去でき、模擬廃棄体が露出することができた。
- 緩衝材の除去深度とベントナイトペレットを充填した隙間部平均除去深度との差は、緩衝材除去深度の増加に伴ってその差が大きくなるような傾向は見られず、135～327mm の範囲であった。（図 3.3.2-3、図 3.3.2-4）

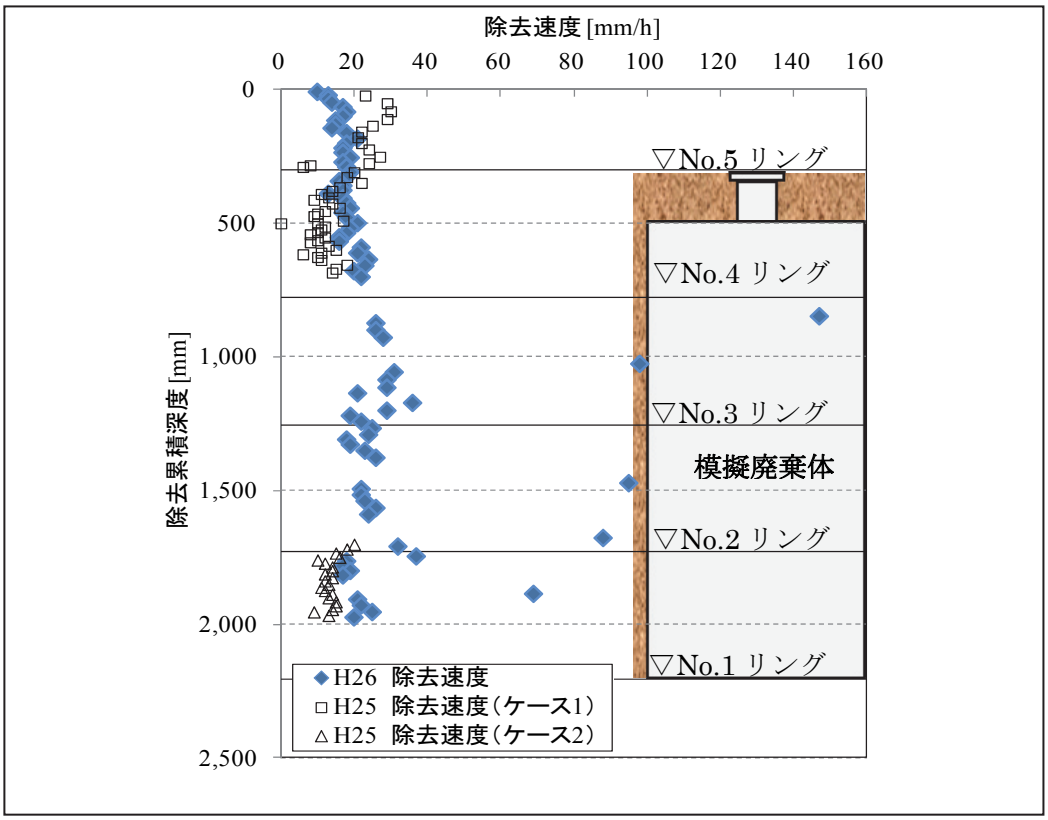
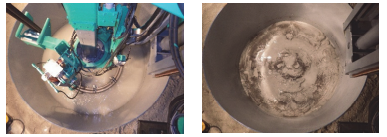
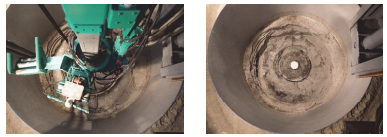


図 3.3.2-2　緩衝材除去深度測定結果

表 3.3.2-1　緩衝材除去速度の比較

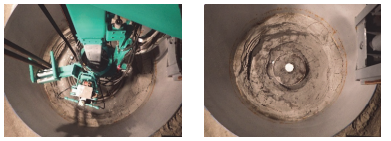
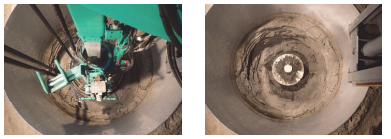
除去深度 （除去部位）	平均除去速度(mm/h)	
	平成 25 年度	平成 26 年度
0～300mm （円盤状緩衝材部位）	22.3	16.2
300～475mm （リング状+上部ペレット）	14.2	17.1
475～1,970mm 付近 （リング状+側部ペレット部位）	12.7	22.9※

※除去速度 50mm/h 以上の 5 点を除いて算出

経過日数	日時	噴射時間	累積時間	ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ	緩衝材除去深さ（ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ先端降下量）		ペレット充てん箇所深度（GL−）					ペレット除去深さ		噴射方向	備考	状況写真
		(min)	(min)	先端位置(GL−)	(mm)	累積(mm)	前	後	左	右	平均	(mm/hr)	累積(mm)			
1	2014/10/20 11:05	0	0	1,220	0	0								下向き	・60分毎に除去深さ測定。 ・ノズル位置は60分毎に最下部に配置。 ・試験終了後、浸漬塩水を除去⇒以降、同様の測定・操作を実施。 ・ドーナツ状に除去が進んでいる。	
	2014/10/20 12:05	60	60	1,230	10	10										
	2014/10/20 13:05	60	120	1,243	13	23										
	2014/10/20 14:05	60	180	1,256	13	36										
	2014/10/20 15:05	60	240	1,270	14	50	−	−	−	−	−	−	−			
2	2014/10/21 10:05													下向き	・ドーナツ状の除去形状が、中心方向に幅を広げる。 ・中心付近はケイ砂状の堆積が見られる。	
	2014/10/21 11:05	60	300	1,287	17	67										
	2014/10/21 12:05	60	360	1,305	18	85										
	2014/10/21 13:05	60	420	1,322	17	102										
	2014/10/21 14:05	60	480	1,337	15	117										
	2014/10/21 15:05	60	540	1,352	15	132										
	2014/10/21 16:05	60	600	1,366	14	146	−	−	−	−	−	−	−			
3	2014/10/22 9:35													下向き	・3Dスキャナーデータから、一部ペレット充てん部分に到達した模様だが、吸引スラリーからはペレット状のものは見られない。 ・中心部のケイ砂状の堆積も除去が進み、中心部を含めて平均的な除去が進む。	
	2014/10/22 10:35	60	660	1,384	18	164										
	2014/10/22 11:35	60	720	1,405	21	185										
	2014/10/22 12:35	60	780	1,423	18	203										
	2014/10/22 13:35	60	840	1,440	17	220										
	2014/10/22 14:35	60	900	1,457	17	237										
	2014/10/22 15:35	60	960	1,476	19	256										
	2014/10/22 16:35	60	1,020	1,493	17	273	−	−	−	−	−	−	−			
4	2014/10/23 9:30													下向き	・試験の途中、模擬廃棄体の把持部を確認。 ・試験終了後、把持部周りのペレット充てん箇所が明瞭に確認される。	
	2014/10/23 10:30	60	1,080	1,511	18	291										
	2014/10/23 11:30	60	1,140	1,530	19	310										
	2014/10/23 12:30	60	1,200	1,548	18	328										
	2014/10/23 13:30	60	1,260	1,564	16	344										
	2014/10/23 14:30	60	1,320	1,581	17	361										
	2014/10/23 15:30	60	1,380	1,598	17	378										
	2014/10/23 16:30	60	1,440	1,611	13	391	−	−	−	−	−	−	−			
5	2014/10/24 9:30													下向き	・試験の途中、リユース設備のSS濃度上昇を確認し、固液分離槽から廃棄槽へ沈澱スラリーを輸送（ポンプによる引き抜き）。 ・試験終了後、模擬廃棄体肩部を視認。	
	2014/10/24 10:30	60	1,500	1,628	17	408										
	2014/10/24 11:30	60	1,560	1,646	18	426										
	2014/10/24 12:30	60	1,620	1,665	19	445										
	2014/10/24 13:30	60	1,680	1,682	17	462										
	2014/10/24 14:30	60	1,740	1,700	18	480										
	2014/10/24 15:30	60	1,800	1,721	21	501	1,975	1,815	1,760	1,875	1,856	27	161			

※ペレット除去深さは、模擬廃棄体と緩衝材の側部 20mm の隙間部の深度から算出した。

図 3.3.2-3　緩衝材除去状態の観察結果(1)

経過日数	日時	噴射時間	累積時間	ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ	緩衝材除去深さ(ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ先端降下量)		ペレット充てん箇所深度(GL-)					ペレット除去深さ		噴射方向	備考	状況写真
		(min)	(min)	先端位置(GL-)	(mm)	累積(mm)	前	後	左	右	平均	(mm/hr)	累積(mm)			
6	2014/10/27 12:00													下向き	・安定した除去が進む。 ・模擬廃棄体の把持部周りは堆積物というより、濃度の高いスラリーが浮いている状態であることを確認。	
	2014/10/27 13:00	60	1,860	1,740	19	520										
	2014/10/27 14:00	60	1,920	1,758	18	538										
	2014/10/27 15:00	60	1,980	1,774	16	554										
	2014/10/27 16:00	60	2,040	1,790	16	570	2,000	2,005	1,990	1,995	1,998	35	303			
7	2014/10/28 10:25													下向き	・安定した除去が進む。 ・廃棄体把持操作支援システムを用いて、緩衝材除去装置の中心と模擬廃棄体把持部中心との位置調整を実施。	
	2014/10/28 11:25	60	2,100	1,812	22	592										
	2014/10/28 12:25	60	2,160	1,833	21	613										
	2014/10/28 13:25	60	2,220	1,857	24	637										
	2014/10/28 14:25	60	2,280	1,880	23	660										
	2014/10/28 15:25	60	2,340	1,900	20	680										
	2014/10/28 16:25	60	2,400	1,922	22	702	2,265	2,290	2,205	2,235	2,249	42	554			
8	2014/10/29 13:52													下向き	・開始1時間で除去深度が大きく進展。 ・試験終了後、前日の除去形状と比較した結果、スタビライザー下の緩衝材が大きく除去された様子を確認。 ・試験終了時の噴射リング引上げとともに、把持部周りが洗われる。	
	2014/10/29 14:52	60	2,460	2,069	147	849										
	2014/10/29 15:52	60	2,520	2,095	26	875	2,304	2,339	2,310	2,291	2,311	31	616			
9	2014/10/31 9:50													下向き	・噴射ノズルと把持部が十分な離隔となったため、把持を伴う除去を開始。 ・試験中、除去深度が大きく進展する。上方からの視認による大きな変化は見られず、前回と同様にスタビライザー下で緩衝材が大きく除去された模様。	
	2014/10/31 10:50	60	2,580	2,121	26	901										
	2014/10/31 11:50	60	2,640	2,149	28	929										
	2014/10/31 12:50	60	2,700	2,247	98	1,027										
	2014/10/31 13:50	60	2,760	2,278	31	1,058										
	2014/10/31 14:50	60	2,820	2,307	29	1,087										
	2014/10/31 15:50	60	2,880	2,336	29	1,116	2,604	2,489	2,491	2,534	2,530	36	835			
10	2014/11/4 11:20													下向き	・除去深度にバラつきが見られたが、大きな進捗は見られていない。	
	2014/11/4 12:20	60	2,940	2,357	21	1,137										
	2014/11/4 13:20	60	3,000	2,393	36	1,173										
	2014/11/4 14:20	60	3,060	2,422	29	1,202										
	2014/11/4 15:20	60	3,120	2,441	19	1,221										
	2014/11/4 16:20	60	3,180	2,463	22	1,243	2,748	2,735	2,869	2,725	2,769	48	1,074			

※ペレット除去深さは、模擬廃棄体と緩衝材の側部 20mm の隙間部の深度から算出した。

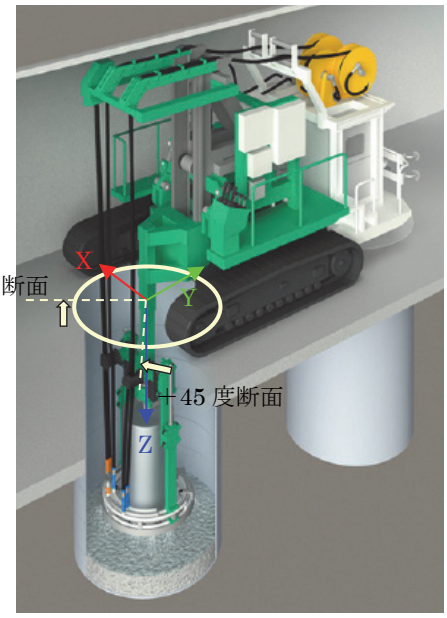
図 3.3.2-4　緩衝材除去状態の観察結果(2)

経過日数	日時	噴射時間	累積時間	ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ	緩衝材除去深さ(ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ先端降下量)		ペレット充てん箇所深度(GL-)					ペレット除去深さ		噴射方向	備考	状況写真
		(min)	(min)	先端位置(GL-)	(mm)	累積(mm)	前	後	左	右	平均	(mm/hr)	累積(mm)			
11	2014/11/5 10:00													下向き	・安定した除去が進む。 ・除去深度に大きな進展も見られない。	
	2014/11/5 11:00	60	3,240	2,488	25	1,268										
	2014/11/5 12:00	60	3,300	2,512	24	1,292										
	2014/11/5 13:00	60	3,360	2,530	18	1,310										
	2014/11/5 14:00	60	3,420	2,549	19	1,329										
	2014/11/5 15:00	60	3,480	2,572	23	1,352	2,835	2,807	2,840	2,765	2,812	9	1,117			
12	2014/11/10 9:55													下向き	・試験中、除去深度が大きく進展する。上方からの視認では除去形状に大きな変化は見られず、スタビライザー下で緩衝材が大きく除去された模様。	
	2014/11/10 10:55	60	3,540	2,598	26	1,378										
	2014/11/10 11:55	60	3,600	2,693	95	1,473										
	2014/11/10 12:55	60	3,660	2,715	22	1,495										
	2014/11/10 13:55	60	3,720	2,737	22	1,517										
	2014/11/10 14:55	60	3,780	2,760	23	1,540	3,038	3,046	3,026	3,030	3,035	45	1,340			
13	2014/11/11 10:05													下向き	・試験中、除去深度が大きく進展する。上方からの視認では除去形状に大きな変化は見られず、スタビライザー下で緩衝材が大きく除去された模様。	
	2014/11/11 11:05	60	3,840	2,786	26	1,566										
	2014/11/11 12:05	60	3,900	2,810	24	1,590										
	2014/11/11 13:05	60	3,960	2,898	88	1,678										
	2014/11/11 14:05	60	4,020	2,930	32	1,710										
	2014/11/11 15:05	60	4,080	2,967	37	1,747	3,199	3,165	3,210	3,159	3,183	30	1,488			
14	2014/11/13 11:30													下向き	・安定した除去が進む。 ・試験終了後のペレット充てん箇所深度が、一部模擬廃棄体底部(GL-3430)まで達していることを確認。	
	2014/11/13 12:30	60	4,140	2,985	18	1,765										
	2014/11/13 13:30	60	4,200	3,002	17	1,782										
	2014/11/13 14:30	60	4,260	3,021	19	1,801										
	2014/11/13 15:30	60	4,320	3,038	17	1,818	3,310	3,438	3,297	3,254	3,325	35	1,630			
15	2014/11/14 10:45													下向き	・開始1時間で除去深度が大きく進展。上方からの視認では除去形状に大きな変化は見られず。 ・累積76時間でスタビライザー最大深度に到達、かつ試験終了後、ペレット充てん箇所深度の平均値が模擬廃棄体底部まで達したため試験終了。	
	2014/11/14 11:45	60	4,380	3,107	69	1,887										
	2014/11/14 12:45	60	4,440	3,128	21	1,908										
	2014/11/14 13:45	60	4,500	3,150	22	1,930										
	2014/11/14 14:45	60	4,560	3,175	25	1,955										
	2014/11/14 15:45	60	4,620	3,195	20	1,975	3,432	3,439	3,416	3,407	3,424	20	1,729			

※ペレット除去深さは、模擬廃棄体と緩衝材の側部 20mm の隙間部の深度から算出した。

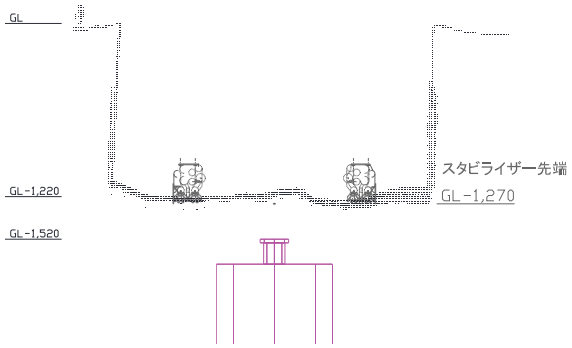
図 3.3.2-5　緩衝材除去状態の観察結果(3)

X 軸、Y 軸、Z 軸、および断面位置の説明図

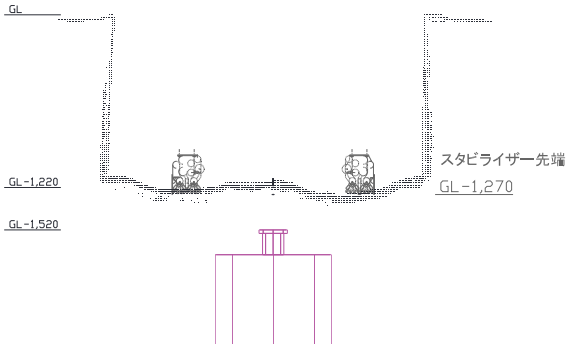


【累積 4 時間後】

+45 度断面

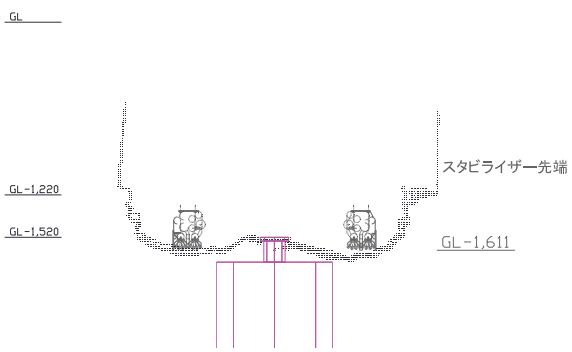


－45 度断面



【累積 24 時間後】

+45 度断面



－45 度断面

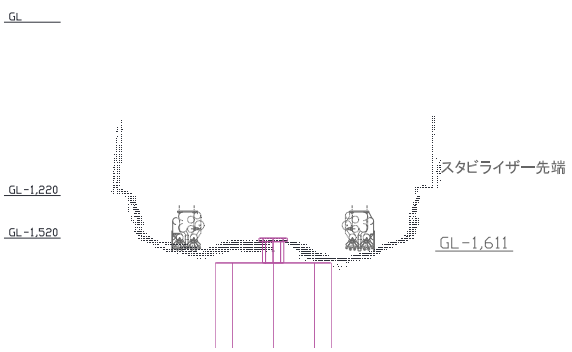
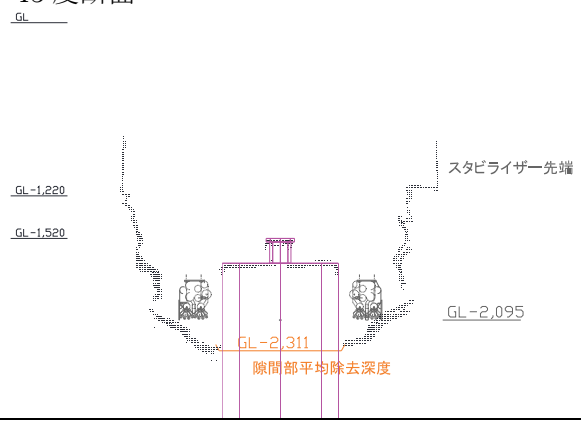


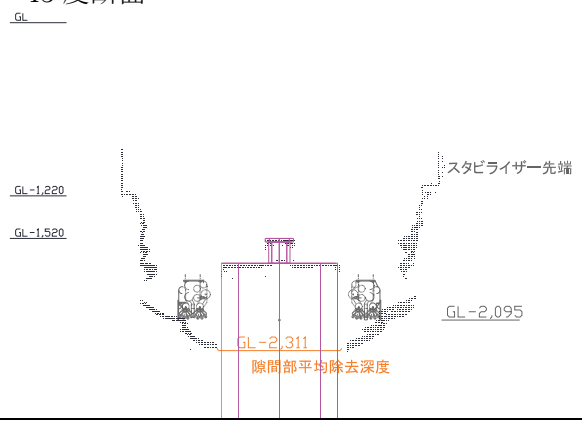
図 3.3.2-6　緩衝材除去形状と除去深度(1)

【累積 42 時間後】※模擬廃棄体-緩衝材間隙間充填部の除去深度測定（以下、隙間部平均除去深度と記す）

+45 度断面

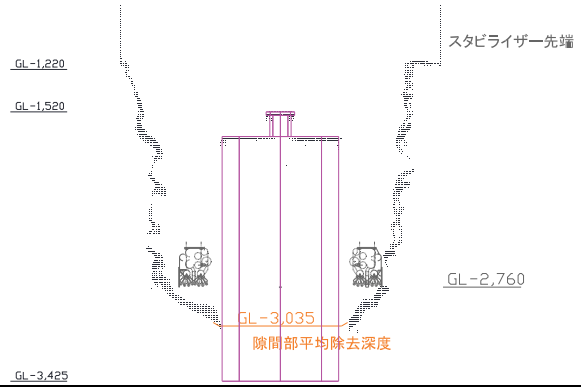


－45 度断面

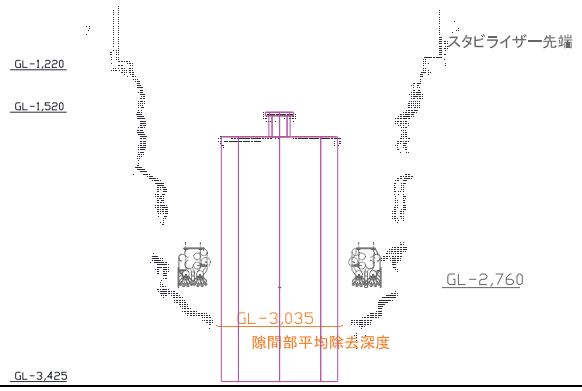


【累積 63 時間後】

+45 度断面

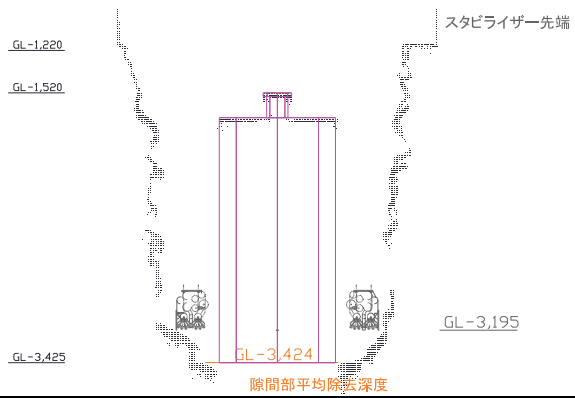


－45 度断面



【累積 77 時間後】

+45 度断面



－45 度断面

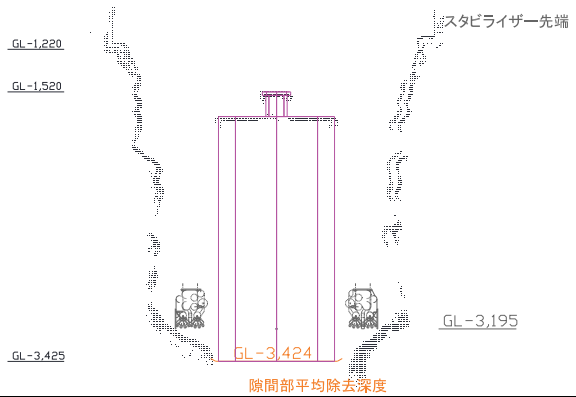


図 3.3.2-7　緩衝材除去形状と除去深度(2)

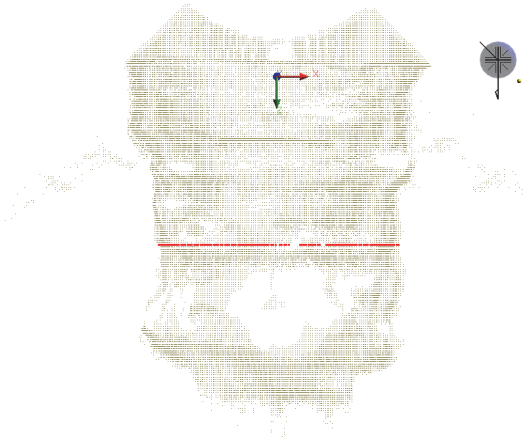
(2) 3D スキャナによる緩衝材除去形状・除去体積

緩衝材除去状況の把握のため 3D スキャナによる緩衝材除去形状を計測した。3D スキャナの計測は、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、1 回/日の頻度で実施した。

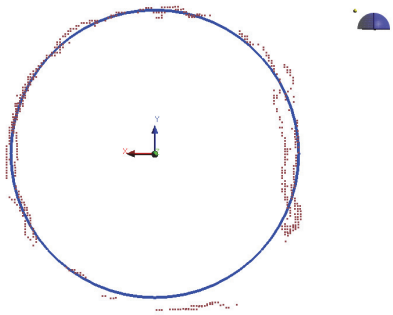
1) 緩衝材除去体積の算出方法

緩衝材除去体積の算出方法を図 3.3.2-8 に示す。形状計測結果を用いた緩衝材除去体積は、以降この方法によって算出したものである。

①スキャンした点群から、高さ方向 15～20mm 間隔でデータを抽出



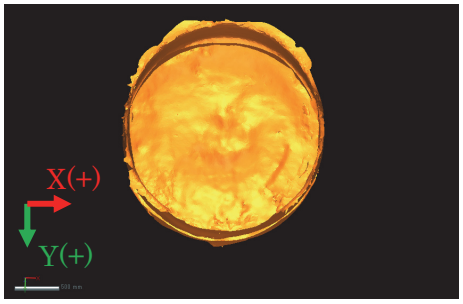
②最小二乗法によって、フィッティングする円を作成

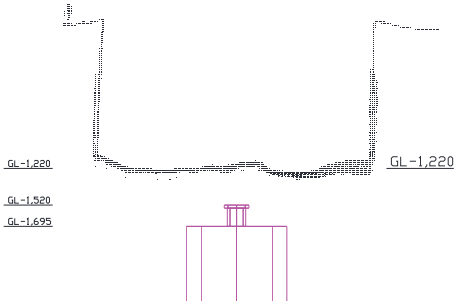


③高さ方向の円錐台の積み重ねとして除去体積を算出（ただし、模擬廃棄体は体積控除）

図 3.3.2-8　形状計測結果を用いた緩衝材除去体積の算出方法

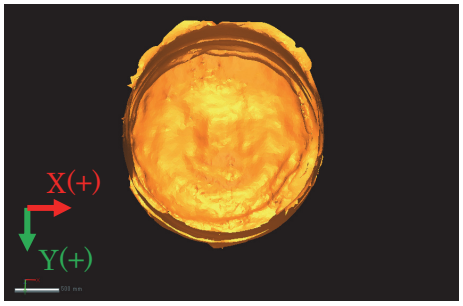
緩衝材除去体積は、3 次元データから x,y 軸に沿った断面から平均的な寸法を把握し、除去形状を円錐と円柱の組み合わせにより算定した。緩衝材の除去形状および除去体積計算結果を図 3.3.2-9～図 3.3.2-17 に示す。

<table>
<tr><td> 
</td><td>除去体積の計算

※除去深度が浅く、除去体積の算出不可</td></tr>
<tr><td>+45 度断面
 
</td><td>フィッティングした円の集合

※除去深度が浅く、除去体積の算出不可</td></tr>
</table>

図 3.3.2-9　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 4 時間後）

<table>
<tr><td> 
</td><td>除去体積の計算

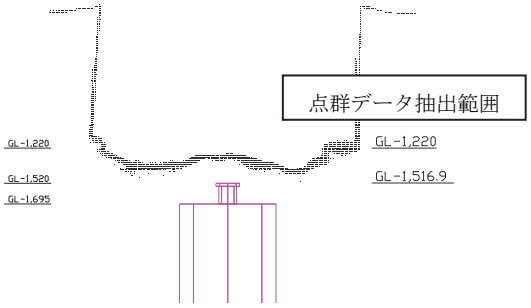
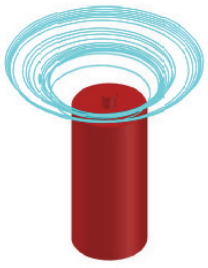
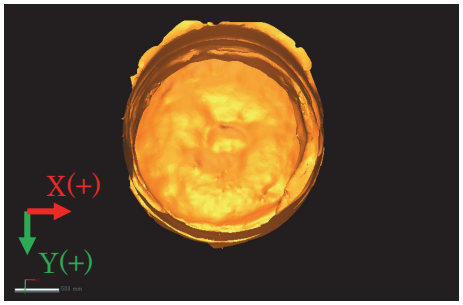
<table><tr><td></td><td>(m³)</td></tr><tr><td>円錐台積算体積</td><td>0.596</td></tr><tr><td>模擬廃棄体分控除体積</td><td>0</td></tr><tr><td>除去体積</td><td>0.596</td></tr></table></td></tr>
<tr><td>+45 度断面
 
</td><td>フィッティングした円の集合
  </td></tr>
</table>

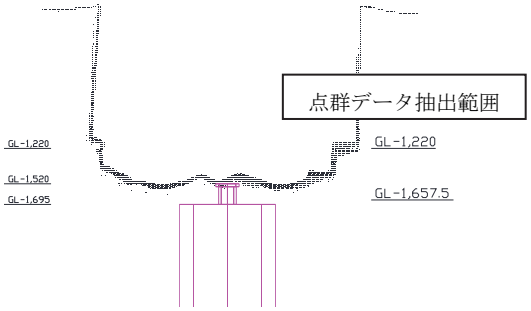
図 3.3.2-10　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 10 時間後）



除去体積の計算

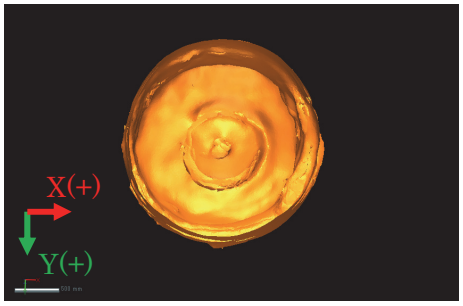
	(m³)
円錐台積算体積	0.998
模擬廃棄体分控除体積	0
除去体積	0.998

+45 度断面



フィッティングした円の集合

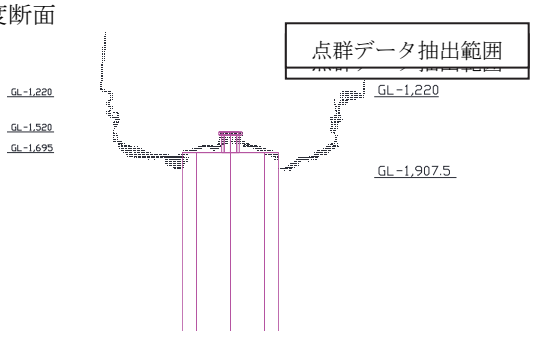
図 3.3.2-11　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 17 時間後）



除去体積の計算

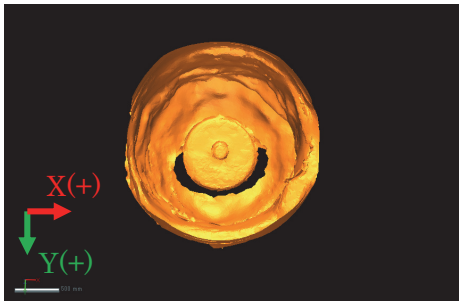
	(m³)
円錐台積算体積	1.627
模擬廃棄体分控除体積	0.099
除去体積	1.528

+45 度断面



フィッティングした円の集合

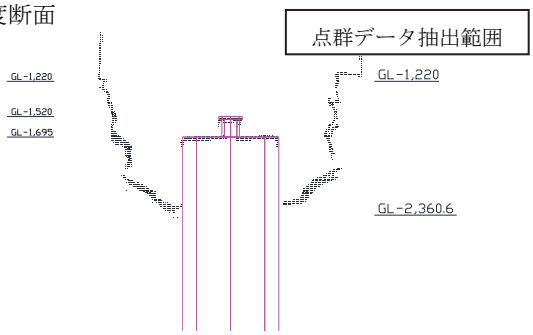
図 3.3.2-12　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 30 時間後）



除去体積の計算

	(m³)
円錐台積算体積	2.780
模擬廃棄体分控除体積	0.338
除去体積	2.442

+45 度断面



フィッティングした円の集合

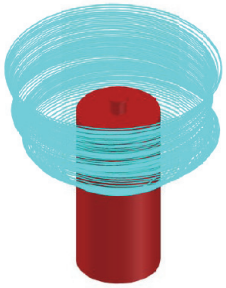
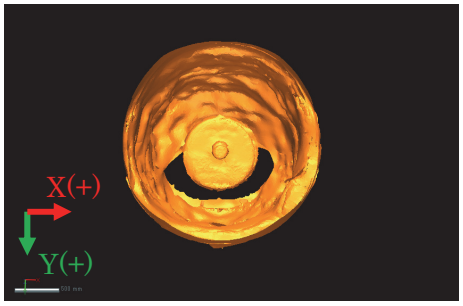


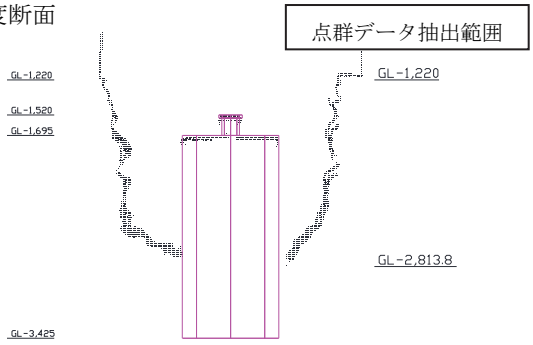
図 3.3.2-13　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 42 時間後）



除去体積の計算

	(m³)
円錐台積算体積	3.731
模擬廃棄体分控除体積	0.570
除去体積	3.161

+45 度断面



フィッティングした円の集合

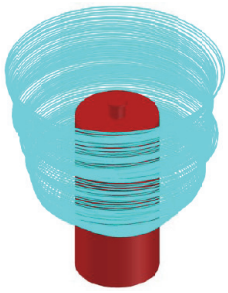
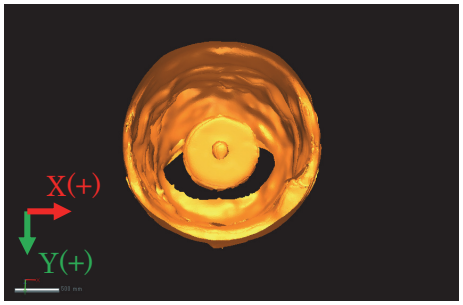


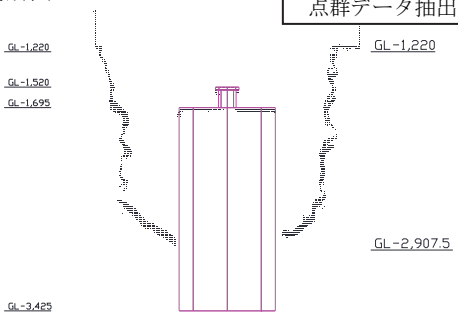
図 3.3.2-14　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 53 時間）



除去体積の計算

	(m³)
円錐台積算体積	3.996
模擬廃棄体分控除体積	0.619
除去体積	3.377

+45 度断面



フィッティングした円の集合

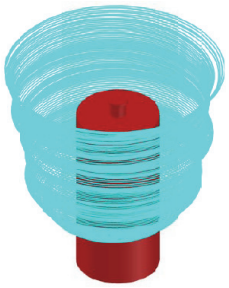
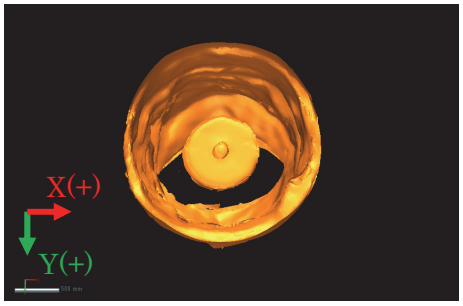


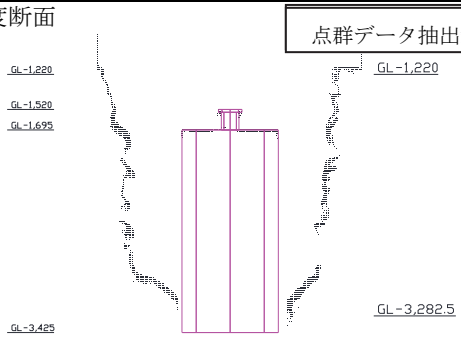
図 3.3.2-15　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 58 時間）



除去体積の計算

	(m³)
円錐台積算体積	4.720
模擬廃棄体分控除体積	0.817
除去体積	3.903

+45 度断面



フィッティングした円の集合

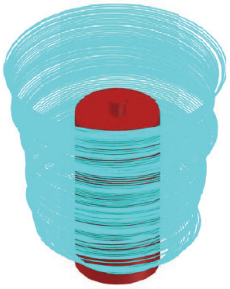
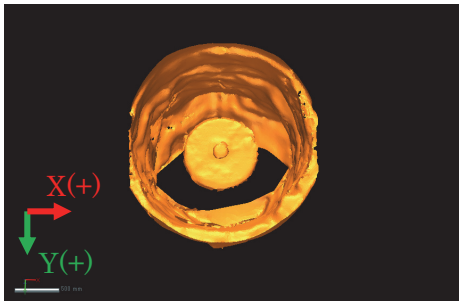


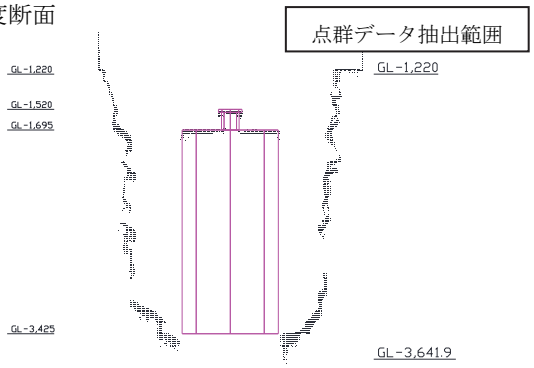
図 3.3.2-16　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 68 時間）



除去体積の計算

	(m³)
円錐台積算体積	5.528
模擬廃棄体分控除体積	1.007
除去体積	4.521

+45 度断面



フィッティングした円の集合

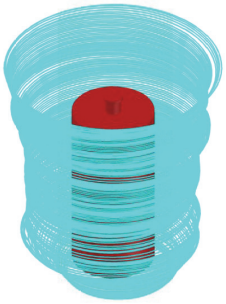


図 3.3.2-17　緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 77 時間後）

2) 緩衝材除去体積結果

これらのデータから得られた知見を以下に示す。

- 累積 30 時間までは模擬廃棄体把持部周りを含めて、ほぼ同じレベルで緩衝材が除去されており、噴射リングの設置した保護管により横向き噴射を実施しなくとも模擬廃棄体把持部周りの緩衝材、ペレットが除去されたと考えられる。
- 累積 30 時間後以降は、模擬廃棄体が現れ、側部の緩衝材が除去された。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。
- 除去形状情報 3D スキャナ 2 台の点群情報を合成し、除去形状を測定することにより、死角が少なく幅広い範囲の除去形状取得でき、深度が増加しても明瞭な除去形状を取得できた。

(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 3.3.2-2）。

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

緩衝材除去量（体積）＝（緩衝材除去量（重量））／（緩衝材の乾燥密度）
※本試験では緩衝材の乾燥密度 1.6Mg/m^3

上記の SS 濃度から算定した緩衝材除去量と 3D スキャナによる緩衝材除去量の比較を図 3.3.2-18 に示す。結果から得られた知見を以下に示す。

- SS 濃度から算定した緩衝材除去量と 3D スキャナによる緩衝材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。
- 試験後半では、両者の除去量に差が生じている。これは、緩衝材除去時に時間の経過とともに塩水が吸水膨潤したため、除去体積から算出した除去量が少なくなったと考えられる。したがって、緩衝材の除去量を測定する方法として除去形状から除去量をする場合、残置された緩衝材の体積変化を反映することができれば、より精度の高い除去量の算定が可能である。

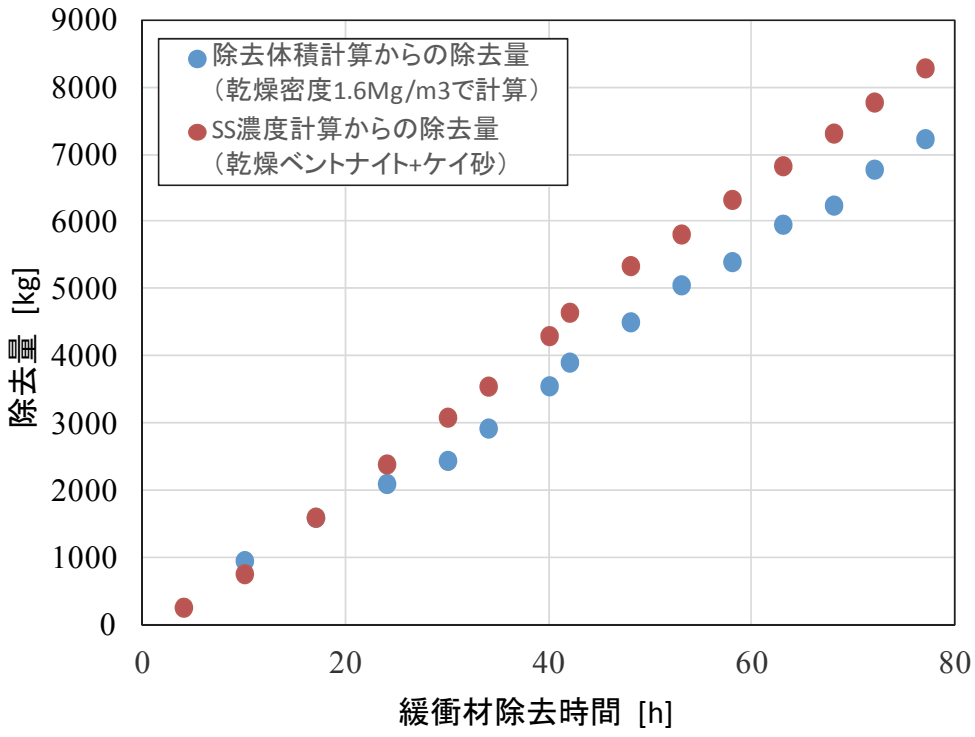


図 3.3.2-18　緩衝材累積除去量（除去堆積計算と SS 濃度計算）の比較

表 3.3.2-2　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

date	time	入口側 SS （時間換算）	出口側 SS （時間換算）	流量	流入 ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ量	初期含有 ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ量	溜り水内 ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ量	除去 ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ量	除去 ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ量 （1時間換算）	累計除去量 （乾燥ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ）	累計除去量 （乾燥ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ+ 砂）	累計除去量 （湿潤ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ+ 砂）	除去体積計算	除去体積計算からの除去量 （乾燥密度1.6Mg/m^{3}で計算）
		mg/L	mg/L	m3/hr	kg	kg	kg	kg	kg/h	kg	kg	kg	m3	kg
2014/10/20	4	12923.71	804.35	14.90	192.53	11.98	1.18	181.72	45.43	181.72	259.60	299.84		
2014/10/21	10	24343.02	1157.98	15.03	365.90	17.41	1.10	349.59	58.27	531.31	759.02	876.66	0.596	953.6
2014/10/22	17	40183.98	1379.56	15.11	606.99	20.84	1.97	588.12	84.02	1119.43	1599.19	1847.06	0.998	1596.8
2014/10/23	24	38777.48	1694.55	14.93	578.94	25.30	1.02	554.66	79.24	1674.10	2391.57	2762.26	1.313	2100.8
2014/10/24	30	39916.06	7933.36	15.17	605.44	120.33	2.17	487.28	81.21	2161.37	3087.68	3566.27	1.528	2444.8
2014/10/27	34	21850.04	844.42	15.32	334.75	12.94	1.90	323.72	80.93	2485.09	3550.13	4100.40	1.829	2926.4
2014/10/28	40	35486.13	1316.82	15.33	544.12	20.19	2.34	526.27	87.71	3011.36	4301.94	4968.74	2.222	3555.2
2014/10/29	42	16104.78	346.97	15.29	246.24	5.31	2.47	243.40	121.70	3254.76	4649.66	5370.36	2.442	3907.2
2014/10/31	48	33154.76	1197.95	15.17	502.96	18.17	1.21	485.99	81.00	3740.76	5343.94	6172.25	2.817	4507.2
2014/11/4	53	22814.28	1095.52	15.12	344.86	16.56	1.15	329.45	65.89	4070.21	5814.58	6715.84	3.161	5057.6
2014/11/5	58	24743.92	1009.13	15.14	374.56	15.28	0.85	360.14	72.03	4430.35	6329.07	7310.07	3.377	5403.2
2014/11/10	63	23961.61	1034.93	15.23	364.89	15.76	1.81	350.94	70.19	4781.29	6830.41	7889.13	3.725	5960.0
2014/11/11	68	23546.01	974.55	15.01	353.49	14.63	1.04	339.90	67.98	5121.19	7315.99	8449.96	3.903	6244.8
2014/11/13	72	22140.45	894.77	15.18	335.98	13.58	1.04	323.44	80.86	5444.63	7778.04	8983.64	4.237	6779.2
2014/11/14	77	24645.75	1241.94	15.19	374.27	18.86	1.03	356.44	71.29	5801.07	8287.24	9571.76	4.521	7233.6

※湿潤ベントナイトは含水比 15.5%として計算した

3.3.3　緩衝材除去システムの遠隔による制御・監視機能

(1) 噴射・吸引設備.の制御・監視機能

緩衝材除去試験時、模擬廃棄体の把持機能について確認を行った。緩衝材除去システムの把持方法図 3.3.3-1 を示す。得られた知見を以下に示す。

- 塩水噴射・スラリー吸引装置の動作を遠隔操作設備内から制御・監視し、緩衝材除去状況に合わせ操作を行い、対象緩衝材の除去が可能なことを確認した(図 3.3.2-6、図 3.3.2-7)。
- 緩衝材除去試験時に、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し把持機能の制御・監視が可能なことを確認した（図 3.3.3-2)。
- 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行った。この結果、遠隔操作により昇降装置の引上げを制御可能なことを確認した（図 3.3.3-2)。

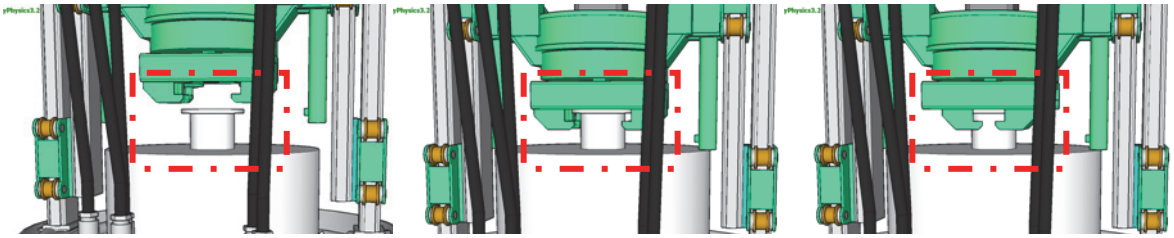


図 3.3.3-1　模擬廃棄体の把持方法

図 3.3.3-2　模擬廃棄体の把持・引上げ状況

(2) 塩水リユース設備の制御・監視機能

緩衝材除去試験時、遠隔操作設備により塩水リユース設備の制御・監視を行った。得られた知見を以下に示す。

- 緩衝材除去試験時に、塩水の噴射量およびスラリー吸引量を遠隔操作設備内で制御・監視し、試験中に遠隔による制御・監視が可能なことを確認した（図 3.3.1-2、図 3.3.3-3）。
- 緩衝材除去試験時に、固液分離槽のスラリーの固液分離機能、リユースの SS 品質リユース、塩分濃度、pH 等性状を遠隔操作設備内で監視し、遠隔による監視が可能なことを確認した（図 3.3.1-5、図 3.3.3-3）。

図 3.3.3-3　塩水リユース設備の監視状況

3.4　異なる特性を有する緩衝材に対して緩衝材除去システムの適用性の検討

これまでに緩衝材除去システムの緩衝材除去試験により、模擬廃棄体の最深部まで緩衝材の除去を実施している。一方、廃棄体回収という観点では、廃棄体を把持し引き上げることができれば、必ずしも深部まで緩衝材を除去する必要はなく、廃棄体回収に要する時間を最小限に抑えることができる。廃棄体を引き上げる際に発生する抵抗力は、図 3.4-1 に示すように緩衝材と廃棄体側部に発生する表面摩擦と廃棄体底面に発生する負圧である。

本検討では、緩衝材と廃棄体側部に発生する表面摩擦に着目し、異なる特性を有する緩衝材に対して小規模模型を使用した引き抜き試験を実施した。

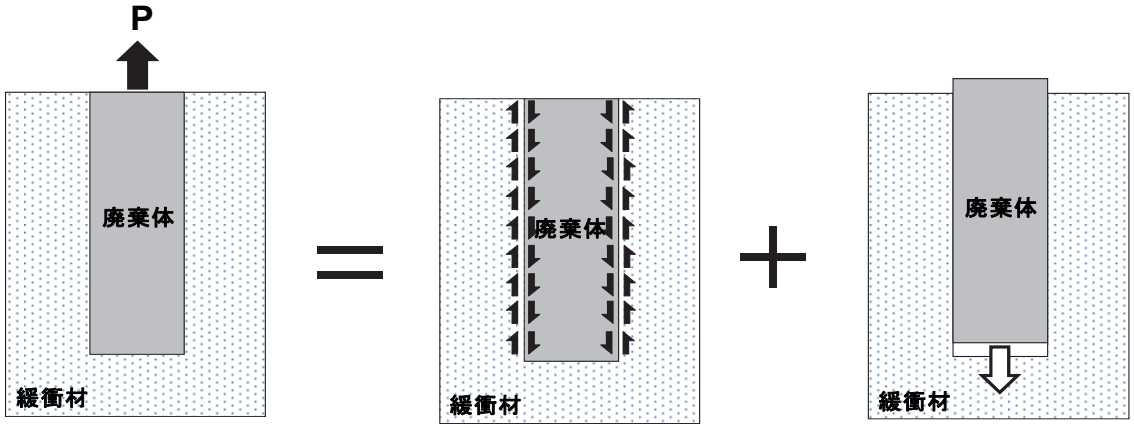


図 3.4-1　廃棄体引き抜き時に発生する抵抗力のイメージ図

3.4.1　試験対象

緩衝材は、処分孔竪置き定置方式（竪置き方式)、処分坑道横置き定置方式（横置き方式）の両方式において、様々な緩衝材方式が考えられており、図 3.4.1-1 に示すように代表的な定置方法としては、緩衝材ブロック、原位置締固め、ペレット充填、吹付けなどがある[3]。(NUMO、2011)

引き抜き試験では、廃棄体周囲に構築される人工バリアの状態に着目し、緩衝材と廃棄体の隙間にペレットを充填する方式（以下、試験体タイプ A)、廃棄体定置後に緩衝材と廃棄体の隙間が発生しない方式（以下、試験体タイプ B）を対象とする。

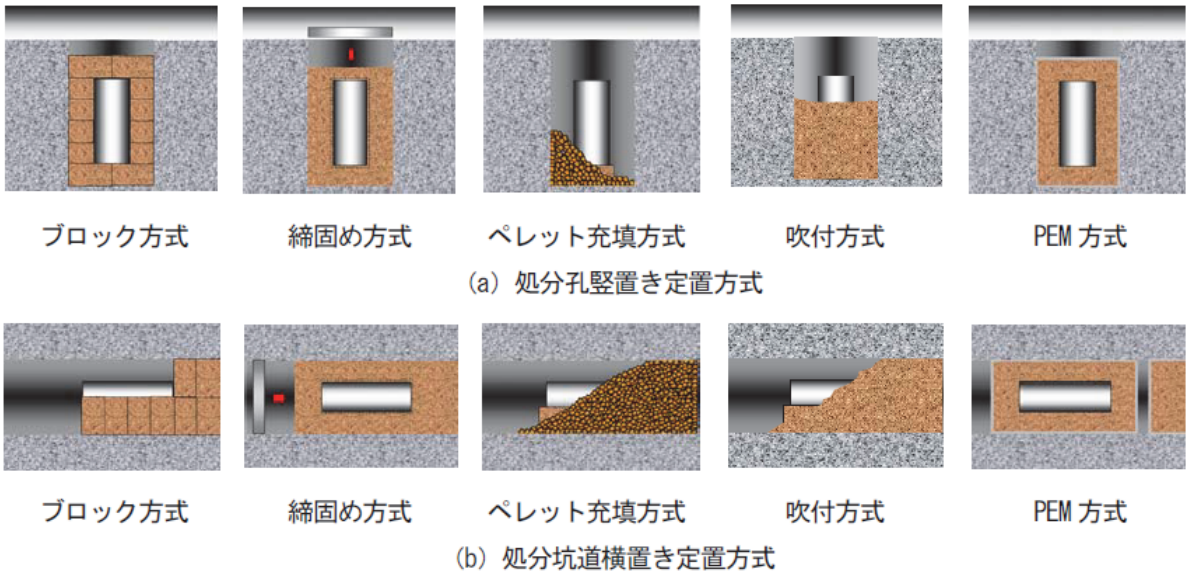


図 3.4.1-1　定置概念（NUMO、2011）

3.4.2　試験条件

(1) 試験体の材料仕様

引き抜き試験では、（ｉ）試験体タイプ A、（ii）試験体タイプ B の 2 ケースについて試験を実施する。各方式に使用する試験体の材料仕様を表 3.4.2-1 に示す。使用するペレットの含水比および乾燥密度の結果を表 3.4.2-2、廃棄体に使用する炭素鋼の表面粗さの測定結果を図 3.4.2-1 に示す。

表 3.4.2-1　試験体に使用する材料仕様

	仕様	備考
ペレット	0.3mm 級ペレット、4mm 級ペレット	緩衝材除去試験と同等仕様
緩衝材	クニゲル V1 70wt%、 ケイ砂 3 号 15wt%、ケイ砂 5 号 15wt%	緩衝材除去試験と同等仕様
模擬廃棄体（炭素鋼）	SFVC1（JIS G 3202）	

表 3.4.2-2　ベントナイトペレット含水比および単体の乾燥密度測定結果

	0.3mm 級ペレット	4mm 級ペレット
ベントナイト材料	クニゲル V1	クニゲル V1
ベントナイト配合率（%）	100	100
土粒子密度（Mg/m^3）	2.796	2.796
含水比（%）	5.77	5.89
乾燥密度（Mg/m^3）	2.13	1.97

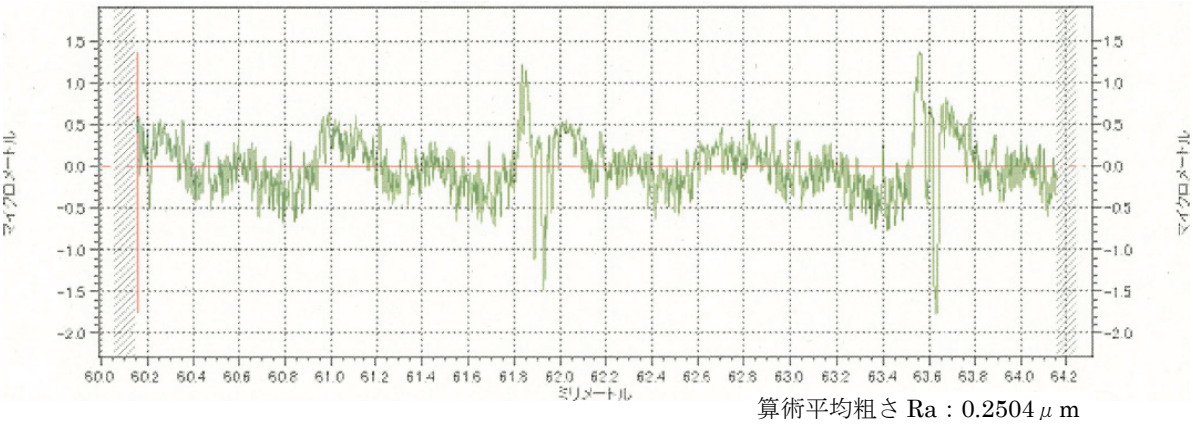


図 3.4.2-1　炭素鋼の表面粗さ測定結果(プロファイルグラフ、平均粗さ、最大粗さ)

(2) 試験体の規格および試験条件

引き抜き試験で実施する各試験ケース（試験体タイプ A、試験体タイプ B）の試験体の規格および試験条件を表 3.4.2-3 に示す。各試験ケースとも側圧を変化させた試験を実施する。また、引き抜き試験に使用する試験体の形状を図 3.4.2-2 に示す。

表 3.4.2-3　各試験体の規格および試験条件

試験条件	試験体タイプ A		試験体タイプ B
	ペレット	緩衝材	緩衝材
乾燥密度	1.37 Mg/m³	1.60 Mg/m³	1.60 Mg/m³
含水比 （飽和度）	5～10 %※ （30～55%）	20～23 % （85～90%）	20～23 % （85～90%）
試験体に作用させる側圧	0.05、0.15、0.30、0.60 MPa		
引き抜き速度	0.2mm/min		

※ペレットの含水比（飽和度）は 0.3mm および 4mm 級ペレット単体の値

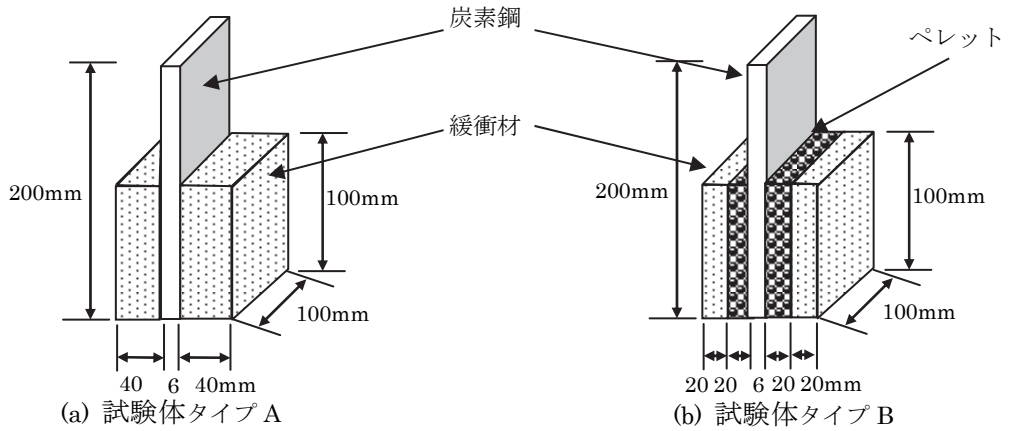
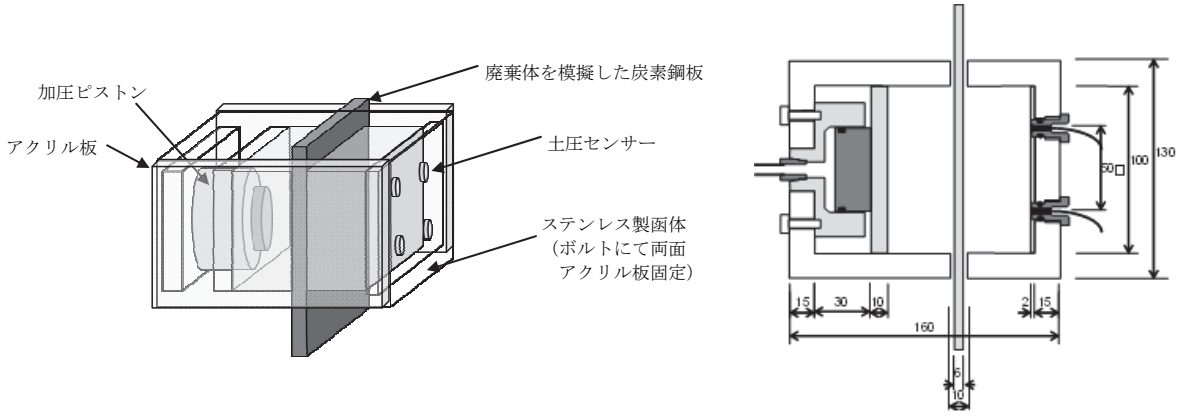


図 3.4.2-2　試験体の形状

(3) 試験装置

引き抜き試験に使用する試験用モールドは、図 3.4.2-2 に示す試験体が納まる寸法とする。以下、使用する試験装置の規格・能力および図 3.4.2-3 に試験装置の詳細を示す。その他、試験に供する試験機器の仕様を表 3.4.2-4 に示す。

・荷重の載荷、制御用水圧ジャッキ（φ50mm）
・水圧ジャッキは、供給する水を窒素ガス圧力にて制御
・加圧側（水圧ジャッキ）と逆側に土圧センサーを 4 か所設置
・側面は厚さ 20mm のアクリル板を採用



(a) 鳥瞰図　　(b) 平面図

図 3.4.2-3　試験装置詳細図

表 3.4.2-4　引き抜き試験に使用した機器仕様

設備機器	機器名称	仕様
載荷装置	(株)丸東製作所製一軸圧縮試験機	最大軸力 8tf、載荷速度 0.048～4.8mm/min 土の一軸圧縮試験（JIS A 1216）に準拠
圧力センサー	共和電業(株)製　小型圧力センサー PS-10KD	計測最大圧 1MPa
データロガー	(株)東京測器研究所製　データロガー TDS302	
側圧制御装置	窒素ガスボンベ	最大ガス圧 15MPa
	東京航空計器(株)製　ガス圧測定器 MODEL300702	計測最大圧 5MPa
	水圧調整用圧力容器	最大ガス圧 4.2MPa

図 3.4.2-4　試験装置全景

3.4.3　試験方法

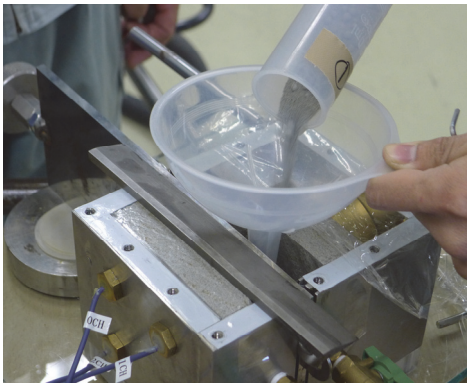
(1) 試験体の製作

緩衝材の製作に用いる材料は、ベントナイト（クニゲル V1）とケイ砂 3 号、ケイ砂 5 号を乾燥重量比 70:15:15 であらかじめ混合し、ベントナイトの含水比が 23%となるようにイオン交換水を加水してから、ミキサー(アイリッヒ型 5 リットルミキサー)で 2 分間以上混合する。なお、混合時には炭酸ガスをミキサー内部に満たし、後述のプレス成型時に空気ができるだけ残留しないようにする。プレス成型は、内径 160mm の厚肉の鋼製シリンダー（深さ約 300mm）内に材料を装てんし、プレスのためのピストンを挿入する直前にシリンダー内部に炭酸ガス注入し、500kN 載荷装置で圧縮する。プレス成型した緩衝材を試験体寸法に切り出しを行う。

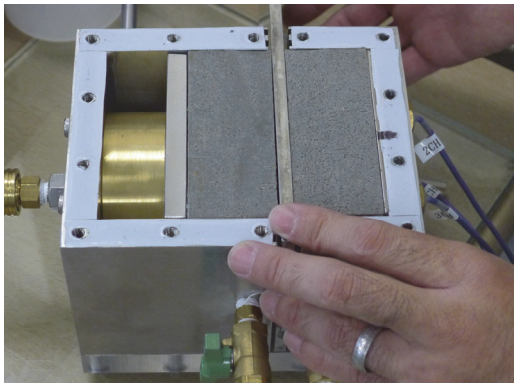
試験体タイプ A では、模擬廃棄体となる引き抜き板との間の 20mm 幅の隙間に対し、充填密度が乾燥密度換算値（有効ベントナイト密度）で 1.37 Mg/m^3 以上となるように 4mm 級ペレット（含水比 5%～10%）と 0.3mm 級ペレット（含水比 5%～10%）の 2 種類を事前に 50:50 の重量比で混合したものを使用する。

(2) 試験手順

試験体タイプ A では、プレス成型し切り出した緩衝材および炭素鋼を設置し、緩衝材と炭素鋼の隙間に上述した混合ペレット少量ずつ自然落下させて所定の乾燥密度になるように充填を行う。試験体タイプ B では、プレス成型し切り出した緩衝材を抜き試験モールドへ緩衝材設置し、炭素鋼を設置する。（図 3.4.3-1）



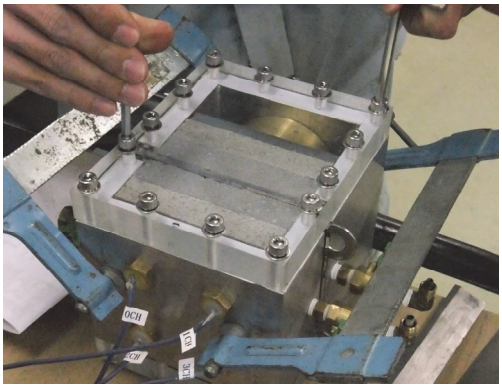
(a) 試験体タイプ A



(b) 試験体タイプ B

図 3.4.3-1　緩衝材、ペレットおよび炭素鋼の設置

各試験体を引き抜き試験用モールドに設置後、引き抜き試験用モールドのアクリル製蓋の装着し試験体を封入する。（図 3.4.3-2）



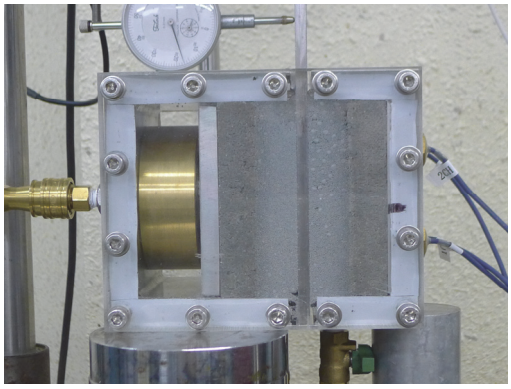
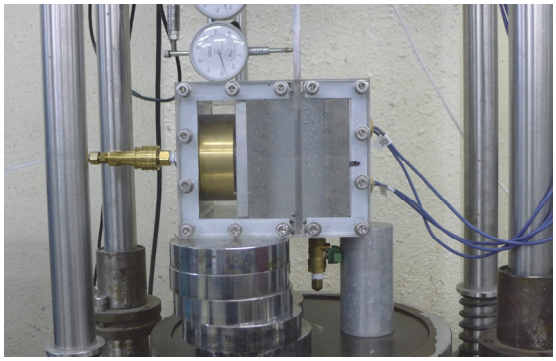
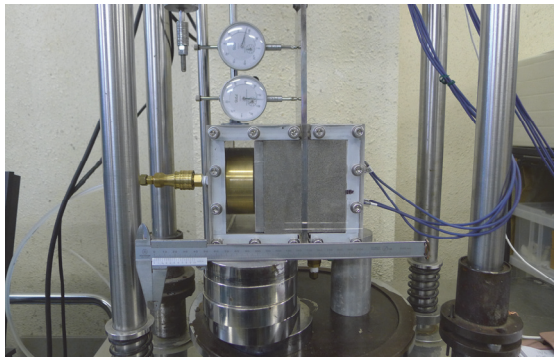


図 3.4.3-2　引き抜き試験用モールドのアクリル製蓋装着状況

各試験体封入後、試験条件となる所定の側圧を載荷後、載荷装置によって試験体を押し上げることにより、炭素鋼板を鉛直下向きに引き抜く。この時、載荷速度は 0.2mm/min とし、載荷に伴う抵抗力を連続的に取得する。（図 3.4.3-3）



(a) 試験体タイプ A



(b) 試験体タイプ B

図 3.4.3-3　引き抜き試験状況

3.4.4　試験結果

試験体タイプ A および試験体タイプ B を用いて実施した引き抜き試験結果を以下に示す。

(1) 引き抜き抵抗力の変化状況

試験体タイプ A の引き抜き試験における引き抜き変位の進展に伴う引き抜き抵抗力の変化を図 3.4.4-1 に示す。引き抜き抵抗力の変化においてピーク点は観測されなかった。変位量が 0.5mm を超えると、引き抜き抵抗力抵抗力は頭打ちになり、微小な勾配で徐々に抵抗力が漸増する傾向を示した。

試験体タイプ B の引き抜き試験における引き抜き変位の進展に伴う引き抜き抵抗力の変化を図 3.4.4-2 に示す。変位量が 0.5mm を超えたあたりから引き抜き抵抗力はピーク値を示し、その後は低下するものの変位の進展に伴って若干の勾配で漸増傾向を示した。

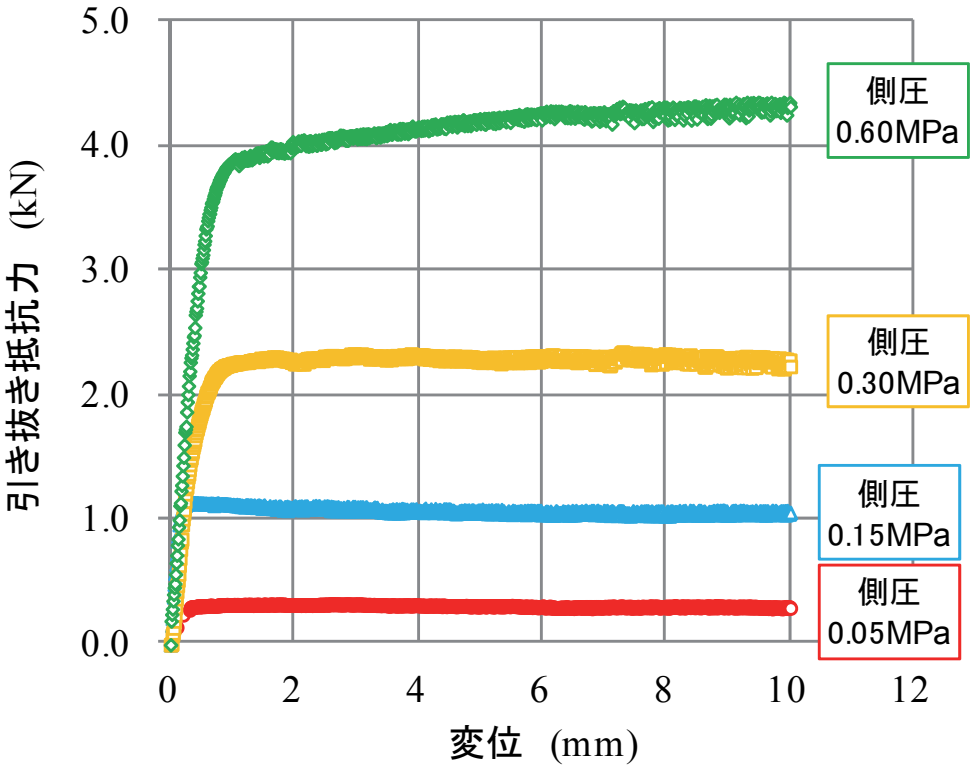


図 3.4.4-1　引き抜き抵抗力－変位の関係（試験体タイプ A）

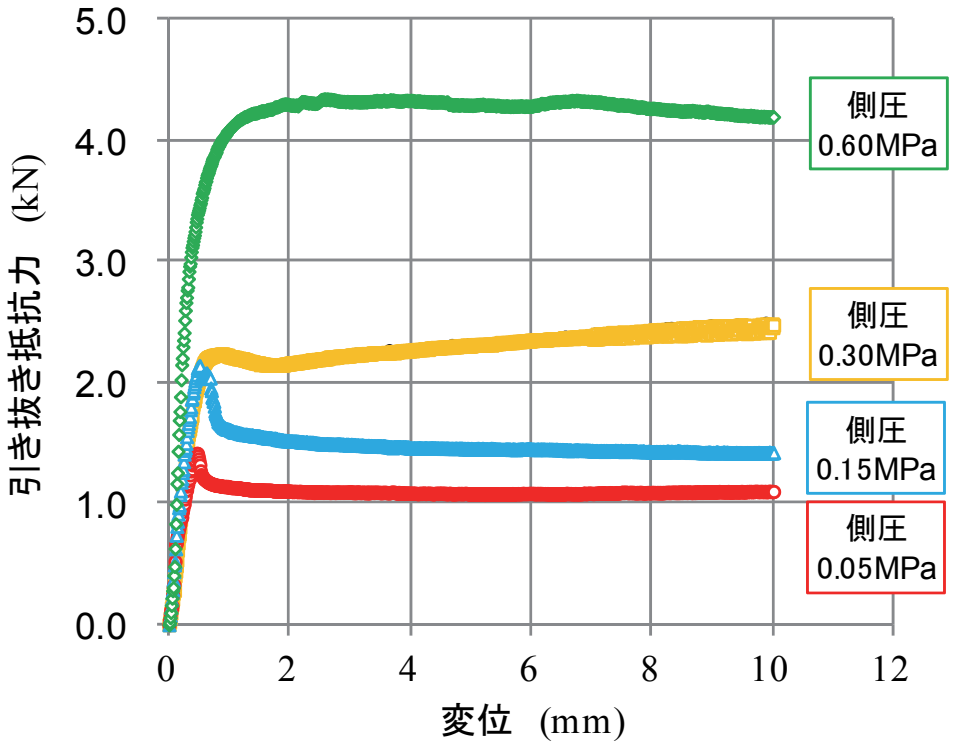


図 3.4.4-2　引き抜き抵抗力－変位の関係（試験体タイプ B）

(2) 表面摩擦応力と側圧の関係

試験体タイプ A および試験体タイプ B の引き抜き試験について、図 3.4.4-1 および図 3.4.4-2 に示した引き抜き抵抗力の計測結果から、各側圧条件における引き抜き力の最大値を引き抜き試験時の炭素鋼と緩衝材（またはペレット）の接地面積で除した値を「表面摩擦応力」として算出した結果を表 3.4.4-1 に示す。また、算出した表面摩擦応力と側圧との関係を図 3.4.4-3 に示す。これより得られた知見を以下に示す。

- 側圧条件 0.60MPa の場合には試験体タイプ A と試験体タイプ B の表面摩擦応力はほぼ等しい。
- 試験体タイプ A では側圧 - 表面摩擦応力のプロットに対する一次回帰式がほぼ原点を通る勾配を示した。
- 試験体タイプ B では側圧 - 表面摩擦応力のプロットに対する一次回帰式が Y 切片を有する勾配を示した。
- 小規模の要素試験結果ではあるが、各試験体タイプにおける側圧 - 表面摩擦応力の関係を一次回帰式で近似することができた。実規模の廃棄体に作用する側圧がわかれば、この近似式を用いて廃棄体を引き抜くための力を算出することが可能であり、緩衝材除去システムを適用した場合、どの程度緩衝材を除去すれば回収が可能か推測することができる。

表 3.4.4-1　各側圧条件における表面摩擦応力

	側圧条件（MPa）	引き抜き抵抗力の最大値(kN)	炭素鋼と緩衝材の接地面積（m²）	表面摩擦応力（MPa）
試験体タイプ A	0.05	0.33	0.02	0.017
	0.15	1.14	0.02	0.057
	0.30	2.35	0.02	0.118
	0.60	4.35	0.02	0.218
試験体タイプ B	0.05	1.42	0.02	0.071
	0.15	2.14	0.02	0.107
	0.30	2.49	0.02	0.125
	0.60	4.35	0.02	0.218

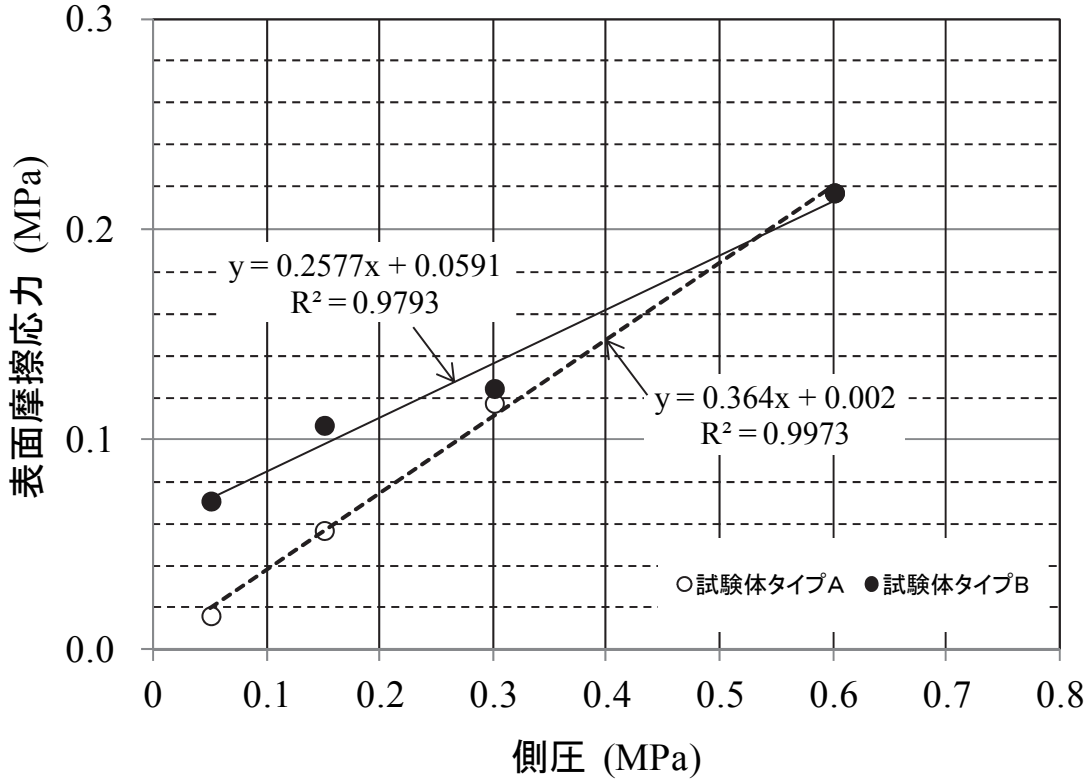


図 3.4.4-3　各側圧条件における表面摩擦応力の最大値と側圧の関係

3.5 まとめ

3.5.1 塩水リユース特性

塩水リユース特性に関わる結果を以下にまとめる。

- 本試験において処理するスラリーの SS 濃度変化に対応し、処理した塩水の SS 濃度は平均 298mg/L であり安定した処理ができることがわかった。
- 本試験のスラリー濃度は平成 25 年度の試験時のスラリー濃度より高く、本年度の改良により除去効率が向上した。
- 試験開始から累積 36 時間程度固液分離槽の沈殿物を除去しない場合、固液分離機能に影響することがわかった。
- 7 時間程度の連続試験では、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。

3.5.2 緩衝材除去特性

緩衝材除去特性に関わる結果を以下にまとめる。

- 本試験では、竪置き・ブロック方式（乾燥密度 1.6Mg/m^3、飽和度 60%程度、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。緩衝材除去システムでは、設定の緩衝材に対して、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。
- 緩衝材の除去速度（1 時間当たりの除去深さ）は、模擬廃棄体把持部上部では平均 17.1mm/h、側部では平均 22.9mm/h であり、本試験条件の除去速度を把握した。
- 緩衝材除去システムについて、緩衝材除去時間 77 時間で緩衝材の除去を実施し、緩衝材除去特性を確認できた。
- 模擬廃棄体側部では、模擬廃棄体把持部上部に比べ、除去対象部位に模擬廃棄体の胴体部が存在するため、塩水の接触面が限定され集中的に緩衝材除去が進むため、除去速度が上昇する。
- 緩衝材の除去深度とベントナイトペレットを充填した隙間部平均除去深度との差は、緩衝材除去深度の増加によりその差は広がらず、135～327mm の範囲であった。
- 除去形状情報 3D スキャナ 2 台の点群情報を合成することで、深度が増加しても明瞭な除去形状を取得できた。
- SS 濃度から算定した緩衝材除去量と 3D スキャナによる緩衝材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を示した。さらに、緩衝材の除去量を測定する方法として除去形状から除去量をする場合、残置された緩衝材の体積変化を反映することができれば、より精度の

高い除去量の算定が可能である。

3.5.3　緩衝材除去システムの遠隔による制御・監視機能

遠隔操作設備に関わる結果を以下にまとめる。

- 塩水噴射・スラリー吸引装置の動作を制御・監視し、緩衝材除去状況に合わせ操作が可能なことを確認した。
- 模擬廃棄体把持部の位置確認→把持装置の位置調整→模擬廃棄体把持部を把持→昇降装置による模擬廃棄体の引上げまでの動作が制御・監視可能なことを確認した。
- 遠隔操作設備内で塩水の噴射量およびスラリー吸引量を制御・監視し、固液分離槽のスラリーの固液分離機能、リユースの SS 品質リユース、塩分濃度、pH 等性状を監視可能なことを確認した。

3.5.4　異なる特性を有する緩衝材に対して緩衝材除去システムの適用性

小型模型を用いた引き抜き試験に関わる結果を以下にまとめる。

- 緩衝材と廃棄体側部に発生する表面摩擦に着目し、緩衝材と廃棄体の隙間にペレットを充填する方式と廃棄体定置後に緩衝材と廃棄体の隙間が発生しない方式を対象とした引き抜き試験を実施した。引き抜き試験では、各試験体に作用する側圧を変化させた場合の引き抜き力の変化を計測した。
- ペレットを充填する方式、隙間が発生しない方式ともに、側圧 - 表面摩擦応力の関係は一次回帰式で近似することができた。
- 規模の廃棄体に作用する側圧がわかれば、本試験結果を用いて廃棄体の表面摩擦力が算出でき、緩衝材除去システムを適用した場合、どの程度緩衝材を除去すれば回収が可能か推測できる可能性を示した。

3.5.5　今後の課題

(1) 緩衝材除去システム

緩衝材除去試験から得られた知見をもとに、緩衝材除去システムの今後の課題を以下に示す。

- 緩衝材除去試験により緩衝材の特性変化(密度、飽和度、廃棄体の発熱、作成方法など)に関する緩衝材除去システムの除去特性を確認する必要がある。
- 本緩衝材除去システムは、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。今後は、塩水リユースのコンパクト化など地下環境に向け本システムの完成度を上げていくことが必要である。

(2) 引き抜き試験

引き抜き試験から得られた知見をもとに、今後の課題を以下に示す。

- 本試験の緩衝材条件（密度、飽和度)だけでなく、再冠水後の膨潤挙動を含めた試験条件による試験の実施が必要である。
- 本試験は小規模要素試験であり、実規模スケールへ向けた検証が必要である。
- 緩衝材除去システムを利用した廃棄体回収に試験結果を適用する場合、緩衝材除去材は塩水による膨潤が発生するなど、より詳細な条件を考慮した試験検討が必要である。

参考文献

[1] （公財）原子力環境整備促進・資金管理センター：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）（2014）

[2] 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）

[3] 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地層処分の実現のために－”，NUMO-TR-11-01（2011）

第4章　実証試験計画の見直し

平成 25 年度に策定した地下環境における実規模で行う実証試験計画に基づき、平成 26 年度に改良を行った緩衝材除去システムを利用する場合の作業環境について調査・検討し、その結果に基づき実証試験に必要となる設備及および坑道について基本設計を行った。また、緩衝材除去システムの作業環境については、平成 25 年度に実施された地層処分実規模設備整備事業[1]における幌延深地層研究センターの地下施設での研究成果を活用した。

4.1　検討フロー

図 4.1-1 に「実証試験計画の見直し」の検討フローを示す。

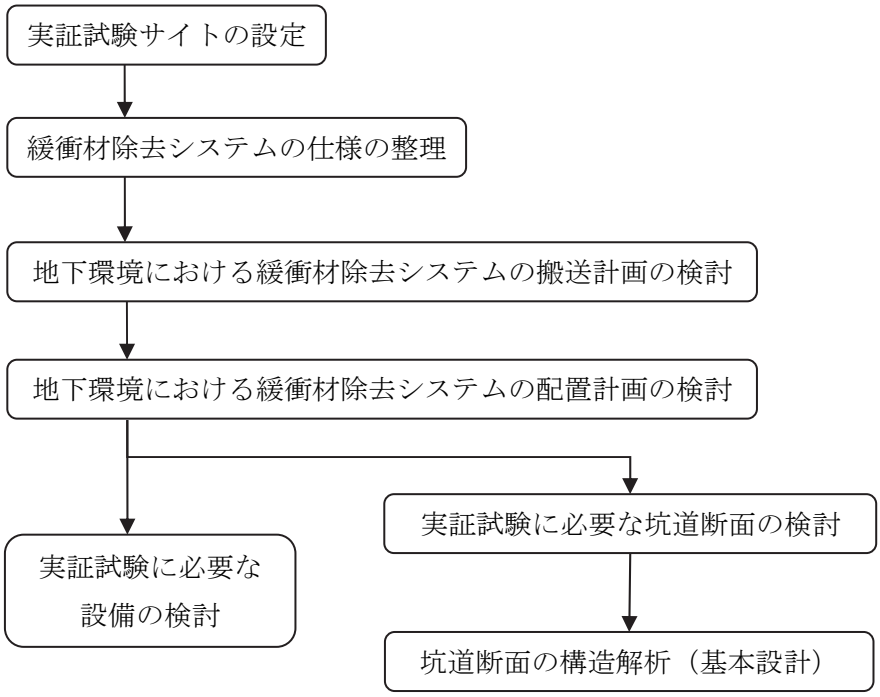


図 4.1-1　実証試験計画の見直し検討フロー

4.2　実証試験サイトの設定

本年度は、「地下環境での実証試験計画の見直し」にあたり、実際の地下施設を例とした検討を行った。地下施設として、幌延深地層研究センターの 350m 調査坑道を対象とする。

4.2.1　地下坑道の仕様

(1) 地下坑道の概要

検討対象とする地下坑道（周回坑道、試験坑道）の平面配置図を図 4.2.1-1 に、周回坑道及び試験坑道 2 の断面仕様を図 4.2.1-2、図 4.2.1-3 を示す。緩衝材除去試験の実証試験場所は「試験坑道 2」とする。試験坑道 2 の仕様は、坑道断面 φ4000mm、坑道延長 25m を設定する。

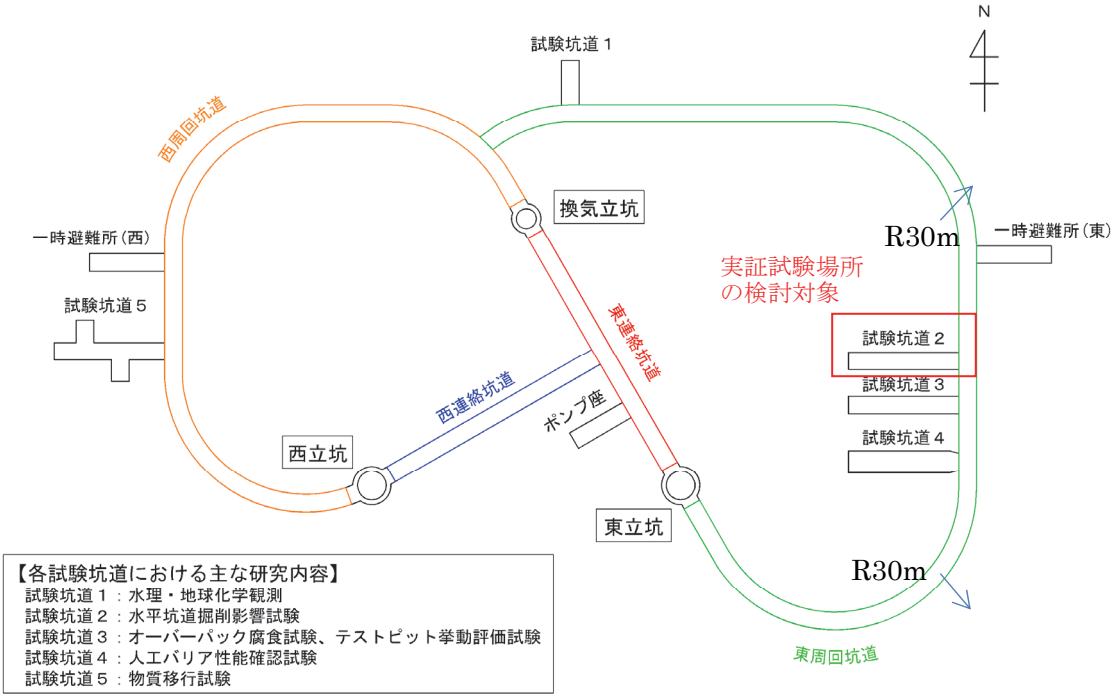


図 4.2.1-1　地下坑道の配置概要[1]

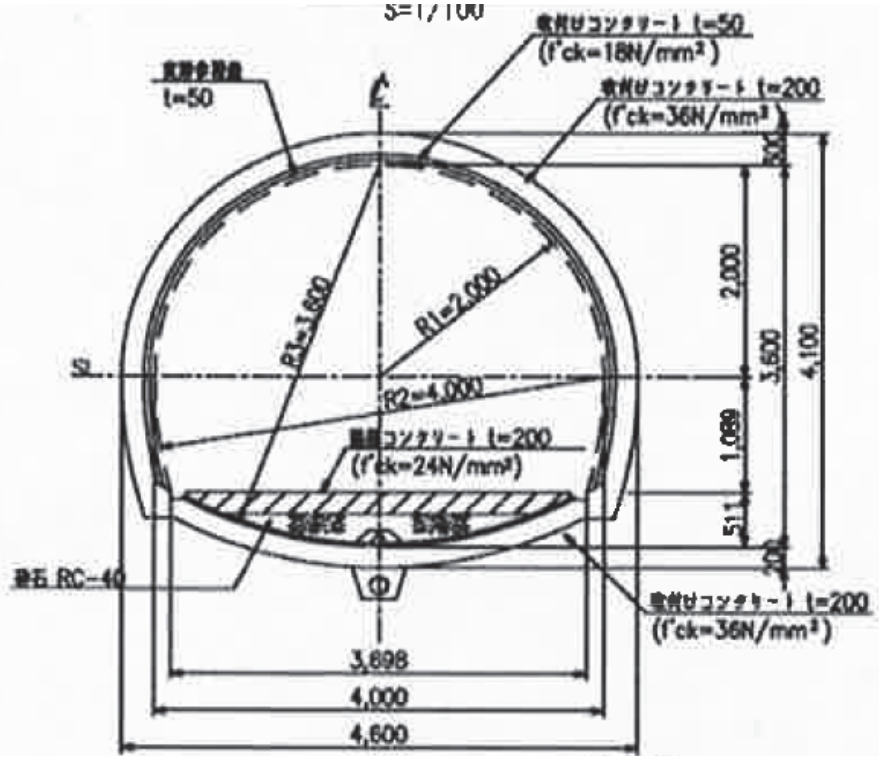


図 4.2.1-2　周回坑道の断面仕様[1]

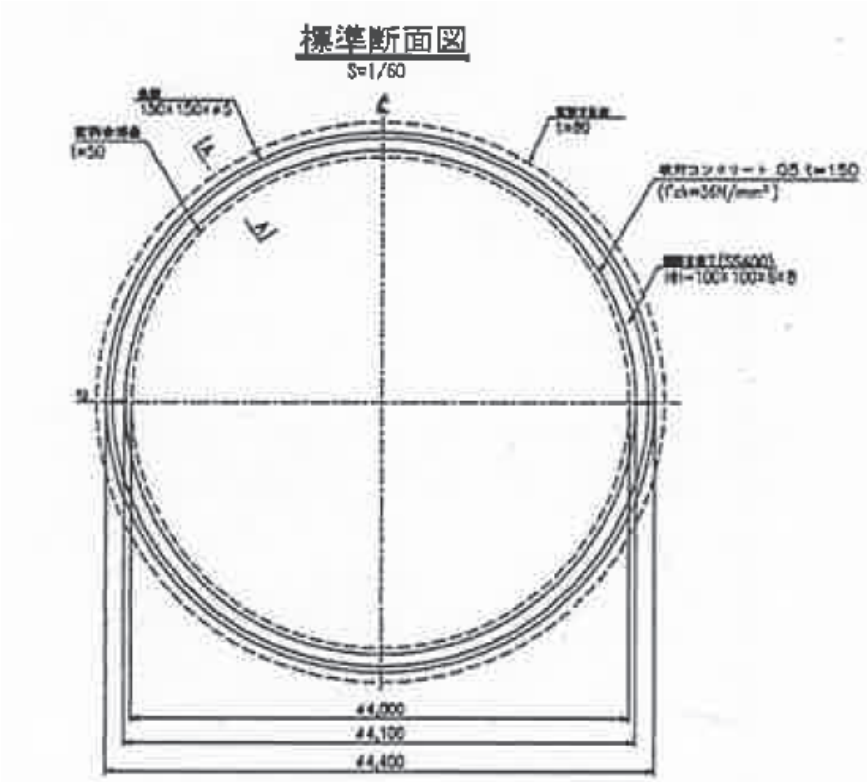


図 4.2.1-3　試験坑道 2 の断面仕様[1]

(2) 地下坑道の設備

実証試験を実施するために、緩衝材除去システムの資機材を試験坑道 2 まで搬出入する必要がある。表 4.2.1-1 に資機材の搬入出に必要な設備および坑道仕様を示す。資機材の搬出入は、坑道内の設備であるトロリー（図 4.2.1-4）を使用することが考えられる。そのため、搬出入する資機材は 4t 以下という制約を受けることになる。

表 4.2.1-1　資機材搬入出に用いる設備および坑道仕様[1]

坑道	坑道仕様	揚重 or 搬送方法
立坑	φ6.5m	立坑（揚重荷重 8ｔ） 坑口移動台車 8ｔ
立坑下	高さ H 約 4.5m	トロリー （揚重荷重　2ｔ@2 基）
周回坑道	高さ H 約 3.0m	トロリー （搬送荷重　2ｔ@2 基）
試験坑道 2 入口	高さ H 約 3.0m	トロリー （揚重荷重　2ｔ@2 基）
試験坑道 2	高さ H 約 4.0m	トロリー （搬送荷重　2ｔ@2 基）

図 4.2.1-4　トロリーおよび巻上機

4.3　緩衝材除去システムの仕様の整理

地下環境での緩衝材除去試験に必要な設備を図 4.3-1 に示す。図に示すように、①噴射・吸引設備、②塩水リユース設備、③遠隔操作設備で構成される。

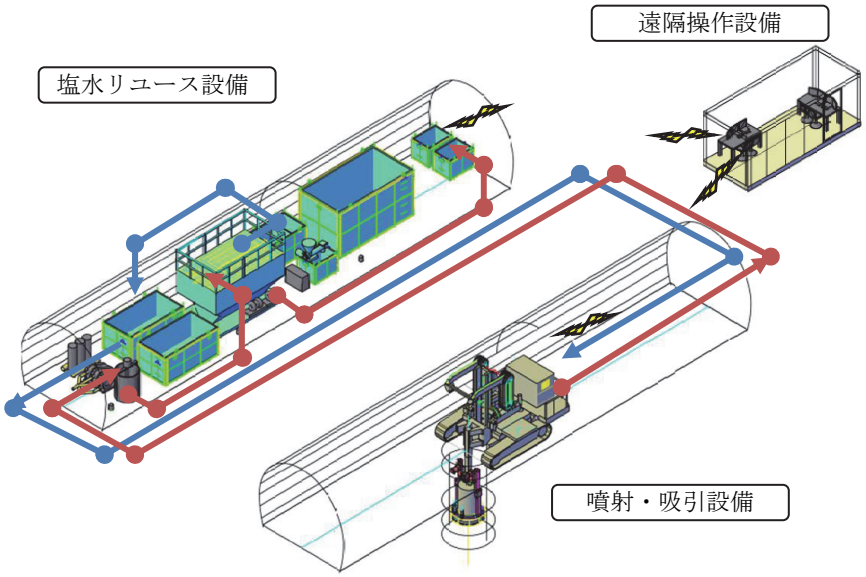


図 4.3-1　緩衝材除去システムの設備概要

4.3.1　噴射・吸引設備の概要

噴射・吸引設備の全体図を図 4.3.1-1 に示す。噴射・吸引設備は、主に①走行装置、②昇降装置（把持装置を含む）、③塩水噴射・スラリー吸引装置、④油圧ユニットで構成される。また、主な諸元として、高さ 3,913mm、幅 3,250mm、長さ 5,360mm、重量 15,835kg（表 4.3.1-1）である。

表 4.3.1-1　噴射・吸引設備主要部の重量

主要部	重量（kg）
①走行装置	7, 280
②昇降装置（把持装置を含む）	5, 550
③塩水噴射・スラリー吸引装置	835
④油圧ユニット装置	2, 170
合計	**15, 835**

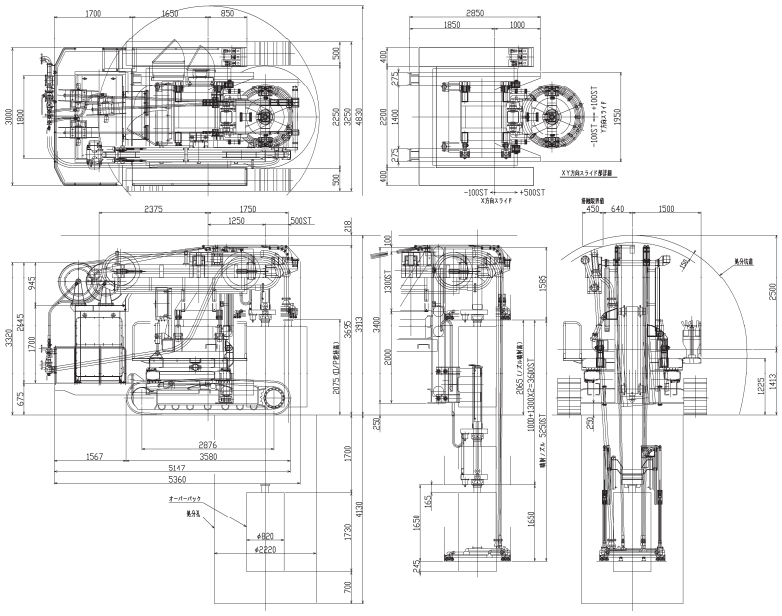


図 4.3.1-1　噴射・吸引設備の全体図

4.3.2　塩水リユース設備の概要

緩衝材除去試験における塩水リユース設備の塩水、スラリー処理フローを図 4.3.2-1 に示す。塩水リユース設備の構成要素および寸法・重量を表 4.3.1-1 に示す。

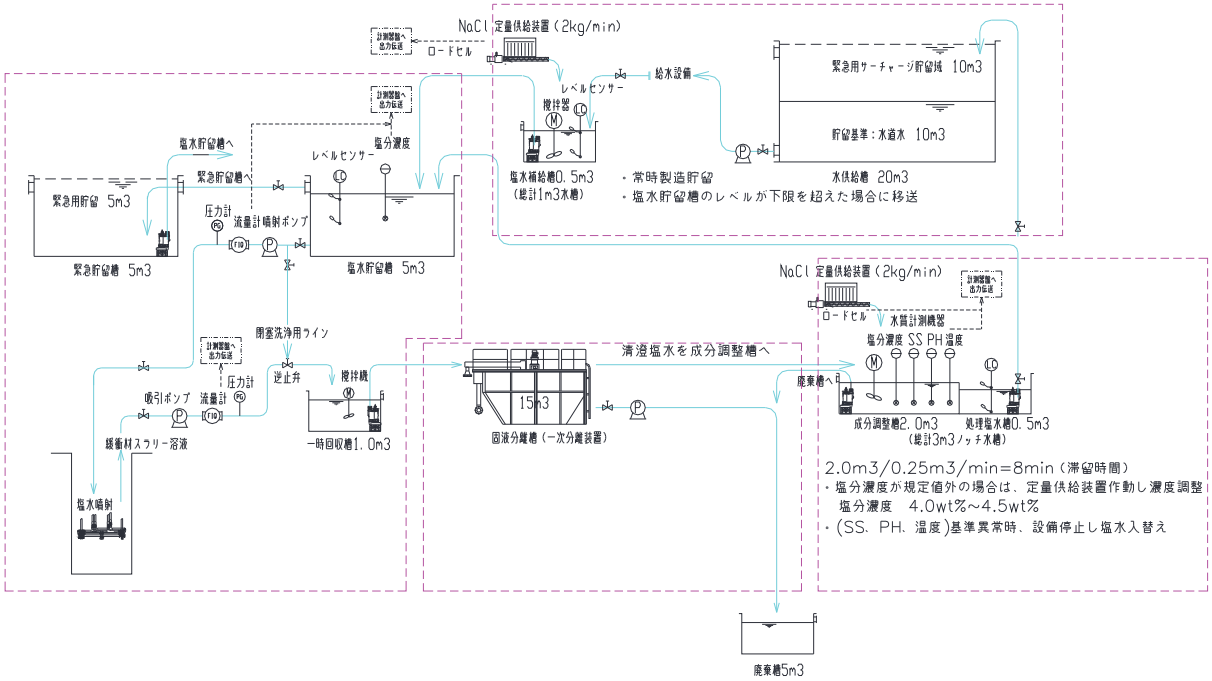


図 4.3.2-1　塩水リユース設備による塩水・スラリー処理フロー

表 4.3.2-1　塩水リユース設備の仕様

設備名称	公称容量 (m^3)	外寸法			重量（kg）
		長辺（mm）	短辺（mm）	高さ（mm）	
①噴射ポンプ	—	2, 000	2, 000	1, 440	1, 300
②吸引ポンプ	—	2, 300	1, 200	1, 166	1, 800
③一時回収槽	1. 0	1, 400	1, 050	900	304
④固液分離槽	15. 0	4, 000	2, 300	2, 300	3, 400
⑤成分調整槽	3. 0	2, 150	1, 400	1, 300	652
⑥水供給槽	20. 0	4, 400	2, 400	2, 250	2, 150
⑦塩水補給槽	1. 0	1, 400	1, 050	900	304
⑧塩水貯留槽	5. 0	2, 400	1, 550	1, 645	845
⑨緊急貯留槽	5. 0	2, 900	2, 050	1, 050	856
⑩廃棄槽	5. 0	2, 650	1, 800	1, 300	859

4.3.3　遠隔操作設備の概要

遠隔操作設備の全体図を図 4.3.3-1 に示す。遠隔操作設備の構成最大重量設備は、主制御盤であり、重量は約 100kg である。遠隔操作室には、PC 本体とモニターで 7 台、机（1.5m×0.8m：2 台、1.8m×0.8m：1 台）を配置する。

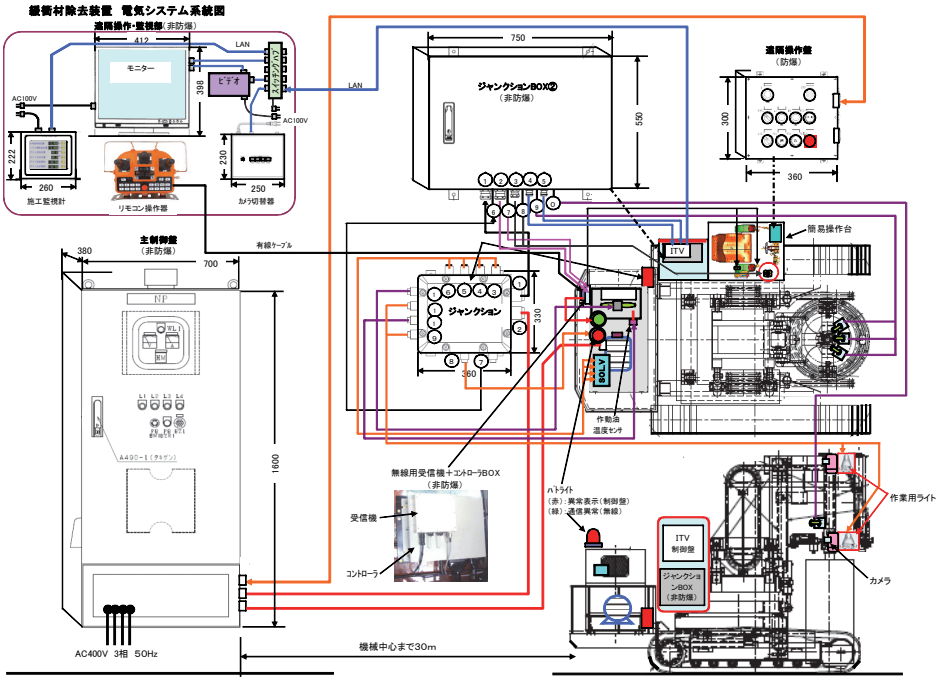


図 4.3.3-1　遠隔操作設備の全体図[2]

4.4　地下環境における緩衝材除去システムの搬送計画の検討

緩衝材除去システムの設備や資機材を試験坑道 2 まで搬出入するには、立坑および周回坑道を経由することになる。そこで、立坑および周回坑道の形状、揚重設備の制約などの制約条件から試験坑道 2 までの緩衝材除去システムの搬入計画について検討を行った。

4.4.1　搬出入計画

(1) 搬出入ルート

試験坑道 2 までの資機材の搬入出ルートは、図 4.4.1-1 に示すとおりに設定した。

・地上から地下まで：東立坑

・立坑下から試験坑道 2 まで：東立坑から試験坑道 2 に至る最短ルート

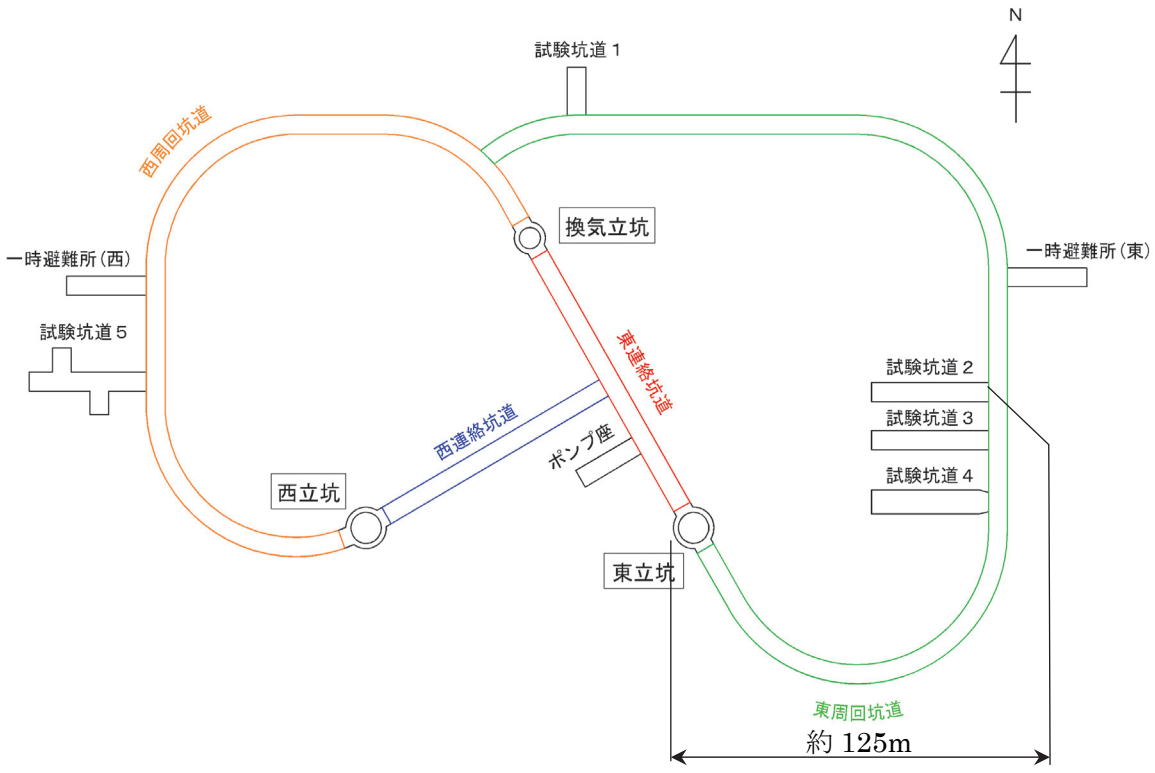


図 4.4.1-1　資機材搬入出ルート

(2) 緩衝材除去システムの分割運搬検討

噴射・吸引設備の総重量は約 15.9t（4.3.1 参照）あるため、周回坑道内の揚重荷重の制約条件（最大 4t）を満足しない。そこで、表 4.3.1-1 に示す噴射・吸引設備を構成する①、②、③、④を周回坑道の揚重荷重条件（最大 4t）を満足するように分割化を検討

した。表 4.4.1-1 に検討結果を示す。塩水リユース設備は各水槽を分割せずに運搬し、遠隔操作設備は寸法・重量ともに東立坑、周回坑道の制約条件内のため、検討から除く。

表 4.4.1-1　噴射・吸引設備の分割検討結果

主部位	細部	高さ (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)	重量 (kg)
①走行装置	クローラ左	782	1,025	3,648	3,045
	クローラ右	782	1,025	3,648	3,045
	センターフレーム	480	1,300	1,230	670
	ユニットベース	1,055	3,000	1,700	520
	小計				**7,280**
②昇降装置（把持装置を含む）	スライドフレーム	1,173	2,200	1,905	1,420
	運転席・歩廊	1,130	3,000	2,800	550
	昇降フレーム、電装品	3,400	1,350	1,275	2,010
	塩水ホース巻取装置	4,600	700	985	585
	把持部昇降装置、噴射部昇降装置	1,675	1,350	1,590	1,570
	小計				**5,550**
③塩水噴射・スラリー吸引装置	噴射・吸引部	400		φ1,430	250
	塩水ホース巻取装置	4,600	700	985	585
	小計				**835**
④油圧ユニット部	油圧ユニット	1,400	1,800	1,040	1,570
	リール架台	1,716	1,990	1,358	210
	リール 1	935	542	870	130
	リール 2	935	542	870	130
	リール 3	935	542	870	130
	小計				**2,170**
合計					**15,835**

4.4.2　搬出入計画

(1) 東立坑搬出入計画

表 4.2.1-1 に示すように東立坑の最大揚重は 8t である。また、資機材の設置スペースは図 4.4.2-1 のようになる。そこで、①噴射・吸引設備、②塩水リユース設備の中で最大寸法・重量となる各部材について搬出入の検討結果を以下に示す。

①噴射・吸引設備の最大の寸法及び重量

・最大寸法：昇降設備（運転席・歩廊）3.0m×2.8m ≦ 設置スペース※

・最大重量：走行体（クローラ）約 3.1t ≦ 8t

②塩水リユース設備の最大の寸法及び重量

・最大寸法：水供給槽 2.4m×2.25m ≦ 設置スペース※

・最大重量：固液分離槽　約 3.4kg ≦ 8t

①噴射・吸引設備、②塩水リユース設備ともに寸法・重量の制約条件をクリアし、搬出入することが可能である。塩水リユース設備の水供給槽の平面形状は 4.4m×2.4m のため、設置スペースに収まらないが、高さが 2.25m と低いので半回転すれば搬出入可能となる。なお、固液分離槽も同じ要領で搬出入する。

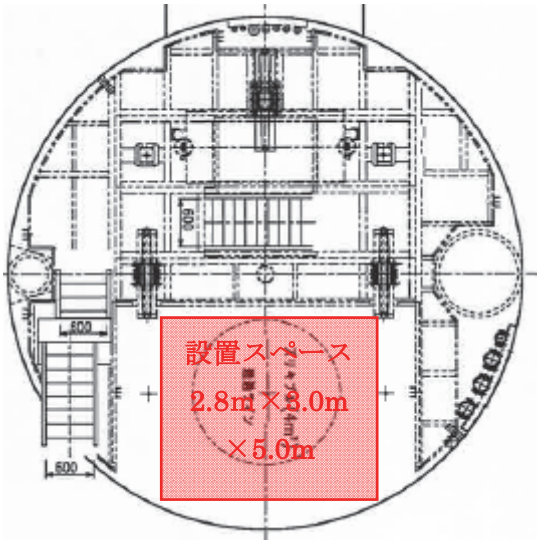


図 4.4.2-1　搬出入に用いる東立坑の断面仕様[1]

(2) 周回坑道搬出入計画

周回坑道から試験坑道 2 までの搬出入検討として、最大寸法である塩水リユース設備「水供給槽」について周回坑道、試験坑道 2 の入口部の干渉確認を行った。ここで運搬方法は、周回坑道の①既存クレーンと②ベルトコンベヤとターンテーブルの 2 ケースを検討対象とした。

（ⅰ）A 地点：周回坑道で最も曲線半径が小さい R30m区間

（ⅱ）B 地点：直角に曲がる必要がある試験坑道 2 の入口部

検討結果を図 4.4.2-2、図 4.4.2-3 に示す。検討結果は以下のとおりである。

・クレーン利用の場合、吊り上げに必要な吊代が確保できない。また、B 地点で隅切り部の拡幅が生じる。

・ベルトコンベヤとターンテーブルの組合せにより、「水供給槽」を搬出入できるか否かを検討した結果、A 地点では通過可能だが、B 地点で隅切り部の拡幅が生じる。

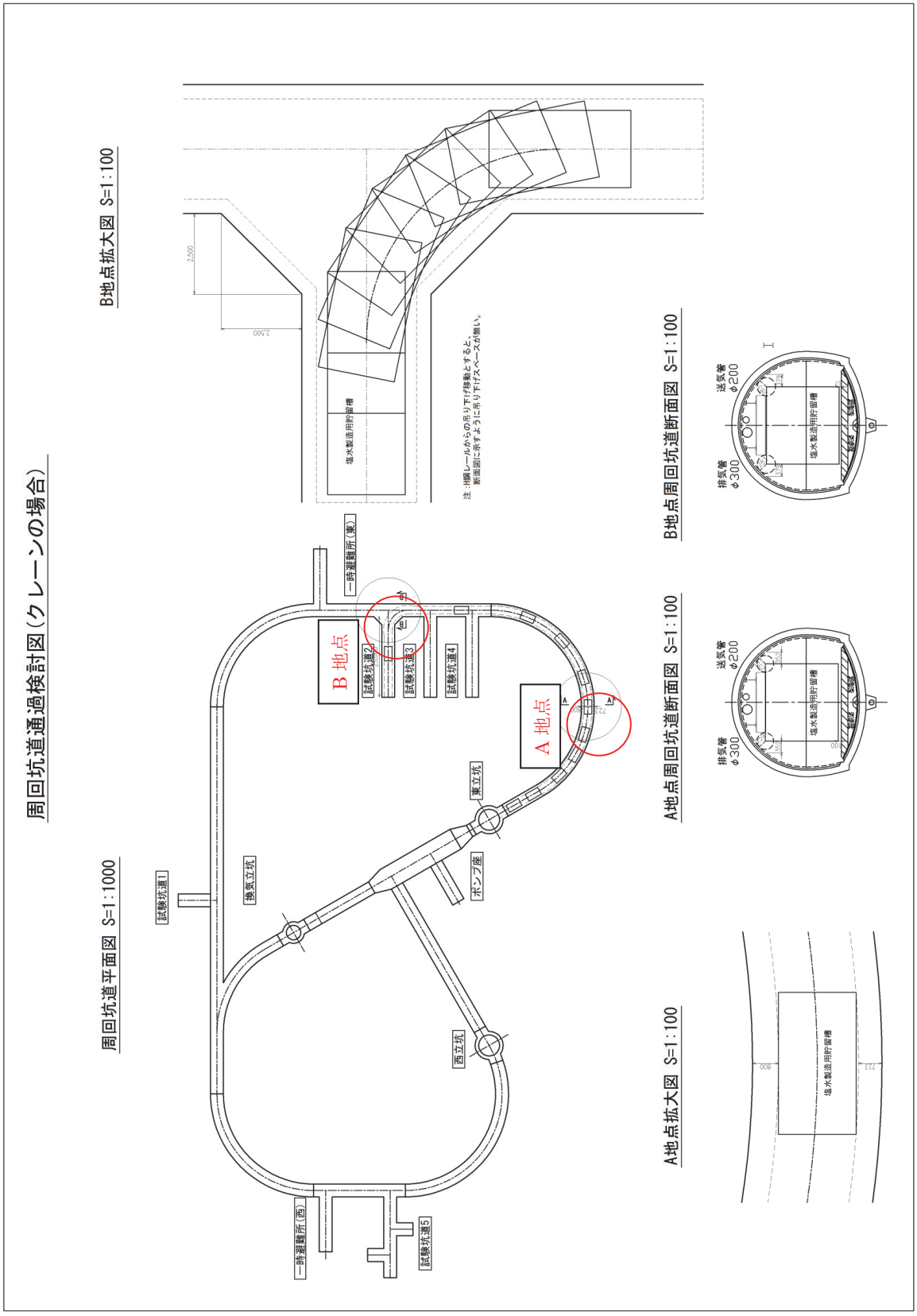


図 4.4.2-2　水供給槽の搬入検討図（クレーン利用）

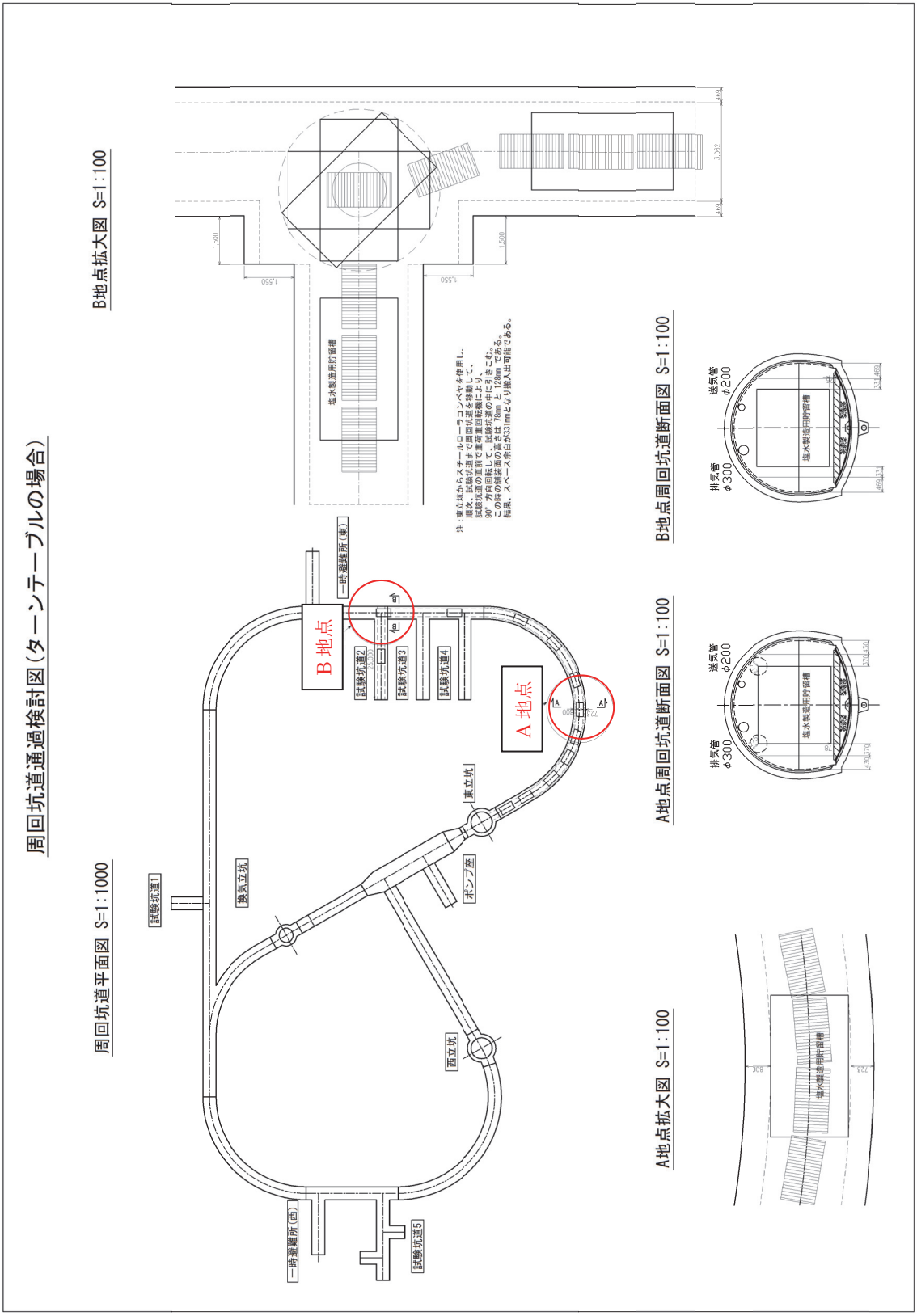


図 4.4.2-3　水供給槽の搬入検討図（ターンテーブル利用）

4.5　地下環境における緩衝材除去システムの配置計画の検討

緩衝材除去システムの設備を試験坑道 2 に配置する検討を行った。試験坑道 2 は、坑道断面φ4000mm、坑道延長 25m を設定した。緩衝材除去システムは図 4.5-1 に示す第 2 次取りまとめにおける堆積岩系坑道断面を想定し開発しているため、設定した試験坑道 2 の坑道断面では設置できない。そこで、配置案として、以下の 2 案を検討した。配置案 2 では、「平成 24 年度　地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：地層処分回収技術高度化開発）」の設計仕様[3]である図 4.5-2 に示す塩水噴射・スラリー吸引装置と塩水リユース設備による塩水除去試験を想定した。

（ｉ）配置案 1：試験坑道 2 の坑道断面を堆積岩系坑道断面へ拡幅し、緩衝材除去試験に必要な坑道延長を確保

（ii）配置案 2：試験坑道 2 を設定断面、延長とし、緩衝材除去試験に必要な模擬処分孔のみ設置

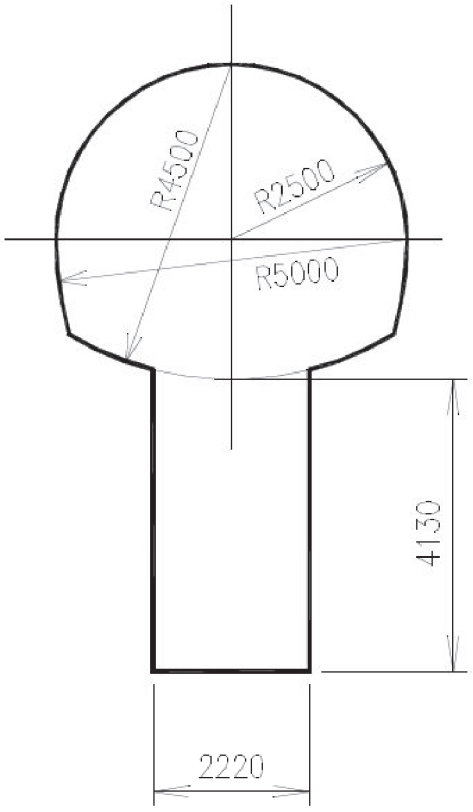


図 4.5-1　処分坑道および処分孔の仕様例[4]

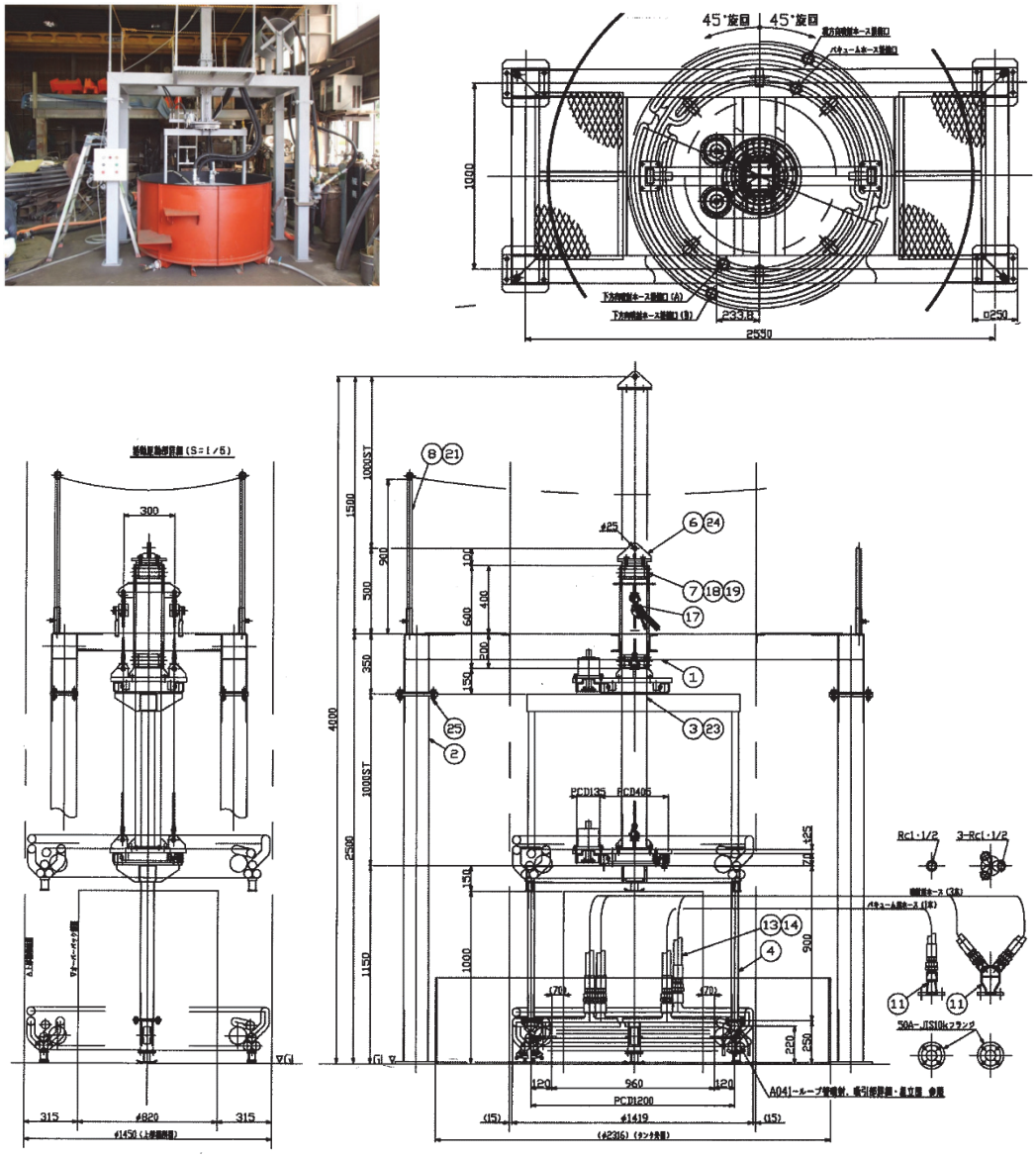


図 4.5-2　塩水噴射・スラリー吸引装置の全体図[3]

4.5.1　配置計画

配置計画に際して、各設備間の離隔基準を以下のように設定した。

・緩衝材除去試験中における作業時の安全性確保の観点から、噴射・吸引設備と試験坑道 2 の天端との離隔は 100m 以上確保する。

・メンテナンス時の動線を確保する観点から、塩水リユース設備の各水槽の離隔及び試験坑道 2 との離隔は 500mm 以上確保する。

・緩衝材除去試験中に模擬処分孔上部を解放することになった場合、噴射・吸引設備を移動させる必要があるため、噴射・吸引設備と塩水リユース設備との離隔は 4,000mm 以上

確保する。

(1) 配置案 1

図 4.5.1-1、図 4.5.1-2 に緩衝材除去システムの配置案 1 を示す。模擬処分孔は、配置の作業性などを考慮して坑道奥に配置した。遠隔操作設備は、その使用用途の意味からも、試験坑道内に設置しないこととした。塩水リユース設備では、噴射ポンプ及び吸引ポンプの設置位置は、圧送時の損失を低減するため、噴射・吸引設備付近に設置した。試験坑道 2 の入口から奥行方向 5mは下面に架台等を設置することで、スロープ区間を有効利用する。

配置検討結果から、緩衝材除去試験に必要な坑道延長を L＝34m となり、塩水リユース設備の「水供給槽」、「固液分離槽」を搬出入するため拡幅が必要となった。

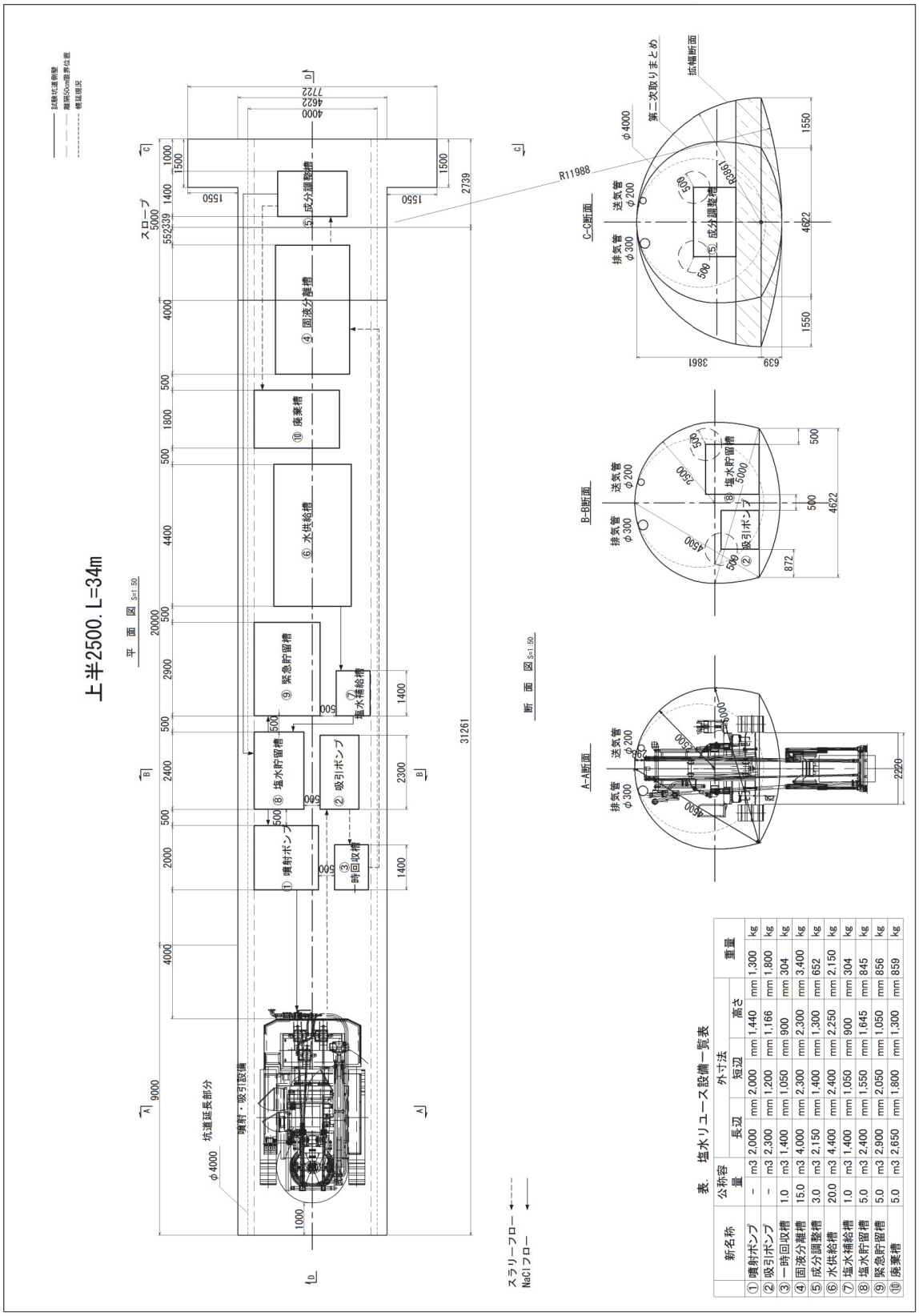


表. 塩水リユース設備一覧表

	新名称	公称容量		外寸法 長辺		外寸法 短辺		外寸法 高さ		重量	
①	噴射ポンプ	–	m3	2,000	mm	2,000	mm	1,440	mm	1,300	kg
②	吸引ポンプ	–	m3	2,300	mm	1,200	mm	1,166	mm	1,800	kg
③	一時回収槽	1.0	m3	1,400	mm	1,050	mm	900	mm	304	kg
④	固液分離槽	15.0	m3	4,000	mm	2,300	mm	2,300	mm	3,400	kg
⑤	成分調整槽	3.0	m3	2,150	mm	1,400	mm	1,300	mm	652	kg
⑥	水供給槽	20.0	m3	4,400	mm	2,400	mm	2,250	mm	2,150	kg
⑦	塩水補給槽	1.0	m3	1,400	mm	1,050	mm	900	mm	304	kg
⑧	塩水貯留槽	5.0	m3	2,400	mm	1,550	mm	1,645	mm	845	kg
⑨	緊急貯留槽	5.0	m3	2,900	mm	2,050	mm	1,050	mm	856	kg
⑩	廃薬槽	5.0	m3	2,650	mm	1,800	mm	1,300	mm	859	kg

図 4.5.1-1 配置案 1（平面図）

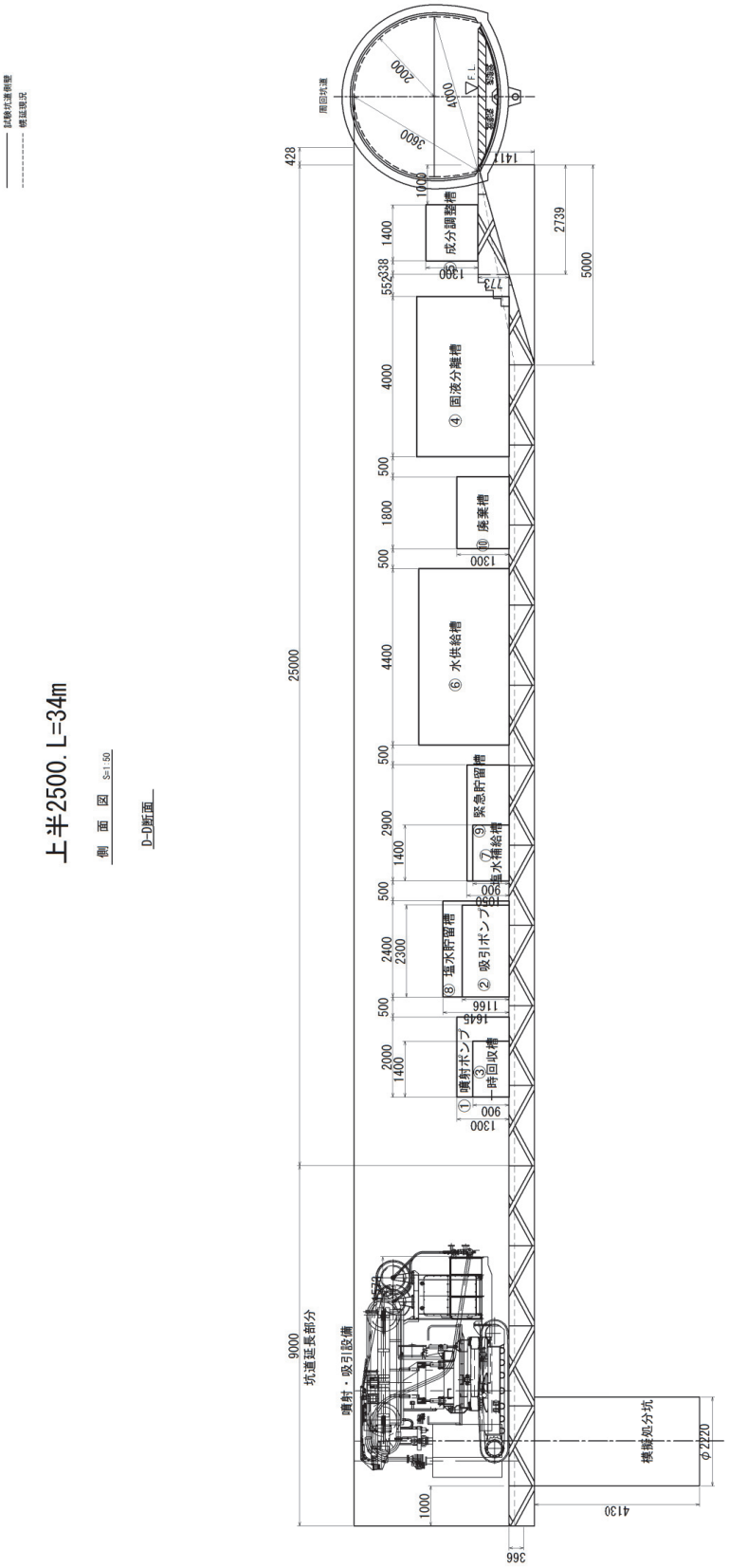


図 4.5.1-2　配置案 1（断面図）

(2) 配置案 2

図 4.5.1-3、図 4.5.1-4 に緩衝材除去システムの配置案 2 を示す。模擬処分孔は配置案 1 同様坑道奥に配置し、遠隔操作設備は試験坑道内に設置しないこととした。配置案 2 では、坑道寸法上、塩水リユース設備の「水供給槽」、「固液分離槽」、「成分調整槽」、「塩水補給槽」は試験坑道内に配置できないため、周回坑道へ配置することが必要となった。

図 4.5.1-3 配置案２（平面図）

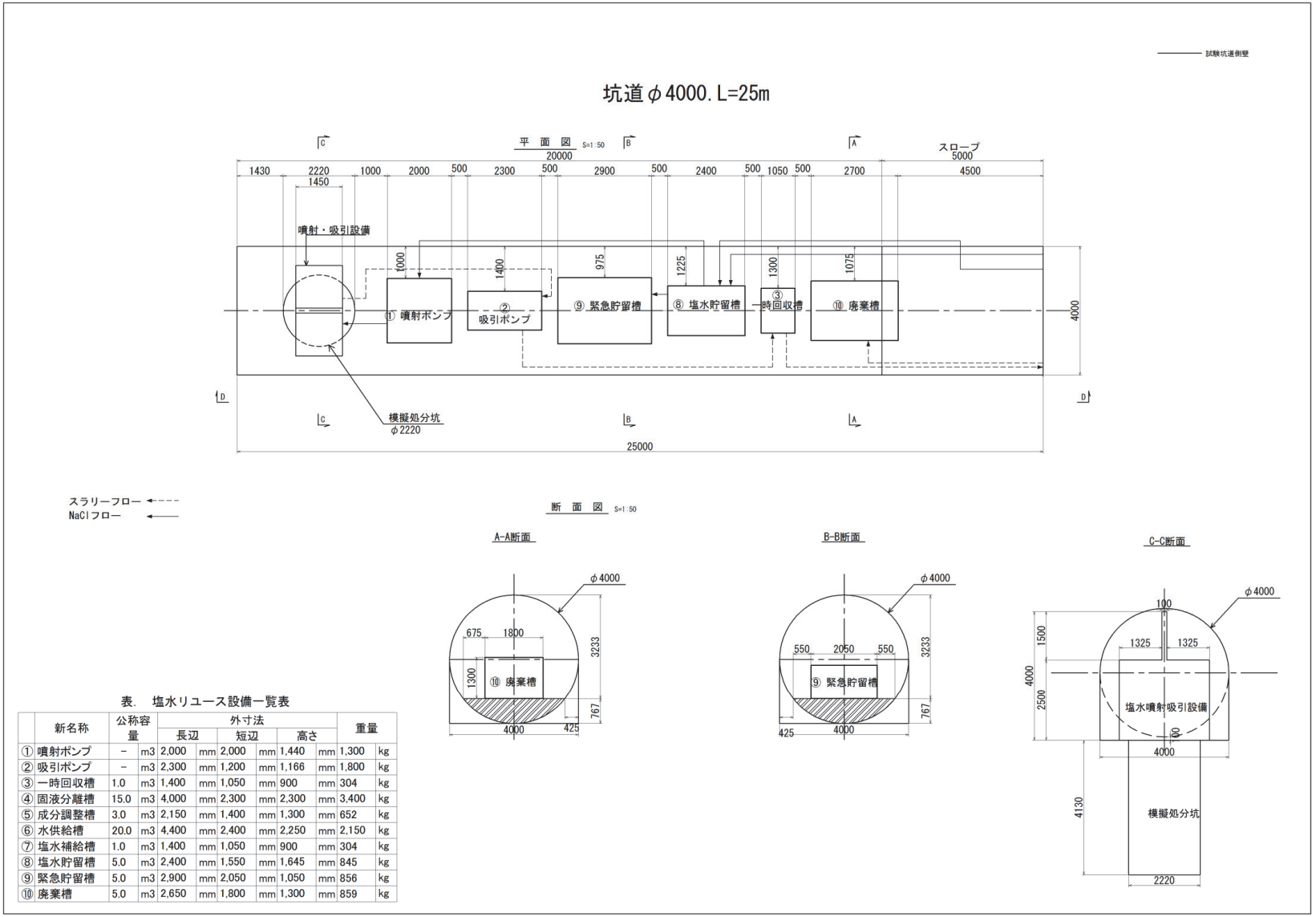


表. 塩水リユース設備一覧表

	新名称	公称容量		外寸法 長辺		短辺		高さ		重量	
①	噴射ポンプ	−	m3	2,000	mm	2,000	mm	1,440	mm	1,300	kg
②	吸引ポンプ	−	m3	2,300	mm	1,200	mm	1,166	mm	1,800	kg
③	一時回収槽	1.0	m3	1,400	mm	1,050	mm	900	mm	304	kg
④	固液分離槽	15.0	m3	4,000	mm	2,300	mm	2,300	mm	3,400	kg
⑤	成分調整槽	3.0	m3	2,150	mm	1,400	mm	1,300	mm	652	kg
⑥	水供給槽	20.0	m3	4,400	mm	2,400	mm	2,250	mm	2,150	kg
⑦	塩水補給槽	1.0	m3	1,400	mm	1,050	mm	900	mm	304	kg
⑧	塩水貯留槽	5.0	m3	2,400	mm	1,550	mm	1,645	mm	845	kg
⑨	緊急貯留槽	5.0	m3	2,900	mm	2,050	mm	1,050	mm	856	kg
⑩	廃棄槽	5.0	m3	2,650	mm	1,800	mm	1,300	mm	859	kg

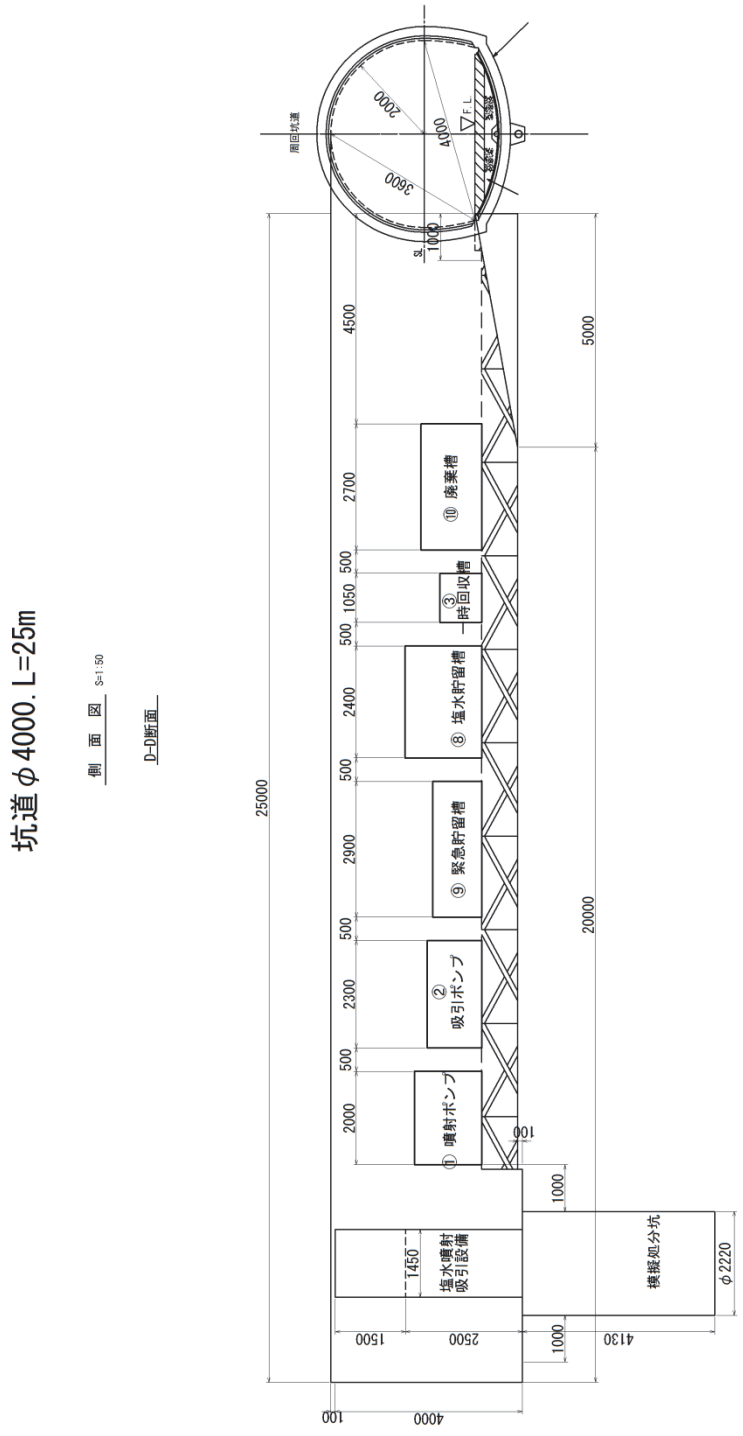


図 4.5.1-4　配置案 2（断面図）

4.6　実証試験に必要な設備の検討

4.6.1　インフラ設備の検討

緩衝材除去試験に必要なインフラ設備の仕様を表 4.6.1-1 に示す。

表 4.6.1-1　緩衝材除去試験に必要となるインフラ仕様

電気	給水	排水
100V　4kw 200V　48kw 400V　22kw	$23m^3$	$23m^3$

電気及び給水は東立坑から供給できるものとする（図 4.6.1-1）。また、排水は塩水リユース設備の廃棄槽で受け、東立坑まで移送し、既存の揚重設備にて地上に引き上げる方法とする。なお、給水管は本管よりサドル付分水栓にて分岐する。電気ケーブルについては、電圧降下計算よりφ21mm、φ37mm、φ66mm が必要となる。

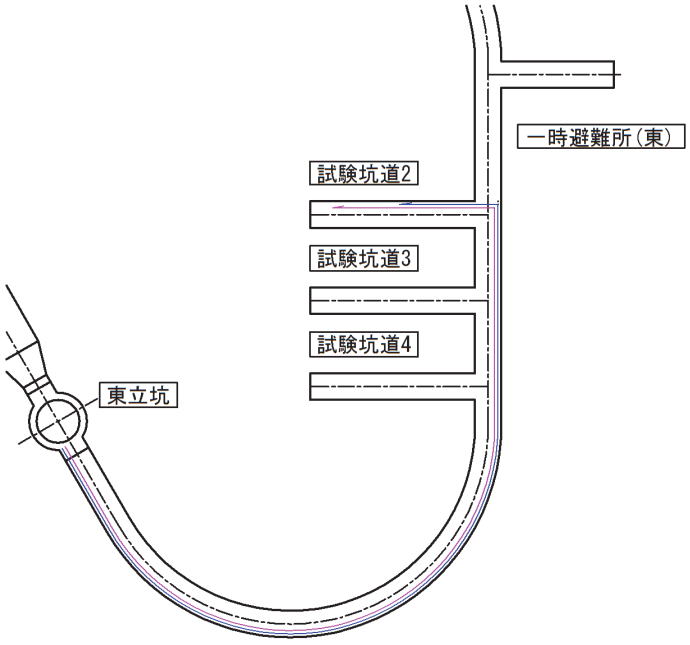


図 4.6.1-1　電気及び給水の供給ライン

4.6.2　試験坑道内における設備の運搬、組立設備の検討

試験坑道 2 に搬入した噴射・吸引設備および塩水リユース設備は、緩衝材除去試験のために組立、配置（4.5.1　参照）する必要がある。

各設備の最大荷重は、噴射・吸引設備では走行装置のクローラ（片側分）3,045kg （4.4.1 参照）、塩水リユース設備では、固液分離槽の 3,400kg（4.3.2　参照）となる。そのため、4t 以上の吊り上げに対応できる方法を表 4.6.2-1 に示す。

吊り上げ方法としては、主に天井クレーン（オーバーヘッド形）、天井クレーン（ローヘッド形）、門型クレーンが想定される。本検討では、運搬荷重が 4t 以下であることから、坑道内の利用、仮設設備の施工性を考慮した場合、天井クレーンのローヘッド形が最適と考えられる。

選定した天井クレーンには、噴射・吸引設備および塩水リユース設備は試験坑道内での運搬、組立、配置による水平移動のため、吊り上げは固定式ではなく、表 4.6.2-2 に示す移動機能を有したもの選定する必要がある。検討の結果、地下坑道内という作業環境および作業効率から電動式が最適と考えられる。

以上、検討結果から試験坑道内で使用する緩衝材除去システムの組立、配置に必要な設備を以下に示す。天井クレーン（ローヘッド形）は、走行レール、サドル、ガーダ、巻上機から構成されている。

・走行レール：I-300×150×10×18.5
・サ　ド　ル：EL050-6 相当
・ガ　ー　ダ：I-300×150×10×18.5
・電動巻上機：ER2M 相当

表 4.6.2-1　吊り上げ方法の比較

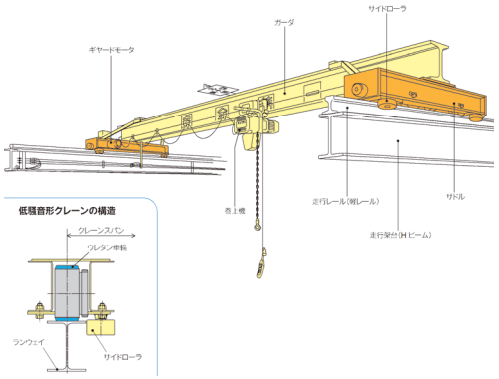
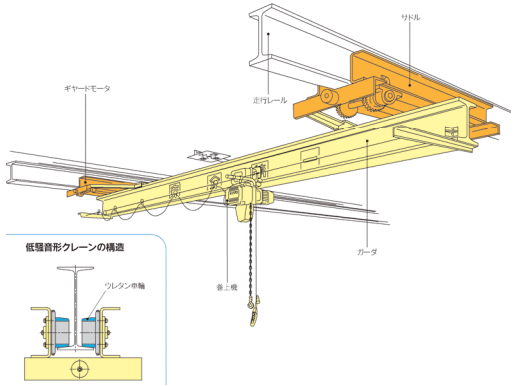
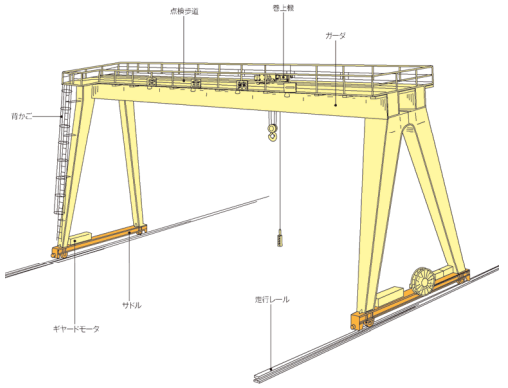
	天井クレーン（オーバーヘッド形）	天井クレーン（ローヘッド形）	門型クレーン
概要			
	柱のブラケット等に設置した走行レールの上にサドル及びガーダを設置するタイプのクレーンである。 比較的大きな荷重に対応できる。	天井に走行レール（I ビーム）を固定し、この走行レールに懸垂するタイプのクレーンである。吊上げ位置に応じ、走行レールやスパンを自由に設定できる。	底面に敷設する 2 本の走行レールに門型を設置するタイプのクレーンである。 吊上げ対象物の高さや定格荷重に合せた仕様にできる。
定格荷重	1～10t	1～5t	
設備重量 （使用機種）	・サドル：約 200kg ・ガータ：約 70kg ・チェーンブロック：約 250kg 計　520kg	・サドル：約 270kg ・ガータ：約 70kg ・チェーンブロック：約 250kg 計　590kg	・本体：5,450kg ・チェーンブロック：約 250kg 計 5,700kg

表 4.6.2-2　巻上機の比較

	チェーンブロック	
	手動式	電動式
概要		
	手動操作にて昇降・横行するタイプである。定格荷重の適用性は幅広い。防爆対応にするには、チェーンブロックを特殊製作する必要がある。	押しボタン操作により昇降・横行するタイプである。昇降は電動式、横行は電動式か手動式タイプがある。昇降や横行での微調整が必要な場合は可変速タイプを使用する。また、防爆仕様もある。
定格荷重	500kg～50t	125kg～20t
標準揚程	2.5～3.5m	4～6m
今回吊荷重（4t）に対応する仕様	・単体重量：約 92kg ・レール下端から フックまでの距離：660mm ・標準揚程：3.0m	・単体重量：約 245kg ・レール下端から フックまでの距離：910mm ・標準揚程：4.0m～6.0m

4.6.3　試験坑道 2 に配置するその他設備

幌延坑道建設時にメタンガスが確認されているため、緩衝材除去試験中における作業員の安全確保のため換気設備を配置する。

坑道内に配置する換気設備は送風管と排気管となり、坑道の一部を占用することになるので、各風管の規模を予め検討した。

緩衝材除去試験は遠隔操作にて行うため、試験中に作業員が坑道内に立ち入ることはないが、緩衝材除去試験設備の組立解体時は 7～10 名程度が坑道内に入る可能性がある。

したがって、試験坑道 2 に 10 名程度が入ることを想定し、換気設備の仕様を検討結果、送気管φ200、排気管φ300 が必要となる。

4.7　実証試験に必要な坑道断面の検討

これまで緩衝材除去システムの設備の搬出入、配置検討を行った。検討結果から、試験坑道 2 で緩衝材除去システムによる緩衝材除去試験を実施するための坑道断面、坑道延長を設定した。

噴射・吸引設備は、試験坑道内に分割運搬するため、試験坑道内で組立が必要となる。ここで、4.5.1 で検討した配置案 1 を基本とし、噴射・吸引設備の組立に必要な坑道断面の検討および必要断面への試験坑道 2 の拡幅による構造解析を行い、坑道の基本設計を行った。

4.7.1　噴射・吸引設備組立エリアの設定

組立エリアは、噴射・吸引設備の下部からの組立手順を満足できるように設定した。ここで、塩水噴射・スラリー吸引設備の一部である塩水ホース巻き取り装置（図 4.7.1-1）が噴射・吸引設備の最上部に位置することから、当該設備の組立時のクリティカルとなる。

組立エリアは、試験坑道 2 の拡幅高を極力低くするため、吊角度 90°で吊上げるものとした。検討の結果より、吊代は 1543mm 以上必要であり、組立エリアの最小範囲は図 4.7.1-2 より第 2 次とりまとめ断面の天端より 3119mm 以上拡幅する必要がある。

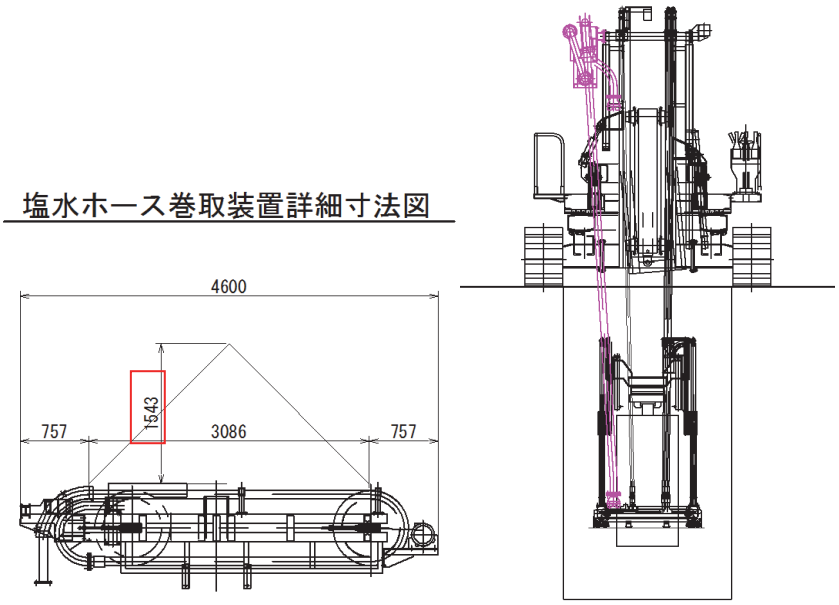


図 4.7.1-1　塩水ホース巻き取り装置および装置の吊代の検討

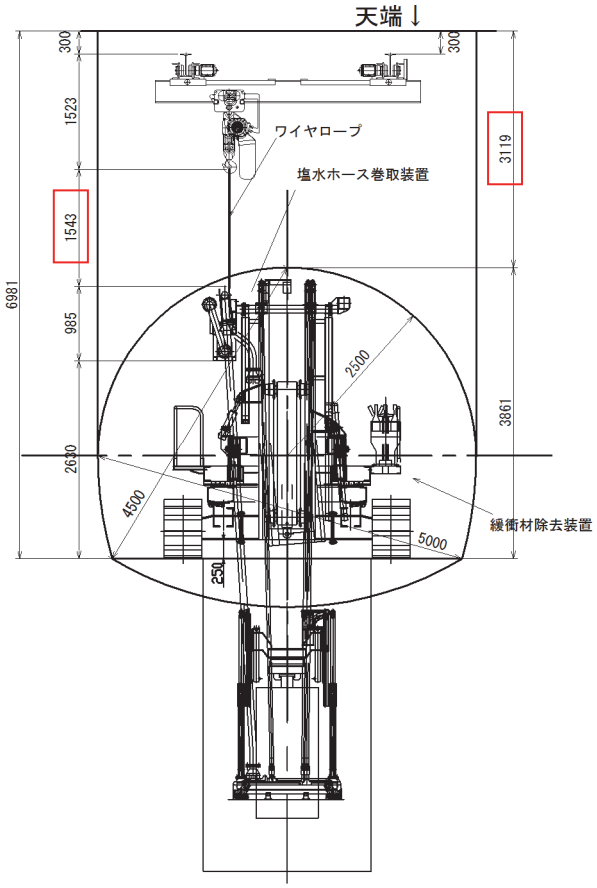


図 4.7.1-2　組立エリアの最小寸法（横断方向）

4.7.2　拡幅断面の形状検討

山岳トンネルは、岩盤のアーチアクションを期待して構造物を安定させ構築するものであることから、坑道天端は図 4.7.1-2 を満足する円弧状にする必要がある。ここで、4.7.1 で設定した組立エリアを包含した断面形状について検討を行う。断面形状は、図 4.7.2-1 に示す堆積系岩盤の馬蹄型断面とより掘削面積が小さい硬岩系岩盤の幌型断面とした。また、両断面形状について緩衝材除去試験を実施するために必要な試験坑道について、図 4.7.2-2、図 4.7.2-3 に示す。次項では、試験坑道 2（坑道断面 φ4000mm、坑道延長 25m）を図 4.7.2-2、図 4.7.2-3 に示した断面へ拡幅した場合構造解析について示す。

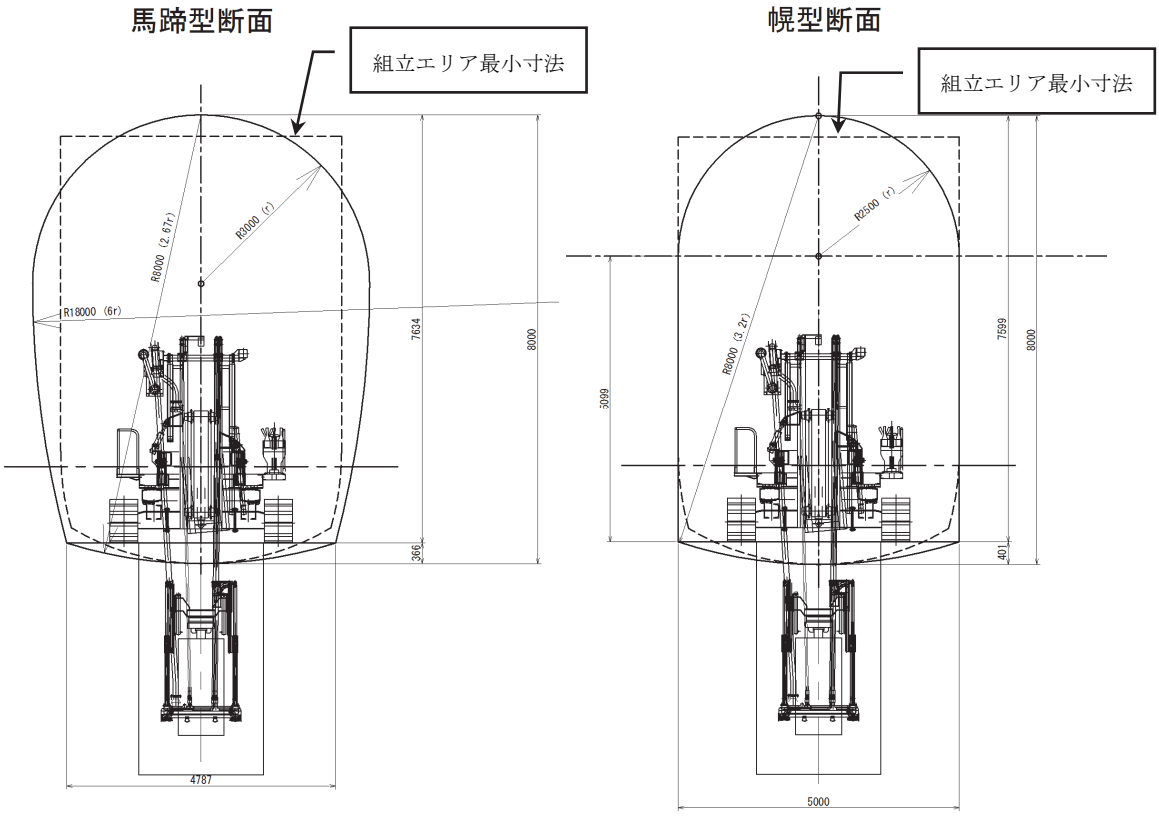


図 4.7.2-1　拡幅断面の検討ケース

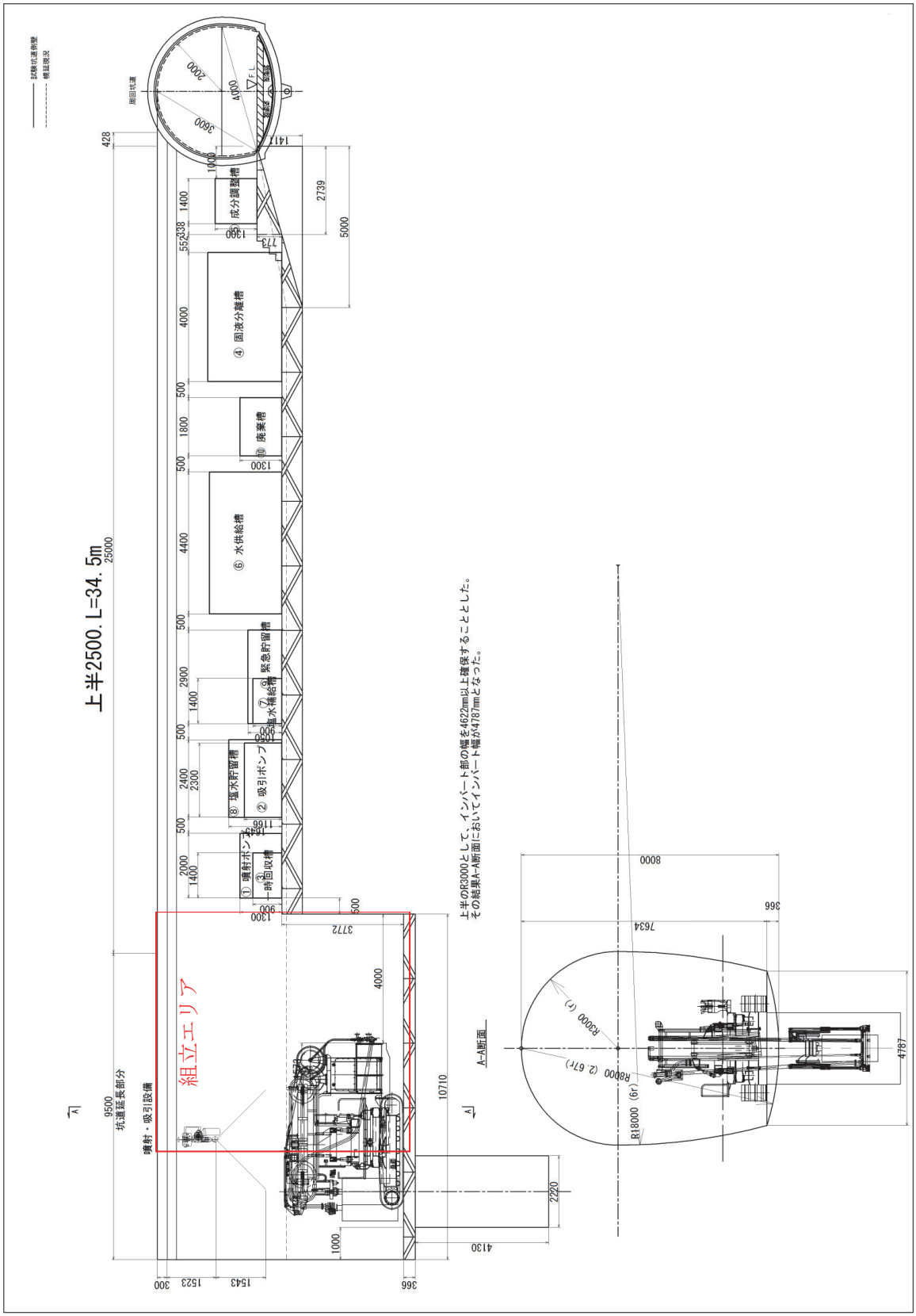


図 4.7.2-2　噴射・吸引設備組立エリア（馬蹄型）を含む試験坑道縦断図

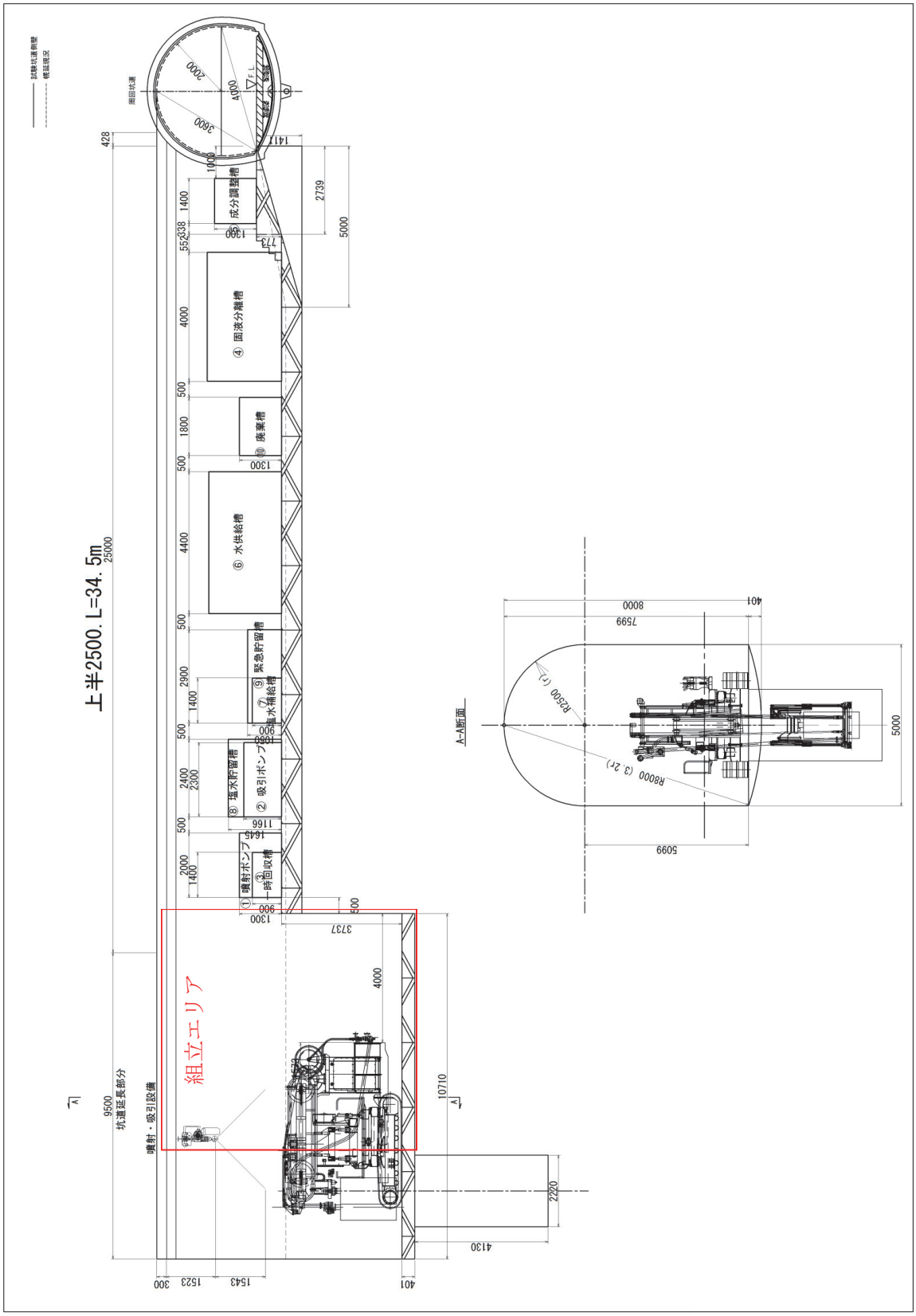


図 4.7.2-3　噴射・吸引設備組立エリア（幌型）を含む試験坑道縦断図

4.8　坑道断面の構造解析（基本設計）

4.8.1　構造解析の断面設定

試験坑道 2 を拡幅した場合の支保工仕様を構造解析にて検討する。解析断面位置を図 4.8.1-1 に示す。

・Case1：組立エリアでの拡幅断面（馬蹄型断面に拡幅）
・Case2：組立エリアの拡幅（幌型断面に拡幅）
・Case3：試験坑道 2 入口の拡幅
・Case4：模擬処分孔の断面

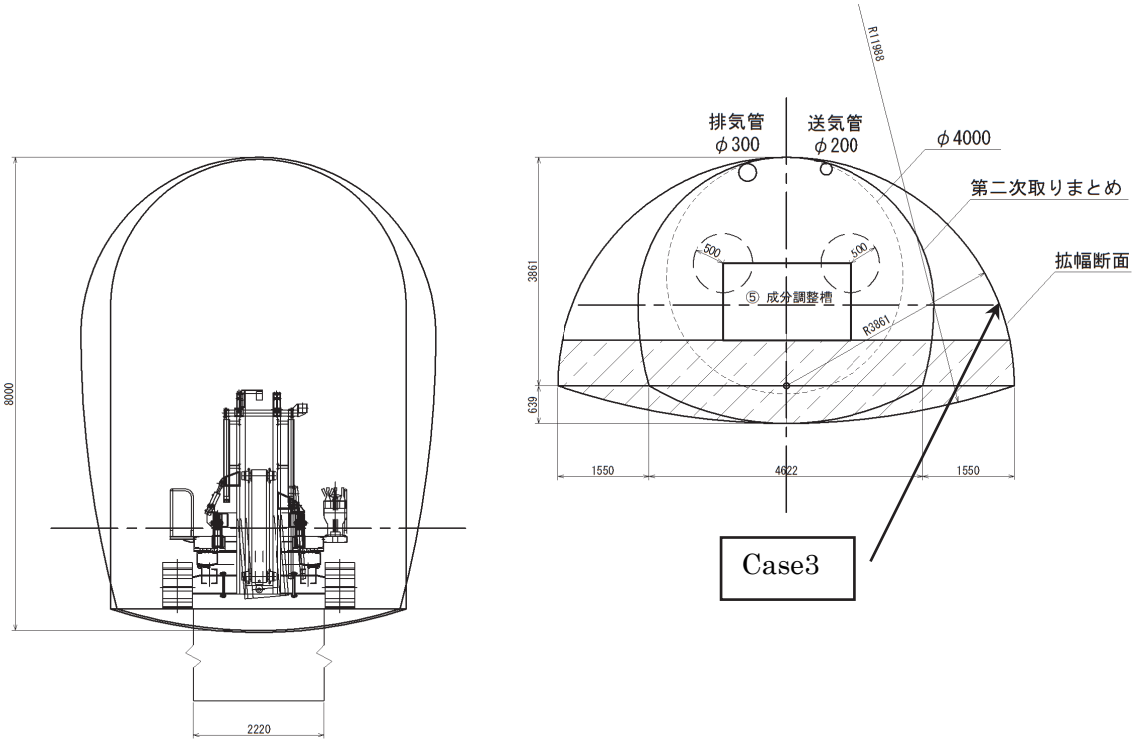


図 4.8.1-1　解析断面位置

模擬処分孔の掘削（Case4）は、掘削断面がφ2220mm と小断面のため、支保材（H 鋼材）の曲げ加工が出来ない。そのため、予め曲げ加工が施されている円形ライナープレートを採用する。但し、円形ライナープレートは規格品のため、形状は直近上位のφ2500mm を採用する。

4.8.2　岩盤および支保工のモデル化

試験坑道周辺岩盤および支保工のモデル化では、既存の幌延地下施設の支保設計[5]（以下、実施設計）の考え方を踏襲し、岩盤の応力－ひずみ関係は弾完全塑性モデルを採用し、二次元平面ひずみの条件下において解析を行う。

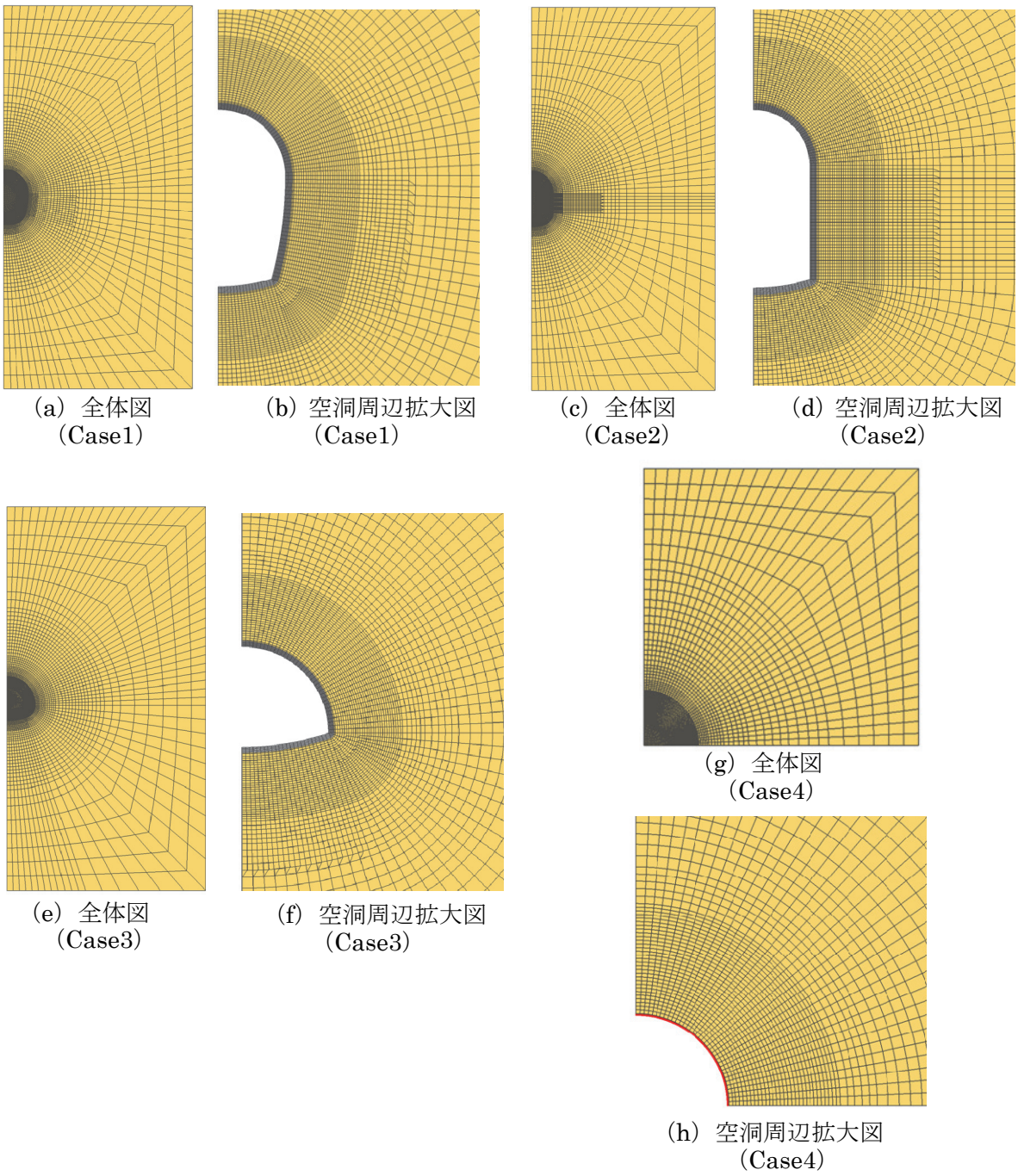
解析領域は断面形状の対称性を勘案し、水平坑道は断面形状の 1/2、模擬処分坑道は 1/4 をモデル化する。モデル化するにあたり、岩盤及び吹付けコンクリートは平面ひずみ要素、鋼製支保工はビーム要素とする。

支保工について、実施設計では内径 4m であることを考慮し、吹付け厚は上限 25cm、鋼製支保工は H-150 を基本として上限 HH154 としているが、本検討断面は、標準断面より大きな掘削断面積となることから吹付け厚は 30cm、鋼製支保工は従来鋼 H-200、高規格鋼 HH-200 を上限とする。なお、ロックボルトは準拠図書同様、安全側を考慮し、数値解析上はモデル化しない。

4.8.3　解析領域と解析メッシュ

モデル化する範囲は、掘削による影響を十分配慮し、掘削幅（掘削高さ）を D とし、吹付けコンクリートの増厚の可能性を考慮して 5D 程度の領域を確保することとする。

境界条件は、対称軸は水平方向のみ固定、それ以外は全方向固定とする。解析領域は、上述のモデル化範囲にしたがってメッシュ分割する。（図 4.8.3-1）



（a）全体図
（Case1）

（b）空洞周辺拡大図
（Case1）

（c）全体図
（Case2）

（d）空洞周辺拡大図
（Case2）

（e）全体図
（Case3）

（f）空洞周辺拡大図
（Case3）

（g）全体図
（Case4）

（h）空洞周辺拡大図
（Case4）

図 4.8.3-1　メッシュ分割図

4.8.4　解析用物性値

(1) 初期応力

解析で考慮する水平方向初期応力の異方性は、実施設計時の考え方を踏襲し、σ_v：σ_{max}：σ_{mi}＝1.0：1.3：0.9 を採用することとする。深度 350m の初期応力は、表 4.8.4-1 に示すとおりである。応力比は東西方向 1.3、南北方向 0.9、坑道軸は東西方向であることから水平坑道の解析に採用する側圧係数は 0.9 となる。

表 4.8.4-1　深度 350m の初期応力[5]

深度 m	鉛直応力 Sv kN/m²	東西方向 S_{max} kN/m²	南北方向 S_{min} kN/m²
350	5,359.1	S_v×1.3 (6,966.8)	S_v×0.9 (4,823.2)

(2) 岩盤物性値

解析に採用する岩盤物性値は表 4.8.4-2 に示す岩盤等級 CM-M(Hr)の物性値を採用する。

表 4.8.4-2　解析用地山物性値[5][6]

岩盤等級	ヤング率 MPa	ポアソン比	粘着力 MPa	内部摩擦角 deg.	引張強度 MPa
CM-M(Hr)	1,350	0.186	1.6	25	0.50

(3) 支保工物性値

支保部材の物性値を表 4.8.4-3～表 4.8.4-6 に示す。支保部材のモデル化に関して、鋼製支保工はビーム要素で吹付けコンクリートはソリッド要素でモデル化する。

Case3 の既設断面（φ4000）の支保パターンは表 4.8.4-5 に示す物性値を想定し、ステップ解析を実施する。また、Case4 の模擬処分孔の支保部材は、ライナープレートをビーム要素でモデル化する[7] 。

表 4.8.4-3　吹付けコンクリートの物性値

規格・仕様	普通 f'_{ck}=18N/mm² t=20cm～	高強度 f'_{ck}=36N/mm² t=20cm～
ヤング率 (kN/mm²)	4	6
ポアソン比	0.2	
要素種別	ソリッド要素	

表 4.8.4-4　鋼製支保工物性値

規格・仕様	従来型 H 鋼 H-150 SS400	高規格 H 鋼 HH-154 HT590	従来型 H 鋼 H-200 SS400	高規格 H 鋼 HH-200 HT590
ヤング率（kN/mm²）	210			
ポアソン比	0.3			
断面積（m²）	39.65×10^{-4}	47.19×10^{-4}	63.53×10^{-4}	63.53×10^{-4}
断面二次モーメント（m⁴）	$1{,}620\times10^{-8}$	$2{,}000\times10^{-8}$	$4{,}720\times10^{-8}$	$4{,}782\times10^{-8}$
要素種別	ビーム要素			

表 4.8.4-5　Case3 既設断面に使用する支保の物性値

規格・仕様	高強度 f'_{ck}=36N/mm² t=15cm	従来型 H 鋼 H-100 SS400
ヤング率（kN/mm²）	6	210
ポアソン比	0.2	0.3
断面積（m²）	-----	21.59×10^{-4}
断面二次モーメント（m⁴）	-----	378×10^{-8}
要素種別	ソリッド要素	ビーム要素

表 4.8.4-6　ライナープレートの物性値（Case4）[7]

規格・仕様	1 枚あたり	1m あたり 板厚 t=2.7mm
ヤング率（kN/mm²）	210	
ポアソン比	0.3	
断面積（m²）	19.88×10^{-4}	39.76×10^{-4}
断面二次モーメント（m⁴）	70.5×10^{-8}	141×10^{-8}
要素種別	-----	ビーム要素

4.8.5　許容値

許容値一覧を表 4.8.5-1 に示す。

表 4.8.5-1　許容応力度[5]

支保種別	仕様	許容応力度（MPa）
吹付けコンクリート	f'_{ck}=18N/mm²	4.5
	f'_{ck}=36N/mm²	9.0
鋼製支保工	SS400	160
	HT590	236
ライナープレート	SS400	160

4.8.6　解析手順

各ケースの解析ステップを表 4.8.6-1 に示す。Case1、Case2、試験坑道 2（L=25m）から新たに地山を掘削する必要があるため、坑道内の地山に初期応力を与え、掘削解放率 α を解放させる。次に、支保部材と岩盤が一体となる構造について、残りの掘削相当外力を付加し 100%まで解放させる。ここで、インバート打設時期は、施工上の理由等より閉合距離を 4m（うち、切羽から支保工まで 1m）で設定する。Case3 は、Case1、Case2 同様に地山掘削から解析を行うが、一度既設坑道断面で応力解放させ、その後再度既設支保工を撤去し拡幅後、再度支保工を設置する解析ステップを実施した。

表 4.8.6-1　解析ステップ

解析ステップ	Case1	Case2	Case3	Case4
1	初期応力解析	初期応力解析	初期応力解析	初期応力解析
2	全断面掘削 [支保工設置直前まで]	全断面掘削 [支保工設置直前まで]	既設断面掘削 （φ4000+300） [支保工設置直前まで]	全断面掘削 （φ2500）
3	アーチ部支保工（吹付け、鋼製支保工）設置 [支保工設置から 3.0m 掘削まで]	アーチ部支保工（吹付け、鋼製支保工）設置 [支保工設置から 3.0m 掘削まで]	既設断面支保工（吹付け、鋼製支保工）設置	ライナープレート設置 [模擬処分孔底面まで掘削完了]
4	インバート吹付け設置※	インバート吹付け設置※	拡幅断面掘削 [支保工設置直前まで]	－
5	－	－	アーチ部支保工 （吹付け、鋼製支保工）設置 [支保工設置から 3.0m 掘削まで]	－
6	－	－	インバート吹付け設置※	－

※3m 遅れにてインバートを設置し、残りの相当外力を解放させる。

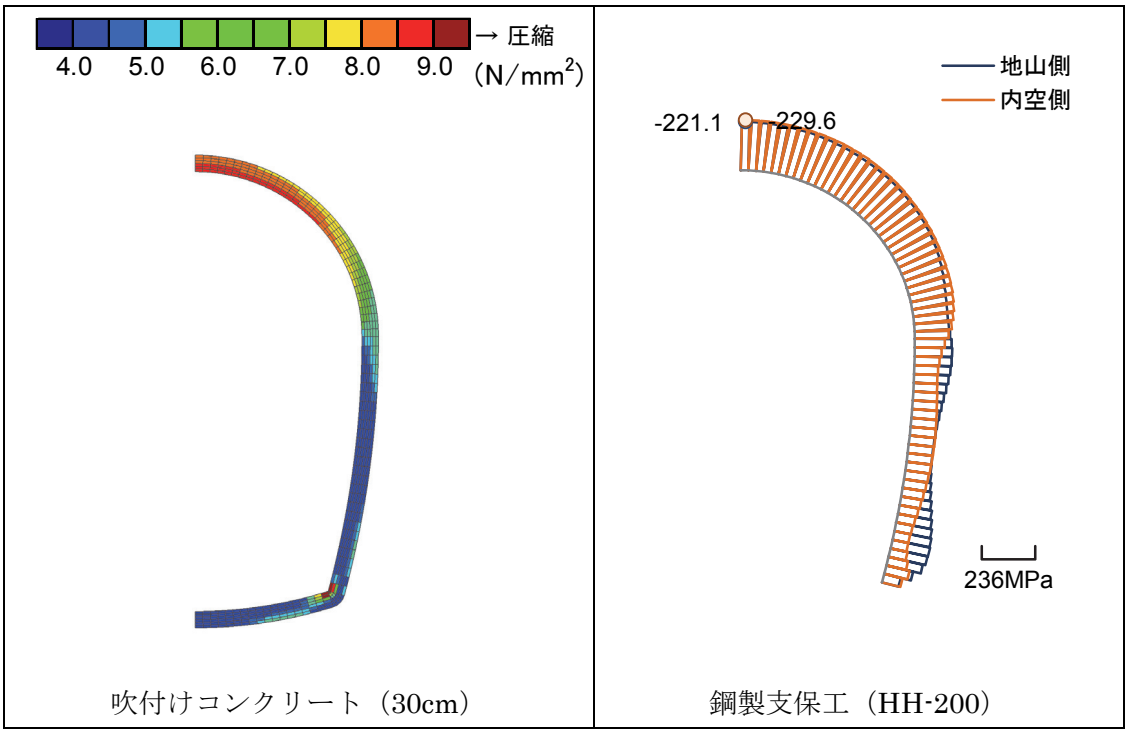
4.8.7　解析結果

(1) Case1 の支保部材

Case1 の解析結果を表 4.8.7-1、図 4.8.7-1、図 4.8.7-2 に示す。馬蹄型断面では、アーチ部、インバート部ともに設定支保工部材の許容応力度以内となった。

表 4.8.7-1　支保部材の仕様および応力照査結果（Case1）

部位	支保種別	最大発生応力 MPa	許容応力度 MPa	塑性領域 [最大幅] m
アーチ部	吹付けコンクリート t=30cm (f'ck=36N/mm²)	8.95	9.0	1.30
	鋼製支保工 高規格(SS540), HH-200@1.0m	229.6	236	
インバート部	吹付けコンクリート t=30cm(f'ck=36N/mm²)	7.76	9.0	0.90
	鋼製支保工（ストラット） 未採用	-----	-----	



吹付けコンクリート（30cm）　　鋼製支保工（HH-200）

図 4.8.7-1　支保工応力分布（Case1）

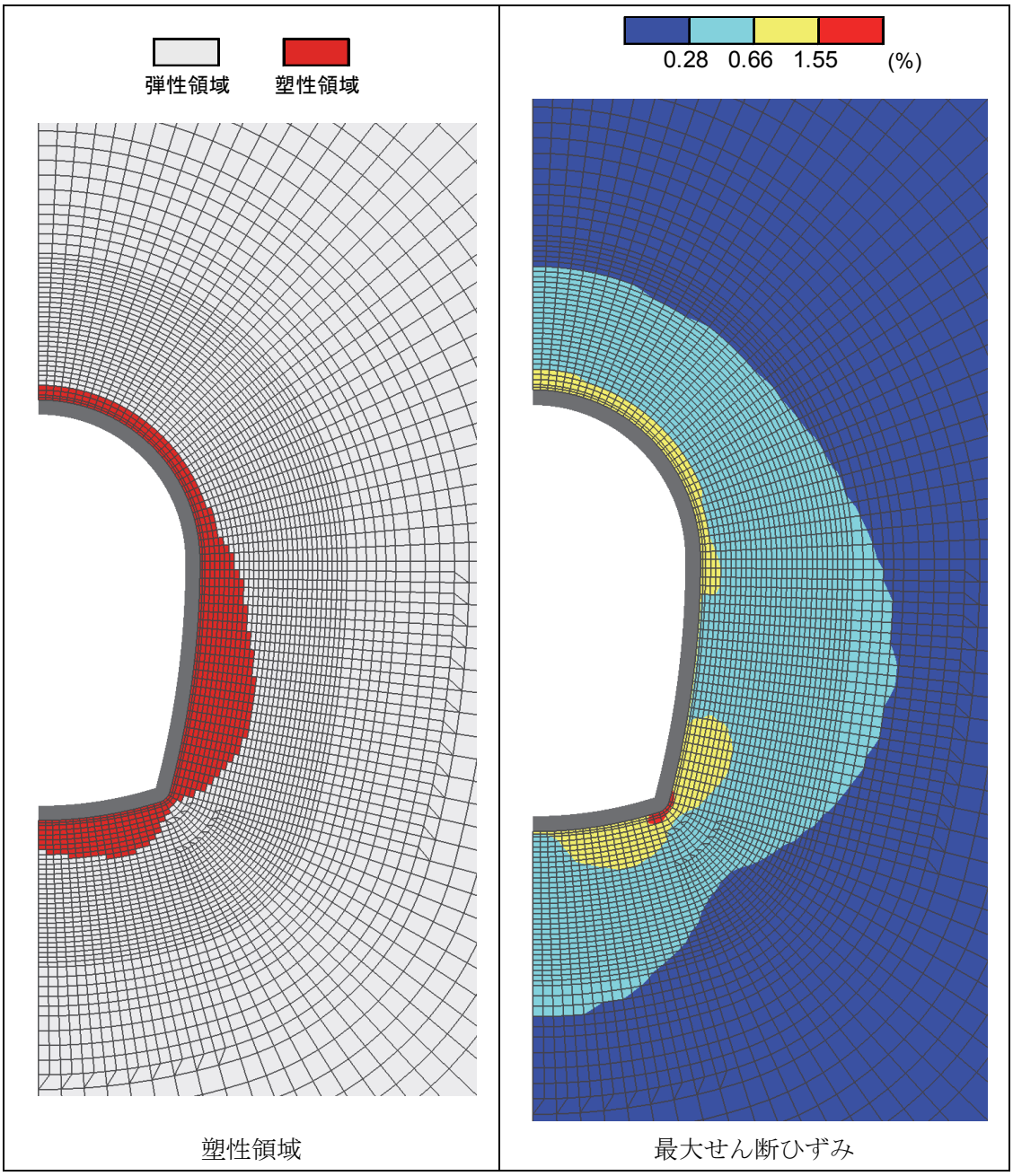


図 4.8.7-2　岩盤の塑性領域分布と最大せん断ひずみ分布（Case1）

(2) Case2 の支保部材

Case2 の解析結果を表 4.8.7-2、図 4.8.7-3、図 4.8.7-4 に示す。幌型断面では、アーチ部の頂部で許容応力度以上の応力が発生した。

表 4.8.7-2　支保部材の仕様および応力照査結果（Case2）

部位	支保種別	最大発生応力 MPa	許容応力度 MPa	塑性領域 [最大幅] m
アーチ部	吹付けコンクリート t=30cm（f'ck=36N/mm²）	9.61	9.0	1.20
	鋼製支保工 HH-200@1.0m（HT590）	239.64	236	
インバート部	吹付けコンクリート t=30cm（f'ck=36N/mm²）	7.23	9.0	0.80
	鋼製支保工（ストラット） 未採用	-----	-----	

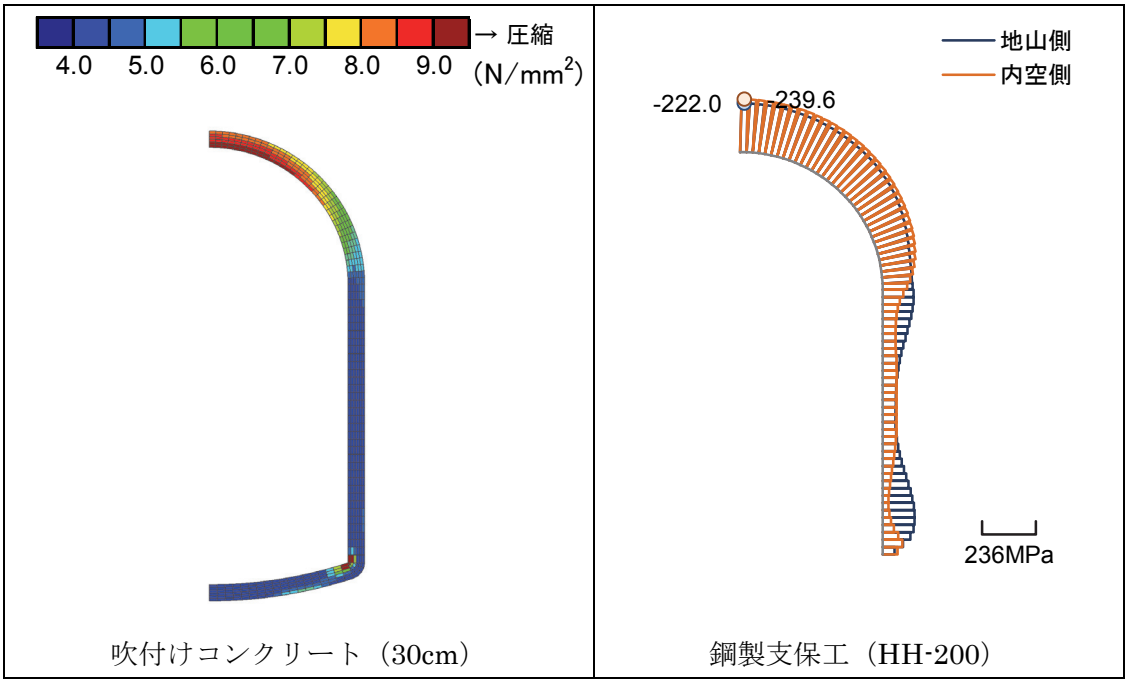


図 4.8.7-3　支保工応力分布（Case2）

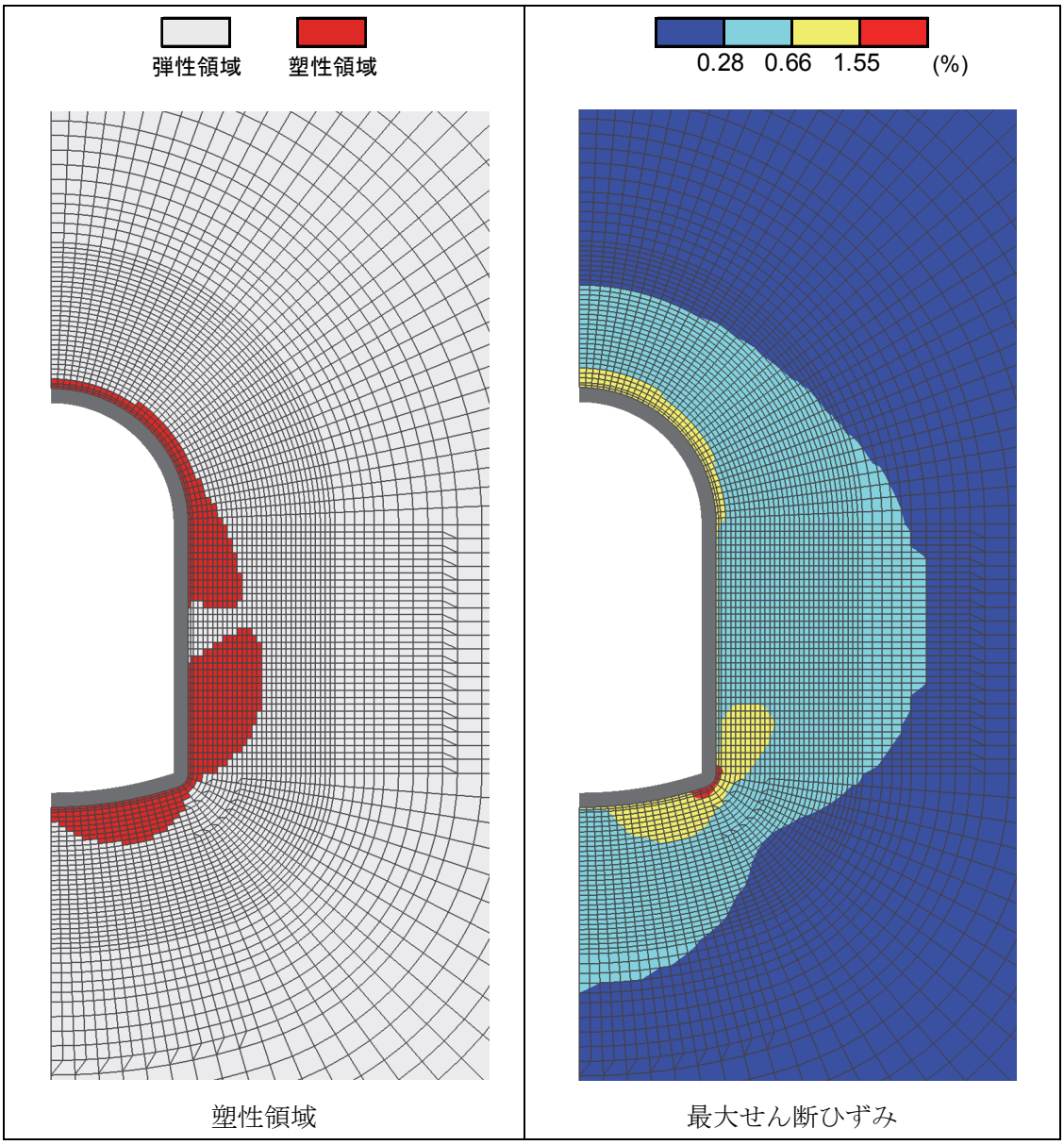


図 4.8.7-4　岩盤の塑性領域分布と最大せん断ひずみ分布（Case2）

(3) Case3 の支保部材

Case3 の解析結果を表 4.8.7-3、図 4.8.7-5、図 4.8.7-6 に示す。既設坑道の拡幅では、アーチ部、インバート部ともに設定支保工部材の許容応力度以内となった。

表 4.8.7-3　支保部材の仕様および応力照査結果（Case3）

部位	支保種別	最大発生応力 MPa	許容応力度 MPa	塑性領域 [最大幅] m
アーチ部	吹付けコンクリート t=20cm（f'ck=36N/mm²）	8.17	9.0	1.10
	鋼製支保工 HH-154@1.0m（HT590）	192.00	236	
インバート部	吹付けコンクリート t=20cm（f'ck=36N/mm²）	3.69	9.0	1.20
	鋼製支保工（ストラット） 未採用	-----	-----	

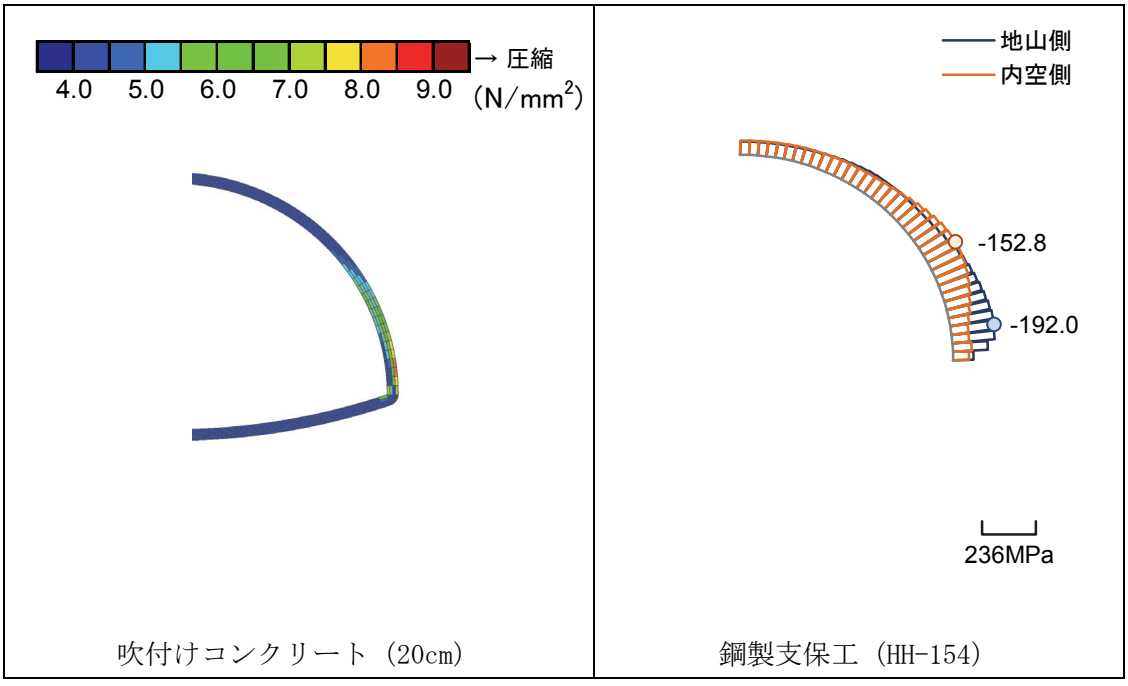


図 4.8.7-5　支保工応力分布（Case3）

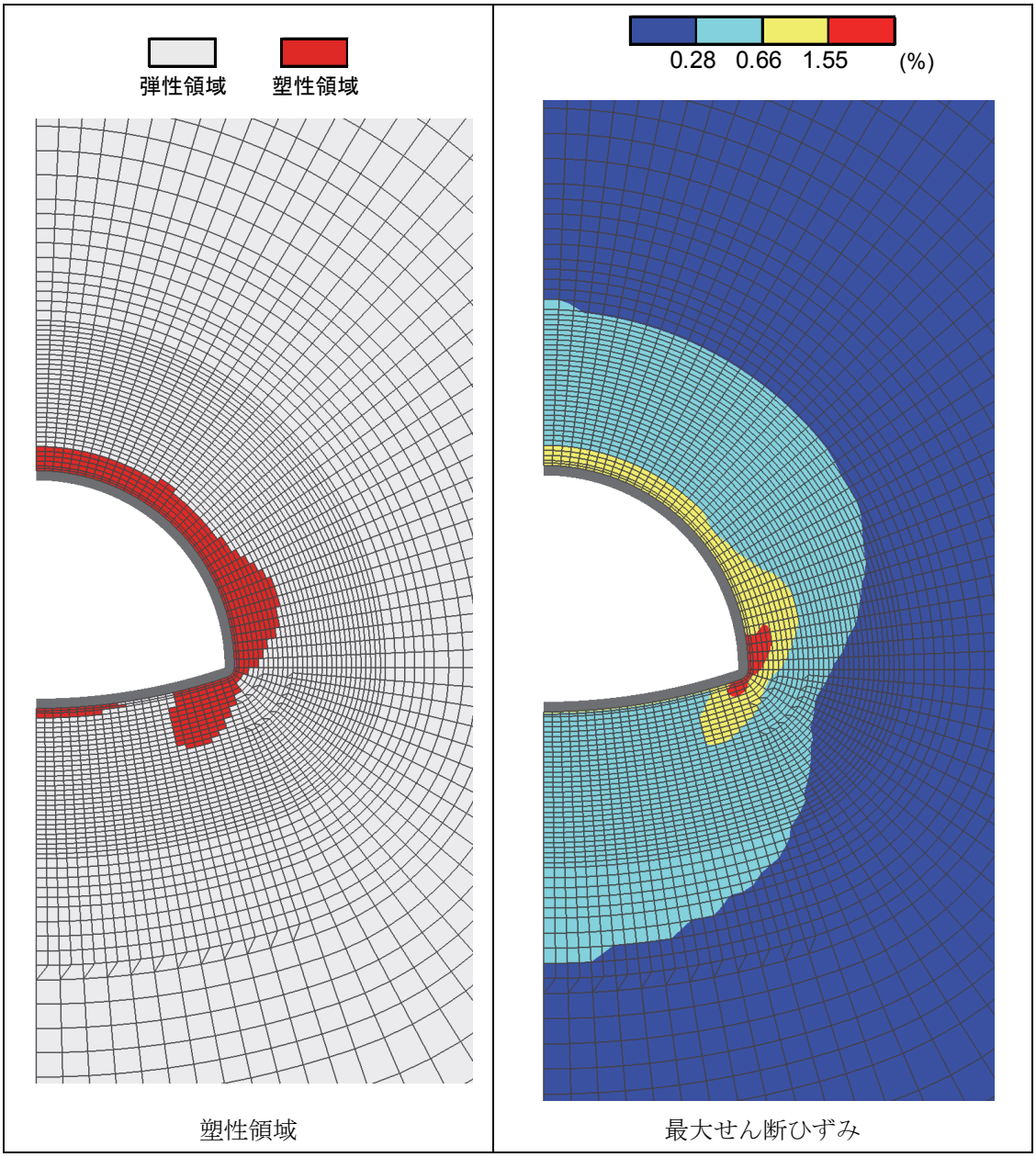


図 4.8.7-6　岩盤の塑性領域分布と最大せん断ひずみ分布（Case3）

(4) Case4 の支保部材

Case4 の解析結果を表 4.8.7-4、図 4.8.7-7、図 4.8.7-8 に示す。解析結果では、設定支保工部材の許容応力度以内となった。

表 4.8.7-4　支保部材の仕様および応力照査結果（Case4）

部位	支保種別	最大発生応力 MPa	許容応力度 MPa	塑性領域 [最大幅] m
模擬処分孔	ライナープレート t=2.7mm（SS400）	46.0	160	0.55
	補強部材（鋼製支保工） 未採用	-----	-----	

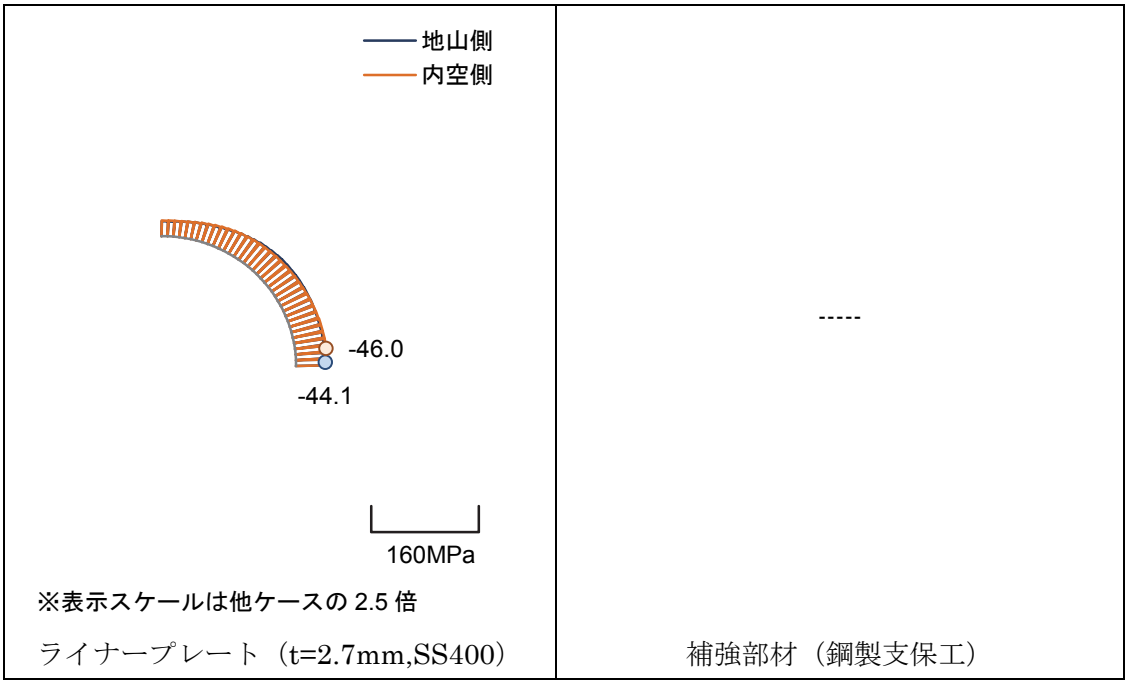


図 4.8.7-7　支保工応力分布（Case4）

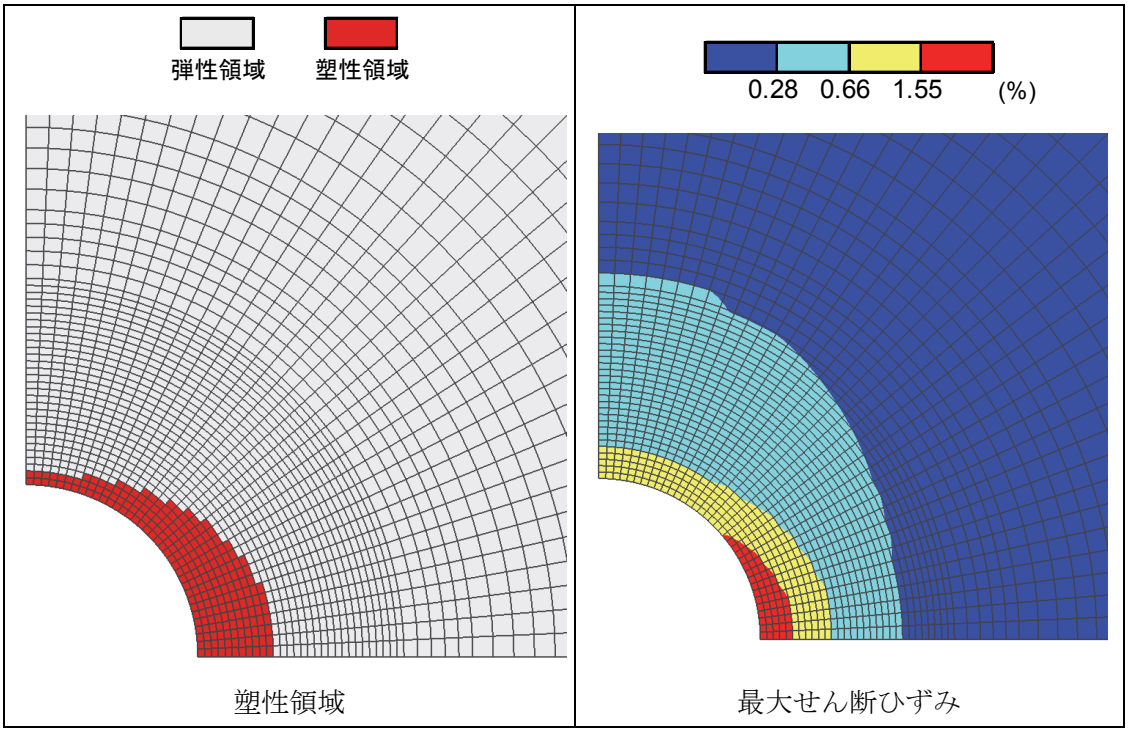


図 4.8.7-8　岩盤の塑性領域分布と最大せん断ひずみ分布（Case4）

4.9 まとめ

4.9.1 実証試験サイトの設定

平成26年度までに開発した緩衝材除去システムによる実証試験の検討をより具体的な検討とするために、実際の地下研究施設である「幌延深地層研究センター」の 350m 調査坑道の「試験坑道 2」とする。試験坑道 2 の仕様は、坑道断面φ4000mm、坑道延長 25m を設定した。

4.9.2 地下環境における緩衝材除去システムの搬送計画

東立坑から試験坑道 2 まで緩衝材除去システムを搬送する検討結果を以下にまとめる。

- 噴射・吸引設備は、周回坑道の運搬設備の最大揚重条件以下の 4t 以下に分割し、試験坑道 2 までの運搬が可能である。
- 塩水リユース設備は、「水供給槽」、「固液分離槽」を試験坑道 2 に搬入する場合、坑道入口を拡幅する必要がある。また、運搬は、ベルトコンベヤとターンテーブルの組合せが必要となる。

4.9.3 地下環境における緩衝材除去システムの配置計画

試験坑道 2 に緩衝材除去システムを配置する場合の検討結果を以下にまとめる。

- 緩衝材除去システムの配置には、第 2 次とりまとめの堆積岩系坑道断面への拡幅と坑道延長 34m が必要となる。また、塩水リユース設備の「水供給槽」、「固液分離槽」を搬出入するため拡幅が必要となる。
- 試験坑道 2 を拡幅しない場合は、噴射・吸引設備の塩水噴射・スラリー吸引装置のみを使用し、塩水リユース設備の一部を周回坑道へ設置することで緩衝材除去試験が可能となる。

4.9.4 実証試験に必要な設備

緩衝材除去システムに必要な設備の検討結果を以下にまとめる。

- 電気容量は、100V　4kw、200V　48kw、400V　22kw が必要となる。
- 使用水量は、給水、排水ともに 23m^3 となる。
- 電気ケーブルは、φ21mm、φ37mm、φ66mm が必要となる。
- 試験坑道内の運搬は、天井クレーンは（ローヘッド形）、電動巻上機を使用する。
- 換気設備の仕様を検討結果、送気管φ200、排気管φ300 が必要となる。

4.9.5　実証試験に必要な坑道断面

緩衝材除去システムによる緩衝材除去試験に必要な坑道断面を以下にまとめる。

- 噴射・吸引設備の最小組立スペースは、幅 5000mm（第 2 次とりまとめ断面と同じ)、高さ 6981mm（インバート上面から天端)、長さ 7490mm 以上が必要となる。

4.9.6　坑道断面の構造解析

試験坑道 2 を拡幅した場合の構造解析結果を以下にまとめる。

- Case1 の吹付けコンクリートは高強度（f'ck=36N/mm²）厚さ 30cm、鋼製支保工は高規格(HT590) HH-200 を採用することで許容値を満足する結果となる。
- Case2 では Case1 と同様の支保パターンを採用すると支保工が許容値を超過する結果となる。全断面掘削による解析を実施しているため、分割施工を考慮することで許容値内となる可能性がある。
- Case3 は吹付けコンクリート厚を 20cm とした場合、従来型鋼 H-150 では許容値を超過するため、高規格支保工 HH-154 を採用することで許容値を満足する結果が得られた。
- Case4 については、ライナープレートの板厚 2.7mm を採用した場合、SS400 相当の許容値を下回る結果が得られた。

4.9.7　今後の課題

実施設計に向けての今後の課題を以下に示す。

- 地下施設全体のレイアウト図、各坑道断面の仕様、換気ダクトや照明設備等の坑道附帯設備の仕様、立坑や周回坑道の楊重設備の仕様等、地下施設の最新図面を入手する必要がある。
- 本検討では、試験坑道 2 周辺に埋設されている計測機器を考慮せず拡幅断面の検討を行った。しかし、実際に試験坑道 2 の拡幅を行うには、拡幅範囲等について計測管理者と調整する必要がある
- 解析結果では、鋼製支保工の仕様は一般に使用されている H150（SS400）を HH200（SS540）の高規格に、吹付コンクリートの仕様は f'ck=36N/mm² を 36 N/mm² の高強度にする必要が生じた。しかし、本解析は全断面掘削の解析パターンにて検討した結果であるため、実施設計では掘削手順に応じた構造解析を実施し、支保工仕様を再検討する必要がある。
    - 本検討では、現有設備を配置するために坑道の拡幅を検討した。今後は、噴射・吸引設備、塩水リユース設備の処理能力や設備構成を検討し、坑道断面（堆積岩系断面）以上の拡幅を行わないような設備設計の検討が必要である。

参考文献

[1] （公財）原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 25 年度地層処分原子力発電施設広聴・広報等事業（地層処分実規模設備整備事業）（2014）

[2] （公財）原子力環境整備促進・資金管理センター：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）（2014）

[3] （公財）原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）（2013）

[4] 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）

[5] 森岡宏之他：幌延深地層研究計画における地下施設の支保設計（実施設計）．日本原子力研究開発機構，JAEA-Research2008-2009，2008

[6] 森岡宏之他：幌延深地層研究計画における地下研究坑道の支保設計，第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp21-24，2006

[7] コルゲート・ライナー技術協会：ライナープレート設計・施工マニュアル，2006

第5章　処分施設における回収維持期間の検討

5.1　検討方針

5.1.1　背景と目的

平成 25 年度の検討では、廃棄体を回収するための維持期間を設けた場合に対する検討として、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、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、定性的評価を行った[4]。

本年度は、平成 25 年度に実施した処分施設への安全性に影響を及ぼす要因について、人工バリア（オーバーパック、緩衝材）の性能維持が可能な期間の観点から分析を行い、主たる影響要因について、その影響の程度を定量的に把握するとともに回収維持期間について検討した。その回収維持期間に対し、処分施設（地下施設）を維持管理するための具体的な方策と残される課題を整理することを目的とした。

検討項目は次の 4 項目である。

① 処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合における人工バリア性能に及ぼす影響の程度の定量的把握
② ①の結果を基とした処分施設の状態の検討および回収維持期間の例示
③ ②の結果に対する処分施設の維持管理方策の検討
④ ①～③の検討結果から残される課題の整理

5.1.2　検討内容と手順

(1) 処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合における人工バリア性能に及ぼす影響の程度の定量的把握

検討の手順を図 5.1.2-1 に示す。影響因子の整理および人工バリアの状態設定の検討では、平成 25 年度に実施した処分施設の安全性に及ぼす影響についての調査結果を反映し取りまとめた。また、定量化（程度の検討）で必要となる人工バリアの環境条件として、オーバーパックの腐食や緩衝材への熱的影響等を検討するために温度条件、地下水条件、雰囲気等を設定した。詳細を 5.2.3 環境条件の設定に示す。

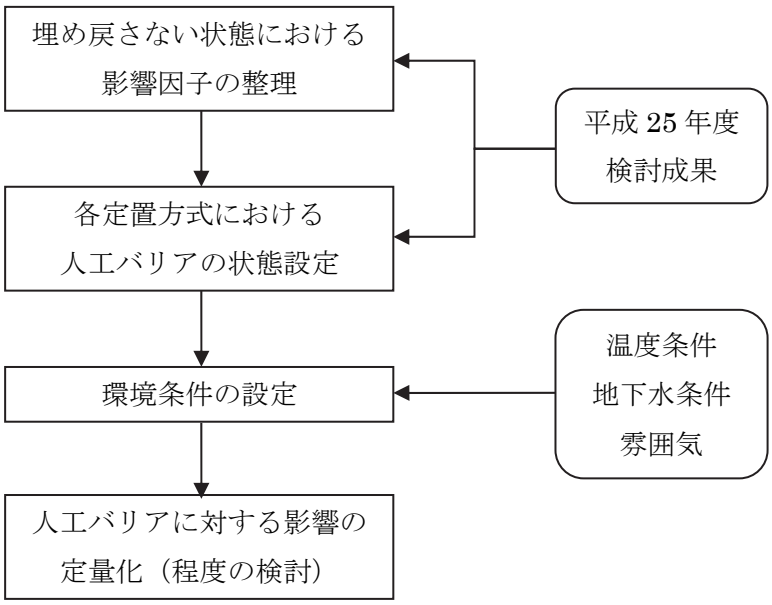


図 5.1.2-1　影響の程度の定量的把握における検討手順

これらの環境条件の設定や影響の定量化の検討にあたっては、以下の調査を行い処分場の環境条件を試行的に設定した。

・第 2 次取りまとめにおける人工バリア性能に係る環境条件調査
・地層処分研究施設における人工バリア性能に係る地下環境情報調査

(2) 処分施設の状態の検討および回収維持期間の例示

(1) の結果を基として、処分施設について、操業段階における代表的な状態を設定し、回収維持期間の例示について検討を行った。

検討の手順を図 5.1.2-2 に示す。特に回収維持期間の設定（例示）の考え方を明確にして検討することに留意した。

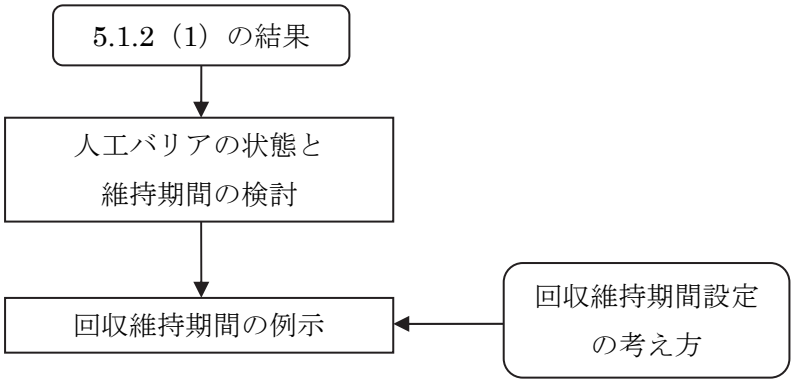


図 5.1.2-2　回収維持期間の例示の検討手順

(3) 処分施設の維持管理方策の検討

(2) において例示した回収維持期間に対し、処分施設を維持管理するための具体的な方策の検討を行った。検討では、平成 25 年度に実施した回収維持期間の検討における地層処分類似施設の維持管理に関する文献調査結果を活用した。検討の手順を図 5.1.2-3 に示す。

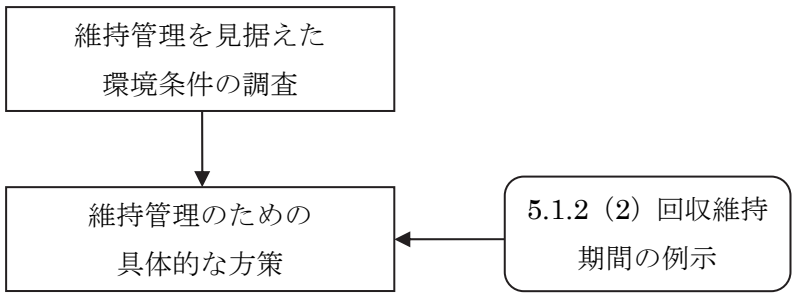


図 5.1.2-3　処分施設の維持管理方策の検討手順

(4) 残される課題の整理

(1) ～(3) の検討結果において、残される課題について整理した。

5.2　処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合における人工バリア性能に及ぼす影響の程度の定量的把握

5.2.1　処分施設を埋め戻さない状態における影響因子の整理

平成 25 年度の地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）「処分施設における回収維持期間の検討」において、処分施設を埋め戻さずに一定期間維持することにより処分施設の安全性に及ぼす影響について検討しており、その検討成果に基づき人工バリア等に対する影響因子を抽出・整理した。

(1) 人工バリア等に対する影響因子

処分施設の埋め戻し時期の違いによる人工バリア等の変状（変化）について、操業安全性、閉鎖後長期安全しに影響する環境変化の要因（「放射線場」、「熱的影響」、「力学的影響」、「水理学的影響」、「化学的影響」の 5 つの影響）として網羅的に抽出し、それらの因子の経時変化と構成要素からの影響を体系的に整理している。

人工バリア等の構成材料に対する変状と発生時期が、表 5.2.1-1 のように整理されている。表から人工バリア等のうち、オーバーパックおよび PEM 容器の炭素鋼材料については腐食が変状として挙げられる。PEM 容器については、変形・破損も変状として抽出されている。緩衝材については、ベントナイト材料の膨潤・変形、変質・劣化および流出が変状として挙げられている。ここで、PEM 容器は人工バリアではなく人工バリアとしての要件や特性を持ってはいないが、本検討では便宜上オーバーパックや緩衝材と同じ人工バリアの項目に含めた。

表 5.2.1-1　人工バリア等に発生する現象とその時期の整理（RWMC（2014）の表を編集）

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	
人工バリア等	オーバーパック	鋼材	腐食	－	○	○	－
	緩衝材	ベントナイト	放射線	－	○	○	間隙水・空気
			膨潤、変形	－	○	○	スメクタイト
			変質、劣化	－	△	○	スメクタイト
			流出	－	△	○	－
	PEM 容器	鋼材	腐食	－	○	○	－
			変形・破損	－	△	○	－

○：発生する可能性が高いと考えられる変状、△：状態により発生が考えられる変状

これらの変状に対する人工バリア等の特性の変化とその原因について、5 つの影響の観点より整理したものを表 5.2.1-2 に示す。これらから、人工バリア等の変状に対する主な影響因子として、次の項目が抽出される。ここで、放射線の影響としては操業安全の考慮等が主であり、後述する人工バリアへの定量的な影響は小さいと考えられることから対象から外した。

オーバーパック、PEM 容器の腐食に対する影響因子：地下水質、温度

緩衝材の劣化・変質：温度、地下水質、腐食生成物

緩衝材の膨潤・変形：湧水の有無

緩衝材の流出：湧水の流量

これらの影響因子について、次項で設定する人工バリア等の状態に対する整理を 5.2.2 (3)で実施する。

表 5.2.1-2　人工バリア等に発生する現象とその時期の整理（RWMC（2014）の表を編集）

整理の観点	人工バリア等の特性		特性の変化	原因	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	○	－
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	◎	○
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	◎	○
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	◎	－
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、◎：特性の変化増大の可能性あり

5.2.2　各定置方式における人工バリア等の状態設定

(1) 定置方式

定置方式としては、代表的な定置方式[5]である処分孔竪置き定置方式（竪置き方式)、処分坑道横置き定置方式（横置き方式）の両方式を対象とした。

また、横置き定置方式では、国の基盤研究[6]や NUMO の検討[7]において PEM（Pre-fabricated EBS Module）方式が検討されている。PEM 方式は、地上施設であらかじめ人工バリアを鋼製セル（PEM 容器)内に格納して一体化し、地下施設に搬送し処分坑道に横置き定置する方式である。回収維持の観点からは、鋼製の PEM 容器に及ぼす影響について検討する必要があり、他の定置方式とは異なることから PEM 方式についても検討対象とした。

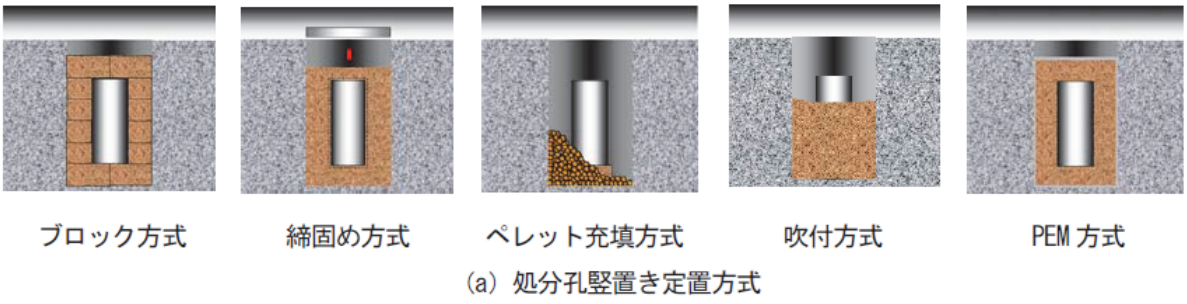
したがって、竪置き方式、横置き方式、および横置き定置方式の 1 つである PEM 方式の 3 つの定置方式を検討対象とした。

(2) 人工バリアの状態の設定

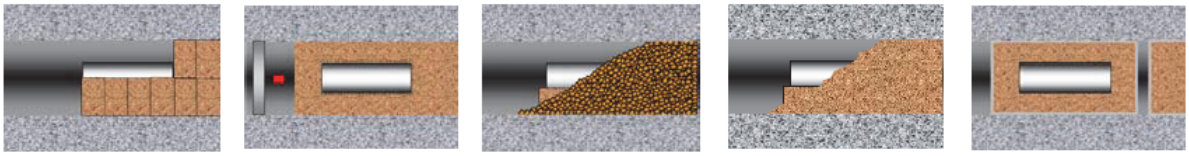
状態の設定においては、PEM 容器内に一体化してしまう PEM 方式以外の竪置き方式および横置き方式においては、オーバーパックと緩衝材の状態の組み合わせとなることから、緩衝材の定置方法を考慮することとした。各定置方式において考えられる緩衝材の代表的な定置方法としては、緩衝材ブロック、原位置締固め、ペレット充てん、吹付けが考えられ、これらの概念を図 5.2.2-1 に示す[7]。

図から分かるように、回収維持の状態を設定する場合、緩衝材をどの定置状態とするかにより様々な状態が想定されてしまうこと、現状において定置方式が決まっていないこと等から、環境設定の検討を行う基として、各定置方式における代表的なイメージを設定した。そのため、影響する因子の検討や影響の程度の検討においては、さまざまな状態を考慮して実施することとした。

ここでは、竪置き方式、横置き方式、PEM 方式について、5.2.4　人工バリアに対する影響の定量化の検討における環境設定等における状態の基とする観点から、各方式における代表的な状態のイメージを設定した。



(a) 処分孔竪置き定置方式



(b) 処分坑道横置き定置方式

図 5.2.2-1　定置概念[7]

1) 竪置き方式

竪置き方式での状態のイメージとその説明を表 5.2.2-1 に示す。

①は、緩衝材の定置が完了していな状態を想定した。オーバーパックが少なくとも定置可能な緩衝材の底部、または底部+胴部が定置されている状態である。この状態では、湧水が直接オーバーパックに接する可能性がある。また、緩衝材が、湧水により膨潤、変形し、緩衝材の要件であるオーバーパック支持性が失われる可能性がある。オーバーパックの腐食検討としての湧水状態は、オーバーパック表面を濡らす程度に湧水（滴水）が存在し、オーバーパック表面温度が高い場合には蒸発してしまう状況が考えられる。

②は、処分孔への人工バリアの定置は完了しているが、処分坑道は埋め戻されていない状態となる。緩衝材が湧水により膨潤して膨出する可能性があることから、処分孔上部には膨出防止のための蓋が設置されることが考えられる。

③は、処分坑道は埋め戻され、処分坑道の端部にはプラグが設置されている。人工バリアの状態としてはほぼ第 2 次取りまとめと同様であるが､主要坑道が空いていることから、周辺岩盤内には主要坑道に向かう水の流れが発生している状態が考えられる。

④は、主要坑道までの埋戻しが実施されており、第 2 次取りまとめの操業終了の概念と同様の状態となる。

2) 横置き方式

横置き方式での状態のイメージとその説明を表 5.2.2-2 に示す。

①は、緩衝材の定置が完了していない状態を想定する。オーバーパックが少なくとも定置可能な緩衝材の底部が定置されている状態となる。この状態では、湧水が直接オーバーパックに接する可能性がある。また、定置が完了していない緩衝材が湧水により膨潤、変形し、緩衝材の要件であるオーバーパック支持性が失われる可能性がある。オーバーパックの腐食を検討するための湧水状態に関しては、想定として、緩衝材が膨潤や変形する程

度ではないもののオーバーパック表面を濡らす程度に湧水（滴水）が存在し、オーバーパック表面温度が高い場合には蒸発してしまう状況が考えられる。

②は、処分坑道への人工バリアの定置は完了しているが、処分坑道と緩衝材の隙間は充填されていない状態である。緩衝材が湧水により膨潤、変形し、膨出する可能性がある。

③は、処分坑道と緩衝材の隙間が隙間充てん材で充填され、処分坑道の端部にはプラグが設置されている。人工バリアの状態としてはほぼ第 2 次取りまとめと同様であるが、主要坑道が空いていることから、周辺岩盤内には主要坑道に向かう水の流れが発生している状態が考えられる。

④は、主要坑道までの埋戻しが実施されており、第 2 次取りまとめの操業終了の概念と同様の状態となる。

3) PEM 方式

PEM 方式での状態のイメージとその説明を表 5.2.2-3 に示す。

①は、PEM 方式の場合、人工バリアの設置の途中の段階は無いものとした。

②は、処分坑道への人工バリアの定置は完了しているが、処分坑道と緩衝材の隙間は充填されていない状態である。PEM が湧水により湿潤する可能性があるが、緩衝材が湧水と接触する可能性は無いものとした。

③は、処分坑道と PEM の隙間が隙間充てん材で充填され、処分坑道の端部にはプラグが設置されている。人工バリアの状態としては、ほぼ第 2 次取りまとめと同様であるが、主要坑道が空いていることから、周辺岩盤内には主要坑道に向かう水の流れが発生している状態が考えられる。

④は、主要坑道までの埋戻しが実施されており、第 2 次取りまとめの操業終了の概念と同様の状態となる。

表 5.2.2-1　竪置き方式における状態のイメージと説明

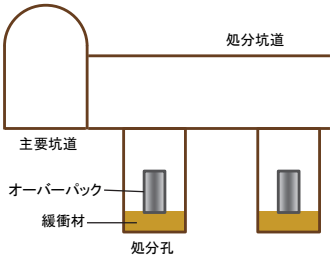
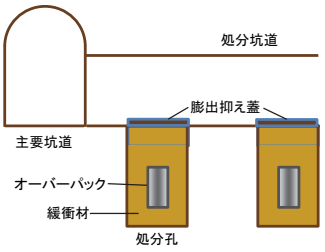
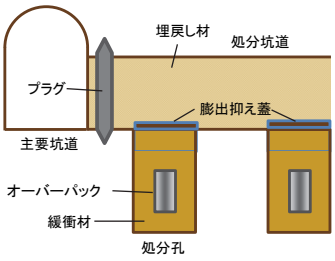
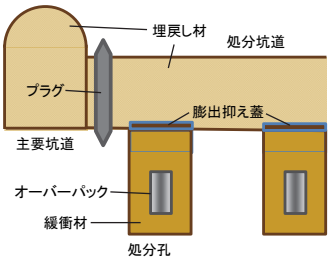
	状態のイメージ	状態の説明
①		・処分孔に緩衝材が定置され、オーバーパックが緩衝材上に定置されている。 ・オーバーパック全体は緩衝材に覆われておらず、部分的にオーバーパック表面が露出している。 ・湧水等がある場合、直接オーバーパックが濡れる可能性がある。 ・湧水等がある場合、湧水を吸収した緩衝材が膨潤、変形する可能性がある。 ・ガラス固化体からの発熱の影響により、緩衝材中の水分が蒸発し、緩衝材が収縮・変形する可能性がある。 ・処分坑道、主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。
②		・緩衝材が全て定置され、処分孔が埋め戻されている。 ・オーバーパックには直接湧水は触れない。 ・処分孔からの処分坑道への膨出の防止のため、処分孔上部に膨出抑え蓋などが設置されていることが想定される。 ・処分坑道は埋め戻されていない。 ・処分坑道、主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。
③		・処分孔および処分坑道が埋め戻されている。 ・処分坑道端部にはプラグが設置されている。 ・主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。
④		・処分孔、処分坑道および主要坑道が埋め戻されている。 ・第 2 次取りまとめの概念と同様。

表 5.2.2-2　横置き方式における状態のイメージと説明

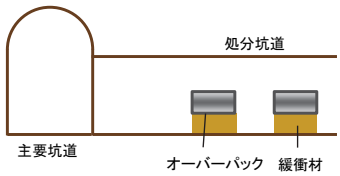
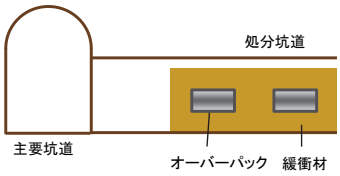
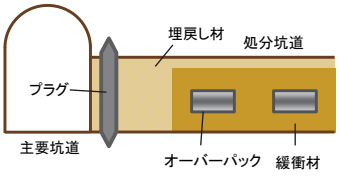
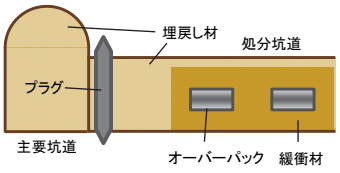
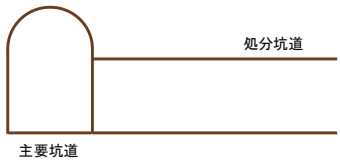
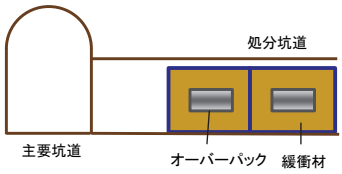
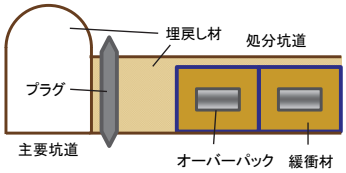
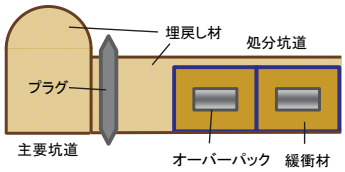
	状態のイメージ	状態の説明
①		・処分坑道に緩衝材が定置され、オーバーパックが緩衝材上に定置されている。 ・オーバーパック全体は緩衝材に覆われておらず、部分的にオーバーパック表面が露出している。 ・湧水等がある場合、直接オーバーパックが濡れる可能性がある。 ・湧水等がある場合、湧水を吸収した緩衝材が膨潤、変形する可能性がある。 ・ガラス固化体からの発熱の影響により、緩衝材中の水分が蒸発し、緩衝材が収縮・変形する可能性がある。 ・処分坑道、主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。
②		・緩衝材が全て定置されている。 ・オーバーパックには直接湧水は触れない。 ・処分坑道は埋め戻されていない。 ・緩衝材ブロック定置の場合、処分坑道と緩衝材の間に隙間が発生する。 ・湧水等がある場合、湧水を吸収した緩衝材が膨潤、変形する可能性がある。 ・ガラス固化体からの発熱の影響により、緩衝材中の水分が蒸発し、緩衝材が収縮・変形する可能性がある。 ・処分坑道、主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。
③		・処分坑道が埋め戻されている。 ・処分坑道端部にはプラグが設置されている。 ・主要坑道は埋め戻されていない。 ・主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。
④		・処分坑道、主要坑道が埋め戻されている。 ・第 2 次取りまとめの概念と同様。

表 5.2.2-3　PEM 方式における状態のイメージと説明

	状態のイメージ	状態の説明
①		・人工バリアは定置されていない。 ・検討対象外とする。
②		・PEM が定置されている。 ・処分坑道は埋め戻されていない。 ・湧水が有る場合、直接 PEM 容器が濡れる可能性がある。 ・処分坑道、主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される
③		・処分坑道が埋め戻されている。 ・オーバーパックには直接湧水は触れない。 ・処分坑道の端部にはプラグが設置されている。 ・主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。
④		・処分坑道、主要坑道が埋め戻されている。 ・第 2 次取りまとめの概念と同様。

(3) 影響因子と人工バリアの状態の整理

5.2.1　(1) と(2) より、人工リアの定置方式毎に、想定される人工バリアの状態に対して人工バリア性能への影響が懸念される影響因子について、熱的影響、水理的影響、力学的影響、化学的影響に区分し、発生する現象と人工バリア性能への影響の状況について整理した。

竪置き方式、横置き方式、PEM 方式の方式毎に整理した結果を表 5.2.2-4～表 5.2.2-6 に示す。

特に人工バリアの長期性能に影響が大きいと考える項目については、表中に朱書きで示した。

表 5.2.2-4　竪置き方式における状態のイメージと影響因子の整理

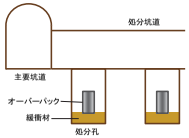
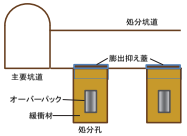
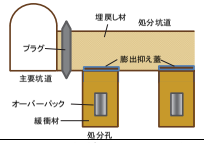
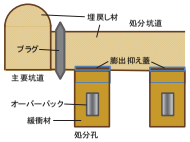
		①	②	③	④
竪置き方式	埋戻し状態のイメージ				
	状態の説明	・処分孔に緩衝材が定置され、オーバーパックが緩衝材上に定置されている。 ・オーバーパック全体は緩衝材に覆われておらず、部分的にオーバーパック表面が露出している。 ・湧水等がある場合、直接オーバーパックが濡れる可能性がある。 ・湧水等がある場合、湧水を吸収した緩衝材が膨潤、変形する可能性がある。 ・ガラス固化体からの発熱の影響により、緩衝材中の水分が蒸発し、緩衝材が収縮・変形する可能性がある。 ・処分坑道、主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。	・緩衝材が全て定置され、処分孔が埋め戻されている。 ・オーバーパックには直接湧水は触れない。 ・処分孔からの処分坑道への膨出の防止のため、処分孔上部に抑え蓋などが設置されていることが想定される。 ・処分坑道は埋め戻されていない。 ・処分坑道、主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。	・処分孔および処分坑道が埋め戻されている。 ・処分坑道端部にはプラグが設置されている。 ・主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。	・処分孔、処分坑道および主要坑道が埋め戻されている。 ・第 2 次取りまとめの概念と同様。
	熱的影響	①オーバーパック温度　⇒　腐食挙動の変化 ②緩衝材最高温度 100℃超　⇒　ベントナイトの変質による緩衝材の膨潤特性、止水性、核種吸着性、透水係数の劣化 ③蒸発による緩衝材含水比の低下　⇒　緩衝材の比熱および熱伝導率の変動 ④蒸発による緩衝材含水比の低下　⇒　緩衝材の収縮による破損、亀裂の発生	①オーバーパック温度　⇒　腐食挙動の変化 ②緩衝材最高温度 100℃超　⇒　ベントナイトの変質による緩衝材の膨潤特性、止水性、核種吸着性、透水係数の劣化	特に無し （本状態では特記すべき顕著な影響は無い）	「第 2 次取りまとめ」の概念
	水理的影響	①湧水による緩衝材の流出（パイピング）　⇒　緩衝材の密度低下による緩衝材の膨潤特性、止水性、核種吸着性、透水係数の劣化	①湧水による緩衝材の流出（パイピング）　⇒　緩衝材の密度低下による緩衝材の膨潤特性、止水性、核種吸着性、透水係数の劣化	①湧水による緩衝材の流出（パイピング）　⇒　緩衝材の密度低下による緩衝材の膨潤特性、止水性、核種吸着性、透水係数の劣化	「第 2 次取りまとめ」の概念
	力学的影響	①酸素による腐食によるオーバーパックの減肉　⇒　強度および遮へい性の劣化 ②緩衝材の膨潤　⇒　緩衝材の変形による密度低下で膨潤特性、止水性および核種吸着性の劣化、応力緩衝性能の劣化 ③緩衝材の乾燥、膨潤　⇒　緩衝材の変形によるオーバーパック支持性の劣化	①酸素による腐食によるオーバーパックの減肉　⇒　強度および遮へい性の劣化 ②緩衝材膨潤の膨潤　⇒　（処分孔より緩衝材がはらみ出した場合）緩衝材の密度低下で膨潤特性、止水性および核種吸着性の劣化	特に無し （本状態では特記すべき顕著な影響は無い）	「第 2 次取りまとめ」の概念
	化学的影響	①オーバーパックの酸素による腐食の継続　⇒　オーバーパックの酸素による腐食量の増加 ②地下水質の変化　⇒　オーバーパックの腐食速度の変動による腐食量の増加 ③地下水質の変化および腐食生成物の発生　⇒　緩衝材の劣化による緩衝材の膨潤特性、止水性および核種吸着性の劣化	①オーバーパックの酸素による腐食の継続　⇒　オーバーパックの酸素による腐食量の増加 ②地下水質の変化　⇒　オーバーパックの腐食速度の変動による腐食量の増加 ③地下水質の変化および腐食生成物の発生　⇒　緩衝材の劣化による緩衝材の膨潤特性、止水性および核種吸着性の劣化	①地下水質の変化　⇒　オーバーパックの腐食速度の変動による腐食量の増加	「第 2 次取りまとめ」の概念

表 5.2.2-5　横置き方式における状態のイメージと影響因子の整理

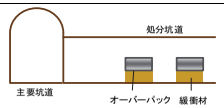
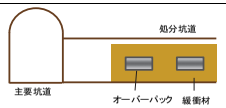
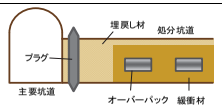
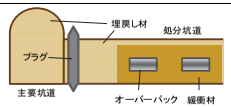
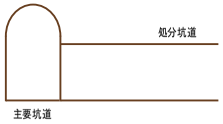
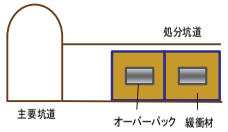
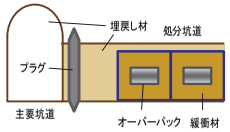
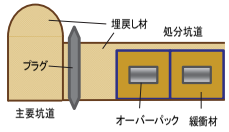
横置き方式	埋戻し状態のイメージ	①  	②  	③  	④ 
	状態の説明	・処分坑道に緩衝材が定置され、オーバーパックが緩衝材上に定置されている。 ・オーバーパック全体は緩衝材に覆われておらず、部分的にオーバーパック表面が露出している。 ・湧水等がある場合、直接オーバーパックが濡れる可能性がある。 ・湧水等がある場合、湧水を吸収した緩衝材が膨潤、変形する可能性がある。 ・ガラス固化体からの発熱の影響により、緩衝材中の水分が蒸発し、緩衝材が収縮・変形する可能性がある。 ・処分坑道、主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。	・緩衝材が全て定置されている。 ・オーバーパックには直接湧水は触れない。 ・処分坑道は埋め戻されていない。 ・緩衝材ブロック定置の場合、処分坑道と緩衝材の間に隙間が発生する。 ・湧水等がある場合、湧水を吸収した緩衝材が膨潤、変形する可能性がある。 ・ガラス固化体からの発熱の影響により、緩衝材中の水分が蒸発し、緩衝材が収縮・変形する可能性がある。 ・処分坑道、主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。	・処分坑道が埋め戻されている。 ・処分坑道端部にはプラグが設置されている。 ・主要坑道は埋め戻されていない。 ・主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。	・処分坑道、主要坑道が埋め戻されている。 ・第 2 次取りまとめの概念と同様。
	熱的影響	①オーバーパック温度　⇒　腐食挙動の変化 ②緩衝材最高温度 100℃超　⇒　ベントナイトの変質による緩衝材の膨潤特性、止水性、核種吸着性、透水係数の劣化 ③蒸発による緩衝材含水比の低下　⇒　緩衝材の比熱および熱伝導率の変動 ④蒸発による緩衝材含水比の低下　⇒　緩衝材の収縮による破損、亀裂の発生	①オーバーパック温度　⇒　腐食挙動の変化 ②緩衝材最高温度 100℃超　⇒　ベントナイトの変質による緩衝材の膨潤特性、止水性、核種吸着性、透水係数の劣化 ③蒸発による緩衝材含水比の低下　⇒　緩衝材の比熱および熱伝導率の変動 ④蒸発による緩衝材含水比の低下　⇒　緩衝材の収縮による破損、亀裂の発生	特に無し （本状態では特記すべき顕著な影響は無い）	「第 2 次取りまとめ」の概念
	水理的影響	①湧水による緩衝材の流出　⇒　緩衝材の密度低下による緩衝材の膨潤特性、止水性、核種吸着性、透水係数の劣化	①湧水による緩衝材の流出　⇒　緩衝材の密度低下による緩衝材の膨潤特性、止水性、核種吸着性、透水係数の劣化	①湧水による緩衝材の流出（パイピング）　⇒　緩衝材の密度低下による緩衝材の膨潤特性、止水性、核種吸着性、透水係数の劣化	「第 2 次取りまとめ」の概念
	力学的影響	①酸素による腐食によるオーバーパックの減肉　⇒　強度および遮へい性の劣化 ②緩衝材の膨潤　⇒　緩衝材の変形による密度低下で膨潤特性、止水性および核種吸着性の劣化、応力緩衝性能の劣化 ③緩衝材の膨潤　⇒　緩衝材の変形によるオーバーパック支持性の劣化	①酸素による腐食によるオーバーパックの減肉　⇒　強度および遮へい性の劣化 ②オーバーパックの腐食膨張および緩衝材の膨潤　⇒　緩衝材の変形による密度低下で膨潤特性、止水性および核種吸着性の劣化、応力緩衝性能の劣化 ③緩衝材の膨潤　⇒　緩衝材の変形による密度低下で膨潤特性、止水性および核種吸着性の劣化、応力緩衝性能の劣化	特に無し （本状態では特記すべき顕著な影響は無い）	「第 2 次取りまとめ」の概念
	化学的影響	①オーバーパックの酸素による腐食　⇒　オーバーパックの酸素による腐食量の増加 ②地下水質の変化　⇒　オーバーパックの腐食速度の変動による腐食量の増加 ③地下水質の変化　⇒　緩衝材の劣化による緩衝材の膨潤特性、止水性および核種吸着性の劣化	①オーバーパックの酸素による腐食　⇒　オーバーパックの酸素による腐食量の増加 ②地下水質の変化　⇒　オーバーパックの腐食速度の変動による腐食量の増加 ③地下水質の変化および腐食生成物の発生　⇒　緩衝材の劣化による緩衝材の膨潤特性、止水性および核種吸着性の劣化	①地下水質の変化　⇒　オーバーパックの腐食速度の変動による腐食量の増加	「第 2 次取りまとめ」の概念

表 5.2.2-6　PEM 方式における状態のイメージと影響因子の整理

PEM 処分方式	埋戻し状態のイメージ	①  	②  	③  	④ 
	状態の説明	・人工バリアは定置されていない。 ・検討対象外とする。	・PEM が定置されている。 ・処分坑道は埋め戻されていない。 ・湧水が有る場合、直接 PEM 容器が濡れる可能性がある。 ・処分坑道、主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される	・処分坑道が埋め戻されている。 ・オーバーパックには直接湧水は触れない。 ・処分坑道の端部にはプラグが設置されている。 ・主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。	・処分坑道、主要坑道が埋め戻されている。 ・第 2 次取りまとめの概念と同様。
	熱的影響		①オーバーパック温度　⇒　腐食挙動の変化 ②緩衝材最高温度 100℃超　⇒　ベントナイトの変質による緩衝材の膨潤特性、止水性、核種吸着性、透水係数の劣化 ③蒸発による緩衝材含水比の低下　⇒　緩衝材の比熱および熱伝導率の変動 ④蒸発による緩衝材含水比の低下　⇒　緩衝材の収縮による破損、亀裂の発生	特に無し （本状態では特記すべき顕著な影響は無い）	「第 2 次取りまとめ」の概念
	水理的影響		①（PEM 容器が有孔タイプの場合）湧水による緩衝材の膨潤、流出　⇒　緩衝材の密度低下による緩衝材の膨潤特性、止水性、核種吸着性、透水係数の劣化	①（PEM 容器が有孔タイプの場合）湧水による緩衝材の膨潤、流出　⇒　緩衝材の密度低下による緩衝材の膨潤特性、止水性、核種吸着性、透水係数の劣化	「第 2 次取りまとめ」の概念
	力学的影響		①PEM 容器の腐食による容器減肉、（無孔タイプの場合）貫通孔の発生　⇒　PEM 容器の強度低下による変形、貫通孔の発生による緩衝材の腐食膨張による変形、緩衝材密度の低下 ②緩衝材の膨潤による膨潤応力の発生　⇒　緩衝材の変形による緩衝材密度の低下、 ③緩衝材の膨潤による膨潤応力の発生　⇒　PEM 容器の変形	特に無し （本状態では特記すべき顕著な影響は無い）	「第 2 次取りまとめ」の概念
	化学的影響		①PEM の酸素による腐食　⇒　PEM 容器の強度低下による変形、貫通孔の発生による緩衝材の腐食膨張による変形、緩衝材密度の低下 ②地下水質の変化および腐食生成物の発生　⇒　緩衝材の劣化による緩衝材の膨潤特性、止水性および核種吸着性の劣化	①地下水質の変化　⇒　オーバーパックの腐食速度の変動による腐食量の増加	「第 2 次取りまとめ」の概念

5.2.3　環境条件の設定

環境条件の設定では、人工バリア性能への影響を検討するための情報として、温度条件、および地下水条件について検討し、設定した。

温度条件については、想定する人工バリアの埋戻し状態において熱解析を実施して、緩衝材、オーバーパック、PEM 容器の最高温度および温度の経時変化を把握した。埋戻し状態としては、表 5.2.2-1～表 5.2.2-3 中に示した状態の図を代表的な状態とし、熱解析に反映した。また、温度条件については、H26 年度の検討では、換気や空調などの坑道内環境対策の検討を行わないことから、坑道内の自然換気や換気ファンの通気による温度差を考慮しないものとした。

地下水条件については、深地層におけるデータとして第 2 次取りまとめや幌延、瑞浪の深地層の研究施設における測定データ等を文献より収集し、オーバーパックや PEM 容器の腐食挙動を検討するための情報として整理した。

(1) 温度条件

1) 一定期間埋め戻さないとした人工バリア状態設定における廃棄体の発熱影響の検討

前節でまとめた各定置方式の人工バリアの状態設定において、廃棄体の発熱影響による人工バリアの温度履歴、最高温度の把握を熱解析により行い、解析評価は第 2 次取りまとめ（JNC，1999）に準じた 3 次元モデルで行った。検討フローを図 5.2.3-1 に示す。

処分坑道の断面形状および人工バリアの基本仕様は、竪置き方式および横置き方式については第 2 次取りまとめに示された仕様とした（図 5.2.3-2、図 5.2.3-3）。また、PEM 方式については、H24 年度処分システム工学要素技術高度化報告書―遠隔操作技術高度化開発―（原環センター）で示された設計例に基づき検討を行った（図 5.2.3-4、図 5.2.3-5）。

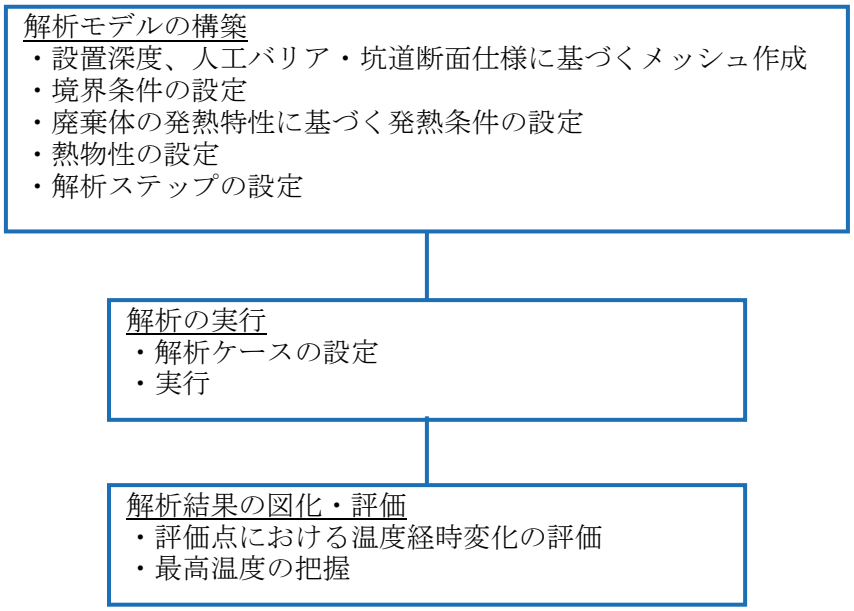
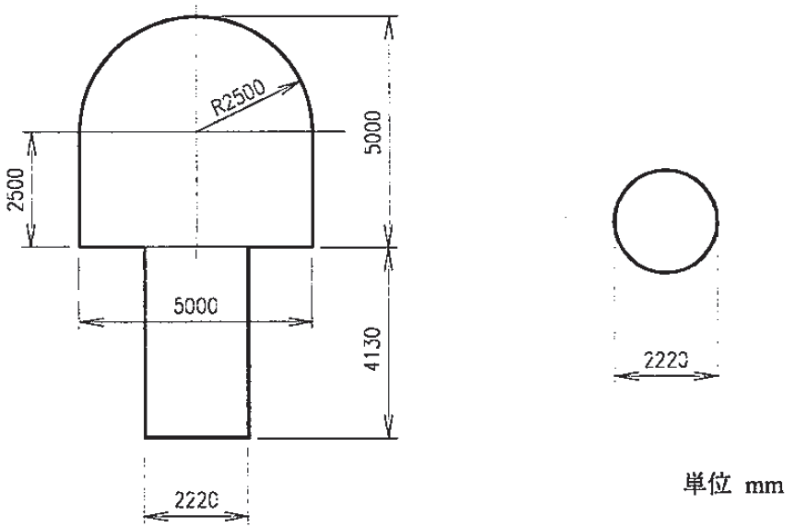


図 5.2.3-1　熱伝導解析による検討フロー



(a)竪置き方式　　(b)横置き方式

図 5.2.3-2　処分坑道断面形状（竪置き方式および横置き方式）[5]

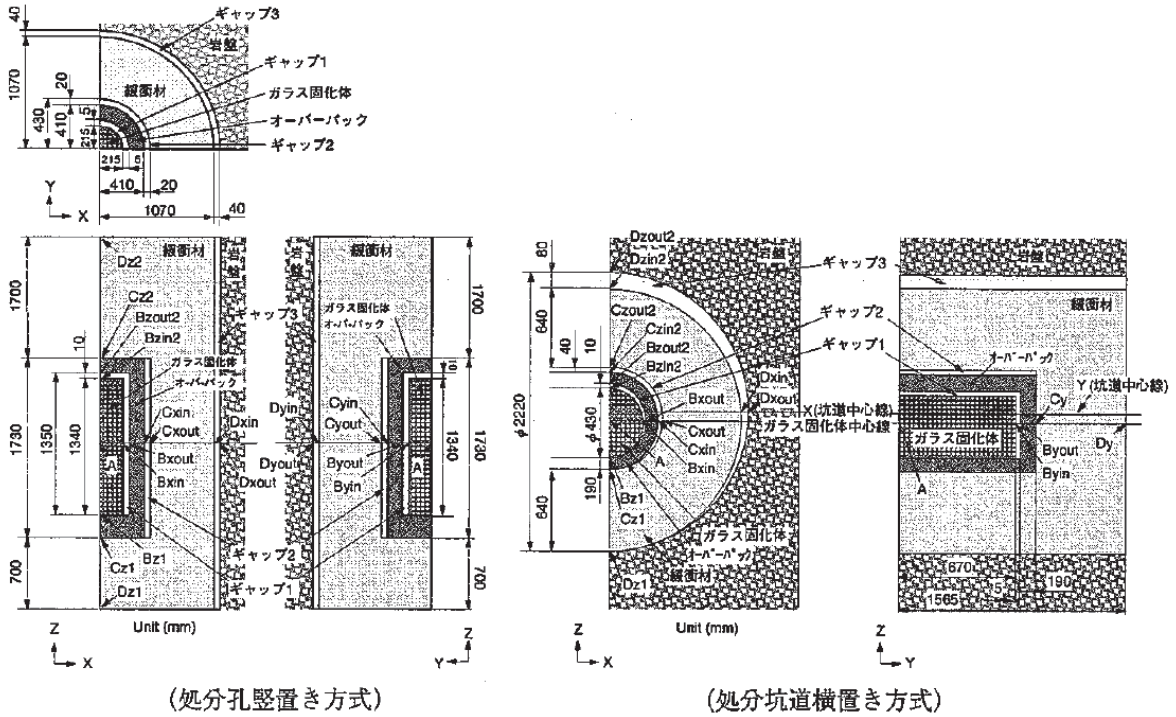


図 5.2.3-3　人工バリアの基本仕様（竪置き方式および横置き方式）[5]

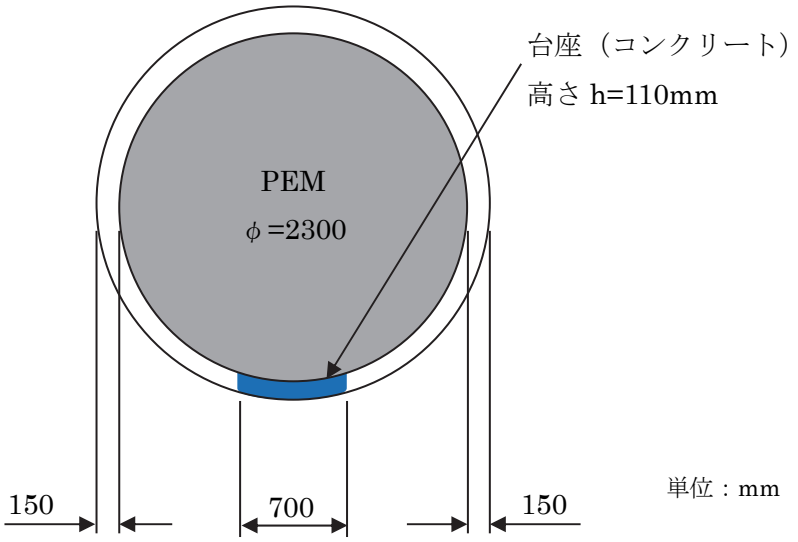
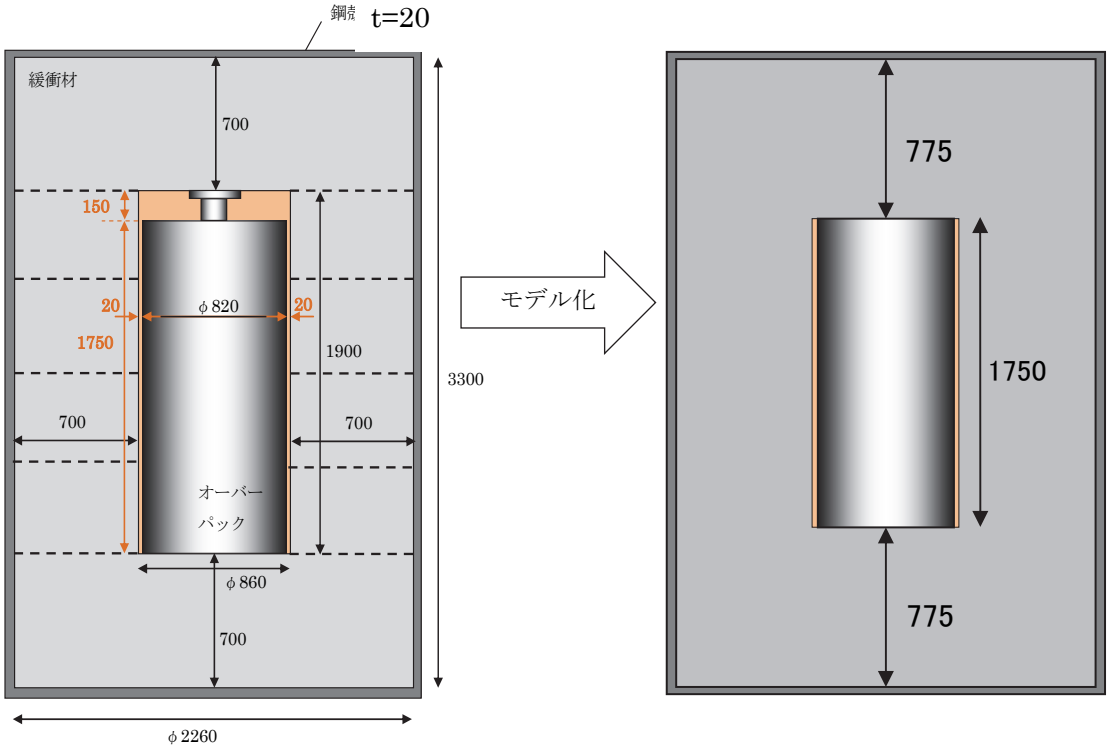


図 5.2.3-4　処分坑道断面形状（PEM 方式）[6]



※オーバーパックの高さ 1750mm は溶接のための余裕代を第 2 次取りまとめモデルに加えた値

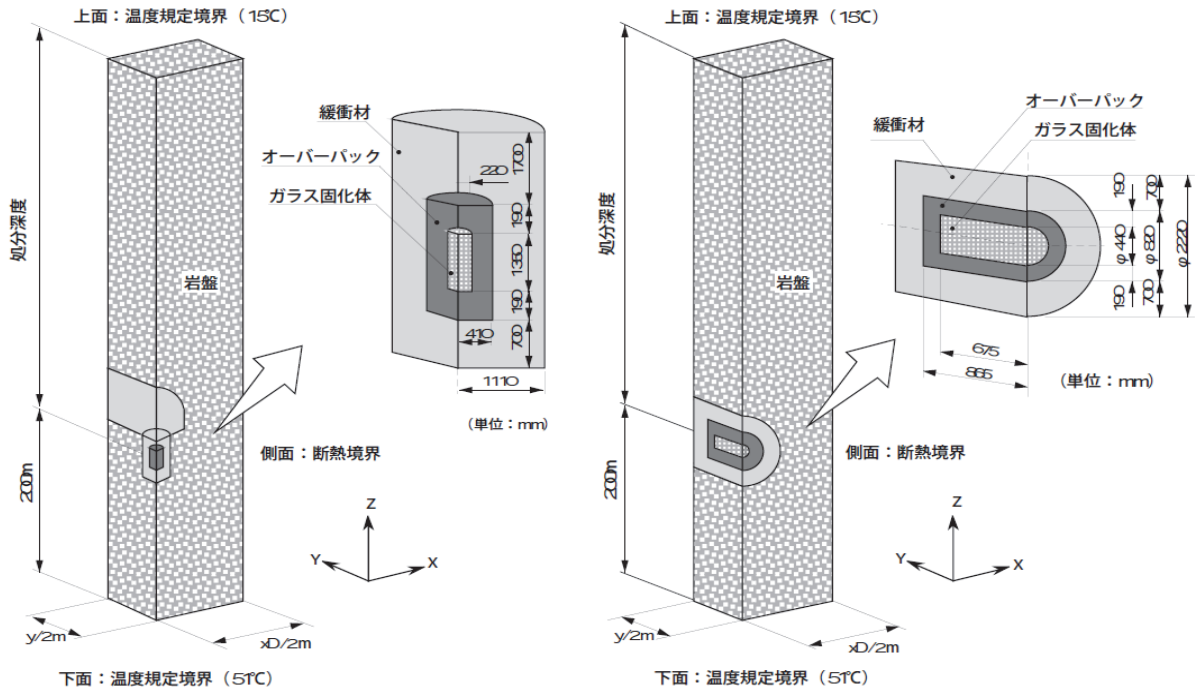
図 5.2.3-5　人工バリアの基本仕様とモデル化（PEM 方式）[6]

a. 解析手法および解析モデル

第 2 次取りまとめ[5]に基づき、水・応力との連成を考慮しない非定常三次元熱伝導解析により検討した。空間方向の離散化には有限要素法を、時間方向の離散化には差分法を適

用した一般的な解析手法を用いる。

解析モデルの構築は、第2次取りまとめの処分坑道竪置きモデルおよび横置きモデル（図5.2.3-6）と同様とする。PEM 方式については横置きモデルに準じて構築した。水平方向の解析領域は、多くの廃棄体が一定間隔で定置されることを考慮し、処分坑道横断方向は廃棄体の中心から隣接処分坑道との中間点までとし、処分坑道軸方向の解析領域は廃棄体の中心から隣接廃棄体との中間点までとした。鉛直方向は地表面から処分深度+200m までをモデルに含めた。処分深度は、地質環境条件が厳しい（地温が高い）硬岩系の深度1000m を想定してモデルを構築した。



（処分孔竪置き）　　（処分坑道横置き）

図 5.2.3-6　第 2 次取りまとめの解析モデル[5]

解析モデルに与える境界条件についても、第 2 次取りまとめと同様に設定した。鉛直の側面の境界条件は現象の対称性を考慮して断熱境界とした。初期条件は、地表面を 15℃、、地温勾配を深度方向に 3℃/100m とし、地表面とモデル底部は、境界条件として初期温度で一定とした。したがって、処分深度 1000m で初期温度が 45℃、深度 1200m の境界条件が 51℃となる。

b. 発熱特性および熱物性

廃棄体の発熱特性は、第 2 次取りまとめで用いられた図 5.2.3-7 に示すガラス固化体中間貯蔵期間後の発熱量の時系列変化を用いる。ガラス固化体の発熱は、ガラス固化体を構成する要素に境界条件として与え、その合計が発熱体の総発熱量となるように要素の体積

を考慮して設定した。

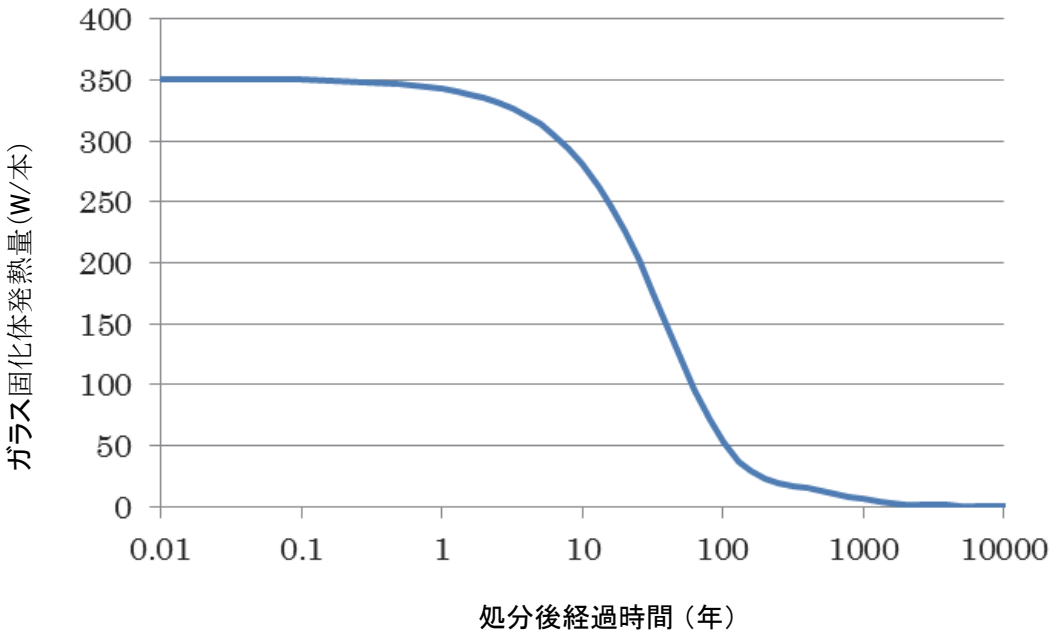


図 5.2.3-7　ガラス固化体中間貯蔵期間後の発熱量時系列変化[5]

解析に用いる熱物性を表 5.2.3-1 に示す。ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、硬岩、粉末ベントナイトおよび空気の熱物性は第 2 次取りまとめ（JNC，1999）で用いられた値を引用した。PEM 鋼殻についてはオーバーパックと同じ炭素鋼の設定とした。PEM の台座はコンクリートとし、その材料であるセメントは TRU 廃棄物処分技術に関する 2000 年度報告書[8]で用いられた値を用いた。PEM 容器内の隙間充填材については、H24 年度処分システム工学要素技術高度化報告書―遠隔操作技術高度化開発―（原環センター）[6]で示された設計例に基づき、粒状のベントナイトペレットとした。粒状ベントナイトの熱特性は充填直後の空気が混在している状態を想定し、竹ヶ原ほか（2000）[9]による 100%ベントナイトの粒状体の計測値のうち、径が 1.7mm 以下の細粒分を含む試料の平均値を用いて設定した。

表 5.2.3-1　人工バリアおよび岩盤の熱特性[5]

名称	熱伝導率 ［$Wm^{-1}K^{-1}$］	比熱 ［$J\,kg^{-1}\,K^{-1}$］	密度 ［$kg\,m^{-3}$］	記事
ガラス固化体	1.2	960	2800	第 2 次取りまとめ[5]より
オーバーパック・PEM 鋼殻	51.6	470	7860	第 2 次取りまとめ[5]より 300K の炭素鋼
緩衝材	0.78	590	1712	第 2 次取りまとめ[5]より 含水比:7%，乾燥密度:1.6Mgm^{-3}
硬岩	2.8	1000	2670	第 2 次取りまとめ[5]より
セメント	2.56	1050	2350	TRU 廃棄物処分技術に関する 2000 年度報告書[8]より セメント系材料
粉末ベントナイト	0.158	217	1040	第 2 次取りまとめ[5]より 含水比 6%，乾燥密度:0.98Mgm^{-3}
粒状ベントナイト	0.317	150	1270	竹ヶ原ほか(2000)[9]による計測値 粒状の 100%ベントナイト （＜φ1.7mm）含水比 8.4%
空気	0.03	1010	0.9799	第 2 次取りまとめ[5]より 360K 常圧下での空気の値

c. 解析ケース

本検討の有限要素モデルを図 5.2.3-8～図 5.2.3-10 に示す。図 5.2.3-8 は竪置き方式の有限要素モデル、図 5.2.3-9 は横置き方式の有限要素モデル、図 5.2.3-10 は横置き方式の有限要素モデルである。これらの図はモデル全体を対象として図化すると、紙面上では認識できないため、廃棄体近傍のみを拡大表示したものである。図中、赤三角形はオーバーパックの評価点、青三角形は緩衝材の評価点、黒三角形は PEM 鋼殻の評価点である。オーバーパックと緩衝材の間に隙間が無い場合、評価点は同一となる。図中の座標軸は後述の解析ケースおよび解析結果をまとめた表に示す温度評価点の方向に対応する。また、竪置き方式の場合、緩衝材の膨潤による浮き上がり防止の蓋が必要と考えられるが、材料や形状などが未定のため本検討ではモデル化は行わないものとした。なお、蓋をコンクリートとした場合、空気や緩衝材よりも熱伝導率は高いため、本検討結果よりも温度分布は低くなることが予想される。

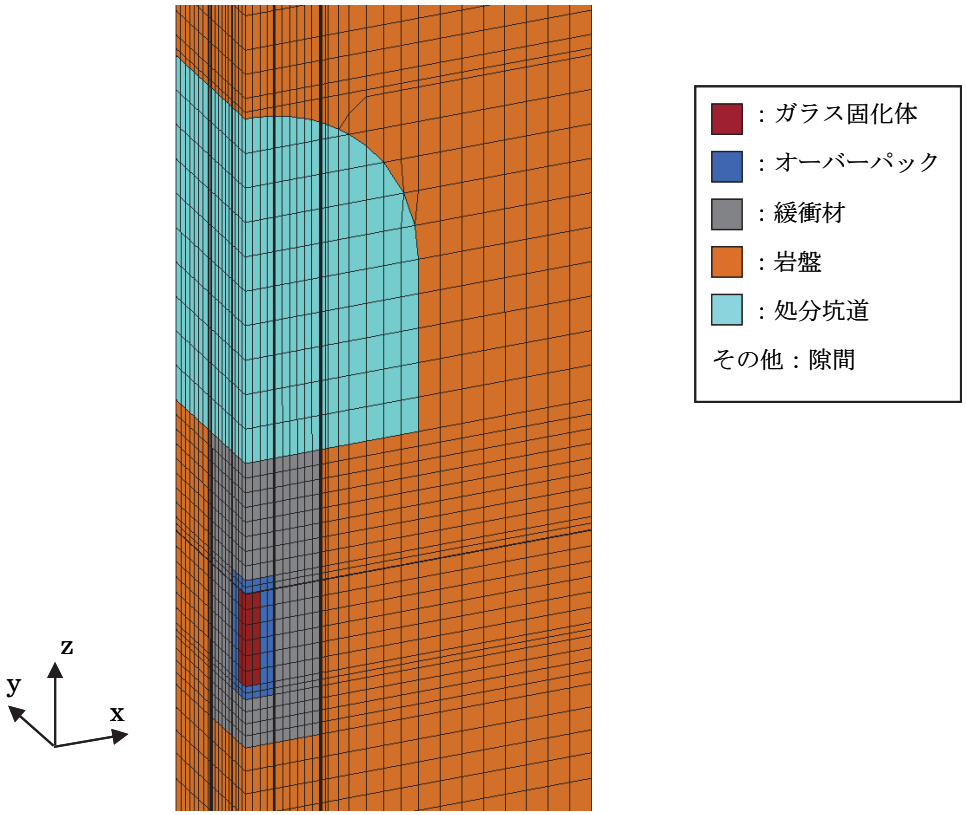
解析モデルの廃棄体定置ピッチおよび坑道離間距離については、すぐに埋め戻した場合との比較を行うため、第2次取りまとめの検討結果から設定した。竪置き方式については、第2次取りまとめにおける空洞安定性の検討から設定された最小処分坑道離間距離および

最小廃棄体（処分孔）ピッチでも緩衝材の温度が 100℃を上回らない結果が得られていることから、廃棄体の定置間隔を 4.44m（2d）、坑道離間距離は 10m（2D）と設定した。横置き方式については、緩衝材の温度が 100℃を上回らない廃棄体定置ピッチおよび坑道離間距離として、廃棄体の定置間隔を 3.13m、坑道離間距離は 13.32m（6D）と設定した。PEM 方式については第 2 次取りまとめでの検討例がないため、第 2 次取りまとめにおける横置き方式の検討結果を参考にして定置間隔を 3.34m、坑道離間距離は 15.6m（6D）と設定した。

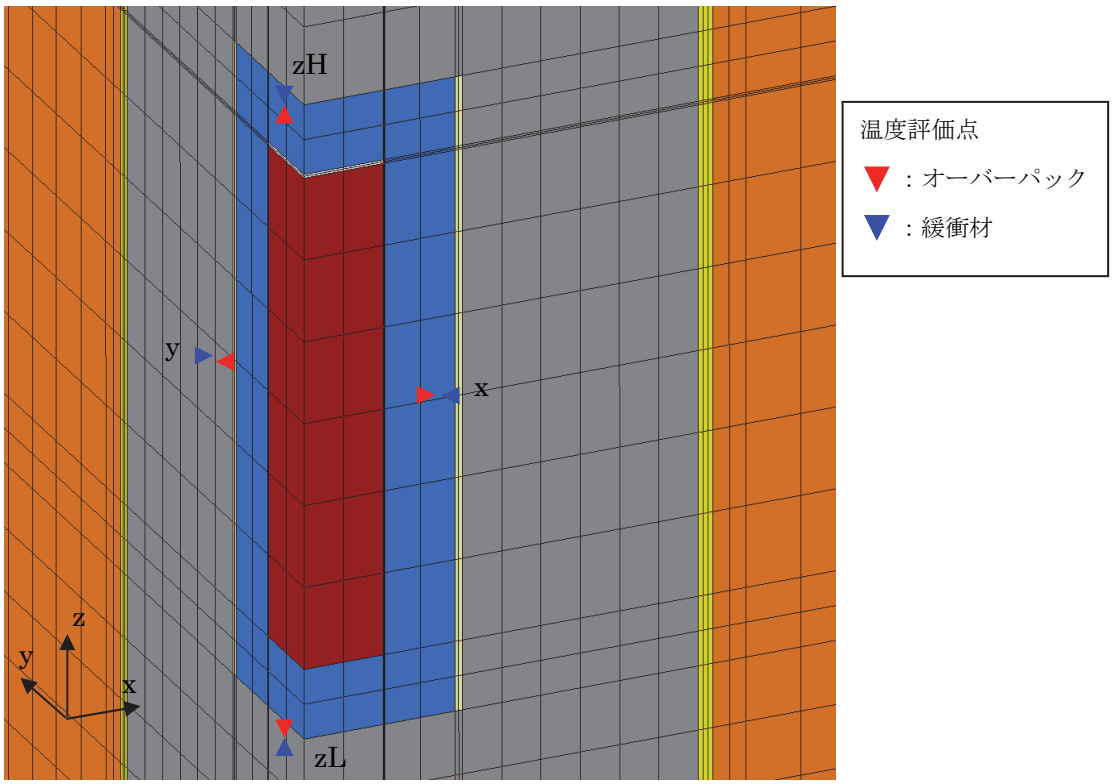
これらの解析モデルについて硬岩系岩盤 1000m の地質環境条件で熱影響解析を実施した。表 5.2.3-2～表 5.2.3-4 に解析ケース一覧を示す。ここで、横置き方式のケース h-2-1 は第 2 次取りまとめと同じ解析条件となる。竪置き方式については、第 2 次取りまとめの解析結果との比較のための参考ケースとして、第 2 次取りまとめと同じ解析条件としたケース v-3 を実施した。また、PEM 方式において本解析で設定した坑道離間距離について、従来どおり埋め戻した場合には緩衝材の温度制限を満足することを確認するための参考ケースとして、ケース p-3 を実施した。解析ケースごとの隙間の状態に対応する有限要素モデルを図 5.2.3-11～図 5.2.3-13 に示す。ここで、図 5.2.3-11 における下段のメッシュ図は廃棄体中心部における水平断面図である。

図 5.2.3-14～図 5.2.3-22 に解析結果として評価点の温度の経時変化を示す。凡例の x,y,z は図 5.2.3-8～図 5.2.3-10 に示すモデルの座標系に対応している。このうち、オーバーパックと緩衝材が接触する評価点については同一節点であるため、両者を併記して示している。

解析結果の温度分布を図 5.2.3-23～図 5.2.3-31 に示す。ここでの温度分布は、緩衝材が最高温度に達した時刻に最も近い出力結果でのコンター図として示している。

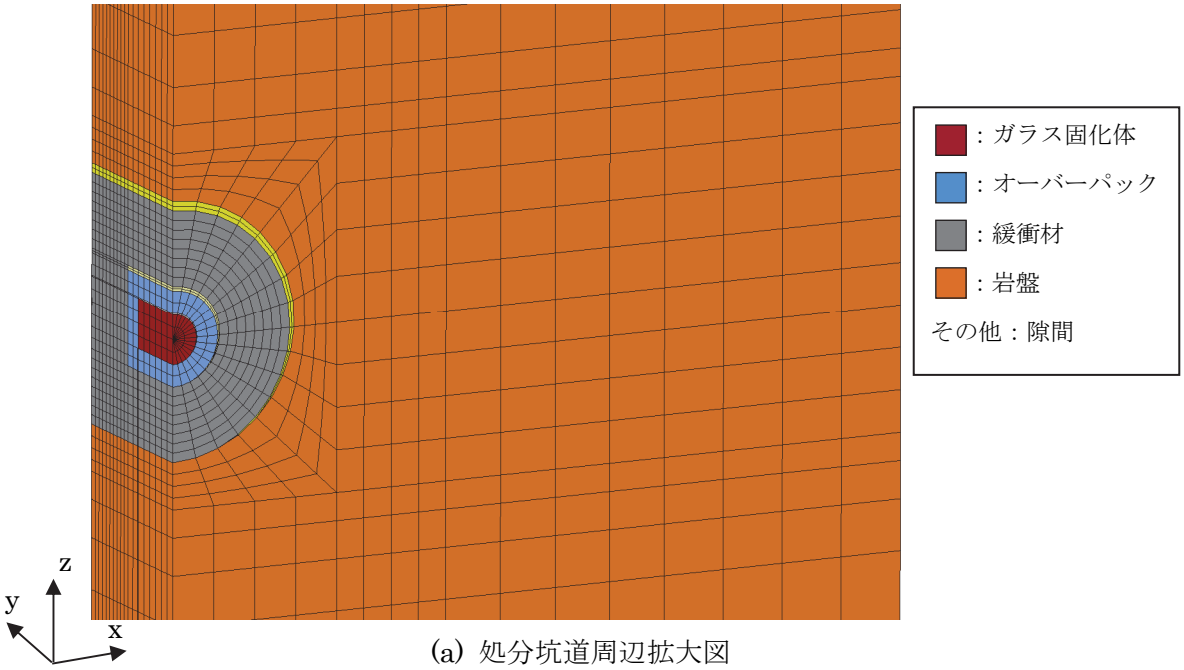


(a) 処分坑道周辺拡大図

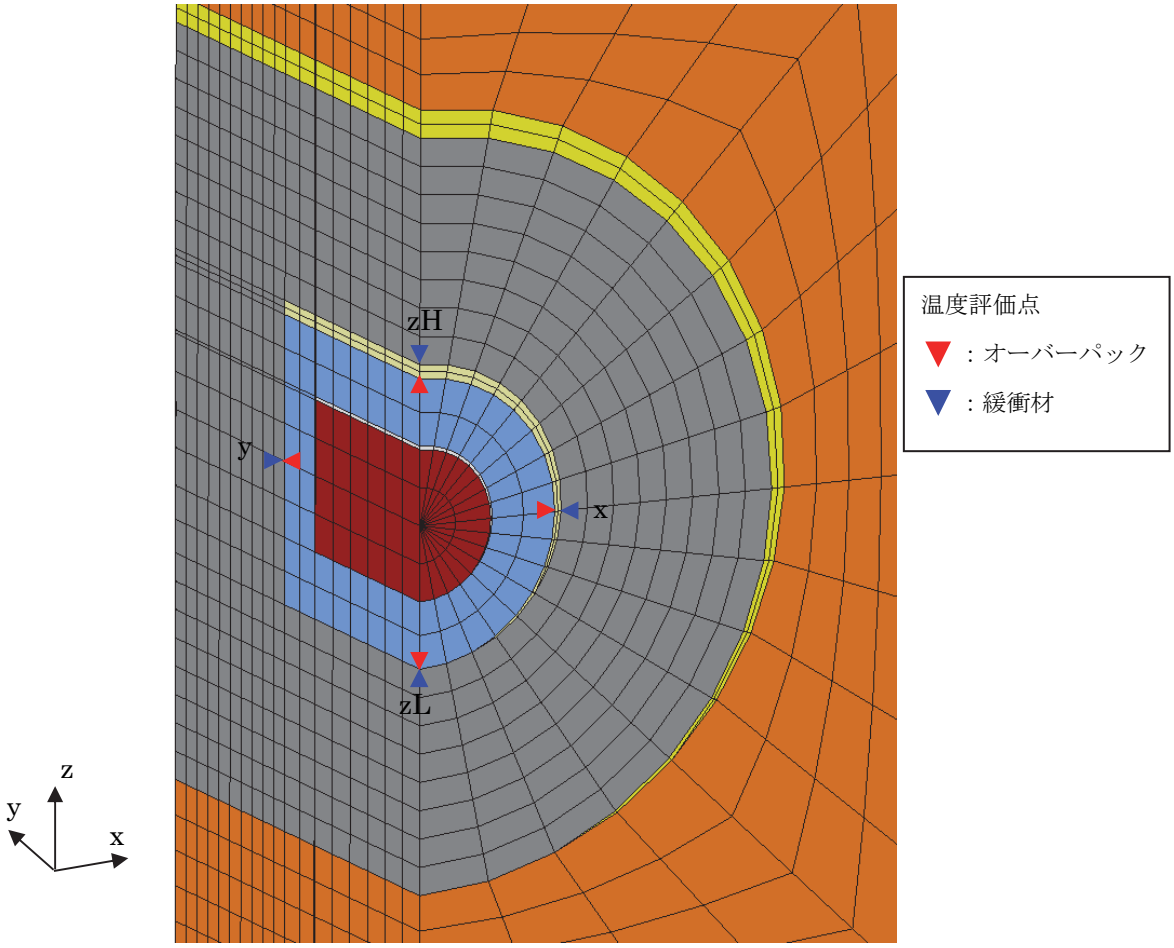


(b) 廃棄体近傍拡大図（温度評価点）

図 5.2.3-8　有限要素モデル（竪置き方式）

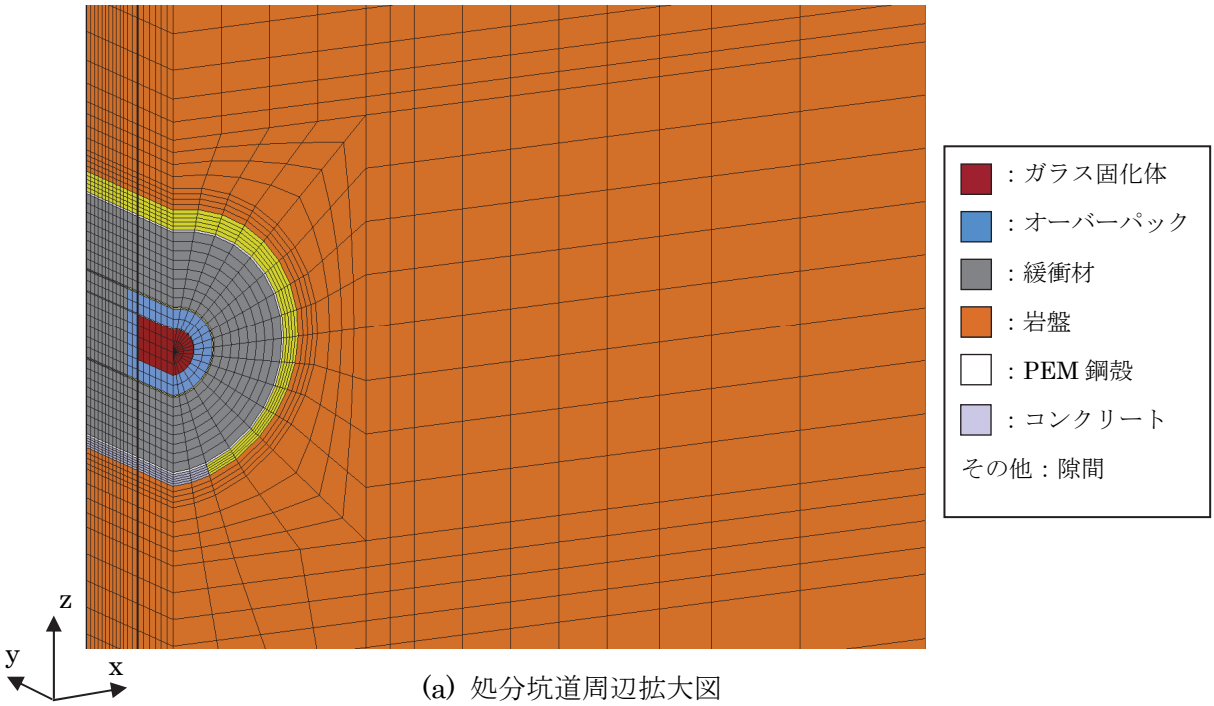


(a) 処分坑道周辺拡大図

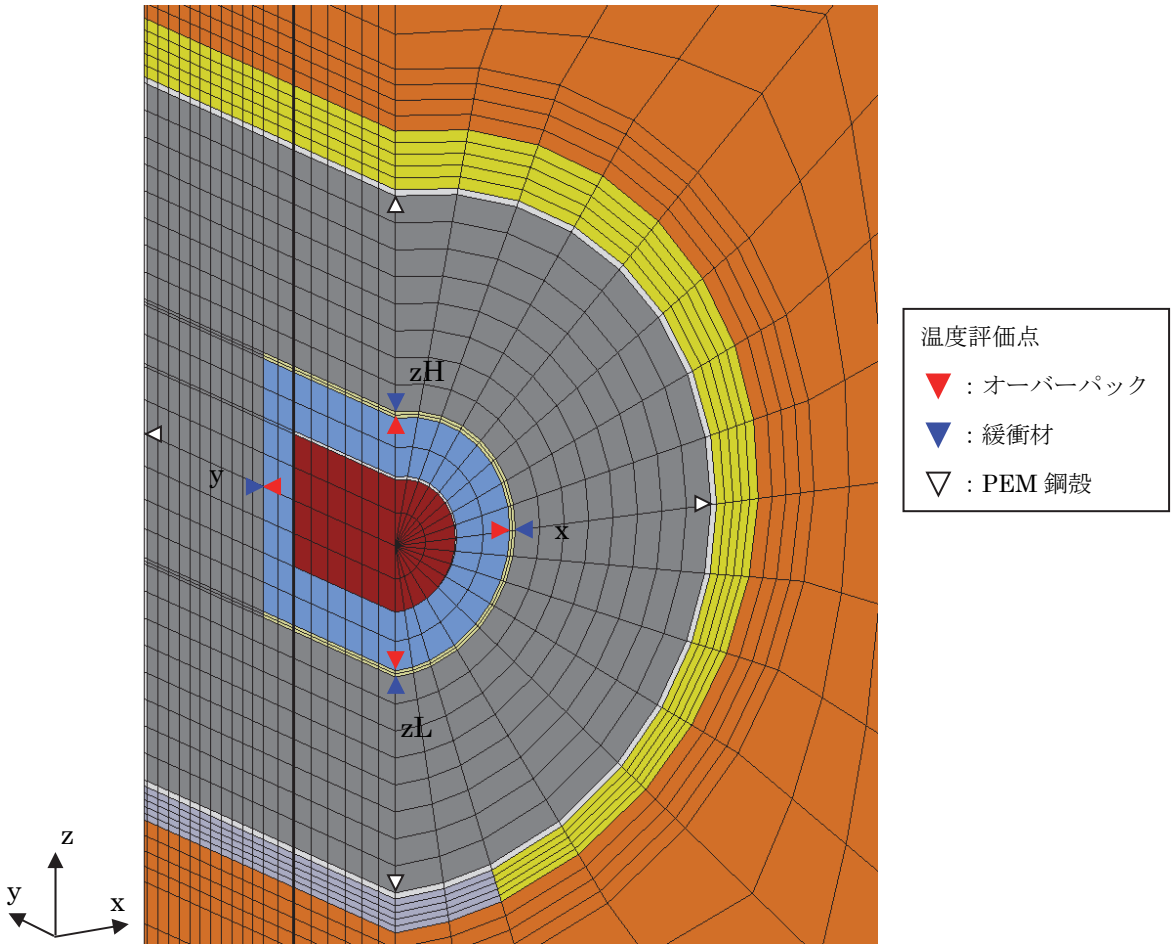


(b) 廃棄体周辺拡大図（温度評価点）

図 5.2.3-9　有限要素モデル（横置き方式）



(a) 処分坑道周辺拡大図



(b) 廃棄体周辺拡大図（温度評価点）

図 5.2.3-10　有限要素モデル（PEM 方式）

表 5.2.3-2　解析ケース（竪置き方式）

ケース	定置状態	隙間の状態			処分間隔		最高温度(℃)			備考
		ガラス固化体－オーバーパック	オーバーパック－緩衝材	緩衝材－岩盤	定置間隔(m)	坑道間隔(m)	評価点	オーバーパック表面	緩衝材	
v-1	①	有り（空気）	有り：OP　－岩盤（空　気）		4.44(2d)	10.0(2D)	x y z_L z_H	231.0 231.0 223.4 **233.2**	－ － **223.4** －	
v-2-1	②	〃	有り（空気）	有り（空気）	〃	〃	x y z_L z_H	**122.8** **122.8** 121.2 121.3	103.4 103.5 121.2 **121.3**	
v-2-2	②	〃	無し（粉末ベントナイト）	有り（空気）	〃	〃	x y z_L z_H	**112.8** **112.8** 111.7 111.8	108.2 108.2 111.7 **111.8**	
v-3（参考 1）	－	〃	有り（空気）	有り（空気）	〃	〃	x y z_L z_H	**120.4** **120.4** 118.9 118.8	101.2 101.2 **118.9** 118.8	第 2 次取りまとめ比較ケース：処分坑道埋戻し
（参考 2）	－	〃	無し（粉末ベントナイト）	無し（粉末ベントナイト）	〃	〃	Cxin Cxout Cyin Cyout	**101.8** － **101.7** －	－ 97.7 － **97.8**	第 2 次取りまとめより

D:処分坑道径（5m），d：処分孔径（2.22m）

表 5.2.3-3　解析ケース（横置き方式）

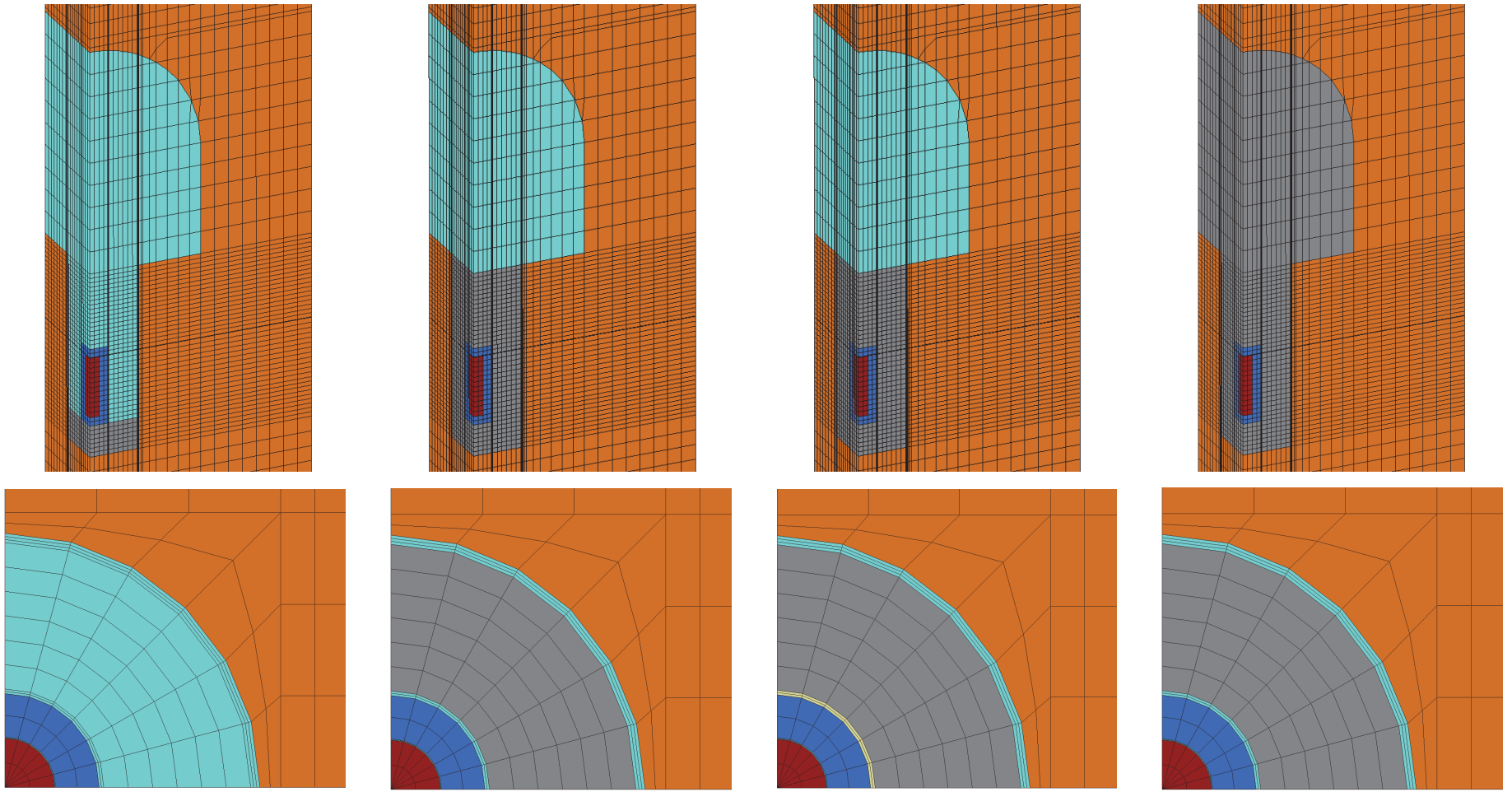
ケース	定置状態	隙間の状態			処分間隔		最高温度(℃)			備考
		ガラス固化体－オーバーパック	オーバーパック－緩衝材	緩衝材－岩盤	定置間隔(m)	坑道間隔(m)	評価点	オーバーパック表面	緩衝材	
h-1	①	有り（空気）	有り：OP　－岩盤（空　気）		3.13	13.32(6D)	x y zL zH	202.0 201.3 200.5 **202.4**	－ － **200.5** －	
h-2-1	②	〃	有り（空気）	有り（空気）	〃	〃	x y zL zH	**119.6** 118.3 **119.6** **119.6**	103.2 118.3 **119.6** 99.7	第 2 次取りまとめ比較ケース
h-2-2	②	〃	無し（粉末ベントナイト）	有り（空気）	〃	〃	x y zL zH	113.2 112.2 **113.4** 113.0	108.5 112.2 **113.4** 106.4	
（参考 1）	－	〃	無し（粉末ベントナイト）	無し（粉末ベントナイト）	〃	〃	Cxin Cxout Cyin Cyout	103.7 － 103.4 －	－ 99.5 － 96.7	第 2 次取りまとめより

D:処分坑道径（2.22m）

表 5.2.3-4　解析ケース（PEM 方式）

ケース	定置状態	隙間の状態			処分間隔		最高温度(℃)				備考
		ガラス固化体ーオーバーパック	オーバーパックー緩衝材	PEMー岩盤	定置間隔(m)	坑道間隔(m)	評価点	オーバーパック表面	緩衝材	PEM 鋼殻	
p-2	②	有り（空気）	無し（粒状ベントナイト）	有り（空気）	3.34	15.6(6D)	x y z_L z_H	117.8 116.5 **118.2** 117.5	114.9 **116.5** 114.3 115.1	94.8 94.0 83.6 **97.7**	
p-3（参考）	―	有り（空気）	無し（粒状ベントナイト）	無し（粒状ベントナイト）	〃	〃	x y z_L z_H	98.7 97.6 **99.2** 98.3	96.1 **97.6** 96.3 95.8	78.5 **79.3** 77.1 78.8	緩衝材温度制限確認ケース

D:処分坑道径（2.6m）



CASE v-1
（定置状態①）

CASE v-2-1
（定置状態②,OP-緩衝材隙間あり）

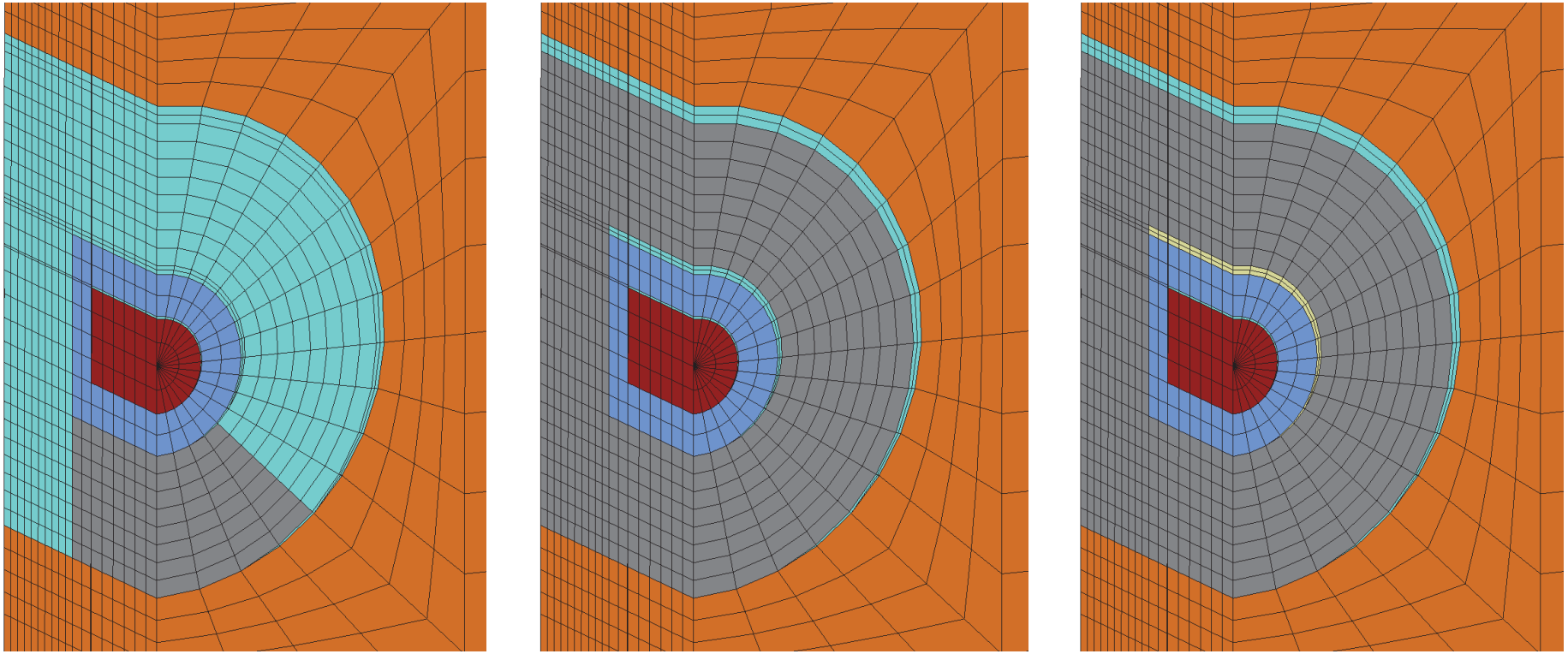
CASE v-2-2
（定置状態②,OP-緩衝材隙間充填）

CASE v-3
（参考ケース,OP-緩衝材隙間あり）

図 5.2.3-11　解析ケースごとの隙間の状態（竪置き方式）

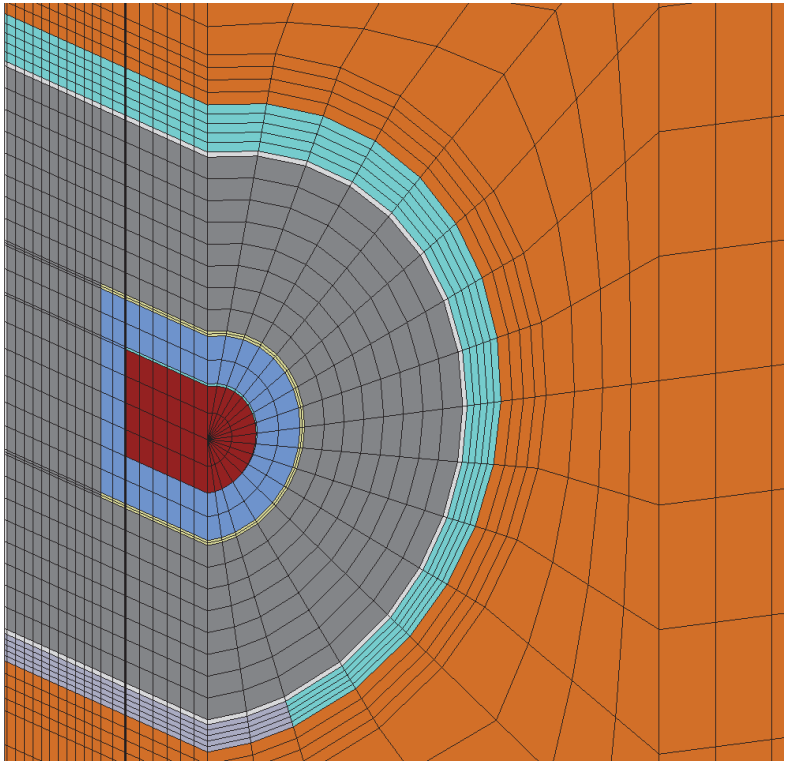
：空気

※下段の図は廃棄体中心部における水平断面図

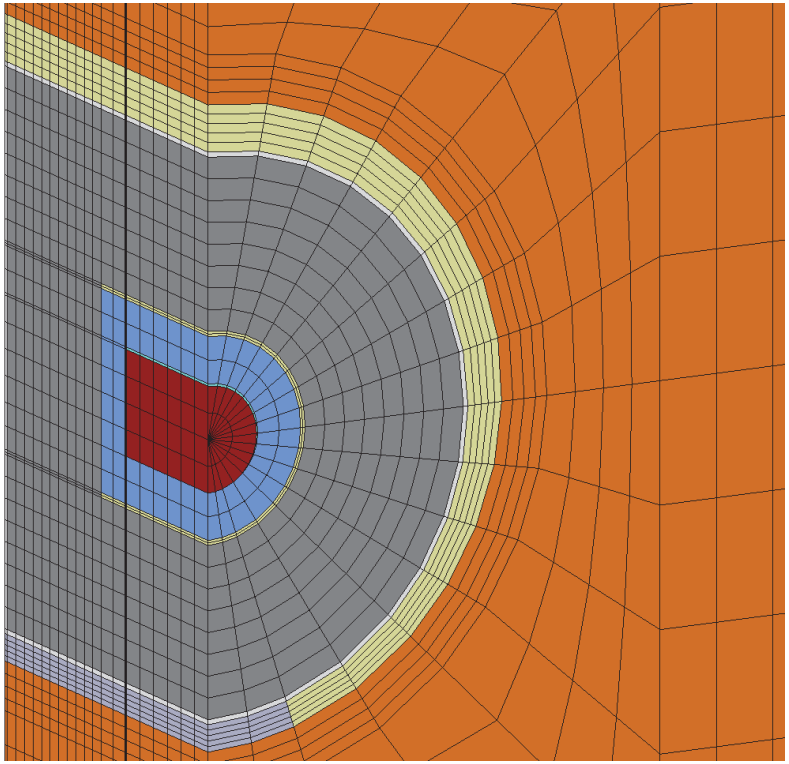


CASE h-1（定置状態①）　CASE h-2-1（定置状態②,OP-緩衝材隙間あり）　CASE h-2-2（定置状態②,OP-緩衝材隙間なし）

図 5.2.3-12　解析ケースごとの隙間の状態（横置き方式）



CASE p-2（定置状態 ②）



CASE p-3（参考ケース）

：空気

図 5.2.3-13　解析ケースごとの隙間の状態（PEM 方式）

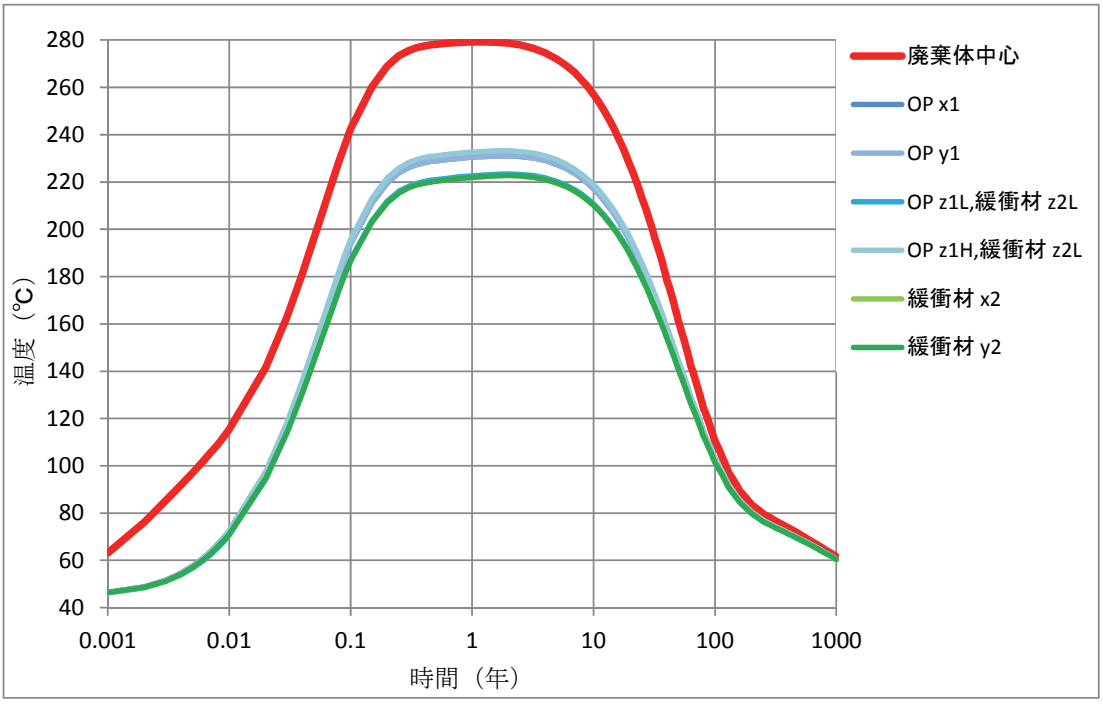


図 5.2.3-14　ケース v-1 の温度経時変化（図 5.2.3-8 参照）

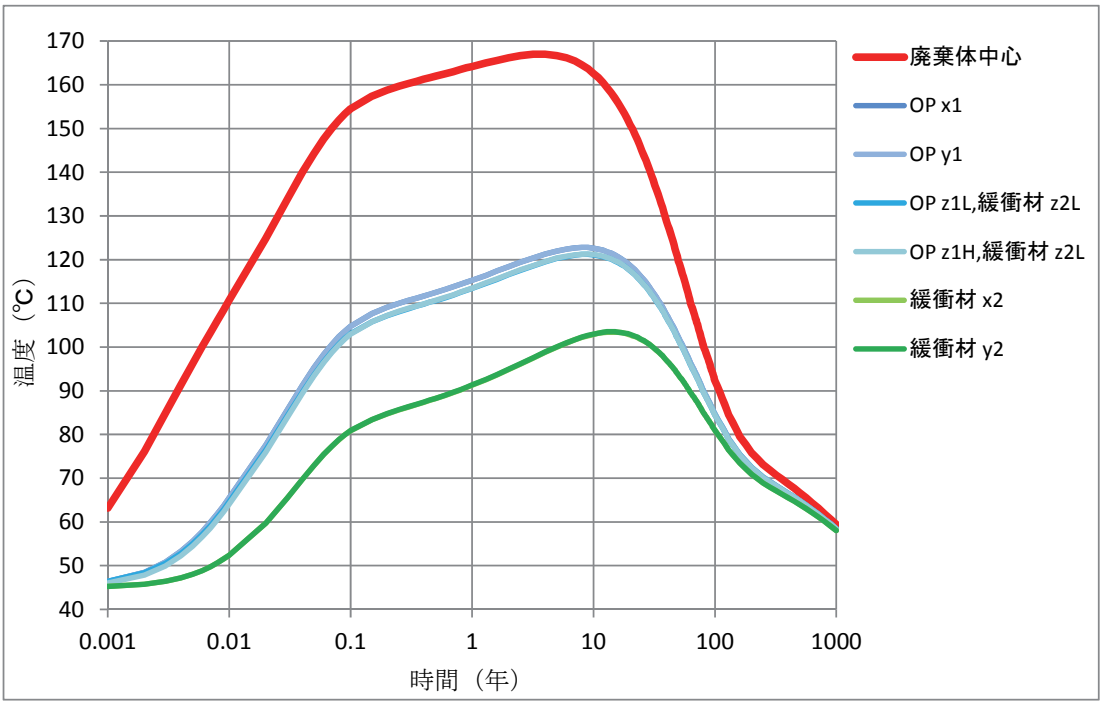


図 5.2.3-15　ケース v-2-1 の温度経時変化（図 5.2.3-8 参照）

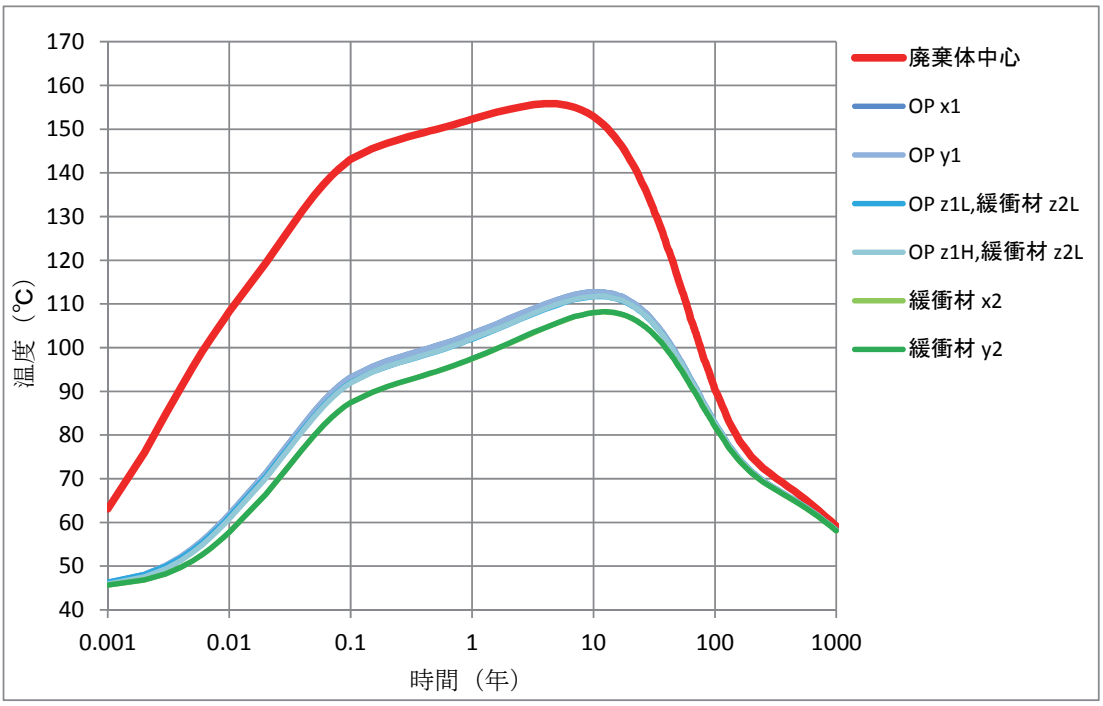


図 5.2.3-16　ケース v-2-2 の温度経時変化（図 5.2.3-8 参照）

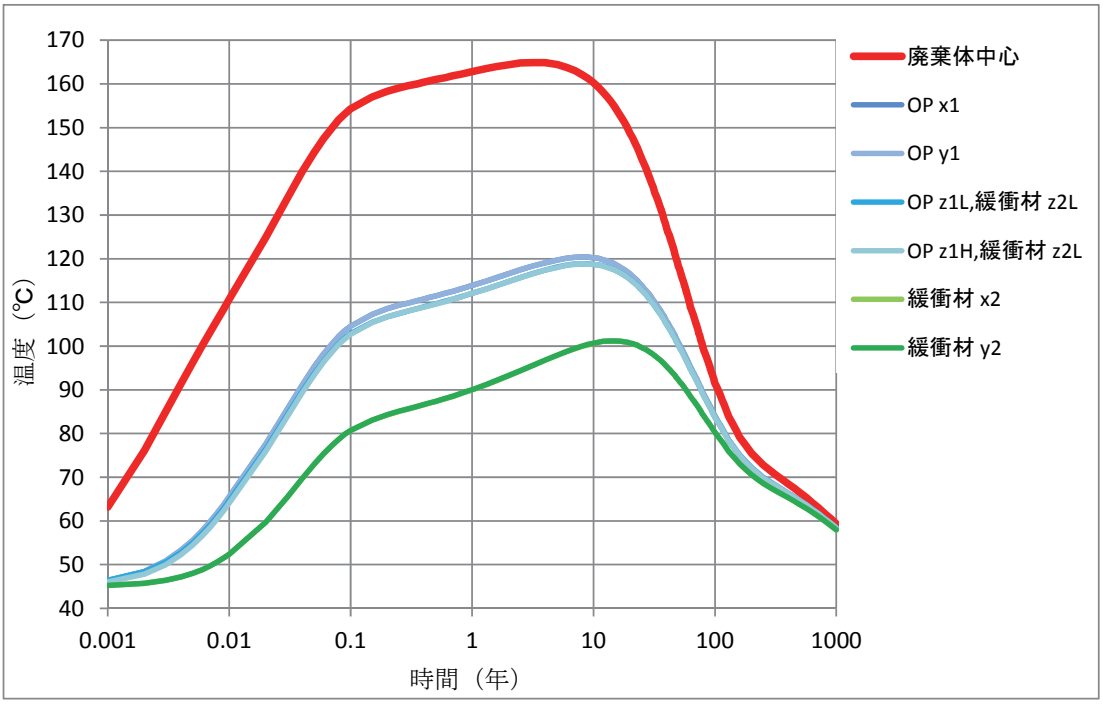


図 5.2.3-17　ケース v-3 の温度経時変化（図 5.2.3-8 参照）

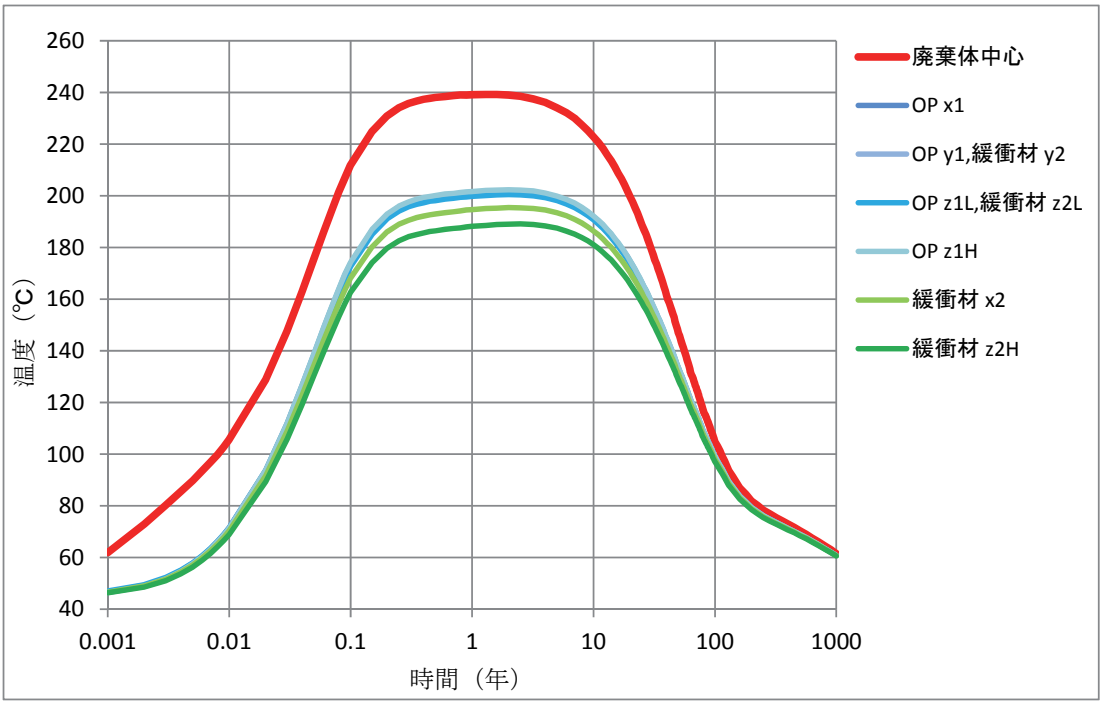


図 5.2.3-18　ケース h-1 の温度経時変化（図 5.2.3-9 図 5.2.3-8 参照）

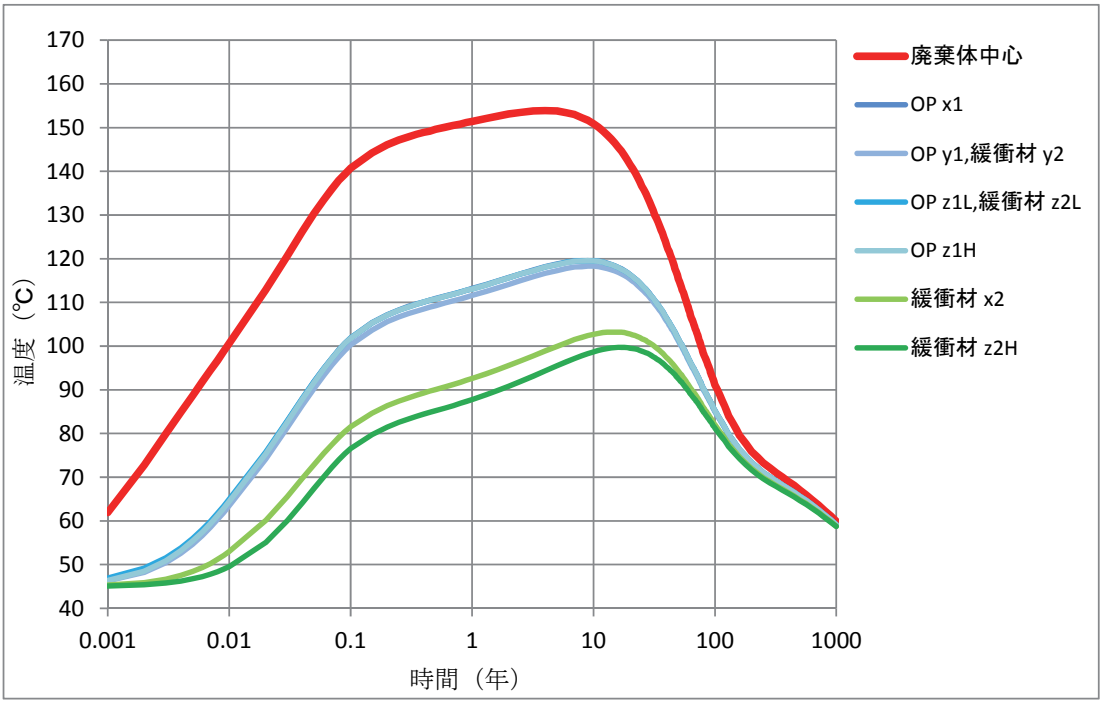


図 5.2.3-19　ケース h-2-1 の温度経時変化（図 5.2.3-9 参照）

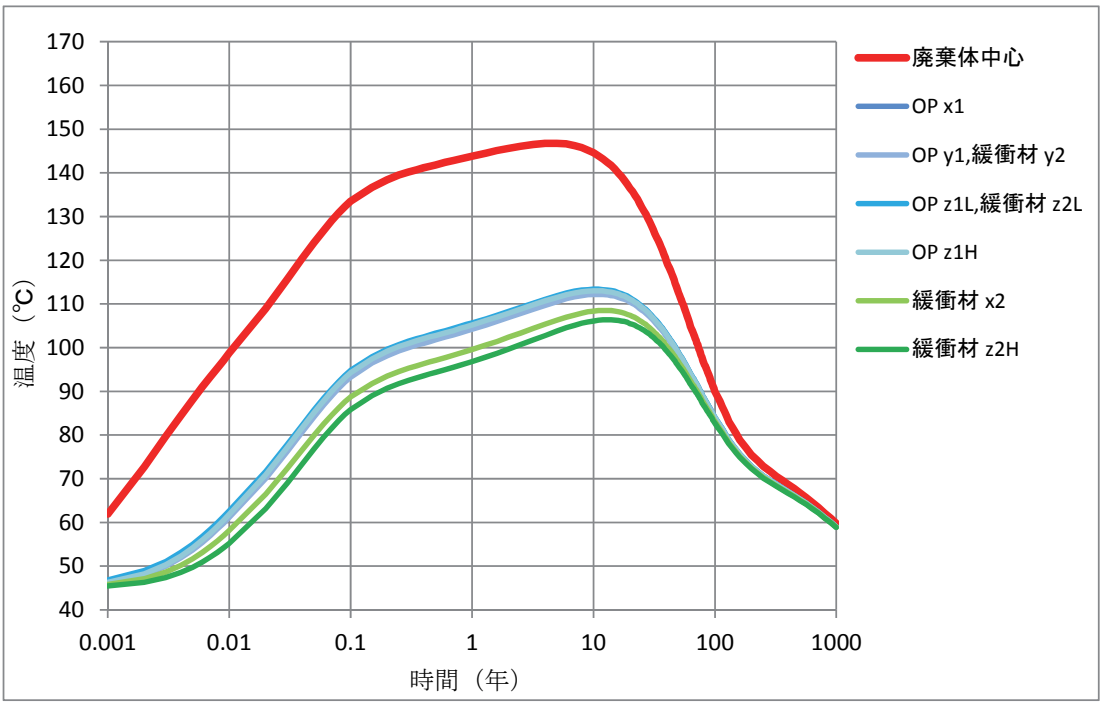


図 5.2.3-20　ケース h-2-2 の温度経時変化（図 5.2.3-9 参照）

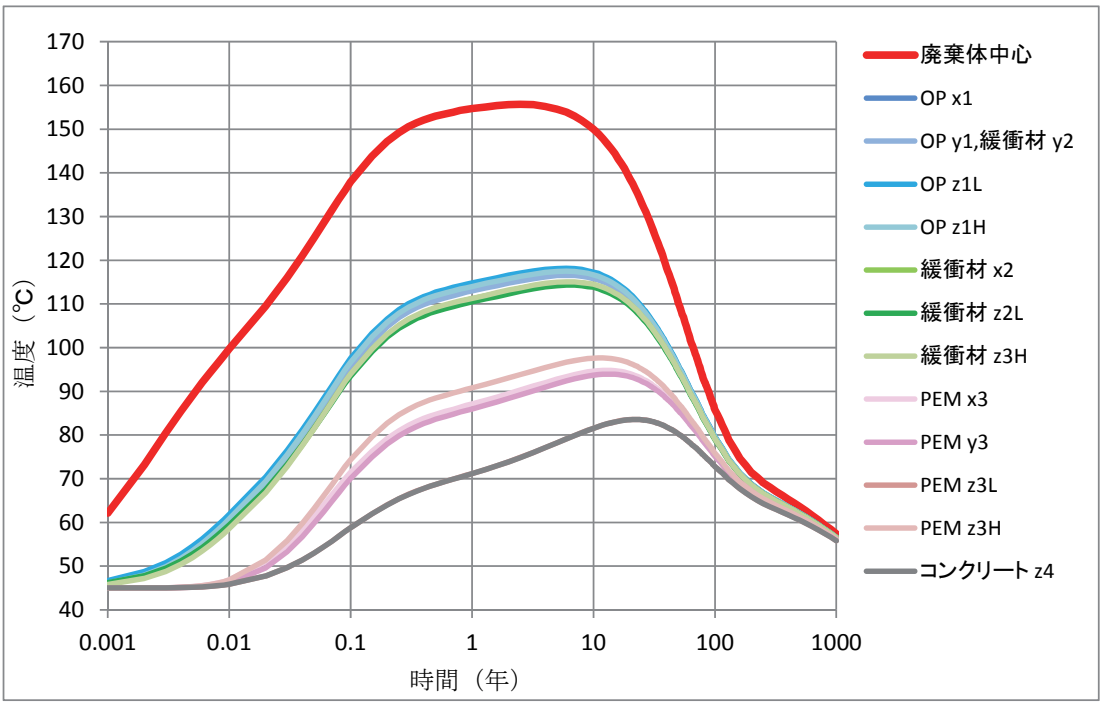


図 5.2.3-21　ケース p-2 の温度経時変化（図 5.2.3-10 参照）

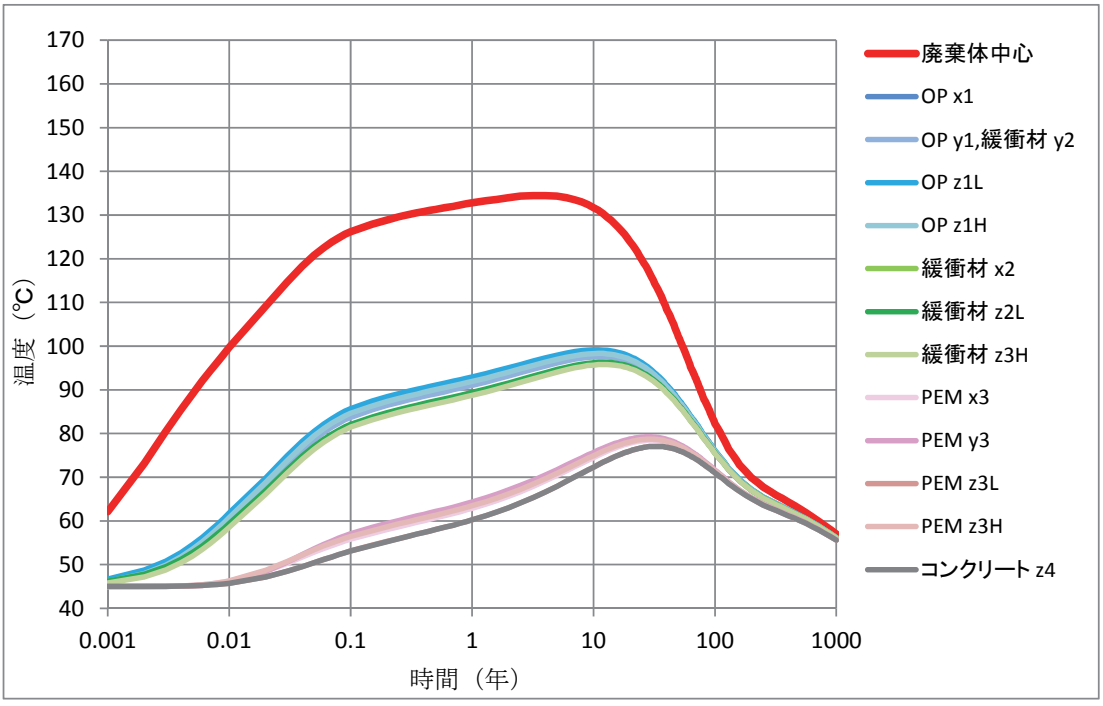


図 5.2.3-22　ケース p-3 の温度経時変化（図 5.2.3-10 参照）

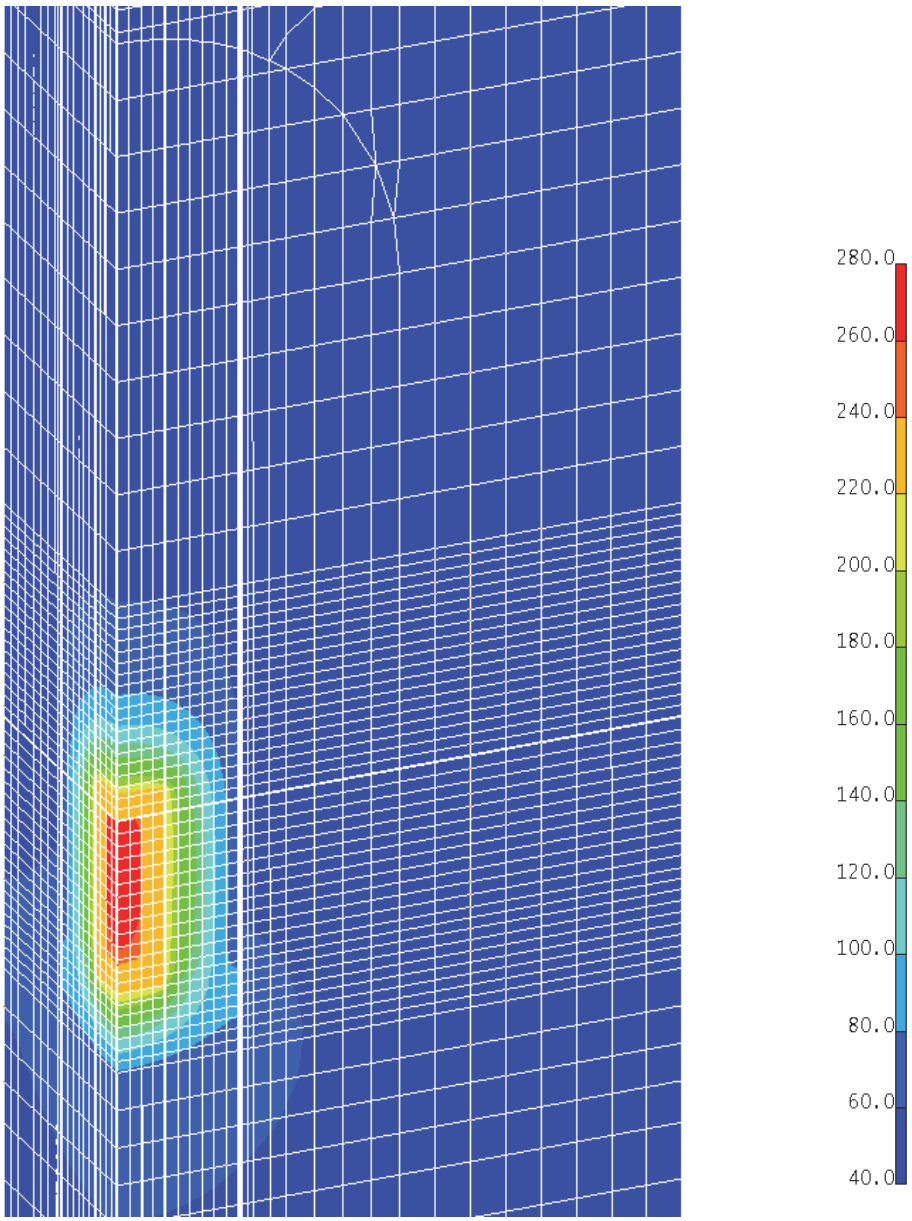


図 5.2.3-23　ケース v-1 の温度分布
（緩衝材最高温度 2 年後〔出力温度 2 年後〕，単位：℃）

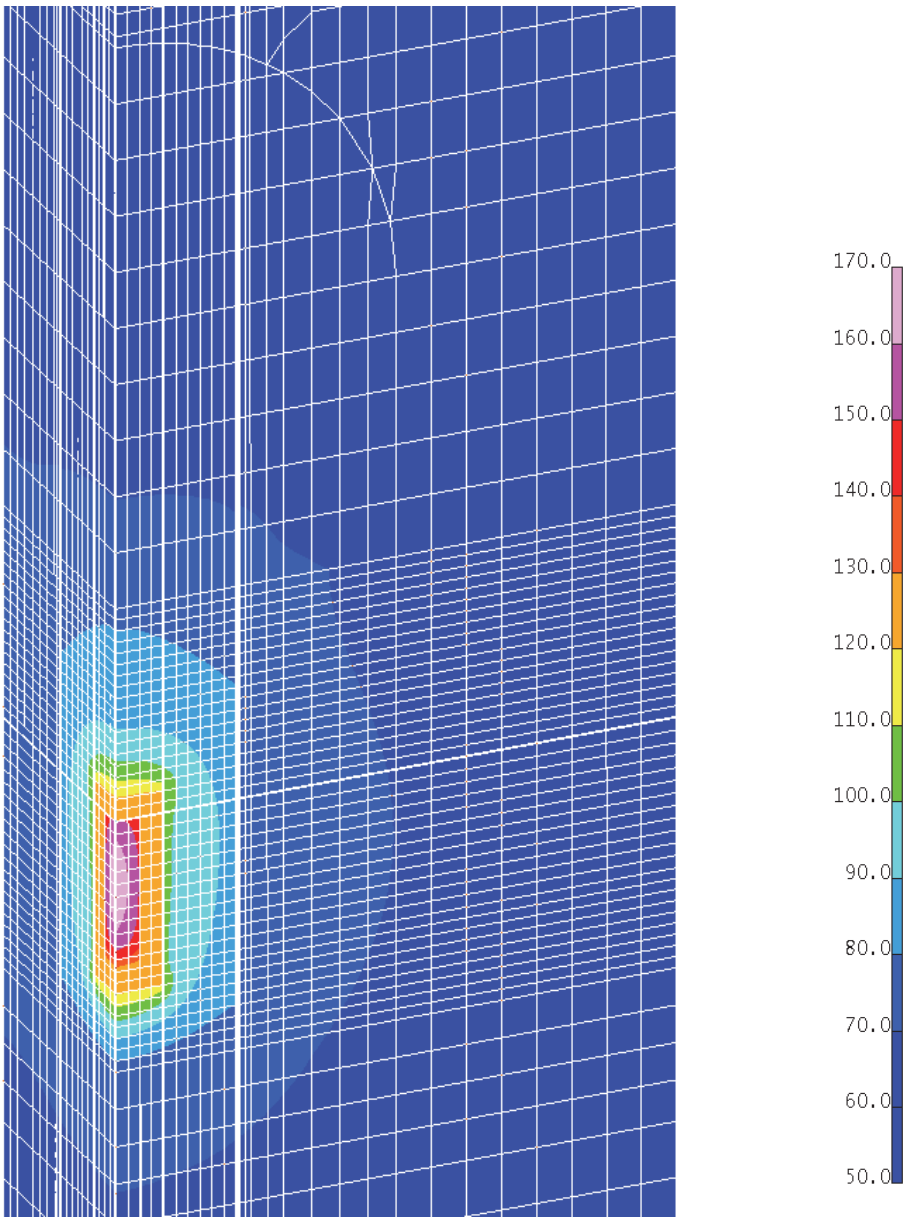


図 5.2.3-24　ケース v-2-1 の温度分布
（緩衝材最高温度 9 年後〔出力温度 8 年後〕，単位：℃）

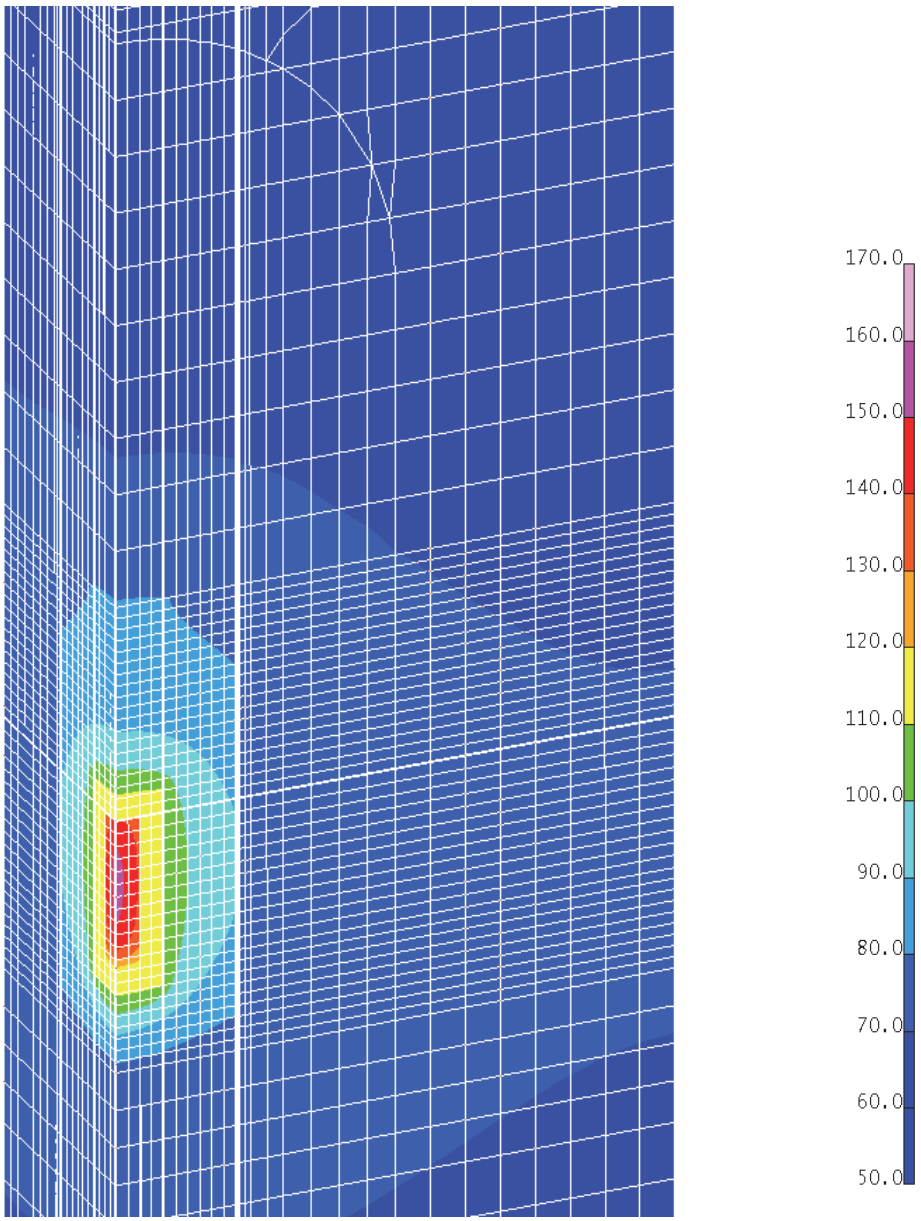


図 5.2.3-25　ケース v-2-2 の温度分布
（緩衝材最高温度 11 年後〔出力温度 10 年後〕，単位：℃）

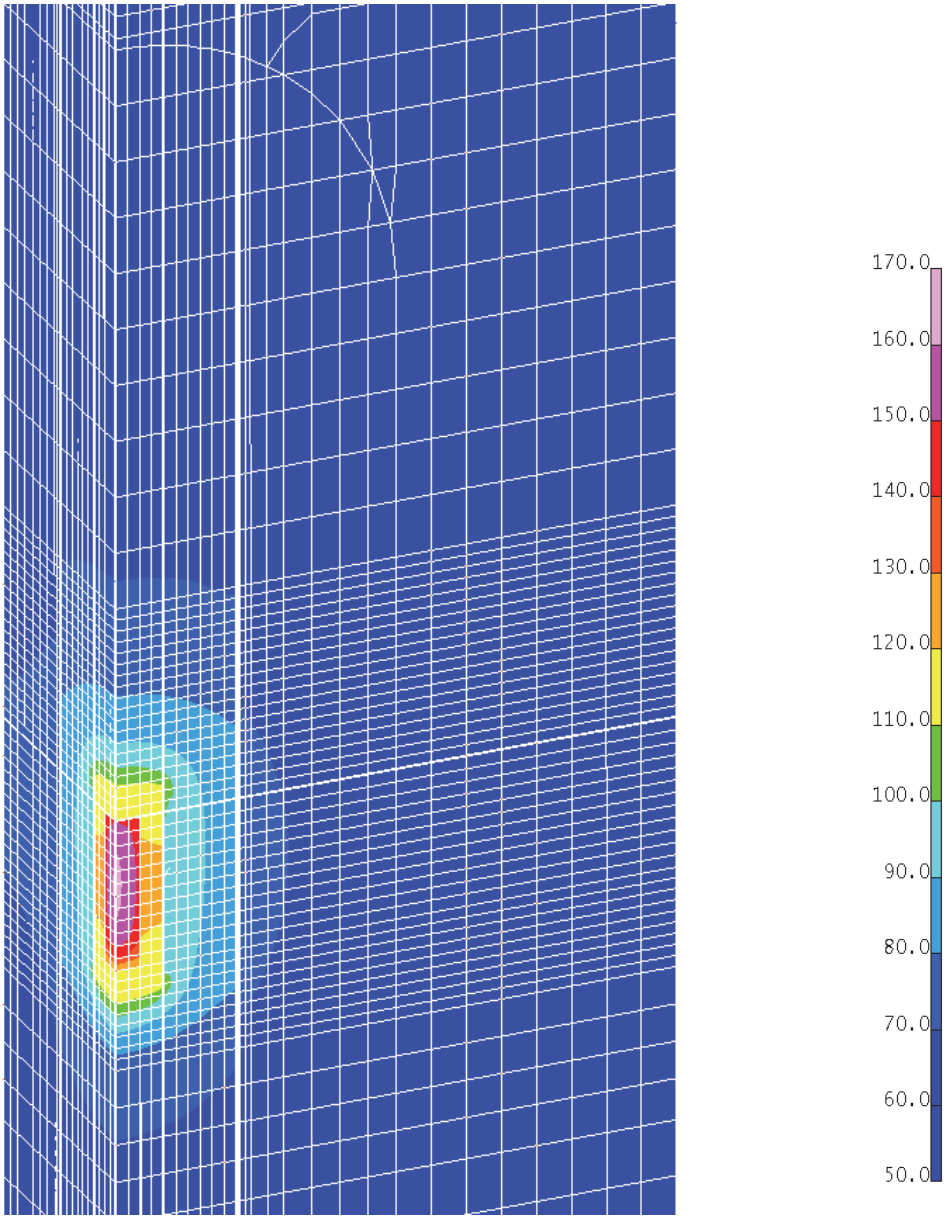


図 5.2.3-26　ケース v-3 の温度分布
（緩衝材最高温度 8 年後〔出力温度 8 年後〕，単位：℃）

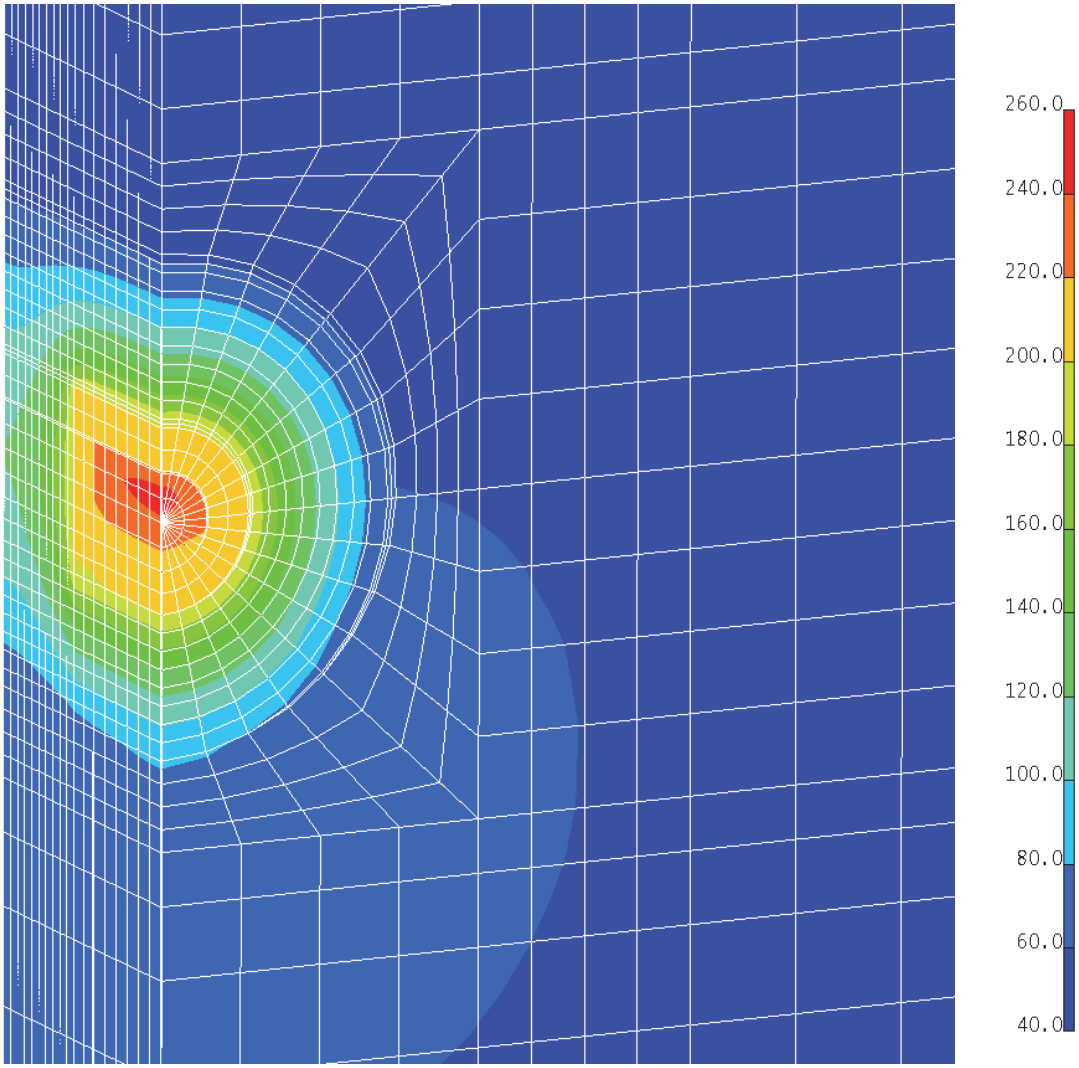


図 5.2.3-27　ケース h-1 の温度分布

（緩衝材最高温度 2 年後〔出力温度 2 年後〕，単位：℃）

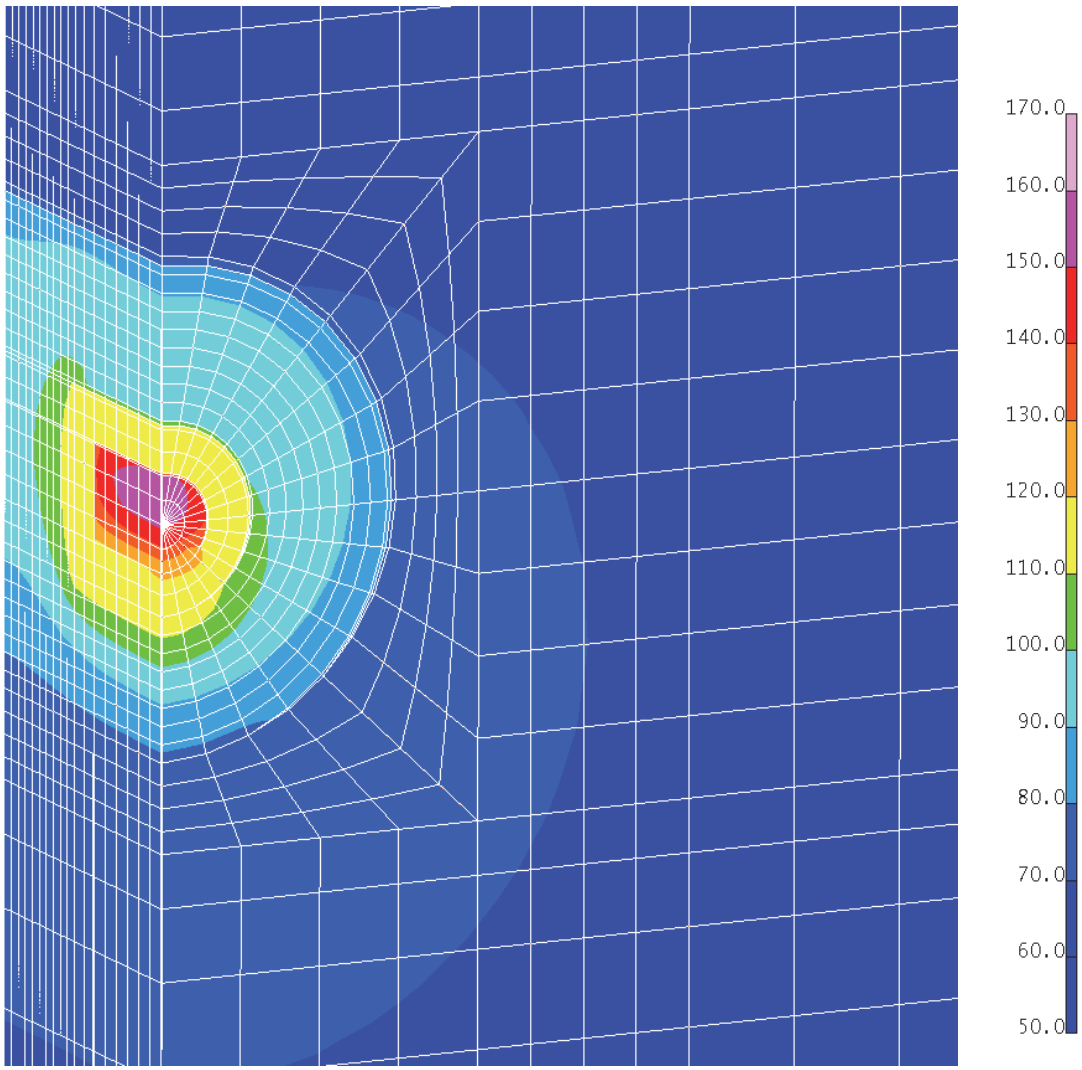


図 5.2.3-28　ケース h-2-1 の温度分布
（緩衝材最高温度 9 年後〔出力温度 8 年後〕，単位：℃）

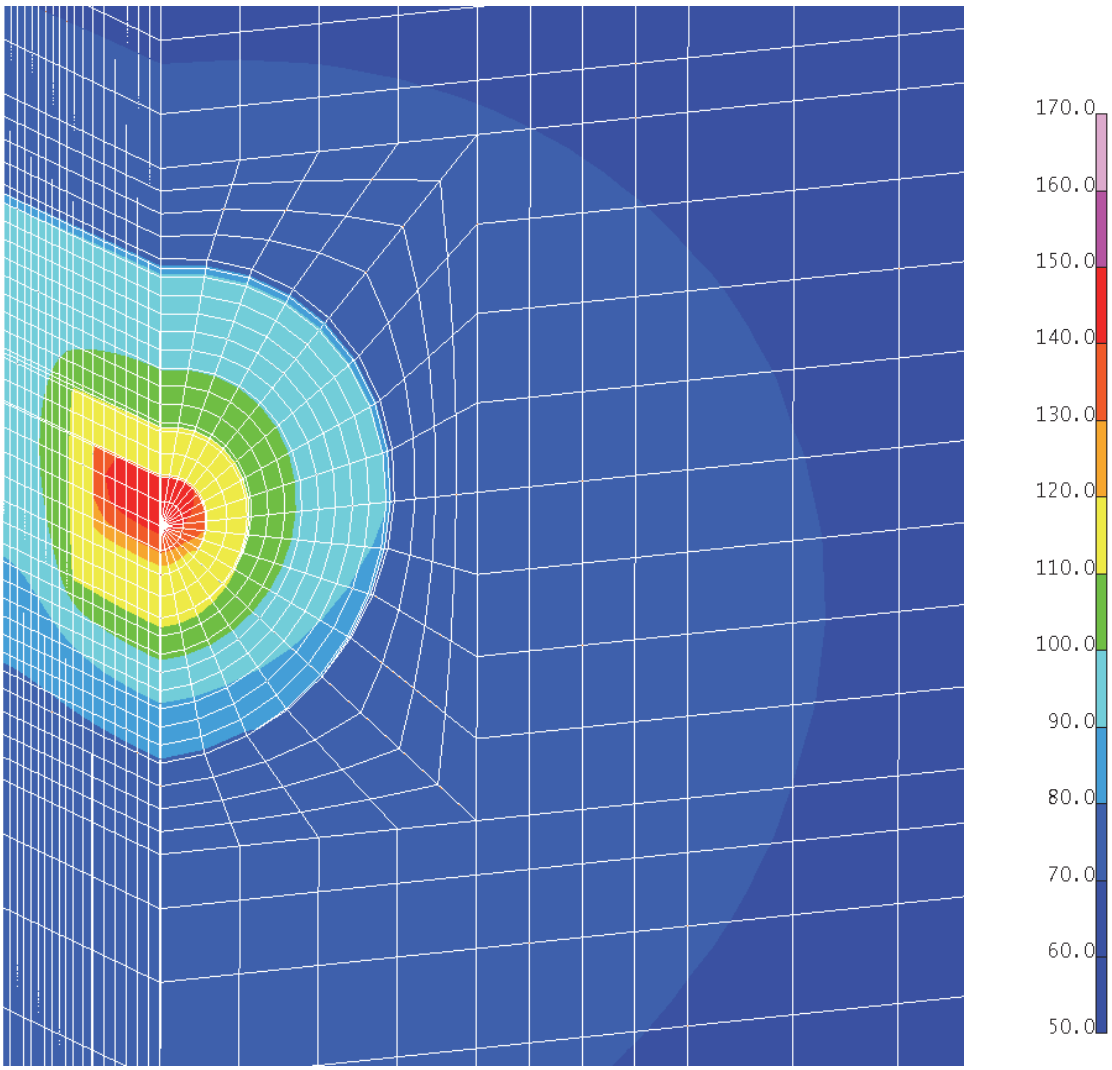


図 5.2.3-29　ケース h-2-2 の温度分布
（緩衝材最高温度 10 年後〔出力温度 10 年後〕，単位：℃）

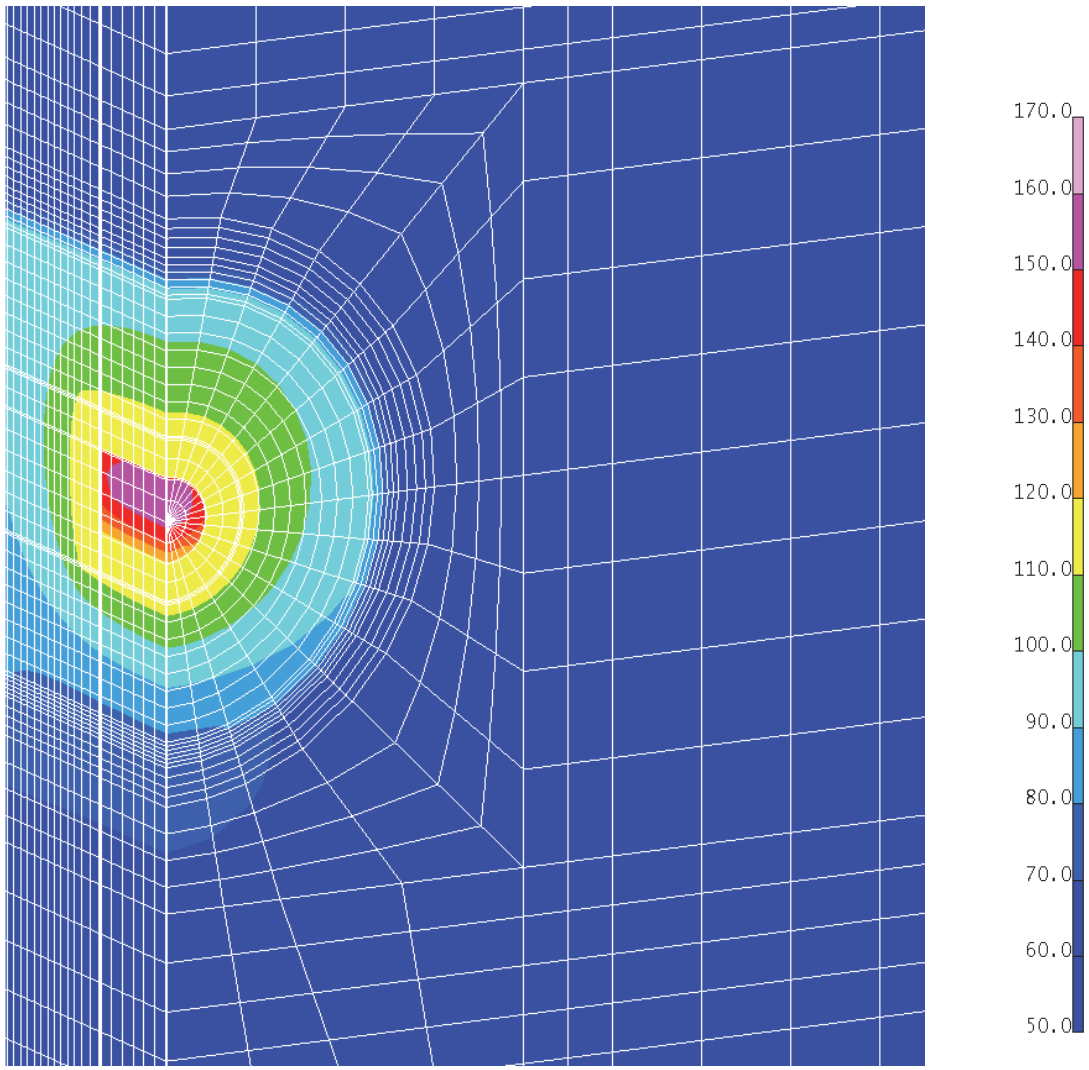


図 5.2.3-30　ケース p-2 の温度分布
（緩衝材最高温度 5 年後〔出力温度 5 年後〕，単位：℃）

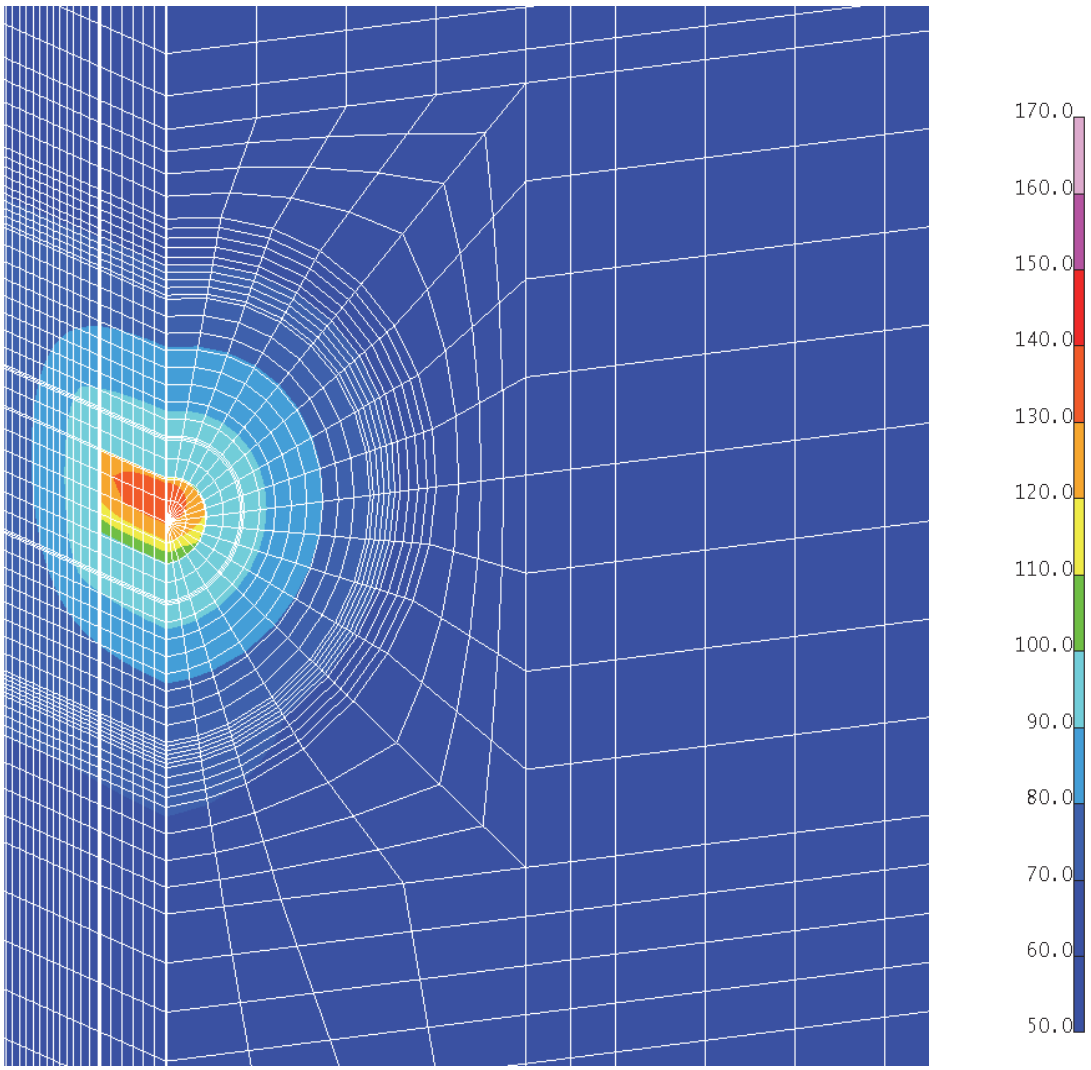


図 5.2.3-31　ケース p-3 の温度分布
（緩衝材最高温度 11 年後〔出力温度 10 年後〕，単位：℃）

d. 解析結果の評価

(a) 評価点の最高温度

定置状態①では、竪置き方式のケース v-1、横置き方式のケース h-1 ともにオーバーパック表面および緩衝材の評価点における最高温度は 200℃以上に上昇する結果となった。ただし、ここでは熱伝導のみを考慮した解析を実施しており、実現象としては、空気の対流熱伝達やふく射伝熱による熱移動の効果もあるため、本解析結果ほど温度は上昇しないことが考えられる。それらの効果を把握する場合には、対流熱伝達およびふく射伝熱を考慮することが必要となる。

定置状態②では、オーバーパックと緩衝材の隙間を空気とした場合、竪置き方式のケース v-2-1、横置き方式のケース h-2-1 ともにオーバーパック表面および緩衝材の評価点における最高温度は 120℃以上もしくはその近くまで上昇する結果となった。第 2

次取りまとめとの比較について、詳細は次項で述べるが、横置き方式のケース h-2-1 の評価点における温度は第 2 次取りまとめと概ね一致する結果となった。また、竪置き方式で処分坑道を埋め戻した状態を設定し、第 2 次取りまとめと同じ解析条件とした参考ケース v-3 についても、第 2 次取りまとめと概ね一致する結果となった。ここでケース v-2-1 とケース v-3 との結果（処分孔の隙間が充填されていない場合）を比較すると、処分坑道を埋め戻さないことによる緩衝材最高温度の上昇分は 2.4℃となり、処分坑道の埋め戻し状態が緩衝材の最高温度に大きな影響を与えない結果となった。

定置状態②においてオーバーパックと緩衝材の隙間を粉末ベントナイトで充填した場合においても、竪置き方式のケース v-2-2、横置き方式のケース h-2-2 ともにオーバーパック表面および緩衝材の評価点における最高温度は 110℃以上に上昇する結果となった。ただし、オーバーパックと緩衝材の隙間を粉末ベントナイトで充填した効果については、充填しない場合と比較して竪置き方式のケース v-2-2 で約 10℃、横置き方式のケース h-2-2 では約 6℃低くなる結果となり、有効性が認められる結果となった。PEM 方式のケース p-2 についても緩衝材の最高温度は 116℃以上に上昇する結果となった。なお、PEM 方式において本解析で設定した坑道離間距離の妥当性について、従来どおり処分坑道を埋め戻した場合を想定したケース p-3 では緩衝材の最高温度が 100℃以下となることを確認した。

定置状態②ではいずれの定置方式においても、またオーバーパックと緩衝材の隙間の状態にかかわらず、最高温度が 100℃を上回る結果となった。第 2 次取りまとめにおいても、隙間の状態を空気、水、粉末ベントナイトにより充填した場合の検討がなされており、いずれの場合でも 100℃前後となる結果が示されている。その結果に対して第 2 次取りまとめでは、解析で空気のふく射や滞流の熱伝達の影響を考慮していないこと、定置後の緩衝材中への地下水の浸潤による熱伝導性の向上や緩衝材の膨潤による隙間が閉塞されることを考慮し、隙間が緩衝材の温度に及ぼす影響は小さいとしている。

(b) 第 2 次取りまとめとの比較による検証と解析結果の取り扱いについて

解析結果の評価にあたり、本解析と第 2 次取りまとめの解析結果について比較を行った。両者の対応する評価点と最高温度をまとめたものを表 5.2.3-5 および表 5.2.3-6 に示す。これらの結果から、本解析および第 2 次取りまとめの各評価点における最高温度および分布の傾向は概ね一致することが確認できた。ただし、本検討の解析結果の方がオーバーパック表面で 2.5～2.8℃、緩衝材では 0.6～2.8℃ほど高くなる結果となっており、これは解析メッシュの違いによるものと考えられる。有限要素法では解析メッシュが細かいほど解析精度は向上する。特に、本検討においては、熱伝導率が比較的低い緩衝材等の材料部分のメッシュ分割の細かさが解析精度に影響を与えると考えられる。解析結果の取り扱いにあたっては、このように解析メッシュの違いによって解析結果にある程度の誤差が生じることを考慮した上で、評価を実施する必要がある。

表 5.2.3-5　第 2 次取りまとめ解析結果との比較（竪置き方式）

ケース	解析結果　最高温度（上段：評価点、下段：温度））							
	オーバーパック表面				緩衝材			
v-3	x1	y1	z1L	z1H	x2	y2	z2L	z2H
	120.4	120.4	118.9	118.8	101.2	101.2	118.9	118.8
第 2 次取りまとめ	Cxin	Cyin	Cz1	Cz2	Cxout	Cyout	Cz1	Cz2
	117.9	117.9	116.3	116.3	100.2	100.2	116.3	116.3
差分	2.5	2.5	2.6	2.5	1.0	1.0	2.6	2.5

表 5.2.3-6　第 2 次取りまとめ解析結果との比較（横置き方式）

ケース	解析結果　最高温度（上段：評価点、下段：温度））							
	オーバーパック表面				緩衝材			
h-2-1	x1	y1	z1L	z1H	x2	y2	z2L	z2H
	119.6	118.3	119.6	119.6	103.2	118.3	119.6	99.7
第 2 次取りまとめ	Cxin	Cy	Cz1	Czin2	Cxout	Cy	Cz1	Czout2
	117.1	115.5	116.9	117	101.7	115.5	116.9	99.1
差	2.5	2.8	2.7	2.6	1.5	2.8	2.7	0.6

2) 高い温度の期間の抽出

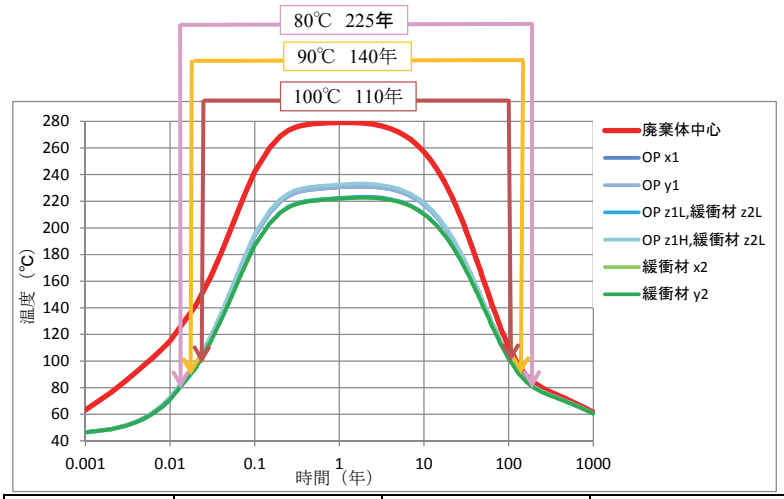
温度解析結果の経時変化から、オーバーパックおよび PEM 容器の腐食や緩衝材の温度による変質を評価するための高い温度の期間を抽出した。抽出した期間は、評価のための目安とした。

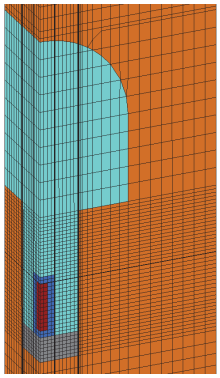
抽出する期間としては、オーバーパックおよび PEM 容器の表面温度が 80℃を超える期間、90℃を超える期間、100℃を超える期間とし、抽出点としては、オーバーパックおよび PEM 容器の表面温度の最高温度地点（解析結果と同様の地点）とした。以降に各ケースにおける抽出結果を示す。

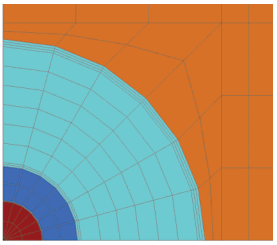
a. 竪置き方式での温度解析結果

(a) ケース v-1（オーバーパック）

図 5.2.3-32 にケース v-1 における結果を示す。各温度において、その温度を超える期間が長いセルを黄色で示した。





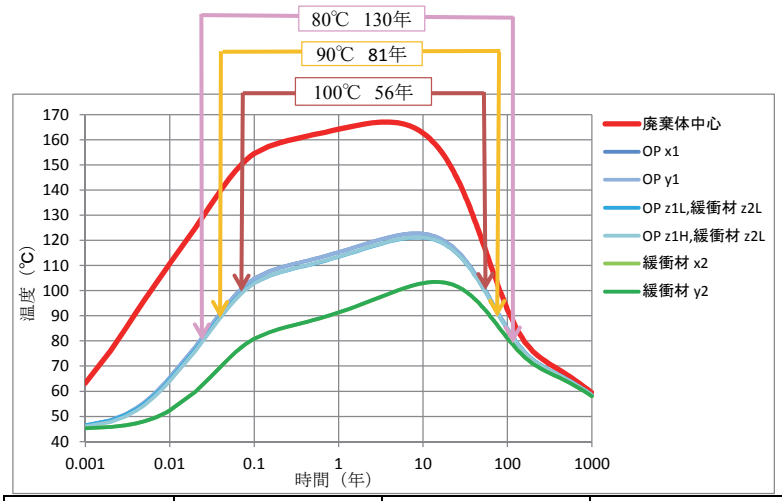


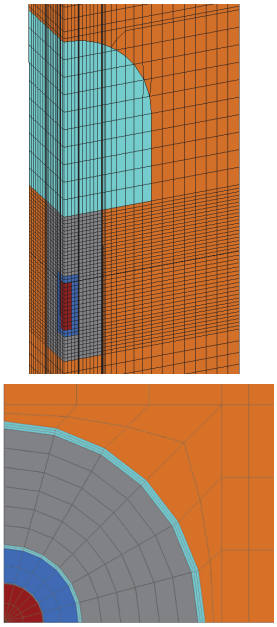
	80℃	90℃	100℃
OPX	225 年	140 年	110 年
OPY	225 年	140 年	110 年
OPZL	200 年	140 年	105 年
OPZH	225 年	140 年	110 年

図 5.2.3-32　ケース v-1 における期間の抽出結果

(b) ケース v-2-1（オーバーパック）

図 5.2.3-33 にケース v-2-1 における結果を示す。各温度において、その温度を超える期間が長いセルを黄色で示した。



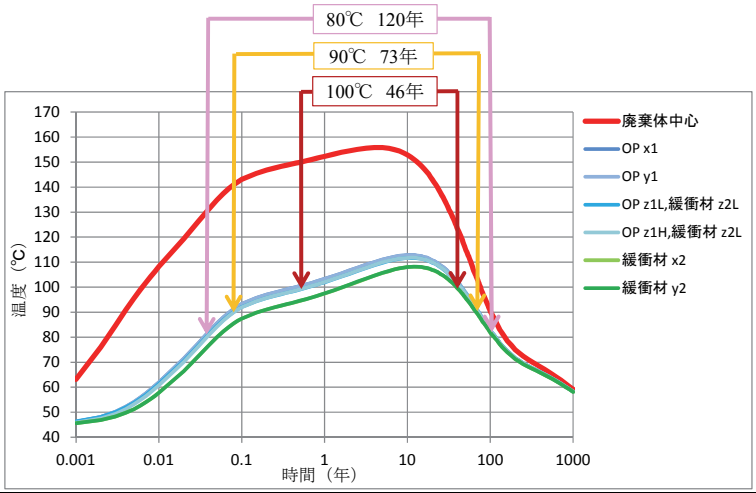


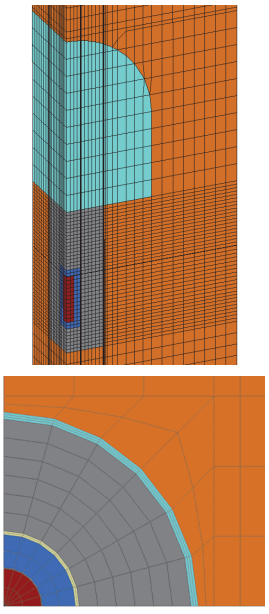
	80℃	90℃	100℃
OPX	130 年	81 年	56 年
OPY	130 年	81 年	56 年
OPZL	125 年	80 年	54 年
OPZH	125 年	80 年	54 年

図 5.2.3-33　ケース v-2-1 における期間の抽出結果

(c) ケース v-2-2（オーバーパック）

図 5.2.3-34 にケース v-2-2 における結果を示す。各温度において、その温度を超える期間が長いセルを黄色で示した。



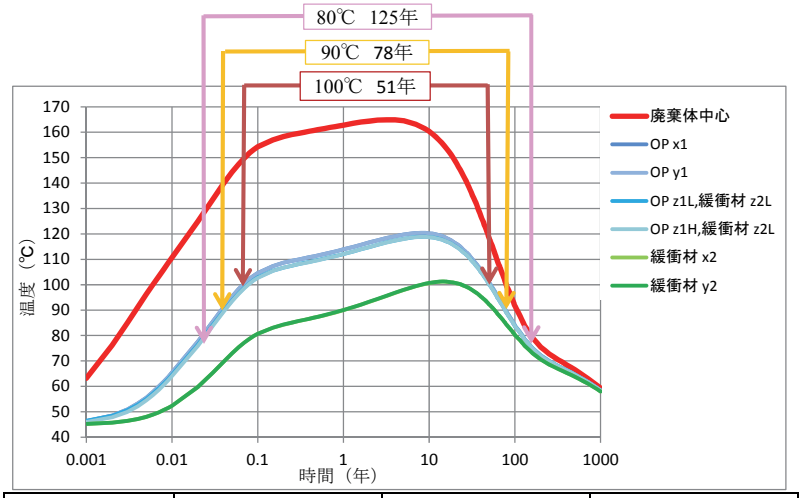


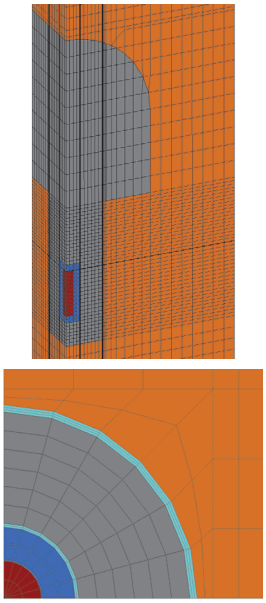
	80℃	90℃	100℃
OPX	120 年	73 年	46 年
OPY	120 年	73 年	46 年
OPZL	120 年	72 年	45 年
OPZH	120 年	72 年	45 年

図 5.2.3-34　ケース v-2-2 における期間の抽出結果

(d) ケース v-3（オーバーパック）

図 5.2.3-35 にケース v-3 における結果を示す。各温度において、その温度を超える期間が長いセルを黄色で示した。





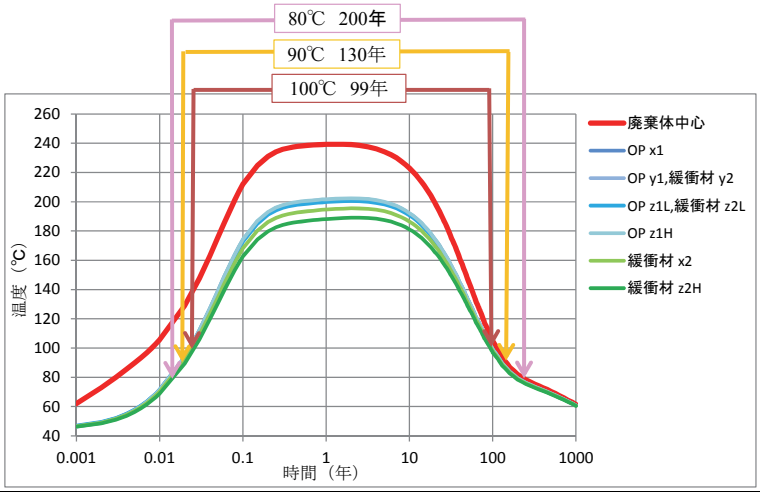
	80℃	90℃	100℃
OPX	125 年	78 年	52 年
OPY	125 年	78 年	52 年
OPZL	125 年	77 年	51 年
OPZH	125 年	77 年	51 年

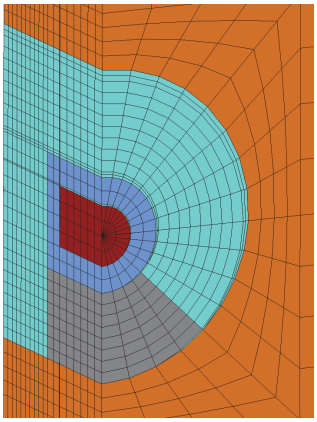
図 5.2.3-35　ケース v-3 における期間の抽出結果

b. 横置き方式での温度解析結果

(a) ケース h-1（オーバーパック）

図 5.2.3-36 にケース h-1 における結果を示す。各温度において、その温度を超える期間が長いセルを黄色で示した。



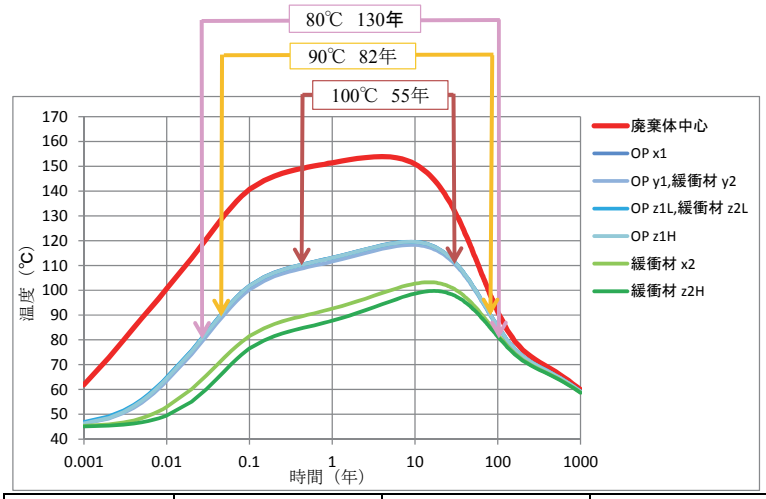


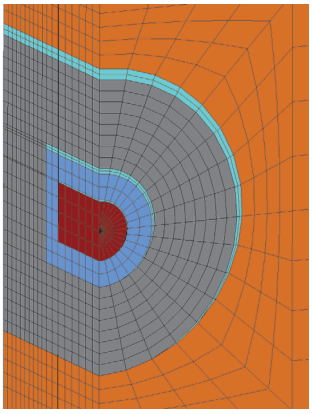
	80℃	90℃	100℃
OPX	200 年	130 年	99 年
OPY	200 年	130 年	98 年
OPZL	200 年	130 年	98 年
OPZH	200 年	130 年	99 年

図 5.2.3-36　ケース h-1 における期間の抽出結果

(b) ケース h-2-1（オーバーパック）

図 5.2.3-37 にケース h-2-1 における結果を示す。各温度において、その温度を超える期間が長いセルを黄色で示した。



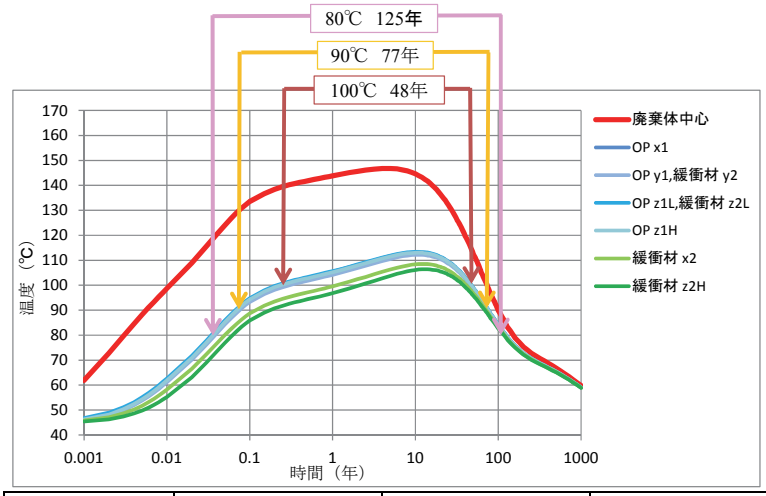


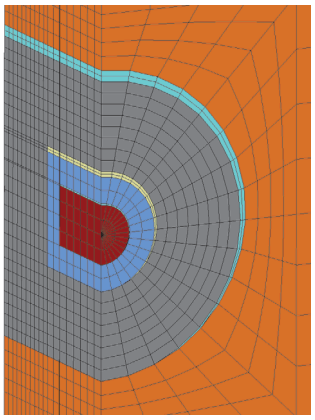
	80℃	90℃	100℃
OPX	130 年	82 年	55 年
OPY	130 年	81 年	53 年
OPZL	130 年	82 年	55 年
OPZH	130 年	82 年	55 年

図 5.2.3-37　ケース h-2-1 における期間の抽出結果

(c) ケース h-2-2（オーバーパック）

図 5.2.3-38 にケース h-2-1 における結果を示す。各温度において、その温度を超える期間が長いセルを黄色で示した。





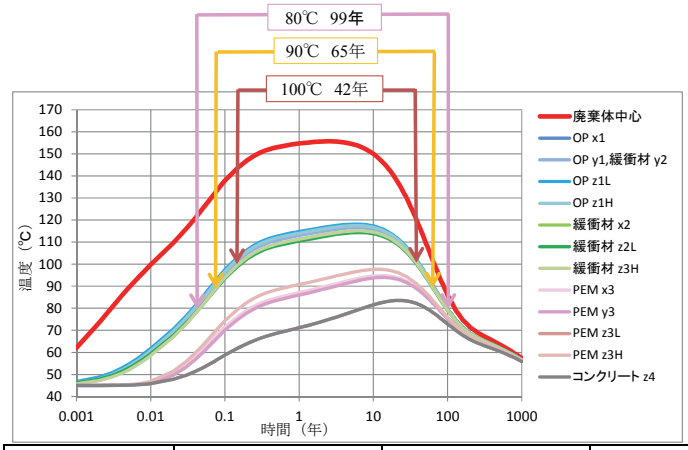
	80℃	90℃	100℃
OPX	125 年	77 年	48 年
OPY	125 年	76 年	47 年
OPZL	125 年	77 年	48 年
OPZH	125 年	77 年	48 年

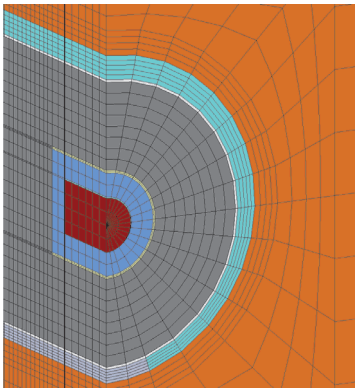
図 5.2.3-38　ケース h-2-2 における期間の抽出結果

c. PEM 方式での温度解析結果

(a) ケース p-2（オーバーパック）

図 5.2.3-39 にケース p-2（オーバーパック）における結果を示す。各温度において、その温度を超える期間が長いセルを黄色で示した。



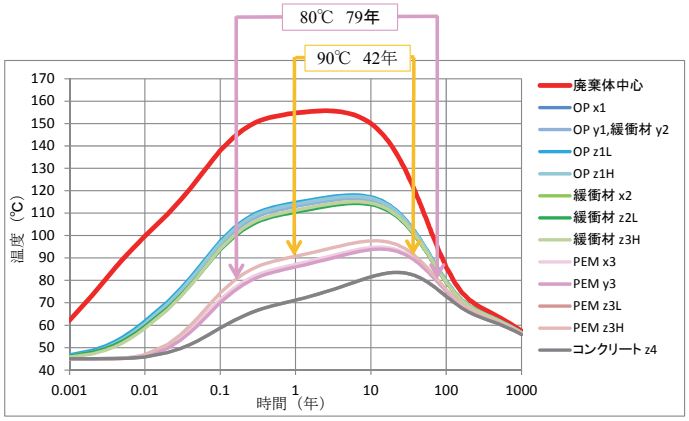


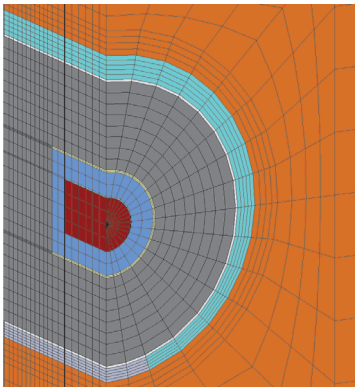
	80℃	90℃	100℃
OPX	99 年	64 年	42 年
OPY	98 年	63 年	41 年
OPZL	99 年	65 年	42 年
OPZH	98 年	64 年	42 年

図 5.2.3-39　ケース p-2（オーバーパック）における期間の抽出結果

(b) ケース p-2（PEM 容器）

図 5.2.3-40 にケース p-2（PEM 容器）における結果を示す。各温度において、その温度を超える期間が長いセルを黄色で示した。PEMZL は 90℃を超えなかった。また、全 PEM 測定位置で 100℃を超えなかった。



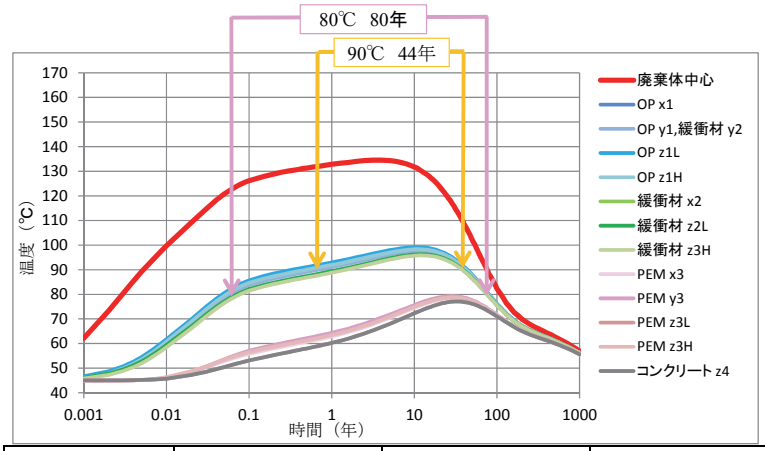


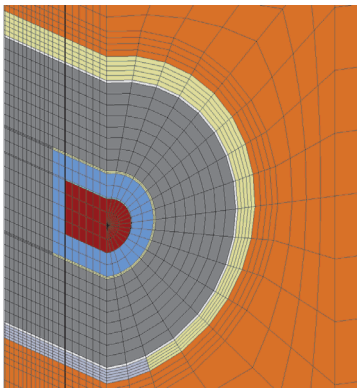
	80℃	90℃	100℃
PEMX	75 年	35 年	―
PEMY	74 年	33 年	―
PEMZL	45 年	―	―
PEMZH	79 年	42 年	―

図 5.2.3-40　ケース p-2（PEM 容器）における期間の抽出結果

(c) ケース p-3（オーバーパック）

図 5.2.3-41 にケース p-3（オーバーパック）における結果を示す。各温度において、その温度を超える期間が長いセルを黄色で示した。全オーバーパック測定位置で 100℃を超えなかった。



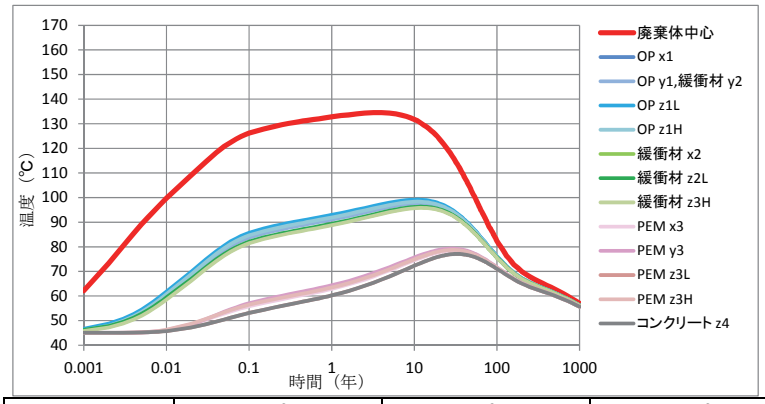


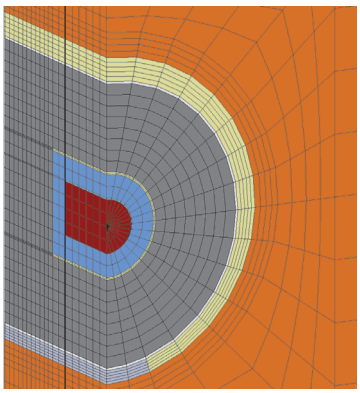
	80℃	90℃	100℃
OPX	80 年	43 年	—
OPY	78 年	42 年	—
OPZL	80 年	44 年	—
OPZH	79 年	43 年	—

図 5.2.3-41　ケース p-3（オーバーパック）における期間の抽出結果

(d) ケース p-3（PEM 容器）

図 5.2.3-42 にケース p-3（PEM 容器）における結果を示す。各温度において、その温度を超える期間が長いセルを黄色で示した。全 PEM 容器測定位置で 80℃を超えなかった。





	80℃	90℃	100℃
PEMX	—	—	—
PEMY	—	—	—
PEMZL	—	—	—
PEMZH	—	—	—

図 5.2.3-42　ケース p-3（PEM 容器）における期間の抽出結果

(2) 地下水条件

1) 文献調査

a. 調査の観点

地層処分における回収維持期間の評価のために、地下水について以下の 2 つの観点から文献を収集・調査した。

・地下水水質（降水系・海水系、pH、Eh、イオン濃度、温度等）

・地下水とセメント系材料との接触影響

b. 調査方法

a.調査観点で記した 2 点に着目し、第 2 次取りまとめおよび JAEA データベースから、報告書および技術論文を抽出した。抽出した論文を次に示す。

① 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－分冊 3　地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023[10]

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

③ 岩月輝希　他：瑞浪超深地層研究所における深度 500m までの地球化学調査および調査技術開発，JAEA-Research 2013-021. [11]

④ 大森一秋　他：超深地層研究計画における地下水の地球化学に関する調査研究 JAEA-Data/Code, 2013-001.[12]

⑤ 谷口直樹　他：幌延地下水環境における炭素鋼の腐食挙動の予察的検討, JAEA-Research 2006-051.[13]

⑥ 谷口直樹　他：高 pH 化した海水系地下水環境における炭素鋼の局部腐食進展挙動 JAEA-Research 2009-066.[14]

⑦ 齋正貴　他：超深地層研究計画における地下水の地球化学に関する調査研究, JAEA-Data/Code 2011-003.[15]

⑧ 核燃料サイクル開発機構：幌延地域における地下水水質形成モデル構築のための予察的検討，JNC TN8400 2002-025.[16]

⑨ 瀬尾俊弘　他 : 我が国における地下水の水質に関するデータの収集・解析(1992), PNC TN7410 92-017.[17]

⑩ 幌延深地層研究計画における地下水、河川水および降水の水質データ（2001~2010 年度）JAEA-Data/Code 2011-023[18]

⑪ 日本地下水学会　春季講演会公演予稿　試錐調査における地下水水質の時間的推移 [19]

(a) 地下水水質に係わる文献

抽出した文献に対して、地下水水質に係わる文献・データに着目して整理した結果を表 5.2.3-7 に示す。

表 5.2.3-7　地下水水質に係わる文献

文献名		主な内容	備考
①	JNC TN1400 99-023[10]	モデル地下水 ①地下水化学（p.Ⅳ-14－16） ②地下水組成（p.Ⅵ-75－81）	取りまとめ報告書
②	JNC TN1400 99-022[5]	ベントナイト間隙水の pH （p.Ⅳ-18）	取りまとめ報告書
③	JAEA-Research 2013-021[11]	平成 17～26 年において瑞浪深地層研究所深度 500m までの地下施設建設過程で得られた地下水水質データ ①MSB-2 および MSB--4 号孔における地下水水質の経時変化（p.14－18） ②研究坑道から掘削した観測孔における地下水水質の経時変化（p.24-28）	瑞浪超深地層研究所調査データ
④	JAEA-Data/ Code 2013-001[12]	瑞浪地域研究坑道内および地表、研究アクセス坑道内および深度 400m 予備ステージから掘削したボーリング孔から採水した地下水水質に関する分析結果（経時変化）（p.37-72）	瑞浪超深地層研究所調査データ
⑤	JAEA-Research 2006-051[13]	幌延における地下水組成（p.2）	幌延深地層研究所調査データ
⑦	JAEA-Data/ Code 2011-003[15]	瑞浪深地層研究所における地下水組成（p24-39）	瑞浪超深地層研究所調査データ
⑧	JNC TN8400 2002-025[16]	幌延地区 HDB-1、HDB-2 および掘削深度 1000m 以上高圧下(D-1)における地下水組成（pH および Eh 等の実測値）（p.32-33）	幌延深地層研究所調査データ
⑨	PNC TN7410 92-017[17]	・降水地下水の基準 ・我が国における地下水水質に関するデータ（①の参考文献である） 1992 年より過去 36 年間に公開された公共機関の報告書や地下水関係の学会誌など 3,600 件の内、有効な水質データが記載されている論文 401 件から水質データを抽出（p.10、p.14）	一般調査等におけるデータ
⑩	JAEA-Data/Code 2011-023[18]	地下水、河川水、降水および浅層地下水の水質分析結果（p.23-229）	幌延深地層研究所踏査データ

(b) 地下水とセメント系材料との接触影響

地下水とセメント系材料との接触影響に係わる文献として抽出した結果を表 5.2.3-8 に示す。

表 5.2.3-8　地下水とセメント系材料との接触影響に係わる影響

文献名		主な内容	備考
③	JAEA-Research 2013-021[11]	セメント材料の化学的影響の観察事例 ①主・換気立孔コンクリートライナーの表・裏面を介した地下水（p.35） ②グラウト周辺の地下水水質の経時変化（p.35-39） ③研究坑道から掘削されたボーリング孔のセメント保孔部の地下水（p.39-42）	瑞浪超深地層研究所調査データ
⑤	JAEA-Research 2006-051[13]	幌延模擬地下水に OPC および HFSC を 90 日および 180 日接触させた時の水質（(7)の参考文献である。）（p.3、10）	幌延深地層研究所踏査データ
⑥	JAEA-Research 2009-066[14]	幌延模擬地下水に OPC および HFSC を 90 日および 180 日接触させた時の水質	幌延深地層研究所踏査データ
⑪	日本地下水学会 春季講演会公演予稿[19]	セメンチング等の孔井仕上げが実施されている試錐孔の２区間の地下水水質の経時変化データ（p.88）	幌延深地層研究所踏査データ

c. 調査内容

【文献①】[10]

・モデル地下水について

① 下水化学（文献中 p.Ⅳ-14－16　p.Ⅵ-75－81）

地層処分システムの安全評価の観点から地下水の化学的条件にかかわる因子（pH、Eh、イオン濃度）を抽出し、地表から地下深部において起こり得る反応を化学平衡に基づき、4 種類のモデル地下水（降水系高 pH 型、降水系低 pH 型、海水系高 pH 型、海水系低 pH 型）が設定された[20]。

降水系高 pH 型、海水系高 pH 型に関しては、実測地下水を用いた多変量解析から分類の妥当性が支持された[21][22]。しかし、降水系低 pH 型に関しては信頼性のあるデータが得られていない。

以上より、日本における妥当性が支持された地下水は降水系高 pH 型および海水系高 pH 型であり、以降、各々を降水系地下水および海水系地下水と呼ぶ。

② 下水組成（p.Ⅴ-32－34）

降水系地下水は、大気中でのガス-水反応、土壌中での有機物の腐敗による CO_2 ガス吸収反応、岩盤中での鉱物-水反応および曹長石-カオリナイト間の化学平衡の地下水水質形成モデルにより導出した元素濃度と実測値から導出した元素濃度を組み合わせ、降水系地下水組成を設定した。

海水系地下水は、微斜長石と白雲母の化学平衡、有機物による SO_4^{2-} の還元反応、方解石と苦灰石間の化学平衡および玉髄と水溶液間の溶液平衡を考慮し、水質を求めた。これらの地下水組成の計算値を

表 5.2.3-9 に示す。

表 5.2.3-9　地質環境変更ケースで設定したモデル地下水組成の計算値[10]

	降水系地下水（レファレンスケース）	海水系地下水*1
pH	8.5	8.0
Eh [mV]	-281	-303
単位： [mol l^{-1}]		
Na (Total)	3.6×10^{-3}	6.2×10^{-1} *5
Ca (Total)	1.1×10^{-4}	3.3×10^{-4}
K (Total)	6.2×10^{-5}	1.1×10^{-2}
Mg (Total)	5.0×10^{-5}	2.5×10^{-4}
Fe (Total)	9.7×10^{-10}	3.9×10^{-8}
Al (Total)	3.4×10^{-7}	3.2×10^{-9}
C (Total)	3.5×10^{-3} *2	3.5×10^{-2} *6
S (Total)	1.1×10^{-4} *3	3.0×10^{-2} *7
B (Total)	2.9×10^{-4} *4	1.7×10^{-3} *4
P (Total)	2.9×10^{-6} *4	2.6×10^{-7} *4
F (Total)	5.4×10^{-5} *4	1.0×10^{-4} *4
Br (Total)	—	5.3×10^{-4} *4
I (Total)	—	2.0×10^{-4} *4
N (Total)	2.3×10^{-5} *4	5.2×10^{-3} *4
Cl (Total)	1.5×10^{-5} *5	5.9×10^{-1}
Si (Total)	3.4×10^{-4}	3.0×10^{-4}

*1 海水を起源として，鉱物との平衡反応，有機物による還元反応を考慮したモデル地下水（Yui et al., 1999a）
*2 無機炭素 $=3.5\times10^{-3}$ mol l^{-1}, $CH_4(aq)=1.5\times10^{-10}$ mol l^{-1}
*3 $SO_4^{2-}=1.1\times10^{-4}$ mol l^{-1}, $HS^-=3.8\times10^{-9}$ mol l^{-1}, $H_2S(aq)=1.2\times10^{-10}$ mol l^{-1}
*4 実測地下水の平均値より設定
*5 電荷バランスをとるために調整
*6 無機炭素 $=1.5\times10^{-2}$ mol l^{-1}, $CH_4(aq)=2.0\times10^{-2}$ mol l^{-1}
*7 $SO_4^{2-}=3.2\times10^{-5}$ mol l^{-1}, $HS^-=2.8\times10^{-2}$ mol l^{-1}, $H_2S(aq)=2.1\times10^{-3}$ mol l^{-1}

【文献②】[5]

・ベントナイト間隙水の pH　（p.Ⅳ-18）

炭酸塩水溶液 0.1molL^{-1} における試験溶液の pH と間隙水の pH の関係が図 5.2.3-43 に示されている。ベントナイト乾燥密度が 1.6Mgm^{-3} のとき、試験溶液に比べ間隙水 pH が明らかに低下していることが確認できる。間隙水の pH は pH 試験紙を用いて測定されたという記述がある。

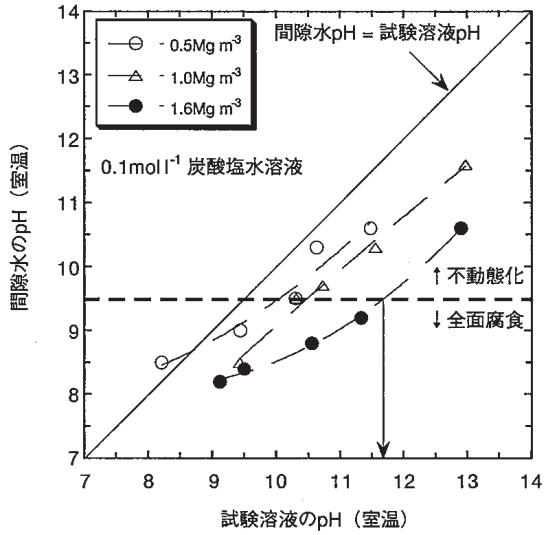


図 5.2.3-43　炭酸塩水溶液（0.1mol/l）における試験溶液の pH と間隙水の pH の関係[5]

【文献③】[11]

・平成 17～26 年の瑞浪超深地層研究所計画において行われた、深度 500m までの地下施設建設過程で得られた地球化学特性調査データ

地下水水質として pH、EC（電気伝導度）および、イオン濃度 Na、Cl、Ca、Mg、Cl、LC(無機炭素)、SO_4、K、Si、Al、Fe、F、Br、Mn、B の測定データが記載されている。地下水の採水場所としては、地上から掘削した MSB-2 および MSB-4 号孔、研究坑道から掘削した観測孔 07MI07 号孔、09MI20 号孔、09MI21 号孔および 10MI26 号孔であり、12MI33 号孔については測定データが無い。また、換気立坑の集水リングおよび、深度 200m 予備ステージに施工されたグラウト周辺においても地下水が採水されており、 pH のデータが記載されている。

研究坑道の直近では湧水割れ目に対するグラウトが、両立坑にはコンクリートライナー施工が、研究坑道の壁面には保抗用のセメントモルタル吹付けが行われているとの記載がある。そのため、研究坑道から掘削した観測抗、換気立坑の集水リング、研究坑道周辺である予備ステージで採水された地下水にはセメントとの接触影響の可能性が考えられる。一方、地上から掘削した MSB-2 および MSB-4 号孔については、施工等の記載が無く採取された地下水水質は純粋な地下水の水質であると考えられる。ボーリング孔および立坑の位置関係を図 5.2.3-44 に示す。

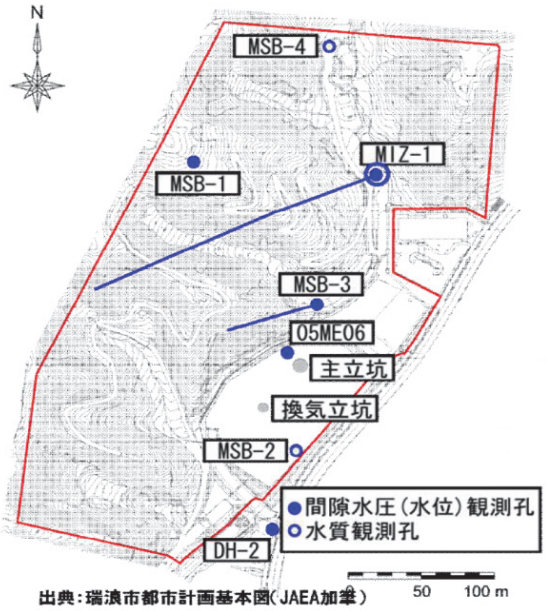


図 5.2.3-44　ボーリング孔および立坑の位置関係[11]

① MSB-2 および MSB-4 号孔における地下水水質の経時変化（p.14－18）

MSB-2 および MSB-4 号孔の地下水水質が採水・調査されている。共に pH が区間ごとに異なり、およそ 6～10 程度である。しかし、経時変化は見られない。イオン濃度については、Na、Cl、Ca、Mg、Cl、LC(無機炭素)、SO_4、K、Si、Al、Fe、F、Br、Mn、B が調べられている。

② 究坑道から掘削した観測孔における地下水水質の経時変化（p.24－28）

07MI07 号孔における pH が計測され、いずれの区間もほぼ同じでおよそ 7～9 であった。しかし、区間 6 の pH は初期で 11 程度と非常に高く、2 年ほどで他の区間と同等の値に低下していることが確認された。09MI20 および 09MI26 号孔における pH はおよそ 8～9 程度であり、経時変化は確認できていない。09MI21 号孔の pH は、区間 1 において pH が 11 程度と他区間の pH（pH9 程度）と比較して高い値になっている。また、経時変化は見られなかった。理由は③に記述する。

これらの研究坑道における水圧･水質観測孔と観測方式の概要を図 5.2.3-45 に示す。

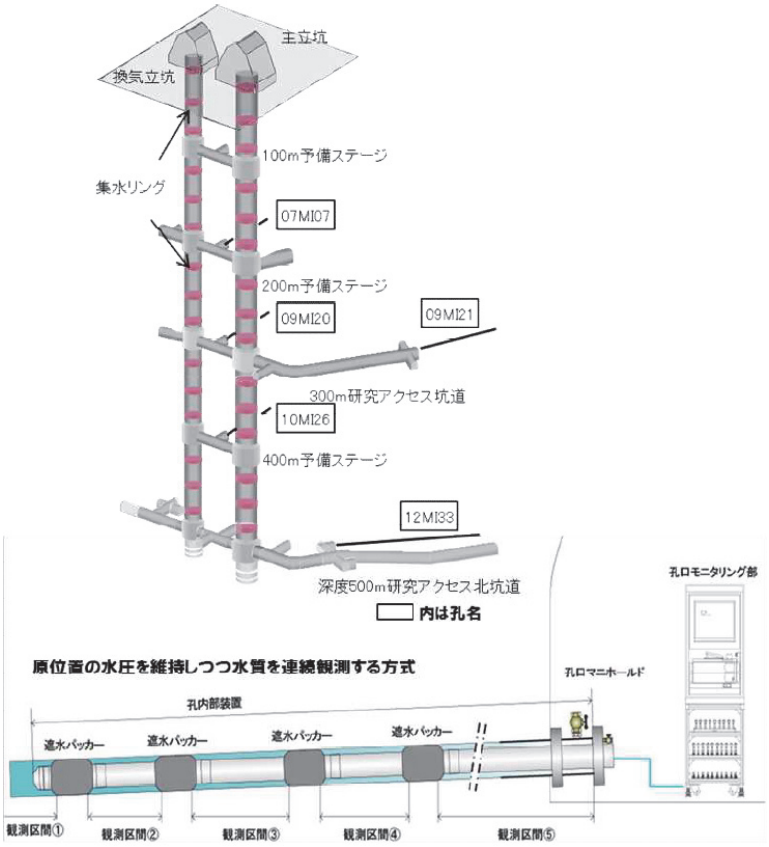


図 5.2.3-45　研究坑道における水圧・水質観測孔と観測方式（2012 年度末時点）[11]

・セメント材料の化学的影響の観察事例

① コンクリートライナーの表面・裏面を介して研究坑道に流出する地下水（p.35）

地下水は図 5.2.3-46 のように岩盤から研究坑道内に流入する過程で主・換気立坑のコンクリートライナーに接していることから、集水リングで各深度の地下水を採取し、pH の変化について確認した。換気立坑の集水リングから得られた地下水の pH の経時変化を図 5.2.3-47 に示す。各集水リングの地下水の pH は、初期にコンクリートライナーとの接触により上昇しているものの、半年程度で当初の pH に回復している。コンクリートの中性化反応には、より長期の時間を要することから、この pH の変化は、

セメントの影響を受けた地下水が、岩盤から湧出する地下水により洗い流され置換したためと考えられる。集水リングの一部では採水管に炭酸塩鉱物が確認され、コンクリートの溶脱により地下水に供給された Ca が方解石として沈殿したものと推察される。コンクリートの中性化に関わる炭酸塩鉱物によるコンクリートライナー裏面の炭酸塩鉱物によるコーティングの有無については未確認である。

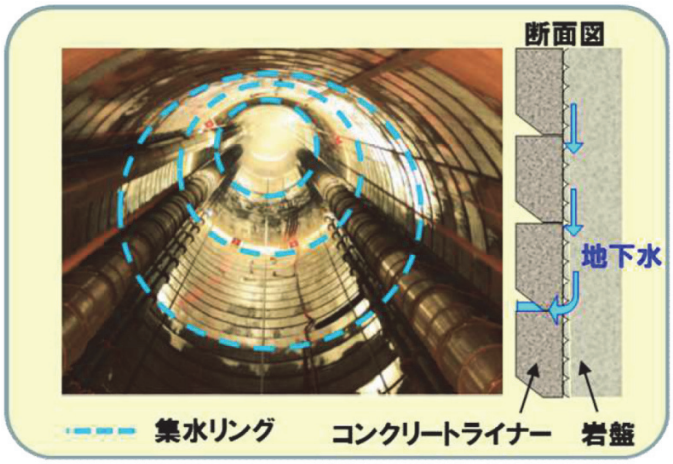


図 5.2.3-46　コンクリートライナーの概略[11]

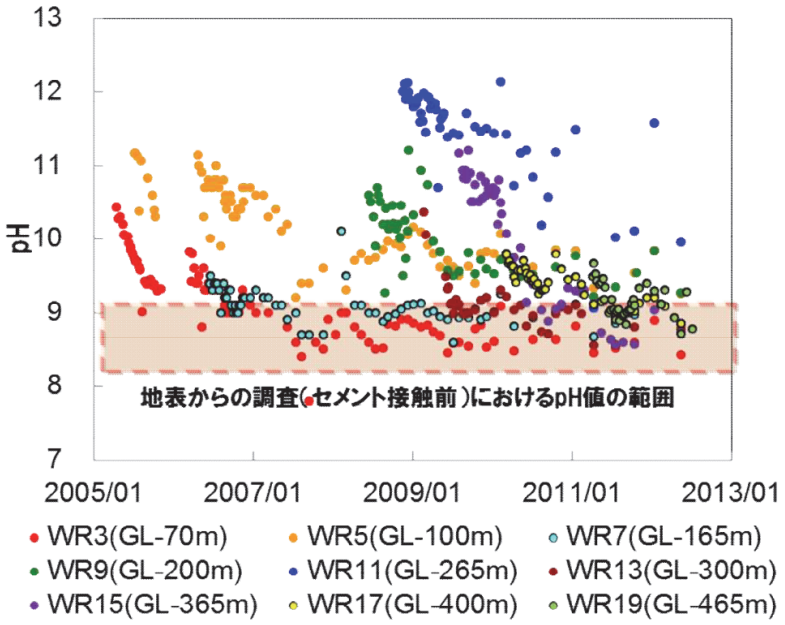


図 5.2.3-47　コンクリートライナー周辺の地下水（集水リング）の pH の経時変化[11]

② ラウト周辺の地下水（p.35－39）

2007 年に深度 200m 予備ステージに施工されたグラウト（図 5.2.3-48）周辺の地下水の pH について、その長期変化を確認した。プレグラウト実施（2007 年 6 月）後、研究坑道掘削、モニタリング装置の設置を行い、約半年後から pH 測定を開始した結果、当初、pH10～12 程度の地下水が約 1 年後にバックグラウンドと同等の値まで低下したことが確認された（図 5.2.3-49）。また、観測孔のボーリングコアの観察に基づいて

グラウト浸透・固化領域、中間領域、強変質領域に分類したそれぞれの観測区間で、地下水の水質を分析した結果、時間経過とともに各領域の水質がほぼ一様に変化しており、研究坑道への地下水の排水を反映していると推察された。

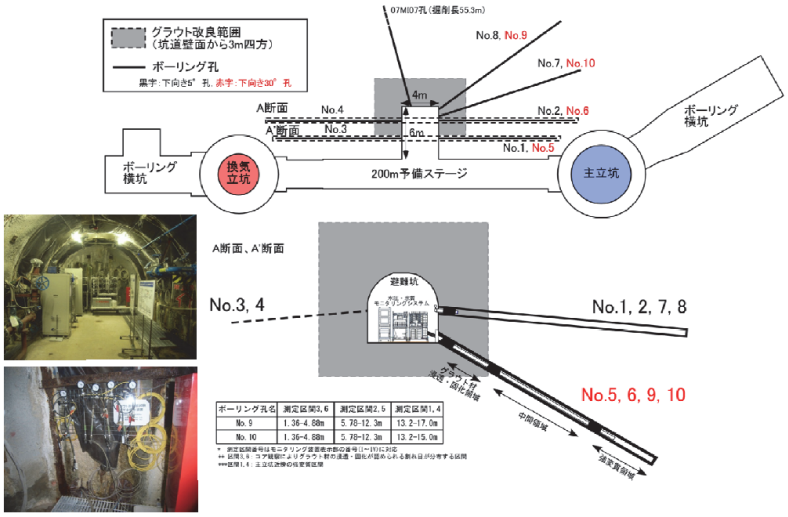


図 5.2.3-48　深度 200m 予備ステージにおけるグラウト領域とモニタリングの概略[11]

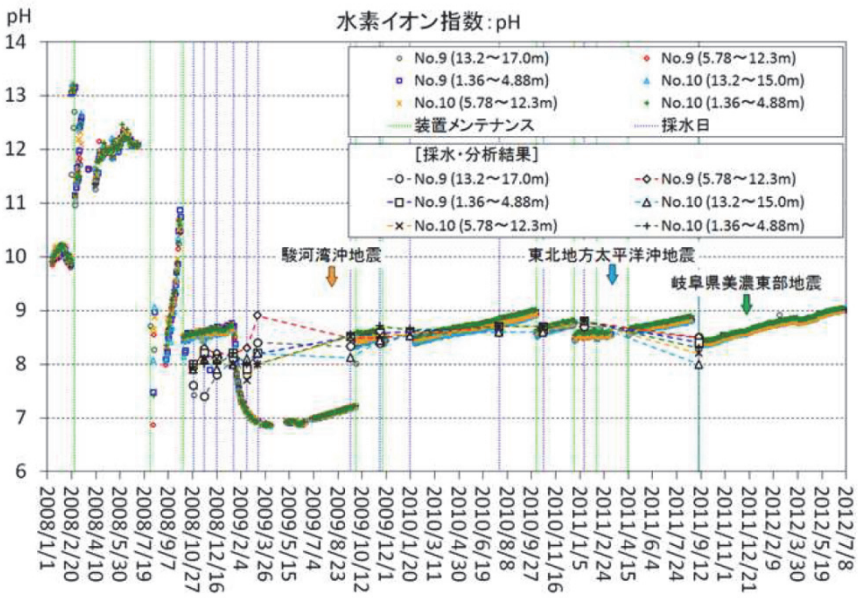


図 5.2.3-49　グラウト領域周辺の地下水の pH の経時変化[11]

③　究坑道から掘削されたボーリング孔のセメント保孔部の地下水（p.39－42）

研究坑道から掘削したボーリング孔（09MI21 号孔）のセメント打設部（区間 1）において、地下水の pH の長期変化について確認した。同ボーリング孔では、セメントを打設していない区間 2～4 の地下水の pH と比較することで、セメントの影響を確認することができる。区間 1 の地下水は 2 年間にわたって高 pH 状態（11 前後）が継続しており、前述①、②の観測例と比較して、研究坑道周辺への地下水湧出が少ないことから、セメントと反応した地下水が置換されずに滞留しているものと推測された（図

5.2.3-50)。各区間の水質の経時変化を図 5.2.3-51 に示す。

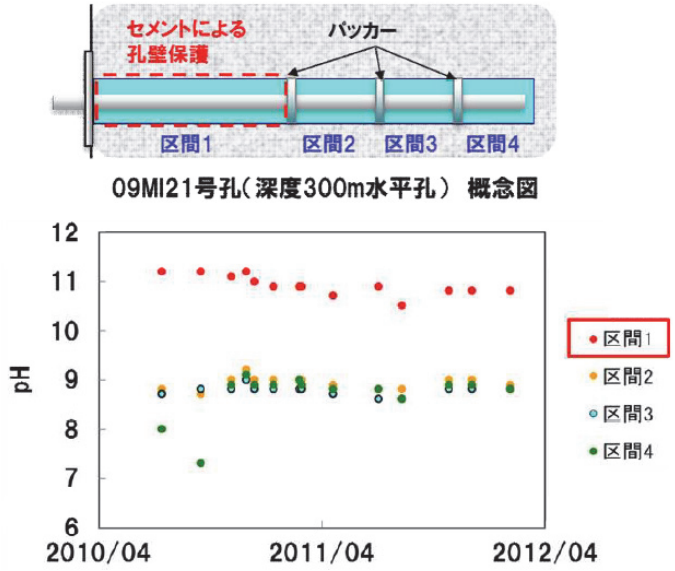


図 5.2.3-50　09MI21 号孔（深度 300m 水平孔）より採取した地下水の pH 観測結果[11]

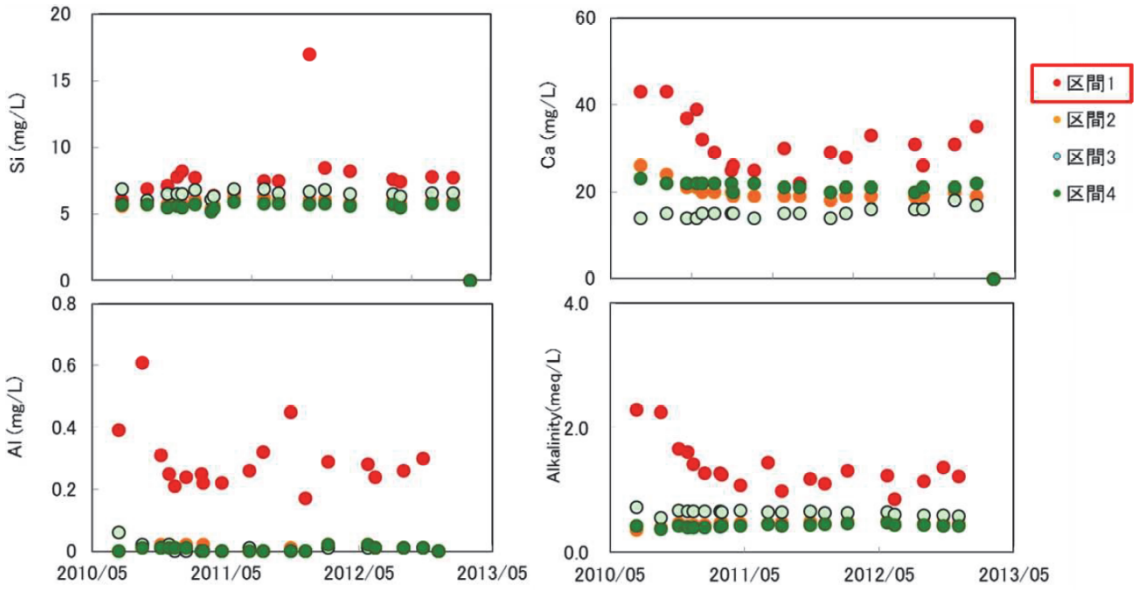


図 5.2.3-51　09MI21 号孔（深度 300m 水平孔）より採取した地下水の水質観測結果[11]

【文献④】[12]

・瑞浪地域研究坑道内および地表、研究アクセス坑道内および深度 400m 予備ステージから掘削したボーリング孔から採水した地下水水質に関する分析結果（経時変化）（p.2－72）

2011 年に地下水水質として、pH、 EC、温度、Eh、溶存酸素濃度（DO）、イオン濃度等の測定が行われている。地下水採水場所に関して、坑道およびボーリウング孔に対する施工等の記載は無し。また、地下水採水方法としては、多区間水質連続モニタリング装置によるパッカー区間ごとの採水を行っている。そのため、地下水水質は被圧・嫌気状態で測定されている。その他、多区間間隙水圧モニタリングシステムやハイブリッドスタンド

パイプマルチパッカーシステムにより採水されている。採水場所の概要を図 5.2.3-52 および表 5.2.3-10 に示す。地下水水質に継時的変化見られず、pH はおよそ 7～12 であり、換気立坑の集水井リングで採水された B-WR-20-7 が最も大きく pH12 であり、MSB4 号孔-1(97~98)が最も低く pH7.1 であった。温度はおよそ 17～26℃、Eh はおよそ-100mV.vs.SHE であるが、MSB2 号孔では最高値 262mV.SHE が測定されている。また最小値は 09MI21-区間 1(14)で測定された-152mV.SHE である。イオン濃度に関してはウラニン、アミノ G 酸、ナフチオサン Na、Na、K、Ca、Mg、TC（全炭素）、TIC（全無機炭素）、TOC（全有機炭素）、SO4、S、F、Cl、NO3、NO2、Br、I、NH4、PO4、Si、Al、T-Fe、Fe、Mn、B、U が測定されている。

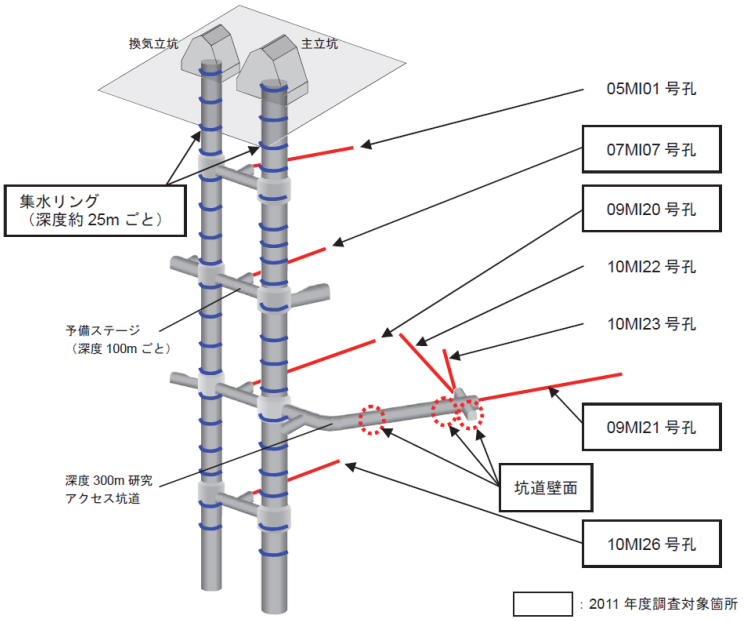


図 5.2.3-52　研究坑道内の調査位置図[12]

表 5.2.3-10　採水場所一覧[12]

採水場所		
研究坑道内	集水リング	主立坑
		換気立坑
	坑道壁面	深度 300m 研究アクセス坑道
	ボーリング孔	07MI07 号孔
		09MI20 号孔
		09MI21 号孔
		10MI26 号孔
地表から掘削したボーリング孔		MSB-2 号孔
		MSB-4 号孔
		MIZ-1 号孔

【文献⑤】[13]

・幌延における地下水組成

幌延研究所設置地区周辺のボーリング孔 HDB-1、HDB-3、HDB-6 でえられた揚水地下水の測定値は揚水時に大気などの影響を受けたと考えられるので、熱力学的な観点から補正が行われ、表 5.2.3-11 に示す地下水組成の幅が提示されている。

表 5.2.3-11　予察的に推定された研究所設置地区での深部地下水組成幅[13]

項目	HDB-6 孔 実測値	推定値	
		pH が低い場合	pH が高い場合
pH	7.7	5.9	7.1
Eh (V, vs. SHE)		-0.124～-0.183	-0.198～-0.248
イオン強度	2.08×10^{-1}	1.32×10^{-1}～4.19×10^{-1}	
Na	1.87×10^{-1}	1.19×10^{-1}～3.62×10^{-1}	
K	2.36×10^{-3}	2.20×10^{-3}～9.99×10^{-3}	
Ca	3.40×10^{-3}	1.93×10^{-3}～8.98×10^{-3}	
Mg	3.66×10^{-3}	1.93×10^{-3}～1.06×10^{-2}	
Cl	1.80×10^{-1}	9.65×10^{-2}～3.64×10^{-1}	
Si	8.57×10^{-4}	9.20×10^{-5}～9.80×10^{-4}	
Fe	1.07×10^{-5}	1.68×10^{-5}～6.00×10^{-4}	3.51×10^{-6}～6.00×10^{-5}
S	検出下限以下	3.68×10^{-10}～3.50×10^{-9}	
C	$[HCO_3^-]=2.62\times10^{-2}$	6.96×10^{-2}～1.05×10^{-1} $[HCO_3^-]=1.96\times10^{-2}$～$2.64\times10^{-2}$	

幌延における地下水は、炭素鋼の腐食挙動に影響を及ぼすと考えられている塩化物、硫酸塩、硫化物などの化学種濃度は第 2 次取りまとめにおける地下水設定の範囲を超えていないが、次のような特徴がある。

①海水系の地下水であり、塩化物イオン濃度が比較的高い。

②炭酸ガスの溶解により、炭酸塩濃度が比較的高い。

③硫酸塩、硫化物はほとんど含まれていない。

また、表中の項目のほか、幌延の地下水中にはアンモニウムイオンが含まれており、アンモニウムイオンの実測値として、6.89×10^{-3}mol/L の濃度が報告されている。アンモニウムイオンは炭素鋼の腐食への影響は小さいと考えられるが、オーバーパック材料として銅を検討する場合は応力腐食割れについて評価が必要となる。

・模擬地下水の設定　p.3

幌延地下水成分のうち、炭素鋼の腐食に影響を及ぼすと考えられる化学種（炭酸塩と塩化物）の成分のみに着目して単純化された溶液を作成した。組成は飽和 $CaCO_3$+0.28M-NaCl 水溶液とした。幌延の地下深部に存在する地下水は炭酸ガスを溶解していると考えられるため、炭酸ガスを含むガスを通気した。コンクリート支保と地下水の接触を想定して、模擬地下水に粉砕した OPC または低アルカリセメント(HFSC)を

10g/L で 10 日間以上浸漬させ、上澄み液を模擬地下水とした。試験溶液を表 5.2.3-12 に示す。

表 5.2.3-12　試験項目と使用した試験溶液[13]

試験項目	試験溶液	吹き込みガス	備考
アノード分極試験	模擬地下水	N_2(0.05MPa)+CO_2(0.05MPa)	模擬地下水：0.28M-NaCl + 飽和 $CaCO_3$
	実地下水	N_2(0.05MPa)+CO_2(0.05MPa)	
	模擬地下水＋OPC	N_2(0.1MPa)	
	模擬地下水＋HFSC	N_2(0.1MPa)	
大気吹き込み下の浸漬試験	模擬地下水	大気(0.05MPa)+CO_2(0.05MPa)	
	実地下水	大気(0.05MPa)+CO_2(0.05MPa)	
低酸素濃度条件の浸漬試験	模擬地下水	N_2(0.05MPa)+CO_2(0.05MPa)	
	実地下水	N_2(0.05MPa)+CO_2(0.05MPa)	

・実験結果と考察　p.15

コンクリート接触地下水の pH はアルカリ性であるが、緩衝材間隙水中で明らかに低下した。緩衝材はアルカリ性溶液を中世側に緩衝する作用あり、幌延の地下水条件に対しても緩衝効果が認められた。緩衝材中の pH 測定は pH 試験紙により行われた。測定結果を表 5.2.3-13 に示す。

測定方法は図 5.2.3-53 に示すように、緩衝材の上にナイロン布で包んだ pH 用紙を置き、油圧プレスし緩衝材より浸み出た間隙水を測定していると推測される。

表 5.2.3-13　試験溶液の pH と緩衝材中の pH[13]

試験溶液	吹き込みガス	pH（溶液）	pH(緩衝材)
模擬地下水	N_2(0.05MPa)+CO_2(0.05MPa)	6.4	6.7
実地下水	N_2(0.05MPa)+CO_2(0.05MPa)	6.8	7.2
模擬地下水＋OPC	N_2(0.1MPa)	12.3	8.6
模擬地下水＋HFSC	N_2(0.1MPa)	10.9	8.2

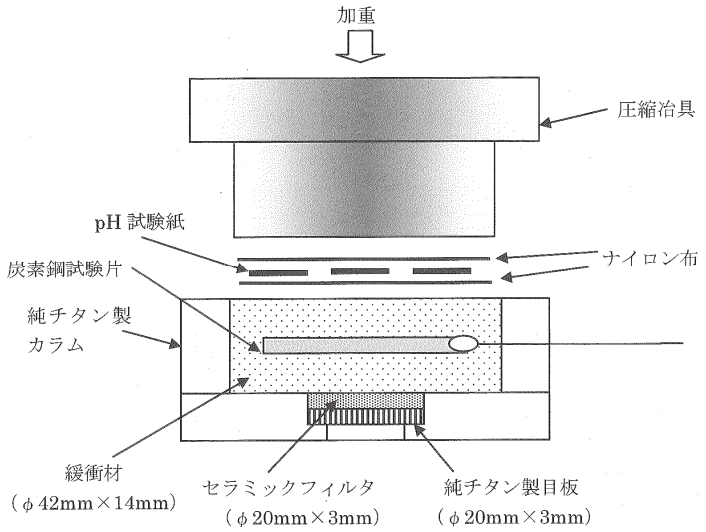


図 5.2.3-53　緩衝材間隙水中の pH 測定方法の模式図[13]

【文献⑥】[14]

・幌延模擬地下水条件

幌延模擬地下水に OPC、および HFSC を粉砕して 10 日間以上静置後の上澄み液を用いて試験を実施した。pH の測定結果を表 5.2.3-14 に示す。上澄み液の分析結果無し。模擬地下水は、幌延の地下水成分のうち、炭素鋼の腐食挙動に影響を及ぼすと考えられる炭酸塩と塩化物に着目した。

表 5.2.3-14　浸漬試験条件[14]

試験溶液	コンクリート	pH	期間（days）
0.28M-NaCl ＋ 飽和 $CaCO_3$	OPC	12.7	90
	OPC	12.7	180
	HFSC	10.4	90
	HFSC	10.4	180

・実験結果と考察　p.11-

海水系地下水の一例として幌延の模擬地下水を用い、コンクリートと接触させて高 pH 化させた条件で炭素鋼の孔食、すきま腐食の進展挙動を調べ、結果として、孔食係数は中性～アルカリ性環境や種々の天然水環境で得られた過去のデータ範囲にあり、平均腐食深さが同じであれば過去の孔食、すきま腐食に関するデータとほぼ同程度の値を示すことを確認した。また、実験データの極値統計解析によるオーバーパックの最大腐食深さを推定した結果、いずれの条件でも従来の孔食・すきま腐食進展に関する経験モデルにより算出される値を超えないことを確認した。

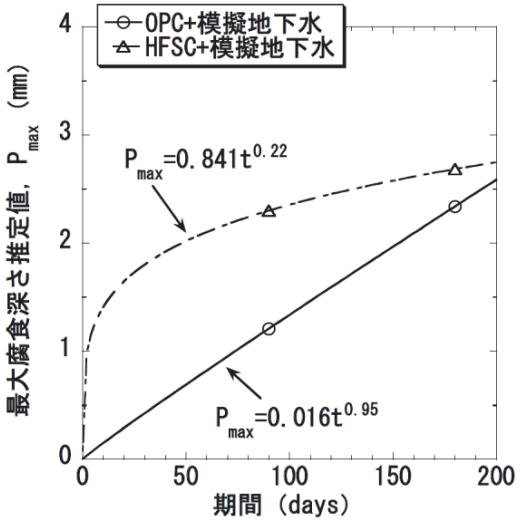


図 5.2.3-54　信頼率 0.99 での最大腐食深さ推定値の経時変化[14]

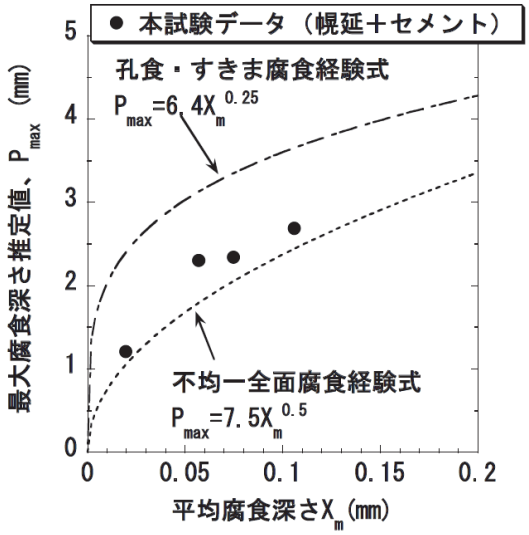


図 5.2.3-55　平均腐食深さと信頼率 0.99 での最大腐食深さ推定値の関係および既往の経験的モデルから得られる値との比較[14]

【文献⑦】[15]

2007 年および 2008 年に深度 200m 予備ステージにおけるボーリング孔（07MI07 号孔）、研究坑道の壁面からの湧水、深度 300m 研究アクセス坑道の掘削に先立って実施された先行ボーリング孔からの湧水、探り削孔からの湧水、坑道内に設置した湧水リングに流入した地下水についてそれぞれ水質分析を行った。さらに、MSB-2、MSB-4 および MIZ-1 号孔において採取した地下水についても水質分析を実施した。

・瑞浪深地層研究所における地下水組成　（p.24－39）

採水した地下水から測定した pH、EC、温度、Eh、DO、イオン濃度が記載されている。採水場所である坑道内等の施工内容についての記載が無い。pH はおよそ 8～12 であり、換気立坑の No.11-265.0mbgl の集水リングで採水された地下水の pH が最も高く 12.12 で

あり、主立坑の No.2-43.5mbgl の集水リングで採水された地下水の pH が最少で 8.00 であった。電気伝導度はおよそ 40～280mSm-1 程度であった。温度はおよそ 9～26℃、酸化還元電位はおよそ-160～320mV 程度であった。単位が mV と記載されているが mV,vs,SHE であると考えられる。換気立坑 No.5-102.6mbgl において採水されたものの Eh が最大で 320.0mV.vs.SHE であり、最小値は主立坑の No.9-202.6mbgl 採水されたもので、-160.0mV.vs.SHE である。イオン濃度に関してはウラニン、アミノ G 酸、ナフチオサン Na、Na、K、Ca、Mg、Sr、TC（全炭素）、TIC（全無機炭素）、TOC（全有機炭素）、SO4、F、Cl、NO3、NO2、Br、Si、Al、Total-Fe、Mn が測定されている。

【文献⑧】[16]

幌延地区における HDB-1 孔および HDB-2 孔で採取した地下水にたいして地上で pH、Eh、DO、EC および水素／酸素同位体の測定データおよび、幌延地区 D-1 における原位置での pH、Eh および EC の測定データとなっている。地下水採水位置における施工状況の説明は無く、また、パッカーを設置しフローセルにより揚水を行って採水している。

【文献⑨】[17]

・降水起源と考えられている地下水データの抽出（p.5）

降水系地下水の基準として以下の 3 つを記している。

① 5.7=<pH=<10

② 水温=<(3℃/100m)×深度(m)＋20℃

③ Cl 濃度=<141mg/L 、SO4 濃度=<100mg/L

・抽出地下水データ p.14-15

我が国における 1992 年より過去 36 年間に公開された公共機関の報告書や地下水関係の学会誌など 3,600 件の内、有効な水質データが記載されている論文 401 件から水質データを抽出した。集計データおよび 200m 以深の酸化還元電位が測定された地下水データを表 5.2.3-15～表 5.2.3-18 に示す。

表 5.2.3-15　200m 以深の酸化還元電位が測定された地下水データ[17]

岩種	採水地点	孔底深度 (GL-m)	pH	Eh (mV)	水温 (℃)	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	全Fe	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	SiO_2	文献
						(mg/ℓ)									
第四紀火山岩	長崎*	212	6.70	110	27.2	121.5	22.4	82.6	149.2	0.75	1261.6	25.4	14.2	110.5	1
第四紀火山岩	長崎*	212	6.85	60	15.3	15.2	3.9	37.5	21.0	15.65	246.3	4.3	21.6	104.0	1
第四紀堆積岩	長崎	250	7.30	-80	34.5	147.0	12.4	13.1	6.9	1.51	473.3	6.4	tr.	78.6	1
第四紀堆積岩	長崎	300	6.70	25	30.6	22.0	7.1	25.0	5.8	0.11	166.8	5.6	tr.	104.6	1
古第三紀層	長崎	300	8.30	120	21.3	655.3	2.1	1.1	2.7	0.06	1427.7	36.6	4.2	19.8	2
第四紀火山岩	長崎	300	6.29	170	24.0	183.3	30.9	182.5	266.6	0.84	2061.7	123.2	77.0	119.6	1
古第三紀層	佐賀	316	8.62	-220	16.9	183.0	2.0	8.0	tr.	0.69	434.5	32.5	3.9	25.5	2
第四紀火山岩	長崎	353	6.92	140	30.2	279.5	31.3	52.9	97.6	0.10	1351.4	27.2	tr.	112.0	1
第四紀火山岩	長崎	801	6.72	100	34.3	186.8	20.8	81.0	126.4	0.56	1326.8	23.5	tr.	133.8	1

＊：異なる試錐孔における測定・分析データ。

文献 1：太田　一也(1973)

文献 2：太田　一也(1971)

表 5.2.3-16　主要溶存成分濃度の集計結果[17]

	全地下水データ			日本の温泉（湯原、瀬野，1977）		
項目	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値	平均値
pH	0.4	12.1	7.1	0.4	10.0	−
Na^+ (mg/l)	−	20,533	745.7	−	20,533	773
K^+ (mg/l)	−	6,218	36.0	−	4,664	45
Ca^{2+} (mg/l)	−	5,169	131.6	−	5,000	222
Mg^{2+} (mg/l)	−	4,000	38.5	−	1,003	49
HCO_3^- (mg/l)	−	11,325	300.2	−	9,000	474
Cl^- (mg/l)	−	68,800	1,313.1	−	43,790	1,260
SO_4^{2-} (mg/l)	−	84,000	175.1	−	49,930	1,650
SiO_2 (mg/l)	−	809	45.5	−	−	−

表 5.2.3-17　温泉等を除くデータ（7,969 件）の集計結果[17]

項目	最小値	最大値	平均値
pH	2.8	12.1	7.1
Na^+ (mg/l)	−	11,449	426.1
K^+ (mg/l)	−	679	10.9
Ca^{2+} (mg/l)	−	3,347	85.3
Mg^{2+} (mg/l)	−	3,620	31.0
HCO_3^- (mg/l)	−	6,200	137.6
Cl^- (mg/l)	−	19,602	614.6
SO_4^{2-} (mg/l)	−	4,240	114.9
SiO_2 (mg/l)	−	525	38.2

表 5.2.3-18　降水起源と考えられる地下水（5,127 件）の集計結果[17]

項目	最小値	最大値	平均値
pH	5.8	9.8	7.1
Na^+ (mg/l)	−	653	29.9
K^+ (mg/l)	−	124	4.3
Ca^{2+} (mg/l)	−	395	17.1
Mg^{2+} (mg/l)	−	267	7.7
HCO_3^- (mg/l)	−	2,062	145.3
Cl^- (mg/l)	−	141	20.6
SO_4^{2-} (mg/l)	−	95	9.0
SiO_2 (mg/l)	−	231	42.5

【文献⑩】[18]

地下水水質の分析対象は、ボーリング孔から採取した地下水、掘削水、掘削リターン水、岩盤コアからの抽出水、河川水および雨水である。平成 18 年度から立坑内の集水リング、立坑壁面湧水からも地下水を採取している。採水場所を図 5.2.3-56 に示す。

ボーリング孔にて採水したものに関して、いずれの深さに関しても pH が 10~13 程度と高いところが確認された。

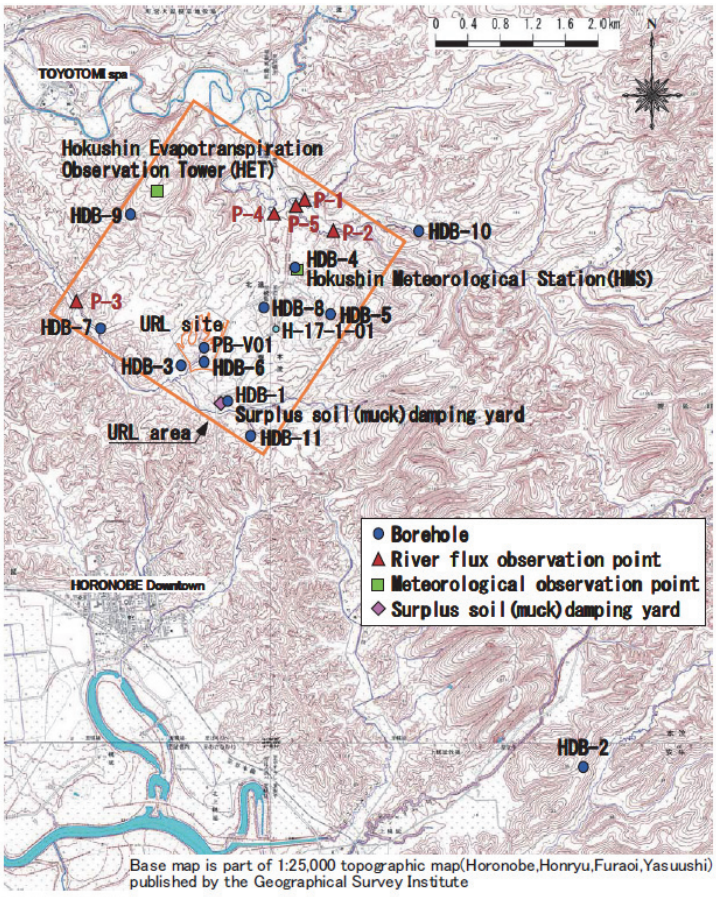


図 5.2.3-56　採水場所[18]

【文献⑪】[19]

幌延深地層研究計画における試錐調査孔 HDB-6 孔の区間 4（深度 288.66-302.90m、区間 6 に比べ透水性が良好）および区間 6（深度 362.39-385.70m）における地下水の温度、pH、Eh、EC、DO（溶存酸素濃度）、溶存イオン濃度（Na、K、Cl、HNO_3、Ca、Mg、SO_4、T-Fe）の分析が実施されている。pH の経時変化を図 5.2.3-57 に示す。また溶存イオン濃度の経時変化を図 5.2.3-58 に示す。2003 年における地下水データは試錐調査による揚水試験で採水された地下水を、それ以降のデータは多段式地下水観測装置によるバッチ式封圧採水された地下水のものである。

揚水試験における掘削泥水影響調査のために掘削汚水にトレーサーを混入させ、10mg/L で管理しており、揚水試験の採水ではその影響が 8%以下と小さいことが図 5.2.3-57 の左図から確認できる。また、図 5.2.3-57 の右図を見ると、2003 年に揚水試験により採水され地下水は pH7 前後の中性を示したが、それ以降のバッチ式採水地下水ではセメンチングの影響を受けて pH9 程度とアルカリ性を示している。しかし、7 年後には pH は中世まで低下している。区間 4 の方が区間 6 に比べ pH の低下が早い理由は透水性が良好であることが原因であると考えられる。

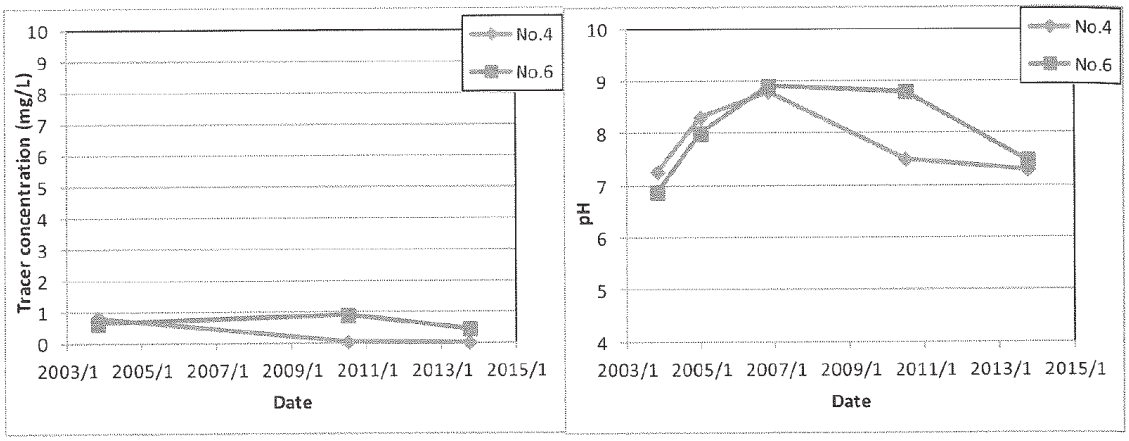


図 5.2.3-57　各採水におけるトレーサ濃度と pH[19]

多くの溶存成分では pH と同様、濃度回復において区間 4 が区間 6 よりも早い傾向が見られた。SO_4^{2-}や T-Fe は濃度の増加や減少が確認できるが、これはセメンチングや鋼製ケーシングの影響である可能性が考えられる。

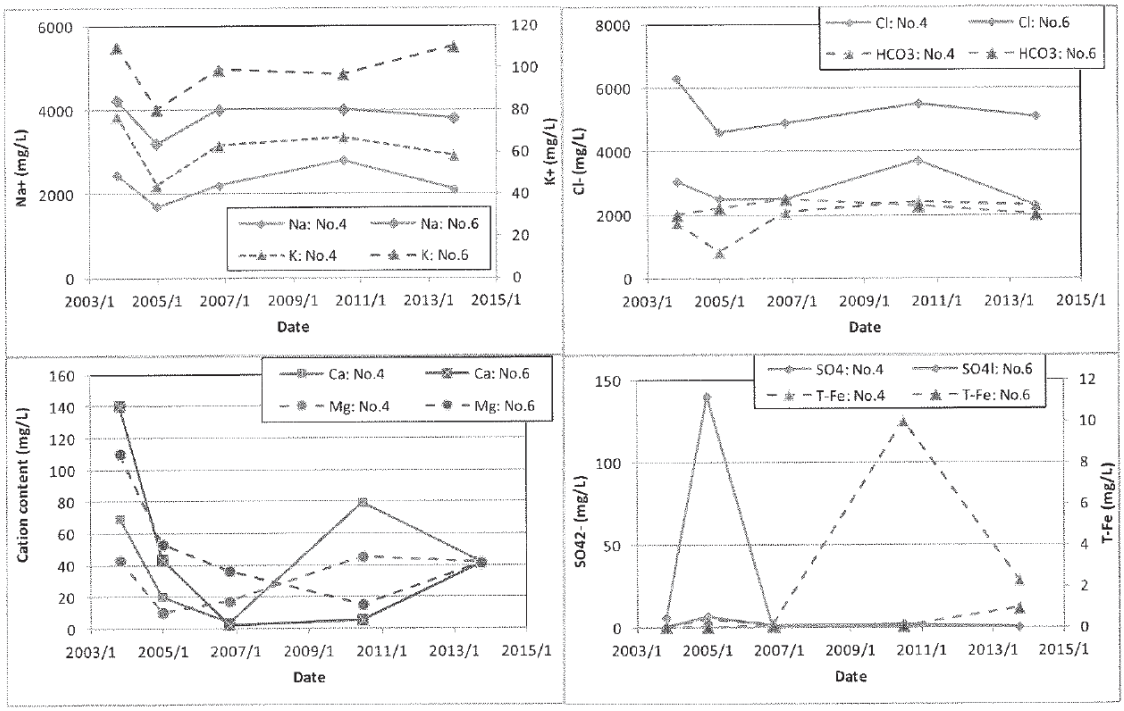


図 5.2.3-58　各採水における溶存イオン濃度[19]

2) 地下水質の設定

地下水水質の中で、人工バリアの腐食に影響すると考えられるパラメータを設定し、このパラメータに対して地下水に関する文献①～⑪から地下水水質の値を抽出した。

また、地下水に関する文献①～⑪から地下水 pH のセメント系材料との接触影響について、その経時変化を抽出した。

a. パラメータ（地下水水質）

pH、Eh、水温、溶存元素をパラメータとした。溶存元素については、国内の LNG タンク水張試験※1 において試験で用いる水溶液に対して可使用判断のために分析する項目を参考とした。パラメータとして設定した溶存元素を次に示す。

・パラメータとして設定した溶存元素

H_2S , Cl^- , SO_4^{2-} , NH^{4+} , Fe

※1 中山　元、他、地上式 LNG 貯蔵タンクの海水による水張試験手順の検討、材料と環境 2007、D-120、早稲田大学、腐食防食教会(2007)

b. 地下水とセメント系材料との接触影響

地下水 pH のセメント系材料との接触影響について、その経時変化を抽出した。

c. 地下水水質の設定

(a) モデル地下水水質

地下水に関する文献を基にモデル地下水水質を、　a. で設定したパラメータで抽出した。以降に文献毎に結果を示す。

【文献①】[10]

表 5.2.3-19　地質環境変更ケースで設定したモデル地下水組成の計算値

場所	pH	Eh[mV vsSHE]	Temp [℃]	Cl^- [mol/L]	total-Fe [mol/L]	NH_4^+ [mol/L]	H_2S(aq) [mol/L]	SO_4^{2-} [mol/L]
降水系地下水	8.5	-281	-	1.5E-5	9.7E-10	-	1.2E-10	1.1E-4
海水系地下水	8.0	-303	-	5.9E-1	3.9E-3	-	2.1E-3	3.2E-5

(b) 実測値の地下水水質

地下水に関する文献を基に実測値の地下水水質を、　a. で設定したパラメータで抽出した。以降に文献毎に結果を示す。

【文献④】[12].

表 5.2.3-20　瑞浪深地層研究所(2011~2012)における地下水組成

場所	pH	Eh[mV vsSHE]	Temp [℃]	Cl^- [mol/L]	total-Fe [mol/L]	NH_4^+ [mol/L]	H_2S [mol/L]	SO_4^{2-} [mol/L]
	min	min	min	min	min	min	min	min
	max	max	max	max	max	max	max	max
集水リング (主立坑)	7.8	-	15.2	4.77	1.07E-4	5.56E-3	-	9.37E-3
	11.3	-	26.0	9.56	1.47E-2	5.56E-3	-	1.67E-1
集水リング (換気立坑)	8.2	-	17.5	5.50	2.69E-4	5.56E-3	-	4.16E-2
	10.6	-	25.7	11.68	5.01E-2	1.67E-2	-	8.54E-2
集水リング (MIZ-1 号孔)	7.0	-	21.0	19.18	4.66E-4	1.67E-2	-	1.04E-3
	9.0	-	24.3	53.31	4.83E-2	4.44E-2	-	4.16E-3
地下水 (09MI20 号孔)	7.8	-140	20.6	1.55	8.95E-5	5.56E-3	-	9.37E-2
	8.6	-61	25.7	4.54	1.97E-3	1.11E-2	-	1.67E-1
地下水[注1] (09MI21 号孔)	8.5	-152	22.1	3.13	8.95E-5	5.56E-3	-	3.12E-3
	10.9	133	25.4	6.06	3.94E-3	1.11E-2	-	2.71E-3
地下水 (10MI26 号孔)	7.9	-134	20.9	2.96	8.95E-5	5.56E-3	-	5.83E-2
	8.5	-44	25.4	9.39	1.72E-3	1.67E-2	-	1.15E-1
地下水 (MIZ-1 号孔)	8.3	-11	24.3	51.34	1.15E-3	2.78E-2	-	1.04E-3
まとめ	7.0	-152	15.2	1.55	8.95E-5	5.56E-3	-	1.04E-3
	11.3	133	26.0	53.31	5.01E-2	4.44E-2	-	1.67E-1

注 1：No25～40 においては原水試料のみを採用

【文献⑦】[15]

表 5.2.3-21　瑞浪超深地層地下研究所(2008)における地下水組成

場所	pH	Eh[mV vsSHE]	Temp [℃]	Cl^- [mol/L]	total-Fe [mol/L]	NH_4^+ [mol/L]	H_2S [mol/L]	SO_4^{2-} [mol/L]
	min	min	min	min	min	min	min	min
	max	max	max	max	max	max	max	max
集水リング (換気立坑)	10.4	-	10.0	8.41	8.95E-4	-	-	1.15E-2
	11.4	-	12.9	9.39	-	-	-	5.52E-2
探り削孔 (換気立坑)	8.3	-	24.2	4.91	8.95E-4	1.11E-2	-	1.46E-2
壁面湧水 (主立坑)	9.6	-	12.8	2.96	8.95E-4	1.11E-2	-	1.46E-2
地下水 (08MI13 号孔)	8.3	-	23.8	2.60	-	1.11E-2	-	5.20E-3
	11.1	-	25.7	4.68	-	3.89E-2	-	3.40E-1
地下水 (MIZ-1 号孔)	-	-	-	6.35E-1	5.37E-5	1.11E-2	-	4.16E-3
	-	-	-	51.62	3.22E-3	1.33E-1	-	4.27E-2
まとめ	8.3	-	10.0	6.35E-1	5.37E-5	1.11E-2	-	4.16E-3
	11.4	-	25.7	51.62	3.22E-3	1.33E-1	-	3.40E-1

【文献⑧】[16]

表 5.2.3-22　幌延地層研究所(2003)における地下水組成(元素濃度は空気中におけるもの)

場所 日時	pH	Eh[mV vsSHE]	Temp [℃]	Cl^- [mol/L]	total-Fe [mol/L]	NH_4^+ [mol/L]	H_2S [mol/L]	SO_4^{2-} [mol/L]
D-1 (深度 1000m)	7.8	-415	31.1	4.12E-1	5.37E-6	-	-	1.04E-6
	8.5	-106	34.6	6.01E-1	1.79E-5	-	-	6.39E-4
D-1 (深度 800m)	8.3	318	-	7.67E-4	1.27E-5	-	-	1.04E-6
			-	5.64E-3	1.58E-5	-	-	4.10E-4
HDB-1 (548~568.18m)	-	-	-	2.12E-1	5.19E-5	7.21E-3	-	1.01E-3
HDB-2 (334.9~404.9m)	-	-	-	1.18E-1	5.37E-7	2.94E-3	-	2.50E-5
まとめ	7.8	-415	31.1	7.67E-4	5.37E-6	2.94E-3	-	1.04E-6
	8.5	318	34.6	6.01E-1	5.19E-5	7.21E-3		1.01E-3

【文献⑩】[18]

表 5.2.3-23　幌延深地層研究所(2001~2010)における地下水組成

場所	pH	Eh[mV vsSE]	Temp [℃]	Cl^- [mol/L]	total-Fe [mol/L]	NH_4^+ [mol/L]	H_2S [mol/L]	SO_4^{2-} [mol/L]
	min	min	min	min	min	min	-	min
	max	max	max	max	max	max	-	max
HDB-1	7.7	-	12	7.25E-1	3.58E-4	5.56E-3	-	1.53
	11.6	-	24.8	293	5.91E-2	7.22	-	151
HDB-2	8.5	-	14.8	5.73	2.69E-3	1.44E-1	-	8.12
	12	-	21.6	25.5	5.73E-2	7.22E-1	-	36.2
HDB-3	7.6	-	11.4	14.4	3.94E-3	1.44E-1	-	1.35
	12.4	-	15.7	46.8	8.77E-3	2.83	-	4.06
HDB-4	7.0	-	9.8	6.21E-1	3.58E-4	6.67E-1	-	2.08E-3
	9.4	-	18.9	133	6.27E-3	7.22	-	2.60
HDB-5	7.01	-	9.2	7.05E-1	3.58E-3	1.56E-2	-	6.25E-2
	8.8	-	18.9	95.9	1.79E-2	3.94	-	4.27
HDB-6	6.9	-	7.9	5.08	1.79E-4	6.67	-	2.08E-3
	9.3	-	20.6	333	6.80E-3	7.78	-	20.1
HDB-7	8.2	-	-	12.7	1.79E-3	-	-	2.08E-1
	11.2	-	-	452	1.24E-2	-	-	12.5
HDB-8	8.4	-	16.3	2.82	5.37E-4	-	-	1.04E-1
	10.2	-	18.9	192	6.72E-2	-	-	22.1
HDB-9		-	-	197	-	-	-	4.48
		-	-	243	-	-	-	20.8
HDB-10	6.6	-	11	1.92	1.79E-4	5.56E-3	-	3.12E-3
	7.4	-	30.5	228	4.96E-2	12.8	-	17.7
HDB-11	7.9	-	-	158	1.43E-3	6.67	-	2.08E-3
	9.3	-	-	309	3.58E-3	11.7	-	212
まとめ	6.6	-	7.9	6.21E-1	1.79E-4	5.56E-3	-	2.08E-3
	12.4	-	30.5	333	6.72E-2	12.8	-	212

(c) まとめ

以上より、モデル地下水水質および、立坑、ボーリング孔における実測値の地下水水質を以下のようにまとめた。

・モデル地下水水質

降水系

pH=8.5

Eh =-281 [mVvsSHE]

Cl^-濃度=1.5E-5 [mol/L]

total-Fe 濃度=9.7E-10[mol/L]

H_2S(aq)濃度=1.2E-10 [mol/L]

SO_4^{2-}濃度=1.1E-4 [mol/L]

海水系

pH=8.0

Eh =-303 [mVvsSHE]

Cl^-濃度=5.9E-1 [mol/L]

total-Fe 濃度=3.9E-3[mol/L]

H_2S(aq)濃度=2.1E-3 [mol/L]

SO_4^{2-}濃度=3.2E-5 [mol/L]

・実測値の地下水水質

pH=6.6～12.4

Eh =-415～318 [mVvsSHE]

Temp=7.9～34.6[℃]

Cl^-濃度=7.67E-4～333[mol/L]

total-Fe 濃度=5.37E-6～6.72E-2[mol/L]

NH_4^+濃度=2.94E-3～12.8[mol/L]

SO_4^{2-}濃度=1.04E-6～212[mol/L]

d. 地下水とセメント系材料との接触影響

(a) 実測値

地下水に関する文献を基に地下水とセメント系材料との接触影響を抽出した。以降に文献毎に結果を示す。

【文献③】[11]

図 5.2.3-59 は、研究坑道から掘削された観測孔（07MI07 号孔）における水質の経時変化の内、pH に関するデータである。図中の斜線は、初期の高 pH から中性域まで低下する変化のイメージを示すため本検討で追記したものである。

pH データ経時変化：初期 pH11 以上→pH8 程度のバックグラウンドの値に 1 年程度で復帰

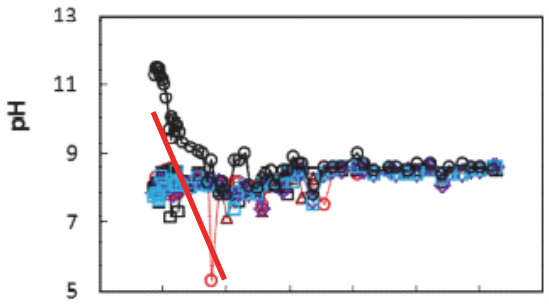


図 5.2.3-59　研究坑道から掘削された観測孔における水質の経時変化[11]に追記
（横軸 1 目盛/年）

図 5.2.3-60 は、コンクリートライナー周辺の地下水(集水リング)の pH の経時変化に関するデータである。図中の斜線は、初期の高 pH から中性域まで低下する変化のイメージを示すため本検討で追記したものである。

pH データ経時変化：バックグラウンドの値までに、短い場所で 1 年、長い場所で 3 年程度の期間を要している。図中の斜め線は本検討で追記したものである。

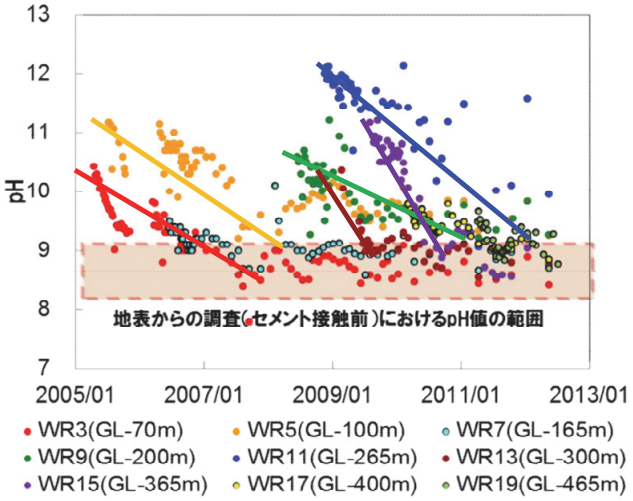


図 5.2.3-60　コンクリートライナー周辺の地下水(集水リング)の pH の経時変化[11]に追記

図 5.2.3-61 は、グラウト領域周辺の地下水の pH の経時変化に関するデータである。図中の斜線は、初期の高 pH から中性域まで低下する変化のイメージを示すため本検討で追記したものである。

pH データ経時変化：バックグラウンドの値までに、約 8 か月（0.7 年）の期間を要する。

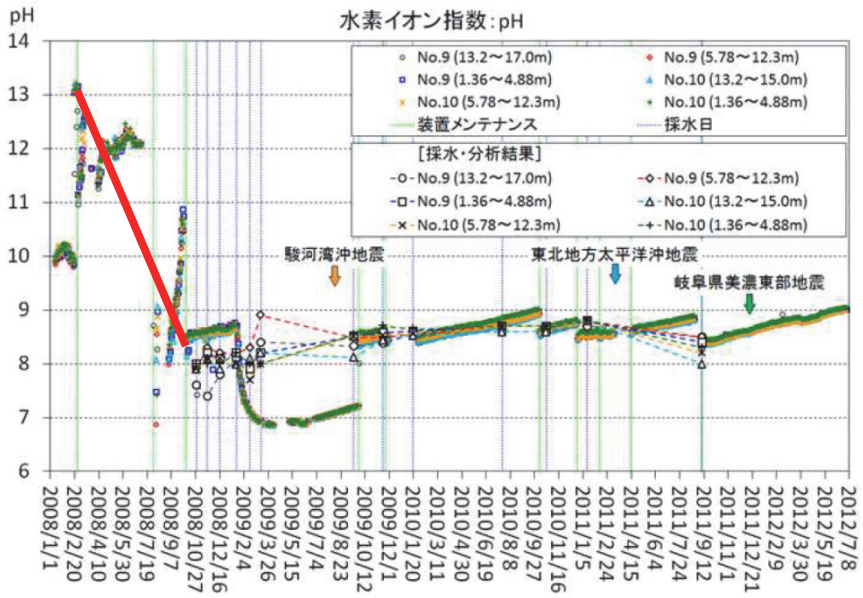


図 5.2.3-61　グラウト領域周辺の地下水の pH の経時変化に[11]追記

また、前述した図 5.2.3-50 では、09MI21 号孔における地下水の pH 観測データを示した。

pH データ経時変化：水が動かない場合には 2 年経過しても値の変化は小さい

【文献⑪】[19]

前述の図 5.2.3-57 に幌延深地層研究計画における試錐調査孔 HDB-6 孔の区間 4（深度 288.66-302.90m、区間 6 に比べ透水性が良好）および区間 6（深度 362.39-385.70m）における水質の変化の内、pH に関するデータを示した。

pH データ経時変化：pH7 前後の中性から、バッチ式採水地下水はセメンチングの影響を受けて pH9 程度とアルカリ性を示すが、7 年後には pH は中性まで低下する

(b) まとめ

(a) の実測値の検討より、坑道周辺の動いている地下水や、湧水における pH の値および経時変化を次のようにまとめた。

pH10～12 程度（セメントの影響）：初期の期間　1 年程度
pH8～9 程度（地下水程度）　　：1 年～3 年程度以降

5.2.4　人工バリアに対する影響の定量化（程度の検討）

ここまでに検討した人工バリアの状態と環境状態の検討成果に基づき、人工バリアであるオーバーパック、緩衝材と PEM 容器の変状における以下に示す定量化（程度の検討）を実施した。

・オーバーパックの変状の影響としての腐食の定量化

・緩衝材の変状の影響としての劣化、流出の定量化

・PEM 容器の変状の影響としての腐食の定量化

(1) オーバーパックの腐食影響

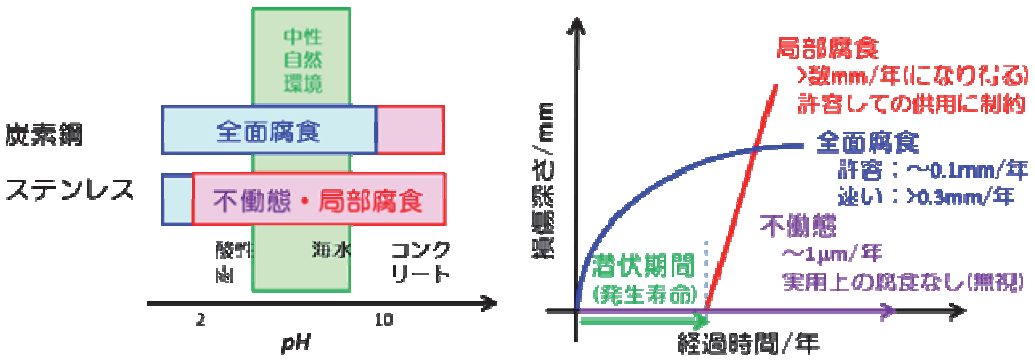
1) 検討方法

炭素鋼の代表的な腐食形態を表 5.2.4-1 に示す。炭素鋼の全面腐食と不働態・局部腐食を図 5.2.4-1 に模式的に示すように、なかでも、全面腐食が代表的な腐食形態である。腐食は、以降に示す因子が作用すると考えられるため、それらを踏まえた条件を適切に選定し、評価に反映する。

評価期間を最長 100 年程度として考えるが、炭素鋼を 30～50 年オーダーで使用してきた実績／フィールドデータ、および、鋼構造物のメンテナンス最適化のための腐食劣化診断の手順化の検討[23]の知見などを活用する。

表 5.2.4-1　炭素鋼の代表的な腐食形態

腐食形態			備　考
湿食	全面腐食	均一腐食	炭素鋼の代表的な腐食、0.1mm/年オーダー 局在化により凹凸を生じる
	局部腐食	孔食	自由表面に生じる穴あき腐食
		すきま腐食	構造上、付着物下で起きる
		通気差腐食	酸素濃淡によるアノードとカソードの分離
		脱成分腐食	合金中の特定組成の抜け落ち
		粒界腐食	粒界のみ優先的に腐食が進展
		SCC	特定の材料･環境･応力下で発生
	異種金属接触腐食		電位の貴卑、面積比に依存
	エロージョン･コロージョン		腐食作用と流れによる力学作用の競合
	微生物腐食		高い生物活性下での腐食の加速
	水素脆化		金属中に吸収された水素による割れ
	酸露点腐食		高温気相からの塩酸、硫酸などの結露
乾食	高温腐食		酸化、硫化、溶融塩腐食など



(a)　炭素鋼、ステンレスの腐食形態　　(b)　腐食深さ-経過時間関係

図 5.2.4-1　炭素鋼の全面腐食と不働態・局部腐食(模式図)

2) 設定した状態と期間中に考慮が必要な腐食に係る因子の整理

a. 水共存環境での腐食の因子

(a) pH

炭素鋼の腐食の pH 依存性は、図 5.2.4-2 に示す実測電位-pH 図[24]で記述できる。アルカリ自然水-ベントナイト系における炭素鋼の局部腐食生起条件の検討[25]を図 5.2.4-3 に示すように、pH_d(=9.4)を境に、酸性側で全面腐食、アルカリ性側で不働態化し、pH_d 近傍～10.5 程度までの弱アルカリ性環境では不働態が不安定で、孔食、すきま腐食、などの局部腐食感受性を示す。中性自然水の pH は、一般的に、炭酸/重炭酸/二酸化炭素(CO_3^{2-}/HCO_3^-/CO^2)平衡によって決り、炭酸/重炭酸系環境での局部腐食、応力腐食割れ感受性評価が精力的に行われている。ベントナイト/模擬地下水(1mmol/L[HCO_3^-]、pH=7.3)比が 10^{-2}～10^{-1} 程度のベントナイト懸濁水環境では pH=9.6～10.3 と高くなって不働態化する。コンクリート透過水など、pH=11.5～13 の強アルカリ性環境では不働態が安定し、局部腐食を起こし難い。

電位-pH 図は、熱力学的に示される平衡論をベースにしているため、直接、速度は示さないが、参考のために、電位-pH 図上に腐食速度の pH 依存性を模式的に示しておく。

代表的な腐食速度[26]を図 5.2.4-4 に示すように、炭素鋼の中性域における代表的な腐食速度：0.1mm/年を中心とする範囲では、通常用途では、腐食を許容して使う範囲で、耐食的とされる不働態域では 1μm/年オーダー、逆に不可使用とされる局部腐食の進展部は数 mm/年オーダーである。

坑道周辺の動いている地下水や、湧水における pH の値、および、経時変化は、初期の 1 年程度の期間は pH=10～12 程度、1～3 年程度以降は pH=8～9 程度(地下水程度)であった。したがって、想定される地下水環境は、地下水そのものの中性からコンクリートの影響を受けたアルカリ性まで拡がっており、ちょうど pH_d を跨ぐ範囲にある。酸性環境は処分地選定段階で除外されると考えられる。一方、高 pH の場合にはオーバーパックが不働態化し、局部腐食や応力腐食割れを引き起こしやすくなるが、緩衝材による pH 緩衝作用により、地下水の pH が 12 程度までであれば、不働態化を防ぐことができることが報告[27][28]されているため、ここでは課題の抽出とする。

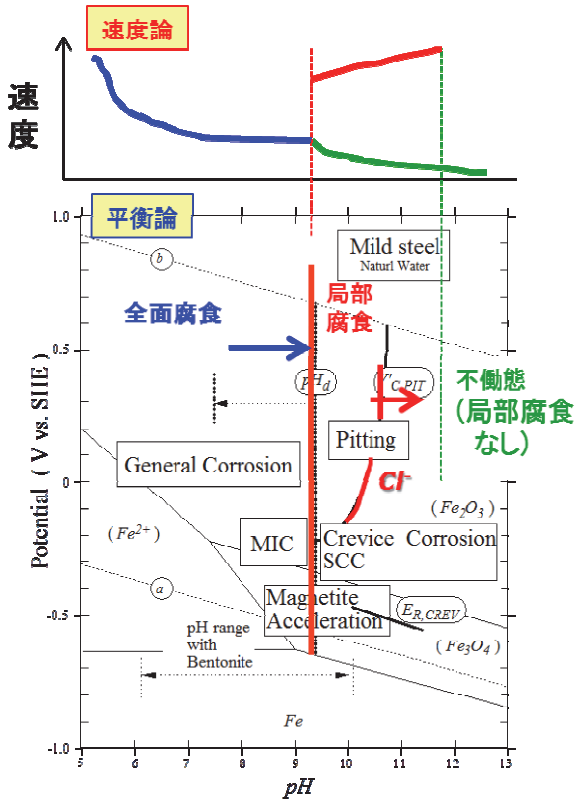


図 5.2.4-2　炭素鋼の実測電位-pH 図[24]

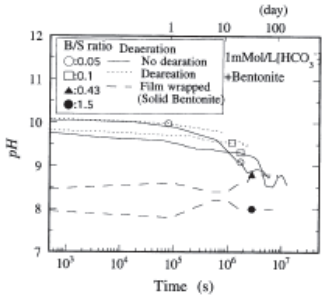


Fig. 1　Time dependency of pH with various bentonite/solution (B/S) ratios in 1 mMol/L[HCO_3^-] solutions with or without deaeration at 20°C.

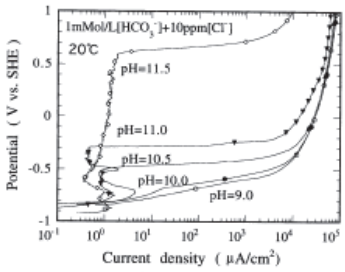


Fig. 3　Effects of pH on the anodic polarization curve in 1 mMol/L[HCO_3^-]+10 ppm[Cl^-] solution at 20°C.

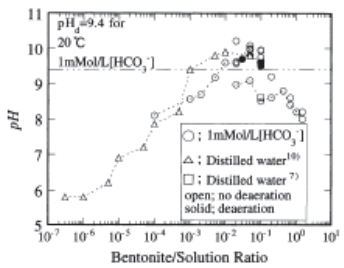


Fig. 2　Relationship between B/S ratio and pH in 1 mMol/L[HCO_3^-] solutions with or without deaeration at 20°C.

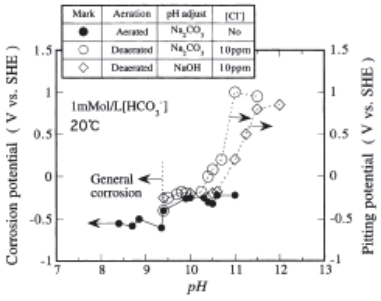


Fig. 4　Effects of pH on the corrosion potential in the aerated 1 mMol/L[HCO_3^-] solutions at 20°C, and those on the pitting potential determined by anodic polarization tests in deaereated 1 mMol/L[HCO_3^-]+10 ppm[Cl^-] solutions at 20°C.

図 5.2.4-3　アルカリ自然水-ベントナイト系における炭素鋼の局部腐食生起[25]

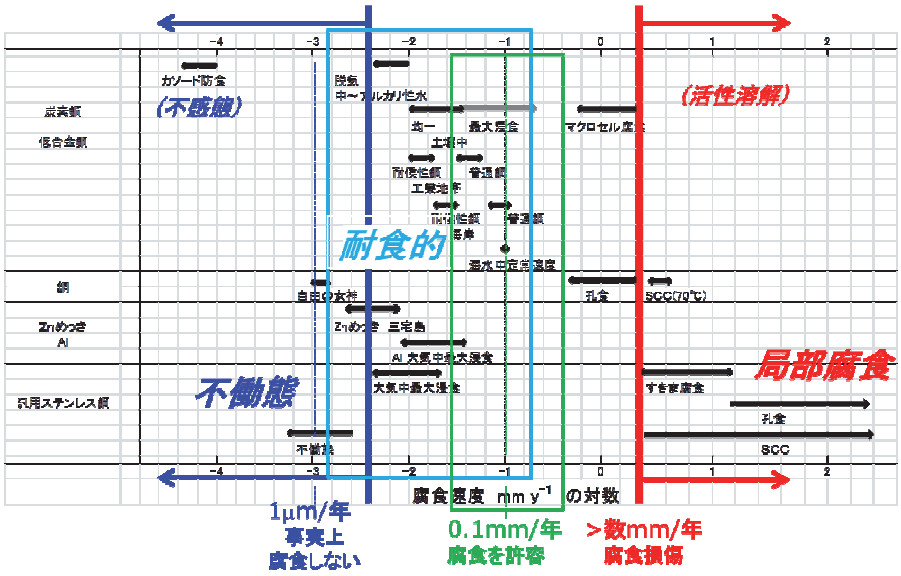


図 5.2.4-4　代表的な腐食速度[26]

(b) 溶存酸素、DO、および、酸化還元電位、Eh

腐食の原理と機構を図 5.2.4-5 に示すように、鉄の腐食は、アノード反応とカソード反応が対になって起きる。中性域における代表的なカソード反応は溶存酸素(DO)の還元であるから、腐食速度は DO に依存し、DO が高いほど速くなる。表層水は大気平衡の 8ppm(mg/L)の DO を含むが、DO が無い深地層水環境ではカソード反応が水の還元に代わる。

また、これらの反応は電荷"e-"の移動を伴うことから、電気化学的に "電流"の形で定量化が可能で、電位―電流(E-i)軸上のアノード分極曲線とカソード分極曲線の交点で平衡の浸漬電位、腐食速度を与える電流(密度)が記述される。

炭素鋼の腐食速度の DO 依存性[29]を模式的に図 5.2.4-6 に示す。カソード分極曲線は DO に依存し、アノード分極曲線(直線)とは、DO が 8.26ppm(大気平衡の DO 濃度)の場合、交点 I で交わるから、その時の $i = 2.5\times10^{-1}A/m^2$ (～mm/yr)が腐食速度を与える。DO が 1ppm に低下すると交点が L となり、$3\times10^{-2}A/m^2$ に低下する。通常の脱気(N_2 ガスバブリングなど)レベルは DO=0.2～0.3ppm 程度で、数十年の供用期間である一般の鋼構造物では、実用上、腐食が無視できる。ただし、酸素濃淡電池が出来て、アノードとカソードが分離すれば、極端に腐食する部分が出現する可能性がある。

日本各所の水道水、自然水、ミネラルウオーターなどの酸化還元電位、Eh[30] 図 5.2.4-7 に示すように、-0.4(還元性)～+0.8(酸化性)V と大きくばらついている。その中で、調査した地下水の Eh は比較的低い。

雨水やアクセス坑道からの酸化性の水の浸入を排除できない場合は影響を考慮する。

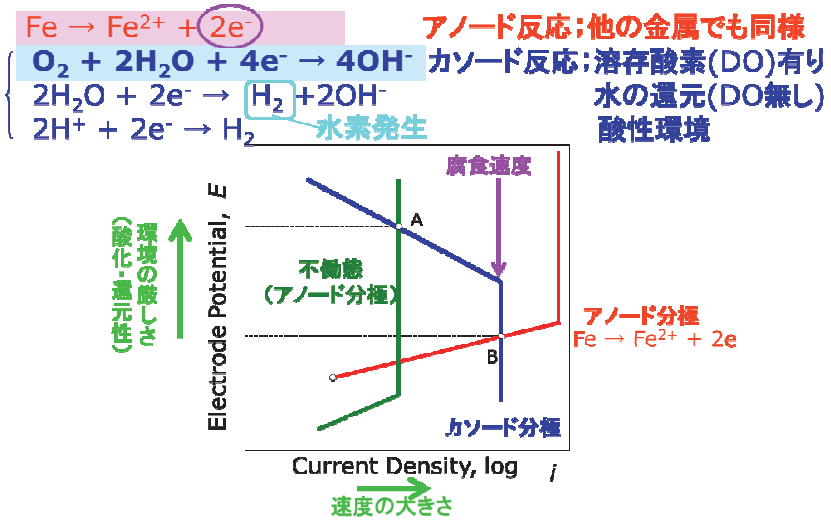


図 5.2.4-5　腐食の原理と機構

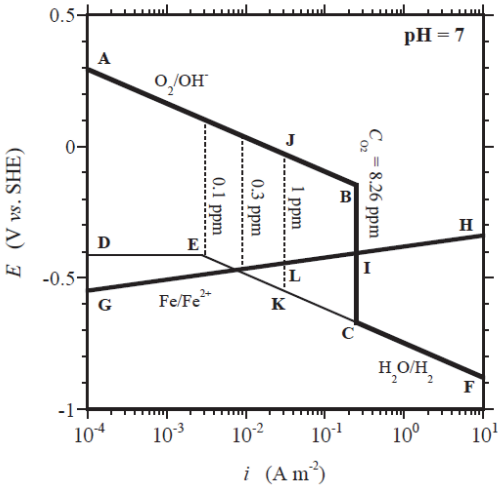


Fig. 1　中性水溶液環境における鉄の腐食反応の反応速度（電流密度）と電極電位との関係を表す Evans 図（模式的）

図 5.2.4-6　炭素鋼の腐食速度の溶存酸素濃度依存性(模式図)[29]

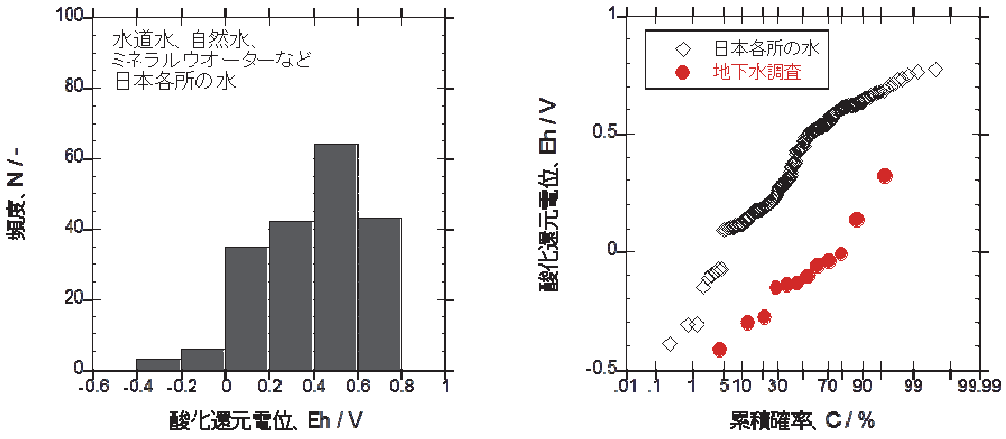


図 5.2.4-7　日本各所の水道水、自然水、ミネラルウオーターなどの酸化還元電位

(c) 温度

腐食速度の温度依存性[31][32]を図 5.2.4-8 に示す。保温材下腐食(CUI)のように、降雨などで適宜水分が供給され保水され、内部流体から加熱されることによって乾湿繰り返し状態が続く系では、腐食速度は温度に依存して大きくなる。一方、循環冷却水などの水溶液環境においても温度の上昇とともに腐食速度が高くなるが、その程度は CUI の時よりは遅い。さらに、開放系では 70℃を超えると DO の低下を伴い、腐食速度が低減する。

温度や期間について、解析結果を評価で反映する。例えば、使用済燃料コンクリートキャスク貯蔵用キャニスタ候補材(ステンレス)の塩化物応力腐食割れ特性の評価[33]に際して、キャニスタの環境変化と腐食特性評価を模式的に図 5.2.4-9 に示すように、表面金属温度が上限臨界温度以上では塩の付着に関わらず金属表面が乾燥するため、腐食環境には無い（500℃以上の高温域における溶融塩腐食は除外）が、時間とともに温度が低下し、臨界温度/湿度を下回ると、金属表面が濡れ腐食環境が整のい、SCC(腐食)発生領域となる。さらに SCC の場合は、SCC 生起下限界温度があり、貯蔵末期には、再度、SCC 感受性領域を脱する。

対象とする炭素鋼の腐食に関しては、下限臨界温度は想定しないが、高温期間は非腐食性環境として除外できる。

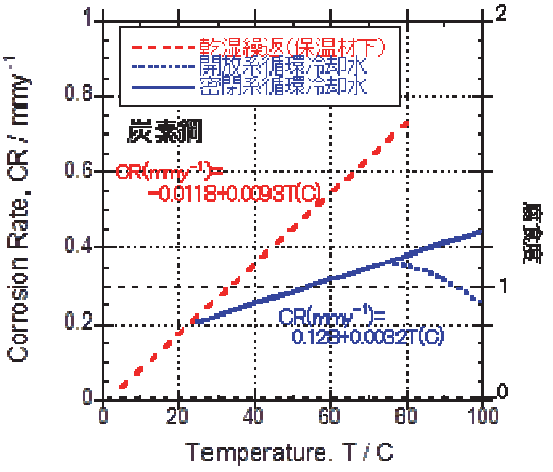


図 5.2.4-8　腐食速度の温度依存性

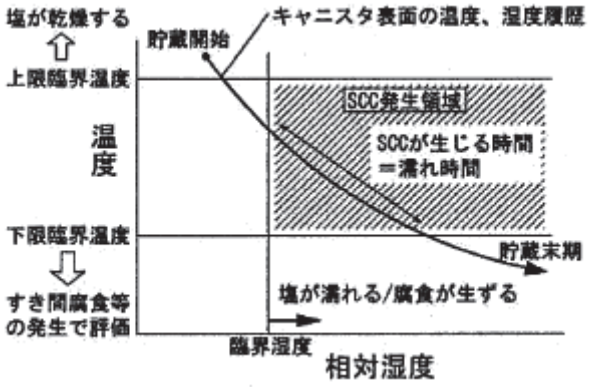


図 5.2.4-9　キャニスタの環境変化と腐食特性評価(模式図)[33]

(d) 共存イオン種

炭素鋼の全面腐食は、図 5.2.4-5 に示すアノード反応とカソード反応によって起きて、この反応に Cl^-は関与しないため、基本的には炭素鋼の全面腐食速度は Cl^-依存性が無い。一方、すきま腐食の原理[34]を図 5.2.4-10 に示すように、局部腐食では Cl^-の濃縮が関与するので、Cl^-濃度依存性が顕著になる。

放射線分解によるラジカル、過酸化水素などは、いずれも酸化剤としてカソード反応を促進するため、一般的に腐食性が増す。

炭素鋼のベントナイト混濁水環境における腐食[25]を図 5.2.4-11 に示すように、孔食の萌芽とともに、Fe^{2+}イオンと、負に帯電したベントナイトが結合して金属表面に吸着して再不働態化を妨げるため、局部腐食進展の起点となる。

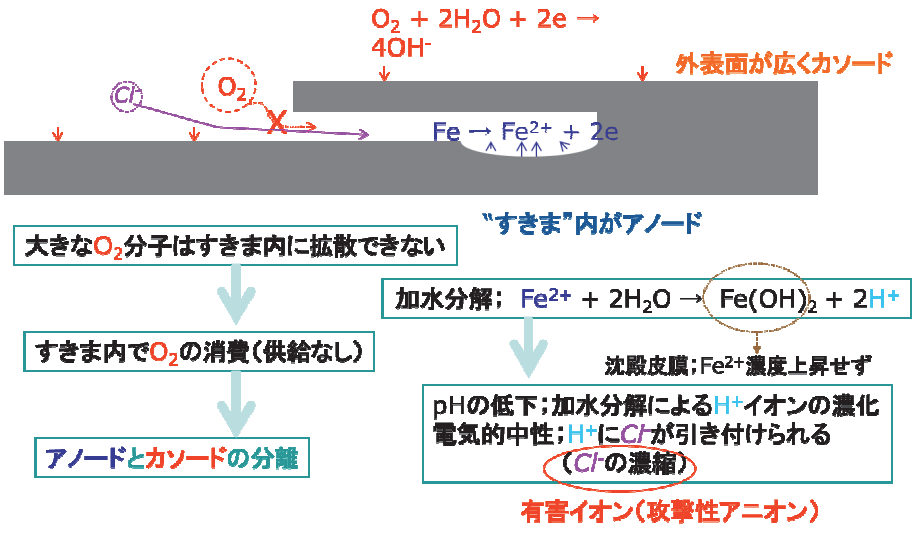


図 5.2.4-10　すきま腐食の原理[34]

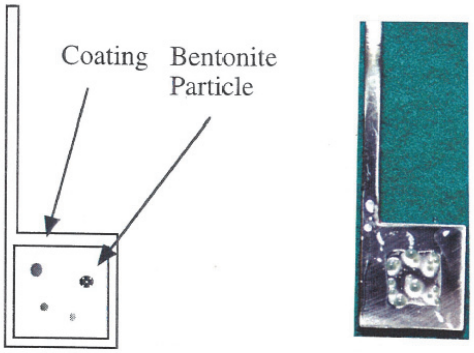


Fig 3.9 Picture of the bentonite-coagulation at pitting site after potentiostatic test of +0.244V for 5 sec. at 1mMol/L [HCO_3^-] + 10ppm [Cl^-] solution with bentonite (B/S ratio=0.1) at 20℃.

図 5.2.4-11　炭素鋼のベントナイト混濁水環境における腐食[25]

(e) 生物活性

河川水環境に設置したステンレス鋼製箱型試験体[35][36]を図 5.2.4-12 に例示するように、藻類など、および、好気性細菌が繁殖し、表面は緑･褐色になる。一方、砂礫に埋もれた下面では硫酸塩還元細菌が繁殖して硫酸(SO_4^{2-})を還元して代謝物としてチオ硫酸($S_2O_3^{2-}$)や HS^-を生成し、腐食環境が厳しくなり、pH の低下による腐食速度の増加、すきま腐食の発生･成長、硫化鉄(FeS)の生成などが起きる。

炭素鋼の場合も原理は同様であるが、もともと腐食を許容した使い方が主流で生物活性による加速も折り込まれているとの認識のため、特出しして問題とされないことも多い(=トラブル発生時には諦める)が、地下埋設環境における腐食の予測[37][38]を図 5.2.4-13 に示すように、生物活性(微生物)を前提とした腐食速度では設計は成り立たない。

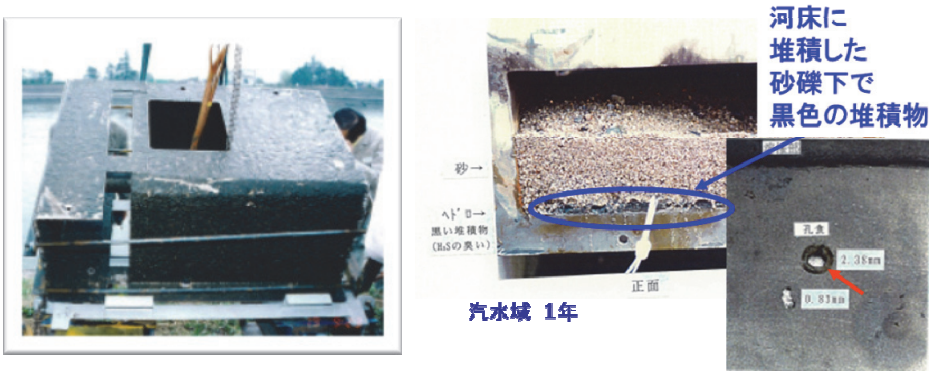


図 5.2.4-12　河川水環境に設置したステンレス鋼製箱型試験体の状況

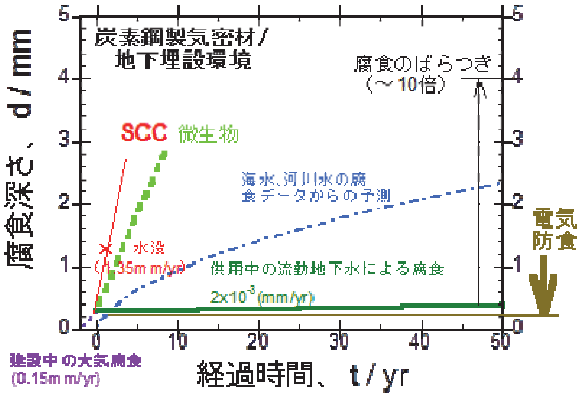


図 5.2.4-13　地下埋設環境における腐食の予測

(f) 土壌成分の影響

直接土壌と触れることを想定しないため検討外とする。ただし、掘削土を地上で保管し、埋戻し材に何割か混ぜて地下埋設されることも考えられ酸化した土壌の影響が考えられるが、定量的に不明なためここでは課題の抽出とする。

(g) コンクリートの影響

健全なコンクリート中の pH は 13 前後と高く、完全に不働態化しており、腐食しない。しかし、コンクリート透過水環境では時間の経過とともに pH が低下し、中性化していく。その過程で、Cl^-があれば、局部腐食感受性が出現する。さらに、pH_d を下回ると全面腐食領域になる。

ただし、コンクリートの影響で地下水の pH は上昇するが、1)コンクリートの環境に与える影響は時間とともに低減していくとともに、2)ベントナイトを透過することによる pH 緩衝能が作用し、金属表面の pH はコンクリートの影響が緩和されることが期待される。

(h) 流速、物質移動の制約

さびが、層として留まるか、流出するかの判断。緻密で下地保護性がある腐食生成物が膜／層状に生成すれば腐食は抑制される。

海水/淡水環境下での炭素鋼の腐食深さ[39]を図 5.2.4-14 に示すように、初期速度を r_0(mm/yr)、例えば、0.285mm/yr、速度定数を k(yr)、例えば、k=0.80yr、平均腐食深さ、a(mm)が時間、t(yr)のべき数を 1/2 とするべき乗に比例し、その速度は時間とともに低減していく。すなわち、緻密なさび層が酸素の拡散律速となり、カソード反応が抑制される。

$$(a + kr_0)^2 = 2kr_0^2 t + k^2 r_0^2$$

ただし、この形のモデル式は取り扱いが大変であるため、より簡便には、

$$a\ (mm) = a_0 \times t^{0.5}\ (yr)$$

などの形が用いられることが多い。ここで、a_0 を初速度として、a_0= 0.3(mm) at 常温などが用いられるほか、さらに、a_0 に各種加速因子依存性を入れたパラメータ、$f_{(因子)}$を設定することが可能である。

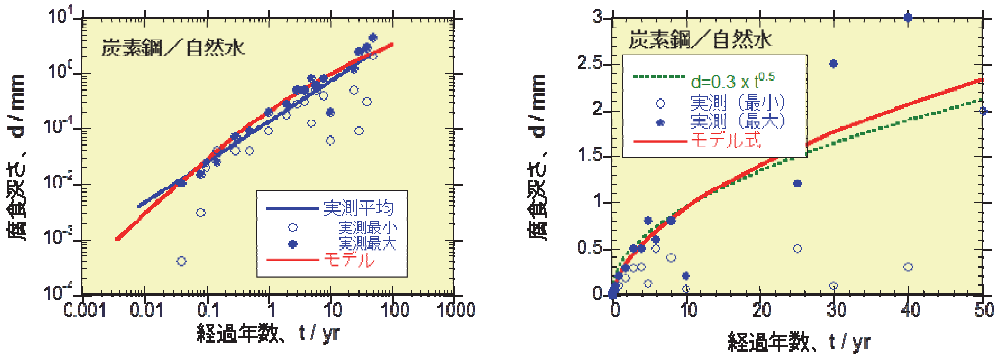


図 5.2.4-14　海水/淡水環境下での炭素鋼の腐食深さ[39]

(i) 寸法/面積効果

炭素鋼の全面腐食の進展による凹凸[40]を図 5.2.4-15 に示す。接液部が 10cm 四方の炭素鋼製平板試験片の上に電解セルを立てて定電流保持試験によって所与の通電電気量を与えて腐食させながら、試験片底部側から X-Y ステージに取り付けた超音波探触子で、適宜、腐食深さを実測した。試験終了後(左図の試験では 2A/m^2、2016hr)に重量減から平均腐食深さを算出した。全面･均一腐食であってもアノード反応とカソード反応の場所が完全には一致せず極在化をするため、深いところと浅いところが出現し、深いところは平均の 3 倍程度の深さになる。1 つの深い腐食(アノード)を支えるカソード面積が大きいほど、腐食深さは大きくなる。したがって、大きなものほど、最大腐食深さは大きくなる傾向にある。

腐食速度におよぼす試験体表面積の影響[41]を図 5.2.4-16 に示すように、局部腐食の場合は、より顕著である。

半分が全面腐食域、半分が不働態域に置かれた場合は、異種金属接触腐食と同じ考え方でその影響を推算することができる。異種金属接触による腐食の加速[42]を表 5.2.4-2 に示す。単独での腐食速度に対して、その接する金属の合金種、および、その面積比で異種金属接触腐食の加速影響が見積まれる。「自然海水、流速 1m/s 環境」における軟鋼(=鉄)の単独での、腐食速度は 0.15mm/年である。アルミと接触した場合、アルミ：軟鋼(M)の接触面積比が 1：1 であれば、20Al であるから、Al の腐食速度、単独で 0.008mm/年(不働態)が 20 倍になる。接触面積比が 10：1、すなわち、腐食する側の Al の面積が鉄の 10 倍であれば Al の腐食は 2 倍、逆に、1：10 であれば 80 倍になる。逆に、軟鋼がチタンと 1：1 で接触した場合、鉄の腐食は 2 倍になる。

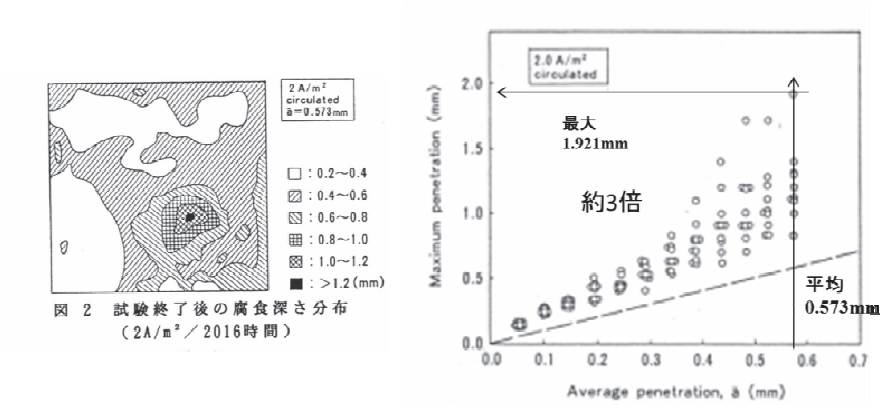


図 2　試験終了後の腐食深さ分布
（2A/m²／2016時間）

図 5.2.4-15　炭素鋼の全面腐食の進展による凹凸[40]

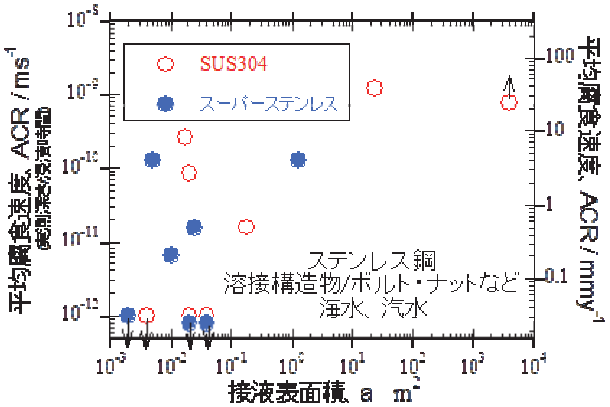


図 5.2.4-16　腐食速度におよぼす試験体表面積の影響[41]

表 5.2.4-2　異種金属接触による腐食の加速[42]

接触する金属（M）	単独での腐食速度 (mm/y)	加速率														
		炭素			チタン(Ti)			銅(Cu)			軟鋼(Ms)			アルミニウム(Al)		
		10:1M	1:1M	1:10M	10:1M	1:1M	1:10M	10:1M	1:1M	1:10M	10:1M	1:1M	1:10M	10:1M	1:1M	1:10M
亜鉛	0.05	35	20	5	35	4	2	20	10	3	20	10	3	5	2	1
アルミニウム	0.008	200	60	10	30	30	2	100*	20	2	80	20	2	1	1	1
軟鋼	0.15	10	4	2	5	2	1	7	3	1	1	1	1	2Al	20Al	80Al
ニレジスト	0.05	10	4	2	3	2	1	7	3	1	1Ms	2Ms	3Ms	2Al	20Al	80Al
鉛	0.01	10	4	1	3	1	1	25	8	1	1Ms	2Ms	5Ms	2Al	20Al	60Al
ネーバル黄銅	0.04	50	8	1	8	4	1	2	2	1	1Ms	3Ms	7Ms	2Al	20Al	100Al
アルミニウム黄銅	0.01	50	8	1	8	4	1	2	2	1	1Ms	3Ms	7Ms	2Al	20Al	100Al
アルミニウム青銅(10% Al)	0.02	25	5	1	4	2	1	2	2	1Cu	1Ms	3Ms	7Ms	2Al	20Al	100Al
ニッケルアルミ青銅	0.015	15	3	1	2	1	1	1Cu	2Cu	1Cu	1Ms	3Ms	7Ms	2Al	20Al	100Al
銅	0.03	40	8	1	10	5	1	1	1	1	1Ms	3Ms	7Ms	2Al	20Al	100Al
りん青銅（5% Sn）	0.02	25	5	1	10	5	1	1Cu	2Cu	1Cu	1Ms	3Ms	7Ms	2Al	20Al	100Al
りん青銅（10% Sn）	0.02	15	3	1	8	4	1	1Cu	2Cu	1Cu	1Ms	3Ms	7Ms	2Al	20Al	100Al
90/10 キュプロニッケル	0.02	15	3	1	5	2	1	2	2	2	1Ms	3Ms	7Ms	2Al	20Al	100Al
70/30 キュプロニッケル	0.02	10	2	1	5	1	1	1Cu	1Cu	2Cu	1Ms	3Ms	7Ms	2Al	20Al	100Al
インコネル 625	<0.005	25	5	1	3	2	1	1Cu	1Cu	10Cu	1Ms	3Ms	7Ms	2Al	20Al	100Al
モネル 400	0.005	50	5	1	15	2	1	1Cu	1Cu	10Cu	1Ms	3Ms	7Ms	2Al	20Al	100Al
ステンレス鋼（316）	0.005	3	3	1	3	2	1	1Cu	2Cu	10Cu	1Ms	3Ms	7Ms	2Al	20Al	100Al
チタン	<0.001	2	1	1	1	1	1	1Cu	5Cu	10Cu	1Ms	2Ms	5Ms	2Al	30Al	30Al
炭素（グラファイト）	—	—	—	—	1Ti	1Ti	2Ti	1Cu	8Cu	40Cu	2Ms	4Ms	10Ms	10Al	60Al	200Al

試験方法：異種金属接触腐食試験（面積比：10/1～1/10）
環境：自然海水，流速：1 m/s

(j) すきま構造、物質移動の制約

緩衝材とオーバーパックのすきま、PEM 容器と台座等（コンクリート）のすきま、等がある。弱アルカリ性環境で炭素鋼が不働態化すれば、すきま腐食が生起する可能性がある。

(k) 放射線影響

放射線の影響を分子レベルで見た場合、放射線のエネルギーがその分子に直接吸収されて障害をおよぼす直接作用と、他の分子がエネルギーを吸収し活性生成物を作り、それが標的分子と反応して標的分子に障害を及ぼす間接作用に分けることができる。放射線は材料、および、環境に影響を与える[43]。

材料側因子は、照射ぜい化、および、照射誘起応力腐食割れ(IASCC)などが挙げられる。BWR 相当の高温水環境の SUS304 ステンレス鋼は 5×1024n/m²（E＞1MeV）程度から IASCC が発生するなどのしきい値が報告されている。

環境側因子は、水に対して放射線が作用し、水分子のイオン化や励起が起きる。水分子のイオン(H_2O^+)は非常に不安定で、10～15 秒以内に分解して HO・と H_3O^+とを生ずる。励起された水分子(H_2O^*)は開裂して HO・と H・を生じる。水分子から飛び出した電子は他の水分子の間に捕らえられて水和電子 e_{aq}^-を生じる。中性の水中での半減期は 2.1×10^{-4} 秒である。

ラジカル同士は反応して、

$$H\cdot + HO\cdot \rightarrow H_2O$$

の中和反応のほかに、

$$H\cdot + H\cdot \rightarrow H_2$$

$$HO\cdot + HO\cdot \rightarrow H_2O_2$$

など、分子状生成物 H_2、H_2O_2 を生ずる。電離が疎なX線やγ線のような放射線では HO・、H・の密度も低く、H_2、H_2O_2 は生じにくい。一方、α線のような密な放射線ではラジカルが拡散する前に上記の反応によって H_2、H_2O_2 を生じやすい。

これらが溶液中の溶質と反応することにより化学的過程が起こる。HO・及び H_2O_2 は酸化力が強く有機物と反応して間接作用の主因をなすと考えられる。一方、e_{aq}^-は前述したように強い還元力を有する。水溶液中では

$$e_{aq}^- + H^+ \longleftrightarrow H\cdot$$

の平衡があるので、pH4～9 では e_{aq}^-と H・の両者が共存し、pH2 以下では H・が重要な還元剤となる。

酸素の存在は反応を質的にも量的にも変化させ、水和電子や水素原子と反応してスーパーオキシド（ハイドロペルオキシラジカル、$HO_2\cdot$）を作ることである。

$$e_{aq}^- + O_2 \rightarrow O_2^-$$

$$H\cdot + O_2 \rightarrow HO_2\cdot$$

HO_2・は酸化力が強く、核酸、蛋白質、脂質等の生体有機分子との反応により、H_2O_2 や、有機分子の不安定なアルコキシルラジカル(RO・)を作る。

以上のことから、本来は実際に放射線照射を行って(腐食)挙動を評価すべきではあるが、第一義的には、腐食試験は酸化剤として H2O2 を添加した系での実験・評価で代替出来る。ただし、生物活性の放射線照射による変化(RO・生成など)は代替出来ないと考えられる。

b. 大気系腐食の因子

(a) 海洋性湿潤大気環境における腐食因子

炭素鋼の海洋性湿潤大気環境における 1 年間の曝露試験に基づく腐食度[44][45]は、以下の関係で例示されるように、温度(気温)、湿度、海塩粒子量(飛来海塩量：式の単位が ppm)、および、亜硫酸ガス濃度(付着量：式の単位が mdd)が高い/多いほど腐食が加速され、降水量の影響は“マイナス(-)”であるから、降雨によって抑制される。すなわち、鋼は、炭素鋼表面に付着した海塩粒子や硫酸痕など、表面の水膜を維持させる物質を洗い流す効果が大きい。

腐食度 1yr(mdd)= -52.67+ 0.484×(気温、℃) + 0.701×(湿度、%)
-0.022×(降水量 mm/yr) + 0.075×(海塩粒子 ppm)
+8.202×(亜硫酸ガス mdd)

なお、腐食速度、mdd (mg/dm²/day)は、10cm 四方の板を大気環境に曝露して、曝露前後の重量変化、⊿mg を測定し、曝露面積、100cm²、および曝露日数、day で除したもので、実際の曝露試験に即した値である。腐食速度の比較に際しては、”Fe：10μA/cm² = 0.116mm/年 = 0.104g/m²/h = 25mdd”で換算[46]した値を用いることが多い。例えば、地下の閉空間の環境として、気温：30℃、湿度：100%、降雨：無し、海塩:無し、亜硫酸ガス:無し、を代入し、

腐食度(mdd)= -52.67 + 0.484×30 +0.701×100= 31.95(mdd)= 0.15(mm/yr)を得る。

炭素鋼の全国等腐食線図[47]を図 5.2.4-17 に示すように、太平洋に面した外洋、外洋の中でも南側で腐食速度が大きくなっている。

炭素鋼の大気腐食の進展[37]を図 5.2.4-18 に示す。図中の 2 つの○は上記の腐食度の計算値、実線は臨海工業地帯における曝露試験データに基づく。

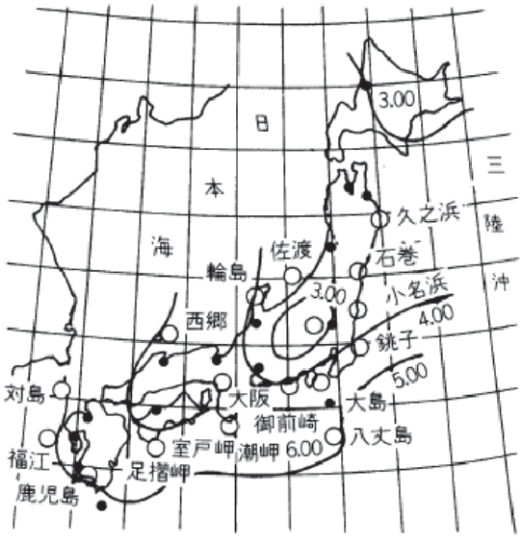


図 5.2.4-17　炭素鋼の全国等腐食線図[47]

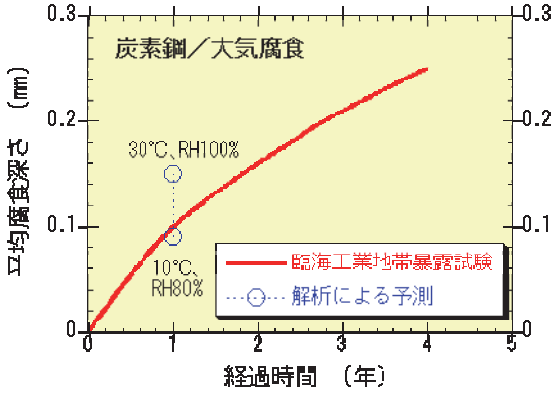


図 5.2.4-18　炭素鋼の大気腐食の進展[37]

(b) 保温材下などの制約下の腐食

保温材下腐食[48] (CUI, Corrosion Under Insulation)は大気腐食の 1 種で、外部から進入した雨水または本財内部で凝縮した水分が配管表面に形成する水膜を通じて鋼材の表面に腐食電池が形成する。カソードでは還元反応(主に水に溶け込んだ酸素の還元)、アノードでは酸化反応(主に鉄の溶解)が起る。水の供給源は、1)降雨や冷却水の飛沫など、外部から浸入する水、2)温度差による結露、3)保温材と鋼表面間の微細なすきまでの毛管凝縮による水分の結露、4)海塩粒子および保温材などからの溶出不純物イオンの化学濃縮(潮解)による水分の結露があり、水膜形成プロセスでは大気中の相対湿度が重要となる。さらに、a)水の供給源が非常に多様であり、水の浸入箇所と水膜形成箇所は必ずしも一致せず、予測し難い、b)一般的な大気腐食より湿潤時間が長く継続する、c)一般的な大気腐食よりも腐食速度が大きい、d)全面腐食ではなく、腐食箇所が局在化しやすい、などの特徴がある。その因子として、水膜の保持あるいは厚み分布、水膜中に溶解する不純物、保温材の物質移送と外装板、運用による温度変化、マグネタイ

トなどの腐食生成物による加速、などが考えられている。

一般的に、1)濡れ乾きは、緻密な皮膜になり難く、濃縮も繰り返すため、腐食環境として厳しい。2)湿度が高いほうが濡れやすいが、ある程度低い方が濃縮する。3)温度が高いと腐食しやすいが、高すぎると DO が低下し、乾きやすいため、温度、湿度、および、乾湿の影響は複雑で、4)環境も均一とはならないため、保温材下腐食の状況は大きくばらつく。化学プラントにおける保温材下腐食の実測腐食速度の確率による整理[49]を図 5.2.4-19 に示す。機器を塔、熱交換器、槽、配管に分け、温度区分を API581 のテクニカルモジュールに従って-12～16、16～49、49～93、93～121℃の 4 区分に分けている。各腐食速度を二重指数分布で整理した結果を左図に示すように、熱交換器、槽、配管はいずれも直線性の高い分布を示しており、同じ母集団に属している。一方、塔の腐食速度分布は傾きが小さい。各機器、温度での腐食速度の代表値は、累積 90%確率における腐食速度としおり、概ね、0.1～0.3mm/年の範囲である。保温材下腐食テクニカルモジュール[50]を

表 5.2.4-3 に、用いられている腐食速度[51][52]を表 5.2.4-4 に示す。このテクニカルモジュールでは、設置環境、海岸からの距離、設備設置温度を選択肢から選ぶことで基本腐食速度、Ra(mm/yr)を決める。次に環境因子として、構造の複雑さ、周辺環境因子、保温材保護構造因子、保護状態因子、支持構造因子、コーテングの質と劣化因子、検査の効果因子を選定し、それぞれの係数、C1～C7 を決め、それらの積から対象部位の CUI 減肉速度、Rc(mm/yr)を求め、使用期間、Y(yr)との積で推定減肉量、LC(mm)を算出する。

なお、金属側温度>>大気側温度(水より熱容量が小さい)が実現すれば、乾いて腐食しない。60℃/35%RH の恒温恒湿保持環境に置いた苦汁塩滴試験で SCC が発生する SUS316 は、試験片を 60℃に加熱して 30℃/90%RH の恒温恒湿槽中に保持しても、僅かに発錆したのみで SCC は発生しなかった[53]。

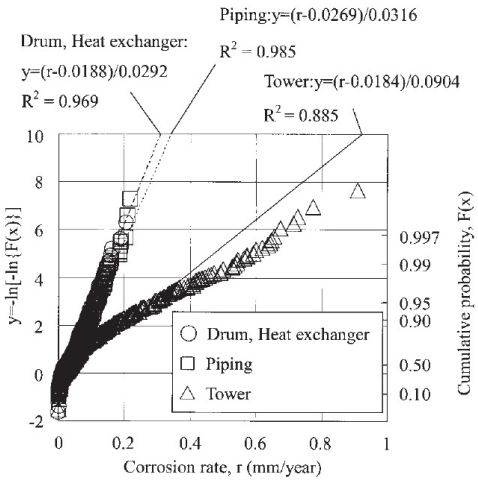


Fig. 4 Dependence of CUI corrosion rate on type of equipments.

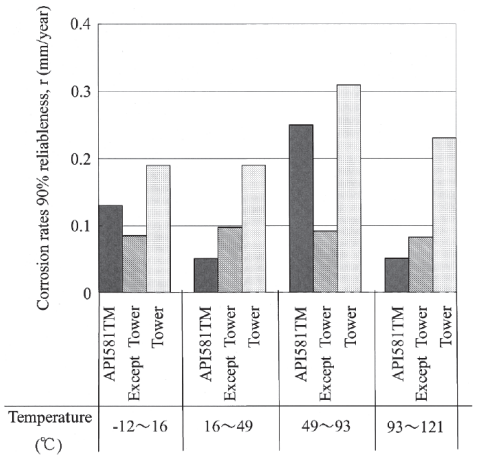


Fig. 6 Comparison between API581 CUI technical module and the result of CUI corrosion rates by this study.

図 5.2.4-19　化学プラントにおける保温材下腐食の実測腐食速度の確率による整理[49]

表 5.2.4-3　保温材下腐食(CUI)判定テクニカルモジュール[50]

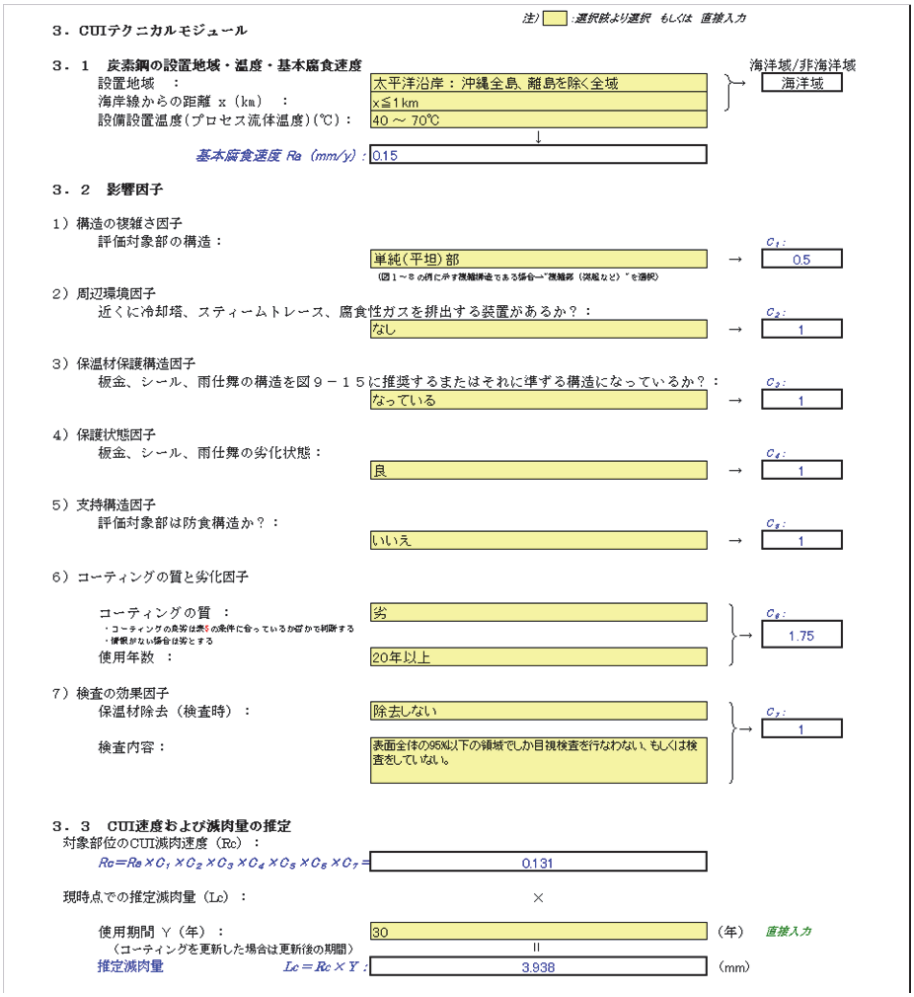
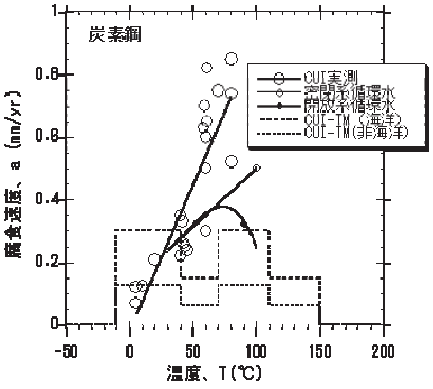


表 5.2.4-4　保温材下腐食テクニカルモジュールに用いられている腐食速度[51][52]

温度　℃	基本腐食速度(mm/y)	
	海洋域	非海洋域
～ -10	0	0
-10 ～ 40	0.3	0.125
40 ～ 70	0.15	0.06
70 ～ 110	0.3	0.125
110 ～ 150	0.15	0.06
150 ～	0	0



c. 材料因子

流動水中の炭素鋼の腐食は溶存酸素の拡散に律速されるため、合金元素の影響は少ない。

流動水中における炭素鋼の腐食速度におよぼす合金元素の影響[54][55]を図 5.2.4-20 に示すように、Al、Cr などが有効で、S が有害で、有効な元素の添加によって腐食速度を 1/2～1/3 に減らすことができる。一方、大気腐食には Cu、P、Cr が有効[56][57]である。

溶接部の選択腐食(部位毎に明瞭な腐食速度の差が存在し、腐食部位外が全く腐食しないことではない[58]は、材料側のマクロ的な不均一に起因する。母材部、溶接金属部、ボンド部、HAZ は、それぞれ単独に存在する場合であれば、アノード分極が異なっても、酸素の鋼表面への拡散が律速するため、腐食速度は同一となる。しかし、それぞれ単独時の腐食電位は合金種/添加元素の種類と量、組成、ミクロ組織、表面の性状に依存して数十 mV 程度の差があり、アノード部(多くの場合、溶接金属)の腐食が促進される。ボンド部 HAZ では、ベイナイト中の炭素過飽和となったフェライト、島状マルテンサイト、粒界などに生成する活性な硫化物からなる不純物フイルムなど、選択腐食の起点となる。したがって、溶接部：母材、HAZ、溶金、化学種、%C、組織：フェライト/パーライト、凝固組織など、表面仕上げ、酸洗、溶接時の酸化皮膜の有無、材料の製造法：圧延(圧延面、端面)、鍛造、鋳造、溶接法、および、冷間加工などの影響に共通して、電位差を小さくすることが腐食の抑制に効果的である。

表 3.10　流動水中における鋼の耐食性におよぼす合金元素の影響[54](35°C)

環境	効果＼熱処理・流速 m/s	900°C 焼なまし			焼ならし
		0	0.25	2	2
水道水	有効		Al, Cr	Al, Cr	Al, Cr
	有害		C	(S)	(S)
	交互作用		Ni×Cu		
3%食塩水	有効	Al,Cr,P,Mn	Mn	Al, P, Si	Al
	有害	C	Cr(>5 %)		
	交互作用	Mo×C	S×Cu	Mo×C	

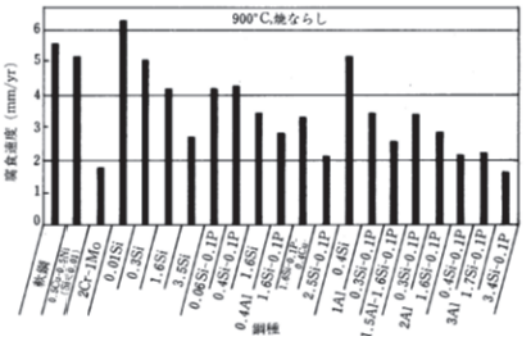


図 5.2.4-20　流動水中における炭素鋼の腐食速度におよぼす合金元素の影響[54][55]

d. フィールドデータの活用

炭素鋼の自然環境での長期間の使用実績を調査した。護岸用鋼矢板の 50 年までの腐食実測結果､および､短時間側の実験室データに基づいた腐食状況[37]を図 5.2.4-21 に示す。なお、炭素鋼の標準的な腐食深さ－時間関係から推算される腐食深さを併せて記した。長期間の実測腐食調査の趣旨、および、人間(測定者)の特質として、腐食が大き目の位値を測定に反映させる傾向が否定できないため、平均的な腐食量よりも大きな値が得られている可能性がある。それでも、50 年までの実測データは 0.1mm/年は越えていない。一方、腐食が小さなものは 0.01mm/年程度に過ぎず、実際には、もっと小さな腐食の割合は更に高いものと推察される。

海底トンネルの鉄道レールの腐食例[59][60][61]を図 5.2.4-22 に示す。鉄道レールは無塗装で使用され、湿潤大気環境にあるが、海水の漏水が激しく液溜まりに成っている場所があると推察される。さらに、列車の走行により繰り返しの荷重が負荷されている。した

がって、鉄道トンネルの場合、最大で 1mm/年の速い腐食速度を示す“部分”がある。一方、0.05mm/年程度の遅い腐食速度を示す部分もあり、環境や力学条件などの運用条件によって、かなりのばらつきを示している。

船齢 55 年の経年船の船体外板の腐食深さの分布[62]を図 5.2.4-23 に示すように、調査点の 70%は 1mm/55 年(～0.02mm/年)で、中央値が 0.65mm、平均値が 1.3mm、最大値が 6.6mm（～0.12mm/年)となっている。なお、炭素鋼の標準的な腐食深さ、d(mm)－時間、yr 関係式に t=50(yr)を代入して得られる、d_{50yr} は 2.1mm であるから、海水中の腐食環境は比較的安定していると言える。なお、船の外板であるから、環境露出面は塗装されており、気水(接水)界面は変動する。

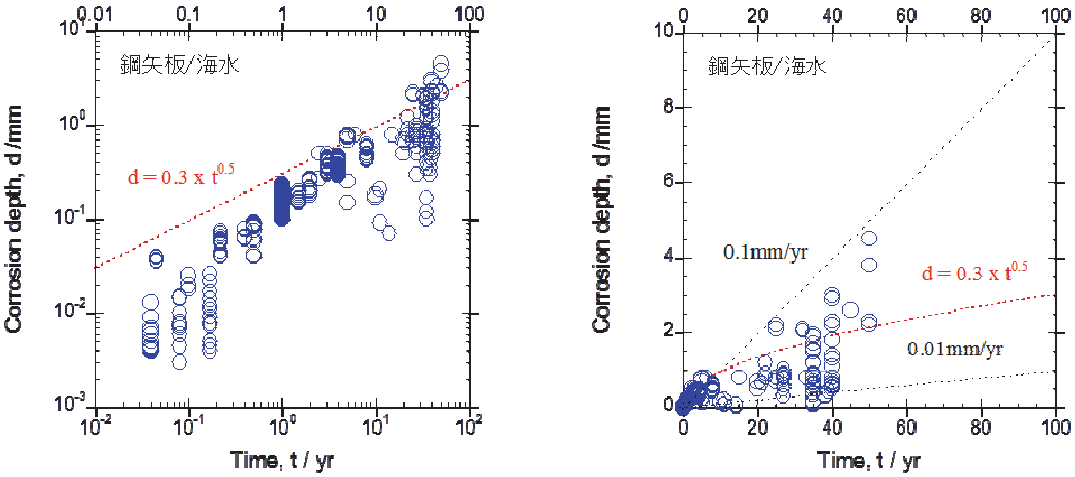


図 5.2.4-21　護岸用鋼矢板の腐食[37]

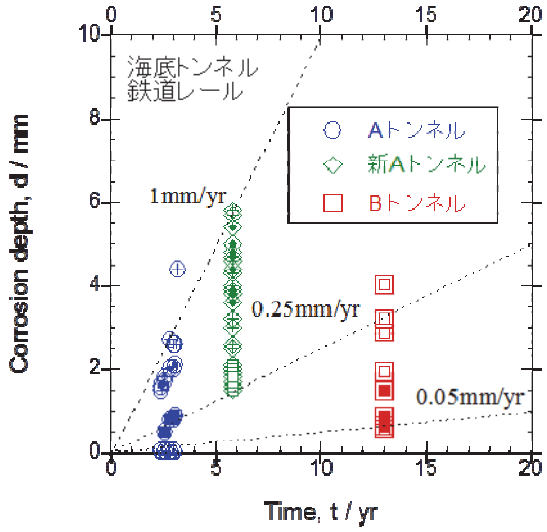


図 5.2.4-22　海底トンネルの鉄道レールの腐食[59][60][61]

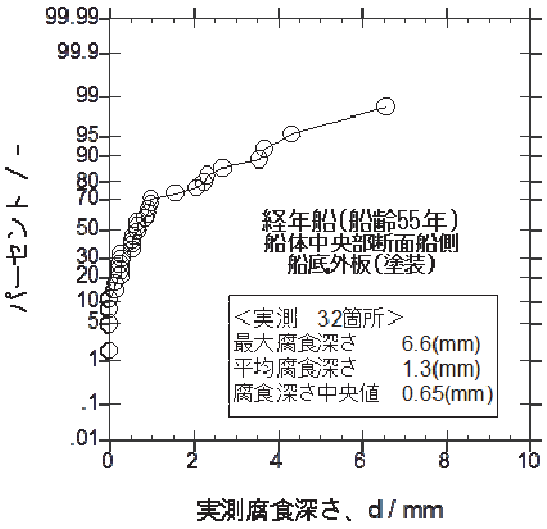


図 5.2.4-23　船齢 55 年の経年船の船体外板(塗装)の腐食深さ[62]

e. 評価における考え方

回収性の維持、長期安全性の確保の観点から、腐食の定量評価が困難な場合には腐食しないように対策を立てることになる。

OP の回収性を考えると、評価上は把持部（ガラス固化体のような吊り部）の溶接部が厳しくなる可能性があるため、処分の長期安全性とは異なるが評価指標に入れることの可否を検討する。なお、構造検討の範囲は、課題とする。

その手順として、まず、要求すべき／問題にすべき機能(の喪失)を想定する。例えば、

- 貫通孔があく(特に、PEM 容器の場合、密閉性は要求されていない)
- 力学的な必要強度(厚さ)を割り込む
- 錆と凹凸によって、滑らない、蓋が開かない、ボルト/ナットが回らない、など
- 錆びていると言われる(工学的には、問題ないレベルの腐食のみ)

一方、想定する条件として、オーバーパック(PEM 容器など、金属)と接触する

- 物質：大気、水、ベントナイト
- 環境：ドライ、湿潤、接水
- 状況：全体(均一の濡れ)、局所的(乾燥ベントナイトの一部だけ濡れているなど)

これら組み合わせの状況となる。環境面からは、ドライ(乾燥)であれば、腐食環境が整わないため腐食しないのに対して、湿潤、および、接水環境では腐食し得る。腐食(湿食)の基本は水(H_2O)と溶存酸素(O_2、もしくは、DO: Dissolved Oxygen）であり、

- 腐食反応：アノード反応、カソード反応

のバランスを保って進行する。その中で、温度、pH、電気伝導度、酸化･還元性などの水質、水の量(水溶液/水没環境、湿潤環境による水膜、など)、および物質移動の律速(水膜の厚さ、ベントナイトなどの物質など)で、その腐食の大きさ(駆動力)が決る。したがって、

- 接水：温度 – pH(水質) －DO/酸化･還元性/Eh － 腐食生成物
- 湿潤：気温 – 湿度 － 表面吸着性物質の量/濡れ性－ 腐食生成物 – 空気の流れ

によって、基本的な腐食性を見積もることが可能である。

また、対象とする一連の系が、ほぼ均一の環境下にあるのか、もしくは、局所的な環境の違いがあり、その環境差が腐食進展の駆動力になり得るか否かを考慮する必要がある。

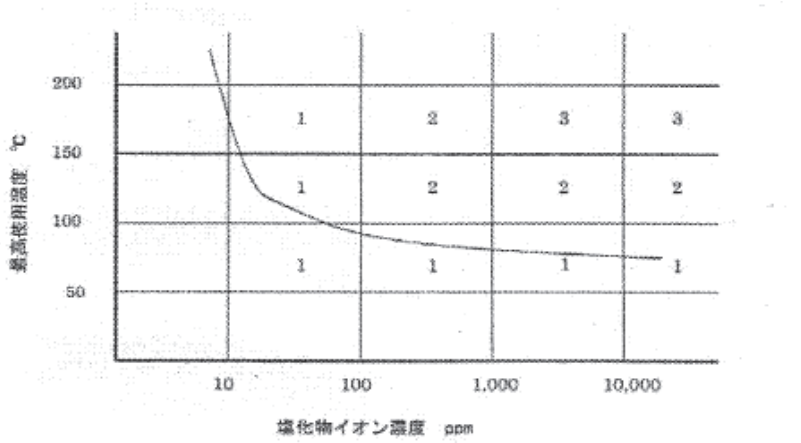
個別腐食劣化機構に関する腐食診断の因子[63]の例を表 5.2.4-5 に示す。炭素鋼の水溶液モデル、湿潤大気モデル、および、CUI テクニカルモジュールによって、考慮・反映させる因子が変わっている。なお、各モデル間で□で関連性のある因子を繋いだ。

汎用ステンレス鋼の中性域における SCC 発生限界線図[64]と感受性ランク[65]を図 5.2.4-24 に示すように、環境を温度：50℃ごと－塩化物イオン濃度：10 倍ごとに区分して領域を区切って、劣化レベル：0～3 を定義し、感受性をランク付けすることが行われている。なお、原典[50]では、劣化レベルが高い側で数字が小さくなっているが、領域図に合せて劣化レベルの数字の大小の向きを反転させている。

また、代表的な腐食データベースである CORROSION DATA SURVAY[66]では、図 5.2.4-25 に示す温度：100°F ごと、濃度：20%ごとの腐食判定プラットホームを用いた 4 段階評価を採用している。●は 0.05mm/yr 以下で耐食的であるため、劣化レベルを 0 とし、以下、順次、1、2、3 を割り振ることができる。

表 5.2.4-5　個別腐食劣化機構に関する腐食診断の因子[63]

水溶液モデル	湿潤大気モデル	CUIテクニカルモジュール
$a=a_0 \times t^{0.5}$	$a=a_0 \times t^{0.5}$	$a=a_0 \times t$
温度	気温	海洋域／非海洋域
pH	湿度	海岸からの距離
溶存酸素濃度	降水量	流体温度
水質	海塩粒子	構造の複雑さ
流速	亜硫酸ガス	周辺環境
密閉系・開放系		保温材保護構造
乾湿繰り返し		保温材状態
凹凸（局在化）		支持構造
		コーテング質，劣化因子
		検査の効果
使用年数	使用年数	使用年数

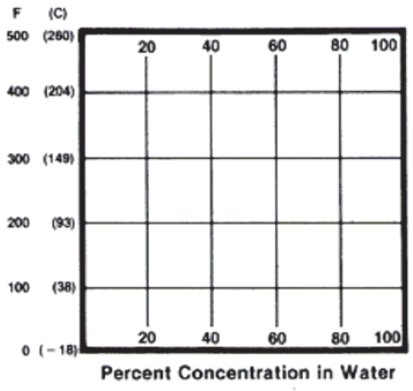


Group 1 の材料の SCC 発生限界線図と感受性ランク図（pH が 5 以上 9 未満の場合）

劣化レベル	破損確率	寿命	破損感受性
3	>0.01	≦2d	高
2	>0.001,≦0.01	>2d,≦4d	中
1	>0.0001,≦0.001	>4d,≦10d	低
0	≦0.0001	>10d	微

d:定期検査間隔

図 5.2.4-24　汎用ステンレス鋼の中性域における SCC 発生限界線図[64]と感受性ランク[65]



Average Penetration Rate Per Year

Code		Mils	Inches	mm
●	<	2	0.002	0.05
○	<	20	0.020	0.508
□	{	20-50	0.020-0.050	0.508-1.27
X	>	50	0.050	1.27

Footnotes for Data Squares

1. Pitting
2. Stress Corrosion Cracking
3. Intergranular Attack
4. Crevice Attack

劣化レベル
0
1
2
3

図 5.2.4-25　腐食データベースによる腐食判定ホーム[66]

3) 影響の定量化（程度の検討）

a. 埋戻状態の設定

腐食評価の観点から埋戻状態を図 5.2.4-26 に模式的に示すように、オーバーパック(OP)は、1) 空気(大気)、2) 水(地下水)、もしくは、3) ベントナイト、と接触しているとする。大気、および、ベントナイトと接している場合、a) 乾燥、b) 湿潤、c) 濡れ、の状態を取り得て、乾燥の場合は腐食性が無いと見込まれる。したがって、第一義的には、1) 空気の場合は大気腐食モデル、2) 水の場合は水溶液モデル、3) ベントナイトの場合は保温材下腐食(CUI)モデルで評価出来る。

炭素鋼の腐食の進展予測の例[63]を図 5.2.4-27 に示す。環境を 60℃として、湿潤大気腐食モデル、水溶液腐食モデル、CUI モデルを比較した。

(a) 湿潤大気腐食モデル

$a(mm)=a_0(X)\times t^{0.5}(yr)$、

a_0(60℃、R.H.70%、1000ppm[Cl]) = 0.53(mm/y)

(b) 水溶液腐食モデル

$a(mm)=f(凹凸)\times a_0(T)\times t^{0.5}(yr)$

f(凹凸)=1,

a_0(60℃) = 0.54(mm/yr)

(c) CUI モデル

$a(mm)=a_0\times t(yr)$,

a_0(非海洋域) = 0.025(mm/yr)、

a_0'(環境補正) = 0.13(mm/yr)

60℃、30 年の保温材下腐食深さは、それぞれ 1) 2.9mm、2) 3.0mm、3) 3.9mm と計算され、短時間側では時間のべき乗則を用いる 1)、2)のほうが大きく、逆に、長時間側では線形則を用いる 3)の方が大きく見積もられ、17 年前後でほぼ同じ深さとなっている。

また、i) 全体が同一環境、ii) 局所的に濡れるなどの不均一環境、の両者の可能性があり、後者の場合、局所的な加速によって、平均的な均一腐食速度よりも速い速度を取る可能性がある。

地下水の pH の変化[11]を図 5.2.4-28 に例示するように、初期にはコンクリートの影響を受けて pH13 程度の高い pH を示すが、pH は徐々に低下して中性となり、1～3 年でその影響が認められなくなっている。さらに、ベントナイトの緩衝作用（図 5.2.3-43 参照）が認められる場合には、OP 表面の pH 高くならないと推測されため、基本的に、中性地下水と設定する。結露水の水滴も同様に、中性とする。ただし、液滴の滴下などの局所的な濡れを考慮する際は、より長時間にわたって高 pH 維持される危惧がある。

オーバーパックの埋設環境における温度解析を図 5.2.4-29 に例示するように、初期の 40～60℃から温度上昇をして 0.02 年(200hr)後から 80～120℃を超え、100 年以上にわたって高温状態が持続する。その後、100～200 年後に再度、80～100℃以下になる。開放系であれば、水は数十℃を超えて加熱されると蒸発し始め、金属表面は乾燥して、80～100℃以上では腐食性を失う。一方、閉鎖系では高温･高圧水となって腐食性は持続される。また、OP 表面温度と OP に接する環境側の温度の差の有無によって、腐食性か否かが変わってくる。

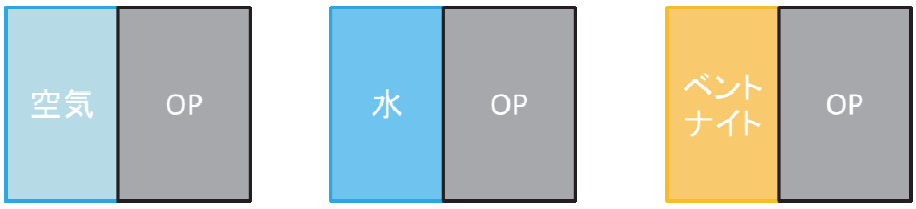


図 5.2.4-26　腐食評価の観点から埋戻状態(模式図)

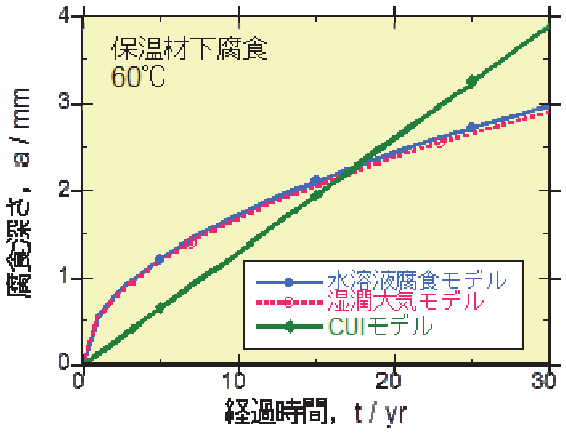


図 5.2.4-27　炭素鋼の腐食の進展予測例[63]

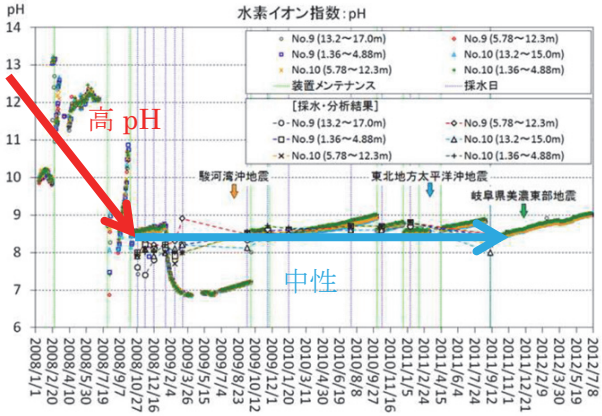


図 5.2.4-28　地下水の pH 変化(例)

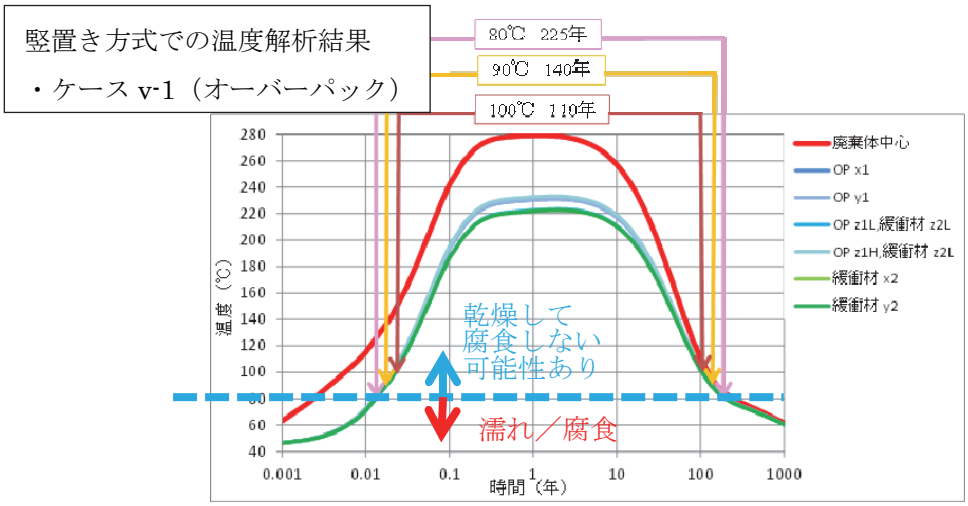


図 5.2.4-29　オーバーパックの埋設環境における温度解析(例)

b. 空気と接する場合の腐食見積

湿潤大気と接する炭素鋼の腐食速度は、気温－湿度－表面吸着性物質の量/濡れ性で評価され、腐食生成物、空気の流れの有無による影響などを受ける。大気腐食速度の環境依存性式[44]

腐食度 1yr(mdd)= -52.67+ 0.484×(気温、℃) + 0.701×(湿度、%)
-0.022×(降水量 mm/yr) + 0.075×(海塩粒子 ppm)
+8.202×(亜硫酸ガス mdd)

にしたがって、温度、および、湿度をパラメータとした空気と接する場合の腐食見積結果を表 5.2.4-6 に示す。ここで、降水量、海塩粒子、亜硫酸ガスの影響はいずれもゼロとした。塩化物濃度をパラメータとした 10 年後の腐食深さも合せて計算したように、濃度が高くなると影響が大きくなる。なお、もともとのデータベースは大気曝露試験結果であることから、高温域への外挿は、本来、適用範囲外の参考値である。さらに、高温域では金属表面に水膜が維持されず非腐食環境となる可能性があるため、90℃以上の計算値は薄字での記載とした。

表 5.2.4-6　空気と接する場合の腐食見積(温度、湿度)

温度(℃)	湿度(%)	腐食速度 (mm/yr)	腐食深さ(mm)			塩化物の影響下、10年後(mm)		
			10年後	50年後	100年後	10ppm	100ppm	1000ppm
60	40	0.018	0.06	0.12	0.18	0.14	0.15	1.00
75	40	0.047	0.15	0.33	0.47	0.22	0.24	1.10
90	40	0.076	0.24	0.54	0.76	0.28	0.33	1.19
105	40	0.105	0.33	0.74	1.05	0.33	0.43	1.28
30	60	0.016	0.05	0.11	0.16	0.14	0.14	1.00
45	60	0.045	0.14	0.32	0.45	0.22	0.24	1.09
60	60	0.074	0.23	0.52	0.74	0.28	0.33	1.18
75	60	0.103	0.32	0.73	1.03	0.33	0.42	1.27
90	60	0.132	0.42	0.93	1.32	0.37	0.51	1.37
105	60	0.161	0.51	1.14	1.61	0.40	0.60	1.46
15	80	0.043	0.13	0.30	0.43	0.21	0.23	1.08
30	80	0.072	0.23	0.51	0.72	0.27	0.32	1.18
45	80	0.101	0.32	0.71	1.01	0.32	0.41	1.27
60	80	0.130	0.41	0.92	1.30	0.36	0.51	1.36
75	80	0.159	0.50	1.12	1.59	0.40	0.60	1.45
90	80	0.188	0.59	1.33	1.88	0.44	0.69	1.54
105	80	0.217	0.69	1.53	2.17	0.47	0.78	1.63
15	100	0.099	0.31	0.70	0.99	0.32	0.41	1.26
30	100	0.128	0.40	0.90	1.28	0.36	0.50	1.35
45	100	0.157	0.50	1.11	1.57	0.40	0.59	1.44
60	100	0.186	0.59	1.31	1.86	0.43	0.68	1.54
75	100	0.215	0.68	1.52	2.15	0.47	0.77	1.63
90	100	0.244	0.77	1.73	2.44	0.50	0.87	1.72
105	100	0.273	0.86	1.93	2.73	0.53	0.96	1.81

c. 水と接する場合の腐食見積

水と接する炭素鋼の腐食速度は、温度－pH(水質)－DO/酸化･還元性/Eh で評価され、腐食生成物などの影響を受ける。

温度依存性[31]は以下に記される。

a_{0T} (mm/yr) = 0.128 + 0.00032T(℃)

炭素鋼の腐食速度は pH 依存性がある。しかしながら、初期の 1～3 年はコンクリートの影響を受けて高アルカリ性となる可能性があるものの、大部分の期間は pH=8～9 の中性と想定されることから、本見積では影響はないもの(pH 依存性係数、$f_{(pH)}$=1)とする。

炭素鋼の腐食速度の DO 依存性[29]は、図 5.2.4-30 の Evans 図のアノード分極曲線とカソード分極曲線の交点から求めた腐食速度の DO 依存性をに示すように、DO の低下に依存して腐食速度が低下し、以下に記載される。

$f_{(DO)}$ = 0.00155 + 0.120 DO (ppm)

以上のことから、地下水環境における炭素鋼の腐食速度(初速度)、a0 は、

a_0 (mm/yr) = [0.128 + 0.00032T(℃)]×[0.00155 + 0.120 DO (ppm)]

となる。水と接する場合の腐食見積(温度、DO)を表 5.2.4-7 に示す。

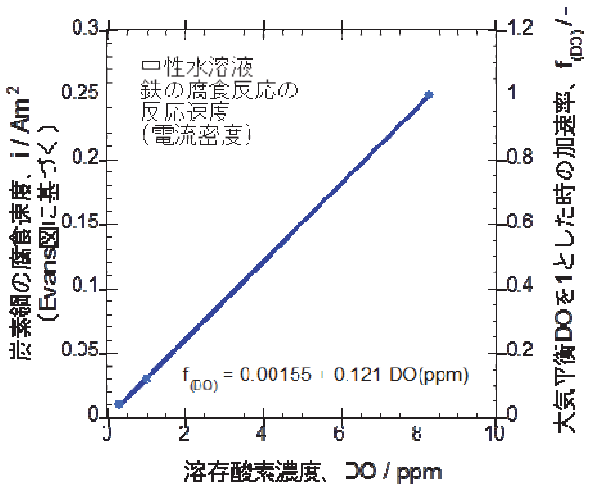


図 5.2.4-30　Evans 図のアノードとカソードの交点から求めた腐食速度の DO 依存性[29]

表 5.2.4-7　水と接する場合の腐食見積(温度、DO)

温度(℃)	DO(ppm)	腐食速度 (mm/yr)	腐食深さ(mm)			温度(℃)	DO(ppm)	腐食速度 (mm/yr)	腐食深さ(mm)		
			10年後	50年後	100年後				10年後	50年後	100年後
15	8	0.169	0.54	1.20	1.69	15	0.3	0.007	0.02	0.05	0.07
30	8	0.215	0.68	1.52	2.15	30	0.3	0.008	0.03	0.06	0.08
45	8	0.262	0.83	1.85	2.62	45	0.3	0.010	0.03	0.07	0.10
60	8	0.308	0.97	2.18	3.08	60	0.3	0.012	0.04	0.08	0.12
75	8	0.354	1.12	2.50	3.54	75	0.3	0.014	0.04	0.10	0.14
90	8	0.400	1.26	2.83	4.00	90	0.3	0.016	0.05	0.11	0.16
105	8	0.446	1.41	3.15	4.46	105	0.3	0.017	0.06	0.12	0.17
15	3	0.064	0.20	0.45	0.64	15	0.1	0.002	0.01	0.02	0.02
30	3	0.081	0.26	0.57	0.81	30	0.1	0.003	0.01	0.02	0.03
45	3	0.098	0.31	0.70	0.98	45	0.1	0.004	0.01	0.03	0.04
60	3	0.116	0.37	0.82	1.16	60	0.1	0.004	0.01	0.03	0.04
75	3	0.133	0.42	0.94	1.33	75	0.1	0.005	0.02	0.04	0.05
90	3	0.150	0.48	1.06	1.50	90	0.1	0.006	0.02	0.04	0.06
105	3	0.168	0.53	1.19	1.68	105	0.1	0.006	0.02	0.04	0.06
15	1	0.021	0.07	0.15	0.21						
30	1	0.027	0.09	0.19	0.27						
45	1	0.033	0.10	0.23	0.33						
60	1	0.039	0.12	0.28	0.39						
75	1	0.045	0.14	0.32	0.45						
90	1	0.051	0.16	0.36	0.51						
105	1	0.056	0.18	0.40	0.56						

d. ベントナイトと接する場合の見積

ベントナイトと接する炭素鋼の腐食速度は、ベントナイトの化学的作用を無視すると、温度、および、海洋／非海洋で評価される。

CUI モデル[50]で代替することができて、海洋か非海洋でそれぞれ温度帯の腐食速度[51][52]が規定されている。さらに、構造の複雑さ因子、C1 は単純(平坦)部であれば、C1=0.5、支持構造の防食構造因子、C2、コーテングの良否因子、C6 など、それぞれ、1 以下の係数を掛ける。逆に、周辺環境因子、C2 は、近くに冷却塔、スティームトレース、腐食性ガスを排出する装置などがあれば、C2=1.5 など、1 以上の係数を掛ける。ベントナイトの化学的寄与も、係数化することが可能と考えられるが、現時点で、係数化するだけの科学的根拠が得られていないので、係数化はしない。ベントナイトと接する場合の腐食見積を表 5.2.4-8 に示す。

表 5.2.4-8　ベントナイトと接する場合の腐食見積(温度、海洋／非海洋)

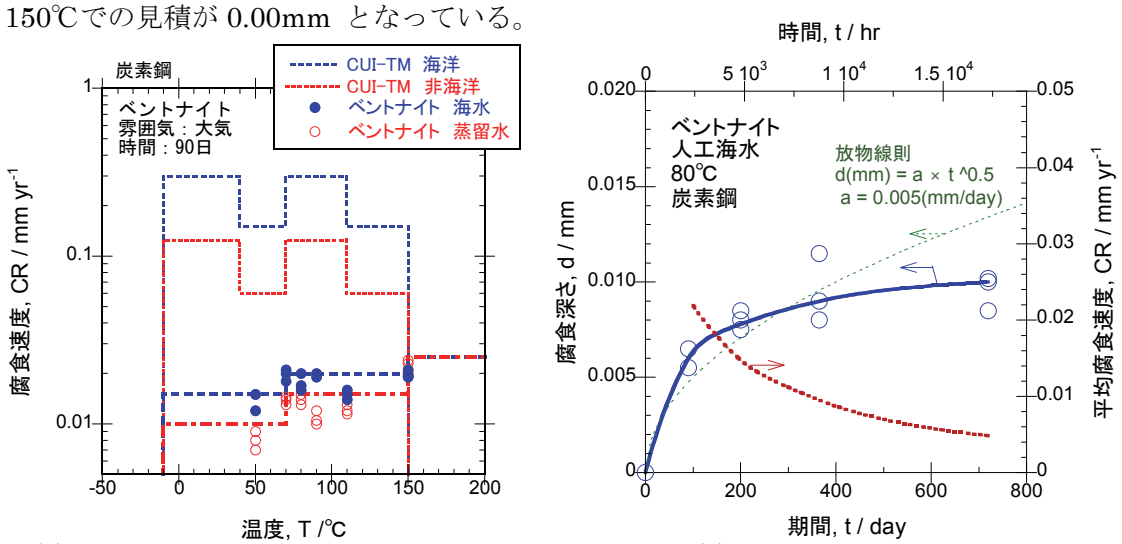
温度(℃)	海洋／非海洋	腐食速度 (mm/yr)	腐食深さ(mm)			構造の影響、10年後の腐食深さ(mm)		
			10年後	50年後	100年後	×平坦	×防食	×健全性
15	海洋	0.300	0.95	2.12	3.00	0.47	0.24	0.12
30	海洋	0.300	0.95	2.12	3.00	0.47	0.24	0.12
45	海洋	0.150	0.47	1.06	1.50	0.24	0.12	0.06
60	海洋	0.150	0.47	1.06	1.50	0.24	0.12	0.06
75	海洋	0.300	0.95	2.12	3.00	0.47	0.24	0.12
90	海洋	0.300	0.95	2.12	3.00	0.47	0.24	0.12
105	海洋	0.300	0.95	2.12	3.00	0.47	0.24	0.12
120	海洋	0.150	0.47	1.06	1.50	0.24	0.12	0.06
135	海洋	0.150	0.47	1.06	1.50	0.24	0.12	0.06
150	海洋	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	非海洋	0.125	0.40	0.88	1.25	0.20	0.10	0.05
30	非海洋	0.125	0.40	0.88	1.25	0.20	0.10	0.05
45	非海洋	0.060	0.19	0.42	0.60	0.09	0.05	0.02
60	非海洋	0.060	0.19	0.42	0.60	0.09	0.05	0.02
75	非海洋	0.125	0.40	0.88	1.25	0.20	0.10	0.05
90	非海洋	0.125	0.40	0.88	1.25	0.20	0.10	0.05
105	非海洋	0.125	0.40	0.88	1.25	0.20	0.10	0.05
120	非海洋	0.060	0.19	0.42	0.60	0.09	0.05	0.02
135	非海洋	0.060	0.19	0.42	0.60	0.09	0.05	0.02
150	非海洋	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

e. 腐食性の定置条件の比較

腐食深さの定置条件、および時間依存性を比較してに表 5.2.4-9 示す。100 年間で、最大で 3mm 程度の腐食が見込まれる。腐食深さは、<0.1mm、0.1～1mm、>1mm の 3 段階に区分して色分けを追記した。なお、ベントナイトに水が来る系として保温材下腐食(CUI)モデルを採用したため、かなり保守的な(大き目の)値となっており、何らかの低減効果を見込むことを検討することが合理的であろう。

一方、平均腐食深さに対して、実際には腐食深さが凹凸を持ってばらつき、その最大腐食深さは図 5.2.4-15 に示すように平均値の 3 倍程度が見込まれる。したがって、最大値の見積は、この計算値の 3 倍程度を見込む必要がある。

JAEA が実施したベントナイト埋設環境における炭素鋼の腐食試験結果[68]を参考として作成した腐食挙動を図 5.2.4-31 に示す。80℃、人工海水/ベントナイト系の腐食深さは初期（最初の調査点の 90 日後）に速く、時間とともに低減するが、その傾向は放物線よりも急激な挙動を示している。したがって、初期の内に定常･平衡状態に到達すれば遅い腐食速度で長期予測をすることが合理的であるが、非定常状態が維持され続けると、比較的速い速度が続く可能性がある。90 日後の腐食速度の温度依存性は CUI-TM の速度よりも 0.5～1 桁程度低い。一方、CUI-TM のような 40～70℃、および、110～150℃での速度低下は認められなかった。したがって、ベントナイト、人工海水中の腐食の見積を CUI-TM のベントナイト､海洋性の見積の 1/5 として表 5.2.4-9 の右端に示す。そのため、150℃での見積が 0.00mm となっている。



(a)80℃、人工海水/ベントナイト系の腐食挙動　　(b)腐食速度の温度依存性

図 5.2.4-31 ベントナイト埋設環境における炭素鋼の腐食挙動

表 5.2.4-9　腐食深さの定置条件、および時間依存性比較

10年間

温度(℃)	大気／湿度(R.H.)				地下水／溶存酸素(DO)					ベントナイト	
	40%	60%	80%	100%	8ppm	3ppm	1ppm	0.3ppm	0.1ppm	海洋性	非海洋性
15			0.13	0.99	0.54	0.20	0.07	0.02	0.01	0.95	0.40
30		0.05	0.23	1.28	0.68	0.26	0.09	0.03	0.01	0.95	0.40
45		0.14	0.32	1.57	0.83	0.31	0.10	0.03	0.01	0.47	0.19
60	0.06	0.23	0.41	1.86	0.97	0.37	0.12	0.04	0.01	0.47	0.19
75	0.15	0.32	0.50	2.15	1.12	0.42	0.14	0.04	0.02	0.95	0.40
90	0.24	0.42	0.59	2.44	1.26	0.48	0.16	0.05	0.02	0.95	0.40
105	0.33	0.51	0.69	2.73	1.41	0.53	0.18	0.06	0.02	0.95	0.40
120										0.47	0.19
135										0.47	0.19
150										0.00	0.00

100年間

温度(℃)	大気／湿度(R.H.)				地下水／溶存酸素(DO)					ベントナイト	
	40%	60%	80%	100%	8ppm	3ppm	1ppm	0.3ppm	0.1ppm	海洋性	非海洋性
15			0.43	0.99	1.69	0.64	0.21	0.07	0.02	3.00	1.25
30		0.16	0.72	1.28	2.15	0.81	0.27	0.08	0.03	3.00	1.25
45		0.45	1.01	1.57	2.62	0.98	0.33	0.10	0.04	1.50	0.60
60	0.18	0.74	1.30	1.86	3.08	1.16	0.39	0.12	0.04	1.50	0.60
75	0.47	1.03	1.59	2.15	3.54	1.33	0.45	0.14	0.05	3.00	1.25
90	0.76	1.32	1.88	2.44	4.00	1.50	0.51	0.16	0.06	3.00	1.25
105	1.05	1.61	2.17	2.73	4.46	1.68	0.56	0.17	0.06	3.00	1.25
120										1.50	0.60
135										1.50	0.60
150										0.00	0.00
備考	時間のべき乗(1/2)				時間のべき乗(1/2)					時間に線形	

＜0.1mm　0.1～1mm　＞1mm

f. 高レ地層処分におけるオーバーパックの腐食代選定シナリオの対照

オーバーパックのガラス固化体の収納部の寸法は、ガラス固化体の製作精度や挿入性を考慮し、直径 440mm×1,350mm と設定され、全面腐食を対象に 1,000 年間の腐食深さを評価[69]している。処分環境では、はじめに緩衝材や埋め戻し材中に取り込まれた酸素の還元をカソード反応とする腐食が進展し、酸素消費後は水の還元による腐食が支配的になると考えられる。よってカソード反応の観点から、「酸素による腐食」「水の還元による腐食」を対象に 1,000 年間の腐食深さを別々に評価して合算している。

酸素による腐食は、オーバーパック周囲の酸素がすべて腐食で消費されると仮定し、坑道仕様等から保守的にその量を 700mol とした。この酸素により 1400mol の鉄の腐食が見積もられる。

$$Fe + 1/2\ O_2 + H_2O \quad \rightarrow \quad Fe(OH)_2$$

これを炭素鋼オーバーパックの平均腐食深さに換算すると 1.8mm となる。全面腐食といえども、腐食の不均一化が生じ得るため、平均腐食深さに対する最大の腐食深さを推定し、最大腐食深さの推定値 P は 11.8mm としている。

一方、水の還元による腐食は、低酸素濃度下の既存実験データから経時的に低下する傾向にあり、1 年後には $10\ \mu m\ y^{-1}$ 以下としている。環境条件を実験的に確認した範囲（人工海水および人工淡水）に限定すれば、長期試験の結果に基づいて平均腐食速度は $5\ \mu m\ y^{-1}$ となる。

腐食深さの評価にあたり、環境条件にともなう不確実性も勘案し、保守的に平均腐食速度を $10\ \mu m\ y^{-1}$ としたうえで、さらに不均一化を考慮し 2 倍の腐食速度 $20\ \mu m\ y^{-1}$ を仮定して、1,000 年間の腐食深さを 20mm と評価している。

上述の酸素による腐食深さと水の還元による腐食深さを合算すると、1,000 年間の腐食深さは 31.8mm となることから、腐食代は 40mm と評価されている。

したがって、初期の持ち込まれた酸素による腐食は、持ち込んだ酸素の量と炭素鋼の面積を設定し、かつ、酸素の全量が腐食に寄与したとして、平均として 1.8mm である。なお、時間軸の評価はなされていないが、酸素を含む中性水溶液中の腐食深さが放物線則に従うと仮定し、

$$d(mm) = 0.3 \times t(yr)^{0.5}$$

とすれば、1.8mm に到達するのは 36 年後になる。

同様に、持ち込まれる酸素の量と炭素鋼の面積を設定すれば、平均腐食深さは推算可能である。

(2) 緩衝材への影響

1) 検討方法

緩衝材の長期挙動に係る影響としては、他のバリア材料との相互作用としてセメント系材料とベントナイトの相互作用、炭素鋼腐食生成物とベントナイトの相互作用、定置環境条件に係るものとして地下水水質、温度による変質などが挙げられる。また、地下水水理による緩衝材の流出現象（パイピング、エロージョン）も影響が懸念される現象として挙げられる。平成 25 年度の回収維持期間の検討[4]における緩衝材の長期挙動特性に係る変質挙動として、緩衝材の膨潤、変形、劣化、変質、流出が示されている。また、NUMO の報告書[7]では、緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用に関する科学的な知見の整備状況が表 5.2.4-10、表 5.2.4-11 のように整理されている。

これらの示された項目は、いずれも共通して影響項目として挙げられていることが分かる。次項においては、これまでに設定した環境条件も踏まえて回収維持期間において考慮が必要な項目として整理した。整理した項目について、定量化が可能なものについては既往の文献等に基づき影響の定量化を試みた。

表 5.2.4-10　緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用に関する科学的な知見の整備状況（1/2）[7]

項目と内容		概要	文献
塩水の影響		塩分濃度が高いほど，膨潤圧は小さくなるが，有効粘土密度が 1.5Mg/m^3 以上では，純水による膨潤圧との差は顕著ではない。また，体積膨潤比は有効粘土密度が高いほど増加するが，塩分濃度が高いほど小さいことが分かった。	JAEA（2010a） JNC（2005） Komine and Ogata（2004） 小峯ほか（2009） Komine et al.（2009） 棚井ほか（2010） 田中・中村（2004）
セメントとベントナイトの相互作用	緩衝材中粘土鉱物のカルシウム型化	コンクリート支保，プラグなどを通過して緩衝材に接する地下水は Ca イオンの多い組成となるため，イオン交換により緩衝材中の Na 型スメクタイト[6-4]が Ca 型スメクタイトに変化し，透水性の上昇と膨潤性の低下が起こる可能性について，検討が進められている。	電事連・JNC（2005）
	緩衝材中粘土鉱物の溶解	緩衝材の主要構成鉱物であるスメクタイトが地下水に溶解する現象で，高 pH 条件で促進されことが報告されている。pH，温度をパラメータとして定式化が進められている。	Cama et al.（2000） 亀井ほか（2007） Köhler et al.（2003） Kuwahara（2006） Nakayama et al.（2004） Sato et al.（2004）
	二次鉱物の沈殿	緩衝材の主要構成鉱物であるスメクタイトが，二次鉱物を生成して置換される現象で，スメクタイトが鉱物学的に不安定化する物理化学条件の時に顕著となる。その結果，膨潤特性や透水特性が変化する可能性がある。	Gaucher and Blanc（2006） 原環センター（2003b，2010d） 金（2001） Oda（2004）
	セメンテーション	セメントーベントナイトの境界領域近傍で，双方の間隙中に二次鉱物が沈殿し，間隙を閉塞する現象。その結果，膨潤特性や透水特性が変化する可能性がある。	Pusch（1982）

表 5.2.4-11　緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用に関する科学的な知見の整備状況（2/2）[7]

項目と内容		概要	文献
炭素鋼腐食生成物とベントナイトの相互作用	粘土鉱物の層間の交換性陽イオンの Fe 型化	ベントナイトの主成分で膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトの層間の交換性陽イオン（Na^+イオン）が，Fe^{2+}イオンと置換することにより，ベントナイトの膨潤性や透水性，収着性などの特性が変化する可能性について検討が進められている。	Carlson et al.（2007） Ishidera et al.（2007） Kozai et al.（2001） 笹本ほか（2010） 柴田ほか（2004） 陶山ほか（2008）
	鉱物化学変質	Fe^{2+}イオンの割合が増加すると，擬クロライト化／鉄クロライト化，バーチェリン化，ノントロナイト化，鉄サポナイト化など鉱物が生成する可能性がある。このうち，膨潤性を示さない擬クロライト化，鉄クロライト化，バーチェリン化が起こるとベントナイトの膨潤性や透水性，収着性などの特性が変化する可能性について検討が進められている。	Fukushi et al.（2010） JAEA（2008b，2010b） Lantenois et al.（2005） Marty et al.（2010） 笹本ほか（2009） 陶山ほか（2008） Wersin et al.（2006）
	腐食生成物によるセメンテーション	鉄腐食生成物の沈殿や，鉱物化学反応の結果，別の鉱物が副次的に沈殿し，空隙を閉塞する可能性がある。その結果，膨潤性や透水性，収着性などの特性が変化する可能性について検討が進められている。	Bildstein et al.（2006） Marty et al.（2010） Savage et al.（2010） 上野ほか（2008）
イライト化		イライト化は，130℃以下でほとんど生じることがなく，緩衝材の安全機能に対する顕著な影響がないことが分かった。	Huang et al.（1993） 石川ほか（1994 ） JNC（1999b）
緩衝材の流出		侵食現象は降水系地下水条件において留意するべき事象であるが，海水系条件ではその影響が小さいことが分かった。サイトの地下水が降水系地下水である場合には，緩衝材と接する亀裂の流出挙動に対する影響を評価した上で，適切な対策を講じる必要がある。	JNC（2005） 松本・棚井（2003，2004，2008，2010） 松本ほか（2005）

2) 設定した状態と期間に考慮が必要な緩衝材の変質に係る因子の整理

a. 塩水の影響

塩水の影響については、特に設定した状態と期間にのみ考慮が必要な影響ではないことから、ここでは考慮が必要な緩衝材の変質に係る因子とはしないものとして整理した。

b. 緩衝材とセメントとの相互作用

緩衝材とセメントとの相互作用として、ベントナイトの Ca 型化、ベントナイトの溶解および二次鉱物の沈殿、セメンテーションが既往の研究より示されており、これらについて検討した。

(a) Ca 型化

緩衝材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 イオンと粘土成分である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 型化が発生することが知られている[70]。セメント材料は、地下処分場において必ず使用されることが考えられることから、影響を想定する必要がある。

既往の検討においては、OPC セメントと比較して低アルカリセメントでは 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[7]。

ただし、回収維持期間の検討において、温度が比較的高温度で、ある程度の期間（数十年）継続する場合には、条件を合わせた試験検討が必要である。

(b) ベントナイトの溶解および二次鉱物の沈殿

セメント材料からの高 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既往の検討により確認されている。また、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℃以下の条件では、スメクタイト溶解速度も遅いとの報告がされており、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ない[5]。本検討では、設定した状態と期間における pH は、8～9 の弱アルカリ性程度と予想しているが、高温度の環境がある程度の期間（数十年）継続する環境に対する検討や温度が 100℃を超える温度履歴を経たベントナイトに対する研究データは見当たらず、このような高温度環境を想定する場合は、a.と同様に今後の試験検討が必要であると考えられる。

(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℃を超える温度を経験したベントナイトであり、100℃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]。したがって、本検討で設定されている高温度で長期間継続する環境においては、温度に対する対策が必要と考えらえる。または、高温度を考慮した試験検討により、ベントナイトへの影響が想定される範囲内であることを示すことが必要であると考える。

また、懸念される環境に対する影響の定量的データは現状では見当たらず、定量化による評価は困難な状況である。

c. 緩衝材と炭素鋼腐食生成物との相互作用

緩衝材と炭素鋼腐食生成物との相互作用として、Fe 型化、鉱物化学変質、腐食生成物によるセメンテーションが既往の研究より示されており、これらについて検討した。

(a) Fe 型化（イオン交換）

層間陽イオン交換反応による Fe 型化について、鉄粉を用いた試験ではベントナイトの一部が Fe 型化することが確認されている[71][72]が、炭素鋼片と圧縮ベントナイトを接触させた試験では Fe 型化は確認されていない[73][74][75]。この違いは、鉄の比表面積の影響と考えられ鉄の浸出率が高いことが要因と考えられた、本検討の環境でも影響は小さいものと考えられる。

(b) 鉱物化学変質

鉱物化学変質については、[76]の検討において、温度および鉄／ベントナイト重量比をパラメータとした調査が実施され、X 線回折測定結果から温度が 150℃、鉄／ベントナイト重量比が 1:1 の条件以外では、ベントナイトの変質は起こらない結果が得られている[7]。また、笹本らの試験では、約 10 年間にわたり室温で鉄粉とベントナイトを接触させた試験でベントナイトの変質は確認されず[77]、陶山らの試験では、圧縮

ベントナイトを用いた試験期間 10 年で実施された試験で鉄片試料は腐食しているがスメクタイトの鉱物化学的変質は確認できていない[75]。

これらのことから、設定した状態と期間では、人工バリアの状態により 100℃を超える高温度の環境も想定されることから、鉄とベントナイトの反応が懸念されるが、そのような環境においては媒体となる水分がほとんど存在しないと考えると、この反応はオーバーパックと緩衝材の接触面のみのと限定される。したがって、鉱物化学変質については定量的な検討対象として除外した。

表 5.2.4-12　ベントナイトの変質と試験条件[7]

試験期間	試験温度 (℃)	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) 腐食生成物によるセメンテーション

腐食生成物のセメンテーションについては、上野らの検討によれば、鉄共存系での圧縮ベントナイトによる最長 10 年程度の試験の結果、セメンテーションは確認されていない[78]。

NUMO の検討においては、鉄ーベントナイトの相互作用については変質を示唆するデータが一部で得られているが、実際の処分環境では、緩衝材中の物質移行が制限されていることや炭素鋼の腐食速度が遅く、鉄の供給量が少ないことから、鉄ーベントナイトの反応は顕著には進まない可能性が示唆されているとしている[7]。本検討においても、設定した状態と期間においてオーバーパックの腐食による鉄の供給量が顕著に増大することは考え難くいため、影響は少ないとして定量的な検討対象から除外することができると考える。ただし、NUMO の記述にもあるように、この現象の理解については、今後も継続的に技術開発を進め、上記の考えを支える論拠を充実させていく必要があると考えられる。

d. 温度による緩衝材粘土成分の変質（イライト化）

緩衝材の粘土成分のスメクタイトにおいては、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℃を超える条件で 100 万年以上スメクタイトが安定に存在していた

例があり、またスメク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℃を超える期間が数十年で最高温度が 130℃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[5]。

本検討では、130℃を超える温度環境はオーバーパック周囲への緩衝材の定置が少なく、また周囲の空気の動きの無い極端なケースにおける温度解析結果であることから、ここでは考慮が必要となる変質に係る因子より除外した。

e. 緩衝材の流出現象

人工バリア周辺の岩盤の開口幅が大きい場合、また高い割れ目頻度を有する場合には、膨潤によるベントナイトの割れ目への侵入が止まらず、緩衝材密度の低下により緩衝材の諸機能ならびに構造力学安定性に影響を与えることが懸念される[79]。緩衝材の岩盤亀裂内への侵入現象については、初動の侵入速さに関するデータの整備[80]と、降水系地下水と海水系地下水に大別した水質の違いによる挙動の把握[81]が行われている。その結果、海水系地下水においては試験条件の範囲（最大平均流速 8×10-6m/s）では、侵入現象は起こらないことが確認されている。一方、降水系地下水では平均流速 2×10-6m/s において侵入現象が確認されている。侵入現象は降水系地下水条件において留意するべき事象であるが、海水系条件ではその影響が小さいことが示唆されている[79][82]。また、ベントナイト密度分布の X 線 CT スキャナを用いた非破壊検査による取得[83]ならびに、侵入現象モデルの入力データの整備を進め、評価手法の妥当性・適用性について検討を行った。その結果、実際の侵入現象では、既存のモデル化で用いられている粘度といった物性パラメータ以外に評価上影響する要因が含まれていることが推測され、現状の物性パラメータによる侵入現象のモデル化には限界があることが示された[84]。

本検討における回収維持期間で特に関係すると考えられる初期の重要な現象として、緩衝材の流出現象に対しては、我が国の基盤研究（処分システム工学確証技術開発）や SKB において実験的研究が実施されている。我が国の基盤研究では、緩衝材表面の近傍の止水性能評価のために、異種材料で発生することが予想される地下浸潤によるパイピング・エロージョン現象の把握と水みちが緩衝材の膨潤によって自己シールされる現象を実験によって定量的に評価している[85]。実験では、流速をパラメータとしてパイピング・エロージョン現象の発生の有無を観察し、0.005L/min 以上の条件では発生が見られ、0.001L/min で見られなかった。ここで、坑道内において発生する湧水量としては、国内の文献[86][87][88]によると、堆積岩（泥質岩など）で 0～0.3L/分/m、結晶質岩（花崗岩など）で 0～0.6L/分/m が想定される。したがって、現状の実験データに基づけば日本の地下環境では、何らかの湧水対策を実施しないかぎり湧水による緩衝材のパイピング・エロージョンの現象が発生することとなる。

本検討では流出現象について、得られている実験データに基づき次項において定量的な検討を実施することとする。

3) 影響の定量化（程度の検討）

(2)の検討より、影響の検討について、緩衝材の湧水量によるエロージョンの影響について定量的な検討を実施した。

緩衝材の流出現象について、国の基盤研究による試験が実施され、湧水量と緩衝材のエロージョン量の関係が取得されている[85]。この研究では、図 5.2.4-32 に示すように、クニゲル V1 の総湧水量とエロージョン量の関係が、次式のように与えられている。

$$E = 0.01Q^{0.65}$$

E はエロージョン量、Q は総湧水量である。

前述したように、国内の坑道内において発生する湧水量としては、堆積岩で 0～0.3L/分/m、結晶質岩で 0～0.6L/分/m が想定されることから、ここでは、0.6L/分/m=0.6×10^3/分/m の条件を選定する。経過時間を 100 年とすると、総湧水量 Q（g）は、0.6×1000×60×24×365×100×となることから、エロージョン量は 67kg 程度となり、処分孔あたりの値として仮定する。この時、断面全体に対する重量比としては、1%程度となり、密度低下への影響は小さく見える。ただし、パイピングは局部的に発生する現象であることから、緩衝材の局部的な流出の影響が緩衝材の局部的な密度低下として閉鎖後長期にわたり残る場合には密度増加などの対策が必要と考えられる。また、実際の湧水量は坑道に一様ではなく、エロージョンの状況も場所により異なることも予想されることから、施工方法や設計における十分な考慮も必要である。

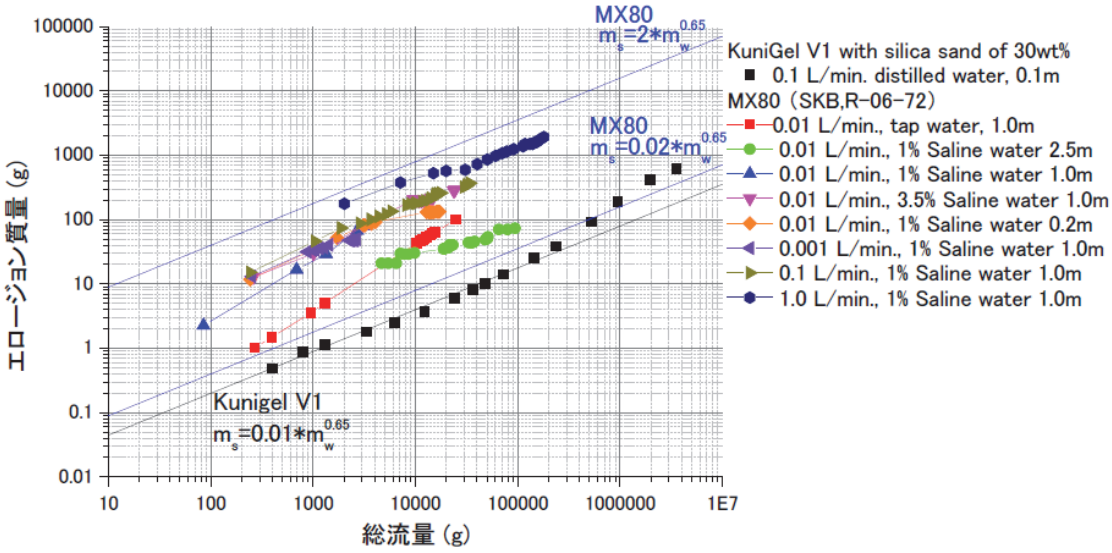


図 5.2.4-32　クニゲル V1 の総湧水量とエロージョン量の関係[85]

(3) PEM 容器

1) 検討方法

PEM 容器の材質としては、現在の検討[6][89]においては炭素鋼が選定されている。したがって、(1) に示すオーバーパックの腐食影響の検討と同様とする。

2) 設定した状態と期間に考慮が必要な腐食に係る因子の整理

基本的にはオーバーパックの検討における腐食に係る因子と同様とする。

3) 影響の定量化（程度の検討）

基本的には、オーバーパックの評価と同様の定量化となるが、PEM 容器は人工バリアではないことからオーバーパックの環境条件（温度)、長期性能は考慮しないものとする。

表 5.2.3-4 に示す熱解析結果からオーバーパックに対する温度結果より数十度低い結果となっている。したがって、同じ環境であればオーバーパックにおける腐食の程度の評価よりも PEM 容器の腐食の程度は減少するものと想定される。

5.2.5　整理とまとめ

処分施設を埋め戻さない状態における人工バリアに対する影響因子を整理し、各定置方式における人工バリアの状態設定および環境条件について設定し、人工バリアに対する影響の程度を解析的手法等により定量的に把握した。影響因子の整理および人工バリアの状態設定の検討では、平成 25 年度に実施した処分施設の安全性に及ぼす影響についての調査･整理した成果を反映した。

定量化（程度の検討）で必要となる人工バリアの環境条件として、オーバーパックの腐食や緩衝材への熱的影響等を検討するために温度条件、地下水条件、雰囲気等を設定した。なお、これらの環境条件の設定や影響の定量化の検討にあたっては、第２次取りまとめにおける人工バリア性能に係る環境条件調査および地層処分研究施設における人工バリア性能に係る地下環境情報調査の調査を行い処分場の環境条件を試行的に設定した。以下に設定した条件をまとめる。

・温度条件　：竪置き方式、横置き方式および PEM 方式における埋め戻しまでの代表的な状態に対して、人工バリアの温度の経時変化と温度分布を熱解析により把握。
①竪置き方式：緩衝材最高温度・約 220℃（オーバーパック露出条件）
緩衝材最高温度・約 110～120℃（緩衝材有り条件）
②横置き方式：緩衝材最高温度・約 200℃（オーバーパック露出条件）
緩衝材最高温度・約 110～120℃（緩衝材有り条件）
③PEM 方式　：緩衝材最高温度・約 120℃
PEM 容器最高温度・約 100℃

・地下水条件：瑞浪超深地層研究所および幌延深地層研究所における地下水や湧水の組成、経時変化を文献調査し、調査データより腐食評価等のための参考データとなる地下水組成、pH 条件の幅を設定。また、緩衝材流出評価のための湧水量について国内データを参考に設定。
① 下水組成：「5.2.3 (2) 2) c (c). まとめを参照のこと」
② pH　　：初期期間 1 年程度　pH10～12 程度
1 年～3 年程度　pH8～9 程度

・雰囲気条件：特に検討はしていないが、腐食評価として、緩衝材が完全に定置される前の雰囲気は大気とし、その大気は浸潤大気として湿度は 100%までの幅とし、緩衝材が定置された後の雰囲気は低酸素雰囲気になると仮定。

人工バリアの環境条件については、処分施設を一定期間埋め戻さい状態が前提になるため、上記の温度や地下水条件が過渡的な状態である。したがって、温度や地下水の挙動が相互に関連して変化する状態となり、人工バリアに対する影響の定量化のための条件設定は難しく、保守的な条件設定となった。環境条件により現実的な設定が必要である。検討では、上記の環境を参考にオーバーパック、PEM 容器に対する腐食影響の定量化、緩衝材の変状として流出の定量化を検討した。影響の程度として定量化した結果を以下に示す。

・オーバーパック腐食量：大気（温度・湿度）、地下水、ベントナイト埋設環境の条件について、

例えば、大気中の酸素共存環境で、100 年で 3mm 程度（凹凸考慮の場合 9mm 程度)、ベントナイト中等の低酸素環境で 100 年で 0.6mm 程度（凹凸考慮の場合 1.8mm 程度)。（表 5.2.4-9 参照）

・緩衝材流出量　　：経過時間を 100 年として、エロージョン量を処分孔あたりの値として 67kg と仮定。

・PEM 容器腐食量　　：オーバーパックと同様の腐食影響の定量化となる。

回収維持期間においては、空洞が空いており、人工バリア周囲にも埋戻しを実施しないことによる隙間が残ることから、操業環境を維持するための地下水の排水や換気による乾燥、酸化環境が継続することの腐食や好気性の微生物の影響など、操業を進めることにより埋戻しを実施すれば影響が小さい、または無視していたような事項についても、人工バリアや処分場に対する影響として考慮が必要である。

5.3　人工バリアの状態と回収維持期間の例示

ここでは 5.2.4 人工バリアに対する影響の定量化（程度）の検討で得られた結果を基に、各定置概念における人工バリアの状態と期間及び回収維持期間の例示について検討結果を取りまとめた。

5.3.1　人工バリアの状態と期間

処分施設を一定期間埋め戻さず人工バリア性能を維持する場合について、人工バリア毎に状態を変化させる因子となる、温度（T）、水理（H）、力学（M）、化学（C）に分類して整理をした後、それら因子の相互の影響と期間について検討を行い整理した。以下に、定置方式ごとに述べる。

(1) 処分孔竪置き定置方式

処分孔竪置き定置方式において、操業段階の代表的な状態と考える以下の 3 ケースについて検討した。

1)オーバーパックのみを定置したケース
2)緩衝材を定置したケース
3)処分坑道を埋め戻したケース

1) オーバーパックのみを定置したケース

オーバーパックのみを定置した状態における人工バリアの性能維持が懸念される事象を整理した結果を表 5.3.1-1 に示す。また、この状態イメージを図 5.3.1-1 に示す。

表 5.3.1-1　人工バリア性能維持への影響が懸念される事象（1）
（処分孔竪置き定置概念：オーバーパックのみを定置したケース）

		状態（従来と異なる現象）		論拠	人工バリア性能維持への影響が懸念される事象
人工バリア	オーバーパック	T	200℃超過、オーバーパックの腐食の増大	5.2.3	オーバーパックの腐食に伴う減厚
		H	湧水によるオーバーパックの腐食の増大		オーバーパックの腐食に伴う減厚 ⇒ **人工バリア性能の長期健全性低下**
		M	酸素によるオーバーパックの腐食の増大		オーバーパックの腐食に伴う減厚
		C	酸素によるオーバーパックの腐食の増大		オーバーパックの腐食に伴う減厚
	緩衝材	T	100℃超過による緩衝材の変質・変形	5.2.3	**緩衝材の変質に伴うシール性等の劣化** 緩衝材の乾燥に伴う変形
		H	湧水による緩衝材の膨潤・流出		緩衝材の膨潤に伴う変形 ⇒
		M	－		⇒ **変形に伴うオーバーパック支持性の低下**
		C	－		－

－：該当する事項無し

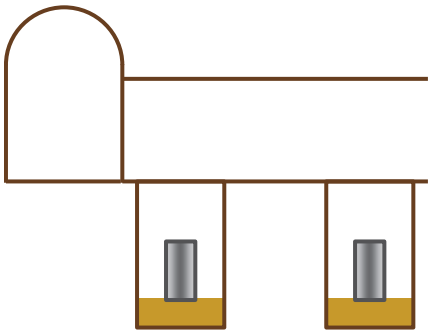


図 5.3.1-1　オーバーパックのみを定置したケースにおける人工バリアの状態イメージ
（処分孔竪置き定置概念）

以下において、人工バリアの各因子について説明する。

a. オーバーパック

(a) 温度を因子とした状態

オーバーパックのみを定置したケースにおけるオーバーパックの表面温度は、表 5.2.3-2 より 200℃を超過する可能性があり、緩衝材を定置する場合と比べて大幅な温度上昇が認められる。100℃程度、大気中の条件とすると、表 5.2.4-9 より腐食（減厚）は、100 年程度で 3mm 程度（凹凸考慮の場合 9mm 程度）、50 年程度で 2mm 程度（凸

凹考慮の場合 6mm 程度)、10 年程度で 1mm 程度（凸凹考慮の場合 3mm 程度）となると算出され、オーバーパックの人工バリア性能が劣化する懸念があると考えられる。

また、オーバーパックの表面温度が高温となることから、坑道からの湧水の液滴が直接オーバーパック表面に接触するなどが無ければ、オーバーパック表面には水膜が維持されず非腐食環境となる。この場合には、初期から 100～200 年程度の間は高温度の状態が継続しており、この期間は腐食（減厚）がほとんど無くなる可能性があり、オーバーパックの人工バリア性能が劣化する懸念が低下する。ただし、液滴が懸念される場合には、坑道や処分孔口に液滴防止を施すことが必要と考えられる。したがって、一定期間埋め戻さずに人工バリア性能を維持させる場合、温度因子の面からの対策が求められる。

前節の温度解析の検討では、換気の影響などの空気の流れを考慮しない、緩衝材の湧水による熱物性の変化を考慮しない条件での検討であり、実際の操業においては換気などによる空気の流れや湧水が想定され、最高温度の低下や高温度期間の減少が考えられる。温度の低下は、腐食量の低減が期待されるが、反面高温度期間の減少による非腐食環境の期間が減少することが考えられる。状態の評価においては、これらの想定に対する考慮が必要である。

(b) 水理を因子とした状態

地下水（湧水）がオーバーパックに触れることにより腐食量が増大することが懸念される。前節までの検討の結果より、環境として 100℃程度、大気中の条件とすると、表 5.2.4-9 より腐食（減厚）は、100 年程度で 3mm 程度（凹凸考慮の場合 9mm 程度)、50 年程度で 2mm 程度（凸凹考慮の場合 6mm 程度)、10 年程度で 1mm 程度（凸凹考慮の場合 3mm 程度）となると算出され、オーバーパックの人工バリア性能が劣化する懸念があると考えられる。したがって、一定期間埋め戻さずに人工バリア性能を維持させる場合、水理因子の面からの対策が求められる。

(c) 力学を因子とした状態

前節までの検討の結果より、湧水の存在と酸化環境の存在によりオーバーパックの腐食が進行し、オーバーパックの人工バリア性能（構造健全性）が劣化する懸念があると考えらる。したがって、一定期間埋め戻さずにオーバーパックの人工バリア性能を維持させる場合、力学因子の面からの対策が求められる。

(d) 化学を因子とした状態

酸化環境はオーバーパックの腐食を増大させ腐食量が増大することになる。前節までの検討の結果より、環境として 100℃程度、大気中の条件とすると、表 5.2.4-9 より腐食（減厚）は、100 年程度で 3mm 程度（凹凸考慮の場合 9mm 程度)、50 年程度で 2mm 程度（凸凹考慮の場合 6mm 程度)、10 年程度で 1mm 程度（凸凹考慮の場合 3mm 程度）となると算出され、オーバーパックの長期健全性が劣化する懸念がある。した

がって、一定期間埋め戻さずにオーバーパックの人工バリア性能を維持させる場合、化学因子の面からの対策が求められる。

b. 緩衝材

(a) 温度を因子とした状態

オーバーパックのみを設置したケースでは、底部の緩衝材温度は、表 5.2.3-2 より100℃を超えて緩衝材が変質し、緩衝材の人工バリア性能が低下する懸念があると考えられる。また、温度の影響により緩衝材が乾燥収縮し、これらにより底部の緩衝材が変形することになり、オーバーパックの支持性を低下させる懸念が考えられる。したがって、一定期間埋め戻さずに緩衝材の人工バリア性能を維持させる場合、温度因子の面からの対策が求められる。

(b) 水理を因子とした状態

地下水（湧水）が緩衝材に触れることにより膨潤し、それにより底部の緩衝材が変形することになり、その影響によって緩衝材の人工バリア性能に影響を及ぼす懸念があると考えられる。したがって、一定期間埋め戻さずに緩衝材の人工バリア性能を維持させる場合、水理因子の面からの調査や対策に関する研究が求められる。

(c) 力学を因子とした状態

地下水（湧水）が緩衝材に触れることにより膨潤し、また、温度の影響により緩衝材の乾燥することにより収縮し、これらにより底部の緩衝材が変形していくことになり、その影響によりオーバーパックの支持性を低下させる懸念があると考えられる。したがって、一定期間埋め戻さずに緩衝材の人工バリア性能を維持させる場合、力学因子の面からの対策が求められる。

(d) 化学を因子とした状態

5.2.4(2) 緩衝材の変質影響の検討から、化学を因子とした緩衝材の変質の大きさは、埋め戻しの有無により影響を受けることはないと判断される。

2) 緩衝材を定置したケース

緩衝材を定置した状態における人工バリア性能維持への影響が懸念される事象を整理した結果を表 5.3.1-2 に示す。また、この状態イメージを図 5.3.1-2 に示す。

表 5.3.1-2　人工バリア性能維持への影響が懸念される事象（2）
（処分孔竪置き定置概念：緩衝材を定置したケース）

		状態（従来と異なる現象）		論拠	人工バリア性能への影響が懸念される事象
人工バリア	オーバーパック	T	100℃超過	5.2.3	－
		H	－		－
		M	－		－
		C	－		－
	緩衝材	T	100℃超過による緩衝材の変質	5.2.3	緩衝材の変質に伴うシール性低下
		H	動水勾配増大による緩衝材の流出	5.2.4	緩衝材の流出に伴う密度低下
		M	－		⇨ **密度低下による所要性能低下**
		C	－		－

－：該当する事項無し

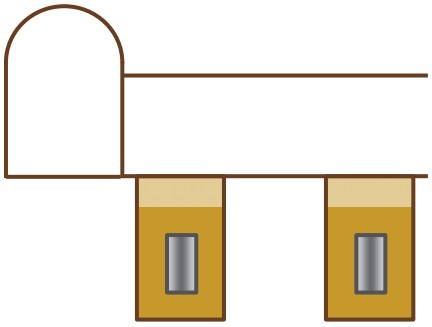


図 5.3.1-2　緩衝材を定置したケースにおける人工バリアの状態イメージ
（処分孔竪置き定置概念）

以下において、人工バリアの各因子について説明する。

a. オーバーパック

(a) 温度を因子とした状態

処分坑道の埋め戻しを行わない場合のオーバーパックの表面温度は、表 5.2.3-2 より 100℃を超過する可能性があるが、第 2 次取りまとめにて試算されている坑道の埋め戻しを行う場合の温度と比べて大きな差異は認められなかった。温度因子の面からはオーバーパックの人工バリア性能への影響は特にないと判断される。

(b) 水理を因子とした状態

透水性の低い緩衝材の存在により、オーバーパックに達する水の供給が大幅に抑制される。温度として 100℃程度、ベントナイト中での埋設環境の状態とすると、表 5.2.4-9 より腐食(減厚)は、100 年程度で 0.6mm 程度(凹凸考慮の場合 1.8mm 程度)、50 年程度で 0.4mm 程度(凸凹考慮の場合 1.2mm 程度)、10 年程度で 0.2mm 程度(凸凹考慮の場合 0.6mm 程度)と算出された。ただし、緩衝材が再冠水前の酸素が存在する状態から、再冠水するまでの腐食は算出しておらず、期間が不明のため算出が難しい。

この状態において、このまま回収せず閉鎖段階に移行する場合に、低酸素状態での腐食挙動が維持されれば、オーバーパックの人工バリア性能への影響はほとんど無いと考えられる。

(c) 力学を因子とした状態

これまでの検討結果より、低酸素濃度の環境はオーバーパックの腐食を抑制することになり、オーバーパックの人工バリア性能(構造健全性)が劣化する懸念はほぼ無いと考えられる。

(d) 化学を因子とした状態

低酸素濃度の環境はオーバーパックの腐食を抑制することになるが、上記の温度・水理環境における腐食(減厚)は、表 5.2.4-9 より 100 年程度で 0.6mm 程度(凹凸考慮の場合 1.8mm 程度)、50 年程度で 0.4mm 程度(凸凹考慮の場合 1.2mm 程度)、10 年程度で 0.2mm 程度(凸凹考慮の場合 0.6mm 程度)と算出された。したがって、このまま低酸素の状態が維持されれば、化学因子の面から、オーバーパックの人工バリア性能を喪失する懸念は、ほぼ無いと考えられる。

b. 緩衝材

(a) 温度を因子とした状態

これまでの検討結果より、緩衝材を定置した後、緩衝材と坑道との間に隙間を残した場合、緩衝材温度が 100℃を超え、緩衝材が変質して緩衝材の人工バリア性能が低下する懸念がある。したがって、一定期間埋め戻さずに緩衝材の人工バリア性能を維持する場合には、温度因子の面から対策が求められる。

(b) 水理を因子とした状態

主要坑道と処分坑道に空洞が存在していることにより、処分孔周辺の動水勾配が大きい状態になることが想定される。動水勾配により生じる地下水流(湧水)が緩衝材に触れることにより、緩衝材が膨潤して、場合によっては緩衝材が流出することになり、その影響により緩衝材の人工バリア性能に影響を及ぼす懸念がある。したがって、

一定期間埋め戻さずに緩衝材の人工バリア性能を維持させる場合、水理因子の面からの調査や対策に関する研究が求められる。

(c) 力学を因子とした状態

水理因子と同じように、処分孔周辺の動水勾配が大きい状態である場合、地下水（湧水）が緩衝材に触れることにより流出し、それにより密度の低下を引き起こし、その影響により緩衝材の人工バリア性能を低下させる懸念が考えられる。したがって、一定期間埋め戻さずに緩衝材の人工バリア性能を維持させる場合には、力学因子の面からの対策が求められる。

(d) 化学を因子とした状態

5.2.4(2) 緩衝材の変質影響の検討から、化学を因子とした緩衝材の変質の大きさは、埋め戻しの有無により影響を受けることはないと判断される。

3) 処分坑道を埋め戻したケース

処分坑道を埋め戻したケースにおける人工バリア性能維持への影響が懸念される事象を整理した結果を表 5.3.1-3 に示す。また、この状態イメージを図 5.3.1-3 に示す。

表 5.3.1-3　人工バリア性能維持への影響が懸念される事象（3）
（処分孔竪置き定置概念：処分坑道を埋め戻したケース）

		状態（従来と異なる現象）		論拠	人工バリア性能維持への影響が懸念される事象
人工バリア	オーバーパック	T	100℃超過	5.2.3	－
		H	－		－
		M	－		－
		C	－		－
	緩衝材	T	100℃超過による緩衝材の変質	5.2.3	緩衝材の変質に伴うシール性低下
		H	動水勾配増大による緩衝材の流出	5.2.4	緩衝材の流出に伴う密度低下
		M	－		⇨ **密度低下による所要性能低下**
		C	－		－

－：該当する事項無し

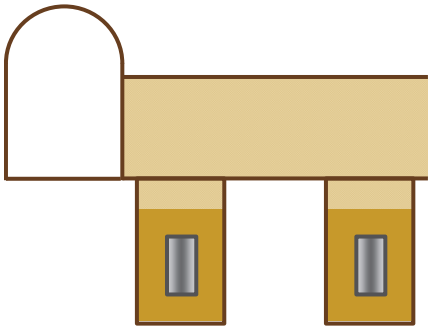


図 5.3.1-3　処分坑道を埋め戻したケースにおける人工バリアの状態イメージ
（処分孔竪置き定置概念）

以下において、人工バリアの各因子について説明する。

a. オーバーパック

緩衝材を設置したケースと同様な状態が継続する。

b. 緩衝材

緩衝材が設置されたケースと同様な状態が継続する。

(2) 処分坑道横置き（原位置）定置概念

処分坑道横置き（原位置）定置概念における人工バリアの状態と期間について考察した。なお、処分坑道横置き（原位置）定置概念における状態と期間は、(1) で考察した処分孔竪置き概念の各々と、ほぼ同様に考えられる結果となった。

1) オーバーパックのみ定置したケース

オーバーパックのみを定置した状態における人工バリア性能維持への影響が懸念される事象を整理した結果を表 5.3.1-4 に示す。また、この状態イメージを図 5.3.1-4 に示す。

表 5.3.1-4　人工バリア性能維持への影響が懸念される事象（4）
（処分坑道横置き定置概念：オーバーパックのみを定置したケース）

		状態（従来と異なる現象）		論拠	人工バリア性能維持への影響が懸念される事象
人工バリア	オーバーパック	T	200℃近く、オーバーパックの腐食の増大	5.2.3	オーバーパックの腐食に伴う減厚
		H	湧水によるオーバーパックの腐食の増大		オーバーパックの腐食に伴う減厚 ⇒ **人工バリア性能の長期健全性低下**
		M	酸素によるオーバーパックの腐食の増大		オーバーパックの腐食に伴う減厚
		C	酸素によるオーバーパックの腐食の増大		オーバーパックの腐食に伴う減厚
	緩衝材	T	100℃超過による緩衝材の変質・変形	5.2.3	**緩衝材の変質に伴うシール性低下** 緩衝材の乾燥に伴う変形
		H	湧水による緩衝材の膨潤		緩衝材の膨潤に伴う変形 ⇒ **変形に伴うオーバーパック支持性の低下**
		M	－		
		C	－		－

－：該当する事項無し

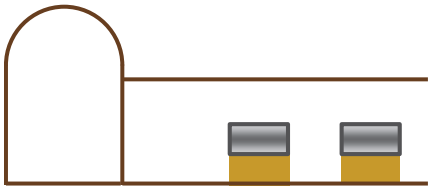


図 5.3.1-4　オーバーパックのみを定置したケースにおける人工バリアの状態イメージ
（処分坑道横置き定置概念）

以下において、人工バリアの各因子について説明する。

a. オーバーパック

(a) 温度を因子とした状態

オーバーパックのみを定置したケースにおけるオーバーパックの表面温度は、表 5.2.3-3 より 200℃近くまで上昇する可能性があり、緩衝材を定置する場合と比べて大幅な温度上昇が認められる。100℃程度、大気中の条件とすると、表 5.2.4-9 より腐食（減厚）は、100 年程度で 3mm 程度（凹凸考慮の場合 9mm 程度）、50 年程度で 2mm 程度（凸凹考慮の場合 6mm 程度）、10 年程度で 1mm 程度（凸凹考慮の場合 3mm 程度）となると算出され、オーバーパックの人工バリア性能が劣化する懸念があると考えられる。

また、オーバーパックの表面温度が高温となることから、坑道からの湧水の液滴が直接オーバーパック表面に接触するなどが無ければ、オーバーパック表面には水膜が維持されず非腐食環境となる。この場合には、初期から 100～200 年程度の間は高温度の状態が継続しており、この期間は腐食（減厚）がほとんど無くなる可能性があり、オーバーパックの人工バリア性能が劣化する懸念が低下する。ただし、液滴が懸念される場合には、坑道に液滴防止を施すことが必要と考えられる。したがって、一定期間埋め戻さずに人工バリア性能を維持する場合には、温度因子の面から対策が求められる。

前節の温度解析の検討では、換気の影響などの空気の流れを考慮しない、緩衝材の湧水による熱物性の変化を考慮しない条件での検討であり、実際の操業においては換気などによる空気の流れや湧水の存在を想定する場合には、最高温度の低下や高温度期間の減少が考えられる。温度の低下は、腐食量の低減が期待されるが、反面高温度期間の減少による非腐食環境の期間が減少することが考えられる。状態の評価においては、これらの想定に対する考慮が必要である。

(b) 水理を因子とした状態

地下水（湧水）がオーバーパックに触れることにより腐食量が増大することが懸念される。、前節までの検討の結果より、環境として 100℃程度、大気中の条件とすると、表 5.2.4-9 より腐食（減厚）は、100 年程度で 3mm 程度（凹凸考慮の場合 9mm 程度）、50 年程度で 2mm 程度（凸凹考慮の場合 6mm 程度）、10 年程度で 1mm 程度（凸凹考慮の場合 3mm 程度）となると算出され、オーバーパックの人工バリア性能が劣化する懸念が考えられる。したがって、一定期間埋め戻さずに人工バリア性能を維持する場合、水理因子の面から対策が求められる。

(c) 力学を因子とした状態

これまでの検討結果より、湧水の存在と酸化環境の存在によりオーバーパックの腐食が進行し、オーバーパックの人工バリア性能（構造健全性）を喪失する懸念が考えられる。したがって、一定期間埋め戻さずにオーバーパックの人工バリア性能を維持

させる場合、力学因子の面から対策が求められる。

(d) 化学を因子とした状態

酸化環境はオーバーパックの腐食を増大させ腐食量が増大することになる。前節までの検討の結果より、環境として100℃程度、大気中の条件とすると、表 5.2.4-9 より腐食（減厚）は、100 年程度で 3mm 程度（凹凸考慮の場合 9mm 程度）、50 年程度で 2mm 程度（凸凹考慮の場合 6mm 程度）、10 年程度で 1mm 程度（凸凹考慮の場合 3mm 程度）となると算出され、オーバーパックの人工バリア性能が劣化する懸念があると考えられる。したがって、一定期間埋め戻さずにオーバーパックの人工バリア性能を維持する場合、化学因子の面から対策が求められる。

b. 緩衝材

(a) 温度を因子とした状態

オーバーパックのみを設置したケースでは、底部の緩衝材温度は表 5.2.3-3 より100℃を超えて緩衝材が変質し、緩衝材の人工バリア性能が低下する懸念があると考えられる。また、温度の影響により緩衝材が乾燥収縮し、これらにより底部の緩衝材が変形することになり、その影響によりオーバーパックの支持性を低下させる懸念があると考えられる。したがって、一定期間埋め戻さずに緩衝材の人工バリア性能を維持する場合、温度因子の面から対策が求められる。

(b) 水理を因子とした状態

地下水（湧水）が緩衝材に触れることにより膨潤し、それにより底部の緩衝材が変形することになり、その影響により緩衝材の人工バリア性能に影響を及ぼす懸念があると考えられる。したがって、一定期間埋め戻さずに緩衝材の人工バリア性能を維持する場合、水理因子の面から対策が求められる。

(c) 力学を因子とした状態

地下水（湧水）が緩衝材に触れることにより膨潤し、また、温度の影響により緩衝材が乾燥収縮し、これらにより底部の緩衝材が変形することになり、その影響によりオーバーパックの支持性を低下させる懸念があると考えられる。したがって、一定期間埋め戻さずに緩衝材の人工バリア性能を維持する場合、力学因子の面から対策が求められる。

(d) 化学を因子とした状態

5.2.4(2) 緩衝材の変質影響の検討から、化学を因子とした緩衝材の変質の大きさは、埋め戻しの有無により影響を受けることはないと判断される

2) 緩衝材を設置したケース

緩衝材を定置した状態における人工バリア性能維持への影響が懸念される事象を整理し

た結果を表 5.3.1-5 に示す。また、この状態イメージを図 5.3.1-5 に示す。

表 5.3.1-5　人工バリア性能維持への影響が懸念される事象（5）
（処分坑道横置き定置概念：緩衝材を定置したケース）

			状態（従来と異なる現象）	論拠	人工バリア性能維持への影響が懸念される事象
人工バリア	オーバーパック	T	100℃超過	5.2.3	－
		H	－		－
		M	－		－
		C	－		－
	緩衝材	T	100℃超過による緩衝材の変質・変形	5.2.3	**緩衝材の変質に伴うシール性低下** 緩衝材の乾燥に伴う変形
		H	動水勾配増大による緩衝材の流出	5.2.4	緩衝材の流出に伴う密度低下 ⇨ **密度低下による所要性能低下**
		M	－		
		C	－		－

－：該当する事項無し

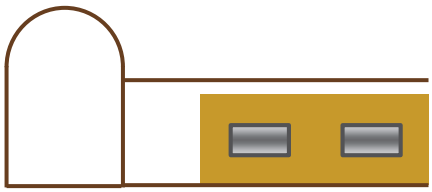


図 5.3.1-5　緩衝材を定置したケースにおける人工バリアの状態イメージ
（処分坑道横置き定置概念）

以下において、人工バリアの各因子について説明する。

a. オーバーパック

(a) 温度を因子とした状態

処分坑道の埋め戻しを行わない場合のオーバーパックの表面温度は、表 5.2.3-3 より 100℃を超過する可能性があるが、第 2 次取りまとめにて試算されている坑道の埋め戻しを行う場合の温度と比べて大きな差異は認められなかった。温度因子の面からは、オーバーパックの人工バリア性能への影響が懸念される事象は特にないと判断される。

また、前節の温度解析の検討では、緩衝材の湧水による熱物性の変化を考慮しない条件での検討であり、実際の操業においては湧水の存在を想定する場合には、最高温度の低下や高温度期間の減少が考えられ、腐食量の低減が期待される。

(b) 水理を因子とした状態

透水性の低い緩衝材の存在により、オーバーパックに達する水の供給は抑制される。ただし、緩衝材の施工方式により異なるが、ベントナイトブロックを想定した場合ではブロック間に隙間が存在することから、オーバーパック表面において低酸素状態になっていることは考え難く、ベントナイトに接触している状態としての評価になると考える。他の緩衝材施工方式として、ベントナイトペレット充填や吹付け等が考えられるが、この場合には坑道との隙間が無い施工方法となるため、人工バリア性能維持への影響の懸念はないものと考えられる。温度として 100℃程度、ベントナイト中の状態とすると、表 5.2.4-9 より腐食（減厚）は、100 年程度で 3mm 程度（凹凸考慮の場合 9mm 程度）、50 年程度で 2mm 程度（凸凹考慮の場合 6mm 程度）、10 年程度で 1mm 程度（凸凹考慮の場合 3mm 程度）と算出された。

したがって、一定期間埋め戻さずにオーバーパックの人工バリア性能を維持する場合、水理因子の面から対策が求められる。

(c) 力学を因子とした状態

これまでの検討結果より、湧水の存在と酸化環境の存在によりオーバーパックの腐食が進行し、オーバーパックの人工バリア性能（構造健全性）が劣化する懸念があると考えられる。

したがって、一定期間埋め戻さずにオーバーパックの人工バリア性能を維持する場合、力学因子の面から対策が求められる。

(d) 化学を因子とした状態

温度として 100℃程度、ベントナイト中の状態とすると、表 5.2.4-9 より腐食（減厚）は、100 年程度で 3mm 程度（凹凸考慮の場合 9mm 程度）と算出されている。

したがって、一定期間埋め戻さずにオーバーパックの人工バリア性能を維持する場合、化学因子の面から対策が求められる。

b. 緩衝材

(a) 温度を因子とした状態

緩衝材を定置した後、緩衝材と坑道との間に隙間を残した場合、緩衝材温度は、表 5.2.3-3 より 100℃を超える可能性があり、緩衝材が変質して緩衝材の人工バリア性能が低下する懸念があると考えられる。また、温度の影響により緩衝材が乾燥収縮し、これらにより底部の緩衝材が変形することになり、その影響によりオーバーパックの支持性を低下させる懸念があると考えられる。

したがって、一定期間埋め戻さずに緩衝材の人工バリア性能を維持する場合、温度因子の面から対策が求められる。

(b) 水理を因子とした状態

主要坑道と処分坑道に空洞が存在していることにより、処分坑道周辺の動水勾配が大きい状態になることが想定される。動水勾配により生じる地下水流（湧水）が緩衝材に触れることにより、緩衝材が膨潤して、場合よっては緩衝材が流出していくことになり、その影響により緩衝材の人工バリア性能に影響を及ぼす懸念があると考えられる。また、地下水（湧水）が緩衝材に触れることにより膨潤し、緩衝材が変形することになり、その影響により緩衝材の人工バリア性能に影響を及ぼす懸念があると考えられる。

したがって、一定期間埋め戻さずに緩衝材の人工バリア性能を維持する場合、水理因子の面から対策が求められる。

(c) 力学を因子とした状態

地下水（湧水）が緩衝材に触れることにより膨潤・流出し、それにより変形や密度の低下を引き起こし、その影響により、緩衝材の人工バリア性能を低下させる懸念があると考えられる。

したがって、一定期間埋め戻さずに緩衝材の人工バリア性能を維持する場合、力学因子の面から対策が求められる。

(d) 化学を因子とした状態

5.2.4(2) 緩衝材の変質影響の検討から、化学を因子とした緩衝材の変質の大きさは、埋め戻しの有無により影響を受けることはないと判断される。

3) 処分坑道を埋め戻したケース

処分坑道を埋め戻したケースにおける人工バリア性能維持への影響が懸念される事象を整理した結果を表 5.3.1-6 に示す。また、この状態イメージを図 5.3.1-6 に示す。

表 5.3.1-6　人工バリア性能維持への影響が懸念される事象（6）
（処分坑道横置き定置概念：処分坑道を埋め戻したケース）

		状態（従来と異なる現象）		論拠	人工バリア性能維持への影響が懸念される事象
人工バリア	オーバーパック	T	100℃超過	5.2.3	－
		H	－		－
		M	－		－
		C	－		－
	緩衝材	T	100℃超過による緩衝材の変質	5.2.3	緩衝材の変質に伴うシール性低下
		H	動水勾配増大による緩衝材の流出	5.2.4	緩衝材の流出に伴う密度低下
		M	－		⇨ **密度低下による所要性能低下**
		C	－		－

－：該当する事項無し

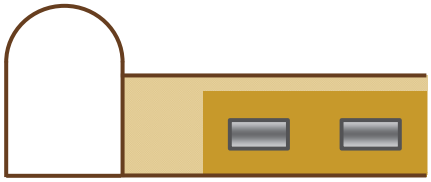


図 5.3.1-6　処分坑道を埋め戻したケースにおける人工バリアの状態イメージ
（処分坑道横置き（原位置）定置概念）

以下において、人工バリアの各因子について説明する。

a. オーバーパック

処分坑道が埋め戻された状態であり、第 2 次取りまとめと同様の状態となる。したがって、オーバーパックの人工バリア性能は維持されている状態と考えられる。

b. 緩衝材

(a) 温度を因子とした状態

第 2 次取りまとめと同じ状態となる。したがって、温度因子の面から、一定期間埋め戻さずに緩衝材を健全な状態に維持させるための対策は求められない。

(b) 水理を因子とした状態

主要坑道に空洞が存在していることにより、処分坑道周辺の動水勾配が大きい状態となることが想定される。動水勾配により生じる地下水流（湧水）が緩衝材に触れることにより、緩衝材が膨潤して場合よっては緩衝材が流出していくことになり、その影響により緩衝材の人工バリア性能に影響を及ぼす懸念があると考えられる。

したがって、一定期間埋め戻さずに緩衝材の人工バリア性能を維持する場合、水理因子の面から対策が求められる。

(c) 力学を因子とした状態

地下水（湧水）が緩衝材に触れることにより流出し、それにより密度の低下を引き起こし、その影響により緩衝材の人工バリア性能を低下させる懸念があると考えられる。

したがって、一定期間埋め戻さずに人工バリア性能を維持する場合、力学因子の面から対策が求められる。

(d) 化学を因子とした状態

5.2.4(2) 緩衝材の変質影響の検討から、化学を因子とした緩衝材の変質の大きさは、埋め戻しの有無により影響を受けることはないと判断される。

(3) 処分坑道横置き（PEM）定置概念

処分坑道横置き（PEM）定置概念における人工バリアの状態と期間について考察した。

1) PEM のみ設置したケース

PEM のみを定置した状態における人工バリア性能維持への影響が懸念される事象を整理した結果を表 5.3.1-7 に示す。また、この状態イメージを図 5.3.1-7 に示す。

表 5.3.1-7　人工バリア性能維持への影響が懸念される事象（7）
（処分坑道横置き（PEM）定置概念： PEM のみを定置したケース）

		状態（従来と異なる現象）		論拠	人工バリア性能維持への影響が懸念される事象
PEM 容器		T	100℃近く	5.2.3	オーバーパックの腐食に伴う減厚
		H	湧水によるオーバーパックの腐食の増大		オーバーパックの腐食に伴う減厚
		M	酸素によるオーバーパックの腐食の増大		オーバーパックの腐食に伴う減厚
		C	酸素によるオーバーパックの腐食の増大		オーバーパックの腐食に伴う減厚
人工バリア	緩衝材	T	100℃超過による緩衝材の変質	5.2.3	**緩衝材の変質に伴うシール性低下**
		H	－		－
		M	－		－
		C	－		－

人工バリア性能の長期健全性低下

－：該当する事項無し

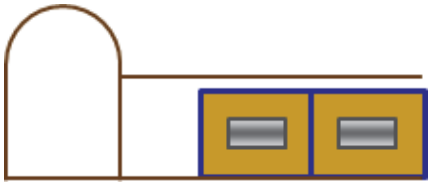


図 5.3.1-7　PEM のみを定置したケースにおける人工バリアの状態イメージ
（処分坑道横置き（PEM）定置概念）

以下において、人工バリアの各因子について説明する。

a. PEM 容器

(a) 温度を因子とした状態

埋め戻しをしない場合の PEM 容器の表面温度は、表 5.2.3-4 より 100℃弱程度であ

るが、埋め戻しする場合と比べて温度上昇が予測される。PEM 容器の温度は、腐食速度に影響する。オーバーパックと同様に、環境として 100℃程度、大気中の条件とすると、表 5.2.4-9 より腐食（減厚）は、100 年程度で 3mm 程度（凹凸考慮の場合 9mm 程度）、50 年程度で 2mm 程度（凸凹考慮の場合 6mm 程度）、10 年程度で 1mm 程度（凸凹考慮の場合 3mm 程度）となると算出される。埋め戻しする場合は、PEM 容器の温度は 80℃程度となる。表 5.2.4-9 における 75℃の条件でみると、腐食（減厚）において 100 年程度で 0.6mm 程度（凹凸考慮の場合 1.8mm 程度）、の差となるが、大きな違いではない。

また、PEM の表面温度は長くはないが高温となる期間があることから、坑道からの湧水の液滴が直接 PEM 表面に接触するなどが無ければ、PEM 表面には水膜が維持されず非腐食環境となる。この場合は、初期から 40 年程度の間であり、この期間は腐食（減厚）がほとんど無くなる可能性がある。ただし、液滴が懸念される場合には、坑道に液滴防止を施すことが必要と考えられる。したがって、一定期間埋め戻さずに PEM 容器の性能を維持する場合、温度因子の面から対策が求められる。

前節の温度解析の検討では、換気の影響などの空気の流れを考慮しない、緩衝材の湧水による熱物性の変化を考慮しない条件での検討であり、実際の操業においては換気などによる空気の流れや湧水の存在を想定する場合には、最高温度の低下や高温度期間の減少が考えられる。温度の低下は、腐食量の低減が期待されるが、反面高温度期間の減少による非腐食環境の期間が減少することが考えられる。状態の評価においては、これらの想定に対する考慮が必要である。

(b) 水理を因子とした状態

地下水（湧水）が PEM 容器に触れることにより腐食量が増大することになり、(a) と同様に人工バリア性能が低下する懸念があると考えられる。

したがって、一定期間埋め戻さずに PEM 容器の性能を維持する場合、水理因子の面から対策が求められる。

(c) 力学を因子とした状態

湧水の存在と酸化環境の存在により、PEM 容器の腐食が進行し、人工バリア性能を維持するための PEM 容器の性能を喪失する懸念があると考えられる。

したがって、一定期間埋め戻さずに PEM 容器の性能を維持する場合、力学因子の面から対策が求められる。

(d) 化学を因子とした状態

酸化環境は PEM 容器の腐食を増大させ腐食量が増大することになり、(a) と同様に人工バリア性能を維持するための PEM 容器の性能を喪失する懸念がある。

したがって、一定期間埋め戻さずに PEM 容器の性能を維持する場合、化学因子の面から対策が求められる。

b. 緩衝材

(a) 温度を因子とした状態

PEM のみを設置したケースでは、緩衝材温度は表 5.2.3-4 より 100℃を超えて緩衝材が変質し、緩衝材の人工バリア性能が低下する懸念があると考えられる。

したがって、一定期間埋め戻さずに緩衝材の人工バリア性能を維持する場合、温度因子の面から対策が求められる。

(b) 水理を因子とした状態

PEM 容器の健全性が維持され、地下水（湧水）が緩衝材に触れることが無ければ、緩衝材の人工バリア性能に影響を及ぼす懸念は無いものと考えられる。

(c) 力学を因子とした状態

水理を因子とした状態と同様に PEM 容器の健全性が維持され、地下水（湧水）が緩衝材に触れることが無ければ、緩衝材の人工バリア性能に影響を及ぼす懸念は無いものと考えられる。

(d) 化学を因子とした状態

5.2.4(2) 緩衝材の変質影響の検討から、化学を因子とした緩衝材の変質の大きさは、埋め戻しの有無により影響を受けることはないと判断される

2) 処分坑道が埋め戻されたケース

処分坑道を埋め戻した状態における人工バリア性能維持への影響が懸念される事象を整理した結果を表 5.3.1-8 に示す。また、この状態イメージを図 5.3.1-8 に示す。

表 5.3.1-8　人工バリア性能維持への影響が懸念される事象（8）
（処分坑道横置き（PEM）定置概念：処分坑道を埋め戻したケース）

		状態（従来と異なる現象）		論拠	人工バリア性能維持への影響が懸念される事象
PEM 容器		T	80℃近くまで上昇	5.2.3	－
		H	－		－
		M	－		－
		C	－		－
人工バリア	緩衝材	T	－		－
		H	－		－
		M	－		－
		C	－		－

－：該当する事項無し

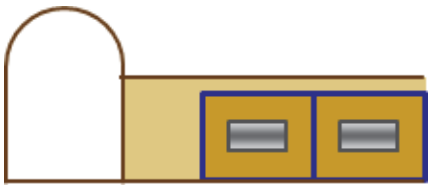


図 5.3.1-8　処分坑道を埋め戻したケースにおける人工バリアの状態イメージ
（処分坑道横置き（PEM）定置概念）

以下において、人工バリアの各項目について説明する。

a. PEM 容器

PEM 容器の周囲に埋め戻し材が存在することにより、PEM 容器の劣化速度が緩慢になる。状態としては、第 2 次取りまとめと同様となり、PEM の腐食についても同様の考え方になるものと考えられる。したがって、大気に直接触れていない状態で、低酸素状態として考える。環境として、温度で 80℃程度、ベントナイト中の状態とすると、表 5.2.4-9 の右欄より 100 年程度で 0.6m 程度（凹凸考慮の場合 1.8m 程度）、50 年程度で 0.4mm 程度（凸凹考慮の場合 1.2mm 程度）、10 年程度で 0.2mm 程度（凸凹考慮の場合 0.6mm 程度）と算出された。この程度の腐食で回収時の力学的な影響に問題ないとするならば、PEM 容器は健全な状態で維持されるものと考えられる。

b. 緩衝材

PEM 容器の周囲に埋め戻し材が存在することにより、PEM 容器の健全性が維持されている状態であることから、緩衝材の人工バリア性能維持への影響はないものと考えられる。

5.3.2　回収維持期間の例示

(1) 回収維持期間の例示

5.3.1 の検討により、処分プロセスを進めず一定期間埋め戻さない状態とした場合における人工バリア性能に対して、影響の程度と期間について算定した結果を表 5.3.2-1 に整理した。これらの期間と影響の程度（裕度）の考え方は、坑道が埋め戻されない場合、第 2 次取りまとめにおける人工バリアの要件とは異なり、見直す必要性があると考えられる。例えば、腐食代においては、埋め戻すことを前提とした腐食代であり、緩衝材においては、維持期間に相当する期間に対する流出量分の厚さや密度の追加が必要になると考えられ、その前提に違いが生じることとなる。そのため、処分坑道等が埋め戻されない場合には、処分坑道等を埋め戻さないとする条件を整理したうえで、新たに人工バリア性能に及ぼす影響の程度と維持期間の設定の考え方について検討が必要である。

したがって、人工バリア性能に影響を及ぼすものと想定される定量的な程度とその期間をもって、回収維持期間を例示することは現状では困難であり、回収維持期間の検討について継続的な検討が必要である。

表 5.3.2-1 人工バリアに及ぼす主な影響の程度と期間（表 5.2.4-6～表 5.2.4-8 より）

人工バリア	主な影響	期間			備考
		10 年後	50 年後	100 年後	
オーバーパック	腐食深さ（mm）	0.9	1.9	2.7	空気と接する場合
		0.2	0.4	0.6	水と接する場合
		0.4	0.9	1.3	ベントナイトと接する場合
緩衝材	流出量（kg）			67	ただし、1 処分孔あたり（竪置き方式）

しかしながら、方策を加えることにより人工バリア性能に及ぼす影響を抑えることが可能である。ただし、それら方策の時間的な変化には不確実性を有することになり、回収可能性を維持する期間において、維持管理していくことが前提となる。一般にトンネル構造物は、トンネルを運営する機関が維持管理を続けながら供用しており、理論上は維持管理することにより永久に供用することが可能ではあると考えられる。したがって、地下施設においても、維持管理が可能な坑道とすることにより、人工バリア性能を維持しつつ、回収可能性を継続的に維持することが可能であると考えられる。

なお、我が国におけるトンネルと鉱山の実績面からは、表 5.3.2-2、表 5.3.2-3 に示すとおり、トンネル供用期間は、最大で 70 年程度、鉱山での稼働期間は、最大で 150 年程度であり、回収維持期間の設定に対するひとつの目安になるものと考えられる。

表 5.3.2-2　我が国におけるトンネルの共用期間の例[4]

名称（トンネル）	共用期間（坑道維持期間）	
	矢板工法	NATM 工法
道路トンネル（高速道路）	1965 年～（50 年間）	1983 年～（32 年間）
鉄道トンネル（新幹線）	1964 年～（51 年間）	1976 年～（39 年間）
鉄道トンネル（在来線）	1942 年～（73 年間）	

表 5.3.2-3 我が国における鉱山の稼働期間の例

名称（鉱山）	鉱山稼働期間
釜石鉱山[97][98]	1862 年～（153 年間）
神岡鉱山[98]	1874 年～（141 年間）（採掘は 720 年頃～）
釧路コールマイン[99]	1905 年～（110 年間）（採掘は前身の安田炭礦）

一方、回収可能性維持期間については、技術的要素だけではなく社会的要素を含めて決定するものであり、今後のそのような議論に際する技術的な根拠として、人工バリア性能維持に対して工学的観点から以下に整理した。

・オーバーパックのみ設置したケースでは、回収の容易性は高いものの、人工バリアの性能を維持するための工学的対策が必要となり、その実現性や信頼性について検討が必要となる。

・緩衝材を定置したケースでは、竪置き方式において、オーバーパックの人工バリア性能を維持する観点からは、合理的な状態であると考えられる。また、緩衝材の遮へい性により、処分坑道の作業性（作業時間）を確保することもできる。しかし、処分坑道横置き方式（原位置）の処分坑道については、緩衝材を定置することにより維持管理のための空間を確保することが難しくなるため、湧水抑制対策の維持管理の実現性と信頼性の確保に向けた抜本的な検討が必要である。

・処分坑道までを埋め戻した状態では、坑道内は酸化還元環境に移行しつつ人工バリア性能が維持されている状態であると考えられる。また、前段階（緩衝材を設置した状態）と同様に坑道（主要坑道）が空いている状態であることから、岩盤中の動水勾配の変化に対応した湧水抑制対策が必要である。

5.4　処分施設の回収維持期間に対する維持管理方策の検討

処分施設の維持管理方策の検討では、「維持管理を見据えた環境条件の調査」、「維持管理のための具体的な方策」として、一般的なトンネルの維持管理の例を示し、処分概念の各方式における操業の代表的な人工バリアの状態に応じた維持管理の検討を行い、その結果を以下に取りまとめた。

5.4.1　維持管理を見据えた環境条件の調査

(1) 一般的なトンネルの維持管理

本検討で対象としている処分施設は、地下坑道群からなるものである。そのため処分施設の維持管理について検討を行う場合、まずは一般的なトンネルで実施されている維持管理を参考にすることが合理的であると考えられる。一般的なトンネルの維持管理は通常４つの項目からなる維持管理サイクルと呼ばれる手順を繰返し実施することにより、長期間施設を維持する。図 5.4.1-1 にトンネルで行われている一般的な維持管理サイクルを示す。

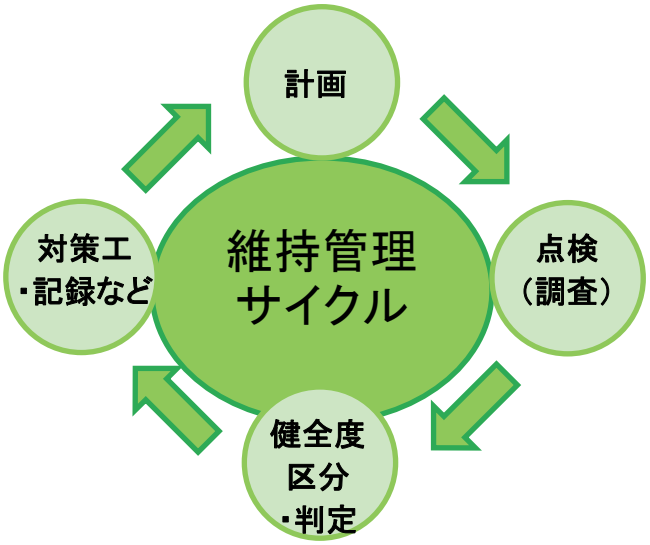


図 5.4.1-1　一般的なトンネルの維持管理の手順

図 5.4.1-1 に示した維持管理サイクルのうち、点検および判定については昨年度の検討で各種事業体のフローについてまとめ、処分施設への適用性について検討を行った。本検討では維持管理サイクルのうち主に対策工（補修・補強）を中心に一般的なトンネルで実施されている技術について調査を実施し、処分施設への適用性検討を行うこととする。

本検討で対象とする処分施設は、アクセス坑道、連絡坑道、主要坑道、処分坑道、処分孔（竪置き方式の場合）からなる。第 2 次取りまとめに示されている各坑道の標準断面を図 5.4.1-2～図 5.4.1-4 に示す。これらの坑道について回収維持期間の維持管理を検討する場合、対象とする坑道等が埋め戻される場合と埋め戻されない場合の二つに大別して考えることが

できる。前章での検討結果により、回収維持期間（操業期間）に埋め戻される坑道・処分孔については、第 2 次取りまとめと同様に坑道が安定した状態となることから基本的に対策は不要と考えられる。一方で、回収維持期間（操業期間）に埋め戻されない坑道・処分孔については、通常のトンネルで実施されている維持管理方法を適用していくことが合理的であると考えられる。

人工バリア性能への影響を低減させるために坑道の環境条件として求められるものは、力学的観点から地山および支保の強度の保持による坑道維持と水理学的観点からの湧水抑制である。化学的観点からの影響については、現象として把握できる事象が岩盤の劣化や支保の劣化による坑道の変状、または坑道内への湧水の水質となって現れるため、力学的観点および水理学的観点からの対策を行うことにより影響を低減・制御することが可能であり、求められる坑道の環境条件を保持することが可能であると考えられる。なお、熱的観点からの影響について対策を考慮する場合については、坑道離間距離や廃棄体定置ピッチを考慮した設計や、空調による坑道内温度の制御等が考えられるが、これらは適切な設計の実施や空調設備を適宜交換することにより、必要とされる坑道の環境条件を保持することが可能であると考えられる。

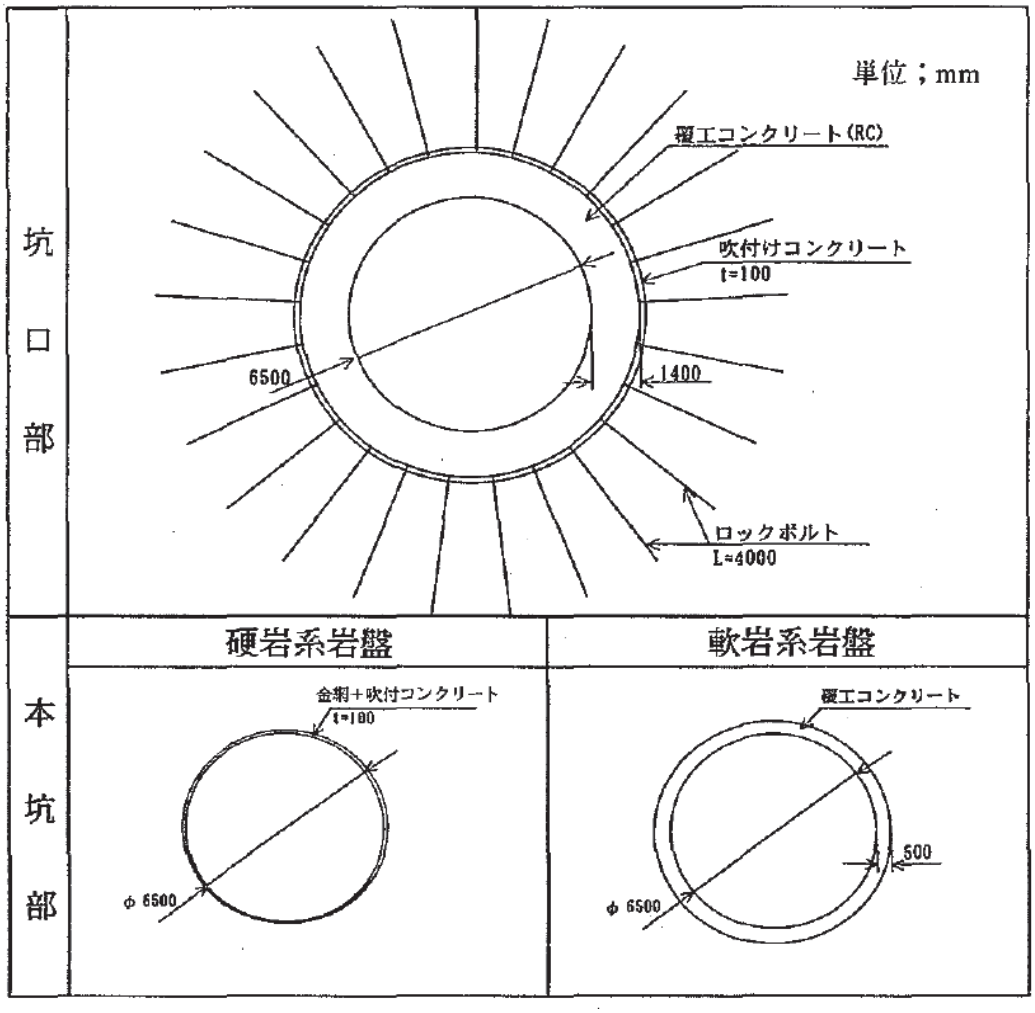
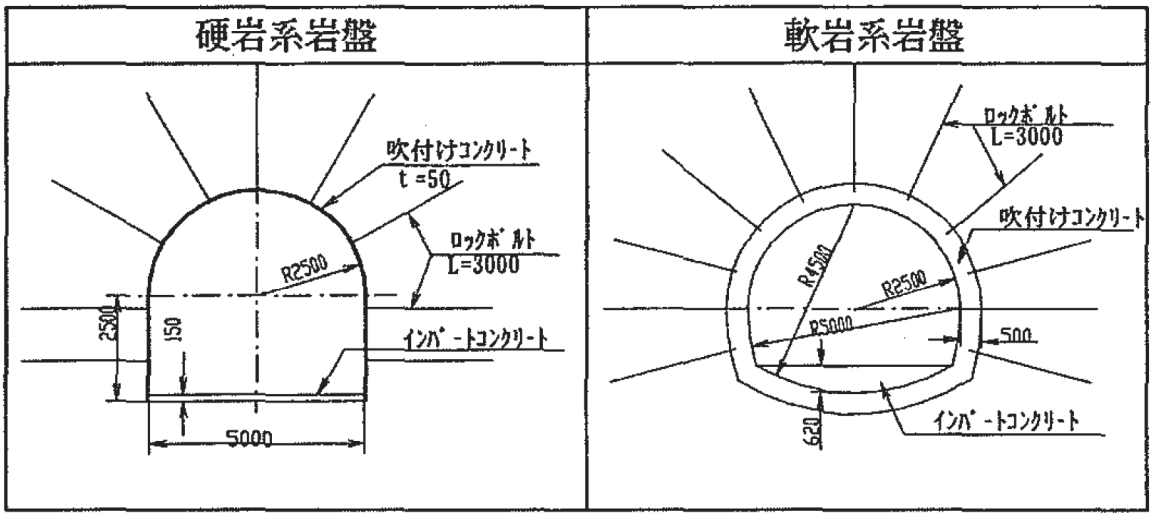


図 5.4.1-2　アクセス坑道における標準断面[5]



単位：mm

図 5.4.1-3　主要・連絡坑道における標準断面[5]

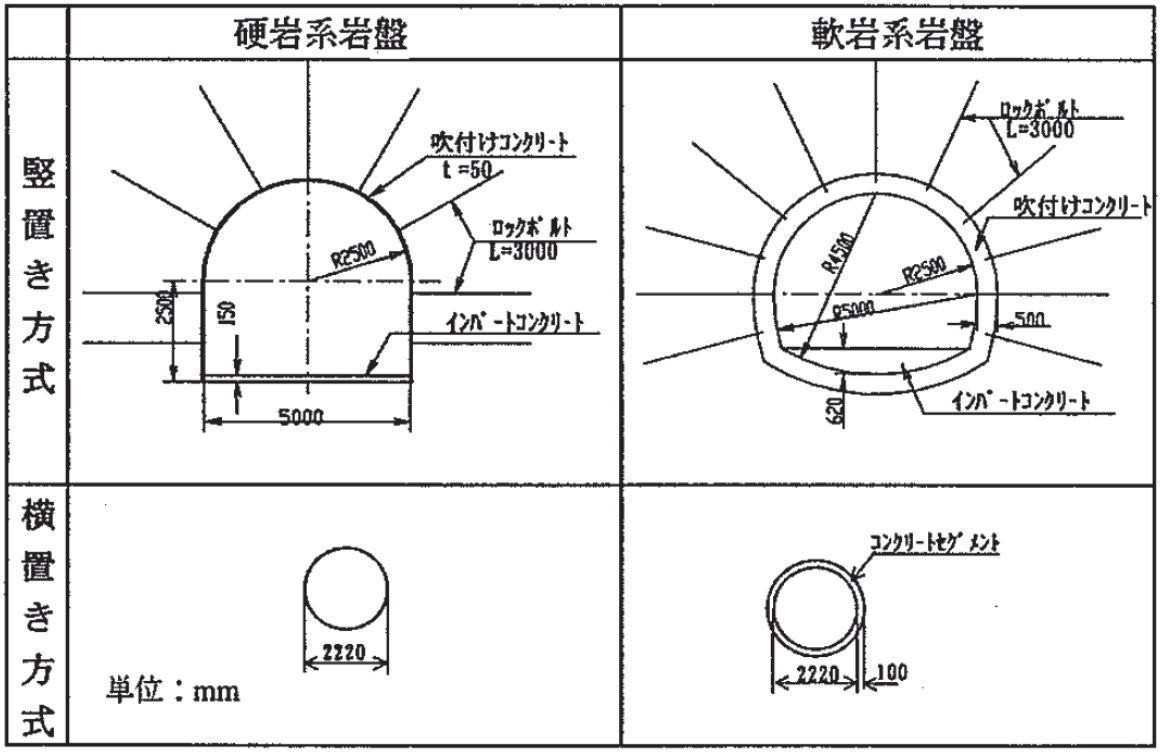


図 5.4.1-4　処分坑道における標準断面[5]

(2) 一般的な維持管理の例

1) トンネルの維持管理

トンネルの維持管理は土木学会編「トンネルの維持管理」[95]に体系的にまとめられている。以下、トンネルの変状調査、対策工の選定手順、対策工について示す。また、最新の補修・補強技術についても調査結果を示す。

トンネルに変状が認められた場合、以下の図 5.4.1-6 に示す手順により対策工を選定することが一般的なトンネルでは行われている。

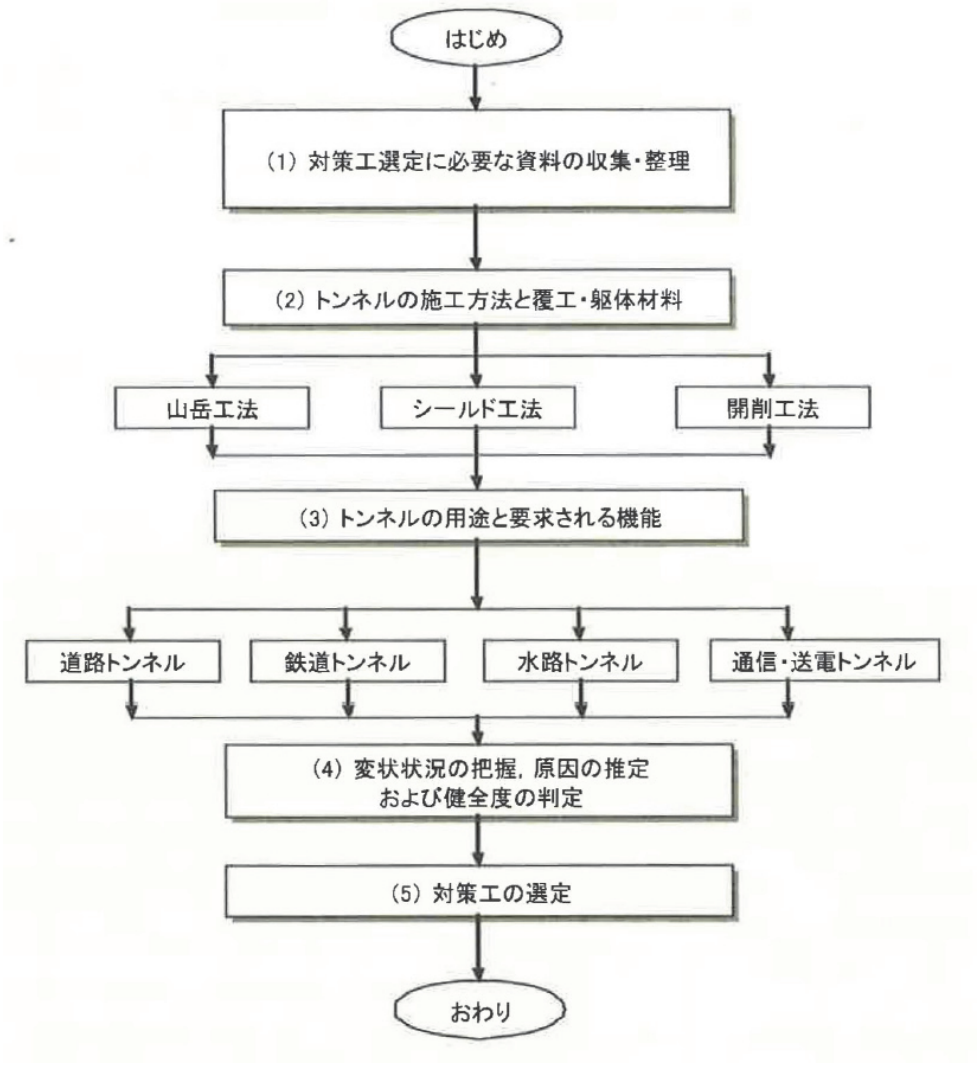


図 5.4.1-5　対策工選定の手順[95]

変状に対する対策工の例を表 5.4.1-1 に示す。

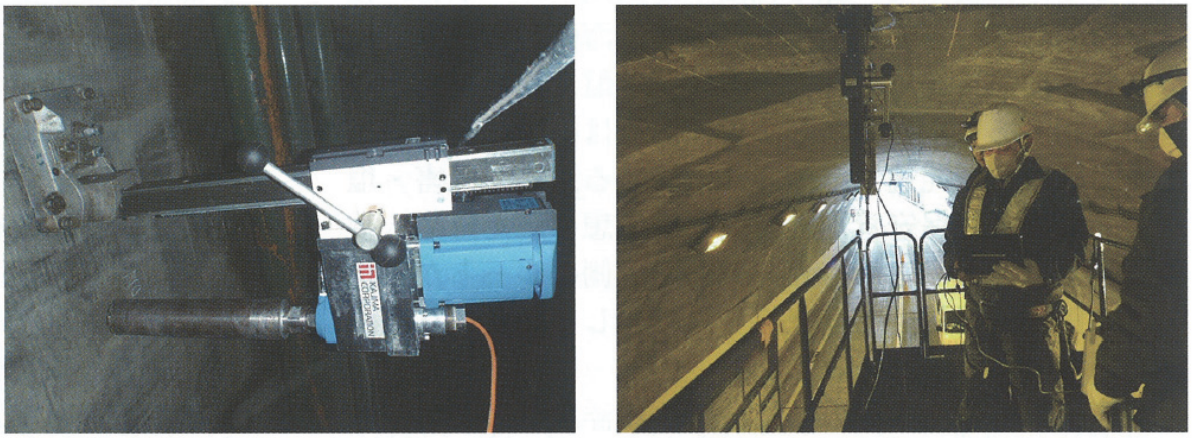
表 5.4.1-1 変状に対する対策工の例[95][96]

部位	形態	変状現象	工法区分※	対策工法																		
				劣化・剥落対策									漏水・凍結対策						外力対策				
				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	電気防食工法	凍害対策工法	剥落防止工法	内面補強工法	地山との一体化	導水工法	止水工法	背面注入工法	地下水位低下工法	断熱工法	加熱工法	裏込注入工法	ロックボルト補強工法	内巻工法	セントル補強工法	内面補強工法
覆工・躯体	損傷	目地切れ，目違い，段差，目開き	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		○	○				○	○	○							○	○	○	○	○
	変形	押し出し・横断面変形	山・都																○	○	○	○	○
		移動，側壁転倒，沈下	山																○	○	○	○	○
	材料劣化・材質不良	石灰分の溶出，断面欠損	山・都	○	○	○	○	○															
		ジャンカ	山・都		○					○													
		鉄筋の露出，鉄筋腐食	山・都	○	○	○	○	○		○													
	漏水・凍結	ツララ，倒氷	山	○	○	○			○		○						○	○					
		漏水	山・都	○									○	○	○	○							
	表面付着物	エフロレッセンス，錆汁	山・都	○	○	○	○	○						○									
		バクテリアスライム，煤煙，黒鉛，カビ，汚泥	山・都	○	○	○					○		○										
路面・地盤	損傷	ひび割れ	山・都	○	○	○	○	○											○	○	○	○	○
	変形	隆起，沈下	山・都																○	○	○	○	○
		トンネル軸方向の変形（軌道狂い）	山・都																○	○	○	○	○
		排水溝の縁石の転倒	山																				
排水溝	流入水	氷盤	山														○	○					
		滞水	山・都	○									○	○	○	○							
	流入物	噴泥，沈砂	山・都										○						○	○	○	○	○
		バクテリアスライム，汚泥	山・都	○	○	○					○		○										
坑口・開口部	損傷	ひび割れ，食い違い	山・都	○	○	○	○	○													○	○	○
	変形	前傾，沈下，移動	山																		○	○	○
構造変化部※※	損傷	ひび割れ	山・都	○	○	○	○	○											○	○	○	○	○
		目地切れ，目違い，段差，目開き	山・都																○	○	○	○	○
	変形	横断面変形，縦断面変形	山・都																○	○	○	○	○
	流入水	漏水	山・都	○									○	○	○	○							
付帯設備	腐食	支持金物の腐食	山・都																				
	変形	取付部の緩み，脱落	山・都																○	○	○	○	○
補修・補強材	劣化	浮き，ひび割れ，剥離・剥落	山・都		○					○	○								○	○	○	○	○
		腐食	山・都																				
地山	損傷	トンネル周辺の押し出し	山									○							○	○	○	○	○
	変形	地表面沈下・陥没	山・都									○							○	○	○	○	○
備考	※ 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，構造の特徴上比較的生じやすい変状現象を表すものであり，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．																						

また、最新の補修・補強技術の例として東海道新幹線トンネルで実施されている技術[96]を図 5.4.1-6、図 5.4.1-7 に示す。

①調査検査技術：

・レーダ式空洞調査技術
・デジタルカメラ式ひび割れ調査技術
・OC 法による覆工応力測定技術（図 5.4.1-6(a)）
・小型カメラによる空洞形状計測装置（図 5.4.1-6(b)）

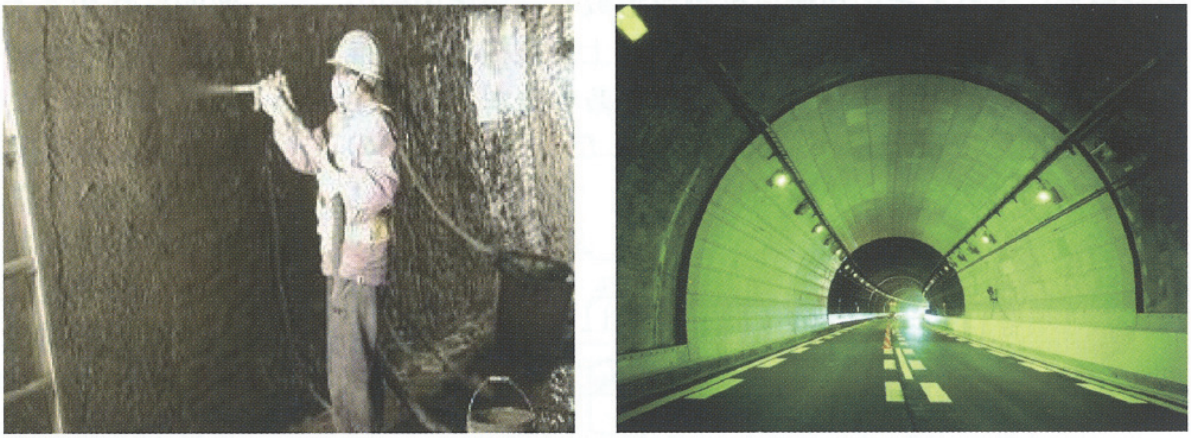


(a)　覆工応力測定技術　　(b)　空洞形状計測装置

図 5.4.1-6　測定・計測技術の例[96][97]

②補修補強技術

・可塑性モルタル空洞充填技術
・埋設型枠内巻技術（図 5.4.1-7(b)）
・高じん性モルタル薄肉吹付内巻工法（図 5.4.1-7(a)）
・高性能ロックボルト補修工法



(a)吹付　　(b)埋設型枠)

図 5.4.1-7　内巻き補強工法の例[96][97]

現在供用されている鉄道トンネルや道路トンネルでは、長期の力学的安定性や坑道内環境の保持のため覆工が設置されており、これまで示してきた一般的なトンネルを対象とした維持管理技術は覆工を対象としたものが多い。一方で、前述した第 2 次取りまとめで示されている処分施設の標準断面をみると、覆工が計画されていない坑道が多くある。長期間にわたり坑道を維持管理していくためには、既存の維持管理技術に関する処分施設への適用性の検討だけでなく、覆工の必要性の検討が必要と考えられる。また、処分坑道に人工バリアを定置した場合、維持管理のための補修・補強を実施していくためには空間の確保が必要であり、維持管理を前提とした坑道断面の検討が必要と考えられる。

5.4.2　維持管理のための具体的な方策

5.3 人工バリアの状態と回収維持期間の例示の検討により、埋め戻しをせずに人工バリア性能を維持するためには、坑道と人工バリアの変状を抑制する方策を加えることが必要な事象が多々見られた。ここでは、人工バリア性能を維持しつつ、処分施設を維持管理するための方策について検討を加えた。

(1) 処分孔竪置き定置方式

処分孔竪置き定置方式において、操業段階の代表的な状態と考える以下の 3 ケースにおいて、人工バリア性能を維持しつつ処分施設を維持管理するための方策について検討した。

1)オーバーパックのみを定置したケース

2)緩衝材を定置したケース

3)処分坑道を埋め戻したケース

1) オーバーパックのみ定置したケース

オーバーパックのみ定置したケースにおいて、人工バリア性能維持への影響が懸念される事象に対して、処分施設の維持管理方策を検討した結果を表 5.4.2-1 に示す。

表 5.4.2-1　処分施設を持管理するための方策（1）

（処分孔竪置き定置方式：オーバーパックのみ定置ケース）

		影響因子	人工バリア性能維持への影響が懸念される事象	埋め戻さずに人工バリア性能と処分施設を維持管理するための方策
主要坑道		T	－	－
		H	湧水による坑道の劣化	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	乾燥による強度低下 **空洞安定性の低下**	（湧水抑制と吹付けの実施と維持管理）
		C	水質による坑道の劣化	**吹付け（低 pH セメント）実施と維持管理**
処分坑道		T	－	－
		H	湧水による坑道の劣化	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	乾燥による強度低下 **空洞安定性の低下**	（湧水抑制と吹付け実施と維持管理）
		C	水質による坑道の劣化	**吹付け（低 pH セメント）実施と維持管理**
処分孔		T	－	－
		H	湧水による処分孔の劣化	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	乾燥による強度低下 **空洞安定性の低下**	（湧水抑制と吹付け実施と維持管理）
		C	水質による処分孔の劣化	**吹付け（低 pH セメント）実施と維持管理**
人工バリア	オーバーパック	T	オーバーパックの腐食に伴う減厚	－
		H	オーバーパックの腐食に伴う減厚	**湧水抑制の実施**
		M	**オーバーパックの長期健全性低下**	（湧水抑制の実施による劣化抑制）
		C	オーバーパックの腐食に伴う減厚	**酸素遮断（窒素封入）の実施**
	緩衝材	T	**緩衝材の変質に伴うシール性等の劣化** 緩衝材の乾燥に伴う変形	（換気・防水対策）による変質抑制
		H	緩衝材の膨潤に伴う変形	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	**緩衝材の変形に伴うＯＰ支持性の低下**	（湧水抑制対策）による変形抑制
		C	－	－

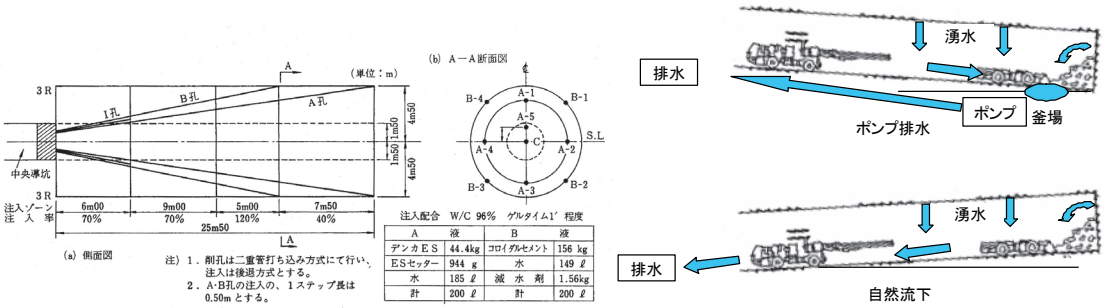
－：該当する事項無し

a. 主要坑道

主要坑道においては、湧水と乾燥による地山や支保の劣化に伴い、空洞安定性の低下が引き起こされる事象が懸念される。人工バリア性能を維持しつつ主要坑道を維持管理するための湧水と乾燥への対応を検討する。

湧水への対応として、グラウトや排水による湧水抑制対策が考えられる。図 5.4.2-1 に

対策の概念[90][91][92][93]を示す。これらの対策の効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を図り、湧水抑制効果を維持しておくことが前提になるものと考えられる。



グラウト　　排水

図 5.4.2-1　湧水抑制対策

乾燥への対応は、土木工学分野では、地山への吹付けコンクリートを施工する方策が一般的な対策となる。しかし、地層処分分野ではセメント系材料の使用は、アルカリによるベントナイト系材料の変状を引き起こすことが知られ、低ｐＨセメントが開発されているところである。一方で、吹付けコンクリートの効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を図り、吹付けコンクリートの性能を維持しておくことが前提になるものと考えられる。

b. 処分坑道

処分坑道においては、主要坑道と同様に、湧水と乾燥による地山や支保の劣化に伴い、空洞安定性の低下が引き起こされる事象が懸念される。人工バリア性能を維持しつつ処分坑道を維持管理するための湧水と乾燥への対応は、主要坑道と同様にグラウトや排水による湧水抑制対策と、低ｐＨセメントを用いた吹付けコンクリートの施工が挙げられる。なお、各対策の効果は、時間的な不確実性が考えられることから、維持管理を図り、所要の性能を維持しておくことが前提になるものと考えられる。

c. 処分孔

処分孔においては、主要坑道・処分坑道と同様に、湧水と乾燥による地山や支保の劣化に伴い、空洞安定性の低下が引き起こされる事象が懸念される。人工バリア性能を維持しつつ処分孔を維持管理するための湧水と乾燥への対応は、坑道と同様にグラウトや排水による湧水抑制対策と、低ｐＨセメントを用いた吹付けコンクリートの施工が挙げられる。なお、各対策の効果は、時間的な不確実性が考えられることから、維持管理を図り、所要の性能を維持しておくことが前提になるものと考えられる。

d. オーバーパック

オーバーパックにおいては、湧水の接触や酸素の供給による劣化により、容器厚さが減じる事象が懸念された。オーバーパックの所要性能を維持しつつ処分施設を維持管理する

ための湧水と酸化環境への対応を検討する。

湧水への対応として、主要坑道や処分坑道と同様に、湧水抑制対策が考えられる。

酸化環境への対応としては、オーバーパックへの酸素の供給を遮断する方法となり、オーバーパックの被膜や、不活性ガスの使用による還元環境の構築が考えられる。このうち、オーバーパックの被膜については、被膜の耐久性や被膜に用いる材料の残置による人工バリア性能への影響など、地層処分分野においては課題が残る方策であると考えられる。一方で、不活性ガスの使用については、使用するガスの透気の防止のための方策が必要となる。また、それらの対策の効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を図り、所要の性能を維持しておくことが前提になるものと考えられる。

e. 緩衝材

緩衝材においては、廃棄体発熱に伴う温度上昇により 100℃を超え、変質に伴うシール性の低下などの人工バリア性能への影響が懸念された。また、乾燥による収縮や湧水による膨潤に伴う変形によりオーバーパックの支持性の低下も懸念された。緩衝材の所要性能を維持しつつ処分施設を維持管理するための温度と湧水への対応を検討する。

温度への対応としては、空調を用いた坑道換気などの設備的な対応や、処分孔の離間距離を広げるなどの設計的な対応が考えられる。

湧水への対応として、緩衝材を膨潤させないための湧水抑制には、「防水」の効果が求められる。湧水抑制対策としては、前述するようにグラウトや排水による湧水抑制対策が考えられるが、「防水」を効果の目標とする場合、グラウト対策では効果の不確実性が存在すると考えられる。一方で、防水シート（＋覆工コンクリート）を用いて排水対策とすることにより、緩衝材の膨潤を起させない確実な効果が得られるものと考えられる。しかし、防水シートによる排水対策の効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を図り、湧水抑制効果を維持していくことが前提になるものと考えられる。

さらに、防水により緩衝材に供給される湧水を遮断することにより、温度による緩衝材の変質についても防止が可能であると考えられるとともに、オーバーパックの劣化を防止る効果も兼ね合わせて備えることが可能となる。

従って、オーバーパック定置状態における（オーバーパック下部）緩衝材への対策は、防水シート（＋覆工コンクリート）を用いた排水対策が現実的な選択になるものと考えられる。

2) 緩衝材を定置したケース

緩衝材を定置したケースにおける人工バリア性能維持への影響が懸念される事象に対して、処分施設の維持管理方策について検討した結果を表 5.4.2-2 に示す。

表 5.4.2-2　処分施設を持管理するための方策（2）
（処分孔竪置き定置方式：緩衝材を定置したケース）

		影響因子	人工バリア性能維持への影響が懸念される事象	埋め戻さずに人工バリア性能と処分施設を維持管理するための方策
主要坑道		T	－	－
		H	湧水による坑道の劣化	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	乾燥による強度低下 **空洞安定性の低下**	（湧水抑制と吹付けの実施と維持管理）
		C	水質による坑道の劣化	**吹付け（低 pH セメント）実施と維持管理**
処分坑道		T	－	－
		H	湧水による坑道の劣化	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	乾燥による強度低下 **空洞安定性の低下**	（湧水抑制と吹付け実施と維持管理）
		C	水質による坑道の劣化	**吹付け（低 pH セメント）実施と維持管理**
処分孔		T	－	－
		H	－	－
		M	－	－
		C	－	－
人工バリア	オーバーパック	T	－	－
		H	－	－
		M	－	－
		C	－	－
	緩衝材	T	緩衝材の変質に伴うシール性低下	隙間充填と（換気・防水対策）による変質抑制
		H	緩衝材の流出に伴う密度低下	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	**緩衝材の密度低下による所要性能低下**	（湧水抑制対策）による変形抑制
		C	－	－

－：該当する事項無し

a. 主要坑道

主要坑道において、人工バリア性能維持に及ぼす影響は、オーバーパックのみが定置されたケースと同じであり、湧水と乾燥による地山や支保の劣化に伴う空洞安定性の低下する事象が懸念される。また、その対策においても、オーバーパックのみが定置されたケースと同様となる。

b. 処分坑道

処分坑道において、人工バリア性能維持に及ぼす影響は、オーバーパックのみが定置されたケースと同じであり、湧水と乾燥による地山や支保の劣化に伴う空洞安定性の低下する事象が懸念される。また、その対策においても、オーバーパックのみが定置されたケースと同様となる。

c. 処分孔

緩衝材が定置されることにより空洞が無くなり、人工バリア性能を維持するための対応は特に必要としない。

d. オーバーパック

透水性の低い緩衝材の存在により、オーバーパックに達する水の供給が大幅に抑制され、温度として 100℃程度、ベントナイト中で低溶存酸素の状態（例えば 1ppm）とすると、腐食（減厚）は、100 年程度で 0.6mm 程度（凹凸考慮の場合 1.8mm 程度）と算出された。緩衝材が再冠水前の酸素が存在する状態から、再冠水するまでの腐食は算出していないが、このまま回収せず閉鎖段階に移行する場合に、低酸素状態での腐食挙動が維持されれば、オーバーパックの人工バリア性能への影響はほとんど無いと考えられる。

e. 緩衝材

緩衝材においては、廃棄体発熱に伴う温度上昇により 100℃を超え、変質に伴うシール性の低下などの長期健全性への影響が懸念された。また、動水勾配の増大による地下水の流れにより、緩衝材が流出して緩衝材の所要性能が低下する事象が懸念された。緩衝材の所要性能を維持しつつ処分施設を維持管理するための温度と湧水への対応を検討する。

湧水への対応として、緩衝材を膨潤させないための湧水抑制は、「防水」の効果が求められる。湧水抑制対策としては、前述するようにグラウトや排水による湧水抑制対策が考えられるが、「防水」を効果の目標する場合、グラウト対策では効果の不確実性が存在すると考えられる。一方で、防水シート（＋覆工コンクリート）を用いて排水対策とすることにより、緩衝材の膨潤を引き起させない確実な湧水抑制効果が得られるものと考えられる。しかし、防水シートによる排水対策の効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を図り、湧水抑制効果を維持していくことが前提になるものと考えられる。

さらに、防水により緩衝材への水の供給を遮断することにより、緩衝材の温度による変質についても防止が可能であると考えられ、処分孔が埋め戻された状態における緩衝材への対策は、グラウトを併用しつつ防水シート（＋覆工コンクリート）を用いた排水対策が現実的な選択になるものと考えられる。

3) 処分坑道が埋め戻された状態

処分坑道が埋め戻された状態における人工バリア性能維持への影響が懸念される事象に対して、処分施設の維持管理方策を検討した結果を表 5.4.2-3 に示す。

表 5.4.2-3　処分施設を持管理するための方策（3）

（処分孔竪置き定置方式：処分坑道が埋め戻されたケース）

		影響因子	人工バリア性能維持への影響が懸念される事象	埋め戻さずに人工バリア性能と処分施設を維持管理するための方策
主要坑道		T	－	－
		H	湧水による坑道の劣化	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	乾燥による強度低下 **空洞安定性の低下**	（湧水抑制と吹付けの実施と維持管理）
		C	水質による坑道の劣化	**吹付け（低 pH セメント）実施と維持管理**
処分坑道		T	－	－
		H	－	－
		M	－	－
		C	－	－
処分孔		T	－	－
		H	－	－
		M	－	－
		C	－	－
人工バリア	オーバーパック	T	－	－
		H	－	－
		M	－	－
		C	－	－
	緩衝材	T	緩衝材の変質に伴うシール性低下	隙間充填と（換気・防水対策）による変質抑制
		H	緩衝材の流出に伴う密度低下	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	**緩衝材の密度低下による所要性能低下**	（湧水抑制対策）による変形抑制
		C	－	－

－：該当する事項無し

a. 主要坑道

主要坑道において、人工バリア性能維持への影響が懸念される事象は、オーバーパックのみが定置されたケースや緩衝材が定置されたケースと同じであり、湧水と乾燥による地山や支保の劣化に伴う空洞安定性の低下する事象が懸念される。また、その対策においても、オーバーパックのみが定置されたケースや緩衝材が定置されたケースと同様となる。

b. 処分坑道

埋め戻されることにより空洞が無くなり、坑道が還元環境に移行することから、人工バリア性能と処分坑道を維持するための対応は特に必要としない。

c. 処分孔

緩衝材が定置されることにより空洞が無くなり、人工バリア性能と処分孔を維持するための対応は特に必要としない。

d. オーバーパック

オーバーパックにおいては、緩衝材が定置された状態と同様、人工バリア性能を維持するための対応は特に必要としない。

e. 緩衝材

緩衝材においては、緩衝材が定置された状態と同様、廃棄体発熱に伴う温度上昇により100℃を超え、変質に伴うシール性の低下などの人工バリア性能への影響が懸念された。また、動水勾配の増大による地下水の流れにより、緩衝材が流出して緩衝材の所要性能が低下する事象が懸念された。緩衝材の所要性能を維持しつつ処分施設を維持管理するための温度と湧水への対応を検討する。

湧水への対応として、緩衝材の膨潤させないための湧水抑制は、「防水」の効果が求められる。湧水抑制対策としては、前述するようにグラウトや排水による湧水抑制対策が考えられるが、「防水」を効果の目標する場合、グラウト対策では効果の不確実性が存在すると考えられる。一方で、防水シート（＋覆工コンクリート）を用いて排水対策とすることにより、緩衝材の膨潤を引き起させない確実な湧水抑制効果が得られるものと考えられる。しかし、防水シートによる排水対策の効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を図り、湧水抑制効果を維持していくことが前提になるものと考えられる。

さらに、防水により緩衝材への水の供給を遮断することにより、緩衝材の温度による変質についても防止が可能であると考えられ、処分孔が埋め戻された状態における緩衝材への対策は、グラウトを併用しつつ防水シート（＋覆工コンクリート）を用いた排水対策が現実的な選択になるものと考えられる。

(2) 処分坑道横置き定置方式

処分坑道横置き定置方式において、操業段階の代表的な状態であると考える以下の 3 ケースにおいて、人工バリア性能を維持しつつ処分施設を維持管理するための方策について検討した。

1)オーバーパックのみを定置したケース

2)緩衝材を定置したケース

3)処分坑道を埋め戻したケース

1) オーバーパックのみ定置したケース

オーバーパックのみ定置したケースにおいて、人工バリア性能維持への影響が懸念される事象に対して、処分施設の維持管理方策を検討した結果を表 5.4.2-4 に示す。

表 5.4.2-4　処分施設を持管理するための方策（4）
（処分坑道横置き定置方式：オーバーパックのみ定置ケース）

		影響因子	人工バリア性能維持への影響が懸念される事象	埋め戻さずに人工バリア性能と処分施設を維持管理するための方策
主要坑道		T	－	－
		H	湧水による坑道の劣化	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	乾燥による強度低下 **空洞安定性の低下**	（湧水抑制と吹付けの実施と維持管理）
		C	水質による坑道の劣化	**吹付け（低 pH セメント）実施と維持管理**
処分坑道		T	－	－
		H	湧水による坑道の劣化	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	乾燥による強度低下 **空洞安定性の低下**	（湧水抑制と吹付け実施と維持管理）
		C	水質による坑道の劣化	**吹付け（低 pH セメント）実施と維持管理**
人工バリア	オーバーパック	T	オーバーパックの腐食に伴う減厚	－
		H	オーバーパックの腐食に伴う減厚	**湧水抑制の実施**
		M	**オーバーパックの長期健全性低下**	（湧水抑制の実施による劣化抑制）
		C	オーバーパックの腐食に伴う減厚	**酸素遮断（窒素封入）の実施**
	緩衝材	T	**緩衝材の変質に伴うシール性低下** 緩衝材の乾燥に伴う変形	（換気・防水対策）による変質抑制
		H	緩衝材の膨潤に伴う変形	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	**緩衝材の変形に伴うオーバーパック支持性の低下**	（湧水抑制対策）による変形抑制
		C	－	－

－：該当する事項無し

a. 主要坑道

主要坑道においては、湧水と乾燥による地山や支保の劣化に伴い、空洞安定性の低下が引き起こされる事象が懸念される。人工バリア性能を維持しつつ主要坑道を維持管理するための湧水と乾燥への対応を検討する。

湧水への対応として、グラウトや排水による湧水抑制対策が考えられる。これらの対策の効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を図り、湧水抑制効果を維持しておくことが前提になるものと考えられる。

乾燥への対応は、土木工学分野では、地山への吹付けコンクリートを施工する方策が一般的な対策となる。しかし、地層処分分野ではセメント系材料の使用は、アルカリによるベントナイト系材料の変状を引き起こすことが知られ、低ｐＨセメントが開発されている

ところである。一方で、吹付けコンクリートの効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を図り、吹付けコンクリートの性能を維持しておくことが前提になるものと考えられる。

b. 処分坑道

処分坑道においては、主要坑道と同様に、湧水と乾燥による地山や支保の劣化に伴い、空洞安定性の低下が引き起こされる事象が懸念される。人工バリア性能を維持しつつ処分坑道を維持管理するための湧水と乾燥への対応は、主要坑道と同様にグラウトや排水による湧水抑制対策と、低ｐHセメントを用いた吹付けコンクリートの施工が挙げられる。なお、各対策の効果は、時間的な不確実性が考えられることから、維持管理を図り、所要の性能を維持しておくことが前提になるものと考えられる。

c. オーバーパック

オーバーパックにおいては、湧水の接触や酸素の供給による劣化により、オーバーパックの厚さが減じる事象が懸念された。人工バリア性能を維持しつつ処分施設を維持管理するための湧水と酸化環境への対応を検討する。

湧水への対応として、主要坑道や処分坑道と同様に、湧水抑制対策が考えられる。

酸化環境への対応としては、オーバーパックへの酸素の供給を遮断する方法となり、オーバーパックの被膜や、不活性ガスの使用による還元環境の構築が考えられる。このうち、オーバーパックの被膜については、被膜の耐久性や被膜に用いる材料の残置による人工バリア性能への影響など、地層処分分野においては課題が残る方策であると考えられる。一方で、不活性ガスの使用については、使用するガスの透気の防止のための方策が必要となる。また、それらの対策の効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を図り、所要の性能を維持しておくことが前提になるものと考えられる。

d. 緩衝材

緩衝材においては、廃棄体発熱に伴う温度上昇により 100℃を超え、変質に伴うシール性の低下などの人工バリア性能への影響が懸念された。また、湧水による膨潤に伴う変形によりオーバーパックの支持性の低下も懸念された。緩衝材の所要性能を維持しつつ処分施設を維持管理するための温度と湧水への対応を検討する。

温度への対応としては、空調を用いた坑道換気などの設備的な対応や、処分坑道の離間距離を広げるなどの設計的な対応が考えられる。

湧水への対応として、緩衝材を膨潤させないための湧水抑制には、「防水」の効果が求められる。湧水抑制対策としては、前述するようにグラウトや排水による湧水抑制対策が考えられるが、「防水」を効果の目標とする場合、グラウト対策では効果の不確実性が存在すると考えられる。一方で、防水シート（＋覆工コンクリート）を用いて排水対策とすることにより、緩衝材の膨潤を起させない確実な効果が得られるものと考えられる。しかし、防水シートによる排水対策の効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を

図り、湧水抑制効果を維持していくことが前提になるものと考えられる。

さらに、防水により緩衝材に供給される湧水を遮断することにより、温度による緩衝材の変質についても防止が可能であると考えられるとともに、オーバーパックの劣化を防止る効果も兼ね合わせて備えることが可能となる。

従って、オーバーパック定置状態における（オーバーパック下部）緩衝材への対策は、防水シート（＋覆工コンクリート）を用いた排水対策が現実的な選択になるものと考えられる。

2) 緩衝材を定置した状態

緩衝材を定置したケースにおける人工バリア性能維持への影響が懸念される事象に対して、処分施設を維持管理するための方策について検討した結果を表 5.4.2-5 に示す。

表 5.4.2-5　処分施設を持管理するための方策（5）
（処分坑道横置き定置方式：緩衝材を定置したケース）

		影響因子	人工バリア性能維持への影響が懸念される事象	埋め戻さずに人工バリア性能と処分施設を維持管理するための方策
主要坑道		T	－	－
		H	湧水による坑道の劣化	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	乾燥による強度低下 **空洞安定性の低下**	（湧水抑制と吹付けの実施と維持管理）
		C	水質による坑道の劣化	**吹付け（低 pH セメント）実施と維持管理**
		R	－	（処分坑道端部での）放射線遮へい
処分坑道		T	－	－
		H	湧水による坑道の劣化	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	乾燥による強度低下 **空洞安定性の低下**	（湧水抑制と吹付け実施と維持管理）
		C	水質による坑道の劣化	**吹付け（低 pH セメント）実施と維持管理**
		R	－	（処分坑道端部での）放射線遮へい
人工バリア	オーバーパック	T	－	－
		H	－	－
		M	－	－
		C	－	－
		R	－	（処分坑道端部での）放射線遮へい
	緩衝材	T	緩衝材の変質に伴うシール性低下 緩衝材の乾燥に伴う変形	隙間充填と（換気・防水対策による）変質抑制
		H	緩衝材の流出に伴う密度低下	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	**緩衝材の密度低下による所要性能低下**	（湧水抑制対策）による変形抑制
		C	－	－
		R	－	（処分坑道端部での）放射線遮へい

－：該当する事項無し

a. 主要坑道

主要坑道において、人工バリア性能維持に及ぼす影響は、オーバーパックのみが定置されたケースや緩衝材が定置されたケースと同じであり、湧水と乾燥による地山や支保の劣化に伴う空洞安定性の低下する事象が懸念される。また、その対策においても、オーバーパックのみが定置されたケースや緩衝材が定置されたケースと同様となる。

b. 処分坑道

処分坑道において、人工バリア性能維持に及ぼす影響は、オーバーパックのみが定置されたケースと同じであり、湧水と乾燥による地山や支保の劣化に伴う空洞安定性の低下する事象が懸念される。また、その対策においても、オーバーパックのみが定置されたケースと同様となる。

c. オーバーパック

透水性の低い緩衝材の存在により、オーバーパックに達する水の供給は抑制される。ただし、緩衝材の施工方式により異なるが、ベントナイトブロックを想定した場合ではブロック間に隙間が存在することから、オーバーパック表面において低酸素状態になっていることは考え難く、ベントナイトに接触している状態としての評価になると考える。他の緩衝材施工方式として、ベントナイトペレット充填や吹付け等が考えられるが、この場合には坑道との隙間が無い施工方法となるため、オーバーパックへの影響は無いものと考えられる。温度として 100℃程度、ベントナイト中の状態とすると、腐食（減厚）は、100 年程度で 3mm 程度（凹凸考慮の場合 9mm 程度）と算出された。一定期間埋め戻さずに緩衝材を健全な状態に維持させるためには、水理因子の面からの対策が求められる。

d. 緩衝材

緩衝材においては、廃棄体発熱に伴う温度上昇により 100℃を超え、変質に伴うシール性の低下などの人工バリア性能への影響が懸念された。また、動水勾配の増大による地下水の流れにより、緩衝材が流出して緩衝材の所要性能が低下する事象が懸念された。緩衝材の所要性能を維持しつつ処分施設を維持管理するための温度と湧水への対応を検討する。

温度への対応としては、空調を用いた坑道換気などの設備的な対応や、処分坑道の離間距離を広げるなどの設計的な対応が考えられる。

湧水への対応として、緩衝材の膨潤させないための湧水抑制は、「防水」の効果が求められる。湧水抑制対策としては、前述するようにグラウトや排水による湧水抑制対策が考えられるが、「防水」を効果の目標する場合、グラウト対策では効果の不確実性が存在すると考えられる。一方で、防水シート（＋覆工コンクリート）を用いて排水対策とすることにより、緩衝材の膨潤を引き起させない確実な湧水抑制効果が得られるものと考えられる。しかし、防水シートによる排水対策の効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を図り、湧水抑制効果を維持していくことが前提になるものと考えられる。

さらに、防水により緩衝材への水の供給を遮断することにより、緩衝材の温度による変質についても防止が可能であると考えられ、処分孔が埋め戻された状態における緩衝材への対策は、グラウトを併用しつつ防水シート（＋覆工コンクリート）を用いた排水対策が現実的な選択になるものと考えられる。

3) 処分坑道が埋め戻された状態

処分坑道が埋め戻された状態における人工バリア性能維持への影響が懸念される事象に対して、処分施設を維持管理するための方策を検討した結果を表 5.4.2-6 に示す。

表 5.4.2-6　処分施設を持管理するための方策（6）
（処分坑道横置き定置方式：処分坑道が埋め戻されたケース）

		影響因子	人工バリア性能維持への影響が懸念される事象	埋め戻さずに人工バリア性能と処分施設を維持管理するための方策
主要坑道		T	－	－
		H	湧水による坑道の劣化	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	乾燥による強度低下 **空洞安定性の低下**	（湧水抑制と吹付けの実施と維持管理）
		C	水質による坑道の劣化	**吹付け（低 pH セメント）実施と維持管理**
処分坑道		T	－	－
		H	－	－
		M	－	－
		C	－	－
人工バリア	オーバーパック	T	－	－
		H	－	－
		M	－	－
		C	－	－
	緩衝材	T	緩衝材の変質に伴うシール性低下	隙間充填と（防水対策による）による変質抑制
		H	緩衝材の流出に伴う密度低下	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	緩衝材の密度低下による所要性能低下	（湧水抑制対策）による変形抑制
		C	－	－

－：該当する事項無し

a. 主要坑道

主要坑道において、人工バリア性能維持に及ぼす影響は、オーバーパックのみが定置されたケースや緩衝材が定置されたケースと同じであり、湧水と乾燥による地山や支保の劣化に伴う空洞安定性の低下する事象が懸念される。また、その対策においても、オーバーパックのみが定置されたケースや緩衝材が定置されたケースと同様となる。

b. 処分坑道

埋め戻されることにより空洞が無くなり、坑道が還元環境に移行することから、人工バ

リア性能と処分坑道を維持管理するための対応は特に必要としない。

c. オーバーパック

オーバーパックにおいては、緩衝材が定置された状態と同様、坑道が還元環境に移行することから、オーバーパックを維持管理するための対応は特に必要としない。

d. 緩衝材

緩衝材においては、緩衝材が定置された状態と同様、廃棄体発熱に伴う温度上昇により100℃を超え、変質に伴うシール性の低下などの緩衝材の所要性能への影響が懸念された。また、動水勾配の増大による地下水の流れにより、緩衝材が流出して緩衝材の所要性能が低下する事象が懸念された。緩衝材の所要性能を維持しつつ処分施設を維持管理するための温度と湧水への対応を検討する。

温度への対応としては、処分坑道の離間距離を広げるなどの設計的な対応が考えられる。

湧水への対応として、緩衝材の膨潤させないための湧水抑制は、「防水」の効果が求められる。湧水抑制対策としては、前述するようにグラウトや排水による湧水抑制対策が考えられるが、「防水」を効果の目標する場合、グラウト対策では効果の不確実性が存在すると考えられる。一方で、防水シート（＋覆工コンクリート）を用いて排水対策とすることにより、緩衝材の膨潤を引き起させない確実な湧水抑制効果が得られるものと考えられる。しかし、防水シートによる排水対策の効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を図り、湧水抑制効果を維持していくことが前提になるものと考えられる。

さらに、防水により緩衝材への水の供給を遮断することにより、緩衝材の温度による変質についても防止が可能であると考えられ、処分孔が埋め戻された状態における緩衝材への対策は、グラウトを併用しつつ防水シート（＋覆工コンクリート）を用いた排水対策が現実的な選択になるものと考えられる。

(3) 処分坑道横置き（PEM）定置方式

処分坑道横置き（PEM）定置方式において、操業段階の代表的な状態と考える以下の 2 ケースにおいて、人工バリア性能と処分施設を維持管理するための方策について検討した。

1)PEM のみを定置したケース

2)処分坑道を埋め戻したケース

1) PEM のみを定置したケース

オーバーパックのみ定置したケースにおける人工バリア性能維持への影響が懸念される事象に対して、処分施設の維持管理方策を検討した結果を表 5.4.2-7 に示す。

表 5.4.2-7　処分施設を持管理するための方策（7）
（処分坑道横置き（PEM）定置方式：PEM のみ定置ケース）

		影響因子	人工バリア性能維持への影響が懸念される事象	埋め戻さずに人工バリア性能と処分施設を維持管理するための方策
主要坑道		T	－	－
		H	湧水による坑道の劣化	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	乾燥による強度低下 **空洞安定性の低下**	（湧水抑制と吹付けの実施と維持管理）
		C	水質による坑道の劣化	**吹付け（低 pH セメント）実施と維持管理**
処分坑道		T	－	－
		H	湧水による坑道の劣化	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	乾燥による強度低下 **空洞安定性の低下**	（湧水抑制と吹付け実施と維持管理）
		C	水質による坑道の劣化	**吹付け（低 pH セメント）実施と維持管理**
PEM 容器		T	－	－
		H	PEM 容器の劣化に伴う減厚	**湧水抑制の実施**
		M	PEM 容器の減厚に伴う構造安定性の低下	（湧水抑制の実施による劣化抑制）
		C	PEM 容器の劣化に伴う減厚	**酸素遮断（窒素封入）の実施**
人工バリア	緩衝材	T	**緩衝材の変質に伴うシール性低下**	（換気対策）による変質抑制
		H	緩衝材の膨潤に伴う変形	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	**緩衝材の変形に伴うＯＰ支持性の低下**	（湧水抑制対策）による変形抑制
		C	－	－

－：該当する事項無し

a. 主要坑道

主要坑道においては、湧水と乾燥による地山や支保の劣化に伴い、空洞安定性の低下が引き起こされる事象が懸念される。人工バリア性能を維持しつつ主要坑道を維持管理するための湧水と乾燥への対応を検討する。

湧水への対応として、グラウトや排水による湧水抑制対策が考えられる。これらの対策の効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を図り、湧水抑制効果を維持しておくことが前提になるものと考えられる。

乾燥への対応は、土木工学分野では、地山への吹付けコンクリートを施工する方策が一般的な対策となる。しかし、地層処分分野ではセメント系材料の使用は、アルカリによるベントナイト系材料の変状を引き起こすことが知られ、低ｐＨセメントが開発されているところである。一方で、吹付けコンクリートの効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を図り、吹付けコンクリートの性能を維持しておくことが前提になるものと考えられる。

b. 処分坑道

処分坑道においては、主要坑道と同様に、湧水と乾燥による地山や支保の劣化に伴い、空洞安定性の低下が引き起こされる事象が懸念される。人工バリア性能と処分坑道を維持するための湧水と乾燥への対応は、主要坑道と同様にグラウトや排水による湧水抑制対策と、低ｐＨセメントを用いた吹付けコンクリートの施工が挙げられる。なお、各対策の効果は、時間的な不確実性が考えられることから、維持管理を図り、所要の性能を維持しておくことが前提になるものと考えられる。

c. PEM 容器

PEM 容器においては、湧水の接触や酸素の供給による劣化により、PEM 容器の厚さが減じる状態が懸念された。PEM 容器の機能を維持しつつ処分施設を維持管理するための湧水と酸化環境への対応を検討する。

湧水への対応として、主要坑道や処分坑道と同様に、湧水抑制対策が考えられる。

酸化環境への対応としては、PEM 容器への酸素の供給を遮断する方法となり、容器表面の被膜や、不活性ガスの使用による還元環境の構築が考えられる。このうち、PEM 容器の被膜については、被膜の耐久性や被膜に用いる材料の残置による人工バリア性能への影響など、地層処分分野においては課題が残る方策であると考えられる。一方で、不活性ガスの使用については、使用するガスの透気の防止のための方策が必要となる。また、それらの対策の効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を図り、所要の性能を維持しておくことが前提になるものと考えられる。

PEM 容器の搬送定置時の要求性能は、搬送定置時（吊り上げ時）の構造健全性であるが、定置後の回収に対しては一体性となり要求される性能が変化する。従って、対策の要否については、性能が要求される時期との関係により、判断されるものと考えられる。なお、これらの対策の効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を図り、所要の

性能を維持しておくことが前提になるものと考えられる。

d. 緩衝材

緩衝材においては、廃棄体発熱に伴う温度上昇により 100℃を超え、変質に伴うシール性の低下などの人工バリア性能維持への影響が懸念された。緩衝材の所要性能を維持しつつ処分施設を維持管理するための温度と湧水への対応を検討する。

温度への対応としては、空調を用いた坑道換気などの設備的な対応や、処分坑道の離間距離を広げるなどの設計的な対応が考えられる。

湧水への対応として、緩衝材の膨潤させないための湧水抑制には、「防水」の効果が求められる。湧水抑制対策としては、前述するようにグラウトや排水による湧水抑制対策が考えられるが、「防水」を効果の目標とする場合、グラウト対策では効果の不確実性が存在すると考えられる。一方で、防水シート（＋覆工コンクリート）を用いて排水対策とすることにより、緩衝材の膨潤を起させない確実な効果が得られるものと考えられる。しかし、防水シートによる排水対策の効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を図り、湧水抑制効果を維持していくことが前提になるものと考えられる。

さらに、防水により緩衝材に供給される湧水を遮断することにより、温度による緩衝材の変質についても防止が可能であると考えられるとともに、PEM 容器の劣化を防止る効果も兼ね合わせて備えることが可能となる。

従って、PEM のみ定置するケースにおける緩衝材への対策は、防水シート（＋覆工コンクリート）を用いた排水対策が現実的な選択になるものと考えられる。

2) 処分坑道を埋め戻したケース

処分坑道が埋め戻された状態における人工バリア性能維持への影響が懸念される事象に対して、処分施設の維持管理方策を検討した結果を表 5.4.2-8 に示す。

表 5.4.2-8　処分施設を持管理するための方策（8）

（処分孔横置き（PEM）定置方式：処分坑道が埋め戻されたケース）

		影響因子	人工バリア性能維持への影響が懸念される事象	埋め戻さずに人工バリア性能と処分施設を維持管理するための方策
主要坑道		T	－	－
		H	湧水による坑道の劣化	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	乾燥による強度低下 **空洞安定性の低下**	（湧水抑制と吹付けの実施と維持管理）
		C	水質による坑道の劣化	**吹付け（低 pH セメント）実施と維持管理**
処分坑道		T	－	－
		H	－	－
		M	－	－
		C	－	－
PEM 容器		T	－	－
		H	－	－
		M	－	－
		C	－	－
人工バリア	緩衝材	T	緩衝材の変質に伴うシール性低下	隙間充填による変質抑制
		H	緩衝材の流出に伴う密度低下	**湧水抑制の実施と維持管理**
		M	緩衝材の密度低下による所要性能低下	（湧水抑制対策）による変形抑制
		C	－	－

－：該当する事項無し

a. 主要坑道

主要坑道において、人工バリア性能維持に及ぼす影響は、PEM のみが定置されたケースと同じであり、湧水と乾燥による地山や支保の劣化に伴う空洞安定性の低下する事象が懸念される。また、その対策においても、PEM のみが定置されたケースと同様となる。

b. 処分坑道

埋め戻されることにより空洞が無くなり、坑道が還元環境に移行することから、人工バリア性能を維持するための対応は特に必要としない。

c. PEM 容器

PEM 容器においては、処分坑道が埋め戻されることにより還元環境へ移行するため、PEM 容器の機能を維持するための対応は特に必要としない。

d. 緩衝材

緩衝材においては、緩衝材が定置された状態と同様、廃棄体発熱に伴う温度上昇により100℃を超え、変質に伴うシール性の低下などの緩衝材の所要性能への影響が懸念された。また、動水勾配の増大による地下水の流れにより、緩衝材が流出して緩衝材の所要性能が低下する事象が懸念された。緩衝材の所要性能を維持しつつ処分施設を維持管理するための温度と湧水への対応を検討する。

温度への対応としては、処分坑道の離間距離を広げるなどの設計的な対応が考えられる。

湧水への対応として、緩衝材の膨潤させないための湧水抑制は、「防水」の効果が求められる。湧水抑制対策としては、前述するようにグラウトや排水による湧水抑制対策が考えられるが、「防水」を効果の目標する場合、グラウト対策では効果の不確実性が存在すると考えられる。一方で、防水シート（＋覆工コンクリート）を用いて排水対策とすることにより、緩衝材の膨潤を引き起させない確実な湧水抑制効果が得られるものと考えられる。しかし、防水シートによる排水対策の効果は、時間的な不確実性があることから、維持管理を図り、湧水抑制効果を維持していくことが前提になるものと考えられる。

さらに、防水により緩衝材への水の供給を遮断することにより、緩衝材の温度による変質についても防止が可能であると考えられ、処分孔が埋め戻された状態における緩衝材への対策は、グラウトを併用しつつ防水シート（＋覆工コンクリート）を用いた排水対策が現実的な選択になるものと考えられる。

5.4.3　維持管理の具体的方策のまとめ

これまでの検討により、何れの段階においても、処分施設を維持管理するための方策とその維持期間は、人工バリア性能に影響を及ぼさないように、坑道環境を維持管理している期間が相当することになる。すなわち、坑道環境の維持管理可能な期間は、操業におけるオーバーパックや緩衝材の定置などのプロセスにおいて、次のプロセスに進まず、それまでのプロセスの状態とした場合、定置された人工バリアは、外因により人工バリア性能が低下する懸念のあることが示された。

これまでの検討結果をまとめると、人工バリアの性能を維持するためには、以下に示す 2 つの方法を念頭に置き、処分施設の状態に応じた維持管理方法を採用する必要があると考えられる。

③ 人工バリア性能を維持できるようになるまで作業段階を進める（第 2 次取りまとめで想定する作業手順）。
④ 人工バリアの性能を低下させないように坑道環境の維持管理を行う。

5.5　まとめと課題の整理

本検討では、平成 25 年度に実施した処分施設への安全性に影響を及ぼす要因について、人工バリア（オーバーパック、緩衝材）の性能維持が可能な期間の観点から分析を行い、主たる影響要因について、その影響の程度を定量的に把握するとともに回収維持期間について試行した。また、回収維持期間を対象として、処分施設（地下施設）を維持管理するための具体的な方策について整理した。実施した検討項目は以下の通りである。

① 処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合における人工バリア性能に及ぼす影響の程度の定量的把握
② ①の結果を基とした人工バリアの状態と回収維持期間の例示
③ ②の結果に対する処分施設の維持管理方策の検討

5.5.1　処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合における人工バリア性能に及ぼす影響の程度の定量的把握

処分施設を埋め戻さない状態における人工バリアに対する影響因子を整理し、各定置方式における人工バリアの状態設定および環境条件について設定し、人工バリアに対する影響の程度を解析的手法等により定量的に把握した。影響因子の整理および人工バリアの状態設定の検討では、平成 25 年度に実施した処分施設の安全性に及ぼす影響についての調査･整理した成果を反映した。また、定量化（程度の検討）で必要となる人工バリアの環境条件として、オーバーパックの腐食や緩衝材への熱的影響等を検討するために温度条件、地下水条件、雰囲気等を設定した。なお、これらの環境条件の設定や影響の定量化の検討にあたっては、第２次取りまとめにおける人工バリア性能に係る環境条件調査および地層処分研究施設における人工バリア性能に係る地下環境情報調査の調査を行い処分場の環境条件を試行的に設定した。

人工バリアの環境条件については、処分施設を一定期間埋め戻さない状態が前提になるため、温度や地下水条件が過渡的な状態となる。したがって、温度や地下水の挙動が相互に関連して変化する状態となり、人工バリアに対する影響の定量化のための条件設定が難しく、保守的な条件設定となった。環境条件のより現実的な設定が必要である。

また、処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合は、坑道が空いており、人工バリア周囲にも埋戻しを実施しないことによる隙間が残ることから、操業環境を維持するための地下水の排水や換気による乾燥、酸化環境が継続することの腐食や好気性の微生物の影響など、操業を進めることにより埋戻しを実施すれば影響が小さい、または無視していた事項についても、人工バリアや処分場に対する影響として考慮が必要である。

以上より、処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合に対して、人工バリア性能に及ぼす影響の程度を定量的に把握するための課題を次に示す。

・温度や水の過渡的な状態について、相互に影響するような環境設定も実施することにより、人工バリアの状態設定をより現実的なものとして、定量評価の向上を図る。
・埋め戻さない期間を維持することにより、緩衝材の置かれる温度条件が厳しくなる可能性があり、緩衝材の高温環境下における長期挙動を含めた特性試験を実施して、人工バリア性能への影響を把握する。
・埋め戻さないことによる緩衝材への変質影響やオーバーパックの腐食挙動への影響において初期の設計値に対する取扱いを検討する必要がある。
・竪置き定置における処分孔蓋の設置、隙間埋め戻し材の設置など、これまで設計検討において取扱いが不明瞭であった要素について明確にしていく必要がある。

5.5.2　人工バリアの状態と回収維持期間の例示

処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合における人工バリア性能に及ぼす影響の程度の定量的把握の結果を基として、人工バリアの状態について検討を行い、回収維持期間について試行した。その結果、例えば、操業段階のある状態でのオーバーパックの腐食（減厚）は、100 年程度で 3mm 程度、50 年程度で 2mm 程度、10 年程度で 1mm 程度（100℃程度、大気中の条件とした場合）となる算出結果であった。

しかし、この算定結果は坑道を埋め戻さない状態での試行であり、坑道を埋め戻すことを前提としている第 2 次取りまとめの人工バリア要件とは異なるものである。例えば、腐食代においては、埋め戻すことを前提とした腐食代であり、その前提に違いが生じることとなる。そのため、処分坑道等を埋め戻さない場合には、処分坑道等を埋め戻さないとする条件を整理したうえで、新たに人工バリア性能に及ぼす影響の程度と維持期間の設定の考え方について検討が必要である。

一方、操業のプロセスを進めず処分坑道や主要坑道等を一定期間埋め戻さない状態とした場合、その状態によっては人工バリア性能に影響を及ぼす挙動の発生が懸念されるが、方策を加えることにより挙動を抑えることが可能であると考えられる。それらの方策は時間的な変化に関して不確実性を有することになるため、回収可能性を維持する期間において維持管理していくことが前提となる。

地下施設においても、維持管理が可能な坑道とすることにより、人工バリア性能を維持しつつ、回収可能性を継続的に維持することが可能であると考えられる。なお、トンネルの実績面の調査結果では、我が国におけるトンネル供用期間は最大で 70 年程度であり、鉱山の稼働期間では最大で 150 年程度であることから、これらの期間を回収維持期間の設定に対するひとつの目安として提示した。

回収維持期間については、技術的要素だけではなく社会的要素を含めて決定されるものであるが、回収維持期間の長さに柔軟性を持たせるためには、各坑道の維持管理の成立性や信頼性が技術的な論点であり今後の課題となる。以下に課題を整理する。

・坑道を埋め戻さない場合、岩盤中の動水勾配の増大により、湧水による緩衝材の流出が想定される。操業中において坑道が空いている場合、どの状態でも湧水抑制対策は、必要となる

対策であり、維持管理の観点も含め、その実現性や信頼性について、さらに検討を進めていく必要がある。

・オーバーパックのみ設置したケースでは、回収の容易性は高いものの、オーバーパックの長期健全性を維持するための工学的対策が必要となり、その実現性や信頼性について検討が必要となる。

・緩衝材を定置したケースでは、竪置き方式において、緩衝材を定置することにより、オーバーパックの長期健全性を確保する観点からは、合理的な状態であると考えられる。また、緩衝材の遮へい性や処分坑道内の空間が確保されていることにより、処分施設の維持管理に係わる作業性を確保することもできる。しかし、処分坑道横置き方式（原位置）の処分坑道については、緩衝材を定置することにより維持管理のための空間を確保することが難しくなるため、湧水抑制対策の維持管理の実現性と信頼性の確保に向けた検討が必要である。

・処分坑道までを埋め戻した状態では、坑道内が還元環境に移行し、人工バリア性能が維持されている状態であると考えられる。しかし、前段階（緩衝材を設置した状態）と同様に主要坑道が空いている状態であることから、岩盤中の動水勾配の変化に対応した湧水抑制対策の検討が必要である。

・回収維持期間については、一定期間処分施設を埋め戻さない条件の場合、第 2 次取りまとめにおける人工バリアの要件とは異なることから、人工バリア性能に及ぼす影響の程度と維持期間の設定の考え方について継続的な検討が必要である。

5.5.3　処分施設の維持管理方法の検討

例示した回収維持期間に対し、処分施設を維持管理するための具体的な方策を検討した。検討では、一般的なトンネルで実施されている維持管理サイクル（計画、点検（調査）、健全度の区分と判定、対策工、記録等）のうち対策工（補修・補強）を中心に調査を実施し、処分施設への適用性を検討した。対策工の調査結果では、一般的なトンネルでは長期の力学的安定性や坑道内環境の保持を目的として覆工が設置されているため、覆工における変状の有無を確認して対策工を選定・実施していることがわかった。一方で、第 2 次取りまとめで示されている処分施設の標準断面には覆工が計画されていない坑道が多くあり、長期間にわたり坑道を維持管理していくためには既存の維持管理技術に関する処分施設への適用性の検討だけでなく、覆工の必要性や坑道断面積への影響の検討も課題として挙げられる。また、維持管理のために坑道の補修・補強が必要となった場合には作業空間の確保が不可欠となる。維持管理を前提とした坑道断面の検討が課題と考えられる。

ただし、処分施設の維持管理においては維持管理サイクルとして総合的にして検討していくことが重要である。

以上より、回収維持期間にわたり処分施設を維持管理するための具体的な方策検討に対する課題を次に示す。

・施設が大規模であること、かつ長期間の維持管理が求められることから、既存の維持管理技術に関する処分施設への適用性の検討および維持管理技術の合理化の検討が必要である。
・点検（調査）、対策工（補修・補強）の維持管理を実施することを前提とした坑道断面の検討が求められる。
・一般的なトンネルでは長期の力学的安定性や坑道内環境の保持を目的として覆工が設置されていることから、処分施設においても覆工の必要性の検討を行うことが望まれる。
・処分施設の維持管理は、計画、点検（調査）、健全度の区分と判定、対策工、記録などを統合して考える必要があるため、別途、処分システム工学確証技術開発にて検討されているモニタリングなどの成果を合わせた総合的な検討が必要である。

5.6 参考文献

[1] 廃棄物安全小委員会、“ 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、平成 18 年 9 月 11 日

[2] 原子力委員会、“今後の原子力研究開発在り方について（見解)”、平成 24 年 12 月 25 日

[3] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, “Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel”, NEA/RWM/R(2011)4, Paris, 2011 (full report).

[4] 原子力環境整備促進・資金管理センター、“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

[5] 核燃料サイクル開発機構、“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－、分冊 2 地層処分の工学技術”、JNC TN1400 99-022、平成 11 年 3 月

[6] 原子力環境整備促進・資金管理センター、“平成 24 年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 1 分冊）－遠隔操作技術高度化開発－”、平成 25 年 3 月

[7] 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 年 9 月

[8] TRU レポート共同作業チーム、“TRU 廃棄物処分概念検討書”，平成 12 年 3 月

[9] 竹ヶ原竜大ほか、“すきま充填材としてのベントナイト特性に関する研究（その 2）－すきま充填材の熱物性値評価－”，土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集、CS-190、2009 年 9 月

[10] 核燃料サイクル開発機構、“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－分冊 3 地層処分システムの安全評価”，JNC TN1400 99-023、

[11] 岩月輝希、湯口貴史、大森一秋、長谷川隆、宗本隆志、“瑞浪超深地層研究所における深度 500m までの地球化学調査および調査技術開発”，JAEA-Research 2013-021、2013.

[12] 大森一秋、新宮信也、萩原大樹、増田薫、飯塚正俊、乾道春、岩月輝希、“超深地層研究計画における地下水の地球化学に関する調査研究－瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集－（2011 年度)”、JAEA-Data/Code 2013-001、2013.

[13] 谷口直樹、甲川憲隆、前田一人、“幌延地下水環境における炭素鋼の腐食挙動の予察的検討”， JAEA-Research 2006-051、2006.

[14] 谷口直樹、鈴木宏幸、内藤守正、“高 pH 化した海水系地下水環境における炭素鋼の局部腐食進展挙動”、JAEA-Research 2009-066、2010.

[15] 齋正貴、新宮信也、萩原大樹、水野崇、“超深地層研究計画における地下水の地球化学に関する調査研究－瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集－（2008 年度)，JAEA-Data/Code 2011-003、2011.

[16] 核燃料サイクル開発機構、“幌延地域における地下水水質形成モデル構築のための予察的検討”，JNC TN8400 2002-025、2003.

[17] 瀬尾俊弘、清水和彦、“我が国における地下水の水質に関するデータの収集・解析”，PNC TN7410 92-017、1992.

[18] 天野由記、山本陽一、南條功、村上裕晃、横田秀晴、山崎雅則、國丸貴紀、大山隆弘、岩月輝希、“幌延深地層研究計画における地下水、河川水および降水の水質データ（2001~2010 年度)”、JAEA-Data/Code 2011-023、2012.

[19] 穂刈利之、沖原光信、岸敦康、水野崇、宮川和也、“試錐調査における地下水水質の時間的推移”、日本地下水学会春季講演会公演予稿（東大本郷キャンパス大会)、2014 年 5 月 24 日.

[20] 油井三和、武田精悦、小室光世、牧野仁史、澁谷朝紀、梅木博之、石黒勝彦、高瀬博康、根山敦史、“高レベル廃棄物地層処分システムの性能評価における地下水の地球化学的特

性に関するモデル化、PNC TN841092-166、1992.
[21] 笹本広、油井三和、梅木博之、“統計学的手法に基づいた地下水水質の分析”、日本原子力学会 1998 年秋の大会予稿集、p.867、1998.
[22] Sasamoto, H., Salter, P., Apted, M. and Yui, M., “ Principal Component Analyses of Potential Repository Groundwater”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc.1999.
[23] 中山元、朝倉紘治、辻川茂男、“鋼構造物のメンテナンス最適化のための腐食劣化診断の手順化の検討”、第 53 回材料と環境討論会、B-113 、2006.
[24] G. Nakayama, N. Nakamura, Y. Fukaya, M. Akashi, H. Ueda, ” Assessment of crevice corrosion and hydrogen induced stress-corrosion cracks in titanium-carbon steel composite overpack for geological disposal of high-level radioactive waste”, Workshop entitled: “Prediction of Long Term Corrosion Behavior in Nuclear Waste Systems” which will held in Cadarache from November 26h- 29th 2001, EFC publications No. 36, MANEY, 2003.
[25] 中山元、明石正恒、“アルカリ自然水-ベントナイト系における炭素鋼の局部腐食生起条件の検討”、材料と環境、49、p.22-227、腐食防食協会、2000.
[26] 腐食防食協会編、“材料環境学入門”、p.273、丸善、1993.
[27] 谷口ほか、“ベントナイト中における炭素鋼の不動態化条件の検討”、サイクル機構技報告、No.4、pp.87-91、1999
[28] 核燃料サイクル開発機構、“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－分冊 2 工学技術の開発－”, JNC TN1400 2005-015, p.25、2005.
[29] 明石正恒、“自然水環境における炭素鋼の均一腐食進展の流速依存性のモデル化”、腐食防食協会関東支部技術交流会、2012 年 1 月 20 日、早稲田大学.
[30] http://w-21.net/dron/table/orp.html、2014.12.4 検索.
[31] 腐食防食協会、“装置材料における保温材下の外面腐食の現状と対策について”、第 148 回腐食防食シンポジウム資料、2004 年 11 月.
[32] NACE, “NACE Standard Recommended Practice 0198-2004”, Item No.21084, NACE, 2004.
[33] 谷純一、“使用済燃料コンクリートキャスク貯蔵用キャニスタ候補材(ステンレス)の塩化物応力腐食割れ特性の評価”、電中研報告 Q06001、平成 18 年 9 月.
[34] 腐食防食協会編、“材料環境学入門”、p.34、丸善 (1993)
[35] 田中和嗣、辻川茂男、中山元、松川徹、横山弘善、佐藤昌宏、玉田明宏、千葉幸憲、坂本秀樹、高橋和夫、“河川用ゲート設備の防食性能に関する実験検討（第 2 報)”、第 48 回材料と環境討論会講演予稿集、C-108
[36] 中山元、明石正恒、“自然水系におけるステンレス鋼の腐食電位”、材料と環境 98 講演予稿集、D-115 (1998).
[37] 中山元、“自然水環境における炭素鋼の 50 年の腐食の見積と防食”、材料と環境 2004 講演予稿集 B-204、腐食防食協会(2004).
[38] 善一章、“海中構造物　腐食の実体と対策”、p.32、鹿島研究出版会 (1974)
[39] 腐食防食協会編、“金属の腐食･防食 Q&A”、p.11、丸善 (1988).
[40] 福田敬則、明石正恒、“炭素鋼の全面腐食進展速度予測法の検討”、腐食防食 93 講演予稿集、D-107、腐食防食協会(1993).
[41] 中山元、“水中に設置されたステンレス鋼製溶接構造物の腐食モニタリング”、第 54 回材料と環境討論会講演予講集、A307、腐食防食協会、2007.
[42] 日刊工業新聞社、“ステンレス鋼便覧、第 3 版”、p.1359、1995.
[43] 原子力百科事典、放射線の直接作用と間接作用 (09-02-02-10).
[44] 堀川一男、ほか、“防食技術”、16, No.4, 153 (1967).
[45] 腐食防食協会編、金属の腐食防食 Q&A、p.19、丸善(1988).
[46] 腐食防食協会編、“金属の腐食防食 Q&A”、p.141、丸善(1988).
[47] 陸上鉄骨構造物防食研究会、“学振 97 委技術賞受賞記念報告書”、p.15-16 (1968).
[48] エンジニアリング振興協会、“保温材下配管外面腐食（CUI）に関する維持管理ガイドライン”、平成 24 年 2 月.
[49] 栗原朋之、三宅隆介、大島義生、中原正大、“化学プラントにおける断熱材下の外面腐食

の実機検査結果の解析と発生可能性推定方法の検討”、材料と環境、59、291-297 (2010).
[50] エンジニアリング振興協会, “機械システム等のメンテナンス最適化のための RBM 手法の開発に関するフェージビリティスタディ”、平成 16 年度報告書.
[51] 戦略的技術開発（構造物長寿命化高度メンテナンス技術開発）―鋼構造物診断技術開発, 平成 17 年度報告書の CUI テクニカルモジュールのデータベース.
[52] 第 148 回腐食防食シンポジウム資料「装置産業における保温材下の外面腐食の現状と対策について」、2004 年 11 月、腐食防食協会 (2004).
[53] 中山元、藤原寛明、“加熱を受ける金属容器の温度勾配環境下での湿潤大気応力腐食割れ感受性”、第 51 回材料と環境討論会、B305、腐食防食協会 (2004).
[54] 小若正倫、長野博夫、“防食技術”、20、213 (1971).
[55] 小若正倫、“金属の腐食損傷と防食技術”、p.80、アグネ (1995).
[56] C.P. Larrabee, S.K. Cobwrn, Proc. 1st Int. Cong. On Metallic Corrosion, NACE p.276 (1961).
[57] 小若正倫、“金属の腐食損傷と防食技術”、p.52、アグネ (1995).
[58] 幸英昭、“炭素鋼･低合金鋼溶接部における腐食･防食”、溶接学会誌、77、7、13-17 (2008).
[59] 溝口茂、杉野和男、松山晋作、佐藤幸雄、“新関門トンネルに敷設した低合金鋼レールの腐食挙動”、第 35 回腐食防食討論会、B-203 (1988).
[60] 川崎祐征、阿部則次、若月修、溝田敏夫、“腐食レールの寿命推定”、土木学会第 55 回年次講演会、IV-261 (平成 12 年 9 月).
[61] 佐古武彦、力武基樹、久保和範、坂井宏行、“海底トンネル内におけるレール腐食の進みと排水中の塩化物イオンとの関係”、土木学会第 58 回年次講演会、IV-041 (平成 15 年 9 月).
[62] 在田正義、“腐食と船体の安全性について”、西部造船学会会報、75、233-245.
[63] (財)機械システム振興協会、“機械システム等のメンテナンス最適化のための高度メンテナンス技術開発に関するフィージビリティスタディ”、平成 19 年、(財) エンジニアリング振興協会.
[64] 化学工学会編、“塩化物 SCC 対策鋼使用実績データ集”、化学工学会(1997).
[65] 中山元、“ステンレス、チタンの孔食、すきま腐食、および SCC の発生条件とその防止方法”、第 51 回技術セミナー「第 2 回腐食防食技術実践･応用セミナー」、腐食防食協会、2010.02.09.
[66] Edited by D.L. Graver, Corrosion Data Survey - Metal Section, Sixth Editio, NACE International (1985)、
[67] 腐食防食協会、腐食センターニュース、最近の問合わせから―、No.44、p.11-13 (2007).
[68] 谷口直樹、本田 明、川崎 学、水流 徹、圧縮ベントナイト中における炭素鋼の腐食形態と腐食速度の評価、核燃料サイクル開発機構 研究報告書 JNC TN8400 99-003 (1991).
[69] 原子力機構 : 我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 次とりまとめ 総論レポート, JNC-TN1400-99-020 (1999).
[70] 電気事業連合会・核燃料サイクル機構、“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ー、JNC TY1400 2005-013、2005.
[71] Kozai, N., Adachi, Y., Kawamura, S., Inada, K., Kozaki, T., Sato, S., Ohashi, H., Ohnuki, T. and Banba, T.、“Characterization of Fe-Montmorillonite: A Stimulant of Buffer Materials Accommodating Overpack Corrosion Product”, Nuclear Science and Technology, 38, 12, pp.1141-1143、2001.
[72] 笹本広, 石井智子, 佐藤久夫, 九石正美、“鉄共存下でのベントナイトの変質に関する実験的研究”、JAEA-Research 2010-030、2010.
[73] Ishidera T., Ueno K., Kurosawa S. and Suyama T.、“Investigation of Montmorillonite Alteration and Form of Iron Corrosion Products in Compacted Bentonite Being in Contact with Carbon Steel for Ten Years”, Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, ANDRA, Lille, pp.269-270、2007.
[74] Carlson, L., Karnland, O., Oversby, V. M., Rance, A. P., Smart, N. R., Snellman, M.,

Vähänen, M. and Werme, L. O.、“Experimental Studies of the Interactions between Anaerobically Corroding Iron and Bentonite”, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 1-7, pp.334-345、2007.
[75] 陶山忠宏, 上野健一, 笹本広、“炭素鋼と 10 年間接していた圧縮ベントナイトの変質挙動調査”, JAEA-Data/Code 2008-007、2008.
[76] 日本原子力研究開発機構、“平成 19 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム化学影響評価高度化開発報告書”、平成 19 年度 3 月.
[77] 笹本広, 陶山忠広、“鉄－ベントナイト反応に関わる実験的検討－室温における 10 年程度の試験後試料の分析結果－”, JAEA-Research 2009-039、2009.
[78] 上野健一, 笹本広, 陶山忠宏、“緩衝材長期安定性に関する概略的評価, －鉄 - ベントナイトの相互作用に関わる影響評価－”, JAEA-Research 2008-073、2008.
[79] 核燃料サイクル開発機構、“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－, 分冊 2 工学技術の開発－”, JNC TN1400 2005-015、2005.
[80] 松本一浩, 棚井憲治、“ベントナイト緩衝材の流出特性の評価（Ⅱ）”, JNC TN8400 2003-006、2003.
[81] 松本一浩, 棚井憲治、“緩衝材の流出／侵入特性”, JNC TN8400 2003-035、2004.
[82] 松本一浩, 棚井憲治, 菅野毅, 岩田裕美子、“拡散モデルを用いた侵入現象による緩衝材密度変化の事例解析”, JNC TN8400 2005-009、2005.
[83] 松本一浩, 棚井憲治 、“X 線 CT スキャナによる亀裂内侵入ベントナイトの密度測定に関する適用性”, 原子力バックエンド研究, Vol.15 No.1, pp.27-35、2008.
[84] 松本一浩, 棚井憲治、“緩衝材の侵入現象モデルに関する適用性の確認”, JAEA Research、2009-070、2010.
[85] 原子力環境整備促進・資金管理センター、“平成 24 年度地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第二分冊）人工バリア品質評価技術の開発－、平成 25 年 3 月.
[86] 日本鉄道建設公団、“渇水の調査及び対策に関する研究報告書”、1987.
[87] 大島洋志, 高木盛男, 榎本秀明, 辻徹、“鉄道トンネルの湧水量実態調査, トンネルと地下”, Vol.18, No. 1, pp.43-49、1987.
[88] 日本トンネル技術協会、“トンネル施工に伴う湧水, 渇水に関する調査研究（その 2)”、1983.
[89] 原子力発電環境整備機構、“技術年報 2013 年度”、NUMO-TR-14-01、2014 年 5 月
[90] 原子力環境整備促進・資金管理センター、“平成 17 年度　地層処分技術調査等　遠隔操作技術高度化調査　報告書（2/3)”, 平成 18 年 3 月.
[91] 原子力環境整備促進・資金管理センター、“平成 18 年度　地層処分技術調査等　遠隔操作技術高度化調査　報告書（2/2)”、平成 19 年 3 月.
[92] 原子力環境整備促進・資金管理センター、“平成 19 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 1 分冊）－遠隔操作技術高度化開発－（2/2)”、平成 20 年 3 月.
[93] 原子力環境整備促進・資金管理センター、“平成 20 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 1 分冊）－遠隔操作技術高度化開発－（2/2)”、平成 21 年 3 月.
[94] 原子力環境整備促進・資金管理センター、“平成 23 年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：地層処分回収技術高度化開発)”、平成 24 年 3 月.
[95] 土木学会、“トンネルの維持管理（トンネルライブラリー第 14 号)”、2005.
[96] 吉川正ほか、“丹那・新丹那トンネルの建設と現在の建設および調査点検・補修補強技術”、基礎工 Vol.42、No.10、2014.
[97] 出典：釜石鉱山フリー百科事典『ウィキペディア（Wikipedia）
[98] 出典：神岡鉱山フリー百科事典『ウィキペディア（Wikipedia）
[99] 出典：釧路コールマインフリー百科事典『ウィキペディア（Wikipedia）

第6章　まとめ

第 1 章（事業概要）

平成 26 年度地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）における、事業の背景と目的、全体計画、実施概要を示した。実施概要のうち（1）回収技術高度化開発では、緩衝材除去装置の総合動作確認、実証試験計画の見直し、(2)処分施設における回収維持期間の検討では、平成 25 年度に実施した処分施設への安全性に影響を及ぼす要因について、人工バリア（オーバーパック、緩衝材）の性能維持が可能な期間の観点から分析、その影響の程度の定量的把握、回収維持期間について試行、処分施設（地下施設）を維持管理するための具体的な方策について検討を行った。以下に、第 2 章（緩衝材除去装置の改良）、第 3 章（緩衝材除去システムの総合動作確認）、第 4 章（地下での実証試験計画の見直し）、第 5 章（処分施設における回収維持期間の検討）について主な成果と残される課題を示す。

第 2 章（緩衝材除去装置の改良）

緩衝材除去装置の改良では、「総合動作確認」を滞りなく実施するため、平成 25 年度までの課題に対して、「原因調査・設計」、「改良」、「動作確認」の 3 つの段階を設け改良を行った。実施内容とその成果のまとめ以下に示す。

- 噴射・吸引設備（塩水噴射・スラリー吸引装置、および昇降設備）、遠隔操作設備（3D 観測システム）について、発生原因の調査を実施し、改良項目の抽出を実施し、それぞれの改良項目に対する改良方法を選定し設計を行った。また、各設備・装置の改良に伴う、関連設備・装置への影響についても検討した。
- 噴射・吸引設備の改良にあたっては、装置全体の組立段階における不適合発生を防ぐことを目的に、工場における装置改良段階での動作確認を繰返し実施した。調整作業後、工場内検査において各装置・動作に設けた基準をすべて満足することを確認し、装置全体の組立現場へ輸送、組立を完了した。
- 噴射・吸引設備のうち塩水噴射・スラリー吸引装置については、スラリー吸引量、吸引ホースの変形、揺動角度、揺動速度、遠隔動作を主たる動作確認項目とし、それぞれに設けた判定基準をすべて満足することを確認した。
- 噴射・吸引設備のうち昇降装置については、把持部昇降装置自然降下量、噴射部昇降装置自然降下量、吸引ホース巻取り動作、遠隔動作を主たる動作確認項目とし、それぞれに設けた判定基準をすべて満足することを確認した。
- 遠隔操作設備のうち 3D 観測システムについては、廃棄体把持部の自動連続計測、形状計測を主たる動作確認項目とし、それぞれに設けた判定基準をすべて満足することを確認した。

第 3 章（緩衝材除去システムの総合動作確認）

改良を実施した緩衝材除去システムの総合動作確認を目的とし、地上にて実規模スケールでの緩衝材除去試験（以下、本試験）を行った。本試験により得られた主な知見と今後の課題について以下に示す。

（塩水リユース特性）

・本試験において処理するスラリーの SS 濃度変化に対応し、処理した塩水の SS 濃度は平均 298mg/L であり安定した処理ができることがわかった。
・7 時間程度の連続試験では、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。
・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。

（緩衝材除去特性）

・緩衝材除去システムでは、設定の緩衝材に対して、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。なお、本試験では、竪置き・ブロック方式（乾燥密度 1.6Mg/m3、飽和度 60%程度、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。
・緩衝材の除去速度（1 時間当たりの除去深さ）は、模擬廃棄体把持部上部では平均 17.1mm/h、側部では除去速度は平均 22.9mm/h であり、本試験条件における緩衝材の除去速度を把握した。
・緩衝材除去システムについて、緩衝材除去時間 77 時間で緩衝材の除去を実施し、緩衝材除去特性を確認できた。
・模擬廃棄体側部では、模擬廃棄体把持部上部に比べ、除去対象部位に模擬廃棄体の胴体部が存在するため、塩水の接触面が限定され集中的に緩衝材除去が進ため、除去速度が上昇する。
・SS 濃度から算定した緩衝材除去量と 3D スキャナによる緩衝材除去量は概ね一致していることから、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を示した。
・さらに、緩衝材の除去量を測定する方法として除去形状から除去量をする場合、残置された緩衝材の体積変化を反映することができれば、より精度の高い除去量の算定が可能である。

（緩衝材除去システムの遠隔による制御・監視）

・塩水噴射・スラリー吸引装置の動作を制御・監視し、緩衝材除去状況に合わせ操作が可能なことを確認した。
・模擬廃棄体把持部の位置確認→把持装置の位置調整→模擬廃棄体把持部を把持→昇降装置による模擬廃棄体の引上げまでの動作が制御・監視可能なことを確認した。
・遠隔操作設備内で塩水の噴射量およびスラリー吸引量を制御・監視し、固液分離槽のスラリーの固液分離機能、リユースの SS 品質リユース、塩分濃度、pH 等性状を監視可能なことを

確認した。

（異なる特性を有する緩衝材に対する緩衝材除去システムの適用性）

・緩衝材と廃棄体側部に発生する表面摩擦に着目し、緩衝材と廃棄体の隙間にペレットを充填する方式と廃棄体定置後に緩衝材と廃棄体の隙間が発生しない方式を対象とした引き抜き試験を実施した。引き抜き試験では、各試験体に作用する側圧を変化させた場合の引き抜き力の変化を計測した。
・ペレットを充填する方式、隙間が発生しない方式ともに、側圧 - 表面摩擦応力の関係は一次回帰式で近似することができた。
・実規模の廃棄体に作用する側圧がわかれば、本試験結果を用いて廃棄体の表面摩擦力が算出でき、緩衝材除去システムを適用した場合、どの程度緩衝材を除去すれば回収が可能か推測できる可能性を示した。

（今後の課題）

・緩衝材除去試験により緩衝材の特性変化(密度、飽和度、廃棄体の発熱、作成方法など)に関する緩衝材除去システムの除去特性を確認する必要がある。
・本緩衝材除去システムは、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。地下環境に向けたシステム規模の最適化など、今後は本システムの完成度を上げていくことが必要である。
・本引き抜き試験は小規模要素試験であり、実規模スケールへ向けた検証が必要である。
・緩衝材除去システムを利用した廃棄体回収に今回の引き抜き試験結果を適用する場合、緩衝材除去材は塩水による膨潤が発生するなど、より詳細な条件を考慮した試験検討が必要である。

第 4 章（地下での実証試験計画の見直し）

平成 25 年度に実施された地下環境における実規模で行う実証試験計画に基づき、平成 26 年度に改良を行った緩衝材除去システムを利用する場合の作業環境について調査・検討し、その結果に基づき実証試験に必要となる設備及および坑道について基本設計を行った。なお、緩衝材除去システムの作業環境については、平成 25 年度に実施された地層処分実規模設備整備事業[1]における幌延深地層研究センターの地下施設での研究成果を活用した。本検討により得られた主な成果と今後の課題について以下に示す。

（実証試験サイトの設定）

・平成 26 年度までに開発した緩衝材除去システムによる実証試験の検討をより具体的にするために、実際の地下研究施設である「幌延深地層研究センター」の 350m 調査坑道の「試験坑道 2」を例として設定し検討を行った。

（地下環境における緩衝材除去システムの搬送計画）

東立坑から試験坑道 2 まで緩衝材除去システムを搬送する検討結果を以下にまとめる。

・噴射・吸引設備は、周回坑道の運搬設備の最大揚重条件以下の 4t 以下に分割し、試験坑道 2 までの運搬が可能である。

・塩水リユース設備は、「水供給槽」、「固液分離槽」を試験坑道 2 に搬入する場合、坑道入口を拡幅する必要がある。また、運搬は、ベルトコンベヤとターンテーブルの組合せが必要となる。

（地下環境における緩衝材除去システムの配置計画）

・試験坑道 2 における緩衝材除去システムの配置には、第 2 次とりまとめの堆積岩系坑道断面への拡幅と坑道延長 34m が必要となる。また、塩水リユース設備の「水供給槽」、「固液分離槽」を搬出入するため拡幅が必要となる。

（実証試験に必要な坑道断面）

緩衝材除去システムによる緩衝材除去試験に必要な坑道断面を以下にまとめる。

・噴射・吸引設備の最小組立スペースは、幅 5000mm（第 2 次とりまとめ断面と同じ）、高さ 6981mm（インバート上面から天端）、長さ 7490mm 以上が必要となる。

（今後の課題）

・本検討では、試験坑道 2 周辺に埋設されている計測機器を考慮せず拡幅断面の検討を行った。しかし、実際に試験坑道 2 の拡幅を行うには、拡幅範囲等について計測管理者と調整する必要がある

・解析結果では、鋼製支保工の仕様は一般に使用されている H150（SS400）を HH200（SS540）の高規格に、吹付コンクリートの仕様は f’ck 18N/mm2 を 36 N/mm2 の高強度にする必要が生じた。しかし、本解析は全断面掘削の解析パターンにて検討した結果であるため、実施設計では掘削手順に応じた構造解析を実施し、支保工仕様を再検討する必要がある。

・本検討では、現有設備を配置するために坑道の拡幅を検討した。今後は、噴射・吸引設備、塩水リユース設備の処理能力や設備構成を検討し、坑道断面（堆積岩系断面）以上の拡幅を行わないような設備設計の検討が必要である。

第 5 章（処分施設における回収維持期間の検討）

本検討では、平成 25 年度に実施された処分施設への安全性に影響を及ぼす要因について、人工バリア（オーバーパック、緩衝材）の性能維持が可能な期間の観点から分析を行い、主たる影響要因について、その影響の程度を定量的に把握するとともに回収維持期間について試行した。また、回収維持期間を対象として、処分施設（地下施設）を維持管理するための具体的な方策について整理した。主な成果と残される課題について以下に示す。

（処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合における人工バリア性能に及ぼす影響の程度の定量的把握）

処分施設を埋め戻さない状態における人工バリアに対する影響因子を整理し、各定置方式における人工バリアの状態設定および環境条件について設定し、人工バリアに対する影響の程度を解析的手法等により定量的に把握した。また、定量化（程度の検討）で必要となる人工バリアの環境条件として、オーバーパックの腐食や緩衝材への熱的影響等を検討するために温度条件、地下水条件、雰囲気等を設定した。なお、これらの環境条件の設定や影響の定量化の検討にあたっては、第２次取りまとめにおける人工バリア性能に係る環境条件調査および地層処分研究施設における人工バリア性能に係る地下環境情報調査の調査を行い処分場の環境条件を試行的に設定した。

人工バリアの環境条件については、処分施設を一定期間埋め戻さない状態が前提になるため、温度や地下水条件が過渡的な状態となる。したがって、温度や地下水の挙動が相互に関連して変化する状態となり、人工バリアに対する影響の定量化のための条件設定が難しく、保守的な条件設定となった。環境条件のより現実的な設定が必要である。

また、処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合は、坑道が空いており、人工バリア周囲にも埋戻しを実施しないことによる隙間が残ることから、操業環境を維持するための地下水の排水や換気による乾燥、酸化環境が継続することの腐食や好気性の微生物の影響など、操業を進めることにより埋戻しを実施すれば影響が小さい、または無視していた事項についても、人工バリアや処分場に対する影響として考慮が必要である。

以上より、処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合に対して、人工バリア性能に及ぼす影響の程度を定量的に把握するための課題を次に示す。

・温度や水の過渡的な状態について、相互に影響するような環境設定も実施することにより、人工バリアの状態設定をより現実的なものとして、定量評価の向上を図る。
・埋め戻さないことによる緩衝材への変質影響やオーバーパックの腐食挙動への影響において初期の設計値に対する取扱いを検討する必要がある。
・竪置き定置における処分孔蓋の設置、隙間埋め戻し材の設置など、これまで設計検討において取扱いが不明瞭であった要素について明確にしていく必要がある。

（人工バリアの状態と回収維持期間の例示）

処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合における人工バリア性能に及ぼす影響の程度の定量的把握の結果を基として、人工バリアの状態について検討を行い、回収維持期間について試行した。その結果、例えば、操業工程のある状態でのオーバーパックの腐食（減厚）は、100 年程度で 3mm 程度、50 年程度で 2mm 程度、10 年程度で 1mm 程度（100℃程度、大気中の条件とした場合）となる算出結果であった。

しかし、この算定結果は坑道を埋め戻さない状態での試行であり、坑道を埋め戻すことを前提としている第 2 次取りまとめの人工バリア要件とは異なるものである。例えば、腐食代においては、埋め戻すことを前提とした腐食代であり、その前提に違いが生じることとなる。そのため、処分坑道等を埋め戻さない場合には、処分坑道等を埋め戻さないとする条件を整理したうえで、

新たに人工バリア性能に及ぼす影響の程度と維持期間の設定の考え方について検討が必要である。

一方、操業のプロセスを進めず一定期間埋め戻さない状態とした場合、その状態によっては人工バリア性能に影響を及ぼす挙動の発生が懸念されるが、方策を加えることにより挙動を抑えることが可能であると考えられる。地下施設においても、維持管理が可能な坑道とすることにより、人工バリア性能を維持しつつ、回収可能性を継続的に維持することが可能である。なお、トンネルの実績面の調査結果では、我が国におけるトンネル供用期間は最大で 70 年程度であり、鉱山の稼働期間では最大で 150 年程度であることから、これらの期間を回収維持期間の設定に対するひとつの目安として提示した。

回収維持期間については、技術的要素だけではなく社会的要素を含めて決定されるものであるが、回収維持期間の長さに柔軟性を持たせるためには、各坑道の維持管理の成立性や信頼性が技術的な論点であり今後の課題となる。以下に残される課題を整理する。

- オーバーパックのみ設置したケースでは、回収の容易性は高いものの、オーバーパックの長期健全性を維持するための工学的対策が必要となり、その実現性や信頼性について検討が必要となる。
- 緩衝材を定置したケースでは、竪置き方式において、緩衝材を定置することにより、オーバーパックの長期健全性を確保する観点からは、合理的な状態であると考えられる。また、緩衝材の遮へい性や処分坑道内の空間が確保されていることにより、処分施設の維持管理に係わる作業性を確保することもできる。しかし、処分坑道横置き方式（原位置）の処分坑道については、緩衝材を定置することにより維持管理のための空間を確保することが難しくなるため、湧水抑制対策の維持管理の実現性と信頼性の確保に向けた検討が必要である。
- 処分坑道までを埋め戻した状態では、坑道内は還元環境に移行しつつ人工バリア性能が維持されている状態である。しかし、前段階（緩衝材を設置した状態）と同様に坑道（主要坑道）が空いている状態であることから、岩盤中の動水勾配の変化に対応した湧水抑制対策の検討が必要である。
- 回収維持期間については、一定期間処分施設を埋め戻さない条件の場合、第 2 次取りまとめにおける人工バリアの要件とは異なることから、人工バリア性能に及ぼす影響の程度と維持期間の設定の考え方について継続的な検討が必要である。

（処分施設の維持管理方法の検討）

例示した回収維持期間に対し、処分施設を維持管理するための具体的な方策を検討した。検討では、一般的なトンネルで実施されている維持管理サイクル（計画、点検（調査）、健全度の区分と判定、対策工、記録等）のうち対策工（補修・補強）を中心に調査を実施し、処分施設への適用性を検討した。また、維持管理のために坑道の補修・補強が必要となった場合には作業空間の確保が不可欠となる。維持管理を前提とした坑道断面の検討が課題と考えられる。

以上より、回収維持期間にわたり処分施設を維持管理するための具体的な方策検討に対する課題を次に示す。

・施設が大規模であること、かつ長期間の維持管理が求められることから、既存の維持管理技術に関する処分施設への適用性の検討および維持管理技術の合理化の検討が必要である。
・処分施設の維持管理は、計画、点検（調査)、健全度の区分と判定、対策工、記録などを統合して考える必要があるため、別途、処分システム工学確証技術開発にて検討されているモニタリングなどの成果を合わせた総合的な検討が必要である。

別紙-1

緩衝材除去システムの総合動作確認試験

1. 走行装置に対する遠隔操作設備の設計・製作

2. 昇降装置に対する遠隔操作設備の設計・製作

3. 塩水噴射・スラリー吸引装置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.　走行装置に対する遠隔操作設備の設計・製作

走行装置に対する遠隔操作設備の設計を図 1-1 に示す手順にて実施した。

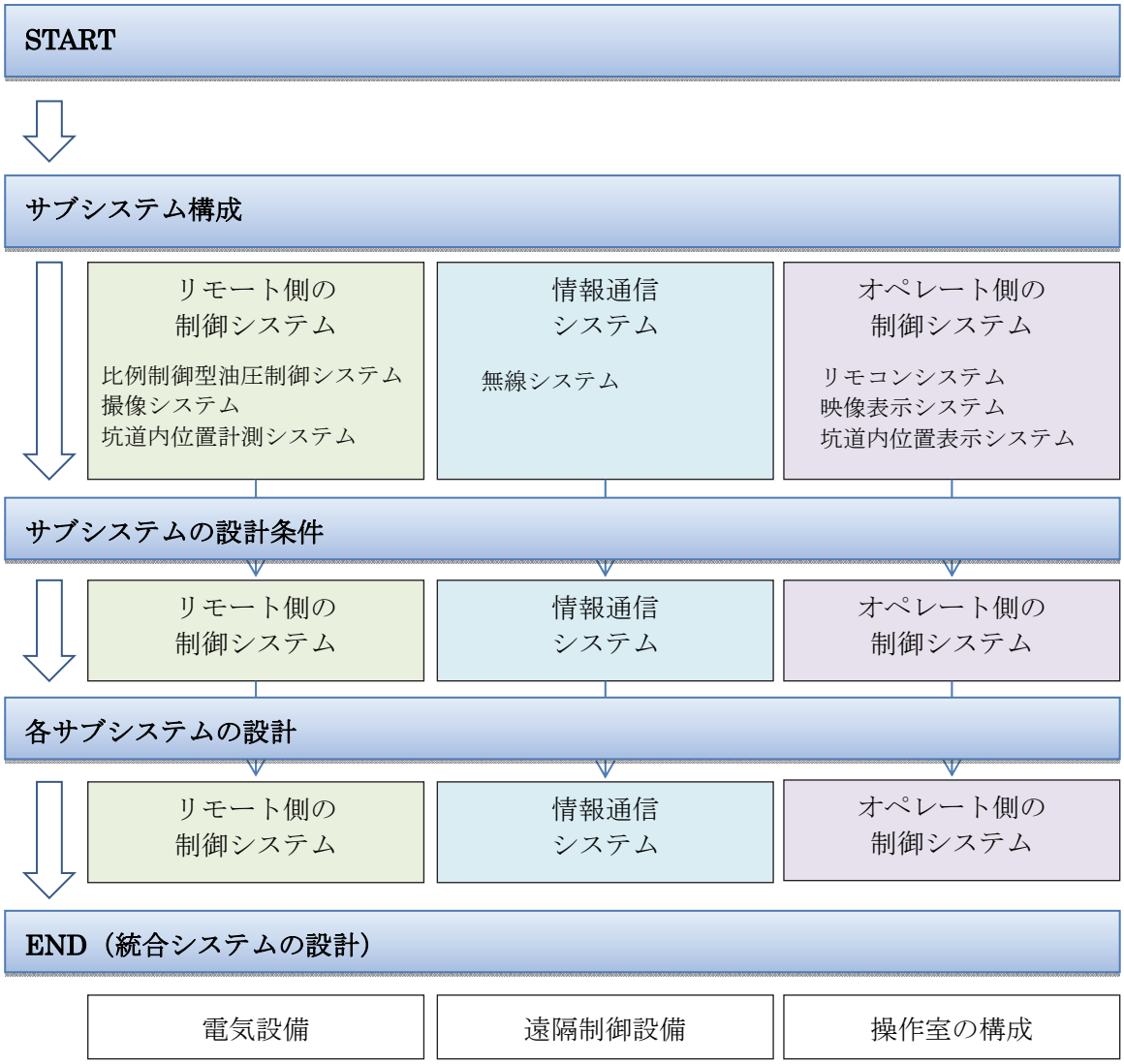


図 1-1　走行装置に対する遠隔操作設備の設計手順

(1) 設計条件

走行装置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 1-1 に示す。

表 1-1　走行装置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に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

電気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 1-2）

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、走行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、非合理な方式であると判断し、走行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 1-2 に示す。

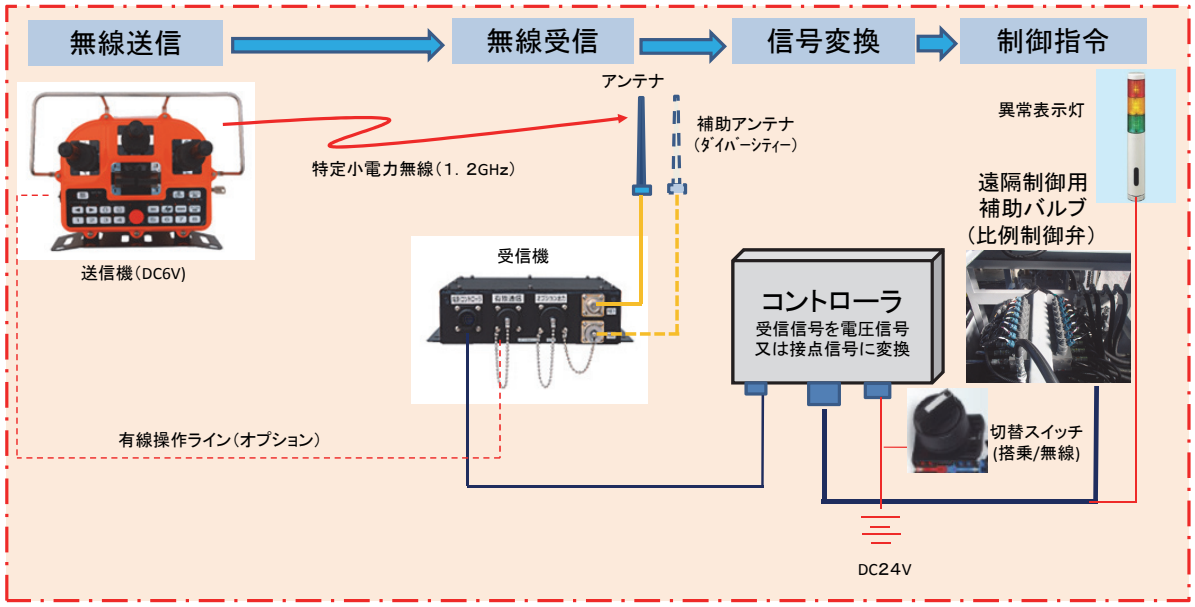


図 1-2　比例制御型油圧制御システムの概要

表 1-2　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/cm2 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、走行装置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 1-3 に示す。

表 1-3　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 1-4 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 1-4　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
抗道環境	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 ㎝	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 1-5 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 1-5　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 1-6 に示す。

表 1-6　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 1-7 に示す。

表 1-7　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 1-8 に示す。

表 1-8　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		抗道内位置情報（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 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	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)　走行装置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。走行装置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 1-9 に、油圧制御システム系統を図 1-3 に示す。

表 1-9　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	主ﾎﾟﾝﾌﾟ回路で使用	―
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/cm²	―	―
比例制御弁仕様	ｼｮﾍﾞﾙﾒｰｶ標準品	―	実績多数あり
比例弁指令電圧	0～5V	―	

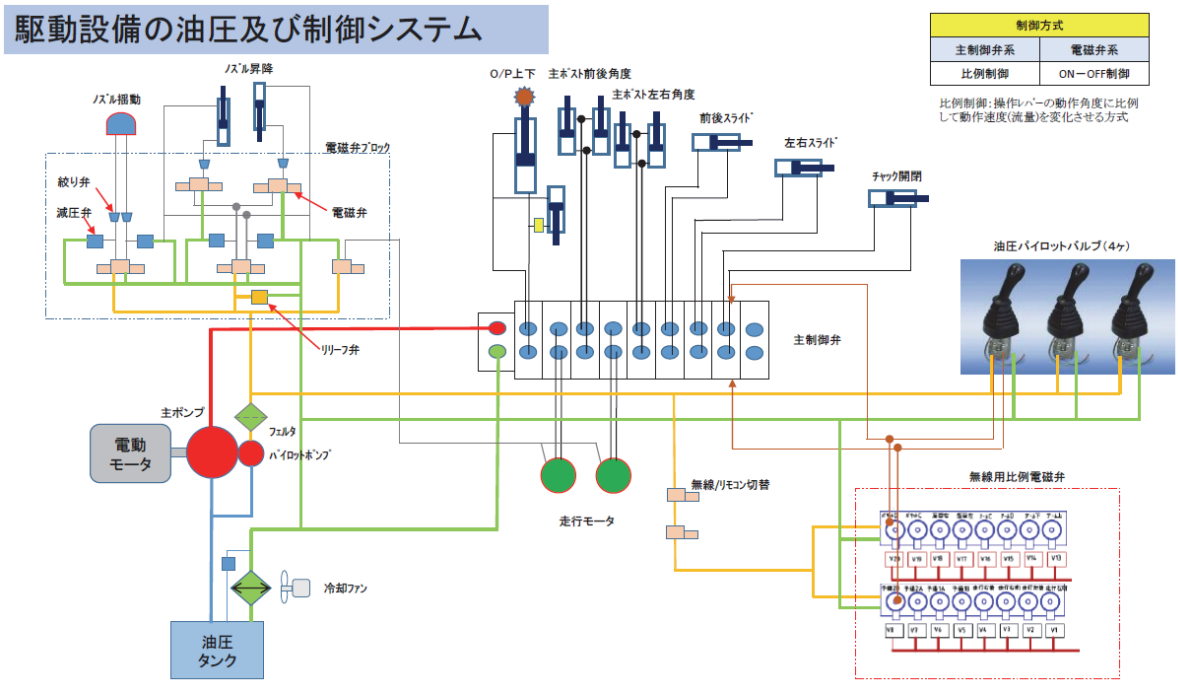


図 1-3　油圧制御システム系統図

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 1-10 に、撮像システム（カメラ）の配置を図 1-4 に示す。

表 1-10　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	ﾋﾋﾞﾉﾃﾞｰﾀｺﾑ製
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(ﾅｲﾄﾓｰﾄﾞ時)	―
	レンズ 3～9mm（89.1°～29.8°）	―
実用温度条件	-20℃～60℃	―

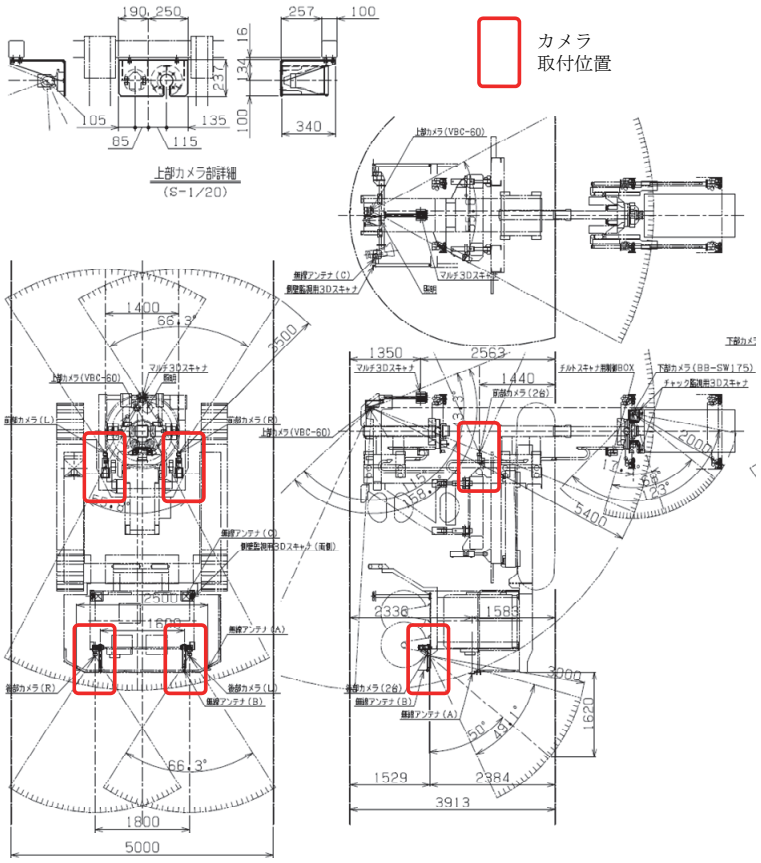


図 1-4　走行用カメラ取り付け位置

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 1-11 に、3D スキャナーの取り付け位置を図 1-5 に示す。

表 1-11　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。	抗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 10cm	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。

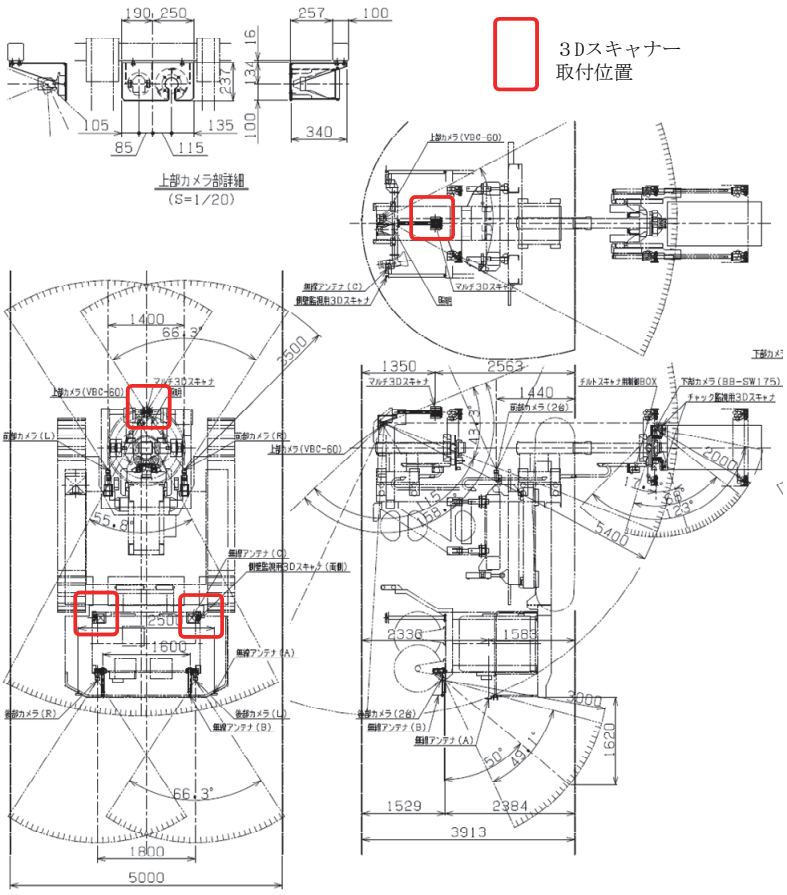


図 1-5　3D スキャナー取り付け位置

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 1-12、表 1-13 に、無線システムの構成を図 1-6 に示す。

表 1-12　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℃～+55℃
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 1-13　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：6.5～450 Mbps、 11ac：6.5～1,300 Mbps
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)203 mm x (奥行)203 mm x (高さ)65 mm
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 1,300 Mbps

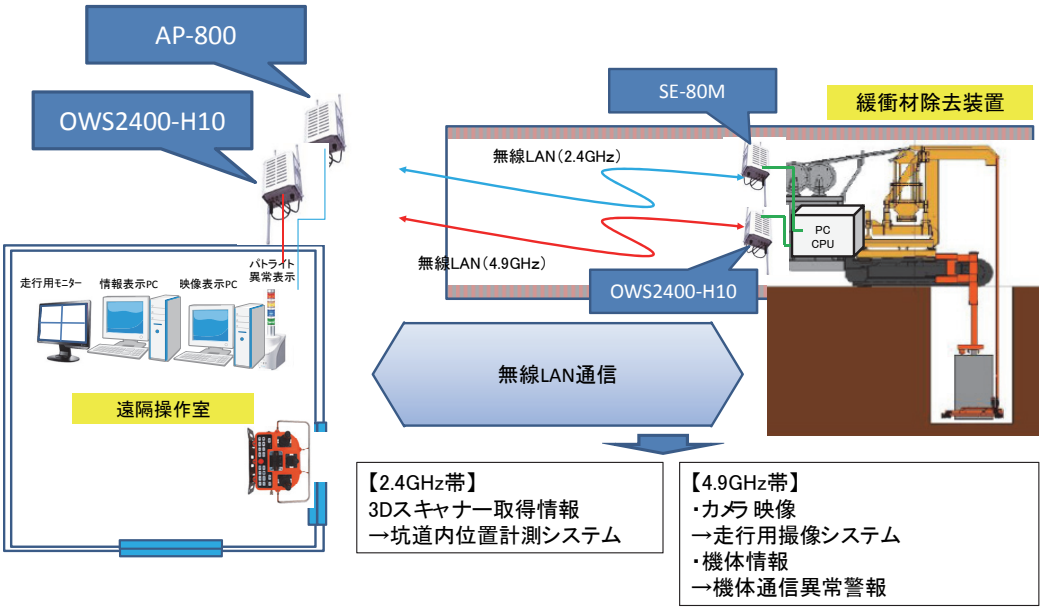


図 1-6　無線システム構成図

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 1-14 に、遠隔操作システム及びリモコンレバー配置を図 1-7 に示す。

表 1-14　リモコンシステムの仕様

送信機(操作側機器仕様)

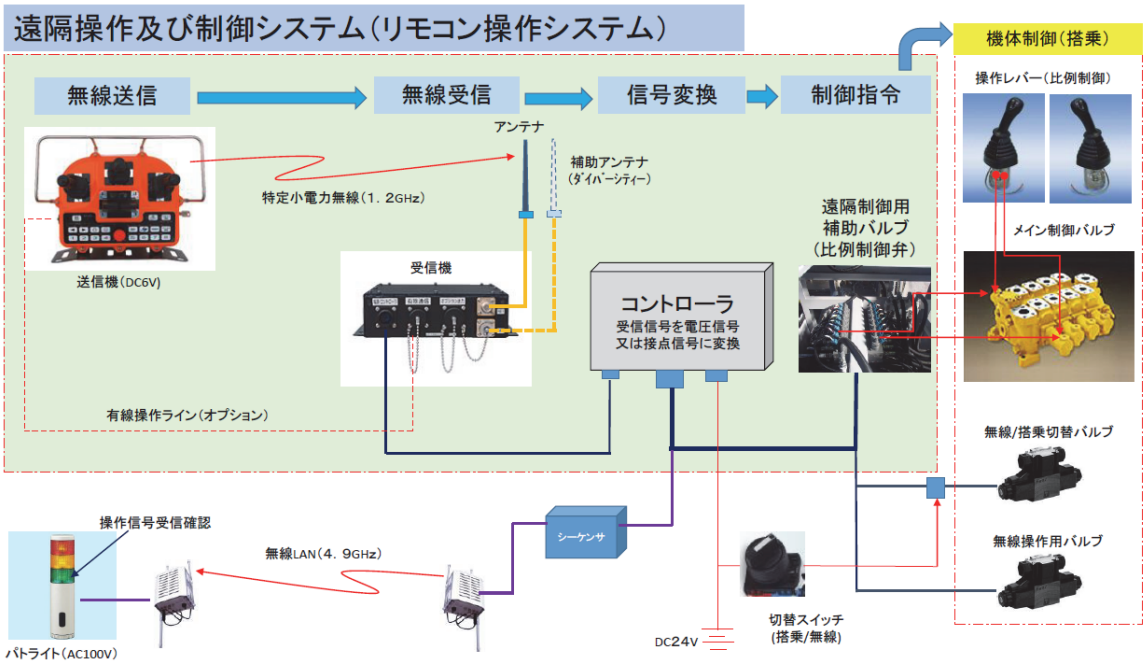
1.無線伝送方式	特定小電力無線　ARIB STD-T67　10W 単向連続送信
2.無線周波数	1252MHz 帯 19 波（1252.0375～1252.4875）
3.無線チャンネル	固定/ｸﾞﾙｰﾌﾟ/ｵｰﾙ　切替え
4.構造	PC/ABS 樹脂
5.質量	約 2.4kg
6.温度・湿度	動作温度：-15～60℃　湿度：RH90%以下
7.保護等級	IP55
8.電源	ﾆｯｹﾙ水素電池（単 3 型×2 本）　ACｱﾀﾞﾌﾟﾀ
9.電池使用時間	8 時間以上（新品充電後、単 3 型 2 本 1900mAh）
10.通信速度	高速ﾓｰﾄﾞ(4800bps)/遠隔ﾓｰﾄﾞ(2400bps)切替え
11.有線出力	RS422(4800bps)/MSK(2400bps,600Ω,0dBm)切替え

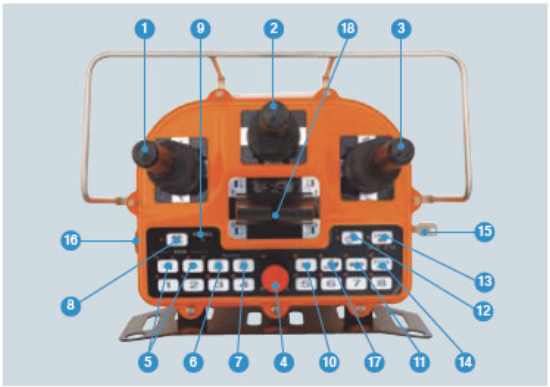
受信機

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/ｸﾞﾙｰﾌﾟ/ｵｰﾙ　切替え
4.構造	ｱﾙﾐﾆｭｰﾑ板金構造
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	高速ﾓｰﾄﾞ(4800bps)/遠隔ﾓｰﾄﾞ(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.ｵﾌﾟ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ﾋﾞｯﾄ)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





駆動設備関連操作
（レバー番号：対応操作）
18左：走行右の前後
18右：走行左の前後

リモコン側操作レバー配置

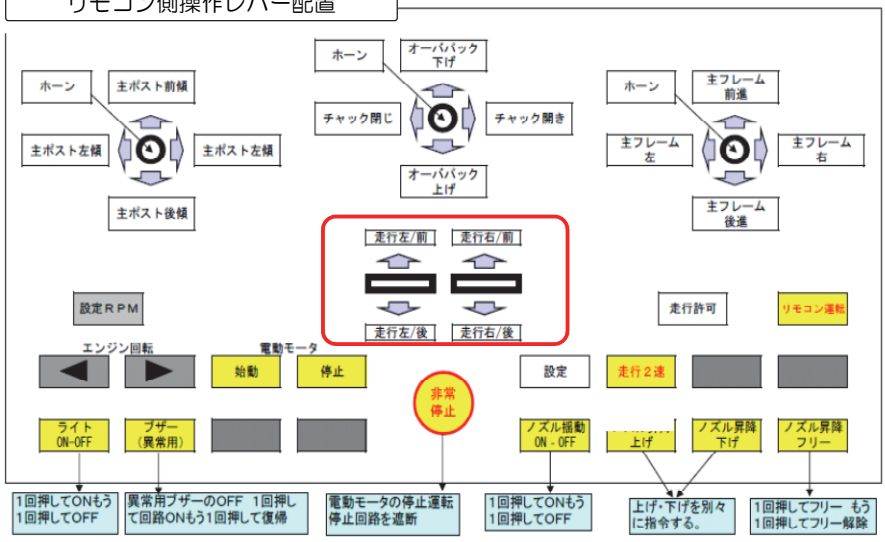
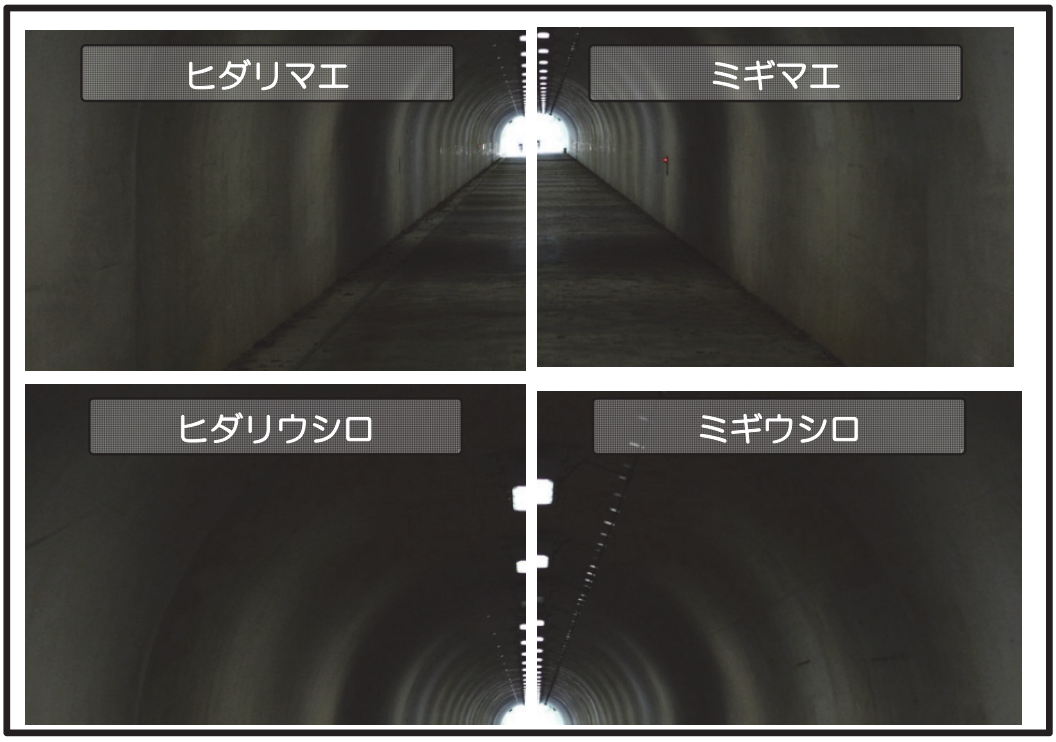


図 1-7　遠隔操作システム及びリモコンレバー配置

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 1-8 に示す。



（注）画像は模擬で実際の画像ではありません

図 1-8　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 1-9 に示す。

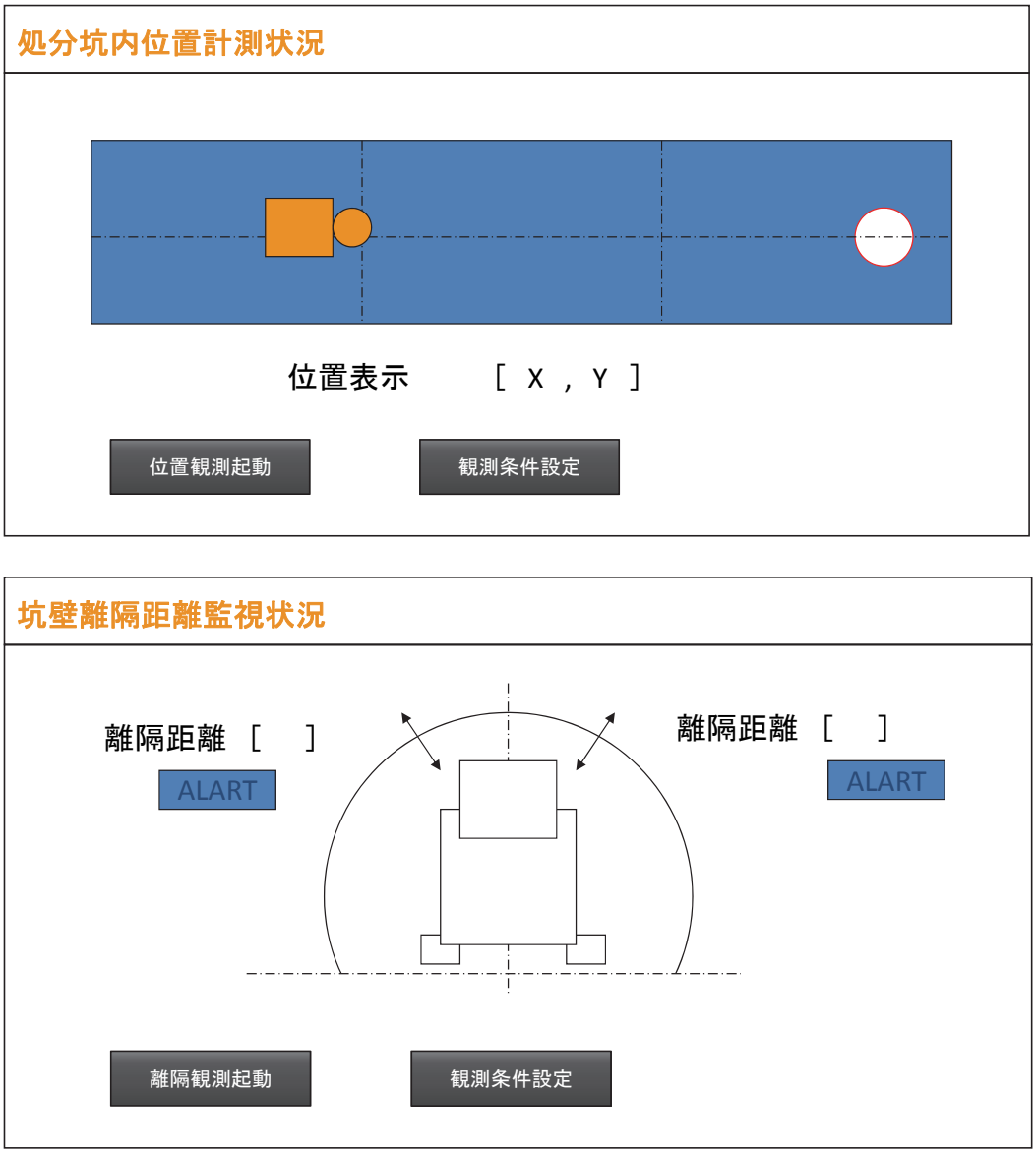


図 1-9　坑道内位置情報表示システムの画面仕様

2.　昇降装置に対する遠隔操作設備の設計・製作

昇降装置に対する遠隔操作設備の設計・製作は、図 2-1 に示す手順にて実施した。

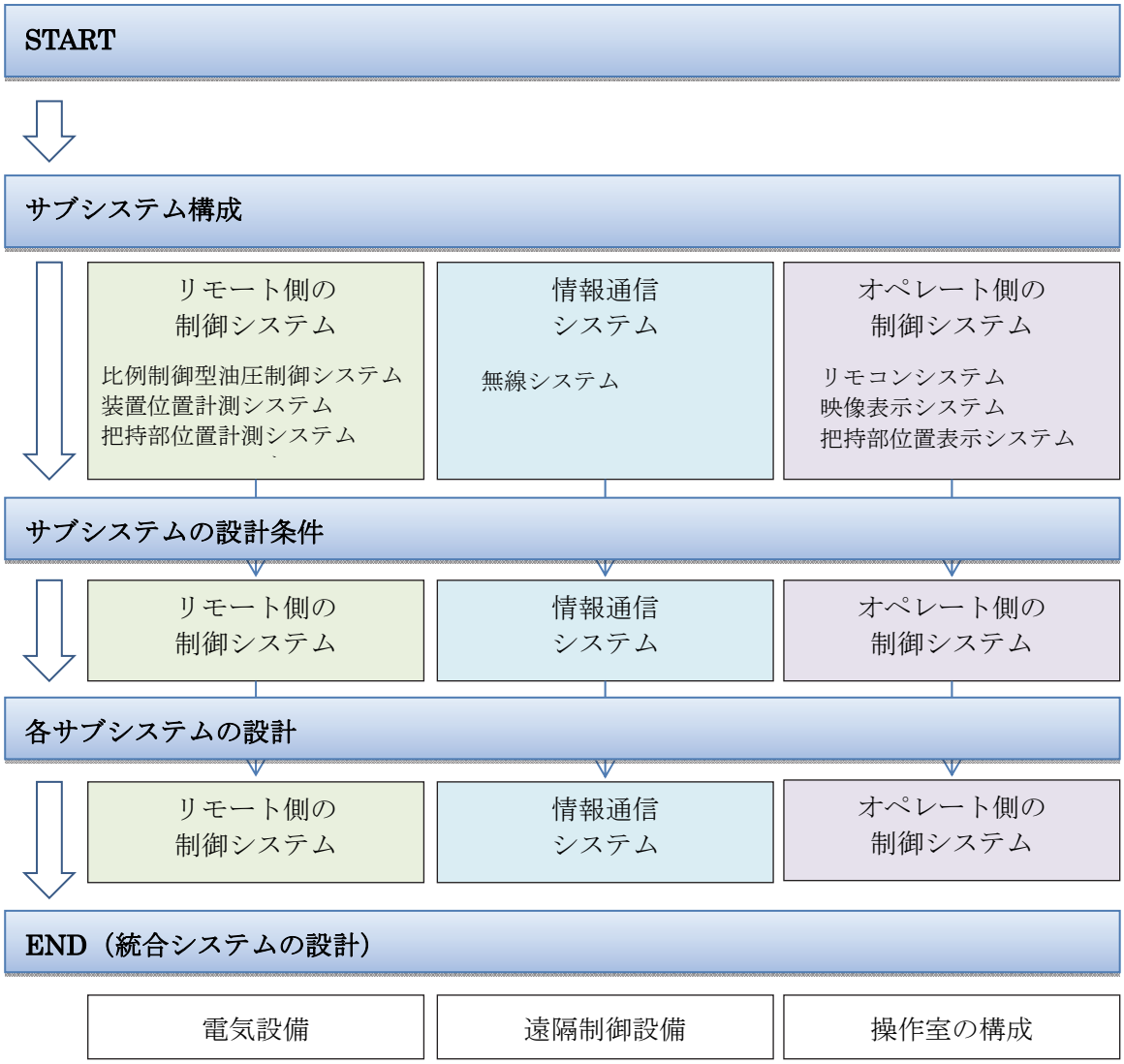


図 2-1　昇降装置に対する遠隔操作設備の設計手順

(1)　設計条件

昇降装置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 2-1 に示す。

表 2-1　昇降装置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 2-2 に示す。

表 2-2　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

走行装置と同様の撮像システム（表 1-3）を採用した。

c. 把持部位置計測システムの設計条件

走行装置と同様に 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 2-3 に示す。

表 2-3　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

走行装置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 2-4 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 2-4　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

走行装置と同様にリモコンユニット（表 1-6）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計条件を表 2-5 に示す。

表 2-5　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	昇降装置付近
	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、走行装置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 2-6 に示す。

表 2-6　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
使用環境および電源	映像表示システム同等	

(2) 昇降装置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。昇降装置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 2-7 に、計測するセンサー類の取り付け位置を図 2-2 に示す。

表 2-7　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 ﾊﾟﾙｽ/1mm　IP63
ノズル部高さ	リニアエンコーダ	MUTOH DE-04	5 ﾊﾟﾙｽ/1mm　IP63

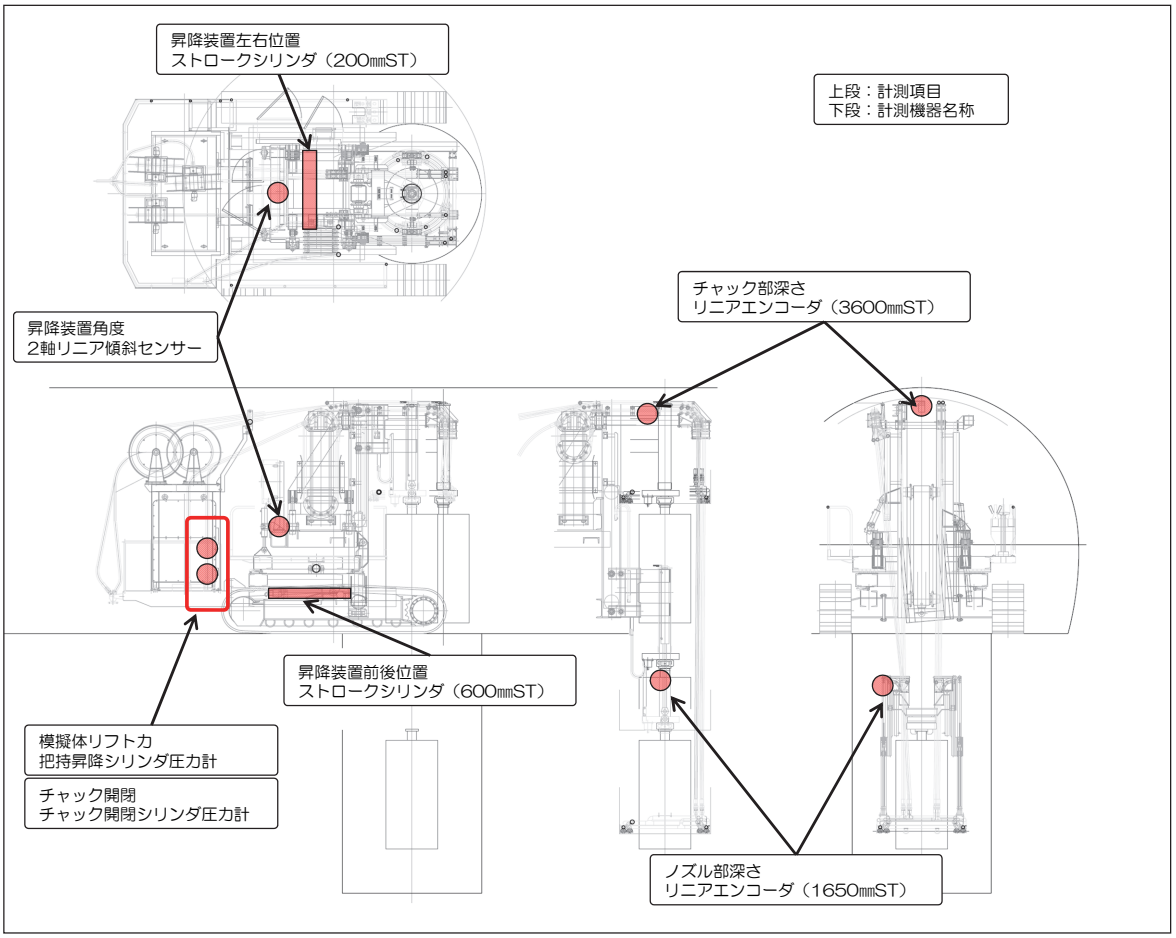


図 2-2　センサー類取付位置図

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 2-8 に、撮像システム（カメラ）の配置を図 2-3 に示す。

表 2-8 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(ﾅｲﾄﾓｰﾄﾞ)	
	ズーム性能 36 倍　ﾃﾞｼﾞﾀﾙｽﾞｰﾑ；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℃～50℃	
湿度条件	20～80%	

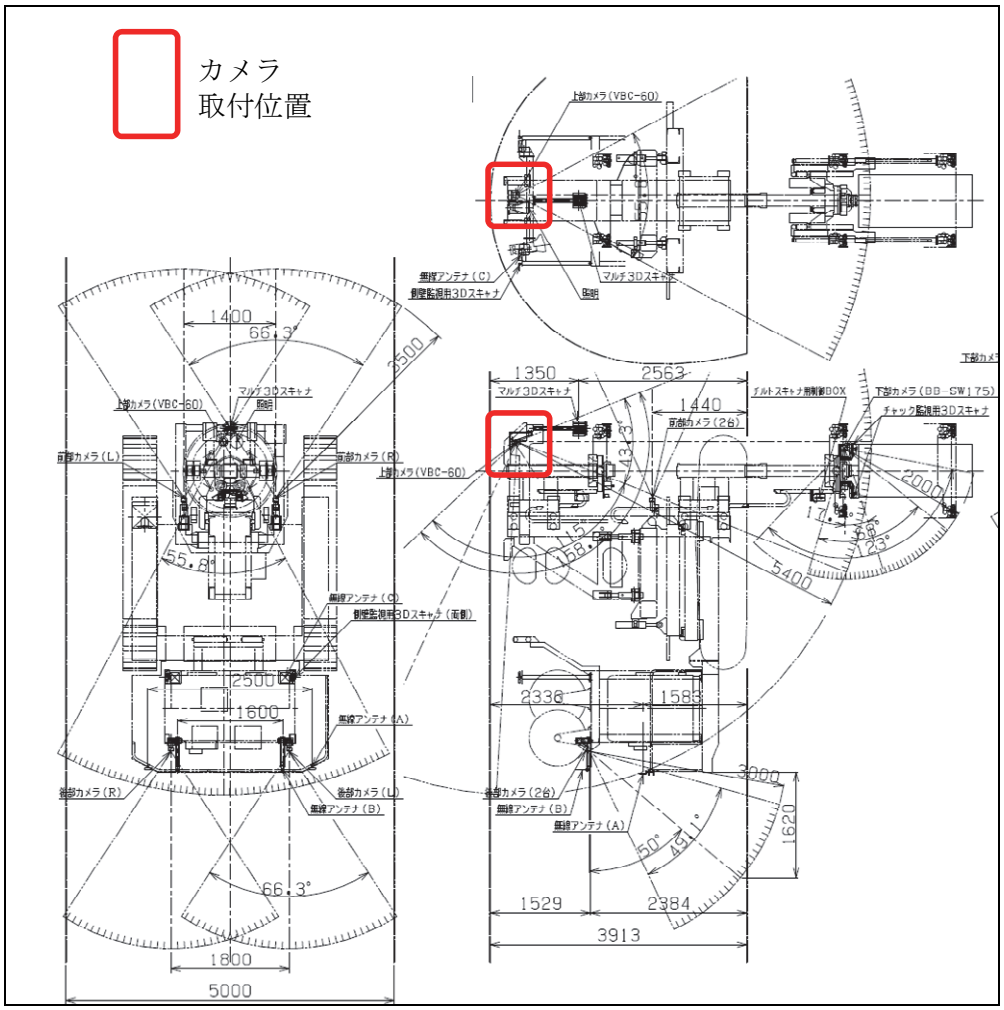


図 2-3　撮像システム（カメラ）配置

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 2-9 に、3D スキャナーの配置を図 2-4 に示す。

表 2-9 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	

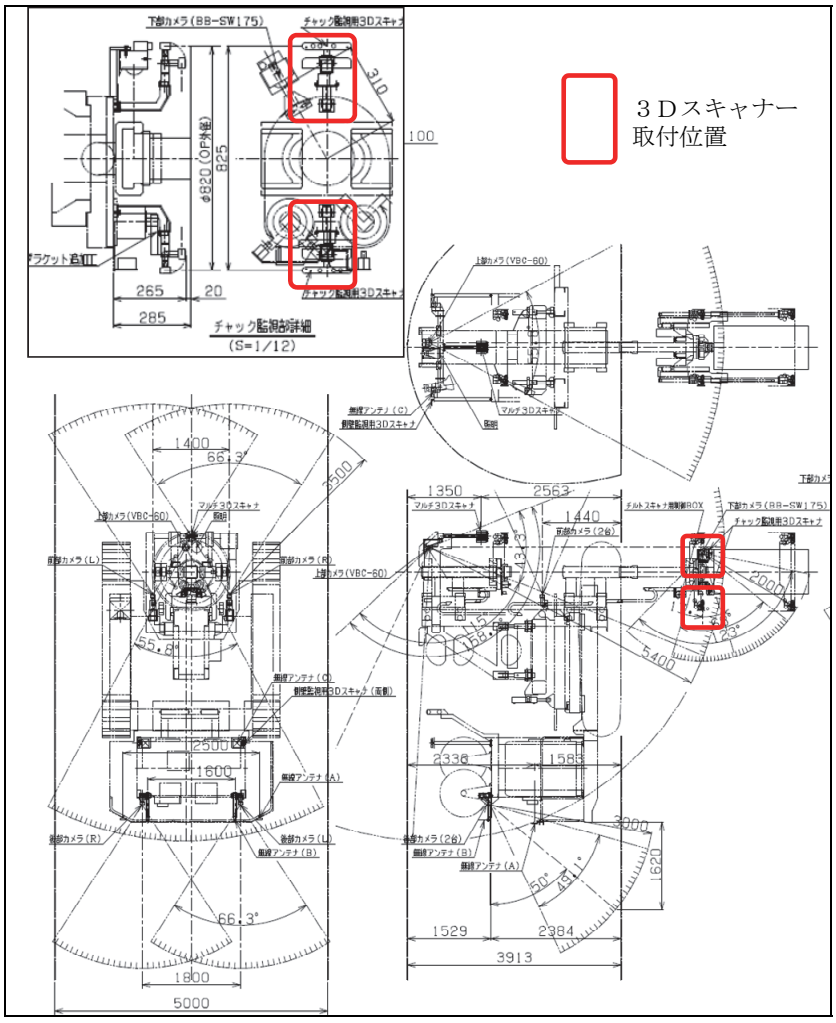


図 2-4　３Ｄスキャナー取付位置

2) 情報通信システムの仕様

昇降装置に対する遠隔操作設備の仕様は走行装置と同様（表 1-12、表 1-13）とした。無線システム構成図を図 2-5 に示す。

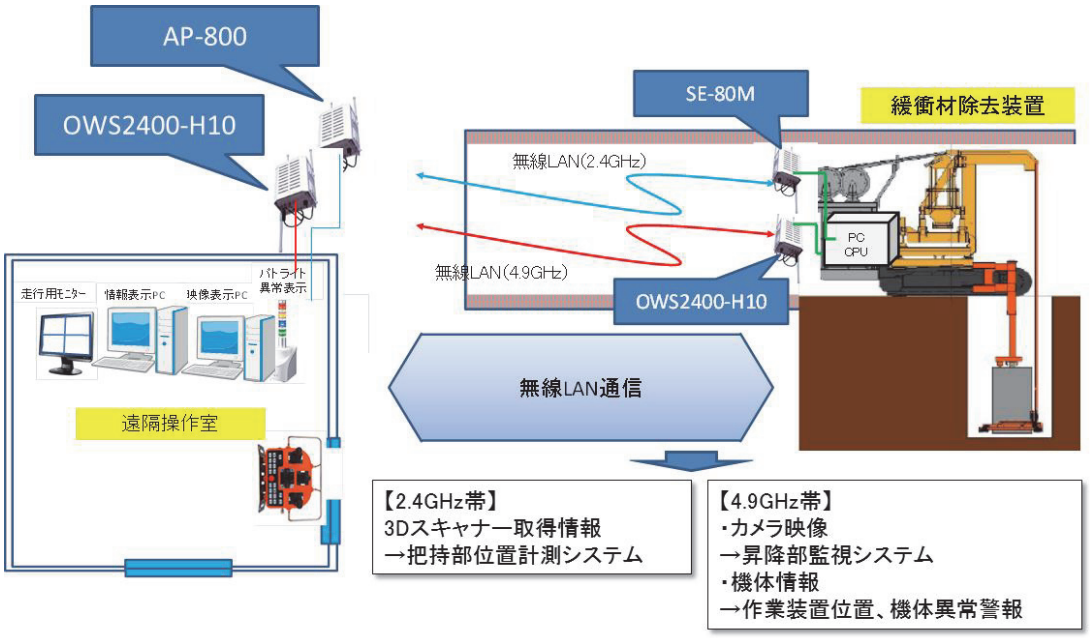


図 2-5　無線システム構成図

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

昇降装置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 1-14 を参照、昇降装置に関するリモコンシステムの操作レーバー配置を図 2-6 に示す。

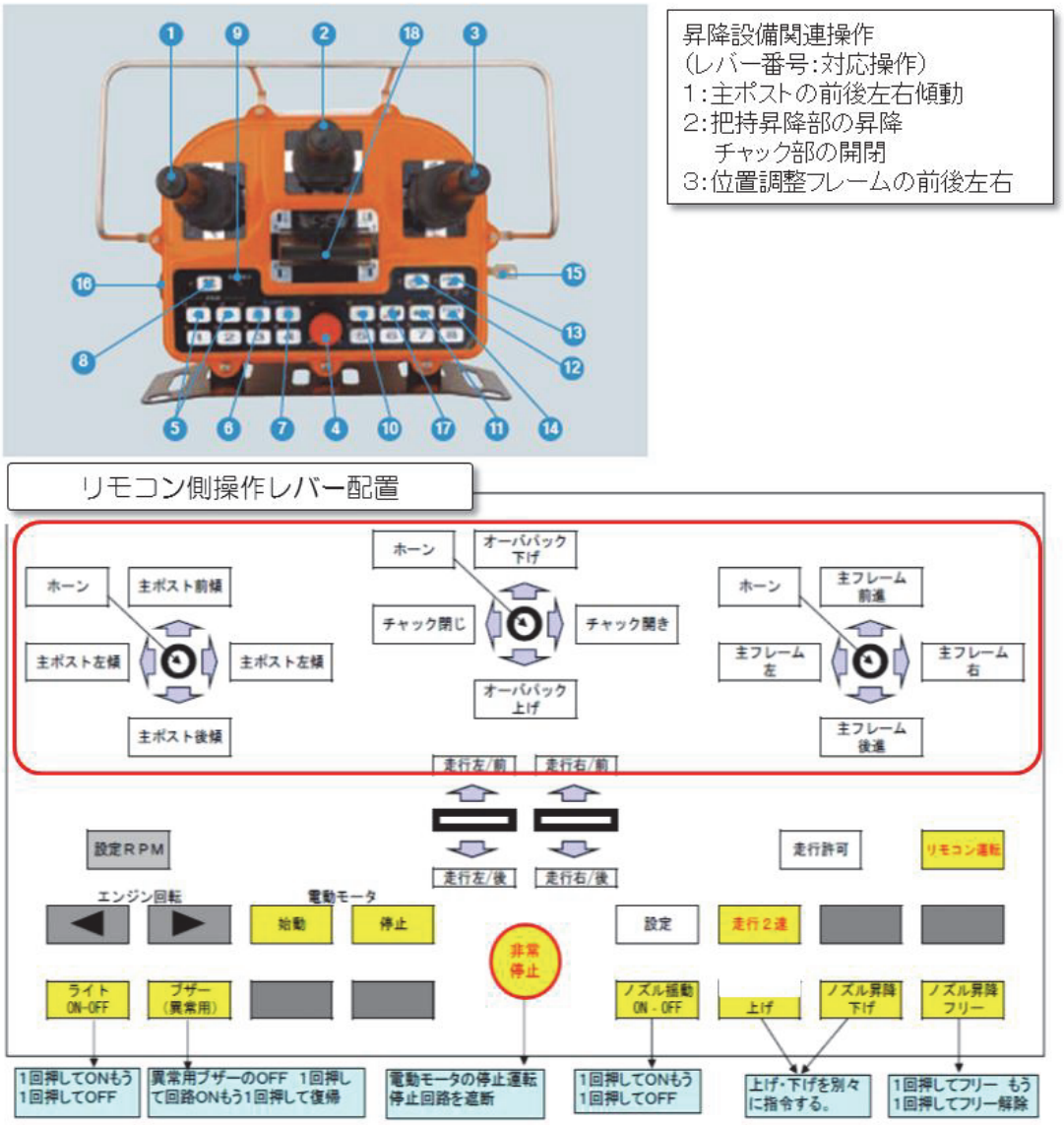


図 2-6　遠隔操作システムリモコンレバー配置

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 2-7 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 2-8 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。

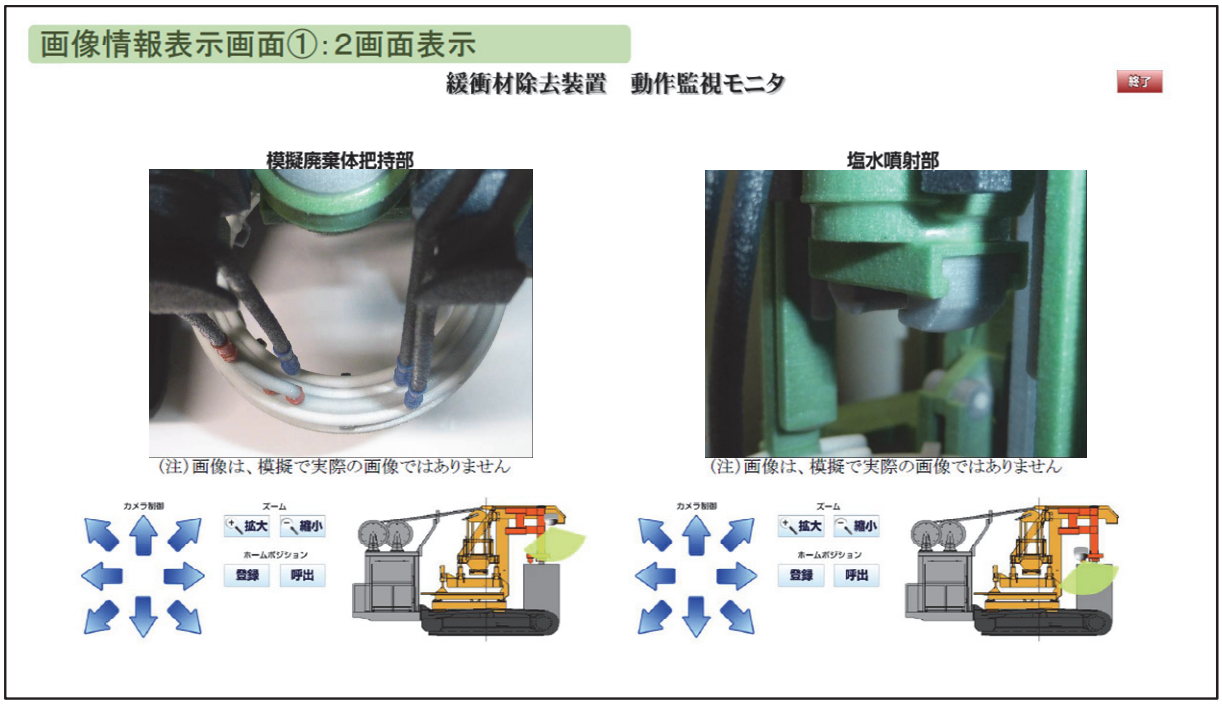


図 2-7　撮像表示システムの画面仕様

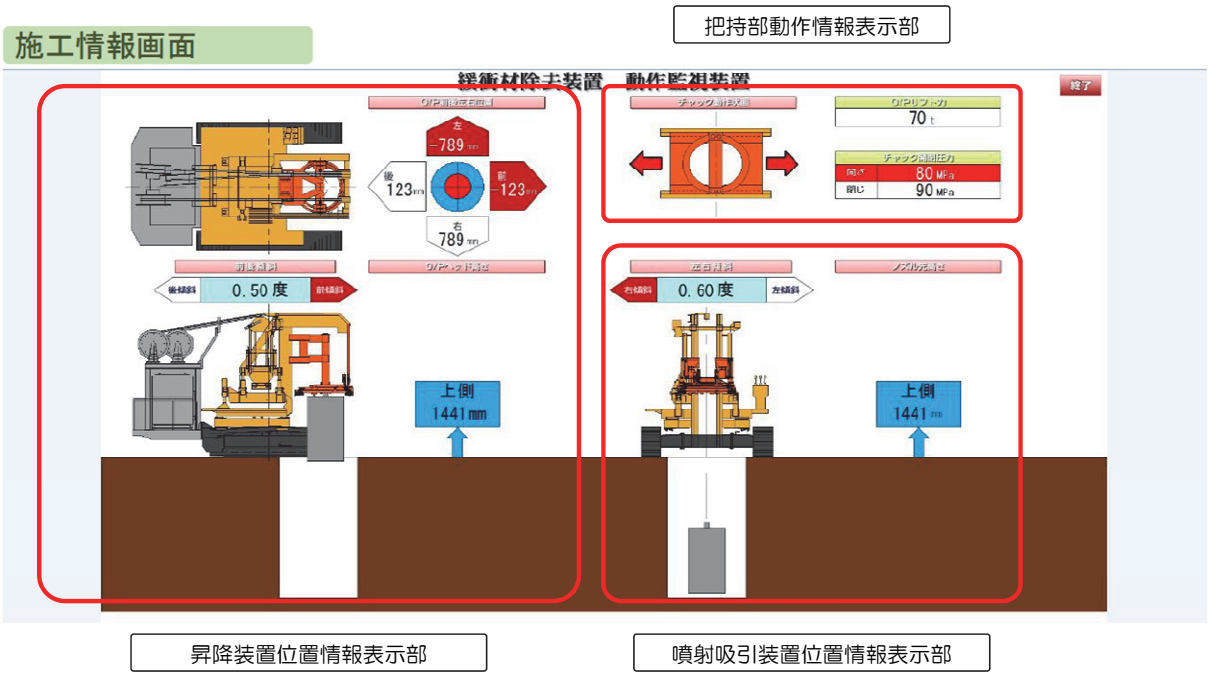


図 2-8　作業姿勢表示システムの画面仕様

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 2-9 に示す。

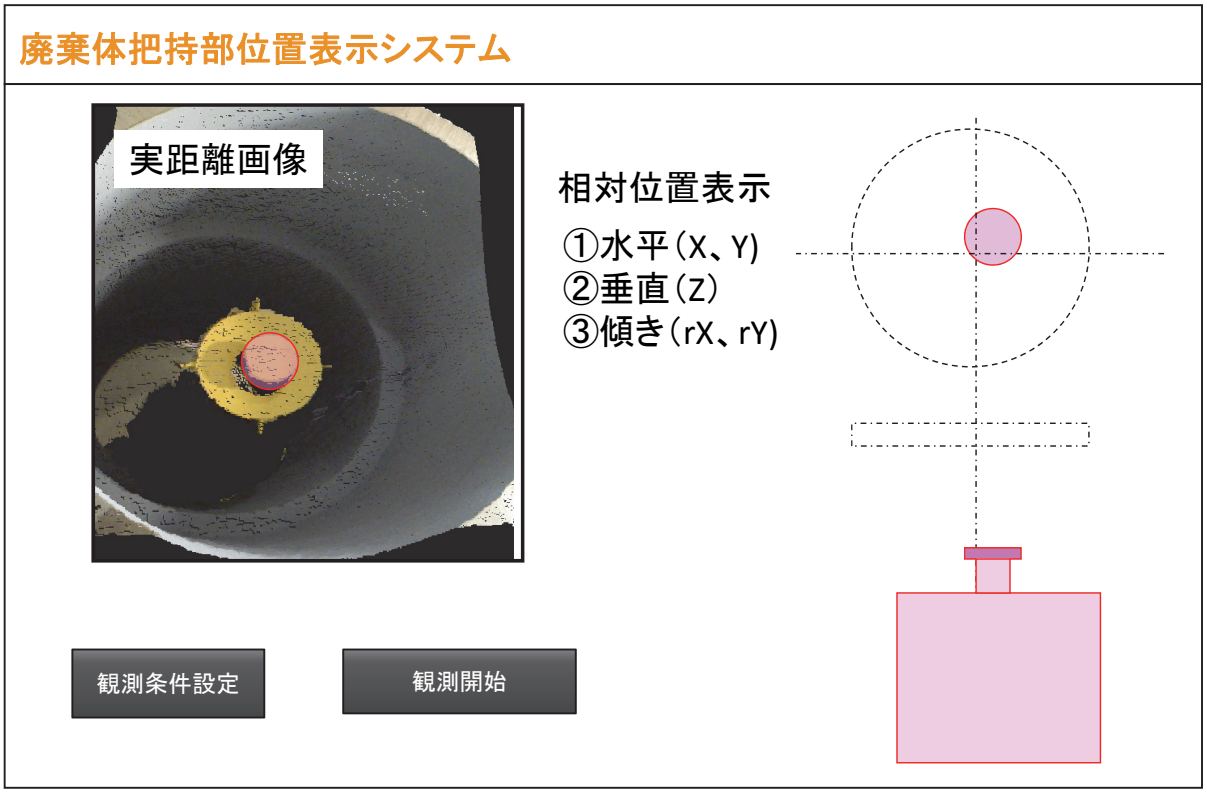


図 2-9　廃棄体把持部位置表示システムの画面仕様

3.　塩水噴射・スラリー吸引装置に対する遠隔操作設備の設計・製作

塩水噴射・スラリー吸引装置に対する遠隔操作設備の設計・製作は、図 3-1 に示す手順にて実施した。

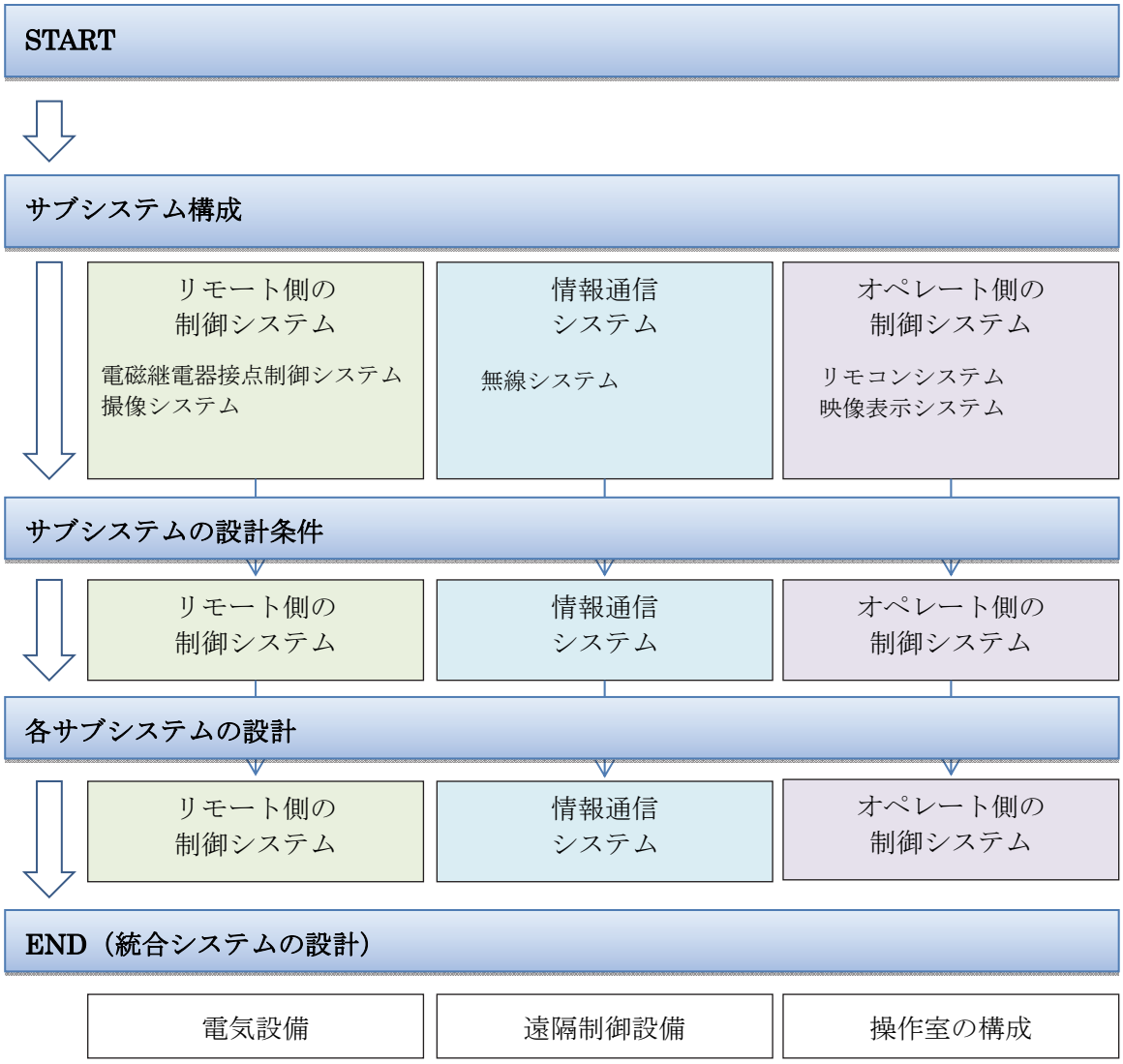


図 3-1　塩水噴射・スラリー吸引装置に対する遠隔操作設備の設計手順

(1) 設計条件

塩水噴射・スラリー吸引装置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た、サブシステムの設計結果を表 3-1 に示す。

表 3-1　塩水噴射・スラリー吸引装置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・スラリー吸引装置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・スラリー吸引装置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 3-2 にまとめた。

表 3-2　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

走行装置（表 1-3）や昇降装置（表 2-5）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

走行装置と同様に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 3-3 に示す。

表 3-3　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		作業者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

走行装置同様に塩水噴射・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 3-4 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 3-4　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、走行装置や昇降装置と同様にリモコンユニット（表 1-14）を採用した。リモコンシステムの設計条件を表 3-5 に示す。

表 3-5　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、走行装置や昇降装置と同様にリモコンユニット（表 1-14）を採用した。映像表示システムの設計条件を表 3-6 に示す。

表 3-6　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	昇降装置付近
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、走行装置や昇降装置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）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 3-7 に示す。

表 3-7　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 電源	映像表示システム同等	

(2) 塩水噴射・スラリー吸引装置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・スラリー吸引装置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 3-8 に、システム制御回路図を図 3-2 に示す。

表 3-8　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 は取り付面からの高さ。
※5：フォト MOS 全駆動時

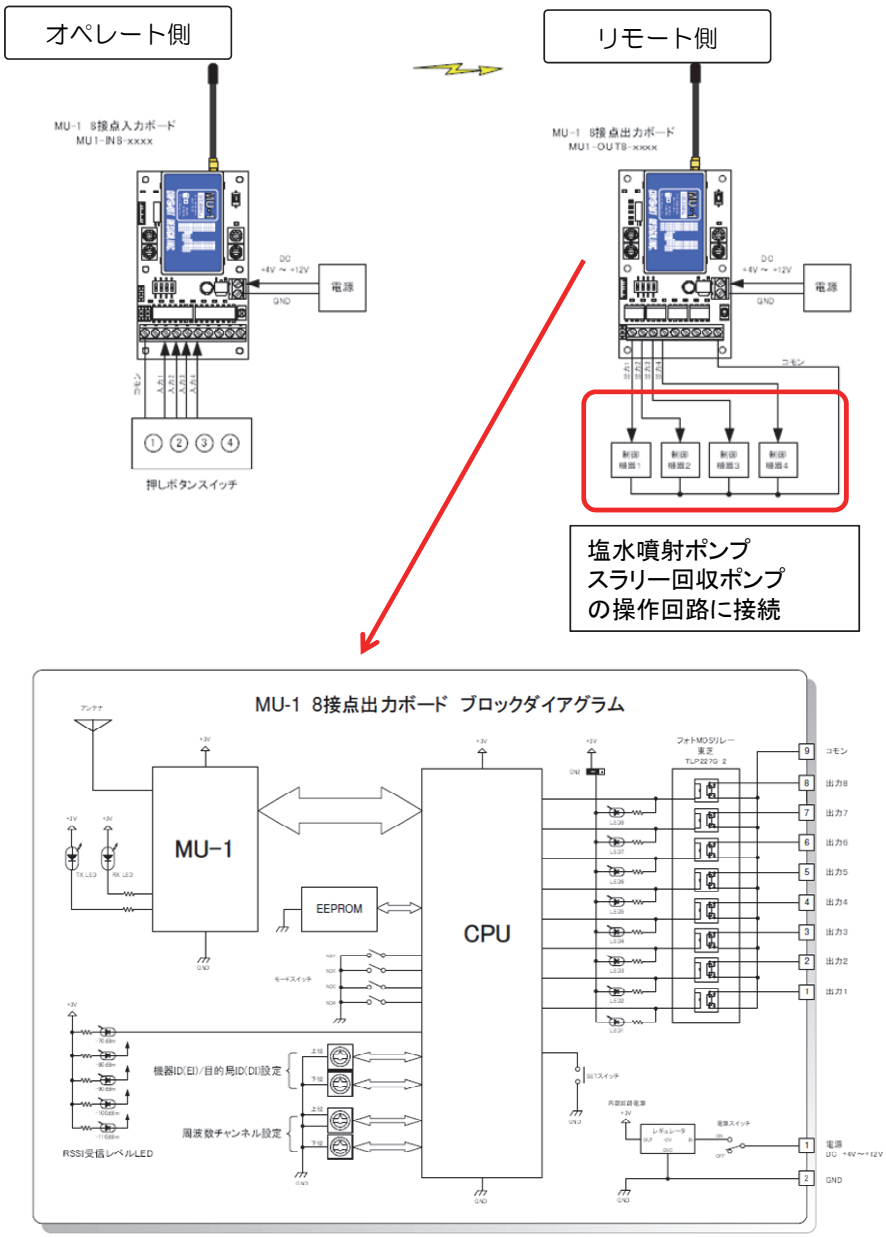


図 3-2　リモート側システム制御回路図

b. 撮像システムの仕様

塩水噴射・スラリー回収設備の遠隔操作設備対する、リモート側の撮像システムの構成機器として用いるカメラの仕様を表 3-9 に、カメラの取り付け位置を図 3-3 に示す。

表 3-9 撮像システムの仕様

型式	Web カメラ　BB - SW175	パナソニック製
防水性能	IP55 屋外仕様	
画像圧縮	JPEG	
電源	DC12V AC ｱﾀﾞﾌﾟﾀ付き	
カメラ性能	有効画素　130 万画素	
	最低被写体照度　0.61lux	
	ズーム性能：2 倍　ﾃﾞｼﾞﾀﾙｽﾞｰﾑ；8 倍	
	レンズ焦点：オートフォーカス　0.5m～∞	
	焦点距離 1.95mm	
パン(水平)機能	±47.5°	
チルト(垂直)機能	－45°　～+10°	
ネットワーク	LAN	
温度条件	—20℃～50℃	
湿度条件	90%以下	

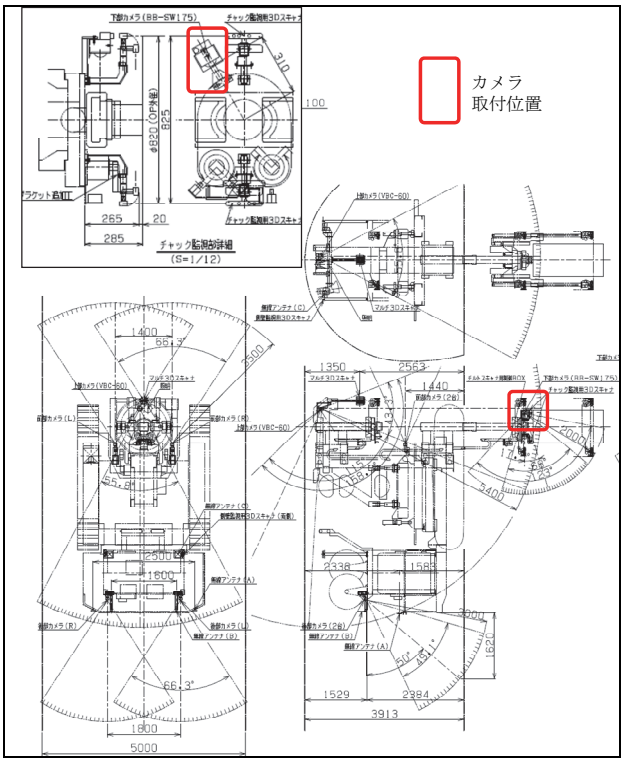


図 3-3　噴射部監視用カメラ取付位置

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 3-10 に、３Ｄスキャナーの取り付け位置を図 3-4 に示す。

表 3-10 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	

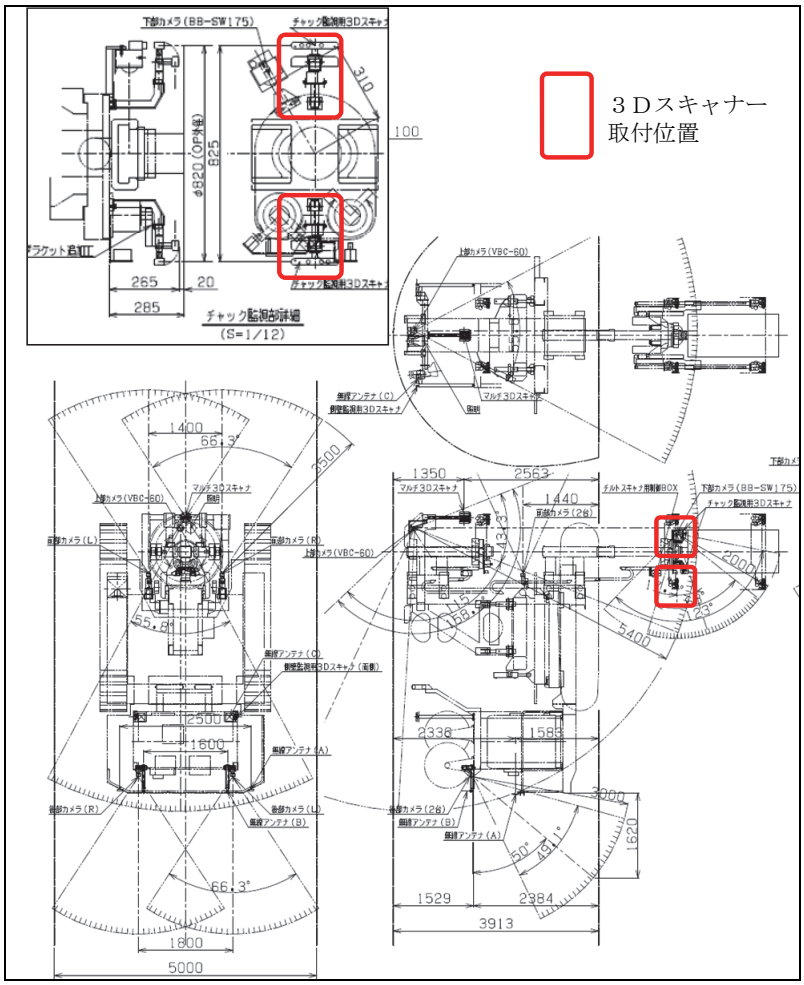


図 3-4　３Ｄスキャナー取り付け位置

(3) 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、走行装置表 1-12、表 1-13）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 3-5 に示す。

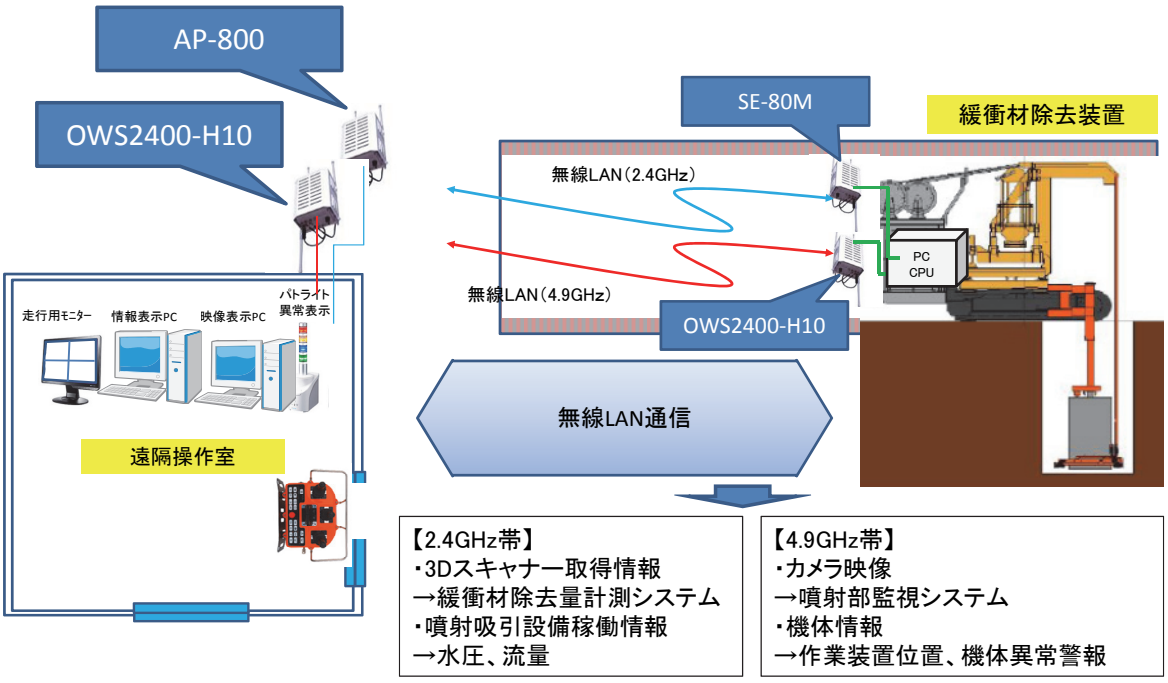


図 3-5　無線システム構成図

4) 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 3-11 に示す。

表 3-11 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℃±5℃、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℃
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※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℃±5℃、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℃～+35℃ 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℃～+55℃) ±5.5ppm 以内(-20℃～+65℃)	25℃の値を基準とする
アンテナ	1/4 λ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	7μVEMF 以下	7μVEMF= -96.1dBm(50Ω)
使用温度	-20℃～+65℃(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℃～+70℃(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℃
*到達距離： 約 1000m　条件:単向通信、エラー訂正無し、25℃、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 3-6 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。

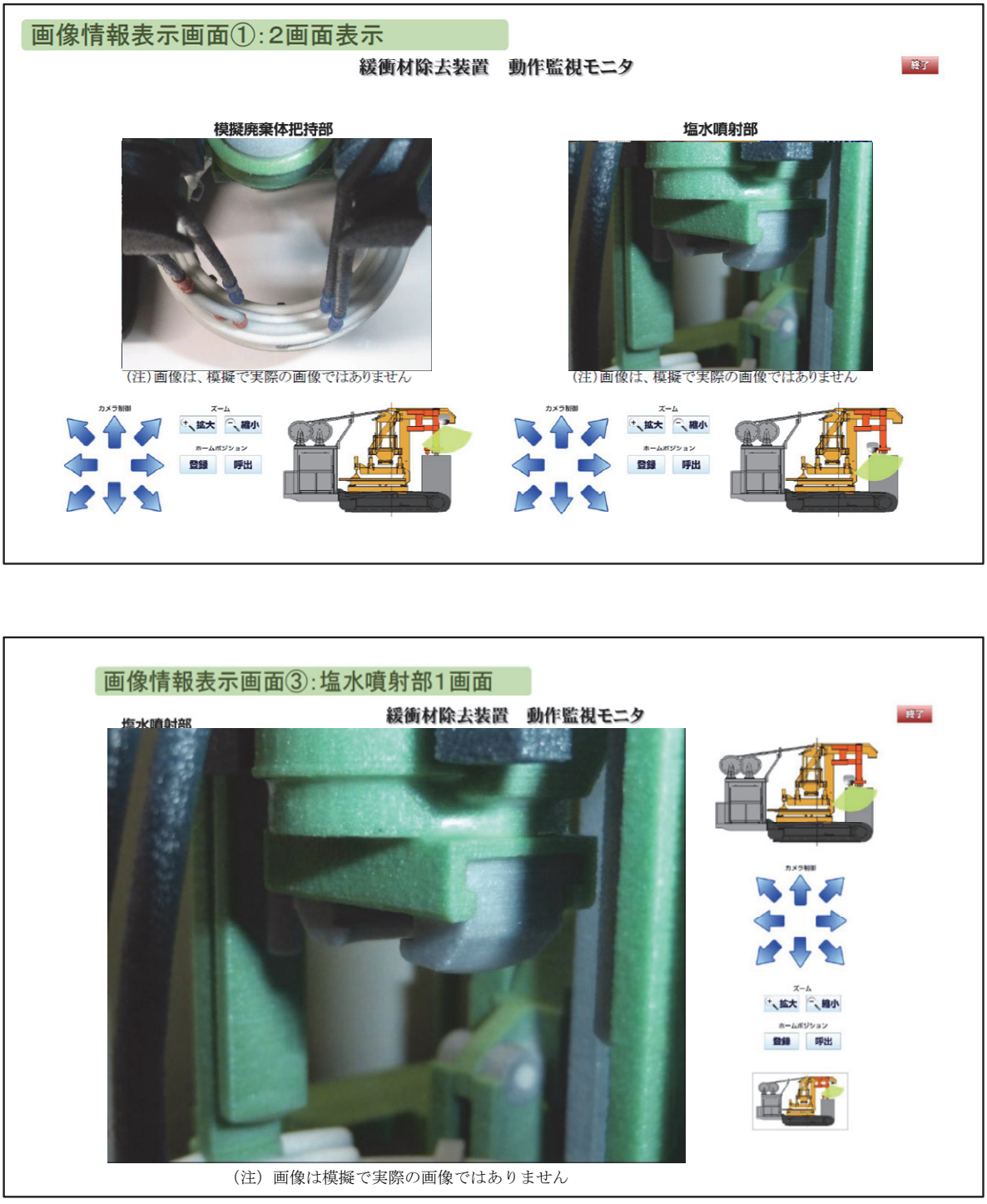


図 3-6　撮像表示システムの画面仕様

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 3-7 に示す。

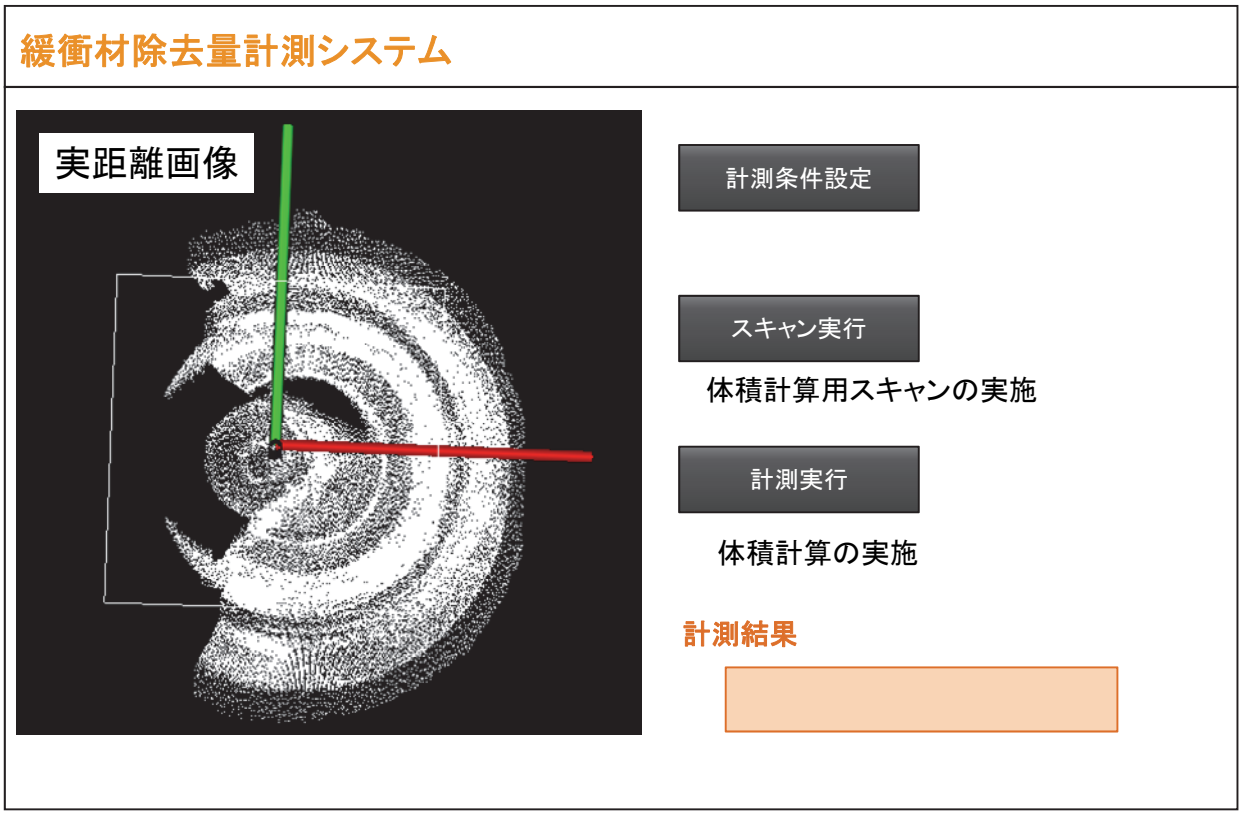


図 3-7　緩衝材除去量計測システムの画面仕様

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 4-1 に示す手順にて実施した。

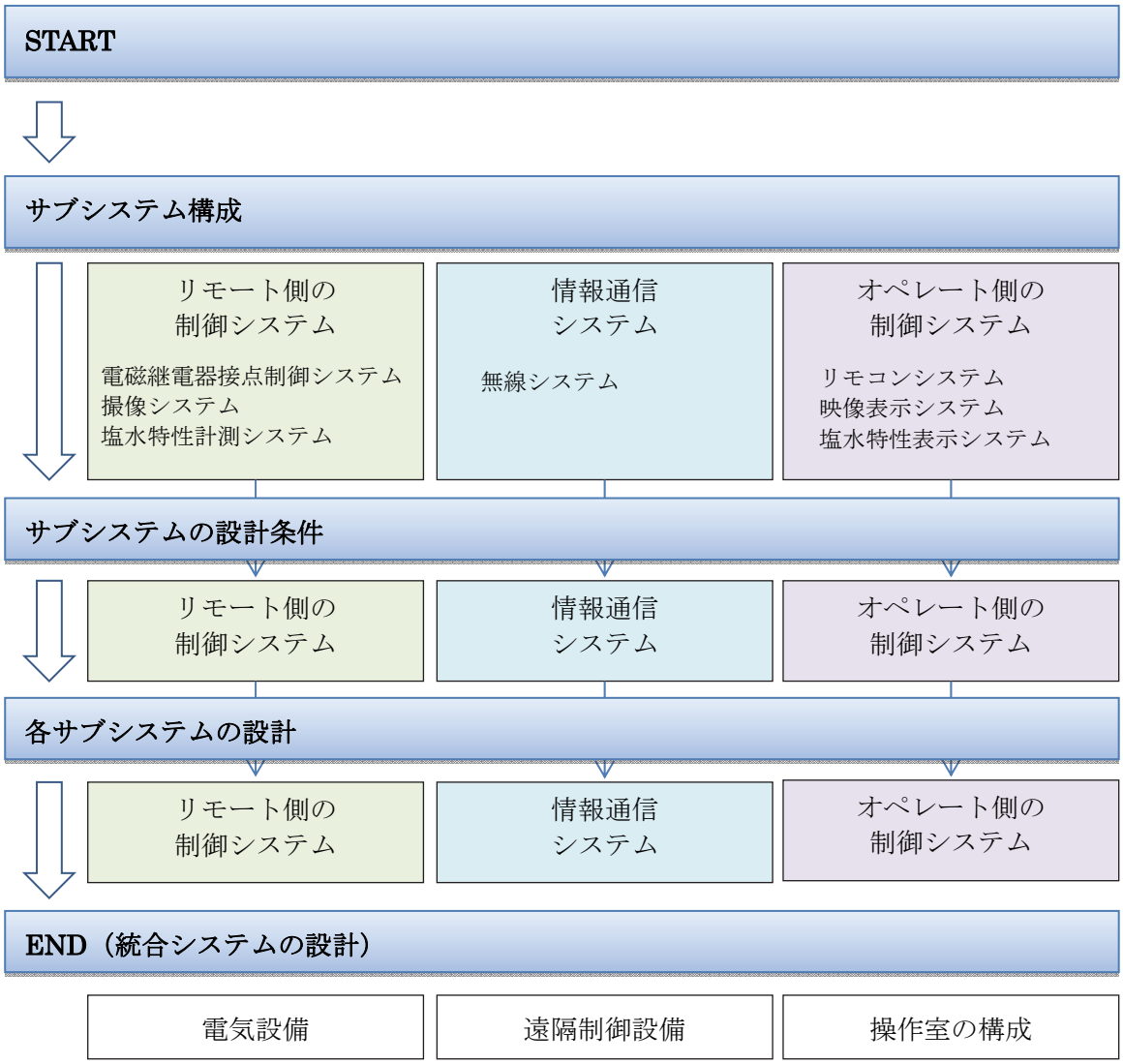


図 4-1　塩水リユース設備に対する遠隔操作設備の設計手順

(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 4-1 に示す。

表 4-1　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。

d. 電磁継電器型接点制御システムの設計条件

塩水噴射・スラリー吸引装置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 4-2 に示す。

表 4-2　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	

e. 撮像システムの設計条件

走行装置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 4-3 に示す。

表 4-3　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	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	

f. 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 4-4 に示すした。

表 4-4　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

走行装置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 4-5 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 1-12)、位置監視機能については 2.4GHz 帯（表 1-13)、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 4-5 に示す。

表 4-5　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		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、装備する機能を満すために装備するサブシステムの設計条件を検討した。

g. 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、走行装置等と同様にリモコンユニットを採用した。設計条件を表 4-6 に示す。

表 4-6　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　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	

h. 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、昇降装置等と同様にパーソナルコンピューター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 4-7 に示す。

表 4-7　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		１台のカメラからの映像を表示	昇降装置付近
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	

i. 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、走行装置などと同様に、パーソナルコンピューター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 4-8 に示す。

表 4-8　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 4-9、リシステム制御回路図を図 4-2 に示す。

表 4-9 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 は取り付面からの高さ。
※5：フォト MOS 全駆動時

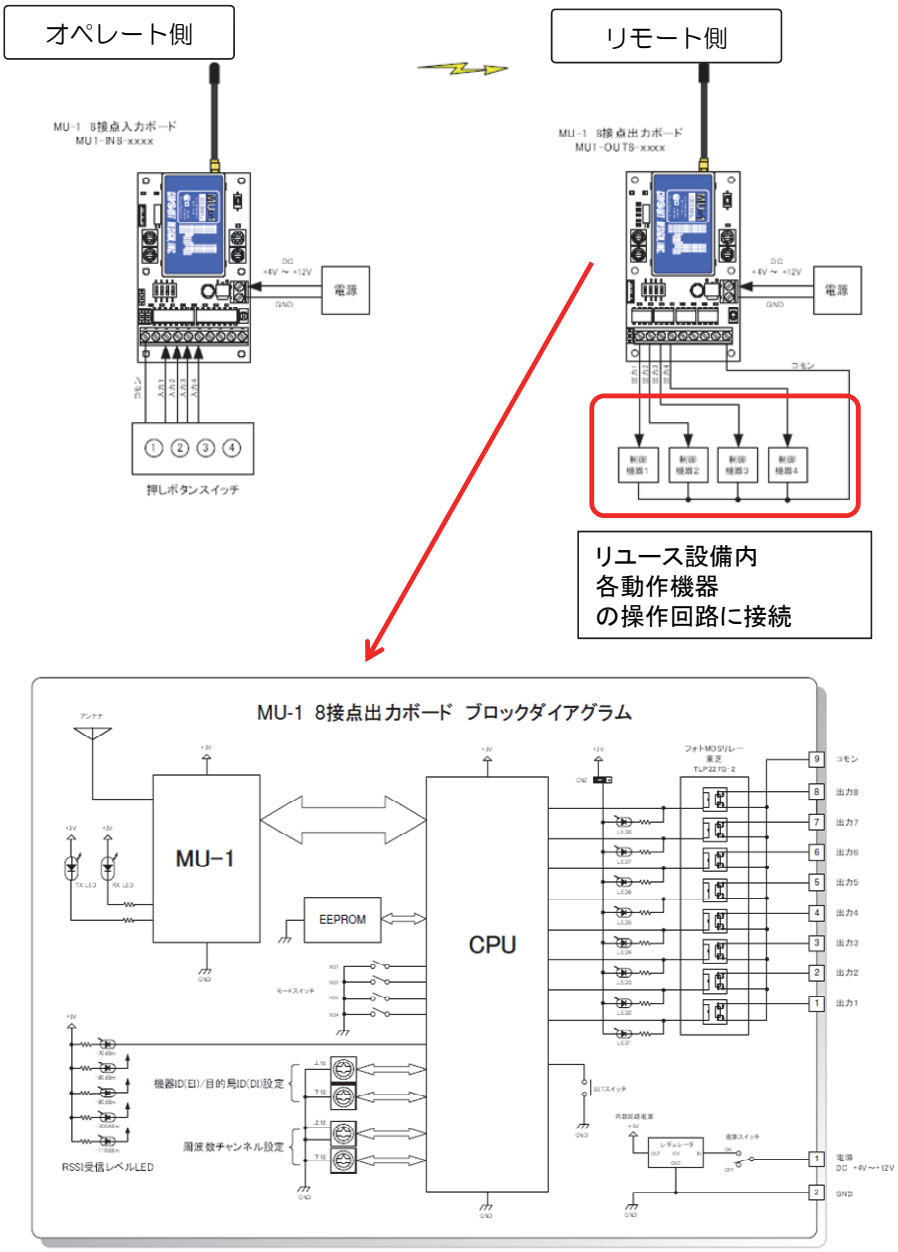
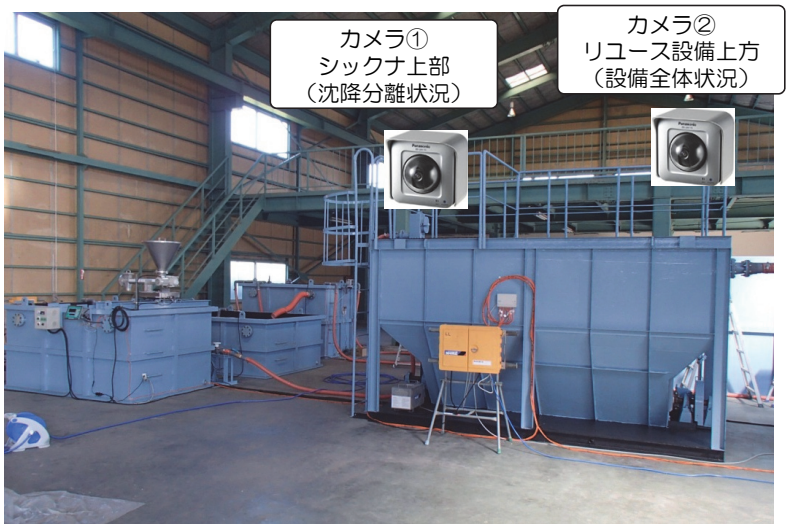


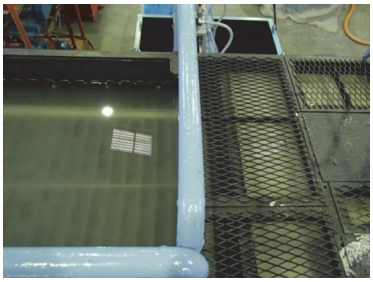
図 4-2　リモート側システム制御回路図

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 3-9）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 4-3 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 4-3　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 4-10 に、配置を図 4-4 に示す。

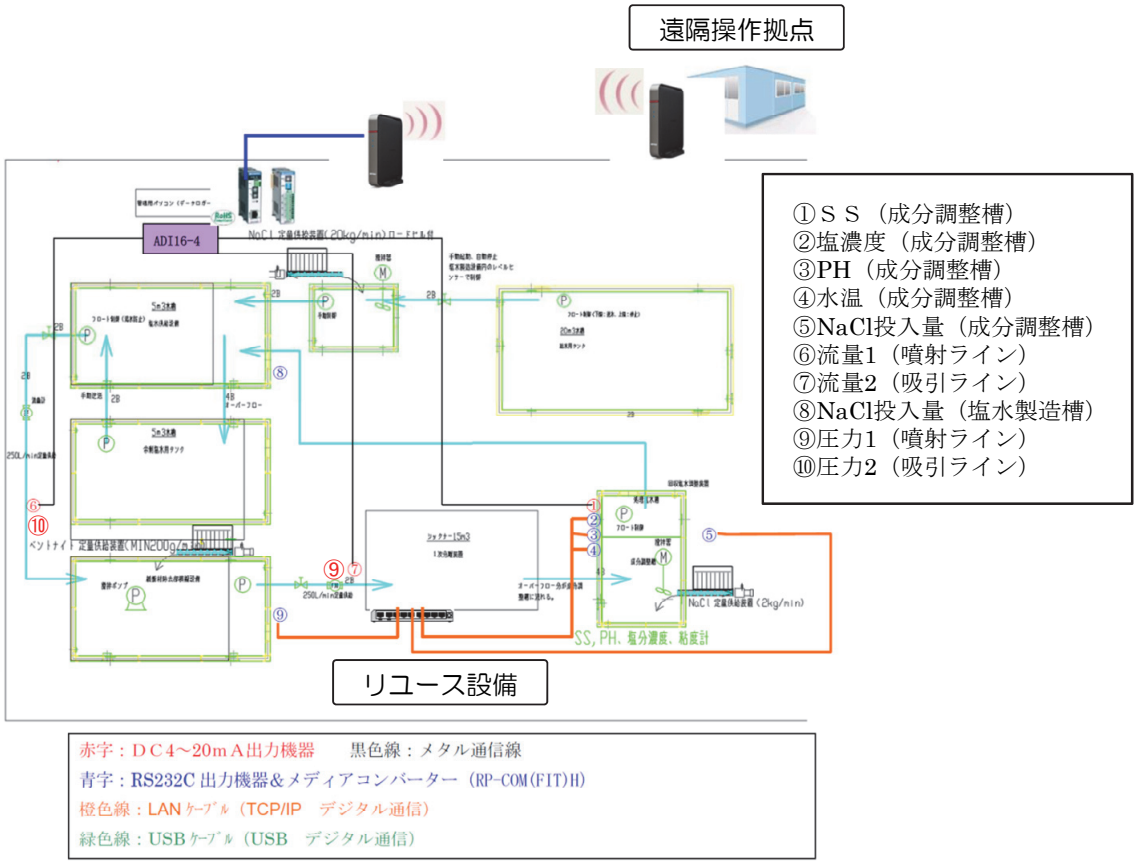
表 4-10 塩水特性計測システムの仕様

リユース設備側

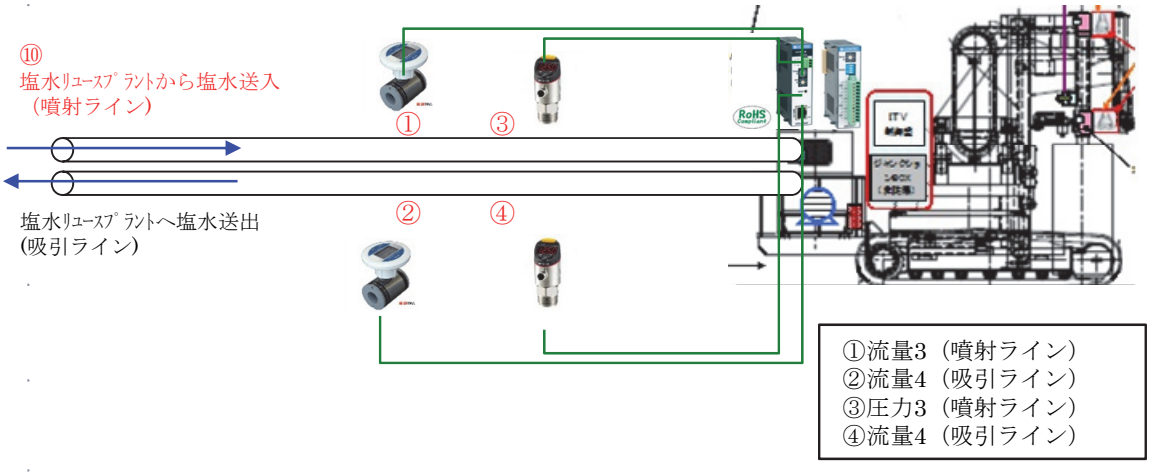
項番	計測物名称	単位	計測間隔	数値表示	ｸﾞﾗﾌ表示	データ保存(ロガー間隔)	出力形式
1	ＳＳ（成分調整槽）	mg/L	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	ｱﾅﾛｸﾞ 4-20mA／MODBUS
2	塩濃度（成分調整槽）	%	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	RS-232C
3	PH（成分調整槽）	PH	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	RS-232C
4	水温（成分調整槽）	度	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	RS-232C
5	NaCl 投入量（成分調整槽）	Kg	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	RS-232C
6	流量１（噴射ライン）	㎥/ｈ	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	ｱﾅﾛｸﾞ 4-20mA
7	流量２（吸引ライン）	㎥/ｈ	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	ｱﾅﾛｸﾞ 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)	ｱﾅﾛｸﾞ 4-20mA
10	圧力２（吸引ライン）	MPa	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	ｱﾅﾛｸﾞ 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	ｸﾞﾗﾌ表示	データ保存(ロガー間隔)	出力形式
1	流量１（噴射ライン）	㎥/ｈ	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	ｱﾅﾛｸﾞ 4-20mA
2	流量２（吸引ライン）	㎥/ｈ	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	ｱﾅﾛｸﾞ 4-20mA
3	圧力３（噴射ライン）	MPa	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	ｱﾅﾛｸﾞ 4-20mA
4	圧力４（吸引ライン）	MPa	瞬時	1 sec	5 sec	1 min(AVG)	ｱﾅﾛｸﾞ 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 4-4　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 4-11 に、無線システム構成図を図 4-5 に示す。

表 4-11 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

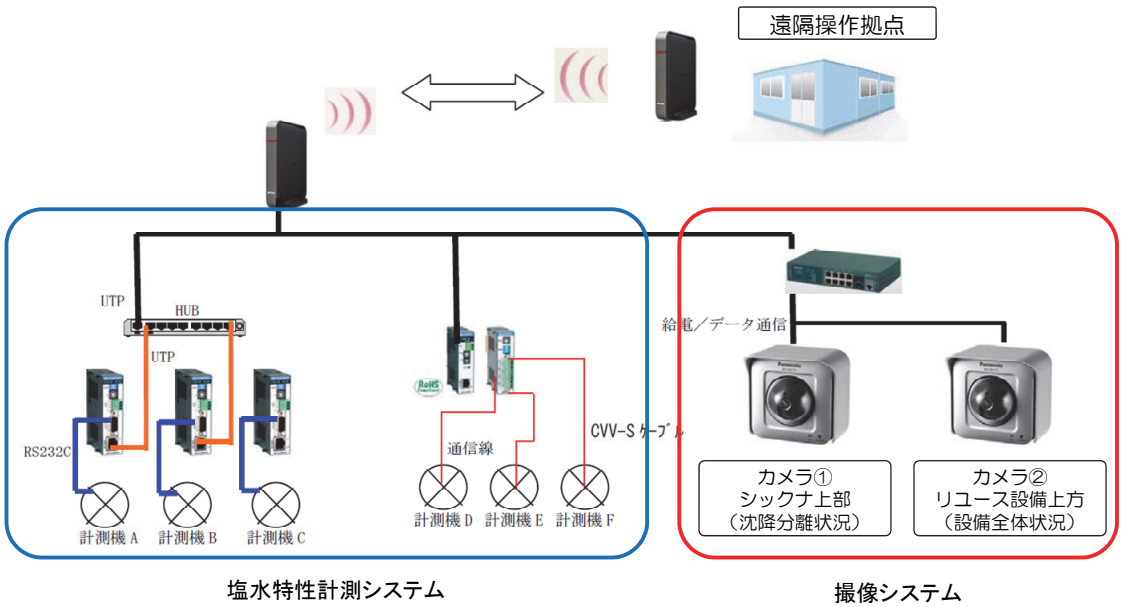


図 4-5 無線システム構成図

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 4-12 に示す。

表 4-12 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℃±5℃、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℃
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※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℃±5℃、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℃～+35℃ 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℃～+55℃) ±5.5ppm 以内(-20℃～+65℃)	25℃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	7μVEMF 以下	7μVEMF= -96.1dBm(50Ω)
使用温度	-20℃～+65℃（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℃～+70℃（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℃

*到達距離： 約 1000m 条件：単向通信、エラー訂正無し、25℃、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 4-6 に示す。

沈降分離状況画像（シックナ上部）

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 4-6　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、システムの出力画面仕様を図 4-7 に示す。

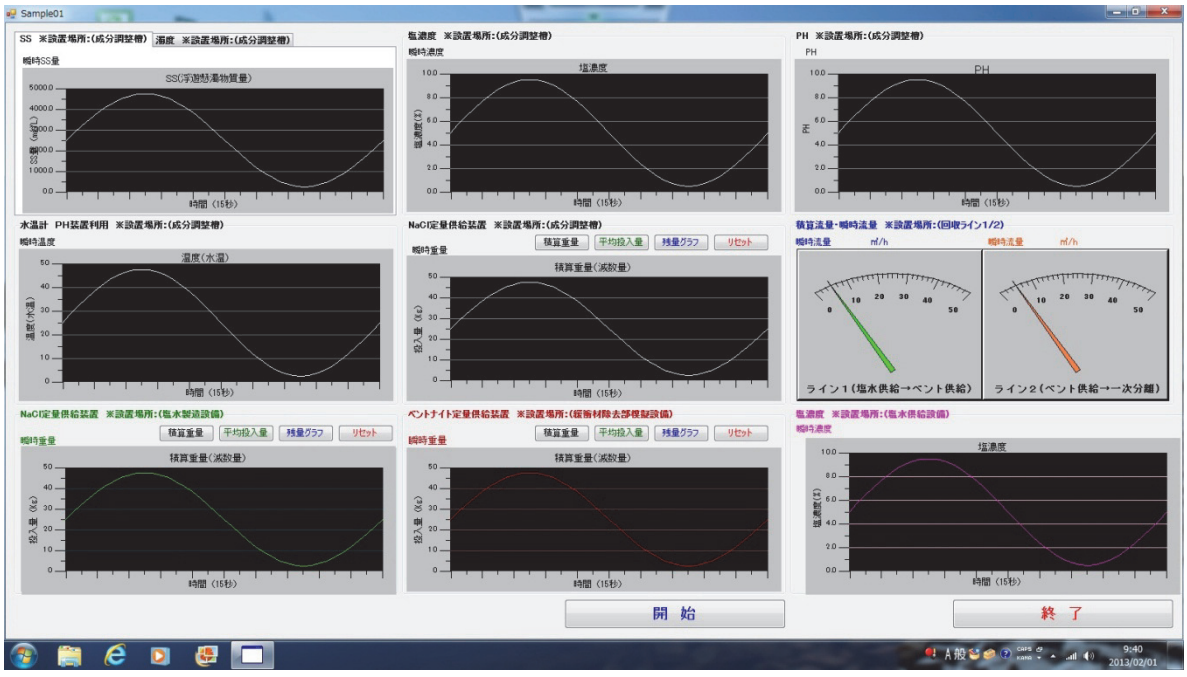


図 4-7　塩水特性表示システムの画面仕様

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 5-1 に、装置全体の電気制御システム系統図を図 5-1 に示す。

遠隔操作設備の仕様を表 5-2 に、装置全体の遠隔操作設備システム図を図 5-2 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 5-3 に、遠隔操作室内の装置配置を図 5-4 に示す。

表 5-1　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、ﾌﾞｻﾞｰ停止　他
	寸法	縦 300×横 360×奥行 127mm
電動モータ	仕様	防爆型　22 ㎾-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	ｶﾒﾗｱﾅﾛｸﾞﾃﾞｰﾀ変換、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 5-2　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	ｻｰｷｯﾄﾃﾞｻﾞｲﾝ、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	ﾑﾄｰｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ、DE-04 及び DL-07
	仕様	出力ﾊﾟﾙｽ 5 ﾊﾟﾙｽ/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	ｱｻﾀﾞﾃｯｸ、特注仕様
	仕様	計測ｽﾄﾛｰｸ 600 ㎜及び 200 ㎜
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	ﾋﾋﾞﾉﾃﾞｰﾀｺﾑ、RD-211
	仕様	有効画素数 38 万画素、防爆
カメラ（昇降装置）	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	走行装置、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	走行装置、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ﾃﾞｰﾀ（距離情報）による遠隔操作支援及び緩衝材除去状況把握

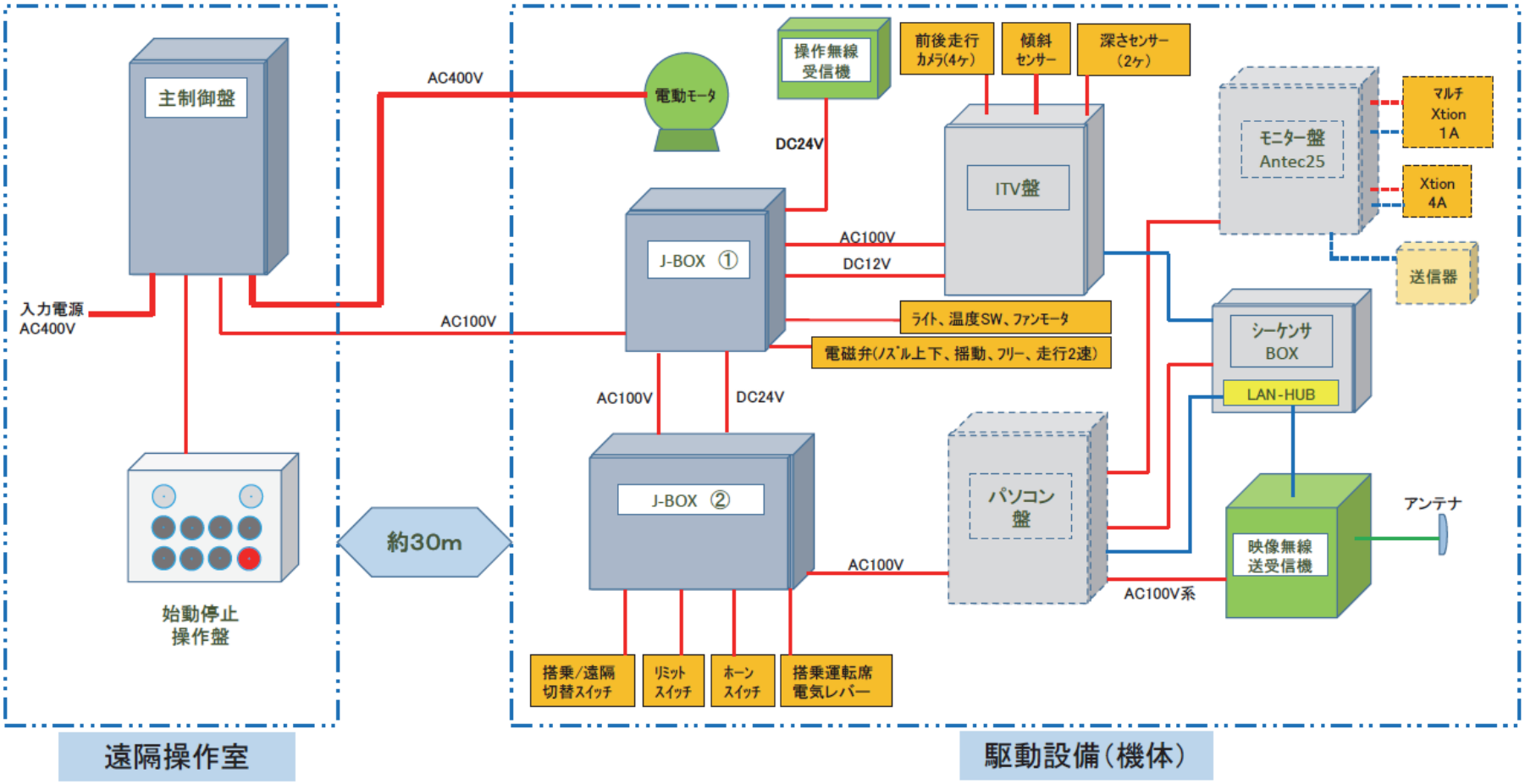


図 5-1　電気制御システム系統図

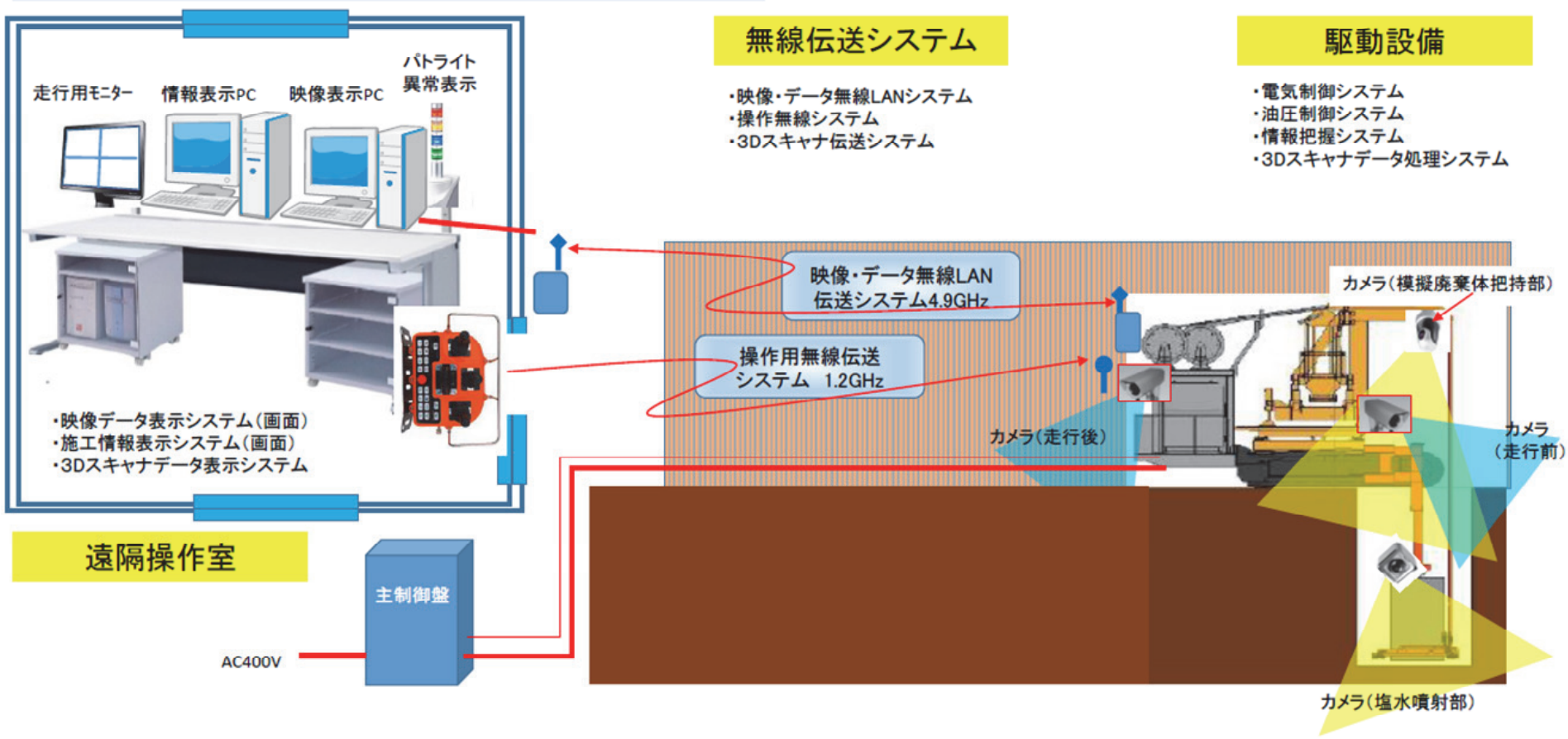


図 5-2　遠隔操作システム系統図

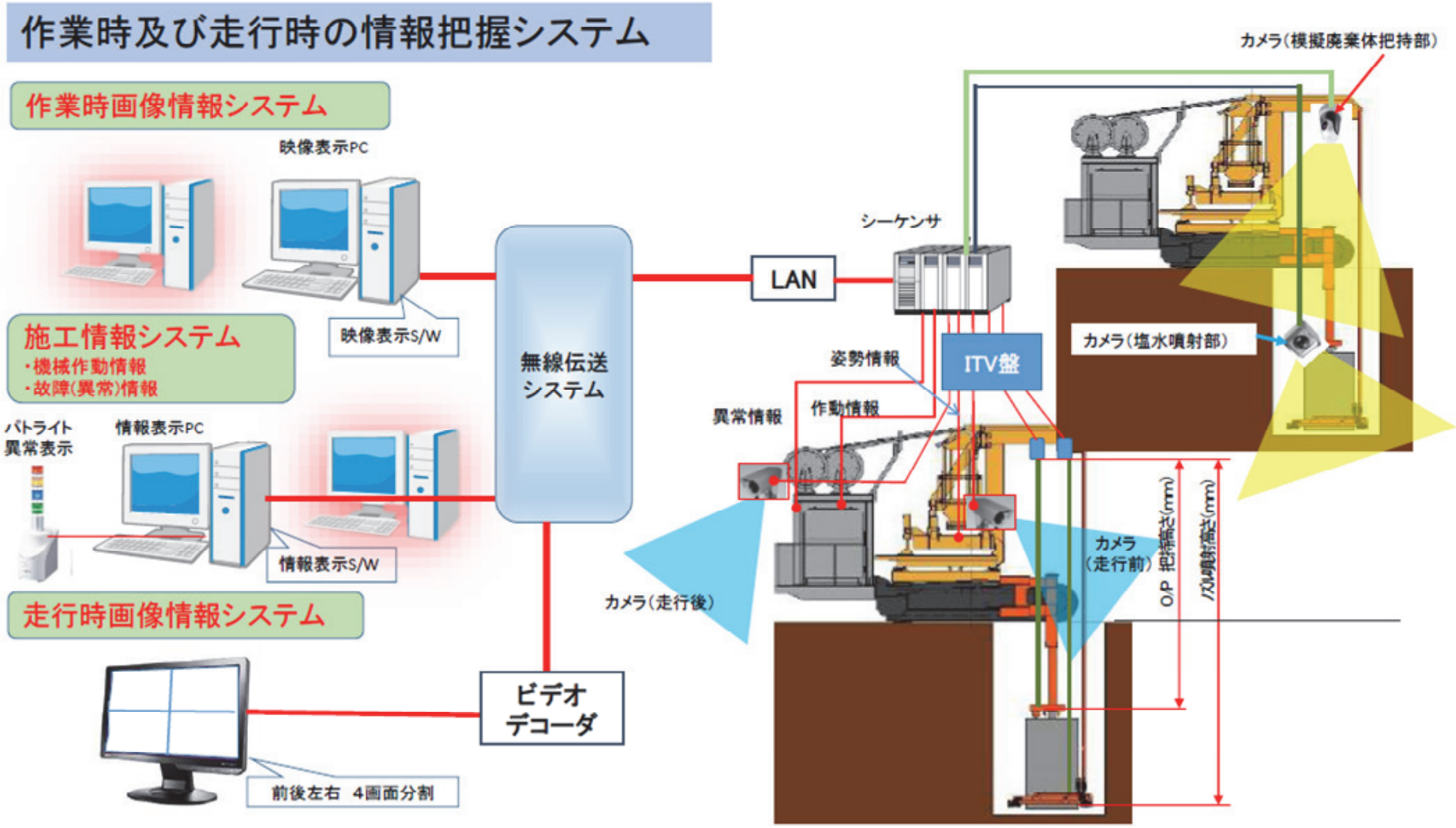


図 5-3　情報表示システム系統図

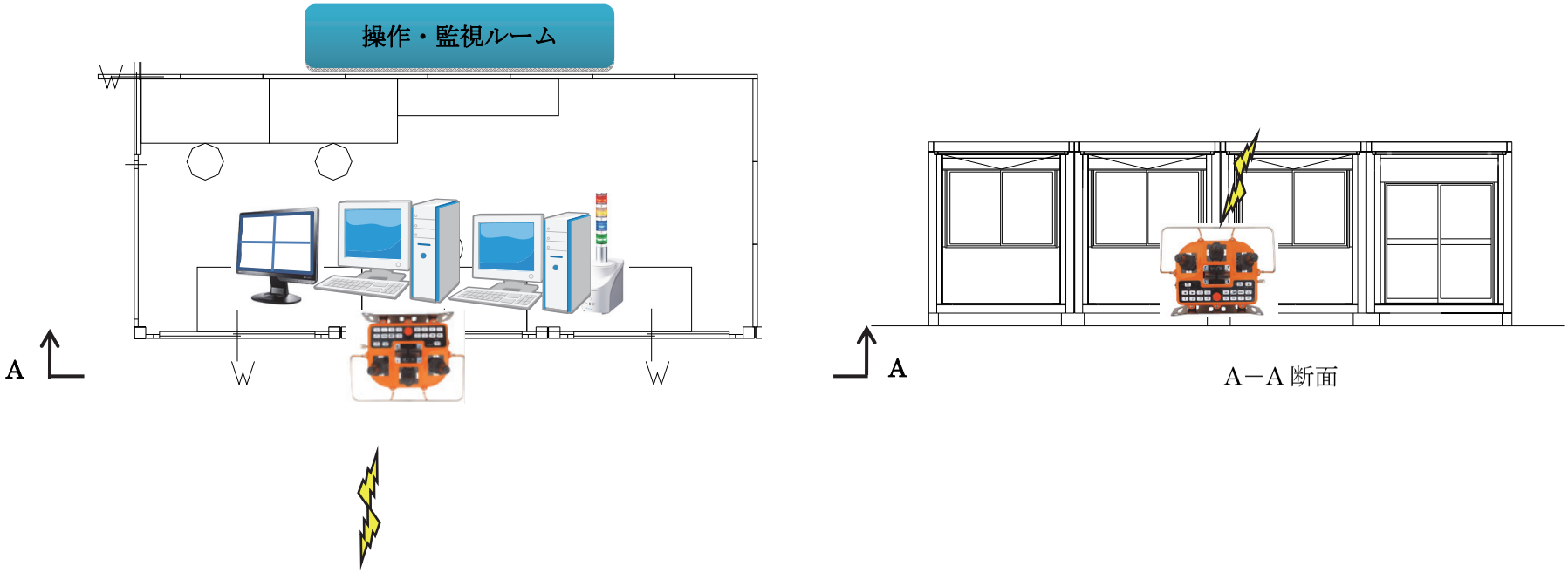


図 5-4　遠隔操作室内配置

別紙-2

第 4 章実証試験計画の見直し

1. 試験坑道の換気設備容量の算定

2. ケーブルサイズの選定

3. 製品カタログ（天井クレーンほか）

1.　試験坑道の換気設備容量の算定

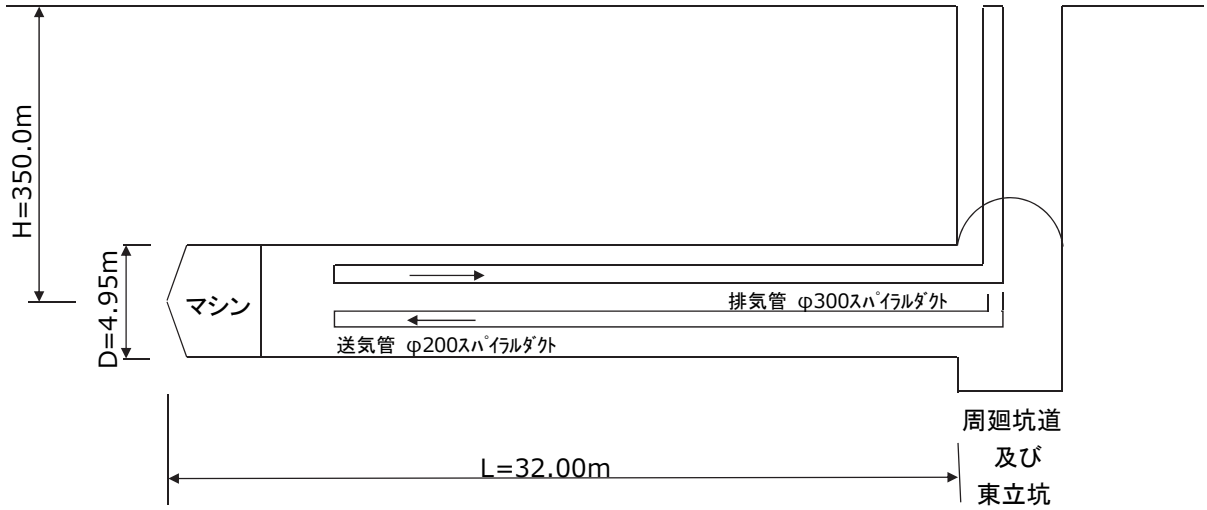
試験坑道 2 の建設にあたり、過年度掘削途中断面において可燃性ガスの発生が確認されており、防爆対策用の換気設備を装備する。このうち換気設備について検討を行う。

1)　試験坑道 2 における換気設備の概略仕様

換気方式は、吸排気併用換気方式
（主換気＝排気、副換気＝給気）を標準とする。

表 1.1　風管の仕様

仕上り径	風管径	風管径（径）
ϕ 4,950mm	ϕ 300mm	ϕ 200mm



※ここでは東立坑まで送れる容量を計画する。

図 1.1　試験坑道なの風管設置イメージ図

2)　換気設備容量の計算

必要換気量は次の容量（Q1、Q2、Q3）のうち大きい値を採用する。

a ：可燃性ガスの希釈に必要な換気容量（Q1）
b ：坑内作業員の必要換気量（Q 2）
c ：試験時人員の必要換気量（Q 3）

1)　可燃性ガスの希釈に必要な換気容量（Q1）

イ）トンネル掘削におけるガス湧出量Qの算定

QG＝π（(D＋2βD）/2）＾2×（X＋αD）×ε／100×（0.1H+1）
＝π（(4.95+2×1.0×4.95）/2）＾2×（2.5+1.5×4.95）×0.6×（0.1×0.0+1）
＝ 328.3 m^3
D：坑道直径（m）＝ 4.95 m
X：日進量（m）＝ 2.5m
α：1.5
β：1.0
H：掘削中心深さ（m）＝ 0.0m
ε：空隙率（%）＝ 60.0 %
とする。

よって、１分あたり湧出量 qG
qG＝QG／（24×60）
＝328.3/(24×60)=0.228m^3／min
＝0.228m^3／min

ロ）希釈に必要な換気量の算定

qG を法令により定める濃度へ希釈するため、要求される換気量を以下に示す。なお、ガス濃度は安全側を考慮し 100%を考える。

Q1＝（1+ α'）×qG×100／C
＝（1+0.005）×0.228×100/0.5＝45.8m^3／min
＝ 45.8m^3／min
α’＝L／100×α
＝0.005%
L＝（ l ＋h－2－lm－5D＋3）
＝32.0 m

qG：湧出量（m3／min）=0.228 m^3／min
C：希釈目標濃度 =0.5%
l：掘削延長（m）=32.0 m
h：立坑深（m）=0.00m
D：掘削外径（m）=4.95 m
α：漏風率=0.015

2)　坑内作業員の必要換気量（Q2）

イ）可燃性ガス対策

Q2＝（10m³／min・人×切羽人数＋3m³/min・人×坑外人数）×（1＋α'）

＝（10m³／min・人×5.8 人＋3m³/min・人×(1.5+1.5 人）×（1＋0.005）

＝ 67.3 m³／min

・トンネル世話役　1.5 人

・トンネル特殊工　5.8 人

・トンネル作業員　1.5 人

3)　試験時人員の必要換気量（Q3）

Q3＝（3m³／min・人×10 人)×(1＋0.005)

＝30.2 m³／min

Q1＝45.8m³／min

Q2＝67.3m³／min

Q3＝30.2m³／min

Q1 と Q2 と Q3 のうち大きい

Q（=Q2）＝67.3m³／min

要求換気量を得る。

主換気に対し副換気を 1/2 とする。

・主換気→67.3m³／min（排気）

・副換気→33.7m³／min（給気）

試験時は、

・主換気→30.2m³／min

・副換気→15.1m³／min

とする。

3)　換気ファン能力の計算

1)　排気用ファン

圧力損失 h＝λ×(L1/α1)×(V1 ^ 2/2g)×γ

＝0.025×（154/0.30）×（15.87 ^ 2/2g）×1.2

h＝197.9mmAq=1.94kPa

管内風速：V1＝Q/(15×π×α1 ^ 2)

V1＝15.87m/sec

L1：風管延長(m)　L1＝L+122＝154.0m

λ：風管摩擦係数=0.025

α1：風管径(m) = 0.30

g：重力加速度(m/sec^2)=9.8

γ：空気の比重(kg/m^3)=1.2

hf：換気ファンの圧力

hf＝h/(1-α’)＝197.9/（1-0.005）=198.9mmAq

風量：Q=67.3m^3/min

P(W)＝9.8×Q×h×(1/60)×1/η=3,108W

η：効率=0.7

2)　送気ファン

圧力損失 h＝λ×(L/α)×(V ^ 2/2g)×γ

h＝0.025×（154/0.2）×（17.88 ^ 2/2ｇ）×1.2＝376.8mmAq

＝3.70kPa

V＝Q/(15×π×α ^ 2)

＝33.7/(15×π×0.2 ^ 2）＝17.88

V＝17.88m/sec

L：風管延長(m)＝154.0m

λ：風管摩擦係数=0.025

α：風管径(m) =0.20

g：重力加速度(m/sec^2)=9.8

γ：空気の比重(kg/m^3)=1.2

hf：換気ファンの圧力

h/(1-α’)＝376.8/（1-0.005）=375mmAq

風量：Q=33.7m^3/min

P(W)＝9.8×Q×h×(1/60)×1/ η

＝9.8×33.7×376.8×（1/60）×1/0.7=2,963 W

η：効率=0.7

3)　設計採用ファンの決定

排気ファンは可燃性ガスを含む空気を排気場合、

①構造的に防爆であるターボブロワ

②防爆構造の軸流ファン

のいずれかを採用する。

②防爆構造の軸流ファンを採用すると仮定した場合、

・排気用ファン

表 1.2　ターボ遠心式ファンの仕様

平成 18 年度機械器具損料表		
分類ｺｰﾄﾞ	1203-038-008-001	
風量	75m³/min	＞67.3m³/min
風圧	1100mmAq	＞198.9 mmAq
機関出力	22kW	＞3kW

必要とする風圧を得るファンの台数は 1 である。

・送気ファン

表 1.3　軸流式ファンの仕様

平成 18 年度機械器具損料表		
分類ｺｰﾄﾞ	1203-038-008-001	
風量	75m³/min	＞33.7m³/min
風圧	1100mmAq	＞375mmAq
機関出力	22kW	＞3kW

必要とする風圧を得るファンの台数は 1 である。

なお、試験時は排気、給気ともϕ200 風管で十分である。

2.　ケーブルサイズの選定

ケーブル導体公称断面積は次の算式により算出したなかで、最も大きい導体公称断面積を選定する。

(1) 許容電流から定まるケーブル導体公称断面積

ａ．分岐回路ケーブル（電動機電路等）の許容電流

$$I=\frac{\text{負荷容量〔kW〕}}{\eta\times\phi\times\sqrt{3}\times E}$$

ここで、I：定格電流[A]

η：効率（0.85を標準とするが、特殊な場合は別途検討する。）

ϕ：力率（別紙「ケーブルサイズ選定表」を参記載のない場合は、0.8とする）

E：定格圧力[KV]

なお、Y－Δ起動を行う場合の始動器と電動機間の配線ケーブルの負荷電流は、

定格電流の1／√3 ＝ 0.57 ≒ 0.6以上とする。（内線規定より）

(2) 電圧降下から定まるケーブル導体公称断面積

・電圧降下の算出

三相三線式　e＝√３IL（Rcosθ＋Xsinθ）

$$e=\frac{2IL}{\sqrt{3}}(R\cos\theta+X\sin\theta)$$ ……Y－△始動の場合

単相三線式　e ＝　IL（Rcosθ＋Xsinθ）

単相二線式　e ＝　2IL（Rcosθ＋Xsinθ）

ここで、e：電圧降下値（V）

I：連続して流れる最大電流（A）

L：ケーブルの亘長（km）

R：ケーブルの交流抵抗（Ω／km）

X：ケーブルのリアクタンス（Ω／km）

cosθ：負荷の力率　（JIS C 4210 によるが、記載のないものは 0.85）

sinθ：負荷の無効率（JIS C 4210 によるが、記載のないものは 0.526）

・電圧降下率の算出

$$\varepsilon = \frac{e}{E} \times 100$$

ここで、ε：電圧降下率（%）

E：電線路の公称電圧（V）　幹線 100,200,415,3300,6600Ｖ（線路公称電圧）

分岐 100,200,400,3000,6000Ｖ（負荷の定格電圧）

e：電圧降下値（V）

高圧及び低圧電路の電圧降下率は、原則として下記のとおりとする。

表 2.1　電 圧 降 下 率 表

<table>
<tr><td></td><td>高　　圧</td><td colspan="2">低　　圧</td></tr>
<tr><td>幹　線
回　路</td><td>各幹線毎に　　1%以内
（又は幹線総合 2%以内）</td><td colspan="2">各幹線毎に　　1%以内
（又は幹線総合 2%以内）</td></tr>
<tr><td rowspan="4">分　岐
回　路</td><td rowspan="4">変圧器フィーダー　1%以内
電動機等フィーダー2%以内</td><td>分岐回路の距離
（m）</td><td>電圧降下率
（%）</td></tr>
<tr><td>60 以下</td><td>2</td></tr>
<tr><td>200 以下</td><td>3</td></tr>
<tr><td>200 超過</td><td>3(4)</td></tr>
</table>

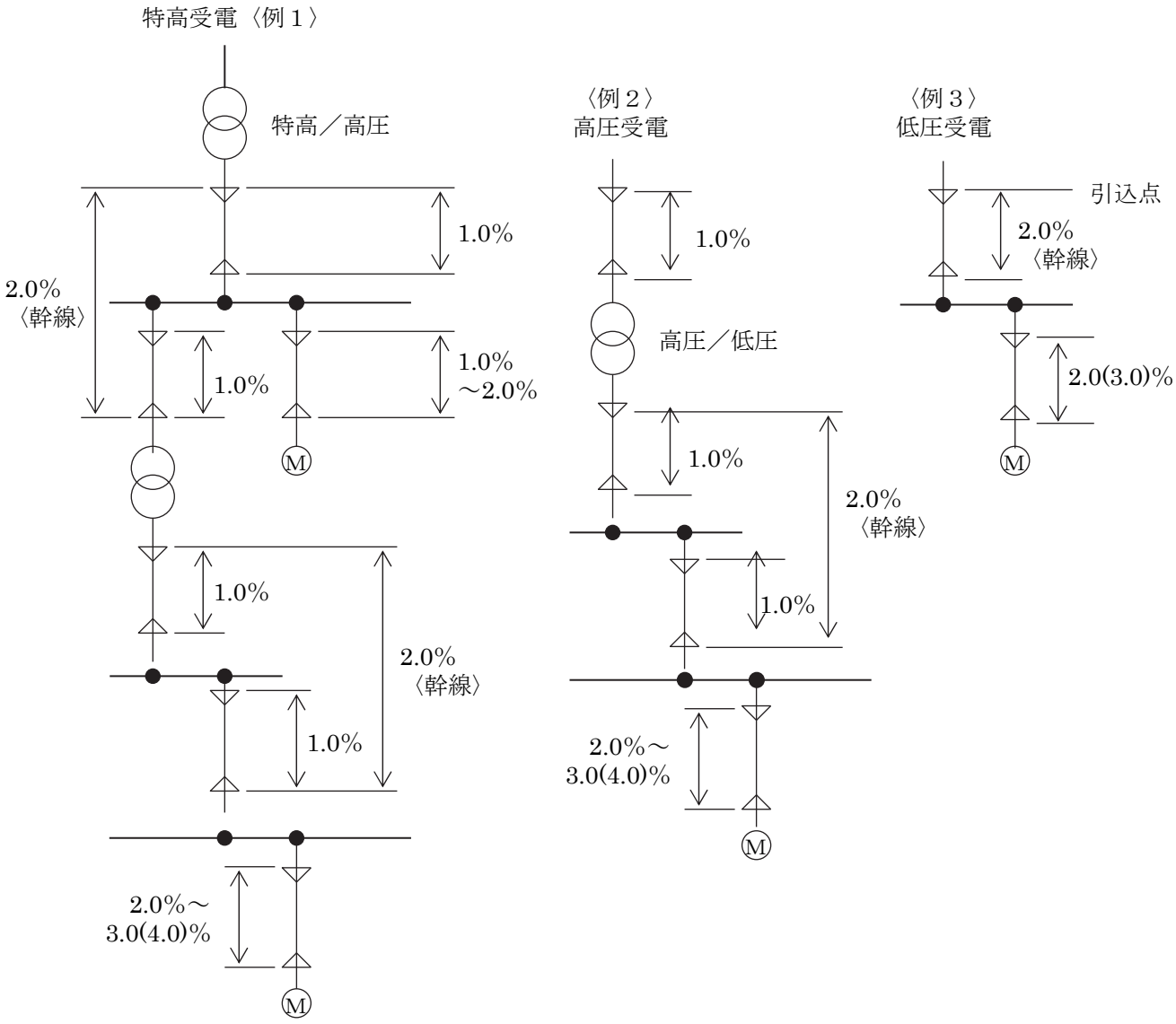
注 1. 構内の変圧器から供給する場合で、低圧幹線が長く総合で２％以内とすることが妥当でない場合３％以内とすることが出来る。

注 2. 構内の変圧器から供給する場合で、200m を越えて 3%以内とすることが妥当でない場合は、4%とすることが出来る。

注 3. 電圧降下率は、内線規定の推奨値と異なる部分があるが、試験を行う装置への電源供給を目的としているため、施設の受配電設備が多少変動しても一定範囲内の電圧降下に収まることとして、幹線も含め電圧降下を５％以内を目標として定めた。

注 4. 盤内電圧降下は考慮しない。

高圧及び低圧電路の許容電圧降下率の基準値（参考）



（注）低圧幹線が長い場合は、総合で３％以内とすることが出来る。

表 2.2　EM-CE,EM-CET ケーブルの許容電流（A）

（電線要覧 2000 年･日本電設工業会）

導体公称断面積 (mm²)	ケーブルの呼称電圧 (V)	低減率	1.0				0.7			
		ケーブルの形状	単心3条平積み	2心	3心	単心3個撚	単心3条平積み	2心	3心	単心3個撚
2	600		26	28	23	—	18	19	16	—
3.5			27	39	33	—	25	27	23	—
5.5			48	52	44	—	33	36	30	—
8			60	65	54	—	42	45	37	—
14	600		84	91	76	86	58	63	53	60
	3300　6600		88	—	83	—	61		58	—
22	600		105	120	100	110	73	84	70	77
	3300　6600		115	—	105	120	80	—	73	84
38	600		160	170	140	155	110	115	98	105
	3300　6600		160	—	145	170	110	—	100	115
60	600		210	225	190	210	145	155	130	145
	3300　6600		215	—	195	225	150	—	135	155
100	600		295	310	260	290	205	215	180	200
	3300　6600		295	—	265	310	205	—	185	215
150	600		380	400	340	380	265	280	235	265
	3300　6600		380	—	345	405	265	—	240	280
200	600		455	485	410	465	315	335	285	325
	3300　6600		450	—	410	485	315	—	285	335
250	600		520	560	470	535	360	390	325	370
	3300　6600		515	—	470	560	360	—	325	390
325	600		610	660	555	635	425	460	385	440
	3300　6600		600	—	550	660	420	—	385	460
400	600		685	—	—	725	480	—	—	505
	3300　6600		680	—	—	750	475	—	—	525
500	600		770	—	—	835	535	—	—	580
	3300　6600		780	—	—	855	545	—	—	595

注：　1）単心平積みは、単心を 3 条並べた条件（S＝D の布設条件）での許容電流値

2) 600V 単芯 3 個撚 EM ケーブルは、600VCVT と同じ許容電流値

3）3300、6600V の EM ケーブルは CV、CVT と同じ許容電流値

表 2.3　線　路　定　数　表（低　圧）

（電線要覧 2000 年－日本電線工業会）

公称断面積 (mm²)		50Hz			60Hz		
		R(90℃)	X	Z	R(90℃)	X	Z
600V CVT 600V EM-CET	400	0.0633	0.0808	0.099	0.0646	0.0971	0.11
	325	0.0764	0.0816	0.11	0.0775	0.098	0.121
	250	0.0981	0.0836	0.129	0.0989	0.1	0.139
	200	0.121	0.0859	0.148	0.121	0.103	0.159
	150	0.159	0.0846	0.178	0.16	0.102	0.189
	100	0.239	0.0881	0.244	0.24	0.106	0.256
	60	0.397	0.0913	0.372	0.397	0.11	0.384
	38	0.626	0.0955	0.558	0.626	0.115	0.57
	22	1.08	0.103	0.926	1.08	0.123	0.938
	14	1.71	0.107	1.432	1.71	0.128	1.445
	8	—	—	—	—	—	—
600V CV 600V EM-CE	2,3C-325	0.077	0.0723	0.105	0.0783	0.0867	0.115
	250	0.0985	0.0739	0.123	0.0995	0.0887	0.133
	200	0.121	0.0755	0.142	0.122	0.0906	0.152
	150	0.16	0.0744	0.173	0.16	0.0893	0.182
	100	0.239	0.0773	0.238	0.24	0.0928	0.248
	60	0.397	0.0768	0.364	0.397	0.0922	0.373
	38	0.626	0.0771	0.547	0.627	0.0925	0.557
	22	1.08	0.082	0.913	1.08	0.0984	0.923
	14	1.71	0.0828	1.418	1.71	0.0994	1.428
	8	3.01	0.087	2.46	3.01	0.104	2.47
	5.5	4.34	0.0914	3.527	4.34	0.11	3.538
	3.5	6.76	0.0914	5.463	6.76	0.11	5.474
	2	12.0	0.0992	9.66	12.0	0.119	9.671
	1C-1000	0.0255	0.0777	0.067	0.0262	0.0933	0.077
	800	0.0308	0.0796	0.072	0.0313	0.0955	0.082
	600	0.044	0.0799	0.083	0.0458	0.0959	0.094
	500	0.051	0.0809	0.089	0.0526	0.0972	0.1
	400	0.0622	0.0808	0.098	0.0635	0.0971	0.109
	325	0.0751	0.0816	0.109	0.0762	0.098	0.12
	250	0.0962	0.0836	0.127	0.0971	0.1	0.138
	200	0.118	0.0859	0.146	0.119	0.103	0.157
	150	0.157	0.0846	0.176	0.157	0.102	0.187

但し、R：導体抵抗　　$\cos\theta = 0.8$

X：リアクタンス　$\sin\theta = 0.6$

Z：電気定数

Z：$R\cos\theta + X\sin\theta$　より算出した

注）1.　EM ケーブルも同じ値とする。

表 2.4　ケーブルサイズ選定表

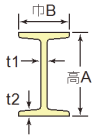
負荷名称		単機容量	電気方式と回路電圧	電圧降下	定格電流	許容電流	ケーブル亘長	ケーブルサイズの検討		決定ケーブルサイズ	備考
自	至	(kW)	(V)	(%)	(A)	(A)	(m)	許容電流による（電流低減率 0.7）	許容電圧降下による		
100V系統		4	1φ2W 100V	3%	40	50	150	63A 600V CE 14sq－2c	2.98V 600V CE 100sq－2c 2.98%	600V CE 100sq－2c	
200V系統		48	3φ3W 200V	3%	203.78	224.158	150	265A 600V CET 150sq	5.83V 600V CET 400sq 2.92%	600V CET 400sq	
400V系統		22	3φ3W 400V	3%	46.7	58.375	150	70A 600V CE 22sq－3c	11.49V 600V CE 22sq－3c 2.87%	600V CE 22sq－3c	

3.　製品カタログ（天井クレーンほか）

(1)　走行クレーン、ガーダのカタログ

クレーンガーダ許容スパン選定表［シングルレール］

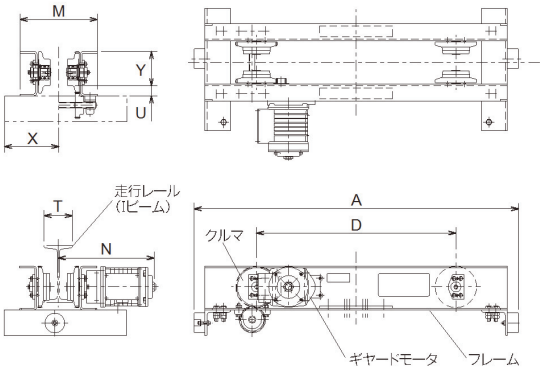
は電気チェーンブロック、 はロープホイスト、( )内はローヘッド用

構造	ガーダ断面	部材寸法 Iビーム I- 高A x 巾B x t1 x t2	単位質量 (kg/m)	許容スパン（m）									
				500kg	1t	1.5t	2t	2.5t	2.8t	3t	5t	7.5t	10t
Iビーム		I-200x100x7x10	26.0	6.0	4.6								
				6.0	4.6								
		I-250x125x7.5x12.5	38.3	8.6	6.7	5.5	4.5	4.0					
				8.3	6.1								
		I-250x125x10x19	55.5	11.2	8.2	6.9	6.0	5.4	5.1	4.9			
				11.2	8.2	6.9	6.0	5.4	5.1	4.9			
		I-300x150x8x13	48.3	10.2	9.0	6.8	6.1	5.6	5.2	4.9			
				10.0	7.6								
		I-300x150x10x18.5	65.5	11.6(11.2)	10.2	8.5	7.4	6.7	6.6	6.4	4.3		
		I-300x150x11.5x22	76.8	11.6(11.2)	11.2	9.4	8.2	7.5	7.1	6.9	5.0		
		I-350x150x9x15	58.5	11.2	9.4	7.8	6.9	6.4	6.2	6.0	3.6		
				11.0	9.0	7.7							
		I-350x150x12x24	87.2	11.6(11.2)	11.6(11.2)	11.3(11.2)	9.9	9.0	8.6	8.3	6.6	4.5	
				11.6(11.2)	11.6(11.2)	11.3(11.2)	9.9	9.0	8.6	8.3	6.1	4.2	3.1
		I-400x150x10x18	72.0	11.6(11.2)	11.0	9.3	8.3	7.6	7.2	7.2	5.6		
				11.6(11.2)	10.6	8.7	8.1	7.5	7.2	7.1	5.1 *		
		I-400x150x12.5x25	95.8	11.6(11.2)	11.6(11.2)	11.6(11.2)	11.3(11.2)	10.3	9.5	9.2	6.8	5.2	3.9
					11.6(11.2)	11.6(11.2)	11.2	9.4	9.0	8.7	6.6	4.8	3.6
		I-450x175x11x20	91.7	11.6(11.2)	11.6(11.2)	11.6(11.2)	10.5	9.6	9.2	8.8	6.8	5.6	
					11.6(11.2)	11.0	10.7	9.9	9.5	9.3	6.8		
		I-450x175x13x26	115.0	11.6(11.2)	11.6(11.2)	11.6(11.2)	11.6(11.2)	11.6(11.2)	11.5(11.2)	11.1	8.5	6.8	5.4
							11.6(11.2)	11.4(11.2)	10.8	10.5	8.1	6.5	4.8

*:ロープホイストRF形は使用不可です。◎上記以外のIビームサイズについては別途お問い合わせください。◎空欄は使用不可範囲です。

(2) サドルカタログ

EL ローヘッド形電動式サドル



▼詳しくはP29上の速度換算表をご覧ください。

定格荷重(t)	スパン(m)	形式	走行モータ出力(kWx2)[速度記号:50/60Hz速度(m/s)] C 0.0833/0.100	L 0.167/0.200	S 0.333/0.400	H 0.500/0.600	SD 0.333·0.0833/0.400·0.100	適合する走行Iビーム巾T(mm)	最大車輪圧(kN)	車輪径(mm)	寸法(mm) A	D	M	U	N *1	X	Y *2	概略質量(kg)
1	~6	EL010-6									1140	700						132
	6.1~9	EL010-9	0.1	0.25	0.25	0.25	0.25/0.063	75·100·125·150	4.51	95	1500	1060	T+171	34	288+T/2	241-T/2	121	150
	9.1~12	EL010-12									1840	1400						164
	12.1~15	EL010-15	0.15	0.4	0.4	0.4	0.4/0.1	125·150	15.7	140	2200	1760	T+231	40	336+T/2		174	340
2	~6	EL020-6									1140	700					138	152
	6.1~9	EL020-9	0.1	0.25	0.25	0.25	0.25/0.063	100·125·150	9.31	110	1500	1060	T+191	36	288+T/2			172
	9.1~12	EL020-12									1840	1400					165	202
	12.1~15	EL020-15	0.15	0.4	0.4	0.4	0.4/0.1	125·150	15.7	140	2200	1760	T+231	40	336+T/2		174	340
3	~6	EL030-6				0.25			9.31	110	1140	700	T+191	36		281-T/2	165	160
	6.1~9	EL030-9	0.1	0.25	0.25		0.25/0.063	100·125·150	10.5	125	1840	1400	T+241	38	288+T/2		162	234
	9.1~12	EL030-12				0.4												
	12.1~15	EL030-15									2200	1760	T+231					340
5	~6	EL050-6	0.15	0.4	0.4		0.4/0.1		15.7	140				40	336+T/2		174	
	6.1~9	EL050-9				0.75		125·150			1500	1060	T+211					270
	9.1~12	EL050-12	0.25	0.75	0.75		0.75/0.19		17.6	155	2200	1760	T+279	39	399+T/2	290-T/2	201	432
	12.1~15	EL050-15																

*1: N寸法は標準速用ギヤードモータ(S)を使用。
*2: Y寸法はサドル最上部からクルマ走行レール踏面までの高さを示します。
◎ギヤードモータの取付位置は、対角です。
◎走行レール継ぎ部のウェブに補強板を取付ける場合は、サドルとの干渉チェックが必要です。
(75mm巾の場合は取付けないでください)また、レール下面には取付けないでください。
◎ガーダ等設計される場合は、お問い合せください。

(3) 電動巻上機のカタログ

2速インバータ形

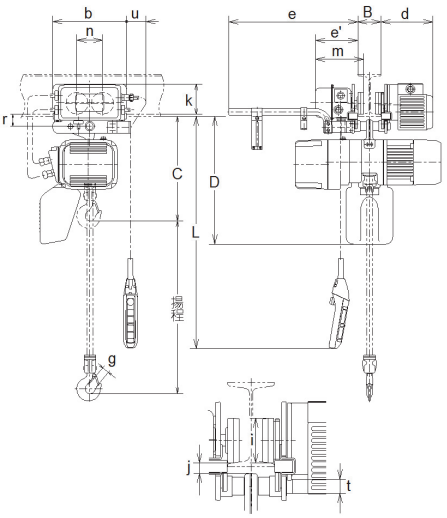
電気トロリ結合式
巻上下・横行2速インバータ形

ER2M

[標準装備]
- インバータ仕様
- フリクションクラッチ
- 上下限リミットスイッチ
- 非常停止ボタン

[オプション]
- メカニカルブレーキ付フリクションクラッチ
- オーバーロードリミッタ
- ロードベル(~3t)*

*詳しくはP38をご覧ください。



- ●給電ケーブルはついておりません。給電方式に応じご相談ください。
- ●揚程(ロードチェーン)・押ボタンコードの長さは、それぞれ標準仕様以外の長さもご相談に応じます。
- ●ロードチェーンは焼入れチェーンのため継ぎたしができませんのでご注意ください。
- ●標準揚程以外の仕様、またはチェーンバケットの構成については、「標準バケット揚程表」(13ページ)をご参照ください。
- ●操作方法はテルハ用5点(上下・横行)ボタン式、クレーン用7点(上下・横行・走行)ボタン式があります。
- ●操作回路は24Vの低電圧となっておりますので、クレーン用7点ボタン式の場合は別途クレーン用制御箱をお求めください。
- ●押ボタンスイッチには、非常停止ボタンが標準装備されています。非常停止ボタンを押すことにより、モータの回路を手元で遮断することができます。
- ●同一レールに複数台使用で互いに衝突の可能性がある場合は、緩衝用バンパーが必要となります。
- ●2台つり作業の場合は、片側の巻上機でその荷をつり上げることができる定格荷重の巻上機を選定してください。3台つり以上をお考えの場合は、事前に当社へご相談ください。

■ 諸元

定格荷重(t)	形式	基本本体	標準揚程(m)	オシボタンコード長さ:L(m)	巻上モータ 3相200V 出力(kW)	巻上モータ 3相200V 反復定格(%ED)	横行モータ 3相200V 出力(kW)	横行モータ 3相200V 反復定格(%ED)	巻上速度(m/s)		横行速度(m/s)		適用レール(I)J:B(mm)	最小回転半径(mm)	ロードチェーン 線径×掛数(mm)	等級	試験荷重(t)	質量(kg)	揚程1m増し増加質量(kg)
									50/60Hz 高速	50/60Hz 低速	50/60Hz 高速	50/60Hz 低速							
125kg	ER2M001IH-IS	B	4・6	3.5・5.5	0.56	40/20	0.4	27/13	標準 0.277 / 設定範囲 0.0461~0.0231		標準 0.400 / 設定範囲 0.400	標準 0.0667 / 設定範囲 0.0400	[75]・100・125	800 [3500]	φ4.3x1	M6	156kg	59	0.42
250kg	ER2M003IS-IS								標準 0.179 / 設定範囲 0.0239~0.0150								313kg		
	ER2M003IH-IS				0.9				標準 0.261 / 設定範囲 0.0435~0.0218									69	
490kg	ER2M004IL-IS	C			0.56				標準 0.0750 / 設定範囲 0.0125~0.0063						φ6.0x1		613kg	65	0.81
	ER2M004IS-IS								標準 0.142 / 設定範囲 0.0237~0.0118									69	
500kg	ER2M005IS-IS				0.9				標準 0.0693 / 設定範囲 0.0115~0.0058								625kg		
1	ER2M010IL-IS	D							標準 0.137 / 設定範囲 0.0228~0.0114						φ7.7x1	M5	1.25	78	1.33
	ER2M010IS-IS				1.8													85	
1.5	ER2M015IS-IS	E							標準 0.0877 / 設定範囲 0.0146~0.0073		設定範囲 0.400	設定範囲 0.0400	[100]・125・150	800 [1000]	φ10.2x1		1.88	113	2.3
2	ER2M020IL-IS								標準 0.0714 / 設定範囲 0.0119~0.0060								2.5	114	
	ER2M020IS-IS								標準 0.136 / 設定範囲 0.0226~0.0113									131	
2.5	ER2M025IS-IS	F							標準 0.111 / 設定範囲 0.0184~0.0092						φ11.2x1		3.13	153	2.8
2.8	ER2M028IS-IS	E		3.8・	3.5				標準 0.0878 / 設定範囲 0.0146~0.0073				125・150	1000	φ10.2x2	M4	3.5	159	4.7
3	ER2M030IS-IS								標準 0.0861 / 設定範囲 0.0143~0.0072								3.75		
4.8	ER2M048IS-IS	F		5.8			0.75		標準 0.0564 / 設定範囲 0.0094~0.0047				125・150・175	1600	φ11.2x2		6	235	5.8
5	ER2M050IS-IS								標準 0.0553 / 設定範囲 0.0092~0.0046								6.25		

●質量は、揚程4mの場合です。●適用レール[I]J[ ]内数値の場合は、最小回転半径が[ ]の数値となりますのでご注意ください。
●M6等級の対象製品は、125kg~500kgの標準仕様(フリクションクラッチ仕様)となります。

■ 寸法(mm)

形式	レール下面から下フックまでの距離:C	D	b	d	e	e'	g	i	j	k	m	n	r	t	u
ER2M001IH-IS	375	450	315	220	515	179	27	95	22	130	205	109	51	31	83
ER2M003IS-IS															
ER2M003IH-IS															
ER2M004IL-IS	395	510													
ER2M004IS-IS															
ER2M005IS-IS															
ER2M010IL-IS	435	550					31								
ER2M010IS-IS															
ER2M015IS-IS	505						34								
ER2M020IL-IS	570	630	325	225	520	184	39	110	27	125	212	118	60	36	76
ER2M020IS-IS	585														
ER2M025IS-IS	620	830	340	226	521	186	44	125	29	131	215	132	68	43	70
ER2M028IS-IS	765	900													
ER2M030IS-IS	815														
ER2M048IS-IS	900	910	400	281	528	192	47	140	44	145	233	150	86	54	56
ER2M050IS-IS															

●D寸法は、揚程4mの場合です。

(4) 円形ライナープレートの標準寸法

直　径 D(mm)	標準セクション構成 (1リング当り)			標準補強 リングサイズ	標準補強リング構成 (1リング当り)		
	P−6	P−8	P−10		標準長さ(mm)	本数	質量(kg)
1200	4	—	—	—	—	—	—
1500	5	—	—	—	—	—	—
1700	3	2	—	—	—	—	—
1800	2	3	—	—	—	—	—
2000	—	—	4	H-100	1564.0	4	106
2500	—	—	5	H-125	1956.5	4	185
3000	—	—	6	H-125	2349.0	4	222
3200	—	8	—	H-125	2506.0	4	237
3500	—	—	7	H-125	2741.5	4	259
3600	—	9	—	H-125	2820.0	4	266
4000	—	—	8	H-125	3134.0	4	296
4500	—	—	9	H-125	3526.5	4	333
5000	—	—	10	H-125	3134.0	5	370
5500	—	—	11	H-150	3448.0	5	536
6000	—	—	12	H-150	3134.0	6	585
6500	—	—	13	H-150	3291.0 3605.0	4 2	634
7000	—	—	14	H-150	3134.0	7	557
7500	—	—	15	H-150	3134.0 3448.0	2 5	731
8000	—	—	16	H-175	3134.0	8	1013
8500	—	—	17	H-175	3291.0 3369.5	4 4	1076
9000	—	—	18	H-175	3134.0	9	1139
9500	—	—	19	H-175	3134.0 3448.0	4 5	1203
10000	—	—	20	H-175	3134.0	10	1266