

平成 26 年度地層処分技術調査等事業

(地層処分回収技術高度化開発)

平成23年度～平成26年度 総 括 報 告 書

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）において、平成 23 年度～平成 26 年度の成果を取りまとめたものです。

## はじめに

本報告書は、平成23年度から26年度に実施した、地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）の成果および今後検討が必要と判断された課題を取りまとめたものである。

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る安全規制制度のあり方について」（総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会）においては、基本的に廃棄体を回収するような事態が生ずることはないと考えとしながらも、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、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段階にあった。

本事業は、これまでの知見を高度化し、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行い、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ことを目指したものである。

回収技術高度化開発における廃棄体を回収するための緩衝材除去システム開発においては、回収に必要な機能を抽出し、設計的な検討を行い、緩衝材除去、塩水リユース、遠隔操作に関する諸機能を統合した緩衝材除去システムを開発し、最終年度において、実規模模擬廃棄体を用いた総合的な動作確認試験を行い、開発した緩衝材除去システムの緩衝材除去性能、システム成立性、操作性、地下への展開性に関する評価を行い、廃棄体回収が可能であることを地上にて実証した。

地下環境での実証試験計画策定においては、第2次取りまとめに示される処分坑道を対象として、実規模での廃棄体の回収試験を行うための実証試験坑道の基本設計を行い、実証試験計画を具現化した。また、地下環境における実証試験設備の配置案を数例提示し、地下環境の実情に応じた試験設備の配置が可能であることを示し、地下での試験設備の配置に柔軟性を持たせた。

地層処分における回収維持期間の検討においては、操業段階での人工バリアの代表的な状態を設定し、一定期間、坑道を埋め戻さない場合の処分施設の安全性に及ぼす影響について、熱的、力学的、水理学的、化学的な観点から定性的な評価を行い、想定される影響について主な因子を抽出整理した。また、人工バリア性能維持が可能な観点から、主な影響の程度を定量的に把握するとともに、回収維持期間を例示し、その考え方を整理した。さらに例示した回収維持期間に対する維持管理の具体的な方策を提示した。

本報告書では、これまでの4年間に実施した上記検討によって得られた知見を整理し、その成果を示すとともに、今後の地層処分回収技術の整備に向け、さらなる検討が必要な課題を抽出し

た結果について述べる。



# 目 次

|                                                                |       |
|----------------------------------------------------------------|-------|
| 第 1 章 事業概要 .....                                               | 1-1   |
| 1.1 全体概要 .....                                                 | 1-1   |
| 1.1.1 事業の背景 .....                                              | 1-1   |
| 1.1.2 事業の目的 .....                                              | 1-1   |
| 1.1.3 全体計画 .....                                               | 1-2   |
| 1.2 開発成果概要 .....                                               | 1-2   |
| 1.2.1 廃棄体を回収するための緩衝材除去システムの開発 .....                            | 1-2   |
| 1.2.2 地下環境における実証試験計画 .....                                     | 1-3   |
| 1.2.3 地層処分における回収維持期間の検討 .....                                  | 1-3   |
| 1.2.4 全体計画と回収技術開発の成果・経緯 .....                                  | 1-4   |
| 第 2 章 個別開発成果 .....                                             | 2-1   |
| 2.1 廃棄体を回収するための緩衝材除去システムの開発 .....                              | 2-1   |
| 2.1.1 緩衝材除去システムの開発に係る前提条件 .....                                | 2-1   |
| 2.1.2 塩水噴射・吸引設備の開発 .....                                       | 2-13  |
| 2.1.3 塩水リユース設備の開発 .....                                        | 2-34  |
| 2.1.4 遠隔操作技術の開発 .....                                          | 2-44  |
| 2.1.5 緩衝材除去システムの動作確認 .....                                     | 2-57  |
| 2.1.6 動作確認のための試験設備 .....                                       | 2-73  |
| 2.1.7 処分坑道内における緩衝材回収作業 .....                                   | 2-131 |
| 2.1.8 総合動作確認による緩衝材除去システムの成立性の検討 .....                          | 2-132 |
| 2.1.9 まとめ .....                                                | 2-147 |
| 2.2 地下環境における実証試験計画 .....                                       | 2-156 |
| 2.2.1 実証試験サイトの設定 .....                                         | 2-156 |
| 2.2.2 緩衝材除去システムの仕様の整理 .....                                    | 2-160 |
| 2.2.3 実証試験に必要な設備の検討 .....                                      | 2-163 |
| 2.2.4 実証試験に必要な試験坑道の検討 .....                                    | 2-164 |
| 2.2.5 実証試験に必要な試験坑道の基本設計 .....                                  | 2-169 |
| 2.2.6 まとめ .....                                                | 2-177 |
| 2.3 処分施設における回収維持期間の検討 .....                                    | 2-178 |
| 2.3.1 検討方針 .....                                               | 2-178 |
| 2.3.2 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<br>程度の定量的把握 ..... | 2-181 |
| 2.3.3 人工バリアの状態と回収維持期間の例示 .....                                 | 2-229 |
| 2.3.4 処分施設の回収維持期間に対する維持管理方策の検討 .....                           | 2-243 |
| 2.3.5 まとめと課題の整理 .....                                          | 2-251 |

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 2.3.6 参考文献 .....                    | 2-255 |
| 第3章 まとめおよび今後の開発戦略 .....             | 3-1   |
| 3.1 個別開発成果のまとめ .....                | 3-1   |
| 3.1.1 廃棄体を回収するための緩衝材除去システムの開発 ..... | 3-1   |
| 3.1.2 地下環境における実証試験計画 .....          | 3-2   |
| 3.1.3 地層処分施設における回収維持期間の検討 .....     | 3-3   |
| 3.2 今後の課題と開発戦略 .....                | 3-3   |
| 3.2.1 廃棄体を回収するための緩衝材除去システムの開発 ..... | 3-3   |
| 3.2.2 地下環境における実証試験計画 .....          | 3-4   |
| 3.2.3 地層処分施設における回収維持期間の検討 .....     | 3-4   |
| 3.2.4 今後の開発戦略 .....                 | 3-5   |
| 別紙 - 外部発表リスト                        |       |

## 図 目 次

|            |                             |      |
|------------|-----------------------------|------|
| 図 1.2.4-1  | 全体計画（開発スケジュール） .....        | 1-4  |
| 図 1.2.4-2  | 地層処分工学技術における回収技術開発の経緯.....  | 1-5  |
| 図 2.1.1-1  | 緩衝材除去システムの基本構成 .....        | 2-2  |
| 図 2.1.1-2  | 緩衝材除去システムの噴射・吸引設備基本構成図..... | 2-2  |
| 図 2.1.1-3  | 緩衝材除去システムの噴射・吸引設備全体配置案..... | 2-2  |
| 図 2.1.1-4  | 塩水噴射とスラリー吸引状況.....          | 2-3  |
| 図 2.1.1-5  | 回収作業全体の流れ .....             | 2-5  |
| 図 2.1.1-6  | 廃棄体を回収するための各装置の関係 .....     | 2-8  |
| 図 2.1.1-7  | 処分孔埋戻材除去装置.....             | 2-8  |
| 図 2.1.1-8  | 緩衝材除去装置.....                | 2-9  |
| 図 2.1.1-9  | 廃棄体受取搬送装置 .....             | 2-10 |
| 図 2.1.1-10 | 緩衝材除去システムの全体構成.....         | 2-11 |
| 図 2.1.1-11 | 緩衝材の設計範囲 .....              | 2-12 |
| 図 2.1.1-12 | 坑道の仕様.....                  | 2-13 |
| 図 2.1.2-1  | 噴射・吸引設備の装置構成 .....          | 2-14 |
| 図 2.1.2-2  | 塩水噴射・スラリー吸引装置の構成.....       | 2-15 |
| 図 2.1.2-3  | 塩水噴射・スラリー吸引装置組み立て図 .....    | 2-17 |
| 図 2.1.2-4  | 塩水噴射・スラリー吸引装置の製作状況 .....    | 2-18 |
| 図 2.1.2-5  | 昇降装置設計図.....                | 2-21 |
| 図 2.1.2-6  | 塩水ホース巻き取り装置設計図 .....        | 2-22 |
| 図 2.1.2-7  | 噴射ノズル旋回部設計図.....            | 2-23 |
| 図 2.1.2-8  | 昇降装置の製作状況 .....             | 2-24 |
| 図 2.1.2-9  | 把持装置設計図.....                | 2-25 |
| 図 2.1.2-10 | 把持部の製作状況.....               | 2-26 |
| 図 2.1.2-11 | 駆動設備走行部の設計図.....            | 2-28 |
| 図 2.1.2-12 | 走行部製作状況 .....               | 2-29 |
| 図 2.1.2-13 | 油圧ユニット系統図.....              | 2-32 |
| 図 2.1.2-14 | 油圧ユニット設計図.....              | 2-33 |
| 図 2.1.2-15 | 油圧ユニットの製作状況.....            | 2-34 |
| 図 2.1.3-1  | 塩水リユース設備全体フロー図 .....        | 2-38 |
| 図 2.1.3-2  | 固液分離槽設計図.....               | 2-39 |
| 図 2.1.3-3  | 20m <sup>3</sup> 水槽.....    | 2-40 |
| 図 2.1.3-4  | 5m <sup>3</sup> 水槽.....     | 2-41 |
| 図 2.1.3-5  | 3m <sup>3</sup> 水槽.....     | 2-42 |
| 図 2.1.3-6  | 1m <sup>3</sup> 水槽.....     | 2-43 |
| 図 2.1.3-7  | 塩水リユース設備の製作状況.....          | 2-44 |

|            |                                      |       |
|------------|--------------------------------------|-------|
| 図 2.1.4-1  | 遠隔操作設備における全体システム構成 .....             | 2-47  |
| 図 2.1.4-2  | 遠隔測定システム図 .....                      | 2-48  |
| 図 2.1.4-3  | 電気システム構成図 .....                      | 2-49  |
| 図 2.1.4-4  | 無線遠隔操作システム構成図.....                   | 2-50  |
| 図 2.1.4-5  | 映像伝送監視システム図 .....                    | 2-51  |
| 図 2.1.4-6  | 3D 観測装置 (Xtion) の形状 .....            | 2-52  |
| 図 2.1.4-7  | 廃棄体把持機能のプログラムフロー図 (プログラム設計図) .....   | 2-53  |
| 図 2.1.4-8  | 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) . | 2-54  |
| 図 2.1.4-9  | 観測可能範囲図.....                         | 2-55  |
| 図 2.1.4-10 | 計測データのモニタリングシステムの概要.....             | 2-56  |
| 図 2.1.4-11 | 塩水リユース設備 遠隔通信経路 .....                | 2-57  |
| 図 2.1.5-1  | 動作確認試験フロー (走行装置) .....               | 2-59  |
| 図 2.1.5-2  | 走行装置の動作確認試験状況.....                   | 2-60  |
| 図 2.1.5-3  | 動作確認試験フロー (昇降装置) .....               | 2-62  |
| 図 2.1.5-4  | 昇降装置の動作確認試験状況.....                   | 2-64  |
| 図 2.1.5-5  | 昇降装置の動作確認検査フローおよび検査概念.....           | 2-65  |
| 図 2.1.5-6  | 昇降装置の動作確認例.....                      | 2-67  |
| 図 2.1.5-7  | 塩水噴射・スラリー吸引装置の動作確認フロー.....           | 2-68  |
| 図 2.1.5-8  | 塩水噴射・スラリー吸引装置の動作確認試験状況.....          | 2-69  |
| 図 2.1.5-9  | 動作確認試験フロー (塩水リユース設備) .....           | 2-70  |
| 図 2.1.5-10 | 塩水リユース設備の動作確認試験状況.....               | 2-70  |
| 図 2.1.5-11 | 遠隔操作設備の動作確認フロー .....                 | 2-71  |
| 図 2.1.5-12 | 遠隔操作設備の動作確認.....                     | 2-72  |
| 図 2.1.6-1  | 緩衝材除去装置の全体構成 .....                   | 2-73  |
| 図 2.1.6-2  | 試験孔および試験坑道の断面.....                   | 2-74  |
| 図 2.1.6-3  | 模擬廃棄体外形図.....                        | 2-75  |
| 図 2.1.6-4  | 模擬廃棄体基本構造案および重心計算結果.....             | 2-76  |
| 図 2.1.6-5  | 荒加工後外観図.....                         | 2-77  |
| 図 2.1.6-6  | 完成後外観図 .....                         | 2-77  |
| 図 2.1.6-7  | 最終機械加工後外観図.....                      | 2-77  |
| 図 2.1.6-8  | 試験設備配置 .....                         | 2-79  |
| 図 2.1.6-9  | 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.....     | 2-130 |
| 図 2.1.7-1  | 処分坑道における緩衝材回収作業基本動作.....             | 2-131 |
| 図 2.1.8-1  | 緩衝材除去試験の方法.....                      | 2-132 |
| 図 2.1.8-2  | 緩衝材除去システム (緩衝材除去による機能確認) .....       | 2-133 |
| 図 2.1.8-3  | 試験に用いた緩衝材寸法 .....                    | 2-134 |
| 図 2.1.8-4  | 充填材料と充填位置 .....                      | 2-135 |
| 図 2.1.8-5  | 緩衝材除去試験手順 .....                      | 2-136 |

|            |                                                  |       |
|------------|--------------------------------------------------|-------|
| 図 2.1.8-6  | 塩水噴射・スラリー吸引流量の測定結果 .....                         | 2-138 |
| 図 2.1.8-7  | 固液分離設備前後の SS 濃度.....                             | 2-139 |
| 図 2.1.8-8  | 塩分濃度・pH・水温の測定結果（固液分離後） .....                     | 2-139 |
| 図 2.1.8-9  | 緩衝材除去深度測定結果.....                                 | 2-140 |
| 図 2.1.8-10 | 形状計測結果を用いた緩衝材除去体積の算出方 .....                      | 2-141 |
| 図 2.1.8-11 | 緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 17 時間後） .....                | 2-142 |
| 図 2.1.8-12 | 緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 42 時間後） .....                | 2-143 |
| 図 2.1.8-13 | 緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 77 時間後） .....                | 2-143 |
| 図 2.1.8-14 | 緩衝材累積除去量（除去堆積計算と SS 濃度計算）の比較.....                | 2-144 |
| 図 2.1.8-15 | 模擬廃棄体の把持方法 .....                                 | 2-145 |
| 図 2.1.8-16 | 模擬廃棄体の把持・引上げ状況.....                              | 2-145 |
| 図 2.1.8-17 | 塩水リユース設備の監視状況.....                               | 2-146 |
| 図 2.1.9-1  | 緩衝材除去装置の基本設計（平成 23 年度） .....                     | 2-147 |
| 図 2.1.9-2  | 塩水リユース設備の設備概念（平成 23 年度） .....                    | 2-148 |
| 図 2.1.9-3  | 塩水噴射・スラリー吸引装置の機能確認（平成 24 年度） .....               | 2-148 |
| 図 2.1.9-4  | 昇降装置・把持装置を含む緩衝材除去装置ベース部の組立（平成 24 年度）<br>.....    | 2-149 |
| 図 2.1.9-5  | 塩水リユース設備の全体構成（平成 24 年度） .....                    | 2-149 |
| 図 2.1.9-6  | 映像カメラ、エンコーダ、無線伝送コントローラーを用いた実証（平成 24 年度）<br>..... | 2-150 |
| 図 2.1.9-7  | 3D スキャナの試行（平成 24 年度） .....                       | 2-150 |
| 図 2.1.9-8  | 緩衝材除去システムの構成（平成 25 年度） .....                     | 2-151 |
| 図 2.1.9-9  | 緩衝材除去システム構成設備の整備状況（平成 25 年度） .....               | 2-151 |
| 図 2.1.9-10 | 各設備の動作確認試験（平成 25 年度） .....                       | 2-152 |
| 図 2.1.9-11 | 緩衝材除去による各設備の機能確認（平成 25 年度） .....                 | 2-152 |
| 図 2.1.9-12 | 噴射・吸引設備の改良後全景（平成 26 年度） .....                    | 2-153 |
| 図 2.1.9-13 | 噴射・吸引設備のうち塩水噴射・スラリー吸引装置（平成 26 年度改良後）<br>.....    | 2-154 |
| 図 2.1.9-14 | 噴射・吸引設備のうち昇降装置（平成 26 年度改良後） .....                | 2-154 |
| 図 2.1.9-15 | 遠隔操作設備のうち緩衝材除去形状取得支援システム（平成 26 年度改良後）<br>.....   | 2-155 |
| 図 2.1.9-1  | 実証試験計画の見直し検討フロー .....                            | 2-156 |
| 図 2.2.1-1  | 地下坑道の配置概要[1].....                                | 2-157 |
| 図 2.2.1-2  | 搬出入に用いる東立坑の断面仕様[1] .....                         | 2-157 |
| 図 2.2.1-3  | 周回坑道の断面仕様[1].....                                | 2-158 |
| 図 2.2.1-4  | 試験坑道 2 の断面仕様[1].....                             | 2-158 |
| 図 2.2.2-1  | 緩衝材除去システムの設備概要 .....                             | 2-160 |
| 図 2.2.4-1  | 処分坑道の仕様例[2].....                                 | 2-164 |

|            |                                                    |       |
|------------|----------------------------------------------------|-------|
| 図 2.2.4-2  | 試験坑道 2 入口の断面形状の検討 .....                            | 2-165 |
| 図 2.2.4-3  | 塩水ホース巻き取り装置および装置の吊代の検討 .....                       | 2-166 |
| 図 2.2.4-4  | 組立エリアの拡幅断面検討 .....                                 | 2-166 |
| 図 2.2.4-5  | 噴射・吸引設備組立エリア（馬蹄型）を含む試験坑道平面図 .....                  | 2-168 |
| 図 2.2.4-6  | 噴射・吸引設備組立エリア（馬蹄型）を含む試験坑道縦断面図 .....                 | 2-169 |
| 図 2.2.5-1  | 解析断面位置 .....                                       | 2-170 |
| 図 2.2.5-2  | メッシュ分割図 .....                                      | 2-171 |
| 図 2.2.5-3  | 支保工応力分布（Case1） .....                               | 2-175 |
| 図 2.2.5-4  | 岩盤の塑性領域分布と最大せん断ひずみ分布（Case1） .....                  | 2-175 |
| 図 2.3.1-1  | 影響の程度の定量的把握における検討手順 .....                          | 2-179 |
| 図 2.3.1-2  | 回収維持期間の例示の検討手順 .....                               | 2-179 |
| 図 2.3.1-3  | 処分施設の維持管理方策の検討手順 .....                             | 2-180 |
| 図 2.3.2-1  | 定置概念[10] .....                                     | 2-183 |
| 図 2.3.2-2  | 熱伝導解析による検討フロー .....                                | 2-192 |
| 図 2.3.2-3  | 処分坑道断面形状（縦置き方式および横置き方式） [8] .....                  | 2-193 |
| 図 2.3.2-4  | 人工バリアの基本仕様（縦置き方式および横置き方式） [8] .....                | 2-193 |
| 図 2.3.2-5  | 処分坑道断面形状（PEM 方式） [9] .....                         | 2-194 |
| 図 2.3.2-6  | 人工バリアの基本仕様とモデル化（PEM 方式） [9] .....                  | 2-194 |
| 図 2.3.2-7  | 第 2 次取りまとめの解析モデル[8] .....                          | 2-195 |
| 図 2.3.2-8  | ガラス固化体中間貯蔵期間後の発熱量時系列変化[8] .....                    | 2-196 |
| 図 2.3.2-9  | 有限要素モデル（縦置き方式） .....                               | 2-199 |
| 図 2.3.2-10 | 有限要素モデル（横置き方式） .....                               | 2-200 |
| 図 2.3.2-11 | 有限要素モデル（PEM 方式） .....                              | 2-201 |
| 図 2.3.2-12 | ケース v-1 における期間の抽出結果 .....                          | 2-208 |
| 図 2.3.2-13 | ケース v-2-2 における期間の抽出結果 .....                        | 2-208 |
| 図 2.3.2-14 | ケース h-1 における期間の抽出結果 .....                          | 2-209 |
| 図 2.3.2-15 | ケース h-2-2 における期間の抽出結果 .....                        | 2-209 |
| 図 2.3.2-16 | ケース p-2（オーバーパック）における期間の抽出結果 .....                  | 2-210 |
| 図 2.3.2-17 | ケース p-3（オーバーパック）における期間の抽出結果 .....                  | 2-210 |
| 図 2.3.2-18 | 炭素鋼の全面腐食と不働態・局部腐食(模式図) .....                       | 2-215 |
| 図 2.3.2-19 | 腐食評価の観点から埋戻状態(模式図) .....                           | 2-216 |
| 図 2.3.2-20 | 炭素鋼の腐食の進展予測例[66] .....                             | 2-216 |
| 図 2.3.2-21 | 地下水の pH 変化(例) .....                                | 2-217 |
| 図 2.3.2-22 | オーバーパックの埋設環境における温度解析(例) .....                      | 2-217 |
| 図 2.3.2-23 | 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[32]<br>..... | 2-219 |
| 図 2.3.2-24 | ベントナイト埋設環境における炭素鋼の腐食挙動 .....                       | 2-221 |
| 図 2.3.2-25 | クニゲル V1 の総湧水量とエロージョン量の関係[88] .....                 | 2-225 |

|           |                                      |       |
|-----------|--------------------------------------|-------|
| 図 2.3.3-1 | 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    | 2-230 |
| 図 2.3.3-2 | 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 .....    | 2-233 |
| 図 2.3.3-3 | 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 .....  | 2-236 |
| 図 2.3.3-4 | 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 ..... | 2-237 |
| 図 2.3.3-5 | 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 .....  | 2-240 |
| 図 2.3.4-1 | 一般的なトンネルの維持管理の手順 .....               | 2-243 |
| 図 2.3.4-2 | 湧水抑制対策 .....                         | 2-245 |

## 目 次

|            |                                     |       |
|------------|-------------------------------------|-------|
| 表 2.1.1-1  | 回収技術に係る業務内容の推移 .....                | 2-1   |
| 表 2.1.1-2  | 試験に必要となる回収装置全体の設計要件 .....           | 2-4   |
| 表 2.1.1-3  | 切削方式による掘削技術の例 .....                 | 2-6   |
| 表 2.1.1-4  | 緩衝材除去システムの構成 .....                  | 2-11  |
| 表 2.1.1-5  | 緩衝材の仕様 .....                        | 2-12  |
| 表 2.1.1-6  | 廃棄体（オーバーパック）の設計条件 .....             | 2-13  |
| 表 2.1.2-1  | 塩水噴射・スラリー吸引設備の基本仕様 .....            | 2-15  |
| 表 2.1.2-2  | 走行装置設計条件一覧 .....                    | 2-27  |
| 表 2.1.2-3  | 油圧ユニット装置設計条件一覧 .....                | 2-30  |
| 表 2.1.2-4  | 油圧ユニットの仕様一覧 .....                   | 2-31  |
| 表 2.1.3-1  | 塩水リユース設備 設備一覧（1） .....              | 2-35  |
| 表 2.1.3-2  | 塩水リユース設備 設備一覧（2） .....              | 2-36  |
| 表 2.1.4-1  | 塩水噴射・スラリー吸引装置に対する遠隔操作設備の要求事項 .....  | 2-44  |
| 表 2.1.4-2  | 走行装置に対する遠隔操作設備の要求事項 .....           | 2-45  |
| 表 2.1.4-3  | 昇降装置に対する遠隔操作設備の要求事項 .....           | 2-45  |
| 表 2.1.4-4  | 塩水リユース設備に対する遠隔操作設備の要求事項 .....       | 2-46  |
| 表 2.1.4-5  | XtionProLive 性能諸元 .....             | 2-52  |
| 表 2.1.4-6  | 計測機器設備 .....                        | 2-56  |
| 表 2.1.5-1  | 動作確認項目と動作確認方法（走行装置） .....           | 2-58  |
| 表 2.1.5-2  | 走行装置の動作確認試験結果一覧 .....               | 2-60  |
| 表 2.1.5-3  | 動作確認項目と動作確認方法（昇降装置） .....           | 2-61  |
| 表 2.1.5-4  | 昇降装置の動作確認試験結果一覧 .....               | 2-63  |
| 表 2.1.5-5  | 昇降装置巻き取り部の動作確認項目と動作確認方法 .....       | 2-65  |
| 表 2.1.5-6  | 昇降装置の動作確認項目一覧 .....                 | 2-66  |
| 表 2.1.5-7  | 塩水噴射・スラリー吸引装置の動作確認項目と確認方法 .....     | 2-68  |
| 表 2.1.5-8  | 塩水噴射・スラリー吸引装置（改良後）の動作確認項目一覧 .....   | 2-68  |
| 表 2.1.5-9  | 塩水噴射・スラリー吸引装置（改良前）の動作確認試験結果一覧 ..... | 2-69  |
| 表 2.1.5-10 | 動作確認項目と動作確認方法（塩水リユース設備） .....       | 2-69  |
| 表 2.1.5-11 | 塩水リユース設備の動作確認試験結果一覧 .....           | 2-70  |
| 表 2.1.5-12 | 遠隔操作設備の動作確認項目一覧 .....               | 2-71  |
| 表 2.1.6-1  | 試験孔および試験坑道の基本仕様 .....               | 2-74  |
| 表 2.1.8-1  | 模擬廃棄体の仕様 .....                      | 2-133 |
| 表 2.1.8-2  | 試験に用いる緩衝材の主要な仕様 .....               | 2-134 |
| 表 2.1.8-3  | 試験に用いるベントナイトペレットの仕様 .....           | 2-135 |
| 表 2.1.8-4  | 試験条件（緩衝材除去による機能確認試験） .....          | 2-135 |
| 表 2.1.8-5  | 緩衝材除去により確認する機能と取得特性および取得方法 .....    | 2-137 |



|            |                                                 |       |
|------------|-------------------------------------------------|-------|
| 表 2.1.8-6  | 緩衝材除去速度の比較.....                                 | 2-141 |
| 表 2.1.9-1  | 緩衝材除去システムを構成する各設備の改良（平成 26 年度） .....            | 2-153 |
| 表 2.2.1-1  | 資機材搬入出に用いる設備および坑道仕様[1] .....                    | 2-159 |
| 表 2.2.2-1  | 噴射・吸引設備主要部の重量.....                              | 2-160 |
| 表 2.2.2-2  | 噴射・吸引設備の分割検討結果 .....                            | 2-161 |
| 表 2.2.2-3  | 塩水リユース設備の仕様 .....                               | 2-162 |
| 表 2.2.3-1  | 緩衝材除去試験に必要なとなるインフラ仕様 .....                      | 2-163 |
| 表 2.2.3-2  | 天井クレーンの仕様 .....                                 | 2-163 |
| 表 2.2.5-1  | 深度 350m の初期応力[3] .....                          | 2-171 |
| 表 2.2.5-2  | 解析用地山物性値[3].....                                | 2-171 |
| 表 2.2.5-3  | 吹付けコンクリートの物性値.....                              | 2-172 |
| 表 2.2.5-4  | 鋼製支保工物性値 .....                                  | 2-172 |
| 表 2.2.5-5  | Case2 既設断面に使用する支保の物性値 .....                     | 2-172 |
| 表 2.2.5-6  | 許容応力度[3] .....                                  | 2-173 |
| 表 2.2.5-7  | 解析ステップ .....                                    | 2-173 |
| 表 2.2.5-8  | 支保部材の仕様および応力照査結果（Case1） .....                   | 2-174 |
| 表 2.2.5-9  | 支保部材の仕様および応力照査結果（Case2） .....                   | 2-175 |
| 表 2.3.2-1  | 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）<br>..... | 2-181 |
| 表 2.3.2-2  | 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）<br>..... | 2-182 |
| 表 2.3.2-3  | 縦置き方式における状態のイメージと説明.....                        | 2-186 |
| 表 2.3.2-4  | 横置き方式における状態のイメージと説明.....                        | 2-187 |
| 表 2.3.2-5  | PEM 方式における状態のイメージと説明 .....                      | 2-188 |
| 表 2.3.2-6  | 縦置き方式における状態のイメージと影響因子の整理.....                   | 2-189 |
| 表 2.3.2-7  | 横置き方式における状態のイメージと影響因子の整理.....                   | 2-190 |
| 表 2.3.2-8  | PEM 方式における状態のイメージと影響因子の整理.....                  | 2-191 |
| 表 2.3.2-9  | 人工バリアおよび岩盤の熱特性[8].....                          | 2-197 |
| 表 2.3.2-10 | 解析ケース（縦置き方式） .....                              | 2-202 |
| 表 2.3.2-11 | 解析ケース（横置き方式） .....                              | 2-203 |
| 表 2.3.2-12 | 解析ケース（PEM 方式） .....                             | 2-204 |
| 表 2.3.2-13 | 第 2 次取りまとめ解析結果との比較（縦置き方式） .....                 | 2-207 |
| 表 2.3.2-14 | 第 2 次取りまとめ解析結果との比較（横置き方式） .....                 | 2-207 |
| 表 2.3.2-15 | 炭素鋼の代表的な腐食形態 .....                              | 2-214 |
| 表 2.3.2-16 | 空気と接する場合の腐食見積(温度、湿度).....                       | 2-218 |
| 表 2.3.2-17 | 水と接する場合の腐食見積(温度、DO) .....                       | 2-219 |
| 表 2.3.2-18 | ベントナイトと接する場合の腐食見積(温度、海洋／非海洋).....               | 2-220 |
| 表 2.3.2-19 | 腐食深さの定置条件、および時間依存性比較 .....                      | 2-221 |

|            |                                                |       |
|------------|------------------------------------------------|-------|
| 表 2.3.2-20 | 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)        |       |
|            | [10] .....                                     | 2-223 |
| 表 2.3.2-21 | 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)        |       |
|            | [10] .....                                     | 2-224 |
| 表 2.3.3-1  | 人工バリア性能維持への影響が懸念される事象 (1) .....                | 2-230 |
| 表 2.3.3-2  | 人工バリア性能維持への影響が懸念される事象 (2) .....                | 2-233 |
| 表 2.3.3-3  | 人工バリア性能維持への影響が懸念される事象 (3) .....                | 2-236 |
| 表 2.3.3-4  | 人工バリア性能維持への影響が懸念される事象 (4) .....                | 2-237 |
| 表 2.3.3-5  | 人工バリア性能維持への影響が懸念される事象 (5) .....                | 2-240 |
| 表 2.3.3-6  | 人工バリアに及ぼす主な影響の程度と期間 (表 2.3.2-16~表 2.3.2-18 より) | 2-241 |
| 表 2.3.3-7  | 我が国におけるトンネルの共用期間の例[7] .....                    | 2-241 |
| 表 2.3.3-8  | 我が国における鉱山の稼働期間の例 .....                         | 2-242 |
| 表 2.3.4-1  | 処分施設を持管理するための方策 (1) .....                      | 2-244 |
| 表 2.3.4-2  | 処分施設を持管理するための方策 (2) .....                      | 2-247 |
| 表 2.3.4-3  | 処分施設を持管理するための方策 (3) .....                      | 2-249 |

# 第1章 事業概要

## 1.1 全体概要

### 1.1.1 事業の背景

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って既に放射性廃棄物が発生しており、その処理処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る研究開発について、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る安全規制制度のあり方について」（総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会）においては、基本的に廃棄体を回収するような事態が生ずることはないと考えとしながらも、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。

### 1.1.2 事業の目的

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したものである。

### 1.1.3 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年間程度の期間で行うことを目指したものである。対象とする処分方式は、処分孔縦置き方式とした。

## 1.2 開発成果概要

平成23年度から平成26年度の4年間で実施した、廃棄体を回収するための緩衝材除去システムの開発、地下環境における実証試験計画、地層処分における回収維持期間の検討について、成果の概要を以下に示す。

### 1.2.1 廃棄体を回収するための緩衝材除去システムの開発

平成23年度は、全体計画に基づき、廃棄体を回収するための緩衝材除去システムの基本設計を行い、平成23年度から4年間程度に展開した図1.2.4-1に示す全体計画として、設計、製作、確認試験のスケジュールを作成した。また、緩衝材除去システムを構成する主要部位である塩水噴射部について、設計を行った。

平成24年度は、緩衝材除去システムを構成する、塩水噴射部の製作、スラリー吸引設備の設計・製作、昇降設備の設計・製作、塩水リユース設備の設計・製作及び駆動設備の設計を実施した。特に駆動設備に関しては遠隔操作によるシステムの設計を行った。

平成25年度は、緩衝材除去システムのうち駆動設備の製作を行い、完了後、平成24年度に製作した塩水噴射設備、スラリー吸引設備、昇降設備、塩水リユース設備を組み立てるとともにシステムの調整を行った。また、組立・取り付けを完了した緩衝材除去システムの機能確認を目的として、地上にて、緩衝材を用いた実規模での緩衝材除去試験を行い、噴射量、噴射圧力、緩衝材除去量、スラリー化した緩衝材の個液分離特性、リユース塩水性状等に関するデータを取得し、設定した機能要件が確保されていることを確認した。

平成26年度は、平成25年度までに製作した緩衝材除去システム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。ま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個液分離特性、リユース塩水性状等に関するデータを取得し、回収技術に関する知見を取りまとめた。

なお、これまでに開発した地層処分技術における回収技術開発の経緯を図1.2.4-2に示した。

### 1.2.2 地下環境における実証試験計画

平成 23 年度は、最新の知見に基づき、地下環境において実規模の試験を行う回収技術の実証試験計画を策定した。また、試験に必要となる回収装置全体の概念検討を行い、平成 23 年度から 4 年程度の期間で具体化するためのスケジュールを作成した。

平成 24 年度は、平成 23 年度に実施した地下環境における実規模で行う実証試験の全体計画について、緩衝材除去システムの開発状況及び地下環境情報の変化に照らして見直しを実施した。特に実証試験の対象とする地下坑道の例に対して、開発した装置の搬入を検討するため立坑設備に関する調査、坑道内における回収作業の概念について検討を行い、課題を抽出した。

平成 25 年度は、平成 24 年度に実施した地下環境における実規模での実証試験の全体計画について、緩衝材除去システムの開発状況に及び地下環境情報の変化に照らして見直しを行った。特に、開発中の緩衝材除去システムは第二次取りまとめに示される坑道に適用することを条件としていることから、地下での実証試験にあたり、地下環境状況によっては坑道の拡張等の整備が必要となる場合がある、として課題を整理した。また、地下での試験設備の配置、試験手順、試験工程を検討し、実証試験計画に反映した。

平成 26 年度は、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システムを利用する場合の作業環境について調査・検討を行い、その結果に基づき実証試験に必要となる地下での試験坑道や設備について、基本設計を行い具体化した。

### 1.2.3 地層処分における回収維持期間の検討

平成 25 年度は、処分施設を埋め戻さずに、廃棄体を回収するための維持期間について検討を行った。処分施設を埋め戻さずに一定期間維持することで、処分施設の安全性に及ぼす影響について、周辺岩盤の力学的な観点、水理的な観点及び化学的観点、熱的観点から調査・整理を行い定性的な評価を行った。

平成 26 年度は、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で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、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把握するとともに回収維持期間の例示について検討した。さらに、その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提示し、残される課題について整理した。

## 1.2.4 全体計画と回収技術開発の成果・経緯

### (1) 全体計画（開発スケジュール）

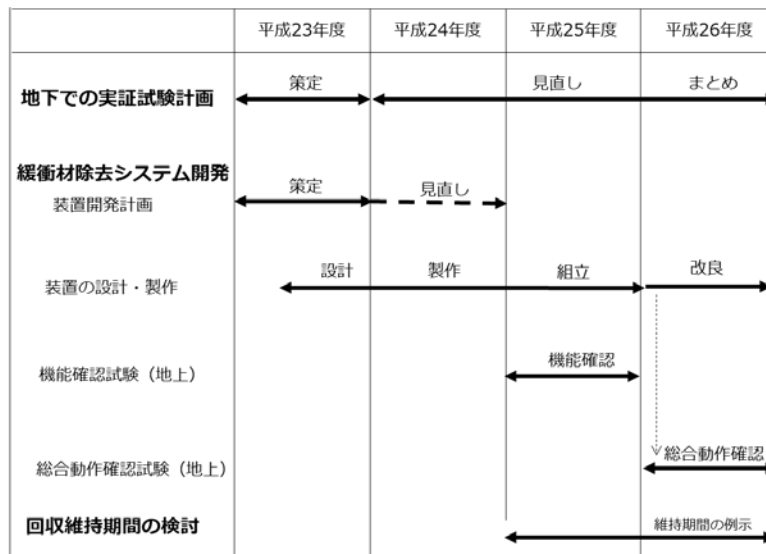


図 1.2.4-1 全体計画（開発スケジュール）

## (2) 回収技術開発の成果・経緯

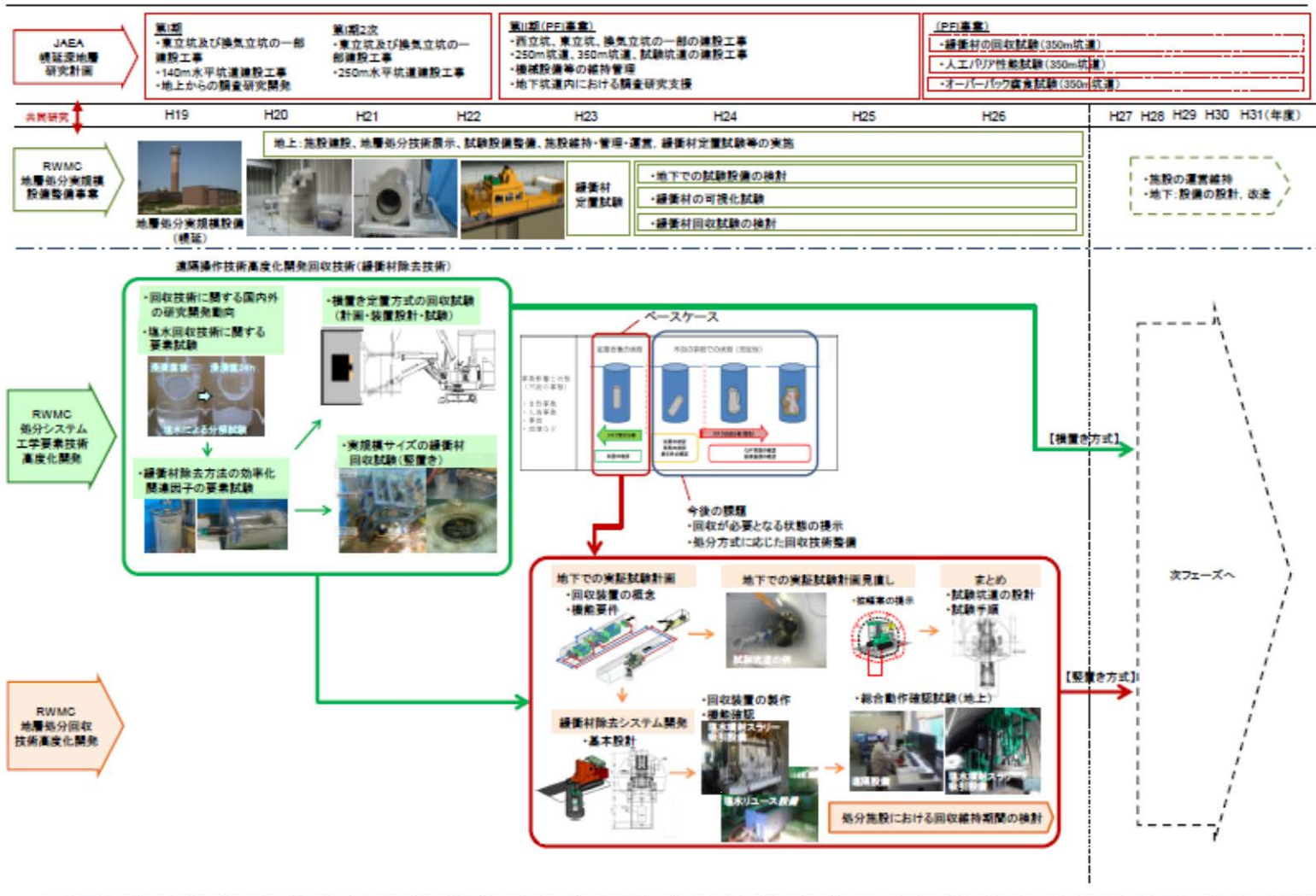


図 1.2.4-2 地層処分工学技術における回収技術開発の経緯

## 第2章 個別開発成果

回収技術高度化開発において、平成 23 年度から平成 26 年度の 4 年間で実施した「廃棄体を回収するための緩衝材除去システムの開発」、「地下環境における実証試験計画」、「地層処分施設における回収維持期間の検討」について、個別開発成果を以下に取りまとめた。

### 2.1 廃棄体を回収するための緩衝材除去システムの開発

#### 2.1.1 緩衝材除去システムの開発に係る前提条件

緩衝材除去システム開発を行う上で、必要となる前提および基本条件以下に示す。

##### (1) 基礎研究成果の反映

緩衝材除去システムの開発には、これまでの国の基盤研究「地層処分技術調査等事業処分システム工学要素技術高度化開発」で得られた成果表 2.1.1-1 を踏まえ実施した。

表 2.1.1-1 回収技術に係る業務内容の推移

| 年度       | 業務実施内容                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 平成 12 年度 | 遠隔操作によるハンドリング・定置・回収手法の一連の概念構築にて、操業の逆動線による回収概念を提示。                                                                                                                                                                                                              |
| 平成 17 年度 | 遠隔操業システムの成立性を示す為の技術課題の一つとして回収技術を挙げ、研究を進める必要性を指摘。                                                                                                                                                                                                               |
| 平成 19 年度 | 国内の回収可能性に関する検討状況と、仏(ANDRA)や独(SKB)等の回収技術の研究動向について公開情報を基に調査。                                                                                                                                                                                                     |
| 平成 20 年度 | 回収可能性に係わる技術のうち、定置した廃棄体を回収するためには、緩衝材の膨潤による拘束圧を除去する必要があることから、緩衝材の除去技術について、国内外の検討状況を網羅的に調査し、操業技術や操業システムの成立性の観点から整理した。<br>① スウェーデンのみ、塩水の利用に着目した緩衝材の除去技術について、実験により具体的成果を取得<br>② 国内ではビーカースケールではあるが、塩水の利用に着目した研究を実施（国産ベントナイトに対して網羅的な要素試験）<br>③ 緩衝材の塩水回収技術のメカニズムに関する考察 |
| 平成 21 年度 | 回収技術に対する技術的成立性の評価、及び実規模塩水回収装置設計に向けた小規模実験を実施。<br>① 塩水の噴射条件に係る因子を整理、要素試験による緩衝材の除去性能を検討<br>② 緩衝材の条件・定置姿勢に着目した回収概念を小規模実験より抽出<br>③ 実規模を想定した緩衝材除去システムの概念検討を実施。                                                                                                       |
| 平成 22 年度 | 処分孔縦置き方式処分概念に基づく人工バリアシステムに対して、平面寸法を実規模スケールとした塩水を用いた緩衝材除去試験を実施。回収技術の設計に資するデータの取得。<br>① 予備試験による噴射ノズルユニット、スラリー吸引方法、塩水・緩衝材再処理（固液分離）方法の検討<br>② 平面方向実規模試験装置の設計・製作 図 2.1.1-1、図 2.1.1-2、図 2.1.1-3<br>③ 平面方向実規模緩衝材除去試験を実施 図 2.1.1-4                                     |



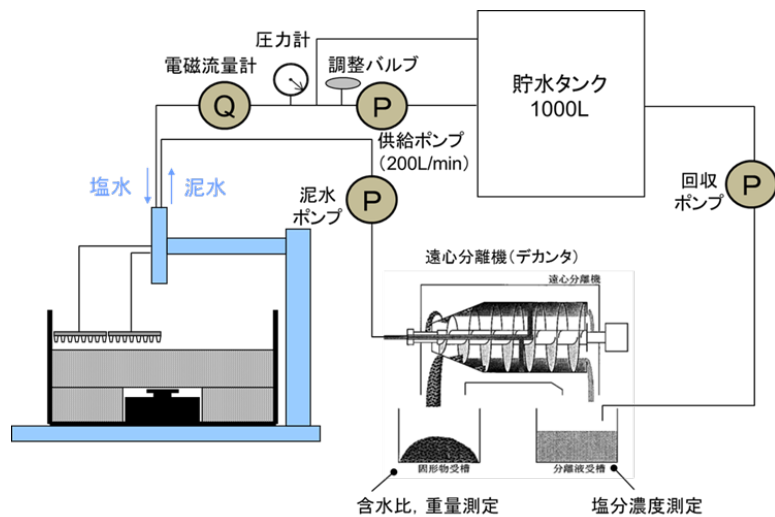


図 2.1.1-1 緩衝材除去システムの基本構成

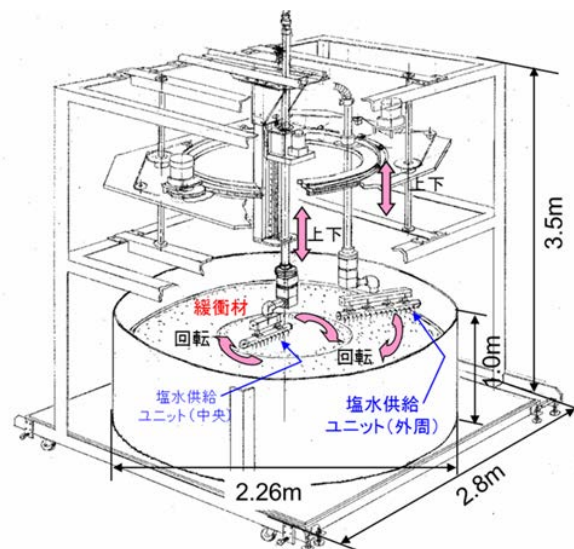


図 2.1.1-2 緩衝材除去システムの噴射・吸引設備基本構成図

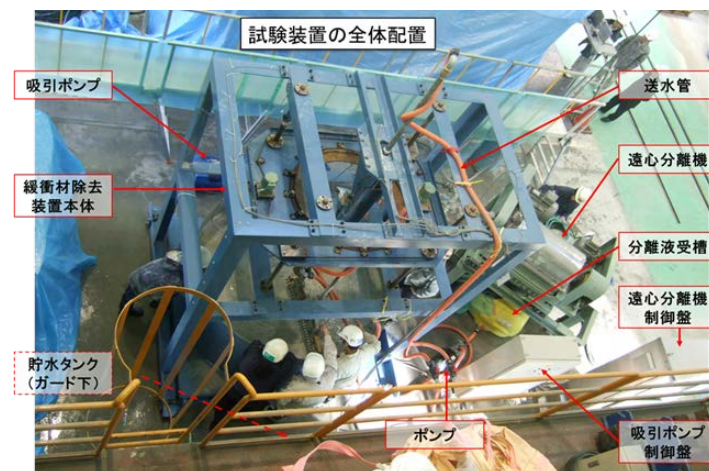


図 2.1.1-3 緩衝材除去システムの噴射・吸引設備全体配置案

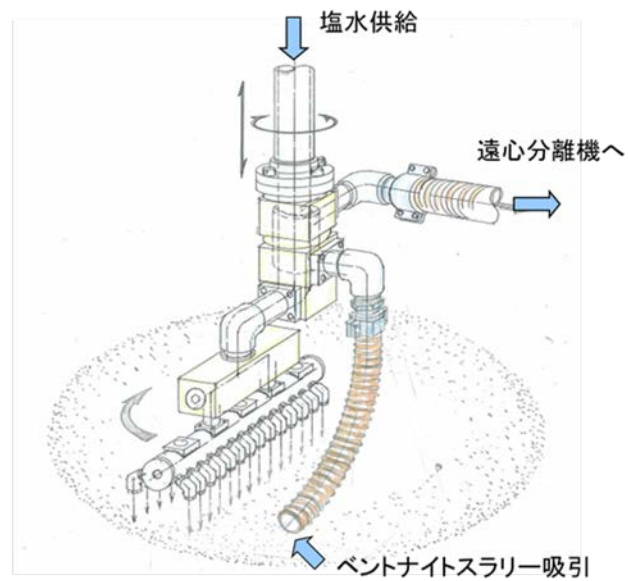


図 2.1.1-4 塩水噴射とスラリー吸引状況

## (2) 必要となる設計要件

地下環境における回収高度化実証試験に必要な回収装置全体の設計検討にあたり、地下環境の特性、回収実施場所の環境、廃棄体の回収に必要な設計要件を表 2.1.1-2 に取りまとめた。

表 2.1.1-2 試験に必要なとなる回収装置全体の設計要件

|    | 環境・状態・作業       |         | 回収装置の設計要件                  |
|----|----------------|---------|----------------------------|
| 1  | 地下環境           | 空間特性    | 移動、作業、運搬での制約寸法(重量)内であること   |
| 2  |                | 大気特性    | 気圧、温度、湿度、ガス等に対する耐久性があること   |
| 3  |                | 湧水特性    | 水圧、水温、鉱物、化学特性等に対する耐久性があること |
| 4  |                | 地熱特性    | 熱影響、冷却特性等に対する耐久性があること      |
| 5  |                | 鉱物特性    | 酸化還元、加水脱水反応性等に耐久性があること     |
| 6  |                | 化学特性    | 置換付加反応、脱離転位反応等に耐久性があること    |
| 7  |                | 伝播特性    | 遮へい性、反射性、吸収性等に耐久性があること     |
| 8  |                | 地山特性    | 地山に対してある程度強固耐久性があること       |
| 9  |                | 施工特性    | 暗間部、不陸路盤、湧水泥滓化に耐久性があること    |
| 10 | 回収環境<br>(放射線場) | 放射線管理区域 | 施設の安全性に悪影響を及ぼさないこと *       |
| 11 |                |         | 放射線に対して耐久性があること *          |
| 12 |                |         | 遠隔機能/装置に耐久性があること *         |
| 13 | 廃棄体回収          | 装置移動    | 順次回収作業ができること               |
| 14 |                | 対象物確認   | 廃棄体位置および状態が確認できること         |
| 15 |                | 上部埋戻材   | 廃棄体上部埋戻し材が除去できること          |
| 16 |                | 上部緩衝材   | 廃棄体把持部の緩衝材が除去・清掃できること      |
| 17 |                | 転倒防止    | 廃棄体の把持(転倒防止)ができること         |
| 18 |                | 拘束除去    | 廃棄体周りの拘束が除去できること           |
| 19 |                | 引揚げ取出し  | 廃棄体が引揚げ取り出しできること           |
| 20 |                | 容器格納    | 廃棄体を遮へい容器へ格納できること          |
| 21 |                | 運搬      | 廃棄体が運搬できること                |
| 22 | 処分孔処理          | 再利用     | 緩衝材の定置 ができること              |
| 23 |                | 埋戻し     | 処分孔が埋戻しできること               |

\* 回収高度化実証試験では、放射線に対する試験は対象外とする。

### (3) 回収作業全体の流れと必要な機能

試験に必要なとなる回収作業全体の流れを図 2.1.1-5 に整理した。このなかで、処分孔の埋戻し材除去、緩衝材の除去、廃棄体の把持引上げ、搬送までの一連の機能について検討した。

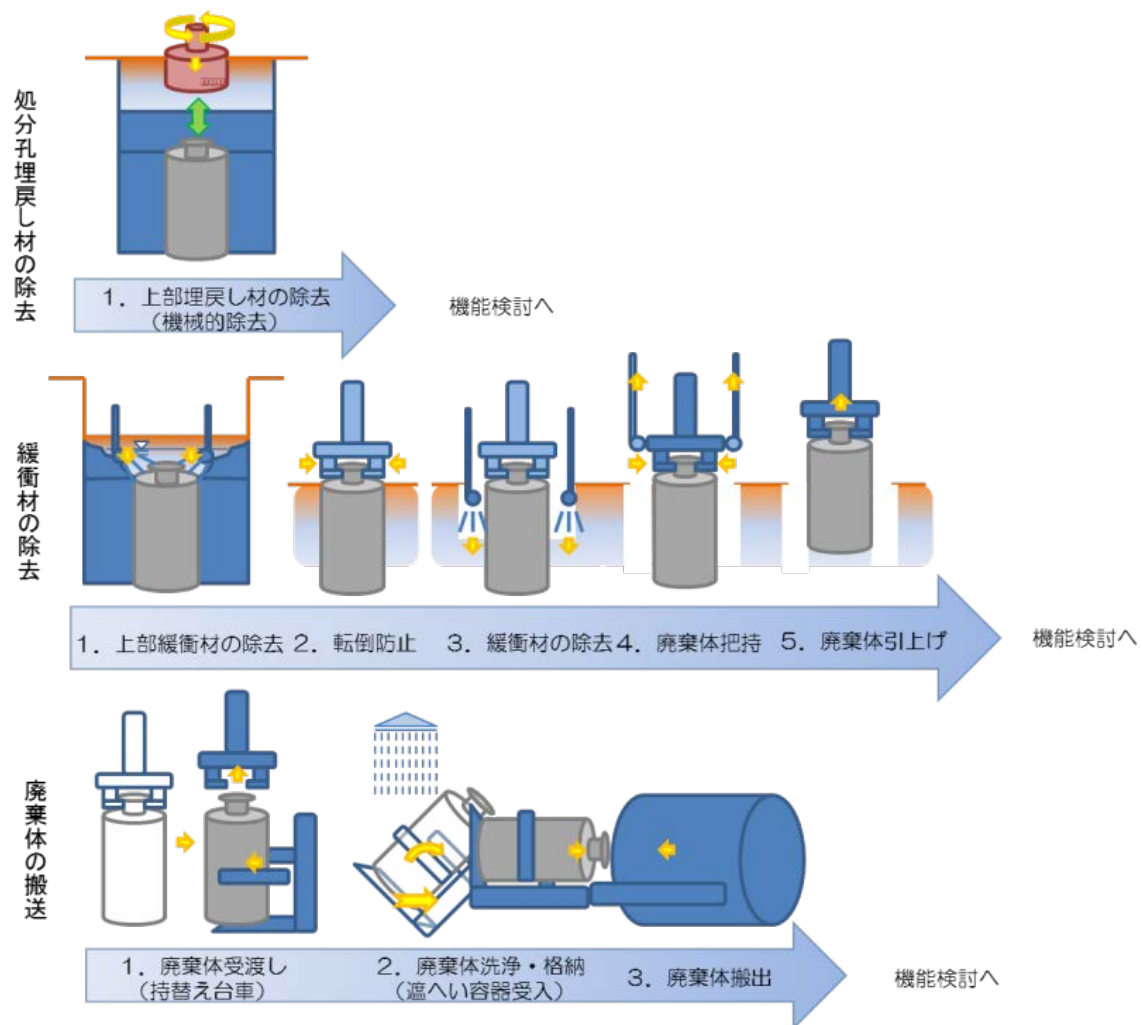
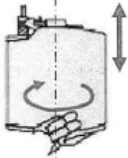
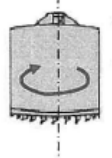
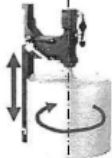
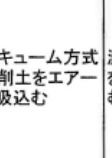
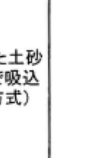
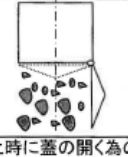
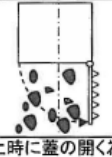
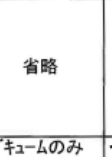


図 2.1.1-5 回収作業全体の流れ

### 1) 処分孔の埋戻し材除去機能

処分孔の上部埋戻し材除去方法については、廃棄体および緩衝材が定置条件のまま変化していない条件において、機械的な除去方法を考えた場合、廃棄体と機械との距離を制御できる場合は、機械的な除去方法が可能であり効率的である。また、打撃方式と切削方式を比較した場合、機械的除去による衝撃などが廃棄体に直接的・間接的に影響を与えないことから切削方式が望ましいものとする。

表 2.1.1-3 切削方式による掘削技術の例

| 主な方式          | 乾式掘削方式(回転+上下動作)                                                                                                                          |                                                                                                                    |                                                                                                      |                                                                                    | その他                                                                                       |                                                                                     |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|               | アースドリルバケット                                                                                                                               | オーガスクレーン                                                                                                           | コアバレル                                                                                                | コアドリルバケット                                                                          | 乾式                                                                                        | 湿式                                                                                  |
| 外観形状          |                                                         |                                   |                     |  |        |  |
| 放土方式          |                                                         |                                   |                     |  |        |  |
| 特徴<br>(長所・短所) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・排土時に蓋の開く為のスペースを考慮。</li> <li>・先端の爪・蓋形状を考慮しないと掘り残しが多く出る。</li> <li>・蓋の開閉はバケットの上部のレバー(手動)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・スクレーン外部に付着した土砂を取り除くのに大変な機械化が難しい。</li> <li>・掘削した土砂を確実に撤去するのが難しい。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・排土時に蓋の開く為のスペースを考慮。</li> <li>・蓋の開閉はバケットの上部のレバー(手動)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・中央部は土砂を保持する蓋がないことから上げる時にこぼれる。</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・バキュームのみでは掘れない。</li> <li>・掘削機能との組合せが難い。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・泥土の処理が大変である。(ポリウムが多い)</li> </ul>            |

### 2) 緩衝材の除去及び廃棄体の把持機能

廃棄体周りの緩衝材の拘束除去や廃棄体の把持引上げについては、緩衝材の拘束除去作業中の廃棄体転倒防止を含めて検討する必要があることから、廃棄体の転倒防止機能、緩衝材の除去機能、廃棄体の引上げ機能を一体とした装置開発をすることが有効と考えた。廃棄体の転倒防止は、把持引上げ機能の前段階として機能する装置とした。この際、廃棄体把持部の位置、距離、傾きを正確に情報制御して仮把持することが必要で、把持部が清掃されていることが重要である。

把持部の除去には、廃棄体に損傷を与えない除去方法が必須であることから、ある程度柔質な接触圧にて緩衝材を除去する必要がある。対応技術として塩水噴射による方法とした。

把持技術には、把持部に接近する速度や把持角度および把持力などの、既往の技術を応用した探査およびセンシング技術の高度化が必要となる。たとえば、把持したワイングラスにワインを注ぐロボット技術等の先端技術精度が必要かどうかを検討することも重要と考え、次の設計段階にて検討することとした。

### 3) 噴射部及び把持部の昇降(伸縮)機能

廃棄体の転倒防止および引上げにおいては、緩衝材除去作業中に廃棄体が揺れることで、装置との接触損傷を防止することを防止するため、振れ止め機能を有するガイド引揚げ機構が必要となる。廃棄体定置時の伸縮方法としては、既往の研究より、ワイヤー方

式による延長伸縮自在性と振れ止めガイドレールを兼ね備えた形式である、テレスコピック機構などが提案されている。しかし、引上げ時の把持と定置時の開放では、目標座標点への接近精度が全く異なることから、本検討業務における伸縮機構には、単身油圧シリンダー方式による検討を進めることとした。

#### 4) スラリー吸引機能

塩水を用いた緩衝材の除去技術では、塩水によりスラリー化された緩衝材を除去する装置が必要となる。汲み上げ方式や吸引方式などが考えられるが、スラリー化された緩衝材は、その濃度により粘性度が異なることから、除去方式に対して適切なスラリー濃度を維持すると共に、所定の能力を要する装置により除去(吸引)搬送する必要がある。除去部での作業性や装置サイズを考慮して、吸引および流体搬送方式とした。

#### 5) 塩水リユース機能

搬送された緩衝材スラリーは、塩水と緩衝材に分離処理され、そのうち、塩水は塩分濃度調整等を行った後に緩衝材除去へ再利用する仕組みとした。分離した緩衝材は、脱水固化することで体積を圧縮し運搬処理効率を上げるものとした。一方、再利用する為の塩水は、地下環境や緩衝材に含まれる化学成分との反応特性を考慮し、塩分濃度や温度などが調整管理できるものとして設計検討を行った。

また、地下環境での回収性能を高めるためには、緩衝材除去技術の基本要素である塩水にもロバスト性を持たせる必要があると考え、リユースする塩水の品質にある程度柔軟な幅を持たせることを考慮して設計検討を進めた。

#### 6) 廃棄体の引上げと搬送機能

引上げる廃棄体は、安全に遮へい格納された後に搬送されなければならない。処分孔竖置き方式においては、引上げ時の廃棄体接触損傷の防止や処分孔等への落下などを防止する必要がある。また、搬送前には、廃棄体の健全性の確認を行う必要がある。廃棄体の引上げ行為、健全性確認、および遮へい格納行為を連続的同時に行うことは、装置の複雑化や巨大化につながると考え、空間制限を考慮してこれら二つの行為を分離して行うこととした。

廃棄体を遮へい格納する直前では、廃棄体表面に付着した緩衝材や除去に使用した塩水成分および地山環境に依存する化学成分などの廃棄体以外の付着成分を除去し、廃棄体の健全性を評価した後に格納容器へ納め、搬送基準に合致させた運搬を行うことになると想定した。この範囲の研究分野においては、明確にすべき課題が多く残されていることから、今後の検討課題とした。

#### (4) 回収に必要となる装置の設計検討

これまでの機能検討結果を基に、地下環境での廃棄体を回収するための緩衝材除去に係る装置の設計検討を行った。以下に各装置の関係を図 2.1.1-6 に示す。



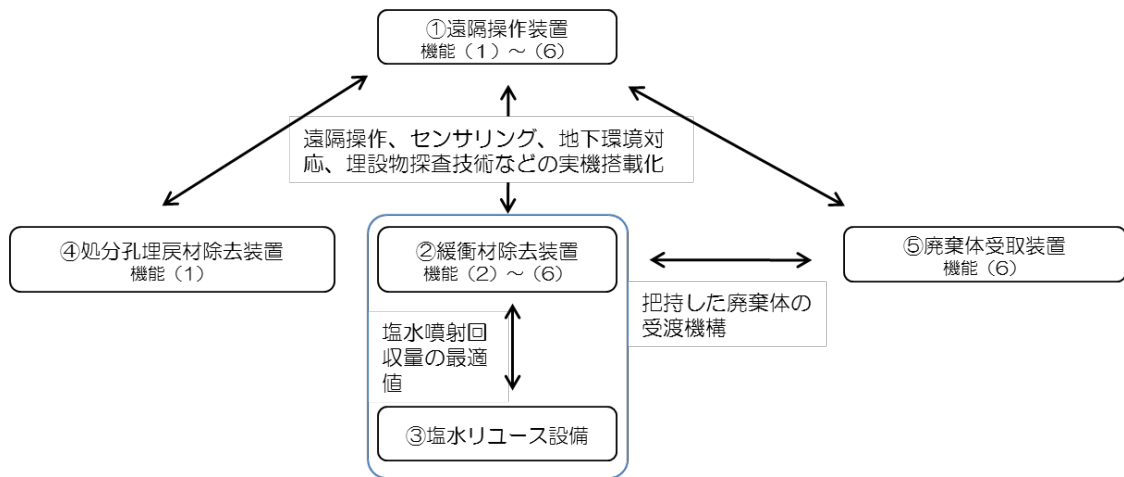


図 2.1.1-6 廃棄体を回収するための各装置の関係

#### 1) 処分孔埋戻材除去装置

本装置は、処分孔縦置き方式において処分孔上部埋戻し材を除去する方法として、効率的に除去するために、廃棄体に損傷を及ぼさない範囲で切削除去を行うための装置である。

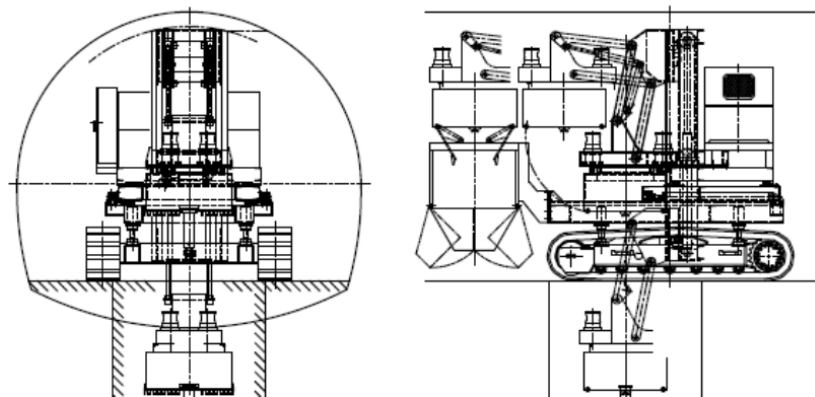


図 2.1.1-7 処分孔埋戻材除去装置

処分孔埋戻材除去装置は、①走行台車、②掘削位置芯出し装置、③油圧ユニット、④制御盤、⑤アースドリル昇降装置、⑥アースドリル俯仰装置、⑦アースドリルバケット、⑧掘削除去物仮置措置から構成した。この他、遠隔操作装置としては、モニター・センサリング装置および制御用通信設備などを搭載することとした。

## 2) 緩衝材除去装置

本装置は、廃棄体に対して安全に緩衝材の拘束を除去し、廃棄体を引上げる最重要機能を有する装置である。

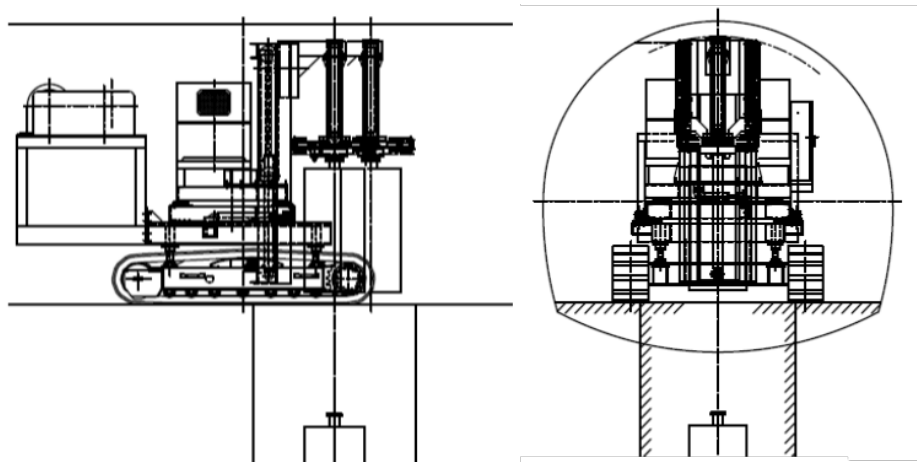


図 2.1.1-8 緩衝材除去装置

緩衝材除去装置は、①走行台車、②把持引揚げ位置芯出し装置、③油圧ユニット、④制御盤、⑤廃棄体把持・引上げ装置、⑥廃棄体把持部引揚げ装置、⑦廃棄体チャック装置、⑧噴射吸引装置、⑨噴射スラリー吸引部昇降装置、⑩噴射ポンプおよび再処理装置、⑪噴射用塩水水槽などから構成した。この他、遠隔操作装置としては、モニター・センサリング装置および制御用通信設備などが搭載することとした。

また、廃棄体の回収作業にあたっては、緩衝材の拘束圧を除去することが必須の要件であることから、地下環境での実規模実証試験に必要となる装置として、本装置を開発対象とした。



### 3) 廃棄体の受取搬送装置

本装置は、引上げた廃棄体を、把持引上げ位置から廃棄体洗浄および遮へい格納・搬送準備を行うに所定の位置まで運搬することを目的とした装置である。

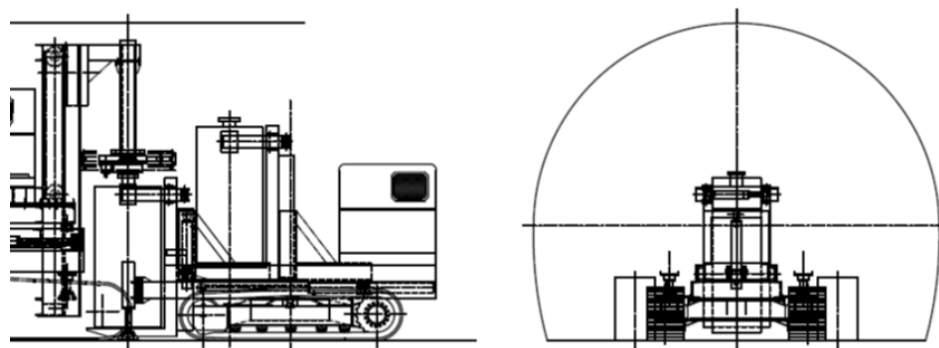


図 2.1.1-9 廃棄体受取搬送装置

廃棄体の受取搬送装置は、①走行台車、②スライドガイド、③スライドフレーム、④昇降把持フレーム、⑧受取部昇降装置、⑨廃棄体チャッキング装置、⑩油圧ユニットなどから構成した。この他、遠隔操作装置としては、モニター・センサリング装置および制御用通信設備などが搭載されることとした。

以上、地下環境における廃棄体回収作業の流れから、実規模で行う回収技術の実証試験に必要な回収装置全体の設計検討を行い、3つの装置概念を示した。「処分孔埋戻し材除去装置」は既往の建設技術にて開発が可能と考えられ、試験対象とはしないこととした。「緩衝材除去装置」は緩衝材除去に必要な機能の検討から、試験に必要な装置として位置付けた。ここでの緩衝材除去装置の概念を基に、次章に示す基本設計を進めることとした。「廃棄体搬送装置」は廃棄体回収の一連の作業から、必要な装置として概念を提示した。ここでは既往の搬送定置装置の研究成果の応用が可能であると考え、試験対象にしないこととした。

## (5) 基本設計に係るシステム構成・設計条件・要求機能および要求性能

基本設計に係る回収実施場所、共試体等の仕様および機器構成をを以下に示す。なお、要求機能および性能要求については、各設備の詳細を次項以降に示す。

### 1) 緩衝材除去装置のシステム構成

緩衝材除去システム構成並びに設備および装置名称を以下に示す。表 2.1.1-4、図 2.1.1-10 参照。

表 2.1.1-4 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<br>(機能) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・油圧ユニット</li> <li>・走行装置</li> <li>・昇降装置</li> <li>・把持装置</li> <li>・塩水噴射・スラリー吸引装置</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・吸引ポンプ</li> <li>・噴射ポンプ</li> <li>・一時回収槽</li> <li>・固液分離槽</li> <li>・成分調整槽</li> <li>・水供給槽</li> <li>・塩水補給槽</li> <li>・塩水貯留槽</li> <li>・緊急貯留槽</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・操作制御装置</li> <li>・操作監視装置</li> </ul> |

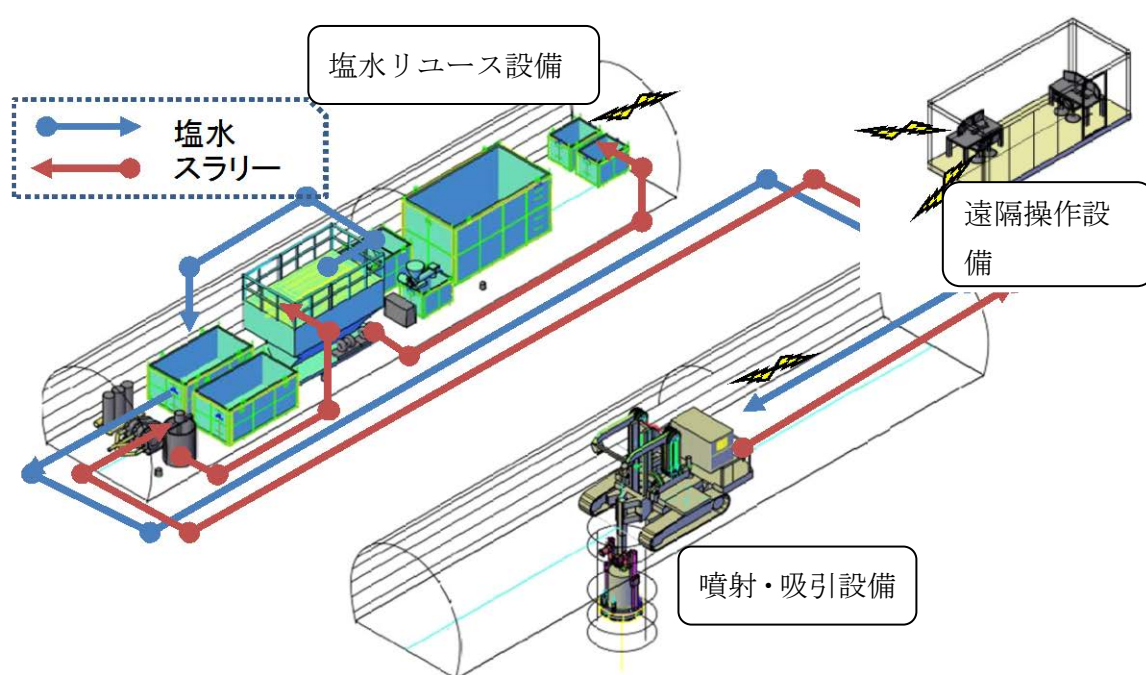


図 2.1.1-10 緩衝材除去システムの全体構成

## (6) 想定試験実施場所、共試体等の仕様

### 1) 緩衝材

緩衝材除去に係わる回収対象となる緩衝材の仕様を表 2.1.1-5 示す。また、除去対象となる人工バリアの製作範囲を図 2.1.1-11 に示す。

表 2.1.1-5 緩衝材の仕様

| 項目   | 条件                                  |
|------|-------------------------------------|
| 配合   | ベントナイト:珪砂=70:30 (珪砂は 3 号と 5 号の均等配合) |
| 乾燥密度 | 1.6Mg/m <sup>3</sup>                |
| 飽和度  | 約 50%                               |
| 膨潤圧  | 考慮しない                               |
| ガス等  | 考慮しない                               |

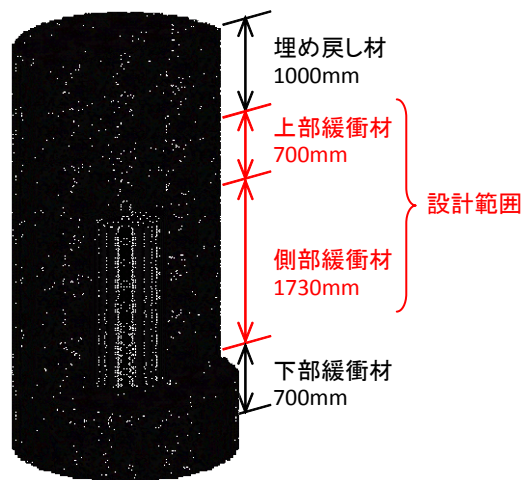
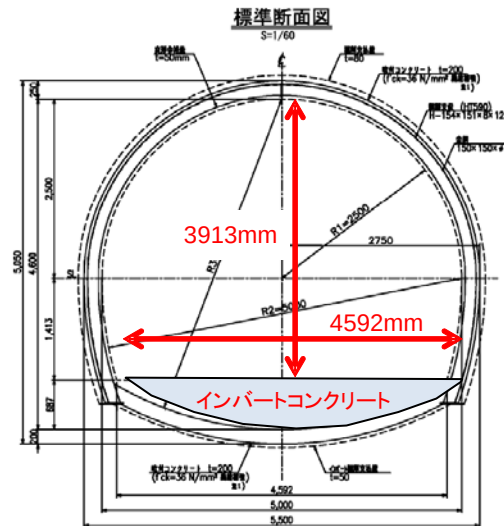


図 2.1.1-11 緩衝材の設計範囲

## 2) 地下環境の設定

回収実施場所（坑道）の仕様（寸法）は、「第 2 次とりまとめ」における軟岩系モデル（処分孔縦置き方式）図 2.1.1-12 とした。なお、処分坑の内径はφ2220mm とした。



出典：JAEA ホームページ  
より、一部加筆

図 2.1.1-12 坑道の仕様

### 3) 廃棄体（模擬オーバーパック）の仕様

回収対象となる廃棄体（模擬オーバーパック）の仕様を表 2.1.1-6 示す。

表 2.1.1-6 廃棄体（オーバーパック）の設計条件

| 項目   | 条件                           |
|------|------------------------------|
| 重量   | 6t                           |
| 寸法   | φ 820x1730mm                 |
| 把持部分 | 円筒頂部に“工型”突起部                 |
| 把持条件 | 上部からの吊上げ可能、側部転倒・横倒し不可        |
| 埋設深さ | 廃棄体(把持部除く)上面から作業盤まで距離1,700mm |
| 状態   | 定置直後のまま、維持される(ベースケース)        |

## 2.1.2 塩水噴射・吸引設備の開発

塩水噴射・吸引設備は、塩水噴射・スラリー吸引装置、走行装置、昇降装置、把持装置および油圧ユニットより構成される。表 2.1.1-4、図 2.1.1-10 参照。

以下に各装置等の設計および製作状況を示す。

### (1) 塩水噴射・スラリー吸引装置の基本設計

塩水噴射・スラリー吸引装置は、緩衝材に塩水を噴射し除した緩衝材スラリーを吸引する機能を有する。

## 1) 設計条件

塩水噴射・スラリー吸引装置の設計条件を以下のとおり定めた。

- 装置の外形は処分孔径 (2220mm) に入ること
- 対象とする緩衝材は乾燥密度  $\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$ 、飽和度  $S_r=\text{約 } 50\%$
- 1ノズルで塩水噴射による緩衝材除去試験を噴射時間 12 分・圧力 0.6MPa で直径約 50mm、深さ約 40mm の緩衝材の除去が行えたことから噴射圧力を 0.6Mpa とした。。
- 噴射に使用する塩水量は、循環して利用することを考慮して  $15\text{m}^3/\text{h}$  と設定した。これは坑道 (トンネル) における一般的な水処理能力である  $30\text{m}^3/\text{h}$  程度に対し、ある程度の余裕をみて  $15\text{m}^3/\text{h}$  と設定した。
- ノズル総数は、塩水量  $15\text{m}^3/\text{h}$  で、圧力 0.6MPa (流量  $7.82\text{L}/\text{min}$ ) のときで 32 個とする。  
 $15\text{m}^3/\text{h} / 7.82\text{L}/\text{min} \text{ (at } 0.6\text{MPa)} = 32 \text{ 個}$
- 廃棄体の拘束を除去するため、装置を昇降するための溝幅が 200mm であるので、半径方向に塩水噴射ノズルを 4 個配置する。
- 吸引配管への塩水噴射ノズルの配置は 1 ブロックあたり 4 個で全体で 8 ブロック有ることから 32 個とした。1 ブロックあたり  $45^\circ$  の範囲の緩衝材を除去する。そのため、塩水噴射ノズル (装置全体) を揺動させ、緩衝材を連続して除去する。
- 下向きの塩水噴射ノズル半径方向の 4 個を内外に 2 個ずつ分け、内配管と外配管の 2 系統とし、水流の方向や勢いの調整が可能とする。
- 廃棄体上部の緩衝材は、ドーナツ状に除去した後、側面に向いた塩水噴射ノズルにより残りの中央部を除去する。

噴射・吸引設備の装置構成を図 2.1.2-1 塩水噴射・スラリー吸引装置の基本仕様を表 2.1.2-1、構成を図 2.1.2-2 に示す。

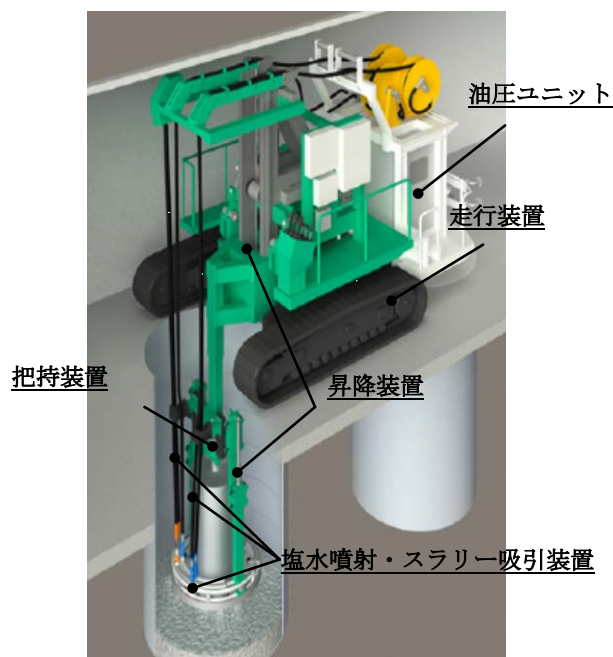


図 2.1.2-1 噴射・吸引設備の装置構成

表 2.1.2-1 塩水噴射・スラリー吸引設備の基本仕様

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

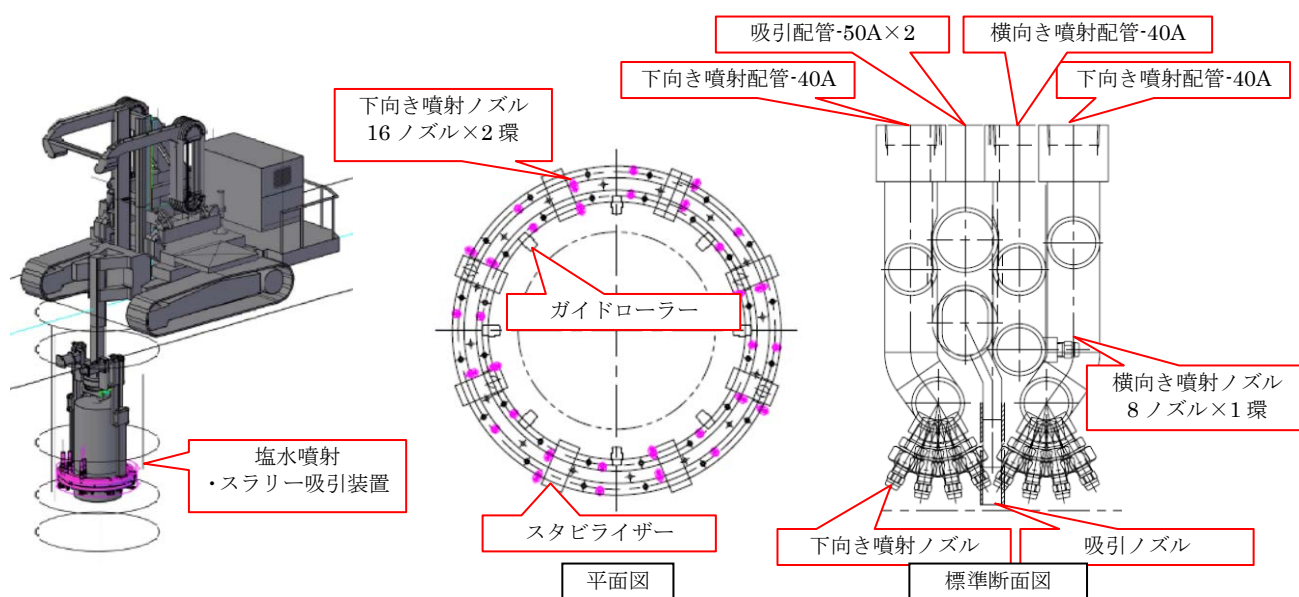


図 2.1.2-2 塩水噴射・スラリー吸引装置の構成

## 2) 動作条件

塩水噴射・スラリー吸引装置の動作に必要な条件を以下に示す。

- ・ 緩衝材の最小除去幅は、装置の噴射・吸引ノズル幅を考慮し 200mm とした。
- ・ 廃棄体に装置が接触するなど廃棄体の安全に関わる影響を考え、廃棄体の側面より 100mm の範囲は積極的に緩衝材除去を行わない。
- ・ 1 ノズルが緩衝材を除去できる噴射領域は直径 50mm と設定する。

- 緩衝材上面から塩水噴射ノズルまでの距離は 1cm とする
- 塩水を滞留させることにより緩衝材を浸漬崩壊させる
- 噴射ノズルからの水流により緩衝材除去を促進させる
- 緩衝材をスラリー化し、スラリー流体として吸引する
- 緩衝材除去の連続動作を行う
- 揺動範囲は $\pm 45^{\circ}$  で、速度は 2 分とする

塩水噴射・スラリー配管装置の設計図を図 2.1.2-3 に示す。

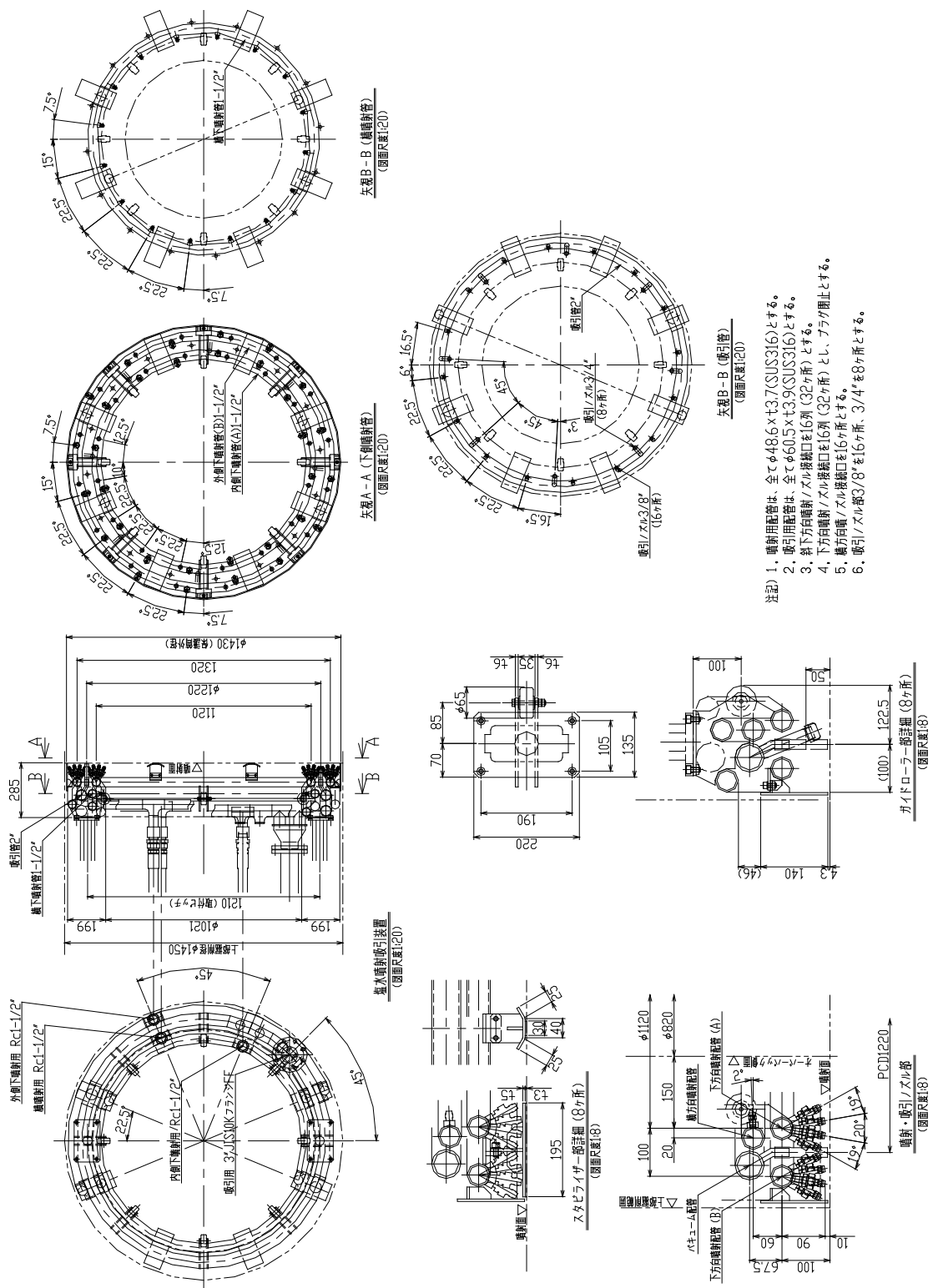


図 2.1.2-3 塩水噴射・スラリー吸引装置組み立て図



### 3) 塩水噴射・スラリー吸引装置の製作

製作状況をに示す。なお、装置の動作確認については、2.1.5 に記載する。



図 2.1.2-4 塩水噴射・スラリー吸引装置の製作状況

## (2) 昇降装置の基本設計

昇降装置は、位置調整、把持昇降、塩水噴射・スラリー吸引装置昇降、塩水ホース巻き取りおよび塩水噴射・スラリー吸引装置揺動（旋回）機構を有する。

### 1) 設計条件および設計仕様

#### a. 位置調整機構

位置調整機構は、廃棄体周囲の緩衝材を除去する前に、廃棄体を仮把持し、除去作業時の振れ止めを行う。仮把持動作においては、廃棄体の把持部に対して、緩衝材除去装置の精密な位置調整が必要となるが、坑道内移動を目的とした走行装置では、微妙な位置実現することが難しいため、緩衝材除去装置側の把持機構が微細な動きが出来るよう、把持専用に平面位置調整機能を設けることとした。また、走行装置の作業地盤の傾きについても考慮し、上下スライド用マスト部に角度調整機能を持たせることにした。

#### (a) 設計条件

- ・ 把持位置に合わせて、装置の位置調整を行えること。

#### (b) 設計仕様

- ・ 前後スライド量：前方 500mm、後方 100mm
- ・ 左右スライド量：車体中心を基準にして左右方向にそれぞれ 100mm

- マスト前後角度調整量：前後左右方向へそれぞれ約 5 度

#### b. 把持昇降機構

回収対象の廃棄体周辺の緩衝材除去を行った後、廃棄体を把持しながら、処分坑道地盤より高い位置まで引上げる機能をもつものとした。

##### (a) 設計条件

- 把持する廃棄体の埋設条件は、廃棄体上面を処分孔の地盤より 1700mm 下とし、廃棄体上部に高さ 200mm の把持用突起部を製作した。
- 廃棄体の自重は約 6t とする。
- 廃棄体底部を処分坑道地盤より高い位置に引上げることが可能なこと。
- 緩衝材除去時は、廃棄体の振れ止め機能も兼用する。

##### (b) 設計仕様

- 緩衝材除去時は、廃棄体の振れ止め機能も兼用する。
- 機構方式：昇降機能付きマスト＋伸縮角ロッド  
昇降方式（1 段目）：油圧シリンダー＋チェーン方式  
昇降方式（2 段目）：油圧シリンダー方式 1, 2 段目は同時伸縮可能方式
- 昇降速度（引上げ動作時について設計）  
昇降速度（1 段目）：約 30 秒（マスト上げ時）  
昇降速度（2 段目）：約 30 秒（角ロッド上げ時）
- 昇降ストローク  
マスト部：2600mm  
角ロッド部：1000mm
- 引上げ力：約 13ton （廃棄体の周辺摩擦力、その他想定外の外力を考慮）

#### c. 塩水噴射・スラリー吸引装置昇降機構

塩水噴射およびスラリー吸引を行う配管部分を、緩衝材除去作業の進行に合わせて降下させていく機能を有し、緩衝材除去終了後において速やかに噴射部を引上げる機能を有するものとした。また、塩水噴射部は揺動しながら、緩衝材に塩水を吹きかける機構動作も含まれる。

##### (a) 設計条件

分坑道地盤下 1700mm に埋設されている廃棄体（円筒形、外径 φ 820mm、高さ 1730mm）の下端近くまで、塩水噴射部を下げること。

- 廃棄体全周をくまなく塩水噴射することが可能であり、塩水噴射部全体を揺動させること。

##### (b) 設計仕様

- 昇降ストローク
- 伸縮方式：2 段伸縮方式（個別シリンダー＋同一レバー操作式）
- 昇降ストローク：（1 段目）725mm（2 段目）925mm、全体 1650mm
- 昇降速度：60 秒以内（1 段・2 段とも）合計 120 秒以内

- 昇降力：約 400 k g（塩水噴射部重量の約 2 倍）  
（廃棄体への接触による損傷を考慮）
- 揺動角度：左右 45 度揺動（270 度揺動モーター×1/3 ギア減速）
- 揺動速度：1 min<sup>-1</sup>（周速度≒3.5m/min）

d. 塩水ホース巻き取り機構

ホースリール機構と移動シープ機構を併せ持つ方式とした。

(a) 設計条件

- 塩水供給条件  
供給塩水圧力：最大 1.0Mpa  
供給塩水量：下向き側最大 30m<sup>3</sup>/hr、横向き側最大 7.5m<sup>3</sup>/hr
- 塩水吸引条件
- 真空圧（負圧）
- 吸引塩水量：噴射塩水量より多いものとする

(b) 設計仕様

- 塩水噴射ホース仕様  
品名：グラウトホース  
仕様：耐圧：5.0Mpa・ホース内径：35mm・本数：下向き 2 系統、横向き 1 系統
- 塩水吸引ホース仕様  
品名：補強コード入りサクションホース  
仕様：耐圧：5.0MPa・口径：80A・本数：1 系統  
昇降装置の設計図を図 2.1.2-5、図 2.1.2-6、図 2.1.2-7 に示す。

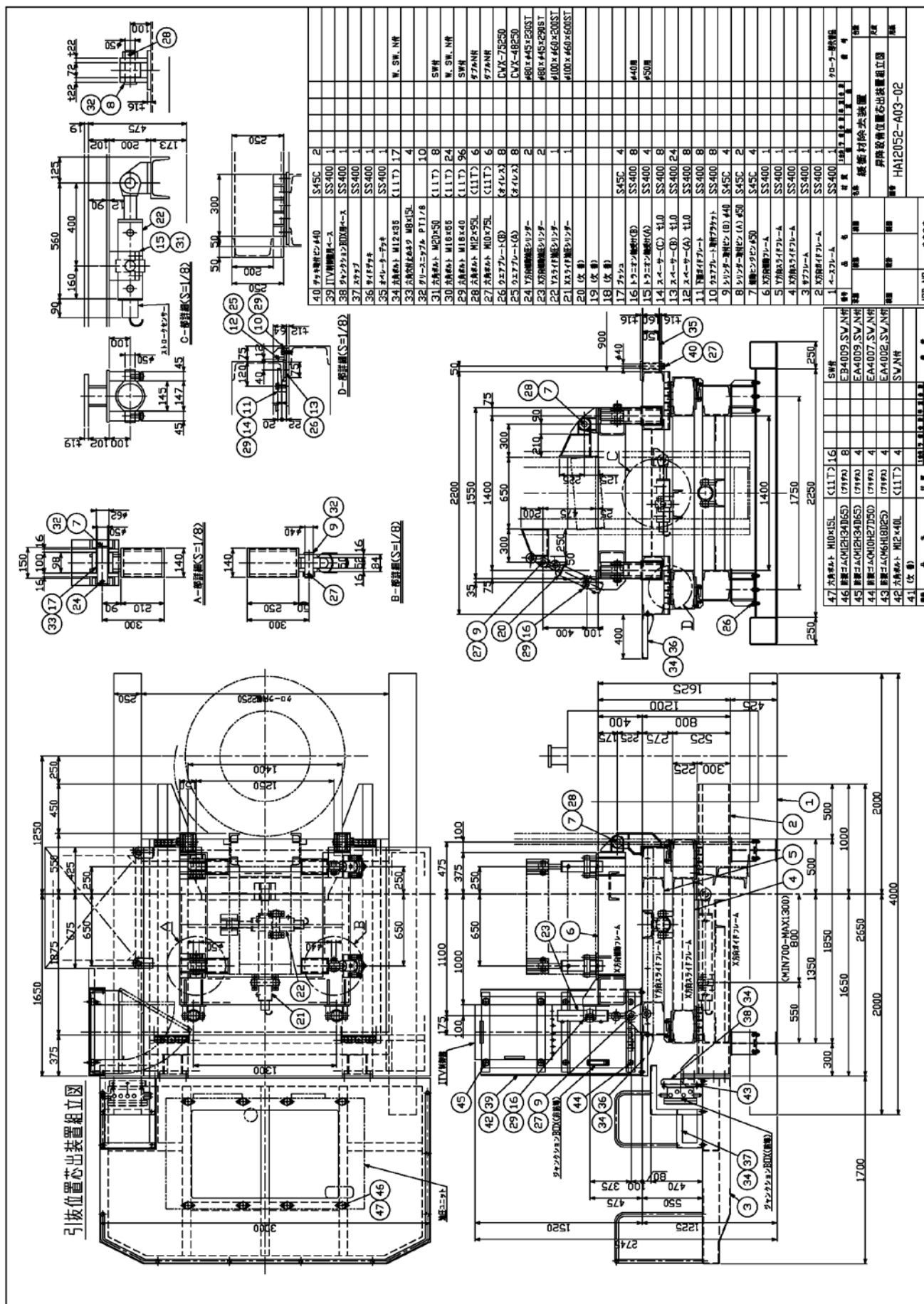


図 2.1.2-5 昇降装置設計図

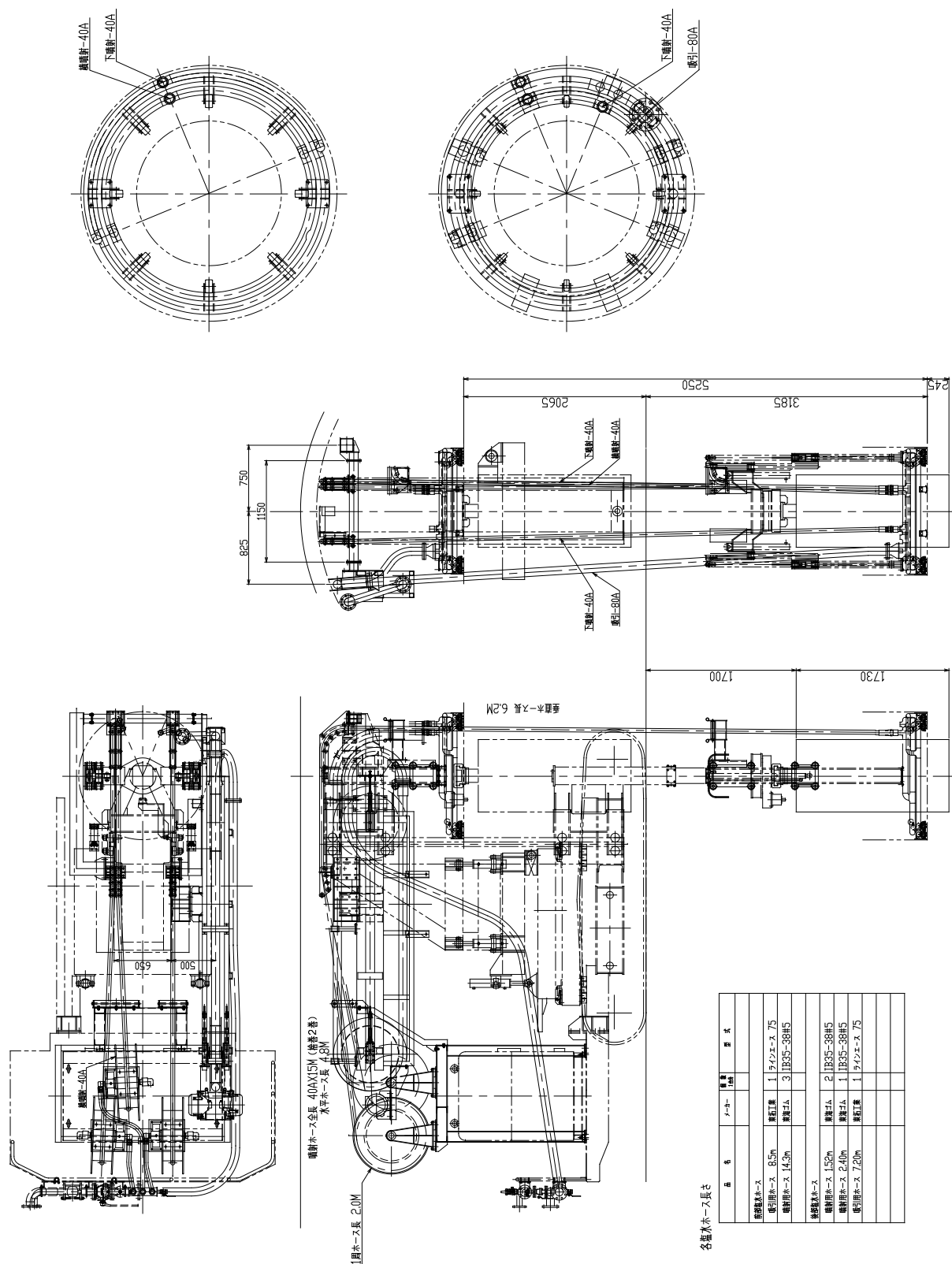


図 2.1.2-6 塩水ホース巻き取り装置設計図

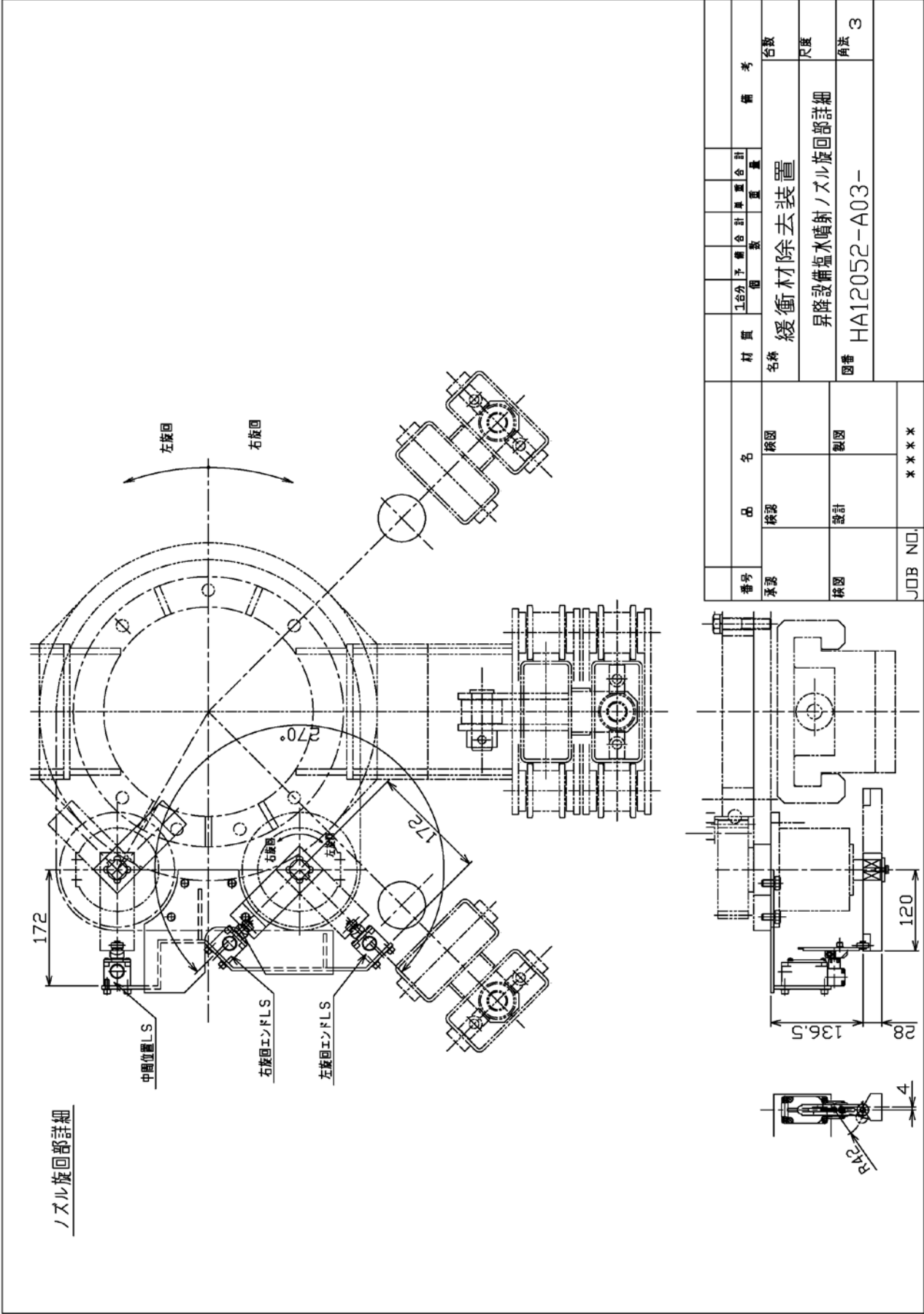


図 2.1.2-7 噴射ノズル旋回部設計図



## 2) 昇降装置の製作

製作状況を図 2.1.2-8 示す。なお、装置の動作確認新については、後項にて記載する。



図 2.1.2-8 昇降装置の製作状況

## (3) 把持装置

廃棄体把持は、廃棄体上部のある把持部材（フランジ型突起）のくびれを、2本の爪で挟みこみ、引っ掛ける方式とした。

### 1) 設計条件

- 廃棄体把持部のくびれを挟みこむことができる機構
- 最大引上げ力で破損しない強度・構造

### 2) 設計仕様

- 機能方式：廃棄体把持部（フランジ型突起部）引っ掛け方式
- 把持方式：2本の爪による挟みこみ（油圧シリンダーによる駆動）
- 動作ストローク：125mm
- 最大引上げ力設定値：13t
- 装置概算重量：約 100kg

把持装置の設計図を図 2.1.2-9 に示す。

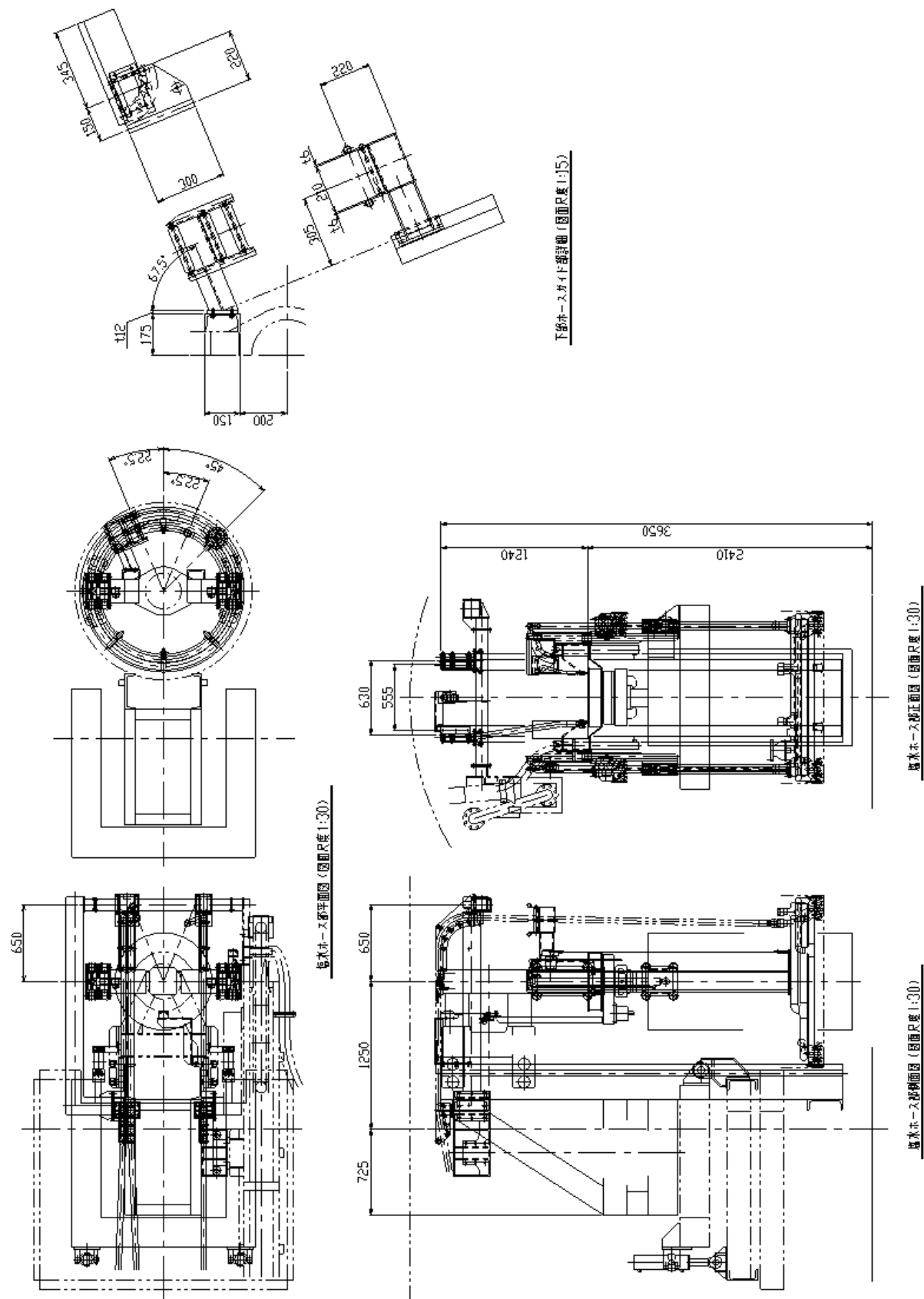


図 2.1.2-9 把持装置設計図



### 3) 把持部の製作状況

把持部の製作状況をに示す。なお、装置の動作確認新については、後項にて記載する。



図 2.1.2-10 把持部の製作状況

### (4) 走行装置

装置の移動方式は、走行性・安全性およびメンテナンス性を考慮してクローラー方式とした。

#### 1) 設計条件

- 処分坑道内の路盤において「遠隔操作」で支障なく決められた作業位置までに自走走行することができること。
- 坑道内（中心部内最大幅 5m）想定路盤において、走行により位置の移動ができること。
- 坑道内における若干の不陸（凹凸）路盤でも、支障なく走行できること。
- 坑道内又は坑道までの搬入路における傾斜路面を想定し斜面走行できること
- 坑道内での旋回（スピントーン＝両側のクローラを同時に逆方向に動作）は不要とする。基本的には、片側のクローラを動かし緩やかに旋回するピボットターン動作とする
- 走行は狭小な坑道内であるため低速度ではあるが、万が一の時に備え「微速動作」が行えるように配慮する。

#### 2) 設計仕様

装置の設計仕様を表 2.1.2-2、把持装置の設計図を図 2.1.2-11 に示す。

表 2.1.2-2 走行装置設計条件一覧

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

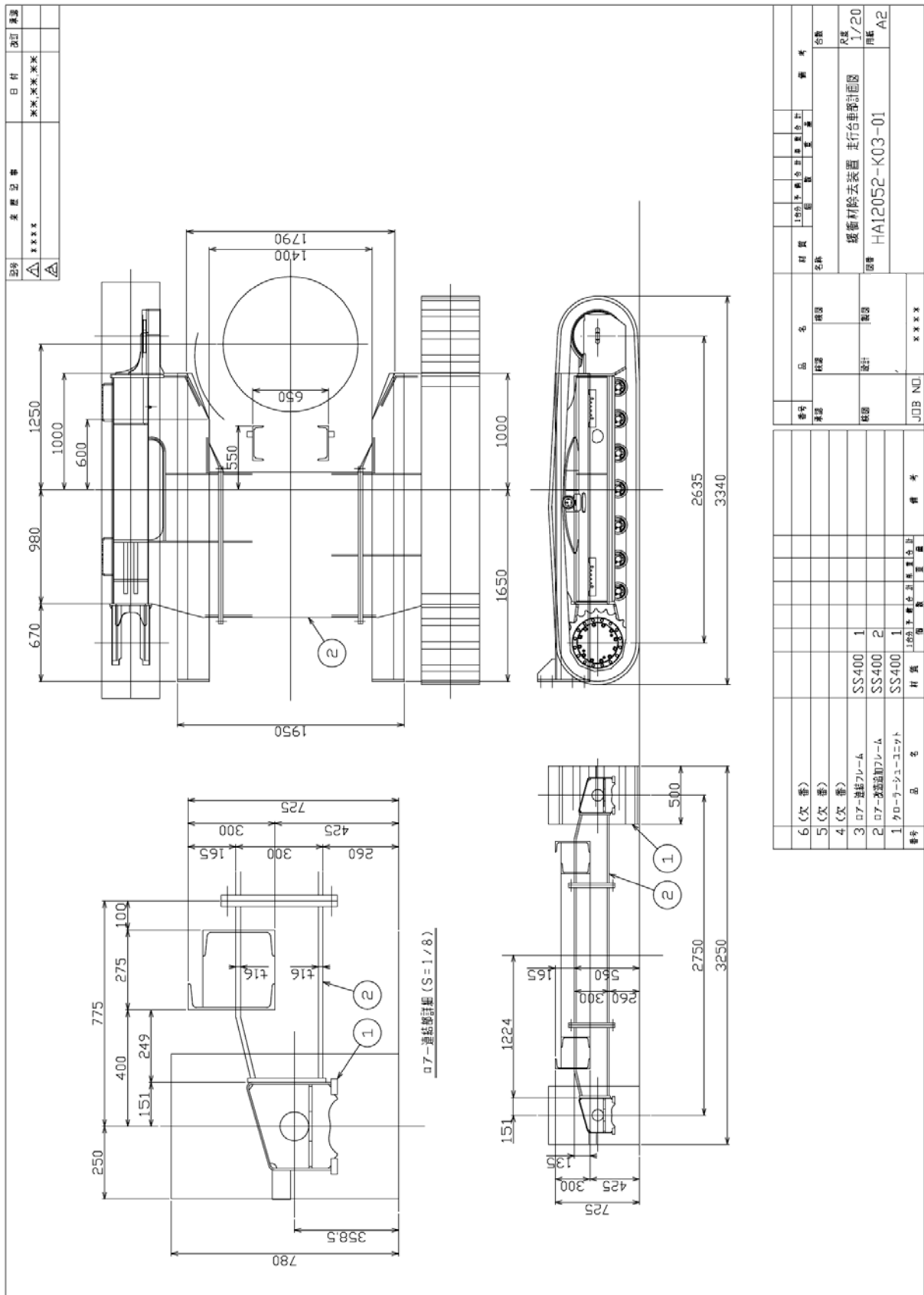


図 2.1.2-11 駆動設備走行部の設計図

### 3) 駆動装置の製作状況

製作状況を図 2.1.2-12 示す。なお、装置の動作確認新については、後項にて記載する。



図 2.1.2-12 走行部製作状況

### (5) 油圧ユニット

#### 1) 油圧ユニットの設計条件

油圧ユニット装置ならびに油圧回路の設計条件を以下に示す。

##### a. 前提条件

走行装置、昇降装置および把持装置の機能を確保し、所定の動作速度等を確保することを前提に動力源となる油圧ユニット装置の設計を実施した。

##### b. 使用方法及び使用条件

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

##### c. 油圧ユニットの要求機能

###### ①速度調整機能

必要な部分は速度調整（微速）及び各装置の組み合わせ動作が出来るようにする。

###### ②噴射部揺動機能

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

###### ③操作系油圧回路

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

#### ④塩水噴射・スラリー吸引装置昇降機能

塩水噴射・スラリー吸引装置の昇降回路には、油圧シリンダによる伸縮回路に加えて、下降時に自重により自然降下が起きないように「逆止弁」を設置した。

#### d. 設計条件

前提条件及び使用条件および要求機能等を表 2.1.2-3 の設計条件に示す。

表 2.1.2-3 油圧ユニット装置設計条件一覧

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

## 2) 油圧回路にかかわる製作設計

### a. ポンプ吐出量の検討

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

### b. 速度調整機能

必要な部分は速度調整（微速）及び各装置の組み合わせ動作が出来るようにした。

c. 塩水噴射・スラリー吸引装置揺動機能

塩水噴射・スラリー吸引装置揺動動作については、リミットスイッチを利用して電気回路と併せて反復運動させた。

d. 操作系油圧回路

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

e. 塩水噴射・スラリー吸引装置昇降機能

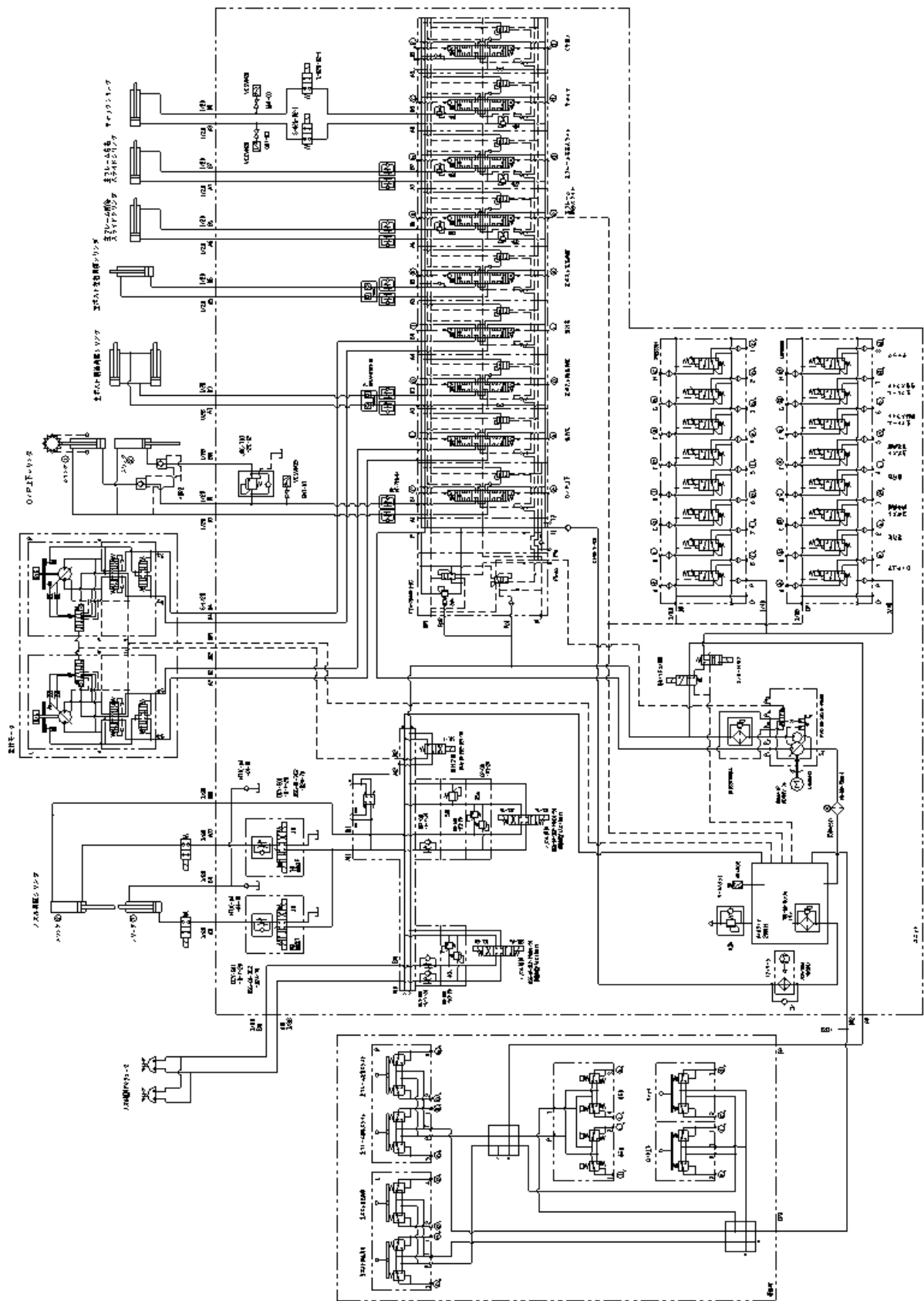
塩水噴射・スラリー吸引装置昇降回路には、油圧シリンダ伸縮制御に加えて、下降時に自重により自然降下が起きないように「逆止弁」を設置した。また、所要油量が少ないことと、他の動作制御より高い精度が求められることから、サブポンプ（最大 7.5L/min）から独立して油圧を供給することとした。

### 3) 油圧ユニット装置の仕様

前述の要求性能からの設計条件および、油圧動作機器の機能及び動作設定に基づく、主な油圧ユニット装置の設計仕様を表 2.1.2-4、系統図を図 2.1.2-13、設計図を図 2.1.2-14 に示す。

表 2.1.2-4 油圧ユニットの仕様一覧

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



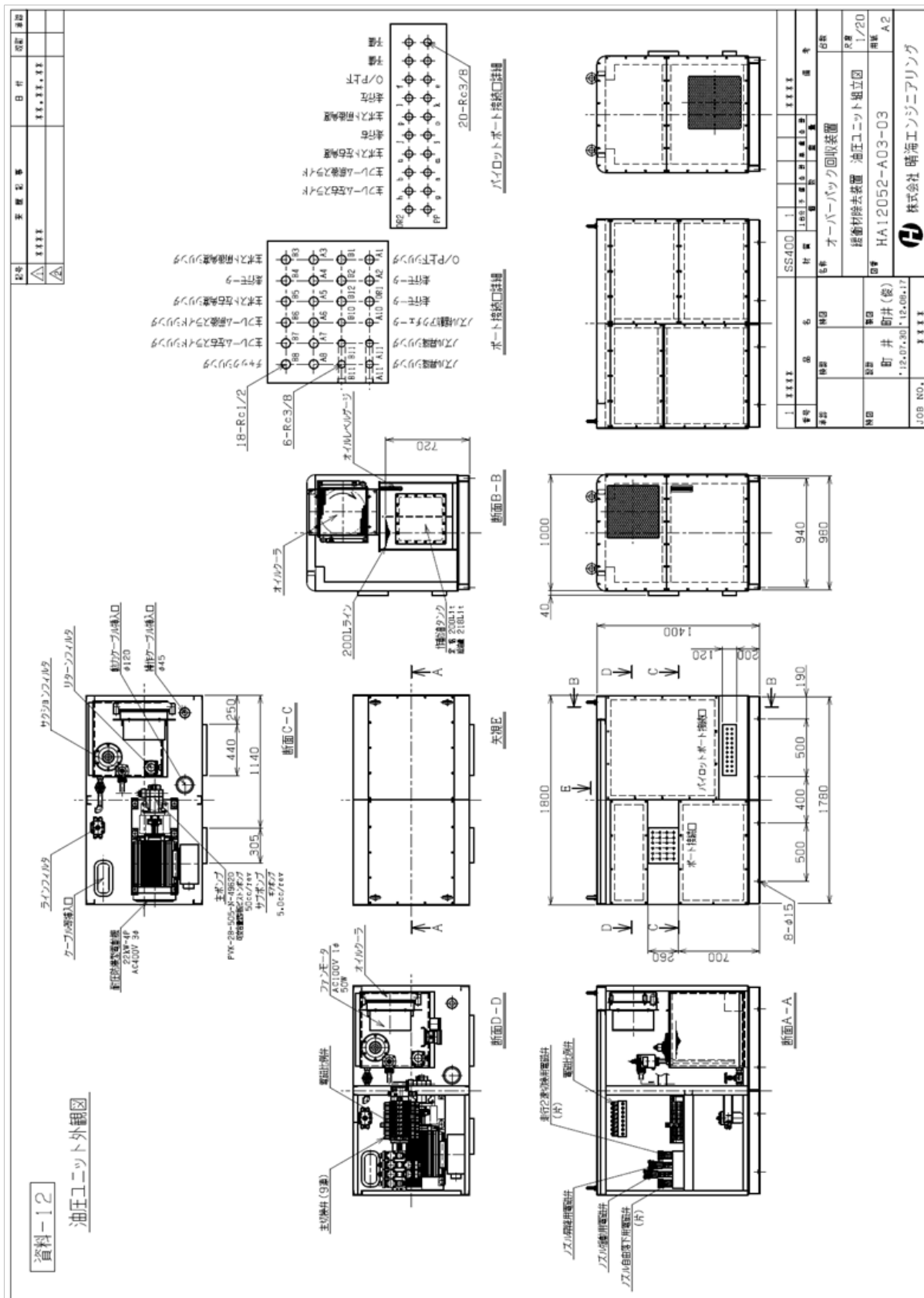


図 2.1.2-14 油圧ユニット設計図



#### 4) 油圧ユニット製作状況

製作状況を図 2.1.2-15 に示す。なお、装置の動作確認新については、後項にて記載する。



図 2.1.2-15 油圧ユニットの製作状況

### 2.1.3 塩水リユース設備の開発

塩水リユース設備は、固液分離装置、塩水成分調整装置、塩水供給装置およびスラリー回収装置より構成される。

#### (1) 装置の構成及び設計仕様

各装置の構成及び仕様を表 2.1.3-1、表 2.1.3-2 に示す。

表 2.1.3-1 塩水リユース設備 設備一覧 (1)

| 項目                                     | 内訳          | 仕様・規格                                                   | 数量 | 単位 |
|----------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------|----|----|
| 塩水リユース設備 250L/min(15m <sup>3</sup> /h) |             |                                                         |    |    |
| 固液分離装置<br>(沈降分離方式)                     | 固液分離槽       | 容量 20m <sup>3</sup> (処理量 30m <sup>3</sup> /h 以下)        | 1  | 基  |
| 塩水成分調整設備                               | 成分調整用水槽     | 2.0m <sup>3</sup> +0.5m <sup>3</sup> (中間仕切)相当           | 2  | 基  |
|                                        | NaCl 定量供給装置 | 供給量 Max 2kg/min、塩供給                                     | 1  | 式  |
|                                        | NaCl 用ホッパー  | 150L 相当                                                 | 1  | 式  |
|                                        | 水質計測器(濁度計)  | 近赤外線散乱光検出法                                              | 1  | 式  |
|                                        | 水質計測器(塩水濃度) | 電磁誘導式                                                   | 1  | 式  |
|                                        | 水質計測器(pH)   | ガラス電極法                                                  | 1  | 式  |
|                                        | 水質計測器(温度)   | 温度補償 0~100℃                                             | 1  | 式  |
|                                        | NaCl 投入量    | 成分調整槽、塩水製造槽                                             | 1  | 式  |
|                                        | 記録計         | SD カード方式、通信 RS232C 系                                    | 1  | 式  |
|                                        | 記録用 PC      | OS Windows7                                             | 1  | 台  |
|                                        | 攪拌機         | プロペラ攪拌機 1.5kW                                           | 1  | 台  |
|                                        | 移送用ポンプ      | 海水用 1.5kW、0.2m <sup>3</sup> /min、18m、U-222KC 相当         | 1  | 台  |
|                                        | 自動制御盤       | —                                                       | 1  | 式  |
|                                        | レベルセンサー     | —                                                       | 1  | 式  |
|                                        | 廃棄用ポンプ      | —                                                       | 1  | 台  |
|                                        | 起動盤         | —                                                       | 1  | 式  |
| 塩水供給設備                                 | リユース塩水貯留槽   | 5.0m <sup>3</sup>                                       | 1  | 基  |
|                                        | 塩水供給ポンプ     | 海水用 1.5kW、0.2m <sup>3</sup> /min、18m、U-222KC 相当、流量調整機能付 | 1  | 台  |
|                                        | 自動制御盤       | —                                                       | 1  | 式  |
|                                        | 流量計         | 流体用超音波流量計                                               | 1  | 式  |
|                                        | 圧力計         | —                                                       | 1  | 式  |
|                                        | レベルセンサー     | —                                                       | 1  | 式  |
|                                        | 水質計測器(塩水濃度) | 電磁誘導式                                                   | 1  | 式  |
|                                        | 記録計         | SD カード方式、通信 RS232C 系                                    | 1  | 式  |
|                                        | 緊急貯留水槽      | 5.0m <sup>3</sup>                                       | 1  | 基  |
|                                        | 移送用ポンプ      | 海水用 1.5kW、0.2m <sup>3</sup> /min、18m、U-222KC 相当         | 1  | 台  |
|                                        | 起動盤         | —                                                       | 1  | 式  |
| 塩水製造設備                                 | 塩水溶解槽       | 1.0m <sup>3</sup>                                       | 1  | 基  |
|                                        | NaCl 定量供給装置 | 供給量 Max 2kg/min、塩供給                                     | 1  | 式  |

|      |            |                                                 |   |   |
|------|------------|-------------------------------------------------|---|---|
|      | NaCl 用ホッパー | 150L 相当                                         | 1 | 式 |
|      | レベルセンサー    | —                                               | 1 | 式 |
|      | 攪拌機        | プロペラ攪拌機 1.5kW                                   | 1 | 台 |
|      | 移送用ポンプ     | 海水用 1.5kW、0.2m <sup>3</sup> /min、18m、U-222KC 相当 | 1 | 台 |
|      | 起動盤        | —                                               | 1 | 式 |
|      | 清水貯留槽      | 20.0m <sup>3</sup>                              | 1 | 基 |
|      | 移送用ポンプ     | 海水用 1.5kW、0.2m <sup>3</sup> /min、18m、U-222KC 相当 | 1 | 台 |
|      | 起動盤        | —                                               | 1 | 式 |
| 吸引装置 | スクイーズポンプ   | 250L/min、インバーター方式                               | 2 | 台 |

表 2.1.3-2 塩水リユース設備 設備一覧 (2)

| 項目                      | 内訳              | 仕様・規格                                           | 数量 | 単位 |
|-------------------------|-----------------|-------------------------------------------------|----|----|
| 減容化設備                   | 原水攪拌槽           | 5.0m <sup>3</sup> 、攪拌装置付                        | 1  | 基  |
|                         | 凝集剤添加装置         | 高分子、PAC 縦型                                      | 1  | 台  |
|                         | シックナー           | 0.2m <sup>3</sup>                               | 1  | 基  |
|                         | フィルタープレス加圧ろ過装置  | 0.5MPa、濾布#5 相当                                  | 1  | 台  |
|                         | 自動制御盤           | —                                               | 1  | 台  |
| 緩衝材除去部模擬設備<br>(機能確認試験用) | 起動盤             | —                                               | 3  | 台  |
|                         | 凝集剤攪拌槽          | 1.0m <sup>3</sup> 高分子、PAC                       | 1  | 基  |
|                         | 濾水槽             | 1.0m <sup>3</sup>                               | 2  | 基  |
|                         | 脱水固化収納容器        | 1.0m <sup>3</sup>                               | 1  | 基  |
|                         | 模擬タンク           | 5.0m <sup>3</sup>                               | 1  | 基  |
|                         | 移送用ポンプ          | 海水用 1.5kW、0.2m <sup>3</sup> /min、18m、U-222KC 相当 | 1  | 台  |
|                         | ベントナイト混合土定量供給装置 | 供給量 Max 2kg/min、ベントナイト混合土供給                     | 1  | 式  |
|                         | ベントナイト混合土用ホッパー  | 150L 相当                                         | 1  | 式  |
|                         | 攪拌機             | 海水用 3.3kW、7.5m <sup>3</sup> /min SA-300 相当      | 1  | 式  |
| その他                     | 配管・バルブ等         | —                                               | 1  | 式  |
|                         | 動力ケーブル等         | —                                               | 1  | 式  |
|                         | その他             | コンプレッサー、ダウントランスなど                               |    |    |

## (2) 塩水噴射・スラリー回収の処理フロー

- ① 塩水は、塩水供給設備の貯留水槽から塩水供給ポンプにより圧送される。塩水供給設備の構成は塩水貯留水槽と塩水供給ポンプ、圧送状況を確認する水圧圧力計および積算・瞬時流量計から構成される。
- ② 塩水噴射・スラリー吸引装置により緩衝材が除去され、塩水はスラリー化する。スラリーはスラリー吸引設備により吸引・排出される。スラリー吸引設備の構成は圧送ポンプ、(流体圧送距離等の必要により) 一次貯留水槽と吸引・排出状況を確認する圧力計および積算・流量計から構成される。
- ③ 吸引・排出されたスラリーは、固液分離設備であるシックナーを用いてスラリー中のベントナイトおよびケイ砂を重力の作用で沈降させ高濃度スラッジとして、上澄み液は塩水として分離される。
- ④ 清澄された塩水は、塩水調整設備に移送され、成分確認と調整されリユース塩水となる。塩水調整設備は、約 3m<sup>3</sup> のノッチタンクと塩水成分測定装置 (塩分濃度、濁度、pH、温度)、塩定量供給装置と攪拌装置から構成される。
- ⑤ リユース塩水は、塩水噴射・スラリー吸引設備の塩水供給設備にある塩水貯留水槽に戻される。

関連設備として塩水製造設備、減容化設備を設置する。

塩水製造設備は、初期段階での塩水製造および緩衝材除去過程のなかで、塩水を補給するための装置であり、供給水の貯留水槽、塩定量供給装置と水槽攪拌装置より構成される。

減容化設備は、高濃度スラッジを遠心力やろ過により脱水固化する。塩水リユースのフローを図 2.1.3-1 に示す。

塩水リユース設備のうち主要装置である塩水分離槽および水槽の設計概略図を図 2.1.3-2、図 2.1.3-2、図 2.1.3-4、図 2.1.3-6、図 2.1.3-5 に示す。

[illegible]

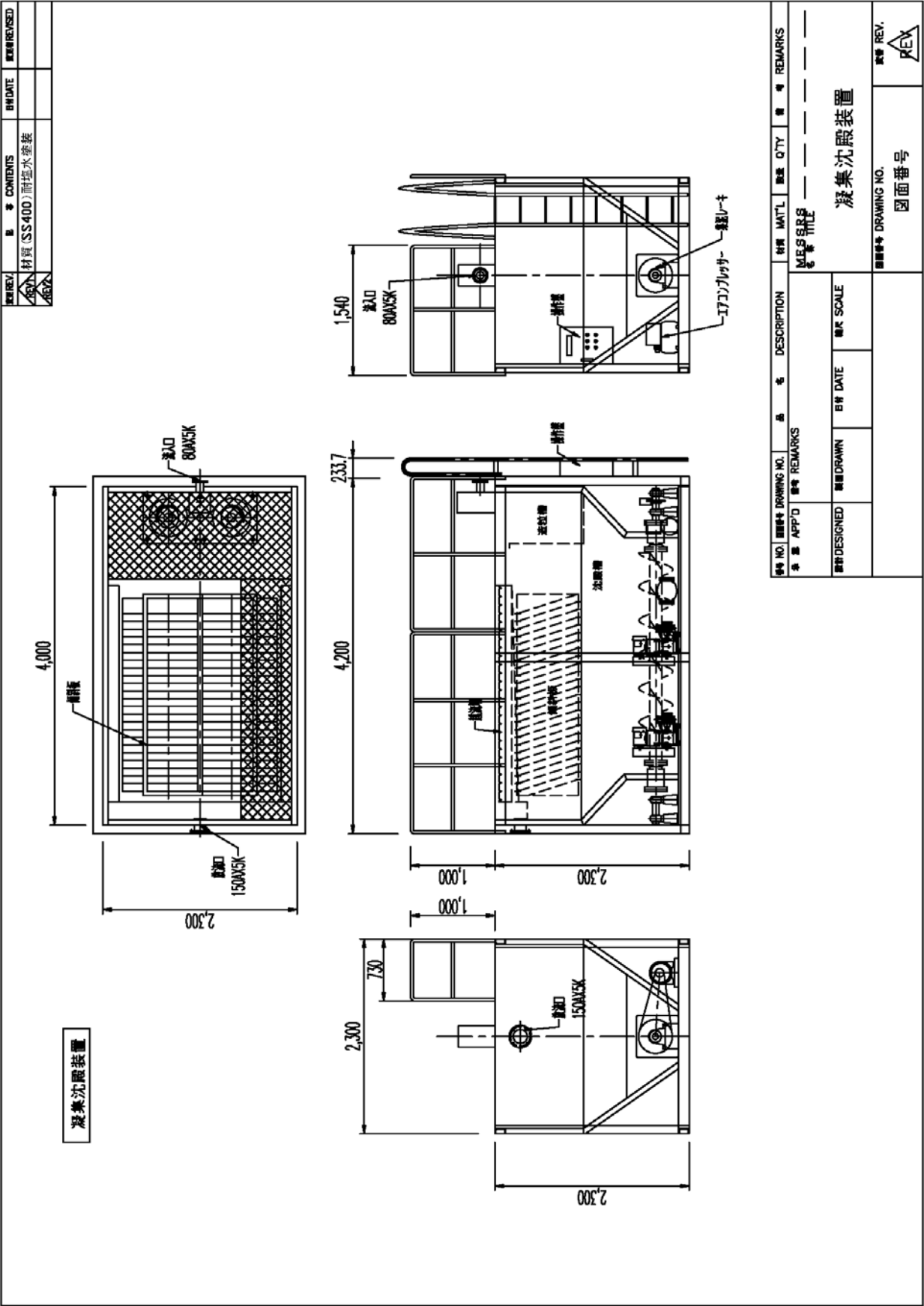


図 2.1.3-2 固液分離槽設計図











### (3) 塩水リユース設備の製作状況

製作状況をに示す。なお、装置の動作確認新については、後項にて記載する。



図 2.1.3-7 塩水リユース設備の製作状況

### 2.1.4 遠隔操作技術の開発

緩衝材回収作業は、廃棄体を回収するため放射線の管理区域なの作業となるため、全ての動作を遠隔操作にて行うこととした。

各設備から遠隔操作への要求事項を表 2.1.4-1、表 2.1.4-2、表 2.1.4-3、表 2.1.4-4 に示す。なお、遠隔操作設備の動作確認は他設備の動作確認時に合わせて行う。

#### (1) 噴射・吸引設備

表 2.1.4-1 塩水噴射・スラリー吸引装置に対する遠隔操作設備の要求事項

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

表 2.1.4-2 走行装置に対する遠隔操作設備の要求事項

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

表 2.1.4-3 昇降装置に対する遠隔操作設備の要求事項

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

## (2) 塩水リユース設備

表 2.1.4-4 塩水リユース設備に対する遠隔操作設備の要求事項

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

## (3) システムの全体構成

遠隔操作設備の構成であるリモート側の制御システム、情報通信システム、オペレート側の制御システムについては、各設備側からの要求事項を満たす構成とした。仕様および全体システム構成を図 2.1.4-1 に、測定システム図を図 2.1.4-2 示す。

また、電気システムの全体構成を図 2.1.4-3 に、遠隔操作システムの全体構成を図 2.1.4-4 に、映像伝送監視システムを図 2.1.4-5 示す。

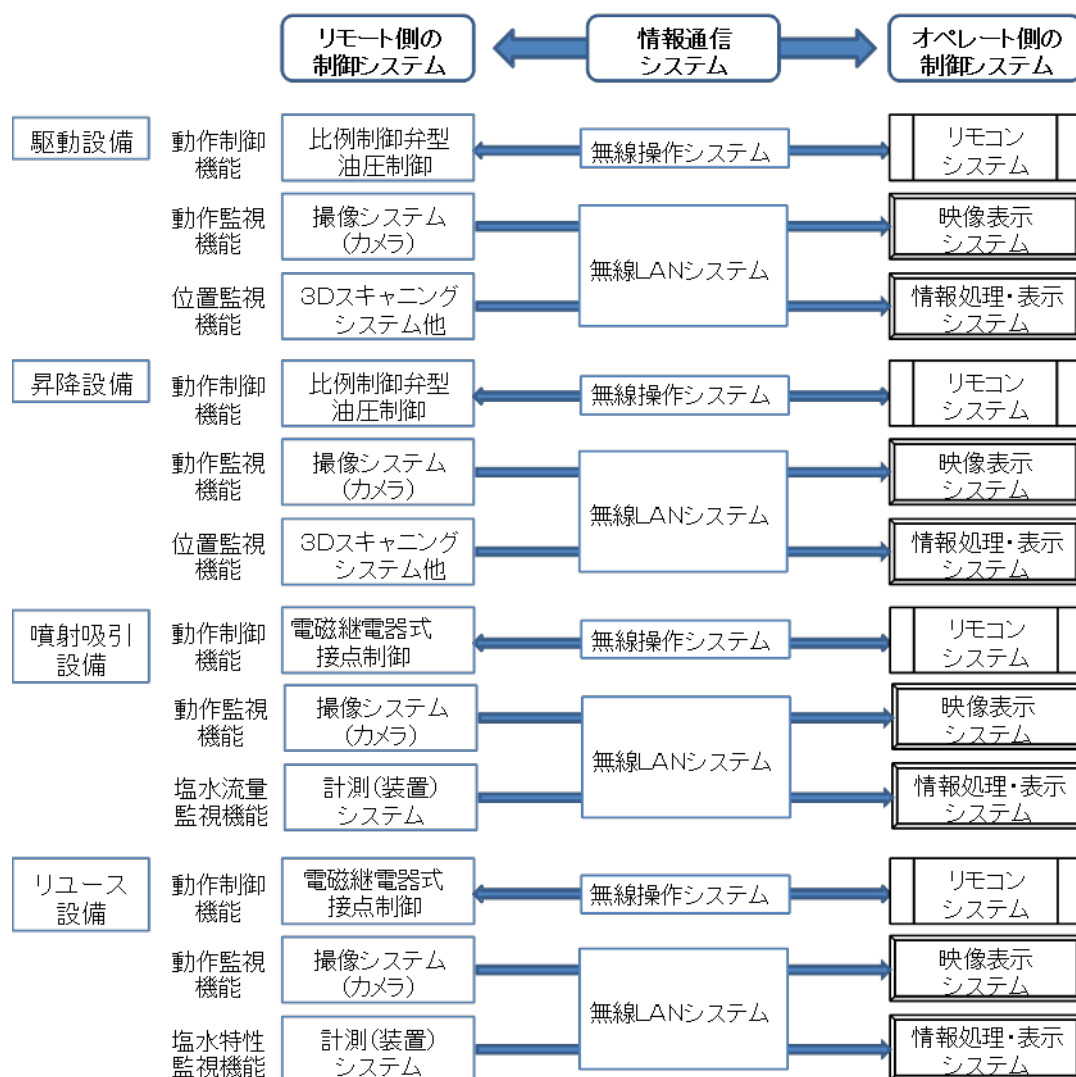


図 2.1.4-1 遠隔操作設備における全体システム構成

(資料-16)

## 施工監視システム図

(概要)  
本施工監視装置は、把持昇降装置(支柱ポスト)の前後左右傾斜位置を確認し、把持部および塩水噴射部・スライア吸引設備の深さ(高さ)位置を把握操作するための作業管理装置である。

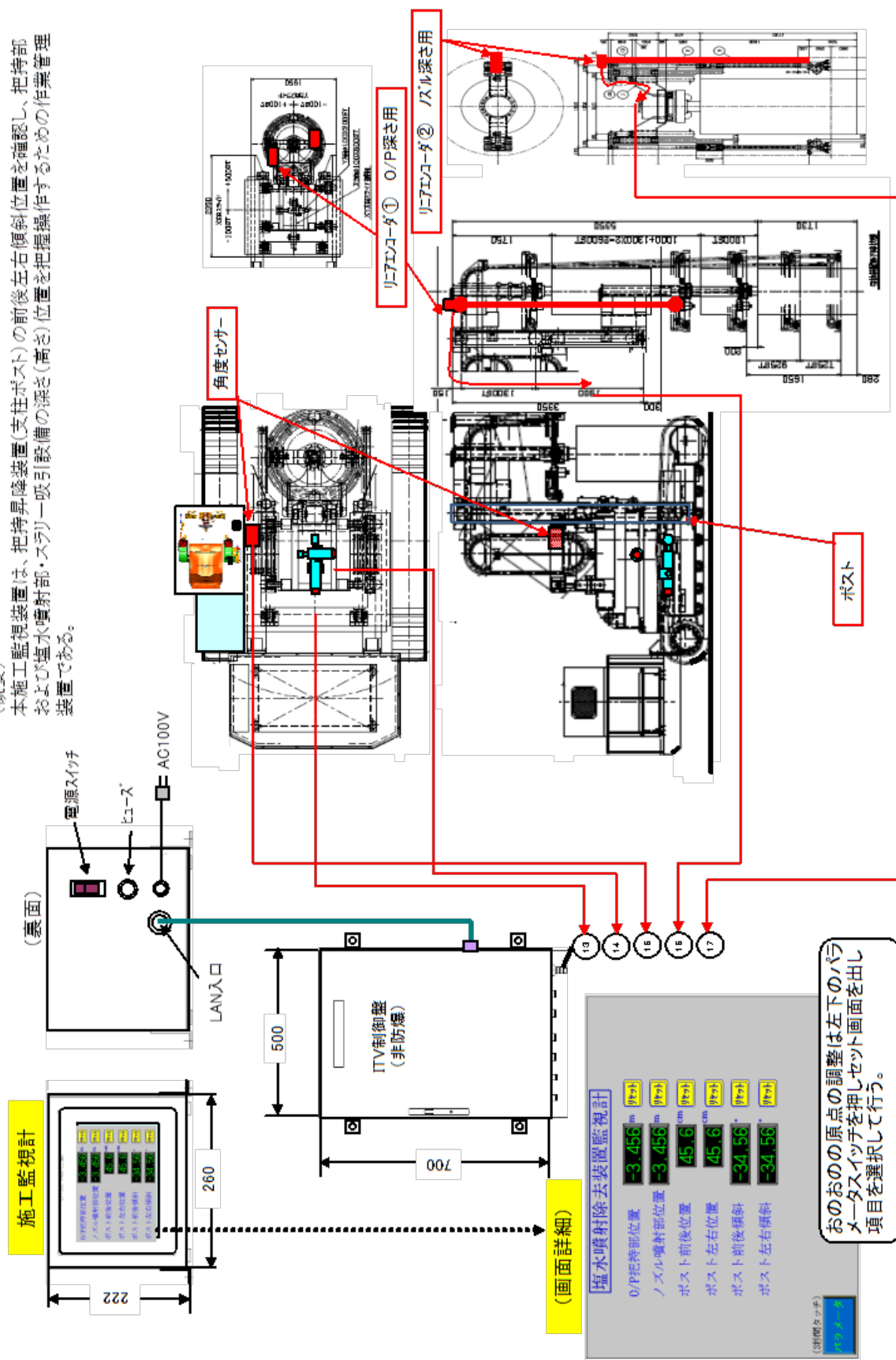


図 2.1.4-2 遠隔測定システム図

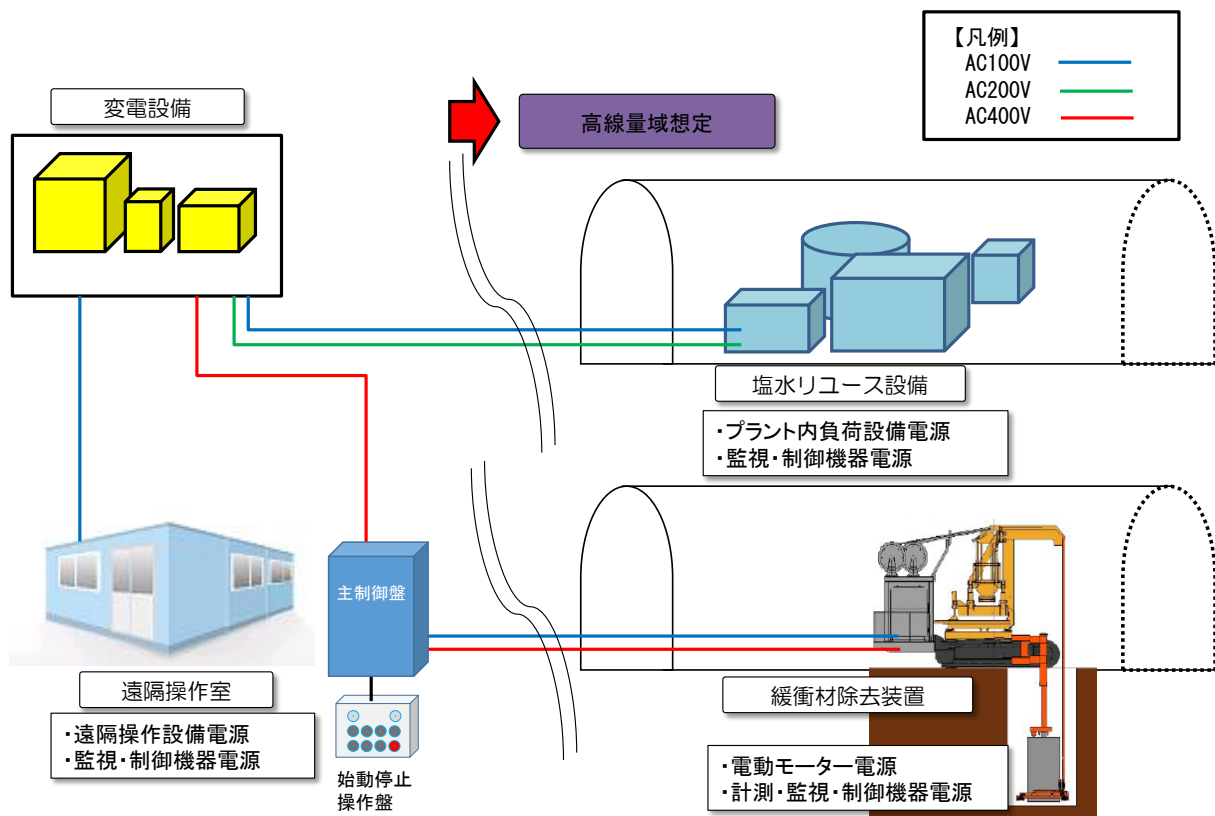


図 2.1.4-3 電気システム構成図



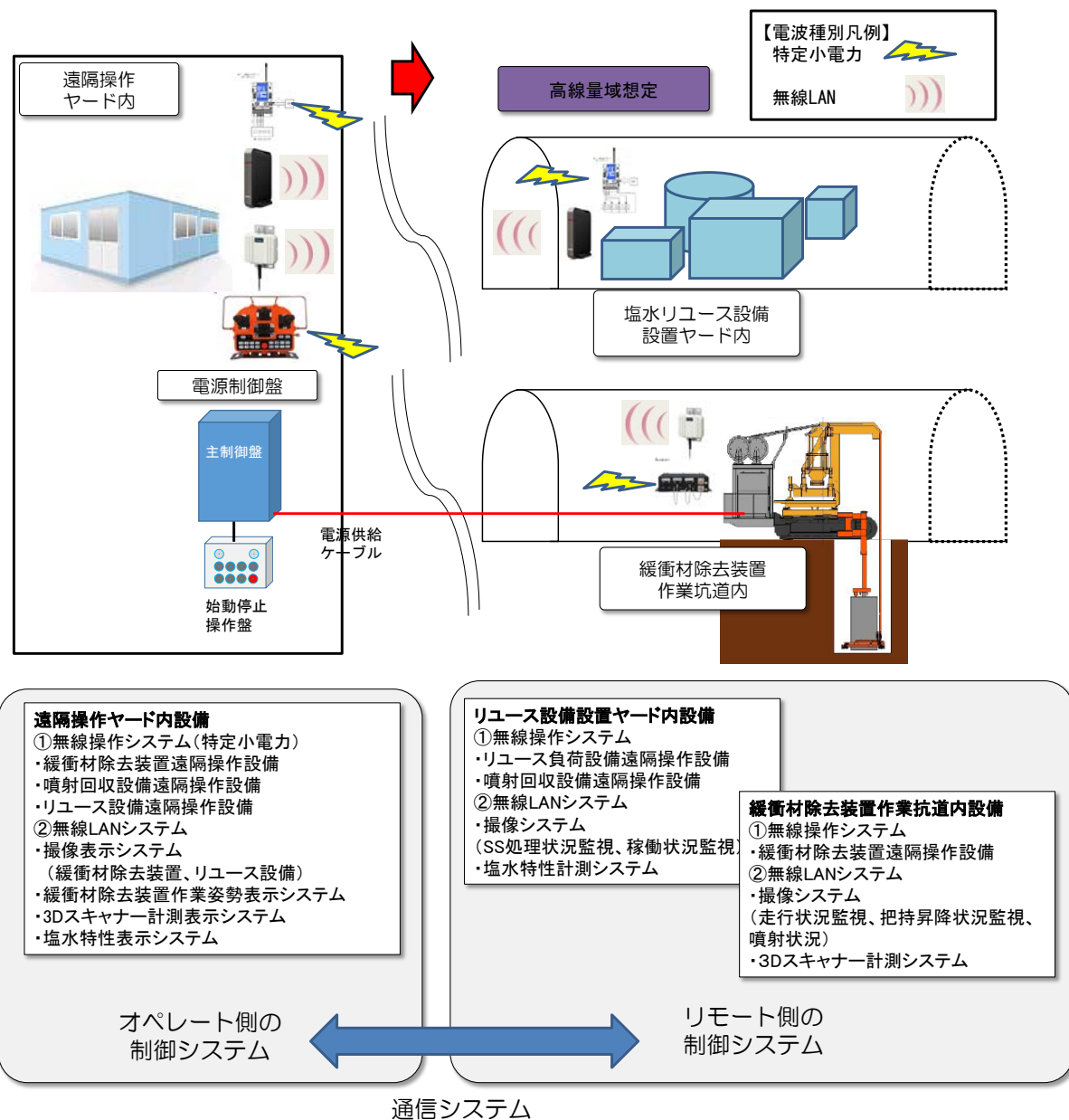


図 2.1.4-4 無線遠隔操作システム構成図



平成24年度は、計画カメラ6台のうち、2台を取り付け、LANケーブルでの映像転送機能の確認試験を行った。

2-51

#### (4) 3D 観測システム

3D 観測装置（Xtion）によって、緩衝材除去形状および廃棄体の相対地を検出する。形状および仕様をに示す。



図 2.1.4-6 3D 観測装置（Xtion）の形状

表 2.1.4-5 XtionProLive 性能諸元

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

### 1) 3D 観測システムを用いた廃棄体の把持機能

#### a. 設計条件

- 10 秒以内に相対位置情報を操作画面へ表示する
- 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

#### b. プログラムフロー

プログラムフローを図 2.1.4-7 に示す。

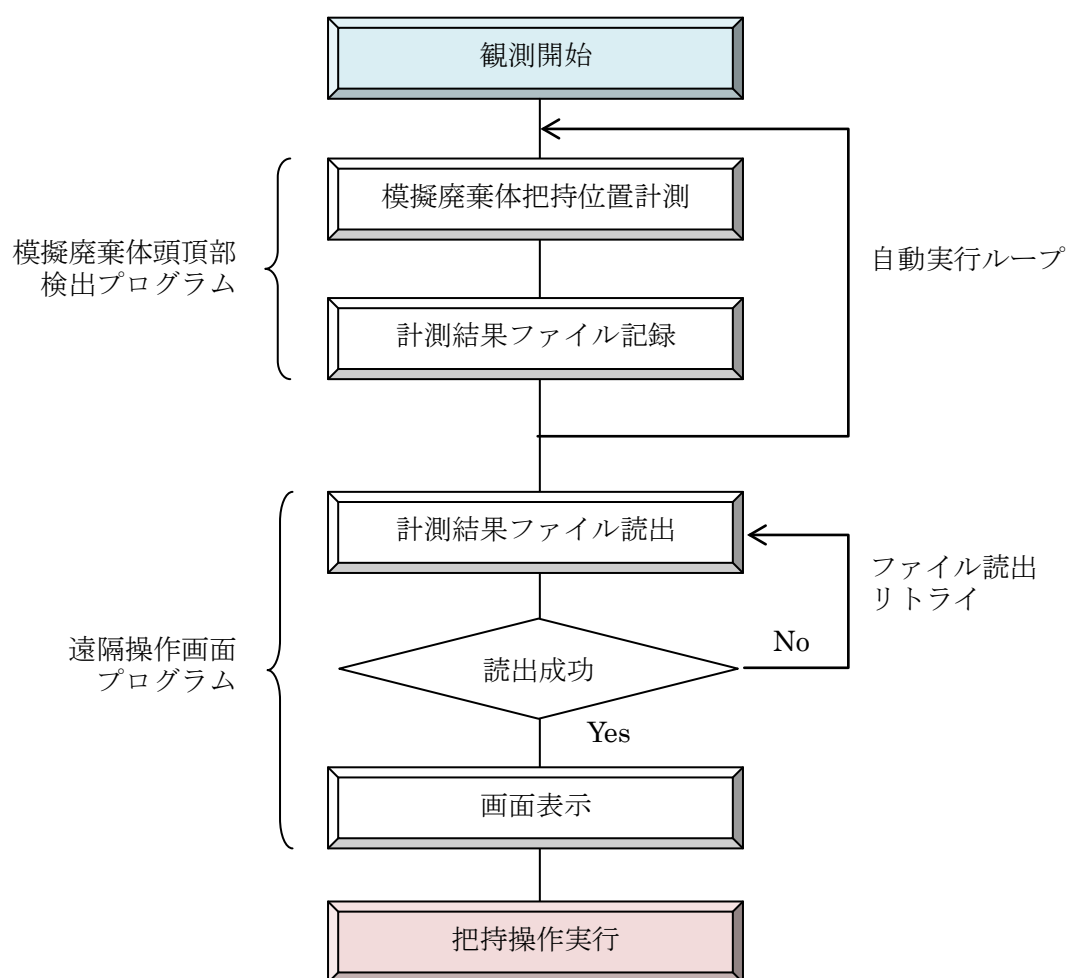


図 2.1.4-7 廃棄体把持機能のプログラムフロー図（プログラム設計図）

## 2) 3D 計測システムを用いた緩衝材除去測定機能

### a. 設計条件

- 10 秒以内に相対位置情報を操作画面へ表示する
- 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

### b. プログラムフロー

プログラムフローを図 2.1.4-8 図 2.1.4-7 に示す。

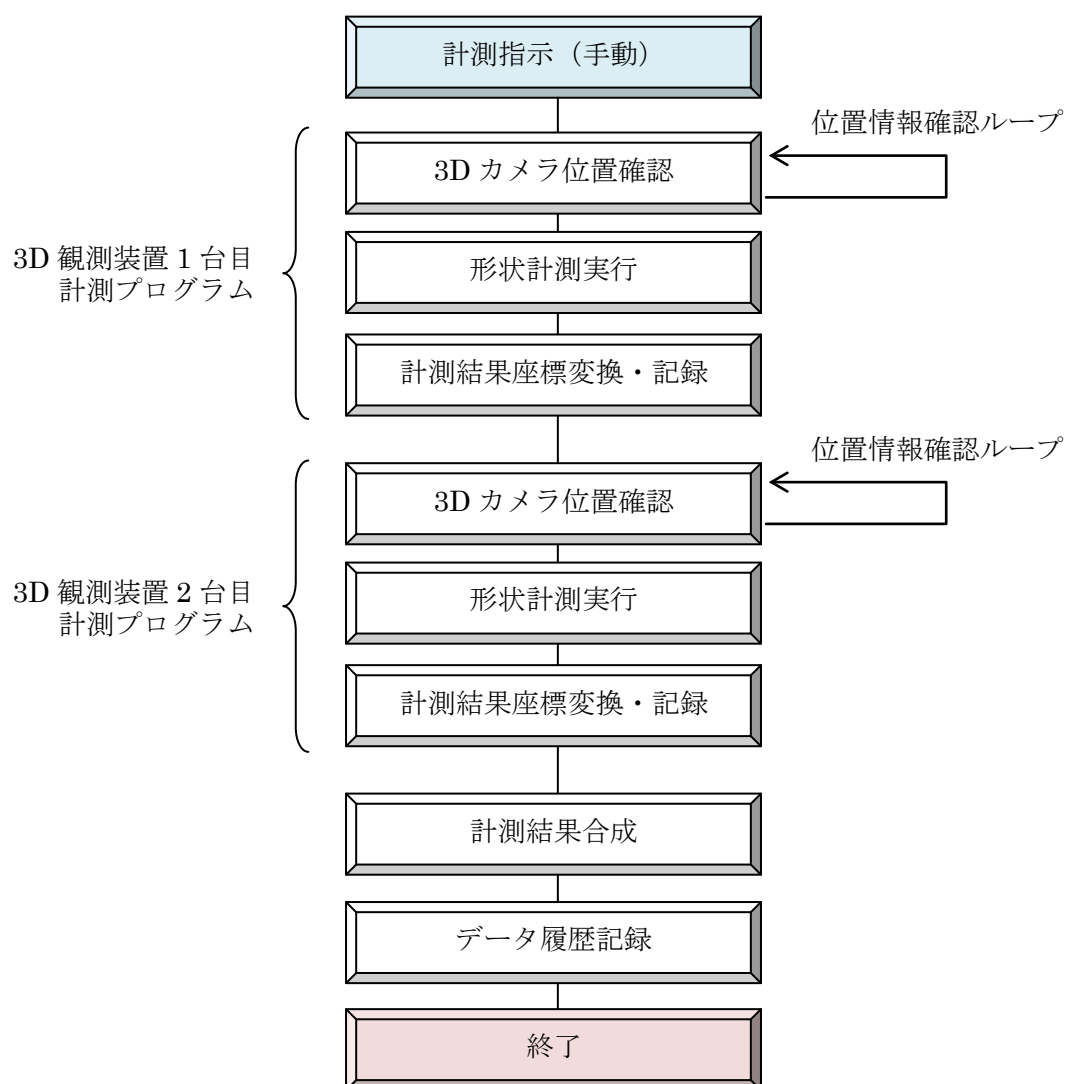


図 2.1.4-8 緩衝材除去形状計測機能の改良プログラムフロー図（プログラム設計図）

### 3) 観測可能範囲

3D 観測装置による緩衝材除旧形状の可能範囲（模式図）を図 2.1.4-9 に示す。

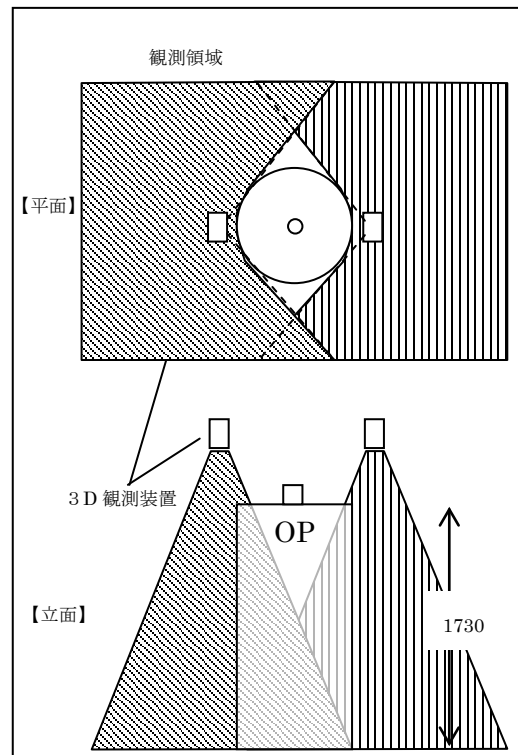


図 2.1.4-9 観測可能範囲図

### (5) 計測設備

塩水リユース設備の計測は測定されるデータ・情報を集約しモニタリングすることで遠隔操作機能の一部として動作する計測設備を設置けた。計測設備のモニタリング項目を以下に示す。

- 塩水噴射・スラリー吸引設備：流量
- 塩水調整設備：塩分濃度、SS、pH、温度
- 塩水供給設備：塩分濃度

計測データは LAN ケーブルにより表示・記録用装置に転送・集約される。遠隔操作を考慮した装置の概要を図 2.1.4-10 に示す。

塩水リユース設備の計測機器設備を表 2.1.4-6、計測器および通信路の配置を図 2.1.4-11 に示す。

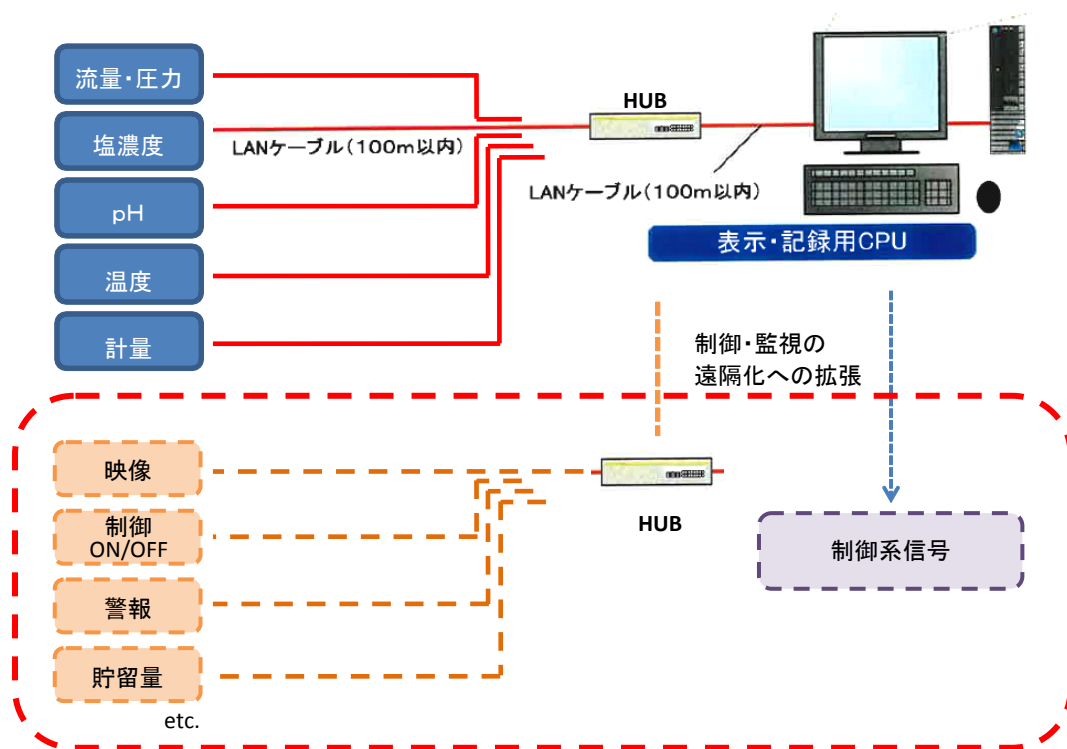


図 2.1.4-10 計測データのモニタリングシステムの概要

表 2.1.4-6 計測機器設備

| 項目                                        | 内訳          | 場所  | 仕様・規格                | 数量 | 単位 |
|-------------------------------------------|-------------|-----|----------------------|----|----|
| 塩水リユース設備<br>250L/min(15m <sup>3</sup> /h) | 水質計測器(濁度計)  | ①   | 近赤外線散乱光検出法           | 1  | 式  |
|                                           | 水質計測器(塩水濃度) | ②   | 電磁誘導式                | 1  | 式  |
|                                           | 水質計測器(pH)   | ③   | ガラス電極法               | 1  | 式  |
|                                           | 水質計測器(温度)   | ④   | 温度補償 0~100℃          | 1  | 式  |
|                                           | NaCl 投入量    | ⑤⑧  | 成分調整槽、塩水製造槽          | 2  | 式  |
|                                           | 流量計         | ⑥⑦  | 液体用超音波流量計            | 2  | 式  |
|                                           | 記録計         | --- | SD カード方式、通信 RS232C 系 | 1  | 式  |
|                                           | 記録用 PC      | --- | OS Windows7          | 1  | 式  |

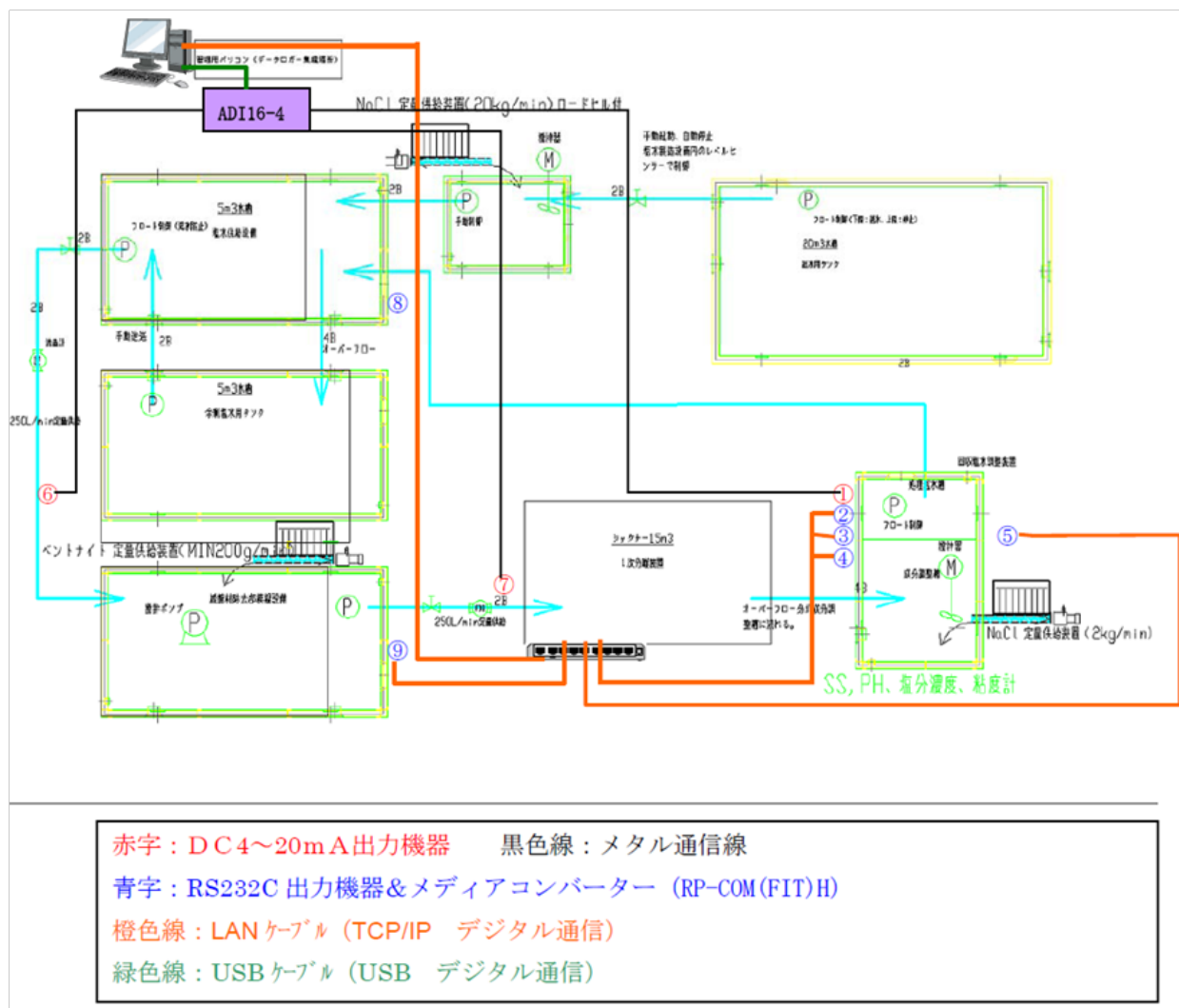


図 2.1.4-11 塩水リユース設備 遠隔通信経路

## 2.1.5 緩衝材除去システムの動作確認

### (1) 対象設備

- ・ 噴射・吸引設備
- ・ 塩水リユース設備
- ・ 遠隔操作設備（上記設備の試験に合わせて実施）
- ・ 遠隔操作設備 3D 計測装置

### (2) 動作確認方法および結果

#### 1) 噴射・吸引設備

##### a. 走行装置および油圧ユニット

走行装置および油圧ユニットの動作確認項目・確認方法および確認結果をに示す。なお、動作確認は遠隔操作にて実施することにより、設備に係る遠隔操作設備の動作確認を合わせて実施した。



表 2.1.5-1 動作確認項目と動作確認方法（走行装置）

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

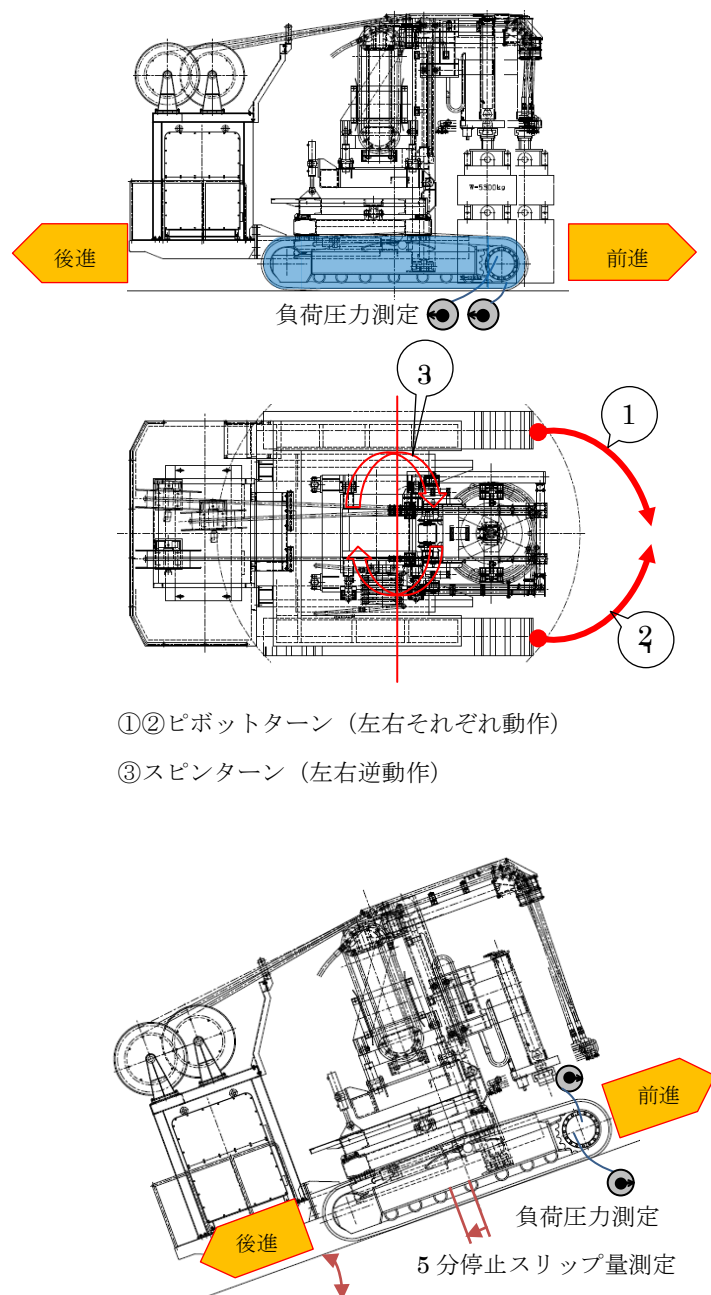
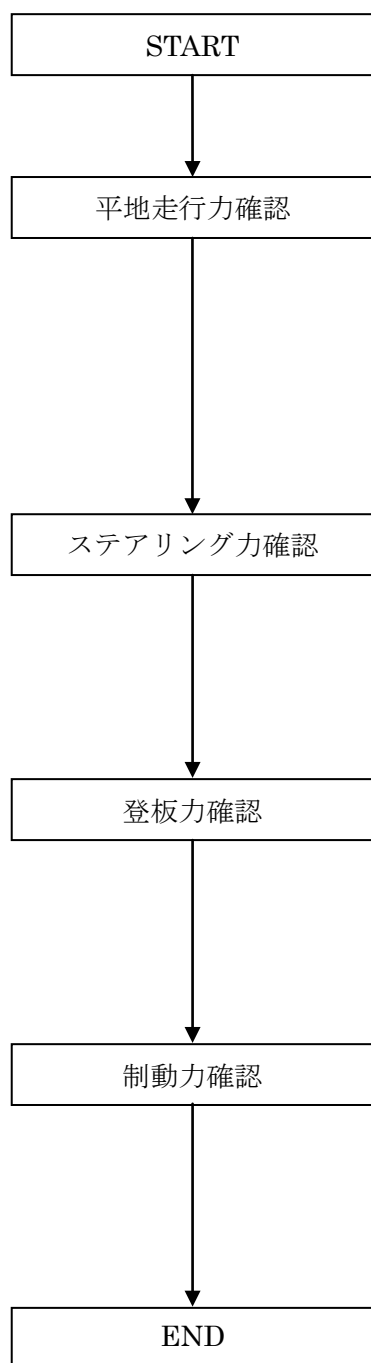


図 2.1.5-1 動作確認試験フロー（走行装置）

表 2.1.5-2 走行装置の動作確認試験結果一覧

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



図 2.1.5-2 走行装置の動作確認試験状況

b. 昇降装置

昇降装置の動作確認項目・確認方法および確認結果をに示す。なお、動作確認は遠隔操作にて実施することにより、設備に係る遠隔操作設備の動作確認を合わせて実施した。

また、ホース巻き取り部について改良を行ったため、改良後に改良部分の動作確認も実施した。

表 2.1.5-3 動作確認項目と動作確認方法（昇降装置）

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

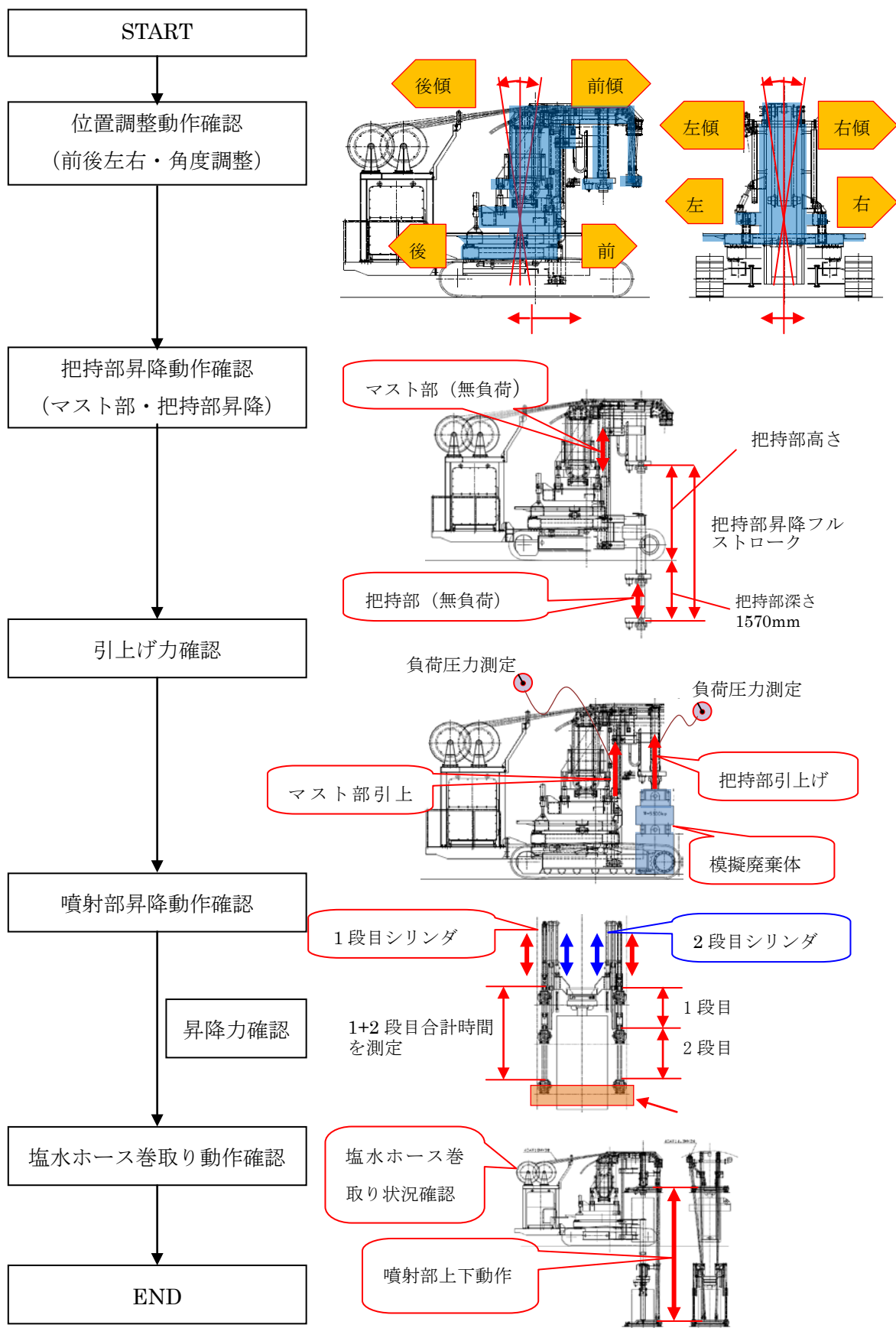


図 2.1.5-3 動作確認試験フロー（昇降装置）

表 2.1.5-4 昇降装置の動作確認試験結果一覧

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



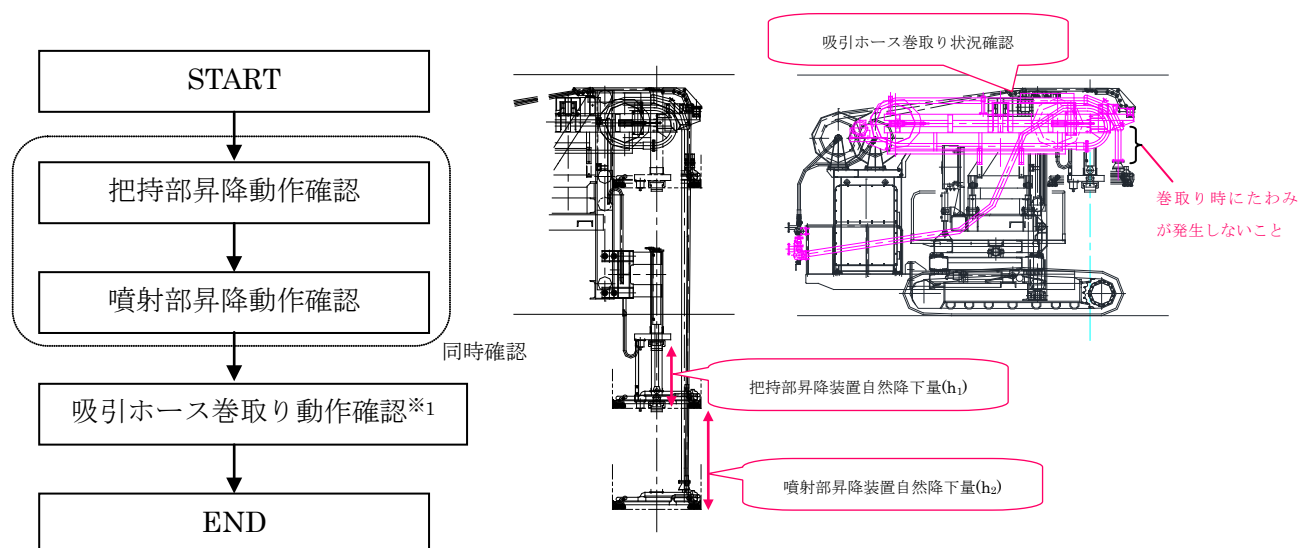
図 2.1.5-4 昇降装置の動作確認試験状況

表 2.1.5-5 昇降装置巻き取り部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、<br>揺動時の自然降下<br>量 | エンコーダーによる降下量<br>( $h_1$ )を測定   | ・昇降装置全体の降下量<br>10mm/h 以下<br>(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、<br>揺動時の自然降下<br>量 | エンコーダーによる降下量<br>( $h_2$ )を測定※2 |                                                   |
| ③吸引ホース<br>巻取り | 吸引ホース巻取り<br>動作              | 目視による確認                        | ・吸引ホース巻取り時のホ<br>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<br>作で実施           | ・各動作とも遠隔で操作で<br>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 2.1.5-5 昇降装置の動作確認検査フローおよび検査概念



表 2.1.5-6 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                                             | 検査値                                                    |
|--------------------|----------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 把持部昇降装置<br>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<br>10mm/h 以下<br>(全体の降下量 $h=h_1+h_2$ ) | $h=3\text{mm}$<br>$h_1=1\text{mm}$<br>$h_2=2\text{mm}$ |
| 噴射部昇降装置<br>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<br>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。

(a) 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において噴射動作および揺動動作を伴って実施する。

(b) 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実施できることを確認する。

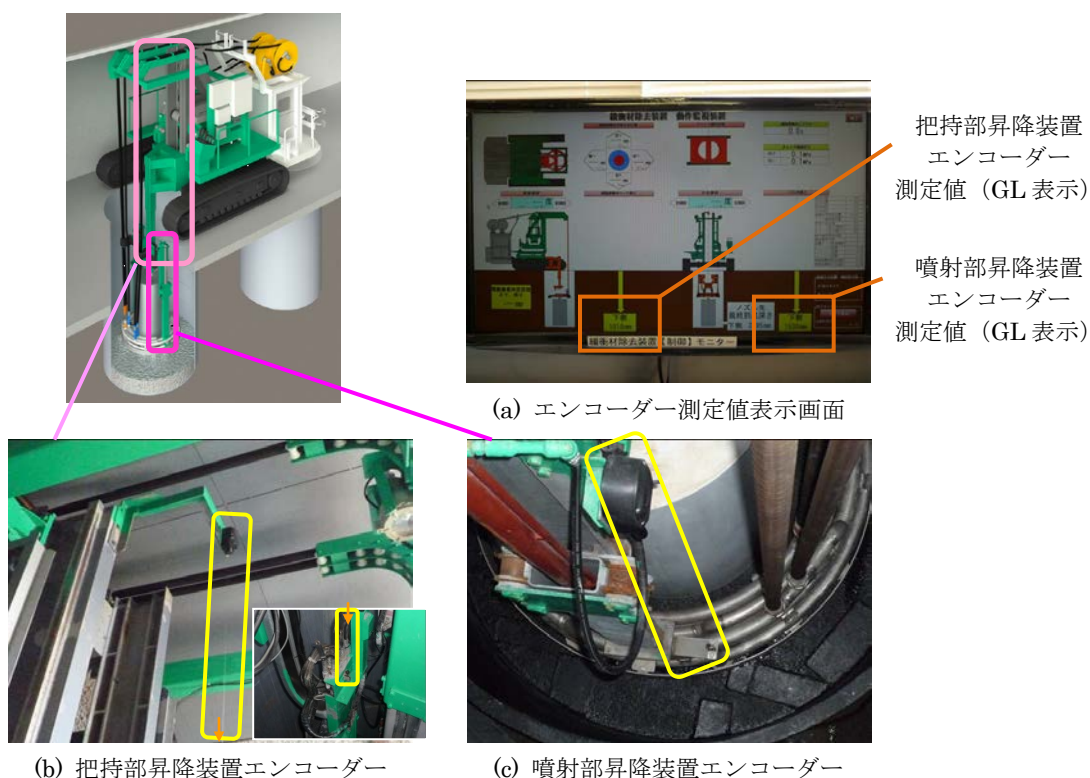


図 2.1.5-6 昇降装置の動作確認例

c. 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動作確認項目・確認方法および確認結果をに示す。なお、動作確認は遠隔操作にて実施することにより、設備に係る遠隔操作設備の動作確認を合わせて実施した。

また、吸引ホース口径について改良を行ったため、改良後に改良部分の動作確認も実施した。

表 2.1.5-7 塩水噴射・スラリー吸引装置の動作確認項目と確認方法

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

表 2.1.5-8 塩水噴射・スラリー吸引装置（改良後）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                                       | 検査値                                              |
|----------|-----------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 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<br>(吸引流量が噴射流量 250L/min を上回ること) | 流量計<br>300L/min<br>水槽貯水<br>300.1L/min<br>(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 $45 \pm 2$ 度                        | 44.3 度<br>(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<br>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                                           |

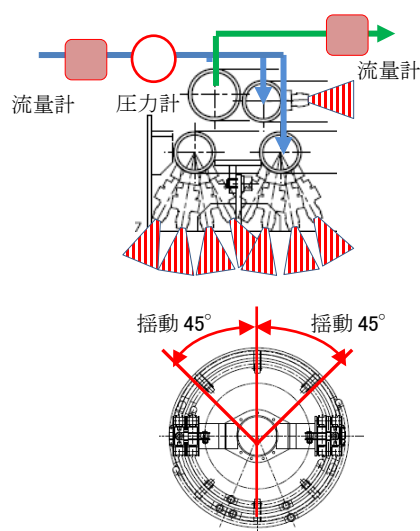
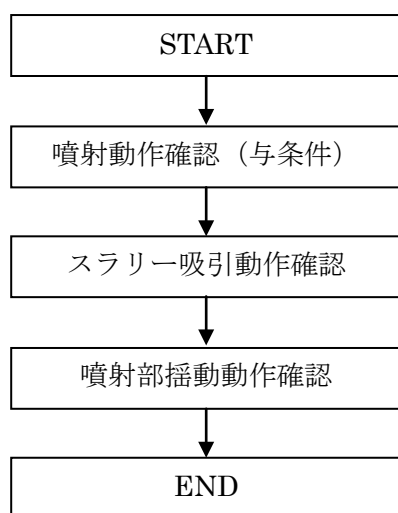


図 2.1.5-7 塩水噴射・スラリー吸引装置の動作確認フロー

表 2.1.5-9 塩水噴射・スラリー吸引装置（改良前）の動作確認試験結果一覧

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



図 2.1.5-8 塩水噴射・スラリー吸引装置の動作確認試験状況

## 2) 塩水リユース設備

塩水リユース設備の動作確認項目と動作確認方法を表 2.1.5-10 に示す。また動作確認試験フローを図 2.1.5-9 に示す。

表 2.1.5-10 動作確認項目と動作確認方法（塩水リユース設備）

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

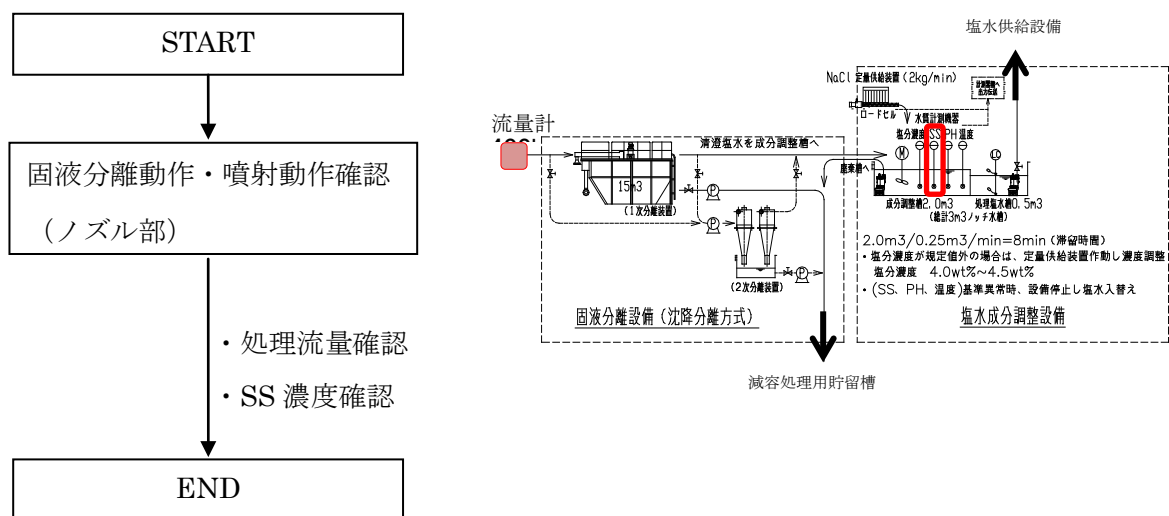


図 2.1.5-9 動作確認試験フロー（塩水リユース設備）

表 2.1.5-11 塩水リユース設備の動作確認試験結果一覧

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



図 2.1.5-10 塩水リユース設備の動作確認試験状況

### 3) 遠隔操作設備 3D 計測装置

遠隔操作設備 3D 計測装置の動作項目、確認方法および確認項目を表 2.1.5-12、図 2.1.5-11 に示す。以下の項目についてはすべて基準を満足することを確認した。

表 2.1.5-12 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                                                                                                       | 検査値                                                                                           |
|---------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・データ連携 10 秒以内</li> <li>・エラー時のリトライ機能の実行</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・データ連携瞬時</li> <li>・リトライ機能実行確認</li> </ul>               |
|               | 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  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・3D 観測装置の 2 台計測および自動合成の実行</li> <li>・AutoCAD 読取り可能形式保存の実行</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・2 台計測および自動合成の実行確認</li> <li>・「ASC 形式点群」保存確認</li> </ul> |

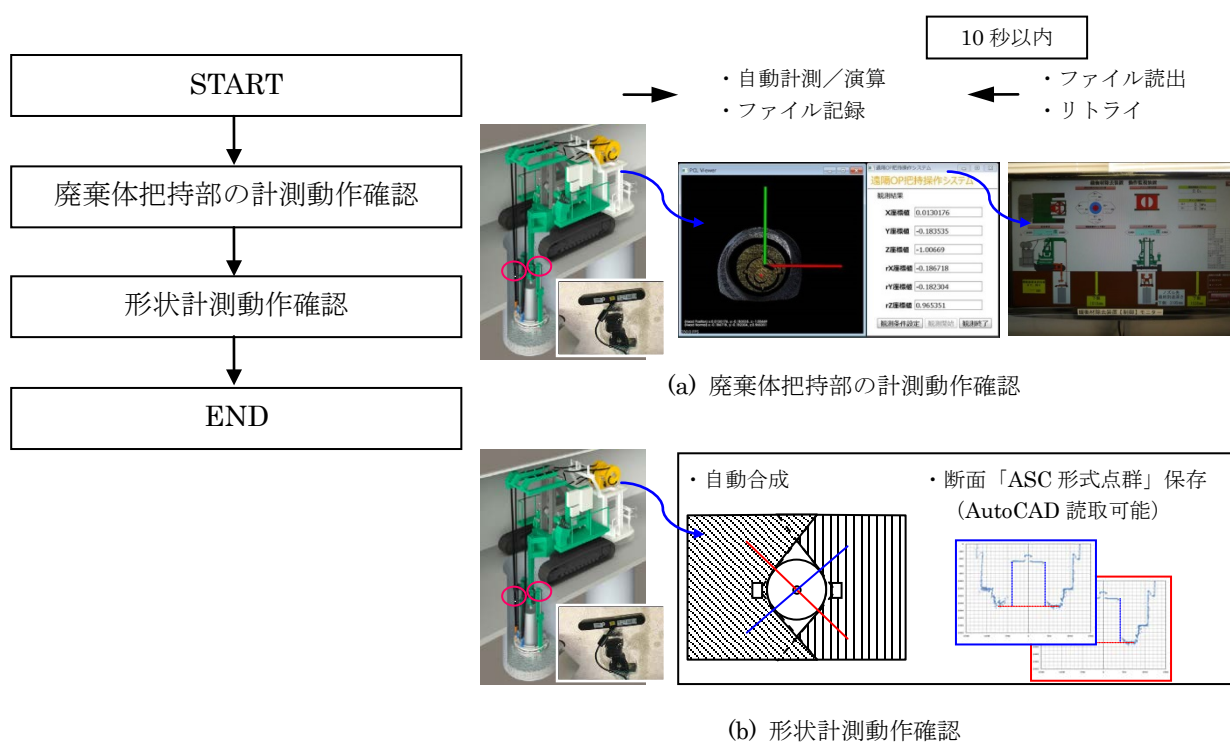


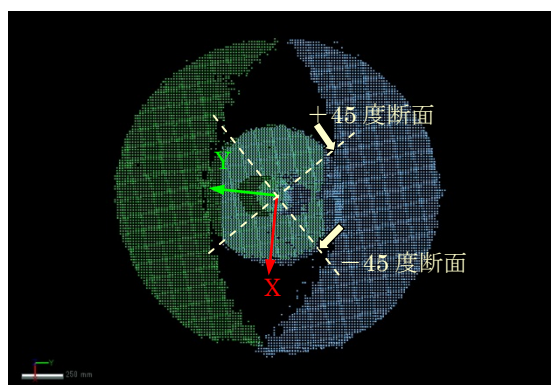
図 2.1.5-11 遠隔操作設備の動作確認フロー



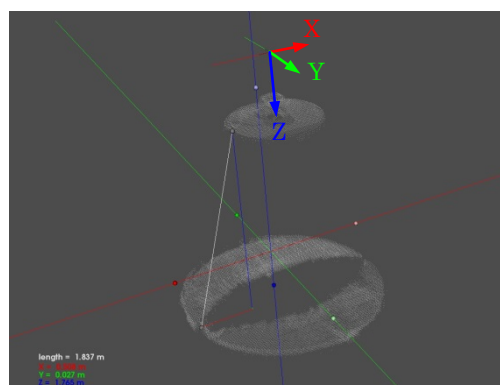
① X 軸、Y 軸、Z 軸の説明



② 3D 観測装置の 2 台計測自動合成結果

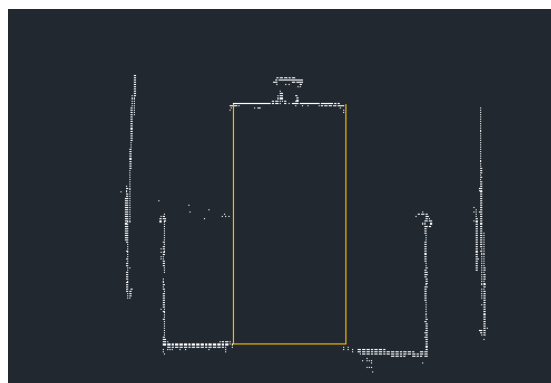


(a) 平面表示  
(2 台の 3D 観測装置計測結果を色分け)

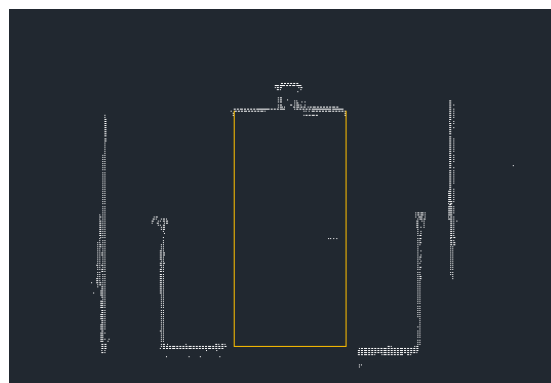


(b) 3 次元表示

③ AutoCAD 出力断面図（黄色：模擬廃棄体寸法  $\phi 820 \cdot H1,730$  を上書き）



(a) +45 度断面



(b) -45 度断面

図 2.1.5-12 遠隔操作設備の動作確認

## 2.1.6 動作確認のための試験設備

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

### (1) 緩衝材除去装置

緩衝材除去装置は、塩水噴射部・スラリー吸引設備、昇降設備、塩水リユース設備、駆動設備から構成される。全体構成を図 2.1.6-1 に示す。

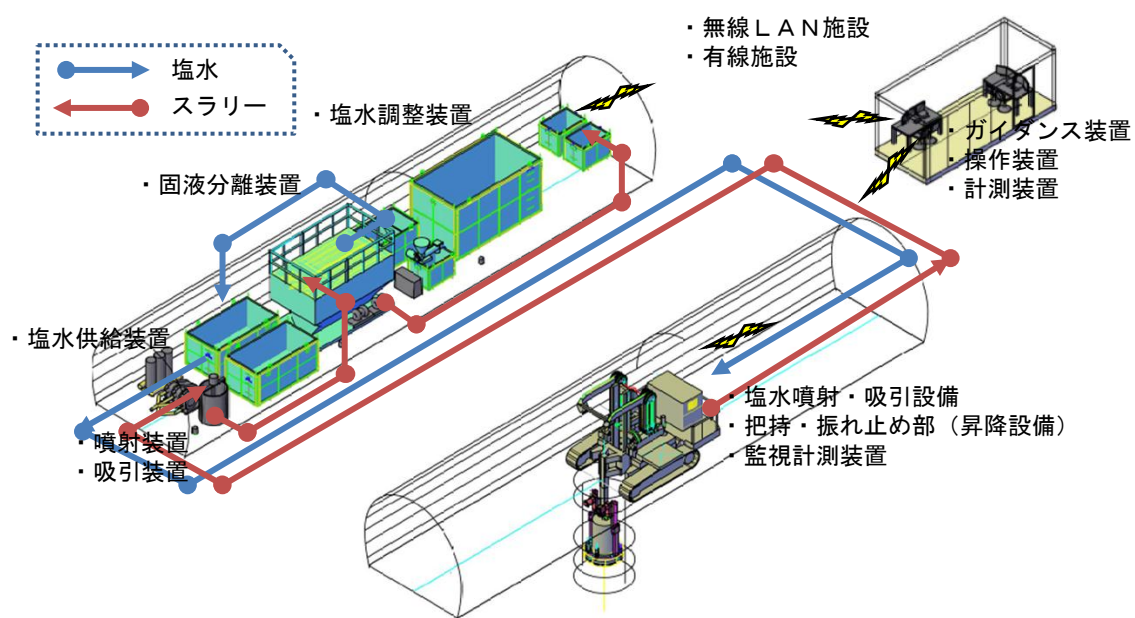


図 2.1.6-1 緩衝材除去装置の全体構成



## 1) 試験孔および試験坑道

試験孔および試験坑道は、HLW 第 2 次取りまとめにおける堆積岩・堅置き処分概念で適用される処分孔と処分坑道の断面および仕様を満足するものとし整備した。断面を図 2.1.6-2 に、仕様を表 2.1.6-1 に示す。

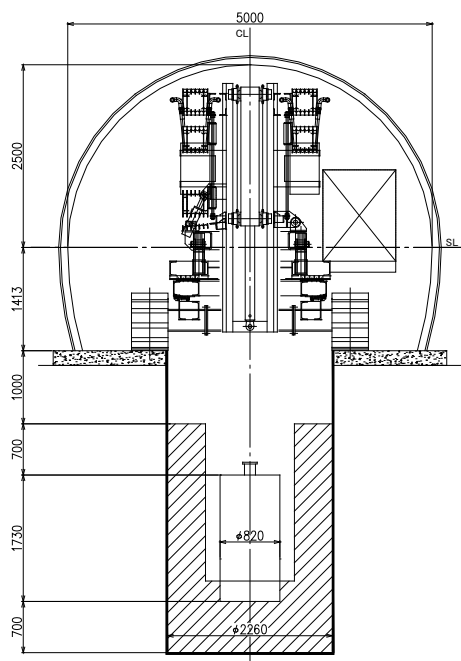


図 2.1.6-2 試験孔および試験坑道の断面

表 2.1.6-1 試験孔および試験坑道の基本仕様

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

## 2) 操作室

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

### 3) 模擬廃棄体

動作確認及び機能確認に用いる実規模スケールでの模擬廃棄体を設計・製作した。

#### a. 仕様

##### (a) 寸法

直径  $\phi 820$  mm、全長  $L = 1,730$  mm（把持部を除く）、寸法を図 2.1.6-3 に示す。

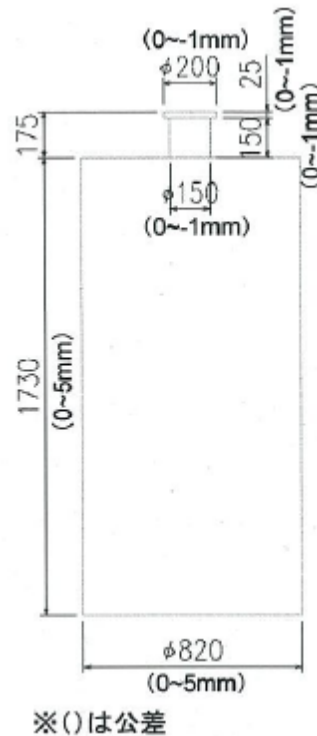


図 2.1.6-3 模擬廃棄体外形図

#### b. 重量

##### (a) 重量

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

##### (b) 材質

- ・炭素鋼
- ・錆対策として、防錆塗装を行った。

### 4) 基本構造及び製作方法

#### a. 基本構造

「仕様」に示す寸法、重量を確保するための基本構造の検討を行い、図 2.1.6-4 に示す通り、外形は寸法通りに加工し内部空間を設けることで重量を調整する構造とした。模擬廃棄体の円筒胴体部と蓋の接合方法は、製作性・取扱い性を考慮し、ボルト締結構造とした。上記構造にて、重心位置を計算し実機と比較した結果を図 2.1.6-4 に示す。

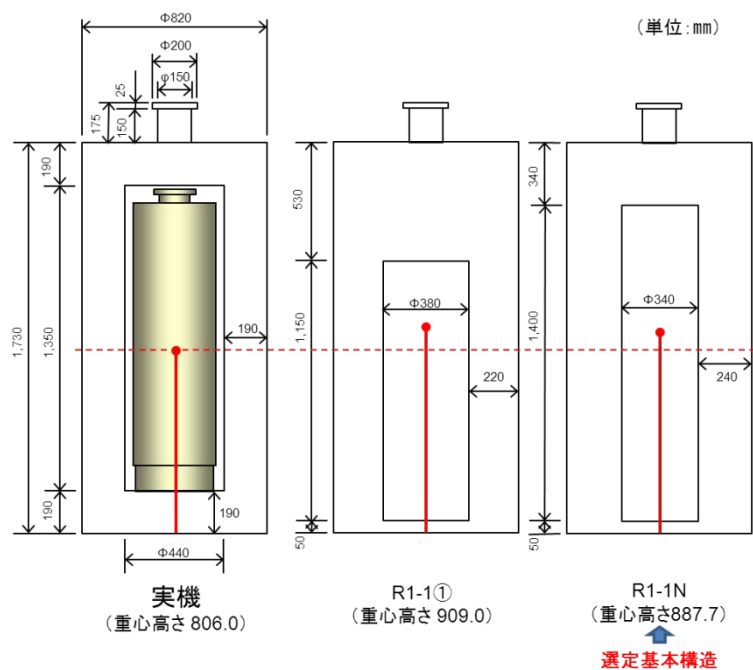


図 2.1.6-4 模擬廃棄体基本構造案および重心計算結果

(a) 製作方法と完成状況

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

なお、前項の基本構造を基に、本体上部にはハンドリング用のアイボルトを取り付け可能な構造とした。緩衝材除去試験中はアイボルトをはずし、キャップボルトを取り付けることでボルト孔への緩衝材の侵入を防ぐこととした。完成状況を図 2.1.6-5、図 2.1.6-6、図 2.1.6-7 に示す。



図 2.1.6-5 荒加工後外觀図



図 2.1.6-6 完成後外觀図



図 2.1.6-7 最終機械加工後外觀図

#### 5) 塩水

作動試験に使用する塩水を整備した。整備した塩水の水量は、固液分離装置と成分調整槽のそれぞれの設備を満水とした水量 17m<sup>3</sup>程度（図 2.1.5-9 参照）とした。

#### 6) 使用電源

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

#### 7) 除去緩衝材の仮置き場

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

#### 8) 設備保管等倉庫

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

## (2) 試験設備配置の検討

安全かつ効率的な動作確認試験および性能試験を実施するために、緩衝材除去装置の設置および試験中の揚重作業に用いるクレーンの配置（作業）スペースを考慮し、各設備の配置検討を行った（5.2.2 項参照）。検討結果を図 2.1.6-8 に示す。また模擬処分孔および模擬処分坑道の詳細を図 2.1.6-9 に示す

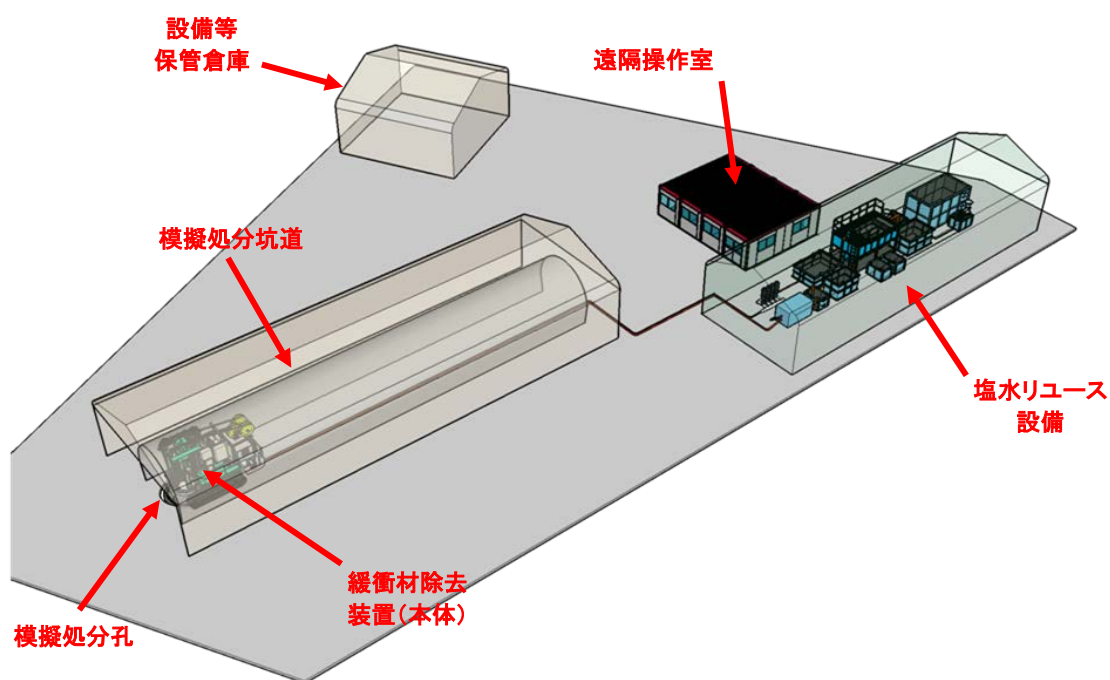


図 2.1.6-8 試験設備配置



## 2.1.7 処分坑道内における緩衝材回収作業

処分坑道内における緩衝材回収作業に係る基本動作を

図 2.1.7-1 に示す。



図 2.1.7-1 処分坑道における緩衝材回収作業基本動作



## 2.1.8 総合動作確認による緩衝材除去システムの成立性の検討

開発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を行い、噴射・吸引設備、塩水リユース設備、遠隔操作設備の機能確認および緩衝材除去システムの成立性を確認した。

### (1) 試験方法

模擬処分孔に緩衝材と模擬廃棄体を設置し、緩衝材除去システムにより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する実規模スケールの試験を行った（図 2.1.8-1）。緩衝材はブロック方式を採用し、緩衝材と模擬廃棄体の隙間はベントナイトペレットを充填した。

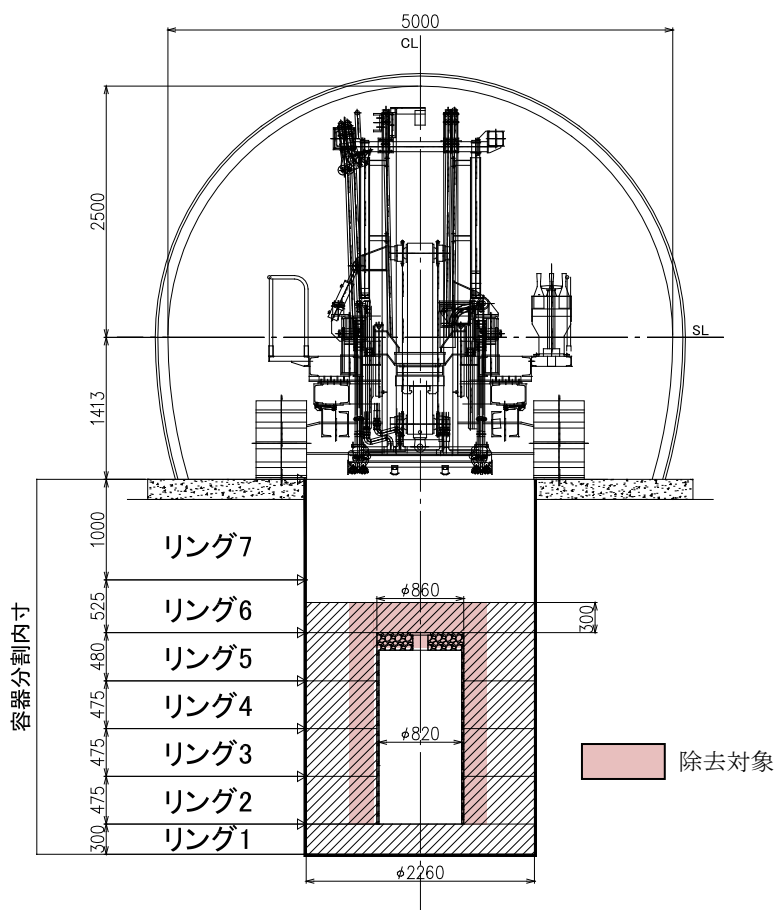


図 2.1.8-1 緩衝材除去試験の方法

## (2) 緩衝材除去試験に使用する資機材

緩衝材除去試験に使用する資機材を以下に示す。

### 1) 緩衝材除去システム

緩衝材除去システムは、①噴射・吸引設備、②塩水リユース設備、③遠隔操作設備からなる（図 2.1.8-2）。

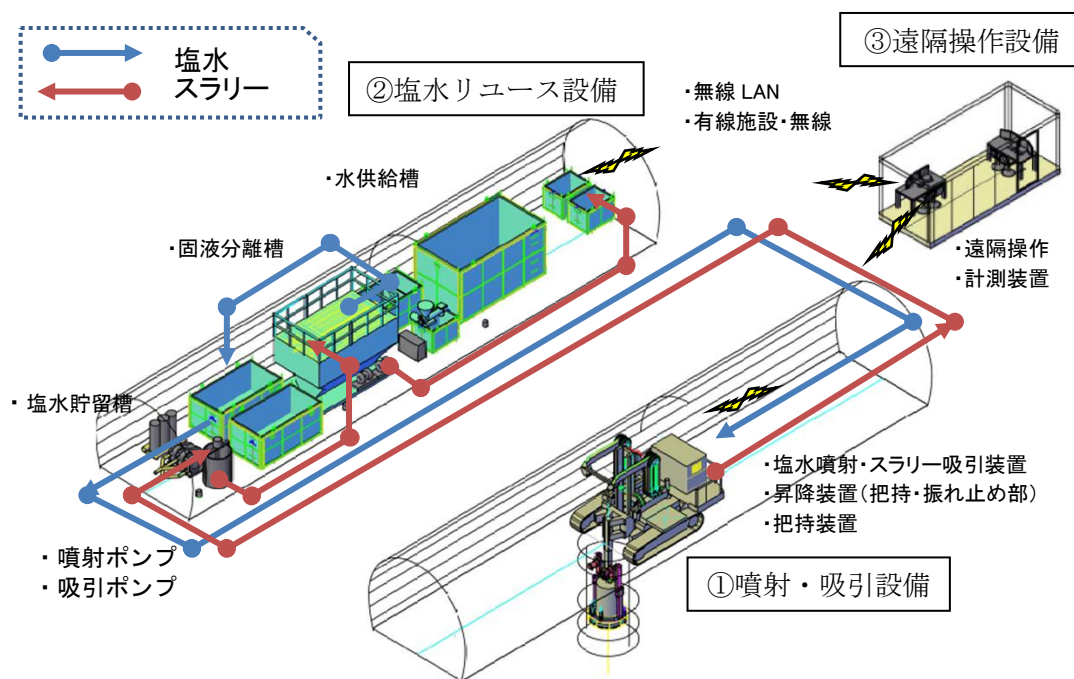


図 2.1.8-2 緩衝材除去システム（緩衝材除去による機能確認）

### 2) 緩衝材および模擬廃棄体

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 2.1.8-1）。

表 2.1.8-1 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 |

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、乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  および飽和度 60%程度とした(表 2.1.8-2)。また、緩衝材と模擬廃棄体との隙間(幅  $t=20\text{mm}$ )はペレットを充填(有効ベントナイト密度  $1.37\text{Mg/m}^3$ )し、緩衝材と模擬廃棄体を一体化させる。

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。緩衝材は No.1～No.6 リングに分割し、模擬処分孔から 2,505mm の高さまで定置した。作製した緩衝材の品質を確認し、平均緩衝密度  $1.608\text{Mg/m}^3$ 、飽和度 58.4%とほぼ仕様通りであった。

模擬廃棄体と緩衝材を設置する模擬処分孔の寸法は、内径  $\phi 2,596\text{mm}$ 、深さ 4,556mm とした。

表 2.1.8-2 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%<br>+ケイ砂 30wt%           | ・ベントナイトはクニゲル V1(クミネ工業製)を用いる                |
| 品質 | 乾燥密度 $1.6\text{Mg/m}^3$<br>飽和度 60%程度 | —                                          |
| 形状 | 外形 2,260mm、                          | ・模擬廃棄体頂部および底部は円盤型、側部は中空型(模擬廃棄体設置部を有する)の緩衝材 |
| 重量 | 約 21.1t                              | —                                          |

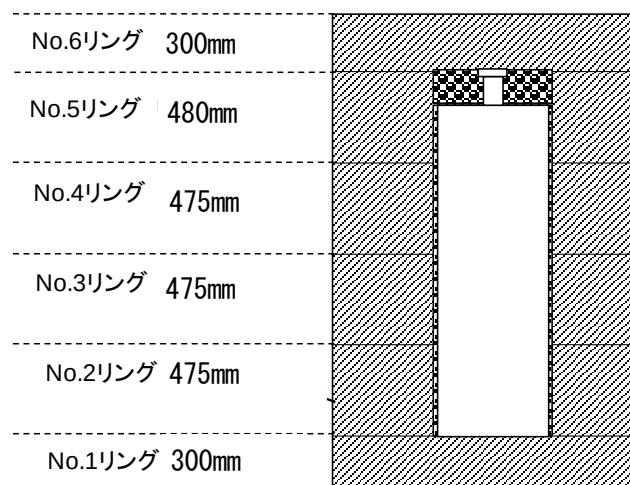


図 2.1.8-3 試験に用いた緩衝材寸法

### 3) 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  $1.37\text{Mg/m}^3$ )した(図 2.1.8-4)。

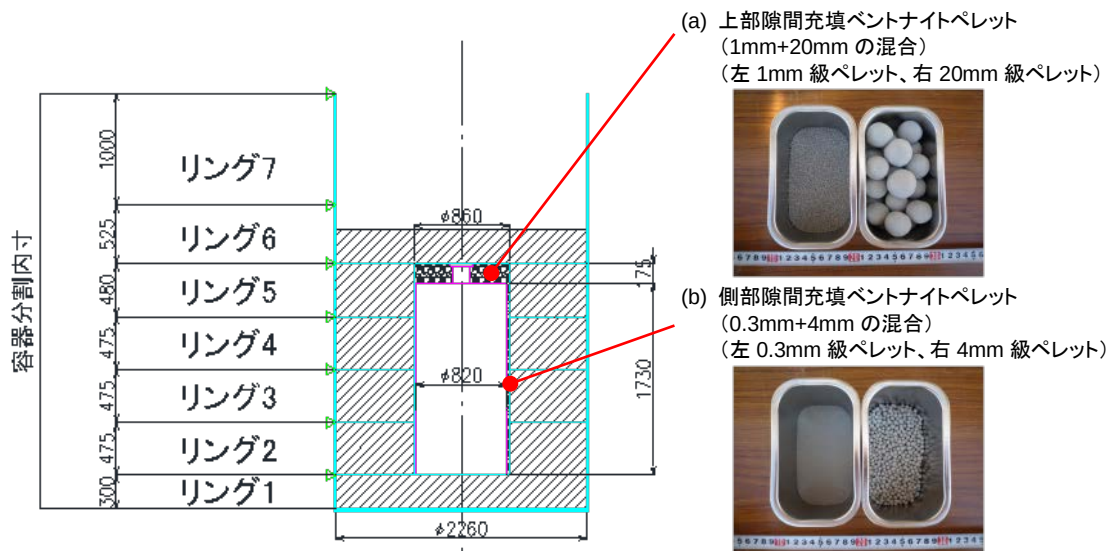


図 2.1.8-4 充填材料と充填位置

表 2.1.8-3 試験に用いるベントナイトペレットの仕様

| 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/m <sup>3</sup> | —                                         |
| 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                     | —                                         |

### (3) 緩衝材除去システムの試験条件

緩衝材除去に使用する緩衝材除去システムの試験条件を表 2.1.8-4 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た。

表 2.1.8-4 試験条件（緩衝材除去による機能確認試験）

| 項目       | 試験条件                                                                                                                    |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 塩水       | 濃度 4wt%<br>水量 23m <sup>3</sup>                                                                                          |
| 塩水噴射条件   | 噴射圧力 0.6MPa±0.5%<br>噴射流量 15m <sup>3</sup> /h<br>ノズル径 φ 2.2mm<br>ノズル数<br>下向き：16 ノズル×2 環<br>横向き：8 ノズル×1 環<br>揺動速度 1cm/sec |
| スラリー吸引条件 | 吸引流量 15m <sup>3</sup> /h 以上                                                                                             |

#### (4) 取得特性および取得手順

本試験により取得するデータは、主として①緩衝材除去状況（緩衝材除去特性）を確認するもの、②塩水リユース設備の稼働状況（塩水リユース特性）を確認するもの、③遠隔による操作性を確認するものである。これらの取得特性および手順を図 2.1.8-5、表 2.1.8-5 に示す。

①については緩衝材除去に関わる安定性および効率性の確認を目的とし、②については緩衝材除去に関わる塩水およびスラリーの処理サイクルの安定性および確実性の確認を目的とし、③については①②に関わる操作・データ取得状況から操作性・確実性を確認した。

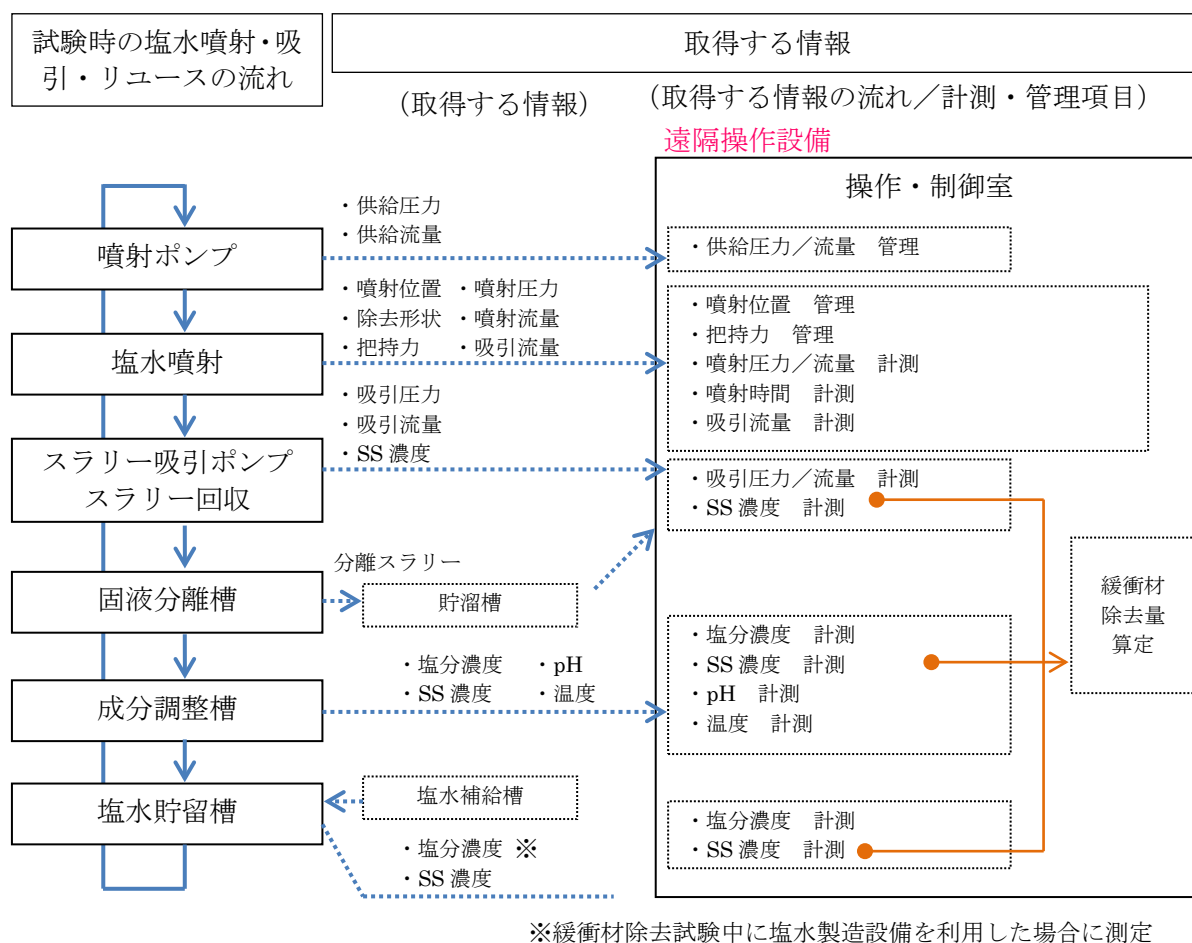


図 2.1.8-5 緩衝材除去試験手順

表 2.1.8-5 緩衝材除去により確認する機能と取得特性および取得方法

| 取得特性      | 機能                           | 試験により取得する特性                  | 特性の取得方法         | 設備       |
|-----------|------------------------------|------------------------------|-----------------|----------|
| ①塩水リユース特性 | 噴射機能<br>(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<br>(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<br>(塩水の循環機能)        | 供給流量<br>(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<br>(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<br>(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。

## (5) 試験結果

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・確実性により評価した。なお、試験時の緩衝材除去システムの連続稼働時間は最大 7 時間である。

### 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。

- 塩水噴射・スラリー吸引機能：塩水・スラリーの給排水能力の確認
- 固液分離機能：スラリーの固液分離機能、リユースの SS 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

#### a. 塩水噴射・スラリー吸引機能

本試験における塩水噴射条件（噴射圧力 0.6MPa、ノズル径  $\phi 2.2\text{mm}$ 、下向き噴射時ノズル数 16 ノズル $\times$ 2 環）では、約  $15\text{m}^3/\text{h}$  の塩水を使用することになる。試験は図 2.1.8-6 に示すように約 80 時間行っており、単純に計算すると約  $1,200\text{m}^3$  の塩水が必要となる。開発した塩水リユース機能により、本試験では約  $25\text{m}^3$  の塩水を使用することで、緩衝材の除去を行うことが可能となった。

また、塩水噴射流量は概ね  $15\text{m}^3/\text{h}$  の流量で推移し吸引流量はそれを上回る数値となっていることから、塩水噴射とスラリー吸引量が一定のバランスで保たれており、十分な機能を発揮できていることが確認できた。

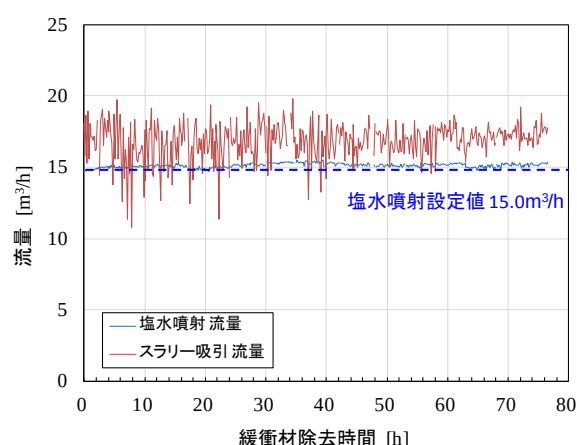


図 2.1.8-6 塩水噴射・スラリー吸引流量の測定結果

## b. 固液分離機能およびリユース後の塩水品質

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 濃度および塩分濃度、pH 等性状の確認を行った。測定結果を図 2.1.8-7、図 2.1.8-8 に示す。これらより得られた知見を以下に示す。

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。
- 塩分濃度（設定：4.0%）、pH（基準値：5.8～8.6）から大きな変動は見られなかった。
- 水温は、日中の気温変化、ポンプ等装置稼働による影響を受け、同一試験日（最大約 7 時間）の試験開始から試験終了にかけて温度が上昇した。今回の連続 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。

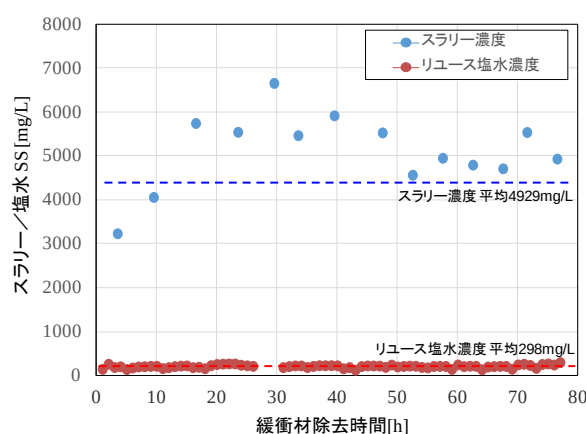


図 2.1.8-7 固液分離設備前後の SS 濃度

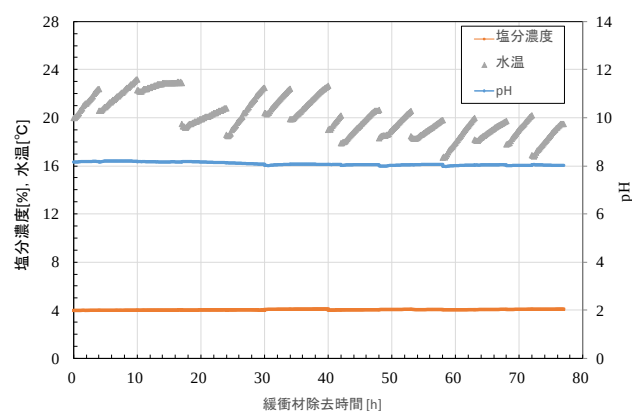


図 2.1.8-8 塩分濃度・pH・水温の測定結果（固液分離後）



## 2) 緩衝材除去特性

### a. 除去状況

緩衝材除去は、図 2.1.8-3 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 (No.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図 2.1.8-9 に緩衝材除去速度の結果を示す。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、緩衝材 No.5 (300~475mm) は平均 17.1mm/h、緩衝材 No.4 (475mm~) は平均 22.9mm/h と速度が上昇している。
- 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。

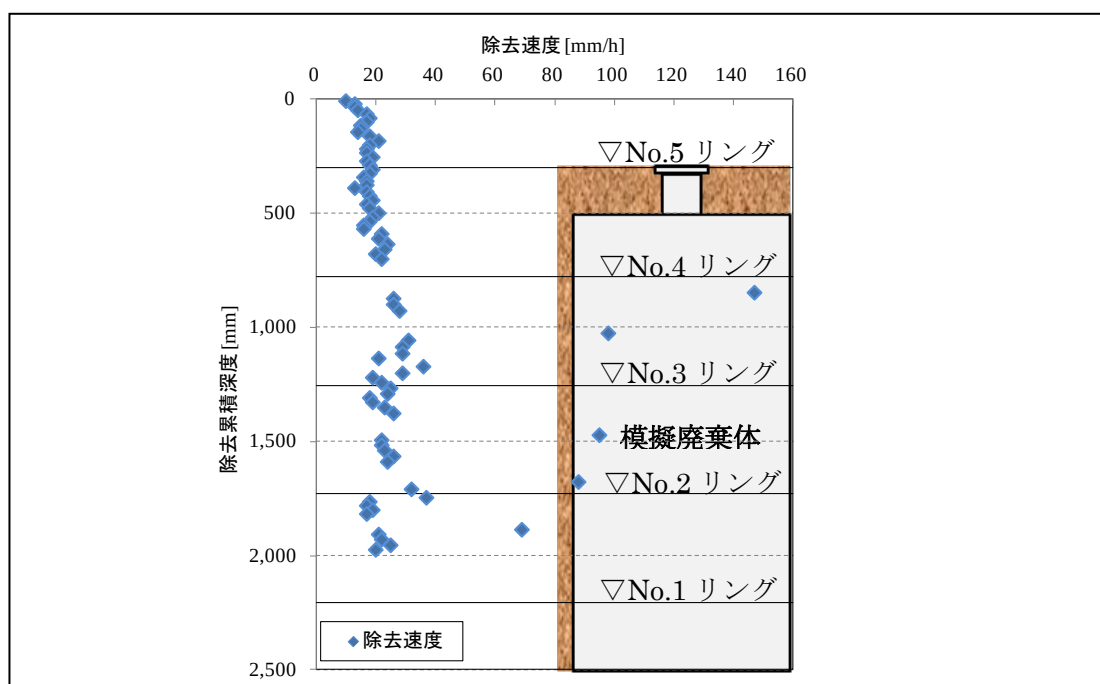


図 2.1.8-9 緩衝材除去深度測定結果

表 2.1.8-6 緩衝材除去速度の比較

| 除去深度<br>(除去部位)                    | 平均除去速度<br>(mm/h) |
|-----------------------------------|------------------|
| 0～300mm<br>(円盤状緩衝材部位)             | 16.2             |
| 300～475mm<br>(リング状+上部ペレット)        | 17.1             |
| 475～1,970mm 付近<br>(リング状+側部ペレット部位) | 22.9※            |

※除去速度 50mm/h 以上の 5 点を除いて算出

### 3) 3D スキャナによる緩衝材除去計測

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。

#### a. 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 2.1.8-10 に示す。①除去形状計を 3D スキャナにより計測し高さ方向に分割したデータを、②円でフィッティングし、③高さ方向の円錐台の積み重ねとして除去体積を算出した（ただし、模擬廃棄体は体積控除）。

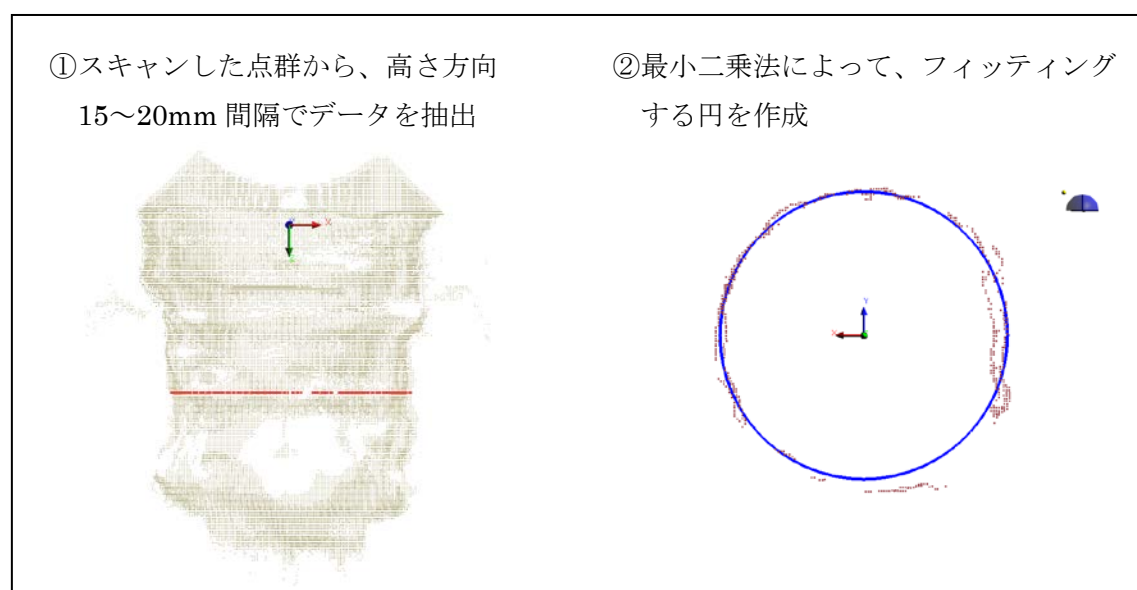


図 2.1.8-10 形状計測結果を用いた緩衝材除去体積の算出方

b. 計測結果

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 2.1.8-11～図 2.1.8-13 に示す。これらのデータから得られた知見を以下に示す。

- ・ 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が大きくなることはなく、135～327mm の範囲であった。
- ・ 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。

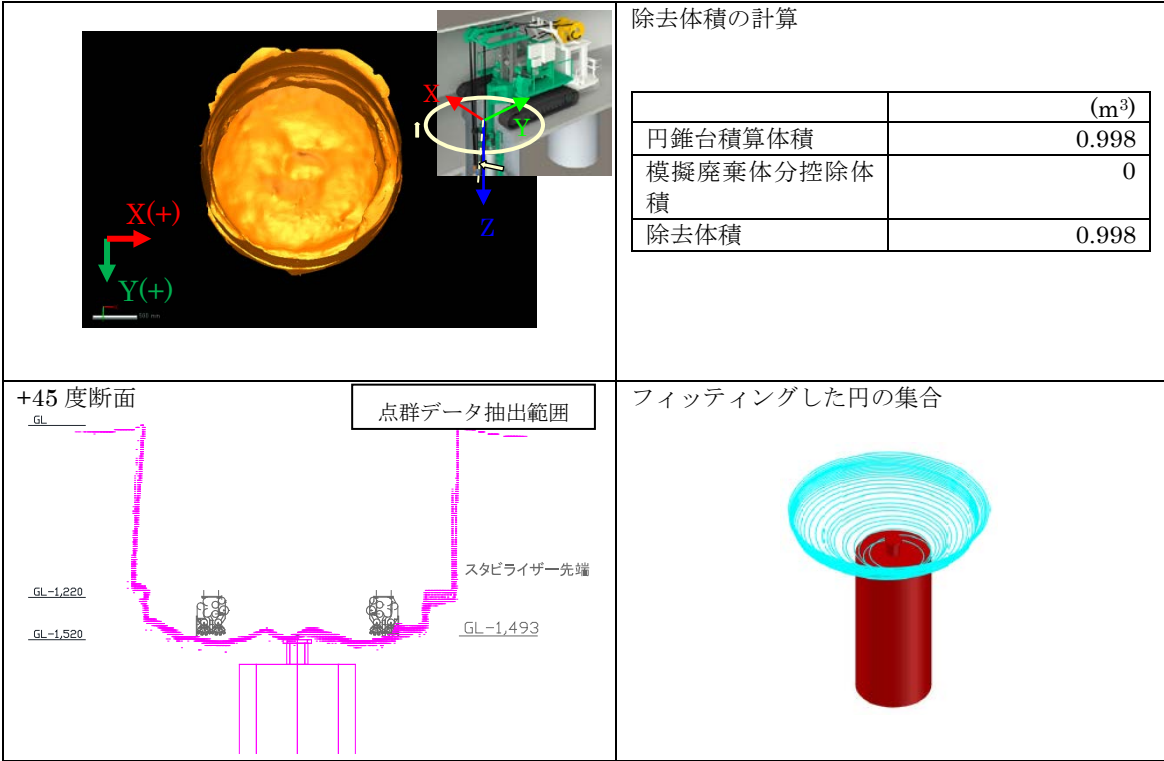


図 2.1.8-11 緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 17 時間後）

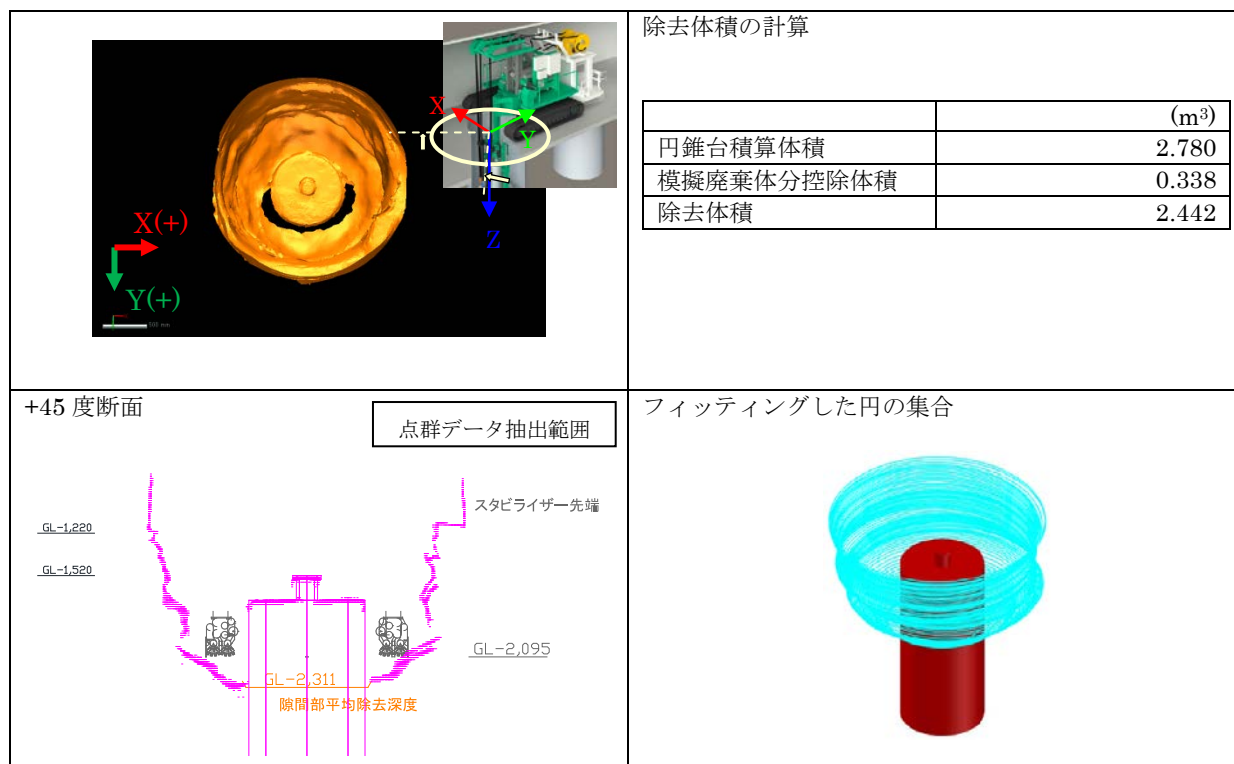


図 2.1.8-12 緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 42 時間後）

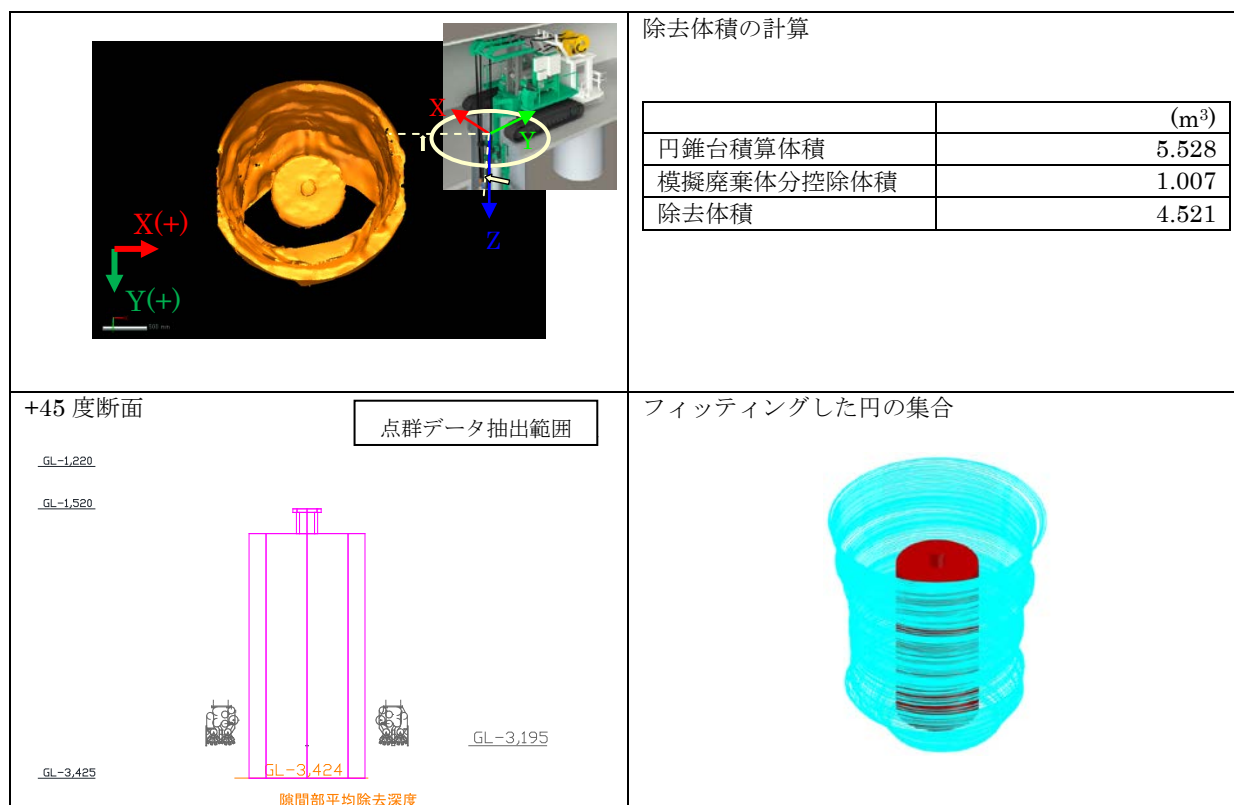


図 2.1.8-13 緩衝材除去形状と除去体積計算結果（累積 77 時間後）

#### 4) 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。

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

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

※本試験では緩衝材の乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>

上記の SS 濃度から算定した緩衝材除去量と 3D スキャナによる緩衝材除去量の比較を図 2.1.8-14 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。

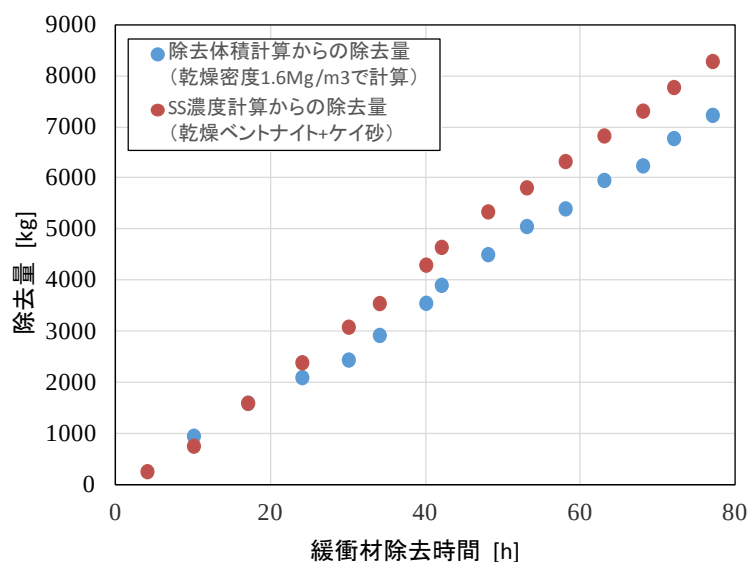


図 2.1.8-14 緩衝材累積除去量（除去堆積計算と SS 濃度計算）の比較

## 5) 遠隔による制御・監視機能

### a. 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。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。
- 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 2.1.8-15、図 2.1.8-16）。
- 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 2.1.8-16）。

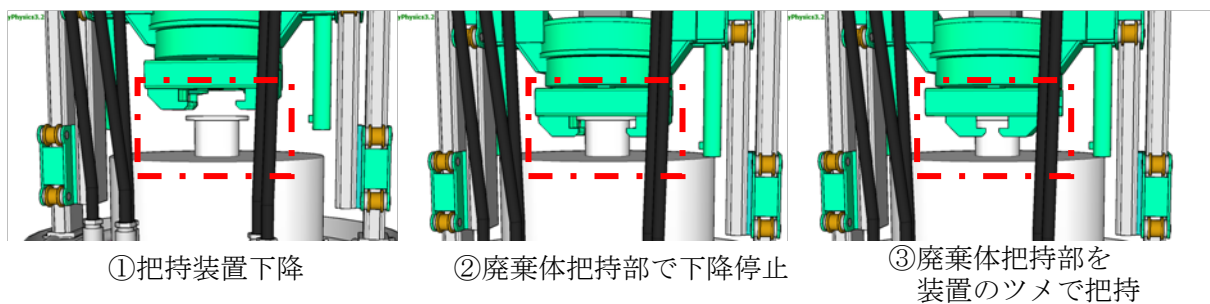


図 2.1.8-15 模擬廃棄体の把持方法



図 2.1.8-16 模擬廃棄体の把持・引上げ状況

b. 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（図 2.1.8-17）。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。
- 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 2.1.8-17 塩水リユース設備の監視状況







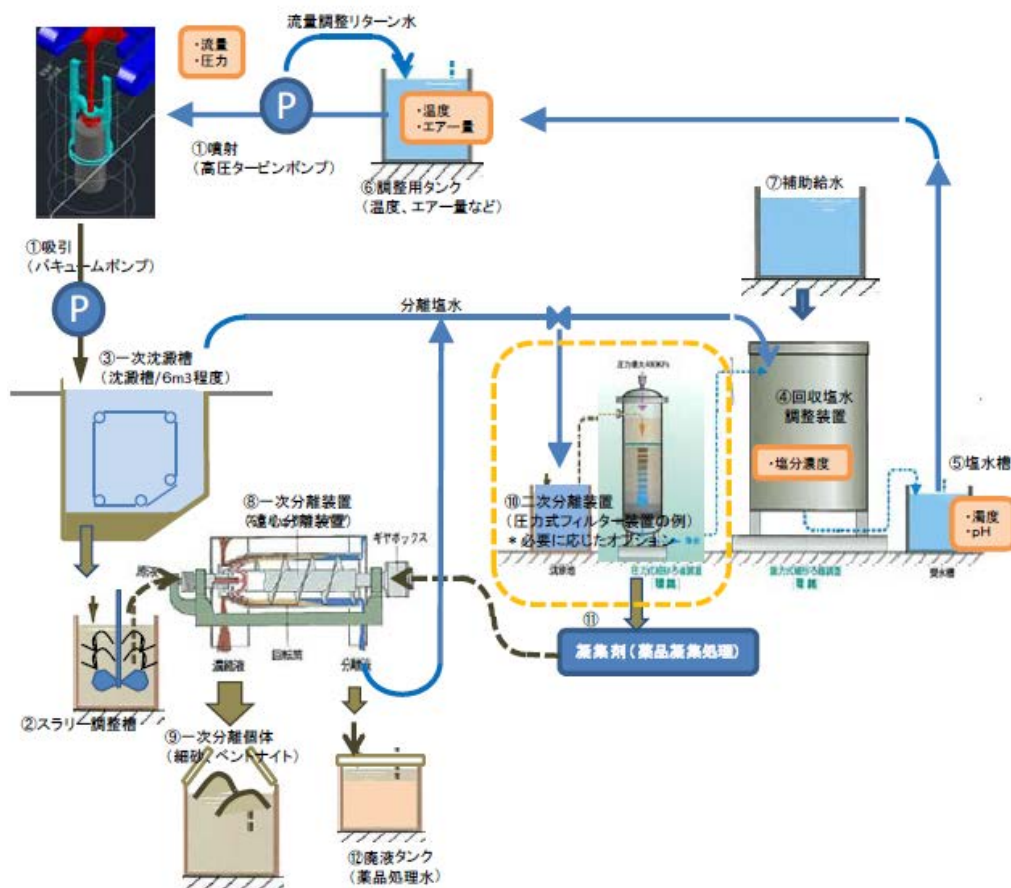


図 2.1.9-2 塩水リユース設備の設備概念 (平成 23 年度)

### (3) 平成 24 年度成果

緩衝材除去装置のうち塩水噴射・スラリー吸引装置や昇降装置、塩水リユース設備の製作に着手するとともに、遠隔操作設備等の設計を実施した。

製作した装置、設備については、実機製作 (組立) に向けた機能確認を実施し、これまでの要素技術開発では得られなかった、塩水噴射・スラリー吸引装置の制御方法 (例えば揺動速度) や噴射ノズルの最適角度などの知見を取得した。



図 2.1.9-3 塩水噴射・スラリー吸引装置の機能確認 (平成 24 年度)



図 2.1.9-4 昇降装置・把持装置を含む緩衝材除去装置ベース部の組立（平成 24 年度）

塩水リユース設備のうち固液分離装置の選定は、地下環境の空間的制約において処理能力を含めた重要な課題として挙げられ、種々実機を用いた機能確認を実施した。この結果、固形分の自然沈降を主たる機能として備える「シクナー沈降濃縮装置」が、規模は大きくなるものの、構造的に簡易、すなわち放射線管理場におけるメンテナンス性や操作性に有効であり、かつ自然沈降を利用している点、不必要な化学成分を持ち込む必要がなく、もっとも有効な装置として選定した。また、これら機能確認の結果をもとに、塩水リユース設備の全体構成（スラリーの循環フロー）を構築した。

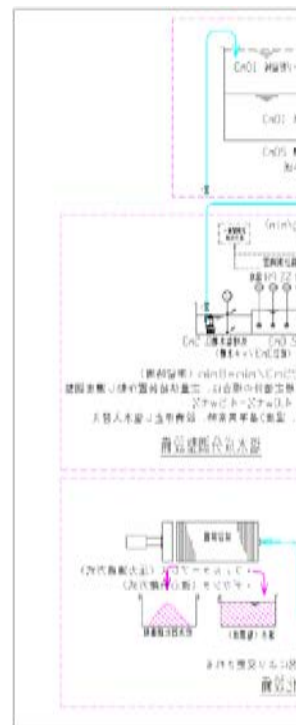


図 2.1.9-5 塩水リユース設備の全体構成（平成 24 年度）

遠隔操作設備の設計においては、遠隔操作の枠組みとともに、現存する装置類の実証を実施した。具体的には、映像データと、エンコーダを用いた把持装置の相対距離、ならびに無線伝送を可能とするコントローラーを用いた遠隔操作の実証を行い、安全性や操作性に対する課題を洗い出した。特に対象物の位置情報は映像データのみでは、安全な遠隔操作の実施が困難であることを知見として得、次年度以降の 3D スキャナ観測システムの開発、および遠隔走行などへの展開に大きく寄与することとなる。



図 2.1.9-6 映像カメラ、エンコーダ、無線伝送コントローラーを用いた実証（平成 24 年度）

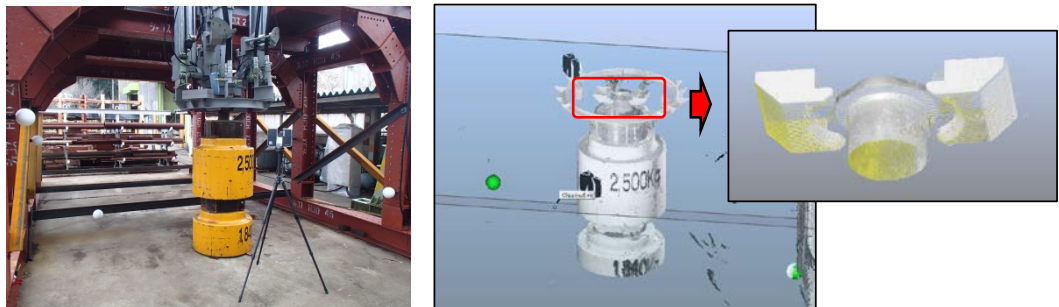
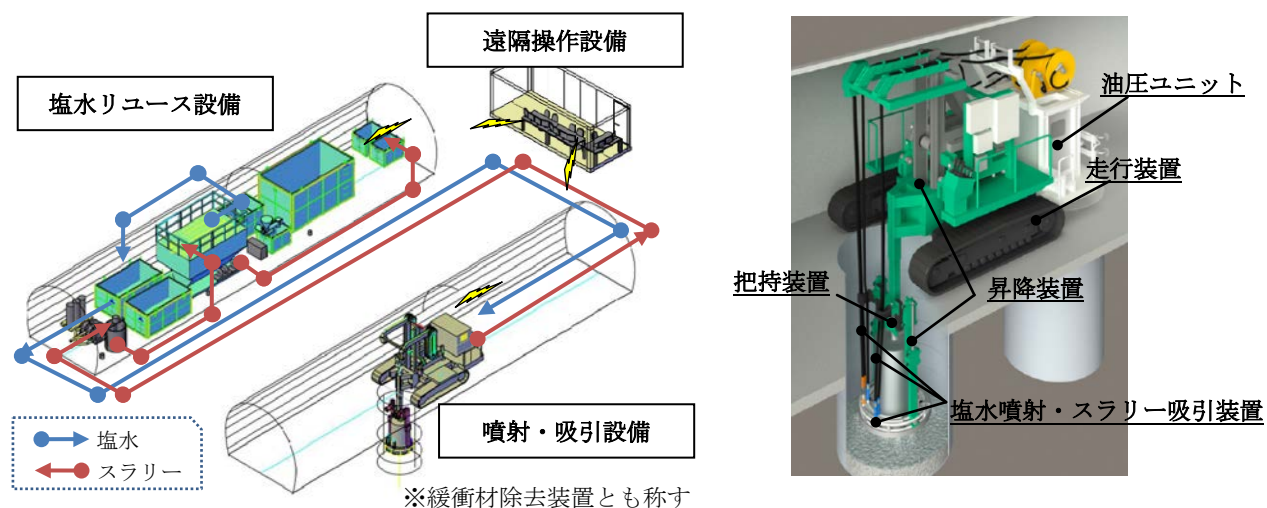


図 2.1.9-7 3D スキャナの試行（平成 24 年度）



#### (4) 平成 25 年度成果

緩衝材除去装置のうち走行装置、油圧ユニットなどの駆動装置の製作を行うとともに、平成 25 年度までに製作してきた各装置の組立・調整を実施した。この組立・調整は遠隔操作設備の製作、塩水リユース設備のレイアウトを含み、組立・調整完了後にはそれぞれ装置・設備の動作確認を実施した。



(a) 緩衝材除去システムの構成設備

(b) 噴射・吸引設備の構成装置（機能）

図 2.1.9-8 緩衝材除去システムの構成（平成 25 年度）



(a) 設備全景



(b) 噴射・吸引設備  
(緩衝材除去装置)



(c) 塩水リユース設備



(d) 遠隔操作設備

図 2.1.9-9 緩衝材除去システム構成設備の整備状況（平成 25 年度）

動作確認では、走行装置の走行速度や昇降装置のストローク量、塩水噴射・スラリー吸引装置の揺動速度、塩水リユース設備の固液分離機能など、設計した装置・設備が所定の機能を有し、それぞれに与えられた基準を満足することを確認した。

また、動作確認を終えた緩衝材除去システムの各設備を用い、次年度の総合動作確認の実施に向けた課題抽出が可能な体系での緩衝材除去試験（実規模緩衝材の上部、下部に分割した除去試験）を実施した。緩衝材除去システム全体を稼働させた初めての試験である。この結果、塩水噴射・スラリー吸引装置の除去深度増加に伴う吸引量の低下、昇降装置の自然降下といった装置改良の必要性が明らかになったほか、遠隔操作設備のうち 3D スキャナ観測システムにおける、廃棄体把持部の自動連続計測や緩衝材除去形状取得範囲拡大など、操作性や安全性を考慮した場合の追加機能の必要性が明らかになった。

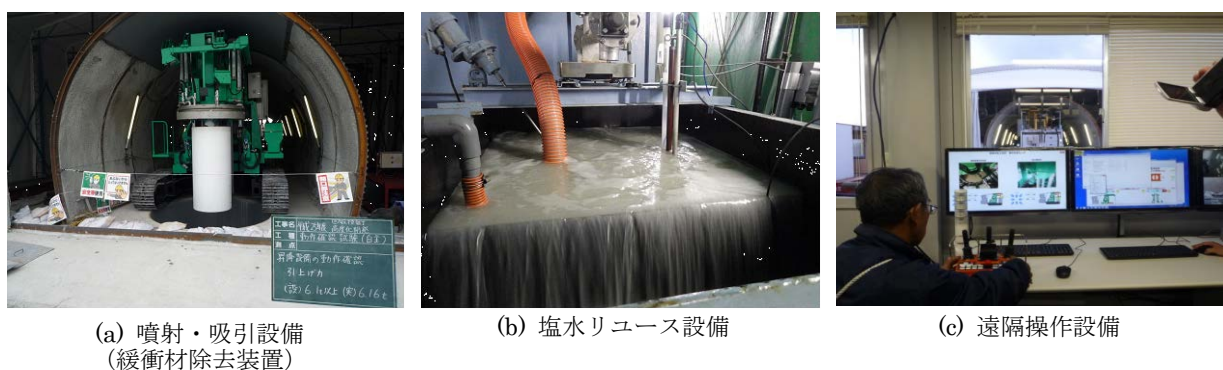


図 2.1.9-10 各設備の動作確認試験（平成 25 年度）



図 2.1.9-11 緩衝材除去による各設備の機能確認（平成 25 年度）

# (5) 平成 26 年度成果

総合動作確認による緩衝材除去システムの評価に向けて、平成 25 年度に明らかになった各設備の課題を整理し、評価項目の達成に向けた設備の改良を実施した。主な改良点は以下の通りである。

表 2.1.9-1 緩衝材除去システムを構成する各設備の改良（平成 26 年度）

| 課題の整理 | 評価項目             | 各設備の改良                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|       | 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<br>設計条件：スラリー吸引流量 0.25m <sup>3</sup> /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<br>・吸引ホースの改良（40A×2 本→補強コード入り 80A×1 本）<br>・吸引ノズルの増加（16 ノズル→24 ノズル）<br>・吸引ホース巻取り装置の改良<br>・揺動トルクの改良（トルク力アップ）<br>・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      | (2) 噴射・吸引設備のうち昇降装置の改良<br>設計条件：自然降下量 10mm/h 以下<br>・噴射部昇降油圧回路の改良（シャットオフバルブ追加）<br>・把持部昇降油圧回路の改良（シャットオフバルブ追加）                                                                                                                                                 |
|       | オペレーター<br>の遠隔操作性 |                                                                                                                                                                                                                                                           |
|       | 装置・設備<br>の安全性    | (3) 遠隔操作設備の改良<br>設計条件：廃棄体の把持自動連続計測<br>・ファイル方式によるデータ連携（リトライ機能付き）<br>・連続計測アプリケーションの自動実行ループの制作<br>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<br>・3D 観測装置 2 台計測および自動合成<br>・形状計測結果の ASC 形式点群保存（AutoCAD 読取可能形式）                                                             |
|       | オペレーター<br>の遠隔操作性 |                                                                                                                                                                                                                                                           |

これらの設備の改良は、事前の調査・設計、製作（改良）、動作確認検査を実施したほか、繰返しの動作確認を実施した後、総合動作確認を実施した。以下に主な設備改良点を図示する。

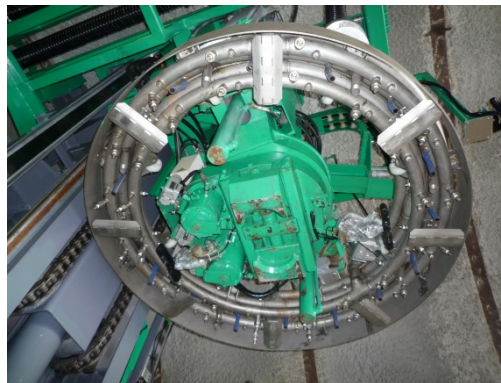


図 2.1.9-12 噴射・吸引設備の改良後全景（平成 26 年度）





(a) 吸引ホースの改良



(b) 吸引ノズルの増加

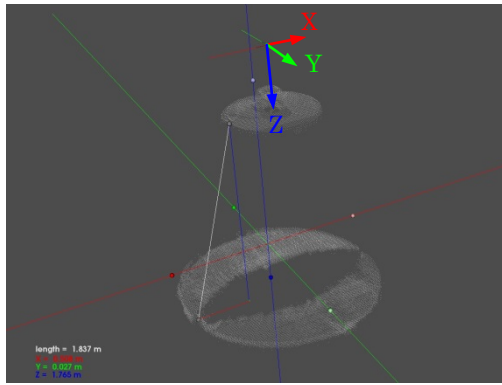


図 2.1.9-13 噴射・吸引設備のうち塩水噴射・スラリー吸引装置（平成 26 年度改良後）

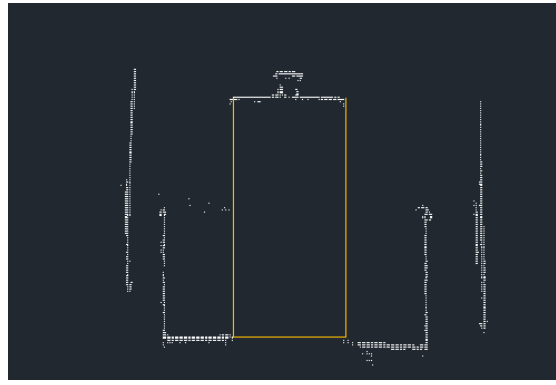


(a) シャットオフバルブの追加

図 2.1.9-14 噴射・吸引設備のうち昇降装置（平成 26 年度改良後）



(a) 3D 観測装置 2 台計測および自動合成



(b) AutoCAD 出力断面図

図 2.1.9-15 遠隔操作設備のうち緩衝材除去形状取得支援システム（平成 26 年度改良後）



## 2.2 地下環境における実証試験計画

2.1 で開発した緩衝材除去システムを用いて、地下環境で緩衝材除去試験の実証試験を行うための試験計画の検討を行った。

本検討では、

- ①実証試験に必要な装置、設備の調査・検討
- ②実証試験に必要な試験坑道の基本設計

を行った。なお、緩衝材除去システムの地下作業環境への検討には、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。図 2.1.9-1 に「実証試験計画の見直し」の検討フローを示す。

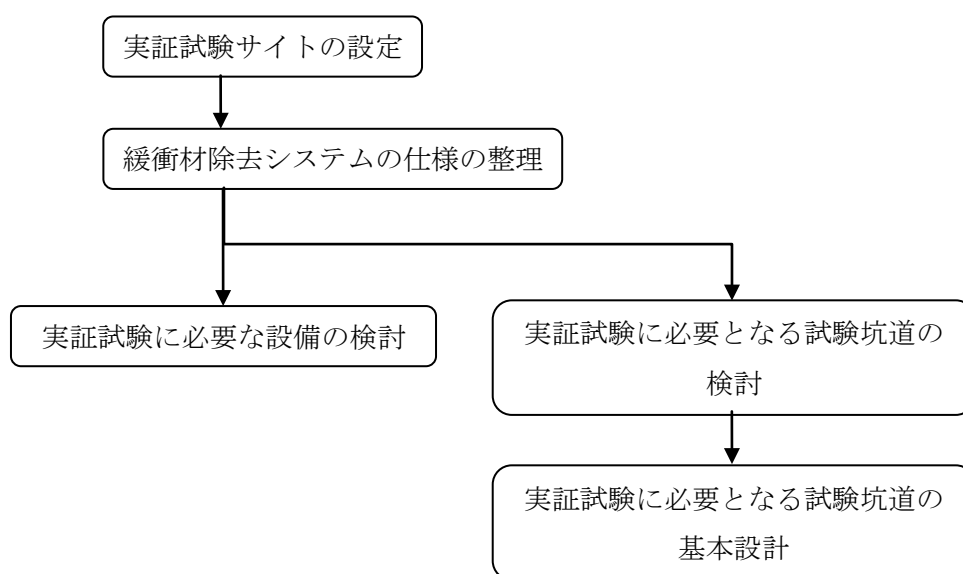


図 2.1.9-1 実証試験計画の見直し検討フロー

### 2.2.1 実証試験サイトの設定

地下環境を考慮するために、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深度 350m 調査坑道を対象とした。

#### (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 2.2.1-1 に、東立坑、周回坑道及び試験坑道 2 の断面仕様を図 2.2.1-2～図 2.2.1-4 を示す。緩衝材除去試験の実証試験場所を「試験坑道 2」とした。試験坑道 2 の仕様は、坑道断面  $\phi 4000\text{mm}$ 、坑道延長 25m を設定した。

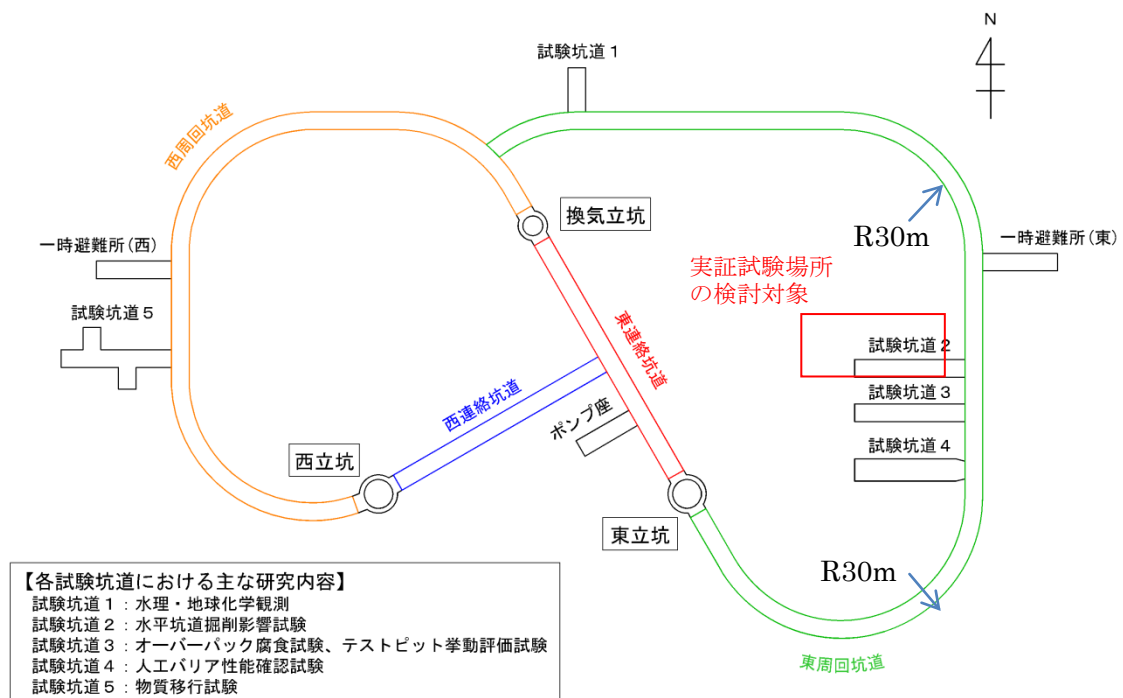


図 2.2.1-1 地下坑道の配置概要[1]

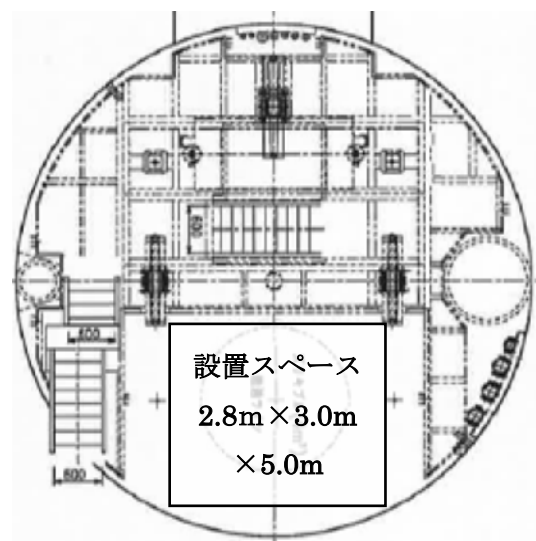


図 2.2.1-2 搬出入に用いる東立坑の断面仕様[1]

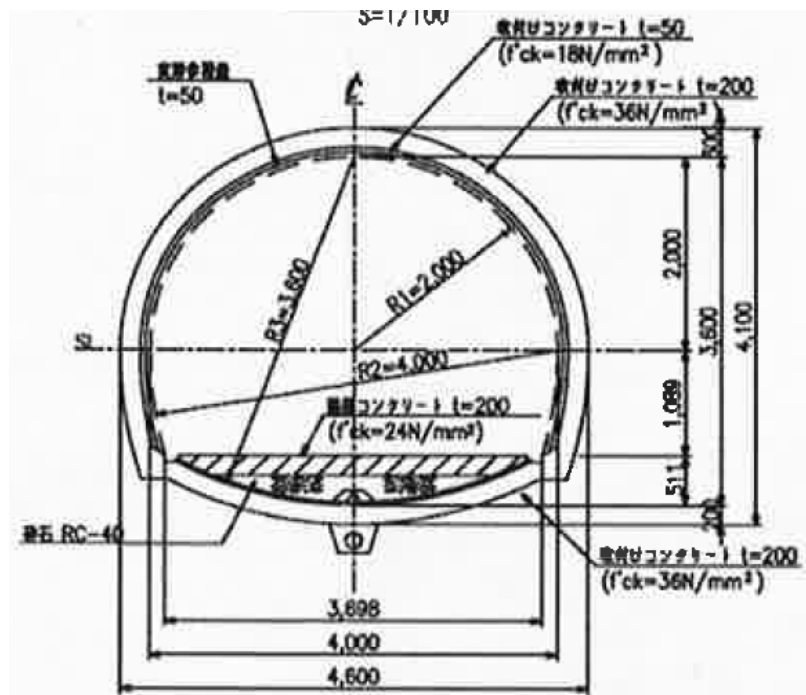


図 2.2.1-3 周回坑道の断面仕様[1]

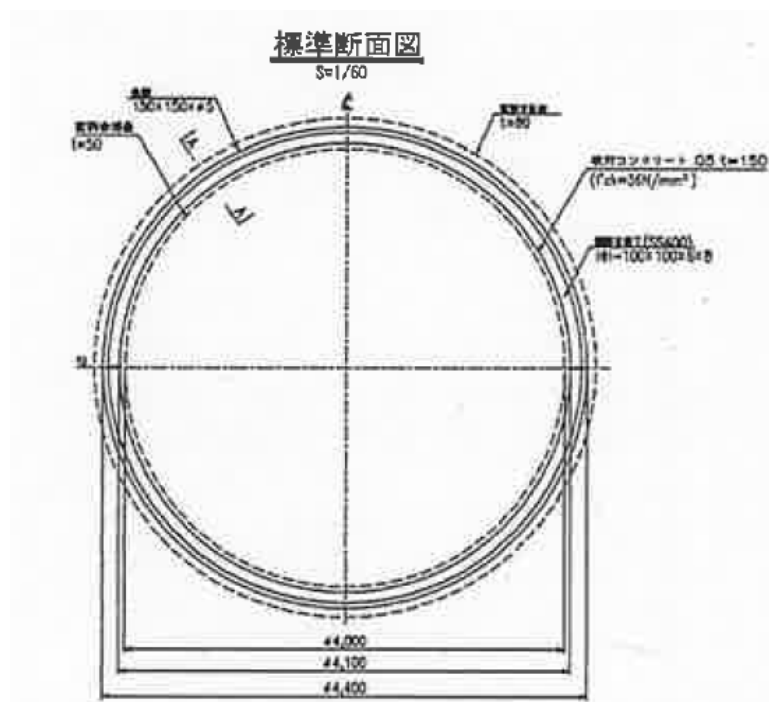


図 2.2.1-4 試験坑道 2 の断面仕様[1]

## (2) 地下坑道の設備

幌延深地層研究センターの深度 350m 調査坑道に保有される資機材の搬出入設備および坑道仕様を表 2.2.1-1 に示す。表中のトロリーを使用し、実証試験に必要な資機材を試験坑道 2 まで搬出入するため、資機材は 4t 以下という制約を受ける。

表 2.2.1-1 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        | φ 6.5m         | 立坑（揚重荷重 8 t）<br>坑口移動台車 8 t |
| 立坑下       | 高さ H<br>約 4.5m | トロリー<br>（揚重荷重 2 t @2 基）    |
| 周回坑道      | 高さ H<br>約 3.0m | トロリー<br>（搬送荷重 2 t @2 基）    |
| 試験坑道 2 入口 | 高さ H<br>約 3.0m | トロリー<br>（揚重荷重 2 t @2 基）    |
| 試験坑道 2    | 高さ H<br>約 4.0m | トロリー<br>（搬送荷重 2 t @2 基）    |

## 2.2.2 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 2.2.2-1 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。

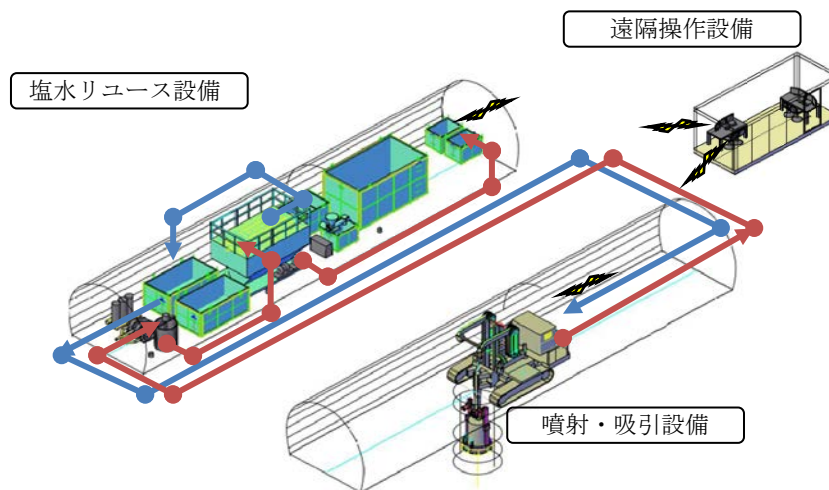


図 2.2.2-1 緩衝材除去システムの設備概要

### (1) 噴射・吸引設備

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 2.2.2-1）である。

表 2.2.2-1 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  |

噴射・吸引設備の総重量は約 15.9t 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、噴射・吸引設備を構成する①、②、③、④（表 2.2.2-1）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 2.2.2-2 に検討結果を示す。

表 2.2.2-2 噴射・吸引設備の分割検討結果

| 主部位                | 細部              | 高さ<br>(mm) | 幅<br>(mm) | 長さ<br>(mm) | 重量<br>(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<br>(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     |

## (2) 塩水リユース設備

塩水リユース設備の構成要素および寸法・重量を表 2.2.2-3 に示す。塩水リユース設備は各水槽を分割せずに運搬、設置を検討した。

表 2.2.2-3 塩水リユース設備の仕様

| 設備名称   | 公称容量<br>(m <sup>3</sup> ) | 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     |

## (3) 遠隔操作設備

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。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。

## 2.2.3 実証試験に必要な設備の検討

### (1) インフラ設備

緩衝材除去試験に必要なインフラ設備の仕様を表 2.2.3-1 に示す。電気及び給水は東立坑から供給できるものとし、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  $\phi 21\text{mm}$ 、 $\phi 37\text{mm}$ 、 $\phi 66\text{mm}$  が必要となる。

表 2.2.3-1 緩衝材除去試験に必要なインフラ仕様

| 電気                                 | 給水               | 排水               |
|------------------------------------|------------------|------------------|
| 100V 4kw<br>200V 48kw<br>400V 22kw | 23m <sup>3</sup> | 23m <sup>3</sup> |

### (2) 試験坑道内の運搬・組立設備

2.2.2 に示したように、噴射・吸引設備は地下坑道内を分割し運搬するため、坑道内の運搬・組立を行う設備が必要となる。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(表 2.2.2-2)、塩水リユース設備では、固液分離槽の3,400kg(表 2.2.2-3)となる。

本検討では、これらの条件を考慮し、各設備を試験坑道内で運搬装置として、吊り上げ式設備である天井クレーン(オーバーヘッド形)、天井クレーン(ローヘッド形)、門型クレーンを選定した。その中から、運搬荷重が4t以下であること、坑道内の利用、仮設設備の施工性を考慮し、天井クレーンのローヘッド形が最適と考えた。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、移動機能を有した電動式巻上機を選定した。

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。なお、天井クレーン(ローヘッド形)は、走行レール、サドル、ガーダ、巻上機から構成する(表 2.2.3-2)。

表 2.2.3-2 天井クレーンの仕様

| 仕様機材  | 仕様                |
|-------|-------------------|
| 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           |



### (3) 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の配置を検討した。緩衝材除去試験は遠隔操作となるが、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、換気設備の仕様として、送気管φ200、排気管φ300が必要となる。

#### 2.2.4 実証試験に必要な試験坑道の検討

試験坑道対象となる試験坑道2（直径φ4000mm、延長L=25m）において、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寸法の検討を行った。ここで、緩衝材除去システムの各設備は、試験坑道2までの運搬で経由する立坑および周回坑道では既存坑道断面（図2.2.1-2、図2.2.1-3）での運搬が可能であった。

##### (1) 試験坑道

噴射・吸引設備は、第2次取りまとめにおける堆積岩系坑道断面（以下、第二次とりまとめ断面）を想定し開発を行っており、図2.2.4-1に示すように既設の試験坑道断面では噴射・吸引設備を搬入することができない。そのため、試験坑道2は少なくとも第二次取りまとめ断面が確保できるように拡幅が必要である。

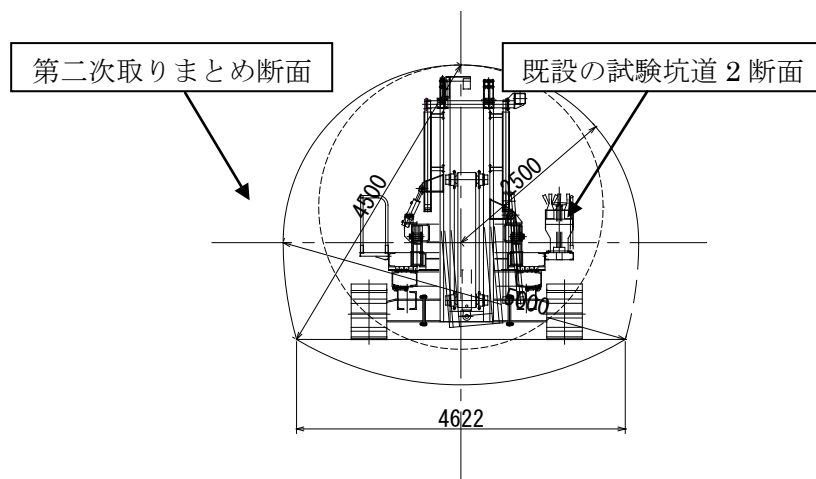


図 2.2.4-1 処分坑道の仕様例[2]

## (2) 試験坑道の入口部

試験坑道 2 への試験用資機材の検討を行うため、緩衝材除去システムの中でも最大寸法となる塩水リユース設備の成分調整槽を用いた。検討の結果を図 2.2.4-2 に示す。試験坑道 2 に水供給槽を搬入する場合、入口両端を 1,500mm 程度隅切りするような入口部の拡幅が必要である。

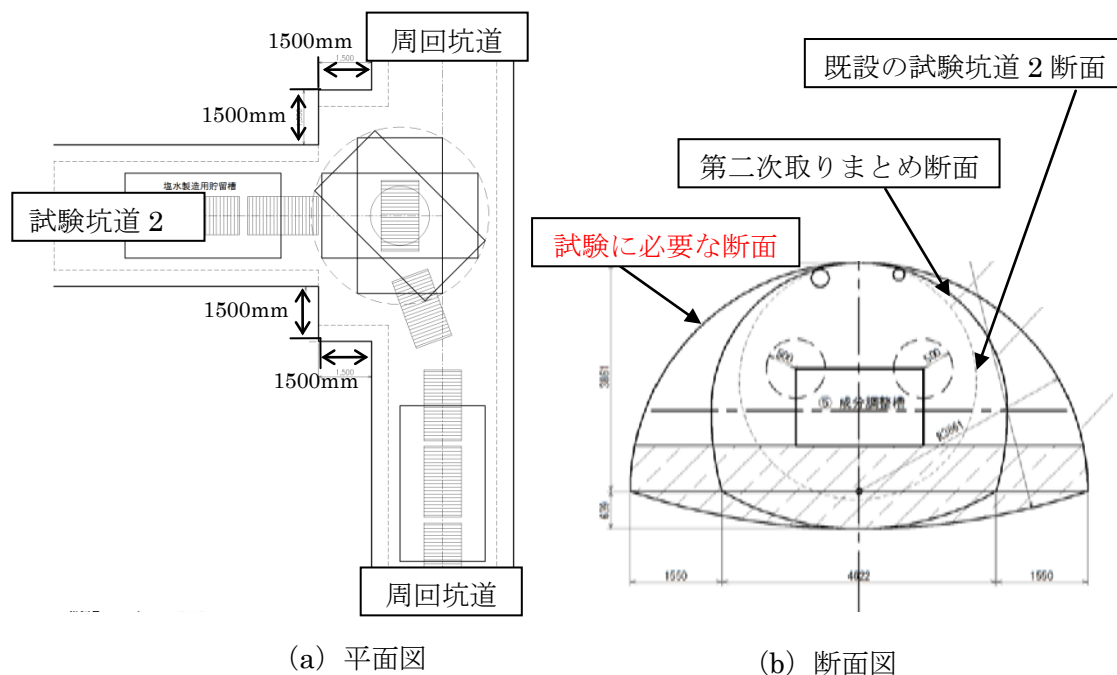


図 2.2.4-2 試験坑道 2 入口の断面形状の検討

## (3) 試験坑道（組立エリア部）

分割した噴射・吸引設備は、試験坑道内で組立が必要となる。そこで、噴射・吸引設備の組立に必要な組立エリアを確保できる坑道断面の検討を行った。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なエリアを設定した。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 2.2.4-3）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。

検討の結果より、組立エリアの最小寸法は図 2.2.4-4 に示すように、第 2 次とりまとめ断面の天端より 3,119mm 以上拡幅する必要がある。

以上より、組立エリアとして必要な坑道断面形状について検討を行った。坑道形状は、通常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ことから、組立エリアの寸法を確保した馬蹄型断面とした。

### 塩水ホース巻取装置詳細寸法図

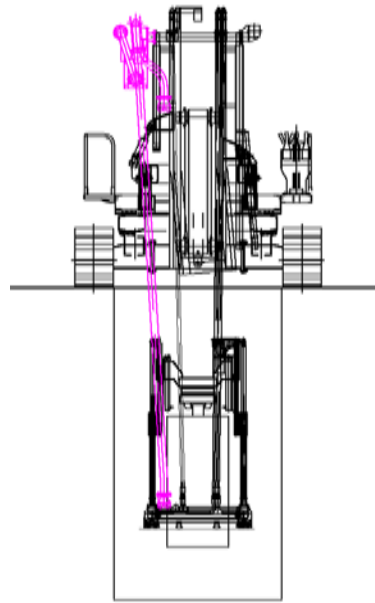
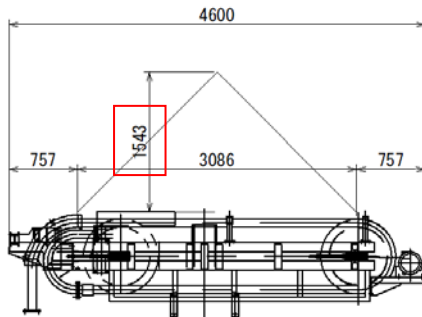
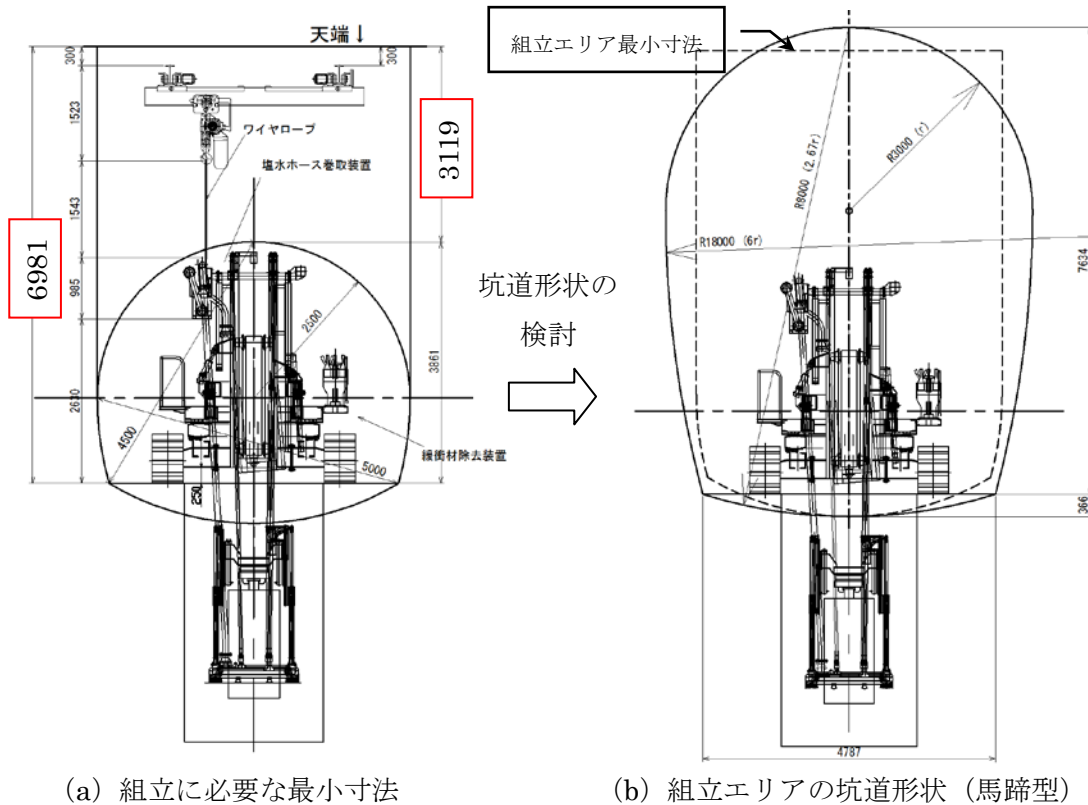


図 2.2.4-3 塩水ホース巻き取り装置および装置の吊代の検討



(a) 組立に必要な最小寸法

(b) 組立エリアの坑道形状 (馬蹄型)

図 2.2.4-4 組立エリアの拡幅断面検討

#### (4) 実証試験に必要な試験坑道寸法

(1)～(3)の検討結果をもとに、緩衝材除去試験に必要な試験坑道寸法の検討を行った。検討条件として、塩水リユース設備の坑道内配置に際して、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。

図 2.2.4-5、図 2.2.4-6 に緩衝材除去システムを配置した試験坑道図を示す。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、遠隔操作設備はその使用用途の意味から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。幌延坑道建設時にメタンガスが確認されているため、坑道断面の拡幅は、上端部ではなく下端部への拡幅を行うこととした。検討結果から、緩衝材除去試験に必要な坑道延長は  $L=34.5\text{m}$  となり、既設坑道の延長が必要となった。

次項では、試験坑道 2 (坑道断面  $\phi 4,000\text{mm}$ 、坑道延長 25m) を検討した拡幅断面に対する構造解析の検討について述べる。



## 噴射・吸引設備組立断面図

上半 2500 L=34.5m

### 噴射・吸引設備組立縦断面図 (配置案1) 馬蹄型

上半 2500 L=34.5m

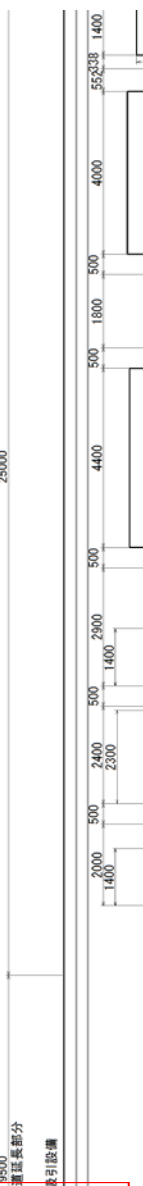


図 2.2.4-6 噴射・吸引設備組立エリア（馬蹄型）を含む試験坑道縦断面図

## 2.2.5 実証試験に必要な試験坑道の基本設計

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 坑道延長を検討した。

ここで、2.2.4 で検討した坑道断面を基本とし、噴射・吸引設備の組立に必要な坑道断面および試験坑道 2 の入口部の拡幅断面について構造解析を行い、坑道の基本設計を行った。

### (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 2.2.5-1 に示す。

- Case1：組立エリアでの拡幅断面（馬蹄型断面に拡幅）
- Case2：試験坑道 2 入口の拡幅



図 3.3-6 緩衝材除去装置

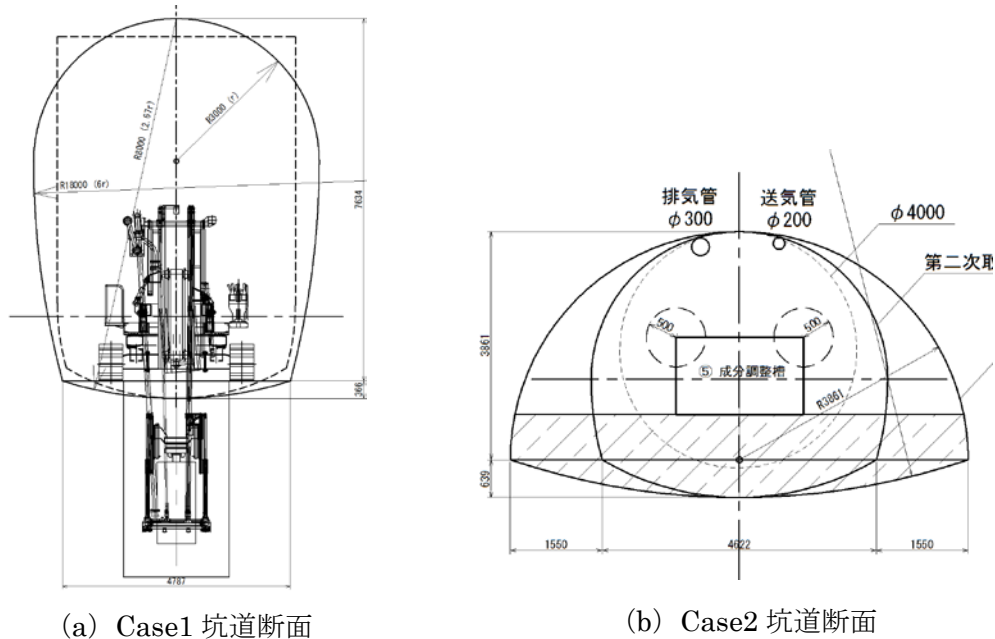


図 2.2.5-1 解析断面位置

## (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[3]（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 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、実施設計では試験坑道 2 の内径が 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。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。

## (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 2.2.5-2）



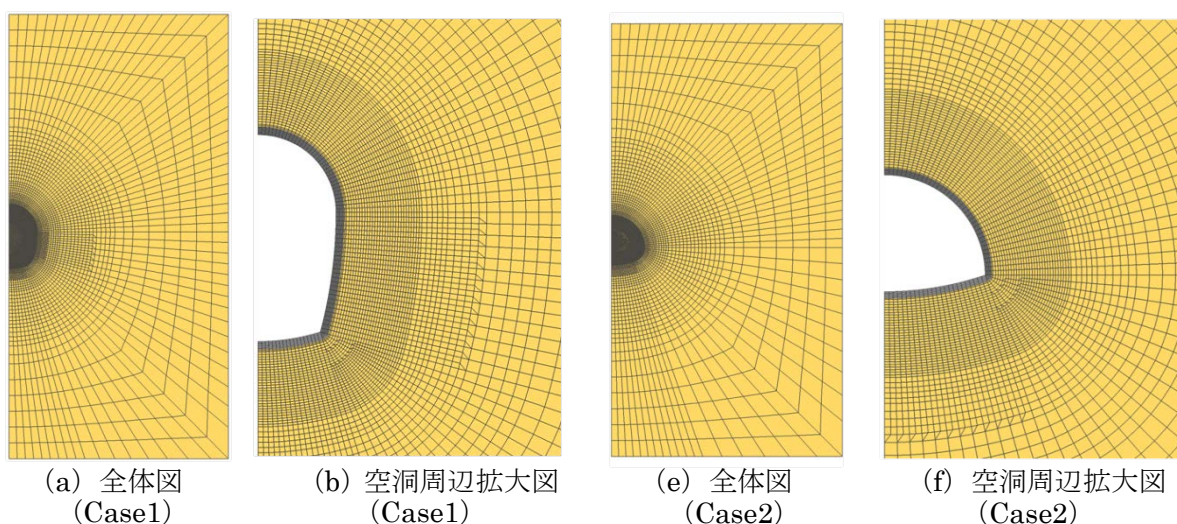


図 2.2.5-2 メッシュ分割図

#### (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、 $\sigma_v : \sigma_{\max} : \sigma_{\min} = 1.0 : 1.3 : 0.9$ を採用することとする。深度 350m の初期応力は、

表 2.2.5-1 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 2.2.5-1 深度 350m の初期応力[3]

| 深度<br>m | 鉛直応力 $S_v$<br>kN/m <sup>2</sup> | 東西方向 $S_{\max}$<br>kN/m <sup>2</sup> | 南北方向 $S_{\min}$<br>kN/m <sup>2</sup> |
|---------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 350     | 5,359.1                         | $S_v \times 1.3$ (6,966.8)           | $S_v \times 0.9$ (4,823.2)           |

##### 2) 岩盤物性値

解析に採用する岩盤物性値は表 2.2.5-2 に示す。岩盤等級 CM-M(Hr)の物性値を採用する。

表 2.2.5-2 解析用地山物性値[3]

| 岩盤等級     | ヤング率<br>MPa | ポアソン比 | 粘着力<br>MPa | 内部摩擦角<br>deg. | 引張強度<br>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 2.2.5-3～表 2.2.5-5 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した。

Case2 の既設断面（φ 4000）の支保パターンは、表 2.2.5-5 に示す物性値を想定し、ステップ解析を実施した。

表 2.2.5-3 吹付けコンクリートの物性値

| 規格・仕様                     | 普通<br>$f'_{ck}=18\text{N/mm}^2$<br>$t=20\text{cm}\sim$ | 高強度<br>$f'_{ck}=36\text{N/mm}^2$<br>$t=20\text{cm}\sim$ |
|---------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| ヤング率 ( $\text{kN/mm}^2$ ) | 4                                                      | 6                                                       |
| ポアソン比                     | 0.2                                                    |                                                         |
| 要素種別                      | ソリッド要素                                                 |                                                         |

表 2.2.5-4 鋼製支保工物性値

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

表 2.2.5-5 Case2 既設断面に使用する支保の物性値

| 規格・仕様                         | 高強度<br>$f'_{ck}=36\text{N/mm}^2$<br>$t=15\text{cm}$ | 従来型 H 鋼<br>H-100<br>SS400 |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------|
| ヤング率 ( $\text{kN/mm}^2$ )     | 6                                                   | 210                       |
| ポアソン比                         | 0.2                                                 | 0.3                       |
| 断面積 ( $\text{m}^2$ )          | -----                                               | $21.59 \times 10^{-4}$    |
| 断面二次モーメント<br>( $\text{m}^4$ ) | -----                                               | $378 \times 10^{-8}$      |
| 要素種別                          | ソリッド要素                                              | ビーム要素                     |

#### 4) 許容値

許容値一覧を表 2.2.5-6 に示す。

表 2.2.5-6 許容応力度[3]

| 支保種別      | 仕様                        | 許容応力度 (MPa) |
|-----------|---------------------------|-------------|
| 吹付けコンクリート | $f'_{ck}=18\text{N/mm}^2$ | 4.5         |
|           | $f'_{ck}=36\text{N/mm}^2$ | 9.0         |
| 鋼製支保工     | SS400                     | 160         |
|           | HT590                     | 236         |

#### (5) 解析手順

各ケースの解析ステップを表 2.2.5-7 に示す。Case1 は、試験坑道 2 (L=25m) から新たに地山を掘削するため、坑道内の地山に初期応力を与え、掘削解放率  $\alpha$  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) で設定した。Case2 は、Case1 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 2.2.5-7 解析ステップ

| 解析<br>ステップ | Case1                                            | Case2                              |
|------------|--------------------------------------------------|------------------------------------|
| 1          | 初期応力解析                                           | 初期応力解析                             |
| 2          | 全断面掘削<br>[支保工設置直前まで]                             | 既設断面掘削 (φ 4000+300)<br>[支保工設置直前まで] |
| 3          | アーチ部支保工 (吹付け、鋼製支保工)<br>設置<br>[支保工設置から 3.0m 掘削まで] | 既設断面支保工<br>(吹付け、鋼製支保工) 設置          |
| 4          | インバート吹付け設置※                                      | 拡幅断面掘削<br>[支保工設置直前まで]              |

|   |   |                                                  |
|---|---|--------------------------------------------------|
| 5 | — | アーチ部支保工<br>(吹付け、鋼製支保工) 設置<br>[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。

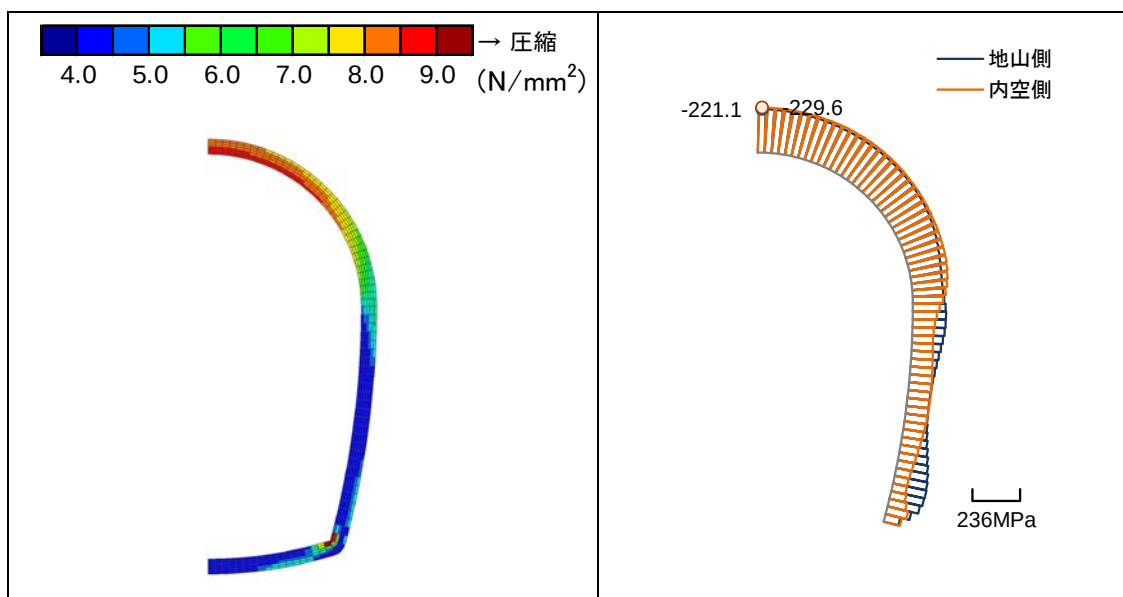
## (6) 解析結果

### 1) Case1 の支保部材

Case1 の解析結果を表 2.2.5-8 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 2.2.5-8 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<br>MPa | 許容応力度<br>MPa | 塑性領域<br>[最大幅]<br>m |
|------------|------------------------------------------------------------|---------------|--------------|--------------------|
| アーチ部       | 吹付けコンクリート<br>$t=30\text{cm}$ ( $f'_{ck}=36\text{N/mm}^2$ ) | 8.95          | 9.0          | 1.30               |
|            | 鋼製支保工<br>高規格(SS540), HH-200@1.0m                           | 229.6         | 236          |                    |
| インバート<br>部 | 吹付けコンクリート<br>$t=30\text{cm}$ ( $f'_{ck}=36\text{N/mm}^2$ ) | 7.76          | 9.0          | 0.90               |
|            | 鋼製支保工 (ストラット)<br>未採用                                       | -----         | -----        |                    |



|                 |               |
|-----------------|---------------|
| 吹付けコンクリート（30cm） | 鋼製支保工（HH-200） |
|-----------------|---------------|

図 2.2.5-3 支保工応力分布（Case1）

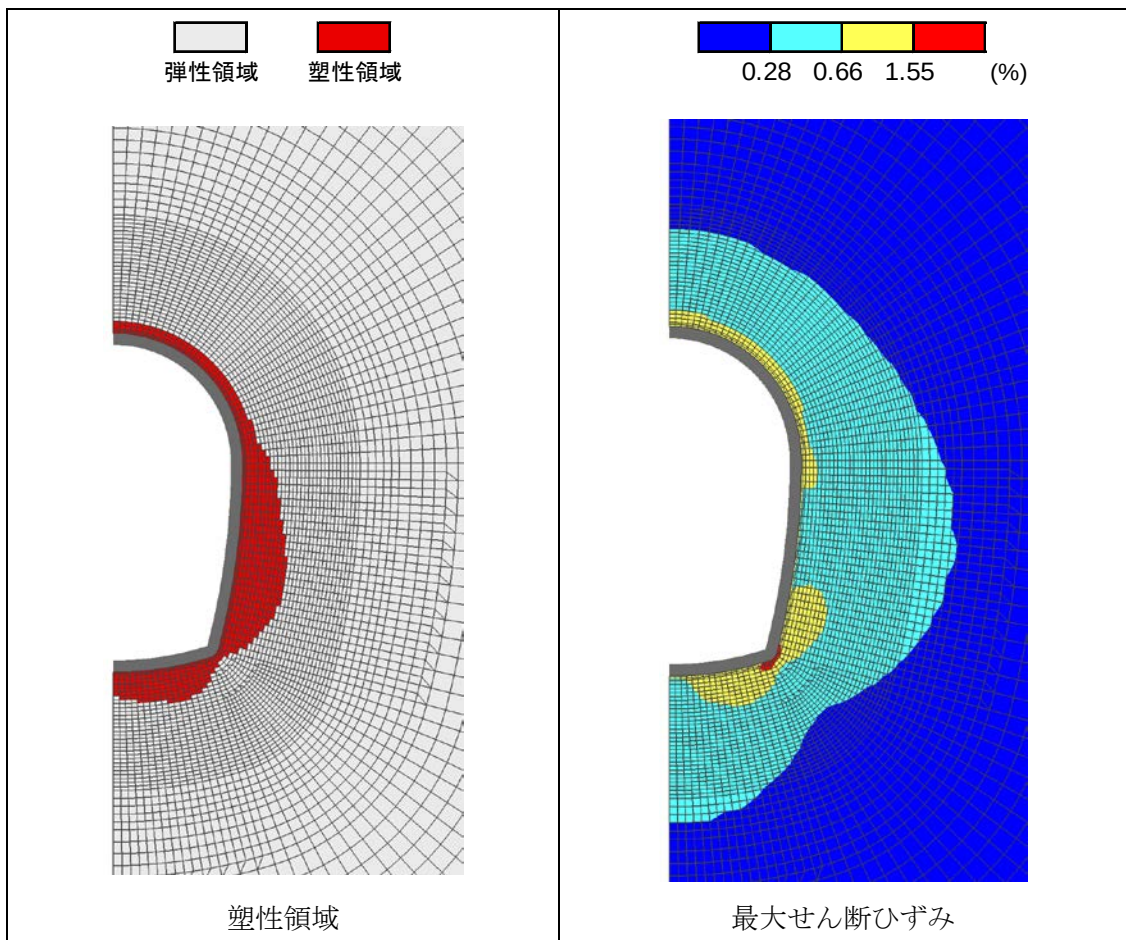


図 2.2.5-4 岩盤の塑性領域分布と最大せん断ひずみ分布（Case1）

## 2) Case2 の支保部材

Case2 の解析結果を表 2.2.5-9 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 2.2.5-9 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<br>MPa | 許容応力度<br>MPa | 塑性領域<br>[最大幅]<br>m |
|------|---------------------------------------------------|---------------|--------------|--------------------|
| アーチ部 | 吹付けコンクリート<br>t=20cm ( $f'_{ck}=36\text{N/mm}^2$ ) | 8.17          | 9.0          | 1.10               |
|      | 鋼製支保工<br>HT590, HH-154@1.0m                       | 192.00        | 236          |                    |

|            |                                                   |       |       |      |
|------------|---------------------------------------------------|-------|-------|------|
| インバート<br>部 | 吹付けコンクリート<br>t=20cm ( $f'_{ck}=36\text{N/mm}^2$ ) | 3.69  | 9.0   | 1.20 |
|            | 鋼製支保工（ストラット）<br>未採用                               | ----- | ----- |      |

## 2.2.6 まとめ

### (1) 地下環境における実証試験計画

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」とした。試験坑道 2 の仕様は、坑道断面  $\phi 4,000\text{mm}$ 、坑道延長 25m を設定した。

### (2) 緩衝材除去システムの仕様の整理

東立坑から試験坑道 2 まで資機材を運搬した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。

### (3) 実証試験に必要な設備の検討

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  $23\text{m}^3$  となる。
- 電気ケーブルは、 $\phi 21\text{mm}$ 、 $\phi 37\text{mm}$ 、 $\phi 66\text{mm}$  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  $\phi 200$ 、排気管  $\phi 300$  が必要となる。

### (4) 実証試験に必要な試験坑道の検討

試験坑道 2 に実証試験を行う場合に必要な試験坑道寸法の検討結果を以下にまとめる。

- 試験坑道 2 で緩衝材除去システムを使用するには、基本として第 2 次取りまとめ断面への拡幅が必要となる。また、資機材を搬出入するため入口部は、さらに 1,500mm 程度の拡幅が必要となる。
- 噴射・吸引設備の最小組立スペースとして、幅 5,000mm、高さ 6,981mm（インバート上面から天端）、長さ 7,490mm 以上が必要となる。
- 坑道の拡幅はメタンガスを考慮してすべて下端部への拡幅とし、坑道延長は  $L=34.5\text{m}$  が必要となる。

### (5) 実証試験に必要な試験坑道の基本設計

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 ( $f'_{ck}=36\text{N/mm}^2$ ) 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 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。

## 2.3 処分施設における回収維持期間の検討

### 2.3.1 検討方針

#### (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[7]。

平成 26 年度では、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

#### (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 2.3.1-1 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 2.3.1 (3)環境条件の設定に示す。

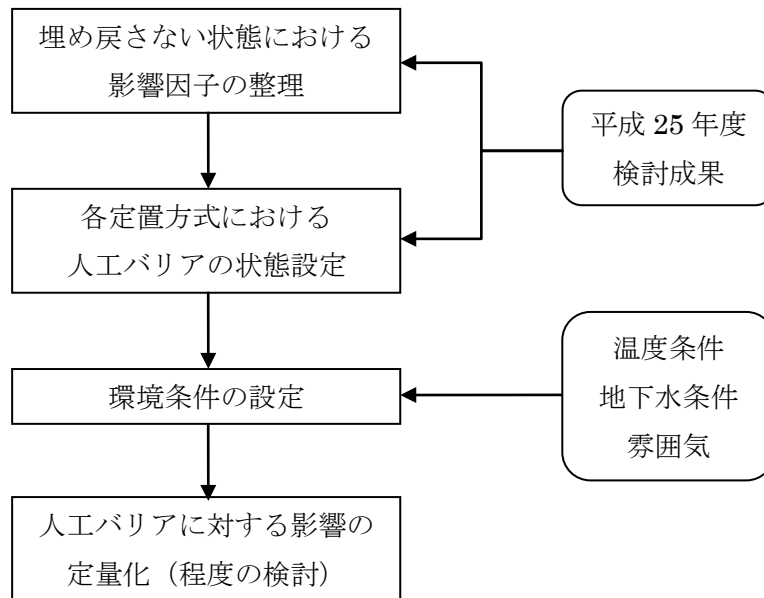


図 2.3.1-1 影響の程度の定量的把握における検討手順

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 2.3.1-2 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。

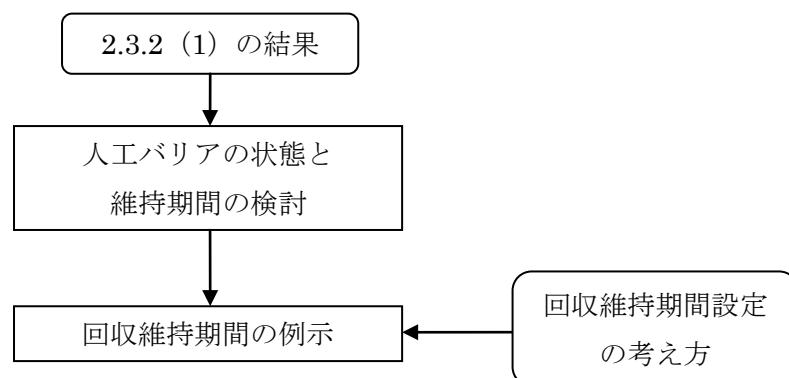


図 2.3.1-2 回収維持期間の例示の検討手順



### 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 2.3.1-3 に示す。

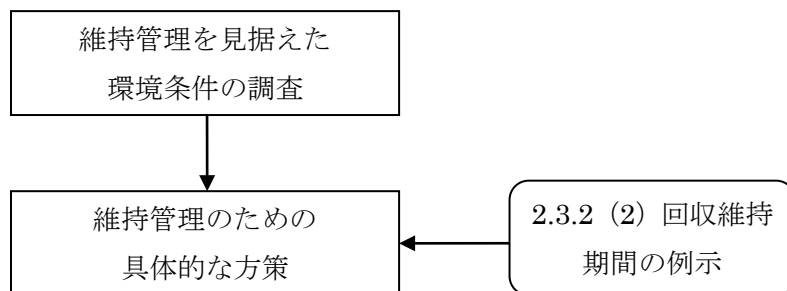


図 2.3.1-3 処分施設の維持管理方策の検討手順

### 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。

## 2.3.2 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

### (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、閉鎖後長期安全に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 2.3.2-1 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 2.3.2-1 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 2.3.2-2 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整理を 2.3.2.(2).3) で実施する。

表 2.3.2-2 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

## (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[8]である処分孔堅置き定置方式（堅置き方式）、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[9]や NUMO の検討[10]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る、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、縦置き方式、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 方式以外の縦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、ペレット充填、吹付けが考えられ、これらの概念を図 2.3.2-1 に示す[10]。

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、縦置き方式、横置き方式、PEM 方式について、(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。

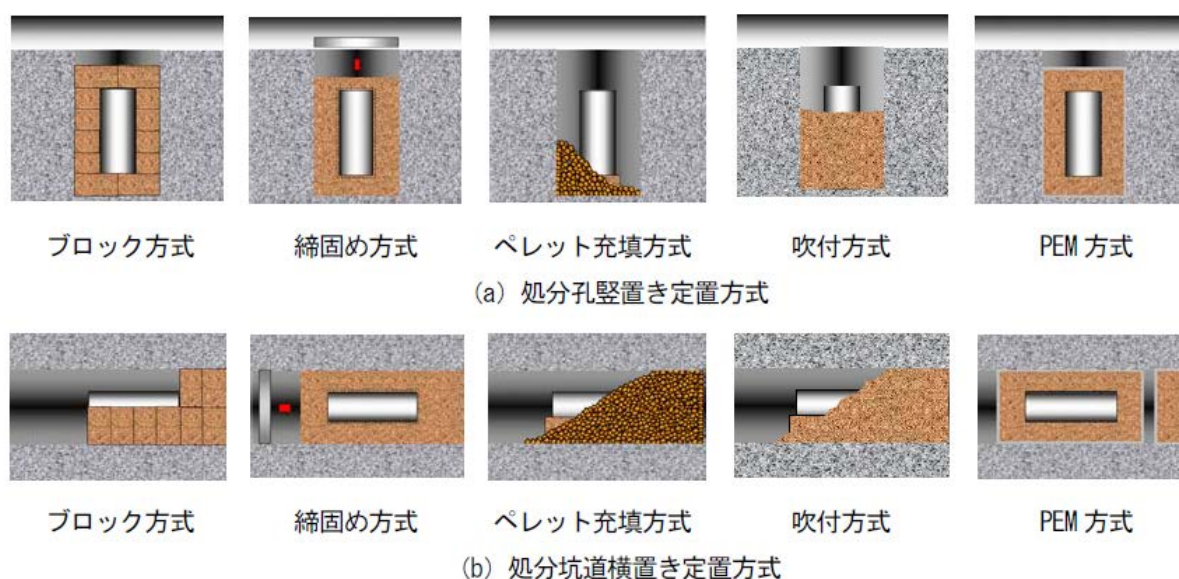


図 2.3.2-1 定置概念[10]

#### a. 縦置き方式

縦置き方式での状態のイメージとその説明を表 2.3.2-3 に示す。

①は、緩衝材の定置が完了していない状態を想定した。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次取りまとめの作業終了の概念と同様の状態となる。

#### b. 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 2.3.2-4 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次取りまとめの作業終了の概念と同様の状態となる。

#### c. PEM 方式

PEM 方式での状態のイメージとその説明を表 2.3.2-5 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 の隙間が隙間充填材で充填され、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 次取りまとめの作業終了の概念と同様の状態となる。

表 2.3.2-3 堅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 | <p>処分坑道</p> <p>主要坑道</p> <p>オーバーバック</p> <p>緩衝材</p> <p>処分孔</p>                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分孔に緩衝材が定置され、オーバーバックが緩衝材上に定置されている。</li> <li>・オーバーバック全体は緩衝材に覆われておらず、部分的にオーバーバック表面が露出している。</li> <li>・湧水等がある場合、直接オーバーバックが濡れる可能性がある。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> |
| ② | <p>処分坑道</p> <p>主要坑道</p> <p>オーバーバック</p> <p>緩衝材</p> <p>膨出抑え蓋</p> <p>処分孔</p>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材が全て定置され、処分孔が埋め戻されている。</li> <li>・オーバーバックには直接湧水は触れない。</li> <li>・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。</li> <li>・処分坑道は埋め戻されていない。</li> <li>・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。</li> </ul>                                                                                           |
| ③ | <p>埋戻し材</p> <p>処分坑道</p> <p>プラグ</p> <p>主要坑道</p> <p>オーバーバック</p> <p>緩衝材</p> <p>膨出抑え蓋</p> <p>処分孔</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分孔および処分坑道が埋め戻されている。</li> <li>・処分坑道端部にはプラグが設置されている。</li> <li>・主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。</li> </ul>                                                                                                                                                                                           |
| ④ | <p>埋戻し材</p> <p>処分坑道</p> <p>プラグ</p> <p>主要坑道</p> <p>オーバーバック</p> <p>緩衝材</p> <p>膨出抑え蓋</p> <p>処分孔</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分孔、処分坑道および主要坑道が埋め戻されている。</li> <li>・第2次取りまとめの概念と同様。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                               |

表 2.3.2-4 横置き方式における状態のイメージと説明

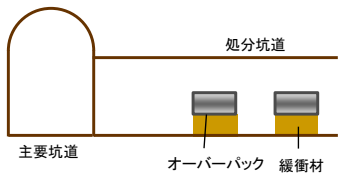
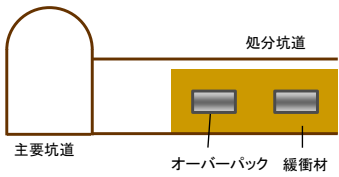
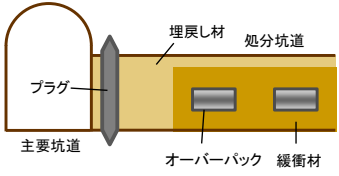
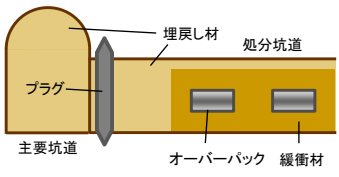
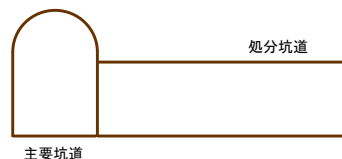
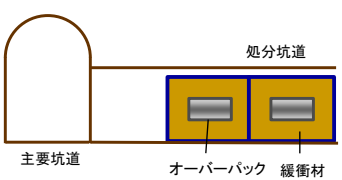
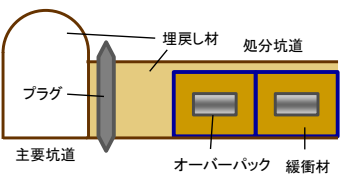
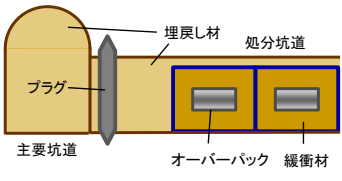
|   | 状態のイメージ                                                                                                                                               | 状態の説明                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ① |  <p>主要坑道</p> <p>処分坑道</p> <p>オーバーパック 緩衝材</p>                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> |
| ② |  <p>主要坑道</p> <p>処分坑道</p> <p>オーバーパック 緩衝材</p>                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材が全て定置されている。</li> <li>・オーバーパックには直接湧水は触れない。</li> <li>・処分坑道は埋め戻されていない。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>                 |
| ③ |  <p>主要坑道</p> <p>処分坑道</p> <p>プラグ</p> <p>埋戻し材</p> <p>オーバーパック 緩衝材</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分坑道が埋め戻されている。</li> <li>・処分坑道端部にはプラグが設置されている。</li> <li>・主要坑道は埋め戻されていない。</li> <li>・主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。</li> </ul>                                                                                                                                                                        |
| ④ |  <p>主要坑道</p> <p>処分坑道</p> <p>プラグ</p> <p>埋戻し材</p> <p>オーバーパック 緩衝材</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分坑道、主要坑道が埋め戻されている。</li> <li>・第2次取りまとめの概念と同様。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                      |



表 2.3.2-5 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 |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>人工バリアは定置されていない。</li> <li>検討対象外とする。</li> </ul>                                                                                  |
| ② |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>PEM が定置されている。</li> <li>処分坑道は埋め戻されていない。</li> <li>湧水が有る場合、直接 PEM 容器が濡れる可能性がある。</li> <li>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</li> </ul> |
| ③ |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>処分坑道が埋め戻されている。</li> <li>オーバーバックには直接湧水は触れない。</li> <li>処分坑道の端部にはプラグが設置されている。</li> <li>主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。</li> </ul>       |
| ④ |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>処分坑道、主要坑道が埋め戻されている。</li> <li>第 2 次取りまとめの概念と同様。</li> </ul>                                                                      |

### 3) 影響因子と人工バリアの状態の整理

(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。

縦置き方式、横置き方式、PEM 方式の方式毎に整理した結果を表 2.3.2-6～表 2.3.2-8 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 2.3.2-6 堅置き方式における状態のイメージと影響因子の整理

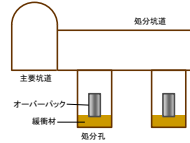
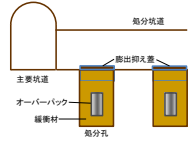
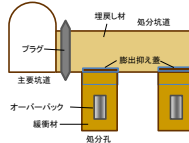
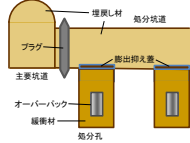
|       |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                            |                                                                                                        |
|-------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 堅置き方式 | 埋戻し状態のイメージ |                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                        |                                                         |                     |
|       | 状態の説明      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分孔に緩衝材が定置され、オーバーバックが緩衝材上に定置されている。</li> <li>・オーバーバック全体は緩衝材に覆われておらず、部分的にオーバーバック表面が露出している。</li> <li>・湧水等がある場合、直接オーバーバックが濡れる可能性がある。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材が全て定置され、処分孔が埋め戻されている。</li> <li>・オーバーバックには直接湧水は触れない。</li> <li>・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。</li> <li>・処分坑道は埋め戻されていない。</li> <li>・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。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分孔および処分坑道が埋め戻されている。</li> <li>・処分坑道端部にはプラグが設置されている。</li> <li>・主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分孔、処分坑道および主要坑道が埋め戻されている。</li> <li>・第2次取りまとめの概念と同様。</li> </ul> |
|       | 熱的影響       | <p>①オーバーバック温度 ⇒ 腐食挙動の変化</p> <p>②緩衝材最高温度 100℃超 ⇒ ペ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</p> <p>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</p> <p>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</p>                                                                                                                                                      | <p>①オーバーバック温度 ⇒ 腐食挙動の変化</p> <p>②緩衝材最高温度 100℃超 ⇒ ペ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</p>                                                                                                                                               | <p>特に無し<br/>(本状態では特記すべき顕著な影響は無い)</p>                                                                                                       | 「第2次取りまとめ」の概念                                                                                          |
|       | 水理的影響      | <p>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</p>                                                                                                                                                                                                                                                                    | <p>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</p>                                                                                                                                                                        | <p>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</p>                                                                          | 「第2次取りまとめ」の概念                                                                                          |
|       | 力学的影響      | <p>①酸素による腐食によるオーバーバックの減肉 ⇒ 強度および遮へい性の劣化</p> <p>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</p> <p>③緩衝材の乾燥、膨潤 ⇒ 緩衝材の変形によるオーバーバック支持性の劣化</p>                                                                                                                                                                                  | <p>①酸素による腐食によるオーバーバックの減肉 ⇒ 強度および遮へい性の劣化</p> <p>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</p>                                                                                                                          | <p>特に無し<br/>(本状態では特記すべき顕著な影響は無い)</p>                                                                                                       | 「第2次取りまとめ」の概念                                                                                          |
|       | 化学的影響      | <p>①オーバーバックの酸素による腐食の継続 ⇒ オーバーバックの酸素による腐食量の増加</p> <p>②地下水質の変化 ⇒ オーバーバックの腐食速度の変動による腐食量の増加</p> <p>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</p>                                                                                                                                                                            | <p>①オーバーバックの酸素による腐食の継続 ⇒ オーバーバックの酸素による腐食量の増加</p> <p>②地下水質の変化 ⇒ オーバーバックの腐食速度の変動による腐食量の増加</p> <p>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</p>                                                                                | <p>①地下水質の変化 ⇒ オーバーバックの腐食速度の変動による腐食量の増加</p>                                                                                                 | 「第2次取りまとめ」の概念                                                                                          |

表 2.3.2-7 横置き方式における状態のイメージと影響因子の整理

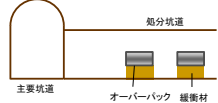
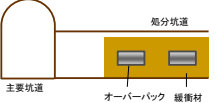
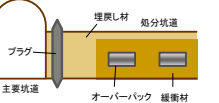
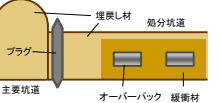
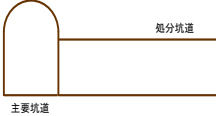
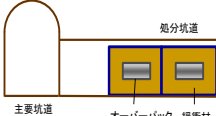
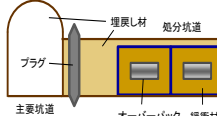
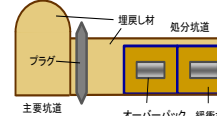
|       |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                |                                                                                                  |
|-------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 横置き方式 | 埋戻し状態のイメージ | ①                                                                                                                                                                                                                                                    | ②                                                                                                                                                                                                                                   | ③                                                                           | ④             |
|       | 状態の説明      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分坑道に緩衝材が定置され、オーバーバックが緩衝材上に定置されている。</li> <li>・オーバーバック全体は緩衝材に覆われておらず、部分的にオーバーバック表面が露出している。</li> <li>・湧水等がある場合、直接オーバーバックが濡れる可能性がある。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材が全て定置されている。</li> <li>・オーバーバックには直接湧水は触れない。</li> <li>・処分坑道は埋め戻されていない。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分坑道が埋め戻されている。</li> <li>・処分坑道端部にはプラグが設置されている。</li> <li>・主要坑道は埋め戻されていない。</li> <li>・主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分坑道、主要坑道が埋め戻されている。</li> <li>・第2次取りまとめの概念と同様。</li> </ul> |
|       | 熱的影響       | ①オーバーバック温度 ⇒ 腐食挙動の変化<br>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<br>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<br>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オーバーバック温度 ⇒ 腐食挙動の変化<br>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<br>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<br>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<br>(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バックの減肉 ⇒ 強度および遮へい性の劣化<br>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<br>③緩衝材の膨潤 ⇒ 緩衝材の変形によるオーバーバック支持性の劣化                                                                                                                                                                                                     | ①酸素による腐食によるオーバーバックの減肉 ⇒ 強度および遮へい性の劣化<br>②オーバーバ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<br>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<br>(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オーバーバックの酸素による腐食 ⇒ オーバーバックの酸素による腐食量の増加<br>②地下水質の変化 ⇒ オーバーバックの腐食速度の変動による腐食量の増加<br>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オーバーバックの酸素による腐食 ⇒ オーバーバックの酸素による腐食量の増加<br>②地下水質の変化 ⇒ オーバーバックの腐食速度の変動による腐食量の増加<br>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 ⇒ オーバーバ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 2.3.2-8 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      | <ul style="list-style-type: none"> <li>人工バリアは設置されていない。</li> <li>検討対象外とする。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>PEM が設置されている。</li> <li>処分坑道は埋め戻されていない。</li> <li>湧水が有る場合、直接 PEM 容器が濡れる可能性がある。</li> <li>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</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>処分坑道が埋め戻されている。</li> <li>オーバーバックには直接湧水は触れない。</li> <li>処分坑道の端部にはプラグが設置されている。</li> <li>主要坑道には、換気のための空気の流れが想定される。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>処分坑道、主要坑道が埋め戻されている。</li> <li>第 2 次取りまとめの概念と同様。</li> </ul> |
|          | 熱的影響       | <ul style="list-style-type: none"> <li>検討対象外とする。</li> </ul>                          | ①オーバーバック温度 ⇒ 腐食挙動の変化<br>②緩衝材最高温度 100℃超 ⇒ ペ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<br>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<br>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<br>(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      | <ul style="list-style-type: none"> <li>検討対象外とする。</li> </ul>                          | 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      | <ul style="list-style-type: none"> <li>検討対象外とする。</li> </ul>                          | 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<br>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、<br>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<br>(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      | <ul style="list-style-type: none"> <li>検討対象外とする。</li> </ul>                          | 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<br>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 ⇒ オーバーバ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                                                                                  |

### (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、オーバーバック、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 2.3.2-3～表 2.3.2-5 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、オーバーバックや 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

##### a. 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 2.3.2-2 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、堅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 2.3.2-3、図 2.3.2-4）。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 2.3.2-5、図 2.3.2-6）。

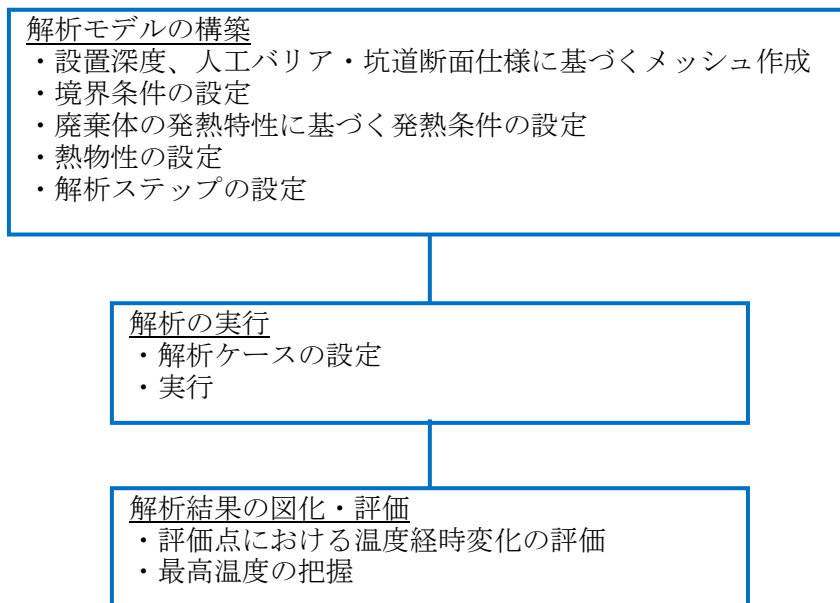


図 2.3.2-2 熱伝導解析による検討フロー

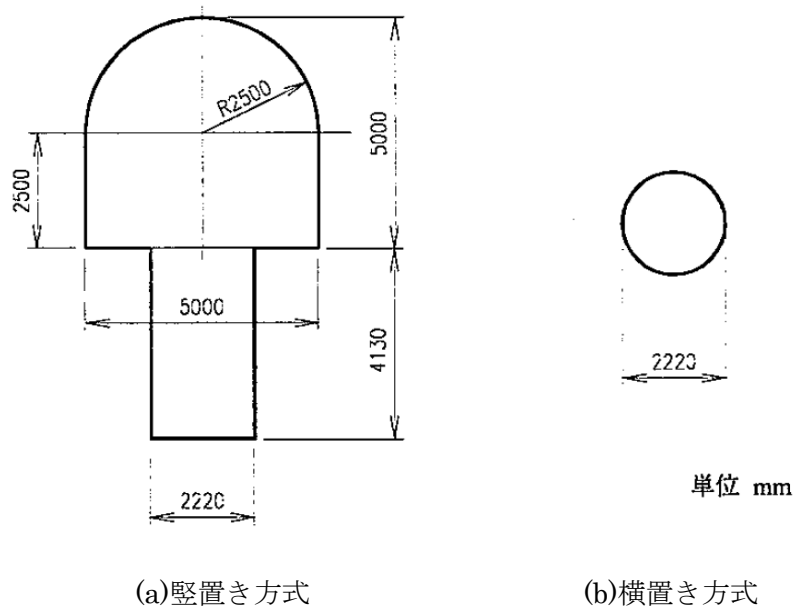
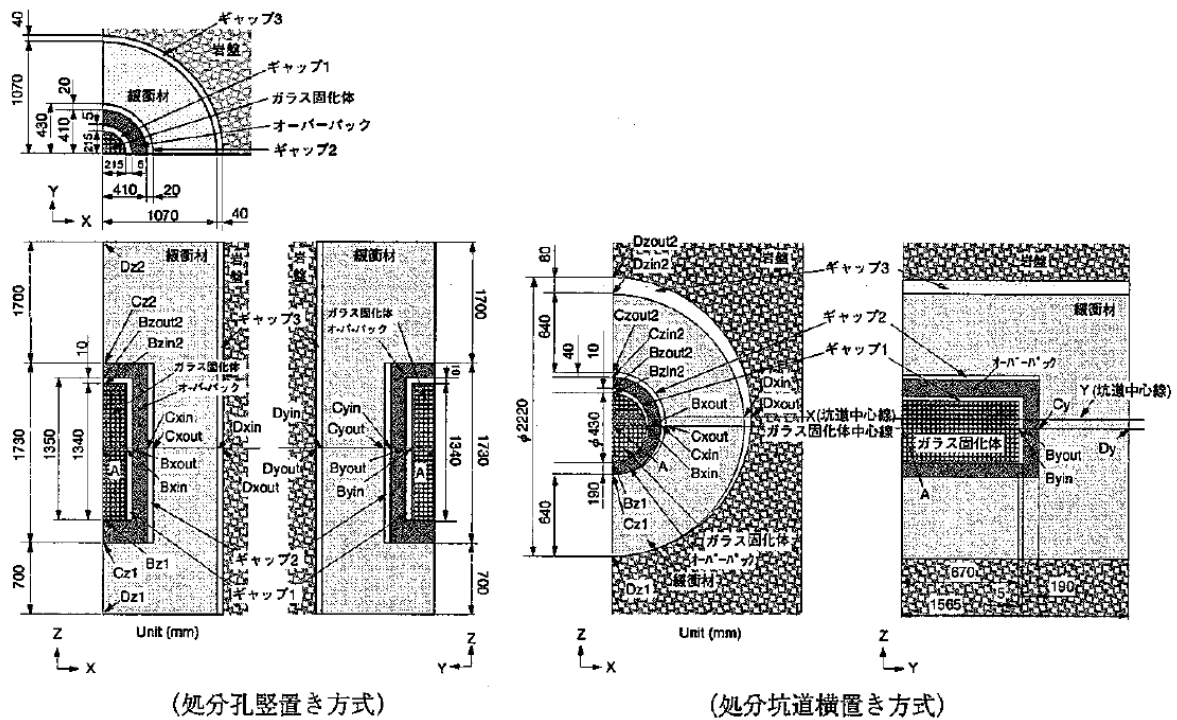


図 2.3.2-3 処分坑道断面形状（縦置き方式および横置き方式） [8]



隙間モデル

図 2.3.2-4 人工バリアの基本仕様（縦置き方式および横置き方式） [8]

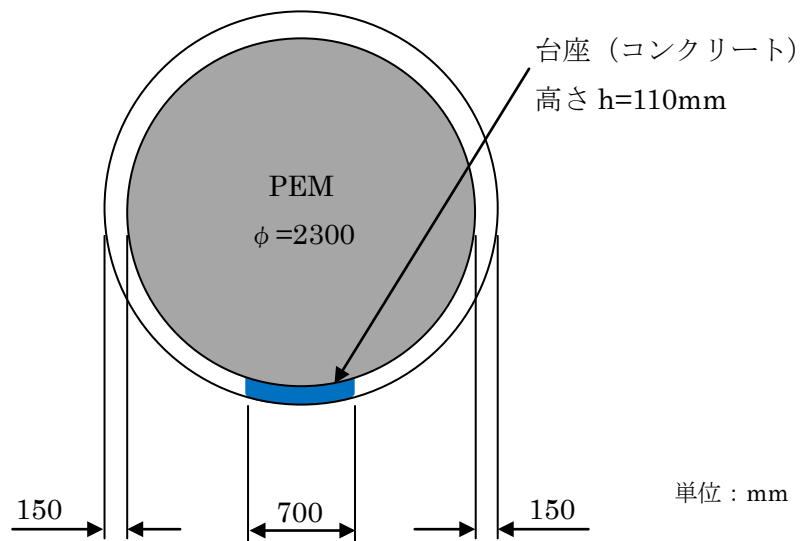
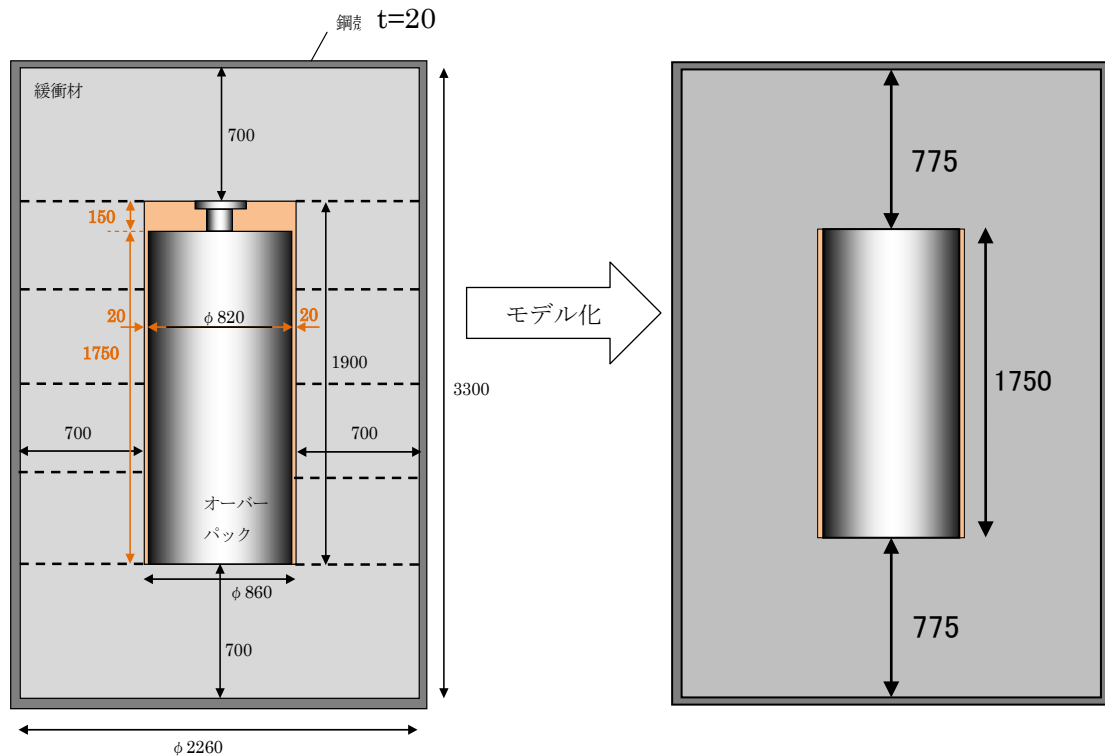


図 2.3.2-5 処分坑道断面形状（PEM 方式）[9]



※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 2.3.2-6 人工バリアの基本仕様とモデル化（PEM 方式）[9]

#### (a) 解析手法および解析モデル

第 2 次取りまとめ[8]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。



Figure 1 consists of two schematic diagrams of the experimental apparatus. The left diagram, labeled (a) 断熱孔縦置き (Fracture hole vertical), shows a 3D view of a rock specimen (岩盤) with a vertical fracture hole. The specimen has a height of 200 mm and a width of 20 mm. The fracture hole is filled with a glass solid (ガラス固化体) and surrounded by a buffer material (緩衝材). The top and bottom boundaries are temperature-controlled (15°C and 5°C respectively). The side view shows the fracture boundary (断熱境界) and the fracture hole (断熱孔). The dimensions are in mm.

The right diagram, labeled (b) 断熱孔横置き (Fracture hole horizontal), shows a 3D view of a rock specimen (岩盤) with a horizontal fracture hole. The specimen has a height of 200 mm and a width of 20 mm. The fracture hole is filled with a glass solid (ガラス固化体) and surrounded by a buffer material (緩衝材). The top and bottom boundaries are temperature-controlled (15°C and 5°C respectively). The side view shows the fracture boundary (断熱境界) and the fracture hole (断熱孔). The dimensions are in mm.

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。

廃棄体の発熱特性は、第2次取りまとめで用いられた図2.3.2-8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。



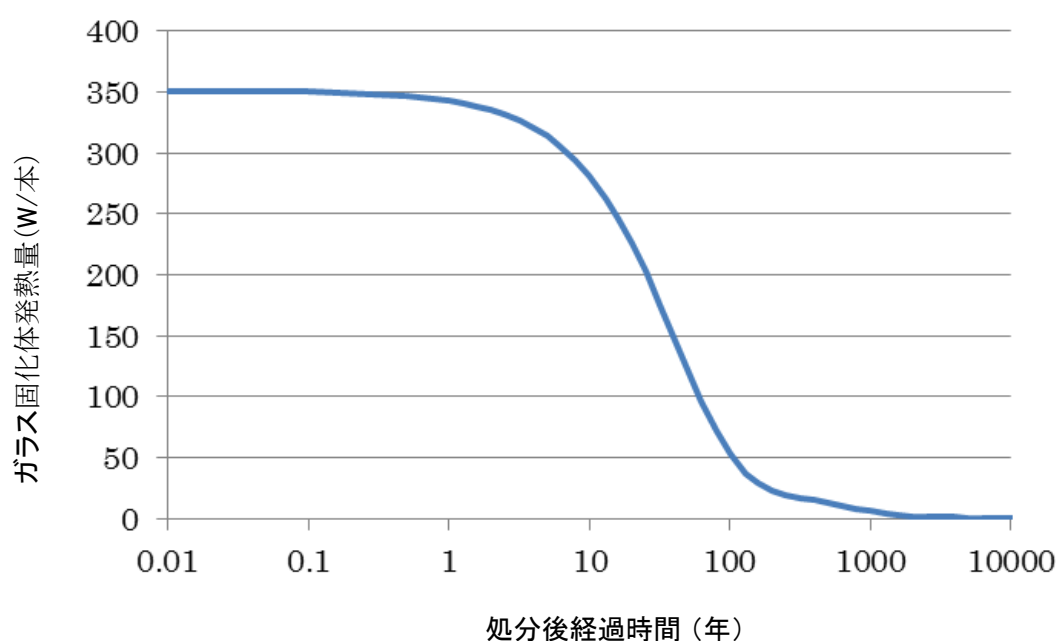


図 2.3.2-8 ガラス固化体中間貯蔵期間後の発熱量時系列変化[8]

解析に用いる熱物性を表 2.3.2-9 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[11]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）[9]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）[12]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 2.3.2-9 人工バリアおよび岩盤の熱特性[8]

| 名称                     | 熱伝導率<br>[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] | 比熱<br>[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] | 密度<br>[kg m <sup>-3</sup> ] | 記事                                                                            |
|------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| ガラス固化体                 | 1.2                                         | 960                                         | 2800                        | 第 2 次取りまとめ[8]より                                                               |
| オーバー<br>パック・<br>PEM 鋼殻 | 51.6                                        | 470                                         | 7860                        | 第 2 次取りまとめ[8]より<br>300K の炭素鋼                                                  |
| 緩衝材                    | 0.78                                        | 590                                         | 1712                        | 第 2 次取りまとめ[8]より<br>含水比:7%, 乾燥密度:1.6Mgm <sup>-3</sup>                          |
| 硬岩                     | 2.8                                         | 1000                                        | 2670                        | 第 2 次取りまとめ[8]より                                                               |
| セメント                   | 2.56                                        | 1050                                        | 2350                        | TRU 廃棄物処分技術に関する 2000 年<br>度報告書[11]より<br>セメント系材料                               |
| 粉末<br>ベントナイト           | 0.158                                       | 217                                         | 1040                        | 第 2 次取りまとめ[8]より<br>含水比 6%, 乾燥密度:0.98Mgm <sup>-3</sup>                         |
| 粒状<br>ベントナイト           | 0.317                                       | 150                                         | 1270                        | 竹ヶ原ほか(2000)[12]による計測値<br>粒状の 100%ベントナイト<br>( $< \phi 1.7\text{mm}$ ) 含水比 8.4% |
| 空気                     | 0.03                                        | 1010                                        | 0.9799                      | 第 2 次取りまとめ[8]より<br>360K 常圧下での空気の値                                             |

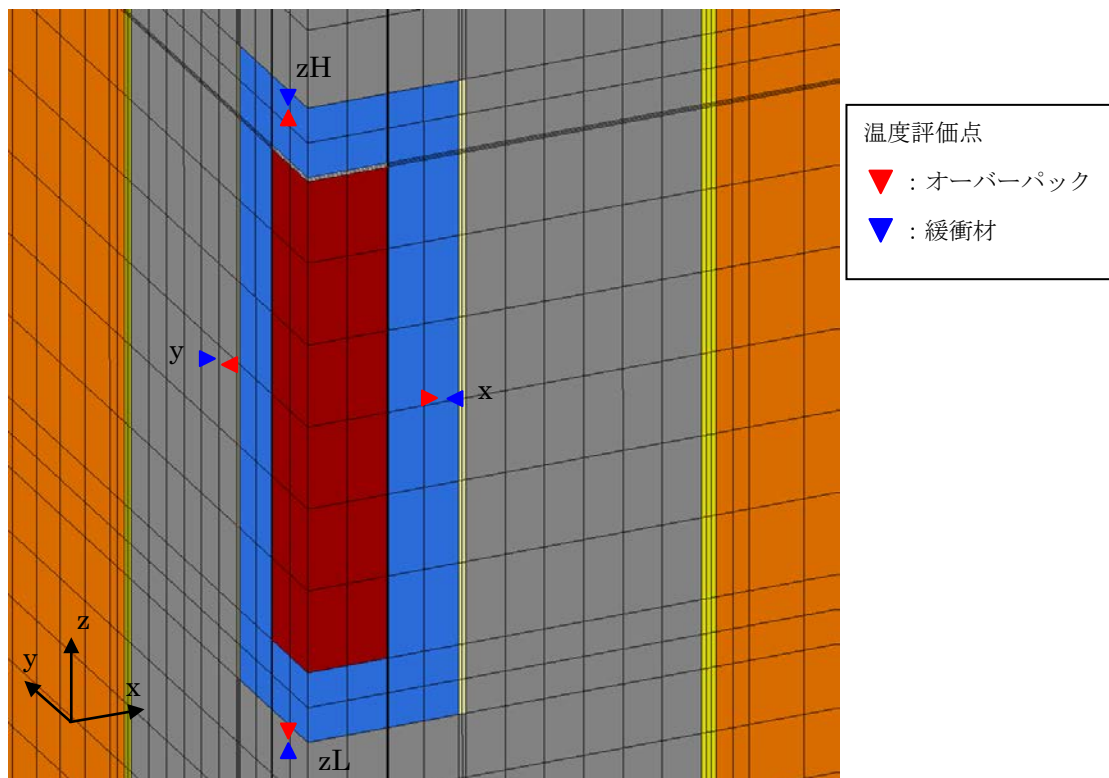
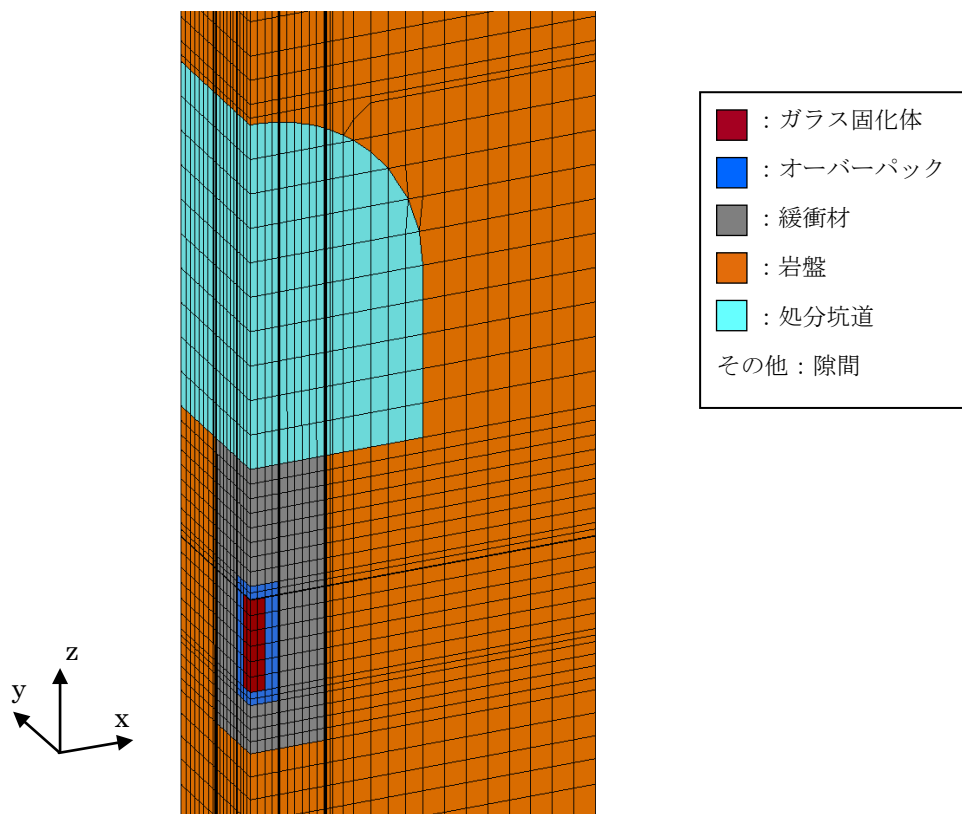
## (c) 解析ケース

本検討の有限要素モデルを図 2.3.2-9～図 2.3.2-11 に示す。図 2.3.2-9 は縦置き方式の有限要素モデル、図 2.3.2-10 は横置き方式の有限要素モデル、図 2.3.2-11 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、縦置き方式の場合、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が高いため、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。縦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 2.3.2-10～表 2.3.2-12 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。縦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。なお、表 2.3.2-10～表 2.3.2-12 に示す x,y,z は図 2.3.2-9～図 2.3.2-11 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。



(b) 廃棄体近傍拡大図（温度評価点）

図 2.3.2-9 有限要素モデル（縦置き方式）

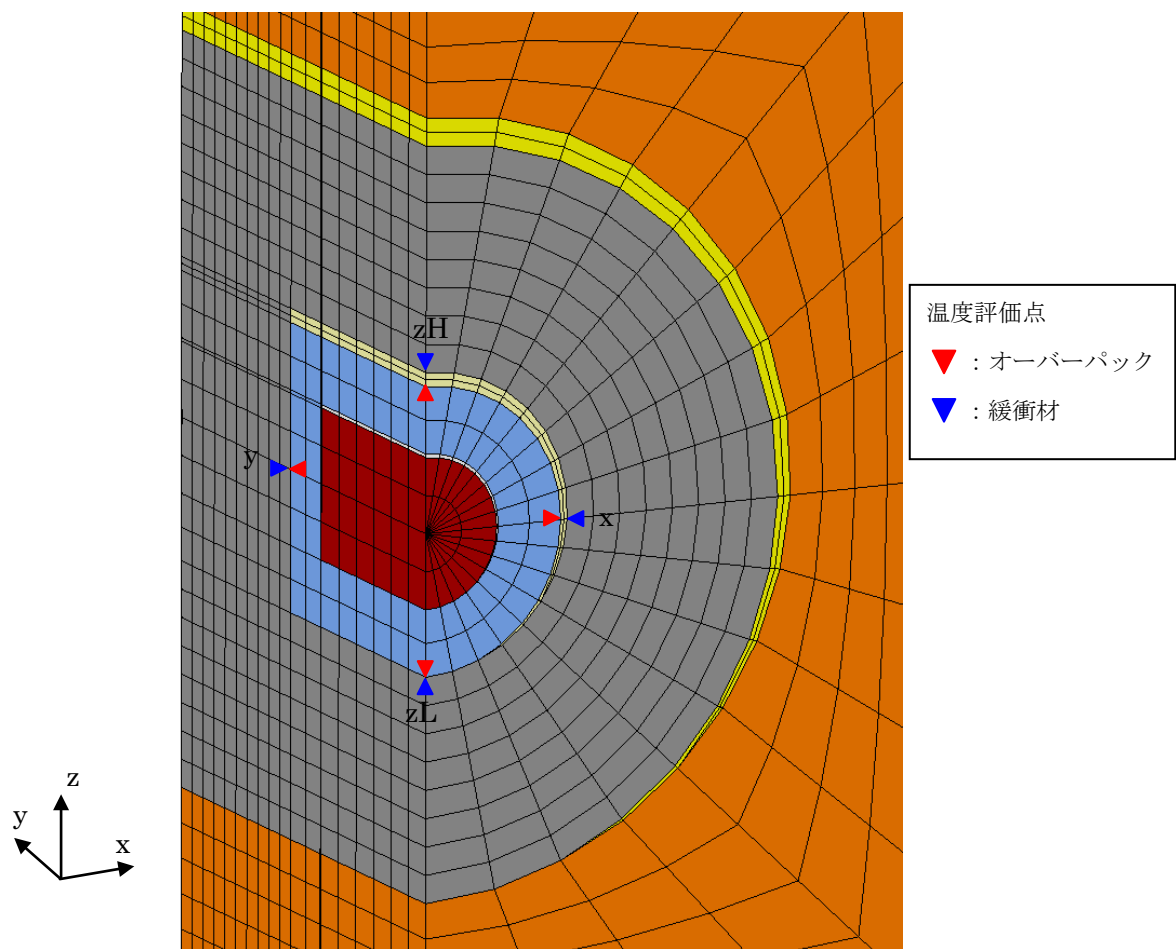
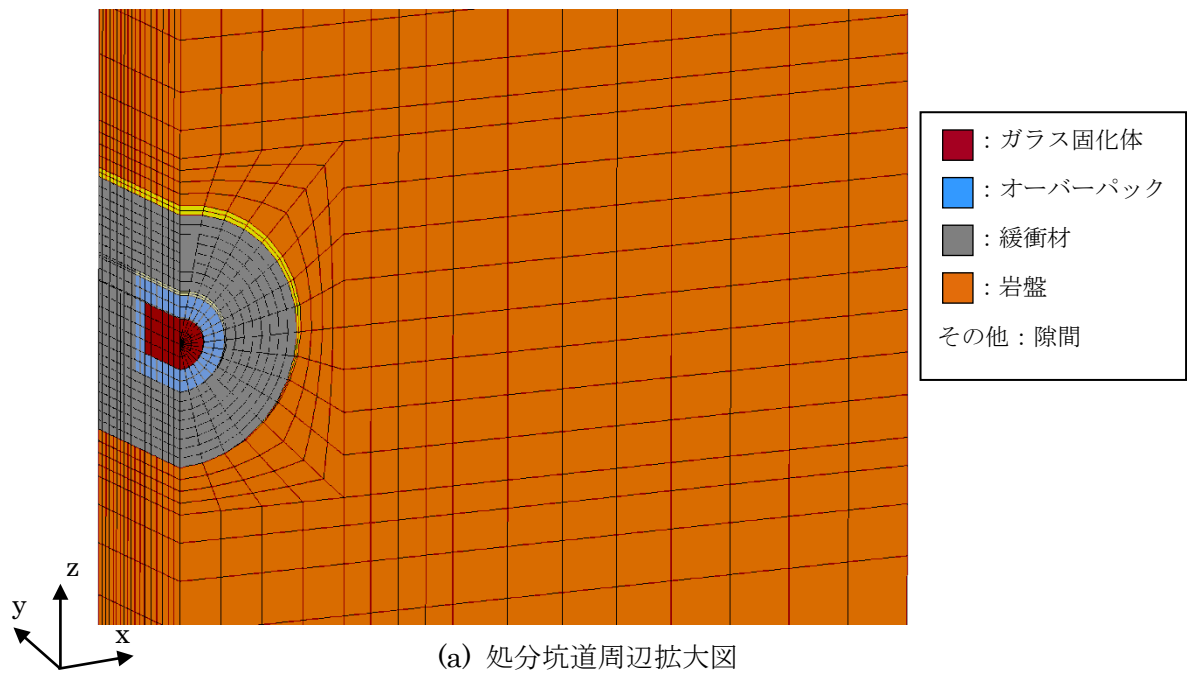


図 2.3.2-10 有限要素モデル（横置き方式）

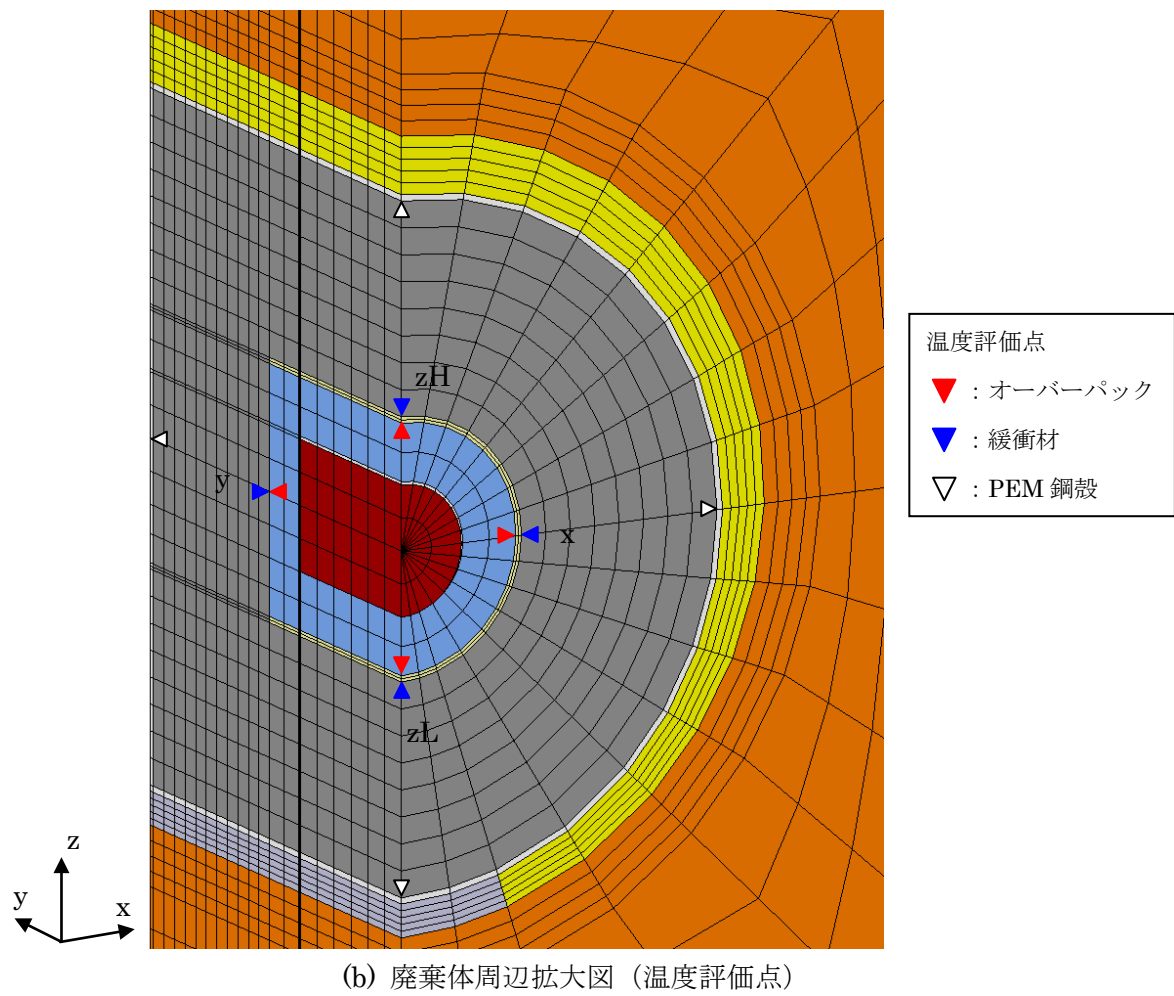
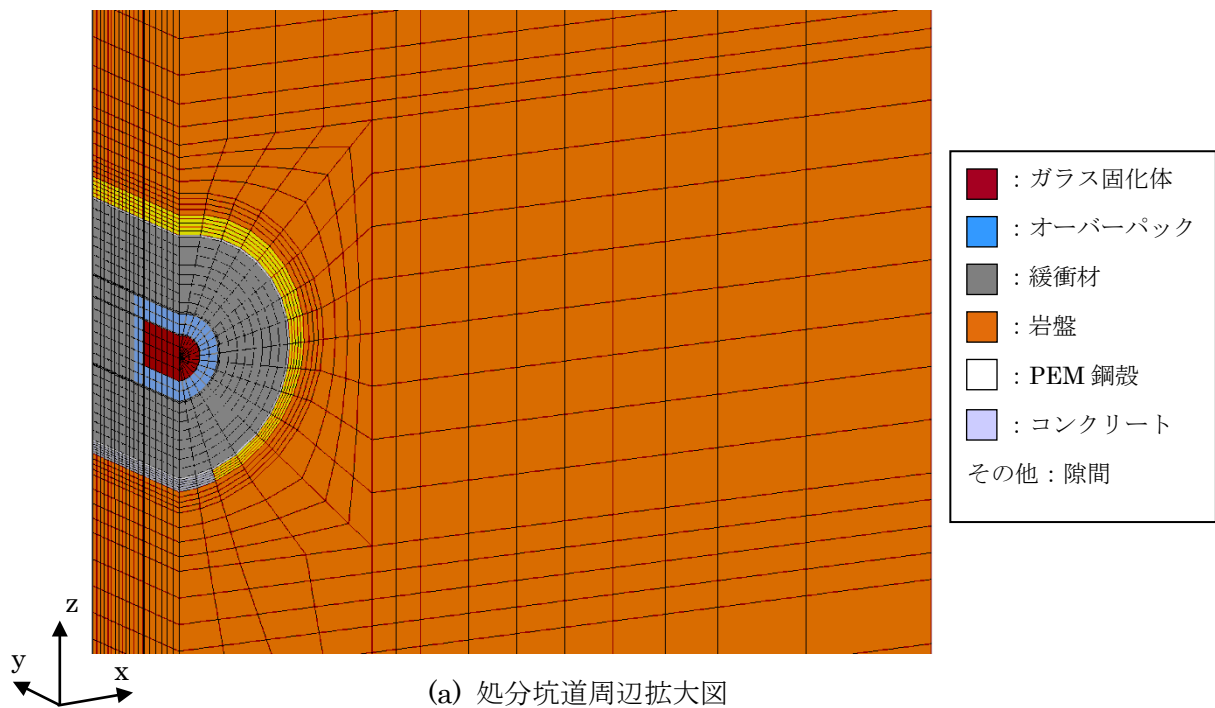


図 2.3.2-11 有限要素モデル (PEM 方式)

表 2.3.2-10 解析ケース（縦置き方式）

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

D:処分坑道径 (5m), d : 処分孔径 (2.22m)

表 2.3.2-11 解析ケース（横置き方式）

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

D:処分坑道径 (2.22m)



表 2.3.2-12 解析ケース (PEM 方式)

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

D:処分坑道径 (2.6m)

#### (d) 解析結果の評価

##### イ. 評価点の最高温度

定置状態①では、縦置き方式のケース v-1、横置き方式のケース h-1 と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した解析を実施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、縦置き方式のケース v-2-1、横置き方式のケース h-2-1 と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、縦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、縦置き方式のケース v-2-2、横置き方式のケース h-2-2 と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縦置き方式のケース 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。

ロ. 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 2.3.2-13 および表 2.3.2-14 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  $2.5\sim 2.8^{\circ}\text{C}$ 、緩衝材では  $0.6\sim 2.8^{\circ}\text{C}$  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 2.3.2-13 第 2 次取りまとめ解析結果との比較（縦置き方式）

| 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<br>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 2.3.2-14 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<br>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    |

b. 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℃、90℃、100℃ 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) 縦置き方式での温度解析結果

イ. ケース v-1（オーバーパック）

図 2.3.2-12 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。

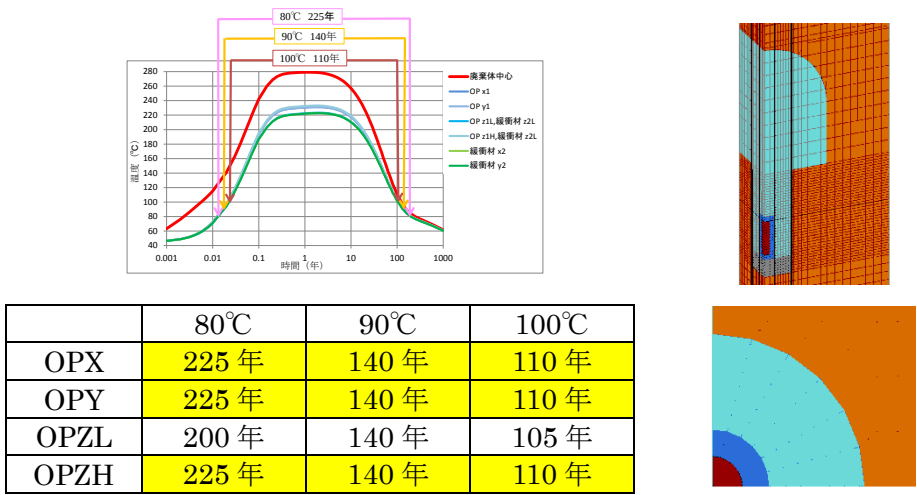


図 2.3.2-12 ケース v-1 における期間の抽出結果

ロ. ケース v-2-2（オーバーパック）

図 2.3.2-13 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。

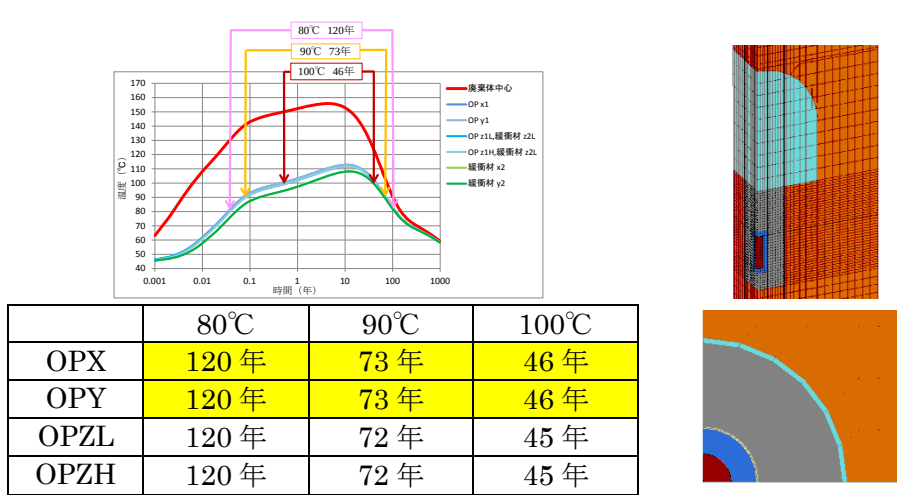


図 2.3.2-13 ケース v-2-2 における期間の抽出結果

(b) 横置き方式での温度解析結果

イ. ケース h-1 における期間の抽出結果（オーバーパック）

図 2.3.2-14 にケース h-1 における期間の抽出結果を示す。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。

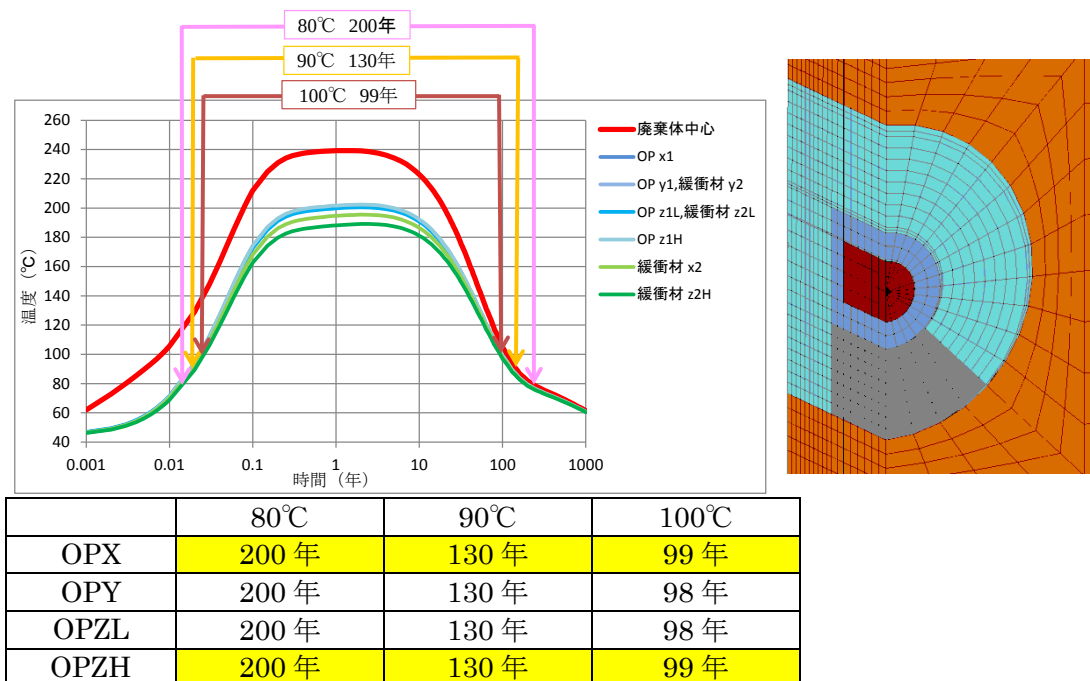


図 2.3.2-14 ケース h-1 における期間の抽出結果

ロ. ケース h-2-2（オーバーパック）

図 2.3.2-15 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。

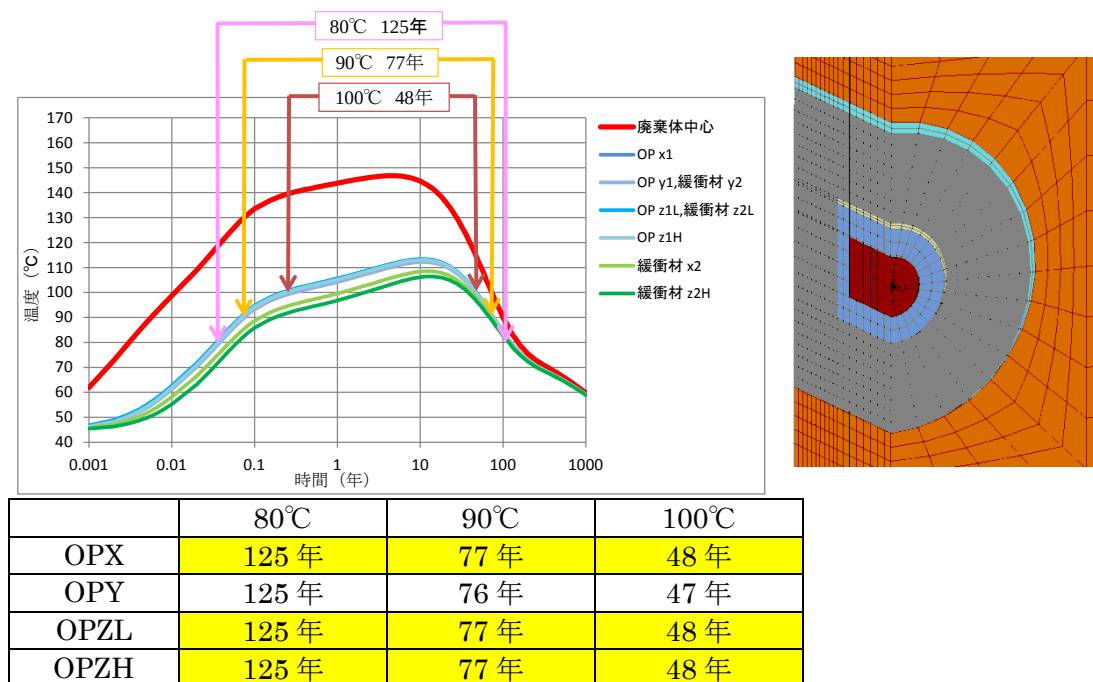


図 2.3.2-15 ケース h-2-2 における期間の抽出結果

(c) PEM 方式での温度解析結果

イ. ケース p-2 (オーバーパック)

図 2.3.2-16 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。

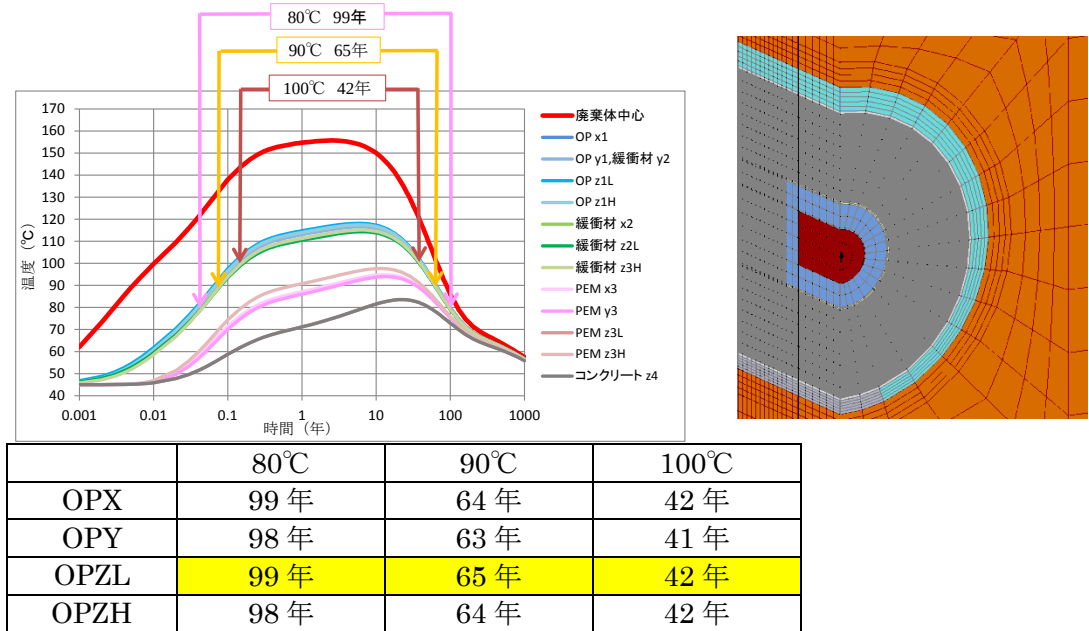


図 2.3.2-16 ケース p-2 (オーバーパック) における期間の抽出結果

ロ. ケース p-3 (オーバーパック)

図 2.3.2-17 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°C を超えなかった。

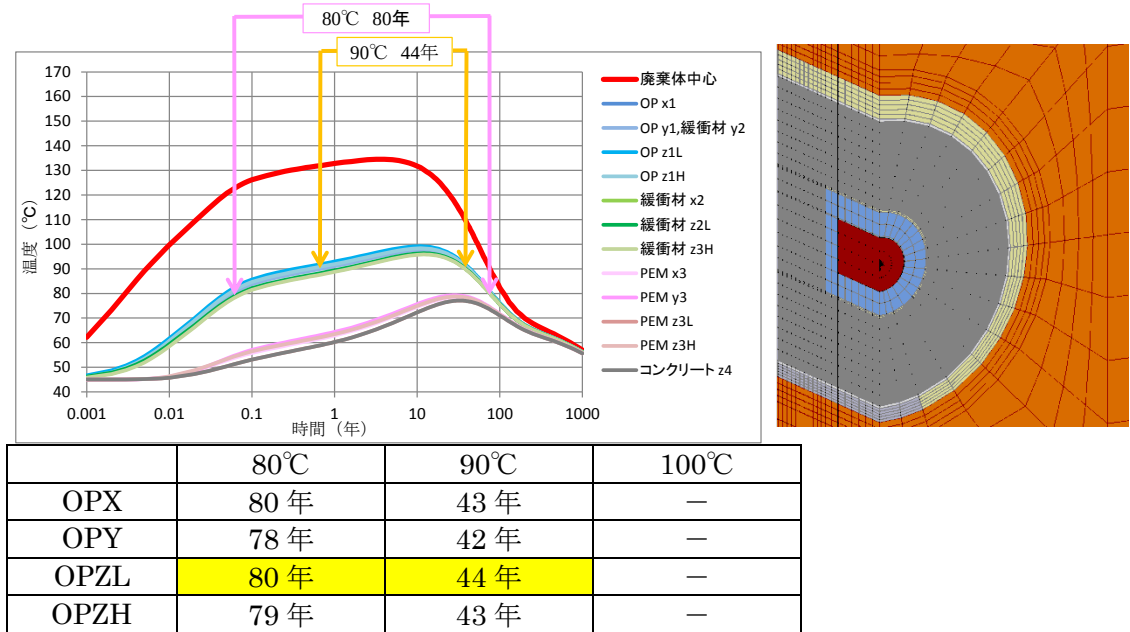


図 2.3.2-17 ケース p-3 (オーバーパック) における期間の抽出結果

## 2) 地下水条件

### a. 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[13]
- 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[8]
- 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.[14]
- 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.[15]
- 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.[16]
- 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.[17]
- 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.[18]
- 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.[19]
- 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.[20]
- 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[21]
- 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 [22]



## b. 地下水質の設定

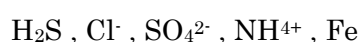
地下水水質の中で、人工バリアの腐食に影響すると考えられるパラメータを設定し、このパラメータに対して地下水に関する文献①～⑩から地下水水質の値を抽出した。

また、地下水に関する文献①～⑩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



※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

#### イ. 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。

#### ロ. まとめ

以下のとおり、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についてまとめた。

・モデル地下水水質

降水系

pH=8.5

Eh =-281 [mVvsSHE]

Cl<sup>-</sup>濃度=1.5E-5 [mol/L]

total-Fe 濃度=9.7E-10[mol/L]

H<sub>2</sub>S(aq)濃度=1.2E-10 [mol/L]

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度=1.1E-4 [mol/L]

海水系

pH=8.0

Eh =-303 [mVvsSHE]

Cl<sup>-</sup>濃度=5.9E-1 [mol/L]  
total-Fe 濃度=3.9E-3[mol/L]  
H<sub>2</sub>S(aq)濃度=2.1E-3 [mol/L]  
SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>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[°C]  
Cl<sup>-</sup>濃度=7.67E-4～333[mol/L]  
total-Fe 濃度=5.37E-6～6.72E-2[mol/L]  
NH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度=2.94E-3～12.8[mol/L]  
SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>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

イ. 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。

ロ. まとめ

イ. 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

#### (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

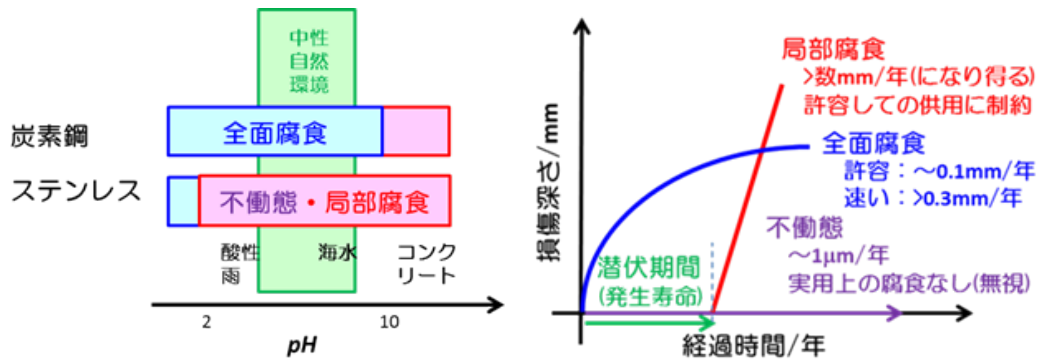
##### a. 検討方法

炭素鋼の代表的な腐食形態を表 2.3.2-15 に示す。炭素鋼の全面腐食と不働態・局部腐食を図 2.3.2-18 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[26]の知見などを活用する。

表 2.3.2-15 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、熔融塩腐食など                      |



(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 2.3.2-18 炭素鋼の全面腐食と不働態・局部腐食(模式図)

## b. 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 2.3.2-19 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[66]を図 2.3.2-20 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。

#### イ. 湿潤大気腐食モデル

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

$$a_0(60^\circ\text{C}, \text{R.H.}70\%, 1000\text{ppm}[\text{Cl}]) = 0.53(\text{mm/y})$$

#### ロ. 水溶液腐食モデル

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

$$f(\text{凹凸})=1,$$

$$a_0(60^\circ\text{C}) = 0.54(\text{mm/yr})$$

#### ハ. CUI モデル

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

$$a_0(\text{非海洋域}) = 0.025(\text{mm/yr}),$$

$$a_0(\text{環境補正}) = 0.13(\text{mm/yr})$$

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 年前後では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[14]を図 2.3.2-21 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[8]が認められる場合には、OP 表面の pH 高くなると推測されたため、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 2.3.2-22 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 2.3.2-19 腐食評価の観点から埋戻状態(模式図)

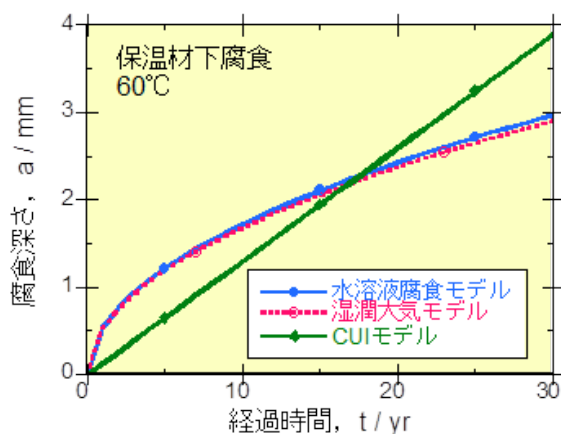


図 2.3.2-20 炭素鋼の腐食の進展予測例[66]

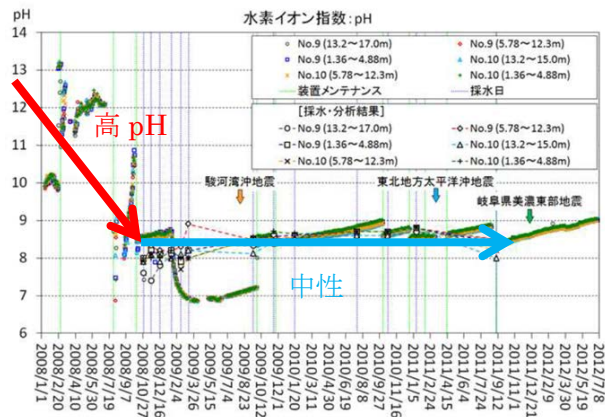


図 2.3.2-21 地下水の pH 変化(例)

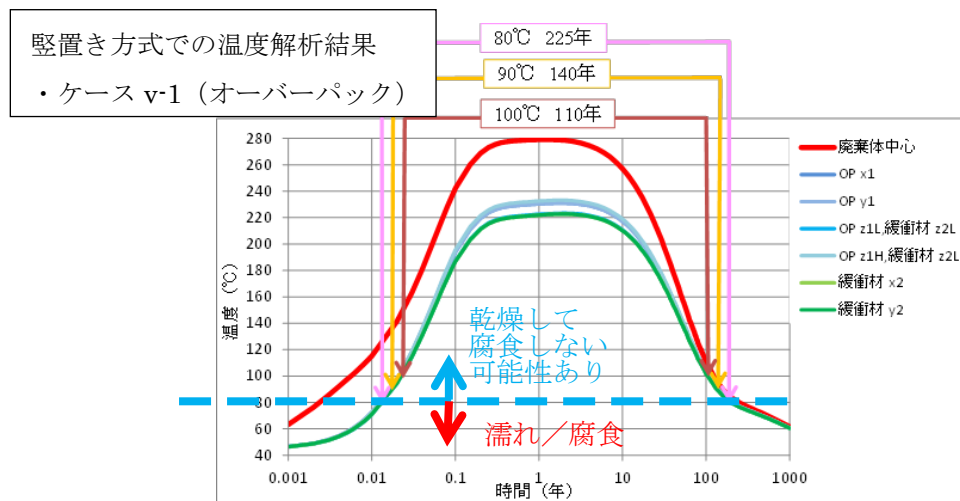


図 2.3.2-22 オーバーパックの埋設環境における温度解析(例)

#### (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[47]

$$\begin{aligned} \text{腐食度 } 1\text{yr(mdd)} = & -52.67 + 0.484 \times (\text{気温, } ^\circ\text{C}) + 0.701 \times (\text{湿度, } \%) \\ & -0.022 \times (\text{降水量 mm/yr}) + 0.075 \times (\text{海塩粒子 ppm}) \\ & + 8.202 \times (\text{亜硫酸ガス mdd}) \end{aligned}$$

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 2.3.2-16 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 2.3.2-16 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<br>(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[34]は以下に記される。

$$a_{0T} \text{ (mm/yr)} = 0.128 + 0.00032T(^{\circ}\text{C})$$

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、 $f_{\text{pH}}=1$ )とする。

炭素鋼の腐食速度の DO 依存性[32]は、図 2.3.2-23 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。

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

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)、 $a_0$  は、

$$a_0 \text{ (mm/yr)} = [0.128 + 0.00032T(^{\circ}\text{C})] \times [0.00155 + 0.120 \text{ DO (ppm)}]$$

となる。水と接する場合の腐食見積(温度、DO)を表 2.3.2-17 に示す。

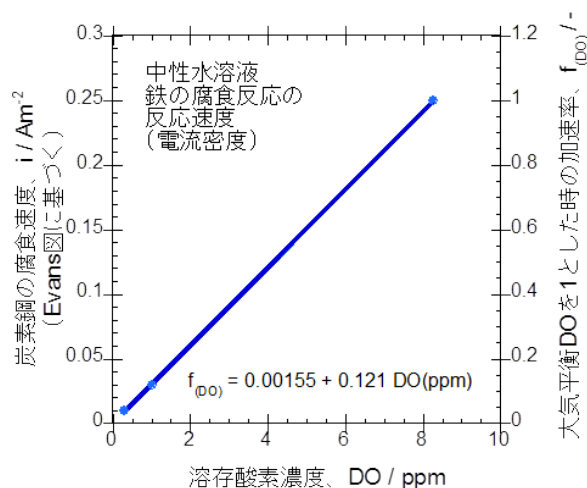


図 2.3.2-23 Evans 図のアノードとカソードの交点から求めた腐食速度の DO 依存性[32]

表 2.3.2-17 水と接する場合の腐食見積(温度、DO)

| 温度(°C) | DO(ppm) | 腐食速度<br>(mm/yr) | 腐食深さ(mm) |      |       | 温度(°C) | DO(ppm) | 腐食速度<br>(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[53]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[54][55]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、コーティングの良否因子、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、スチームトレース、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 2.3.2-18 に示す。



表 2.3.2-18 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／<br>非海洋 | 腐食速度<br>(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表 2.3.2-19 に示す。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(大きい)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る。

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[71]を参考として作成した腐食挙動を図 3.4.1-31 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 3.4.1-9 の右端に示す。そのため、150℃での見積が 0.00mm となっている。

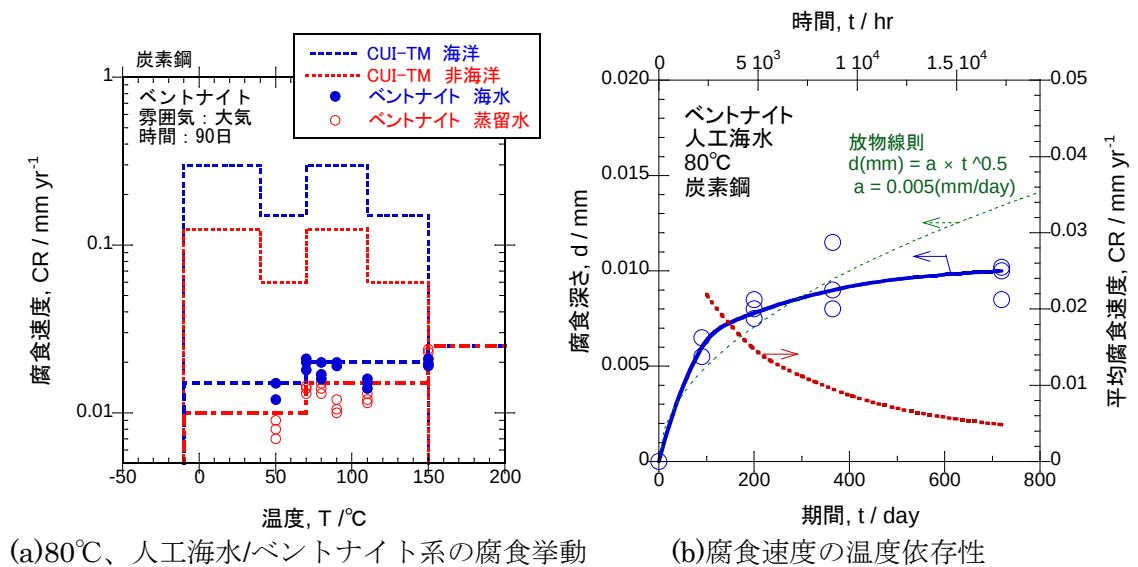


図 2.3.2-24 ベントナイト埋設環境における炭素鋼の腐食挙動

表 2.3.2-19 腐食深さの定置条件、および時間依存性比較

| 10年間   |                     |      |      |      |              |      |      |        |        |        |      |
|--------|---------------------|------|------|------|--------------|------|------|--------|--------|--------|------|
| 温度(°C) | 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(°C) | 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[4]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 1,400mol の鉄の腐食が見積もられる。



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  $10 \mu\text{m y}^{-1}$  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  $5 \mu\text{m y}^{-1}$  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  $10 \mu\text{m y}^{-1}$  としたうえで、さらに不均一化を考慮し 2 倍の腐食速度  $20 \mu\text{m y}^{-1}$  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、

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

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) 緩衝材の変質影響

### a. 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[7]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、流出が示されている。また、NUMO の報告書[10]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 2.3.2-20、表 2.3.2-21 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 2.3.2-20 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) [10]

| 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 <sup>3</sup> 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)<br>JNC (2005)<br>Komine and Ogata (2004)<br>小峯ほか (2009)<br>Komine et al. (2009)<br>棚井ほか (2010)<br>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 <sup>64</sup> 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 条件で促進される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)<br>亀井ほか (2007)<br>Köhler et al. (2003)<br>Kuwahara (2006)<br>Nakayama et al. (2004)<br>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)<br>原環センター (2003b, 2010d)<br>金 (2001)<br>Oda (2004)                                                  |
|                  | セメンテーション         | セメント・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 2.3.2-21 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) [10]

| 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 <sup>+</sup> イオン) が、Fe <sup>2+</sup> 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)<br>Ishidera et al. (2007)<br>Kozai et al. (2001)<br>笹本ほか (2010)<br>柴田ほか (2004)<br>陶山ほか (2008)                                 |
|                      | 鉱物化学変質               | Fe <sup>2+</sup> 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、パーチェリン化、ノントロナイト化、鉄サボ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、パ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)<br>JAEA (2008b, 2010b)<br>Lanenois et al. (2005)<br>Marty et al. (2010)<br>笹本ほか (2009)<br>陶山ほか (2008)<br>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)<br>Marty et al. (2010)<br>Savage et al. (2010)<br>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)<br>石川ほか (1994 )<br>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)<br>松本・棚井 (2003, 2004, 2008, 2010)<br>松本ほか (2005)                                                                                         |

設定した状態と期間に、特に考慮が必要となる緩衝材の変質に係わる因子は、表 2.3.2-21 に示す緩衝材の流出現象である。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[82]。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[83]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[84]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  $8 \times 10^{-6} \text{m/s}$ ）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  $2 \times 10^{-6} \text{m/s}$  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[82][85]。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[86]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[87]。

本検討における回収維持期間で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[9]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[88]。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[89][90][91]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。

## b. 影響の定量化（程度の検討）

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[88]。この研究では、図 2.3.2-25 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<sup>3</sup>/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に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。

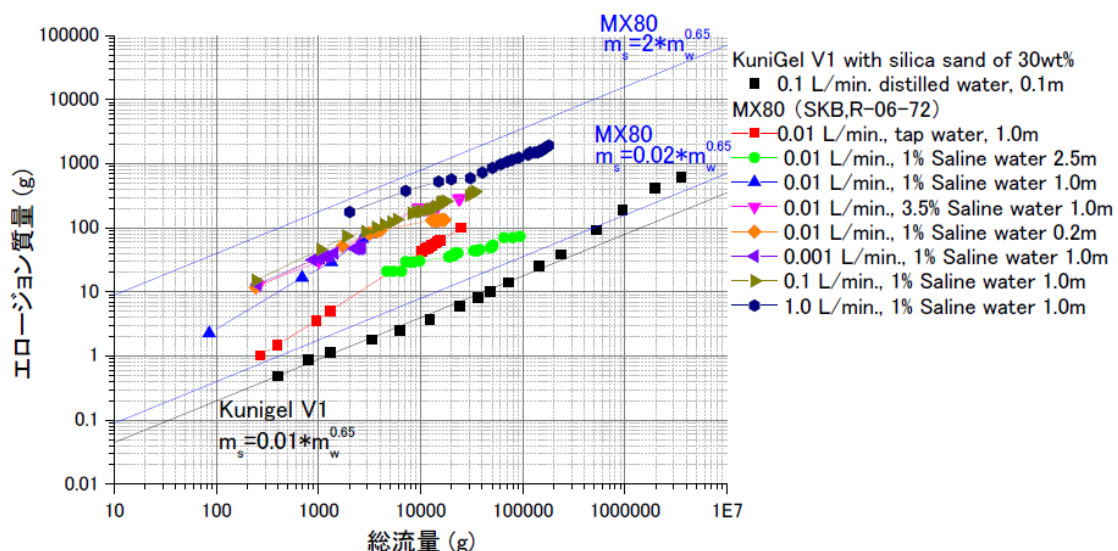


図 2.3.2-25 クニゲル V1 の総湧水量とエロージョン量の関係[88]

### 3) PEM 容器

#### a. 検討方法

PEM 容器の材質としては、現在の検討[9][92]においては炭素鋼が選定されている。したがって、1) のオーバーパックスの腐食影響の検討と同様とする。

#### b. 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スの検討における腐食に係る因子と同様とする。

#### c. 影響の定量化（程度の検討）

基本的には、オーバーパックス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スの環境条件（温度）、長期性能は考慮しないものとする。

表 2.3.2-12 に示す熱解析結果からオーバーパックス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ス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) 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、オーバーパックス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 : 堅置き方式、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 堅置き方式 : 緩衝材最高温度・約 220℃（オーバーパックス露出条件）  
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℃（オーバーパックス露出条件）  
緩衝材最高温度・約 110～120℃（緩衝材有り条件）
  - ③ PEM 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 : 「2.3.2 (3) 2) b (c) ロ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 : 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な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ス、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 2.3.2-19 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。

### 2.3.3 人工バリアの状態と回収維持期間の例示

ここでは 2.3.2(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。

#### (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) 処分孔竖置き定置方式

処分孔竖置き定置方式において、作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。

- a. オーバーパックのみを定置したケース
- b. 緩衝材を定置したケース
- c. 処分坑道を埋め戻したケース

##### a. 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 2.3.3-1 に示す。また、この状態イメージを図 2.3.3-1 に示す。

表 2.3.3-1 人工バリア性能維持への影響が懸念される事象 (1)  
(処分孔縦置き定置概念：オーバーパックのみを定置したケース)

|       |         | 状態<br>(従来と異なる現象) |                      | 人工バリア性能維持<br>への影響が懸念される事象                 |
|-------|---------|------------------|----------------------|-------------------------------------------|
|       |         |                  | 論拠                   |                                           |
| 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 | 2.3.2(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                           |
|       | 緩衝材     | T                | 100℃超過による緩衝材の変質・変形   | 2.3.2(3) 緩衝材の変質に伴うシール性等の劣化<br>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

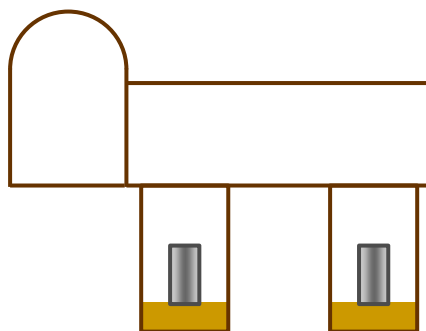


図 2.3.3-1 オーバーパックのみを定置したケースにおける人工バリアの状態イメージ  
(処分孔縦置き定置概念)

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

##### イ. 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 2.3.2-10 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 2.3.2-19 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、オーバーパックス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、オーバーパックス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ス表面に接触するなどが無ければ、オーバーパックス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年程度の間は高温の状態で継続しており、この期間は腐食(減厚)がほとんど無くなる可能性があり、オーバーパックス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。

#### ロ. 水理を因子とした状態

地下水(湧水)がオーバーパックス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2.3.2-19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、オーバーパックス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。

#### ハ. 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スの腐食が進行し、オーバーパックスの人工バリア性能(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ス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。

#### ニ. 化学を因子とした状態

酸化環境はオーバーパックス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2.3.2-19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、オーバーパックス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ス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

### イ. 温度を因子とした状態

オーバーパックスのみを設置したケースでは、底部の緩衝材温度は、表 2.3.2-10 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、オーバーパックス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。

### ロ. 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。

### ハ. 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ス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。

### ニ. 化学を因子とした状態

2.3.2(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。

b. 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 2.3.3-2 に示す。また、この状態イメージを図 2.3.3-2 に示す。表 2.3.3-2

表 2.3.3-2 人工バリア性能維持への影響が懸念される事象 (2)

(処分孔縦置き定置概念：緩衝材を定置したケース)

|       |         | 状態<br>(従来と異なる現象) |                 | 論拠       | 人工バリア性能<br>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          | 2.3.2(3) | —                       |
|       |         | H                | —               |          | —                       |
|       |         | M                | —               |          | —                       |
|       |         | C                | —               |          | —                       |
|       | 緩衝材     | T                | 100℃超過による緩衝材の変質 | 2.3.2(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 | 2.3.2(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

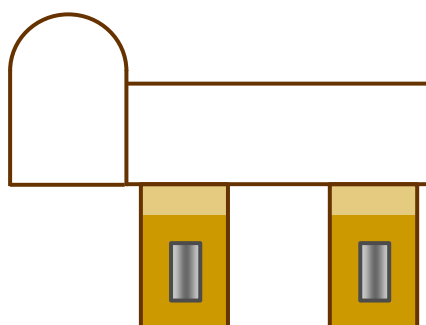


図 2.3.3-2 緩衝材を定置したケースにおける人工バリアの状態イメージ

(処分孔縦置き定置概念)

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

1. 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 2.3.2-10 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。

ロ. 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 2.3.2-19 の右欄より腐食(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(凹凸考慮の場合 1.2mm 程度)、10 年程度で 0.2mm 程度(凹凸考慮の場合 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。

ハ. 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。

ニ. 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 2.3.2-19 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(凹凸考慮の場合 1.2mm 程度)、10 年程度で 0.2mm 程度(凹凸考慮の場合 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

イ. 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。

ロ. 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。

#### ハ. 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。

#### ニ. 化学を因子とした状態

2.3.2(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。



c. 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 2.3.3-3 に示す。また、この状態イメージを図 2.3.3-3 に示す。

表 2.3.3-3 人工バリア性能維持への影響が懸念される事象 (3)

(処分坑道縦置き定置概念：処分坑道を埋め戻したケース)

|       |         | 状態<br>(従来と異なる現象) |                 | 論拠       | 人工バリア性能維持<br>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          | 2.3.2(3) | —                         |
|       |         | H                | —               |          | —                         |
|       |         | M                | —               |          | —                         |
|       |         | C                | —               |          | —                         |
|       | 緩衝材     | T                | 100℃超過による緩衝材の変質 | 2.3.2(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 | 2.3.2(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

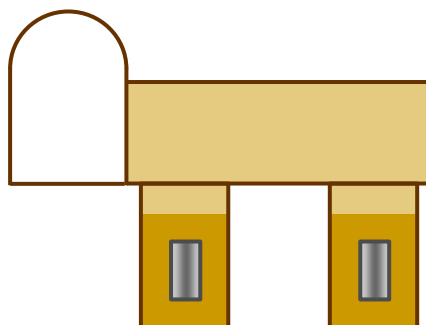


図 2.3.3-3 処分坑道を埋め戻したケースにおける人工バリアの状態イメージ

(処分坑道縦置き定置概念)

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) で考察した処分孔縦置き概念の各々と、ほぼ同様に考えられる結果となった。

## 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。

### a. 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 2.3.3-4 に示す。また、この状態イメージを図 2.3.3-4 に示す。

表 2.3.3-4 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（PEM）定置概念： PEM のみを定置したケース）

|           |     | 状態<br>(従来と異なる現象)       |             | 人工バリア性能維持<br>への影響が懸念される事象 |                       |
|-----------|-----|------------------------|-------------|---------------------------|-----------------------|
|           |     |                        | 論拠          |                           |                       |
| PEM<br>容器 | T   | 100℃近く                 | 2.3.2(3)    | PEM 容器の腐食に伴う減厚            | 人工バリア<br>の長期健全<br>性低下 |
|           | H   | 湧水による PEM 容器<br>の腐食の増大 |             | PEM 容器の腐食に伴う減厚            |                       |
|           | M   | 酸素による PEM 容器<br>の腐食の増大 |             | PEM 容器の腐食に伴う減厚            |                       |
|           | C   | 酸素による PEM 容器<br>の腐食の増大 |             | PEM 容器の腐食に伴う減厚            |                       |
| 人工バリア     | 緩衝材 | T                      | 100℃超過による変質 | 2.3.2(3)                  | 緩衝材の変質に伴うシール性低下       |
|           |     | H                      | —           |                           | —                     |
|           |     | M                      | —           |                           | —                     |
|           |     | C                      | —           |                           | —                     |

—：該当する事項無し

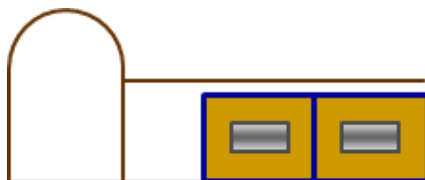


図 2.3.3-4 PEM のみを定置したケースにおける人工バリアの状態イメージ  
 （処分坑道横置き（PEM）定置概念）

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

### イ. 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 2.3.2-12 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 2.3.2-19 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（凹凸考慮の場合 6mm 程度）、10 年程度で 1mm 程度（凹凸考慮の場合 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 2.3.2-19 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。

### ロ. 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、イ. 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。

### ハ. 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。

### ニ. 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、イ. 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

### イ. 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 2.3.2-12 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。

### ロ. 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。

### ハ. 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。

### ニ. 化学を因子とした状態

2.3.2.(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

## b. 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 2.3.3-5 に示す。また、この状態イメージを図 2.3.3-5 に示す。

表 2.3.3-5 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 (PEM) 定置概念：処分坑道を埋め戻したケース)

|           |     | 状態<br>(従来と異なる現象) |          | 人工バリア性能維持<br>への影響が懸念される事象 |
|-----------|-----|------------------|----------|---------------------------|
|           |     |                  | 論拠       |                           |
| PEM<br>容器 | T   | 80℃近くまで上昇        | 2.3.2(3) | —                         |
|           | H   | —                |          | —                         |
|           | M   | —                |          | —                         |
|           | C   | —                |          | —                         |
| 人工バリア     | 緩衝材 | T                | —        | —                         |
|           |     | H                | —        | —                         |
|           |     | M                | —        | —                         |
|           |     | C                | —        | —                         |

—：該当する事項無し

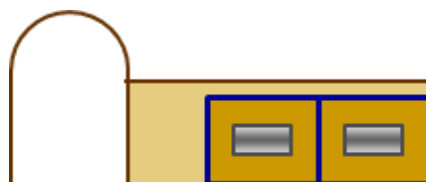


図 2.3.3-5 処分坑道を埋め戻したケースにおける人工バリアの状態イメージ  
(処分坑道横置き (PEM) 定置概念)

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 2.3.2-19 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 (凹凸考慮の場合 1.2mm 程度)、10 年程度で 0.2mm 程度 (凹凸考慮の場合 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。

## (2) 回収維持期間の例示

### 1) 回収維持期間の例示

2.3.3(3)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 2.3.3-6 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 2.3.3-6 人工バリアに及ぼす主な影響の程度と期間（表 2.3.2-16～表 2.3.2-18 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<br>ック | 腐食深さ<br>(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<br>(kg)  |       |       | 67     | ただし、1 処分孔あたり（堅置き方式） |

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 2.3.3-7、表 2.3.3-8 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 2.3.3-7 我が国におけるトンネルの共用期間の例[7]

| 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 2.3.3-8 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[100]      | 1862 年～（153 年間）              |
| 神岡鉱山[101][102] | 1874 年～（141 年間）（採掘は 720 年頃～） |
| 釧路コールマイン[102]  | 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、堅置き方式において、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。

### 2.3.4 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」について、処分概念の堅置き方式を例として、操業段階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った。その結果を以下に示す。

#### (1) 維持管理を見据えた環境条件の調査

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り返し実施することにより、長期間施設を維持する。図2.3.4-1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。

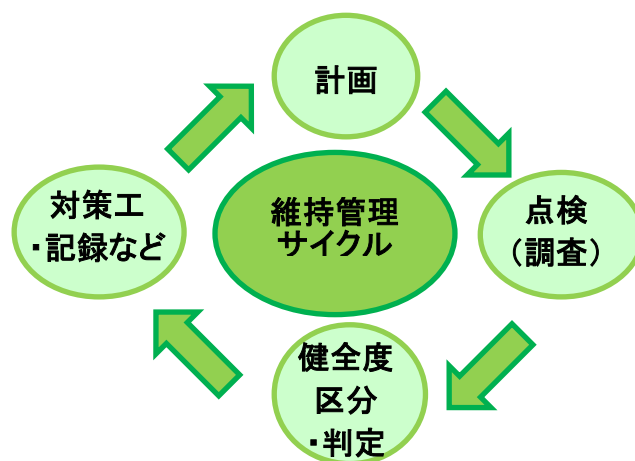


図 2.3.4-1 一般的なトンネルの維持管理の手順

図2.3.4-1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(4)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。

#### (2) 維持管理のための具体的な方策

2.3.3 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、回収可能性を維持させるための方策について処分孔堅置き定置方式について例を示し、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。

- a. オーバーパックのみを定置したケース
- b. 緩衝材を定置したケース
- c. 処分坑道を埋め戻したケース



a. 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ける各坑道と人工バリアに対して、人工バリア性能維持に及ぼす影響が懸念される事象に対する方策を検討した結果を表 2.3.4-1 に示す。

表 2.3.4-1 処分施設を持管理するための方策 (1)  
(処分孔竖置き定置方式：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<br>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<br>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<br>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<br>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 O P 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 2.3.4-2 に対策の概念[93][94][95][96]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。

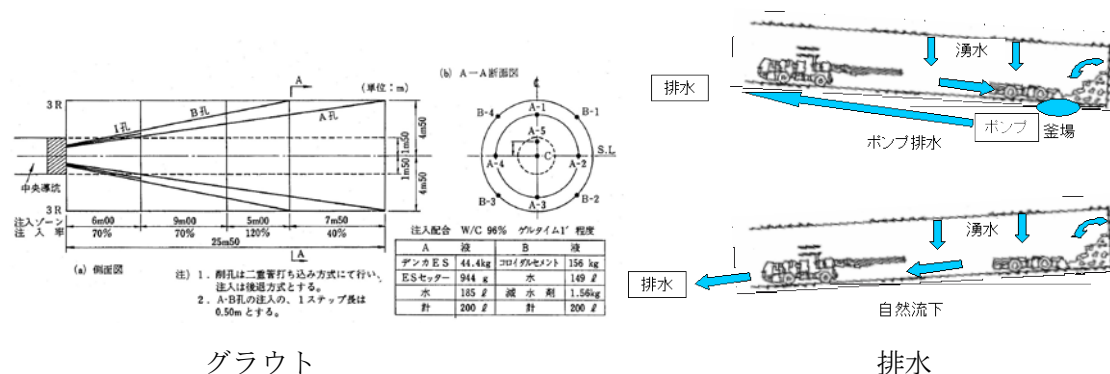


図 2.3.4-2 湧水抑制対策

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す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。

b. 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に対して影響が懸念される事象へ

の対策について検討した結果を表 2.3.4-2 に示す。

表 2.3.4-2 処分施設を持管理するための方策 (2)

(処分孔堅置き定置方式：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<br>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<br>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                     | 隙間充填と (換気・防水対策) による変質抑制        |
|       |         | H                     | 湧水抑制の実施と維持管理                   |
|       |         | M                     | (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管理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、オーバーパックのみが定置されたケースと同じであり、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する方策を検討した結果を表 2.3.4-3 に示す。

表 2.3.4-3 処分施設を持管理するための方策 (3)  
(処分孔縦置き定置方式：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<br>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<br>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<br>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<br>(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) 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管理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、オーバパックの所要性能と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、オーバーパックのみが定置されたケースと同じであり、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。

(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、回収可能性を維持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、作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。

### 2.3.5 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

#### (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であった。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、作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、作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。
- ・堅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。

## (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が埋め戻され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。

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。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、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、堅置き方式において、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。

### (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。

### 2.3.6 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] 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] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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).
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 原子力環境整備促進・資金管理センター、“平成 24 年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 1 分冊）―遠隔操作技術高度化開発―”、平成 25 年 3 月
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 核燃料サイクル開発機構、“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性―地層処分研究開発第 2 次取りまとめ―分冊 3 地層処分システムの安全評価”，JNC TN1400 99-023、
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.

- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Sasamoto, H., Salter, P., Apted, M. and Yui, M., “Principal Component Analyses of Potential Repository Groundwater”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc.1999.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 腐食防食協会編、“材料環境学入門”、p.273、丸善、1993.
- [30] 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
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] <http://w-21.net/dron/table/orp.html>、2014.12.4 検索.
- [34] 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.
- [35] NACE, “NACE Standard Recommended Practice 0198-2004”, Item No.21084, NACE, 2004.
- [36] 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.
- [37] 腐食防食協会編、“材料環境学入門”、p.34、丸善(1993)
- [38] 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
- [39] 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).
- [40] 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).
  - [41] 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)
  - [42] 腐食防食協会編、“金属の腐食・防食 Q&A”、p.11、丸善 (1988).
  - [43] 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).
  
  - [44] 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稿集、A307、腐食防食協会、2007.
  - [45] 日刊工業新聞社、“ステンレス鋼便覧、第 3 版”、p.1359、1995.
  - [46] 原子力百科事典、放射線の直接作用と間接作用 (09-02-02-10).
  - [47] 堀川一男、ほか、“防食技術”、16, No.4, 153 (1967).
  - [48] 腐食防食協会編、金属の腐食防食 Q&A、p.19、丸善(1988).
  - [49] 腐食防食協会編、“金属の腐食防食 Q&A”、p.141、丸善(1988).
  - [50] 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).
  - [51] 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.
  - [52] 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).
  - [53] 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.
  - [54] 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.
  - [55] 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).
  - [56] 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).
  - [57] 小若正倫、長野博夫、“防食技術”、20、213 (1971).
  - [58] 小若正倫、“金属の腐食損傷と防食技術”、p.80、アグネ (1995).
  - [59] C.P. Larrabee, S.K. Coburn, Proc. 1st Int. Cong. On Metallic Corrosion, NACE p.276 (1961).
  - [60] 小若正倫、“金属の腐食損傷と防食技術”、p.52、アグネ (1995).
  - [61] 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).
  - [62] 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).
  - [63] 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).
  - [64] 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).
  - [65] 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.
  - [66] (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ェ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.
  - [67] 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).

- [68] 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.
- [69] Edited by D.L. Graver, Corrosion Data Survey - Metal Section, Sixth Edition, NACE International (1985).
- [70] 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一、No.44、p.11-13 (2007).
- [71] 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).
- [72] 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).
- [73] 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—、JNC TY1400 2005-013、2005.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] 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.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] 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.
- [80] 笹本広、陶山忠宏、“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.
- [81] 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、一鉄 - ベントナイトの相互作用に関わる影響評価—”、JAEA-Research 2008-073、2008.
- [82] 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.
- [83] 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.
- [84] 松本一浩、棚井憲治、“緩衝材の流出／侵入特性”、JNC TN8400 2003-035、2004.
- [85] 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.
- [86] 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.

- [87] 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.
- [88] 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一、平成 25 年 3 月.
- [89] 日本鉄道建設公団, “湧水の調査及び対策に関する研究報告書”、1987.
- [90] 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.
- [91] 日本トンネル技術協会, “トンネル施工に伴う湧水, 湧水に関する調査研究 (その 2)”、1983.
- [92] 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
- [93] 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.
- [94] 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.
- [95] 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) ー遠隔操作技術高度化開発ー (2/2)”、平成 20 年 3 月.
- [96] 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) ー遠隔操作技術高度化開発ー (2/2)”、平成 21 年 3 月.
- [97] 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.
- [98] 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.
- [99] 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.
- [100] 出典: 釜石鉦山フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』
- [101] 出典: 神岡鉦山フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』
- [102] 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3章 まとめおよび今後の開発戦略

回収技術高度化開発において、平成 23 年度から平成 26 年度の 4 年間で実施した「廃棄体を回収するための緩衝材除去システムの開発」、「地下環境における実証試験計画」、「地層処分施設における回収維持期間の検討」について、個別開発成果のまとめと今後の課題を以下に取りまとめた。また、本事業の取り組みを踏まえ、新たな事業へ向けた開発戦略を示す。

### 3.1 個別開発成果のまとめ

#### 3.1.1 廃棄体を回収するための緩衝材除去システムの開発

本事業では、廃棄体の回収手順の中でも中核技術となる人工バリアの緩衝材除去技術について塩水を利用した緩衝材除去システムの開発を行った。以下に、緩衝材除去システムの開発および緩衝材除去システムを利用した実規模大の緩衝材除去試験によって得られた成果を示す。

##### (1) 緩衝材除去システム

###### 1) 噴射・吸引設備

- 緩衝材を除去するための塩水噴射、噴射した塩水と緩衝材（スラリー）を吸引する機能を有した塩水噴射・スラリー吸引装置を開発した。また、本装置には緩衝材除去するための噴射ノズルの角度や揺動速度などについて要素試験を行い、その知見をもとに開発を行った。
- 廃棄体（約 6.1）を把持し、引き上げることができる把持装置を開発した。
- 緩衝材除去形状を計測するため、3D スキャナを使用した形状計測装置を開発した。

###### 2) 塩水リユース設備

- 地下環境といった特別な制約条件を受けるため、最小限のインフラ設備利用を考慮し、塩水の再利用機能（スラリーの循環フロー）を有した設備を開発した。
- 塩水を再利用するため、吸引したスラリーを塩水と緩衝材に分離する固液分離槽を利用した。固液分離槽は、構造的に簡易でありメンテナンス性や操作性に有効、かつ自然沈降を利用しているため、不必要な化学成分を持ち込む必要といった利点を有している「シックナー沈降濃縮装置」を利用した。

###### 3) 遠隔操作設備

- 噴射・吸引設備による廃棄体の把持、引上げおよび塩水噴射・吸引設備などの稼働制御遠隔で行える設備を開発した。また、噴射量、吸引量データ、緩衝材除去形状の計測データの取得および動作の監視が遠隔で行える設備を開発した。
- 塩水リユース稼働中の塩水の品質を遠隔で監視できる設備を開発した。

## (2) 総合動作確認による緩衝材除去システムの成立性

- 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。
- 塩水リユース機能により、本試験では約 25m<sup>3</sup>の塩水を使用することで、緩衝材の除去を行うことが可能となった。
- 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。
- 緩衝材除去中の緩衝材除去システムの各設備機能を遠隔操作により監視・制御できることを確認した。

### 3.1.2 地下環境における実証試験計画

平成 26 年度までに開発した緩衝材除去システムによる地下環境における実証試験計画の検討を行った。本検討では、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」の調査し、幌延深地層研究センターの地下環境および設備などを整理した。また、実証試験に必要な設備および坑道断面など計画に必要な項目を整理した。以下に得られた成果を示す。

#### (1) 実証試験に必要な設備

- 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<sup>3</sup> となる。
- 電気ケーブルは、φ 21mm、φ 37mm、φ 66mm 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 φ 200、排気管 φ 300 が必要となる。

#### (2) 実証試験に必要な坑道

- 試験坑道 2 で緩衝材除去システムを使用するには、基本として第 2 次取りまとめ断面への拡幅が必要となる。また、資機材を搬出入するため入口部は、さらに 1500mm 程度の拡幅が必要となる。
- 噴射・吸引設備の最小組立スペースとして、幅 5000mm、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。
- 噴射・吸引設備組立エリアの吹付けコンクリートは高強度（ $f'_{ck}=36\text{N/mm}^2$ ）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
- 試験坑道入口部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。

### 3.1.3 地層処分施設における回収維持期間の検討

本検討では、処分施設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、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。以下に得られた成果を示す。

- 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では、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と環境条件を試行的に設定し、熱的観点、力学的観点、水理的観点、化学的観点から影響の程度を定量的に把握し、知見として整理した。
- 人工バリアの状態と回収維持期間の例示の検討では、定量的に把握した影響の算定結果は、処分施設を埋め戻さないことを前提としていることから、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り、現状ではこれらの試算結果から、維持期間の設定は困難である、として、考え方の整備が必要であり今後の課題として整理した。
- 一方、処分施設を埋め戻さない一定期間は、処分施設を維持管理していくことが前提であることから、地下施設を維持管理していくことにより、人工バリア性能を維持しつつ、回収可能性を維持することが可能であると考えられ、我が国におけるトンネルの共用期間、鉱山の稼働期間を調査し、これらの期間を回収維持期間の設定に対する一つの目安として提示した。
- 試行的に例示した維持期間に対する処分施設の維持管理方策の検討では、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、健全度の区分と判定、対策工、記録）のうち対策工を中心に調査を実施し、処分施設への適用性を検討し、覆工の必要性、坑道の補修・補強が必要となった場合に必要となる作業空間の確保等、維持管理を前提とする坑道断面の必要性等の課題を抽出し整理した。

## 3.2 今後の課題と開発戦略

個別開発開に対する今後の課題を以下に示す。また、本事業の取り組みから得られた知見をもとに、新たな事業へ向けた開発戦略を示す。

### 3.2.1 廃棄体を回収するための緩衝材除去システムの開発

- 地下環境の空間制約条件を考慮し、さらなる各設備のコンパクト化を図る必要がある。
- 噴射・吸引設備は移動式としたが、塩水リユース設備は固定配置となっている。この場合、廃棄体の回収が一处分坑道あたり複数ある場、噴射・吸引設備と塩水リユース設備間のホースなどのケーブルへの対応が問題となる。そのため、両設備の同時移動を検討する必要がある。
- 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。

- 緩衝材除去試験では、模擬廃棄体の全周の緩衝材を除去した。しかし、廃棄体を回収するためには、定置後廃棄体にかかる緩衝材の拘束力を把握することができれば、必ずしも緩衝材すべてを除去する必要はない。そのために、緩衝材の膨潤挙動や回収時の塩水の影響などを考慮した廃棄体にかかる緩衝材の拘束力を把握することが必要である。

### 3.2.2 地下環境における実証試験計画

- 試験解析結果では、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  $f'_{ck}=36\text{N/mm}^2$  を  $36\text{ N/mm}^2$  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り、実施工による掘削手順の工夫を踏まえ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張を検討した。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）以上の拡張を行わないような設備設計の検討が必要である。

### 3.2.3 地層処分施設における回収維持期間の検討

我が国の地層処分において回収可能性を維持していく取り組みに対して、本検討では、処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合の処分施設に及ぼす影響について、概ね現状の把握と課題を整理した段階であると考えられる。今後、取り組むべき課題と戦略を以下に整理する。

#### (1) 処分施設を一定期間埋め戻さないとした場合の人工バリア性能に及ぼす影響の定量化

- 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。

#### (2) 回収維持期間の設定

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、今後の地層処分技術の整備に向け以下の取り組みが必要である。

- オーバーパックのみ設置した状態では、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。
- 緩衝材を定置した状態では、豎置き方式において、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。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。

### (3) 回収維持期間にわたり処分施設を維持管理するための方策

- 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総合的な検討を行い、処分施設の維持管理技術の整備し、地層処分技術の安全性、信頼性を向上させる。

#### 3.2.4 今後の開発戦略

可逆性・回収可能性は、最終処分における可逆性・回収可能性の意義や具体的な確保のあり方について様々な議論がされており、エネルギー基本計画では「可逆性・回収可能性を担保し、今後より良い処分方法が実用化された場合に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする。」

（平成26年4月）、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でも「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。」（平成27年3月）などの方針が示されている。このように、可逆性・回収可能性は、今後さらに地層処分において重要な役割を担っていくことが考えられる。

本事業では、回収可能性に係わる技術開発、開発技術の地下への展開および回収可能性を維持するための影響検討などを実施した。可逆性・回収可能性に関する状況を踏まえ、技術面と社会面の両面でさらなる研究開発を進めていく必要がある。その中でも、今後の研究開発の戦略として、

- 可逆性・回収可能性のあり方の整理
- 各回収プロセスにおける回収装置の開発
- 可逆性・回収可能性に配慮した地層処分のあり方の検討が必要だと考えられる。以下に、その概要を示す。

#### (1) 可逆性・回収可能性のあり方の整理

可逆性・回収可能性の概念を整理するとともに、具体的な制度設計等のあり方について、処分方法の選択可能性の確保、政策の安定性の確保など多面的な検討を行う。

## (2) 各回収プロセスにおける回収装置の開発

本事業では、回収可能性に係わる技術として緩衝材除去技術を中核技術とし、堅置き処分方式における回収技術の開発および地下環境への適用を検討した。他の回収プロセスにおける適用技術は、既存技術の活用が考えられるが、その回収方法と詳細技術の成立性の検討を進め、地下環境への技術の実証を行う。また、他の処分方式に関する技術についても、既往の要素技術を踏まえ開発を進め、地下環境への技術の実証を行う。

## (3) 可逆性・回収可能性に考慮した地層処分のあり方

本事業では、回収可能性の検討として、地層処分施設の安全性に及ぼす影響の評価、設定した操業状態において、人工バリア性能の維持に及ぼす影響を定量的に把握および維持期間について検討した。今後は、回収可能性を維持するために必要な創業時の人工バリアの要件について検討を進めていく。また、新たな地層処分概念として、地層処回収可能性を担保した人工バリア材、施工方法など、地層処分の操業プロセスの検討を行う。

## おわりに

本事業は、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ことを目的として、平成 23 年度から 26 年度までの 4 年間にわたり多くの検討を実施してきた。

廃棄体を回収するための緩衝材除去システムの開発（地下環境において、実規模で行う回収技術の実証試験に必要となる装置の開発）については、例えば、塩水リユース設備の開発では、地下環境で連続的な給水を必要とせず、一定量の塩水を循環させることにより緩衝材が除去できることの実証や、緩衝材除去システムを操作するために必要となる緩衝材除去形状の把握について、遠隔操作室にて計測が可能な 3D カメラを用いた観測システムの開発など、一定の技術開発成果を上げることができたものとする。反面、装置の規模などについては、実際の地下環境では、例えば換気設備や、給排水設備が坑道内に設置されていることを考慮すると、塩水リユース設備や塩水噴射設備のコンパクト化や、限られた坑道空間で廃棄体を効率的に引き上げる方法の検討など、一部について課題の残る結果となった。

地下環境での実証試験計画においては、第 2 次取りまとめに示される処分坑道を対象として、地下環境に係わる調査を進める中、わが国の現状では、実証試験の対象となる既存坑道が存在する見通しが得られそうにないことがわかった。そのため、現状の地層処分研究施設を例として、既設の坑道を拡張して実証試験を実施する方法、新たに坑道を建設して実証試験を実施する方法などを提示した。また、既存坑道を利用する場合、開発した装置を搬入出するために、組み立てや解体するスペースが必要であり、その断面形状について検討し、支保工等の基本設計を取りまとめ、実証試験計画を具現化した。

また、処分施設における回収維持期間の検討に関しては、一定期間坑道を埋め戻さないとした場合について、処分施設に及ぼす影響を把握するため、作業段階における代表的な人工バリアの状態を設定し、主な影響因子による影響の程度を定量的に把握し、回収維持期間について試行するとともにその状態における維持管理方策を取りまとめた。

これらは、人工バリア性能に及ぼす影響の程度の把握のみならず、処分概念における各定置方式の代表的な状態について、熱的影響、力学的影響、水理学的影響、化学的影響の因子ごとに整理しているため、着目する事象と維持管理方策の今後の検討において、「作業のどの段階か」「処分施設のどの場所か」「どのような手順か」を予見する上で有効に活用できるものとする。

今後は、本事業で抽出された課題の解決、多様な処分概念における回収技術の整備に向けて、さらなる検討の実施が必要と考えられるが、本事業で得られた成果がその基礎となり、有効に活用されることを期待する。

<別紙>

外部発表リスト（塩水利用による回収技術関係）

■原子力学会発表

| 発表件名                                                                                                                                      | 著者所属<br>(○は発表者)                      | 発表先              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------|
| 平成 19 年度                                                                                                                                  |                                      |                  |
| 塩水を利用した緩衝材除去方法の検討(1)<br>－浸漬分解実験および沈降実験－                                                                                                   | 岩佐健吾、○石井卓、中島均、澤田正雄、青木孝、齋藤亮           | 2007 年秋の大会 J37   |
| 塩水を利用した緩衝材除去方法の検討(2)<br>－塩水噴射実験－                                                                                                          | 岩佐健吾、石井卓、○中島均、澤田正雄、青木孝、齋藤亮           | 2007 年秋の大会 J38   |
| 平成20年度                                                                                                                                    |                                      |                  |
| 塩水を利用した緩衝材除去方法の検討(3)<br>－CaCl <sub>2</sub> 溶液による浸漬分解実験および沈降実験－                                                                            | 岩佐健吾、張至鎬、○石井卓、沖原光信                   | 2008年秋の大会M32     |
| 塩水を利用した緩衝材除去方法の検討(5)<br>－小規模模擬緩衝材の除去実験（不飽和条件）                                                                                             | ○張至鎬、岩佐健吾、石井卓、沖原光信                   | 2008 年秋の大会 M33   |
| 平成 21 年度                                                                                                                                  |                                      |                  |
| 塩水を利用した緩衝材除去方法の検討(6)<br>－小規模模擬緩衝材の除去実験（飽和条件）                                                                                              | ○張至鎬、石井卓、沖原光信、戸栗智仁、岩佐健吾、齋藤亮          | 2009 年秋の大会 M15   |
| Propagation Behaviour of General and Localised Corrosion of Carbon Steel in Simulated Groundwater under Aerobic Environmental Conditions. | ○石井卓、張至鎬、沖原光信、戸栗智仁、岩佐健吾、齋藤亮          | 2009 年秋の大会 M16   |
| 廃棄体回収に関わる塩水を利用した緩衝材の分解除去方法の検討                                                                                                             | ○岩佐健吾、石井卓、張至鎬、沖原光信、齋藤亮、鈴木啓三          | 原子力バックエンド研究 技術報告 |
| 平成 22 年度                                                                                                                                  |                                      |                  |
| 塩水を利用した緩衝材除去方法の検討(7)<br>－緩衝材除去の効率化の検討（不飽和条件）                                                                                              | ○中島均、朝野英一、張至鎬、石井卓、沖原光信、戸栗智仁、齋藤亮      | 2010 年秋の大会 C39   |
| 塩水を利用した緩衝材除去方法の検討(8)<br>－緩衝材除去の効率化の検討（飽和条件）                                                                                               | ○張至鎬、石井卓、沖原光信、戸栗智仁、齋藤亮、中島均、朝野英一      | 2010 年秋の大会 C40   |
| 塩水を利用した緩衝材除去方法の検討(9)<br>－エア－噴射法の適用性－                                                                                                      | ○石井卓、戸栗智仁、張至鎬、沖原光信                   | 2010 年秋の大会 C41   |
| 平成 23 年度                                                                                                                                  |                                      |                  |
| 塩水を利用した緩衝材除去方法の検討(10)<br>実規模スケール緩衝材除去試験その 1                                                                                               | ○矢萩良二、菱岡宗介、朝野英一、張至鎬、石井卓、中島均、齋藤亮、篠原康寛 | 2011 年秋の大会 B27   |
| 塩水を利用した緩衝材除去方法の検討(11)<br>実規模スケール緩衝材除去試験その 2                                                                                               | ○張至鎬、石井卓、中島均、齋藤亮、篠原康寛、矢萩良二、菱岡宗介、朝野英一 | 2011 年秋の大会 B28   |
| 塩水を利用した緩衝材除去方法の検討(12)<br>除去した緩衝材から生じた塩水スラリーの脱水減容方法の試み                                                                                     | ○石井卓、張至鎬、中島均、戸栗智仁                    | 2011 年秋の大会 B29   |



# ■土木学会発表等

| 発表件名                    | 著者所属<br>(○は発表者)                        | 発表先                                     |
|-------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|
| 平成 22 年度                |                                        |                                         |
| 廃棄体回収のための塩水を利用した緩衝材除去技術 | ○中島均, 朝野英一,<br>張至鎬, 沖原光信,<br>戸栗智仁, 石井卓 | 第 65 回年次学術講演会<br>(平成 22 年 9 月) CS7-032  |
| 平成 24 年度                |                                        |                                         |
| 塩水で飽和した緩衝材の除去特性         | ○中島均, 石井卓, 齊<br>藤亮, 戸栗智仁               | 第 67 回年次学術講演会<br>(平成 24 年 9 月) CS13-044 |

# ■ISEM

| 発表件名                                                                                                                                                                                   | 著者所属<br>(○は発表者)                                                                                                        | 発表先                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 平成 22 年度                                                                                                                                                                               |                                                                                                                        |                                                                |
| DESIGN OPTIONS FOR HLW<br>REPOSITORY OPERATION TECHNOLOGY,<br>(V)PRELIMINARY STUDY AND SMALL<br>SCALE EXPERIMENTS ON THE METHOD<br>OF REMOVAL OF BUFFER MATERIAL<br>WITH SALT SOLUTION | SatohitoTOGURI, Ji<br>hoJANG, KengoIWA<br>SA, HidekazuASAN<br>O, TakashSHII, Mits<br>unobuOKIHA, Hitos<br>hi NAKASHIMA | ICEM2010-40254(ICEM201<br>0, Oct.3-7, 2010,<br>Tsukuba, Japan) |