平成 31 年度

高レベル放射性廃棄物等の 地層処分に関する技術開発事業

地層処分施設閉鎖技術確証試験

報告書

令和2年3月

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 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、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業として、国立研究開発法 人日本原子力研究開発機構と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31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 「地層処分施設閉鎖技術確証試験」の事業報告書である。

| 1. | 緒言. | | 1 |
|------------------------------------|---|--|--|
| 1 | .1 | 本事業の背景と目的 | 1 |
| 1 | .2 | 本事業における研究開発、技術開発の全体フレーム | 2 |
| 1 | .3 | 本年度の実施概要 | |
| | 1.3.1 | 高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発 | |
| | 1.3.2 | 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備 | |
| 2. | 高レイ | ベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発-製作・施工 | 技術に係る |
| | 品質的 | 保証体系およびモニタリング技術の整備- | 6 |
| 2 | .1 | 品質保証および性能確認の手法や知見の体系化に資する基盤情報の整備 | 6 |
| | 2.1.1 | 背景および目的 | 6 |
| | 2.1.2 | 品質保証・性能確認プログラムの具体化に向けた調査研究の進め方 | 6 |
| | 2.1.3 | 諸外国のセーフティケースと性能評価の役割 | 6 |
| | 2.1.4 | 性能評価の入力情報取得の考え方 | |
| | 2.1.5 | 性能評価に資する取組の具体化に向けた考え方 | 13 |
| | 2.1.6 | わが国における品質保証・性能確認プログラムに関する研究開発課題 | 17 |
| 2 | .2 | 処分場構成要素の状態把握に係る関連ハード技術の高度化 | |
| | 2.2.1 | 背景および目的 | |
| | 2.2.2 | 新たなセンサ技術に関する開発動向の調査 | 19 |
| | 2.2.3 | 地下環境における無線伝送技術の実証試験 | 24 |
| | 2.2.4 | 地下環境における無線給電技術の高度化 | |
| | | | |
| 2 | .3 | まとめ | |
| 2 | .3 2.3.1 | まとめ 品質保証体系及び性能確認の手法や知見に資する基盤情報の整備 | |
| 2 | $ \begin{array}{c} 3 \\ 2.3.1 \\ 2.3.2 \end{array} $ | まとめ 品質保証体系及び性能確認の手法や知見に資する基盤情報の整備 処分場構成要素の状態把握に係る関連ハード技術の高度化 | |
| 2 3. | .3 2.3.1 2.3.2 処分均 | まとめ | 42 42 42 42 術の整備- |
| 2 3. | .3 2.3.1 2.3.2 処分均 | まとめ | 42 42 42 術の整備- 45 |
| 2 3. | .3 2.3.1 2.3.2 処分均 | まとめ 品質保証体系及び性能確認の手法や知見に資する基盤情報の整備 処分場構成要素の状態把握に係る関連ハード技術の高度化 易閉鎖後の水みちを防止する技術の整備 –坑道シーリングの設計・評価技 シーリングシステム長期性能評価技術開発 | 42 42 42 術の整備- 45 45 |
| 2 3. | .3 2.3.1 2.3.2 処分均 .1 3.1.1 | まとめ 品質保証体系及び性能確認の手法や知見に資する基盤情報の整備 処分場構成要素の状態把握に係る関連ハード技術の高度化 湯閉鎖後の水みちを防止する技術の整備 一坑道シーリングの設計・評価技 シーリングシステム長期性能評価技術開発 背景・目的・研究アプローチ | 42 42 42 術の整備- 45 45 45 |
| 2 3. 3 | .3 2.3.1 2.3.2 処分均 3.1.1 3.1.1 | まとめ | 42 42 42 術の整備- 45 45 45 45 47 |
| 2 3. 3 | .3 2.3.1 2.3.2 処分均 3.1.1 3.1.1 3.1.2 3.1.3 | まとめ 品質保証体系及び性能確認の手法や知見に資する基盤情報の整備 処分場構成要素の状態把握に係る関連ハード技術の高度化 易閉鎖後の水みちを防止する技術の整備 -坑道シーリングの設計・評価技 シーリングシステム長期性能評価技術開発 背景・目的・研究アプローチ 実施概要 シナリオ解析 | 42 42 術の整備- 45 45 45 47 47 |
| 2 3. 3 | .3 2.3.1 2.3.2 処分す 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 | まとめ 品質保証体系及び性能確認の手法や知見に資する基盤情報の整備 | 42 42 術の整備- 45 45 45 45 47 平価 100 |
| 2 3. | 5.3 2.3.1 2.3.2 处分均 5.1 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 3.1.5 | まとめ 品質保証体系及び性能確認の手法や知見に資する基盤情報の整備 | 42 42 術の整備- 45 45 45 45 47 47 評価 100 119 |
| 2 3. 3 | .3 2.3.1 2.3.2 処分均 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 3.1.5 3.1.6 | まとめ 品質保証体系及び性能確認の手法や知見に資する基盤情報の整備 | 42 42 42 術の整備- 45 45 45 45 47 平価 … 100 119 146 |
| 2 3. 3 | 2.3.1 2.3.2 処分均 3.1 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 3.1.5 3.1.6 2.2 | まとめ 品質保証体系及び性能確認の手法や知見に資する基盤情報の整備 | 42 42 術の整備- 45 45 45 45 47 評価 … 100 119 146 148 |
| 2 3. 3 | 5.3 2.3.1 2.3.2 処分均 5.1 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 3.1.5 3.1.6 2.2 3.2.1 | まとめ 品質保証体系及び性能確認の手法や知見に資する基盤情報の整備 | 42 42 42 術の整備- 45 45 45 45 47 評価 … 100 119 146 148 148 |
| 2 3. 3 | 2.3.1 2.3.2 処分均 3.1 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 3.1.5 3.1.6 2 3.2.1 3.2.2 | まとめ 品質保証体系及び性能確認の手法や知見に資する基盤情報の整備 | ・・・・42 ・・・・・42 ・・・・・42 術の整備ー ・・・・・45 ・・・・・45 ・・・・・45 ・・・・・45 ・・・・・45 ・・・・・47 評価・・・100 ・・・・119 ・・・・148 ・・・・・148 ・・・・・148 |
| 2 3. 3 3 | .3 2.3.1 2.3.2 処分均 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 3.1.5 3.1.6 3.2 3.2.1 3.2.2 处分均 | まとめ | ・・・・42 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ |
| 2 3. 3 4. | .3 2.3.1 2.3.2 处分均 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 3.1.5 3.1.6 .2 3.2.1 3.2.2 处分均 | まとめ 品質保証体系及び性能確認の手法や知見に資する基盤情報の整備 | ・・・・42 ・・・・・42 ・・・・・42 術の整備ー ・・・・・45 ・・・・・45 ・・・・・45 ・・・・・45 ・・・・・45 ・・・・・45 ・・・・・47 評価・・・100 ・・・・・119 ・・・・・148 ・・・・・148 ・・・・・148 ・・・・・・・・・・・・ |
| 2 3. 3 4. 4 | 5.3 2.3.1 2.3.2 处分均 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 3.1.5 3.1.6 5.2 3.2.1 3.2.2 处分均 1 4.1.1 | まとめ 品質保証体系及び性能確認の手法や知見に資する基盤情報の整備 | ・・・・42 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ |
| 2 3. 3 3. 3 4. 4 | .3 2.3.1 2.3.2 处分均 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 3.1.5 3.1.6 3.2.1 3.2.2 处分均 1 4.1.1 4.1.2 | まとめ 品質保証体系及び性能確認の手法や知見に資する基盤情報の整備 | ・・・・42 ・・・・・42 術の整備ー ・・・・・45 ・・・・・45 ・・・・・45 ・・・・・45 ・・・・・45 ・・・・・45 ・・・・・45 ・・・・・47 評価・・・100 ・・・・・100 ・・・・・119 ・・・・・148 ・・・・・148 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ |

| | 4.1.4 | 緩衝材の膨潤挙動に対する化学的な事象の抽出・整理 | 232 |
|----|--------|-------------------------------------|------|
| | 4.1.5 | まとめと今後の課題 | 236 |
| 2 | 4.2 | EDZ シーリング試験 | 238 |
| | 4.2.1 | 試験の概要 | 238 |
| | 4.2.2 | ベントナイト系材料の選定 | 239 |
| | 4.2.3 | EDZ シーリング試験の施工 | 244 |
| | 4.2.4 | 透水試験 | 253 |
| | 4.2.5 | 浸透流解析による粘土止水壁の透水性評価 | 260 |
| | 4.2.6 | まとめ | 265 |
| 2 | 4.3 | 掘削影響領域の連続性等に関する調査(弾性波・比抵抗トモグラフィ調査) | 267 |
| | 4.3.1 | 調査の概要 | 267 |
| | 4.3.2 | 調査用ボーリング孔の掘削 | 268 |
| | 4.3.3 | ポストグラウト | 270 |
| | 4.3.4 | 孔曲がり測定と座標変換 | 272 |
| | 4.3.5 | BTV 観察 | 275 |
| | 4.3.6 | 弾性波トモグラフィ調査 | 277 |
| | 4.3.7 | S波トモグラフィ調査 | 287 |
| | 4.3.8 | 比抵抗トモグラフィ調査 | 289 |
| | 4.3.9 | 検層 | 295 |
| | 4.3.10 |) 室内試験 | 299 |
| | 4.3.1 | 1 掘削影響領域の連続性の調査手法 | 309 |
| | 4.3.12 | 2 まとめと今後の課題 | 310 |
| 5. | 処分類 | 易閉鎖後の水みちを防止する技術の整備-坑道シーリングに関わる施工技術の | >整備- |
| | | | 313 |
| Ę | 5.1 | 小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験(事後調査) | 313 |
| | 5.1.1 | 埋め戻し領域からの埋め戻し材のサンプリングおよび室内物性試験 | 313 |
| | 5.1.2 | 施工中・施工後のモニタリング | 416 |
| Ę | 5.2 | 埋め戻し材の特性を踏まえた施工オプションの整備 | 430 |
| | 5.2.1 | 課題設定の考え方および目的 | 430 |
| | 5.2.2 | 埋め戻し材の材料特性データの整備 | 432 |
| | 5.2.3 | 埋め戻し材の小規模施工試験 | 446 |
| | 5.2.4 | 埋め戻し材の施工概念の検討 | 466 |
| | 5.2.5 | 実寸大模擬坑道の整備 | 475 |
| | 5.2.6 | 埋め戻し材の浸潤挙動の予測 | 481 |
| | 5.2.7 | まとめ | 486 |
| 6. | 結言. | | 489 |
| (| 6.1 | 平成 31 年度の主な成果 | 489 |
| (| 3.2 | 本事業の主な成果 | 490 |
| (| 6.3 | おわりに | 496 |
| | | | |

図目次

| 义 | 1.2 - 1 | 本事業の到達目標と進め方 | 2 |
|---|----------------|--------------------------------------|-----------|
| 义 | 2.1 - 1 | Posiva が取りまとめたセーフティケースの構成と性能評価の概要 | 9 |
| 义 | 2.1 - 2 | SKB が取りまとめたセーフティケースの構成と性能評価の概要 | 9 |
| 义 | 2.1 - 3 | 諸外国における性能評価に資する取組 | 12 |
| 义 | 2.1-4 | 性能評価に資する情報を取得する取組 | 13 |
| 义 | 2.1-5 | 2つのプログラムの具体化に向けた本検討の対象範囲 | 14 |
| 义 | 2.1-6 | フィンランドにおける処分坑道埋め戻し材の製造・施工プロセス管理手法の概要 | 15 |
| 义 | 2.1-7 | 性能確認プログラムの具体化の方向性とトレードオフの関係 | 17 |
| 义 | 2.2-1 | センサ部の範囲による光ファイバセンサの分類 | 20 |
| 义 | 2.2-2 | 散乱光のスペクトルと計測対象 | 21 |
| 义 | 2.2-3 | OTDR による計測のイメージ | 22 |
| 义 | 2.2-4 | 地中無線送信装置の設置位置(全体図) | 25 |
| 义 | 2.2-5 | 地中無線送信装置の設置位置(A-A 断面) | 25 |
| 义 | 2.2-6 | 地中無線送信装置の設置位置(C-C および D-D 断面) | 26 |
| 义 | 2.2-7 | 測定データ 002 局(間隙水圧) | 27 |
| 义 | 2.2-8 | 測定データ 004 局(間隙水圧) | 27 |
| 义 | 2.2-9 | 流量増加・減少時における間隙水圧データ | 28 |
| 义 | 2.2-10 | 流量増加・減少時における土圧データ | 28 |
| 义 | 2.2-11 | 大型送信アンテナを接続した中継装置による無線伝送概念 | 29 |
| 义 | 2.2 - 12 | 送受電コイル1:1の磁界共振結合(S-S)の等価回路 | 32 |
| 义 | 2.2 - 13 | 15 巻きの送受電コイル | 32 |
| 义 | 2.2 - 14 | 受電コイル側の抵抗値と給電効率の関係 | 33 |
| 义 | 2.2 - 15 | 試験装置の詳細構成 | 33 |
| 义 | 2.2 - 16 | 電源部(左:定電圧電源、右:インバーター) | 34 |
| 义 | $2.2 \cdot 17$ | 送電部(左:共振用のコンデンサ、右:送電コイル) | 34 |
| 义 | 2.2-18 | 受電部(左:送電コイル、右:共振用のコンデンサ) | 34 |
| 义 | 2.2 - 19 | 変換部(左)と定電流定電圧回路(右) | 35 |
| 义 | 2.2-20 | リチウムイオン電池 | 35 |
| 义 | 2.2-21 | 電子負荷を利用した試験と測定箇所 | 36 |
| 义 | 2.2-22 | 電子負荷の抵抗と給電効率の関係 | 36 |
| 义 | 2.2-23 | コイル間の給電効率における理論値と試験結果の比較 | 37 |
| 义 | 2.2-24 | バッテリーへの充電確認における測定箇所 | 37 |
| 义 | 2.2-25 | バッテリーへの充電確認の室内試験状況 | 38 |
| 义 | 2.2-26 | バッテリー電圧と電流の経時変化 | 38 |
| 义 | 2.2-27 | コイルの概要 | 39 |
| 义 | 2.2-28 | 試験装置の概要(保護層の厚さ 15 mm) | 39 |
| 义 | 2.2-29 | 充填材の厚さ5mmのコイルの測定状況(左:媒体無し、右:媒体中) | 40 |
| 义 | 2.2-30 | コイル周辺の媒体の影響 | 41 |
| 义 | 3.1-1 | 処分場の設計フロー | 46 |
| 义 | 3.1 - 2 | シーリングシステムが卓越した移行経路となりうる構造・要因 | 46 |
| 义 | 3.1-3 | シーリングシステムの機能喪失時の流動パターン | 53 |
| 义 | 3.1-4 | FTA 分析による各影響モードの発生要因の抽出 | 56 |

図 3.1-5 各影響モードの発生に関係する FEP の抽出・スクリーニング(ベントナイト) 57 図 3.1-6 各影響モードの発生に関係する FEP の抽出・スクリーニング(コンクリート) 58 図 3.1-8 各影響モードの発生に関係する FEP の抽出・スクリーニング(地下水流動(サイトス 図 3.1-10 インフルエンスダイアグラム (コンクリート (吹付け、支保、力学プラグ))62 図 3.1-14 処分坑道を初期位置とした流線分布(左図:透水係数分布、中央・右図:流線分布) 図 3.1-15 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(亀裂性媒体)(上段:レファ 図 3.1-16 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(均質連続体)(上段:レファ 図 3.1-17 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:新第三紀堆積岩(亀裂性媒体)(上段: 図 3.1-18 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(亀裂状媒体)(上段)レファレ 図 3.1-19 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(均質連続体)(上段)レファレ 図 3.1-20 透水係数分布:立坑と断層(透水量係数 1.0×10⁻⁴[m²/s])の交差影響ケース(左はレフ 図 3.1-21 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(亀裂状媒体) 立坑と断層(透 水量係数 1.0×10⁻⁴[m²/s])の交差影響ケース......75 図 3.1-25 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(亀裂状媒体) 上段:施設劣 化のみ(上流側立坑はない)のケース)79 図 3.1-26 ストーリーボード:基本シナリオ(初期状態)81 図 3.1-28 図 3.1-31 図 3.1-33 ストーリーボード:変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)劣化・変質状態...........96 図 3.1-34 シナリオ別インフルエンスダイアグラム (ベントナイト (埋戻し材、止水プラグ)) 図 3.1-35 シナリオ別インフルエンスダイアグラム(コンクリート(吹付け、支保、力学プラグ))

| 义 | 3.1 - 36 | シナリオ別インフルエンスダイアグラム(EDZ:硬岩系) | 98 |
|---|----------------|--|-----|
| 义 | 3.1 - 37 | シナリオ別インフルエンスダイアグラム(EDZ:軟岩系) | 99 |
| 义 | 3.1-38 | シナリオ別インフルエンスダイアグラム(地下水流動(サイトスケール)) | 99 |
| 义 | 3.1-39 | 新第三紀堆積岩のモデル形状と有限要素分割1 | 02 |
| 叉 | 3.1-40 | 深成岩 HLW のモデル形状と領域分割1 | .03 |
| 义 | 3.1-41 | 新第三紀堆積岩リファレンスケースにおける圧力水頭分布1 | 04 |
| 义 | 3.1-42 | 新第三紀堆積岩リファレンスケースにおける粒子軌跡1 | .04 |
| 叉 | 3.1-43 | 深成岩リファレンスケースにおける圧力水頭分布1 | .05 |
| 义 | 3.1-44 | 深成岩リファレンスケースにおける粒子軌跡1 | .05 |
| 义 | 3.1 - 45 | 新第三紀堆積岩のシーリング劣化ケースにおける圧力水頭分布1 | .06 |
| 义 | 3.1-46 | 新第三紀堆積岩のシーリング劣化ケースにおける粒子軌跡1 | 07 |
| 义 | 3.1 - 47 | 深成岩のシーリング劣化ケースにおける圧力水頭分布1 | 07 |
| 义 | 3.1-48 | 深成岩のシーリング劣化ケースにおける粒子軌跡1 | .08 |
| 义 | 3.1-49 | 解析体系1 | .09 |
| 义 | 3.1 - 50 | 新第三紀堆積岩における変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)の水理解析結果1 | 112 |
| 义 | $3.1 \cdot 51$ | 深成岩における変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)の水理解析結果1 | 13 |
| 义 | $3.1 \cdot 52$ | 新第三紀堆積岩の変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)の粒子軌跡及び岩盤に入る | 5位 |
| | 置の分 | 布(非収着性粒子)1 | 114 |
| 义 | $3.1 \cdot 53$ | 新第三紀堆積岩の変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)の粒子軌跡及び岩盤に入る | 5位 |
| | 置の分 | 布(Se) | 115 |
| 义 | $3.1 \cdot 54$ | 深成岩の変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)の粒子軌跡及び岩盤に入る位置の分 | 'n |
| | (非収 | 着性粒子)1 | 116 |
| 义 | $3.1 \cdot 55$ | 深成岩の変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)の粒子軌跡及び岩盤に入る位置の分 | }布 |
| | (Se) | | 117 |
| 义 | 3.1 - 56 | 深成岩の変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)の粒子軌跡及び岩盤に入る位置の分 | 'n |
| | (Cs) | | 18 |
| 义 | 3.1 - 57 | 本検討におけるボウタイ(Bowtie)分析の概念1 | 20 |
| 义 | 3.1 - 58 | 本研究の成果を踏まえたボウタイ分析1 | 22 |
| 义 | 3.1 - 59 | TRU 処分坑道を対象としたセメント系材料と緩衝材の相互作用の解析事例1 | 23 |
| 义 | 3.1-60 | コンクリート支保と2つの密度の埋戻し材を想定した2次元モデルのイメージ1 | 24 |
| 义 | 3.1-61 | ベントナイト緩衝材に用いられる透水係数の経験式1 | 25 |
| 义 | 3.1-62 | ブロック試料の浸漬液の pH 経時変化1 | .26 |
| 义 | 3.1-63 | 低アルカリセメント(HFSC)による緩衝材のセメント影響変質抑制効果の評価の |)— |
| | 例(上 | 段:1 万年後の鉱物組成図、下段:pH 分布の時間変遷) | 27 |
| 义 | 3.1-64 | トンネル試験装置1 | 29 |
| 义 | $3.1 \cdot 65$ | Test4 で水が破過した後の坑道の写真1 | 29 |
| 义 | 3.1-66 | トンネル試験における水の圧力の変化1 | 30 |
| 义 | 3.1-67 | アクセス坑道が排水域になり得る状況とそのイメージ及び回避方法1 | 31 |
| 义 | 3.1-68 | アクセス坑道が地下水排水域や涵養域となる場合の水理場と、アクセス坑道が排水 | 〈域 |
| | や涵養 | 域とはならないように適切なサイト選定を行った場合の現実的な水理場の比較 …1 | 33 |
| 义 | 3.1-69 | 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(亀裂性媒体)、アクセス坑道 | 包及 |
| | び地下 | 坑道埋め戻し材劣化ケース1 | 34 |
| 义 | 3.1-70 | アクセス坑道の地表面付近を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(亀裂性媒 | 体)、 |

| | アクセス坑道及び地下坑道埋め戻し材劣化ケース135 |
|-----|--|
| 义 | 3.1-71 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:新第三紀堆積岩(亀裂性媒体)、アクセ |
| | ス坑道及び地下坑道埋め戻し材劣化ケース136 |
| 义 | 3.1-72 アクセス坑道の地表面付近を初期位置とした地下水流動の流線:新第三紀堆積岩(亀 |
| | 裂性媒体)、アクセス坑道及び地下坑道埋め戻し材劣化ケース |
| 义 | 3.1-73 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(亀裂状媒体)(上)施設劣化、 |
| | 止水プラグなし (下)施設劣化、止水プラグ健全138 |
| 义 | 3.1-74 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(均質連続体)(上)施設劣化、 |
| | 止水プラグなし (下) 施設劣化、止水プラグ健全139 |
| 义 | 3.1-75 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:新第三紀堆積岩(亀裂状媒体)(上)施 |
| | 設劣化、止水プラグなし (下) 施設劣化、止水プラグ健全139 |
| 义 | 3.1-76 バイパス路設置モデルの外観図140 |
| 义 | 3.1-77 アクセス坑道の地表面付近を初期位置とした地下水流動の流線:新第三紀堆積岩(亀 |
| | 裂性媒体)、アクセス坑道及び地下坑道埋め戻し材劣化ケース 左:バイパス路未設置、右: |
| | バイパス路設置141 |
| 义 | 3.1-78 処分坑道中央を初期位置とした地下水流動の流線:新第三紀堆積岩(亀裂性媒体)、ア |
| | クセス坑道及び地下坑道埋め戻し材劣化ケース 左:バイパス路未設置、右:バイパス路設置 |
| | |
| 义 | 3.1-79 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線 |
| 义 | 3.1-80 新第三紀堆積岩最上流側の廃棄体から移行する非収着性トレーサーの挙動(最上流側 |
| | 廃棄体)144 |
| 义 | 3.1-81 新第三紀堆積岩最下流側の廃棄体から移行する非収着性トレーサーの挙動(最下流側 |
| | 廃棄体)145 |
| 义 | 3.2-1 H17 取りまとめで示された既存の設計フロー148 |
| 义 | 3.2-2 平成 30 年度までの本事業成果および NUMO 包括的レポートで示された地下施設設 |
| | 計フローも加味した形で更新したシーリングシステム設計に関するフロー(図中右側) 153 |
| 义 | 3.2-3 プラグの設計に関する解析的検討の全体イメージ154 |
| 义 | 3.2-4 本検討の作業フロー155 |
| 义 | 3.2-5 2 次元鉛直断面モデル(構造)図155 |
| 义 | 3.2-6 止水プラグの構造(矩形型)157 |
| 図 | 3.2-7 数値モデル図(EDZの厚さ)160 |
| 凶 | 3.2-8 数値モデル図(断層・プラグ間の距離)160 |
| 凶 | 3.2-9 数値モデル図(ブラグ形状)161 |
| 凶 | 3.2-10 数値モデル図(矩形ブラグ/切り欠き深さ)161 |
| 凶 | 3.2-11 数値モデル図(ソロバン型ブラグ/切り欠き深さ) |
| 図 | 3.2-12 数値モアル図(フフク近傍の EDZ の連結性) |
| 区 | 3.2-13 月限要素メツンユ図の例(矩形型、EDZ 厚さ 1m) |
| 図 | 3.2-14 粒子の配直図(左: EDZ 厚さ I m、石: EDZ 厚さ 0.5 m) |
| 凶 | 3.2-15 松子か断層に到達するまでの止現化した移行時間の分布(解析ケース間の比較)(1) |
| 5 | |
| 凶 | 3.2-10 松士か町層に到達するよじの止規化した移行時间の分布(解析ゲース间の比較)(2) |
| চন | 167 167 |
| 1XI | うなし 松士が岡壇に到達するよどの比規化した移住時間の分布(膵研クース間の比較)(3) |

| | ••••• | |
|--------------|----------|---|
| 义 | 3.2 - 18 | 粒子が断層に到達するまでの移行時間の分布(解析ケース間の比較)(4)169 |
| 义 | 3.2-19 | 粒子が断層に到達するまでの正規化した移行時間の分布(解析ケース間の比較)(5) |
| | | |
| 义 | 3.2-20 | 粒子が断層に到達するまでの正規化した移行時間の分布(解析ケース間の比較)(6) |
| | | |
| 図 | 3.2-21 | 粒子が断層に到達するまでの移行時間の分布(解析ケース間の比較)(7)172 |
| 図 | 3.2-22 | 粒子が断層に到達するまでの移行時間の分布(EDZ の厚さ)173 |
| 义 | 3.2-23 | 粒子の移行状況(EDZ の厚さ)174 |
| 义 | 3.2-24 | プラグ近傍の粒子の移行状況(EDZ の厚さ)175 |
| 図 | 3.2-25 | 粒子が断層に到達するまでの移行時間の分布(プラグ近傍の EDZ の連結性)176 |
| 図 | 3.2-26 | 粒子の移行状況(プラグ近傍の EDZ の連結性)177 |
| 义 | 3.2-27 | プラグ近傍の粒子の移行状況(プラグ近傍の EDZ の連結性) |
| 図 | 3.2-28 | 粒子が断層に到達するまでの移行時間の分布(プラグの厚さおよび断層までの距離) |
| | | |
| 汊 | 3.2-29 | 粒子の移行状況(プラグの厚さ)180 |
| 汊 | 3.2-30 | プラグ近傍の粒子の移行状況(プラグの厚さ)181 |
| <u></u> 図 | 3.2-31 | 粒子の移行状況(プラグと断層の離間距離)182 |
| <u></u> 図 | 3.2-32 | プラグ近傍の粒子の移行状況(プラグと断層の離間距離) |
| <u></u> 図 | 3.2-33 | 粒子が断層に到達するまでの移行時間の分布(プラグの形状) |
| <u></u> 図 | 3.2-34 | 粒子の移行状況(プラグの形状) |
| <u></u> 図 | 3.2-35 | プラグ近傍の粒子の移行状況(プラグの形状) |
| <u></u> 図 | 3.2-36 | 粒子が断層に到達するまでの移行時間の分布 (プラグの切欠深さ/矩形プラグ) |
| | | 187 |
| 汊 | 3.2-37 | 粒子の移行状況(プラグの切り欠き深さ)188 |
| 図 | 3.2-38 | プラグ近傍の粒子の移行状況(プラグの切り欠き深さ) |
| _ 図 | 3.2-39 | 粒子が断層に到達するまでの移行時間の分布(プラグの切欠深さ/ソロバン型プラグ) |
| | | 190 |
| 図 | 3.2-40 | 粒子の移行状況(硬岩系/プラグの切り欠き深さ/ソロバン型)191 |
| <u></u> 図 | 3.2-41 | プラグ近傍の粒子の移行状況(硬岩系/プラグの切り欠き深さ/ソロバン型)192 |
| 义 | 3.2-42 | 粒子の移行状況(軟岩系/プラグの切り欠き深さ/ソロバン型) |
| 図 | 3.2-43 | プラグ近傍の粒子の移行状況(軟岩系/プラグの切り欠き深さ/ソロバン型)194 |
| | 4.1-1 | 緩衝材の膨潤変形試験装置 |
| <u></u> 図 | 4.1-2 | 緩衝材の膨潤変形試験状況 |
| <u>义</u> | 4.1-3 | 上載荷重を変えた場合の膨潤変形試験結果 |
| <u></u> 図 | 4.1-4 | 供試体の高さを変えた場合の膨潤変形試験結果 |
| | 4.1-5 | 供試体の縦横比と最大膨潤変形率の関係 |
| 図 | 4.1-6 | 上載荷重ごとの膨潤変形試験結果まとめ |
| 図 | 4.1-7 | ※※新本式の※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%<!--</td--> |
| 図 | 4.1-8 | 膨潤圧試験の実施状況 205 |
| <u></u> 汊 | 4 1-9 | 緩衝材の膨潤圧の経時変化 906 |
| <u>図</u> | 4.1-10 | 縦横比と最大膨潤圧の関係 |
| | 4 1-11 | 埋め戸し材の膨潤変形装置 907 |
| н Ц | | |

| 义 | 4.1 - 12 | 埋め戻し材の材料(左・中央:掘削ズリ、右:クニゲル V1) | . 207 |
|---|----------|-------------------------------|-------|
| 义 | 4.1-13 | 埋め戻し材の膨潤変形試験結果 | . 208 |
| 义 | 4.1-14 | 埋め戻し材の上載荷重と最大膨潤変形率の関係 | . 209 |
| 义 | 4.1-15 | 埋め戻し材の膨潤圧試験装置 | . 210 |
| 义 | 4.1-16 | 埋め戻し材の膨潤圧の経時変化 | . 210 |
| 义 | 4.1-17 | 埋め戻し材の縦横比と最大膨潤圧の関係 | .211 |
| 义 | 4.1-18 | 人工バリア性能確認試験 | .213 |
| 义 | 4.1-19 | 緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用 | .213 |
| 义 | 4.1-20 | 縮尺模型と計測装置の概要図 | .214 |
| 义 | 4.1-21 | 縮尺模型の作製手順 | .214 |
| 义 | 4.1-22 | 埋め戻し材の作製状況 | .215 |
| 义 | 4.1-23 | 緩衝材と埋め戻し材境界面の計測器設置状況 | .215 |
| 义 | 4.1-24 | 緩衝材の作製状況 | . 216 |
| 义 | 4.1-25 | 試験装置の組み立て作業状況 | . 216 |
| 义 | 4.1-26 | 縮尺模型試験における膨潤変形率と注水量の経時変化 | .217 |
| 义 | 4.1-27 | 緩衝材の分割図 | . 218 |
| 义 | 4.1-28 | 緩衝材内の含水比分布 | . 218 |
| 义 | 4.1-29 | 埋め戻し材の分割図 | . 219 |
| 义 | 4.1-30 | 土圧計とロードセルの設置状況 | . 220 |
| 义 | 4.1-31 | 側面土圧の計測結果 | . 220 |
| 义 | 4.1-32 | 底面土圧の計測結果 | . 221 |
| 义 | 4.1-33 | ひずみゲージの設置状況 | . 222 |
| 义 | 4.1-34 | 曲げひずみの経時変化 | . 222 |
| 义 | 4.1-35 | ひずみゲージの推定形状 | . 223 |
| 义 | 4.1-36 | リン青銅板の設置位置 | . 223 |
| 义 | 4.1-37 | リン青銅板の計測結果 | . 224 |
| 义 | 4.1-38 | 解析モデルおよび境界条件 | . 228 |
| 义 | 4.1-39 | 膨潤変形解析と縮尺模型試験の結果比較 | . 229 |
| 义 | 4.1-40 | 飽和度コンター図 | . 230 |
| 义 | 4.1-41 | 含水比の抽出点 | . 231 |
| 义 | 4.1 - 42 | 含水比の比較 | .231 |
| 义 | 4.2-1 | EDZ シーリング試験の概念図 | . 238 |
| 义 | 4.2-2 | 本年度の実施内容の全体概要 | . 239 |
| 义 | 4.2-3 | 透水試験の試験状況 | . 240 |
| 义 | 4.2-4 | 透水係数と経過時間の関係 | .241 |
| 义 | 4.2-5 | 有効粘土密度と透水係数の関係 | . 242 |
| 义 | 4.2-6 | ズリ層の撤去手順 | .245 |
| 义 | 4.2-7 | 底盤コンクリートの撤去作業状況 | . 246 |
| 义 | 4.2-8 | ズリ撤去作業の状況 | .247 |
| 义 | 4.2-9 | コンクリートの再打設作業の状況 | . 248 |
| 义 | 4.2-10 | 粘土止水壁施工の概念図 | . 249 |
| 义 | 4.2-11 | スリット掘削の作業状況 | .250 |
| 义 | 4.2 - 12 | スリットの削孔深度検尺結果 | .251 |

| 义 | 4.2-13 | 止水壁施工の作業状況 | 253 |
|---|----------|----------------------------------|-----|
| 义 | 4.2-14 | 透水試験の概念図 | 254 |
| 义 | 4.2-15 | EDZ-1 孔 孔壁展開画像 | 255 |
| 义 | 4.2-16 | 定流量注水試験の装置構成図 | 256 |
| 义 | 4.2 - 17 | 定流注水試験結果 | 257 |
| 义 | 4.2-18 | Cooper-Jacob 法による非定常解析 | 257 |
| 义 | 4.2 - 19 | 定圧注水試験の装置構成図 | 258 |
| 义 | 4.2-20 | 定圧注水試験結果 | 258 |
| 义 | 4.2-21 | Jacob-Lohman 法による非定常解析 | 259 |
| 义 | 4.2-22 | 定圧注水試験時の流量と圧力の経時変化 | 259 |
| 义 | 4.2 - 23 | 注水の影響範囲の広がりイメージ図 | 259 |
| 义 | 4.2 - 24 | 浸透流解析モデル | 261 |
| 义 | 4.2 - 25 | 透水係数の推定方法のイメージ図 | 262 |
| 义 | 4.2-26 | 透水試験1および透水試験2を再現するズリ・EDZの透水係数の関係 | 263 |
| 义 | 4.2-27 | 透水試験3の浸透流解析モデル | 264 |
| 义 | 4.3-1 | 調査の実施期間 | 268 |
| 义 | 4.3-2 | 新規ボーリング孔位置図 | 269 |
| 义 | 4.3-3 | ボーリング削孔状況 | 269 |
| 义 | 4.3-4 | グラウト注入図 | 271 |
| 义 | 4.3-5 | グラウト区間と注入量のイメージ | 272 |
| 义 | 4.3-6 | 孔曲がり測定結果 | 273 |
| 义 | 4.3-7 | 測点座標の変換グラフ | 274 |
| 义 | 4.3-8 | 座標変換の概念図 | 275 |
| 义 | 4.3-9 | ヘアクラックの例(注入前、深度 13m 付近) | 276 |
| 义 | 4.3-10 | 気泡による S4-2 孔のノイズ | 277 |
| 义 | 4.3-11 | 弾性波トモグラフィ概念図 | 278 |
| 义 | 4.3-12 | 弾性波トモグラフィの測点図 | 280 |
| 义 | 4.3-13 | 三次元断面のイメージ | 280 |
| 义 | 4.3-14 | 解析フロー図 | 281 |
| 义 | 4.3-15 | 弾性波の伝播経路 | 282 |
| 义 | 4.3-16 | 坑道壁データを含む弾性波速度の分布断面図 | 284 |
| 义 | 4.3-17 | 坑道壁データを含まない弾性波速度の分布断面図 | 285 |
| 図 | 4.3-18 | 坑道壁間の弾性波速度の分布図 | 286 |
| 义 | 4.3-19 | S 波震源の仕様 | 287 |
| 义 | 4.3-20 | S 波速度の分布図 | 288 |
| 义 | 4.3-21 | 測定概念図 | 289 |
| 义 | 4.3-22 | 電気探査装置 | 289 |
| 义 | 4.3-23 | 電気探査の側転配置図 | 290 |
| 义 | 4.3-24 | 解析フローチャート | 291 |
| 义 | 4.3-25 | ボーリング孔間の比抵抗分布図 | 293 |
| 义 | 4.3-26 | 坑道壁間の比抵抗分布図 | 294 |
| 义 | 4.3-27 | 電気検層概念図 | 295 |
| 义 | 4.3-28 | 孔内用多連電極ケーブル | 295 |

| 凶 | 4.3 - 29 | 電気検層の測定状況 | |
|---|----------------|---------------------------------|-----|
| 义 | 4.3-30 | 速度検層の概念図 | |
| 义 | 4.3 - 31 | 測定プローブ | |
| 义 | 4.3 - 32 | P S 検層の測定状況 | |
| 义 | 4.3-33 | 電気検層・速度検層の結果図 | |
| 义 | 4.3-34 | コアの真空脱気の状況 | |
| 义 | 4.3-35 | 超音波速度測定の測定概念図 | 300 |
| 义 | 4.3-36 | 弾性波速度の試験状況 | |
| 义 | 4.3-37 | コアの弾性波速度図 | 302 |
| 义 | 4.3-38 | グラウト材の弾性波速度図 | 303 |
| 义 | 4.3-39 | グラウト材+コアの模式図 | |
| 义 | 4.3-40 | グラウト材+コアの比抵抗図 | |
| 义 | 4.3-41 | 比抵抗試験の模式図 | 305 |
| 义 | 4.3-42 | 比抵抗試験の状況 | 305 |
| 义 | 4.3-43 | ボーリングコアの比抵抗図 | 306 |
| 义 | 4.3-44 | ボーリングコアとグラウト材の比抵抗図 | |
| 义 | 4.3-45 | グラウト材+コアの模式図 | |
| 义 | 4.3-46 | グラウト材+コアの比抵抗 | |
| 义 | 4.3-47 | トモグラフィ断面の比較 | |
| 义 | 4.3-48 | 三次元の解析例 | |
| 义 | $5.1 \cdot 1$ | サンプリング位置縦断面図 | |
| 义 | 5.1-2 | サンプリング位置正面図 | |
| 义 | 5.1^{-3} | サンプリング位置 | |
| 义 | 5.1-4 | 資機材搬入状況 | |
| 义 | 5.1^{-5} | No.1 孔試錐機設置状況 | |
| 义 | 5.1-6 | サンプリング資機材等設置平面図 | |
| 义 | 5.1-7 | 資機材配置状況 | |
| 义 | 5.1-8 | アクセス南坑道設備横坑の分電盤 | |
| 义 | 5.1 - 9 | サンプリング前の土留め壁の状況 | |
| 义 | 5.1 - 10 | 土留め壁の切削 | |
| 义 | $5.1 \cdot 11$ | ロータリー式ボーリングマシンの原理と概要(水平ボーリング) | |
| 义 | 5.1 - 12 | 固定ピストン式シンウォールサンプラーによる乱れの少ない試料採取 | |
| 义 | $5.1 \cdot 13$ | エキステンションロッド式サンプラーの押込み方法(鉛直孔の例) | |
| 义 | $5.1 \cdot 14$ | サンプリング状況(No.2) | |
| 义 | $5.1 \cdot 15$ | 回収直後の試料(No.4) | |
| 义 | $5.1 \cdot 16$ | 車両での試料搬送(No.1,2) | 320 |
| 义 | $5.1 \cdot 17$ | サンプリング後の孔口状況 | |
| 义 | 5.1 - 18 | 室内試験実施箇所模式図と数量 | 322 |
| 义 | 5.1 - 19 | 搬入試料 | 322 |
| 义 | 5.1 - 20 | サンプラーからの押出し | |
| 义 | 5.1 - 21 | マイターボックスによる端面成形 | 327 |
| 义 | 5.1 - 22 | 供試体の寸法・重量測定 | |
| 义 | 5.1 - 23 | 供試体の作製・充填材注入 | |

| 义 | 5.1 - 24 | 供試体組立て | 328 |
|---|----------------|-------------------------------------|-----|
| 义 | 5.1 - 25 | 測定管への接続 | 328 |
| 义 | 5.1 - 26 | 透水係数測定 | 329 |
| 义 | 5.1 - 27 | 変水位法概念図 | 329 |
| 义 | 5.1 - 28 | 昨年度の施工試験時の室内試験と今年度の詳細調査におけるサンプリング位置 | しの比 |
| | 較 | | 331 |
| 义 | 5.1 - 29 | No.1 採取試料の室内試験位置 | 332 |
| 义 | $5.1 \cdot 30$ | No.2 採取試料の室内試験位置 | 333 |
| 义 | $5.1 \cdot 31$ | No.3 採取試料の室内試験位置 | 334 |
| 义 | 5.1 - 32 | No.4 採取試料の室内試験位置 | 335 |
| 义 | $5.1 \cdot 33$ | サンプリング孔位置図 | 337 |
| 义 | $5.1 \cdot 34$ | 乾燥密度および含水比の分布(全体) | 337 |
| 义 | 5.1 - 35 | 含水比 - 乾燥密度関係(全体) | 337 |
| 义 | 5.1 - 36 | サンプリング孔位置図 | 340 |
| 义 | 5.1 - 37 | No.1:乾燥密度・含水比の度数分布 | 340 |
| 义 | $5.1 \cdot 38$ | No.1:水平深度 - 乾燥密度・含水比関係 | 341 |
| 义 | 5.1 - 39 | No.1:含水比 - 乾燥密度関係 | 341 |
| 义 | 5.1-40 | サンプリング孔位置図 | 342 |
| 义 | 5.1-41 | No.2: 乾燥密度および含水比の度数分布 | 342 |
| 义 | 5.1 - 42 | No.2:水平深度 - 乾燥密度・含水比関係 | 343 |
| 义 | 5.1 - 43 | No.2:含水比 - ·乾燥密度関係 | 343 |
| 义 | 5.1 - 44 | サンプリング孔位置図 | 344 |
| 义 | 5.1 - 45 | No.3: 乾燥密度および含水比の分布 | 344 |
| 义 | $5.1 \cdot 46$ | No.3:水平深度 - 乾燥密度・含水比関係 | 345 |
| 义 | 5.1-47 | No.3: 含水比 - 乾燥密度関係 | 345 |
| 义 | 5.1-48 | サンプリング孔位置図 | 346 |
| 义 | 5.1 - 49 | No.4: 乾燥密度および含水比の分布 | 346 |
| 义 | 5.1 - 50 | No.4:水平深度 - 乾燥密度・含水比関係 | 347 |
| 义 | 5.1 - 51 | No.4: 含水比 - 乾燥密度関係 | 347 |
| 义 | 5.1 - 52 | 乾燥密度・含水比の分布(施工試験時のセクション別) | 348 |
| 义 | 5.1 - 53 | サンプリング孔縦断面図 | 349 |
| 义 | 5.1 - 54 | Sec.1: 含水比 - 乾燥密度関係 | 349 |
| 义 | 5.1 - 55 | サンプリング孔縦断面図 | 350 |
| 义 | 5.1 - 56 | Sec.2: 乾燥密度・含水比の度数分布 | 350 |
| 义 | 5.1 - 57 | Sec.2:含水比 - 乾燥密度関係 | 350 |
| 义 | 5.1 - 58 | サンプリング孔縦断面図 | 351 |
| 义 | 5.1 - 59 | Sec.3: 乾燥密度・含水比の度数分布 | 351 |
| 义 | 5.1-60 | Sec.3:含水比 - 乾燥密度関係 | 352 |
| 义 | $5.1 \cdot 61$ | サンプリング孔縦断面図 | 352 |
| 义 | 5.1-62 | Sec.4: 乾燥密度・含水比の度数分布 | 353 |
| 义 | 5.1 - 63 | Sec.4:含水比 - 乾燥密度関係 | 353 |
| 义 | 5.1-64 | サンプリング孔縦断面図 | 354 |
| 义 | 5.1-65 | Sec.5: 乾燥密度・含水比の度数分布 | 354 |

| 义 | 5.1-66 | Sec.5:含水比 - 乾燥密度関係 | . 355 |
|---|----------|---------------------------------|-------|
| 义 | 5.1-67 | サンプリング孔縦断面図 | . 355 |
| 义 | 5.1-68 | Sec.6: 乾燥密度・含水比の度数分布 | . 356 |
| 义 | 5.1-69 | Sec.6:含水比 - 乾燥密度関係 | . 356 |
| 义 | 5.1-70 | サンプリング孔縦断面図 | . 357 |
| 汊 | 5.1-71 | Sec.7: 乾燥密度・含水比の度数分布 | . 357 |
| 汊 | 5.1-72 | Sec.7:含水比 - 乾燥密度関係 | . 358 |
| 汊 | 5.1-73 | サンプリング孔縦断面図 | . 358 |
| 义 | 5.1-74 | Sec.8: 乾燥密度・含水比の度数分布 | . 359 |
| 汊 | 5.1-75 | Sec.8:含水比-乾燥密度関係 | . 359 |
| 义 | 5.1-76 | No.1: 粒径加積曲線 | . 360 |
| 义 | 5.1-77 | No.2: 粒径加積曲線 | . 361 |
| 义 | 5.1-78 | No.3: 粒径加積曲線 | . 362 |
| 义 | 5.1-79 | No.4: 粒径加積曲線 | . 363 |
| 汊 | 5.1-80 | ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係 | . 364 |
| 义 | 5.1-81 | サンプリング孔位置図 | . 365 |
| 义 | 5.1-82 | 全体:細粒分含有率・有効粘土密度の分布 | . 365 |
| 义 | 5.1 - 83 | サンプリング孔位置図 | . 366 |
| 义 | 5.1-84 | No.1:細粒分含有率・有効粘土密度の分布 | . 366 |
| 义 | 5.1-85 | No.1:水平深度 - 有効粘土密度・細粒分含有率関係 | . 367 |
| 义 | 5.1-86 | サンプリング孔位置図 | . 367 |
| 义 | 5.1-87 | No.2:細粒分含有率・有効粘土密度の分布 | . 368 |
| 义 | 5.1-88 | No.2:水平深度 - 有効粘土密度・細粒分含有率関係 | . 368 |
| 义 | 5.1-89 | サンプリング孔位置図 | . 369 |
| 义 | 5.1 - 90 | No.3:細粒分含有率・有効粘土密度の分布 | . 369 |
| 义 | 5.1 - 91 | No.3:水平深度 - 有効粘土密度・細粒分含有率関係 | . 370 |
| 义 | 5.1 - 92 | サンプリング孔位置図 | . 370 |
| 义 | 5.1 - 93 | No.4:細粒分含有率・有効粘土密度の分布 | . 371 |
| 汊 | 5.1 - 94 | No.4:水平深度 - 有効粘土密度・細粒分含有率関係 | . 371 |
| 义 | 5.1 - 95 | 細粒分含有率・有効粘土密度の分布 | . 372 |
| 义 | 5.1 - 96 | サンプリング孔縦断図 | . 373 |
| 义 | 5.1 - 97 | サンプリング孔縦断図 | . 373 |
| 义 | 5.1 - 98 | Sec.2:細粒分含有率・有効粘土密度の分布 | . 374 |
| 义 | 5.1 - 99 | (再掲)No.1:水平深度 - 有効粘土密度・細粒分含有率関係 | . 374 |
| 义 | 5.1-100 | サンプリング孔縦断図 | . 375 |
| 义 | 5.1-101 | Sec.3:細粒分含有率・有効粘土密度の分布 | . 375 |
| 义 | 5.1-102 | サンプリング孔縦断図 | . 376 |
| 义 | 5.1-103 | Sec.4:細粒分含有率・有効粘土密度の分布 | . 376 |
| 义 | 5.1-104 | (再掲)水平深度‐有効粘土密度・細粒分含有率関係 | . 377 |
| 义 | 5.1-105 | サンプリング孔縦断図 | . 378 |
| 汊 | 5.1-106 | Sec.5:細粒分含有率・有効粘土密度の分布 | . 378 |
| 义 | 5.1-107 | サンプリング孔縦断図 | . 379 |
| 义 | 5.1-108 | Sec.6:細粒分含有率・有効粘土密度の分布 | . 379 |

| 义 | 5.1 - 109 | サンプリング孔縦断図 | 380 |
|---|-----------------|---------------------------------------|-----|
| 义 | 5.1 - 110 | Sec.7:細粒分含有率・有効粘土密度の分布 | 380 |
| 义 | 5.1 - 111 | サンプリング孔縦断図 | 381 |
| 义 | 5.1 - 112 | Sec.8:細粒分含有率・有効粘土密度の分布 | 381 |
| 义 | 5.1 - 113 | メチレンブルー吸着量測定によるベントナイト混合率の測定結果 | 382 |
| 义 | 5.1 - 114 | No.1:メチレンブルー吸着量測定によるベントナイト混合率の推定 | 384 |
| 义 | 5.1 - 115 | No.2:メチレンブルー吸着量測定によるベントナイト混合率の推定 | 384 |
| 义 | 5.1 - 116 | No.3:メチレンブルー吸着量測定によるベントナイト混合率の推定 | 384 |
| 义 | 5.1 - 117 | No.4:メチレンブルー吸着量測定によるベントナイト混合率の推定 | 384 |
| 义 | 5.1 - 118 | No.1・No.2:水平深度 - 乾燥密度・含水比関係 | 386 |
| 义 | 5.1 - 119 | No.3・No.4:水平深度 - 乾燥密度・含水比関係 | 387 |
| 义 | 5.1 - 120 | No.1・No.2:水平深度 - 有効粘土密度・細粒分含有率関係 | 388 |
| 义 | 5.1 - 121 | No.3・No.4:水平深度 - 有効粘土密度・細粒分含有率関係 | 389 |
| 义 | 5.1 - 122 | 乾燥密度・有効粘土密度-透水係数関係 | 390 |
| 义 | 5.1 - 123 | 有効粘土密度-透水係数関係の既往データとの比較 | 391 |
| 义 | 5.1 - 124 | 水平深度-透水係数関係 | 392 |
| 义 | 5.1 - 125 | No.1,2: 透水係数・動水勾配の経時変化 | 393 |
| 义 | 5.1 - 126 | No.3,4: 透水係数・動水勾配の経時変化 | 393 |
| 义 | 5.1 - 127 | 含水比が設定目標範囲外の試料分布 | 394 |
| 义 | 5.1 - 128 | 設定範囲外の含水比分布 | 395 |
| 义 | 5.1 - 129 | 昨年度埋め戻し材施工時の調査結果との比較(含水比: No.1, No.2) | 397 |
| 义 | 5.1 - 130 | 昨年度埋め戻し材施工時の調査結果との比較(含水比: No.3, No.4) | 398 |
| 义 | 5.1 - 131 | 設備横坑切羽の地質状況(原子力機構・原環センター、2019) | 399 |
| 义 | 5.1 - 132 | 土壌水分計の計測結果(原子力機構・原環センター、2019) | 399 |
| 义 | 5.1 - 133 | 土壌水分の経時変化(原子力機構・原環センター、2019) | 400 |
| 义 | 5.1 - 134 | (再掲)粒径加積曲線 | 401 |
| 义 | 5.1 - 135 | 平均的粒度分布でない試料の分布 | 402 |
| 义 | 5.1 - 136 | 細粒分含有率が設定範囲外の試料分布 | 403 |
| 义 | 5.1 - 137 | 目標設定値範囲外の細粒分含有率 | 404 |
| 义 | 5.1 - 138 | 細粒分含有率が25%以上となる試料の分布 | 405 |
| 义 | 5.1 - 139 | 含水比と細粒分含有率の相関 | 406 |
| 义 | 5.1-140 | (再掲)透水係数の分布 | 407 |
| 义 | 5.1-141 | (再掲)メチレンブルー吸着量測定によるベントナイト混合率の推定 | 408 |
| 义 | 5.1 - 142 | 全体:含水比の平均値と最大・最小値 | 409 |
| 义 | $5.1 \cdot 143$ | (再掲)細粒分含有率が25%以上となる試料の分布 | 410 |
| 义 | 5.1-144 | (再掲)含水比と細粒分含有率の相関 | 410 |
| 义 | 5.1 - 145 | (再掲)細粒分含有率・有効粘土密度の平均値と最大・最小値 | 411 |
| 义 | 5.1-146 | 埋め戻し領域の解析領域 | 412 |
| 义 | 5.1-147 | Case 1: 飽和時間の推定 | 413 |
| 义 | 5.1-148 | Case 2: 飽和時間の推定 | 413 |
| 义 | 5.1-149 | Case 3: 飽和時間の推定 | 413 |
| 义 | 5.1 - 150 | Case 4: 飽和時間の推定 | 413 |
| 义 | 5.1 - 151 | 原位置でのモニタリング結果(土壌水分) | 413 |

| 义 | 5.1 - 152 | Case 1: 飽和度の時間変化分布図 | 414 | |
|---|------------------------|--|-----|--|
| 义 | 5.1-153 計測システムの配置(俯瞰図) | | | |
| 义 | 5.1 - 154 | 土留め壁内部の排水構造と集水の仕組み | 417 | |
| 义 | 5.1 - 155 | ベントナイト(クニゲルV1)の吸光度検量線 | 418 | |
| 义 | 5.1 - 156 | 土圧計の配置模式図 | 418 | |
| 叉 | 5.1-157 | 土圧の計測結果 | 419 | |
| 叉 | 5.1-158 | 水圧計の配置概念図 | 419 | |
| 义 | 5.1 - 159 | 水圧の計測結果 | 420 | |
| 义 | 5.1 - 160 | 土壌水分計の配置概念図 | 420 | |
| 义 | 5.1 - 161 | 土壌水分の計測結果 | 421 | |
| 义 | 5.1 - 162 | 土圧変動の変化に着目した期間分け | 422 | |
| 义 | 5.1 - 163 | 土圧変動と水圧変動の相関(全測定期間のデータ) | 424 | |
| 义 | 5.1-164 | 土圧変動と水圧変動の相関(期間1のデータ) | 424 | |
| 叉 | 5.1-165 | 土圧変動と水圧変動の相関(期間2のデータ) | 425 | |
| 义 | 5.1 - 166 | 水位と総流量の計測結果 | 426 | |
| 义 | 5.1 - 167 | 土留め壁底盤部(地下水流出部)の状況観察結果(平成 31 年 8 月 21 日) | 426 | |
| 义 | 5.1 - 168 | 本試験でのベントナイト流出量計測結果から得られたベントナイトと地下水の | の総流 | |
| | 出量の | 関係 | 429 | |
| 义 | 5.1 - 169 | ベントナイトと地下水の総流出量の関係に関する既往の研究成果との比較 | 429 | |
| 义 | 5.2-1 ± | 里め戻し材に関する研究開発の進め方 | 431 | |
| 义 | 5.2-2 ~ | ベントナイト混合率と最大乾燥密度、有効モンモリロナイト密度の関係 | 434 | |
| 义 | 5.2-3 ~ | ベントナイト混合率と透水係数の関係 | 435 | |
| 义 | 5.2-4 韋 | 乾燥密度と透水係数及び有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係 | 435 | |
| 义 | 5.2-5 ~ | ベントナイト混合率と膨潤圧の関係 | 436 | |
| 义 | 5.2-6 韋 | 乾燥密度と膨潤圧及び有効モンモリロナイト密度と膨潤圧の関係 | 436 | |
| 义 | 5.2 - 7 ∄ | 最適含水比と最大乾燥密度の関係 | 437 | |
| 义 | 5.2-8 柞 | 莫擬掘削土の種類による透水係数(※砕砂(泥岩のみ砕石)) | 437 | |
| 义 | 5.2-9 | 最大乾燥密度(玄武岩、砂岩、泥岩) | 438 | |
| 义 | 5.2 - 10 | 有効モンモリロナイト密度(玄武岩、砂岩、泥岩) | 438 | |
| 义 | 5.2 - 11 | 玄武岩、砂岩、泥岩を用いた埋め戻し材の透水係数 | 439 | |
| 义 | 5.2 - 12 | ベントナイト混合率と透水係数の関係 | 440 | |
| 义 | 5.2 - 13 | 締固め試験前後の粒径加積曲線(Na型、4.5Ec) | 441 | |
| 义 | 5.2 - 14 | 締固め試験前後の粒径加積曲線(Ca型、4.5Ec) | 441 | |
| 义 | 5.2 - 15 | 最大粒径及び有効モンモリロナイト密度と膨潤圧の関係(Na型) | 442 | |
| 义 | 5.2 - 16 | 最大粒径及び有効モンモリロナイト密度と膨潤圧の関係(Ca型) | 443 | |
| 义 | 5.2 - 17 | 乾燥密度および有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係(Na型) | 444 | |
| 义 | 5.2 - 18 | 乾燥密度および有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係(Ca型) | 444 | |
| 义 | 5.2 - 19 | 有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係 | 445 | |
| 义 | 5.2 - 20 | 掘削土(砕石・砕砂)利用時の埋め戻し材の管理指標の考え方 | 446 | |
| 义 | 5.2 - 21 | 試験ピットの構造図及び外観 | 449 | |
| 义 | 5.2 - 22 | 施工試験の概要(Case A の例) | 450 | |
| 义 | 5.2 - 23 | 施工試験状況 | 451 | |
| 义 | 5.2 - 24 | 斜め転圧試験の状況 | 452 | |

| 义 | 5.2 - 25 | 各層の乾燥密度(Case A: Na 型 15%、砕石・砕砂 20 mm 以下) | 453 |
|---|----------|---|-----|
| 义 | 5.2 - 26 | 各層の乾燥密度(Case B : Na 型 15%、砕砂 2.5 mm 以下) | 453 |
| 义 | 5.2-27 | 各層の乾燥密度(Case C : Ca 型 30%、砕石・砕砂 20 mm 以下) | 454 |
| 义 | 5.2-28 | 各層の締固め度 | 454 |
| 义 | 5.2 - 29 | 層の上下の乾燥密度 | 455 |
| 义 | 5.2 - 30 | 層の上下の乾燥密度 | 455 |
| 义 | 5.2 - 31 | 乾燥密度と透水係数の関係(室内試験と転圧工法の比較) | 456 |
| 义 | 5.2 - 32 | 斜め転圧工法で施工した埋め戻し材の含水比と乾燥密度の関係 | 457 |
| 义 | 5.2 - 33 | 小型吹付け箱の概略図及び試験状況 | 458 |
| 义 | 5.2 - 34 | 小規模施工試験の流れ及び装置の概要図 | 458 |
| 义 | 5.2 - 35 | 施工試験後のサンプリング方法 | 460 |
| 义 | 5.2 - 36 | シリコーンオイル法の概要 | 460 |
| 义 | 5.2 - 37 | 吹付け施工試験における材料ロス率(ホース内付着率+リバウンド率) | 462 |
| 义 | 5.2-38 | 試験前材料とリバウンド材の粒度分布(Na型) | 463 |
| 义 | 5.2 - 39 | 試験前材料とリバウンド材の粒度分布(Ca 型) | 463 |
| 义 | 5.2-40 | 乾燥密度(シリコーンオイル法、パラフィン法) | 464 |
| 义 | 5.2-41 | 玄武岩を用いた埋め戻し材の乾燥密度と透水係数の関係 | 465 |
| 义 | 5.2-42 | 概念検討で対象とする坑道(主要坑道の例) | 466 |
| 义 | 5.2-43 | 転圧機械による施工可能高さ | 467 |
| 义 | 5.2 - 44 | 模擬坑道を用いた施工試験の例 | 468 |
| 义 | 5.2-45 | 充填装置(スクリュー)の断面配置 | 474 |
| 义 | 5.2-46 | スクリューフィーダー方式による埋め戻し材の施工状況のイメージ | 475 |
| 义 | 5.2-47 | 高レベル放射性廃棄物処分場の主要坑道(深成岩類、先新第三紀堆積岩類) | 476 |
| 义 | 5.2-48 | 模擬坑道構造図① | 479 |
| 义 | 5.2-49 | 模擬坑道構造図② | 480 |
| 义 | 5.2 - 50 | 実寸大模擬坑道の外観 | 481 |
| 义 | 5.2 - 51 | VG モデルによる水分特性曲線(KV015) | 484 |
| 义 | 5.2 - 52 | VG モデルによる水分特性曲線(KB030) | 485 |
| 义 | 5.2 - 53 | 6 種類の埋戻し材の飽和度と浸透率の関係 | 486 |
| 义 | 6.2 - 1 | 本技術開発事業の全体目標とそれを踏まえた個別研究課題の設定 | 491 |
| 义 | 6.2-2 | 既往の設計フローを最新の知見および本事業の成果を踏まえ更新した設計フロ | ーと本 |
| | 公募事 | 事業成果との関係 | 496 |

表目次

| 表 | 2.1 - 1 | セーフティケース開発の目的・特徴及び役割 | 7 |
|---|----------------|--|------|
| 表 | 2.1-2 | 主要国におけるセーフティケースに相当する技術報告書 | 8 |
| 表 | 2.1 - 3 | セーフティケースの主要な項目に関する目的や役割に関する分析 | 8 |
| 表 | 2.1-4 | 品質保証及び性能確認プログラムの定義の例 | .14 |
| 表 | 2.1 - 5 | 性能確認プログラムの具体化に向けた2つのアプローチ(方向性)の想定 | . 16 |
| 表 | 2.2-1 | 主な計測項目と計測技術 | . 19 |
| 表 | 2.2-2 | 長期安全性の観点で人工なバリアシステムの変遷に関連するプロセス | . 20 |
| 表 | 2.2-3 | 各散乱光による分布計測 | .21 |
| 表 | 2.2-4 | 分布型光ファイバセンサ技術の適用例一覧 | . 22 |
| 表 | 2.2-5 | 地中無線装置の通信条件 | . 26 |
| 表 | 2.2-6 | 無線給電装置の概念設計に関する課題 | . 31 |
| 表 | 2.2-7 | 充填材の厚みによるコイルのインダクタンスと内部抵抗 | . 39 |
| 表 | 3.1-1 | 文献調査結果の概要(1/3) | . 49 |
| 表 | 3.1 - 2 | 文献調査結果の概要(2/3) | . 50 |
| 表 | 3.1-3 | 文献調査結果の概要(3/3) | .51 |
| 表 | 3.1-4 | 着目するシーリングシステムの構成要素および機能 | . 53 |
| 表 | 3.1 - 5 | シーリングシステムの機能喪失時の流動パターン(部位別)とその影響 | . 54 |
| 表 | 3.1-6 | シーリングシステムの機能喪失時の流動パターン(組み合わせ)に応じた影響モー | ード |
| | の抽出 | 1 | .55 |
| 表 | 3.1-7 | 予察解析におけるパラメータ設定値 | . 66 |
| 表 | 3.1-8 | ストーリーボード(1/2):基本シナリオ(初期状態) | . 82 |
| 表 | 3.1-9 | ストーリーボード(2/2):基本シナリオ(初期状態) | . 83 |
| 表 | 3.1-10 | ストーリーボード(1/2): 基本シナリオ(劣化・変質状態) | . 86 |
| 表 | 3.1-11 | ストーリーボード (2/2) :基本シナリオ(劣化・変質状態) | . 87 |
| 表 | $3.1 \cdot 12$ | 構成要素毎の透水係数の設定 | 100 |
| 表 | 3.1 - 13 | 新第三紀堆積岩における間隙率、実効拡散係数の設定 | 101 |
| 表 | 3.1-14 | 深成岩における間隙率、実効拡散係数の設定 | 101 |
| 表 | $3.1 \cdot 15$ | 新第三紀堆積岩における水理解析及び物質移行解析のパラメータ設定値 | 110 |
| 表 | 3.1-16 | 深成岩における水理解析及び物質移行解析のパラメータ設定値 | 110 |
| 表 | 3.1-17 | 新第三紀堆積岩における核種移行パラメータ | 111 |
| 表 | 3.1-18 | 深成岩における核種移行パラメータ | 111 |
| 表 | 3.1-19 | 低アルカリ性セメントの種類と開発目的 | 126 |
| 表 | 3.1-20 | トンネル試験のテストケース | 129 |
| 表 | 3.2-1 | 閉鎖システムに関する処分場設計の視点での情報の整理 | 150 |
| 表 | 3.2-2 | 閉鎖システムに関する安全評価の視点での情報の整理(埋め戻し材) | 151 |
| 表 | 3.2 - 3 | 閉鎖システムに関する安全評価の視点での情報の整理(止水プラグ、力学プラク | グ) |
| | •••••• | | 152 |
| 表 | 3.2-4 | 硬岩系、軟岩系岩盤(母岩)の水理・物質移動特性値一覧 | 156 |
| 表 | 3.2-5 | 岩盤以外の水理・物質移動特性値一覧 | 156 |
| 表 | 3.2-6 | 解析ケース一覧表(硬岩系) | 158 |
| 表 | 3.2-7 | 解析ケース一覧表(軟岩系) | 159 |
| 表 | 3.2-8 | 解析ケース一覧表(切り欠き深さ1m) | 159 |

| 表 | 4.1-1 | 緩衝材と埋め戻し材の材料仕様 | . 199 |
|---|--------|----------------------------------|-------|
| 表 | 4.1-2 | ベントナイトの基本物性 | 200 |
| 表 | 4.1-3 | 緩衝材の膨潤変形試験の試験条件 | 201 |
| 表 | 4.1-4 | 緩衝材の膨潤変形試験結果 | . 202 |
| 表 | 4.1-5 | 緩衝材の膨潤圧試験の試験条件 | 205 |
| 表 | 4.1-6 | 埋め戻し材の膨潤変形試験の試験条件 | . 208 |
| 表 | 4.1-7 | 埋め戻し材の膨潤変形試験結果 | . 208 |
| 表 | 4.1-8 | 埋め戻し材の膨潤圧試験の試験条件 | . 210 |
| 表 | 4.1-9 | 埋め戻し材の含水比計測結果 | . 219 |
| 表 | 4.1-10 | 緩衝材と埋め戻し材の土質物性値 | . 224 |
| 表 | 4.1-11 | 二相流パラメータ | . 225 |
| 表 | 4.1-12 | 水蒸気拡散に関するパラメータ | . 226 |
| 表 | 4.1-13 | 緩衝材の力学パラメータ | . 227 |
| 表 | 4.1-14 | 埋め戻し材の力学パラメータ | . 227 |
| 表 | 4.2-1 | 透水試験の供試体仕様 | 240 |
| 表 | 4.2-2 | 模擬地下水の化学組成 | 240 |
| 表 | 4.2-3 | 透水試験の結果 | 241 |
| 表 | 4.2-4 | 膨潤状況確認試験の結果まとめ | .243 |
| 表 | 4.2-5 | 「止水性」「施工性」「コスト」に関する各材料の比較表 | .244 |
| 表 | 4.2-6 | コンクリート配合 | .247 |
| 表 | 4.2-7 | 底盤コンクリートの再打設の実績 | .248 |
| 表 | 4.2-8 | スリットの寸法 | 252 |
| 表 | 4.2-9 | ペレットの充填実績 | . 252 |
| 表 | 4.2-10 | 透水試験一覧 | 260 |
| 表 | 4.2-11 | 透水係数の設定値 | .261 |
| 表 | 4.2-12 | 透水試験1および透水試験2を対象とした浸透流解析の解析条件 | 261 |
| 表 | 4.2-13 | 推定した透水係数を用いた浸透流解析結果 | . 263 |
| 表 | 4.2-14 | 透水係数調整後の浸透流解析結果 | 263 |
| 表 | 4.2-15 | 透水係数の設定値 | 264 |
| 表 | 4.2-16 | 透水試験3を対象とした浸透流解析の解析条件 | 264 |
| 表 | 4.2-17 | 透水試験3を対象とした浸透流解析の解析結果 | 265 |
| 表 | 4.2-18 | 健岩部の透水係数の推定のための浸透流解析における透水係数の設定値 | .265 |
| 表 | 4.2-19 | 健岩部の推定透水係数を用いた浸透流解析の結果 | 265 |
| 表 | 4.3-1 | 主要資機材一覧表 | .270 |
| 表 | 4.3-2 | 確認された亀裂の一覧 | 276 |
| 表 | 4.3-3 | 主要機器一覧表 | 279 |
| 表 | 4.3-4 | 解析ソフトウェア一覧 | .281 |
| 表 | 4.3-5 | 主要機器一覧表 | . 289 |
| 表 | 4.3-6 | 主要機器一覧表 | . 295 |
| 表 | 4.3-7 | 主要機器一覧表 | . 297 |
| 表 | 4.3-8 | 試供体の一覧表 | . 299 |
| 表 | 4.3-9 | 超音波測定使用資機材一覧 | . 301 |
| 表 | 4.3-10 | コアの弾性波速度一覧表 | 302 |

| 表 | 4.3-11 | グラウト材の弾性波速度一覧表 | 303 |
|---|----------|-----------------------|-----|
| 表 | 4.3-12 | グラウト材とコアの比抵抗一覧表 | 304 |
| 表 | 4.3-13 | 比抵抗試験使用資機材一覧 | 305 |
| 表 | 4.3-14 | ボーリングコアの比抵抗一覧表 | 306 |
| 表 | 4.3-15 | ボーリングコアとグラウト材の比抵抗一覧表 | 307 |
| 表 | 4.3-16 | グラウト材とコアの比抵抗 | 308 |
| 表 | 5.1 - 1 | 主要資機材一覧表 | 315 |
| 表 | 5.1 - 2 | サンプリング時の使用電力 | 316 |
| 表 | 5.1-3 | 室内物性試験の数量一覧 | 321 |
| 表 | 5.1-4 | 採取試料一覧 | 323 |
| 表 | 5.1 - 5 | 粒度試験の方法 | 325 |
| 表 | 5.1-6 | 使用材料の物理的特性 | 336 |
| 表 | 5.1-7 | 施工試験時の埋め戻し材の設定目標値 | 336 |
| 表 | 5.1-8 | 乾燥密度と含水比の分布(全体) | 337 |
| 表 | 5.1-9 | 昨年度の地上予備締固め試験結果 2) | 338 |
| 表 | 5.1-10 | 昨年度の吹付け後採取試料による室内試験結果 | 339 |
| 表 | 5.1-11 | No.1:乾燥密度と含水比の分布 | 340 |
| 表 | 5.1-12 | No.2:乾燥密度と含水比の分布 | 342 |
| 表 | 5.1-13 | No.3:乾燥密度と含水比の分布 | 344 |
| 表 | 5.1-14 | No.4:乾燥密度と含水比の分布 | 346 |
| 表 | 5.1-15 | Sec.1:乾燥密度と含水比の分布 | 349 |
| 表 | 5.1-16 | Sec.2:乾燥密度と含水比の分布 | 350 |
| 表 | 5.1 - 17 | Sec.3:乾燥密度と含水比の分布 | 351 |
| 表 | 5.1-18 | Sec.4:乾燥密度と含水比の分布 | 352 |
| 表 | 5.1-19 | Sec.5:乾燥密度と含水比の分布 | 354 |
| 表 | 5.1-20 | Sec.6:乾燥密度と含水比の分布 | 355 |
| 表 | 5.1-21 | Sec.7:乾燥密度と含水比の分布 | 357 |
| 表 | 5.1-22 | Sec.8:乾燥密度と含水比の分布 | 358 |
| 表 | 5.1 - 23 | No.1 : 粒度試験位置 | 360 |
| 表 | 5.1-24 | No.2 : 粒度試験位置 | 361 |
| 表 | 5.1 - 25 | No.3 : 粒度試験位置 | 362 |
| 表 | 5.1-26 | No.4 : 粒度試験位置 | 363 |
| 表 | 5.1 - 27 | 細粒分含有率と有効粘土密度(全体) | 365 |
| 表 | 5.1 - 28 | No.1:細粒分含有率と有効粘土密度 | 366 |
| 表 | 5.1 - 29 | No.2:細粒分含有率と有効粘土密度 | 367 |
| 表 | 5.1 - 30 | No.3:細粒分含有率と有効粘土密度 | 369 |
| 表 | 5.1 - 31 | No.4:細粒分含有率と有効粘土密度 | 370 |
| 表 | 5.1 - 32 | Sec.1:細粒分含有率と有効粘土密度 | 373 |
| 表 | 5.1 - 33 | Sec.2:細粒分含有率と有効粘土密度 | 373 |
| 表 | 5.1-34 | Sec.3:細粒分含有率と有効粘土密度 | 375 |
| 表 | 5.1 - 35 | Sec.4:細粒分含有率と有効粘土密度 | 376 |
| 表 | 5.1 - 36 | Sec.5:細粒分含有率と有効粘土密度 | 378 |
| 表 | 5.1 - 37 | Sec.6:細粒分含有率と有効粘土密度 | 379 |

| 表 | 5.1 - 38 | Sec.7:細粒分含有率と有効粘土密度 | . 380 |
|----|----------|--|-------|
| 表 | 5.1 - 39 | Sec.8:細粒分含有率と有効粘土密度 | . 381 |
| 表 | 5.1-40 | メチレンブルー吸着量測定結果 | . 383 |
| 表 | 5.1-41 | 透水試験結果(飽和度 100%) | . 385 |
| 表 | 5.1-42 | 昨年度の透水試験結果 | . 385 |
| 表 | 5.1-43 | 含水比が設定目標範囲外のデータ(乾燥密度は参考値) | . 396 |
| 表 | 5.1-44 | 平均的粒度分布と異なる試料 | . 402 |
| 表 | 5.1-45 | $F_c \cdot \rho_e$ が目標設定値範囲外のデータ | 403 |
| 表 | 5.1-46 | - Fc≧25%となるデータ | . 405 |
| 表 | 5.1-47 | 解析パラメータ | . 412 |
| 表 | 5.1-48 | 解析ケース | . 412 |
| 表 | 5.1-49 | 本吹付け施工試験で使用したモニタリング用センサ類 | . 417 |
| 表 | 5.1-50 | 土圧変動と水圧変動の相関に関する定性的な検討結果 | . 423 |
| 表 | 5.1-51 | ベントナイト流出量計測結果 | . 428 |
| 表 | 5.2 - 1 | 埋め戻し材の試験に使用した材料 | . 432 |
| 表 | 5.2-2 | 試験に使用したベントナイトの基本物性 | . 432 |
| 表 | 5.2 - 3 | 試験に使用した模擬掘削土の基本物性 | . 433 |
| 表 | 5.2-4 | 埋め戻し材の物性データ取得のための試験ケース | . 433 |
| 表 | 5.2 - 5 | 転圧施工試験ケース | . 447 |
| 表 | 5.2-6 | 施工試験で取得するデータ | . 448 |
| 表 | 5.2-7 | 吹付け施工試験ケース | 459 |
| 表 | 5.2-8 | 吹付け施工試験における品質管理項目 | . 460 |
| 表 | 5.2-9 | 選定した施工パラメータ | . 461 |
| 表 | 5.2 - 10 | | 465 |
| 表 | 5.2-11 | 埋め戻し材の暫定仕様 | 471 |
| 表 | 5.2-12 | スクリュー径と最大塊径の関係 | 472 |
| 表 | 5.2-13 | スクリューフィーダー方式の施工装置の主な諸元 | 474 |
| 表 | 5.2-14 | BL1 および BL2 の応力度照査結果一覧 | 478 |
| 表 | 5.2-15 | BL3の応力度照査結果一覧 | 478 |
| 表 | 5.2-16 | □□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□ | . 481 |
| 表 | 5.2-17 | 各混合十の締固め試験結果と室内試験の供試体仕様 | 482 |
| 表 | 5.2-18 | 試験方法及びその概要 | 482 |
| 表 | 5.2-19 | 水分特性曲線における VG モデルのパラメータ(クニゲル V1:15%) | 483 |
| 表 | 5.2-20 | 水分特性曲線における VG モデルのパラメータ(クニボンド RW: 30%) | 486 |
| 表 | 6.2-1 | 2 ヵ年の事業成果の総括:品質保証および性能評価の手法や知見の体系化に資す | る基 |
| | 盤情報 | Bの整備、処分場構成要素の状態把握に関わる関連ハード技術の整備 | 492 |
| 表 | 6.2-2 | 2ヵ年の事業成果の総括:シーリングシステム長期性能評価技術 | 493 |
| 表 | 6.2-3 | 2ヵ年の事業成果の総括:シーリングシステム設計評価技術開発 | 493 |
| 、表 | 6.2-4 | 2 ヵ年の事業成果の総括: 膨潤挙動相互作用試験 | 494 |
| 表 | 6.2-5 | 2 ヵ年の事業成果の総括: EDZ シーリング試験 | 494 |
| え表 | 6.2-6 | 2ヵ年の事業成果の総括:掘削影響領域の連続性等に関する調査 | 495 |
| 表 | 6.2-7 | 2ヵ年の事業成果の総括:小断面坊道の吹付けによろ埋め戸し材の施工試験 | 495 |
| 表 | 6.2-8 | 2ヵ年の事業成果の総括:埋め戻し材の特性を踏まえた施工オプションの整備 | 495 |
| ~ | J U | | |

1.1 本事業の背景と目的

本事業は、平成 31 年度高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する技術開発事業(地層処分施 設閉鎖技術確証試験)として、経済産業省資源エネルギー庁(以下、資源エネルギー庁)から国 立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)および公益財団法人原子力環境整 備促進・資金管理センター(以下、原環センター)が受託したものである。本事業の背景と目的 を以下に示す。

高レベル放射性廃棄物の地層処分場の閉鎖後長期の安全性の確保においては、埋め戻した坑道 や掘削影響領域(以下、EDZ)が、放射性物質の生活圏に至る移行経路となり得る有意な水みち とならないことが重要である。第2次取りまとめでは、地下施設の閉鎖技術に関して、人工バリ アの設置環境に有意な影響を与えない、坑道そのものが有意な水みちとならないといった観点か ら、これらに対処するための技術としての概念検討が進められた。プラグや埋め戻し材などの物 理的および化学的安定性に関しては、例えばコンクリート製プラグの変質(溶脱に伴う Ca 濃度 や pH の上昇など) による緩衝材や埋め戻し材への影響や、埋め戻し材の膨潤圧による堆積岩系 岩盤における坑道周辺岩盤の長期的な力学的安定性の保持などについて概略的な評価がなされて いる(核燃料サイクル開発機構、1999a、1999b)。また、安全評価においては、プラグや埋め戻 し材などの閉鎖に関連する構成材料にはバリア機能を期待しないこととして、処分システムの評 価が行われている(核燃料サイクル開発機構、1999b)。一方、原子力発電環境整備機構(以下、 NUMO)と核燃料サイクル開発機構は、協力協定に基づき「処分場閉鎖技術に関する検討会」を 設置し、その中で人工バリア周囲の構成要素の相互影響を概略評価するための水理解析を行い、 地層処分システムに求められる閉鎖性能の考え方の整理を行っている(核燃料サイクル開発機構、 2005・NUMO、2007)。幌延深地層研究施設の深度 350m 調査坑道における人工バリア性能確認 試験では、掘削ズリ(稚内層)とベントナイトの混合材料で構成される坑道の埋め戻し材や、低 アルカリ性コンクリートを使用した力学プラグについて、実際の地質環境条件における設計・施 工および品質管理方法の適用性確認を行った(例えば、中山ほか、2014・本島ほか、2015・丹生 屋ほか、2015・中山ほか、2016・澤田ほか、2013a・菊池ほか、2013・澤田ほか、2013b)

これまでの閉鎖技術に関する検討および原位置試験などの成果を踏まえ、平成 30 年 3 月に公 表された「地層処分研究開発に関する全体計画(平成 30 年度~平成 34 年度)」(地層処分研究開 発調整会議、2018)(以下、全体計画)では、処分場の閉鎖後に坑道が有意な水みちとなることを 防止するためのプラグや埋め戻し材などの坑道シーリング技術について、これまでに概念検討が 進められた設計の詳細化や施工技術の成立性の確認、ならびに坑道シーリングが処分場全体の閉 じ込め性能に与える影響の評価や、湧水を伴う割れ目帯などのさまざまな地質環境を考慮した試 験を行うことなどの重要性が示された。

これらの背景を踏まえ、本事業では、平成 30 年度からの 2 ヵ年計画で、建設・操業期間中の 坑道の維持に必要なコンクリート覆工の化学的な劣化や地質環境の長期的な変遷などの長期的影 響も視野に入れつつ、閉鎖後に埋め戻した坑道や EDZ が、水みちとなり地下施設と地上を直結 する卓越した水みち(物質移行経路)となり得る可能性について、室内試験や原位置試験などの 実施によって検証するとともに、多様な地質環境条件を考慮した物質移行経路の分析などを通し て、坑道シーリングに期待する性能の具体化や、その設計評価技術の改良・高度化を進める。併 せて施工オプションの整備や品質管理手法の高度化に資する基盤情報を整備する。

1.2 本事業における研究開発、技術開発の全体フレーム

本事業における研究開発、技術開発では、①高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・ 施工技術の開発、および②処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備を行う。

前者については、人工バリアの設計で想定される短期・長期的な状態に対して、目標とする施 工品質が達成され、処分場が閉鎖された後に期待した性能が発揮されてことを確認・評価するた めの考え方と具体的な方法の検討を行う。また、そのような取り組みの一部を担うモニタリング に関するハード技術の整備として、無線計測技術の長期運用性の向上や新たなセンサに関する要 素技術の開発などを進める。

後者については、閉鎖後長期にわたり初期のシーリングシステム性能は維持されるという従前 の考え方を基本として、坑道や EDZ が卓越した水みちとならないこと、閉鎖後の埋め戻された 坑道や EDZ を含む周辺母岩の物質移行遅延機能が既往のシナリオの想定どおりであることの確 証に取り組む。具体的には、多様な地質環境条件を想定した地下水流動解析などを行い、止水プ ラグや埋め戻し材に期待する役割の明確化および処分事業を想定したシーリングシステムの設計 評価技術の整備を行う。また、坑道シーリング設計評価技術の整備に必要となる要素技術やシー リングシステムとしての性能について、坑道シーリングの長期性能に影響を与えることが想定さ れる事象や地質環境条件などの整理に基づき、優先度が高い事象に関するデータを取得する。さ らに、多様な地質環境や設計オプションへの柔軟な対応に向けて、埋め戻し材などに関する多様 な材料バリエーションに対応した特性データの把握や複数の施工技術オプションの整備ならびに 品質管理手法の具体化を進める。

全体計画と本事業における研究開発課題との関連および全体の目標を図 1.2-1 に示す。



図 1.2-1 本事業の到達目標と進め方

1.3 本年度の実施概要

1.3.1 高レベル放射性廃棄物に対する人エバリアの製作・施工技術の開発

(1) 製作・施工技術に係る品質保証体系およびモニタリング技術の整備

平成 30 年度からの 2 ヵ年で、人工バリアおよび他の地下構成要素の製作・施工に係る品質保 証体系の構築に向けて、国際共同研究への参画や諸外国の先行検討などの動向調査を行い、地下 構成要素の製作・施工管理プロセスやモニタリングを包含した品質保証体系の全体枠組みの構築 および知見やデータなどの体系化に資する基盤情報を整備する。また、モニタリングに関連する 共通基盤技術として、無線関連技術に関する処分環境下での適用性試験などを通して、地下構成 要素の状態把握に係る関連ハード技術の高度化を行うとともに、原位置状態把握に係る新たな技 術の実用化レベルや開発動向を調査する。

平成 31 年度は、人工バリアおよび他の地下構成要素の製作・施工に係る品質保証体系の構築 に向けて、わが国に適用可能な性能確認プログラムの全体枠組みおよび製作・施工プロセス管理 手法の具体化に向けた検討を行う。また、無線関連技術については、幌延 URL での伝送システム の実証試験を継続するとともに、地下 500m から地上までの伝送システム構成等の具体化および 地下環境を想定した給電効率の向上に関する検討を行う。さらに、原位置状態把握に係る新たな センサ技術の高度化に向けた検討を行う。

1.3.2 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備

(1) 坑道シーリングの設計・評価技術の整備

平成 30 年度からの 2 ヵ年の計画で、処分場の閉鎖後に坑道や EDZ が地上と直結する有意な水 みちとなることを防止するため、現在考えられている埋め戻し材やプラグなどのシーリングシス テムが地層処分システム全体の閉じ込め性能に及ぼす影響を評価するための技術を整備する。

具体的には、地層処分システムの安全評価におけるシーリングシステム性能の考え方の整理に 向けて、ケーススタディを通じて以下の検討を進める。

・シーリングシステムの長期性能を考慮したシナリオ解析

・シナリオ解析に基づく物質移行経路評価

・シーリングシステムに求められる要件の具体化

これらの成果に加え、後述する「坑道シーリングに関わる施工技術の整備」や「坑道シーリン グ技術の性能確認」における成果も体系的に整理・統合し、ジェネリックな観点から多様な地質 環境において適用可能なシーリングシステム設計評価技術を提示する。具体的には、既に処分サ イトが選定され建設許認可申請段階にある諸外国の先行事例などに関する動向調査を行い、処分 場を構成するシーリングシステムに関する目的や要求性能などに関する情報を整理する。そのよ うな諸外国の先行的な検討動向も踏まえ、わが国に適用可能な既往の坑道シーリングシステム設 計フローなどの更新・高度化を図る。

平成 31 年度は、平成 30 年度に実施したシーリングシステムの長期変遷に基づくシナリオ解析 および物質移行経路評価(物質移行が促進されるイベント・プロセス等の具体化)に基づき、シ ーリングの長期変遷を考慮した地下水流動解析、物質移行解析等を行い、シーリングの劣化の影 響やシーリング性能と大規模破砕帯との離間距離などの関係等の分析を行う。また、これらの検 討を通じ、地層処分の長期安全性の観点からシーリングシステムに求められる安全機能を整理す るとともに、調査・施工で達成しうるシーリングの性能・品質等を踏まえたシーリングシステム の性能の考え方(シーリングの性能劣化の影響が顕在化しないこと、相互補完的に他のバリアに より性能劣化の影響が緩和されうること等)を提示する。 また、プラグの幾何学的形状等に関する設計の考え方を整理するため、EDZ およびプラグの形 状等のパラメータを変化させた感度解析を実施する。さらに、本事業の研究成果の取りまとめと して、NUMO が公表した包括的技術報告書を含む地層処分場の閉鎖に関する既往の設計フロー を参考とし、本事業で得られた各項目での成果を加えた形で設計フロー等の高度化を図る。

(2) 坑道シーリング技術の性能確認

平成 30 年度からの 2 ヵ年で、止水プラグや埋め戻し材それぞれの構成要素、さらにはそれら を組み合わせたシーリングシステムの性能を室内試験や工学規模の試験を通じて検証する。具体 的には、坑道シーリングの構成要素となる埋め戻し材、止水プラグ、力学プラグに関して、それ らの性能に影響を及ぼす可能性のある事象などを抽出・整理するとともに、研究事例の調査や解 析的検討を通じ、明らかにすべき課題を設定する。また、それらの結果を踏まえ、シーリング構 成要素に期待する機能や役割に対して課題解決に向けた試験計画の立案ならびに試験設計や予備 試験などを実施する。

埋め戻し材については、平成 30 年度から実施している緩衝材と埋め戻し材を対象とした膨潤 変形試験と膨潤挙動相互作用試験を継続する。また、止水プラグについては、平成 30 年度に実施 した事前検討の結果を踏まえた原位置 EDZ シーリング試験を実施し、ベントナイト系材料の EDZ における地下水移行経路の止水性能を評価する。また、あらたに幌延深地層研究施設深度 350m の試験坑道4を活用し、坑道周辺の EDZ の拡がりや経時変化を把握し、グラウト注入によ る EDZ の改善効果を評価するため、弾性波や比抵抗を用いたトモグラフィ調査、S 波トモグラフ ィ調査、検層、室内試験を実施して調査手法の適用性を確認する。

(3) 坑道シーリングに関わる施工技術の整備

サイト選定プロセスの進展に伴い具体化される地質環境や処分概念に応じてシーリングの構成 材料や施工技術を適切に選定するには、多様な材料バリエーションや施工技術オプションに応じ た施工特性を把握しておく必要がある。さらに、施工したシーリングシステムが閉鎖後の再冠水 に至る過程における状態変化ならびに施工手順や時間などにも留意した、品質管理や施工プロセ ス管理の具体化に資する基盤情報を整備するとともに、工学規模試験などによって施工技術の適 用性を確認しておく必要がある。

これらを踏まえ、平成30年度からの2ヵ年で、以下の項目に着手する。

- ・ 小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験
- 埋め戻し材の特性を踏まえた施工オプションの整備

平成 31 年度は、平成 30 年度に実施した小断面坑道の吹付けによる埋め戻し領域において、 既設のモニタング装置を用いた観測(土圧、水圧、水分およびベントナイト流出量)を継続する とともに、埋め戻し材のサンプリングと室内透水試験等を実施し、最終的な埋め戻し領域の透水 性等を確認する。それらの結果とともに、平成 30 年度の成果を併せ、吹付け施工技術に関する 品質管理・施工管理体系を整備する。

また、多様な地質環境条件等に柔軟に対応できる埋め戻し材の材料バリエーションや施工技術 オプションを整備するために、ベントナイトの種類・混合率、模擬掘削土の種類・粒径などをパ ラメータとした室内試験および小規模施工試験を実施する。室内試験では、埋め戻し材の飽和後 および飽和までの過程における材料データを取得する。小規模施工試験では、試験環境の整備を 行うとともに、試験後の埋め戻し材の材料データおよび材料ロスや施工時間などに関するデータ を取得して、坑道シーリングに要求される長期性能を満たす材料・施工パラメータの選定に資す る情報を取りまとめる。また、埋め戻し材の代替施工装置の概念検討を行う。

参考文献

- 核燃料サイクル開発機構(1999a):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.
- 核燃料サイクル開発機構(1999b):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.
- 核燃料サイクル開発機構(2005): 処分システムに求められる閉鎖性能の考え方-坑道交差部に おける水理解析-、JNC TN8400 2005-016.
- 菊池広人、棚井憲治、澤田純之、前川恵輔(2013):幌延 URL における人工バリアの性能確認試験(3)堆積岩の掘削ズリを用いた埋め戻し材の膨潤特性に関する検討、日本原子力学会 2013 年春の年会.
- 原子力発電環境整備機構(2007):処分システムに求められる閉鎖性能の考え方-処分場パネル 規模の水理に関する試解析-、NUMO-TR-06-01.
- 澤田純之、中山雅、棚井憲治、森川義人、城まゆみ(2013a): 幌延 URL における人工バリアの 性能確認試験(2)堆積岩の掘削ズリを用いた坑道の埋め戻し材の締固め特性と透水性に関す る検討、日本原子力学会 2013 年春の年会.
- 澤田純之、中山雅、棚井憲治、松崎達二、本島貴之、城まゆみ(2013b): 幌延 URL における人 エバリアの性能確認試験(5)堆積岩の掘削ズリを用いた坑道の埋め戻し材の転圧締固め特性、 日本原子力学会 2013 年秋の大会.
- 地層処分研究開発調整会議(2018):地層処分研究開発に関する全体計画(平成 30 年度~平成 34 年度).
- 中山雅、三浦律彦、石田知子、竹田宣典、丹生屋純夫、城まゆみ(2014): 幌延 URL における人 エバリア性能確認試験(9)低アルカリ性セメントのプラグコンクリートへの適用、日本原子力 学会 2014 年秋の大会.
- 中山雅、大野宏和、棚井憲治、杉田裕、藤田朝雄(2016): 幌延深地層研究計画における人工バリ ア性能確認試験-坑道の埋め戻し材に関する検討-、JAEA-Research 2016-002.
- 丹生屋純夫、佐藤伸、中山雅、白瀬光泰、名合牧人(2015): 幌延 URL における人工バリアの性 能確認試験(10)プラグ形状に関する解析的検討、日本原子力学会 2015 年秋の大会.
- 本島貴之、臼井達哉、坂本淳、丹生屋純夫、石田知子、三浦律彦、中山雅、大野宏和(2015): 幌延 URL における人工バリア性能確認試験-高流動・低アルカリプラグコンクリートの配 合検討及び温度応力解析・躯体温度測定結果-、土木学会平成 27 年度全国大会第 70 回年 次学術講演会.

高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発 一製作・施工技術に係る品質保証体系およびモニタリング技術の整備

2.1 品質保証および性能確認の手法や知見の体系化に資する基盤情報の整備

2.1.1 背景および目的

地層処分における閉鎖後の長期安全性は人の能動的な管理に依存しないものであるが、一方で、 閉鎖に至るまでの操業段階における人工バリアを含む地下構成要素の製作・施工に係る品質の確 保や施工後の性能確認のためのモニタリングなどの工学的な取組が重要となる。地層処分事業が 先行する諸外国では、これらの工学的な取組に関する検討や国際共同研究などが進められており、 これらのプログラムの具体化に向けた考え方などが集約されつつあるものの、各国の地質環境、 処分概念、規制制度の違いにより、考え方の統一やプログラムの集約には難しさがある。また、 品質保証やモニタリングなどの用語が幅広い取組を想像させるため、これらの取組について検討 するうえで、個々の用語の定義や対象とする範囲及び役割を関係者間で共有することが重要とな る。

このような状況を踏まえ、本章では、品質保証や性能確認に関連する諸外国の検討事例を調査 し、その結果を分析することで品質保証やモニタリングの考え方や役割について整理した。その うえで、わが国の地層処分における地下構成要素の製造・施工に係る品質保証及び操業中の性能 確認についての具体化に向けた研究開発の方向性を整理した。

2.1.2 品質保証・性能確認プログラムの具体化に向けた調査研究の進め方

地層処分事業が先行している国としてスウェーデン及びフィンランドにおける品質保証の取組 み、人工バリア等に対するモニタリングについて先行的に検討が進められている米国及び国際共 同研究(Modern2020)を対象として公開情報に基づく情報を整理し、その分析結果から、わが 国における品質保証及び性能確認の方向性を考察し、それらの具体化に向けた研究開発課題等を 抽出する。

- 諸外国における事実情報の整理
 - ・ セーフティケースの構成を調査し、各構成要素の目的とそれぞれの関連を整理
 - ・ セーフティケースの構成要素の1つである性能評価の役割を整理
- ② 諸外国における事実情報の分析
 - ・ 性能評価の入力情報を取得するための取組を抽出
 - ・ 性能評価の入力情報の取得についての考え方を整理
- ③ わが国における品質保証及び性能確認の具体化に向けた課題の抽出
 - ・ 性能評価の入力情報を取得するための取組として、"品質保証プログラム"と"性能確認 プログラム"を定義
 - · "品質保証プログラム"と"性能確認プログラム"の具体化に向けた考え方を整理
 - ・ 上記の整理結果から、今後の研究開発の方向性を提示

2.1.3 諸外国のセーフティケースと性能評価の役割

品質保証やモニタリングなどの工学技術の役割を考察する上で、これらの取組で得られる情報 が、どのように処分場の安全性などの評価に反映されるのかを理解しておく必要がある。地層処 分施設の安全性を立証するための手法として「セーフティケース」が開発されている。本項では、 諸外国のセーフティケースの構造やその構成要素の目的及び役割を整理した。

(1) セーフティケースの目的及び構造

セーフティケース開発の目的・特徴と役割は、表 2.1-1 に示すように整理できる(IAEA, 2012; OECD/NEA, 2013)。セーフティケースは、処分事業の主要な節目に整備され、事業段階の進展 に伴い更新されるものである。表 2.1-1の「処分事業の主要な節目」とは、研究開発や概念・戦 略決定ならびにサイト選定などを含む操業前段階から、操業中及び施設の最終閉鎖、更に閉鎖後 一定の管理期間を含む場合にはその閉鎖後段階まで、処分事業に係るあらゆる節目を示している。 わが国においては、特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律や核原料物質、核燃料物質及び原 子炉の規制に関する法律によって示されている以下のようなステップが想定される。

- サイト選定(3段階のステップ)
- · 事業許可申請
- ・ 定期的な評価(安全レビュー)
- 閉鎖措置計画認可
- 廃止措置計画認可、など

表 2.1-1 セーフティケース開発の目的・特徴及び役割

| セーフティケース開発の目的・特徴 | | | | |
|--|--|--|--|--|
| セーフティケースとは、処分場が安全であるという主張を、定量化し立証するための根拠、解析、論拠等 | | | | |
| を統合したものであり、 処分事業の主要な節目 に整備され、段階を追って逐次更新され、成熟してゆくも | | | | |
| のである。具体的には、 | | | | |
| ○閉鎖後の処分システムの挙動と性能の理解の実証のために、構造化された追跡可能で透明性のある | | | | |
| 方法で関連する情報を統合する。 | | | | |
| ○処分施設が人の健康と環境を防護するように機能するという合理的な保証を提供することにより、 | | | | |
| その安全を実証する。 | | | | |
| ○処分システムの挙動と性能に関する不確実性を特定し、その重要性を解析し、重要な不確実性の管理 | | | | |
| のためのアプローチを特定する。 | | | | |
| セーフティケースの役割 | | | | |
| ○処分施設の開発の段階的なアプローチにおける重要な各節目における意思決定を支援する。 | | | | |
| ○処分に関連する課題やテーマについて、規制当局や利害関係者間のコミュニケーションを促進する。 | | | | |

セーフティケースの目的や特徴を踏まえると、表 2.1-2 に示す諸外国の主要な技術報告書 は、各国の事業の節目におけるセーフティケースと位置付けることができる。各国のセーフティ ケースでは、国ごとに用語や位置づけに相違はあるものの、概ね以下の①~⑤の内容が包含され ている。

- ① サイトの地質環境
- ② 処分場の設計
- ③ 処分システムの性能評価(処分システムの変遷に関する予測評価)
- ④ シナリオ開発
- ⑤ 安全評価(核種移行及び線量評価)

これらの項目の中で、品質保証やモニタリングなどの工学技術の役割を考察するうえで重要となる②、③、⑤の目的及び役割は表 2.1-3 のように整理できる。セーフティケースでは、処分場の設計で検討された要件や構成要素の仕様への展開・設定の適切性が「性能評価」を通して評価され、線量基準等の規制要件などへの適合性が「安全評価」で確認されることとなる。

| 玉 | 技術報告書の名称等 | | |
|----------|---|-------|--|
| (発行者) | 発行年 / 原典英文報告書名 | 種別 | |
| フィンランド | 2012 / TURVA-2012, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear | 許認可申請 | |
| (Posiva) | Fuel at Olkiloto, Synthesis (Posiva, 2012a) | (付属書) | |
| フウィーデン | 2011 / SR-Site, Long-term safety for the final repository for spent | 許認可申請 | |
| (SVD) | nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project (SKB, | (付属書) | |
| (SKD) | 2011) | | |
| 米国 | 2008 / Yucca Mountain Repository License Application SAFTY | 許認可申請 | |
| (DOE) | ANALYSIS REPORT (DOE, 2008) | (付属書) | |
| フランス | 2005 / Dossier 2005 Argile SYSTHESIS, Evaluation of the feasibility | 研究成果 | |
| (Andra) | of a geological repository in an argillaceous formation (Andra, 2005) | 報告書 | |
| 7 / 7 | 2002 / Project Opalinus Clay Safety Report, Demonstration of | 研究式用 | |
| | disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long- | 初九成木 | |
| (ivagra) | lived intermediate-level waste (Nagra, 2002) | 和百香 | |

表 2.1-2 主要国におけるセーフティケースに相当する技術報告書

表 2.1-3 セーフティケースの主要な項目に関する目的や役割に関する分析

| 構成要素名 | 目的・役割 |
|-----------------|---------------------------------------|
| 処分場の設計 | ○処分場の構成要素や施設展開方法を定義 |
| DESCRIPTION OF | ○閉鎖後長期の安全性が確保できるように、処分場の各構成要素に対して安全機 |
| THE DISPOSAL | 能や性能要件・目標を設定し、設計要件・設計仕様へと展開 |
| SYSTEM (DESIGN) | |
| 処分システムの性能評価 | ○地質環境を含む処分システムの構成要素に関する短~長期の変遷挙動(状態変 |
| PERFORMANCE | 化や機能変化)について分析・評価を実施(要件や性能目標の達成を確認) |
| ASSESSMENT | ○性能評価をとおして、処分システムの変遷に関する基本シナリオを具体化(同シ |
| | ナリオに対する要件や性能目標の達成を確認)、併せて、 |
| | ○発生確率の低い事象や許容可能な不確実性を特定 |
| 安全評価 | ○性能評価結果を踏まえ、安全規制が要求する安全評価方法(統合/分解アプロー |
| SAFETY | チなど)に従い、安全性を示すための指標や基準(リスク基準/線量基準など) |
| ASSESSMENT | を満たすことを示す |
| | ○安全規制の要求事項や性能評価結果(核種移行パラメータの変遷を含むシステ |
| | ムの機能変化など)を踏まえ、安全評価としてのシナリオ分類や核種移行パラメ |
| | ータの設定などが検討される、併せて、 |
| | ○不確実性の特定及びその管理方法が検討される |

(2) 処分システムの性能評価の役割

フィンランドの Posiva とスウェーデンの SKB が建設許可申請で作成したセーフティケースの 具体的な構成と処分システムの性能評価の概要を、それぞれ図 2.1-1 及び図 2.1-2 示す。Posiva のセーフティケースでは「§6 処分場システムの性能評価(Performance Assessment of the Reposiory System)」、SKB のセーフティケースでは「§10 基本的変遷の解析(Analysis of a reference evolution for a repository)」に性能評価の内容が取りまとめられている (Posiva, 2012a、 SKB, 2011)。

性能評価は、天然バリア及び人工バリアの状態や機能の変遷挙動を評価するものであり、処分 システムの構成要素に関する短~長期の変遷挙動について熱、水理、力学、化学(いわゆる THMC) の観点から評価が行われる。Posiva と SKB の性能評価では、建設操業段階から氷期サイクルを 含む 100 万年後までを 4 つの評価期間に分けて実施されている (Posiva, 2012a; SKB, 2011)。



図 2.1-1 Posiva が取りまとめたセーフティケースの構成と性能評価の概要 ((Posiva, 2012a)より要点を整理)

| 建設 | 許可申 | 請『SR-Site』(2011) | セーフティーケースの階層構造 | |
|------|------------|---|--|--|
| ステップ | 報告書 構成 | 主な内容 | 女 全 報告者I SR-Site メイン報告者 主要なレファレシス報告者 Main softwareasa Main softwareasa | |
| 1 | §3 | 処分場に係わるFEP(初期状態、内部プロセス及び 外部因子)の取扱い | | |
| 2a | §4 | Forsmarkサイトの初期状態に関する説明 (岩盤特性/変位帯や龟裂/岩盤応力/水理特 性/地下水特性等) | 天成 生活用 デジル データ 人間帶入 検州和行 報告書 報告書 報任局広告 統合総告書 報告書 報告書 報告書 それを支える参考文献 Additional references Additional references Additional references Additional references | |
| 2b | §5 | 人工バリアシステムの初期状態に関する説明 | Creating and Creating Creating | |
| | §5 | 処分場レイアウトの説明 | | |
| 3 | §6 | 外部条件(気候/人間活動)に開する取扱い | I we think a second of the Landson of the Landson of the second of the | |
| 4 | §7 | 内部プロセスの変遷 (燃料/キャニスタ/緩衝材/ 坑道埋戻材/岩盤/その他) | 人」ハリアのTHMC(熱-水-応力-化学理成セテル) に関連する評価検討項目 | |
| 5 | <u>§</u> 8 | 安全機能(safety functions)及び安全機能指標 (safety function indicators)に関する説明 | 援衛材、理戻し材及びプラグの変遷 | |
| 6 | §9 | データの取扱い | ・プラグの水飽和とそのシーリング能力 | |
| 7 | §10 | 基本的変遷の解析 ・評価期間① 掘削及び提業 ・評価期間② 閉鎖後の初期状態(温帯気候) ・評価期間③ レファレンス氷期サイクルの残存部分 ・評価期間④ その後の氷期サイクル | - ハントナイト物管理失後の均置化 - 応抜/パッケージ間の水理学的相互作用 - 仮分場内及びその周囲における化学的変遷 - サイトにおける天然地下水条件 - 塩分濃度(アップコーニング効果) - 酸化還元条件 - | |
| 8 | §11 | §10、FEP分析及び安全機能に基づくシナリオ選定 | ・グラウト、吹付コンクリート及びコンクリートがpHに及ぼす影響 ・ 銃物ので整い変解 | |
| 9 | §12/13 | 選定されたシナリオに開連する潜在的なシステムへの 影響解析 | - 有機物ない場合になっていた。 - 有機物ない物生物のプロセスが及ぼす効果 - 理要しなにおける酸素消費 | |
| 10 | §14 | 付随的な解析(人間侵入/最適化/除外FEP開 連等) | ・コロイド層 ・ヤースタの高食 2 場響活動が加分性の完成部分に及ばす影響 | |
| 11 | §15 | 結果(規制要件の遵守/今後の課題等) | 19年3年(日ヨリリスピン) *350/75日/ARP リコトンズはも9年7年 注 シーリングシステムと分類しているもの(理め戻し材・簡論材)に関連するものを下握で様記した。 | |
| | | | | |

図 2.1-2 SKB が取りまとめたセーフティケースの構成と性能評価の概要 ((SKB, 2011) より要点を整理)

2.1.4 性能評価の入力情報取得の考え方

(1) 性能評価結果のセーフティケースへの反映

処分事業の主要な節目ごとに更新されるセーフティケースの構成要素の1つである性能評価は、 事業段階に関わらず処分システムの変遷挙動を評価する普遍的なものである。ただし、性能評価 の実施時期(セーフティケースの開発段階)の違いにより、入力情報の精度や詳細さが異なる。 以下に示すように、サイト選定段階において得られる地質環境等の入力情報は限定的なものであ り、モデルや解析等が主体の性能評価が行われる。一方で、建設・操業〜閉鎖段階においては、 地下構成要素の施工品質、原位置の地下環境及び施工した構造物の変遷挙動、操業段階の進展に 応じた地下環境などの詳細な情報を得ることができ、サイト選定段階の限定的な入力情報をこれ らの詳細な情報に置き換えることで、より確からしい性能評価を実施することができる。

① サイト選定段階における性能評価

サイト選定段階においては、地下環境等に関する情報は限定的なものになる。また、人 エバリアを含む地下構成要素の製造・施工もこの段階では行われていないことから、実際 の施工後の品質は得られていない。そのため、設計仕様や施工仕様を初期条件として限定 的な地下環境等の入力情報を用いたモデルや解析等を主体とした状態予測等により処分シ ステムの性能評価が実施される。

建設・操業~閉鎖段階における性能評価

建設・操業段階では、その進展に応じて、地下環境等に関する情報が拡充・詳細化され る。また、人工バリアを含む地下構成要素の製造・施工が行われると施工後の品質に関す る情報を実績として得ることができる。従前の性能評価の入力情報の一部を、本段階をと おして得られる情報に置き換えることで、より確からしい性能評価を実施することができ る。

(2) 諸外国における性能評価の入力情報の取得に関する取組み

性能評価への入力情報を取得するために、諸外国で実施または検討されている試験やモニタリ ングなどの主な取組を図 2.1-3 に示す。

スウェーデン及びフィンランドでは、建設操業段階以前の室内試験や実証試験などの結果から、 処分場構成要素の材料調達、製造、施工などの各段階における管理基準値や検査方法など、品質 保証のために実施される一連の流れを取りまとめた報告書が作成されている。この報告書はセー フティケースの付属書として位置付けられており、キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材、閉鎖材な どに関する報告書が公開されている(Posiva, 2012b; 2012c; 2012d; 2012e)。製造・施工プロ セス管理は、これらの地下構成要素の施工後の品質を材料調達から施工に至る各プロセスで実施 する品質管理により確保する取り組みである。フィンランドにおける各処分場構成要素の製造・ 施工プロセス管理手法を付録1に示す。この一連の流れに基づき製造、施工された処分場構成要 素の品質に関する情報は、性能評価における各構成要素の初期条件として扱われる。

米国のユッカマウンテン地層処分場では、実施主体である米国エネルギー省(DOE)は以下の 判断に資するための情報を取得することが原子力規制委員会(NRC)の規制文書で規定されてい る (Nuclear Regulation Committee, 2001)。

- 建設・操業期間中の地下環境及び環境条件の変化が許認可審査で想定された限度内に 収まっているか
- 天然バリアと人工バリアが意図及び予測された機能を果たしているか
 ※これらの情報を得るための取組として、適切と考えられる原位置モニタリング、室内 試験及びフィールド試験、原位置実験が含まれなければならない。

DOE が許認可申請時に NRC に提出する安全解析書には、上記の情報取得に関する内容を含めな ければならない。また、施設の永久閉鎖に係る許認可申請時には、上記の取り組みによって取得 された情報により閉鎖後の期間に関する性能評価の更新が行われる。そのために、建設認可申請 時には、以下の情報を含む品質保証計画を策定しなければならない。

- 地層処分場及びその構造物、システムまたは構成要素が、実際の使用において満足の ゆく性能を発揮する点について適切な確信を得るために必要なあらゆる計画的及び系 統立った措置
- 品質保証には品質管理が含まれ、この品質管理は材料、構造物、構成要素またはシステムの 物理的な特徴に関連する品質保証措置で、材料、構造物、構成要素またはシステムの品質が あらかじめ規定された要件に適合したものとなるように管理する手段を実現する措置

フランスでは、放射性廃棄物等管理法により"可逆性のある地層処分"を行うことが基本とさ れている。規制当局である原子力安全機関(ANS)は、「処分施設及び地質環境の構成要素の状態 を特徴付ける幾つかのパラメータの変遷、及びこの変遷の原因となる主要現象を追跡調査する (ASN, 2008)」ことを実施主体である Andra に要求している。現在検討が進められている Andra のモニタリングプログラムでは、閉鎖後の安全性が予想通り確保されることを確認するために以 下の2つの目的が設定されている。

- システムの変遷が予想通りであることを確認するための、操業期間にわたる処分シス テムの変遷の追跡調査
- 長期安全性に影響を及ぼす様々なプロセスの理解に対する信頼の向上

このモニタリングプログラムは、処分場操業の最初のステップとして設定された「パイロット操 業フェーズ」に開始される予定であり、必要な全てのパラメータのモニタリングが可能な計測器 を一部の廃棄物セルに設置することが検討されている(Andra 2016a)。

スイスでは、回収可能性の考えを取り入れた処分概念「監視付き長期地層処分」の導入が法令 で定められており、Nagra は、地下施設に高レベル放射性廃棄物の処分エリアの他にパイロット 施設、地下特性調査施設を建設する計画としている。パイロット施設では少数の廃棄体を処分す ることにより、廃棄体、埋め戻し材及び母岩に生じる変化や挙動をモニタリングし、予測モデル の妥当性の確認等を実施することになっている。このパイロット施設は、主処分場との間に THMC の相互作用を生じさせず、また、主処分場の主要施設と同じ挙動を示すものである必要が ある (Nagra, 2002; Nagra, 2016)。これは処分場の地質環境が均一と見なせるオパリナスクレ イの特徴を踏まえた処分概念である。



図 2.1-3 諸外国における性能評価に資する取組

(3) 性能評価の入力情報の取得についての考え方

諸外国の検討動向などを踏まえると、性能評価に資する情報を取得するための取組として(サ イト選定段階では施工後の性能要件や設計仕様の設定等の設計に資するものもある)、図 2.1-4 に 示すように、サイト選定段階以前に実施する室内材料試験や実証試験、施工時の品質を管理する ための施工プロセス管理、地下構成要素の変遷を確認するために建設・操業段階に実施する試験 やモニタリングなどがある。これらの取組は、より確からしい性能評価を行うために、例えば原 位置でのモニタリング単独で実施するのではなく、室内試験、実証試験、施工管理、モニタリン グなどの多様な組合せにより実施されると考えることができる。また、これらの考え方は地層処 分に関するモニタリングの国際共同研究プログラム Modern2020 でも示唆されており、建設・操 業段階において地下構成要素の性能に関する追加情報を取得するためのモニタリングが可能であ るが、そこから示される処分場の安全性は必ずしもモニタリングに依拠するものではないとして いる(Modern2020、2017a)。

つまり、性能評価に資する情報の取得は、処分概念や地質環境等を考慮して、現在から処分場 の閉鎖までの期間において実施可能な取組の最適な組合せを検討し、実施することが重要である



図 2.1-4 性能評価に資する情報を取得する取組

2.1.5 性能評価に資する取組の具体化に向けた考え方

(1) 品質保証プログラムと性能確認プログラム

前述したように、諸外国における性能評価に資する情報の取得として、建設前段階、建設・操 業~閉鎖段階において、室内試験、地上・地下実証試験、製造・施工プロセス管理、原位置実験、 モニタリングなど様々な取組が実施される。

本項では、諸外国のこれらの取組を参考とし、わが国に適用可能な取組として具体化していく うえで、「品質保証プログラム(地下構成要素の施工品質に関する取組)」と「性能確認プログラ ム(地下構成要素の変遷挙動に関する取組)」の2つに分けて検討することとした。品質保証及び 性能確認プログラムの定義を表 2.1-4に、品質保証プログラムと性能確認プログラムの関係及び 対象とする範囲を図 2.1-5 に示す。

なお、これらのプログラムを具体化するにあたり、工学的な対応の観点から、対象とする範囲 と期間を次のように設定する。

- 対象物:地下の人工構造物
- ② 期 間:建設・操業段階~再冠水に至るまで

地下の人工構造物の施工品質は品質保証プログラムにより確保され、建設・操業段階における 人工構造物の変遷挙動の評価に資する情報は性能確認プログラムにより取得する。これらのプロ グラムにより取得した情報は再冠水に至るまでの予測評価(性能評価)に反映する。ただし、地 下の人工構造物については、人工構造物の変遷挙動に影響する母岩側(ニアフィールド領域の地 下環境)との関係に留意する必要がある。また、閉鎖までに取得できる工学的な情報によって予 測が反映できるのは再冠水に至るまでの期間であると考え、建設・操業~閉鎖に伴う擾乱を経て 再冠水に至るまでの処分システムの状態をより確からしく予測し、その後の長期にわたる性能評 価に寄与することを目標とする。

| 性能評価に資する情報の取得に関する取組 | 諸外国の取組事例 |
|---------------------------------------|-------------|
| 品質保証プログラム | 製造・施工プロセス管理 |
| 人工構造物を対象として、一定の施工品質(仕様)を確保するための取組。製造・ | (スウェーデン、フィン |
| 施工プロセス管理によって達成するものもあれば、施工物の現物検査などによっ | ランド) |
| て品質を確認することもある。品質保証プログラムをとおして得られた構造物の | |
| 初期の施工後の品質は、その後の人工構造物の変遷挙動に関する確からしい予測 | |
| 評価のための初期状態としてのインプット情報となる。 | |
| 性能確認プログラム | 原位置試験 |
| 構築した処分システムの変遷挙動に関する、より確からしい評価に資するため | パイロット施設 |
| の情報を得るための取組。品質保証プログラムをとおして得られた構造物の初期 | 各モニタリング |
| の施工品質(製造・施工実績)に加え、その後の人工構造物の変遷挙動に関する確 | |
| からしい予測評価のための情報を取得する。性能確認プログラムの対象には、人工 | |
| 構造物と母岩(ニアフィールド領域+α)が含まれ、それらの変遷挙動の把握のた | |
| めに原位置での直接/間接モニタリングや実証試験が行われることもある。 | |

表 2.1-4 品質保証及び性能確認プログラムの定義の例





(2) わが国における品質保証プログラムの具体化に向けた考え方

品質保証プログラムについては、地下に製造・施工する人工構造物の一定の施工品質を確保す るため、材料調達、地上施設での製造、輸送、施工といったプロセスを対象として検討される。

材料調達や地上施設での製造、輸送については、他分野において類似の品質保証方法が多数あ り、地層処分における人工構造物で使用する材料の特性および輸送方法を踏まえて参照すること ができると考えられる。また、施工時の品質管理の具体化については、近年の一般産業界におい ても取り入れられつつある工法規定方式による品質保証方法が参照できると考えられる。

また、北欧や米国で整備された地層処分事業に特化した具体的なプログラムなどを先行事例と して参照することも可能と考えられる。具体的には、前述したスウェーデンやフィンランドにお ける製造・施工プロセス管理の手法が挙げられる。 ー例としてフィンランドにおける処分坑道埋め戻し材の製造・施工プロセス管理手法の概要を 図 2.1-6 に示す。フィンランドにおける処分坑道の埋め戻し材には、ベントナイトブロックおよ びペレットが検討されている。処分坑道の埋め戻し材に割り当てられた安全機能は、「緩衝材の固 定」および「移流による大量流出の抑制」である(POSIVASKB, 2017)。これらの安全機能から 処分坑道埋め戻し材が満たすべき条件(性能目標)は透水係数1×10⁻¹⁰m/s及び膨潤圧1MPaで ある。しかし、これらを施工中に直接測定することは困難であるため、事前の室内試験や実証試 験により、これらの数値を管理するためのパラメータである乾燥密度に換算し施工中に確認する こととしている。ただしベントナイトが、特定の乾燥密度とモンモリロナイト量において必ずし も膨潤圧と透水係数が一定でないことから、例えばSKBでは、適応型設計と称されるアプロー チを採用し、性能目標と乾燥密度の関係を実験室において確立し、その関係を設計に反映させて 必要となるブロックの乾燥密度を算出している。ブロック等の製造プロセスは正しい特性を持つ 構成要素を生産するように調整される(付録1参照)。

他の人工バリア(キャニスタ、緩衝材、閉鎖材)も含め、フィンランドにおける製造・施工プ ロセス管理手法の詳細を付録1に示す。



図 2.1-6 フィンランドにおける処分坑道埋め戻し材の製造・施エプロセス管理手法の概要 ((Posiva, 2012d)より作成)

(3) わが国における性能確認プログラムの具体化に向けた考え方

性能確認プログラムの具体化に向けては、諸外国における先行的な検討事例を踏まえると、以下の2つの方向性が考えられる。

方向性①:処分場原位置での測定やモニタリングを主体としたプログラム 方向性②:原位置を模擬した環境(別の場所)での試験等を主体としたプログラム

方向性①は米国やフランスの事例と類似する方向性である。米国の場合は、坑道の埋め戻しを 伴わないアクセス性が容易な処分概念であることもあり、性能確認プログラムの一部として建設・
操業段階から最終閉鎖までの原位置におけるモニタリングを実施する計画である(DOE, 2008)。 DOE が計画した取組みを付録1に示す。フランスでは、"可逆性のある地層処分"を行うことが 基本とされており、回収可能性を考慮した設計では、廃棄体へのアクセス性や段階的な埋め戻し など、モニタリング機器を実装するうえでも有利(機器の回収面でも有利)な処分概念が採用さ れている。

方向性②はフィンランドの事例と類似する方向性である。Posiva が採用している KBS-3 概念 は、ベントナイトバリア(緩衝材及び処分坑道埋め戻し材)の健全性の維持が重要な要素である ため、モニタリング活動などによるバリアの擾乱を起こさないようにしている(Modern2020, 2017a)。そのため Posiva のセーフティケース戦略では、処分場システムとその変遷に関する情 報の大部分は研究所試験と原位置試験の組み合わせを通じて入手するものとしている。また、原 位置でのモニタリングを減らし、試験等でパラメータを取得する考えも示されており(Posiva, 2012f; Modern2020, 2019a)、計器や配線等によるバリア機能の低下などの懸念を小さくする取 組と考えられる。

これらの性能確認プログラムの方向性には、表 2.1-5 に示すような技術的対応や研究開発の指 向性が想定される。方向性①では地下の状況をより直接的に把握できることから、規制等に対し て処分システムの状態に関する説明性が高まる。一方で、測定すべき項目に対してモニタリング 機器をどこまで開発すべきなのか際限がなくなる可能性がある。

方向性②は、原位置を模擬した場所での計測や試験の結果に基づく予測を主体として原位置の 状態を評価するものである。解析や試験に基づく予測技術を高度化する必要があるものの、原位 置測定やモニタリングを最小化することができる。

| | 方向性① | 方向性② |
|----------------------|---|--|
| プログラム具体化の 方向性 | 処分場原位置での測定やモニタリング を主体 | 原位置を模擬した環境(別の場所)での試験 等を主体 |
| 研究開発の指向性 | 原位置測定・モニタリング技術の高度 化を指向 | 原位置測定・モニタリングに係る活動の最小 化を指向 |
| 各方向性を実施した 場合の技術開発 | モニタリング技術の高度化 ↓ 地下原位置で必要な測定が可能 ↓ 予測技術の役割は小 | 予測技術の高度化 ↓ 地下原位置の状態・機能の変遷の 予測が可能 ↓ 原位置測定・モニタリングの役割は小 |

表 2.1-5 性能確認プログラムの具体化に向けた2つのアプローチ(方向性)の想定

一方で、性能確認プログラムの具体化に向けたアプローチの選択や開発の方針(方向性)は、 各国の処分概念、地質環境、規制要件に依存する部分が多い。そのため、わが国の性能確認プロ グラムの具体化を検討するには、わが国の処分概念、地質環境、規制要件の現状を考慮する必要 がある。わが国では地層処分に関する規制は現時点で策定されていないが、長期的な安全性が担 保された処分場が構築されたことを最終閉鎖段階までに確認するためには、その間のモニタリン グ活動に一定の役割が期待されることが想定され、今後の安全規制の要求やステークホルダから の要望、経済性などを考慮してモニタリング計画が策定されることになる(NUMO, 2018)。

性能確認プログラムの具体化には長期安全性を担保するための技術的な課題に加えて、このようなステークホルダへの説明性や事業の効率化・合理化といった考えの間にトレードオフの関係が生じることが想定される(図 2.1-7)。性能確認プログラムを最終化させる段階では、トレード

オフのバランスを踏まえて両者の相互補完となるような中間点を模索し、「現実的なプログラム」 を調整する必要がある。

原子炉等規制法によれば、廃棄事業者はその事業を開始しようとする時には廃止措置を実施す るための方針を作成して、公表しなければならないとされている。そのため、品質保証プログラ ムや性能確認プログラムは事業許可申請段階までに最終化する必要がある。事業許可申請段階で プログラムが最終化されてから必要な技術や装置の開発整備に着手することが合理的ではあるが、 その後の建設・操業開始までにこれらの整備が間に合わない可能性は否定できない。そのような 懸念にも留意すれば、性能確認プログラムの当面の研究開発は2つの方向性や選択の幅を見据え て取り組んでいく必要がある。



性能確認プログラムの具体化に関する『2つの方向性』と『対応の幅』



図 2.1-7 性能確認プログラムの具体化の方向性とトレードオフの関係

2.1.6 わが国における品質保証・性能確認プログラムに関する研究開発課題

品質保証プログラムや性能確認プログラムの具体化に向けた研究開発の目的は、適用技術の実 現性や制約を示し、現実的なプログラムの最終化に向けた検討や調整を支援することである。こ れらの研究開発の初期段階では、特に参照可能な先行・類似検討事例に乏しい性能確認プログラ ムについては、まずは、方向性1および2に関する理想的なプログラムを関係者間で共有できる レベルに概念化する必要がある。そのうえで、その実現における研究開発課題を抽出することが 必要と考えられる。

今後の研究開発に向けて必要と考えられる課題を以下に示す。

○品質保証プログラム:

わが国で検討されている地下構成要素の使用材料や施工方法を考慮した施工プロセス管 理手法の整備が挙げられる。ただし、施工プロセス管理手法を整備する際には、わが国の多 様な地下環境に柔軟に対応できるようにしておく必要がある。

○性能確認プログラムの方向性①:

地下構成要素に求められる要求性能への影響が可能な限り小さい測定・モニタリング技術 の開発が必要である。また、プログラムが最終化される段階(事業許可申請段階)までには、 原位置測定やモニタリングの対象パラメータ及び頻度や詳細度を特定するとともに、それら のパラメータの取得に必要な技術開発が完了されていなければならない。

○性能確認プログラムの方向性②:

処分施設の操業~閉鎖までの地下構成要素の性能確認に必要なデータのうち、原位置を模 擬した試験室、実験施設(地上・地下)での試験、精密調査段階の地下調査施設を活用した 実証試験等により把握することができるデータと原位置でモニタリングしなければならな いデータの整理が必要である。また、変遷挙動の予測結果の妥当性が確認されたモデルの開 発等が挙げられる。

2.2 処分場構成要素の状態把握に係る関連ハード技術の高度化

2.2.1 背景および目的

前節のように「性能確認プログラム」では、性能確認方法の1つとしてモニタリングが挙げら れる。人工バリアの変遷挙動は「性能確認プログラム」の重要な要素であり、POSIVA 社が検討 した長期安全性の観点で重要な人工バリアシステムの変遷に関するプロセス(POSIVA、2012b) では、緩衝材と埋め戻し材のプロセスとして、熱移動、水の流入と膨潤、パイピングとエロージ ョン、化学的エロージョン、間隙水の放射化、微生物活動と凍結と解凍などが挙げられ、そのう ち「熱移動」、「水の流入と膨潤」に対してモニタリングが必要とされている。埋め戻し材での温 度や圧力などの分布や経時変化が得られれば、より適切な変遷プロセスを知ることができると考 えられる。光ファイバセンサ技術は温度やひずみの分布を計測する方法であるが、埋め戻し材の 浸潤や温度変化のモニタリング方法として利用できる可能性がある。

また、IAEA (IAEA、2001) は原位置での直接的なモニタリングの実施における懸念の1つと して、「モニタリング機器の設置に伴うバリアを通過する経路の形成(処分場内または周辺におけ る放射性核種の移行ポテンシャルの増加)」があり、モニタリング機器や通信ケーブルによる、核 種移行経路の形成の可能性が懸念されている。計測ケーブルを敷設せずに計測結果を坑外へ通信 する無線伝送技術および計器等へ無線で給電する無線給電技術は、その懸念に対する対応策の1 つで、計測項目の種類に関わらず利用できるため、モニタリング共通の技術と考えられる。

本節では、今後のモニタリング計画の策定等に柔軟に対応できるように、諸外国で検討が進め られている新たなセンサ技術や従来のセンサ技術ではあるが新たな計測方法によりこれまでとは 異なる物理量を計測または推定する技術を調査した。また、無線技術に対する信頼性を向上させ るために、地下環境での試験に適用している無線伝送技術の長期運用性の確認及び無線給電技術 に関する要素試験等を実施した。

2.2.2 新たなセンサ技術に関する開発動向の調査

地層処分が先行する諸外国で利用が検討されている計測技術について適用事例等を調査した結果(原環センター,2019a)を踏まえ、国内外の地層処分分野で用いられている光ファイバセンサの適用状況、ひずみや温度計測以外の新たな利用方法について調査を行った。また、埋め戻し材を例として、その性能確認に利用できる可能性のある光ファイバセンサによる計測事例を抽出するとともに課題を検討した。なお、光ファイバセンサに関する国内外の事例調査は、公開文献で報告されているスイスのNagra、フランスのAndra、わが国の中深度処分における検討事例を対象とした。

(1) 新たなセンサ技術に関する事例調査

諸外国の地層処分の分野で地下構成要素を対象として検討されている計測項目とそれらの計測 技術を表 2.2-1 に整理した。ひずみゲージ式や振動弦式のセンサの利用が多いことに加えて、光 ファイバセンサは複数の計測項目に利用されていた。光ファイバセンサは、光ファイバ自体がセ ンサとして機能し、光ファイバケーブルの任意の点の測定値を得ることができるため、1本の光 ファイバセンサにより多点計測(分布計測)が可能である。

Posiva (Posiva, 2012c) では、原位置における人工バリアのモニタリングで対象とすべきプロ セスの検討が進められている。その一部を抜粋して表 2.2・2 に示す。ここでは、原位置モニタリ ングの対象として緩衝材や埋め戻し材での熱移動、水の流入と膨潤が挙げられている。また、国 際共同研究 Modern2020 でも同様の検討が行われており、そのテストケースで特定されたプロセ スおよび関連パラメータのスクリーリング (Modern2020, 2019a) においても、同様のことが示 されている。光ファイバセンサは基本的には熱とひずみを測定する方法であるが、測定方法や得 られたデータの処理などの工夫により、計測対象を広げられる可能性がある。そのため、光ファ イバセンサに着目して、地層処分分野での活用事例を調査した。

| 計測項目 | 計測技術 | 計測項目 | 計測技術 | | | |
|---------------------|-------------------------------------|------|---|--|--|--|
| 温度 | 光ファイバセンサ 熱電対 測温抵抗体 サーミスタ | 圧力 | ひずみゲージ 圧力計 光ファイバセンサ | | | |
| 湿度 | スマートセル | 間隙水圧 | 間隙水圧計 振動弦式間隙水圧計 | | | |
| 応力 | ひずみゲージ | 金属腐食 | 超音波技術 | | | |
| 変位 | 伸縮計 ひずみゲージ 振動弦センサ 光ファイバセンサ | 放射線 | か射線検出器 シンチレーション検出器 半導体型検出器 光ファイバセンサ | | | |
| ひずみ | 振動弦センサ 光ファイバセンサ | pH | 光ファイバセンサ イオン選択電極、pH 計 | | | |
| 含有量 | マイクロ波センサ TDR センサ | 水素検知 | 光ファイバセンサ | | | |
| コンクリートのひ び割れ | ひずみゲージ 亀裂変位計 光ファイバセンサ | | | | | |

表 2.2-1 主な計測項目と計測技術 (原環センター 2019a から抜粋)

| N 4 | | | a / |
|------------|--------------|------------|-------|
| | プロセス名 | モニタリング分野 | 棄却理由※ |
| 人工バリアの | 熱移動 | 人工バリア/岩盤力学 | |
| 変化に対する | 水の流入と膨潤 | 人工バリア/水理学 | |
| プロセス | パイピングとエロージョン | | 実験室 |
| (緩衝材と | 化学的エロージョン | | 実験室 |
| 埋め戻し材) | 間隙水の放射化 | | 実験室 |
| | モンモリロナイトの変質 | | 実験室 |
| | 随伴鉱物の変質 | | 実験室 |
| | 微生物活動 | | 実験室 |
| | 凍結と解凍 | | 氷河期 |

表 2.2-2 長期安全性の観点で人工なバリアシステムの変遷に関連するプロセス (緩衝材と埋戻し材)(Posiva, 2012f, 原環センター, 2019a)

※棄却理由:原位置における人工バリアのモニタリング対象から棄却する理由

実験室:実験室は原位置によるモニタリングよりも、実験室における研究や、

ONKALO での試験に基づく方が妥当であるもの

(2) 分布型光ファイバセンサ技術の概要

光ファイバセンサには数多くの種類があり、例えば、計測物理量(ひずみ、温度、磁界など) による分類、光の検知量(強度・波長・偏波など)による分類、センサ部(ポイント型・準分布 型・分布型)による分類などがある(保立ら,2012)。センサ部の範囲による光ファイバセンサの 分類を図 2.2-1に示す。代表的な光ファイバセンサのひとつであるファブリペロー干渉計は"ポ イント型センサ"に、ファイバブラッググレーティング(FBG: Fiber Bragg Grating)は"準分 布型センサ"にそれぞれ分類される(Glisic B et al, 2008)。



図 2.2-1 センサ部の範囲による光ファイバセンサの分類

放射性廃棄物処分施設のモニタリングに適用すべく検討が進められている光ファイバセンサの 多くは"分布型センサ"である。分布型センサでは、光ファイバ内に特殊な加工などをすること なく、汎用の光ファイバそのものがセンサとして機能するため、光ファイバケーブルの全長にわ たる情報を得ることができる。そのため、一本の光ファイバで多点計測が可能であり、ひずみゲ ージ式などの電気センサ("ポイント型センサ"に相当)を多数配置して多点計測を行うよりも ケーブル断面を最小限にできるため、バリア機能への影響を低減することが期待されている。 分布型センサでは、光ファイバ内で生じる散乱光を利用している。光の散乱は、物質に光があ たったときに、物質を構成する分子や粒子に光が衝突し、反射される現象である。光ファイバ内 に光が入射すると、すべての箇所でわずかな散乱光が生じる。通信分野において散乱は、入射光 の信号強度が減る原因となるため避けるべきものである。しかし、この散乱光のスペクトル波形 には散乱発生箇所の様々な情報が含まれるため、センサとして利用することができる。光ファイ バ内の散乱光としては、レイリー散乱光、ブリルアン散乱光およびラマン散乱光の3つが知られ ている(図 2.2-2 参照)。それぞれの散乱光を用いた分布計測の一覧を表 2.2-3 に示す。



図 2.2-2 散乱光のスペクトルと計測対象

| 散乱光 | 周波数 | 散乱要因 | 計測項目と 用いられる分布計測 | 使用ファイバ の種類 |
|-------|-----------------------------|---------------------------------------|---|---------------------------------|
| レイリー | 入射光 と同じv ₀ | 媒質内の密度 揺らぎ | ・強度が損失や屈折率などに依存 ・損失分布に用いられる手法、近 年ひずみ分布 DSS*や温度分布 DTS**にも用いられはじめた | 主にシングル モード |
| ブリルアン | ν ₀ ±10 数 GHz | 音波(音響フォノン) | ・周波数がひずみ・温度に依存 ・主に DSS で用いられる手法 | 主にシングル モード |
| ラマン | ^{v 0} ±10 数 THz | 分子振動 (光学フォノン) | ・強度が温度に依存 ・主に DTS で用いられる手法 | 主にマルチ モード (シングル モードも可) |

表 2.2-3 各散乱光による分布計測

*DTS : Distributed Temperature Sensing

* * DSS : Distributed Strain Sensing

いずれの散乱光を利用した場合でも、散乱光が発生した場所を特定する必要があり、最もシン プルな方法はパルス光を入射する方法である。パルス光が伝搬するに従い、いたるところで散乱 光が発生し、散乱光のうち、入射端に近い箇所ほど早く、遠い箇所ほど遅く帰還することとなる。 パルス光の入射から散乱光が帰還するまでの時間と光ファイバ内の光速から、散乱光が発生する 位置を特定できることになる。この手法は OTDR (Optical Time Domain Reflecmetry) と呼ば れる。分布計測技術の基本構成は図 2.2-3 のとおりであるが、使用する散乱光によって計測すべ き周波数が異なるため、基本的にはそれぞれに応じた計測器 (光分析器)を用意する必要がある。



(3) 光ファイバ技術の処分事業への適用事例調査

"分布型センサ"の特長を活用して、各国で放射性廃棄物処分施設のモニタリングに適用する ための検討が行われている。本節では、既往調査(原環センター,2019a)などを通じて得られた 知見をもとに、Nagra、Andra 及びわが国の中深度処分の取組状況について事例を調査し、計測 項目や計測対象、計測方法等の観点から整理した結果を表 2.2-4 に示す。

| 調査対象 | 段階※ | 計測項目 | 計測対象 | 計測方式 | 技術的課題など |
|-----------|-----------------|------------------|-----------------------|-----------------|--|
| Nagra | 原位置試験 | 温度分布 | 坑道 | ラマン | キャリブレーション 計測器の故障 解析モデル データベース |
| | 実証試験 (試験体) | 乾燥密度 (温度分布) | 埋め戻し材 (ベントナ イト) | ラマン | 光ケーブル キャリブレーション |
| | 原位置試験 (TRL5) | 力学的評価 (ひずみ分布) | 坑道 | ブリルアン (レイリー) | 工学的解釈 計測器の故障など |
| | 原位置試験 (TRL6) | 温度分布 | 坑道 | ラマン (Wエンド) | 複合効果 計測器の故障など |
| Andra | ラボ | 放射線 | — (坑道) | レイリー | 基礎検証レベル特殊ファイバが必要 |
| | ラボ | 水素濃度 | — (坑道) | ブリルアン レイリー | 基礎検証レベル特殊ファイバが必要 |
| | ラボ | 内空変位 | 坑道 | ブリルアン | 解析モデル |
| | 原位置試験 | (ひすみ分布) | , u.c. | レイリー | |
| 中深度 処分 | 原位置試験 | ひび割れ (ひずみ分布) | 低拡散層 | ブリルアン レイリー | 網羅的な検証 |
| | 原位置試験 | 温度分布 | アクセス坑 道 | ブリルアン | 光ケーブル キャリブレーション |
| | ラボ | 圧力分布 | 低透水層 | レイリー | 機構の解明 |

表 2.2-4 分布型光ファイバセンサ技術の適用例一覧

※段階 原位置試験:原位置における実寸大レベルでの試験

実証試験:実寸大より小さいものの模擬した供試体での試験

ラボ:原理や機構を検証するための基礎的な室内での試験

1) 適用事例1(トンネル壁面の温度とひずみ)

光ファイバセンサによるトンネル壁面での温度やひずみ計測は Nagra、Andra やわが国の中深

度処分の技術開発で実施されている。ここでは Modern2020 に報告されている Nagra での実寸 大試験(Vogt,T. et al, 2019) について報告する。

Mont Terri の地下空洞施設 URL で実施されている実証試験(FE 試験: Full-Scale Emplacement Experiment)では、これまでの既存計器に加えて、光ファイバセンサが設置されている。試験結果を通じて、いくつかの光ファイバセンサのケーブルの比較し、実施手順やシステム上の課題を抽出するなど、実用的な取り組みがなされた。実証試験で利用された光ファイバセンサの概要を以下に示す。

・光ファイバケーブルに沿った温度とひずみを測定

数 km の長さを 0.1~2.0 m の空間分解能で計測

- ・特長:センサ部には電源が不要であり、耐腐食性を有し、長距離にわたって高い空間分解 能で分布情報が得られる
- FE 試験での分布型光ファイバモニタリング 分布型温度センサ(DTS、ラマン方式):ボアホール、トンネル壁面分布型ひずみセンサ (DSS、ブリルアン・レイリー方式):トンネル壁面(ボアホールは無し)
- ・異なる光ファイバモニタリングシステムの試験と評価を、処分場に類似の条件下として、 FE 試験で行う
- ・Modern2020の WP4 (Demonstration of monitoring:モニタリングのデモ試験) に参加

トンネル壁面には、温度及びひずみ計測用に、ケーブル被覆の硬柔、被覆-光ファイバ間の一体化具合及びメーカーなど、特性の異なるファイバケーブルがトンネル軸方向に設置されている。 実証実験のトンネルは直径3m、長さ50mの円形である。計測前には、光ファイバケーブルに ドライヤーや冷却スプレーを用いて温度変化を与えることで、設置位置が特定された。

また、温度分布センサ(DTS ラマン方式)は、温度の変化分を計測することができるが、絶対 温度を得るためにはキャリブレーションが必要となる。そのキャリブレーションにはいくつかの 方法があるが、ラマン散乱光信号比(ラマン散乱のうち高周波側の散乱と低周波側の散乱の強度 比)を用いることが最適であるとされている。また、センサの正確度(真値との差)を向上させ るためには、正確に温度制御された恒温槽を用いてキャリブレーションを行う必要がある。温度 の平均的な測定誤差は、光ファイバケーブルや計測器によって異なるが 0.1~0.3℃であった。

2) 適用事例2(ベントナイトの乾燥密度)

Nagra では、光ファイバセンサによる温度分布の計測方法を利用して、埋め戻し材の乾燥密度 を推定する検討が行われている。この計測方法は、電熱線と光ファイバケーブルを一体化したア クティブ DTS 用光ケーブル (加温型光ケーブル)を用いて、加温による温度上昇時と下降時の温 度変化から密度と水分量を推定するものである。Grimsel Test Site (GTS) では、基礎的な実験 が行われている (Sakaki et al, 2019)。

実験では、異なる乾燥密度(1350~1790 kg/m³、熱伝導率で 0.256~0.559 W/mK に相当)の ベントナイトを用いて、2 W/m の加熱を 3 時間行い、加熱過程における温度分布の計測(計測点 間隔 0.117 m、計測時間 30 秒)して、計測結果から得られた熱伝導率と、キャリブレーションカ ーブによる熱伝導率と乾燥密度の関係から乾燥密度を推定している。熱伝導率に及ぼす試験体の 不均質性の影響などの課題はあるが、この試験条件の範囲では試験結果は信頼できる測定結果が 得られている。

3) 適用事例3(圧力分布)

わが国の中深度処分に向けた研究開発では、低透水層におけるベントナイトの膨潤圧の測定に

光ファイバセンサを適用する取り組みが行われている(原環センター,2019b)。既往の研究で は、加力装置を用いたベントナイト下の光ファイバセンサに側圧を与える試験によって、段階的 な荷重にともなうひずみ量の変化が得られたため、実際の低透水層への適用を想定し、ベントナ イトへの通水により発生する膨潤圧を用いて光ファイバセンサに側圧を与える試験を行い、圧力 分布計測への適用を確認する試験が行われている(原環センター,2018b)。その結果、光ファイ バセンサによるひずみの測定値が150 μSTよりも大きい範囲では、ロードセルの測定結果から 求めた膨潤圧と光ファイバセンサで測定したひずみには直線関係がみられることから、想定した 試験条件での圧力測定への光ファイバセンサの適用性が確認されている。

(4) 地下構成要素の状態把握への適用に向けた課題等の整理

1) 温度分布及びひずみ分布

ラマン散乱光を用いた温度分布計測、ブリルアン散乱光やレイリー散乱光を用いたひずみ分布 計測については適用事例が多く、既に充分に実用レベルにある。埋め戻し材の温度分布計測への 適用を考えた場合には、光ファイバケーブルの設置方法などが課題となる。

2) 埋め戻し材の乾燥密度

温度の変化量から熱伝導率を求めて乾燥密度を推定するため、埋め戻し材の材料や配合に応じ た熱伝導率と乾燥密度の関係を取得しておく必要がある。同様の計測方法により、埋め戻し材の 充填・未充填の判別や、温度特性の違いによる水の浸透位置なども把握できる可能性がある。

3) 圧力分布

技術的には室内の要素試験で圧力分布への適用性を確認している段階であり、光ファイバケー ブルの設置方法やキャリブレーションなど課題は多い。埋め戻し材の膨潤圧測定への適用を考え た場合には、光ファイバケーブルの固定方法などが課題となる。

2.2.3 地下環境における無線伝送技術の実証試験

無線伝送システムに対する信頼性を向上させるために、原子力機構幌延深地層研究センター (以下、幌延 URL) で実施されている人工バリア性能確認試験に設置した無線伝送装置(原環 センター, 2014)の運用実績を確認するとともに、瑞浪 URL を例として、地下 500 m から地上 までの無線伝送システムの装置構成を検討した。

(1) 無線伝送技術の実証試験

平成 26 年度から幌延 URL の人工バリア性能確認試験で実施中の無線伝送試験について、計測 開始からこれまでの計測期間中に発生した注水ポンプの停止などの主要な外部事象と計測データ の関係を整理し、システムが長期間正常に動作していることを確認した。

地中無線装置の設置位置を図 2.2-4、図 2.2-5、図 2.2-6 に示す。装置は、緩衝材ブロックに 3 台(間隙水圧計 2 台:002 局・004 局、土圧計 1 台:003 局)、埋め戻し材ブロックに 4 台(間隙 水圧計 2 台:005 局・008 局、土圧計 2 台:006 局・007 局)の計 7 台(Geokon 社製)を設置し ている。また、表 2.2-5 に地中無線装置の通信条件を示す。



図 2.2-4 地中無線送信装置の設置位置(全体図) (原子力機構, 2019)



図 2.2-5 地中無線送信装置の設置位置(A-A 断面) (原子力機構,2019)



図 2.2-6 地中無線送信装置の設置位置(C-C および D-D 断面) (原子力機構, 2019)

| 局番 | センサ名※ | 送信器 No. | センサ種別 | センサ No. | 測定時刻 | 通信時刻 | 設置断面 |
|-----|----------|----------|-------|---------|----------|----------|------|
| 002 | PPWL001 | H0795487 | 間隙水圧計 | 1302377 | 毎日 0,12時 | 火曜 16:15 | A-A |
| 003 | TPWL001 | H0795488 | 土圧計 | 1400012 | 毎日 0,12時 | 火曜 15:15 | A-A |
| 004 | PPWL002 | H0795489 | 間隙水圧計 | 1302376 | 毎日 0,12時 | 火曜 14:15 | A-A |
| 005 | PPBWL001 | H0795490 | 間隙水圧計 | 1302375 | 毎日 0,12時 | 火曜 13:15 | C-C |
| 006 | TPBWL001 | H0795508 | 土圧計 | 1400013 | 毎日 0,12時 | 火曜 12:15 | C-C |
| 007 | TPBWL002 | H0795509 | 土圧計 | 1332567 | 毎日 0,12時 | 火曜 11:15 | D-D |
| 008 | PPBWL002 | H0795510 | 間隙水圧計 | 1302374 | 毎日 0,12時 | 火曜 10:15 | D-D |

表 2.2-5 地中無線装置の通信条件

無線伝送試験は平成26年12月から令和2年2月時点までの約63ヶ月間で実施しており(令和2年3月以降も継続中)、全てのセンサが所定の頻度(2回/日)で継続的にデータを取得できている。一方で、坑内のノイズレベル上昇に起因すると考えられる通信障害が度々発生している。しかし、本システムでは、毎週の定期通信で過去4週間分のデータを重複して送信しているため、通信障害が生じても計測データは自動的に補完され、これまでにデータ欠損は起きていない。63ヶ月間の測定データの例として、002局(緩衝材と孔壁岩盤の境界)と004局(緩衝材中)の間隙水圧計の計測結果を図2.2-7、図2.2-8に示す。





平成 26 年度 12 月の注水開始から平成 29 年度 3 月までの注水装置に関する外部イベントについて、原子力機構の人工バリア性能確認試験における「注水開始」、「注水流量の増加・減少」、「注水停止・再開」の 3 つにわけて計測データと外部イベント(原子力機構, 2019)との関係を確認した。ここでは、計測データの例として「注水流量の増加・減少」について以下に記載する。

○注水流量の増加・減少時の計測結果

平成 28 年 10 月 3 日から平成 28 年 11 月 8 日の約 1 か月に渡り、注水流量の増加および減少 が繰り返された。はじめに平成 28 年 10 月 3 日に、試験孔における流量を 150 mL/min から 1000 mL/min に増加、続いて 10 月 31 日に試験孔における流量を 1000 mL/min から 300 mL/min に、埋め戻し材部における流量を 300 mL/min から 0 mL/min に減少させている。ま た、11 月 8 日には試験孔における流量を 300 mL/min から 1000 mL/min に、埋め戻し材部に おける流量を 0 mL/min から 300 mL/min に増加させている。この期間における間隙水圧のデ ータを図 2.2-9 に示す。はじめに 10 月 3 日の注水量増加に伴い 002 局、004 局、005 局、008 局で水圧が増加し、続く 10 月 31 日の注水流量減少に伴い水圧が低下した。また、11 月 8 日の 注水量増加にあわせて、002 局、008 局は比較的速やかに水圧上昇の応答を示す一方、005 局 は、20 日間程度かけて緩やかに水圧が上昇する傾向がみられた。また、004 局については、11 月 8 日の注水流量の増加後、20 日ほどの日数を経過しても水圧の回復はみられなかった。 また、土圧の計測データを図 2.2-10 に示す。2016 年 10 月 3 日の注水量増加に伴い 003 局-008 のいずれも土圧が増加し、2016 年 10 月 31 日の注水流量減少に伴い間隙水圧が低下してい る様子がみられた。間隙水圧計の挙動にも共通するが、緩衝材ブロック内部に設置された 003 局 では、注水開始直後では反応が鈍く、1 ヶ月ほどかけて 0.05MPa ほど圧力が上昇した。埋め戻し 材ブロックに設置された 006 局および 007 局では、注水量増加に伴い速やかに土圧が上昇を開始 した。

以上の結果より、無線伝送装置により伝送された各センサの計測データの挙動は、注水装置に 関する「注水開始」、「注水流量の増加・減少」、「注水停止・再開」の外部イベントと概ね対応し ていることから、無線伝送装置が長期間に渡ってデータ送信を継続していることが確認された。



図 2.2-9 流量増加・減少時における間隙水圧データ



図 2.2-10 流量増加・減少時における土圧データ

(2) 立坑での無線伝送システムの概要検討

1) 立坑での無線伝送システムの概念

無線伝送を行うシステムは、小型送信器、中継装置、受信装置から構成される。図 2.2-11 に大 型送信アンテナを接続した中継装置による無線伝送概念を示す。計器を接続した小型送信器は測 定対象近傍に配置され、測定データを無線で中継装置に送信する。中継装置は小型送信器から送 られてきた測定データを受信装置へ中継する役目を持つ。受信装置は地上付近に配置され、送ら れてきた測定データを受信して上位のシステムへ受け渡す役目を持つ。また、受信装置には中継 装置に対する時刻同期の機能に加え、通信不具合時に中継装置に対して経路変更や内部に一時保存されたデータを再送させるなどの指令を送る機能を持つ。

例題とした立坑において、小型送信器は深度 500 m の立坑内部に設置され、1 段目の中継装置 は深度 500 m 地点付近に設置する。中継装置には大型送信アンテナを接続し、3 段の中継で地表 に設置される受信装置へデータを送信する。受信装置には中継装置の時刻合わせや、多系統存在 する場合の系統切り替えなどの指令を中継装置に送る能力を持たせるため、受信装置にも指令送 信用として中継装置と同様の大型送信アンテナを接続する必要がある。

また、従来の中継装置では、送信アンテナと受信アンテナを共用していた。しかしながら、大 型送信アンテナの場合はコイル素線を太くして巻き数を減らすことで大電流を流せるようにし、 出力を上げることができるが、受信アンテナは微弱な信号を受信するために巻き数を多くする構 造にしなければいけない。そのため、受信アンテナと送信アンテナを別に設ける必要があり、中 継制御装置内にアンテナ切り替え装置の実装が必要となる。



図 2.2-11 大型送信アンテナを接続した中継装置による無線伝送概念

2) 大型送信アンテナの概念設計

大型送信アンテナの設計においては、フランスのトゥルヌミールにおける長距離実験 (Modern2020, 2019c)の結果をもとに、アンテナの目標出力や構造を検討する。実験はトンネ ル坑口から1,200 m 地点に送信器(3 m×3 m アンテナ)を設置し、約270 m 上の地表に受信器 を配置して行われ、地表までの通信距離約270 m において受信器の受信強度が2-3 mVrms を 確保できており、無線送信可能な距離であることが確認されている。送信器と受信器を地表に配 置した結果(受信強度)を送信器の標準的な性能とした場合、実験での受信強度はその性能を下 回り、受信強度は1/10程度であった。この原因として送信器を配置したトンネル内部に敷設され ていたレールの影響が考えられる。 ① 大型送信アンテナの構造及び能力

ここで、トゥルヌミールでの実験結果をもとに立坑での通信距離やアンテナ形状について検討 する。

• 通信距離

実験結果より、鋼製支保工等の影響を受けた信号の受信レベルは、影響を受けない場合に 比べて 1/10 程度にまで低下していた。鋼製支保工等の構造により通信可能な距離は大きく 変わるものの、瑞浪 URL を想定するケースにおいては、これらの影響を鑑みて中継装置 1 台分の通信受け持ち距離を 170 m と設定し、全体の中継段数を 3 段とする。

・ 必要な受信強度

検討対象とする立坑の想定ノイズレベルを 2 mVrms とした場合、信号を識別して受信する ために必要な信号の受信強度はノイズの 3 倍 (S/N 比 = 3) となり、6 mVrms 以上となる。 ・ 受信強度と必要な受信強度に対する比率

トゥルヌミールでの実験における通信距離170m地点での受信強度は約12mVrmsであり、 目標とする必要な受信強度6mVrmsの2倍の出力で信号が届いている。したがって、必要な 受信強度の観点から、トゥルヌミールの実験時に流した電流の1/2に減少できる。

アンテナ面積

大型アンテナの受信のための面積は、立坑の内壁面に形成する。立坑内径を 6.5 m と想定すると、立坑内面積の 33.18 m²に相当する。トゥルヌミールの実験でのアンテナ面積は 9 m²でることから、深度 500 m の立坑とトゥルヌミール実験とのアンテナ面積比は 3.69 倍となる。

アンテナの構造

アンテナを構成するコイルの素線には高電圧対応の AWG12(断面積 3.3 mm²)を用いる。 トゥルヌミールの実験時のアンテナは巻き付け数が 20 周で構成されており、同様に巻き付け 数を設定した場合、大型送信アンテナの直径は 6.5 m であることから全長は約 410 m、抵抗は 2.7 Ω、質量は約 11 kg となる。

アンテナの出力

アンテナの出力はアンテナ面積と電流に比例する。大型送信アンテナに流す必要がある電流 は、トゥルヌミールの実験時の電流の 0.14 倍(=1/2×1/3.69)となる。トゥルヌミールの実験 では、駆動電圧 48 V、電流 9 A であったため、同電圧の場合、大型送信アンテナには 1.3 A 程 度電流を流すことができれば通信が可能になると思われる。

② 大型送信アンテナの設置

・ アンテナ線の設置治具

アンテナは同形状で円形状に巻いたコイル線を用いる必要があるが、設置場所が立坑壁面で あること、立坑が直径 6.8 m と大口径であることから、事前に立坑壁面に設置治具を設置し、 それを使ってアンテナ線の設置を行う。設置治具は長さ 50 cm 程度で、20 mm 間隔にコイル 線を掛ける溝を持ち、立坑壁面の円周上に 50 cm-60 cm 間隔で固定する。コイル線は設置治 具の溝に沿って配線するため、ほぼ同形の円形状のアンテナを得ることができる。

・ コイル線の仮固定とアンテナ特性確認および通信特性試験

設置治具に巻き付けの1周分である約20m ずつコイル線をかけて仮固定する。各コイル線の端部同士は仮の接続とする。そして、アンテナ特性確認試験や通信特性試験を行い、電磁波出力の調整を行う。

3) 立坑での無線伝送システムの技術的課題

大型送信アンテナを利用した無線伝送技術の技術的課題としては、以下の項目があげられる。

- ・ 立坑内壁に構築する大型送信アンテナは、周辺の鋼製部材の影響を受け、出力が増減する可能 性がある。よって、立坑内壁にアンテナを構築した後に、通信特性を実測して確認する必要が ある。実測した通信特性によっては、大型送信アンテナの消費電力の想定が変わり、中継制御 装置に搭載する電源の電圧や容量を変更する必要性が生じる。
- ・ 大型送信アンテナを中継制御装置に接続して駆動させるために、中継制御装置内部に高出力 アンプと送信・受信アンテナの切り替え装置を搭載する必要がある。

2.2.4 地下環境における無線給電技術の高度化

無線給電技術は離れた2点間に電力を受け渡す技術であり、本検討では磁界共振結合方式によ る給電方法を採用した(原環センター,2019a)。この給電方法では、共振現象を利用して電力を 送るため、電源の周波数、送電器の共振周波数、受電器の共振周波数の3つの周波数を一致させ る必要がある。無線給電装置の概念設計に向けた課題点を表 2.2-6に示す。本年度は設計手法の 机上検討結果を踏まえて、要素試験装置を製作し、室内試験により給電効率を確認した。また、 給電コイルを地下に埋設するためのパッケージング方法について検討し、要素試験により給電効 率への影響を確認した。

| 課題点 | 平成 30 年度 | 平成 31 年度 |
|---------------|----------|----------|
| 給電システムの設計方法 | ○机上検討 | ○室内試験 |
| 一度に多数のコイルに送電す | ○机上検討 | |
| る場合の複雑な系の考え方 | | |
| パッケージング方法 | | ○室内試験 |

表 2.2-6 無線給電装置の概念設計に関する課題

(1) 無線給電装置を適用する条件の設定

室内要素試験では、図 2.2-12 に示す送受電コイル 1:1 の磁界共振結合(S·S)の等価回路を 用いた。ここで S·S とは、コイルと共振コンデンサが直列に接続されていることを示す。この等 価回路に必要な送受電器の項目として、送電コイルのインダクタンス L₁、内部抵抗 n、送電側の 共振コンデンサ C₁、受電コイルのインダクタンス L₂、内部抵抗 n、送電側の共振コンデンサ C₂、 相互インダクタンス Mがある。コイルのインダクタンスはコイル形状により決定されるため、L₁ と L₂を設定するためには、コイル形状を決定する必要がある。内部抵抗 n と n は、設定したコ イル形状でコイルを製作した後、コイルを実測することにより求めることができる。相互インダ クタンス M は送受電コイルの位置関係により決定されるため、送受電コイル間距離を設定する 必要がある。



図 2.2-12 送受電コイル1:1の磁界共振結合(S-S)の等価回路

①送電電力

送電された電力で計器等を直接稼働する場合には、無線給電装置に接続する計器の種類や数量 が必要となる。ここでは、給電された電力をバッテリーに蓄電し、それを用いて計器等を稼働さ せることを仮定した。送電電力は10W程度を想定した。

②送受電コイル

カ学プラグ (NUMO, 2018) を越えて給電することを想定し、コイルの直径 3 m、送電距離(コイル間距離) 3 m と設定した。ただし、給電効率はコイル直径とコイル間距離の関係が同じであれば、コイルの大きさに依らず一定となるため、室内試験では 1/6 にスケールダウンして、コイル直径を 500 mm、送電距離を 500 mm として試験装置を製作した。

送受電コイルは硬質塩化ビニール管(VU)の VU500 にリッツ線(240 ヨリ、0.1 mm)を巻い て製作した。製作は5巻き、10巻き、15巻きの3種類とし、送受電コイルの100 kHz における インダクタンスと抵抗について、LCRメーターを利用して計測した。この結果より、巻数が増加 すると、性能が向上する(Q値が増加する)ことが分かったため、試験は15巻の送受電コイルを 利用することとした。試設計に用いる15巻きの送受電コイル(直径 500 mm)及び送受電コイ ルの特性を図 2.2-13 に示す。



| | 送電コイル | 受電コイル |
|--------|-------|-------|
| インダクタ | 262.3 | 263.0 |
| ンス[uH] | | |
| 抵抗[mΩ] | 414 | 406 |
| Q | 398 | 407 |

図 2.2-13 15 巻きの送受電コイル

(2) 給電システムの設計方法に関する検討

1) 給電システムの試設計

給電システムの試設計は、机上検討による概念設計方法(原環センター,2019a)に基づいて実施した。コイル間距離を250-1000 mm として、理論計算から求めた受電コイル側の抵抗値と給電効率の関係を図 2.2-14 に示す。この結果から、各コイル間距離で給電効率が最大となる受電

側コイルの抵抗値が存在することがわかる。室内要素試験では、受電コイル直径と同じコイル間 距離 500 mm として無線給電の要素試験装置を作製するため、要素試験結果と図中のコイル間距 離 500 mm の給電効率を比較して、概念設計方法の妥当性を確認した。



図 2.2-14 受電コイル側の抵抗値と給電効率の関係

2) 要素試験装置の製作

製作する要素試験装置は、電源部・送電部・受電部・変換部・バッテリーの5つから構成される。試験装置の構成を図 2.2-15 に示す。



図 2.2-15 試験装置の詳細構成

①電源部

電源部は、交流 100 V の電圧を直流 12 V に変換する定電圧電源と、直流を交流 100 kHz に変換するインバータ (PCB-30/GP-BASE、ビーアンドプラス社製) で構成した。電源部を図 2.2-16 に示す。

②送電部、受電部

送電部は、共振用のコンデンサと、15巻のコイルで構成し、送電部の共振用のコンデンサと電 源部のインバータは、機器の小型化を目指して同じ回路上に実装した。共振コンデンサは、9.9 nF (4.7 nF:1個、2.2 nF:1個、1 nF:3 個を並列に接続)を受電コイルのインダクタンス 262.3 uH と直列に接続した。送電部の共進周波数は、98.8 kHz である。また、受電部は送電部と同様 のコイルと共振用のコンデンサで構成した。共振コンデンサは、9.67 nF(8.2 nF:1個、1 nF: 1個、0.47 nF:1個を並列に接続)を受電コイルのインダクタンス 263 uH と直列に接続した。

送電部の共振周波数は 99.8 kHz である。送電部を図 2.2-17 に、受電部を図 2.2-18 に示す。

③変換部

変換部は、受電コイルで受け取った交流の電力を直流に変換する整流回路と、バッテリーの仕

様に合わせて電圧と電流を調整する DC-DC コンバータ (PCB-30/GP-REMOTE-5V、ビーアン ドプラス社製)と、定電流定電圧回路で構成した。定電流定電圧回路にはリチウムイオン充電器 (MC1:XTAR)内の回路(出力:4.2V,500mA)を使用した。整流回路と DC-DC コンバータ および定電流定電圧回路を図 2.2-19 に示す

④バッテリー

バッテリーに利用したリチウムイオン電池(NCR18650B, Panasonic 社製)を図 2.2-20 に示 す。この電池は 1.6 A の電流で充電を行うと 180 分程度で満充電になる。空の状態の電池電圧は 3 V 程度であり、そこから 1.6 A で充電されると 4.2 V 程度までは徐々に電圧が上昇する。その 後、電圧はほぼ一定となり、電流は減少しながら満充電になる特性を有している。



図 2.2-16 電源部 (左:定電圧電源、右:インバーター)



図 2.2-17 送電部(左:共振用のコンデンサ、右:送電コイル)



図 2.2-18 受電部(左:送電コイル、右:共振用のコンデンサ)



図 2.2-19 変換部(左)と定電流定電圧回路(右)



図 2.2-20 リチウムイオン電池

3) 室内試験および試験結果

室内試験では、①設計方法の確認のための電子負荷を利用した試験、②バッテリーへの充電の 確認試験を実施した。

①電子負荷を利用した試験

給電効率は、受電コイル側の抵抗により変化するため、バッテリーの充電状況により給電効率 は変化すると考えられる。そのため、最初の検討としてはバッテリーへの給電ではなく、受電コ イル側の抵抗が一定となる電子負荷を利用して室内試験を行い、設計値である図 2.2-14 に示さ れるコイル間距離 500 mm の給電効率と比較した。

電子負荷を利用した試験は以下の条件で行った。試験時の測定箇所を図 2.2-21 に示す。

- ・送受電コイル:15巻コイル
- ・給電距離(送受電コイル間距離):500 mm
- ・コイルの位置関係:送受信コイルの中心軸を合わせて正対
- ・定電圧電源の出力電圧:12V
- ・電子負荷の電流: 0~1.5 Aの間で 0.1 A間隔で可変

試験では、電子負荷の電流を可変させて、図 2.2-21 に示す各電流電圧 I_1 (A), V_1 (V), I_2 (A), V_2 (V)、 $I_{1 \text{ total}}$ (A)、 $I_{2 \text{ total}}$ (A)、 $V_{2 \text{ total}}$ (V)を測定した。また、(式 2.2-1) と(式 2.2-2) から送 受電コイル間の給電効率 η_{coil} と試験装置のシステム効率(電子負荷が受け取った電力/インバータ への入力電力) η_{total} を算出した。



図 2.2-21 電子負荷を利用した試験と測定箇所

送受電コイル間の給電効率と試験装置のシステム効率の測定結果を図 2.2-22 に示す。また、 図 2.2-14 のコイル間距離 500 mm における給電効率と、要素試験結果から得られた送受電コイ ル間の給電効率を図 2.2-23 に示す。

図 2.2-22 の送受電コイル間の給電効率と試験装置のシステム効率の差異は、電源部→送電部 の直流→100 kHz、および受電部→変換部の 100 kHz→直流の変換時に生じる損失であると考え られる。その損失の大きさについては、電子負荷部分の抵抗が高い部分では、送受電コイル間の 給電効率と試験装置のシステム効率の差異は 8%程度であるが、電子負荷部分の抵抗が低い部分 では、その差異が 20%程度と大きくなった。この損失をより少なくすることで、効率がよい無線 給電を行うことができる。また、図 2.2-23 で示した結果より、コイル間の給電効率は、理論値の 傾向と同様の結果であり、100 kHz 部分においては、損失が少ない試験装置を製作することがで きた。



図 2.2-22 電子負荷の抵抗と給電効率の関係



図 2.2-23 コイル間の給電効率における理論値と試験結果の比較

②バッテリーへの充電の確認試験

図 2.2-15 に示した構成の要素試験装置を使用して、以下の条件でバッテリーを対象とした給 電試験を行った。

- ・送受電コイル:15巻コイル
- ・給電距離(送受電コイル間距離):500 mm
- ・コイルの位置関係:送受信コイルの中心軸を合わせて正対
- ・定電圧電源の出力電圧:12V

給電試験では、試験装置の構成において図 2.2-24 に示す各電流電圧 I1 (A)、V1 (V)、I2 (A)、 V2 (V)、I1 total (A)、I2 total (A)、V2 total (V)を測定した。室内試験の状況を図 2.2-25 に、バ ッテリーの電圧と電流の経時変化(バッテリへの充電状況)を図 2.2-26 に示す。

バッテリーの充電特性では 1.6 A の電流で充電を行っているが、本試験では、使用した定電流 定電圧回路の特性で 0.5 A の電流で充電を行った。そのため、バッテリーの充電時間が 3.2 倍 (=1.6/0.5)であり、バッテリーの充電電圧が 4.2 V で一定となるまでの時間が 350 分程度にな ったと考えられる。



図 2.2-24 バッテリーへの充電確認における測定箇所



図 2.2-25 バッテリーへの充電確認の室内試験状況



図 2.2-26 バッテリー電圧と電流の経時変化

(3) コイルのパッケージング方法の検討

無線給電装置は気中や水中あるいは土中で使用される。そのため、装置のコイル近傍における 媒体によりコイルが受ける影響を室内試験により把握し、コイル筐体の材質、形状やコイルの収 納方法等を検討した。また、筐体内を保護する充填材について、土中等への埋設を念頭に材質を 選定し、充填材の有無による給電性能の変化について検討した。

1) パッケージング材料の選定

ー般に、電子部品等の内部の充填材には樹脂が利用される場合が多い。無線給電装置において もパッケージング材料(コイルの保護材)には、製作性を考慮して樹脂の材料を選定した。この 樹脂にはエポキシ樹脂、ケイ素樹脂、ウレタン樹脂が考えられるが、土中に埋設することを考慮 し、熱、酸・アルカリ、水などへの耐性に優れ、液体状で充填でき、充填材としての気密性に優 れたエポキシ樹脂を選定した。

2) 試験装置の製作

試験では所定品質のコイルに、エポキシ樹脂により一定の厚みの保護層を設けた装置を用いた。 コイルは 100 mm のアクリルパイプをフレームとして、リッツ線(90 ヨリ,0.07 mm)を 15 回 巻いて製作した。コイルの概要を図 2.2-27 に示す。また、保護層の充填厚さは、コイルの外形方 向に 5 mm、10 mm、15 mm と厚くなるように変化させて 3 種類製作した。試験装置の概要を図 2.2-28 に示す



図 2.2-27 コイルの概要



図 2.2-28 試験装置の概要(保護層の厚さ 15 mm)

コイルの電気特性と充填材の有無の関係性を把握するために、コイルのインダクタンス Lと内 部抵抗 Rをインピーダンスアナライザー(HIOKI, IM3570)を用いて 100 kHz で測定した。ま た、 $Q = 2\pi fL/R$ の関係からコイル性能 Qを算出した(fは周波数)。測定結果を表 2.2-7 に示 す。測定結果では、充填材の有無や厚みを変化させてもインダクタンスの値は変化しなかった。 充填材がある場合には内部抵抗が 10 m Q程度低下したが、これは測定の誤差であると考えられ る。また、充填材がある場合に Q値は 5 上昇したが、これは内部抵抗が低下したことに起因して いるため、充填材の影響ではない。これらの結果から、充填材の有無によりコイル性能が低下す ることはなく、給電性能はコイル性能とコイル間の位置関係により決定されるため、充填材の有 無は給電性能に影響を及ぼさないことがわかった。

| | 充填厚み5mm | | 充填厚み 10 mm | | 充填厚み 15 mm | |
|---------------|---------|------|------------|------|------------|------|
| | なし | あり | なし | あり | なし | あり |
| <i>L</i> [uH] | 39.2 | 39.7 | 39.4 | 39.6 | 39.5 | 39.4 |
| $R[m\Omega]$ | 296 | 285 | 297 | 282 | 301 | 284 |
| Q | 83 | 88 | 83 | 88 | 82 | 87 |

表 2.2-7 充填材の厚みによるコイルのインダクタンスと内部抵抗

3) 試験結果

試験では、給電効率に影響が大きいと考えられる塩水がコイル周辺に存在する状況を想定した。 塩水には人工海水(マリンアート SF-1)を使用した。人工海水は純水にマリンアートを添加して、 6 種類の濃度(PSU)10、19、29、38、48、57 を準備した。濃度(PSU)は液体1kgに含まれる固形物質をg単位で表したもので、濃度(PSU)38は日本近海における海水濃度とほぼ同等である。また、6 種類の人工海水以外に、水道水と純水の2つを媒体として、計8種類の媒体で室内試験を行った。

室内試験は、媒体の入った水槽にコイルを置き、インピーダンスアナライザーを用いて 100 kHz でコイルのインダクタンスと抵抗を測定した。試験を行う水槽と LCR メーターの設置状況を図 2.2-29 に示す。測定条件の組み合わせを以下に示す。

コイル4種類:保護層なし(パッケージングなし)、保護層5mm、10mm、15mm 媒体8種類 :人工海水(10PSU、19PSU、29PSU、38PSU、48PSU、57PSU)、 水道水、純水(0PSU)



図 2.2-29 充填材の厚さ5mmのコイルの測定状況(左:媒体無し、右:媒体中)

試験により測定されたインダクタンス *L* と内部抵抗 *R*、コイル性能 *Q*を図 2.2-30 に示す。なお、コイル性能 *Q*は $Q=2\pi fL/R$ から算出した。これらより、下記のことが分かる。

・インダクタンスL:充填材の有無や人工海水の濃度が変化しても、L値は変化しない

・内部抵抗 R:充填材ありの場合、空気・純水・水道水中での変化量は小さい

充填材の有無に関わらず、海水濃度が上昇すると R は増加する傾向にある この増加傾向は、充填材が無い場合の方が顕著である

・コイル性能 Q:内部抵抗が増加した場合、Qは低下する





図 2.2-30 コイル周辺の媒体の影響

4) コイル近傍の媒体による影響

試験結果より、コイル近傍の媒体により給電効率に影響を及ぼす要因として、コイル性能の変 化とコイル間で生じる浮遊容量の増加による共振周波数の変化の2つが考えられる。

①コイル性能の変化

コイル近傍に媒体がある場合、充填材(保護層)が存在すれば Qが高くなるが、充填材の厚さ は影響を及ぼさない。充填材の有無に関わらず、人工海水濃度が濃くなると Q が低下し、また、 充填材が存在する場合、充填材の厚さによらず Q の低下が緩和される。

②コイル線間で生じる浮遊容量の増加による共振周波数の変化

コイル近傍の媒体や充填材の有無によらず、コイルのインダクタンスは変化しない。コイルの 浮遊容量が変化するとコイルのインダクタンスが変化するが、今回対象とした媒体では、浮遊容 量の変化は無視できるほど小さかった。 2.3 まとめ

2.3.1 品質保証体系及び性能確認の手法や知見に資する基盤情報の整備

地層処分施設の製作・施工技術に係る品質保証体系の整備にあたり、『品質保証』『性能評価』 『性能確認』『モニタリング』といった用語やそれらの関係を諸外国事例から調査した。

諸外国の取組を参考とし、わが国に適用可能な取組として具体化していくうえで、「品質保証プ ログラム(地下構成要素の施工品質に関する取組)」と「性能確認プログラム(地下構成要素の変 遷挙動に関する取組)」の2つに分けて検討することとした。さらに、性能確認プログラムについ ては、諸外国における先行的な検討事例を踏まえると、以下の2つの方向性が考えられる。

- ▶ 方向性①:処分場原位置での測定やモニタリングを主体としたプログラム
- ▶ 方向性②:原位置を模擬した環境(別の場所)での試験等を主体としたプログラム

これらのプログラムの研究開発に向けて、品質保証プログラムと性能確認プログラムの方向性① および方向性②について、それぞれ技術課題を挙げた。

品質保証プログラムは、わが国で検討されている使用材料や施工方法を考慮した施工プロセス 管理手法の整備が挙げられる。ただし、施工プロセス管理手法を整備する際には、わが国の多様 な地下環境に柔軟に対応できるようにしておく必要がある。

性能確認プログラムの方向性①の具体化に向けた技術課題として、地下構成要素に求められる 要求性能への影響が可能な限り小さい測定・モニタリング技術の開発が必須である。また、プロ グラムが最終化される段階までには、原位置測定・モニタリングの対象パラメータ及び頻度・詳 細度が特定されているのに加え、パラメータ取得に必要な技術の開発が整備されていなければな らない。

性能確認プログラムの方向性②では模擬施設(地上・地下)での試験や精密調査施設等を活用 した実証試験により、妥当性が実証された変遷挙動予測モデルの開発が挙げられる。

2.3.2 処分場構成要素の状態把握に係る関連ハード技術の高度化

新たなモニタリング技術として地下構成要素の状態把握のための光ファイバセンサの適用事例 について調査を行った。また、モニタリングの共通技術として通信ケーブルが不要な無線伝送技 術及び無線給電技術に着目して検討を行った。

光ファイバセンサによる地下構成要素の状態把握への適用性では、スイスの Nagra、フランス の Andra、わが国の原環センターにおける L1 低レベル廃棄物のための中深度処分を対象に国内 外の地層処分プロジェクトで用いられている光ファイバセンサの適用状況、新たな利用について 調査を行った。その結果、光ファイバセンサは原位置での温度やひずみのモニタリングに利用さ れているとともに、埋め戻し材のモニタリングに利用できそうな技術として、Nagra におけるベ ントナイトの乾燥密度の測定、わが国の中深度処分における圧力分布計測に対する取組が新しい 技術として抽出された。光ファイバセンサを用いた乾燥密度や圧力の測定は、まだ技術的な完成 度が低く、基礎技術を含めた開発が必要である。

無線伝送技術の実証では、幌延 URL での実証試験を継続し、計測結果と人工バリア性能確認 試験での注水等の外部要因との関連を整理するとともに、立坑での無線伝送システムの大型送信 アンテナの概要を検討した。その結果、幌延 URL での実証試験は、データ欠損なく順調に継続 されており、注水等の外部要因に対する挙動の計測ができている。また、立坑で利用する大型送 信アンテナの具体化ができた。今後は、無線伝送技術をより長期に実施するための運用技術につ いても検討が必要と考えられる。

無線給電技術の高度化では、無線給電技術を用いた装置を原位置実証するための課題点(シス テムの設計方法、パッケージング方法)を検討し、室内試験を通して確認した。その結果、採用 した給電システム設計方法は有効であること、受電側のバッテリーへの充電が可能であること、 コイル近傍に塩水等の媒体があっても、5 mm 程度の保護層があれば、無線給電の性能に大きな 影響は与えないこと、また、保護材としてはエポキシ樹脂が利用できることが確認できた。

参考文献

ANDRA (2016) : Dossier d'option de sûreté – Partie après fermeture (DOS-AF)

- ASN (2008) : Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde
- DOE (2008) : Yucca Mountain Repository License Application SAFTY ANALYSIS REPORT Rev.1, DOE RW-053.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター(2014):平成25年度地層処分技術調査等事業処分シ ステム工学確証技術開発報告書(第3分冊)モニタリング関連技術の整備、平成26年3月.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター(2018):平成 29 年度地層処分技術調査等事業 処分シ ステム工学確証技術開発 報告書(第4分冊)モニタリング関連技術の整備、平成 30 年 3

月.

- 原子力環境整備促進・資金管理センター(2019a):平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層 処分に関する技術開発事業 地層処分施設閉鎖技術確証試験 報告書、平成 31 年 3 月.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター(2019b):平成 30 年度低レベル放射性廃棄物の処分に 関する技術開発事業 地下空洞型処分施設機能確認試験 報告書、平成 31 年 3 月.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター(2019c):公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理 センター、平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 平成 30 年度地層処分施設閉鎖技術確証試験 報告書、平成 31 年 3 月.
- 原子力発電環境整備機構(2010):放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングと初期ベース ラインに関する検討, NUMO-TR-10-01.
- 原子力発電環境整備機構(2018):包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の実現一 適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築一レビュー版, NUMO-TR-18-03.
- 保立和夫,村山英晶(2012):光ファイバセンサー入門,光防災センシング振興協会.
- IAEA (2011) : Monitoring of geological repositories for high level radiooactive waste, IAEA TECDOC-1208, 2001.
- IAEA (2012) : The Safety Case and Safety Assessment for disposal of Radioactive Waste, Safety Standards Series, Specific Safety Guide No.SSG-23.
- Modern2020 (2017a) : Deliverable D2.1: Repository Monitoring Strategies and Screening Methodologies.
- Modern2020 (2019a) :Deliverable D2.2, Monitoring Parameter Screening: Test Cases.
- Modern2020 (2019b) : Deliverable D6.5, Modern2020 Project Synthesis, Repository Monitoring: Strategies, Technologies and Implementation.
- Modern2020 (2019c) : Development and Demonstration of Monitoring Strategies and Technologies for Geological Disposal. Deliverable D3.2 Wireless data transmission systems for repository monitoring • Work Package 3, Task 2. Modern2020.2019Svemar C.

- NAGRA (2002) : Project Opalinus Clay, Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Technical Report 02-05.
- NAGRA (2016) : The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland, Technical Report 16-02.
- Nuclear Reguration Committee (2001) : 10 CFR Part 63:Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada.
- OECD/NEA (2013) : The Nature and Purpose of the post-closure Safety Case for Geological Repositories.
- Posiva (2012a) : Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto, Synthesis 2012, Posiva 2012-12 (2012).
- Posiva(2012b): Canister Production Line 2012, Design, Production and Initial State of the Canister, Posiva 2012-16.
- Posiva (2012c) : Buffer Production Line 2012, Design, Production and Initial State of the Buffer, Posiva 2012-17.
- Posiva (2012d) : Backfill Production Line 2012. Design, Production and Initial State of the Deposition Tunnel Backfill and Plug. Posiva Report POSIVA 2012-18 (2012).
- Posiva(2012e): Design, Production and Initial State of the Underground Disposal Facility Closure, Posiva 2012-19.
- Posiva (2012f) : Monitoring at Olkiluoto a Programme for the Period Before Repository Operation, POSIVA 2012-01.
- Posiva SKB (2017) : Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Conclusions and recommendations from a joint SKB and Posiva working group. Posiva SKB Report 01, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sakaki, T., Lüthi, B. F., Vogt, T., Uyama, M., Niunoya, S. (2019) : Heated fiber-optic cables for distributed dry density measurements of granulated bentonite mixtures: Feasibility experiments, Geomechanics for Energy and the Environment, 17, 57–65.
- 資源エネルギー庁(2019):諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について.
- SKB (2011) : Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, SKB TR-11-01.
- SSM (2008) : The Swedish Radiation Safety Authority's regulations concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste, SSMFS 2008:21
- STUK (2013) : Guide YVLD.5 (2013) DISPOSAL OF NUCLEAR WAST.
- Vogt, T., Fisch, H., Garitte, B., Lüthi, B. F., Müller, H. R., Reinicke, A, Sakaki, T., Frieg, B., Yeatman, R., König, W. (2019) : What we can learn from a fullscale demonstration experiment after 4 years of DTS monitoring – the FE Experiment, Modern2020 Paris, 2019.

3. 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備 ー坑道シーリングの設計・評価技術の整備-

処分場の閉鎖後に坑道や EDZ が地上と直結する有意な水みちとなることを防止するため、現 在考えられている埋め戻し材やプラグなどのシーリングシステムについて、これらが地層処分シ ステム全体の閉じ込め性能に及ぼす影響を評価するための技術を整備する。

具体的には、地層処分システムの安全評価におけるシーリングシステム性能の考え方の整理に向 けて、ケーススタディを通じて以下の検討を進める。

- シーリングシステムの長期性能を考慮したシナリオ解析
- ・ シナリオ解析に基づく物質移行経路評価
- ・ シーリングシステムに求められる要件の具体化

これらの成果に加え、後述する「坑道シーリングに関わる施工技術の整備」や「坑道シーリン グ技術の性能確認」における成果も体系的に整理・統合し、ジェネリックな観点から多様な地質 環境において適用可能なシーリングシステム設計評価技術を提示する。具体的には、既に処分サ イトが選定され建設許認可申請段階にある諸外国の先行事例などに関する動向調査を行い、処分 場を構成するシーリングシステムに関する目的や要求性能などに関する情報を整理する。そのよ うな諸外国の先行的な検討動向も踏まえ、わが国に適用可能な坑道シーリングシステム設計フロ ーなどの更新・高度化を図る。

平成 30 年度は、わが国のジェネリックな地質環境を想定した上で諸外国における知見も踏ま え、シーリングシステムの安全機能に影響を及ぼす因子・プロセスの整理を行った。併せて、諸 外国における検討動向や国際共同研究事例に関する文献調査を行い、設計技術の観点から、シー リングシステムの目的や要求性能に関する情報を収集・整理した。

平成 31 年度は、平成 30 年度に実施した成果に基づき、わが国のジェネリックな地質環境を想定した上で設計技術の観点から、シーリングシステムの目的や要求性能に関する情報を収集・整理するともに、NUMO が提示している地下施設の設計フローをベースとして既往のシーリングシステムの設計フローの更新を行った。

さらに、シーリングシステムの構成要素である止水プラグに着目し、主にその設計の観点から 止水プラグの幾何形状や配置などに関する数値解析的な検討を実施した。

3.1 シーリングシステム長期性能評価技術開発

3.1.1 背景・目的・研究アプローチ

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、処分坑道やアクセス坑道といった地下空間とその周辺部が主要な核種の移行経路とならないよう、埋め戻し材やプラグ、グラウトなどなどの工 学的対策(以下、シーリングシステム)を講ずることが考えられている。NUMOは、地層処分に よる長期的な安全性を確保するための基本概念である放射性廃棄物の「隔離」と「閉じ込め」を 実現するために、処分場が有すべき具体的な安全機能を定めており、このうち、シーリングシス テムのうち、埋め戻し材や止水プラグに対しては、処分場閉鎖後にシーリング部が放射性物質の 移行経路とならないよう、「坑道およびその周辺が卓越した放射性物質の移行経路となることの 抑制」を安全機能として定めている(NUMO、2018)。また、図 3.1-1 に示す設計フローに従い、 シーリングシステムの設計要件を定めることとしている(NUMO、2018)。坑道およびその周辺 が卓越した移行経路となりうる構造や、その要因となる現象については、これまでに広く研究・ 評価がなされてきており(図 3.1-2)、例えば、設計上の欠陥やシーリング材料の流出(例えば、 杉田ほか、2004、核燃料サイクル開発機構、1999)や岩盤あるいは地下水との相互作用による機能劣化(例えば、原子力機構、2018)などの検討がなされてきている。また、主に掘削影響領域

(EDZ)に起因した、処分坑道沿いあるいは止水プラグ周囲の岩盤などが短絡経路と成りうる可能性もあり、止水プラグの周辺岩盤を回り込む移行経路の評価(例えば、杉田ほか、2005、NUMO、2006)も行われてきている。このように個別事象の現象理解に特化した検討はなされてきているものの、これらがシーリングシステムとして、長期にわたる地層処分の間に、短絡経路となり放射性物質の移行経路と成りうるか、もしくは移行経路となった場合に地層処分システムの長期安全性に対し、どの程度影響し得るものか、あるいはその影響を回避するための設計要件は何か、などについての検討は十分になされていないのが現状である。すなわち、処分システムの長期安全性を確保するために、シーリングシステム全体が有すべき性能に焦点をあてた検討は十分になされていない。そこで、本節の検討では我が国の地質環境条件や処分概念などをベースにシーリングシステムが卓越した移行経路となった場合を想定したシナリオ解析やシナリオ解析に基づく処分システムの長期安全性への影響評価を通じて、より安全性の高いシーリングシステムに求める安全機能や性能の考え方を提示する。



3.1.2 実施概要

平成 30 年度は、諸外国のシーリングシステムの長期性能評価に関する取り組み状況を参照し つつ、本事業において設定するシーリングシステムに求める安全機能の具体化を図るとともに、 安全機能に影響を及ぼす可能性のある因子・プロセスを網羅的に抽出・整理した。その結果、諸 外国においては、「隔離」、「閉じ込め」といった処分システム全体に関わる安全機能に関連し、特 に埋め戻し材に対しては、「放射性核種の移行の制限」に関する安全機能が設定されていることか ら、本事業においてシーリングシステムに求める安全機能として、「シーリング部において移流を 抑制すること」、「シーリング部において遅延性能を有すること」を設定することとした。

平成31年度は平成30年度に設定したシーリングシステムに求める安全機能を軸としたシナリ オ解析を実施し、埋め戻し部(坑道埋め戻し、プラグ等)やその周辺岩盤が卓越した移行経路と なる可能性のあるシナリオを抽出するとともに、抽出したシナリオが処分システムに及ぼす影響 を物質移行解析等により評価した。なお、シナリオ解析およびシナリオの影響度評価を行う際は、 シーリングシステムの劣化・変質を想定した諸外国での安全評価事例を参考とした。これら評価 結果に基づきこれら評価結果に基づき、設計・施工および安全評価の観点からのシーリングシス テムの性能の考え方を整理した。

3.1.3 シナリオ解析

(1) シーリングシステムの機能不全を想定した諸外国の安全評価事例に関する調査・分析

昨年度に調査を行った(原子力機構、原環センター、2019)シーリングシステムの機能不全を 想定した各国安全評価事例のうち、中低レベル放射性廃棄物からの気体状放射性物質のアクセス 坑道等を通じた地表への移行を想定したスイスの事例(オパリナスクレイ)および岩塩を対象と したドイツの事例は本研究で対象とする処分システムと異なるため除外し、それ以外の二つおよ び昨年度の調査には含まれていないが高レベル放射性廃棄物を対象としたスイスの安全評価事例 を含めスウェーデン、フランス、スイスの3か国の事例を対象とした。各国ともに、処分システ ムにおけるクリティカルな安全機能(スウェーデン SR-Site では銅製キャニスタによる超長期閉 じ込め、フランス、スイスでは極めて透水性の低い岩盤(粘土層)による核種移行抑制・遅延) に対する脅威をもたらし得るメカニズムとしてシーリングシステムの機能不全が想定されている。 その上で、シーリングシステムの機能不全に対する安全評価の論証構造は、以下の2点に整理さ れる。

- a. シーリングシステムの設計および施工時の品質管理を適切に行うことにより、長期にわた って坑道が卓越した流動経路および核種移行経路となる可能性を十分に小さくすることが できる
- b. 仮にシーリングシステムの機能が低下したと仮定しても、主要な安全機能(長寿命キャニ スタによる閉じ込め(スウェーデン)、低透水性の粘土層のバリア性能(フランス、スイス)) への影響は小さい

このとき、上記のb.については機能低下に至る具体的なプロセスをシナリオとして想定している わけではなく、what if シナリオとして取り扱っている。すなわち、安全評価においては、シーリ ングシステムの安全機能の低下の可能性が小さいことの論証ではなく、安全機能が低下しても大 丈夫という論証を行うという戦略がとられている。また、シーリングシステムの安全機能の機能 低下をもたらす要因やプロセスの抽出およびその具体的な進展や回避策の検討等は安全評価の分 野よりもむしろ設計や施工および品質管理といった工学的な分野においてテーマとして取り上げ られている。例えば、硬岩系のサイト(スウェーデン)では上流側と下流側にある立坑から処分

場を通過する流れが生じることをシナリオとして想定しているのに対し、軟岩系のサイト(フラ ンス)では、上下流の立坑を介した流れが生じた場合、低透水性の粘土層が有する安全機能が無 力化されてしまう状況を避けるため、アクセス坑道を集中配置する対策が取られている。シーリ ングシステムの劣化を想定したパラメータ設定についても、各国ともに定量的な根拠とともに設 定されているわけではなく、悲観的なパラメータを設定した上で、その想定でも安全機能に対し ては問題がないという論証が取られている。なお、スウェーデンの SR-Site に対しては、スウェ ーデンの放射性安全機関(SSM: Strål Säkerhets Myndigheten)によって、数多くのレビュー が行われているため、シーリングシステムの機能不全を想定したシナリオ (Incompletely sealed repository シナリオ) に対する、規制機関からのコメントの調査を行った。その結果、 Bennet(2012)において、SR-Site におけるシナリオへのアプローチ全般に対して問題ないとの言 及があるとともに、Geier(2015)では、"立坑が2本の場合に処分場のセクションによってはU字 の流路(上流側立坑から地下施設を通過し下流側に至る流れ)が形成されるかどうかである。こ のようなケースは将来の人間の侵入シナリオの一部としては考えにくいが、サイト選定時の調査 井のシーリングの一般的な結果が要因となって発生する可能性がある"とのコメントがあるが、 Incompletely sealed repository シナリオに対する直接的なコメントはなかった。各国の安全評価 事例に関する主要な調査結果については、表 3.1・1~表 3.1・3 に整理した。なお、調査結果の詳 細については付録3を参照のこと。

| 調査項目 | SR-Site (SKB, 2010a, 2010b, 2011) | Dossier 2005 (ANDRA, 2005) | Opalinus (|
|--|--|---|---|
| シーリングシ ステムの機能 不全を想定し たシナリオの 安全評価上の | SR-Site では、シーリングシステムの機能不全を想定した Incompletely sealed repository シナリオを FHA (Future Human Actions)の一環とし て検討している。 顕著な影響が発生する可能性として、銅製キャニスタの腐食を促進する要因 となる酸化性の地表水の地下深部への導入による容器の開口と放射性核種 の溶出及びその後の主要坑道やアクセス坑道を介した地表への核種移行が 生ずるような(悲観的な)シナリオを敢えて想定している。 | Dossier 2005 Argile では、基本シナリオ (Normal evolution scenario) に おける種々の仮定が成立せず一部の安全機能が十全ではないことを想定し た代替シナリオ (Altered evolution scenarios) の検討から、多重バリアシ ステムが将来予測に含まれる種々の不確実性にどの程度の耐性を有するか を評価している。 "Seal failure"シナリオは、上記の代替シナリオ (Altered evolution scenarios) の一つとして想定されているもの。 | HLW 及び SF を対象として, 対して脅威となり得るシーリ 下水流動経路の形成を想定し シーリングシステムの機能低 オを構築している訳ではなく, の影響の規模を把握するため |
| 位置付け | Figure 10-7. Definition of different parts of the studied repository layout. The modelling considers three operational stages (A-C) and three possible grouting levels for each stage. The three stages are indicated by green, turquoise and pink colours. DA = deposition area, MT = transportation and main turnel, $MT = transportation and main turnel, MT = transportation and main tu$ | Shafts B waste repository zone Co waste repository zone Connecting drifts Disposal cell Operating unit CuM.OSES.04.0596.8 | H Fixed-head boundary condition ○ Release point ↑ Water flow ↓ Radionuclide transport ⊗ Seal ■ Backfilling Fig. 1.2-1: Overview of the concep the tunnel system and repository. Opalinus clay にお 想定 |
| | SR-Site における処分場レイアウトの概念 | Dossier 2005 Argile で検討された処分場の概略図 | |
| シナリオ構築 の考え方 | ・処分場の中央エリアの上方のアクセス坑道(斜坑)内の水は、ヒトおよび ウシのための飲料水、ならびに野菜、根作物および穀類の栽培のための潅漑 水としても使用されると仮定される。 ・現在から66.200年後、処分孔と交差する亀裂内の移流によって、キャニ スタ内の使用済み燃料から放射性核種が放出される。放出された放射性核 種は地下水によって処分孔から開放した主要坑道を介して中央エリア上方 のアクセス坑道(斜坑)及びシャフトに移行する。 ・立坑を流れる地下水のみを希釈水量として仮定するという極めて保守的 な仮定を置いている(排水位置となる換気用立坑あるいはアクセス坑道の入 り口(地表部分)において核種を含む水が希釈されずに飲用水及び灌漑用水 として用いられることを想定して被ばく線量を算出している)。 ・開放坑道における放射性核種濃度は、温暖期における開放坑道中の地下水 の交換量によって決定される。 | ・リファレンスケースとして母岩を移行経路とするケース(原則として優先的な移行経路とみなされる)と処分場設備(廃棄物の定置エリアからアクセス坑道までを含む)を経路とするケースが想定された。 ・母岩を移行経路とするケースにおいては、廃棄体パッケージから処分坑道、さらに処分場の施設を通過し母岩中を移行し、全量が天然バリアを通過して生活圏に移行することが想定された ・処分場設備を経路とするケースでは、廃棄体から処分坑道ル、坑道系または母岩へ移行することが想定された。 ・最も悲観的な想定をするため生活圏モデルにおいて水中の放射性核種の濃度が設定され、人は飲料水中または汚染された食物を介して直接均一な濃度の放射線にさらされることが想定された(ANDRA,2005) ・揚水による地下水の流れへの影響や希釈については無視されている。 | ・悲観的な想定として、廃棄体着した放射性核種は坑道系の 座に放出されその後即座は (NAGRA, 2002) ・希釈倍率についての記述は、 |
| シナリオ構築 の根拠につい ての記述 | ・容器開口後の廃棄体からの核種の溶出及びシーリングされていない坑道 を経由した地表への核種移行を評価することにより、一体の銅製キャニス タが早期に腐食開口した場合に生ずる影響(被ばく線量)を算出している。 ・結果、最大線量はリスク上限の14 µ Sv/yを若干上回る25 µ Sv/yとなって いるが、バックグラウンドの線量よりは顕著に低いと推定されている。ま た、バックグラウンド線量に匹敵する影響が生ずるためには、気候変動サイ クルにおける同一の温暖期あるいは寒冷期の期間内に20体以上の銅製キャ ニスタが腐食・開口する必要があり、このような可能性は極めて考えにくい と結論づけている。 | ・上記の水理解析で示された遅い流速で,かつ,坑道内の制限された断面積 でのみ生ずる移流による核種移行の影響は,処分場パネルの全ての面積に おいて生ずる粘土層中の拡散による核種移行に比して顕著に(3桁以上)小 さく,無視し得るほど小さいものとされている。 | ・坑道の透水性を大きく変動 徐々に早期に出現することと はなくいずれの場合も無視し |

表 3.1-1 文献調査結果の概要(1/3)



| 調査項目 | SR-Site (SKB, 2010a, 2010b, 2011) | Dossier 2005 (ANDRA, 2005) | Opal i nus |
|--|---|--|--|
| 安全評価に使用した主要な | ・DarcyTools による hydrogeological conceptual model ・EPANET2 による pipe network model | Alliance による水理、核種移行、化学モデル | ・RNC による Flow model ・PICNIC-TD による核種利 |
| モデル | | | |
| モデル 水理解析にお ける主要なパ ラメータおよ び設定根拠 | ●閉鎖ケースの坑道系の透水係数 1.0×10·10 m/s ●開放ケースの坑道系の透水係数 パイプ・ネットワークモデルによる解析のため設定されていない。 設定根拠:SKB(2010b)に以下の記載がある。 <i>開放状態の主要坑道には大きな容量がある。したがって、地下水流の入口と出口との</i> <i>間の水理水頭差が比較的小さい今日の(引用注:温暖期のこと)境界条件では、主要</i> <i>坑道を通る流れを制限するのは、入口点における透過性土層からの地下水の供給量である。これは、EPANET2管ネットワークモデルを用いたスコーピングシミュレーションによって確認された。(中略)寒冷期の場合、開放状態の主要坑道を通る流れは、</i> <i>坑道にわたる水頭差および坑道における摩擦損失によって支配される。(中略)</i> <i>EPANET 2 管ネットワークモデルを使用して、坑道中の水頭分配を計算した(3.2</i> Methodology for simulation of tunnels, p.19)。 | ●坑道系のシール材の透水係数 K=1.0×10·11 m/s ●坑道系周囲のフラクチャ領域の透水係数 K=5.0×10·9 m/s ※坑道周囲のフラクチャ領域がショートカットになる想定がなされているため、ショートカット発生ケースにおいても基準ケースと同様のパラメータが使用されている。 シール材劣化ケースの透水係数設定根拠: ANDRA(2005)ではシール材に欠陥のある場合に地下水の流動経路となると想定されるフラクチャ領域の透水係数を 5.0×10·9 m/s 及び 1.0×10·6 m/s にした感度解析を実施している。感度解析の結論として以下のように述べられている。 EDZ の性状が、処分場の坑道系、特にシャフトから流出する流れに著しく影響を及ぼすことが確認された。しかしながら、最も悲観的な構成においてさえ、フローは非常に小さいままである。(中略)主要な移動経路は依然として地質学的障壁である。 (7.2.6 Lessons drawn from the seal failure altered evolution scenario, p.509)。 ●周囲の動水勾配シール材の全体的な劣化の表現として、坑道においては比較的迅速な移動が予想されることから、基本シナリオの水理地質学的モ | ●基準ケースの坑道の透水(SF / HLW 処分場の EDZ に シャフトシールについて K ●高透水性ケースの坑道系(SF / HLW 処分場の EDZ に シャフトシールについて最て ※なお、坑道タイプは 6 種書 がそれぞれ設定される。上言 高透水性ケースの透水係数 り、透水係数の設定はあく れている。 SA2 から SA6 のパラメータ ス坑道における現在期待され EDZ の予想される振る舞 Overriding system analyse さらに、以下の記述において 的なケースにおいても流量 いる。 坑道系の透水係数を徐々に は増加していくが、ある程思 SA6 では結果にあまり大差 |
| 水理解析の主 要な結論 | SR-Site の Incompletely sealed repository シナリオにおいて温暖期には主要な流れが 処分領域の通気シャフトから流入し、中央エリア上方のアクセス坑道(斜坑)を通っ て流出する流れであったのに対し、寒冷期には流れが逆転し、氷河のある中央エリア 上方のアクセス坑道(斜坑)から地下水が下方に向かって流入し、氷河のない処分領 | デルにおける処分区域内の最大値に対応する動水勾配 0.2 m/m が計算に採用されている。 ・上記の水理解析で示された遅い流速で,かつ,坑道内の制限された断面積でのみ生ずる移流による核種移行の影響は,処分場パ ネルの全ての面積において生ずる粘土層中の拡散による核種移 行に比して顕著に(3桁以上)小さく,無視し得るほど小さいも | <i>係数に制約されているため</i> p.55)。 ・坑道の透水性を大きく変動 徐々に早期に出現すること はなくいずれの場合も無視 |
| | 域の通気シャフトから上昇して流出するという流れになることが示された。 | のとされている。 N150 100 50 0 1000 2000 3000 4000 5000 6000 X N150 100 50 0 1000 2000 3000 4000 5000 6000 | Tet 1 |
| | 温暖期閉鎖ケースの水理水頭分布 (左)、温暖期開放ケースの水理水頭分布 (中) 温暖期ケースの開放・閉鎖ケースの水理水頭分布の差分 (右) | f f f f f f f f | |
| | 寒冷期閉鎖ケースの水理水頭分布(左)寒冷期開放ケースの水理水頭分布(中) 寒冷期ケースの開放・閉鎖ケースの水理水頭分布の差分(右) | 2000 ¥ 0 | 4217.27、エバ境力中で10歳 |

表 3.1-2 文献調査結果の概要(2/3)



断面に エリアへ流出する流量(上)斜道及び立坑 に存在する流量(下)。BCは基準ケースを 示し SA1~6 は高透水率ケースを示す

表 3.1-3 文献調査結果の概要(3/3)

| 調査項目 | SR-Site (SKB, 2010a, 2010b, 2011) | Dossier 2005 (ANDRA, 2005) | Opalinus |
|-----------------|---|---|---|
| 生活圏につい ての考え方 | ・処分場の中央エリアの上方のアクセス坑道(斜坑)内の水は、ヒトおよび ウシのための飲料水、ならびに野菜、根作物および穀類の栽培のための潅漑 水としても使用されると仮定される。 ・現在から66,200年後、処分孔と交差する亀裂内の移流によって、キャニ スタ内の使用済み燃料から放射性核種が放出される。放出された放射性核種 は地下水によって処分孔から開放した主要坑道を介して中央エリア上方の アクセス坑道(斜坑)及びシャフトに移行する。 ・立坑を流れる地下水のみを希釈水量として仮定するという極めて保守的 な仮定を置いている(排水位置となる換気用立坑あるいはアクセス坑道の入 り口(地表部分)において核種を含む水が希釈されずに飲用水及び灌漑用水 として用いられることを想定して被ばく線量を算出している)。 ・開放坑道における放射性核種濃度は、温暖期における開放坑道中の地下水 の交換量によって決定される。 | ・リファレンスケースとして母岩を移行経路とするケース(原則として優先的な移行経路とみなされる)と処分場設備(廃棄物の定置エリアからアクセス坑道までを含む)を経路とするケースが想定された。 ・母岩を移行経路とするケースにおいては、廃棄体パッケージから処分坑道、さらに処分場の施設を通過し母岩中を移行し、全量が天然バリアを通過して生活圏に移行することが想定された ・処分場設備を経路とするケースでは、廃棄体から処分坑道ル、坑道系または母岩へ移行することが想定された。 ・最も悲観的な想定をするため生活圏モデルにおいて水中の放射性核種の濃度が設定され、人は飲料水中または汚染された食物を介して直接均一な濃度の放射線にさらされることが想定された(ANDRA,2005) ・揚水による地下水の流れへの影響や希釈については無視されている。 | ・悲観的な想定として、廃棄 着した放射性核種は坑道系の 座に放出されその後即座 (NAGRA, 2002) ・希釈倍率についての記述は |
| 安全評価の主要な結果 | ・容器開口後の廃棄体からの核種の溶出及びシーリングされていない坑道を 経由した地表への核種移行を評価することにより、一体の銅製キャニスタが 早期に腐食開口した場合に生ずる影響(被ばく線量)を算出している。 ・結果、最大線量はリスク上限の 14μ Sv/y を若干上回る 25μ Sv/y となって いるが、バックグラウンド線量に匹敵する影響が生ずるためには、気候変動サイクル における同一の温暖期あるいは寒冷期の期間内に 20 体以上の銅製キャニス タが腐食・開口する必要があり、このような可能性は極めて考えにくいと結 論づけている。 | ・前述した水理解析で示された遅い流速で、かつ、坑道内の制限された断面 積でのみ生ずる移流による核種移行の影響は、処分場パネルの全ての面積に おいて生ずる粘土層中の拡散による核種移行に比して顕著に(3 桁以上)小 さく,無視し得るほど小さいものとされている。 | ・坑道の透水性を大きく変動 徐々に早期に出現することと はなくいずれの場合も無視し 10 ¹ ENSI-GO3: 0.1 mSv a ⁻¹ 「でで、 10 ² 10 ⁴ 10 ⁵ 10 ⁶ 10 ⁶ 10 ⁷ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ² 10 ³ 10 ⁹ 10 ² 10 ³ 10 ⁴ 10 ⁷ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ² 10 ³ 10 ⁴ 10 ⁷ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ² 10 ³ 10 ⁴ 10 ⁷ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ² 10 ³ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ² 10 ³ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ⁵ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ² 10 ³ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ² 10 ³ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ² 10 ³ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ⁹ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ⁹ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ⁹ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ⁹ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ⁹ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ⁸ 10 ⁹ 10 ⁹ 10 ⁹ |
| 結論 | ・仮にシーリングシステムの機能が低下したと仮定しても,主要な安全機能 (長寿命容器による閉じ込め) への影響は小さいという論証が行われてい る。 ・軟岩系サイト(Dossier 2005 Argile, Opalinus Clay)とは対照的に主要な 安全機能は銅製キャニスタと考えられているため、シーリングシステムの機 能不全時に発生しうる事象としてアクセス坑道及び主要坑道を経由した循 環流路が想定されている。 ・規制機関より incompletely-sealed repository シナリオについての直接的 な指摘は無かった。多くのレビューにおいても特定の地化学条件やキャニス ターの腐食に関わる物理化学プロセスの理解に重点が置かれているため、シ ナリオへの直接的な言及は見当たらない。 | ・仮にシーリングシステムの機能が低下したと仮定しても、主要な安全機能 (天然バリア)への影響は小さいという論証が行われている。 ・解析におけるシーリングシステムの機能低下に関する透水性の変動幅の 設定については定量的な根拠と共に設定するのではなく悲観的な値を設定 している。 ・天然バリアを無効化する循環流路の形成を回避するため、アクセス坑道を 1か所に集中配置している。 | ・仮にシーリングシステムの (天然バリア) への影響は小 ・解析におけるシーリングシ 設定については定量的な根拠 している。 ・天然バリアを無効化する術 はないが、解析上アクセス坑 |


(2) 影響モードの抽出

3.1.3(1)の文献調査を踏まえ、シーリングシステムの安全機能に関するシナリオの構築において 検討すべき、安全機能に対して重要な影響モード(安全機能が低下する状態)をトップダウン的 に抽出した。抽出にあたっては、検討を行うシーリングシステムを定義するとともに、着目する 機能の定義を行った。その後、シーリングシステムが機能を喪失した際に生じる可能性のある流 動パターンをシーリングシステム毎に抽出し、安全機能に対する影響を整理した。さらに、流動 パターンの組み合わせを網羅的に評価し、安全機能に対する重要な影響モードを抽出した。

1) 対象とするシーリングシステム及び着目する機能の定義

本検討では、NUMO包括的技術報告書(NUMO、2018)におけるシーリングシステムの設計 例を参考に検討対象とするシーリングシステムを定義した。シーリングシステムとしては、地下 坑道(処分坑道、主要坑道、連絡坑道)埋め戻し材、アクセス坑道埋め戻し材、止水プラグ(連絡 坑道およびアクセス坑道)、力学プラグ(処分坑道)、坑口プラグ(アクセス坑道)が挙げられる。 本検討では、安全機能として「シーリング部において移流を抑制すること」および「シーリング 部において遅延性能を有すること」に着目するため、これらの安全機能を期待し得る構成要素と して、地下坑道埋め戻し材、アクセス坑道埋め戻し材および止水プラグを抽出し、これらの機能 が失われた場合の処分システムの長期的な安全性へ及ぼす影響モードを抽出することとした。表 3.1-4 に本検討で着目する構成要素およびその機能について示す。なお、抽出したシーリングシス テムが機能喪失する際は、個々の劣化・変質のみならず、周辺に位置する材料との相互作用(コ ンクリート影響など)も影響を及ぼすと考えられることから、坑道支保(コンクリート支保)お よび緩衝材についても、検討対象に含めることとした。

| 構成要素 | 期待する機能 | 検討対象 |
|----------------|--|------|
| 地下坑道埋戻 | 閉鎖後の地下坑道内の地下水流動を抑制し核種移行経路となることを防ぐ | 0 |
| し材 | ・ 処分孔内の緩衝材の膨出を抑制する | |
| アクセス坑道 埋戻し材 | 閉鎖後のアクセス坑道内の地下水流動を抑制し核種移行経路となることを防ぐ | 0 |
| 止水プラグ | 閉鎖後のアクセス坑道及び近傍の EDZ の地下水流動を抑制し核 種移行経路となることを防ぐ | 0 |
| カ学プラグ | 処分場閉鎖以前に処分坑道から埋戻しの完了していない坑道への 埋戻し材の膨出を抑制する 再冠水後の地下坑道埋戻し材及び止水プラグの膨出を抑制する | |
| 坑口プラグ | アクセス坑道への人間侵入を防止する | |

表 3.1-4 着目するシーリングシステムの構成要素および機能

2) シーリングシステムの機能喪失時の流動パターンに応じた影響モードの抽出

シーリングシステムの機能喪失時の流動パターンとして、図 3.1-3 に示す 5 つの流動パターン (部位別)を抽出した。各部位の流動パターンとそれら流動パターンが地下水流動および核種移 行等へ与える影響について、表 3.1-5 に示す。

① アクセス坑道に沿った地下水の流出 ② アクセス坑道に沿った地表水の流入 ③ アクセス坑道を介した透水性構造との連絡



立坑.及75 斜坑及び 近傍のEDZ 近傍のEDZ

④ 処分坑道に沿った地下水の流動





断層等の 透水性構造 (パネルとは 交差しない)

図 3.1-3 シーリングシステムの機能喪失時の流動パターン

| 各部位の流動パターン | 核種移行への影響 | その他の影響※ |
|--|---|---|
| アクセス坑道に沿った 地下水の流出 | 処分場から地表に至る核種移 行経路(短絡経路)の形成 移行媒体の変化(岩盤割れ目 から劣化した埋戻し材(多孔 質媒体)へ) 移行パラメータの変化(実流 速、分配係数、分散長など) | GBIの変化(坑口から生活圏に 至る核種による被ばく) |
| ② アクセス坑道に沿った 地表水の流入 | 核種の溶解度、分配係数及び 実効拡散係数の変化 | 酸化性地下水の流入による深部 の化学環境変化(酸化性環境へ の推移) その他の水質変化(イオン強 度、炭酸ガス分圧の変化など) |
| ③ アクセス坑道を介した 断層等の透水性構造との連 絡 | 処分場から地表に至る核種移 行経路(短絡経路)の形成 移行パラメータの変化(実流 速、分配係数、分散長など) | GBIの変化(断層露頭から生活 圏に至る核種による被ばく) |
| ④ 処分坑道に沿った地下 水 の流動 | 移行媒体の変化(岩盤割れ目 から劣化した埋戻し材(多孔 質媒体)へ) 移行パラメータの変化(実流 速、分配係数、分散長など) | 緩衝材上部境界条件の変化(水 質変化、流量変化) |
| ⑤ 処分坑道を介した大規 模透水性割れ目 との連絡 | パネル内にある大規模透水性 割れ目に進入する核種割合の 増大 | 緩衝材上部境界条件の変化(水 質変化、流量変化) |

表 3.1-5 シーリングシステムの機能喪失時の流動パターン(部位別)とその影響

部位別の流動パターンの抽出に引き続き、これら流動パターンが組み合わされた場合に生じる 影響モードの検討を行った。検討にあたっては、引き続き行うボトムアップ的検討(FEPリスト 等に基づき、シーリングシステムの機能喪失に関与する要因の抽出)において化学的な影響(支 保工の劣化等)や力学的影響(埋め戻し材の膨出・密度低下等)を取り扱うことから、これらの 影響を含めた全体的な相互作用についても考慮するとともに、時系列的展開(影響モードが生じ る順序、発生時期等)についても考慮することとした。流動パターン(組み合わせ)に応じた影 響モードの抽出結果について、表 3.1-6 に示す。なお抽出した影響モードのうち、流動パターン ④、①+④は Dossier 2005の評価事例で取り扱っているパターンであり、流動パターン①+②+ ④は SR-Site の評価事例で取り扱っているパターンである。

表 3.1-6 シーリングシステムの機能喪失時の流動パターン(組み合わせ)に応じた影響モードの抽出

| 流動パターン | 核種移行への影響 | その他の影響 | | | | |
|------------------------|--|--|--|--|--|--|
| ①(地下坑道の シーリングは健全) | 処分坑道から一旦岩盤に移行した核種の一部がアクセス坑道と連絡した割れ目を介してアクセス坑 アクセス坑道の坑口となるものの影響は限定的で他のシナリオで保守的に代表できることから、評 | 道に進入しそこから地表に至る可能性があるとともに、一部の核種の GBI が 面対象から除外 | | | | |
| ②(地下坑道の シーリングは健全) | アクセス坑道から深部に流入した地表水によって水質や岩盤の鉱物組成の変化した領域を通過する核種の移行特性(溶解度、分配係数及び実効拡散係数)が変化する可能性が あるが、影響は限定的で他のシナリオで保守的に代表できることから評価対象から除外 | | | | | |
| ③(地下坑道の シーリングは健全) | 処分坑道から一旦岩盤に移行した核種の一部がアクセス坑道に進入しさらにこれと交差する断層か ものの、影響は限定的で他のシナリオで保守的に代表できることから評価対象から除外 | ら地表に至る可能性があるとともに、一部の核種の GBI が断層の露頭となる | | | | |
| ④(アクセス坑道の シーリングは健全) | 一部の核種が透水性の坑道を介して下流側に至ることにより処分パネル内の天然バリア効果が低 減する可能性 | 緩衝材上部境界条件の変化(流量変化)により人工パリアからの核種移行 率が変化する | | | | |
| ⑤(アクセス坑道の シーリングは健全) | パネル内大規模透水性割れ目に進入する核種割合が増大することにより処分パネルより下流側も 含めた天然バリア全体の性能低下につながる可能性 | 緩衝材上部境界条件の変化(流量変化)により人工バリアからの核種移行 率が変化する | | | | |
| ①+②(地下坑道の シーリングは健全) | ①と②の影響がそれぞれ別のアクセス坑道で同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとし | て表現可能であるため別途検討を行う必要性は小さい) | | | | |
| ①+③(地下坑道の シーリングは健全) | ①と③の影響が異なるパネル等で同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表現可能 | であるため別途検討を行う必要性は小さい) | | | | |
| 1+4 | 処分坑道内の流れによって移行した核種がアクセス坑道に進入し、そこを経由して直接地表に至 る | GBIの変化(坑口から生活圏に至る核種による被ばく) 緩衝材上部境界条件の変化(水質変化、流量変化) | | | | |
| 1+5 | ①と⑤の影響が同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表現可能であるため別途検 | 討を行う必要性は小さい) | | | | |
| 2+3 | ②と③の影響が同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表現可能であるため別途検 | 討を行う必要性は小さい) | | | | |
| ②+④ | 処分坑道が速やかな移行経路となることに加えて核種の溶解度、分配係数や実効拡散係数が変化 する可能性(酸化性) 緩衝材上部境界条件の変化(流量変化)により人工パリアからの 変化する | | | | | |
| Q+(5) | 処分坑道が速やかな移行経路となることに加えて核種の溶解度、分配係数や実効拡散係数が変化 緩衝材上部境界条件の変化(流量変化)により人エバリ する可能性(酸化性) 処分坑道と交差する大規模透水性割れ目に進入する核種の割合増大及び割れ目内の化学環境変化 による核種移行特性変化の可能性 | | | | | |
| 3+@ | 処分坑道内の流れによって移行した核種がアクセス坑道に進入し、さらにこれと交差する断層を 経由して直接地表に至る | 一部の核種の GBI が断層の露頭となる 緩衝材上部境界条件の変化(流量変化)により人工パリアからの核種移行率が 変化する | | | | |
| 3+5 | ③と⑤の影響が同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表現可能であるため別途検 | - 討を行う必要性は小さい) | | | | |
| (4)+(5) | ④と⑤の影響が異なる処分パネルで同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表現可) | 能であるため別途検討を行う必要性は小さい) | | | | |
| 1+2+3 | ①、②、及び③の影響が同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表現可能であるた | め別途検討を行う必要性は小さい) | | | | |
| ①+②+④ | 一つのアクセス坑道から流入した地表水によって核種の溶解度、分配係数や実効拡散係数が変化 その後処分坑道を通じて速やかに下流側に移行し別のアクセス坑道から地表に至る | 溶存酸素によるオーバーパック腐食促進 緩衝材上部境界条件の変化(流量変化)により人エバリアからの核種移行率が 変化する GBI がアクセス坑道の坑口となる | | | | |
| 1+2+5 | ①単独及び②+⑤の影響が同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表現可能である | ため別途検討を行う必要性は小さい) | | | | |
| 1+3+4 | ①+④及び③+④の影響が同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表現可能である) | ため別途検討を行う必要性は小さい) | | | | |
| 1+3+5 | ①、③及び⑤の影響が同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表現可能であるため) | 別途検討を行う必要性は小さい) | | | | |
| 1+4+5 | ①+④及び⑤の影響が同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表現可能であるため) | 別途検討を行う必要性は小さい) | | | | |
| 2+3+4 | 一つのアクセス坑道から流入した地表水によって核種の溶解度、分配係数や実効拡散係数が変化 その後処分坑道を通じて速やかに下流側に移行し別のアクセス坑道から断層を経て地表に至る | 溶存酸素によるオーバーパック腐食促進 緩衝材上部境界条件の変化(流量変化)により人工バリアからの核種移行率が 変化する GBI が断層の露頭となる(地表まで到達している場合) | | | | |
| 2+3+5 | ②+⑤及び③の影響がそれぞれ同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表現可能で) | あるため別途検討を行う必要性は小さい) | | | | |
| 2+4+5 | ②+④及び②+⑤の影響がぞれぞれ同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表現可 | 能であるため別途検討を行う必要性は小さい) | | | | |
| 3+4+5 | ③+④及び⑤の影響がぞれぞれ同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表現可能で | あるため別途検討を行う必要性は小さい) | | | | |
| 1+2+3+4 | ①+②+④及び②+③+④の影響がそれぞれ同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表現可能であるため別途検討を行う必要性は小さい) | | | | | |
| 1+2+3+5 | ①、②+⑤及び③の影響がそれぞれ同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表現可) | 龍であるため別途検討を行う必要性は小さい) | | | | |
| 1+2+4+5 | ①+②+④及び②+⑤の影響がそれぞれ同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表現可能であるため別途検討を行う必要性は小さい) | | | | | |
| 1+3+4+5 | ①+④、③+④及び⑤それぞれの影響が同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表 | 現可能であるため別途検討を行う必要性は小さい) | | | | |
| 2+3+4+5 | ②+③+④及び②+⑤の影響がそれぞれ同時に生ずる可能性(各影響の単純な重ね合わせとして表: | 現可能であるため別途検討を行う必要性は小さい) | | | | |
| ()+(2)+(3)+(4)+(5) | 1 +2+④、2+3+④及び2+⑤の影響がそれぞれ同時に生ずる可必要性は小さい) | J能性(各影響の単純な重ね合わせとして表現可能であるため別途検討を行う | | | | |

55

3) FTA 分析による各影響モードの発生要因および FEP の抽出・スクリーニング

本項では2)におけるアプローチとは逆にボトムアップ的なアプローチから FEP リスト等に基づき、 シーリングシステムの機能喪失に関与する諸要因の抽出を行った。ここでは、「処分坑道およびアクセ ス坑道に沿った卓越した移行経路が形成される」というトップ事象に対する FTA 分析を行い、FTA 分 析における結果を踏まえ、各影響モードの発生に関係する FEP の抽出およびスクリーニングを実施し た。図 3.1-4 に FTA 分析による各影響モードの発生要因の抽出結果を示すとともに、図 3.1-5~図 3.1-8 に例としてベントナイトに関連した FEP の抽出結果について示す。FTA 分析の結果、上記のトップ事 象に影響を及ぼす要因として、埋め戻し材、コンクリートの透水性上昇に及ぼす要因、EDZ 中の割れ目 の発達や変質にかかる要因、地下施設周辺の地下水流動(ここでは、坑道周辺の地下水流動を支配する と考えられるスケールとしてサイトスケールを想定)に影響を与える要因に大別される、FEP の整理に あたってはこれら要因ごとに整理を行った。その際、各 FEP において着目すべき影響を記載するとと もに、要因を External factor、Repository factor、Geosphere factor、Biosphere factor に分類した。 またこの結果の中で、我が国では例外的であるものや、サイト選定や設計・品質管理によって回避可能 なものを検討し、以降の検討からは除外した。



| シーリングシステム機能低下 のメカニズム | | 関連するFEP | 着目すべき影響 | 日本では該当しな い (例外的) | サイト選定によっ て回避可能 | 設計・品質管理に よって回避可能 |
|-------------------------|-------|--|---|---------------------|-------------------|---------------------|
| | 施工不良 | Accidents and unplanned events (FEP1.1.8) | 緩衝材や埋戻し材の不適切な方法での設置あるいは操業中の異常により緩衝材や埋戻 し材の仕様が要件を満足しない状態で修復されず放置された場合等 | | | Δ |
| | | Seismicity (FEP1.2.4) | 地震動による埋戻し材の液状化のためにベントナイト含有率等が不均質となる | | | |
| | | Glacial and ice-sheet effects (FEP1.3.5) | イオン強度の低い氷河融解水が地下深部に進入することによりベントナイトの浸食が生じ て密度低下をもたらす | 0 | | |
| | 密度低下 | Piping/hydraulic erosion (FEP3.2.2.2) | 坑道と交差する透水性割れ目から流入する地下水によって埋戻し材中のベントナイトに パイピングや浸食が生じ密度低下をもたらす | | | Δ |
| | | Mechanical processes (FEP3.2.3) | 坑道の塑性変形によって埋戻し材中のベントナイト密度が上昇あるいは低下する | | | |
| | | Creep (FEP3.2.3.2) | 坑道近傍の岩盤のクリープ変形に伴い埋戻し材の密度変化が生ずる | | | |
| | | Gas-induced dilation (FEP3.2.3.4) | ガス圧による変形(膨張)によって通気経路が形成し閉じない場合透水性が上昇する | | | |
| ベン・ | | Chemical processes (FEP3.2.4) | 人工パリア材やその他の処分場構成要素(特にコンクリート)及び地下水との化学反応に よりベントナイトの変質(溶解、二次鉱物沈殿やイオン交換)が生じて特性(透水係数、拡 散係数、間隙率等)が変化する | | | |
| ナイ | | Evolution of pH conditions (FEP3.2.4.1) | コンクリート溶脱によるpH上昇のためにベントナイトの変質(溶解、二次鉱物沈殿やイオン 交換)が生じて特性(透水係数、拡散係数、間隙率等)が変化する | | | |
| 4 | | Migration of chemical species (FEP3.2.4.3) | 離れた位置にあるコンクリートの溶脱成分(水酸基等)が移流あるいは拡散で埋戻し材に 供給されることによりベントナイトの変質(溶解、二次鉱物沈殿やイオン交換)が生じて特 性(透水係数、拡散係数、間隙率等)が変化する | | | |
| | 変質·劣化 | Alteration (FEP3.2.4.5) | ベントナイトの変質(溶解、二次鉱物沈殿やイオン交換)によって特性(透水係数、拡散係数、間隙率等)が変化する | | | |
| | | Precipitation (FEP3.2.4.6) | ベントナイト変質に伴う二次鉱物沈殿によって間隙率が低下し特性(透水係数、拡散係数、間隙率等)が変化する | | | |
| | | Radiological processes (FEP3.2.6) | 放射線損傷によって埋戻し材の特性が変化する | | | 0 |
| | | Radiation damage (FEP3.2.6.4) | 放射線損傷によって埋戻し材の特性が変化する | | | 0 |
| | | Geochemical characteristics and properties (FEP4.1.8) | 地下水水質によってベントナイト変質挙動(溶解、二次鉱物沈殿やイオン交換)が影響を 受ける | | | |
| | | Chemical processes (FEP4.2.4) | 地下水水質変化によってベントナイト変質挙動(溶解、二次鉱物沈殿)が影響を受ける | | | |

| External factors | Repository factors | Geosphere factors | Biosphere factors |
|------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
|------------------|--------------------|-------------------|-------------------|

図 3.1-5 各影響モードの発生に関係する FEP の抽出・スクリーニング(ベントナイト)

| シーリングシステム機能低下 | | 関連するFEP | 着目すべき影響 | | サイト選定によっ | 設計・品質管理に |
|---------------|--------|--|--|--------|----------|----------|
| | のメカニズム | | | い(例外的) | て回避可能 | よって回避可能 |
| | | Seismicity (FEP1.2.4) | 地震時の力学的影響によりコンクリートが割れ透水性が変化する | | | |
| | | Thermal processes (FEP3.2.1) | 廃棄体の発熱に起因する熱応力のために割れ目の開口や新たな割れが生ずる | | | |
| | | Mechanical processes (FEP3.2.3) | コンクリートの脆性破壊によって新たな割れ目が形成する(あるいは割れ目が閉じる) | | | |
| | 割れ | Evolution of redox conditions (FEP3.2.4.2) | 処分場の酸化還元環境が変化した場合鉄筋の腐食膨張によってコンクリートに割れが生 ずる | | | |
| | | Corrosion (FEP3.2.4.4) | 鉄筋の腐食膨張によってコンクリートに割れが生ずる | | | |
| | | Radiolysis (FEP3.2.6.2) | 地下水の放射線分解によって生ずる酸化剤に起因する鉄筋の腐食膨張によってコンク リートに割れが生ずる | | | |
| | | Chemical processes (FEP3.2.4) | 人エバリア材やその他の処分場構成要素及び地下水との化学反応によりセメントの変質 (溶解、二次鉱物沈殿)が生じて特性(透水係数、拡散係数、間隙率等)が変化する | | | |
| コンク | | Evolution of pH conditions (FEP3.2.4.1) | コンクリート溶脱が進行するとC/S比の低下に伴いpHが徐々に低下し(中性化)、セメントの変質(溶解、二次鉱物沈殿)が生じて特性(透水係数、拡散係数、間隙率等)が変化する | | | |
| IJ I | | Evolution of redox conditions (FEP3.2.4.2) | 処分場に酸化性地下水が進入した場合鉄筋の腐食膨張によってコンクリートに割れが生 ずる | | | |
| + | 変質劣化 | Migration of chemical species (FEP3.2.4.3) | コンクリートの溶脱成分(水酸基やCa等)が移流あるいは拡散によって散逸することによりセメントの変質(溶解、二次鉱物沈殿)が促進され特性(透水係数、拡散係数、間隙率等)が変化する | | | |
| | | Alteration (FEP3.2.4.5) | セメントの変質(溶解、二次鉱物沈殿)によって特性(透水係数、拡散係数、間隙率等)が 変化する | | | |
| | | Precipitation (FEP3.2.4.6) | セメント変質に伴う二次鉱物沈殿によって割れ目が閉塞あるいは間隙率が低下し特性 (透水係数、拡散係数、間隙率等)が変化する | | | |
| | | Radiological processes (FEP3.2.6) | 放射線損傷によってコンクリートの特性が変化する | | | 0 |
| | | Radiation damage (FEP3.2.6.4) | 放射線損傷によってコンクリートの特性が変化する | | | 0 |
| | | Geochemical characteristics and properties (FEP4.1.8) | 地下水水質によってコンクリート変質挙動(溶解、二次鉱物沈殿)が影響を受ける | | | |
| | | Chemical processes (FEP4.2.4) | 地下水水質変化によってコンクリート変質挙動(溶解、二次鉱物沈殿)が影響を受ける | | | |

 External factors
 Repository factors
 Geosphere factors
 Biosphere factors

図 3.1-6 各影響モードの発生に関係する FEP の抽出・スクリーニング(コンクリート)

| シーリングシステム機能低下 | | 関連するFEP | 着目すべき影響 | 日本では該当しな | サイト選定によっ | 設計・品質管理に |
|---------------|----------------------|--|--|----------|----------|----------|
| のメカニスム | | | | い(例外的) | て回避可能 | よって回避可能 |
| | 坑道掘削時の影響 による割れ目生成 | Excavation damaged and disturbed zones (FEP3.1.6) | 抗道掘削時の岩盤への力学的影響により損傷を受けた領域(excavation damaged zone)及び一般にはより広い水理学的な擾乱の生じた領域(hydraulically disturbed zone)が形成される | | | |
| | | Accidents and unplanned events (FEP1.1.8) | 坑道開放時に落盤等の事故が生じたのちに修復されない場合岩盤に損傷が残る | | | 0 |
| | | Seismicity (FEP1.2.4) | 地震時の力学的影響によりEDZの透水性が変化する | | | |
| | | Thermal processes (FEP3.2.1) | 廃棄体の発熱に起因する熱応力のために割れ目の開口や新たな割れが生ずる | | | |
| | | Mechanical processes (FEP3.2.3) | 岩盤の脆性破壊によって新たな割れ目が形成する(あるいは割れ目が閉じる) | | | |
| | | Material volume changes (FEP3.2.3.1) | 埋戻し材の膨潤によって坑道近傍の割れ目が閉じる | | | |
| | | Collapse of openings (FEP3.2.3.3) | 坑道近傍の岩盤の陥没、剥離、山はね等による岩盤損傷に伴い流動経路が生ずる | | | |
| | | Chemical processes (FEP3.2.4) | 人エバリア材やその他の処分場構成要素及び地下水との化学反応により岩石の変質 (溶解、二次鉱物沈殿)が生じて割れ目の開口や閉塞が生ずる | | | |
| | 坑道掘削後の影響 による割れ・変質 | Evolution of pH conditions (FEP3.2.4.1) | コンクリート溶脱によるpH上昇のために岩石の変質(溶解、二次鉱物沈殿)が生じて特性 (透水係数、拡散係数、間隙率等)が変化する | | | |
| E | | Evolution of redox conditions (FEP3.2.4.2) | 処分場に酸化性地下水が進入した場合ロックボルトの腐食膨張によって岩盤に割れが生 ずる | | | |
| z | | Migration of chemical species (FEP3.2.4.3) | 離れた位置にあるコンクリートの溶脱成分(水酸基等)が移流あるいは拡散で埋戻し材に 供給されることにより岩石の変質(溶解、二次鉱物沈殿やイオン交換)が生じて特性(透 水係数、拡散係数、間隙率等)が変化する | | | |
| | | Corrosion (FEP3.2.4.4) | ロックボルトの腐食膨張によって岩盤に割れが生ずる | | | |
| | | Alteration (FEP3.2.4.5) | 岩石の変質(溶解、二次鉱物沈殿)によって特性(透水係数、拡散係数、間隙率等)が変 化する | | | |
| | | Precipitation (FEP3.2.4.6) | 岩石変質に伴う二次鉱物沈殿によって割れ目が閉塞あるいは間隙率が低下し特性(透水係数、拡散係数、間隙率等)が変化する | | | |
| | | Radiological processes (FEP3.2.6) | 放射線損傷によって坑道近傍の岩盤特性が変化する | | | 0 |
| | | Radiolysis (FEP3.2.6.2) | 地下水の放射線分解によって生ずる酸化剤に起因するロックボルトの腐食膨張によって 岩盤に割れが生ずる | | | |
| | | Radiation damage (FEP3.2.6.4) | 放射線損傷によって坑道近傍の岩盤特性が変化する | | | 0 |
| | | Geochemical characteristics and properties (FEP4.1.8) | 地下水水質によって岩石変質挙動(溶解、二次鉱物沈殿)が影響を受ける | | | |
| | | Chemical processes (FEP4.2.4) | 地下水水質の変化によって岩石変質挙動(溶解、二次鉱物沈殿)が影響を受ける | | | |

 External factors
 Repository factors
 Geosphere factors
 Biosphere factors

図 3.1-7 各影響モードの発生に関係する FEP の抽出・スクリーニング(EDZ)

| シーリングシステム機能低下 | | 間法ナステロの | 業日ナズキ影響 [| | サイト選定によっ | 設計・品質管理に |
|---------------|----------|---|--|--------|----------|----------|
| のメカニズム | | 関連9 SFEP | 宿日9 へご影音 | い(例外的) | て回避可能 | よって回避可能 |
| | | Undetected features (FEP4.1.4) | 調査・建設段階で検知されなかった構造や特徴のために地下水の流向や流速が推定と 異なる | | | |
| | | Geothermal characteristics and properties (FEP4.1.5) | 地温勾配によって地下水の流向や流速が影響を受ける | | | |
| | | Hydraulic characteristics and properties (FEP4.1.6) | サイトの水理学あるいは水理地質学的特徴及び透水係数等の岩盤特性によって地下水 流向及び流速等が規定される | | | |
| | 現在の地下水流動 | Geochemical characteristics and properties (FEP4.1.8) | 塩分濃度勾配によって密度流が生じ地下水の流向や流速が影響を受ける | | | |
| ++h | | Thermal processes (FEP4.2.1) | 地温勾配によって地下水の流向や流速が影響を受ける | | | |
| 下水 | | Hydraulic processes (FEP4.2.2) | サイトの水理学あるいは水理地質学的特徴及び透水係数等の岩盤特性によって地下水 流向及び流速等が規定される | | | |
| 流 | | Mechanical processes (FEP4.2.3) | サイトのカ学的状態による地下水流動状況への影響(間隙水圧や割れ目開口幅) | | | |
| 動 | | Topography and morphology (FEP5.1.1) | 地表の地形勾配によって地下水の流向や流速が影響を受ける | | | |
|) t | | Deformation (FEP1.2.3) | テクトニクス等の種々の地質学的プロセスに伴う地層の変形により圧力分布が変わり、地 下水流動方向や流速が変化する | | | |
| 1 | | Seismicity (FEP1.2.4) | Seismic pumpingによる地下水流動方向や流速の過渡的な変化 | | | |
| 1 | | Magmatic and volcanic activity (FEP1.2.5) | 火山活動に伴う熱対流によって地下水の流向及び流速が変化する | | | 0 |
| ス | | Hydrothermal activity (FEP1.2.7) | 熱水活動に伴う熱対流によって地下水の流向及び流速が変化する | | | 0 |
| 5 | | Regional erosion and sedimentation (FEP1.2.8) | 浸食・堆積による地形変化に伴い地下水の流向及び流速が変化する | | | |
| レ | 痰本の地下水活動 | Hydrological/hydrogeological response to geological changes (FEP1.2.12) | 隆起・浸食による地形変化のために地下水の流向及び流速が変化する | | | |
| | の変化 | Global climate change (FEP1.3.1) | 温室効果ガス排出による気候変動のために涵養量の変化や海水準変動が生じ地下水 の流向及び流速が変化する | | | |
| | | Sea-level change (FEP1.3.3) | 周期的気候変動及び温室効果ガス排出による気候変動のために海水準変動が生じ地 下水の流向及び流速が変化する | | | |
| | | Periglacial effects (FEP1.3.4) | 周氷河気候における永久凍土層の形成等により地下水の流向及び流速が変化する | | | |
| | | Glacial and ice-sheet effects (FEP1.3.5) | 氷河及び氷床の形成により地下水の流向及び流速が変化する | | | 0 |
| | | Hydrological/hydrogeological response to climate change (FEP1.3.7) | 気候変動に伴う地表水系の変化(涵養の変化、河川湖沼の生成消滅や流路変更など)に より地下水の流向及び流速が変化する | | | |
| | | Thermal processes (FEP3.2.1) | 廃棄体の発熱に起因する熱対流によって地下水の流向及び流速が変化する | | | |

 External factors
 Repository factors
 Geosphere factors
 Biosphere factors

図 3.1-8 各影響モードの発生に関係する FEP の抽出・スクリーニング(地下水流動(サイトスケール))

4) シーリングシステムの機能低下に関するインフルエンスダイアグラム作成

前項で整理した FEP の抽出結果を踏まえ、埋め戻し材および止水プラグのベントナイト、吹き 付け施工や坑道支保、力学プラグにおけるコンクリート、EDZ およびサイトスケールの地下水流 動に着目し、FEP 間の関連性を整理したインフルエンスダイアグラムを作成した。

(a)埋め戻し材および止水プラグのベントナイトの透水性上昇(図 3.1-9)

埋め戻し材および止水プラグのベントナイトの透水性が上昇する主要な要因は、「ベントナイト の密度低下」および「ベントナイトの変質・劣化」であると考えられる。ベントナイトの密度低 下のプロセスとしては、坑道と交差する透水性割れ目から地下水が流入することによるベントナ イトの浸食、岩盤クリープにより坑道が変形しベントナイトが機械的に変形、ガス圧による変形 によって通気経路が形成、が考えられる。一方、ベントナイトの変質・劣化のプロセスは、支保 等のコンクリートから溶脱したセメント溶解成分によって埋め戻し材近傍の地下水の pH が上昇 することによりモンモリロナイトが溶脱し、モンモリロナイト含有率が低下するプロセスと地下 水の pH の変動により二次鉱物が沈殿し比膨潤性鉱物含有率が低下するプロセスが考えられる。 ただし、上記プロセスにおいて生成される二次鉱物の沈殿によって材料境界において緻密な変質 層が形成されセメント溶解成分の移動を抑制するプロセスも考えられることから、セメント溶解 成分が必ずしもベントナイトの変質・劣化をもたらすとは限らない。



図 3.1-9 インフルエンスダイアグラム(ベントナイト(埋め戻し材、止水プラグ))

(b)吹き付け・支保・力学プラグのコンクリートの透水性上昇(図 3.1-10)

吹付け・支保・力学プラグのコンクリートの透水性上昇が生じる要因は、コンクリートの割れ 及びコンクリートの変質・劣化が考えられる。コンクリートの割れが生じるプロセスは、廃棄体 の発熱に起因する熱応力により新たな割れが生じる、地震動によって脆性破壊による割れが生成 する、地下水の放射性分解によって酸化剤が生成され鉄筋の腐食膨張により割れが生じるという プロセスが考えられる。一方、コンクリートの変質・劣化が生じるプロセスは、セメント溶解に 伴う間隙率の拡大、材料境界における緻密な変質層形成による物質移動の抑制などが考えられ る。また、セメント溶脱によって劣化促進されるものの、セメント溶脱がもたらした pH 環境の 変化によって沈殿した二次鉱物が割れ目を閉塞するという、劣化を抑止するプロセスが生じるこ とも考えられる。



図 3.1-10 インフルエンスダイアグラム (コンクリート (吹付け、支保、力学プラグ))

(c) EDZ の透水性上昇(図 3.1-11)

EDZ の透水性上昇の要因は、坑道掘削時および掘削後の岩盤の割れ、岩盤変質の3つの要因が 考えられる。坑道掘削後の岩盤の割れの要因は、廃棄体の発熱による熱応力、地震動や坑道の陥 没・剥離・山はね等による岩盤の損傷、埋戻し材の膨潤、地下水が放射性分解により酸化性にな りロックボルトが腐食膨張する等が考えられる。また、前述のセメント溶解成分が供給されるこ とによる岩盤の変質も生じうると考えられる。



図 3.1-11 インフルエンスダイアグラム (EDZ)

(d)サイトスケールの地下水流動(図 3.1-12)

シーリングシステムの機能の変遷を考慮するうえで、サイトスケールの現在および過去の地下 水流動変化について考慮する必要がある。現在の地下水流動は地温勾配、動水勾配、地化学的性 質、力学的状態(間隙水圧や割れ目開口幅)によって決まる。一方、将来的にこれらの条件が変 化する場合は将来の地下水流動が変化する可能性がある。例えば浸食・堆積や隆起・浸食による 地形勾配の変化、周氷河気候による永久凍土層の形成や気候変動に伴う地表水系の変化(河川の 流路変化等)、地質学的プロセス(地震等)による地下の間隙水圧分布や地化学条件の変化によ り将来の地下水流動が変化する可能性がある。



図 3.1-12 インフルエンスダイアグラム(地下水流動(サイトスケール))

(3) 各影響モードの地下水流動への影響に関する予察解析

シーリングシステムの安全機能が喪失する際の重要なシナリオを想定する上では、前項で抽出 した影響モードがどの程度地下水流動へ影響を及ぼすかを具体的に把握することが重要である。 本項では、立坑および処分パネルを含む領域を対象に三次元水理解析を実施した。解析コードに は Partridge (QJ サイエンス(株)ホームページ)を用いた。解析モデルの概略図を図 3.1-13 に 示す。処分坑道、主要坑道、アクセス坑道(立坑)および止水プラグをモデル化しており、処分孔 については、本解析が処分孔上部埋め戻し材に到達した核種が移行する坑道の流動場に着眼して いることから、簡略化のためモデル化していない。流動方向の上流側および下流側で2本の立坑 がモデル化されているが、後述する立坑の有無(上流側立坑の有無)の影響を評価する解析ケー スにおいては立坑のメッシュの材料特性を岩盤に変更することで立坑の有無が変更可能となって いる。処分坑道は17本、処分坑道長は346m(主要坑道との余裕長 30m 含む)、処分坑道感覚は 12m とした。境界条件として与える水理境界は、シーリングシステムの機能劣化が生じた場合に その影響がより顕著となるよう、上流から下流に向けて U 字型の流れが生じるように地表面に動 水勾配を設定し、他の境界を不透水境界とした。ただし、地下施設周辺の地下水流動を形成し得る境界 条件での解析も併せて実施した。



図 3.1-13 3次元水理解析モデルの概略

地下水流動解析を行う上での各構成要素の透水係数を表 3.1-7 に示す。上述したように、本水 理解析では、処分場のサイトとして想定される場の地下水流動を再現することを目的としたわけ ではなく、各影響モードで想定される事象の地下水流動への影響の程度を把握することを目的と しているため、ある程度保守性を見込んだ上で、より影響が顕著となるような透水係数値を与え ている。なお、シーリングシステム構成要素の劣化を想定した場合は、埋め戻し材中のモンモリ ロナイト密度が0となり、非膨潤性の二次鉱物によって置換される可能性があるものの、これら 二次鉱物の透水性に関する知見はほとんどないことから、諸外国で検討されている変動シナリオ や what if 解析の考え方と同様に「悲観的な高い数値」として、"砂並み"の透水係数 (1.0× 10⁵ m/s) を設定した。

予察解析においては、まずレファレンスケースとして、シーリングシステムが健全である状態 を設定して解析を行った上で、表 3.1-6 で整理した各影響モードにおいて想定される流動パター ンの要因となるシーリングシステムの劣化・変質状態を透水係数の変化として表現した解析を行 い、相互の比較検証を行った。また、岩盤を不均質場(亀裂性媒体)もしくは均質場(均質媒 体)として解析を行った場合に流動パターンへ与える影響についても併せて検証を行った。不均 質場の場合は NUMO (2018) における深成岩および新第三紀堆積岩の割れ目統計量から作成さ れた亀裂リアライゼーションに基づき、各亀裂の透水量係数を、亀裂半径、亀裂面法線および中 心座標から有限要素メッシュにクラックテンソル法により等価な透水係数を足しこむことで透水 係数分布を算出した。均質場の場合は、前述の亀裂リアライゼーションの算術平均透水係数の値 を与えた。次項では、レファレンスケースとしてシーリングシステムが健全な状態における地下 施設周辺の地下水流動を示した上で、3.1.3 (2) 2)で抽出した影響モードを想定した際の地下施設 周辺の地下水流動への影響について述べる。

| シーリングシステム 構成要素 | | 本予察解析での透水係数[m/s] | 設定根拠 | 備考(引用文献) |
|---|---|---|---|---|
| 処分坑道 | 処 埋め戻し材 埋め戻し材、坑道支保工および EDZを一体化してモデル化し、 格要素の面積比を考慮して透水 係数を設定 (深成岩) 5.0×10⁻⁷ [m/s] | | 埋め戻し材 深成岩: 5.0×10 ⁻¹² [m/s] ベントナイト有効粘土密度 0.6 [Mg/m3]、淡水条件 新第三紀堆積岩: 1.0×10 ⁻⁶ [m/s] 保守的にベントナイト有効粘土密度 0.6[Mg/m3]、塩 水条件 | NUMO 包括的技術報 告書レビュー版 付属書 4-43、図 2 お よび表 5 |
| 坑道支保工 (新第三紀堆積岩) 1.0×10 ⁻⁶ [m/s] | | (新第三紀堆積岩) 1.0×10 ⁻⁶ [m/s] | 保守的に砂並みに設定 1.0×10 ⁻⁵ [m/s] | NUMO 包括的技術報 告書レビュー版 6章 p6-91 |
| EDZ | | | 第2次取りまとめの設定値に保守性考慮し1オー ダー高い値を設定 1.0×10 ⁻⁶ [m/s] | |
| | 力学プラグ | 非モデル化 | — | |
| 処 分 孔 | 緩衝材 | 非モデル化 | | |
| 連絡坑 | 埋め戻し材 | 一体化してモデル化し値を設定 (面積比を考慮) 1.0×10⁻⁶ | 吹付コンクリートの厚みやインバートコンクリートを考 慮して、埋戻し材の有効粘土密度の仕様に対して保守 的な値を設定 | 処分坑道における埋 戻し材(新第三紀堆積 岩)と同様 |
| 道 | 坑道支保工 FDZ | | 処分坑道と同様 | |
| | 止水プラグ | 4.0×10 ⁻¹³ | 2.555年2月17日 包括的技術報告書(NUMO包括的技術報告書レビ ユー版、付属書4-47)における止水ブラグの材料 仕様である有効粘土密度1.37 [Mg/cm ³]を参考に同 有効粘土密度の淡水条件における透水性を設定 | |
| アクセス坑道 | 埋め戻し材 | 連絡坑道と同様 | 連絡坑道と同様 | 処分坑道における埋 戻し材(新第三紀堆積 岩)と同様 |

表 3.1-7 予察解析におけるパラメータ設定値

(4) 予察解析結果

1) リファレンスケース

レファレンスケースでは、深成岩と新第三紀堆積岩を亀裂性媒体として扱ったケースと深成岩を 均質連続体として扱ったケースの3ケースを実施した。新第三紀堆積岩については、亀裂性媒体 とした際の透水係数分布がほぼ均質連続体とした場合の透水係数分布に近かったため、均質連続 体としたケースの解析は行っていない。深成岩(亀裂性媒体)においては、処分坑道中央から坑 道下流端まで坑道中を移行する流れの割合は少なく、多くの流線は坑道途中で岩盤へ移行してお り、主要坑道を通り、立坑中を鉛直上向きに移行する流れは見られない(図 3.1-14(a))。一方、 深成岩(均質連続体)では深成岩(亀裂性媒体)と比べて坑道中を移行し立坑へ到達する流線が 相対的に多くなり、一部の流線は立坑を遡上しているが、X 軸方向の速度成分により立坑遡上中 に岩盤へ移行している(図 3.1-14(b))。同様の傾向は新第三紀堆積岩(亀裂性媒体)でも確認さ れた(図 3.1-14 (c))





図 3.1-14 処分坑道を初期位置とした流線分布(左図:透水係数分布、中央・右図:流線分 布)

2) 施設劣化による透水性上昇の影響(影響モード①+④)

本ケースは、施設劣化により坑道の透水性が上昇した場合を想定したケースである。すなわ ち、処分坑道、主要坑道および立坑のすべての透水係数が上昇(砂なみである 1.0×10⁵ m/s) したケースである。解析はレファレンスケースと同様に、深成岩(亀裂性媒体)、深成岩(均質 連続体)および新第三紀堆積岩(亀裂性媒体)の3ケースで実施した。深成岩(亀裂性媒体)で は、施設劣化により坑道が高透水性となったため、レファレンスケースと比較して坑道を選択的 に移行する割合が多くなり、一部の流線は立坑まで到達しているものの、これら一部の流線は立 坑を遡上する間に、立坑と交差する亀裂を介して岩盤へ進入しているため、立坑を通じて地表面 まで到達する流線はない(図 3.1-15)。深成岩(均質連続体)(図 3.1-16)および新第三紀堆積 岩(亀裂性媒体)(図 3.1-17)においても、施設劣化によりレファレンスケースに比べて透水性 が高くなったため、坑道を移行する流線の割合が多くなり、多くの流線が立坑を遡上し地表面ま で到達している。岩盤を均質連続体で取り扱い、かつ比較的透水性が低い場合や、亀裂性媒体で あっても透水性が高い亀裂の頻度が小さい場合で坑道の透水性が高い場合、シーリングシステム が主要な移行経路となる可能性がある。ただし、本解析結果は影響モードで想定される事象の影 響がより顕著になるような境界条件をあえて設定していることや、核種の収着や拡散を考慮して いない点、流線の初期位置を坑道中央としている点を考慮する必要がある。



図 3.1-15 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(亀裂性媒体)(上段:レファ レンスケース、下段:施設劣化による透水性上昇の影響ケース)



図 3.1-16 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(均質連続体)(上段:レファ レンスケース、下段:施設劣化による透水性上昇の影響ケース)



図 3.1-17 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:新第三紀堆積岩(亀裂性媒体)(上 段:レファレンスケース、下段:施設劣化による透水性上昇の影響ケース)

3) 断層等大規模亀裂と施設の交差影響(影響モード5)、3+4、2+3+4、2+3+5)

本ケースでは、立坑あるいは処分坑道等で、断層等の亀裂が交差し、この断層を経由して地表 に至る想定の影響モードの評価を行った。まず、透水量係数を1.0×10⁻⁶[m²/s]、厚さを1mと設 定した断層が立坑と交差する場合について、深成岩(亀裂性媒体)および深成岩(均質連続体) の2ケースで解析を行った。図 3.1-18 および図 3.1-19 に深成岩(亀裂性媒体)および深成岩(均 質連続体)の解析結果を示す。両ケースとも、断層の有無による流線への顕著な影響は確認でき ない。深成岩(均質連続体)では相対的に断層に集水される傾向にあり、断層部での移流速度の 上昇が見られるが、立坑と断層との交差によって流線が主要坑道を経由して立坑へ引き込まれる のではなく、坑道から一度岩盤に進入した流線が断層に到達し、集水されていると考えられる。 深成岩(亀裂性媒体)については、前述の透水量係数の設定では、モデル上で明確に断層形状を 再現できなかったため、より高い透水量係数(1.0×10⁻⁴[m²/s])を設定(図 3.1-20)した解析を 行った。その結果、断層中の移流速度が上昇するものの、先の深成岩(均質連続体)と同様に、立 坑と断層との交差によって流線が主要坑道を経由して立坑へ引き込まれるのではなく、坑道から 一度岩盤に進入した流線が断層に到達し、集水されていることが確認された(図 3.1-21)。次に、 断層面の向きと動水勾配との関係を評価するために、配置する断層の向きを変更した解析を行っ た。このケースでは、断層を地表面まで到達されるように設定している(図 3.1-22)。図 3.1-23 に断層の向きを変更した解析結果を示す。他のケースと同様に断層に集水され断層中の移流速度 の上昇が見られるが、動水勾配の向きが断層面の方向と異なるため、移行途中で断層と交差する 他の割れ目に進入していることが確認できる。さらに、断層の立坑の交差と施設の劣化が同時に 生じた場合の影響を評価した。この際の断層の透水量係数は 1.0×10⁻⁴[m²/s]を設定した。解析の 結果、施設劣化が生じた場合においても断層が交差した場合の影響は、これまでのケースで見ら れた傾向と大きな違いは見られなかった。

以上のことから、断層と立坑の交差による地下水移行経路の変動は、シーリングシステムの状態に起因せず、断層の配置(動水勾配との向きの違い)や断層そのものの透水性に起因することから、断層との交差影響については本検討では考慮しないこととした。なお、断層が処分坑道と 交差する場合においても同様であった。



図 3.1-18 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(亀裂状媒体) (上段)レファレンスケース、(下段)立坑と断層(透水量係数 1.0×10⁻⁶[m²/s])の交差影響ケース



図 3.1-19 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(均質連続体) (上段)レファレンスケース、(下段)立坑と断層(透水量係数 1.0×10⁻⁶[m²/s])の交差影響ケース



図 3.1-20 透水係数分布:立坑と断層(透水量係数 1.0×10⁻⁴[m²/s])の交差影響ケース(左はレフ アレンスケース)



図 3.1-21 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(亀裂状媒体) 立坑と断層(透水量係数 1.0×10⁻⁴[m²/s])の交差影響ケース



図 3.1-22 透水係数分布:立坑と断層(1.0×10⁻⁴[m²/s])の交差影響ケース (左:断層が初期配置、右:断層の配置を変更)



図 3.1-23 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(亀裂状媒体) 上段:断層(透水量係数 1.0×10⁻⁴[m²/s])が初期配置 下段:断層(透水量係数 1.0×10⁻⁴[m²/s])の配置変更

4) 施設劣化および上流側立坑(劣化)の配置による透水性上昇の影響(影響モード①+②+④)

本ケースでは、②施設劣化による透水性上昇の影響(影響モード①+④)に加え、処分施設の上 流側にも立坑が配置され、かつ劣化により透水性が上昇した場合を想定した解析を行った。影響 モードとしては、処分坑道、主要坑道および上/下流側の立坑のすべての坑道の透水係数が上昇(砂 なみ 1.0×10⁻⁵[m/s])した場合の解析である。岩盤は深成岩(亀裂状媒体)、深成岩(均質連続体)、 新第三紀堆積岩(亀裂状媒体)の3ケースについて実施した。

深成岩(亀裂性媒体)については、上流側の立坑の配置及び劣化により、上流側の立坑がない ケースと比べて施設の上流付近の地下水流速が増加している(図 3.1-24)ものの、この影響は限 定的であり、流線解析の結果にも差異は見られない(図 3.1-25)。また、この傾向は深成岩(均質 連続体)および新第三紀堆積岩についても同様であった。このことから、上流側立坑を配置して も、処分坑道や立坑が卓越した移行経路になることへの影響は小さいと考えられる。



図 3.1-24 上流側立坑付近のダルシー流速分布(水平断面) 左:施設劣化のみ(上流側立坑無し)のケース) 右:施設劣化及び上流側立坑(劣化)の配置による透水性上昇の影響ケース



図 3.1-25 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(亀裂状媒体) 上段:施設劣化のみ(上流側立坑はない)のケース)

下段:施設劣化及び上流側立坑(劣化)の配置による透水性上昇の影響ケース

5) 予察解析のまとめおよびシナリオ設定に関する知見

(2) 2)で抽出したシーリングシステムに関する影響が発生した場合を想定した地下水流動解析 および流線解析結果から、次項で示すシナリオ設定に資する知見を整理した。

まず、リファレンスケース(シーリングシステムが健全)においては、3種の岩盤(深成岩(亀 裂状媒体)、深成岩(均質連続体)、新第三紀堆積岩(亀裂状媒体))のいずれの場合でも、坑道が 卓越した移行経路にはならず、特に深成岩(亀裂状媒体)の場合は坑道を移行する多くの流線は 坑道と交差する亀裂を介して岩盤側に散逸する結果となった。また、深成岩(均質連続体)、新第 三紀堆積岩(亀裂状媒体)では、地下水は処分坑道の下流端まで坑道中を移行するが、一部流線 を除いて、軸方向の異なる主要坑道を移流する過程で、主要坑道とは異なる動水勾配の向きによ り坑道から岩盤中に散逸する結果となった。さらに同2ケース主要坑道を介して立坑へ到達した 流線も、立坑を遡上中に岩盤へ散逸する結果となった。

一方、シーリングシステムの安全機能が喪失した場合を想定し、坑道の各部位の透水性を上昇

させた解析では、深成岩(亀裂状媒体)では、リファレンスケースと比べて、わずかに立坑まで 到達する流線が増加するに留まるのに対し、深成岩(均質連続体)、新第三紀堆積岩(亀裂状媒体) では、大部分の流線が立坑を遡上し地表面まで到達する結果となった。そのため、シーリングシ ステムの安全評価において着目するシナリオの1つとしては、後者2つの岩種つまり、均質的に 低透水の場合、もしくは比較的高い透水性を有する亀裂の頻度が小さいような岩盤に施設を設定 する場合において、シーリングシステムが劣化した場合、例えば、セメント影響による埋め戻し 材中の膨潤性鉱物(Na型モンモリロナイトなど)の変質による透水性の上昇が生じた場合、一連の 坑道が卓越した移行経路となる可能性が想定される。

(5) 本検討で着目するシーリングシステムの安全機能が喪失した場合のシナリオ

(2)における検討結果を踏まえ、本検討で着目するシナリオの設定を行った。シナリオの設定に あたり、シーリングシステムの劣化・変質を想定した基本シナリオを設定し、基本シナリオの状 態が著しく変動するシナリオ(変動シナリオ)を複数ケース設定した。

具体的には、基本シナリオでは、再冠水時のパイピング・エロージョンを回避するための工学 的対策や、コンクリート溶脱の影響によるベントナイト材料の変質を回避するための材料選定等 を実施することで、シーリングシステムの安全機能が担保されることを前提とし、基本シナリオ をベースとした以下の3つの変動シナリオを設定することとした。

・変動シナリオ (セメント影響)

セメントと埋め戻し材を構成するベントナイトの相互作用(pH 上昇に伴うモンモリロナ イトの溶脱等)埋め戻し材の透水性が上昇するシナリオ

- ・変動シナリオ(ベントナイト侵食・流出)
 岩盤中の割れ目へのベントナイトの膨出とゲル化による流出により、緩衝材領域のベントナイト密度低下、透水性上昇が生じるシナリオ
- ・変動シナリオ(施工不良)
 坑道埋め戻し材の施工不良により埋め戻し部において相対的に高い透水性領域が生じ、かつ周囲の坑道支保の目詰まりにより岩盤への地下水の流出が抑制され、各坑道を介した地表への速い移行経路が生じるシナリオ

以降に基本シナリオを含めた3つの変動シナリオに関する状態設定とストーリーボードを示した。

1) 基本シナリオ

(a) 初期状態

基本シナリオの初期状態においては、埋戻し材は適切な品質・施工管理によって施工され、緩 衝材よりも早期に水分飽和し、その後はベントナイトの止水性により周囲の岩盤と同程度以下の 透水係数となる。坑道支保は、コンクリート健全部の透水性は低いが施工初期に発生した割れ目 や打ち継ぎ目を通じて地下水の流れが生ずる。緩衝材は、ガラス固化体の温度の低下とともに徐々 に含水比が上昇し、数百年以内に完全に水分飽和する。飽和後はベントナイトの膨潤により低透 水性となり処分孔内は拡散場となる。EDZは、坑道開放時の力学的擾乱によって坑道周方向の微 小割れ目や坑道に沿った割れ目の開口が生ずることにより岩盤の健全部(マトリクス部)に比し て透水性が上昇する。図 3.1-26にストーリーボードを示すとともに、表 3.1-8、表 3.1-9にTHMC の観点からの基本シナリオの初期状態を記述した。



図 3.1-26 ストーリーボード:基本シナリオ(初期状態)

| | | Т | Н | М | С | R |
|-----|-------|--------------|-------------|-------------|---------------|---------|
| 処 分 | 埋戻し材 | 緩衝材中の温度(最高温 | 緩衝材よりも早期に水 | 埋戻し材が水分飽和す | 支保のセメント溶出成 | 緩衝材よりも放 |
| 坑道 | | 度<100℃)よりも低 | 分飽和し、その後はベン | るとともにベントナイ | 分との反応によりベン | 射線強度は低 |
| | | く、ベントナイトの熱変 | トナイトの止水性によ | トの膨潤力が発生し、坑 | トナイト及びズリ等の | く、問題とはな |
| | | 質は生じない | り周囲の岩盤と同程度 | 壁を等方的に圧する | 溶解と二次鉱物沈殿あ | らない |
| | | | 以下の透水係数となる | | るいはイオン交換が坑 | |
| | | | | | 壁付近で生ずる | |
| | 坑道支保 | 一般に 100℃以下では | コンクリート健全部の | 処分坑道と連絡坑道の | 坑道開放時に空気中の | |
| | 力学プラグ | コンクリートの強度低 | 透水性は低いが初期割 | 冠水時期が異なるため | 二酸化炭素による中性 | |
| | | 下は生じず、また、遊離 | れ目や打ち継ぎ目を通 | 初期には埋戻し材の膨 | 化が生ずるが材料表面 | |
| | | 水やゲル水も失われな | じて地下水の流れが生 | 潤圧を力学プラグが支 | 近傍に限られる。閉鎖後 | |
| | | い(重量損失がない) | ずる | えるがその後全体が冠 | は地下水との反応によ | |
| | | (嵩・大野、 1984) | | 水すると圧力差は解消 | り水酸基や Ca、 Na、 | |
| | | | | する | K等が溶出する | |
| | EDZ | 熱応力による剥離や割 | 右記の力学的変化に伴 | 坑道開放時の力学的擾 | 坑道開放時に空気等の | |
| | | れが生じないことをモ | い、健全部の岩盤に比し | 乱によって坑道周方向 | 影響を受けるが変質程 | |
| | | ニタリング (アコーステ | て透水性が上昇する | の微小割れ目や坑道に | 度は顕著ではない | |
| | | イックエミッション等) | | 沿った割れ目の開口が | | |
| | | により確認する | | 生ずる | | |

表 3.1-8 ストーリーボード(1/2):基本シナリオ(初期状態)

| | | Т | Н | М | С | R |
|---------------|--------------|--------------|-------------|---------------------|-------------------|---------|
| <i>b</i> п /\ | 经活动 | 皮査仕の改動にといり | 泪底の低てししまた | 巡告せぶ水八約和ナス | 具立沮疾は 100のいて | 虎女物の改士で |
| 处分 | 版 倒 忆 | 廃栗忰の免熱により値 | 温度の低下とともに | 筱�� 竹 か 小 方 起 相 9 つ | 取同価度は 100 U以下 | 廃果物の発する |
| 孔 | | 度が上昇するが、緩衝材 | 徐々に含水比が上昇し、 | とともにベントナイト | でありイライト化は進 | 放射線はオーバ |
| | | 中の最高温度は 100℃ | 数百年以内に完全に水 | の膨潤力が発生する。こ | 展しない。また、温度勾 | ーパックによっ |
| | | 以下。その後数百年以内 | 分飽和する。飽和後はべ | のため、処分孔内は等方 | 配によって塩の濃縮が | て十分に遮蔽さ |
| | | にもとの地温程度に低 | ントナイトの膨潤によ | 的な圧縮場となる | 生ずるが温度低下に伴 | れるため緩衝材 |
| | | 下する。 | り低透水性となり処分 | | い消失する | の放射線損傷や |
| | | | 孔内は拡散場となる | | | 間隙水の放射性 |
| | | | | | | 分解は生じない |
| 連 絡 | 埋戻し材 | 処分坑道と同じ | 処分坑道と同じ | 処分坑道と同じ | 処分坑道と同じ | 処分坑道と同じ |
| 坑道 | 坑道支保 | | | | | |
| | EDZ | | | | | |
| | 止水プラグ | | | | | |
| アク | 埋戻し材 | | | | | |
| セス | 坑道支保 | | | | | |
| 坑道 | EDZ | | | | | |

表 3.1-9 ストーリーボード(2/2):基本シナリオ(初期状態)

(b)劣化·変質状態

カ学プラグや坑道支保については、地圧や地震動等の力学的要因によって割れが生じ、割 れ目に沿ってセメントの溶脱が進むことによってコンクリートが劣化・変質するため透水 性が上昇する。コンクリート・埋め戻し材の境界近傍は、坑道支保及び力学プラグのセメン ト溶出成分によってベントナイト等が溶解し二次鉱物が材料境界に沈殿する。この緻密な 変質層が保護的な被膜として働くことによりさらなる変質は抑制され、変質は長期にわた って表面付近に限定される。同様に、コンクリート・岩盤境界近傍では、表面変質層がコン クリート表面及び直近の割れ目を閉塞することによって変質は抑制される。また、処分孔中 の緩衝材や止水プラグに用いられるベントナイトと岩盤境界近傍では、ベントナイトが処 分孔と交差する割れ目内に膨出するが地下水水質がゲル化領域ではない為そこで安定して 留まり継続的な流出・侵食は生じない。図 3.1-27 にストーリーボードを示すとともに、表 3.1-10、表 3.1-11 に THMC(R)の観点からの基本シナリオの初期状態を記述した。



図 3.1-27 ストーリーボード:基本シナリオ (変質・劣化状態)

| | | Т | Н | М | С | R |
|------|-------|------|------------|------------|------------|-----------|
| 処分坑道 | 埋戻し材 | 地温程度 | ベントナイトの止水 | 埋戻し材が水分飽和 | 坑道支保及び力学プ | 放射線影響は無視で |
| | | | 性により周囲の岩盤 | するとともにベント | ラグのセメント溶出 | きる |
| | | | と同程度以下の透水 | ナイトの膨潤力が発 | 成分によってベント | |
| | | | 係数となる | 生し、坑壁を等方的に | ナイト等が溶解し二 | |
| | | | | 圧する | 次鉱物が材料境界に | |
| | 坑道支保 | | コンクリートが劣化・ | 地圧や地震動等の力 | 沈殿する。この緻密な | |
| | 力学プラグ | | 変質するため透水性 | 学的要因によって割 | 変質層が保護的な被 | |
| | | | が上昇する | れが生じ、割れ目に沿 | 膜として働くことに | |
| | | | | ってセメントの溶脱 | よりさらなる変質は | |
| | | | | が進むことによって | 抑制される(変質は長 | |
| | | | | 強度が低下して変形 | 期にわたって表面付 | |
| | | | | 及びさらなる割れが | 近に限定される) | |
| | | | | 生ずる | | |
| | EDZ | | 健全部の岩盤に比し | 埋戻し材の膨潤圧に | 上記と同様の表面変 | |
| | | | て透水性が高い状態 | よって坑道開放中に | 質層がコンクリート | |
| | | | が続く | 開口した割れ目が閉 | 表面及び直近の割れ | |
| | | | | じる可能性がある | 目を閉塞することに | |
| | | | | | よって変質は抑制さ | |
| | | | | | れる | |

表 3.1-10 ストーリーボード(1/2):基本シナリオ(劣化・変質状態)

| | | Т | Н | М | С | R |
|------|-------|---|------------|------------|------------|--------------|
| 処分孔 | 地温程度 | | ベントナイトの膨潤に | 処分孔内は等方的な圧 | 緩衝材中のベントナイ | オーバーパック開口後 |
| | | | より緩衝材が低透水性 | 縮場であり続ける | トが処分孔と交差する | の α 線による水の放射 |
| | | | となり処分孔内は拡散 | | 割れ目内に膨出するが | 線分解で酸化剤が生ず |
| | | | 場となる | | 地下水水質がゲル化領 | るが鉄とその腐食生成 |
| | | | | | 域ではない為そこで安 | 物等との反応によって |
| | | | | | 定して留まり継続的な | 消費される為緩衝材中 |
| | | | | | 流出・侵食は生じない | は還元性環境であり続 |
| | | | | | | ける |
| 連絡坑道 | 埋戻し材 | | 処分坑道と同じ | 処分坑道と同じ | 処分坑道と同じ | 処分坑道と同じ |
| | 坑道支保 | | | | | |
| | EDZ | | | | | |
| | 止水プラグ | | | | | |
| アクセス | 埋戻し材 | | | | | |
| 坑道 | 坑道支保 | | | | | |
| | EDZ | | | | | |

表 3.1-11 ストーリーボード(2/2):基本シナリオ(劣化・変質状態)
2) 変動シナリオ (セメント影響)

変動シナリオ (セメント影響) では、基本シナリオで想定するシーリングシステムの劣化 の変遷に加え、図 3.1-28 に示す劣化・変質プロセスを考慮する。すなわち、コンクリート・ 埋戻し材境界近傍は、坑道支保及び力学プラグのセメント溶出成分によってベントナイト 等が溶解するが反応生成物 (溶質) がコンクリート割れ目中の移流によって散逸するため、 保護的な変質層が形成されず坑道内全体でベントナイト密度の低下及び透水性の上昇が生 ずる。コンクリート・岩盤境界近傍も同様に、坑道支保及び力学プラグのセメント溶出成分 によって岩石が溶解するが反応生成物 (溶質) がコンクリート割れ目中の移流によって散逸 するため、保護的な変質層が形成されず割れ目開口幅が増大して透水性の上昇が生ずる状 態となる。図 3.1-29 にストーリーボードを示す。



図 3.1-28 コンクリートーベントナイト相互作用による劣化・変質プロセス



図 3.1-29 ストーリーボード:変動シナリオ(セメント影響)

3) 変動シナリオ (ベントナイト浸食・流出)

変動シナリオ(ベントナイト侵食・流出)では、埋め戻し材・坑道支保境界近傍において、 地下水水質がベントナイトのゾル化領域となってもコンクリート近傍ではコンクリートの 溶出により Ca が供給されるため、埋め戻し材と接する間隙水においてはゾル化領域となる 地下水水質にはならないものと考えられる。一方、緩衝材や止水プラグ近傍等のベントナイ ト・岩盤境界近傍においては、地表水の流入等によって地下水水質が変化した結果、ゲル化 領域となる可能性が考えられるため、ベントナイトが交差する割れ目内に膨出した際、ベン トナイトの継続的な流出・侵食が生じることで、ベントナイト密度が低下した結果、緩衝材 や透水性が上昇する。

本シナリオで想定しているベントナイトの亀裂中や個体への侵入挙動については、モデ ル解析等による様々な検討がなされており(例えば、Birgersson et al、2009、Kanno et al、 2001、Borrelli and Ahn、2008)、これらの知見をまとめると以下のように整理される(図 3.1-30)。

- ベントナイト侵入の先端部でゾルが生成しない場合、亀裂中のベントナイトの侵入は、 一定の深さで停止する。
- このため、膨潤圧とせん断抵抗の比 $\tau/\sigma = \tan \phi$ における摩擦角 ϕ が重要となる
- ・ 固体ベントナイトの摩擦角は液固比の上昇(密度の低下)にともなって徐々に増大し、
 これまでの最小の密度での実測値は17.5°である(膨潤圧=300kPaの時)。また、これ
 より低い密度では、φは単調に増大する傾向があると考えられている(Birgesson、
 1995)。このため、保守的な設定としては、φ = 10°が妥当であり、この場合の侵入深
 さは亀裂開口幅0.1mmの場合で4mm程度である



図 3.1-30 膨潤により割れ目に進入するベントナイトのレオロジー状態の概念 (Birgersson et. al., 2009) に加筆

また、SKB-3 の処分概念における地層処分の安全性評価において、地下深部に比べて相 対的に希薄な氷河融解水が地下深部まで流入した場合を想定し、ベントナイトの浸食に関 する検討を行っている(例えば、Miller and Marcos、2007、Neretnieks et al、2009 など)。 地下水中でのベントナイトコロイドの安定性は、二価の陽イオンの存在に強く影響される。 このため、SKB は、ベントナイトコロイドの安定性に関するイオン強度の指標として、 錯 形成していない Ca²⁺ の "臨界凝集濃度"(CCC: critical coagulation concentration)の概念 をとりいれている。SKB によれば、Ca²⁺の CCC は 1mM であり、割れ目の中にあるベント ナイトは、地下水の Ca²⁺濃度がこの値よりも高い場合には安定しており、逆に、 Ca²⁺濃度 がこの値より低い場合には、スメクタイト粘土のコロイド懸濁液が生ずる。換言すれば、地 下水中の Ca²⁺濃度が CCC 以上である限り、ベントナイトと地下水の間には明瞭な界面が 存在するということができる。

また、ベントナイトゾルが安定となるのは以下の三つの条件が同時に成立する場合であ り、通常の地下水組成やコンクリート間隙水は該当しない。

- イオン強度が 25 mM (NaCl equivalent) 以下である
- コロイド系における二価の陽イオンの濃度が、DLVO 理論(Derjaguin and Landau、 1941; Verwey and Overbeek、 1948)における"臨界凝集濃度"(CCC: Critical Coagulation) である 1mM を下回っている
- 一価の陽イオンが粘土鉱物のイオン交換サイトを占める割合が有意となる、すなわち、 (aNa+)2/aCa2+≤0.05

図 3.1-31 に変動シナリオ(ベントナイト浸食・流出)のストーリーボードを示す。



図 3.1-31 ストーリーボード:変動シナリオ(セメント影響)

4) 変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)

変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)では、初期状態として、特に処分坑道上部の天板付 近の埋戻し材の施工方法として、ペレットや粉体による充填を行うものの設計で考慮した 密度を確保することができず、この局所的な低密度領域において Na 型ベントナイトの Ca 型化が進行し局所的に透水性の高い状態となる(伊藤ほか、2010)。その後、コンクリート・ 埋戻し材境界近傍で坑道支保及び力学プラグのセメント溶出成分によって地下水が高 pH となり、ベントナイト等が溶解するが反応生成物(溶質)が施工不良によって生じた坑道天 板付近の埋戻し材低密度領域中の移流によって散逸するため、保護的な変質層が形成され ず、特に坑道上部でベントナイト密度の低下及び透水性の上昇が生ずる。坑道支保に関して は、変動シナリオ(セメント影響)の場合と同様に、コンクリート中の割れ目が移流支配に より二次鉱物による閉塞が生じない想定と生じる想定の両方が可能であるが、変動シナリ オ(セメント影響)との対比のため、坑道支保は割れ目が二次鉱物によって閉塞している状 況を想定する。図 3.1-32 および図 3.1-33 にストーリーボードを示す。



図 3.1-32 ストーリーボード:変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)初期状態



図 3.1-33 ストーリーボード:変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)劣化・変質状態

(6) インフルエンスダイアグラムの再整理

前項でのシナリオ設定を踏まえ、(2) 4)で検討したインフルエンスダイアグラムの再整理を行った。FEP は、基本シナリオで考慮される項目(緑)、変動シナリオで考慮される項目(オレンジ)、 今回の検討で除外する項目(黒)という観点で再整理した。FEP 間のプロセスについても劣化が 促進する方向(赤)、劣化が抑止する方向(青)で区別し、劣化が促進する方向にも抑止する方向 にも作用し得るプロセスについては、その他(黒)で区別した。なお、EDZ については特に軟岩 系岩盤においてクリープによる変形から坑道掘削後の岩盤の変化が生じ得ること等から、硬岩系 と軟岩系とで別々のインフルエンスダイアグラムを作成した。再整理したインフルエンスダイア グラムを図 3.1-34~図 3.1-38 に示す。



図 3.1-34 シナリオ別インフルエンスダイアグラム (ベントナイト (埋戻し材、止水プラグ))



図 3.1-35 シナリオ別インフルエンスダイアグラム(コンクリート(吹付け、支保、力学プラ グ))



図 3.1-36 シナリオ別インフルエンスダイアグラム (EDZ: 硬岩系)



図 3.1-37 シナリオ別インフルエンスダイアグラム (EDZ: 軟岩系)



図 3.1-38 シナリオ別インフルエンスダイアグラム(地下水流動(サイトスケール))

3.1.4 シナリオで想定される因子・プロセスがシーリングシステムに及ぼす影響評価

3.1.3(5)で設定したシナリオを対象に物質移行解析を行い、それぞれのシナリオにおいて、シ ーリングシステムの安全機能に対する影響を評価した。今回はコンクリートの劣化・変質の相互 作用を考慮し、シーリングシステムが卓越した移行経路となることへの影響を評価することを目 的としたため、変動シナリオのうち変動シナリオ(セメント影響)および変動シナリオ(埋め戻 し材施工不良)の2つのシナリオについて影響評価を行うこととした。

(1) レファレンスケースおよび変動シナリオ (セメント影響)

1) 解析条件

表 3.1-12 に物質移行解析における各構成要素の透水係数の設定値を、表 3.1-13~表 3.1-14 に透水係数以外のパラメータを示す。各変動シナリオで構成要素の止水性喪失を想定する状態は 予察解析と同様に「悲観的な高い数値」として "砂並み"の透水係数(1.0×10⁻⁵ m/s)を設定 した。

| シーリングシステム 物質移行解析での | | 物質移行解析での | 机中相构 | (供来(引用支持) |
|--------------------|-------|--|--|---|
| 構成 | 要素 | 透水係数[m/s] | 設定依拠 | 1備考(51用文献) |
| 処分坑道 | 埋め戻し材 | 深成岩:5.0×10 ⁻¹² 新第三紀堆積岩:1.0×10 ⁻⁶ | 予察解析と同様 | NUMO 包括的技術報 告書レビュー版 付属書 4-43、図 2 お よび表 5 |
| | 坑道支保工 | 1.0×10 ⁻⁵ | 予察解析と同様 | NUMO 包括的技術報 告書レビュー版 6 章 p6-91 |
| | EDZ | 坑道に平行に近い(坑道とな す角が45度以内) 亀裂に対し ては予察解析における透水係 数の100倍を設定 それ以外は予察解析と同様 | 応力解放による透水性上昇の下記の検討結果から 設定 井尻ほか(1999)において、発破掘削の場合と機 械掘削の場合の EDZ の幅と透水性の変化に関する 国内 14 箇所の事例検討から発破掘削による EDZ の幅は1m程度、透水性の増加は1~2桁程度 | 井尻裕二、澤田淳、 赤堀邦晃(1999): 我が国の岩盤の水理 特性について、JNC TN8400 99-090. |
| | 力学プラグ | 1.0×10 ⁻⁶ | 構造躯体コンクリートと同程度と想定 | NUMO 包括的技術 報告書レビュー版 6章 表 6.4-1 p6- 102 |
| 処分孔 | 緩衝材 | 1.0×10 ⁻¹² | '高レベル放射性廃棄物処分場堅置き・ブロック方 式において想定されている設定値 | NUMO 包括的技術 報告書レビュー版 6章 表 6.4-1 p6- 102 |
| 連絡坑道 | 埋め戻し材 | 2.0×10 ⁻⁶ | インバートコンクリート(1.0×10 ⁻⁵ [m/s])を一体化しモデ ル化。 埋戻し材の有効粘土密度の仕様に対して保守的な値 を設定 | NUMO 包括的技術報 告書レビュー版 付属書 4-43、図 2 お よび表 5 |
| | 坑道支保工 | 1.0×10 ⁻⁵ | 処分坑道と同様 | |
| | EDZ | 坑道に平行に近い(坑道とな す角が45度以内) 亀裂に対し ては予察解析における透水係 数の100倍を設定 それ以外は予察解析と同様 | 処分坑道と同様 | |
| | 止水プラグ | 非モデル化 | — | — |
| アクセス坑道 | 埋め戻し材 | 非モデル化 | - | - |

表 3.1-12 構成要素毎の透水係数の設定

| 構成要素 | 間隙率 [-] | 実効拡散係数 [m ² /s] | 設定根拠 |
|-------|------------|-------------------------------|-------------------------|
| 廃棄体 | 1 | 4. 0×10^{-9} | 緩衝材内側の拡散バリアとしての機能を無 |
| | | | 視するため、間隙率1、及び目田水中の拡散係数 |
| 緩衝材 | 0.4 | 3. 0×10^{-10} | 透水係数、間隙率:NUMO包括的技術報告書 |
| | | | レビュー版(表 6.4-1) |
| 坑道支保 | 0.46 | 8. 0×10^{-10} | 間隙率:第2次TRUレポート(電事連、核 |
| エ、インバ | | | 燃料サイクル機構、2005) における劣化コン |
| ートコンク | | | クリートの値(表 4. 4. 4-1) |
| リート | | | |
| 埋め戻し | 0.4 | 3. 0×10^{-10} | 緩衝材と同様 |
| 材 | | | |
| 力学プラグ | 1 | 4. 0×10^{-9} | 緩衝材と同様 |

表 3.1-13 新第三紀堆積岩における間隙率、実効拡散係数の設定

| 構成要素 | 間隙率 | 実効拡散係数 | 設定根拠 |
|-------|------|------------------------|----------------------------|
| | [-] | $[m^2/s]$ | |
| 廃棄体 | | | 緩衝材内側の拡散バリアとしての機能を無視 |
| | 1 | 4. 0×10^{-9} | するため、間隙率 1、及び自由水中の拡散係 |
| | | | 数を設定した |
| 緩衝材 | 0.4 | 2.0×10^{-10} | 間隙率:NUMO 包括的技術報告書レビュー版 |
| | 0.4 | 3.0×10^{-5} | (表 6.4-1) |
| 埋戻し材 | | | ベントナイト有効粘度密度 0.6[Mg/m³]、淡水 |
| | 0.4 | 3. 0×10^{-10} | 条件、NUMO-SC レビュー版 付属書 4-43、 |
| | | | 図2および表5 |
| 吹付コン | | | 間隙率、実効拡散係数:間隙率、実効拡散係 |
| クリート | 0.46 | 8. 0×10^{-10} | 数:セメント系材料の設定値 |
| | | | |
| 力学プラグ | | | 間隙率、実効拡散係数:新第三紀堆積岩と同 |
| | 1 | 4.0×10^{-9} | 様 |
| | 1 | 1.0710 | |
| | | | |

表 3.1-14 深成岩における間隙率、実効拡散係数の設定

新第三紀堆積岩における解析モデルを図 3.1-39 に示す。解析範囲は 60m×196.6m×200mと した。処分坑道については中央の処分坑道について廃棄体領域 66.6m+余裕長 30m を確保し、 中央の処分坑道のみ処分孔をモデル化した。インバートコンクリートは上部埋め戻し材と一体化 し、吹付コンクリートについては EDZ と一体化した。坑道周りの EDZ の厚みは 1.0m とした。 主要坑道は半径 2.9m の円柱として近似した。処分孔は、厚さ 0.05m の吹付けコンクリートを EDZ に含め、EDZ の厚みを 0.55m とした。坑道下部の EDZ の厚みは 1.0m とした。中央処分 坑道の処分孔内部(緩衝材・廃棄体)については緩衝材の透水係数を設定し、それ以外の領域につ いては断面積比を考慮した等価透水係数をそれぞれ設定した。力学プラグの透水係数に関しては NUMO 包括的技術報告書における TRU-Gr3 の構造躯体と同様に、健全な場合は 1.0×10⁻⁷ m/s、劣化・変質を想定した場合は 1.0×10⁻⁵ m/s とした。



図 3.1-39 新第三紀堆積岩のモデル形状と有限要素分割

深成岩における解析モデルを図 3.1-40 に示す。解析範囲は処分坑道直交方向(x)80m×坑道平 行方向(y)185.5 m×鉛直方向(z)200 m とした。処分坑道については中央の処分坑道について廃棄 体領域 35.52m(廃棄体 8 ピッチ)+余裕長 30m を確保した。処分坑道については、コンクリート吹 付け部を埋め戻し材に含め、主要坑道については、コンクリート吹付け部を埋め戻し材と一体化 した。処分坑道外縁の厚さ 0.05m の吹付けコンクリートは EDZ に含め、EDZ の厚みを 1.05m と した。底版下部の EDZ の厚みは 1.0m とした。一体化した領域は、断面の領域が等価な透水係数 を持つように、断面積比で透水係数を足しこんだ。力学プラグの透水係数は新第三紀堆積岩と同 様に NUMO 包括的技術報告書における TRU-Gr3 の構造躯体と同様、健全時は 1.0×10⁻⁷ m/s、 劣化ケースは 1.0×10⁻⁵ m/s とした。境界条件については新第三紀堆積岩および深成岩ともに、境 界条件については新第三紀堆積岩および深成岩ともに、処分坑道直交方向(x)に動水勾配 0.05 が かかるように坑道と交わる面を上流側として、流動方向に垂直な面:水頭固定境界、流動方向に 平行な面: 不透水境界,に設定した。



図 3.1-40 深成岩 HLW のモデル形状と領域分割

2) 解析結果

(a)基本シナリオ

新第三紀堆積岩においては、坑道の透水性が高いことから岩盤から処分坑道に向かう流れが生 じ、処分坑道へ地下水が集水されるため、圧力水頭が突き出す形になり、その結果、処分坑道か ら上下方向の流れが生じる(図 3.1-41)。このため、多くの粒子は処分坑道を通らずに処分孔か ら直接岩盤へ移行する(図 3.1-42)一方、深成岩については処分坑道の透水性が低いため、新 第三紀堆積岩とは異なり、処分坑道から上下方向の流れはほとんど生じない(図 3.1-43)。ま た、粒子軌跡をみると、処分坑道中の実効拡散係数が 3.0×10⁻¹⁰ m²/s と大きいため、拡散の影 響により処分坑道中を移行する(図 3.1-44)。



図 3.1-41 新第三紀堆積岩リファレンスケースにおける圧力水頭分布



図 3.1-42 新第三紀堆積岩リファレンスケースにおける粒子軌跡



図 3.1-43 深成岩リファレンスケースにおける圧力水頭分布



図 3.1-44 深成岩リファレンスケースにおける粒子軌跡

(b)変動シナリオ(セメント影響を想定した場合)

新第三紀堆積岩においては、基本シナリオと同様に処分坑道の透水性が比較的高いため処分坑 道に地下水が集水され、圧力水頭が突き出す形になり、下流側で上下方向の流れが生じる(図 3.1-45)。このため、多くの粒子は処分坑道を通らず処分孔から直接岩盤へと移行する(図 3.1-46)。 一方、深成岩においては劣化・変質により基本シナリオと比べて、処分坑道の透水性が高くなる ため、新第三紀堆積岩と同様に、処分坑道に地下水が集水され、下流側で圧力水頭が突き出す形 になり、下流側で上下方向の流れが生じる(図 3.1-47)。また多くの粒子は処分孔から直接岩盤へ と移行する(図 3.1-48)。



図 3.1-45 新第三紀堆積岩のシーリング劣化ケースにおける圧力水頭分布



図 3.1-46 新第三紀堆積岩のシーリング劣化ケースにおける粒子軌跡



図 3.1-47 深成岩のシーリング劣化ケースにおける圧力水頭分布



図 3.1-48 深成岩のシーリング劣化ケースにおける粒子軌跡

(2) 変動シナリオ(埋め戻し材施工不良を想定した場合)

1) 解析条件

解析モデルを図 3.1-49に示す。解析体系の広さは 300m×200m、処分坑道の長さは 200m とし、処分孔は最上流側、中央、最下流側の 3 か所のみモデル化した。処分坑道周辺の EDZ は厚 さ 1m、吹付コンクリートは厚さ 20cm とした。なお、深成岩では吹付コンクリートの設計は 5cm であるが、解析領域に対する吹き付けコンクリートの領域が狭く、メッシュ分割が困難なため、 新第三紀堆積岩と同じ 20cm の厚さでモデル化し透水係数が等価になるように設定した。なお、 境界条件については新第三紀堆積岩および深成岩ともに,処分坑道直交方向(x)に動水勾配 0.05 が かかるように流動方向に垂直な面:水頭固定境界,流動方向に平行な面:不透水境界,に設定し ている。

本シナリオは、坑道支保に発生する割れ目が二次鉱物等で閉塞している状況を想定したケース である。そのため前述したレファレンスケースおよび変動シナリオ(セメント影響)で見られた、 処分孔あるいは処分坑道から岩盤への粒子の散逸効果が抑制される可能性があり、坑道を移動す る粒子が比較的多くなることが想定された。この時、想定する核種によっては、人工バリア材お よび岩盤に対する Kd、De が非収着性・保存性トレーサーとは異なり、移行経路が変わる可能性 があるため、このような核種移行特性の違いによる影響を把握するために、レファレンスケース および変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)とは別に、非収着性・保存性トレーサーの他、収着 性核種における解析も実施した。収着性核種については、NUMO包括的技術報告書における基本 シナリオ(低塩分濃度地下水)におけるニアフィールド岩盤出口の被ばく線量(代表個人は農作 業従事者 Gr とした)に対する重要核種のうち、新第三紀堆積岩については Se-79、深成岩につい ては Se-79 および Cs-135 を用いた(NUMO、2018)。なお、上記核種の半減期は本解析では考 慮していない。水理解析及び物質移行解析に用いたパラメータを表 3.1-15~表 3.1-18 に示す。







図 3.1-49 解析体系

| | 透水係数 | 間隙率 | 実効拡散係数、 | 備考 |
|---------------|----------------------|-------|-----------------------|--|
| | [m/s] | [-] | De | |
| | | | [m ² /s] | |
| 岩盤 | - | 0.008 | $9.0 	imes 10^{-13}$ | 間隙率:NUMO 包括的技術報告書レビュー版(表 6.4-1) |
| | | | | De:NUMO 包括的技術報告書レビュー版(付表 6-18) |
| EDZ | — | 0.008 | $9.0 	imes 10^{-13}$ | 岩盤と同様 |
| 吹付 コンク リート | 1.0×10 ⁻⁷ | 0.46 | 2.8×10^{-9} | De:NUMO包括的技術報告書レビュー版における深成岩の充填材の設定値 |
| | | | | 間隙率:第2次TRUレポート(電事連、核燃料サイクル機構、2005) における劣化コンクリートの値(表4.4.4-1) |
| 埋め戻し材 | 1.0×10^{-5} | 0.4 | 3.0×10^{-10} | 透水係数:砂並みの値 |
| | | | | 間隙率:NUMO 包括的技術報告書レビュー版における緩衝材の設 定値 |
| | | | | 実効拡散係数:NUMO 包括的技術報告書レビュー版における緩衝 材の設定値(付表 6-12)を参考に設定) |
| 緩衝材 | $1.0 	imes 10^{-12}$ | 0.4 | $3.0 	imes 10^{-10}$ | 透水係数:NUMO 包括的技術報告書レビュー版における緩衝材の |
| | | | | 設定値(表 6.4-1) |
| | | | | 間隙率:NUMO 包括的技術報告書レビュー版における緩衝材の設定値 |
| | | | | 実効拡散係数:NUMO 包括的技術報告書レビュー版における緩衝 |
| | | | | 材の設定値(付表 6-12)を参考に設定) |
| 廃棄体 | $1.0 	imes 10^{-5}$ | 1 | $4.0 	imes 10^{-9}$ | バリア性能を期待しないことから以下の値を設定 |
| | | | | 透水係数:砂並みの値 |
| | | | | 間隙率:1 |
| | | | | 実効拡散係数:自由水中の拡散係数 |

表 3.1-15 新第三紀堆積岩における水理解析及び物質移行解析のパラメータ設定値

| 表 3 1-16 | 深成岩における | ら水理解析及 | 7、物質移行解析(| Dパラメータ設定値 |
|----------|---------|-------------|------------------------|-----------|
| 10.1-10 | | ノノハベエカキリハノス | ・ し つ り 見 つ ション コークリーマ | |

| | 透水係数 | 間隙率 | 実効拡散係数、 | 備考 |
|-------|------------------------|-------|-----------------------|---|
| | [m/s] | [•] | De | |
| 11.40 | | | [m²/s] | |
| 岩盤 | - | 0.245 | 1.0×10 ⁻¹¹ | 間隙率:NUMO包括的技術報告書レビュー版における深成岩の設 |
| | | | | |
| | | | | De: NUMO 包括的技術報告書レビュー版における深成岩の設定 |
| DD7 | | | | [值 (付表 6-19) |
| EDZ | - | 0.245 | 1.0×10^{-11} | 岩盤と同様 |
| 吹付コンク | 2.5 × 10 ⁻⁸ | 0.46 | 2.8×10 ⁻⁹ | メッシュ分割の都合上厚さ 20cm としたが実際の厚さは 5cm なの |
| リート | | | | で健全なコンクリートの透水係数 1.0×10 ⁻⁷ m/s の 1/4 の値 |
| | | | | De:NUMO 包括的技術報告書レビュー版における新第三紀堆積 |
| | | | | 岩の充填材の設定値 7.0×10 ⁻¹⁰ m ² /s(付表 6-12)に対し、メッシ |
| | | | | ュの厚さが実際の4倍なので、吹き付けコンクリートを横断する |
| | | | | 拡散フラックスが等価となるように 7.0×10 ⁻¹⁰ m ² /s を 4 倍した値 |
| | | | | ・間隙率:第2次TRUレポート(電事連、核燃料サイクル機構、 |
| | | | | 2005)における劣化コンクリートの値(表 4.4.4-1) |
| 埋め戻し材 | 1.0×10^{-8} | 0.46 | $2.8 	imes 10^{-9}$ | 透水係数:劣化時の値を用いる |
| | | | | 間隙率:NUMO包括的技術報告書レビュー版における緩衝材の設 |
| | | | | 定值 |
| | | | | De:NUMO 包括的技術報告書レビュー版における緩衝材の設定 |
| | | | | 値(付表 6-12)を参考に設定 |
| 緩衝材 | 1.0×10^{-10} | 0.4 | 3.0×10 ⁻¹⁰ | 透水係数:NUMO 包括的技術報告書レビュー版における緩衝材の |
| | | | | 設定値(表 6.4-1) |
| | | | | 間隙率:NUMO包括的技術報告書レビュー版における緩衝材の設 |
| | | | | 定值 |
| | | | | 実効拡散係数:NUMO 包括的技術報告書レビュー版における緩衝 |
| | | | | 材の設定値(付表 6-12)を参考に設定 |
| 廃棄体 | 1.0×10^{-5} | 0.4 | 4.0×10^{-10} | バリア性能を期待しないことから以下の値を設定 |
| | | | | 透水係数:砂並みの値 |
| | | | | 間隙率:1 |
| | | | | 実効拡散係数:自由水中の拡散係数 |

| | セメント系材料 | | 緩衝材 | | 岩 | 1.44 - 47. | |
|----|--------------------|-----------------------|-----------|------------------------------------|-----------|------------------------------------|-------|
| 元素 | Kd[m³/kg] De[m²/s] | | Ka[m³/kg] | D _e [m ² /s] | Kd[m³/kg] | D _e [m ² /s] | 加方 |
| Ι | 0.0001 | 6.0×10 ⁻¹⁰ | 0 | 4.0×10 ⁻¹¹ | 0 | 1.0×10 ⁻¹¹ | 低塩分濃度 |
| Se | 0.01 | 6.0×10 ⁻¹⁰ | 0.0004 | 3.0×10 ⁻¹¹ | 0.04 | 1.0×10 ⁻¹¹ | 低塩分濃度 |
| Cs | 0.0002 | 6.0×10 ⁻¹⁰ | 0.06 | 7.0×10 ⁻⁹ | 1 | 1.0×10 ⁻¹⁰ | 低塩分濃度 |

表 3.1-17 新第三紀堆積岩における核種移行パラメータ (NUMO、2018)

表 3.1-18 深成岩における核種移行パラメータ

(NUMO, 2018)

| | セメント系材料 | | 緩衝材 | | 岩 | /#:]z . | |
|---------------|--------------------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|-------|
| 元素 | Kd[m³/kg] De[m²/s] | | K₄[m³/kg] | D _e [m²/s] | K₄[m³/kg] | D _e [m²/s] | 加方 |
| Ι | 0.0001 | 7.0×10 ⁻¹⁰ | 0 | 5.0×10 ⁻¹¹ | 0 | 9.0×10 ⁻¹³ | 低塩分濃度 |
| Se | 0.01 | $7.0 	imes 10^{-10}$ | 0.0004 | 4.0×10 ⁻¹¹ | 0.001 | 9.0×10 ⁻¹³ | 低塩分濃度 |
| \mathbf{Cs} | 0.0002 | $7.0 	imes 10^{-10}$ | 0.06 | 8.0×10 ⁻⁹ | 0.04 | 9.0×10 ⁻¹³ | 低塩分濃度 |

2) 解析結果

水理解析の結果から、変動シナリオ(セメント影響)の場合と同様、上流側では上下から地下 水を引き込み、下流側では上下に排水するような地下水流れが深成岩、新第三紀堆積岩どちらに おいても確認された(図 3.1-50、図 3.1-51)。物質移行解析については、モデル化した処分孔(3 か所)に 3000 粒子を配置し、各粒子がどの位置で岩盤に進入するかを算出し、ヒストグラムとし て整理した。以下に、岩種および核種毎の結果をまとめた。

■ 新第三紀堆積岩・非収着性粒子(図 3.1-52)

最下流側の廃棄体は上流側で引き込んだ地下水の流出箇所となるため、斜め下向きの流れが生 じ、坑道を通らず直ちに岩盤へ進入する。一方で、上流側(中央部及び最上流側)の廃棄体から 出た粒子は一部が坑道をそのまま移行し続けるため、アクセス坑道まで到達する可能性がある。 同様の傾向は変動シナリオ(セメント影響)でも確認でき、最上流廃棄体の粒子の一部は坑道の 端部まで到達する可能性がある。なお、ヒストグラムから、最上流側の廃棄体では18%、中央 部の廃棄体では11%が坑道の端部まで到達する。

■ 新第三紀堆積岩・Se(図 3.1-53)

最下流側廃棄体については非収着性の場合と概ね同じであるが、特に最上流側廃棄体については、非収着性粒子と比べ、坑道中の移行距離が長く、坑道中央部付近では多くの粒子が坑道の端部付近まで到達している。これは、Se は埋め戻し材中の拡散係数が 3.0×10⁻¹¹ m²/s と小さいため、坑道中における拡散の影響が小さく、移流の影響を受けやすいためと考えられる。ヒストグ

ラムから、最下流側の廃棄体から出た粒子のうち7%が、最上流側の廃棄体から出た粒子のうちの 16%が坑道端部まで到達する。

■ 深成岩・非収着性粒子(図 3.1-54)

新第三紀堆積岩と概ね同様の挙動を示し、最下流の廃棄体は地下水の流出箇所となるため、斜 め下向きの流れが生じ、坑道を通らず直ちに岩盤へ進入する。最上流側廃棄体の粒子は 100m 程 度坑道中を移行した後、徐々に岩盤へと入っていくが、一部が坑道の端部まで到達している。ヒ ストグラムから、最下流側の廃棄体から出た粒子のうち 7%が、最上流側の廃棄体から出た粒子 のうちの 16%が坑道端部まで到達する。

■ 深成岩・Se (図 3.1-55)

非収着性粒子と比べると、最下流側、及び中央部の廃棄体についてはほぼ同様であるが、特に 最上流側廃棄体の違いが大きく、非収着性粒子と比べ、廃棄体を出て直ちに岩盤へ進入する割合 が約 20%と多い(非収着性ではほぼ 0%)。

■ 深成岩 Cs(図 3.1-56)

最上流側および中央部の廃棄体については非収着性粒子と概ね同様の傾向となるものの、最下流側廃棄体において坑道端部まで到達する粒子の割合が30%と多い。これは、Csは坑道埋め戻し材中の拡散係数が大きく(8.0×10⁻⁹m²/s)、拡散により坑道中に進入しやすいためと考えられる。



図 3.1-50 新第三紀堆積岩における変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)の水理解析結果



図 3.1-51 深成岩における変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)の水理解析結果



図 3.1-52 新第三紀堆積岩の変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)の粒子軌跡及び岩盤に入る位置の分布(非収着性粒子)





図 3.1-53 新第三紀堆積岩の変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)の粒子軌跡及び岩盤に入る位置の分布(Se)





図 3.1-54 深成岩の変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)の粒子軌跡及び岩盤に入る位置の分布(非収着性粒子)



図 3.1-55 深成岩の変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)の粒子軌跡及び岩盤に入る位置の分布(Se)



図 3.1-56 深成岩の変動シナリオ(埋め戻し材施工不良)の粒子軌跡及び岩盤に入る位置の分布(Cs)

(3) まとめ

物質移行解析の結果から、シーリングシステムの劣化・変質を想定した変動シナリオ(セメン ト影響を想定した場合)では、ほとんどの粒子が坑道と交差する割れ目へ進入するため、坑道が 卓越した移行経路とはならない可能性が示唆された。この影響は坑道と交差する割れ目頻度や割 れ目の透水性によって異なるものの、深成岩と比較して相対的に割れ目頻度が低い新第三紀堆積 岩においても、処分坑道の途中でほとんどの粒子が割れ目を介して岩盤中に進入する傾向にある ことが明らかになった。一方で、埋め戻し材の施工不良を発端としたその後のセメント影響によ り埋め戻し材透水性の上昇が生ずる一方でコンクリート支保は健全な状態であることを想定した 変動シナリオ(埋め戻し材施工不良を想定した場合)では、処分パネル上流側の廃棄体から上部 の処分坑道に移行した核種の一部が処分坑道端部に至る可能性が示唆された。ただし、今回実施 した物質移行解析は処分坑道端部までの移行挙動を評価したものであるため、処分坑道端部から さらに下流側について坑道が卓越した移行経路となりうるかについては、今後さらなる解析・検 討が必要となる。

3.1.5 シーリングシステムに求められる要件の具体化

(1) ボウタイ分析による予防・影響緩和策の検討

本項では、リスクマネジメントにおける標準的な手法の一つであるボウタイ分析により、前項 までに示した変動シナリオが生起し、かつその影響が処分システムに重要な影響を与える状況を 仮に想定した場合にこれを予防するもしくは影響を緩和させる方策を検討した。シーリングシス テムの劣化・変質によって影響が生ずるまでの過程は、原因となる影響因子から始まり、影響を 生じさせるトップ事象、さらにはこの結果として影響が生じるメカニズムまでが含まれる。また、 リスクマネジメント上の対策としては、原因となる影響因子がトップ事象につながることを回避 する予防策及びトップ事象が生じた場合でも大きな影響が生じないようにする影響緩和策が考え られる。ボウタイ分析では、想定すべきトップ事象毎にこのような一連のリスクマネジメント上 の重要な因子をボウタイ(蝶ネクタイ)に似た形で体系的に整理する(図 3.1-57)。すなわち、 影響を生じさせるトップ事象(例えば、ベントナイトプラグの止水性低下)を中心に配置し、そ の左にトップ事象の原因となる影響因子(例えば、隣接したコンクリートプラグの影響、地下水 によるベントナイトのゾル化・浸食)、反対側にはトップ事象の影響として生じた結果(例えば、 高透水性の地下坑道やアクセス坑道に沿った卓越経路を通じた各種の移動促進、処分坑道と交差 する大規模な高透水性割れ目への核種の速やかな移動)を列挙する。トップ事象の上部にはこれ らの因子を想定するうえで潜在的な危険要因であるハザード(例えば、廃棄体から溶出する放射 性核種)を配置する。リスクマネジメント上の対策としては左に列挙した影響因子がトップ事象 につながることを回避するための予防策(例えば、低アルカリ性セメントプラグの使用、ベント ナイトゾル化地下水質回避)と、トップ事象が生じ右側に列挙した結果が起こったとしても大き な影響が生じないようにする影響緩和策(例えば、アクセス坑道を処分パネル上流側に配置する ことによる地表への短絡経路形成の回避、処分坑道と大規模高透水性構造交差部から廃棄体定置 領域までの十分な離隔の確保)をそれぞれ予防バリア、対処バリアとして整理する。以上のよう

に、ボウタイ分析では、トップ事象の原因となる影響因子及び結果、そしてそれらへの予防策及 び影響緩和策をそれぞれ体系的に整理し、全体像を分かりやすく要約することができる。



図 3.1-57 本検討におけるボウタイ (Bowtie) 分析の概念

前章までに、シーリングシステムの止水性が低下して安全機能の喪失の恐れが考えられるシナ リオとして、セメント影響による坑道の透水性の上昇、ベントナイトの侵食や流出による緩衝材 の性能低下、そして、施工不良による埋め戻し材の性能が不十分である状況などが想定された。 ボウタイ分析の中心となる影響を生じさせるトップ事象として、シーリングシステムの止水性の 低下を設定した場合、上記の3つシナリオで想定される事象がその原因となる。また、これら原 因に対する予防バリアとしては以下の対策があげられる。なお、次項で示すように、以下に示す 対策については、対策の効果等について、今後引き続き検討を行う必要があるものも含まれるこ とから、検討課題として取り扱い、番号を付記して整理している。

・セメント影響による坑道の透水性の上昇

予防的対策:

(課題1) 材料境界での保護的変質層形成による変質抑制

能動的な対策ではないが、材料境界で反応を抑制する保護層生成のバリア (課題 2)低アルカリセメント使用による変質回避

変質反応の抑制を目的とした材料選定によるバリア

・ベントナイトの侵食や流出による緩衝材の性能低下

予防的対策:

(課題3) ジオテキスタイル等による再冠水時パイピング回避

ジオテキスタイルの設置により緩衝材冠水時の流出を防ぐバリア

- (課題4) モンモリロナイトゾル化領域となる地下水水質の回避
 - モンモリロナイトのゾル化を防ぐ地下水環境を選択することによるバリア
- ・施工不良による埋め戻し材の性能が不十分

予防的対策:

(課題 5) ペレット充填等による坑道上部施工不良回避

施工方法の検討・対策により施工不良発生可能性を低くするバリア

(課題 6) 材料境界での保護的変質層形成による変質抑制

セメント影響シナリオと同様、材料境界で反応を抑制する保護層生成のバリア (課題 7) 低アルカリセメント使用による変質回避

セメント影響シナリオと同様、変質反応の抑制を目的とした材料選定によるバリア

ー方シーリングシステムの止水性低下の結果として生じる影響事象として、地下坑道・アクセス 坑道を介した地表への速い核種移行、地下坑道を介した処分パネル領域の速い核種移行が挙げら れる。この影響に対する対処バリアとしては以下による緩和策があげられ、予防的対策と同様の 理由から検討課題として番号を付記して整理している。地下水流動方向と処分坑道方向の関係に は、直交や平行などが考えられるが、本検討では、坑道が卓越した移行経路となりうる条件とし てより厳しいと考えられる平行方向に配置された場合を対象とした。ただし、ボウタイ分析の網 羅性の観点から、その他の流動方向の設定についても今後検討が必要であると考えられるため、 作成するボウタイに併記することとした。

トップ事象(シーリングシステムの止水性低下)に対する影響(速い核種移行)緩和策:

(課題8)アクセス坑道上流側集中配置による循環流路回避

循環流の発生を回避することによるバリア

(課題9) アクセス坑道が排水域となり得るサイトの回避

適切なサイト選定による好ましくない水理場回避によるバリア

- (課題 10) 深部の動水勾配が水平に近い場合のアクセス坑道に着目した地下水流動解析
- 適切なサイト選択によって速い核種移行を回避できることの確認
- (課題 11) 止水プラグ及びバイパスによる連続流路形成の回避
 - 止水プラグによる速い移行経路の遮断
- (課題12) 坑道と割れ目系の交差による連続流動経路の回避

能動的な対策ではないが、岩盤の不均質性による地下水移流の散逸バリア

(課題13) 坑道と交差する割れ目系への核種の散逸

能動的な対策ではないが、岩盤の不均質性による核種の散逸バリア

上記を考慮したボウタイおよび抽出された課題を図 3.1-58 に示す。次項に各課題の概要を述べる。



図 3.1-58 本研究の成果を踏まえたボウタイ分析

1) 課題 1: 材料境界での保護的変質層形成による変質抑制(セメント影響)

緩衝材とセメント系材料(OPCを用いたもの)の相互作用を化学物質輸送解析で検証した既往 の事例は複数存在し、基本的には両者の境界部の間隙に二次鉱物が沈殿し、保護的変質層が形成 される。ただし、埋め戻し材となった場合を想定し、モンモリロナイト密度が低い場合や砂礫等 が含まれている場合の解析事例は少ないため、そのような場合でも同様に保護的な変質層が形成 されるかどうかが今後の検討課題である。また、その他、ニアフィールド複合現象を考慮すると、 以下のような解析も検討する必要がある。

- 平成28年度「沿岸部処分システム高度化開発報告書」(産総研、2017)におけるTRU 処分坑道を対象としたセメント系材料と緩衝材の相互作用の解析事例では全体を拡散場 として一次元モデルで解析(図3.1-59)しているが、例えば支保工にひび割れが入り、 その中に地下水が流入して移流が発生するようなケースを考える場合、二次元以上のモ デルで移流を考慮した解析が必要になる(化学・水理の連成)
- 化学的変質による力学特性の変化と、鉄系材料の腐食膨張や岩盤クリープ等の外力による影響の双方を考慮した連成解析(化学・力学の連成)を行い、緩衝材/埋め戻し材の変形や、セメント系材料のひび割れの発生について解析的に検討することも課題の1つである。





緩衝材とコンクリート支保との境界部拡大図を見ると、FRHP、SRHP いずれの場合も二次鉱物 により間隙率が低下して低拡散性の変質層が形成されている。
2) 課題 6: 材料境界での保護的変質層形成による変質抑制(埋戻し材施工不良)

既往の解析事例ではコンクリートと埋め戻し材の間に低密度層があるケースは存在しない。本 検討で考慮している埋め戻し材の施工不良を考慮した解析を実施するためには、以下のような現 象の影響を評価する解析が必要になる。

- (低密度の) Na 型ベントナイトの Ca 型化
- 低密度で Ca 型化したベントナイトの透水性上昇
- 高 pH でのモンモリロナイトの溶解
- モンモリロナイト溶解生成物の移流による散逸

上記の評価をするための解析は、図 3.1-60 に示すような、コンクリート支保と 2 つの密度の 埋め戻し材を想定した 2 次元(または 3 次元)の体系によって、低密度部分に発生する移流を考 慮した反応輸送解析を実施する必要がある。



図 3.1-60 コンクリート支保と2つの密度の埋戻し材を想定した2次元モデルのイメージ

低密度部分は施工不良を想定して初期条件(初期鉱物の組成と間隙率)を設定する必要がある。 ベントナイトの種類は通常密度の場合と同様に、初期は Na 型を想定してその後イオン交換反応 により、間隙水の液相組成に応じて Ca 型等に変化していく。低密度・通常密度の埋め戻し材は ともに、セメント溶出成分との反応やモンモリロナイト溶解生成物の移流による散逸により鉱物 組成や液相組成が変化する。この時、間隙率や交換性 Na 型割合(ESP)、当量イオン濃度等によ って透水係数の値が変化することが知られている。(伊藤・三原、2005、図 3.1-61) $K = 10^{1.30 \cdot C_i} \cdot e_{sme}^{3.48C_i} \cdot K_0 \quad (m/sec)$

ただし、 $C_i > 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$ のとき、 $C_i = 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$

$$K > 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0$$
のとき, $K = 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0$

 $K > 1.0 \cdot 10^{-5}$ のとき, $K = 1.0 \cdot 10^{-5}$

$$K_{0} = \begin{cases} (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^{2}) \times 10^{-13} \times e_{sme}^{-7.44 - 5.69 \cdot ESP} \cdots e_{sme} \le 7.0\\ (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^{2}) \times 10^{-13} \times 7.0^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \cdot \left(\frac{e_{sme}}{7.0}\right)^{11.4} \cdots e_{sme} > 7.0 \end{cases}$$

ただし, $K_0 < K_0 \Big|_{ESP=1}$ のとき, $K_0 = K_0 \Big|_{ESP=1}$

C_i [eq/dm³]:間隙木の当量イオン濃度 *ESP* [-]:交換性Na割合 *e_{sme}*: モンモリロナイト間隙比(右図)

| Wste | スメクタイト部分 | ∲ sme |
|------|----------|------------------------------|
| | 空気間隙 | \uparrow V _v |
| | | |

$$\rho_{ds} = \frac{W_{sme}}{V_v + V_{sme}}$$
$$e_{sme} = \frac{V_v}{V_{sme}}$$

図 3.1-61 ベントナイト緩衝材に用いられる透水係数の経験式 (伊藤・三原、2005)

上述のように透水係数が変化した場は同時に移流速度も変化する。このような解析を行う場合、 化学物質輸送解析水理解析を連成させる必要があるが、この際以下の2つのような手法が考えら れる。

- 同一ツール内で連成解析を実施する(QPAC 等)。
- 水理解析(FEMWATER等)で得られた移流速度の情報を化学物質輸送解析内で逐一反映さ せる

上記の解析では、課題1でも示したような、コンクリート・埋め戻し材境界部において低拡散 性の保護的な変質層が形成されるかどうかを見ることが重要になる。また、このような変質層が 形成されたとしても、地震動等の外力の影響により破壊されるようなケースについても検討する 必要がある。

3) 課題 2: 低アルカリセメント使用による変質回避

NUMO(2008)によれば、国内外で検討されている低アルカリ性セメントの種類と開発目的は表 3.1-19 に示す通りである。高アルカリ成分の影響は、pH<11 程度であれば軽減できることは第2 次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構、1999)でも指摘されており、下表に示した低アルカリ 性セメントはこの目的に合致するものである。NUMO(2008)に記載されている、ブロック試料の 浸漬試験による pH の測定例も併せて図 3.1-62 に示す。また、工学的な検討として、これらの材質の強度や透水性等についての検討が行われている。

| 分類 | クリンカー | ポゾラ | ラン質混和材添 | 加型 | アルミノシ |
|------|-------------|---------|---------|------------|---|
| | 設計型 | | | | リケート混 |
| | 12030033703 | | | | 和材添加型 |
| 名称 | LAC | HFSC | LHHPC | <u> </u> | SAC |
| pH | 10.5 程度 | 10.5 程度 | 10.5 程度 | 11.0 程度 | 10.5 程度 |
| 開発元 | 電力中央研究 | 核燃料サイク | カナダ原子 | スウェーデ | キエフエ科 |
| | 所-太平洋コ | ル機構 | 力公社 | ン核燃料・廃 | 大学 (ウクラ |
| | ンサルタント | (現原子力開 | (AECL) | 棄物管理会 | イナ) |
| | | 発機構) | 10) | 社 (SKB), | |
| | | 一大林組 | | Posiva 社(フ | |
| | | | | ィンランド) | |
| 開発目的 | 塩類による劣 | pH の低下 | 低発熱性 | pH の低下 | pH の低下 |
| | 化の防止, | | | | on T erminal Antimatical Press 20030 |
| | pH の低下 | | | | |

表 3.1-19 低アルカリ性セメントの種類と開発目的



図 3.1-62 ブロック試料の浸漬液の pH 経時変化

上記のように、周囲のアルカリ影響を低減することが期待されている低アルカリ性セメントであるが、緩衝材への長期影響について解析的に検証した既往の事例はあまり存在しない。図 3.1-63 に化学物質輸送解析による緩衝材のセメント影響変質抑制効果の評価結果を示す(NUMO、 2013、図 3.1-63)。



図 3.1-63 低アルカリセメント(HFSC)による緩衝材のセメント影響変質抑制効果の評価の 一例(上段:1万年後の鉱物組成図、下段:pH分布の時間変遷) (NUMO、2013)

この評価ではベントナイト緩衝材と OPC または HFSC が接触している系について解析を実施 し、その結果を比較している。その結果、OPC と比べ、HFSC の方がむしろ緩衝材の変質や緩衝 材中の pH の上昇が速く進む結果が得られた。これは高 pH の影響から想定される結果と逆の結 果となっているように見えるが、HFSC では支保領域での二次鉱物の沈殿による間隙率の低下が 起きておらず、結果としてアルカリ性成分の緩衝材への拡散による移動量が多くなっているため と分析している。

この事例を踏まえて、今後の検討課題としては以下のような点が挙げられる。

- ここで示した解析は当時の熱力学データベースを用いたものであり、最新のものを用いた場合結果が変わる可能性もあるのでその検証が必要。
- 埋め戻し材とHFSCの相互作用を想定した解析事例は見当たらなかったため、その解析も今後必要である。その際、埋め戻し材は緩衝材と比較してモンモリロナイト密度の低い点や砂礫等が含まれている点を考慮して解析を行う必要がある。

4) 課題 7: 低アルカリセメント使用による変質回避

課題1と同様に、既往の解析事例では低アルカリセメント(HFSC等)を用いたコンクリート と埋め戻し材の間に低密度層があるケースは存在しない。本検討で考慮している埋め戻し材の施 工不良を考慮した解析を実施するためには、課題1で述べた解析に取り組む必要があると考えら れる。低アルカリセメントを用いた場合に必要となる解析手法は、基本的には課題1で述べたも のと同様である。課題2で示した既往の検討事例を踏まえると、解析上は以下のような点に留意 する必要がある。

● 低アルカリセメントを用いることで、むしろ低拡散性の変質層が形成されにくくなり、(通常の OPC と比較すると pH が低いとはいえ) 高 pH のセメント溶出成分が埋め戻し材に移行

することになり、結果としてベントナイトの溶解や Ca 型化等が OPC と比較して進みやす くなる可能性がある。

上記のようなベントナイトの変質が進むと、移流によるモンモリロナイト溶解生成物の散逸が進 む可能性もあるため、拡散場での化学物質輸送解析のみを行うのみではなく、水理場も考慮した 連成解析を実施することが重要である。

5) 課題 3: ジオテキスタイル等による再冠水時パイピング回避

Sandén et al. (2018)では KBS-3V 処分坑道の埋め戻し材設置時の流入地下水の処理方法について包括的が検討がなされており、その処理方法の1つとしてジオテキスタイルを用いる手法を検討している。

上記手法の一環として、鋼製のトンネル試験装置(図 3.1-64、図 3.1-65)を用いた水の流入試 験を行った。このテストではジオテキスタイルの止水能力の他、ベントナイトペレットの水保持 能力のテストも行っている。ジオテキスタイルの止水能力を調査するため、水の流入速度を一定 に保つための水圧の測定試験が行われた。試験の概要は以下の通りである。

- ジオテキスタイルはガラス繊維製であり、厚さは約1.2 mm で、重量は約1 kg/m²である。 有機物の使用は避けられている。
- 表 3.1-20 にあるような 5 つのケースについて測定が行われた。それぞれのケースについての水の圧力の変化を図 3.1-66 に示す。圧力が急激に低下した部分は、ベントナイトペレットからの水の破過が起きたことを示している。
- Test1 はジオテキスタイルを用いないリファレンスケースであり、ベントナイトからの水の 破過が発生するまでに 525 リットルの水が保持された。
- Test2 は Test1 と同じ 0.25L/min の流入速度(ただし、後でトンネルからの漏れが発生した ことを受けて 0.2 L/min に調整)で、ジオテキスタイルを用いたものである。この場合、水 が破過するまでに 1762 リットルの水が保持されており、ジオテキスタイルによりパイピン グが回避できたことを示唆している。
- Test3 と Test4 は水の流入速度を 0.50L/min とし、ジオテキスタイルを壁側に取り付けた。
 破過時間はそれぞれ 32 時間、38 時間と短いが、これはペレットの性質に問題があったのではないか、と考察されている。この間に保持した水はそれぞれ 960 リットル、1140 リットルであった。
- Test5 はジオテキスタイルに排水溝(Temporary drainage)を設置した場合のテストであり、 流入速度が 1L/min を超える場合に必要と考えられている。この場合は、7 時間で 420 リッ トルが保持された。

以上のようにジオテキスタイルに止水能力があることは確認できたが、以下のような点が長期 性能評価の観点からコメントされており、このような課題に取り組むことが今後必要になると考 えられる。

- 止水のために使用するジオテキスタイルの量を把握しておくこと。使用するジオテキスタイルの量は坑道に交差する亀裂の本数でも変わりうるため、注意が必要。
- ジオテキスタイルの透水係数を把握すること。設置後のジオテキスタイルの透水係数は高い と予想されているので、水みちになってしまうことが懸念されている。



図 3.1-64 トンネル試験装置



図 3.1-65 Test4 で水が破過した後の坑道の写真

表 3.1-20 トンネル試験のテストケース

| Test | Pellet | Flow rate | Geotextile | Comments |
|--------|--------|-----------|------------|---|
| Test 1 | Asha | 0.25 | No | Reference test |
| Test 2 | Asha | 0.25 | Yes | Repeating 2012 test with glass fiber geotextile |
| Test 3 | Asha | 0.50 | Yes | Repeating 2012 test with glass fiber geotextile |
| Test 4 | Asha | 0.50 | Yes | Repetition of test 3, but performed using full scale backfill blocks. |
| Test 5 | Asha | 1.00 | Yes | Extreme case. Including equipment for temporary drainage. |



図 3.1-66 トンネル試験における水の圧力の変化

6) 課題 4: モンモリロナイトゾル化領域となる地下水水質の回避

ベントナイトゾルが安定となるのは以下の三つの条件が同時に成立する場合であり、通常の地 下水組成やコンクリート間隙水は該当しない。例外は、雨水に近い極めて希薄な地表水が深部に まで侵入する場合である。

- イオン強度が 25 mM (NaCl equivalent) 以下である
- コロイド系における二価の陽イオンの濃度が、DLVO 理論における"臨界凝集濃度"(CCC) である 1mM を下回っている
- 一価の陽イオンが粘土鉱物のイオン交換サイトを占める割合が有意となる、すなわち、 (aNa⁺)2/aCa²⁺ > 0.05

上記のような希薄な地表水が深部にまで浸入するような状況として考えられるケースは、例え ばアクセス坑道が何らかの理由により高透水性となってそこを移行経路となり、かつ移行中に残 存する地下水との混合や移行経路上に残存する物質との反応が起こらないような場合が考えられ る。上記の状況が生起するような場はサイト選定の段階で回避可能であると考えられるため、モ ンモリロナイトがゾル化する可能性は非常に低いと想定されるが、反応輸送解析によるシミュレ ーション等を通じて論拠を整備していくことが必要であると考えられる。

7) 課題 5: ペレット充填等による坑道上部施工不良回避

NUMO (2019) における埋め戻しの工法として締固め工法が挙げられている。締固め工法を中 心とする坑道埋戻し技術の実証試験については、「地下空洞型処分施設性能確証試験」における実 規模実証試験(秋山他、2016)の例がある。ここでは、転圧工法と吹付け工法の組み合わせによ って狭隘かつ隅角部を有する坑道上部埋戻しの構築を実証している。本実証試験においては施工 後の埋戻し材の採取により十分な透水係数(1.0×10⁻¹¹ m/s 程度)で施工できていることが確か められているが、上部に隙間なく充填できているかどうかの検証に関して詳細には記載されてい ない。一方で、今後の課題として、試験データのばらつきを評価する方法、吹付け時施工時の材 料分離を防止する方策、実証実験で用いられた材料以外の配合による検討が必要とされている。 なお、坑道の充填技術にはペレットを用いた工法も考案されているが、坑道上部をすき間なく充 填する技術を検証した例は国内には見当たらない。したがって、主に坑道上部のすき間を対象と した充填技術の検討・実証等は今後必要であると考えられる。

8) 課題 8: アクセス坑道上流側集中配置による循環流路回避

フランス(Dossier 2005 Argile)では、坑道を介した循環流路を回避するために坑道出口が1 か所にまとめられたデッドエンドタイプの設計方針がとられているが、その一方で適切に換気や 操業時安全性を確保することが必要となる。ANDRA、2005 は避難経路として処分エリアの水平 坑道に 200m ごとに直交する坑道と遮断壁を配することで安全に避難でき、換気については坑道 と送風機を使用して問題なく行われるとされているが、循環流路の回避を目的として坑道出口を 集中させる場合に操業時安全性をどのように確保するのかについて詳細な検討がなされている事 例は見当たらなかった。本対策の有効性を論じる上では、操業時の安全性の観点を踏まえた検討 が必要になると考えられる。

9) 課題 9: アクセス坑道が排水域となりうるサイトの回避

アクセス坑道が排水域となる場をサイト選定時に回避できればシーリングシステム劣化の対策 となりうると考えられる。アクセス坑道が排水域となる条件として、例えば図 3.1-67 に示す 3 パ ターンが想定される。温暖化の影響による新しい河川の発生や急激な海水準変動等を除けば、ア クセス坑道が排水域となりうる場をサイト選定時に回避することは可能であると考えられる。



図 3.1-67 アクセス坑道が排水域になり得る状況とそのイメージ及び回避方法

10) 課題 10: 深部の動水勾配が水平に近い場合のアクセス坑道に着目した地下水流動解析

前項の課題で示した種々の状況においてアクセス坑道が地下水の涵養域や排水域となるような 場合と、適切なサイト選定を行うあるいはアクセス坑道位置を選定することによってこのような 状況を避けた場合(地下水流動が深度によらずほぼ水平である場合)について、地下水流動がど のように変化するかを検証することが課題となる。ここではそれぞれについて地下水流動解析を 実施し結果の比較を行う。 図 3.1-68 にアクセス坑道が地下水排水域や涵養域となる場合の水理場とアクセス坑道が排水 域や涵養域とはならないように適切なサイト選定を行った場合の水理場について示す。これらの 境界水理条件をもとに水理解析・流線解析を行った。

まず、深成岩(亀裂状媒体)においてはアクセス坑道及び地下坑道埋め戻し材劣化ケースとし て上流側と下流側のアクセス坑道及びすべての地下坑道の埋め戻し材が劣化して透水係数が上昇 したケースにおいて、二つの水理場状況での結果を比較した。図 3.1-69 に示すように、深成岩 (亀裂状媒体)では、下流側アクセス坑道が排水域となるような状況でも、処分坑道を通過する 地下水流れは下流側の連絡坑道と交差する透水性割れ目を通じてパネル外に流出するため、アク セス坑道を介して地表面へ上昇する流線は見られない。また、深部の動水勾配が水平に近い場合 も同様に下流側アクセス坑道を介して地表に至る流線は見られない(二つのケースの顕著な差異 は、下流側の連絡坑道と交差する透水性割れ目を通じてパネル外に流出した流線の下流側での流 向となる)。また、劣化した上流側アクセス坑道を通じた地表水の地下深部への進入可能性につい ても解析を行った(図 3.1-70)。上流型アクセス坑道の中心を起点とし、起点の地表面からの深 度を変えた場合の地下水流動の流線の違いを検討すると、アクセス坑道が地下水排水域や涵養域 となる場合は、深度 50m 以浅の場合は、アクセス坑道と交差する高透水性亀裂を通して流線が岩 盤へ散逸しているが、50m を超え 100m 程度までになると、一部流線が処分坑道深度まで到達し ていることがわかる。一方、適切なサイト選定を行った場合の水理場では、各流線はほぼ起点に 近い深度を保ったまま水平方向へ移動し処分坑道へ到達する流線は見られない。

同様に、新第三紀堆積岩(亀裂状媒体)のケースについても解析を行った。新第三紀堆積岩で は、下流側アクセス坑道が排水域となる場合には当該経路を介して地表に至る流線が見られる。 また、深部の動水勾配が水平に近い場合にも、主要坑道からアクセス坑道へ到達し上昇する地下 水流は存在する。ただし、アクセス坑道を遡上中にこれと交差する割れ目を通じて水平方向に流 出するため地表面まで到達する流線はないという結果となった(図 3.1-71)。

劣化した上流側アクセス坑道を通じた地表水の地下深部への進入可能性についての解析結果から(図 3.1-72)、深成岩、新第三紀堆積岩ともに 30m 以浅の地表水の流線が処分坑道深度まで到達していることがわかる。これは、新第三紀堆積岩の場合の岩盤と劣化した坑道埋め戻し材の透水性のコントラストが大きく処分パネルが地下水を引き込む傾向が強いこと及びアクセス坑道と交差する割れ目の頻度が深成岩よりも小さく、連続した流路を形成しやすいことが理由と考えられる。

以上のことから、適切なサイト選定を行うあるいはアクセス坑道位置を選定することによって 処分坑道からアクセス坑道の地表面までの卓越した連続移行経路は発生しないと考えられる。た だし、上流側にアクセス坑道が配置され、かつ劣化している場合は、地表水が処分坑道まで到達 することが考えられ、そのような状況を想定する場合には酸化還元フロントの処分坑道への接近 等の化学的解析評価が必要になると考えられる。

132



図 3.1-68 アクセス坑道が地下水排水域や涵養域となる場合の水理場と、アクセス坑道が排水 域や涵養域とはならないように適切なサイト選定を行った場合の現実的な水理場の比較



図 3.1-69 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(亀裂性媒体)、アクセス坑道及び地下坑道埋め戻し材劣化ケース



図 3.1-70 アクセス坑道の地表面付近を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(亀裂性媒体)、アクセス坑道及び地下坑道埋め戻し材劣化ケ

ース



図 3.1-71 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:新第三紀堆積岩(亀裂性媒体)、アクセス坑道及び地下坑道埋め戻し材劣化ケース



図 3.1-72 アクセス坑道の地表面付近を初期位置とした地下水流動の流線:新第三紀堆積岩(亀裂性媒体)、アクセス坑道及び地下坑道埋め戻し 材劣化ケース

11) 課題 11:止水プラグによるアクセス坑道への地下水流動回避に関する水理解析

処分坑道や主要坑道及びアクセス坑道の止水機能が低下し、核種の速い移行経路となる可能性 があることについて、主要坑道から下流側アクセス坑道へ至る経路の途中に配置される止水プラ グが健全であれば、処分坑道からの卓越した地下水流動経路の形成を回避できる可能性がある。

ここでは、処分坑道や主要坑道及びアクセス坑道が劣化しているが、止水プラグが健全に残っ ていた場合、卓越した地下水流動経路の形成を回避できるかの検証解析を行った。なお解析パラ メータは予察解析と同じものを使用し、境界条件は深部の動水勾配が水平あるいは深部から地表 へ強制的な流れが形成されるような条件の2ケースで実施した。

3つの岩種(深成岩(亀裂性媒体)、深成岩(均質連続体)、新第三紀堆積岩(亀裂性媒体)について、施設が劣化し、止水プラグが健全あるいは劣化した場合の水理解析および流線解析を行った。図 3.1-73 から図 3.1-75 に解析結果を示す。いずれのケースでも、止水プラグによって、主要坑道から直接アクセス坑道へ流れる流動は抑止されているが、その周囲の岩盤を迂回してアクセス坑道へ移行する経路が存在しており、止水プラグでは卓越した地下水流動経路の形成を回避できないことがわかる。なお、主要坑道を移行せず一度岩盤に進入した流線がアクセス坑道に集水されているように変化しているが、これは止水プラグの影響により、主要坑道を通り立坑付近へ向かう流線の割合が低下(岩盤へ進入する流線が増加)するとともに、さらにその流線の流速も低下しているため、主要坑道経由を経由してアクセス坑道へ供給される流量が低下していることが原因と考えられる。つまり、止水プラグは、主要坑道流速の低下と、岩盤中を移行する移行距離の稼ぐことに対し、ある程度の機能を有するが、卓越した地下水流動経路の形成を完全には回避できないと考えられる。



深成岩(亀裂性媒体)

図 3.1-73 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(亀裂状媒体) (上)施設劣化、止水プラグなし (下)施設劣化、止水プラグ健全



図 3.1-74 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:深成岩(均質連続体) (上)施設劣化、止水プラグなし (下)施設劣化、止水プラグ健全



深成岩(均質連続体)

図 3.1-75 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線:新第三紀堆積岩(亀裂状媒体) (上)施設劣化、止水プラグなし (下)施設劣化、止水プラグ健全

前述のように止水プラグの設置によっても卓越移行経路の回避は困難な可能性があるととも に、課題 10 で示したように、深部の動水勾配が水平に近い地下水流動場を想定して解析を行っ た場合でも、新第三紀堆積岩(亀裂性媒体)のモデルでは、処分坑道を起点とする流線がアクセス 坑道を通り、距離を遡上、及び地表水が処分坑道深度まで進入する可能性がある。そこで、アク セス坑道の中間付近(深度 100m)に上流・下流の立坑を結ぶバイパス路を設置し地表水を迂回さ せることで、地表水の処分坑道への到達や処分坑道からの地下水の地表への到達を回避すること が可能かを検討した。

図 3.1-76 に示すとおり、既存の水理解析モデルに対して、上流・下流のアクセス坑道を結ぶ縦 横 6m×6m のバイパス路を配置した。また、迂回を促進するためバイパス路への分岐点の直下に 止水プラグを設定可能とした。バイパス路は十分に高透水性であることを期待することとし、シ ーリングシステムの劣化した場合の透水係数 1.0×10⁻⁵[m/s]の透水係数を設定した。このモデル を用いて、これまでの解析と同様に水理解析・流線解析を行い。地表水の流線や、処分坑道を起 点とする流線を算出した。

図 3.1-77 に、深部の動水勾配が水平に近い地下水流動場を想定したケースで、地表水の流線 のバイパス路の有無による影響の評価結果を示す。バイパス路未設置の場合、地表水は処分坑道 まで到達していたのに対して、バイパス路を設置した場合、地表水はバイパス路を選択的に移行 し、アクセス坑道を降下し、処分坑道まで到達流線は消失している。また、には、バイパス路の 有無による処分坑道を起点とする流線の変化を示しているが、地表付近のアクセス坑道の流れは、 バイパス路からの流れで補われるため、処分坑道を起点とする流線は、地表付近までアクセス坑 道を遡上することなく、バイパス路より深部の領域で岩盤に進入することが分かった(図 3.1-78)。

以上のことから、バイパス路の形成は地表水の迂回や処分坑道から立坑を介した地表への水の 進入を回避することに対し有効な方策であると考えられる。



図 3.1-76 バイパス路設置モデルの外観図

上流・下流バイパス路 未設置

上流・下流バイパス路 設置



図 3.1-77 アクセス坑道の地表面付近を初期位置とした地下水流動の流線: 新第三紀堆積岩(亀裂性媒体)、アクセス坑道及び地下坑道埋め戻し材劣化ケース 左:バイパス路未設置、右:バイパス路設置

上流・下流バイパス路 未設置

上流・下流バイパス路 設置



図 3.1-78 処分坑道中央を初期位置とした地下水流動の流線: 新第三紀堆積岩(亀裂性媒体)、アクセス坑道及び地下坑道埋め戻し材劣化ケース 左:バイパス路未設置、右:バイパス路設置

12) 課題 12: 坑道と割れ目系の交差による連続流動経路の回避

シーリングシステムがすべて劣化した場合でも、高透水性亀裂と坑道が交差するような深成岩 の場合は、坑道と高透水性割れ目との交差部から地下水が岩盤に進入し、連続流動経路の形成が 回避される(図 3.1-79)。一方、深成岩を等価な均質連続体として仮定した解析を行った場合、 岩盤が均質にかつ坑道よりも低透水であるため、岩盤に進入する地下水流動は形成されず、坑道 が連続流動経路として機能し得るとともに、新第三紀堆積岩のように、岩盤が不均質な場合でも、 亀裂の平均的な透水量係数が小さく、坑道よりも透水係数が高い亀裂との坑道との交差頻度が相 対的に低い場合、均質連続体と仮定した深成岩と同様に、坑道等の連続流動経路が形成される可 能性がある(図 3.1-79)。また、高透水性亀裂と坑道が交差するような深成岩の場合でも、亀裂 と坑道の水の流れを遮断するような状況(例えば坑道支保表面が目詰まりなどにより低透水とな る場合)を想定した場合、坑道と割れ目系の交差による連続流動経路の回避できない可能性がある ため、これらの影響を評価することが今後の検討課題として挙げられる。



坑道が高透水性割れ目と交差する環境 (深成岩に対する亀裂状媒体モデル)

図 3.1-79 処分坑道を初期位置とした地下水流動の流線

13) 課題 13: 坑道と交差する割れ目系への核種の散逸

新第三紀堆積岩における、シーリングシステム(処分坑道埋め戻し材及び支保工)が全て劣化 した場合を想定した物質移行解析の結果を示す。最上流側の廃棄体及び最下流側の廃棄体から放 出された粒子の軌跡を図 3.1-80 および図 3.1-81 にそれぞれ示す。なお本解析は 3.1.4(1) 1)で 示した新第三紀堆積岩の解析条件と同じ条件で実施している。

図 3.1-80 から、最上流側の廃棄体については、最上流側の廃棄体から出た粒子のほぼ全量が 処分孔内を拡散で移行して上部坑道埋め戻し材に至り、埋め戻し材中の比較的速い流れに沿って パネル中央付近に達する。その後、パネル下流側で上部坑道を流れる地下水が岩盤側に流出し、 坑道と交差する亀裂に進入して岩盤中を移流一分散一マトリクス拡散しつつ移動する(進入する 個々の割れ目によってパネルより上方に移動するものや下方に移動するもの、あるいは隣の坑道 に再進入するもの等が存在する)。ほとんどの粒子が坑道端部(赤矢印で示した)に到達する前 に岩盤に入るため、埋め戻し材が劣化した処分坑道と下流側アクセス坑道が連続した卓越流路と なっても廃棄体から移行する核種がこの経路に沿って地表に至る可能性は極めて低いと考えられ る。

一方で、図 3.1-81 から、最下流側の廃棄体については、下流側の廃棄体から出た粒子のほぼ全量が処分孔と交差する割れ目に進入して、その後、岩盤中を移流一分散一マトリクス拡散しつつ移動することとなる。このため、処分坑道は核種移行の短絡経路となる可能性は極めて低いと考えられる。



図 3.1-80 新第三紀堆積岩最上流側の廃棄体から移行する非収着性トレーサーの挙動(最上流側廃棄体)



図 3.1-81 新第三紀堆積岩最下流側の廃棄体から移行する非収着性トレーサーの挙動(最下流側廃棄体)

3.1.6 まとめと今後の課題

シーリングシステムの安全機能に対する重要な影響モードの抽出や国際 FEP リストを起点と したシナリオ解析を行った結果、シーリングシステムの劣化・透水性上昇に至る可能性として、 セメント影響による埋め戻し材(ベントナイト系材料)の化学的変質、埋め戻し材や緩衝材中の ベントナイトの侵食・流出、及び埋め戻し材の施工不良を発端としたその後のセメント影響によ る変質という三つのシナリオを抽出した。

今回の検討の結果、上記のシナリオのいずれについても、適切なサイトの選定(モンモリロナ イトのゾル化が生ずる様な例外的な地下水水質の回避)、設計・施工における対策(ジオテキスタ イルによる再冠水時のベントナイトのパイピングの回避、ペレット等を用いた坑道上部のベント ナイト充填による施工不良の回避、及び低アルカリセメントの使用によるセメント影響の緩和) 及び安全評価上の論証(セメント影響によるベントナイト変質に関する反応輸送解析)によって 回避できる可能性が示された。

なお、これらの予防的対策によるシーリングシステム機能維持に関する確度を高めるためには、 今後、以下の課題に取り組む必要があるものと考えられる。

- ジオテキスタイルによるパイピング回避の実証試験及びジオテキスタイルが卓越した流動経路となる可能性についての評価(水理解析及び核種移行解析)
- 処分坑道上部の施工不良が生じた場合のベントナイト低密度部とコンクリート支保の相互作用を考慮した反応輸送解析
- ベントナイトとコンクリート支保の境界部分に生ずる保護的変質層が地震等の外力によって 破壊される場合の埋め戻し材変質の可能性に関する力学-反応輸送連成解析
- 埋め戻し材を対象とした場合の低アルカリセメントの影響解析(最新の熱力学データベース を用いた場合の既往の解析結果との比較も含む)

なお、前述した種々の予防策にもかかわらず、シーリングシステムが劣化したことを仮定した 場合でも、NUMO包括的技術報告書で想定されている深成岩のように透水性の岩盤割れ目が比較 的高い頻度で坑道と交差している場合には、坑道内を流れる地下水がこれらの岩盤割れ目中へと 分散して流入するために坑道は卓越した流動経路とはならない。また、NUMO包括的技術報告書 で想定されている新第三紀堆積岩のように坑道と交差する透水性割れ目の頻度が低い場合には、 シーリングが劣化して透水性の上昇した坑道が速い流路となるが、この場合でも核種は処分パネ ル下流側で岩盤中に散逸するため、坑道がクリティカルな核種移行経路となることは考えにくい。 一方、埋め戻し材の施工不良を発端としたその後のセメント影響による埋め戻し材透水性の上 昇が生じた場合でも、コンクリート支保の透水性は初期の状態にあることを想定した「土管シナ リオ」では、処分パネル上流側の廃棄体から上部坑道に移行した核種の一部は下流側アクセス坑 道に至る可能性が示唆された。この点については、今後、以下の課題に取り組む必要があるもの と考えられる。

- 劣化(土管化)した坑道を移行する核種を想定した安全評価(被ばく線量評価)
- 劣化した坑道を陽にモデル化した処分パネルスケールの水理・核種移行解析

また、シーリングシステム劣化が生起した場合の影響緩和策として、処分場レイアウトやサイ ト選定上の種々の対策によって影響回避・緩和の確実性をさらに高めることが可能と考えられ、 そのためには、今後以下の課題に取り組む必要があると考えられる。

- アクセス坑道を上流側に集中配置する処分場レイアウトによりアクセス坑道が地表に至る短 絡経路となる可能性の回避及び緊急避難経路の確保方策の検討と水理解析によるこの対策の 効果の確認
- 下流側アクセス坑道が排水域となる可能性を回避するためのサイト選定上の要件の明確化
- 上流側と下流側アクセス坑道を直結したバイパス経路による処分場を介した巡回流路回避を 金図した処分場レイアウトの検討及びその効果の確認(上述した「土管シナリオ」における アクセス坑道短絡経路の回避の可能性に関する水理及び核種移行解析を含む)

3.2 シーリングシステム設計評価技術開発

3.2.1 既存の設計フローの更新・高度化

シーリングシステムに関する設計フローとしては、第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構、1999)の原子力機構が成果を踏まえH17取りまとめの中で提示したものがあった(図 3.2-1)。 しかしこの時点では、止水プラグ等に求められる要求事項が概略的に示されていただけであった ため、設計フローとしてもその概念的な検討結果を踏まえたものとなっており、実務への応用と いう観点では不十分であった。

このため、H17 取りまとめ以降の技術開発成果も盛り込まれて作成されている原子力発電環境 整備機構(以下、NUMOと称す)の包括的技術報告書レビュー版(NUMO、2018)で示された フローをベースとして、より実務への応用を意識した設計フローへの更新を行った。



(原子力機構、2005)

表 3.2-1、表 3.2-2 および表 3.2-3 は、公開されていた NUMO の包括的技術報告書レビュー版 (NUMO、2018)から抽出整理したシーリングシステムに求められる要求事項を工学的対策と安 全評価の両面で整理したものである。この整理の結果から、処分場の設計の観点からの具体的な シーリングシステムへの性能や品質管理のための指標などが、設計要件、内容および検討項目と してとなっており、安全評価の観点では、シーリングシステムの設置場所と時間スケールに応じ た要求レベルが主に示されていることがわかる。

このうち、安全評価に関連する時間スケールに応じた要求レベルに対応するような研究開発を 行うことは、2 ヵ年の本事業の中では困難なため、ここで処分場の設計の観点を考慮した形でフ ローの更新を行った。その結果を図 3.2-2 に示す。更新は、2 ヵ年の本事業で得られてきた成果 も踏まえつつ、実務的にシーリングシステム設計を行っていくという観点で行っており、図 3.2-1 に示す過去の検討フローとの大きな違いは、実際の施工方法の検討も1つのプロセスとして加え たことと、シーリング材料の長期変遷の影響までを含めたフロー図としている所である。後者に ついては、本事業後の研究開発により、より精緻化されていくことが期待される。

表 3.2-1 閉鎖システムに関する処分場設計の視点での情報の整理

| (原子力発電環境整備機構、 | 2018 より抜粋・整理) |
|---------------|---------------|
|---------------|---------------|

| 構成要素 | 基本概念 | 安全機能 | 設置場所 | 設計要件 | 内容 | 検討項目 | 評価項目 | 内容 |
|-------|------|------------|-------------|-------|------------|-------------|------------|-------------|
| 埋め戻し材 | 閉じ込め | 坑道およびその周辺が | ・処分場操業のために | 低透水性 | 坑道内が卓越した流路 | 材料、有効粘土密度 | 緩衝材および止水プラ | 処分坑道や連絡坑道 |
| | | 卓越した放射性物質の | 建設したアクセス坑道 | | にならないこと | | グの膨出抑制 | において、再冠水後の |
| | | 移行経路となることの | や連絡坑道(地表と直 | | | | | 緩衝材および止水プラ |
| | | 抑制 | 結する経路) | | | | | グ(横置き・粘土プラグ |
| | | | ・処分坑道(竪置きのみ | | | | | の場合)の膨出を抑制 |
| | | | | | | | | すること |
| | | | | 製作施工性 | 既存の技術又は実現 | 乾燥密度、有効粘土密 | | |
| | | | | | 性の見通しのある技術 | 度、材料の混合率 | | |
| | | | | | で製作施工が可能であ | | | |
| | | | | | ること | | | |
| 止水プラグ | 閉じ込め | 坑道およびその周辺が | 処分場操業のために建 | 低透水性 | 坑道埋め戻し材との組 | 材料、有効粘土密度、 | | |
| | | 卓越した放射性物質の | 設したアクセス坑道や | | み合わせで、坑道およ | プラグの構造 | | |
| | | 移行経路となることの | 連絡坑道(地表と直結 | | びその周辺に沿った地 | | | |
| | | 抑制 | する経路) | | 下水の流動を抑制する | | | |
| | | | | | こと | | | |
| | | | | 製作施工性 | 既存の技術又は実現 | 乾燥密度、材料の混合 | | |
| | | | | | 性の見通しのある技術 | 率 | | |
| | | | | | で製作施工が可能であ | | | |
| | | | | | ること | | | |
| カ学プラグ | 特になし | 緩衝材および埋め戻し | 埋め戻された処分坑道 | 構造健全性 | プラグに作用する坑道 | プラグ厚さ、切り欠き形 | | |
| | | 材などの性能低下に繋 | の端部 | | 埋め戻し材の膨潤圧や | 状、配筋 | | |
| | | がる膨出の抑制 | | | 水圧などに対する構造 | | | |
| | | | | | 健全性を有すること | | | |
| | | | | 製作施工性 | 既存の技術又は実現 | コンクリートの配合・強 | | |
| | | | | | 性の見通しのある技術 | 度 | | |
| | | | | | で製作施工が可能であ | | | |
| | | | | | ること | | | |

表 3.2-2 閉鎖システムに関する安全評価の視点での情報の整理(埋め戻し材)

(原子力発電環境整備機構、2018 より抜粋・整理)

| 構成 | 処分 | 安全評価で | 安全 | 対象とする時間・空間スケー | ールとその間の変遷に関する考え方(基本シナリ | 才) | 安全評価上の取り扱い | い(基本シナリオ) |
|----|-----|--------|----------|-----------------------------|------------------------|------------------|-------------|-----------|
| 要素 | 形態 | 考慮する処 | 評価 | T1:処分場閉鎖から再冠水終了までの期間 | T2:再冠水終了から放射性核種の移行が生じ | T3:放射性核種の移行が生じてか | 最も発生可能性が高い | モデル化の考え方 |
| | | 分場の構成 | 上の | | るまでの期間 | ら現在の地質環境の特性が大きく | と想定される状態(T1 | |
| | | 要素 | 考慮 | | | 変化しないと考えられるまでの間 | から T3 までの間) | |
| | | | の有 | | | | | |
| | | | 無 | | | | | |
| 埋め | 竪置 | 処分坑道 | v | ニアフィールドスケール:処分坑道の端部に位置する取り | ニアフィールドスケール:処分坑道の端部に位 | ニアフィールドスケール:処分坑道 | ・埋め戻し材と坑道など | 埋め戻し材は、対 |
| 戻し | き・ブ | | | 付け坑道および主要坑道の一部に充填されるベントナイト | 置する取り付け坑道および主要坑道の一部 | の端部に位置する取り付け坑道お | の他の構成要素との界 | 象領域内のセメン |
| 材 | ロッ | | | と掘削土の混合物である埋め戻し材は地下水の浸入に伴 | に充填される埋め戻し材は「坑道が卓越した | よび主要坑道の一部に充填される | 面の隙間は埋め戻し材 | ト系材料の使用量 |
| | ク方 | | | うベントナイトの膨潤によって周辺母岩と同等の水理学的 | 放射性物質の移行経路となることの抑制」機 | 埋め戻し材が有する「坑道が卓越 | の膨潤により埋められ | に応じた変質の程 |
| | 式 | 王安玑追 | ~ | 特性を有するよう設計されており、「坑道が卓越した放射性 | 能が発揮されるレベルはさらに低下する | した放射性物質の移行経路となる | る | 度を考慮し、一定 |
| | | | | 物質の移行経路となることの抑制」機能を発揮するが、セメ | | ことの抑制」機能はほとんど失わ | ・コンクリート支保エが | の透水係数値を |
| | | | | ント系材料との反応や浸食などにより徐々にそのレベルが | | れており、母岩程度の透水性を維 | 敷設される場合には、 | 設定する |
| | | | | 低下していく | | 持することがさらに困難となる | 埋め戻し材はセメント起 | |
| | | 連絡坑道 | ~ | パネルスケール:連絡坑道に充填されるベントナイトと掘削 | パネルスケール:連絡坑道に充填される埋め | パネルスケール:連絡坑道に充填 | 源の高アルカリ成分に | |
| | | | | 土の混合物である埋め戻し材は地下水の浸入に伴うベント | 戻し材が有する「坑道が卓越した放射性物質 | される埋め戻し材が有する「坑道 | よって変質し、透水性が | |
| | | | | ナイトの膨潤によって周辺母岩と同等の水理学的特性を有 | の移行経路となることの抑制」機能が発揮さ | が卓越した放射性物質の移行経 | 増大する | |
| | | | | するよう設計されており、「坑道が卓越した放射性物質の移 | れるレベルはさらに低下する | 路となることの抑制」機能はほとん | | |
| | | | | 行経路となることの抑制」機能を発揮するが、セメント系材 | | ど失われている | | |
| | | | | 料との反応や浸食などにより徐々にそのレベルが低下して | | | | |
| | | | | いく | | | | |
| | | アクセス坑道 | ~ | 処分場スケール:アクセス坑道(アクセス斜坑/アクセス立 | 処分場スケール:アクセス坑道(アクセス斜坑 | 処分場スケール:アクセス坑道(ア | | |
| | | | | 坑)に充填されるベントナイトと掘削土の混合物である埋め | /アクセス立坑)に充填されるベントナイトと | クセス斜坑/アクセス立坑)に充 | | |
| | | | | 戻し材は、地下水の浸入に伴うベントナイトの膨潤によって | 掘削土の混合物である埋め戻し材が、安全機 | 填される埋め戻し材の安全機能は | | |
| | | アクヤス立坑 | ~ | 周辺母岩と同等の水理学的特性を有するよう設計されて | 能を発揮するレベルはさらに低下する | ほとんど失われている | | |
| | | | | おり、「坑道が卓越した放射性物質の移行経路となること | | | | |
| | | | | の抑制」機能を発揮するが、セメント系材料との反応や浸 | | | | |
| | | | | 食などにより徐々にそのレベルが低下していく | | | | |
| | 横置 | 処分坑道 | ~ | 竪置き同 | 竪置き同 | 竪置き同 | | |
| | き・ | 連絡坑道 | ~ | 竪置き同 | 竪置き同 | 竪置き同 | | |
| | PEM | アクセス坑道 | ~ | 竪置き同 | 竪置き同 | 竪置き同 | | |
| | 方式 | アクセス立坑 | v | | | | | |

表 3.2-3 閉鎖システムに関する安全評価の視点での情報の整理(止水プラグ、カ学プラグ)

(原子力発電環境整備機構、2018より抜粋・整理)

| 要素 形態 今点する処 分場の構成 支系 評価 T1.処分場開鎖から再遅水終了までの期間 12.再度水終了から放射性機種の移行が生じ、 5.37.00%1(量換の特性が大きく 意才での期間 T3.38性核種の移行が生じ、 5.37.00%1(量換の特性が大きく 定したいと考えられるまでの同) 長売表車面他台本区 5.37.00%1(量換の特性が大きく 定したいと考えられるまでの同) モデル化の考えが 止水 要素 考点 の者 二アフィールドスケール:・ハントナイトを使用して構築される 生 ペアフジは、上記の雪か更した法達ヤロン を読れるない セルスフジは、上記の雪か更した法達ヤロン を読れるない たれ、エスフジ(1、北急や ロン が能かすへのまたが やロン (準続法)(二のたきたい て数) (1、抗盗・ロン (本)にたいきえ)(二、10.5%)(1.5%) | 構成 | 処分 | 安全評価で | 安全 | 対象とする時間・空間スケ- | ールとその間の変遷に関する考え方(基本シナリ | オ) | 安全評価上の取り扱い | ヽ(基本シナリオ) |
|---|----|-----|--------|----------|-------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------|-----------|
| N | 要素 | 形態 | 考慮する処 | 評価 | T1:処分場閉鎖から再冠水終了までの期間 | T2:再冠水終了から放射性核種の移行が生じ | T3:放射性核種の移行が生じてか | 最も発生可能性が高い | モデル化の考え方 |
| 広水 要素 内倉 の方 集 ニフフィールにスケール・バントナイトを使用して構築される エスプラグは加える ニフフィールにスケール・エスプラグは、二部、フライルにスケール・エスプラグは、加速やロスタール・エスプラグは健全なが プレスプラグは、加速やロスジール・エスプラグは、加速やロスタール・エスプラグは、加速やロスタール・エスプラグは健全なが プム、加速やロスタール・エスプラグは、加速やロスタール・エスプラグは、加速やロスタール・エスプラグは、加速やロスタール・エスプラグは健全なが プム、加速やロスタール・アクマルになかール・正水プラグは、加速やロスタール・エスプラグは、加速やロスタール・エスプラグは加速な加速を発展する のた能か発展する (1) 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 | | | 分場の構成 | 上の | | るまでの期間 | ら現在の地質環境の特性が大きく | と想定される状態(T1 | |
| Image: Constraint of the constrating the constraint of the constraint of the constraint of the | | | 要素 | 考慮 | | | 変化しないと考えられるまでの間 | から T3 までの間) | |
| Image: Normal Section 1.1 Constraint of the section 1.2 Constraint 1.2 Constraint 1.2 Constraint 1.2 Constrai | | | | の有 | | | | | |
| 止水 堅置 処分坑道 ニアフィールバスケール:ペンケイトを使用して構築される ニアフィールバスケール:止水ブラグは、坑道 ニアフィールバスケール:止水ブラグは、坑道 ニアフィールバスケール:止水ブラグは、坑道 ニアフィールバスケール:止水ブラグは、坑道 ニアフィールバスケール:止水ブラグは、坑道 ニアフィールバスケール:止水ブラグは、坑道 ニアフィールバスケール:止水ブラ 小ボブラグは、坑道や ED2 が地下水の8 かが通時期の住船が かせ約3所第の住船が かけまがうがはかまる かけまがうがまが通いである かけまがうがまかる かけまがうかまかる かけまがうかまかる かけまがうかまかる かけまがうかまかる かけまがうかまかる かけまがうかまかる かけまがうかまかる かけまかうかまかる かけまがうかまかる かけまかうかまかる かけまかうかまかる かけまかうかまかる かまかうたかかまか かけまかうかまかる ふりまかうかまかる ふりまかうかまかる ふりまかうかまかる ふりまかうかまか ふりまかうかまかる ふりまかうかまかる ふりまかうかまかる ふりまかうかまかる ふりまかうかまかる ふりまかうかまかまか ふりまかうかまかまか ふりまかうかまか ふりまかうかまか ふりまかうかまかまか ふりまかうかまかまか ふりまかうかまか ふりまかうかまか ふりまかうかまか ふりまかうかまか ふりまかうかまか ふりまかうか ふりまかうかか ふりまかうか ふりまか ふりまか ふりまか ふりまか ふりまか ふりまか ふりまか ふりまか ふりまか ふりまか ふりまか ふりまか ふりまか <t< th=""><th></th><th></th><th></th><th>無</th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th></t<> | | | | 無 | | | | | |
| ブラ き・ブ レホフラグは、上記の埋め良した坑道や D2 を読れ込地 や E02 が遠絶抗道への卓越した地下水の移 グが 坑, 坑道や E02 が地下水の移 グが地下水の移 グボルスケール: 設置された止ホブラグは、処分場内売 税 総とさいたいまかごかが 税 総とさいたいたが 税 総を引き続き組持する。 グ 谷のとして扱か 後部することを抑制する 機能を引き続きまかた グボルスクール: 決壊が道 グ ふパネルスケール: 設置された止アンラグは、処分場内売 税 パネルスケール: 止水ブラグは10.50,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,0 | 止水 | 竪置 | 処分坑道 | | ニアフィールドスケール:ベントナイトを使用して構築される | ニアフィールドスケール:止水プラグは、坑道 | ニアフィールドスケール:止水プラ | ・止水プラグは健全な部 | 止水プラグは所期 |
| グ ロック方 主要抗道 下水が連絡抗道への卓貌した地下水の移行経路となって、行経路となり、これらを介して放射性物質が、移動することを抑制する。 存経路となり、これらを介して放射性物質が、約す数面することを抑制する。 発揮される。 発揮される。 発揮される。 ● | プラ | き・ブ | | | 止水プラグは、上記の埋め戻した坑道や EDZ を流れる地 | や EDZ が連絡坑道への卓越した地下水の移 | グは、坑道や EDZ が地下水の移 | 分が残り所期の性能が | の性能が発揮され |
| クカ式 「広射性物質が移動することを抑制する」機能を維持する。 移動することを抑制する」機能を引き続き維持 性物質が移動することを抑制する 機能を引き続き維持する。 連絡坑道 「ペネルスケール:設置された止水ブラグは、処分場内を通 通した地下水が連絡坑道を経てアクセス坑道に至るような 流れを介した放射性核種の移動を防止する パネルスケール:止水ブラグは引き続き安全 機能を維持しており、処分坑道内を処分場内 を流れる地下水が連絡坑道を軽てアクセス坑 道に短部するような流れを生じ、これを介した 放射性核種の移動が生じることが防止される。 パネルスケール:連絡坑道に設置 されたルズラグは引き続き安全 機能を維持しており、処分場入ケール:アクセス坑道にご たかり町林本の移行経となり、これを かして放射性核種の移動が生じることが防止される。 アクセス坑道 ✓ 処分場スケール:アクセス坑道に設置されるし水ブラグに とかして放射性核種の移動が生じることが防止される。 小して放射性核種の移動が生じることが抑制される。 アクセス坑道 ✓ 処分場スケール:アクセス坑道に設置されるし水ブラグの安全機能は引き続き維持され、 50 ^x EDZ を介して短絡し放射性核種の移行経路となること が防止される 処分場スケール:アクセス坑道に しかプラグの安全機能は引き続き維持され、 が進 EDZ がして放射性核種が移行することが抑制される。 処分場スケール:アクセス坑道に とって地下水が連絡坑道本るし水ブラグの安全機能は引き続き維持され、 坑道や EDZ がして放射性核種が移行することが抑制される。 検査 一 ● ● ● ● ● ● ● ● < | グ | ロッ | 主要坑道 | | 下水が連絡坑道への卓越した地下水の移行経路となって | 行経路となり、これらを介して「放射性物質が | 行経路となり、これらを介して放射 | 発揮される。 | るものとして扱う |
| ボ ・ · ・ * | | ク方 | | | 「放射性物質が移動することを抑制する」機能を維持する。 | 移動することを抑制する」機能を引き続き維持 | 性物質が移動することを抑制する | | |
| 水 連絡坑道 ✓ バネルスケール:設置された止水ブラグは、処分場内を通 過した地下水が連絡坑道を経てアクセス坑道に至るような 流れを介した放射性核種の移動を防止する バネルスケール:連水ブラグは引き続き安全 機能を維持しており、処治した水ブラグは引き続き安全 物にを推持しており、知道や EDZ バネルスケール:連絡坑道に設置 された止水ブラグは引き続き安全 物にを推持しており、知道や EDZ バネルスケール:運路坑道を経てアクセス坑道に至るような 流れを介した放射性核種の移動を防止する バネルスケール:運路坑道を経てアクセス坑道に至るような 流れをかした放射性核種の移動が生じることが防止される バネルスケール:アクセス坑道や EDZ アクセス坑道 ✓ 処分場スケール:アクセス坑道に設置される止水ブラグに よって地下水が連絡坑道からアクセス坑道にあるいはそれ らが EDZ を介して短絡し放射性核種の移行経路となること が防止される 処分場スケール:アクセス坑道に設置される止水ブラグの安全機能 は引き続き維持され、坑道や EDZ 処分場スケール:アクセス坑道に設置される止水ブラグの安全機能 は引き続き維持され、坑道や EDZ アクセス坑道 ✓ 処分場スケール:アクセス坑道に設置されるした水ブラグの安全機能は引き続き維持され、 らが EDZ を介して短絡し放射性核種の移行経路となること が加速される 処分場スケール:アクセス坑道に設置されるし水ブラグの安全機能 は引き続き維持され、 坑道や EDZ 処分場スケール:アクセス坑道に 設置されるしホブラグの安全機能 は引き続き維持され、 小道や EDZ 処分場なケール:アクセス坑道に 設置されるしホブラグの安全機能 は引き続き維持され、 小道や EDZ ● ● アクセス坑道 ✓ 砂(加速水石) が防止される ・ボブラグの安全機能 い ごとかい取りたれを を介して放射性核種が移行することが抑制 れる ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● < | | 式 | | | | する。 | 機能を引き続き維持する。 | | |
| 水 小 通した地下水が連絡坑道を経てアクセス坑道に至るような 流れを介した放射性核種の移動を防止する 機能を維持しており、処分坑道内を処分場内 差流れる地下水が連絡坑道を経てアクセス坑 道に短線するような流れを生し、これを介した が地下水の移行経となり、これを かして放射性核種の移動が生じることが防止される された止水ブラグは引き続き安全 機能を維持しており、坑道や EDZ が地下水の移行経となり、これを 介して放射性核種の移動が生じることが防止される アクセス坑道 ✓ 処分場スケール:アクセス坑道に設置される山水ブラグの安全機能は引き続き維持され、 ふった地下水が連絡坑道からアクセス坑道にあるいはそれ。 よって地下水が連絡坑道からアクセス坑道にあるいはそれ。 処分場スケール:アクセス坑道に設置される山水ブラグの安全機能は引き続き維持され、 坑道やEDZ が地下水の短絡経路となり、これ を介して放射性核種が移行することが抑制される 処分場スケール:アクセス坑道に 設置される山水ブラグの安全機能は引き続き維持され、 坑道やEDZ が地下水の短絡経路となり、これ を介して放射性核種が移行することが抑制される 水 アクセス坑道 ✓ 堅置き同 型 のが出たれる かが地下水の短絡経路となり、これ を介して放射性核種が移行することが抑制される ● ● ● ● | | | 連絡坑道 | ~ | パネルスケール:設置された止水プラグは、処分場内を通 | パネルスケール:止水プラグは引き続き安全 | パネルスケール:連絡坑道に設置 | | |
| 水 小 流れを介した放射性核種の移動を防止する を流れる地下水が連絡坑道を経てアクセス坑 道に短線するような流れを生じ、これを介した。 放射性核種の移動が生じることが防止される 機能を維持しており、坑道や EDZ が地下水の移行経となり、これを 介して放射性核種の移動が生じることが防止される アクセス坑道 ✓ 処分場スケール:アクセス坑道に設置される止水ブラグに よって地下水が連絡坑道からアクセス坑道にあるいはそれ らが EDZ を介して短絡し放射性核種の移行経路となること 処分場スケール:アクセス坑道に設置される 止水ブラグの安全機能は引き続き維持され、 坑道や EDZ が地下水の短絡経路となり、これ を介して放射性核種が移行することが抑制される ● 検 一 ● ● ● | | | | | 過した地下水が連絡坑道を経てアクセス坑道に至るような | 機能を維持しており、処分坑道内を処分場内 | された止水プラグは引き続き安全 | | |
| ···································· | | | | | 流れを介した放射性核種の移動を防止する | を流れる地下水が連絡坑道を経てアクセス坑 | 機能を維持しており、坑道や EDZ | | |
| <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>道に短絡するような流れを生じ、これを介した</td> <td>が地下水の移行経となり、これを</td> <td></td> <td></td> | | | | | | 道に短絡するような流れを生じ、これを介した | が地下水の移行経となり、これを | | |
| ···································· | | | | | | 放射性核種の移動が生じることが防止される | 介して放射性核種の移動が生じる | | |
| 小学 空 の分場スケール:アクセス坑道に設置される止水ブラグに よって地下水が連絡坑道からアクセス坑道に設置される止水ブラグの安全機能は引き続き維持され、 らが EDZ を介して短絡し放射性枝種の移行経路となること が防止される 処分場スケール:アクセス坑道に設置される 止水ブラグの安全機能は引き続き維持され、 坑道や EDZ が地下水の短絡経路となり、これ を介して放射性核種が移行することが抑制される 処分場スケール:アクセス坑道に 設置される止水ブラグの安全機能 は引き続き維持され、坑道や EDZ 複 処分坑道 ✓ 警遣き同 をついて放射性核種の移行経路となること が防止される シーロン < | | | | | | | ことが抑制される | | |
| 水プラグの安全機能は引き続き維持され、 、 が防止される 設置される止水プラグの安全機能 は引き続き維持され、 、 が防止される 設置される止水プラグの安全機能 は引き続き維持され、 、 が防止される 設置される止水プラグの安全機能 は引き続き維持され、 、 が防止される い に なの か か か か の ・ い の に なの た か か や か や や や や か や | | | アクセス坑道 | ~ | 処分場スケール:アクセス坑道に設置される止水プラグに | 処分場スケール:アクセス坑道に設置される | 処分場スケール:アクセス坑道に | | |
| ···································· | | | | | よって地下水が連絡坑道からアクセス坑道にあるいはそれ | 止水プラグの安全機能は引き続き維持され、 | 設置される止水プラグの安全機能 | | |
| ・ | | | | | らが EDZ を介して短絡し放射性核種の移行経路となること | 坑道や EDZ が地下水の短絡経路となり、これ | は引き続き維持され、坑道や EDZ | | |
| <td></td> <td></td> <td>アクセス立坑</td> <td>~</td> <td>が防止される</td> <td>を介して放射性核種が移行することが抑制さ</td> <td>が地下水の短絡経路となり、これ</td> <td></td> <td></td> | | | アクセス立坑 | ~ | が防止される | を介して放射性核種が移行することが抑制さ | が地下水の短絡経路となり、これ | | |
| 点 点 点 二 | | | | | | れる | を介して放射性核種が移行するこ | | |
| 横置 処分坑道 <th< th=""><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th>とが抑制される</th><th></th><th></th></th<> | | | | | | | とが抑制される | | |
| き・ PEM 方式 連絡坑道 ✓ 堅置き同 堅置き同 | | 横置 | 処分坑道 | | | | | | |
| PEM アクセス抗道 V 堅置き同 堅置き同 堅置き同 空間 空目 | | き・ | 連絡坑道 | ~ | 竪置き同 | 竪置き同 | 竪置き同 | | |
| 方式 アクセス立坑 ✔ 力学 堅置 処分坑道 ✔ プラ き・ブ 主要坑道 ● グ ロッ 連絡坑道 ● | | PEM | アクセス坑道 | ~ | 竪置き同 | 竪置き同 | 竪置き同 | | |
| 力学 竪置 処分坑道 ✓ プラ き・ブ 主要坑道 ・鉄筋の腐食膨張によ 局所的な構造であ グ ロッ 連絡坑道 ・鉄筋の腐食膨張によ るため、地下水泳 | | 方式 | アクセス立坑 | ~ | | | | | |
| プラ き・ブ 主要坑道 り躯体のひび割れが増 るため、地下水泳 グ ロッ 連絡坑道 加し透水性が増大する 動場への影響に | カ学 | 竪置 | 処分坑道 | ~ | | | | ・鉄筋の腐食膨張によ | 局所的な構造であ |
| グ ロ ッ 連絡坑道 | プラ | き・ブ | 主要坑道 | | | | | り躯体のひび割れが増 | るため、地下水流 |
| | グ | ロッ | 連絡坑道 | | | | | 加し透水性が増大する | 動場への影響は |
| ク 方 アクセス坑道 ・セメント系材料の溶脱 限定的と考え、そ | | ク 方 | アクセス坑道 | | | | | ・セメント系材料の溶脱 | 限定的と考え、モ |
| 式 アクセス立坑 がさらに進行し、いずれ デルには取り込ま | | 式 | アクセス立坑 | | | | | がさらに進行し、いずれ | デルには取り込ま |
| 横置 処分坑道 🖌 セメント成分が消失して ない | | 横置 | 処分坑道 | ✓ | | | | セメント成分が消失して | ない |
| き・ 連絡坑道 高透水性構造となるが | | き・ | 連絡坑道 | | | | | 高透水性構造となるが | |
| PEM アクセス坑道 局所的である。 | | PEM | アクセス坑道 | | | | | 局所的である。 | |
| 方式 | | 方式 | アクセス立坑 | | | | | | |



図 3.2-2 平成 30 年度までの本事業成果および NUMO 包括的レポートで示された地下施設設計 フローも加味した形で更新したシーリングシステム設計に関するフロー(図中右側)

3.2.2 プラグの設計に関する解析的検討

前項で示した実際の地層処分場において設置される可能性のあるシーリングシステム構成要素 のうち、止水プラグは、掘削により坑道周辺岩盤中に形成される EDZ を介して断層のような地上 まで直結する物質移動経路上の物質の移動を遅らせる性能や、坑道埋め戻し領域の力学的な支持 性能が求められる。後者については、既往の構造物の設計手法によって適切な性能を持つプラグ を設計できる一方、プラグの物質移動に関する遅延性能を考慮した設計という観点での合理的な 設定根拠はほとんどなく、直接測定された EDZ の範囲を目安にプラグの大きさやその形状を設 定しているのが現状である。このため、わが国に存在するジェネリックな地質環境を対象とし、 図 3.2-3 のイメージに示すような水理・物質移動の感度解析によって、止水プラグの効果を最大 限に発揮するための合理的な設計の考え方に関する基盤情報を提示するための数値解析的検討を 実施した。



図 3.2-3 プラグの設計に関する解析的検討の全体イメージ

(1) 実施内容

1) 解析モデル等の設定

検討の手順を図 3.2-4 に示す。本検討は、実際の処分場において縦置き方式が採用された場合の処分坑道部分の埋め戻しに関するジェネリックな検討であるため、解析モデルは以下の条件で 設定した。

- ・解析モデルおよびその大きさ:2 次元モデルとし、物質移動解析等で境界条件の影響が生じ ない大きさとする。
- ・岩盤の力学的・水理学的物性:NUMOの包括的技術報告書レビュー版(NUMO、2018)で 示されている物性値を適用する。
- ・坑道形状と大きさ:核燃料サイクル開発機構の第2次取りまとめ報告書 3で示されている縦 置き方式で考えられている5mの馬蹄形断面とする。

作成した解析モデルの概要を図 3.2-5 に示す。モデルは 2 次元鉛直断面とし、解析領域(モデ ルの大きさ)は、予察的な解析によりモデル上流側端部の EDZ 内から出発する粒子の移行状況に 境界条件の影響が生じないことを確認した結果、縦 37.5 m、横 150 m とし、地下坑道と坑道周辺 の EDZ、坑道内部の埋め戻し材(閉鎖後を想定)、坑道と交差する断層と断層への物質の移動を 抑制するためのプラグをモデル化している。地下水流動場としては、上流側から坑道と断層が交 差する方向への流れを想定した。また、止水プラグの効果のみを見る観点から、モデル上端、下 端は不透水境界とし、流動方向は一方向に限定される形で解析を進めた。流動条件の設定では、 NUMO の包括的技術報告書レビュー版に基づき、上流側から断層方向に向かう地下水流動場を想 定して動水勾配 5 %を設定し、地下水流動解析は定常状態の飽和浸透流解析とした。

なお、本解析には、有限要素法による地下水流動解析を実行可能な汎用コード ConnectFlow version12.0 (イギリス Wood 社製) を使用した。 ConnectFlow に関する技術文書 (Wood,2018a,2018b) や検証報告書 (Wood, 2018c) は Wood 社により公開されている。



図 3.2-5 2次元鉛直断面モデル(構造)図

物性値の設定

地質環境特性として硬岩系と軟岩系の2つの岩盤(母岩)を想定した。具体的には、表3.2-4 に示す NUMOの包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構、2018)に示された水 理・物質移動特性値を用いた。

本解析で設定した断層、EDZ、プラグおよび埋め戻し材の水理・物質移動特性値を表 3.2-5 に 示す。なお、断層の有効間隙率に関しては、後述のパーティクルトラッキング法による物質移動 解析において、粒子が断層内に移行するまでの範囲を評価対象とすることから、当該パラメータ が結果に影響することはないため、仮の値として 10%を設定した。

| 地質環境特性 | 透水係数 (m/s) | 有効間隙率 (%) | 備考 |
|---------------------|---------------------|--------------|---|
| 硬岩系岩盤 (深成岩類) | $2.7 	imes 10^{-8}$ | 0.8 | <u>透水係数:</u> NUMO 包括的技術報告書レビュー版 3-3 p3-58 <u>有効間隙率:</u> NUMO 包括的技術報告書レビュー版 付属 書 3-12 p14 |
| 軟岩系岩盤 (新第三紀堆積岩類) | $2.0 	imes 10^{.9}$ | 29 | <u>透水係数:</u> NUMO 包括的技術報告書レビュー版 3-3 p3-62 <u>有効間隙率:</u> NUMO 包括的技術報告書レビュー版 付属 書 3-15 p17 |

表 3.2-4 硬岩系、軟岩系岩盤(母岩)の水理・物質移動特性値一覧

| | 透水係数 (m/s) | 有効間隙率 (%) | 備考 |
|-------|--|-----------------------------|--|
| 断層 | (硬岩系) 1.6×10 ⁻⁶ (断層平行方向) 1.3×10 ⁻⁹ (断層直交方向) (軟岩系) 5.4×10 ⁻⁷ | 10 | 透水係数: NUMO 包括的技術報告書レビュー版 付属書 3- 13 p7 NUMO 包括的技術報告書レビュー版 付属書 3- 15 p19 有効間隙率:仮設定 |
| EDZ | (硬岩系) 2.7×10 ⁻⁶ (軟岩系) 2.0×10 ⁻⁷ | (硬岩系) 0.8 (軟岩系) 29 | 透水係数:母岩の透水係数に対して2桁増加 (NUMO包括的技術報告書レビュー版 付属書4-44 p2 有効間隙率:母岩と同等 |
| プラグ | 1×10^{-10} | 13 | 透水係数、有効間隙率:ベントナイトおよびケ イ砂混合土(NUMO 包括的技術報告書レビュー 版 付属書 4-47 p3 |
| 埋め戻し材 | (硬岩系)2.7×10 ^{.7} (軟岩系)2.0×10 ^{.8} | 30 | 透水係数、有効間隙率:母岩の平均的な透水係 数の10倍(NUMO包括的技術報告書レビュー版 4-5 p4-81 |

表 3.2-5 岩盤以外の水理・物質移動特性値一覧

3) 本解析における変動パラメータとその設定値

本解析では、図 3.2-3 に示した感度解析の考え方を反映し、以下の要素について変動させた解析ケースを設定し解析を実施した。

- ・EDZ 幅:1m、0.5 m
- ・断層などの地表まで直結するルートの距離:5m、10m、15m
- ・プラグの幾何学形状:矩形型、ソロバン型(図 3.2-6)
- ・プラグの厚さ:1m、2m
- ・プラグ周辺の EDZ の連結性:非連結、全て連結、一部連結

なお、プラグの幾何形状効果については、既存文献や解析事例から力学解析によるプラグ周辺の局所安全率分布から1を下回る範囲を仮定して設定し、その領域には EDZ と同じ透水性を与えることにした。なお、図 3.2-6 は、NUMO 包括的技術報告書で示されている止水プラグの例である。



図 3.2-6 止水プラグの構造(矩形型) (NUMO 包括的技術報告書レビュー版、付属書 4-47)

4) 解析ケース

変動パラメータによる解析ケース数は96ケースである。なお、プラグの効果を評価するための 参照ケースとして、2種類の母岩に対してそれぞれ EDZ の厚さを1mと0.5mにした合計4ケ ースを追加した。さらに、プラグ端部の切り欠き深さを1mとしたケースを12ケース(母岩2 種類×プラグ形状2種類×断層などの地表まで直結するルートの距離3種類)を追加した。

以上のことから、合計 112 ケースの解析ケースを設定した。解析ケースの一覧表を表 3.2-6~ 表 3.2-8 に示す。また、変動パラメータを変更した解析モデル図を図 3.2-7~図 3.2-12 に、解析 メッシュ図を図 3.2-13 にそれぞれ示す。

| | 地管理培特性 | | 直結ルートまで | プラグの形状 | プラグの厚さ | 切りをついて | プラグ:6倍507 |
|------|------------|-----|---------|---|-----------------|---------|--------------|
| | 地員煉売村山 | | の距離(m) | 2 | ン ジン の岸と | 9772 AC | |
| C00A | 使岩糸 | 1.0 | - | - | - | | - |
| C01 | 使岩糸 | 1.0 | 5 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C02 | 使岩糸 | 1.0 | 10 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C03 | 使岩糸 | 1.0 | 15 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C04 | 使岩糸 | 1.0 | 5 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C05 | 使岩糸 | 1.0 | 10 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C06 | 使岩糸 | 1.0 | 15 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C07 | 使岩糸 | 1.0 | 5 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 連結 |
| C08 | 使岩糸 | 1.0 | 10 | 矩形型 | 1 | 0.5 | |
| C09 | 使岩糸 | 1.0 | 15 | 矩形型 | 1 | 0.5 | |
| C10 | 使岩糸 | 1.0 | 5 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 連結 |
| C11 | <u>硬岩系</u> | 1.0 | 10 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 連結 |
| C12 | 使岩糸 | 1.0 | 15 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 連結 |
| C13 | <u>硬岩系</u> | 1.0 | 5 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 一部有り |
| C14 | <u>硬岩系</u> | 1.0 | 10 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 一部有り |
| C15 | 硬岩系 | 1.0 | 15 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 一部有り |
| C16 | 硬岩系 | 1.0 | 5 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 一部有り |
| C17 | 硬岩系 | 1.0 | 10 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 一部有り |
| C18 | 硬岩系 | 1.0 | 15 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 一部有り |
| C00B | 硬岩系 | 0.5 | - | - | - | | - |
| C19 | 硬岩系 | 0.5 | 5 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C20 | 硬岩系 | 0.5 | 10 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C21 | 硬岩系 | 0.5 | 15 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C22 | 硬岩系 | 0.5 | 5 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C23 | 硬岩系 | 0.5 | 10 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C24 | 硬岩系 | 0.5 | 15 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C25 | 硬岩系 | 0.5 | 5 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 連結 |
| C26 | 硬岩系 | 0.5 | 10 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 連結 |
| C27 | 硬岩系 | 0.5 | 15 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 連結 |
| C28 | 硬岩系 | 0.5 | 5 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 連結 |
| C29 | <u>硬岩系</u> | 0.5 | 10 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 連結 |
| C30 | 使岩糸 | 0.5 | 15 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 連結 |
| C31 | <u>硬岩系</u> | 0.5 | 5 | 矩形型 | 1 | 0.5 | <u> 一部有り</u> |
| C32 | 使岩糸 | 0.5 | 10 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 一部有り |
| C33 | 使岩糸 | 0.5 | 15 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 一部有り |
| C34 | <u>硬岩系</u> | 0.5 | 5 | 矩形型 | 2 | 0.5 | <u> 一部有り</u> |
| C35 | 使岩糸 | 0.5 | 10 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 一部有り |
| C36 | 使岩糸 | 0.5 | 15 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 一部有り |
| C37 | 使岩糸 | 1.0 | 5 | ソロバン型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C38 | 使岩糸 | 1.0 | 10 | ソロバン型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C39 | 硬岩系 | 1.0 | 15 | ソロバン型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C40 | 硬岩系 | 1.0 | 5 | ソロバン型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C41 | 使岩糸 | 1.0 | 10 | ソロバン型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C42 | 使岩系 | 1.0 | 15 | ソロバン型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C43 | 使岩系 | 0.5 | 5 | ソロバン型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C44 | 硬岩系 | 0.5 | 10 | <u>ソロバン型</u> | 1 | 0.5 | 無し |
| C45 | <u>硬岩系</u> | 0.5 | 15 | ソロバン型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C46 | 使岩系 | 0.5 | 5 | <u>ソロバン型</u> | 2 | 0.5 | 無し |
| C47 | 硬岩系 | 0.5 | 10 | <u>ソロバン型</u> | 2 | 0.5 | 無し |
| C48 | 硬岩系 | 0.5 | 15 | ソロバン型 | 2 | 0.5 | 無し |

表 3.2-6 解析ケース一覧表 (硬岩系)

| | 地質環境特性 | EDZ幅(m) | 直結ルートまで の距離(m) | プラグの形状 | プラグの厚さ | 切り欠き深さ | プラグ近傍EDZ |
|------|---------|---------|-------------------|--------|--------|--------|----------|
| C00C | 軟岩系 | 1.0 | _ | - | - | | - |
| C49 | 軟岩系 | 1.0 | 5 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C50 | 軟岩系 | 1.0 | 10 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C51 | 軟岩系 | 1.0 | 15 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C52 | 軟岩系 | 1.0 | 5 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C53 | 軟岩系 | 1.0 | 10 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C54 | 軟岩系 | 1.0 | 15 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C55 | 軟岩系 | 1.0 | 5 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 連結 |
| C56 | 軟岩系 | 1.0 | 10 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 連結 |
| C57 | 軟岩系 | 1.0 | 15 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 連結 |
| C58 | 軟岩系 | 1.0 | 5 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 連結 |
| C59 | 軟岩系 | 1.0 | 10 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 連結 |
| C60 | 軟岩系 | 1.0 | 15 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 連結 |
| C61 | 軟岩系 | 1.0 | 5 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 一部有り |
| C62 | 軟岩系 | 1.0 | 10 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 一部有り |
| C63 | 軟岩系 | 1.0 | 15 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 一部有り |
| C64 | 軟岩系 | 1.0 | 5 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 一部有り |
| C65 | 軟岩系 | 1.0 | 10 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 一部有り |
| C66 | 軟岩系 | 1.0 | 15 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 一部有り |
| C00D | 軟岩系 | 0.5 | - | - | - | | - |
| C67 | 軟岩系 | 0.5 | 5 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C68 | 軟岩系 | 0.5 | 10 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C69 | 軟岩系 | 0.5 | 15 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C70 | 軟岩系 | 0.5 | 5 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C71 | 軟岩系 | 0.5 | 10 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C72 | 軟岩系 | 0.5 | 15 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C73 | 軟岩系 | 0.5 | 5 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 連結 |
| C74 | 軟岩系 | 0.5 | 10 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 連結 |
| C75 | 軟岩系 | 0.5 | 15 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 連結 |
| C76 | 軟岩系 | 0.5 | 5 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 連結 |
| C77 | 軟岩系 | 0.5 | 10 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 連結 |
| C78 | 軟岩系 | 0.5 | 15 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 連結 |
| C79 | 軟岩系 | 0.5 | 5 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 一部有り |
| C80 | 軟岩系 | 0.5 | 10 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 一部有り |
| C81 | 軟岩系 | 0.5 | 15 | 矩形型 | 1 | 0.5 | 一部有り |
| C82 | 軟岩系 | 0.5 | 5 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 一部有り |
| C83 | 軟岩系 | 0.5 | 10 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 一部有り |
| C84 | 軟岩系 | 0.5 | 15 | 矩形型 | 2 | 0.5 | 一部有り |
| C85 | 軟岩系 | 1.0 | 5 | ソロバン型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C86 | 軟岩系 | 1.0 | 10 | ソロバン型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C87 | 軟岩系 | 1.0 | 15 | ソロバン型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C88 | 軟岩系 | 1.0 | 5 | ソロバン型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C89 | 軟岩系 | 1.0 | 10 | ソロバン型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C90 | 軟岩系 | 1.0 | 15 | ソロバン型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C91 | 軟岩系 | 0.5 | 5 | ソロバン型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C92 | 軟岩系 | 0.5 | 10 | ソロバン型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C93 | 軟岩系 | 0.5 | 15 | ソロバン型 | 1 | 0.5 | 無し |
| C94 | 軟岩系 | 0.5 | 5 | ソロバン型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C95 | 軟岩系 | 0.5 | 10 | ソロバン型 | 2 | 0.5 | 無し |
| C96 | | 0.5 | 15 | いロバン型 | 2 | 0.5 | 毎日 |

表 3.2-7 解析ケース一覧表 (軟岩系)

表 3.2-8 解析ケース一覧表(切り欠き深さ 1m)

| | 地質環境特性 | EDZ幅(m) | 直結ルートまで の距離(m) | プラグの形状 | プラグの厚さ | 切り欠き深さ | プラグ近傍EDZ |
|------|------------|---------|-------------------|--------|--------|--------|----------|
| C97 | 硬岩系 | 1.0 | 5 | 矩形型 | 1 | 1.0 | 無し |
| C98 | 硬岩系 | 1.0 | 10 | 矩形型 | 1 | 1.0 | 無し |
| C99 | 硬岩系 | 1.0 | 15 | 矩形型 | 1 | 1.0 | 無し |
| C100 | 軟岩系 | 1.0 | 5 | 矩形型 | 1 | 1.0 | 無し |
| C101 | 軟岩系 | 1.0 | 10 | 矩形型 | 1 | 1.0 | 無し |
| C102 | 軟岩系 | 1.0 | 15 | 矩形型 | 1 | 1.0 | 無し |
| C103 | 硬岩系 | 1.0 | 5 | ソロバン型 | 1 | 1.0 | 無し |
| C104 | 硬岩系 | 1.0 | 10 | ソロバン型 | 1 | 1.0 | 無し |
| C105 | 硬岩系 | 1.0 | 15 | ソロバン型 | 1 | 1.0 | 無し |
| C106 | 軟岩系 | 1.0 | 5 | ソロバン型 | 1 | 1.0 | 無し |
| C107 | 軟岩系 | 1.0 | 10 | ソロバン型 | 1 | 1.0 | 無し |
| C108 | 軟岩系 | 10 | 15 | ソロバン型 | 1 | 10 | 無し |




図 3.2-8 数値モデル図(断層-プラグ間の距離)



図 3.2-9 数値モデル図 (プラグ形状)



図 3.2-10 数値モデル図(矩形プラグ/切り欠き深さ)



(a) 切り欠き深さ 0.5 m(b) 切り欠き深さ 1m図 3.2-11 数値モデル図(ソロバン型プラグ/切り欠き深さ)



(a) EDZ 無し



(b) EDZ 連結



(c) EDZ 一部連結 図 3.2-12 数値モデル図(プラグ近傍の EDZ の連結性)



(a) 断層とプラグの離間距離 5 m



(b) 断層とプラグの離間距離 10 m



(c) 断層とプラグの離間距離 15 m図 3.2-13 有限要素メッシュ図の例(矩形型、EDZ 厚さ 1m)

5) 粒子追跡線解析

粒跡線解析では、粒子を上流側の EDZ 内に高さ方向に 0.05m 間隔で均等に配置した。なお、 粒子が EDZ の外側の岩盤や内側の坑道内(埋め戻し)にすぐに移行することを避けるため、EDZ の厚さ1mのケースでは、坑道壁面から 0.2~0.8mの範囲に、EDZ の厚さ 0.5mのケースでは、 坑道壁面から 0.2~0.45mの範囲に配置した(図 3.2-14参照)。そして、地下水流動解析により 求めたダルシー流速場を用いたパーティクルトラッキング法により粒子の移行状況を評価した。



図 3.2-14 粒子の配置図(左: EDZ 厚さ1m、右: EDZ 厚さ0.5m)

6) 解析結果とその評価

本解析ではプラグの効果に着目していることと、粒子の移行時間は設定するパラメータによっ て変化するため、地下水流動解析および粒子追跡線解析により、上流側端面の EDZ から粒子が断 層に到達するまでの時間をケース毎に算定し、各変動パラメータが粒子の到達時間に及ぼす影響 を評価した。具体的には、各解析ケースで得られた粒子の到達時間を、プラグを設定しない条件 での解析結果から得られた到達時間を用いて正規化することで変動パラメータの影響の程度を評 価した。以降その概要を示す。

① 解析結果

全ケースの解析結果は付録に示すが、ここでは解析結果を上記の形のグラフとしてとりまとめたものを示す。なお、グラフ上で滑らかな曲線を描かない解析結果がみられるが、これは粒子がプラグによりせき止められた後、岩盤側に入っていった場合と EDZ に戻っていった場合の2つの正規化した移行時間が示されているためである。

①-1 ケース 01-ケース 18

硬岩系、EDZ 厚さ1m、矩形型プラグ、切り込み深さ0.5mの共通条件に対して異なるプラ グの厚さ、プラグと断層の離間距離を設定したケースである。図 3.2-15 に示すように、プラグ 近傍の EDZ の連結性毎にグラフを示した。 ①-2 ケース 19~ケース 36

硬岩系、EDZ 厚さ 0.5 m、矩形型プラグ、切り込み深さ 0.5 m の共通条件に対して異なるプ ラグの厚さ、プラグと断層の離間距離を設定したケースである。図 3.2-16 に示すように、プラ グ近傍の EDZ の連結性毎にグラフを示した。

①-3 ケース 37~ケース 48

硬岩系、ソロバン型プラグ、切り込み深さ 0.5 m、プラグ近傍 EDZ 無しの共通条件に対して 異なるプラグの厚さ、プラグと断層の離間距離を設定したケースである。図 3.2-17 に示すよう に、EDZ の厚さ毎にグラフを示した。

①-4 ケース 49~ケース 66

軟岩系、EDZ 厚さ1m、矩形型プラグ、切り込み深さ0.5mの共通条件に対して異なるプラ グの厚さ、プラグと断層の離間距離を設定したケースである。図 3.2-18 に示すように、プラグ 近傍の EDZ の連結性毎にグラフを示した。

①-5 ケース 67~ケース 84

硬岩系、EDZ 厚さ 0.5 m、矩形型プラグ、切り込み深さ 0.5 m の共通条件に対して異なるプ ラグの厚さ、プラグと断層の離間距離を設定したケースである。図 3.2-19 に示すように、プラ グ近傍の EDZ の連結性毎にグラフを示した。

①-6 ケース 85~ケース 96

軟岩系、ソロバン型プラグ、切り込み深さ 0.5 m、プラグ近傍 EDZ 無しの共通条件に対して 異なるプラグの厚さ、プラグと断層の離間距離を設定したケースである。図 3.2-20 に示すよう に、EDZ の厚さ毎にグラフを示した。

①-7 ケース 97~ケース 108

EDZ 厚さ1m、プラグ厚さ1m、切り込み深さ1mの共通条件に対して異なる母岩、プラグ と断層の離間距離、プラグ形状を設定したケースである。図 3.2-21 に示すように、プラグ近傍 の EDZ の連結性毎にグラフを示した。





(1)





(2)





(3)



図 3.2-18 粒子が断層に到達するまでの移行時間の分布(解析ケース間の比較)(4)





(5)





(6)





② 各変動パラメータが EDZ の物質移動に及ぼす影響に関する知見の整理

i) EDZ の幅

硬岩系と軟岩系岩盤モデルにそれぞれ1mと0.5mのEDZの幅の条件を設定したケースの粒子の移行時間分布の比較を図 3.2-22に示す。

両岩種ともに EDZ の幅が1mの条件の方が0.5mの条件よりも移行時間が長い結果を示した。 これは、図 3.2-23 および図 3.2-24 に示すように、EDZ の幅が 0.5 m の条件の粒跡線をみると EDZ 中を移行する過程において相対的に岩盤中に早く移行したためである。つまり、プラグを設 置することでその近傍の全水頭分布が上向きの流動場を形成するため、EDZ の幅が小さい方が物 質が岩盤中に早く移行し、その結果断層に到達するまでの時間が長くなると考えられる。



図 3.2-22 粒子が断層に到達するまでの移行時間の分布(EDZの厚さ)



図 3.2-23 粒子の移行状況(EDZの厚さ)



図 3.2-24 プラグ近傍の粒子の移行状況(EDZの厚さ)

ii) プラグ近傍 EDZ の連結性

プラグ周辺の局所安全率分布から 1 を下回るような範囲に EDZ が形成される可能性があるこ とから、プラグ近傍の EDZ が形成されない条件、プラグ近傍に連続的に EDZ が形成される条件 (EDZ 連結)、プラグ近傍の一部に EDZ が形成される条件(EDZ 一部連結)での粒子の移行時 間分布を比較した(図 3.2-25 参照)。

プラグ近傍に EDZ が連結して存在する条件では、プラグの効果はほとんど無い。一方、EDZ が存在しない条件では、プラグの効果により断層までの到達時間が長くなる。EDZ が一部連結する条件では、EDZ が存在しない条件よりもプラグによる粒子の遅延効果は小さくなる。これは、図 3.2-26 および図 3.2-27 に示すように、坑道近傍の EDZ を移行してきた粒子が、プラグ近傍に EDZ が形成されていなければ坑道近傍の EDZ から岩盤中に移行して断層へ到達するが、プラグ 近傍の一部に EDZ が形成されていると岩盤中からプラグ近傍の EDZ へ移行し、さらに坑道近傍 の EDZ へ移行するため断層までの到達時間が短くなる。



図 3.2-25 粒子が断層に到達するまでの移行時間の分布(プラグ近傍の EDZ の連結性)



図 3.2-26 粒子の移行状況 (プラグ近傍の EDZ の連結性)



図 3.2-27 プラグ近傍の粒子の移行状況(プラグ近傍の EDZ の連結性)

iii) プラグの厚さおよび断層までの距離

硬岩系と軟岩系岩盤モデルにそれぞれ1mと2mのプラグの厚さの条件を設定したケースの粒子の移行時間分布の比較図を図 3.2-28 に示す。

両岩種ともにプラグの厚さが2mの条件の方が1mの条件よりも概ね移行時間が長い結果を示 した。ただし、坑道に近い粒子は、ほとんど差がないこともわかる。これは、図 3.2-29 および図 3.2-30 に示すように、プラグを設置することでその近傍の全水頭分布が上向きの流動場を形成す る中で、プラグの厚さが2mの条件では、岩盤に近い方の粒子がより早く岩盤中に移行している。 一方、坑道に近い粒子はプラグの厚さが1mの条件の粒子の移行経路とほぼ同じであることがわ かる。

断層までの距離(プラグの離間距離)について、5m、10m、15mの条件を設定したケースの 比較結果も合わせて図 3.2-31に示した。

両岩種ともにプラグと断層までの離間距離が長いほど移行時間が長い結果を示した。図 3.2-31 および図 3.2-32 に示すように、プラグと断層までの離間距離が 5 m のケースでは、EDZ から岩 盤中へ移行しそのまま断層に到達する経路を示している。一方、プラグと断層までの離間距離が 10 m と 15 m のケースでは、坑道に近い方の粒子がプラグの存在により坑道近傍の EDZ から岩 盤中へ移行するが、その後また EDZ へ移行する経路を示している。断層との離間距離が 5 m の ケースでは EDZ への再移行はみられないが、断層との離間距離 10 m と 15 m のケースの方が粒 子が岩盤中へより早く移行するため、断層までの移行時間でみると断層までの離間距離が長い方 が遅延効果があると考えられる。



図 3.2-28 粒子が断層に到達するまでの移行時間の分布 (プラグの厚さおよび断層までの距離)







図 3.2-30 プラグ近傍の粒子の移行状況(プラグの厚さ)



図 3.2-31 粒子の移行状況 (プラグと断層の離間距離)



図 3.2-32 プラグ近傍の粒子の移行状況 (プラグと断層の離間距離)

iv) プラグの形状

硬岩系と軟岩系岩盤モデルにそれぞれ矩形型とソロバン型のプラグ形状を設定したケースの粒子の移行時間分布の比較図を図 3.2-33 に示す。

両岩種ともに矩形型プラグの方が長い移行時間を示した。また、岩盤に近い粒子が相対的に長い移行時間を示した。これは、図 3.2-34 および図 3.2-35 に示すように、矩形型プラグの方がより早く粒子が岩盤中に移行している。ソロバン型プラグの方は、プラグ設置の近くまで EDZ 内を移行するためプラグによる遅延効果が小さい結果になった。また、矩形型プラグではプラグの離間距離が大きいほど移行時間が長いが、ソロバン型プラグでは、離間距離による差はほとんどない結果となった。ソロバン型は、そのプラグの形状により地下水が越流する際の下方流の影響で粒子も EDZ に戻ってしまうため、差がない結果となったと考えられる(図 3.2-35)



図 3.2-33 粒子が断層に到達するまでの移行時間の分布 (プラグの形状)



図 3.2-34 粒子の移行状況 (プラグの形状)



図 3.2-35 プラグ近傍の粒子の移行状況 (プラグの形状)

v) プラグの切り欠き深さ

硬岩系と軟岩系岩盤モデルにそれぞれ矩形型プラグの切り欠き深さを 0.5 m と 1 m に設定した ケースの粒子の移行時間分布の比較図を図 3.2-36 に示す。

両岩種ともに切り欠き深さ1mの方が長い移行時間を示した。また、岩盤に近い粒子が相対的 に長い移行時間を示した。これは、図 3.2-37 および図 3.2-38 に示すように、切り欠き深さ1m の方がより長く粒子が岩盤中を移行するためである。また、岩盤に近い粒子の方がより早く岩盤 中に移行するため遅延効果が大きい結果を示した。

硬岩系と軟岩系岩盤モデルにそれぞれソロバン型プラグの切り欠き深さを 0.5 m と 1 m に設定 したケースの粒子の移行時間分布の比較図を図 3.2-39 に示す。

硬岩系岩盤のケースでは、切り欠き深さ 1 m のケースが長い移行時間を示した。これは、図 3.2-40 および図 3.2-41 に示すように、切り欠き深さ 0.5 m のケースでは、坑道近傍の EDZ から 岩盤へ移行した後、再度坑道近傍の EDZ に移行するが、切り欠き深さ 1m のケースでは坑道近傍 の EDZ から岩盤へ移行してそのまま断層に到達する。そのため、切り欠き深さ 1m のケースの方 がより長い移行時間を示した。

軟岩系岩盤のケースでは、図 3.2-42 および図 3.2-43 に示すように切り欠き深さ 0.5 m と 1 m の両ケースともに坑道近傍の EDZ から岩盤へ移行した後、再度坑道近傍の EDZ に移行するため 断層までの到達時間にほとんど差がない結果を示した。



(プラグの切欠深さ/矩形プラグ)



図 3.2-37 粒子の移行状況 (プラグの切り欠き深さ)



図 3.2-38 プラグ近傍の粒子の移行状況 (プラグの切り欠き深さ)



図 3.2-39 粒子が断層に到達するまでの移行時間の分布(プラグの切欠深さ/ソロバン型プラ

グ)



図 3.2-40 粒子の移行状況(硬岩系/プラグの切り欠き深さ/ソロバン型)



図 3.2-41 プラグ近傍の粒子の移行状況(硬岩系/プラグの切り欠き深さ/ソロバン型)



図 3.2-42 粒子の移行状況(軟岩系/プラグの切り欠き深さ/ソロバン型)



図 3.2-43 プラグ近傍の粒子の移行状況(軟岩系/プラグの切り欠き深さ/ソロバン型)

7) まとめ

本検討では、EDZ の遮水効果を最大限に発揮するためのプラグの合理的な設計の考え方を提示 することを目的として、わが国に存在する花崗岩類のような硬岩系の岩盤や堆積岩類のような軟 岩系の岩盤を対象とした水理・物質移動の感度解析を行った。その結果得られた知見を以下に整 理する。

○EDZ の幅

プラグを設置することによりプラグ近傍の地下水流動が上向きの流れを形成し、EDZ 幅が小 さい条件の方が EDZ を移行する物質が岩盤中に早く移行するため、断層に到達するまでの時間 が長くなる。

○プラグ近傍 EDZ の連結性

プラグ近傍に EDZ が連結して存在する条件では、EDZ を移行する物質がそのまま EDZ を移 行するためプラグの効果は無い。一方、EDZ が一部連結する条件では、EDZ が存在しない条件 よりもプラグによる粒子の遅延効果は小さくなる。これは、坑道近傍の EDZ を移行してきた粒 子が、プラグ近傍に EDZ が形成されていなければ坑道近傍の EDZ から岩盤中に移行して断層 へ到達するが、プラグ近傍の一部に EDZ が形成されていると岩盤中からプラグ近傍の EDZ へ 移行し、さらに坑道近傍の EDZ へ移行するため断層までの到達時間が短くなるためである。 〇プラグの厚さおよび断層までの距離

プラグが厚い条件の方が概ね移行時間が長くなる。ただし、坑道に近いほど差がなくなる。こ れは、プラグを設置することにより上向きの地下水流動場が形成され、プラグが厚い条件の方が、 岩盤に近い物質がより早く岩盤中に移行するためである。

○プラグと断層の離間距離

プラグと断層までの離間距離が大きい条件の方が粒子が岩盤中へより早く移行するため断層 までの移行時間でみると遅延効果がある。

○プラグの形状

矩形型プラグはソロバン型プラグを設置した場合に比べると EDZ 中を移行する物質がより早 く岩盤中に移行するため移行時間が長くなる。ソロバン型プラグでは、プラグ設置の近くまで EDZ 内を移行するためプラグによる遅延効果が小さい。また、矩形型プラグではプラグの離間 距離が大きいほど移行時間が長いが、ソロバン型プラグでは、離間距離による差はほとんどない。 〇プラグの切り欠き深さ

矩形型プラグでは、硬岩系、軟岩系岩盤ともに切り欠き深さが長い条件の方が、EDZ を移行 する物質が岩盤中に早く移行するため移行時間が長くなる。

ソロバン型プラグでは、硬岩系岩盤では切り欠き深さが長い条件の方が、EDZ を移行する物 質が岩盤中に早く移行するため移行時間が長くなる。一方、軟岩系岩盤では切り欠き深さに関係 なくプラグによる物質の遅延効果は小さい。

以上、EDZ を含む岩盤、埋め戻し材および断層を初期設定として均質な媒体としてモデル化 した場合の止水プラグの設計に反映できる知見が得られた。これは地層処分事業の初期段階にお いて止水プラグの設計が必要な場合には、その合理的な根拠を与えるもので有用な情報となるこ とが期待される。一方、モデル内の断層の位置や透水性、あるいは岩盤の水理的な不均質性等の 条件設定によっては異なる影響を示す可能性があることは留意する必要がある。
参考文献

- 原子力発電環境整備機構(2018): 我が国における安全な地層処分の実現一適切なサイトの選定に 向けたセーフティケースの構築— (レビュー版)、NUMO-TR-18-02.
- 杉田裕、川上進、油井三和、牧野仁史、澤田淳、三原守弘、栗原雄二(2004):断層に至るまでの 核種移行に着目した処分場の閉鎖性能についての検討、原子力バックエンド研究、10、No1-2、pp103-112.
- 核燃料サイクル開発機構(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 ー地層処分研究開発第2次取りまとめー分冊2 地層処分の工学技術、JNC TN1400 99-022.
- 日本原子力研究開発機構(2018):平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術 開発事業 処分システム評価確証技術開発5ヵ年成果報告書
- 杉田裕、高橋美昭、浦上学、北山一美、藤田朝雄、川上進、梅木博之、油井三和、宮本陽一(2005): 処分システムに求められる閉鎖性能の考え方-坑道交差部における水理解析-、JNC TN8400 2005-016.
- 原子力発電環境整備機構(2006): 処分システムに求められる閉鎖性能の考え方--処分場パネル規 模の水理に関する試解析-、NUMO-TR-06-01.
- 日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター(2018):平成30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発事業 地層処分施設閉鎖技術確証試験 報告書.
- Bennet., D.G. (2012): Initial Review of SR-Site Main Report. SSM 2012:24, SSM, Stockholm, Sweden..
- Geier, J.E. (2015) : Assessment of flow-related transport parameters used in the SR-Site safety case. SSM 2015:40, SSM, Stockholm, Sweden.
- QJ サイエンス株式会社:http://www.qjscience.co.jp/business/2012-08-06-03-55-31/2012-08-06-06-07-09/partridge.html?limitstart=0、 (参照:令和2年3月24日)
- 嵩、大野 (1984): 高温下のコンクリートの物性、コンクリート工学、Vol. 22、 No.3
- Birgersson, M., Börgesson, L., Hedström, M., Karnland, O. and Nilsson, U. (2009) : Bentonite erosion. Final report. Technical Report TR-09-34, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm, Sweden.
- Kanno, T., Iwata, Y. and Sugino, H. (2001) : Modeling of bentonite swelling as solid particle diffusion. In: F. Adachi (Editor), Clay Science for Engineering. Balkema, Rotterdam, pp. 1579.
- Borrelli, R.A. and Ahn, J. (2008): Numerical modeling of bentonite extrusion and radionuclide migration in a saturated planar fracture. Physics and Chemistry of the Earth, 33: S131-S141.
- Miller, B. and Marcos, N., (2007) : Process report FEPs and scenarios for a spent fuel repository at Olkiluoto. Posiva Report 2007-12, Posiva Oy, Olkiluoto, Finland.
- Neretnieks, I., Liu, L. and Moreno, L. (2009) : Mechanisms and models for bentonite erosion. SKB Report TR-09-35, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm, Sweden.
- Derjaguin, B.V. and Landau, L., (1941) : Theory of the stability of strongly charged lyophobic sols and of the adhesion of strongly charged particles in solutions of electrolytes.

Acta Physical Chemistry, 14: 633.

Verwey、 E.J.W. and Overbeek、 J.T.G.、(1948): Theory of the Stability of Lyophobic Colloids. Elsevier、 Amsterdam.

井尻裕二、澤田淳、赤堀邦晃(1999): 我が国の岩盤の水理特性について、JNC TN8400 99-090.

- 電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構(2005): 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 TY 1400 2005-013
- 伊東弘之、三原守弘(2005):ベントナイト系材料の飽和透水係数の変遷評価式(研究報告)、JNC TN8400 2005-029.
- 原子力発電環境整備機構(2008):アルカリ性セメントの処分場における長期的要請に関する検 討、NUMO-TR-08-02
- 原子力発電環境整備機構、(2013):概要調査段階における設計・性能評価手法の高度化(その2)、 NUMO-TR-13-06
- Sandén, T., Marjavaara, P., Fritzell, A. (2018), "Water handling during backfilling", Posiva SKB Report 05
- 秋山吉弘,寺田賢二,山田淳夫(2016):地下空洞型処分施設施工技術の確証試験の概要,原環センター技術報告書, RWMC-TRJ-15001.
- ANDRA(2005), Dossier 2005 Argile Tome Architecture and management of a geological repository
- 日本原子力研究開発機構(2005):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 -H17取りまとめ・分冊2 工学技術の開発、JNC TN1400 2005-015、p5-36
- Wood (2018a) : ConnectFlow Release 12.0 Technical Summary Document, Wood.
- Wood (2018b) : NAMMU Release 12.0 Technical Summary Document. Wood.
- Wood (2018c) : NAPSAC Release 12.0 Technical Summary Document. Wood.

4. 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備-坑道シーリング技術の性能確認-

処分場建設のために掘削された坑道や坑道掘削によって生じた EDZ が処分場の閉鎖後に地上 と直結する水みちとなることを防止するために、止水プラグや埋め戻し材といったシーリング要 素を組み合わせたシーリングシステムを構築する。本事業においては、坑道シーリングの構成要 素として考えられる埋め戻し材、止水プラグなどに着目し、シーリングシステムの性能を室内試 験や工学規模の試験を通じて検証する。

埋め戻し材について、平成 30 年度から実施している緩衝材と埋め戻し材を対象とした膨潤変 形試験と膨潤挙動相互作用試験を継続するとともに、これらの膨潤変形挙動に影響を及ぼす化学 的事象について整理を行った。

また、止水プラグについては、平成 30 年度の室内試験および原位置での事前検討の結果を踏ま えた原位置 EDZ シーリング試験を実施し、止水プラグの材料として検討されているベントナイ ト系材料の EDZ における地下水移行経路の止水性能を評価した。

あらたに幌延深地層研究施設深度 350m の試験坑道4を活用し、坑道周辺の EDZ の拡がりや 経時変化を把握し、グラウト注入による EDZ の改善効果を評価するため、弾性波や比抵抗を用い たトモグラフィ調査、S 波トモグラフィ調査、検層、室内試験を実施して調査手法の適用性を確 認した。

4.1 膨潤挙動評価試験

4.1.1 試験の概要

人工バリアの処分孔竪置き方式の場合には、処分孔に定置した緩衝材が地下水を吸収して処分 坑道側へ膨出しその乾燥密度が低下することを防ぐために、埋め戻し材を坑道に充填することに より埋め戻す。緩衝材と埋め戻し材の境界面では、緩衝材の膨潤圧と処分孔直上の埋め戻し材の 自重相当の荷重が相互に作用しており、緩衝材の膨潤挙動はこれらの力学的な相互作用の影響を 受ける。膨潤挙動相互作用試験においては、この力学的相互作用を踏まえた緩衝材の膨出挙動の 評価手法を整備することを目的とし、まず、室内での再現試験により把握することとした。

平成 30 年度は、緩衝材と埋め戻し材それぞれの膨潤変形挙動に関わる基礎的な特性を取得する ための膨潤変形試験に着手した。また、幌延で実施している人工バリア性能確認試験を事例に緩 衝材と埋め戻し材の力学的相互作用について整理するとともに、膨潤挙動小規模試験を実施し緩 衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模型試験を実施する際の課題点を抽出した(原子力機構・ 原環センター,2019)。本年度は、基礎的な特性を取得するための膨潤基礎試験を継続実施すると ともに実規模試験の 1/20 スケールの緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模型試験を実施し、 緩衝材および埋め戻し材の膨潤変形挙動に関するデータを取得した。また、膨潤変形挙動解析を 実施し、縮尺模型試験の結果と合わせて緩衝材の膨潤変形量の評価を実施した。

4.1.2 膨潤基礎試験

膨潤基礎試験では、緩衝材および埋め戻し材のベントナイト材料を対象として膨潤挙動に係る 基礎的な特性データの取得のために膨潤変形試験と膨潤圧試験を実施した。膨潤変形試験では、 一定の上載荷重を作用させた状態において供試体に水を浸潤させた時の膨潤による変位の計測を 行う。また、膨潤圧試験では体積拘束した状態における飽和過程の最大膨潤圧計測を実施した。

本試験で使用した緩衝材と埋め戻し材の材料は、幌延深地層研究センターの地下施設深度350m において実施されている人工バリア性能確認試験と同様の仕様を採用した。緩衝材と埋め戻し材 の材料仕様を表4.1-1に示す。緩衝材はクニゲルV1とケイ砂を質量比でそれぞれ70%と30%と なるようにした混合材料で乾燥密度 1.80 Mg/m³、初期含水比 10.5%と設定した。ケイ砂について は、3 号と5 号を重量比で 1:1 となるように混合したものを用いた。埋め戻し材はクニゲル V1 と 掘削ズリの混合材料 (ベントナイト混合率 40%)を乾燥密度 1.20 Mg/m³、初期含水比 35.0%とし た。掘削ズリは、幌延の深度 330~340 mを掘削した際に発生した掘削土であり、粒径を 20 mm 以下に調整して使用した。本試験で使用したクニゲル V1 の基本物性を表 4.1-2 に示す。

| | | 緩衝材 | 埋め戻し材 | |
|-------------------------------|--------|------------------|------------------------------|--|
| 材料構成 | | ベントナイト:ケイ砂=70:30 | ベントナイト:掘削ズリ=40:60 | |
| 材料 | ベントナイト | クニゲル V1 | | |
| | ケイ砂 | 3号:5号=1:1 | | |
| | 掘削ズリ | | 最大粒径 d _{max} =20 mm | |
| 初期含水比 W _{c,0} [%] | | 10.5 | 35.0 | |
| 初期乾燥密度 | | 1.80 | 1.20 | |
| $ ho_{d,0}$ [Mg/m3] | | 1.00 | | |
| 有効ベントナイト密度 | | 1 58 | 0.65 | |
| $\rho_{\rm b} [{\rm Mg/m3}]$ | | 1.00 | 0.00 | |

表 4.1-1 緩衝材と埋め戻し材の材料仕様

| ベントナイト | クニゲル V1 |
|----------------------------------|---------|
| 土粒子密度 [Mg/m ³] | 2.734 |
| 液性限界 [%] | 327.3 |
| 塑性限界 [%] | 38.9 |
| 塑性指数 | 288.4 |
| モンモリロナイト含有率 [%] | 65 |
| 陽イオン交換容量 [c _{mole} /kg] | 73.2 |

表 4.1-2 ベントナイトの基本物性

(1) 緩衝材

1) 膨潤変形試験

緩衝材の膨潤変形試験の装置図を図 4.1-1 に示す。装置は重錘レバー式の圧密試験機である。 試験容器上部の載荷板を介して重錘による荷重を作用させた。供試体は、直径 60 mm、高さ 10 mm として静的圧縮により成型した。膨潤変形試験は上載荷重を 0.125 MPa~1.00 MPa の間で 変化させた 4 条件で実施した。試験容器底部にはポーラスメタルを設置し、イオン交換水を供試 体の底面から 1 次元に浸潤させた。装置の最頂部には変位計を設置し、供試体の飽和に伴う膨潤 変形量を計測した。また、供試体の高さと直径の比(縦横比)が試験に与える影響を確認するた めに、上載荷重を 0.125 MPa で一定として高さを 5 mm と 20 mm に変えた条件での試験も実施 した。実施した試験条件を表 4.1-3 に示す。膨潤変形試験の状況を図 4.1-2 に示す。

供試体の膨潤挙動は式(1)に示すように、鉛直方向の膨潤変形量 Δd を試験開始時の供試体高さ H_0 で除した膨潤変形率 ϵ_s により評価した。

$$\varepsilon_{\rm s} = \frac{\Delta d}{{\rm H}_0} \times 100 \, [\%] \tag{1}$$

また、既往の研究成果(Komine *et al.*, 1994)の方法により各試験条件に対する最大膨潤変形率 *ɛ*smax を求めた。最大膨潤変形率は、計測により得られた膨潤変形率の経時変化を式(2)で表す 双曲線で近似し、その漸近線から式(3)のように定める。

$$\varepsilon_{\rm s}(t) = \frac{t}{a+bt} \, [\%] \tag{2}$$

$$\varepsilon_{\rm smax} = \lim_{t \to \infty} \varepsilon_s(t) = \frac{1}{b} \, [\%] \tag{3}$$

ここで、*t*:時間 [min]、*a*, *b*:近似により求まる定数である。

上記の方法により求めた最大膨潤率を表 4.1-4 に示す。図 4.1-3 は供試体の高さを 10mm とし て作用させる上載荷重の大きさを変えた条件である Case2①~④の 4 ケースの膨潤変形率の経時 変化を示す。上載荷重の大きさを変えた場合には、上載荷重が大きくなるほど最大膨潤変形率が 小さくなる傾向がみられた。

0.125 MPa の同一の上載荷重で高さを変えた Case1、Case2①および Case3 の 3 ケースの膨潤 変形率の経時変化を図 4.1-4 に示す。また、供試体の高さと最大膨潤変形率の関係を図 4.1-5 に 示す。図 4.1-5 には各供試体の有効粘土密度も示しており、各ケースともほとんど同じ有効粘土 密度で作製することができた。結果より、供試体の縦横比が大きくなると最大膨潤変形率が小さ くなる傾向がみられた。

図 4.1-6 に上載荷重と最大膨潤変形率の関係を示す。図 4.1-6 には、本年度に実施した結果に 加えて、平成 30 年度に実施した結果を合わせてプロットした。また、図 4.1-6 中の近似曲線は、 本年度の高さ 10 mm で実施した条件の結果と平成 30 年度の結果よりプロットした。

なお、平成30年度の結果についても、未実施だった試験条件のデータを取得するとともに最大 膨潤変形率を今年度の方法により改めて評価した。その結果、上記と同様、上載荷重が大きくな ると最大膨潤変形率は小さくなる傾向がみられた。両者の結果を比較すると最大膨潤変形率の値 は、上載荷重が大きい条件では同程度であるが、上載荷重が小さい条件では差異が大きくなって いる。

| | Case1 | Case2① | Case2② | Case2③ | Case2④ | Case3 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 直径 D [mm] | | 60 | | | | |
| 高さ H ₀ [mm] | 5 | | 10 | | | |
| 縦横比 Ho/D | 0.0833 | 0.167 | | | | 0.333 |
| 上載荷重 P [MPa] | 0.125 | 0.125 | 0.250 | 0.500 | 1.000 | 0.125 |

表 4.1-3 緩衝材の膨潤変形試験の試験条件







(a) 使用材料(左:クニゲル V1、中央: ケイ砂3号、右:ケイ砂5号)

(b) 供試体の圧縮成型



(c) 試験装置全景



(d) 上載荷重載荷状況

図 4.1-2 緩衝材の膨潤変形試験状況

| 表 4.1-4 緩衝材の膨潤変形試験結果 | | | | | | | | |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|----------|--|--|
| | Case1 | Case2① | Case22 | Case2③ | Case2④ | Case3 | | |
| 上載荷重 P [MPa] | 0.125 | 0.125 | 0.250 | 0.500 | 1.000 | 0.125 | | |
| 高さ H ₀ [mm] | 5 | | 1 | .0 | | 20 | | |
| 縦横比 H₀/D | 0.0833 | | 0.167 | | | 0.333 | | |
| a | 35.1191 | 106.2113 | 122.2145 | 392.0914 | 461.3433 | 373.4605 | | |
| b | 0.021019 | 0.022578 | 0.046187 | 0.138627 | $0.23\overline{6574}$ | 0.028024 | | |
| $1/b(=\epsilon_{smax})$ [%] | 47.6 | 44.3 | 21.7 | 7.2 | 4.2 | 35.7 | | |



図 4.1-3 上載荷重を変えた場合の膨潤変形試験結果



図 4.1-4 供試体の高さを変えた場合の膨潤変形試験結果



図 4.1-5 供試体の縦横比と最大膨潤変形率の関係



図 4.1-6 上載荷重ごとの膨潤変形試験結果まとめ

2) 膨潤圧試験

緩衝材の膨潤圧試験の装置図を図 4.1-7 に示す。試験装置はフレーム式の圧密試験装置を用いた。供試体の寸法は直径 60 mm をとして、高さを 5 mm、10 mm、20 mm と変化させた。表 4.1-5 に膨潤圧試験の試験条件を示す。試験容器底部のポーラスメタルを介して供試体底面よりイオン 交換水を 1 次元に浸潤させた。試験時には載荷枠を変位制御ボルトで固定し、鉛直方向の変位が 生じた場合には変位量が 0 を保つように変位制御ボルトを回して調整した。膨潤圧が平衡状態に 達するまで試験を継続した。試験の実施状況を図 4.1-8 に示す。

図 4.1-9 に緩衝材の膨潤圧の経時変化を示す。また、図 4.1-10 に緩衝材の供試体の縦横比と膨潤

圧の関係を示す。試験結果より、緩衝材の最大膨潤圧は 1.00 MPa~1.63 MPa となり、供試体の 縦横比が大きくなるにつれて膨潤圧も大きくなる傾向がみられた。供試体の縦横比と膨潤圧の関 係を調査した事例(棚井ほか, 2010)においても同様の傾向がみられることが示唆されている。 しかしながら、本研究で設定した条件は既往の事例と比較して有効粘土密度が小さく縦横比も小 さい条件であるため、さらに幅広い条件でのデータを取得し、膨潤圧計測における供試体の縦横 比の影響を解釈することが今後の課題となる。



| | Case1 | Case2 | Case3 |
|------------------------|----------|-------|-------|
| 直径 D [mm] | | 60 | |
| 高さ H ₀ [mm] | 5 | 10 | 20 |
| 縦横比 Ho/D | 0.0833 | 0.167 | 0.333 |

表 4.1-5 緩衝材の膨潤圧試験の試験条件



(a) 膨潤圧の計測状況(b) 載荷枠の変位計測状況図 4.1-8 膨潤圧試験の実施状況



図 4.1-9 緩衝材の膨潤圧の経時変化



図 4.1-10 縦横比と最大膨潤圧の関係

(2) 埋め戻し材

1) 膨潤変形試験

埋め戻し材の膨潤変形試験の装置図を図 4.1-11 に示す。上載荷重はベロフラムシリンダにより 制御し、試験容器上部の載荷板を介して荷重を作用させた。供試体は、直径 100 mm、高さ 35 mm としてモールド内で 3 層に分けて圧縮成型することにより作製した。埋め戻し材の材料を図 4.1-12 に示す。膨潤変形試験は上載荷重の大きさを 0.025 MPa~0.100 MPa の間で変化させた 3 条件で実施した。試験条件を表 4.1-6 に示す。試験容器底部にはポーラスメタルを設置し、イオ ン交換水を供試体の底面から 1 次元に浸潤させた。加圧版に変位計を設置し、供試体の飽和に伴 う膨潤変形量を計測した。 緩衝材と同様の方法により求めた埋め戻し材の最大膨潤率を表 4.1-7 に示す。図 4.1-13 は埋 め戻し材の膨潤変形率の経時変化を示す。埋め戻し材の場合においても上載荷重が大きくなるほ ど最大膨潤変形率が小さくなる傾向がみられた。埋め戻し材の最大膨潤変形率は本試験の条件に おいて最も大きな値でも 0.76%であり、緩衝材と比べて 1/10 程度の上載荷重を作用させた条件で あるもののほとんど膨潤しないことが確認できる。また、図 4.1-14 に埋め戻し材の上載荷重と最 大膨潤変形率の関係を示す。図 4.1-14 には、平成 30 年度に実施した埋め戻し材の結果を合わせ てプロットした。平成 30 年度の結果においても上載荷重が大きくなると最大膨潤変形率は小さ くなる傾向がみられている。本年度の試験で得られた最大膨潤変形率と同程度の値を示している ことが確認できた。



図 4.1-11 埋め戻し材の膨潤変形装置



図 4.1-12 埋め戻し材の材料(左・中央:掘削ズリ、右:クニゲル V1)

| | Case1 | Case2 | Case3 | |
|------------------------|-------|-------|-------|--|
| 直径 D [mm] | 100 | | | |
| 高さ H ₀ [mm] | 35 | | | |
| 縦横比 Ho/D | | 0.35 | | |
| 上載荷重 P [MPa] | 0.025 | 0.050 | 0.100 | |

表 4.1-6 埋め戻し材の膨潤変形試験の試験条件

表 4.1-7 埋め戻し材の膨潤変形試験結果

| | Case1① | Case12 | Case13 |
|-----------------------------|--------|---------|---------|
| 上載荷重 P [MPa] | 0.025 | 0.050 | 0.100 |
| a | 8461.3 | 61171.6 | 92368.7 |
| b | 1.314 | 5.410 | 7.353 |
| $1/b(=\epsilon_{smax})$ [%] | 0.761 | 0.185 | 0.136 |



図 4.1-13 埋め戻し材の膨潤変形試験結果



図 4.1-14 埋め戻し材の上載荷重と最大膨潤変形率の関係

2) 膨潤圧試験

埋め戻し材の膨潤圧試験の装置図を図 4.1-15 に示す。試験装置は埋め戻し材の膨潤変形試験と 同様のものを用いてベロフラムシリンダの可動範囲をなくすことにより供試体を拘束した。試験 時に鉛直方向の変位が生じた場合にベロフラムシリンダのロッドの調整ねじにて変位量が 0 を保 つように調整した。試験容器底部のポーラスメタルを介して供試体底面よりイオン交換水を 1 次 元に浸潤させて膨潤圧が平衡状態に達するまで試験を継続した。供試体の寸法は直径 100 mm を として、高さを 35 mm、70 mm、105 mm と変化させた。表 4.1-8 に膨潤圧試験の試験条件を示 す

図 4.1-16 に埋め戻し材の膨潤圧の経時変化を示す。また、図 4.1-17 に埋め戻し材の供試体の 縦横比と膨潤圧の関係を示す。試験結果より、いずれの条件においても最大膨潤圧は約 0.03 MPa と小さく、供試体の縦横比が変化しても最大膨潤圧はほとんど変わらない結果となった。これは、 埋め戻し材の有効粘土密度が小さいため、発生する膨潤圧も小さく、供試体の寸法の違いによる 影響が出にくいためと考えられる。



図 4.1-15 埋め戻し材の膨潤圧試験装置

| | Case1 | Case2 | Case3 |
|------------------------|-------|-------|-------|
| 直径 D [mm] | | 100 | |
| 高さ H ₀ [mm] | 35 | 70 | 105 |
| 縦横比 H ₀ /D | 0.35 | 0.70 | 1.05 |

表 4.1-8 埋め戻し材の膨潤圧試験の試験条件



図 4.1-16 埋め戻し材の膨潤圧の経時変化



図 4.1-17 埋め戻し材の縦横比と最大膨潤圧の関係

4.1.3 膨潤挙動相互作用試験

(1) 試験準備

1) 縮尺模型の仕様

人工バリアの竪置き方式を対象とした人工バリア性能確認試験(以下、原位置試験)では、処 分孔に直径 2.4m、高さ 4.2m の人工バリア(オーバーパック+ベントナイト緩衝材)を設置し、 処分孔の直上を含む坑道部分は埋め戻し材により埋め戻している。

人工バリアとその直上の埋め戻し材の領域(図 4.1-18 中の赤枠内)を緩衝材と埋め戻し材を組 み合わせた縮尺模型により模擬した。緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用と原位置試験の状況 を図 4.1-19 のように整理している。原位置試験の状況を縮尺模型にて再現するにあたっては、以 下の点に留意した。

- · 人工バリアの部分は緩衝材のみ再現する。
- 原位置試験では緩衝材と岩盤の間隙に注水するためのケイ砂層が設けられている。縮尺模型においても緩衝材と試験容器の間に間隙を設け、その間隙にケイ砂を充填することで緩 衝材の底部から注水した水がケイ砂層を通じて緩衝材の外周部からができる機構とする。
- 原位置試験では原位置の地下水を注入しているが、縮尺模型試験では、イオン交換水を用いる。
- ・ 埋め戻し材は緩衝材との境界面近傍の部分のみを再現することとし、人工バリア上部の坑 道埋め戻し材料とほぼ同等な性状となる条件の上載荷重を埋め戻し材上部から作用させる。

平成 30 年度には膨潤挙動小規模試験を実施し、上記のケイ砂層を通じた緩衝材への注水が可 能であることや緩衝材の膨潤挙動が計測可能であることを実験的に確認した(原子力機構・原環 センター,2019)。本年度は1/20 スケールの緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模型試験を 実施した。縮尺模型を図 4.1-20 に示す。緩衝材と埋め戻し材は、表 4.1-1 に示す人工バリア性能 確認試験の仕様とした。内径 120 mm、高さ 315 mmの鋼製の試験容器内に緩衝材と埋め戻し材 の供試体を設置した。緩衝材部分は、直径 113 mm、高さ 210 mm とした。緩衝材と試験容器の 間には8号ケイ砂を充填し、幅3.5mmのケイ砂層を設けた。埋め戻し材部分は、直径120mm、 高さ105mmとした。埋め戻し材に作用させる荷重は、人工バリア性能確認試験の処分孔直上に 位置する埋め戻し材の自重に相当する荷重とした。上載荷重はベロフラムシリンダにより制御し、 試験容器上部に設置した加圧版を介して埋め戻し材の上部から0.087 MPaの荷重を作用させた。 試験容器の底部と頂部にはポーラスメタルをそれぞれ設置し、底部のポーラスメタルから給水を 行い、ケイ砂層を通じて緩衝材の外周から均等に水が浸潤する構造とした。

供試体の鉛直方向の膨潤変形量は試験装置頂部に設置した外部変位計により計測した。また、 試験容器側面に土圧計を緩衝材および埋め戻し材への水の浸潤により発生する膨潤圧を計測した。 2 つの土圧計の高さを合わせて対向するように配置した。緩衝材部分では高さを変えて3 段設置 し、埋め戻し材部分では1 段設置した。さらに、試験容器底部にはロードセルを設置し、鉛直方 向の膨潤圧を計測した。これらの試験容器の外部からの計測に加えて、緩衝材と埋め戻し材の境 界面にリン青銅板とひずみゲージを設置し、境界面における変形挙動を計測した。

2) 縮尺模型の準備

膨潤挙動相互作用試験における縮尺模型の準備手順を図 4.1-21 に、準備状況を図 4.1-22~図 4.1-25 に示す。まず、試験容器である鋼製モールド内に埋め戻し材を締固めにより作製した。ま た、緩衝材の供試体は、別のモールドを用いて静的圧縮によりブロックを製作した。埋め戻し材 の作成後には、まず、リン青銅板とひずみゲージを設置し、その後に緩衝材ブロックを積み重ね て設置した。緩衝材と試験容器の間の隙間にケイ砂を充填した後に、最後に天地返しをした。各 工程の実際の作業手順を以下に示す。

①埋め戻し材の締固め

- クニゲル V1 とズリを重量比で 40:60 の割合で混合して埋め戻し材の材料を作製し、含水比 を 35%に調整する。
- 直径 120 mm の試験容器に厚さ 35 mm、乾燥密度 1.20 Mg/m³となる重量分の埋め戻し材の 材料を投入し、静的圧縮により締固める。
- 上記の締固めを3回繰り返し、厚さ105 mmの埋め戻し材を作製する。

②緩衝材と埋め戻し材の境界面への計測器の設置

- 埋め戻し材にひずみゲージを設置するための溝を彫りこみ、ゲージを設置する。
- ひずみゲージのケーブルは試験容器側方の配線用の穴より試験容器外に配線する。
- ひずみゲージと直交する方向にリン青銅板を設置する。

※ひずみゲージの配線用の穴については、試験開始前に漏水防止の処理を施す。

③緩衝材ブロックの設置

- クニゲル V1 とケイ砂を重量比で 70:30 の割合で混合して緩衝材の材料を作製し、含水比を 10.5%に調整する。
- 直径 113 mm、厚さ 35 mm、乾燥密度 1.80 Mg/m³の緩衝材ブロック 6 個を静的圧縮により 作製する。
- 試験容器に緩衝材投入ガイドを設置し、緩衝材ブロックを6段積み重ねて高さ210mmの緩 衝材層を作製する。
- 緩衝材と試験容器の間にケイ砂充填用の 3.5 mm の隙間を設ける。

④ケイ砂の充填と計測器の設置

- 8号ケイ砂を緩衝材と試験容器の間の隙間に充填する。
- 緩衝材上部に試験容器の底板を設置する。
- 試験容器の上下を入れ替え、埋め戻し材の上部に載荷板および上板を設置する。
- 変位計を試験装置上部に設置するとともにひずみゲージ、土圧計の配線を行う。
- ベロフラムシリンダを用いて載荷板を介して 0.087 MPa の荷重を作用させる。
- 試験装置底部から注水を行い、珪砂層への通水を確認して準備を完了する。



模擬オーバーパック

図 4.1-18 人工バリア性能確認試験



(原子力機構・原環センター, 2019)









(b) 混合後の試料



9圧縮成型 (d) 圧縮成型後の供試体表面 図 4.1-22 埋め戻し材の作製状況



(c) 埋め戻し材の静的圧縮成型 図 4.1-22



(b) 埋め戻し材へのひずみゲージの設置



(c) 境界面へのリン青銅板の設置
 (d) ひずみゲージのケーブル処理
 図 4.1-23 緩衝材と埋め戻し材境界面の計測器設置状況



(a) ひずみゲージ外観





(b) 緩衝材ブロック



(d) 緩衝材ブロックの設置完了 緩衝材の作製状況





(c) ガイドを用いた緩衝材の設置作業図 4.1-24



(a) ケイ砂の充填状況



(c) 底板の設置



(d) 上板の設置 図 4.1-25 試験装置の組み立て作業状況



(b) ケイ砂の充填完了



(e) 試験の準備完了

(2) 計測結果

1) 外部変位計による膨潤変形量計測

縮尺模型試験における膨潤変形率と注水量の経時変化を図 4.1-26 に示す。注水量の経時変化を みると、試験開始後 20000 分(約 14 日)ごろから注水量は緩やかに増加する傾向となり、40000 分(約 28 日)ごろから試験終了までは注水量はほとんど変動していない。また緩衝材と埋め戻し 材全体の上方への膨潤変形量については、30 日を過ぎたあたりから変形量の変化が緩やかになり 57600 分(40 日)ごろからは、変形量はほとんど変動していない。試験開始約 90000 分(63 日) の時点における変形量は 9.84 mm となっており、膨潤変形率は緩衝材部分の初期高さ 210 mm に対して、4.69%であった。図 4.1-6 に示した上載荷重 0.125 MPa の時の最大膨潤変形率と比べ ると、本試験の膨潤変形率は 1/6~1/10 程度となった。この挙動に関しては、再度、縮尺模型試験 を実施してデータを精査し、膨潤変形率を評価する必要がある。



図 4.1-26 縮尺模型試験における膨潤変形率と注水量の経時変化

2) 含水比計測

試験終了後には、供試体を試験容器から取り出して含水比計測を実施した。まず、緩衝材部分 を高さ方向に16層(1層の平均厚さは10.09mm~20.88mm)に分割した。その後、各層の中央 の幅30mmの部分を直径方向に12個に分割した。以上の手順により図4.1-27に示すように緩 衝材の供試体全体を192個のブロックに分割し、炉乾燥法により含水比を計測した。緩衝材内の 含水比の分布を2次元のコンター図により図4.1-28に示す。水平方向の含水比をみてみると、注 水のために設けたケイ砂層と接している供試体外周部においては含水比が高い一方で、供試体の 中央部では含水比が低い結果であった。高さ方向の含水比を比較してみると緩衝材の中央部にお いて、埋め戻し材との境界面に近い緩衝材の上部において含水比が高くなっていることが確認で きた。緩衝材と埋め戻し材との境界面にはひずみゲージとリン青銅板を設置しており、そこに生 じた隙間から選択的に水が浸潤し上部の含水比が高くなった可能性が考えられる。また、供試体 の解体の際に分割したブロックの割れなどが発生したため体積の測定が困難であり、飽和度が算 出できなかった。

埋め戻し材部分は図 4.1-29 に示すように高さ方向に 3 層に分割した。その後、各層を中央部と

外周部の2つに分割し、炉乾燥法により含水比を計測した。表 4.1-9 に埋め戻し材の含水比の計 測結果を示す。1層目については、中央部がやや高い含水比を示したが、2層目と3層目において は中央部の含水比が低い結果であった。緩衝材との境界面に近い1層目については、ひずみゲー ジとリン青銅板を設置した隙間から選択的に水が浸潤し、中央部で含水比が大きくなった可能性 が考えられる。また、埋め戻し材の飽和度が100%になる場合の含水比は44.5%であり、試験終了 時点では不飽和であると考えられる。



図 4.1-27 緩衝材の分割図



図 4.1-28 緩衝材内の含水比分布



図 4.1-29 埋め戻し材の分割図

| 層 | 含水比 [%] |
|-----------|---------|
| 1 層目(中央部) | 38.9 |
| 1 層目(外周部) | 38.4 |
| 2 層目(中央部) | 36.9 |
| 2層目(外周部) | 38.0 |
| 3層目(中央部) | 36.0 |
| 3 層目(外周部) | 37.3 |

表 4.1-9 埋め戻し材の含水比計測結果

3) 土圧計およびロードセル計測

図 4.1-30 に土圧計とロードセルの設置状況を示す。土圧計による側面土圧の計測結果を図 4.1-31 に、ロードセルによる底面土圧の計測結果を図 4.1-32 に示す。

側面土圧の結果をみると、緩衝材部分に設置した土圧計 1~土圧計 6 については、試験開始直 後から土圧が増加し 1440 分~4320 分(1 日~3 日)を経過したあたりでピークを示した後に緩 やかな減少傾向を示す。その後、約20000分(14日)を経過したあたりから再び緩やかに土圧が 増加し、やがて土圧の変化は収束傾向を示した。試験終了時の土圧は、緩衝材の下部に設置した 土圧計1と土圧計2が約1MPaとなり最も大きく、上部に設置した土圧計5と土圧計6で約0.5 MPa と最も小さくなった。ロードセルによる底面土圧も土圧計と同じ傾向を示しており、最終値 も約1.0 MPaと土圧計1および土圧計2とほぼ同等の値を示した。緩衝材下部においては、緩衝 材の膨潤圧に相当する土圧が計測されていることから膨潤による変形は小さいと考えられる。一 方、緩衝材の上部においては下部の半分程度の土圧であり、膨潤により上方へ変位しているため 土圧が小さくなったと考えられる。一方で、埋め戻し材については、土圧計8において最終的な 土圧の値が 0.05 MPa となり、4.1.2(2) 2)で示した埋め戻し材の膨潤圧と同程度の値を示してい る。土圧計7については他の土圧計とは異なる挙動を示しており、約10000分(7日)が経過し たところで土圧は 0.4 MPa まで上昇した。その後一度土圧はほぼ 0 MPa まで減少し、最終的に は 0.15 MPa となった。試験開始直後の土圧の上昇については、土圧計に埋め戻し材に使われて いる掘削ズリが接触し計測値に影響したことなどが考えられるが詳細を把握するには至らなかっ た。



図 4.1-30 土圧計とロードセルの設置状況



図 4.1-31 側面土圧の計測結果





4) 境界面の形状計測

(a) ひずみゲージの計測結果

緩衝材と埋め戻し材の境界面に設置したひずみゲージの設置状況を図 4.1-33 に示す。ひずみゲ ージは供試体の中心から外周に向かって設置した。ひずみゲージには、半径方向に 4 か所の位置 にひずみセンサを取り付けている。各位置においてゲージの基板の表裏に 1 つずつ、計 8 個ひず みセンサが設置されている。緩衝材の膨潤によりひずみゲージが変形した時のひずみを計測する ことができる。各センサの位置において、緩衝材側のひずみの計測値と埋め戻し材側のひずみの 計測値の差分を求め(例えば、①の計測値-②の計測値) て、各位置における曲げひずみを評価 した。この時、曲げひずみが正の値の時に引張ひずみとなりひずみゲージは下向きに凸の形状を 示す。図 4.1-34 に示す曲げひずみの経時変化をみると、緩衝材の外周部に近い⑦、⑤の位置につ いては、圧縮ひずみが計測されており上方へと膨出していると考えられる。ひずみ量の増加の様 子から⑦の位置がまず大きく上方へ膨出しており、その後やや遅れて⑤の位置が上方へと膨出し ている。③の位置については試験開始直後には圧縮ひずみを示すが、その後ひずみ量が 0 の状態 で落ち着き、最終的には引張ひずみとなった。①の位置については、試験開始直後から引張ひず みを示し、時間の経過とともにひずみ量は減少し、③の位置のひずみ量と同程度の値となった。 ①の位置においては、ひずみ量の変化の様子から上方へはほとんど膨出していないと考えられる。 経過時間ごとのひずみゲージの推定形状を図 4.1-35 に示す。

ひずみゲージによる計測は、固定点を設けていないため計測したひずみ量による相対的な形状 の推定であり、膨出量の定量評価は今後の検討課題である。また、ひずみゲージ全体が上方へ平 行に移動した場合の変位量も計測できない点に留意が必要である。



図 4.1-33 ひずみゲージの設置状況



図 4.1-34 曲げひずみの経時変化



図 4.1-35 ひずみゲージの推定形状

(b) リン青銅板の計測結果

リン青銅板の設置位置を図 4.1-36 に示す。リン青銅板はひずみゲージと直接重ならないよう に、ひずみゲージに対して直交する向きに設置した。リン青銅板の形状計測の結果を図 4.1-37 に 示す。横軸は、各計測位置を供試体の中心を原点とした時の計測位置までの距離で示している。 計測位置の正負の位置は図 4.1-36 に示している。縦軸の鉛直方向の変形量は、リン青銅板の一番 低い場所を基準とした相対的な高さとして示した。結果より、緩衝材の外周部が中心部に比べて 上方へ大きく変形しており、最大で 3 mm の差が生じていることが確認できる。この結果は、ひ ずみゲージの計測結果や含水比計測の結果とも整合的であり、緩衝材と埋め戻し材の境界面にお いては、水の浸潤により外周部から先に上方へと膨潤しその変位量も中心部に比べて大きいと考 えられる。



図 4.1-36 リン青銅板の設置位置



図 4.1-37 リン青銅板の計測結果

(3) 膨潤変形挙動解析による評価

1) CODE_BRIGHT の概要

縮尺模型試験について緩衝材と埋め戻し材を簡易的にモデル化し、緩衝材の膨潤変形挙動について解析評価を実施した。本検討ではスペインのカタルーニャ工科大(UPC)の地盤工学研究室で開発された CODE_BRIGHT (Olivella, 1996)を用いた。CODE_BRIGHT は、地盤や岩盤などの多孔質体の熱一水一力学の連成解析可能な解析コードである。CODE_BRIGHT の特徴としては、流体の解析において液相と気相の二相流を取り扱うことができる。さらに力学の構成モデルとして飽和・不飽和の膨潤性粘土に適用可能な弾・粘塑性モデルが導入されており、飽和膨潤変形特性も表現が可能である。本検討では、熱の影響は考慮せずに、水一力学の連成解析を実施した。解析では、緩衝材と埋め戻し材の土質物性値、二相流解析のための二相流パラメータと水蒸気拡散に関するパラメータおよび力学解析のための力学パラメータを以下に示す。各パラメータを表す記号の下付きの s、1および g はそれぞれ固相、液相および気相を示す。

緩衝材と埋め戻し材の物性値を表 4.1-10 に示す。緩衝材および埋め戻し材の土粒子密度は、平成 30 年度に実施した土粒子密度の計測値より、クニゲル V1: ρ_s =2.743 kg/m³、掘削ズリ: ρ_s =2.637 kg/m³、ケイ砂 3 号: ρ_s =2.637 kg/m³、ケイ砂 5 号: ρ_s =2.639kg/m³として設定した。

| 11 | 4.1-10 | 陵国物と理めたし物の工員物圧値 | | | | |
|-------|--------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|--|
| 百日 | 記号 | 単位 | 緩衝材 | 埋め戻し材 | | |
| 項口 | | | $ ho_d$ =1.8 Mg/m ³ | $ ho_d$ =1.2 Mg/m ³ | | |
| 土粒子密度 | $ ho_{ m s}$ | kg/m ³ | 2.712 | 2.573 | | |
| 間隙率 | n | _ | 0.336 | 0.534 | | |

表 4.1-10 緩衝材と埋め戻し材の土質物性値

二相流パラメータを表 4.1-11 に示す。二相流パラメータのうち、気相の相対浸透率については、 液相の動きに干渉しないような設定とした。各々の式を以下の式(4)~式(9)に示す。

| | 封旦 | 出任 | 緩衝材 | 埋め戻し材 |
|----------|-----|-------|--------------------------------|--------------------------------|
| | 記万 | 中亚 | $ ho_d$ =1.8 Mg/m ³ | $ ho_d$ =1.2 Mg/m ³ |
| 初期飽和度 | Sr | % | 0.556 | 0.787 |
| 絶対浸透率 | K | m^2 | 1×10-20 | 3×10-18 |
| 水分特性曲線 | | | | |
| モデル係数 | P0 | MPa | 1.96 | 1.98 |
| モデル係数 | λ | — | 0.275 | 0.439 |
| 最大飽和度 | Sls | — | 1.00 | 1.00 |
| 残留間隙水飽和度 | Slr | _ | 0.00 | 0.00 |
| 相対浸透率 | | | | |
| モデル係数 | λ | — | 0.500 | 0.439 |
| 最大飽和度 | Sls | _ | 1.00 | 1.00 |
| 残留間隙水飽和度 | Slr | — | 0.00 | 0.00 |

表 4.1-11 二相流パラメータ

● 絶対浸透率

$$K = \exp(-42.10 + 1.12\rho_e - 2.12\rho_e^2)$$
(4)

ここで、peは有効粘土密度を表す。

● 水分特性曲線

水分特性曲線は van Genuchten モデルを適用した。

$$P_c = P_0 \left(S_e^{-\frac{1}{\lambda}} - 1 \right)^{1-\lambda} \tag{5}$$

$$S_e = \frac{S_l - S_{lr}}{S_{ls} - S_{lr}} \tag{6}$$

ここで、 P_0 、 λ はモデルパラメータ、 S_e は有効飽和度、 S_{lr} は残留間隙水飽和度、 S_{ls} は最大飽和度を示す。

● 相対浸透率

相対浸透率は液相に van Genuchten モデルを、気相に Grant モデルを適用した。 液相: van Genuchten モデル

$$K_{rl} = \sqrt{S_e} \left(1 - \left(1 - S_e^{-\frac{1}{\lambda}} \right)^{\lambda} \right)^2 \tag{7}$$

気相: Grant モデル

$$K_{rg} = 1 - K_{rl} \tag{8}$$

水蒸気の拡散は Fick の法則により表現される。拡散係数は以下の式(9)より算出している。

$$D^i_{\alpha} = D\left(\frac{(273.15+T)^n}{P_g}\right) \tag{9}$$

ここで、D、n はモデルパラメータ、 P_g はガス圧を示す。なお、本解析では屈曲度の飽和度依存 性は考慮していない。なお、上付きの*i*は*a*相中の他の相(例えば、液相中の気相あるいは気相 中の液相)を表す。水蒸気拡散に関するパラメータを表 4.1-12 に示す。

| | 記号 単位 | 用导 | 緩衝材 | 埋め戻し材 | | | |
|---------|--------|------|-----------------------------|-----------------------------|--|--|--|
| | | - 単位 | $ ho_{ m d}$ =1.8 Mg/m 3 | $ ho_{ m d}$ =1.2 Mg/m 3 | | | |
| 材料パラメータ | D | — | 5.90×10^{-6} | 5.90×10^{-6} | | | |
| 材料パラメータ | n | — | 2.30 | 2.30 | | | |
| 屈曲度 | τ | | 1.0 | 1.0 | | | |

表 4.1-12 水蒸気拡散に関するパラメータ

CODE_BRIGHT に導入されている力学構成モデルのひとつである Barcelona Basic モデル(以降、BBモデル)(Alonso *et al.*, 1990)は、修正 Cam-Clay モデルを不飽和粘土に拡張した弾塑性構成モデルであり、ベントナイトのような膨潤性粘土に対しても適用できるよう拡張されている。なお、飽和時の挙動は修正 Cam-Clay モデルと一致する。BB モデルで考慮される不飽和粘土の一般的な力学特性を以下に示す。

- ・ サクションの増加(飽和率の低下)による降伏圧密応力の増加
- ・ 不飽和粘土も飽和すると、飽和までのサクション・応力経路とは関係なく、圧密に関しては同じ挙動をする(同じ間隙比~有効応力関係となる、同じ圧密ラインに乗る)。
- ・ 不飽和粘土は湿潤により、拘束応力が小さい場合は膨潤し、高い場合は圧縮する。
- 不飽和粘土の体積変化は応力経路依存性がある(サクションの変化が同時にあると経路依存の 体積変化挙動をする)。
- サクションの増加は有効粘着力を増大させるが、内部摩擦角に影響をほとんど与えない。

緩衝材はこの BB モデルを適用することから弾塑性パラメータを設定する。設定した緩衝材の 力学パラメータを表 4.1-13 に示す。飽和時のパラメータについては、上記で述べたように修正 Cam-Clay モデルに従うことから、要素試験から取得した値を用いた。その他のパラメータにつ いては、フィッティングにより設定した。

表 4.1-13 中の記載している飽和膨潤圧については、式(10)に示す有効粘土密度と膨潤圧の関係 式(菊池ほか, 2005)より求めた。

$$\sigma = \exp(3.94\rho_e^3 - 13.07\rho_e^2 + 18.06\rho_e - 9.60)$$

(10)

表 4.1-13 に示す緩衝材の仕様の場合には有効粘土密度が 1.58 Mg/m³となるので、式(10)より 飽和膨潤圧が 1.307 MPa となる。

また、埋め戻し材は弾性体としてモデル化するため、弾性係数とポアソン比を設定した。埋め 戻し材の力学パラメータを表 4.1-14 に示す。

| 項目 | 記号 | 単位 | 設定値 |
|--------------------------|-----------------|----------|-----------|
| 初期乾燥密度 | $ ho_{ m d}$ | Mg/m^3 | 1.80 |
| 初期間隙比 | е | _ | 0.507 |
| ポアソン比 | v | | 0.30 |
| 膨潤指数(飽和時) | κ0 | — | 0.09 |
| 圧縮指数(飽和時) | λο | | 0.125 |
| 参照有効応力時の湿潤膨潤指数(飽和時) | | | 0 1 4 9 9 |
| (パラメータ設定時の膨潤圧 1.307 MPa) | K _{s0} | | 0.1428 |
| 有効応力依存湿潤膨潤指数パラメータ | | | 0.000 |
| (パラメータ設定時の膨潤圧 1.307 MPa) | α _{sp} | | -0.389 |
| 限界応力比 | М | | 0.63 |
| 飽和時引張強度 | P_{s0} | MPa | 0.0 |
| 王密先行応力(飽和時) | Po* | MPa | 8.050 |

表 4.1-13 緩衝材の力学パラメータ

表 4.1-14 埋め戻し材の力学パラメータ

| | 記 | 埋め戻し材 | | | |
|-------|-------|-------|-------------------------------------|--|--|
| | 口与 | 中世 | $ ho_{ m d}$ =1.2 Mg/m ³ | | |
| 弾性係数 | Е | MPa | 1.792 | | |
| ポアソン比 | v | | 0.40 | | |

2) 解析モデル

解析モデル及び解析条件を図 4.1-38 に示す。縮尺模型試験の緩衝材と埋め戻し材の供試体は、 対称性から軸対称モデルとした。中心軸と緩衝材下面の交点を原点とした。緩衝材と試験容器の 間に設けた厚さ 3.5 mm のケイ砂層はモデル化せず、緩衝材の半径も埋め戻し材と同様に 60 mm とした。供試体の高さは試験と同じ仕様として、緩衝材を 210 mm、埋め戻し材を 105 mm とし た。解析モデルの中心軸および側面を X 方向の固定境界とし、底面を Y 方向の固定境界とした。 また、緩衝材部分の下面および側面を水圧境界として気相と液相の圧力を 0.01 MPa を設定した。 緩衝材の上面は大気開放条件とし、鉛直下向きに 0.087 MPa の荷重を作用させた。変位の解析結 果は、図 4.1-38 に示すように緩衝材と埋め戻し材の境界面と中心軸の交点で抽出した。解析期間 は縮尺模型試験の期間である 90000 分(62.5 日)に対して、101000 分(70 日)とした。





3) 解析結果

変位の抽出点における Y 方向の変位と縮尺模型試験の変位量を図 4.1-39 に示す。解析による変位は 解析の開始直後から増加の傾向がみられ、約 20000 分(14 日)が経過したあたりからは緩やかな増加 の傾向を示した。縮尺模型試験の終了時点(90000 分)における変位量は 23.96 mm となった。一方で、 縮尺模型試験においては、約 40000 分(30 日)に注水量がほとんど変動しなくなるととともに、供試 体の変形量の増加傾向が緩やかになり、57600 分(40 日)ごろからは変形量はほとんど変動せずに最終 的な変形量は 9.84 mm であった。解析の変位量は試験より 2 倍以上大きな値を示しており、試験の状 況を再現できていないことが明らかとなった。

また、図 4.1-40 に解析により得られた飽和度の経時変化を示す。緩衝材部分については、時間の経 過とともに緩衝材の上部と下部から均等に浸潤している様子が確認できる。埋め戻し材部分では、水圧 境界である緩衝材と埋め戻し材の境界面の側面側から浸潤が始まり、14400分(10日)が経過した時点 でほとんど飽和状態に達している。

図 4.1-41 に示すように試験の終了時点(試験:63 日、解析:62 日)における含水比を緩衝材の上部、 中部および下部について抽出した。3 層目、8 層目および 12 層目の7 ブロック~12 ブロックの含水比 を抽出した。なお、縮尺模型試験で分割した緩衝材供試体は、6 ブロックと7 ブロックの間が供試体の 中心と一致し、中心軸と緩衝材底面(1 層目の下面)の交点を原点とした。解析においてもモデルの中 心軸と緩衝材底面の交点を原点として、上部を緩衝材上面から 35 mm (y=175 mm)、中部を y=105 mm、下部を緩衝材底面から 35 mm (y=35 mm)の位置を抽出した。図 4.1-42 に抽出点の含水比を示 す。横軸は、供試体中心を 0 mm として含水比の抽出位置を供試体中心からの距離で示している。縮尺 模型試験では、下部の含水比に比べて上部の含水比が大きくなっており、不均等に水が浸潤しているこ とが確認できる。一方解析では、上部と下部の含水比分布がほとんど等しく、また、中部の含水比が最 も小さい結果となっている。さらに、中部の水平方向の含水比分布をみてみると、解析では x=60 mm (緩衝材側面)から x=25 mm の位置までは緩衝材中心部よりも含水比が高くなっており、x=25 mm の 位置まで水の浸潤が進んでいると考えられる。その一方、縮尺模型試験においては、x=45 mm より外

側が内側と比べて相対的に含水比が大きい分布となっており、解析に比べて水の浸潤は側面から浅い領 域までに留まっていると考えられる。以上に示すように、縮尺模型試験と解析では水の浸潤挙動に差異 がみられ、結果として解析の場合に緩衝材の膨潤が進んだ状態になっているため、変位も大きい値を示 す結果となったと考えられる。



図 4.1-39 膨潤変形解析と縮尺模型試験の結果比較





図 4.1-40 飽和度コンター図



縮尺模型試験

膨潤変形解析





図 4.1-42 含水比の比較
4.1.4 緩衝材の膨潤挙動に対する化学的な事象の抽出・整理

緩衝材や埋め戻し材に用いられるベントナイトの膨潤特性については、ベントナイト周辺の水 のイオン濃度といった化学的性質の影響を大きく受けることが報告されている。そこで、ベント ナイトの膨潤変形挙動に対する化学的影響を対象とした研究事例の調査を行い、緩衝材と埋め戻 し材の力学的相互作用下における緩衝材の膨出挙動を評価する上で考慮すべき事象の抽出・整理 を実施した。

人工バリアとしての緩衝材及び埋め戻し材に使用されるベントナイトの膨潤性能は、その生成 起源と鉱物組成によって異なるとともに、定置される場所周辺の化学的な環境条件にも強く影響 を受ける。ベントナイトの膨潤は、ベントナイトの主要鉱物であるモンモリロナイトの層間空隙 に水分が取り込まれることによって生じることから、モンモリロナイトの安定性や鉱物特性に影 響を与える化学的作用は、ベントナイトの膨潤特性に影響を与えることとなる。地層処分が実施 される環境を想定した場合には、地下水溶存成分(母岩間隙水、海水など)、処分施設に使用され るセメント成分及び鉄とベントナイトとの相互作用が外的な化学的作用の主要なものとして考え られる。

緩衝材は、主にベントナイト単体あるいは砂と混合して作製することが検討されており、砂を 混合して作製する場合には、混合する砂の品質を適切に管理することにより砂による化学的影響 は排除あるいは極めて軽微なものに制限できると考えられる。埋め戻し材については、元の岩盤 から掘削したものであることに加えて調達のしやすさ等から現地の掘削ズリを混合することが検 討されている。ここでは、掘削ズリに起因する化学的影響については、次のような理由で、母岩 間隙水の化学的影響の可能性検討に代えることとした。

- ・埋め戻し材の混合材料が現地の掘削ズリである場合、周辺岩盤を通過して処分施設に到達する地下水にすでにその成分が含まれていると考えられるため、母岩間隙水による化学的影響として考慮する。
- ・現地の掘削ズリではなく、他所の材料(鉱物)を混合する場合は、砂と同様に材料としての 品質管理を適切に実施することにより、影響を低減することが可能であると考える。

ただし、処分施設へ流入した地下水が、埋め戻し材を通過して廃棄体及び緩衝材へ到達するこ とも考えられるため、埋め戻し材の混合鉱物を外部発生鉱物から選定する際には、埋め戻し材自 体の膨潤性能に与える影響だけでなく、埋め戻し材から溶出する可能性のある化学成分による緩 衝材及び廃棄体容器への影響にも留意が必要である。

以下では、緩衝材の膨潤挙動に影響する化学的事象として、地下水・母岩間隙水になどに含ま れる電解質イオン強度の影響、セメント間隙水の影響及び鉄の腐食生成物の影響について整理す る。

(1) 地下水のイオン強度による膨潤特性への影響

地下水に化学成分が含まれる場合のベントナイトの膨潤メカニズムは、外部水との水のポテン シャル差による浸透圧性のものと内部結晶性のものに分類される。前者はベントナイトの層間の イオン強度と地下水のイオン強度の差による浸透圧で水が流入する現象であり、後者はモンモリ ロナイト層間の陽イオンの水和により層間が膨潤する現象である。前者は低粘土密度の場合に支 配的となり、後者は高粘土密度/低含水量の場合に支配的になることが指摘されている。以下に、 地下水溶存成分を評価するための母岩間隙水の成分及びその影響を扱った試験について整理した。

1) 母岩間隙水の化学成分の影響

母岩の間隙水の化学成分に関して、ここでは結晶質岩の代表として花崗岩、堆積岩の代表とし て泥岩を例に概要を記す。

一般的には、花崗岩と泥岩でおおよそ次のような差異が認められる。

- ・ 間隙水のイオン強度:泥岩 (0.2-0.8 M) >>花崗岩 (10⁻³ M)
- ・ 間隙水の pH: 泥岩 (7-7.5) <花崗岩 (9.6)

これら母岩の間隙水がベントナイトに浸潤すると、つぎのような現象が生じる可能性がある。

- ベントナイト鉱物の溶解が発生
- ベントナイト層間水のイオン強度と陽イオン組成の変化
- 新しいベントナイト層間水に適合するように、陽イオンの占有状況が変化
- モンモリロナイトの溶解が発生

母岩の間隙水とベントナイトの層間水の化学組成の差が大きいほど、化学反応はより活発にな り平衡に至るまでにはより長い時間を要する。たとえば、花崗岩の間隙水には石灰分が少ないの で、それを多く含む泥岩の間隙水と比較して、ベントナイトの石灰分をより早く溶解させること になる。また、母岩中の地下水の移動プロセスの違い(一般論であるが、花崗岩においては移流 が卓越し、泥岩においては拡散が卓越する傾向がある)は、短期間の地下水とベントナイトとの 相互作用の拡大に影響する可能性がある。

(a) 花崗岩に関する試験研究

花崗岩とベントナイト緩衝材との相互作用に関する原位置試験については、比較的多くの研究 がある。たとえば、スイス・グリムゼルにおける FEBEX、スウェーデン・エスポにおける ABM 試験などである。室内試験では、ベントナイト MX-80 に花崗岩の間隙水を浸潤させた試験によ り、石灰が溶解(ナトリウムが減少し、カルシウムが増加)することを観測したものなどがある (Jenni, *et al.*, 2014)。

(b) 泥岩に関する試験研究

泥岩を母岩とする処分施設には、一般にコンクリートあるいは鋼製支保工が必要となるため、 母岩との直接的な接触のケースは少なく、このため試験が実施された例も少ない。また、セメン トや鉄は泥岩の間隙水成分を変化させることになる。泥岩の一例として、スイスでの処分候補地 層のひとつとして多くの研究がおこなわれているオパリナス粘土の間隙水は、おおよそベントナ イト MX-80 と類似と考えられている(Bradbury *et al.*, 2012)。

2) イオン濃度による膨潤圧と透水性への影響

Kalnland らは、6種類のベントナイトに対して、膨潤圧及び透水係数を計測している(Karnland et al., 2006)。この試験では、ベントナイトの種類に応じて 0.1M の塩化ナトリウム溶液あるいは 塩化カルシウム溶液を通水し計測を実施している。計測はイオン濃度を 0.1M から 0.3M、1.0M 及び 3.0M と順番に増加させて同じように膨潤圧を計測した後、可逆性を確認するために、濃度 を 0.3M あるいは 0.1M へ戻して膨潤圧、透水係数を計測している。試験の結果より、溶液のイオ ン濃度が高いほど膨潤圧は低下することが確認された。また、供試体の密度が高いほど溶液イオ ン濃度の影響度合いは小さくなる。さらに、溶液濃度に対する膨潤圧の変化は可逆的であること が示された。これらの特徴はいずれの種類のベントナイトについても同様であった。

上記に示したように、塩水による膨潤は、真水によるものよりも小さくなり、緩衝材の機能と

しての膨潤確保を考える際には十分な留意が必要である。さらに、塩水を使用することによる亀 裂の生成も報告されており、この場合はさらに深刻な問題を引き起こす可能性がある。

(2) セメント間隙水の影響

セメント間隙水のベントナイトの膨潤性に与える影響は、カリウム、ナトリウム及びカルシウ ムなどのセメント間隙水中の陽イオンによるモンモリロナイトのイオン交換現象(2次鉱物の生 成)及び高 pH のセメント間隙水によるモンモリロナイトの溶解現象が主なものであるとされてい る。

コンクリート(セメント間隙水)の泥岩への化学的影響に関する研究は、特に中/低レベル放 射性廃棄物処分の分野で数多く実施されており、参考とする部分は多いが、ベントナイト(特に 高圧縮ベントナイト)への化学的影響を考える際には、泥岩とは次のような点で相違があること を考慮すべきである。

- ベントナイトの主要鉱物はモンモリロナイトであるが、一般に泥岩の主要鉱物は層状ケイ 酸塩であり、モンモリロナイトは主にイライトースメクタイト混合層の形で存在する。そのため、イオン交換容量はベントナイトの方がはるかに大きい。
- 一般に高圧縮ベントナイトはきわめて多孔性であり、ベントナイトの陰イオンが接することができる空隙の比率は高くない。
- 同様の理由で、移流、拡散及び目詰まり現象などの媒体中の溶質の移動特性は、ベントナイトと泥岩では大きく異なる。これは、ベントナイト及びコンクリートの最終的な平衡状態には影響しないが、そこに至るまでの時間と過渡的な状態に影響する。

セメント間隙水によるベントナイトへの化学的影響は、一般的には次のようなシナリオで進行 すると考えられる。

- ・ 支保工(あるいは吹付け) コンクリートが水和した後に、不飽和ベントナイトが定置され る。
- ・ コンクリートと母岩の間の pH 勾配が大きいので、この両者の間で化学反応が生じる。
- ・ コンクリート支保工と平衡化した岩盤地下水により、ベントナイトが徐々に飽和する。
- 地下水がベントナイト中へ浸潤するにしたがい、外部との化学的な濃度勾配は徐々に減少する。この地下水の浸潤の有無により、ベントナイト中に化学的な変質を生じた領域と未変質の領域が生じる。この2つの領域の境界は地下水の浸潤により徐々に移動する。
- セメント平衡水は、カリウム、ナトリウム及びカルシウムを多く含み、ベントナイト中の 陽イオン(マグネシウム及びナトリウム)をイオン交換し、ベントナイトの膨潤圧を低下 させる(ナトリウムベントナイトのカルシウム化)可能性がある。
- ・ さらにセメント間隙水の高い pH により、モンモリロナイトの溶解が進む。

セメント間隙水のベントナイトへの影響に関する研究を以下に整理する。

1) 室内試験によるイオン拡散に関する試験

一般に、高圧縮されたベントナイトを対象としたセメント間隙水の浸潤試験は、試験期間が長いことや境界を含むベントナイト/セメント領域全体の分析評価(可視化など)に必要な技術などの要求が厳しいこともあり、実施例は多くはない。柴田らは、セメントペーストで圧縮ベントナイトを挟んだ供試体に対して通水試験を実施している(柴田ほか,2011)。試験では、セメントのカルシウムが境界面よりベントナイト中へ移行していることを確認するとともに、溶出によるモンモリロナイトの溶解の可能性を検討している。

2) 花崗岩中の原位置試験

スイス・グリムゼル試験施設では、花崗岩中での廃棄体横置き概念を対象としたヒーター試験 (FEBEX)の試験体に対する解体調査(FEBEX-DP)が実施され、13年経過後の高圧縮ベント ナイト(スペイン産 Serrata 粘土)とセメント(普通ポルトランドセメントによる吹付けコンク リート)の境界部の調査が実施されている(Turrero *et al.*, 2016)。試験の主な成果は次のとおり である。

- ・ 境界部のベントナイトにおける石灰と塩素の溶解により、コンクリート内でフリーデル氏 塩とエトリンガイト/石灰の沈殿が見られた。
- コンクリート内のカルシウムの溶解とベントナイトあるいは花崗岩中の地下水の炭酸により、境界部のベントナイト中に炭酸カルシウムの沈殿が生じた。
- コンクリート/花崗岩からのナトリウム、カリウム及びカルシウムのベントナイトへの流入により、ベントナイト中にマグネシウムの沈殿を生じた。ナトリウムとカリウムはわずかに増加したのみであったが、おそらくそれらはより遠方まで移行したのではないかと考えられた。これに関しては、ヒーターの温度の影響の可能性がある。
- ベントナイトのマグネシウムが境界へ移行して沈殿(ブルサイトや M-S-H)した。しかし ながら、ベントナイト間隙水におけるマグネシウムは微量であった。
- ・ 境界に近いベントナイト中のケイ素とアルミが少量消費された。モンモリロナイトの溶解 の可能性がある。
- ・ 境界から遠いところでは、カルシウム、ナトリウム、カリウムが増加し、マグネシウムが 減少した。
- コンクリートプラグに接していたベントナイトの膨潤能力は、同程度の乾燥密度をもった ベントナイトと比較しても平均で1%程度低下しているのみであった。ただし、試験体相互 のばらつきが大きいことは留意すべきである。

結論として、13年間の試験によっても、セメント間隙水による高圧縮ベントナイトブロックへの 化学的影響は小さいと評価された。

3) カルシウム化したベントナイトの透水性に関する室内試験

高圧縮されたナトリウム型ベントナイトがセメント間隙水により変質した場合の膨潤性、透水 性及び力学特性を直接的に計測した例は見当たらなかったが、ナトリウム型ベントナイト(以下、 Na型)のカルシウム化、シリカ、アルミの溶出現象などが観測されていることから、膨潤性の低 下及び透水性の増大が見込まれる。カルシウム化したベントナイト(以下、Ca化型)を対象とし て、セメント間隙水による高アルカリ水と硝酸塩のベントナイトの圧密性と透水性への影響につ いての試験的に検討している(入矢ほか,2004)。この検討においては、Na型とCa化型につい て圧密試験と透水試験を実施している。Ca化型の処理には水酸化カルシウム飽和溶液(CW)、 pH13.2の高アルカリ溶液(AW)およびAWに硝酸ナトリウムを3mol/Lの割合で添加した溶液 (AWN)を用いており溶液の影響を調べた。Ca化型の透水係数はNa型の透水係数と比べて明らか に大きくなっており、特にAWNについては、5桁の違いを生じており、高アルカリによるベント ナイトの溶解の影響が大きいことを示している。

セメント間隙水のベントナイトへの影響は、間隙水に含まれるイオンと強いアルカリ性の2つ の要素によりもたらされる。それぞれの変質を引き起こすメカニズムは大きく異なるが、いずれ においてもベントナイトの膨潤性を低下させ、空隙の増大、その結果として透水性を増大させる という結果をもたらす。

(3) 鉄の腐食性生物の影響

オーバーパックや建設資材を起源とする鉄の腐食生成物が、下記のようなベントナイトの劣化 をもたらす可能性が指摘されている。

- 二価あるいは三価の鉄に富む二次鉱物の形成とベントナイトのセメンテーションによる膨 潤特性の低下
- ・ スメクタイトから鉄に富む非膨潤性粘土鉱物への変質
- ・ 鉄のスメクタイト構造への取り込み、例えば鉄に富む2八面体もしくは3八面体の スメクタイトへの変質によるスメクタイトの化学的安定性の低下
- スメクタイトの八面体シート中の三価の鉄の還元により層電荷と陽イオン容量が増加する。
 これにより、ベントナイトの TOT 層の距離が開くこととなり、膨潤圧の低下を招く可能性がある。
- ・ 陽イオン交換サイトにおける三価の鉄によるナトリウムの置換が生じる。これによりモン モリロナイトの膨潤圧が減少

これらの鉄の腐食生成物によるベントナイトの膨潤圧への影響は、化学的作用と力学特性の 関係が明らかになっていない。

1) 室内試験における検討

Kumpulainen らは、鋳鉄を仕込んだ MX-80 ベントナイトの試験とクニピアをバッチで鉄粉と 反応させた試験の結果を比較している(Kumpulainen *et al.*, 2010)。前者では鉱物的変化と膨潤 圧の変化がほとんど確認されなかったが、後者ではモンモリロナイトの非膨潤性鉱物への変質が 観測された。この変質は溶液の化学組成の影響もうけており、塩化ナトリウムや炭酸ナトリウム 溶液では変質が発生したが、硫酸ナトリウムや蒸留水では発生しなかった。

2) 原位置試験における検討

スイス・グリムゼル試験場での FEBEX-DP 試験では、ベントナイトに対する炭素鋼、ステンレ ス鋼、チタン及び銅などの影響も調査されている (P. Wersin *et al.*, 2016)。ベントナイトー鉄境 界部の分析の結果、二価の鉄は、三価の鉄に比べて境界部では少なくなっており、ベントナイト 内部における鉄の移行の最前線と境界部との中間では優勢となっていることが確認された。膨潤 圧に関しては、原位置試験後の試験体から直接計測すること困難である。サポナイトがヒーター 近傍で生成していることが確認されたが、陽イオン交換容量(CEC)の変化はごく小さいもので あったので、膨潤圧の低下は小さかったと考えられた。

4.1.5 まとめと今後の課題

(1) 膨潤基礎試験

膨潤変形試験と膨潤圧試験を実施することにより、緩衝材と埋め戻し材の膨潤特性について概略的に把握することができた。今後は、縮尺模型試験において緩衝材の膨潤変形挙動を評価することを念頭に試験条件を設定し、埋め戻し材のもつ緩衝材の膨出抑制機能の評価に反映できるデータの取得が課題である。

(2) 膨潤挙動相互作用試験

人工バリアの処分孔竪置き方式を対象とした緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用下における 緩衝材の膨出挙動を把握するために、幌延深地層研究センターの地下施設で実施している人工バ リア性能確認試験を事例に実規模試験の1/20スケールの緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた初の 縮尺模型試験を実施し以下の知見を得た。

縮尺模型試験の終了時における膨潤変形率は 4.69%となり、膨潤変形試験の結果と比較して小 さい値となった。この結果に関しては、縮尺模型試験を再度実施してデータを精査し、埋め戻し 材の緩衝材の膨出を抑制する機能を評価することが必要となる。

土圧計による縮尺模型の側面土圧の計測では、緩衝材の下部の土圧に比べて上部の土圧が小さいことが確認された。緩衝材の膨潤による変位が生じており、緩衝材の上部での土圧が小さくなったと考えられる。また、縮尺模型底部に設置したロードセルによる鉛直方向の土圧の計測では、 緩衝材下部の側面土圧と一致する値が得られた。

今後は、緩衝材の浸潤の進展状況と個別の領域の変形量に関するデータの取得を実施し、飽和 の進展により発生する土圧と変形量の関係を定量的に評価することが課題となる。

緩衝材と埋め戻し材の境界面におけるひずみゲージやリン青銅板による膨出挙動計測では、緩 衝材外側からの水の浸潤に伴い、緩衝材の外側から上方への膨潤変形が進展する様子をとらえる ことができた。これらは境界面の相対的な変位計測による膨潤挙動の推定であり、今後は定量的 な膨出量評価の方法を検討するとともに埋め戻し材のもつ緩衝材の膨出抑制機能の評価に資する データとして反映することが課題である。

縮尺模型試験を対象とした膨潤変形解析では、試験における供試体への水の浸潤挙動を再現で きておらず、変形量を過大に評価する結果となった。今後は、試験で起きている現象を解析にお いて適切に表現するとともに解析パラメータについても適切に設定することが必要となる。

(3) 緩衝材の膨潤挙動に対する化学的な事象の抽出・整理

緩衝材の膨潤挙動に影響を及ぼす化学的事象として、地下水・母岩間隙水になどに含まれるイ オン強度の影響、セメント間隙水の影響及び鉄の腐食生成物を対象に整理した。以下にその概略 を示す。

- ・ 塩水及びセメント間隙水の影響により、ベントナイトの膨潤性は低下する。ただし、粘土 密度にもよるが、ある程度の膨潤性は維持される。
- ・ 塩水影響以外にも、母岩間隙水の特性(たとえば石灰分の有無)は、ベントナイトの膨潤 性に大きく影響する可能性がある。
- 外部水のイオン強度の影響は、ベントナイト内部のイオン強度との差に加えて、緩衝材の 粘土密度にも依存することが予想される。
- セメント間隙水の強アルカリは、ベントナイト鉱物の溶解を生じさせて、膨潤性を著しく 損なう可能性がある。
- ・ 鉄の腐食物は、長期的にはベントナイト中に移行するが、膨潤性への影響は小さいことが 予想される。

縮尺模型試験においては、緩衝材と埋め戻し材の力学的作用下の緩衝材の膨潤挙動を把握する ために、イオン交換水を用いて水に含まれる化学成分の影響を排除した試験を実施している。一 方、縮尺模型試験のモデルとしている人工バリア性能確認試験は、堆積岩かつ塩水系地下水環境 下で実施している。当面の課題としては、縮尺模型試験において模擬地下水や幌延地下水を用い ることにより、化学的な作用が生じる場合と生じない場合で膨潤変形挙動の違いを把握すること である。

4.2 EDZ シーリング試験

4.2.1 試験の概要

EDZ のシーリングについては、国内外においてこれまでベントナイト系材料を用いた粘土プラ グの設置を前提とした検討が行われている。粘土プラグに要求される自己充填性や低透水性など の機能については、これまでも地下研究施設を活用した原位置試験が実施されているが、種々の 環境条件に対する粘土プラグの性能評価については十分に把握されていない。そこで、堆積岩か つ塩水系地下水環境下におけるベントナイト系材料を用いた止水プラグの地下水移行抑制機能を より明確化することを目指した EDZ シーリング試験を実施する。本検討では、止水プラグの材料 として検討されているベントナイト系材料について、幌延の地下環境条件下における止水性能を 評価することを目的とした。具体的には、幌延深地層研究センター地下施設の深度 350m 調査坑 道において、図 4.2-1 に示すように、坑道の底盤に鉛直下方向に溝(スリット)を掘削し、ベン トナイト系材料を充填した粘土止水壁によって区切られた試験領域を設定し、透水試験を実施す ることにより粘土止水壁を施工した後の試験領域の透水性を評価する

平成 30 年度においては、原位置 EDZ シーリング試験に先立ち原位置環境下を想定したベント ナイト系材料の室内材料試験を行った。また、試験坑道3においてパイロットボーリングを行い、 坑道の底盤下の状況および EDZ の分布状況を確認するとともに、透水性を確認した。本年度は、 ベントナイト系材料の透水試験の結果に基づき粘土止水壁の材料を選定した。平成 30 年度に実 施した試験坑道3における事前の原位置調査の結果に基づいて試験領域を設定し、選定したベン トナイト系材料を用いた粘土止水壁の施工した後の透水性を透水試験により評価した。また、透 水試験の結果について浸透流解析による評価も併せて実施した。本年度の実施内容の全体概要を 図 4.2-2 に示す。



図 4.2-1 EDZ シーリング試験の概念図



図 4.2-2 本年度の実施内容の全体概要

4.2.2 ベントナイト系材料の選定

EDZ シーリング試験における粘土止水壁の透水性は、幌延の地下施設深度 350m の健岩部の 透水係数である 10⁻¹⁰ m/s 以下となることを目標とした。さらに、本試験においては原位置にお ける施工の不確実性を考慮して、透水係数を1オーダー低い 10⁻¹¹ m/s に設定した。幌延の地下 水環境下においても 10⁻¹¹ m/s の透水係数を達成できる粘土止水壁の乾燥密度として 1.20 Mg/m³ を設定し、平成 30 年度にはナトリウム型ベントナイトについて、その狭隘空間に充填した時の 膨潤の様子を確認している(原子力機構・原環センター, 2019)。それらの材料について、想 定した低透水性を確保できていることを確認するために実施した透水試験の結果と合わせて、 EDZ シーリング試験の止水壁の材料として用いるベントナイトの種類を選定した。

(1) 透水試験

ベントナイトは低透水材料であり、地盤工学会基準「低透水性材料の透水試験方法」(JGS 0312-2018)に基づき、変水位透水試験にて試験を実施した。

透水試験用の供試体の仕様を表 4.2-1 に、透水試験の試験状況を図 4.2-3 に示す。供試体は、 ナトリウム型ベントナイトであるクニゲル V1 とクニゲル GX を用いて作製した。まず、クニゲ ル V1 は透水試験容器内に締め固めたものと、圧縮成形したのちに最大粒径が 20 mm となるよう に粉砕して作製したペレットの 2 形態とした。また、粒状ベントナイトであるクニゲル GX も試 験容器内に充填し供試体とした。さらに、ペレットとクニゲル GX を重量比で 7:3 程度となるよ うに充填した供試体を作製した。以上、計4 形態の材料を試験容器内に乾燥密度が 1.2 Mg/m³ と なるように充填した。各材料について 2 つずつ供試体を作製し、透水試験を実施した。試験用水 には幌延の模擬地下水の組成を模擬した模擬地下水を作製して用いた。模擬地下水の化学組成を 表 4.2-2 に示す。

| 材料之 | ケースタ | 高さ | 高さ 直径 乾燥密度 | | | | |
|--------------|-------|--------|------------|------------------------------------|--------------------|--|--|
| 147 447 | / //1 | h [mm] | d [mm] | $ ho_{\rm d}$ [Mg/m ³] | | | |
| ク - ゲ ル\/1 | V1-1 | 50 | 10 | 1.2 | 粉体のクニゲルV1に加水して突き | | |
| / _ / // / 1 | V1-2 | 50 | 10 | 1.2 | 固め充填 | | |
| ペレット | P-1 | | 50 | | 粉体のクニゲルV1を圧縮成形した | | |
| | | 100 | | 1.2 | のちに最大粒径が20 mmとなるよ | | |
| | P-2 | | | | うに粉砕して作製 | | |
| カーゲルCV | G-1 | 100 | 50 | 1.2 | ベントナイトの原鉱石を粗砕し、 | | |
|)_)//dA | G-2 | 100 | 50 | 1.2 | 粒径が10mm以上のものを除去 | | |
| | PGX-1 | 100 | 60 | 1.2 | ペレットとクニゲルGXを重量比7:3 | | |
| N P 7 F T GX | PGX-2 | 100 | 50 | 1.2 | 程度で混合 | | |

表 4.2-1 透水試験の供試体仕様



図 4.2-3 透水試験の試験状況

| | mol/dm ³ | Na [⁺] | K⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Li⁺ | CI | SO42- | TIC |
|--------------------------------------|---------------------|-----------------|----------|------------------|------------------|----------|----------|----------|----------|
| NaHCO ₃ | 4.83E-02 | 4.83E-02 | | | | | | | 4.83E-02 |
| Na ₂ SO ₄ | 1.53E-06 | 3.06E-06 | | | | | | 1.53E-06 | |
| KCI | 1.66E-03 | | 1.66E-03 | | | | 1.66E-03 | | |
| CaCl ₂ | 1.97E-03 | | | 1.97E-03 | | | 3.94E-03 | | |
| MgCl ₂ -6H ₂ 0 | 2.22E-03 | | | | 2.22E-03 | | 4.44E-03 | | |
| LiCI | 1.25E-03 | | | | | 1.25E-03 | 1.25E-03 | | |
| NaCI | 9.96E-02 | 9.96E-02 | | | | | 9.96E-02 | | |
| 合計 | mol | 1.48E-01 | 1.66E-03 | 1.97E-03 | 2.22E-03 | 1.25E-03 | 1.11E-01 | 1.53E-06 | 4.83E-02 |
| | 分子量 | 22.99 | 39.1 | 40.08 | 24.31 | 6.941 | 35.45 | 96.07 | 12.01 |
| 調整値 | mg/L | 3400 | 65 | 79 | 54 | 8.7 | 3931 | 0.147 | 580 |
| 想定值 | mg/L | 3400 | 65 | 79 | 54 | 8.7 | 4200 | 0.15 | 580 |

表 4.2-2 模擬地下水の化学組成

透水試験の経時変化を各材料1ケースずつ図4.2-4に示す。各試験とも試験終了時の透水係数が10⁻¹² m/sのオーダーであることが確認できる。すべてのケースにおける透水試験の結果を表4.2-3に示す。いずれのケースにおいても透水係数は10⁻¹² m/sのオーダーであった。また、図4.2-5に既往の幌延の地下水とNaCl溶液を用いて実施した透水試験の結果を示す(原子力機構,緩衝材基本特性データベース)。既往研究における試験用水のイオン強度0.21 mol/Lに比べ、本試験の模擬地下水のイオン強度は0.15 mol/Lと若干低いものの透水係数は同程度の値を示すことが確認できた。また、試験終了後に各供試体の飽和度を計測したところ97%~98%となりほぼ飽和が

完了していることを確認した。以上の結果より、形態が異なるナトリウム型ベントナイトの乾燥 密度を 1.2 Mg/m³とすることで、地下水のイオン強度の影響による透水性の上昇を考慮した場合 でも 10⁻¹¹ m/s よりも低い透水性を確保することが可能であることを確認した。





(c) GX-1



図 4.2-4 透水係数と経過時間の関係

| 林彩之 | ケーマタ | 試験後飽和度 | 透水係数 |
|----------------------|-----------------------|--------|------------------------|
| 1711-1-1 | 、 、 、 、 石 | Sr [%] | <i>k</i> 15 [m/s] |
| ク ⁻ ゲル\/1 | V1-1 | 98.37 | 1.62×10^{-12} |
| /_//// | V1-2 | 97.46 | 1.62×10^{-12} |
| o Low K | P-1 | 98.72 | 4.36×10 ⁻¹² |
| | P-2 | 98.48 | 4.21×10 ⁻¹² |
| ク゠ゲルGX | G-1 | 97.35 | 1.81×10 ⁻¹² |
| / _ / //dx | G-2 | 97.46 | 1.39×10 ⁻¹² |
| ペレット+GX | PGX-1 | 97.73 | 2.23×10 ⁻¹² |
| NE / PIUN | PGX-2 | 97.50 | 2.09×10 ⁻¹² |

表 4.2-3 透水試験の結果



図 4.2-5 有効粘土密度と透水係数の関係 幌延地下水と NaCl 溶液の結果は緩衝材基本特性データベースより抽出(抽出条件;材料:クニ ゲル V1、有効粘土密度:1~2 Mg/m³、試験用水イオン濃度:0.2~0.21 mol/L)

(2) EDZ シーリング試験における止水壁の材料選定

平成 30 年度には、狭隘空間へのベントナイト系材料の充填性と充填した材料の膨潤特性を把 握するための膨潤状況確認試験を実施した(原子力機構・原環センター,2019)。4 種類の形態 の材料における試験結果を表 4.2・4 に示す。クニゲル V1 においては供試体にはほとんど隙間が なく密に充填されており、水と接触した部分が即座に膨潤することにより透水性が低下してほと んど水は浸潤しなかった。一方、ペレット、クニゲル GX およびペレット+クニゲル GX におい ては目視で視認できる程度に空隙が存在しているものの、通水を開始すると供試体内の空隙を通 じて水が浸潤し、通水後数分で供試体上端部まで水が到達した。また、水と接触した部分が膨潤 し空隙が閉塞することを確認している。

以上、これまで実施してきた透水試験および膨潤状況確認試験の結果を踏まえて、「止水性」、 「施工性」および「コスト」の観点で4種類の形態の材料を比較した。

1) 止水性

既往検討よりベントナイト系材料の透水性は乾燥密度の大小によって説明できることが示され ており、今年度の検討結果も踏まえるとどの候補材料を使用しても、施工目標とした密度である 1.2 Mg/m³の乾燥密度を確保することによって目標とする原位置岩盤相当の低透水性が達成でき る見込みである。その中でもペレットは膨潤状況確認試験の結果より、空隙が多いことから供試 体全体に速やかに水が浸潤し満遍なく膨潤することが確認された。このことから、原位置での施 工後の早い段階から止水性が発揮されることが期待される。

2) 施工性

幅 10cm のスリットへの充填施工を考えた場合、クニゲル V1 の粉体を原位置に撒き出して施 工することは困難である。狭隘な隙間に充填していく過程で、孔壁の水滴や孔底のたまり水によ って粉体であるクニゲル V1 が即座に膨潤して泥濘状となりスリット内に落ち込んでいかない状 態が想定される。また、乾燥したパイプを通じてスリット内に撒き出す施工方法も考えられるが、 スリット内で所定密度に締固める管理がやはり困難である。

クニゲル GX については、粒度幅がクニゲル V1 に比べてはるかに広く、締め固まりやすい特性があること、および自然充填でほぼ想定する乾燥密度 1.2 Mg/m³を達成できることから有望である。

ペレットは、成型時の乾燥密度が 1.9Mg/m³ 以上と高いため、スリット内に多少の水が存在しても自然落下によって充填が可能と考えらえる。また、クニゲル GX と同様に自然充填でほぼ想定する乾燥密度 1.2 Mg/m³を達成できることからペレットも施工上有望である。

3) コスト

クニゲル V1、クニゲル GX、およびペレットのコストを比較すると、原鉱石の粗砕品である クニゲル GX が最も安価であり、続いてクニゲル V1、最も高価なものがクニゲル V1 の圧縮成 型品であるペレットである。

EDZ シーリング試験の目的は「EDZ におけるベントナイト系材料の地下水移行抑制機能の性能確認」であり、実施するにあたり表 4.2-5 に取りまとめた 3 つの評価項目について順序付けを行うことを考えた場合、第一は水みちもしくは漏洩経路を防ぐための「止水性」であり、第二にその止水性を実現する「施工性」、第三に「コスト」であると想定される。その観点から各材料の比較を行った場合、「止水性」および「施工性」についてともに有望であるペレットの選定が望ましいと考える。

| | 水と接触すると即座に膨潤し、止水性が低下するため水の浸潤が抑制されてい |
|-----------|--|
| クニゲル V1 | る。通水開始 30 分後では底部から数 mm 程度、1 日経過後においても底部か |
| | ら1cm以下までしか水の浸潤は認められない。 |
| | 空隙が明確に視認できる程度に存在しており、通水開始後2分程度で上端部ま |
| ペレット | で水が達した。開始 30 分後にはペレットが膨潤することで空隙が埋まり、通 |
| | 水開始1時間後には通水量はほぼ0となった。 |
| | クニゲル GX は粒度 0.1 mm 以下から 10 mm 以上まで分布しており、その粒 |
| カーゲルCV | 度分布に応じた空隙分布の粗密を視認できる。空隙部分を選択的に水が通過 |
| 7 -7 / GA | し、通水開始後5分以内に上端部まで達している。ペレットのみの場合に比べ |
| | て GX の細粒分の存在によって通水に時間がかかる結果となった。 |
| ペレット+GX | クニゲルGXの粒度に応じた空隙分布の粗密があり、通水した際にも空隙部分 |
| | を選択的に水が通過している。ただし、ペレットと同様に通水開始 30 分後に |
| | は膨潤して空隙が埋まり、通水量はほぼ0となっていた。 |

表 4.2-4 膨潤状況確認試験の結果まとめ (原子力機構・原環センター, 2019)の内容を基に作成

| | クニゲルV1 | クニゲルGX | ペレット |
|-----|------------------|------------------|------|
| 止水性 | 0 | 0 | 0 |
| 施工性 | × | \bigtriangleup | 0 |
| コスト | \bigtriangleup | 0 | × |

表 4.2-5 「止水性」「施工性」「コスト」に関する各材料の比較表

4.2.3 EDZ シーリング試験の施工

(1) EDZ シーリング試験前の準備エ

平成 30 年度に実施した EDZ の状況を確認するための調査において、試験坑道 3 の底盤コンク リートの下には、坑道を掘削した時に発生したズリが 10 cm 程度の厚さで敷均されていることが 確認された。ズリは粒径が大きく、その間隙も大きいことから透水試験では EDZ の透水係数より 1 オーダー程度大きい値を示した。また、止水壁として施工したベントナイトがズリの間隙を通 じて流出することも考えられた。そこで、EDZ シーリング試験の試験領域よりも広い領域に対し て底盤コンクリートとズリ層を撤去し、撤去した空間に再度コンクリートの打設を行った。

ズリ層を撤去する領域は EDZ-1 孔を中心とした外径 1.2m (内径約 1.0m)を対象とした。ズリ 層の撤去手順を図 4.2-6 に示す。まず、EDZ-1 孔を中心とした直径 1.1mの円周上を直径 10 cm のコアドリルで削孔して底盤コンクリートを縁切りした。残存した円柱状のコンクリートは EDZ-1 孔の孔口に設置していた鋼管ケーシングごと撤去した。底盤コンクリートと岩盤部分の間に存 在していたズリは人力にて撤去した。ズリ撤去後には、EDZ-1 孔の保護を目的として鋼管ケーシ ングを設置した。ズリ撤去および鋼管設置後に、底盤コンクリートの再打設を実施した。各作業 の内容を以下に示す。

1) 底盤コンクリートの撤去

作業状況を図 4.2-7 に示す。まず、コアドリル削孔位置の位置出し(円形状)を行った。EDZ-1 孔を中心とした直径 1.1 m の円周上を直径 10 cm の円を 2.3 cm ずつラップさせて削孔位置に 印を付けた。印に合わせてコアドリルを設置し削孔を行った。底盤コンクリートの厚さは平成 30 年度に実施した BTV 観察の結果より 40 cm 程度と想定しており、実際の削孔の深さは現場の状 況に合わせて 35 cm~45 cm 程度であった。また、縁切りを完了するのに計 45 孔を削孔した。そ の後、残存した底盤コンクリートは小割りして撤去をした。

ズリ層の撤去

底盤コンクリートの撤去後には岩盤の上に堆積していたズリを人力にて撤去した。ズリ層の撤 去後の状況を図 4.2-8 に示す。撤去後にズリ層の厚さを測ったところ約 10 cm 程度であり、底盤 コンクリートの上面から岩盤上面までの厚さは岩盤部分の不陸があるためややばらつきがあるも のの 40 cm から 50 cm 程度であり、平成 30 年度の BTV 観察と整合的であった。

3) EDZ-1 孔の保護

ズリ層の撤去後に、EDZ-1 孔の保護を目的として 90A の鋼管(内径 90mm、外径 102mm)を 設置した。鋼管の設置に当たっては、孔周辺の EDZ 部分を数 mm~数 cm 程度均して管を据え付 け、管と岩盤部分の隙間は止水用急結セメントを用いて止水し、コンクリート再打設時に EDZ-1 孔へのコンクリートが流入することを防止する処置を施した。

4) 底盤コンクリートの再打設

再打設したコンクリートの配合を表 4.2-6 に示す。コンクリートの配合については、再打設した底盤コンクリートのひび割れ防止を目的として膨張剤を添加するとともに、EDZ内の亀裂へのセメントの漏出が最小限となるように、水セメント比は水密性を考慮する場合の55%よりも十分に低い 46.9%とした。このコンクリート配合に基づいてコンクリートを 1 バッチ 50L ずつ混練し、12 回に分割して打設した。コンクリートの再打設の作業状況を図 4.2-9 に、打設したコンクリートの実績を表 4.2-7 に示す。







(a) 準備工実施前の全景

(b) 削孔の位置出し



(c) 削孔位置の印(d) コアドリルによる縁切り図 4.2-7 底盤コンクリートの撤去作業状況







(b) コンクリート撤去部分検尺





(c) 底盤コンクリート下断面(1)
 (d) 底盤コンクリート下断面(2)
 図 4.2-8 ズリ撤去作業の状況

| 衣 4.2-0 コンクリート配合 | 表 4.2-6 | コンクリート配合 |
|------------------|---------|----------|
|------------------|---------|----------|

| | 水セメント比 | 細骨材率 | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | | |
|----------------|------------------|------------------|--------------------------|------|-------------|-----|----------|-----------|------|--|
| 配合 | W/C (W/(C+F)) | S/a ((S+F)/a) | 水 | セメント | フライ アッシュ | 細骨材 | 粗骨材 | 高性能 AE | 膨張剤 | |
| | % | % | W | С | F | S | G (5-20) | 减水剤 | | |
| А | | | | | | | | | | |
| $\sigma_{ck}=$ | 40.0 | 477 1 | 105 | 320 | 00 | 000 | 000 | 2.08 | 0.00 | |
| 24MPa | 46.9 | 47.1 | 165 | (普通) | 32 | 803 | 998 | (C*0.65%) | 0.02 | |
| (普通) | | | | | | | | | | |





(a) 打設前の状況

(b) セメントの混錬





(c) セメントの投入
 (d) コンクリートの打設完了
 図 4.2-9 コンクリートの再打設作業の状況

| バッチNo. | 時間 | S(砂) | G(砂利) | F(フ ライアッシュ) | C(セメント) | 膨張剤 | AE減衰剤 | 水 | 備考 |
|--------|---------|-------|-------|---------------------|---------|------|-------|------|----|
| 1 | 10:10 | 40.20 | 49.90 | 1.60 | 16.08 | 1.00 | 0.10 | 8.25 | |
| 2 | 10:35 | 40.20 | 49.90 | 1.60 | 16.10 | 1.02 | 0.10 | 8.25 | |
| 3 | 10:46 | 40.20 | 50.00 | 1.61 | 16.11 | 1.02 | 0.10 | 8.30 | |
| 4 | 10:58 | 40.15 | 50.00 | 1.61 | 16.10 | 1.00 | 0.10 | 8.20 | |
| 5 | 11:15 | 40.20 | 49.90 | 1.60 | 16.09 | 1.00 | 0.10 | 8.20 | |
| 6 | 11:25 | 40.20 | 49.90 | 1.60 | 16.08 | 1.00 | 0.10 | 8.30 | |
| 7 | 11:35 | 40.20 | 49.80 | 1.61 | 16.08 | 1.01 | 0.10 | 8.25 | |
| 8 | 11:45 | 40.20 | 49.90 | 1.60 | 16.09 | 1.03 | 0.10 | 8.25 | |
| 9 | 11:51 | 40.20 | 49.80 | 1.60 | 16.08 | 1.03 | 0.10 | 8.30 | |
| 10 | 11:59 | 40.20 | 49.90 | 1.61 | 16.10 | 1.03 | 0.10 | 8.30 | |
| 11 | 12:06 | 40.15 | 49.91 | 1.60 | 16.09 | 1.02 | 0.10 | 8.25 | |
| 12 | 12:11 | 40.20 | 49.90 | 1.60 | 16.08 | 1.00 | 0.10 | 8.25 | |
| 計 | 2:01:00 | 482.3 | 598.8 | 19.2 | 193.1 | 12.2 | 1.2 | 99.1 | |

| 表 | 4.2-7 | 底盤コンク | リー | トの再打設の実績 |
|---|-------|-------|----|----------|
| | | | - | |

(2) 粘土止水壁の施工

粘土止水壁は、EDZ-1 孔を中心に周囲の岩盤に溝(スリット)加工を施し、ベントナイト系材料を充填することで施工した。スリットは、試験孔中心から 40 cm~50 cm 離れた位置(スリットセンター位置が EDZ-1 孔から 45 cm の位置)に掘削し、試験区間の形状は円形とした。平成 30 年度に実施した BTV 観察とコア観察の結果を再検討し EDZ-1 孔周辺の EDZ の深さを 1.3 m~1.6 m と評価して、スリットの深さは 2.0 m とした。また、スリットの幅は 10 cm とした。止水壁の施工概念図を図 4.2-10 に示す。なお、スリットの掘削方法はラインドリリング方式を採用し

た。

粘土止水壁の透水性は、施工時における粘土止水壁の密度のばらつきを考慮して 10⁻¹¹ m/s オー ダーの透水係数を施工目標とする。4.2.2 で検討した通り、充填材料にはクニゲル V1 のペレット 用いることとし、透水係数 10⁻¹¹ m/s オーダーを達成可能な乾燥密度 1.2 Mg/m³以上で充填した。 粘土止水壁の施工の際には、投入したベントナイト量を管理し、上記の乾燥密度を達成している ことを確認した。

ベントナイト系材料を充填後、底盤コンクリート上面方向にベントナイトが膨潤することによ り、粘土止水壁自体の密度が低下することのないように蓋を設置した。粘土止水壁は自然湧水お よび注水孔からの注水により、膨潤させることを基本とした。注水の際には、EDZ-1孔の近傍の ピットに蓄積している原位置地下水を使用した。



図 4.2-10 粘土止水壁施工の概念図

1) スリット掘削

作業状況を図 4.2-11 に示す。まず、コアドリル削孔位置の位置出し(円形状)を行った。EDZ-1 孔を中心とした直径 45 cm の円周上を直径 10 cm の円を 2.2 cm ずつラップさせて 33 か所の削 孔位置に印を付けた。印に合わせてコアドリルを設置し、2.0 m の深さで削孔を行った。スリット の掘削完了後に削孔深度の検尺を行った。検尺の結果を図 4.2-12 に示す。予定していた掘削長 2.0m に対し、すべての孔において掘削長は 2.0m から 2.035m の範囲に入っていることを確認し た。



(a) スリット掘削前の全景



(b) コアドリルによる削孔



(c) 削孔深度の検尺状況(1)
 (d) 削孔深度の検尺状況(2)
 図 4.2-11 スリット掘削の作業状況

| 位置 | 測定項目 | 設 計 | 実 測 | 差 | 測定結果 |
|------------------|------|-------|---------|----------|--------------|
| 1 | 孔長 | 2.000 | 2.025 | 0.025 | 0 |
| 2 | | 2.000 | 2.010 | 0.010 | 0 |
| 3 | | 2.000 | 2.030 | 0.030 | 0 |
| 4 | | 2.000 | 2.015 | 0.015 | 0 |
| 5 | | 2.000 | 2.015 | 0.015 | 0 |
| 6 | | 2.000 | 2.005 | 0.005 | 0 |
| 7 | | 2.000 | 2.000 | 0.000 | 0 |
| | | 2.000 | 2.000 | 0.000 | 0 |
| 9 | | 2.000 | 2.010 | 0.010 | <u> </u> |
| 10 | | 2.000 | 2.020 | 0.020 | 0 |
| 11 | | 2.000 | 2.015 | 0.015 | <u> </u> |
| 12 | | 2.000 | 2.020 | 0.020 | 0 |
| 13 | | 2.000 | 2.010 | 0.010 | <u> </u> |
| | | 2.000 | 2.020 | 0.020 | <u> </u> |
| 15 | | 2.000 | 2.010 | 0.010 | <u> </u> |
| | | 2.000 | 2.010 | 0.010 | <u> </u> |
| 17 | | 2.000 | 2.000 | 0.000 | 0 |
| | | 2.000 | 2.000 | 0.000 | Q |
| 19 | | 2.000 | 2.005 | 0.005 | 0 |
| | | 2.000 | 2.035 | 0.035 | <u>Q</u> |
| | | 2.000 | 2.035 | 0.035 | Q |
| 22 | | 2.000 | 2.010 | 0.010 | 0 |
| | | 2.000 | 2.005 | 0.005 | <u>Q</u> |
| 24 | | 2.000 | 2.020 | 0.020 | 0 |
| | | 2.000 | 2.010 | 0.010 | Q |
| | | 2.000 | 2.030 | 0.030 | <u>Q</u> |
| 21 | | 2.000 | 2.030 | 0.030 | |
| | | 2.000 | 2.010 | 0.010 | <u>Q</u> |
| 29 | | 2.000 | 2.005 | 0.005 | |
| 30 | | 2.000 | 2.000 | 0.000 | × |
| 20 | | 2.000 | 2.005 | 0.005 | |
| | | 2.000 | 2.005 | 0.005 | |
| 坑 道 妻 側 | | | 5 10 15 | 20 25 30 | 33 model = H |

図 4.2-12 スリットの削孔深度検尺結果

2) ペレット充填

作業状況を図 4.2-13 に示す。まず、ペレット充填に先立ち、削孔径・削孔深度・削孔本数から スリット体積を計算し、1.2 Mg/m³の乾燥密度を達成するために必要なペレットの投入重量を算 出した。ペレットの含水比は 9.89%であり、必要な投入重量は約 727 kg となった。スリットの寸 法を表 4.2-8 に示す。

充填作業中は、常に排水ポンプを用いて可能な限りスリットから地下水を排水した。岩盤から 地下水が染み出して充填中のペレットの層の上に地下水が溜まる状況も見られたが、その量は少 量であり充填作業が継続可能な程度であった。ペレットは複数の層に分けて投入し、1 層分のペ レットを投入するごとに締固めを行い、厚さが 20 cm となるように充填した。ペレットは1袋当 たり 20 kg に計量して小分けしており、20 cm の厚さには4袋(80 kg)が相当する。スリットの 最深部については、ポンプを用いて排水しているものの地下水が残存していることから充填に時 間がかかると膨潤が進んでしまことが懸念されたため、1 層目のみ 40 cm を目標にペレットを投 入した。1 層充填するごとに高さを計測し、底盤までペレットが達するまで作業を繰り返した。ペレットの充填実績を表 4.2-9 に示す。スリットへのペレットの投入重量は 735.24 kg となり、1.2 Mg/m³の乾燥密度に必要な重量の 727 kg を上回った。各層での充填実績をみると、1 層目から 3 層目にかけては目標である乾燥密度 1.2 Mg/m³を 3~4%程度下回っているものの、全体としては目標を若干上回る 1.21 Mg/m³となり目標通り施工できていることを確認した。

充填したベントナイトペレットのはらみだしを防止するため、鋼製抑え蓋(SS400 製)を設置 した。鋼製抑え蓋とペレット・底盤面の間には密着用のゴムシートをパッキン材として敷設した。 また、鋼製抑え蓋はアングル材(SS400 製)4本を使用して底盤面と固定した。

| 項目 | 数值 | 備考 |
|---------------------------|---------|---------|
| スリット面積 [cm ²] | 2,739 | 図面より計算 |
| 平均スリット深さ [cm] | 201.4 | 検尺結果を反映 |
| スリット体積 [cm³] | 551,635 | |

表 4.2-8 スリットの寸法

| 層 | 投入袋 | 1層あたりの 高さ | 充填高さ | 1層あたりの <u>体積</u> | 充填体積 | 1層あたりの 重量 | 投入重量 累計 | 1層あたりの 乾燥密度 |
|--------------|----------------|--------------|--------|---------------------|------------------|--------------|------------|----------------|
| | | cm | cm | cm ³ | cm ³ | kg | kg | Mg/m^3 |
| 1層目 | 8袋投入時 | 46.40 | 46.40 | 127,090 | 127,090 | 163.92 | 163.92 | 1.17 |
| 2 層 目 | 12袋投入時 | 23.00 | 69.40 | 62,997 | 190,087 | 79.76 | 243.68 | 1.15 |
| 3層目 | 16袋投入時 | 23.00 | 92.40 | 62,997 | 253,084 | 80.56 | 324.24 | 1.16 |
| 4層目 | 20 袋投入時 | 21.00 | 113.40 | 57,519 | 310,603 | 81.06 | 405.30 | 1.28 |
| 5層目 | 24袋投入時 | 21.50 | 134.90 | 58,889 | 369,491 | 80.88 | 486.18 | 1.25 |
| 6層目 | 28袋投入時 | 21.00 | 155.90 | 57,519 | 427,010 | 80.22 | 566.40 | 1.27 |
| 7層目 | 32袋投入時 | 21.75 | 177.65 | 59,573 | 486,583 | 81.04 | 647.44 | 1.24 |
| 8層目 | 37袋投入時 | 23.75 | 201.40 | 65,051 | 551, 6 35 | 87.80 | 735.24 | 1.23 |

表 4.2-9 ペレットの充填実績



(a) ペレットの投入



(b) 充填中のスリット内の状況



(c) 人力による突き固め



(d)7層目投入後のペレット状況



(e) 底盤面まで充填完了 図 4 2 1



填完了 (f) 鋼製の抑え蓋の設置 図 4.2-13 止水壁施工の作業状況

4.2.4 透水試験

粘土止水壁によって区切られた領域を対象に EDZ-1 孔を用いた透水試験を実施することによ り、施工した粘土止水壁の透水性能を評価した。透水試験の概念図を図 4.2-14 に示す。透水試験 はスリットの掘削前(止水壁施工前)および止水壁施工後の計2回実施する。試験時期について は、1回目を4.2.3(1)に記載したコンクリートの再打設が完了した後、2回目を粘土止水壁が十分 に飽和したと考えられる止水壁の施工後2か月程度が経過した後とした。



図 4.2-14 透水試験の概念図

(1) 止水壁施工前の透水試験

1) BTV 観察

透水試験の実施の前に、コンクリート再打設後のEDZ-1孔の亀裂の状況を把握するためのBTV 観察を実施した。

EDZ-1 孔の孔壁展開画像を図 4.2-15 に示す。岩盤部において画像上でへアークラックと判定 した面を孔壁展開画像上に青線(サインカーブ)で示した。2 mabh より浅い部分のへアークラック について孔内水の遊離物等がクラックに付着することによって昨年度の BTV 観察結果よりもへ アークラックがやや明瞭に観察され 1.4 mabh までの領域において EDZ の亀裂が確認できた。ま た、EDZ-1 孔には、岩盤部に開口性の亀裂や孔壁の剥落はみられなかった。以上の結果は、平成 30 年度の結果を再検討して評価した EDZ の深さを 1.3 m~1.6 m と整合的であった。



タイトル : 坑道シーリング技術の性能確認 EDZシーリング原位置試験 孔番 : EDZ-1 [トレースライン有]

孔方位: 0孔傾斜:-90

-15 5 0

 凡例
 明腔剥れ目
 鉱物脈

 開口剥れ目
 要理面

 ハアージャウ
 層理面

 城砕帯上盤
 境界面

 磁砕帯下盤
 倍率:1/5アスペクト:100%

図 4.2-15 EDZ-1 孔 孔壁展開画像

0.000m - 3.000m

2) 透水試験

透水試験の装置構成図を図 4.2-16 に示す。BTV 観察の結果をもとに透水試験の試験区間を設 定し、上部パッカーはケーシング内、下部パッカーは健岩部に設置した。上部パッカーの下端の 位置 0.31 mabh、下部パッカーの上端の位置を 1.70 mabh として、試験区間の長さを 1.39 m と した。透水試験の方法は定流量注水試験とし、試験を開始する前に予備注水を実施することによ り注水流量とそれに伴う区間圧の上昇値を確認して、試験時の注水流量を約 1.5 ml/min と設定 した。

透水試験の結果を図 4.2-17 に示す。止水壁施工前の定流量注水試験では、試験時の平均注水 流量が 1.46 L/min、初期水圧との差圧が 0.0551 m (水頭差約 5 m) であった。透水係数は、 Hvorslev 定常式を用いた定常解析と Cooper-Jacob 法 (Cooper H. H. *et al.*, 1946) による非定常 解析により算出した。非定常解析で使用した derivative plot と log(t)-s 曲線を図 4.2-18 に示す。 定常解析で 1.63×10⁶ m/s、非定常解析で 1.72×10⁶ m/s という結果になった。透水係数は 10⁶ m/s オーダーであり、H30 年度の透水試験結果 (10⁻⁵m/s オーダー) に比べて 1 オーダー程度低 い値となった。これは、今年度に底盤コンクリートの岩盤 (EDZ 含む)の間に存在していた坑道 掘削時のズリ残置物の撤去を行ったためと考えられる。掘削ズリは原位置岩盤をブレーカーで破 砕したものであり、粒形も大きく透水性も 10⁵m/s オーダーよりもさらに高いことから、ズリの 撤去によって透水性が改善したものと考えられる。また、本試験で得られた透水係数は試験坑道 3 の側壁近傍で得られた EDZ の透水係数 (青柳ほか, 2016, 2017) と同程度の値であり、底盤 下の EDZ の透水性を反映していると考えられる。





(2) 止水壁施工後の透水試験

透水試験の試験区間は止水壁施工前の透水試験と同じ上部パッカーの下端の位置 0.31 mabh、 下部パッカーの上端の位置を 1.70 mabh として、試験区間の長さを 1.39 m とした。透水試験の 装置構成図を図 4.2-19 に示す。試験を開始する前に予備注水では、止水壁施工前の差圧約 0.05 MPa の時点で約 20 mL/min の注水流量となった。そのため、定流量注水試験を実施した場合に は注水流量の設定次第では差圧が大きくなりすぎてしまい意図的に止水壁を破壊してしまう可能 性があることから、注水圧を約 0.05 MPa とした定圧注水試験を実施した。

透水試験の結果を図 4.2-20 に示す。止水壁施工後の定圧注水試験では、圧力変化が定常状態 (差圧約 0.05 MPa)に達した後の平均注水流量が 0.00174 L/min であった。透水係数は、Hvorslev 定常式を用いた定常解析と Jacob-Lohman 法(Jacob, C.J. *et al.*, 1946) による非定常解析によ り算出した。非定常解析で使用した derivative plot と log(t/rw²)-sw/Q 曲線を図 4.2-21 に示す。 止水壁施工後の透水係数は定常解析で 2.70×10⁻⁹ m/s、非定常解析で 1.47×10⁻⁹ m/s という結果 になった。

定圧注水試験の注水流量および圧力の経時変化をみると、定常状態に至るまでの間に流量の低 下および圧力上昇の傾向が変化する挙動が確認された。注水期間の流量と圧力の経時変化を図 4.2-22 に示す。これは EDZ-1 孔からある程度離れた距離にベントナイト止水壁があることで起きた現象だと考えられる。注水の影響範囲の広がりイメージを図 4.2-23 に示す。図の第 1 変化は、EDZ-1 孔から止水壁までの間にある EDZ 部の区間圧力を満たすまでを示し、第 2 変化は EDZ 部の区間圧力がある程度高まった段階による止水壁側への注水影響圏の広がりを示していると考えられる。止水壁は EDZ-1 孔の孔底側には施工されていないため深度方向への注水による影響を反映していると考えられ、本試験により得られた透水係数は試験領域の場の透水性を表していると考えられる。

この定圧注水試験で得られた透水係数は、止水壁施工前の透水係数 2×10⁻⁶ m/s と比較すると 3 オーダー低い値となっており、止水壁を施工したことで EDZ を分断し試験領域間内の透水性 が低下したものと考えられる。



(a) 透水試時の EDZ-1 孔状況(b) 定圧注水試験用配管図図 4.2-19 定圧注水試験の装置構成図







(b) log(t/r_w²)-s_w/Q 曲線





図 4.2-22 定圧注水試験時の流量と圧力の経時変化



図 4.2-23 注水の影響範囲の広がりイメージ図

4.2.5 浸透流解析による粘土止水壁の透水性評価

粘土止水壁の止水性評価を目的として粘土止水壁施工後に実施した透水試験を対象とした浸透 流解析を実施した。浸透流解析にあたっては、底盤コンクリート(再打設部を含む)、ボーリング 孔(EDZ-1 孔)、ズリ層、EDZ、粘土止水壁を含む領域を3次元でモデル化した。まず、ズリ層 および EDZ の透水係数について、平成30年度に実施した EDZ-1 孔の透水試験(以下、透水試 験1)および粘土止水壁施工前の定流量注水試験(以下、透水試験2)の結果を再現できる値を浸 透流解析により推定した。その後、粘土止水壁施工後の定圧注水試験(以下、透水試験3)を対 象とした浸透流解析により粘土止水壁の透水係数を評価した。本解析で対象とした透水試験の一 覧を表 4.2-10に示す。透水係数は式(1)の理論式より算出した。

$$k = \frac{2.3 Q_0}{2\pi s_0 L} \log_{10} \frac{2L}{D}$$
(1)

ここで、k: 透水係数、 Q_0 : 流量、 S_0 : 差圧、L: 試験区間長、D: ボーリング孔径である。

| | コンクリート再打設 | 止水壁施工 | 定常時注水量 [L/min] | 定常時差圧 [m] | 透水係数 [m/s] |
|---------------------|-----------|-------|-------------------|--------------|----------------------|
| 透水試験1 (平成30年度実施) | なし | なし | 7.29 | 1.75 | 2.5×10 ⁻⁵ |
| 透水試験2 (止水壁施工前) | あり | なし | 1.46 | 5.51 | 1.8×10 ⁻⁶ |
| 透水試験3 (止水壁施工後) | あり | あり | 0.002 | 5 | 2.7×10 ⁻⁹ |

表 4.2-10 透水試験一覧

(1) ズリ層および EDZ の透水係数の推定

1) 解析条件の設定

粘土止水壁を含まないモデルにて定常解析を実施し、粘土止水壁施工前に実施した。表 4.2-10 に示す「透水試験1」、「透水試験2」を再現できるズリ層および EDZ の透水係数を推定した。透 水試験1の解析モデルを図 4.2-24(a)に、透水試験2の解析モデルを図 4.2-24(b)に示す。ボーリ ング孔径は掘削径より φ76 mm とした。試験区間は実際の透水試験区間長に合わせて、透水試験 1では1.9 m、透水試験2では1.39 m とした。透水係数の設定値を表 4.2-11 に示す。健岩部の 透水性は10⁻¹⁰ m/s オーダーとした。ボーリング孔は解析上高透水な地盤としてモデル化し、透水 係数を10¹ m/s オーダー程度とした。底盤コンクリートおよびコンクリート再打設部は、コンク リート標準示方書に記載の水セメント比・透水係数の関係より算出した(土木学会, 2002)。本 試験で再打設したコンクリートは底盤コンクリートと同配合で水セメント比が異なるだけである ので、底盤コンクリート・コンクロート再打設部ともに透水係数は3.3×10⁻¹¹ m/s とした。本定常 解析の解析条件を表 4.2-12 に示す。



図 4.2-24 浸透流解析モデル

| 材料 | 透水係数 [m/s] |
|------------|-------------------------|
| 底盤コンクリート | 2 2 × 10 ⁻¹¹ |
| コンクリート再打設部 | 5.5 ~ 10 |
| ズリ | 本検討で推定 |
| EDZ | 本検討で推定 |
| 健岩部 | 1.0×10^{-10} |
| ボーリング孔 | 1.0×10^{1} |

表 4.2-11 透水係数の設定値

表 4.2-12 透水試験1および透水試験2を対象とした浸透流解析の解析条件

| 項目 | | 内容 | 備考 | |
|------|----------------------------------|-----------------|-------------|--|
| | 側面 | 全水頭固定0m | 地下水位=領域上端 | |
| | ボーリング孔 (GL.1.10m) ボーリング孔端部 | 法景田定7 021 /min | 透水試験1の定常状態に | |
| 培田冬姓 | | 派重回足1.52L/IIII | おける流量 | |
| 境が木口 | | 法量固定1.461 /min | 透水試験2の定常状態に | |
| | | 派重回定1.40C/IIIII | おける流量 | |
| | | 不透水境界 | - | |

2) 透水係数の推定

- ズリ・EDZ の透水係数は以下の方法より推定した。
- 1. 最大圧と初期圧の差分である差圧を対象に、実測値を再現できるズリ・EDZの透水係数の組 み合わせを複数求める。透水試験1、透水試験2の両方を対象に実施する。浸透流解析にお いては初期圧および最大圧を以下として差圧を求める。
 - 初期圧:静水圧状態での圧力
 - 最大圧:定常状態での圧力

なお、実測値と解析結果のフィッティングの精度は0.01mとする。

- 2. 1 で求めたズリ・EDZ の透水係数より、ズリ・EDZ の透水係数の関係式を求める。
- 3. 2 で求めた関係式を解いて、透水試験1および透水試験2のどちらも再現できるズリ・EDZ の透水係数を求める。

透水係数の推定方法のイメージ図を図 4.2-25 に示す。また、ズリ・EDZ の透水係数の推定に あたり、各透水係数は以下の条件を満たすものとした。

| ・透水係数(ズリ) | は透水係数(EDZ)以上である。 |
|------------|---|
| ・透水係数(ズリ) | の最大値は 1.0 m/s(=砂相当)である。 |
| ・透水係数(EDZ) | の最小値は 1.0×10 ⁻¹⁰ m/s(=健岩部相当)である。 |





各透水試験の実測値と浸透流解析の結果が一致するズリ層および EDZ の透水係数の組合せを 図 4.2-26 に示す。図 4.2-26 におけるズリ層と EDZ の透水係数の関係式を式(2)、式(3)に示す。 透水試験 1

$$k_{\rm EDZ} = -0.132 \cdot k_{\not z \, ij} + 0.0000662 \tag{2}$$

透水試験 2

 $k_{\rm EDZ} = -0.000000425 \cdot k_{\chi^{(1)}} + 0.00000338 \tag{3}$

各透水試験におけるズリ層と EDZ の関係式 (式(2)、式(3)) を解いて推定したズリ層と EDZ の 透水係数を表 4.2-13 に示す。ズリ層の透水係数を 4.8×10⁻⁴ m/s、EDZ の透水係数を 3.4×10⁻⁶ m/s と設定して透水試験 1、透水試験 2 を対象に再度浸透流解析を実施したところ、表 4.2-13 に示す ようにて実測値と解析結果に若干のずれがあった。そこで、表 4.2-14 に示すように、ズリ層の透 水係数を 4.8×10⁻⁴ m/s、EDZ の透水係数を 2.98×10⁻⁶ m/s として浸透流解析を実施したところ実 測値と解析結果が一致した。



図 4.2-26 透水試験1および透水試験2を再現するズリ・EDZの透水係数の関係

| | 透水係数設定値 | | 差圧 | | 透水係数 | |
|-------|------------|----------------------|------|------|----------------------|----------------------|
| | [m/s] | | [m] | | [m/s] | |
| | ズリ | EDZ | 解析結果 | 実測値 | 解析結果 | 実測値 |
| 透水試験1 | 4.9 × 10-4 | 2.4×10^{-6} | 1.74 | 1.75 | 2.5×10^{-5} | 2.5×10^{-6} |
| 透水試験2 | 4.0 ^ 10 | 5.4 ^ 10 | 4.84 | 5.51 | 2.1×10^{-6} | 1.8×10^{-6} |

表 4.2-13 推定した透水係数を用いた浸透流解析結果

表 4.2-14 透水係数調整後の浸透流解析結果

| | 透水係数設定値 | | 差圧 | | 透水係数 | |
|-------|------------|-----------------------|------|------|----------------------|----------------------|
| | [m/s] | | [m] | | [m/s] | |
| | ズリ | EDZ | 解析結果 | 実測値 | 解析結果 | 実測値 |
| 透水試験1 | 4.8 × 10-4 | 2.09×10^{-6} | 1.74 | 1.75 | 2.5×10^{-5} | 2.5×10^{-6} |
| 透水試験2 | 4.8 × 10 | 2.96 ~ 10 | 5.51 | 5.51 | 1.8×10^{-6} | 1.8×10^{-6} |

(2) 粘土止水壁の透水性の評価

1) 解析条件の設定

粘土止水壁を含むモデルにて定常解析を実施し、粘土止水壁施工前に実施した。表 4.2-10 に 示す「透水試験 3」の結果を再現できる粘土止水壁の透水係数を推定した。透水試験 3 の解析モ デルを図 4.2-27 に示す。ボーリング孔径は掘削径より φ76 mm とした。試験区間は実際の透水 試験区間長に合わせて 1.39 m とした。設定した透水係数を表 4.2-15 に示す。透水係数のうちズ リ層および EDZ は 4.2.5(1)で求めた値を設定した。粘土止水壁は EDZ シーリング原位置試験の ベントナイトに求める透水係数の値より 10⁻¹¹ m/s オーダーとした。本定常解析の解析条件を表 4.2-16 に示す。



図 4.2-27 透水試験3の浸透流解析モデル

| 材料 | 透水係数 [m/s] |
|------------|-------------------------|
| 底盤コンクリート | 2 2 × 10 ⁻¹¹ |
| コンクリート再打設部 | 5.5 ^ 10 |
| ズリ | 4.8×10 ⁻⁴ |
| EDZ | 2.98×10 ⁻⁶ |
| 健岩部 | 1.0×10^{-10} |
| 粘土止水壁 | 1.0×10 ⁻¹¹ |
| ボーリング孔 | 1.0×10^{1} |

表 4.2-15 透水係数の設定値

表 4.2-16 透水試験3を対象とした浸透流解析の解析条件

| 項目 | | 内容 | 備考 | |
|------|------------|------------------|-------------|--|
| 境界条件 | 側面 | 全水頭固定0m | 地下水位=領域上端 | |
| | ボーリング孔 | 法量固定0.0021 /min | 透水試験3の定常状態に | |
| | (GL.1.10m) | 加重回足0.002L/IIIII | おける流量 | |
| | ボーリング孔端部 | 不透水境界 | - | |

透水試験3を対象とした浸透流解析の結果を表4.2·17に示す。透水試験3の実測値と比較すると、解析で得られた透水係数が1.7×10^{·10} m/sと実測値2.7×10^{·9} m/sより1オーダー程度の低い値となった。このように、粘土止水壁の透水係数を1.0×10^{·11} m/sと設定した解析では透水試験3の実測値を再現できなかった。そこで、粘土止水壁を1.0×10⁹ m/s、1.0×10^{·10} m/s、1.0×10^{·11} m/s、1.0×10^{·12} m/sの4パターンで再び定常解析を実施し、透水試験3の結果を再現できる健岩部の透水係数を推定した。この時、健岩部と粘土止水壁以外の透水係数は表4.2·15と同じの値を設定した。健岩部の透水係数の推定の際に設定した透水係数の値を表4.2·18に示す。

粘土止水壁の透水係数を 1.0×10⁻⁹ m/s とした場合、粘土止水壁の透水係数が大きすぎるため健 岩部の透水係数を 1.0×10⁻¹² m/s 程度まで低くしても、透水試験 3 の差圧を再現することは出来 なかった。粘土止水壁の透水係数を 1.0×10⁻¹⁰ m/s、1.0×10⁻¹¹ m/s、1.0×10⁻¹² m/s とした場合は、 健岩部の透水係数がそれぞれ 5.4×10⁻⁹ m/s、1.01×10⁻⁸ m/s、1.1×10⁻⁸ m/s の時に透水試験 3 の差 圧を再現することができた。健岩部の透水係数は 10⁻⁸~10⁻⁹ m/s のオーダーとなり、既往の調査 実績と比較するとやや高い値となっているが、おおむね妥当な値であると考えられる。これら 3 ケースの透水係数を用いた透水試験1および透水試験2の再現解析においても各透水試験の差圧 を再現できることを確認した。浸透流解析の結果を表 4.2-19 に示す。

| ~ | | | | | 1.01.00.01.01.0 | |
|---|---------|-----|------|-----|-----------------|-----|
| | 透水係数設定値 | | 差圧 | | 透水係数 | |
| | [m/s] | | [n | n] | [m/ | s] |
| | 粘土止水辟 | 健岩部 | 解析結果 | 宝测值 | 解析結果 | 宇測値 |

表 4.2-17 透水試験3を対象とした浸透流解析の解析結果

表 4.2-18 健岩部の透水係数の推定のための浸透流解析における透水係数の設定値

82.6

5

 1.7×10^{-10}

 2.7×10^{-10}

| 材料 | 透水係数 [m/s] |
|------------|-----------------------|
| 底盤コンクリート | 3.3×10 ⁻¹¹ |
| コンクリート冉打設部 | |
| ズリ | 4.8×10^{-4} |
| EDZ | 2.98×10^{-6} |
| 健岩部 | 推定 |
| | 1.0×10^{-9} |
| 兆 누 나 카 辟 | 1.0×10^{-10} |
| 和工工小型 | 1.0×10 ⁻¹¹ |
| | 1.0×10 ⁻¹² |
| ボーリング孔 | 1.0×10^{1} |

| | 透水係数設定値 [m/s] | | 差圧 [m] | | 透水係数 [m/s] | |
|-------|-----------------------|-------------------------|-----------|------|----------------------|----------------------|
| | 粘土止水壁 | 健岩部 | 解析結果 | 実測値 | 解析結果 | 実測値 |
| | 1.0×10^{-10} | 5.4×10 ⁻⁹ | 1.75 | 1.75 | 2.5×10^{-5} | 2.5×10 ⁻⁵ |
| 透水試験1 | 1.0×10 ⁻¹¹ | 1.01 × 10 ⁻⁸ | 1.75 | 1.75 | 2.5×10^{-5} | |
| | 1.0×10 ⁻¹² | 1.1×10 ⁻⁸ | 1.75 | 1.75 | 2.5×10^{-5} | |
| | 1.0×10^{-10} | 5.4 × 10 ⁻⁹ | 5.5 | 5.51 | 1.8×10^{-6} | |
| 透水試験2 | 1.0×10 ⁻¹¹ | 1.01×10^{-8} | 5.5 | 5.51 | 1.8×10^{-6} | 1.8×10^{-6} |
| | 1.0×10 ⁻¹² | 1.1×10 ⁻⁸ | 5.5 | 5.51 | 1.8×10^{-6} | |
| | 1.0×10^{-10} | 5.4 × 10 ⁻⁹ | 5 | 5 | 2.7×10^{-9} | 2.7×10 ⁻⁹ |
| 透水試験3 | 1.0×10 ⁻¹¹ | 1.01×10 ⁻⁸ | 5.02 | 5 | 2.7×10^{-9} | |
| | 1.0×10 ⁻¹² | 1.1×10 ⁻⁸ | 4.99 | 5 | 2.8×10^{-9} | |
| | 1.0×10^{-9} | 1.0×10 ⁻¹² | 1.44 | 5 | 9.5×10^{-9} | |

表 4.2-19 健岩部の推定透水係数を用いた浸透流解析の結果

4.2.6 まとめ

透水試験3

 1.0×10^{-11}

 1.0×10^{-10}

EDZ シーリング試験においては、幌延の地下環境条件におけるベントナイト系材料の持つ地下 水移行経路の遮断機能を明確化するための原位置試験を実施した。本年度においては、室内試験 の結果より低透水性の確保できるベントナイト系材料を選定した。また、幌延の地下施設深度 350mの試験坑道 3 において平成 30 年度の事前調査の結果を基にベントナイト系材料の止水壁 を施工した試験領域を設定し、透水試験および浸透流解析を実施して試験領域の透水性を評価した。

(1) ベントナイト系材料の選定

ベントナイト系材料は、平成 30 年度に室内試験を実施したクニゲル V1 とクニゲル GX の 4 つ の異なる形態を候補材料とした。室内透水試験の結果、いずれの材料によっても 1.2 Mg/m³の乾 燥密度を確保することによって目標とする原位置岩盤相当の低透水性が達成できる見込みである ことを確認した。また、昨年度実施した膨潤状況確認試験の結果より、クニゲル V1 のペレット については、空隙が多いことから供試体全体に速やかに水が浸潤し満遍なく膨潤することが確認 された。このことから、原位置での施工後の早い段階から止水性が発揮されることが期待される。 また、狭隘かつ湿潤な環境である原位置のスリットへ充填することを考慮し、成型時の乾燥密度 が 1.9 Mg/m³ 以上と高いペレットは、スリット内に多少の水が存在しても自然落下によって充填 が可能と考えらえる。以上、「止水性」と「施工性」の観点からクニゲル V1 のペレットを粘土止 水壁の材料とした。

(2) 原位置における EDZ シーリング試験

粘土止水壁施工前の試験領域を対象とした透水試験では、透水係数は約2×10⁻⁶ m/s であり、平 成30年度にズリ部分も含んで実施した際の透水係数約3×10⁻⁵ m/s に比べて約1オーダー低い透 水係数が得られた。掘削ズリは礫大からこぶし大の岩石が残置された部分であり、透水性も高い ため、同ズリ層を取り除いたことによって透水性が低下したことは妥当であるといえる。その後、 幅10 cm、深さ2mのスリットに対してクニゲルV1のペレットを全9層に分割した充填施工を 行った。施工時にペレットの投入重量と各層の厚さを管理することにより、目標密度である1.2 Mg/m³を達成することができた。粘土止水壁の施工から2か月間の自然状態での養生したのちに 再び透水試験を実施した。粘土止水壁施工後の試験領域の透水係数は約3×10⁻⁹ m/s となり、EDZ を遮断したことによって透水係数が10⁻³ m/s 程度低下することを確認した。

粘土止水壁施工後の透水試験を対象とした浸透流解析により、試験領域の透水係数約 3×10⁻⁹ m/s を最もよく再現できるパラメータとして、粘土止水壁の透水係数が 1.0×10⁻¹⁰ m/s、健岩部の 透水係数が 5.4×10⁻⁹ m/s と推定された。

以上の結果より、幌延の地下環境条件下においてベントナイト系材料の止水壁を施工すること で EDZ の透水性が低下することを確認した。今後、実際の止水プラグの設計・施工においては有 用かつ重要な情報となることが期待される一方で、下記の点が課題となる。

・ 止水プラグの施工方法

止水プラグは坑道周辺の EDZ の領域を分断するように岩盤に切り欠きを設ける際に、新た な EDZ が形成されないような施工方法を選択することが必要となる。

・ ベントナイト系材料の充填方法

坑道の側壁部や天端部においては、ベントナイト系材料を切り欠きに充填する際に、岩盤と の境界面に隙間が生じるなどの施工不良が発生することが懸念される。吹付け施工や転圧締固 め、ブロックの積み重ねなど施工場所に適した施工方法を検討することが必要となる。また、 併せて施工方法に適したベントナイト系材料の材料仕様(ベントナイトの配合割合や乾燥密度 等)についても検討が必要になると考えられる。

止水プラグの透水性と領域の透水性の関係

構築した止水プラグおよび岩盤、EDZ などの個々の要素の透水係数とそれらを組み合わせた

領域全体の透水係数の関係については、その詳細が把握されていない。個々の要素の透水係数 の幅を把握するとともにそれらを組み合わせた際の透水性を評価する手法が必要と考える。ま た、施工時の品質管理として実際に施工したプラグの透水係数の計測方法の開発も必要と考え る。

4.3 掘削影響領域の連続性等に関する調査(弾性波・比抵抗トモグラフィ調査)

平成 31 年度は、幌延深地層研究施設の深度 350mの試験坑道 4 において、人工バリア性能確 認試験で EDZ を介した地下水移行を抑制するためのポストグラウトに着手することから、当該 試験坑道および力学プラグ周囲の EDZ の連続性や経時変化を把握し、グラウトの効果を評価す るため、弾性波および比抵抗によるトモグラフィ調査を実施した。調査の結果からシーリングシ ステム設計、評価技術開発における調査手法の適用性を確認した。

4.3.1 調査の概要

トモグラフィ調査は、調査対象の範囲内の物性値(速度、比抵抗等)の分布を断面として可視 化する物理探査手法である。試験坑道4の力学プラグ前方の坑道周りのグラウト注入範囲を対象 とし、試験坑道3の奥側に位置する既存のボーリング孔(S4・2)孔と、試験坑道3の入り口側に グラウト注入範囲を通る位置にあらたにボーリング孔(T・1)を削孔し、これら2孔のボーリング 孔間(クロスホール法)および試験坑道3と試験坑道4の坑道壁の間で弾性波および比抵抗トモ グラフィ調査を実施した。調査の時期は、グラウト注入による物性値の違いを計測するために、 グラウト注入前(7月)、グラウト注入中(9月)、グラウト注入後(12月)の3回とした。3回 の各調査の前にはボアホールテレビ(BTV)観察によりボーリングの孔内壁の割れ目やガスの発 生状況を確認した。あらたに削孔したT・1孔では孔曲がりを測定し、既存のS4・2孔と坑道壁面 に設けた測定点の測量座標とともに整理して解析データに使用した。また、バックグラウンドと なる地質環境とグラウト材などの物性値のコントラストを鮮明にし、トモグラフィ解析によるグ ラウト材などの分布をよりクリアに評価するため、境界条件となるボーリング孔内の諸物性値を 電気および速度検層で取得するとともに、岩盤の剛性変化に対して感度が高いS波トモグラフィ とボーリングコアおよびグラウト材の室内試験を追加して実施した。

トモグラフィ調査の実施期間を図 4.3-1 に示す。


図 4.3-1 調査の実施期間

4.3.2 調査用ボーリング孔の掘削

試験坑道 4 および力学プラグ周囲の EDZ の連続性や経時変化を把握し、グラウトの効果を評価するために実施するトモグラフィ調査を既存の S4-2 孔を用いたクロスホール法で実施するためにボーリング孔を削孔した。

新規に削孔したボーリング孔は、既存の S4・2 孔(水平角 27°下向き)と平行な角度に削孔する 場合はグラウト範囲から外れることから、試験坑道 4 の EDZ 範囲を通りグラウト範囲を通る角 度にするために、試験坑道 4 の躯体から 1m程度離れた水平角 20°下向き、削孔長を 22mとし、 ボーリング孔内へのグラウト材の侵入を考慮してグラウト孔から離れた位置に削孔した。

地下施設深度 350mの試験坑道 3 から試験坑道 4 の方向へ削孔したボーリング孔は T-1 孔(孔 径 86mm、水平角 20 度下向き、掘削長 22m、ノンコア)とした。孔口は、片側ねじ切りのケー シング 1.5m程度(岩盤内部 1.2m程度)を挿入後、セメントミルクで固定し処理した。ケーシ ング径は 4 インチとし、材質は、錆防止のためステンレス製とした。

新規に削孔したボーリング孔の位置を図 4.3-2 に、ボーリング状況を図 4.3-3 に、ボーリング に使用した主要資機材を表 4.3-1 に示す。



図 4.3-2 新規ボーリング孔位置図



図 4.3-3 ボーリング削孔状況

| 名 称 | 形式 | 仕 様 | 数量 |
|-------------------|------------------------|---|----|
| 試錐機 (ボーリングマシン) | THS-5 形 (東亜利根ホーリング) | 最大巻き上げ能力 1.8t H1390×L1770×W1125 1100kg | 1台 |
| 同原動機 | 防爆型 | 15kW モーター | 1台 |
| 試錐ポンプ | NAS-3 (東亜利根) | 最大吐出量 80L/min H680×L1650×W470、200kg | 1台 |
| Hall | AQ | | 1式 |
| | NQ | 試錐機 親ロッド | 1式 |
| 1.8] | NQ(75.3 mm) | ノンコア、ロ元パイロット孔用 | 1式 |
| | PQ(122.0 mm) | ノンコア、ロ元拡孔用 | 1式 |
| コアバーレル | 86mm | | 1式 |
| 水中ポンプ | | 2"100V | 1台 |
| ナ | デリバリーホース | 2"高圧ホース | 1本 |
| | サクションホース | 3"低圧ホース | 1本 |
| ベース鋼材 | | | 1式 |
| 止め具 | | | 1式 |

表 4.3-1 主要資機材一覧表

4.3.3 ポストグラウト

グラウト注入は、1回目の調査(7月)時には東周回坑道側(B-B 断面図)の12 孔と試験坑道 3側(C-C 断面)の上向きの13 孔のグラウトが終了し、2回目の調査時には試験坑道3側(C-C 断面)の25 孔(緑色)が終了し、残りは4 孔(白色)であった。グラウト注入区間を図 4.3-4 に 示す。また、グラウトの注入区間と注入量のデータを入力し3次元可視化ソフトで表示して図 4.3-5 に示す。







図 4.3-5 グラウト区間と注入量のイメージ

4.3.4 孔曲がり測定と座標変換

(1) T-1 孔の孔曲がり測定

調査に先立ち南方向へ水平角 20°下向き孔として新規に掘削したボーリング T-1 孔の孔曲がり 測定を行った。孔曲がり測定の結果、T-1 孔はほぼ孔口からほぼ南方向へ延長しているが、孔底 までの変位量府は西方向へ約 5cm である。また、傾斜角度は孔口付近で 20°、徐々に緩くなり孔 底では 18°である。方位・傾斜のプロットでは、深度 1.2m 付近にデータの飛びが見られケーシン グの端でボーリング孔の径が変化する影響と考えられる。孔軌跡(水平投影、断面投影)および 計測長に伴う孔方位・孔傾斜の変化を図 4.3-6 に示す。なお、孔方位は真北から時計回りの角度、 孔傾斜は水平をゼロとし、下向きをマイナスとした角度である。



(2) 座標の変換

T-1 孔の孔曲がり測定結果を 0.5m 間隔で既存の S4-2 孔の孔口を原点とする座標に変換し、坑 道壁の測定点の測量座標と合わせて整理した。変換した S4-2 孔と **T-1** 孔および坑道壁の測点座 標をグラフにして図 4.3-7 に示す。



図 4.3-7 測点座標の変換グラフ

クロスホール手法のトモグラフィ(断面)は、2本のボーリング孔が平行なことが解析の条件 である。S4-2孔とT-1孔は、傾斜角の異いから断面がねじれていることから3次元座標を変換し て回転させ2次元断面に投影してトモグラフィに使用した。

また、トモグラフィの測点距離は、3次元の座標値より2次元の座標値が短くなることから、 トモグラフィの解析には、3次元の座標値間の距離の比に応じて読み取った走時の補正を行った。 各断面の座標変換と投影断面の概念を図 4.3-8 に示す。

・断面 A

測点の測量座標(X,Y,Z)のX,Y値を入れ替え右手系の座標軸に変換し、X軸を回転軸として27.6度(S4・2孔の孔曲がり測定の平均傾斜角)に回転して座標変換を行いXY 平面に投影し2次元座標とした。

断面 B

測点の測量座標(X,Y,Z)のX,Y 値を入れ替え右手系の座標軸に変換し、XY 平面に投影して2次元座標とした。



図 4.3-8 座標変換の概念図

4.3.5 BTV 観察

3回の調査の前に、ボーリング孔 S4-2 孔 (削孔長 23m)、T-1 孔 (削孔長 22m) は、ボアホー ルテレビカメラ (BTV) で孔内壁面の観察を行いグラウトの侵入や孔内壁面の亀裂の状態を確認 した。

(1) T-1 孔

グラウト注入前の観察とグラウト注入中、注入後の観察に新たな亀裂や既存亀裂の拡大はなく、 グラウト材の侵入した形跡もない。深度 10.0m~10.6m にノジュールが存在している。3 回目(12 月)の測定で確認した不明瞭なヘアクラックの例を図 4.3-9 に示し、一覧を表 4.3-2 に示す。



図 4.3-9 ヘアクラックの例(注入前、深度 13m 付近)

| 改 4.3-2 唯恥でもした电表の 見 | | | | | | | |
|---------------------|----------|---------|--------|--|--|--|--|
| 記録深度(m) | 補正深度 (m) | 走向傾斜 | 区分 | | | | |
| 10.917 | 11.043 | N78E26S | ヘアクラック | | | | |
| 11.055 | 11.183 | N80W29S | ヘアクラック | | | | |
| 11.367 | 11.498 | N78W37S | ヘアクラック | | | | |
| 12.621 | 12.765 | N86W48S | ヘアクラック | | | | |
| 13.072 | 13.22 | N80W45S | ヘアクラック | | | | |

| 表 | 4 3-2 | 確認された亀裂の- | -暫 |
|----|-------|-----------|----|
| 10 | 7.0-2 | | 見 |

(2) S4-2 孔

既存の S4-2 孔では、1 回目の観察で明瞭な開口亀裂と不明瞭なヘアークラックを確認した。これらは前年度の他の調査でも確認済みであり、新たな亀裂や変状はなく、グラウト材の侵入した形跡もないが、観察中には湧水が認められ、BTV のノイズとなる多くの気泡も発生していた。S4-2 孔で撮影した気泡の例を図 4.3-10 に示す。



図 4.3-10 気泡による S4-2 孔のノイズ

4.3.6 弾性波トモグラフィ調査

(1) 弾性波トモグラフィの概要

弾性波トモグラフィ調査は、2 孔のボーリング孔の一方に孔内振源(OWS)を挿入して発振し て弾性波を発生させ、もう一方のボーリング孔内の受振器(ハイドロフォン)と坑壁の受振機器 (ジオオフォン)で弾性波(P波)の伝播時間を観測した。また、坑道壁はハンマーで起振して 電波時間を観測した。ボーリング孔内の起振・受振間隔(坑道壁は約1m間隔)は1mとし、観 測データは、1回の測定ごとにノイズの状況を確認して記録し、5回の重合記録とした。起振時 間を決めるトリガー波形には、孔内震源(OWS)の起振部付近に取付けた圧電素子の起振波形を 起振時間とし、坑道壁は、発振箇所に設置した金属棒とハンマー頭部との接触で通電する瞬間を 発振時間としたコンタクトトリガー方式を用いた。弾性波トモグラフィの測定概念を図 4.3-11に 示し、使用した主要機器を表 4.3-3 に示す。また、弾性波トモグラフィ調査の受発振位置を図 4.3-12 に示し、三次元断面を図 4.3-13 に示す。



図 4.3-11 弾性波トモグラフィ概念図

| 機器名 | 住 様 | 数量 |
|--|--|------|
| データ収録装置 高速高周波 デジタル探鉱器 Hiresp-S001 | チャンネル数:48ch+ AUX1ch ビット長:24bit メモリー長:1kw ~ 100kw サンプル間隔:1,2,4,8,16 µ s 入力周波数範囲:1Hz ~ 10kHz プリアンプ:20db 固定 トリガー入力:アナログ:±1.2V p-p max, 接点(make / break), TTL データ保存形式:SEG-2 フォーマット 電源:AC100V PC 接続:ミニ USB2.0 (PC 制御) | 1 台 |
| OWS 震源 Model-1394 | ばね係数:1000N/m ばねストローク:0.5m おもり重量:1.5 kg トリガー信号用センサ:小型ジオフォン内蔵 トリガー信号:アナログ 4V p-p max, 接点(make / break) 電源:DC12V | 1 台 |
| 孔内受振器 ハイドロフォン CA-1045 | チャンネル数:24ch アレイ間隔:1m 周波数レンジ:5Hz~2kHz 素子感度:-201dB 総合感度:-170dB 適応深さ:最大 3048m 感度低下量:2dB at 3048m 電源電圧:12~30Vdc@1mA 受感部:36.8mmOD 39.8mm ケーブル被覆:ポリウレタン ケーブルテンションメンバー:ケブラー | 1台 |
| 坑道壁受振器 ジオフォン GS-100 | 固有周波数:100Hz±10% 感度:0.91V/in/sec(0.36V/cm/sec)±10% | 11 個 |
| その他 | 2 芯シールド線、テイクアウトケーブル、延長ケーブル、 12V 電源装置 | 1式 |

表 4.3-3 主要機器一覧表









(2) 弾性波トモグラフィの解析方法

走時データおよび座標等の測量結果から処理を行った。解析フローチャートを図 4.3-14 に示し、解析に使用したソフトウェアを表 4.3-4 に示す。



表 4.3-4 解析ソフトウェア一覧

| ソフトウェア名 | 製作会社 | 機能 | |
|-------------------|------------------------|-------------------|--|
| SPW Parallel | Geoscience Corporation | 波形表示・処理ソフトウェ ア | |
| STACK.EXE | サンコーコンサルタント (株) | 波形記録重合プログラム | |
| Geo-tomography/TT | (株)地層科学研究所 | トモグラフィ解析プログラ ム | |
| Surfer Ver.8 | Golden software,LLC | 等高線・3D マップの作製 | |

1) 前処理

a. 波形データの処理

複数個取得した各起振点の波形データを垂直重合することでランダムノイズを低減し S/N 比 の向上を図った。その後、波形表示・処理ソフトウェアの形式に変換し、必要に応じてバンドパ スフィルタなどのノイズを除去する処理を実施した。

b. 走時曲線の読取り

各記録から初動の時刻を読取る。今回は3次元の配置を2次元の断面に投影して解析するため、 実距離と投影した距離の比に応じて走時を補正し入力データとした。弾性波の伝播経路を図 4.3-15 に示す。

- 2) インバージョン(逆解析)計算
- a. 初期モデルの作成

全データから平均的な対象領域の弾性波速度を算出し、0.5m間隔の格子状の均質なモデルを初 期モデルとした。

b. 理論走時計算

弾性波速度の初期モデルから、現地測定時と同じ測定配置で測定した場合の走時をアイコナル 方程式により10回計算した。

c. 残差の計算

測定値の走時と計算値の走時から、残差を計算した。

d. 速度モデルの修正

残差からの速度モデルの修正は、共役傾斜法を使用した。残差が減少しなくなり、ほぼ一定の 値に収束するまでモデルの修正を繰り返し、最終弾性波速度モデルを求めた。

3) 後処理

解析結果から、弾性波速度の分布図を作成した。



図 4.3-15 弾性波の伝播経路

(3) 弾性波トモグラフィの速度断面

1) 断面A

調査3回分の弾性波の速度分布を図4.3-16に示す。図の上段が弾性波(P波)速度の分布、中 段がスローネス(速度の逆数)、下段が1回目の結果を基準としたスローネスの変化率である。ス ローネスの変化率は、負の値を示す場合はスローネスが減少した、つまり弾性波速度が増加した ことを、正の値はその逆を意味している。

弾性波速度は、1.75~2.50 km/s を示す。断面図の上側(試験坑道3側)に黄色からオレンジ色の周囲より低速度の領域があり、さらに断面の中央から下側に水色から青色の高速度の領域が分布しているのが確認された。2回目測定(2019年9月)は1回目に比べ高速度の領域の形状が異なっている、また、2回目測定の弾性波速度の分布にあわせて、スローネスの変化率も+15%から

-20%と大きな変化が出ている。これらは、2回目の測定時に振源の故障により図 4.3-15 に示す **T**-1 孔の起振点から坑壁の波動伝播データがないことから、断面の右上側の弾性波速度値の拘束 条件が違ったことが原因と考えられる。

グラウト注入は、調査対象範囲の中央付近であることから、伝播経路の偏りによる影響を除い て評価する必要があり、伝播経路の異なる坑壁受振のデータを削除して再解析した結果を図 4.3-17 に示す。

弾性波速度は、1.85~2.35 km/s であり、図 4.3-15 の坑壁受振点を含んだ速度断面に比べ、低 速度と高速度のコントラストは小さい。試験坑道 3 の坑壁から離れるほど(断面図の上側から下 側方向)速度が大きくなる傾向があり、水色~青色の 2.1km/s 以上の領域の分布は 3 回の調査で 同じ位置に表れていて、波線の偏りによる影響は少ない。

スローネスの変化量は、調査の2回目、3回目ともに2.5%~-2.5%の範囲であるが、弾性波速度の増加を示す負の変化量の範囲は、グラウト範囲と重なる断面図の中央に分布している。

2) 断面B

試験坑道 3 と試験坑道 4 の間の弾性波速度の分布を図 4.3-18 に示す。弾性波速度の分布は、 調査 1 回目で 1.610m/s~2.00 km/s、調査 2 回目および調査 3 回目では 1.50km/s~2.15 km/s で ある。調査 3 回ともに試験坑道 3 側 (断面上側)が相対的に低速度で、試験坑道 4 側 (断面下側) が高速度を示す。

スローネスの変化率は、調査2回目、調査3回目ともに試験坑道3側が調査1回目に比ベスロ ーネスが上昇し、試験坑道4付近が低下する傾向がある。



図 4.3-16 坑道壁データを含む弾性波速度の分布断面図

284



図 4.3-17 坑道壁データを含まない弾性波速度の分布断面図

285



図 4.3-18 坑道壁間の弾性波速度の分布図

4.3.7 S波トモグラフィ調査

S波トモグラフィの概要

S 波トモグラフィ調査は、弾性波トモグラフィ(P 波)と同様の測定システムを使用し、P 波 孔内震源(OWS)をS 波坑内震源(BIS-SH-SH)に変更してS 波の弾性波の伝播時間を観測し た。S 波の起振方向は一方のボーリング孔に直角な2 方向とし、起振間隔は1mとした。また、 解析方法もP 波の弾性波トモグラフィ調査と同様に行った。S 波震源の仕様を図 4.3-19 に示す。



図 4.3-19 S 波震源の仕様

(2) 解析方法

走時データおよび座標等の測量結果から処理を行った。解析に使用するソフトウェアを表 3.5.2 に示し、解析の流れは弾性波トモグラフィ測定(4.3.6)と同様である。

ただし、S 波の波形データには、S 波より先に到達する P 波の波形も含まれている。そのため、 同じ起振箇所で、起振方向を反転させた 2 つの波形データを比較して、反転している位相を S 波 として読みとりを行った。

(3) S波トモグラフィの速度断面

インバージョン計算によるS波弾性波速度の分布を図 4.3-20 に示す。図の上段は試験坑道壁 の受振点のデータを使用して解析した速度分布を示し、図の下段は試験坑壁の受振点のデータを 除いて解析した速度分布である。図中の左側がS波速度の分布、右側がスローネス(速度の逆数) 分布を示す。

坑壁受振点の有無に関わらず、S波速度は1.00~1.16 km/s を示し、試験坑道 3 の坑壁側は低 速度、孔底側は高速度を示している。

坑壁受振点のデータ含む速度分布図は、、試験坑道3の坑壁の低速度領域がS4-2孔側に広がっているが、坑壁受振点を除いた速度分布図は試験坑道3の坑壁の低速度領域がT-1孔側に分布している。グラウト範囲に相当する深度-6m~-14mのS波速度(Vs)は、1.04~1.08 km/sを示す。



図 4.3-20 S 波速度の分布図

4.3.8 比抵抗トモグラフィ調査

(1) 比抵抗トモグラフィの概要

比抵抗トモグラフィ調査は、2 孔のボーリングに挿入した 1m間隔の孔内用多連電極ケーブルと 試験坑道の坑壁に設置した 11 点の電極を使用し、対象領域を囲むように電極を配置して測定し た。また、ボーリング孔内と坑壁の電極組み合わせによる2極法を用いて、同一ボーリング孔ま たは同一坑壁面上の電極同士で行うインライン測定と、両方のボーリング孔と坑壁上の電極とを 組みあわせるクロスホール法で測定を行った。ボーリング孔内の多連電極ケーブルの電極間隔は 1mであるが最初の測定深度から 0.5m に深度を変えて再度測定し、ボーリング孔内全体では 0.5m、間隔で測定を行った。比抵抗トモグラフィ調査の測定概念図を図 4.3-21 に示し、使用し た主要機器を表 4.3-5 と図 4.3-22 に示し、測定に使用した電極の配置を図 4.3-23 に示す。



表 4.3-5 主要機器一覧表

| 機器名 | 仕 様 | 数量 |
|-------------------------|--|-----|
| 電気探査装置 Terrameter LS | 最大通電電流:2.5A 最大出力電圧:1200Vp-p 最大出力電力:250W 入力インピーダンス:20MΩ 接続 ch:128ch(拡張 BOX 含む) 寸法:42×35×22cm、重量:12kg | 1 台 |
| 電極棒 | ステンレス製、¢10mm×長さ30cm | 11本 |
| 孔内用多連電極ケーブル | 50m:14 及び 21 チャンネル 、電極間隔 1m | 2本 |
| その他 | 電エドラム、遠電極用シールド線(200m)、 | 1式 |



図 4.3-23 電気探査の側転配置図

(2) 比抵抗の計算

比抵抗探査では、地表に設置した一対の電流電極から直流電流を流し、別の一対の電位電極間 での電位差を測定する。地盤が均質等方(半無限媒質)であると仮定した場合、通電した電流 Ι と測定電位差 V から、地盤の比抵抗 ρ は、次式により求めることができる。

$$\rho = K \frac{V}{I}$$

ここで、Kは電極配置によって定まる定数である。実際の地盤は不均質であり、前式で計算される値は電極周辺の平均的な比抵抗を表すと考えられ、このようにして計算された比抵抗を見掛け比抵抗 pa と呼ぶ。

比抵抗トモグラフィでは、対象とする深度に応じて様々な電極配置の手法があり、分解能の高い 2極法の電極配置を用いて測定を行った。計算に使用した見掛け比抵抗の計算式次式に示す。

$$\rho_a = 4 \pi a \frac{V}{I}$$

(3) 比抵抗トモグラフィの解析

解析には比抵抗解析ソフトウエア E-Tomo (ダイヤコンサルタント製)を使用した。図 4.3-24 に比抵抗トモグラフィの解析のフローチャートを示す。



- 1) 前処理
- a. データ編集

測定したデータを解析用データフォーマットに編集し、遠電極補正および2次元断面への投影 補正を行った。また、データの良否の検討を行い、不良箇所データを削除してデータを解析に用 いた。

b. **FEM** モデルの作成

電極座標から FEM(Finite Element Method:有限要素法)モデルを作成した。

- 2) 逆解析計算
- a. 初期モデルの作成

全データの平均見掛け比抵抗を計算し、その平均値を用いた均質なモデルを初期モデルとした。

b. 理論電位計算

比抵抗分布の初期モデルから、現地測定時と同じ電極配置で測定した場合の電位を FEM により計算する。

c. 残差の計算

測定値の対数と計算値の対数から、残差を計算した。

d. 比抵抗モデルの修正

残差からモデルの修正量を求めるため、制約付き最小2 乗法を使用した。残差が少なくなり、 一定の値に収束するまでモデルの修正を繰り返して最終比抵抗モデルを求めた。

3) 後処理

解析結果から、比抵抗分布図を作成した。

(4) 比抵抗トモグラフィの断面

1) 断面A

調査 3 回の比抵抗の分布断面と比抵抗のスローネスの変化量を図 4.3-25 に示す。図の中央部 と左下にはオレンジ色の比抵抗値が 1.00~2.50Q-m で周囲より低比抵抗の領域となっている。ま た、断面右側の**T-1** 孔寄りには緑色の 5Ω-m 以上の高比抵抗の領域が示されている。3 回の調査 を通して比抵抗の分布に明瞭な変化はない。

変化率は、調査の2回目は比抵抗が低下する傾向があるが、調査の3回目には比抵抗が上昇している。

2) 断面 B

調査 3 回の比抵抗の分布断面と比抵抗のスローネスの変化量を図 4.3-26 に示す。1 回目の調査の試験坑道 4 側の 1.00~2.50Q-m を示す低比抵抗の分布範囲は、2 回目の調査では断面の上部

(試験坑道3側)へ広がり、3回目の調査では1回目の調査と同程度に近い分布を示す。また、 変化率は、前述の分布範囲で、2回目の調査は最大で-35%、3回目の調査は最大で-20%の変化を 示す。



図 4.3-25 ボーリング孔間の比抵抗分布図



図 4.3-26 坑道壁間の比抵抗分布図

4.3.9 検層

(1) 電気検層

電気検層は、ノルマル検層および SP(自然電位)検層の2種目を実施した。ノルマル検層 はボーリング孔壁周辺の地盤の電気比抵抗を測定し、SP 検層はボーリング孔内に電気化学的 に発生する起電力を測定した。測定での電極間隔 a は、土木地質調査に広く用いられている 25, 50, 100 cm とした。測定は、図-1の孔内電極 M と地表電極 N との電位差を連続的に、孔内に 電気化学的に発生している自然電位とを同時に測定した。電気検層の概念を図 4.3-27 に示し、 測定状況を図 4.3-28、図 4.3-29 に示し、主要機器を表 4.3-6 に示す。





図 4.3-28 孔内用多連電極ケーブル



図 4.3-29 **電気検層の測定状況**

| 機器名 | 仕様 | 数量 |
|--------------------|--|-----|
| 測 定 器 G3030/OYO | 比抵抗測定範囲:0~10 KΩ·m SP 測定範囲:±2000 mV 出力電流:2,20,60 mA 出力波形:短形波 (記録部) フロッピーディスク内蔵 プリンター内蔵(熱転写方式) | 1 台 |
| ゾンデ G3030/OYO | 電極間隔:25,50,100cm 適用孔径:φ66~120mm | 1 台 |
| その他 | ウインチ、電極棒、ケーブル、 バッテリー他 | 1 式 |

表 4.3-6 主要機器一覧表

(2) 速度検層

弾性波速度構造および動的物性値を把握することを目的として、サスペンション法で PS 検 層を実施した。PS 検層はボーリング孔を利用して地盤内を伝播する P 波(VP:縦波、疎密 波)とS波(VS:横波、せん断波)の深度方向の速度分布を測定する方法である。震源を起振 して生じる弾性波動は孔内水を媒体として地盤を伝播する。

プローブを孔底まで挿入して、孔口まで 1m 間隔で S 波(正方向)、S 波(逆方向)、P 波の 順に起振し、記録した波形を確認して不良な場合は再測定を行った。また、プローブの構造に より、下部受振器よりプローブ下端(4.0m 程度)までの区間は測定できない。速度検層の概念 を図 4.3-30 に示す。



図 4.3-30 速度検層の概念図

震源で P 波、S 波(正・逆方向打撃)を別々に起振し、上部と下部に配置した 2 組の受振器 でそれぞれ 1 深度当たり 6 波形((X,Y,Z) ×2(正・逆))を測定した。P 波は上部受振器と下 部受振器の波形から初動の差を読み取り、S 波は正・逆方向の起振による反転位相の波形から 初動の時間差を読み取った。1.0m の受振器間隔における P 波、S 波の初動の到達時間の差か ら P 波と S 波の速度を算出した。S 波速度は正方向の起振と逆方向の起振による速度をそれぞ れ求め、その算出平均値を S 波の速度とした。速度検層の主要機器を表 4.3-7 に示し、測定状 況を図 4.3-31、図 4.3-32 に示す。

| 機器名 | 仕様 | 数量 |
|---|---|-----|
| 測 定 器 Model-3660C-XPJ /OYO | 成分:2成分(上下受振器) 入力インピーダンス:600Ω 利得:×4 ×16 ×64 ×256 周波数帯域:60~10,000Hz フィルター:LCF400,800,1600,100,000Hz 12dB/oct A/D コンバータ:16bit(±5VF.S) サンプリングレート:2.5,5,10,20,50,100,200 μ sec ショットパルス:0.8,1.6msec メモリ長:1024,2048 ワード ディスプレイ:10.4 インチ液晶(1024×768XGA) OS:Windows XP SP2 記録媒体:内蔵 HDD,USB フラッシュメモリ データフォーマット:専用フォーマット | |
| プローブ Model-348A/3385/ 3387A/3382B/3386A /3302W | 受振器:固有周波数 28Hz 感度:0.11V/kine 周波数特性:200~5kHz 起振器:ソレノイドコイル型打撃板衝突式 駆動電圧:300V | 1 台 |
| ウインチ/OYO | 7 芯硬銅線 アーマードケーブル 外径 9.5mm、耐熱 260℃ | 1 台 |
| その他 | プーリー、ケーブル類、バッテリー他 | 1 式 |

表 4.3-7 主要機器一覧表



(3) 検層結果

電気検層と速度検層の結果を合わせて図 4.3-33 に示す。



図 4.3-33 電気検層・速度検層の結果図

4.3.10 室内試験

トモグラフィ解析によるグラウト材などの分布をよりクリアに評価するため、ボーリング **T-1** 孔のコアとグラウト材について超音波速度測定と比抵抗測定の室内試験を実施した。試供体の一 覧を表 4.3-8 に示す。

| ラキルロ ユモ ロ | 採取深度 | 試験内容 | | (井 士) | |
|-----------|---|------|-----|-----------------|--|
| | (G.Lm) | 自然 | 飽和 | 1佣 考 | |
| 1 | 2.00-2.30 | V•R | - | | |
| 2 | 5.00-5.30 | V•R | - | | |
| 3 | 10.00-10.30 | V•R | - | | |
| 4 | 15.00-15.30 | V•R | - | | |
| 5 | 20.00-20.30 | V•R | - | | |
| G1 | グラウト材 | V•R | - | 2019年7月 注入分 | |
| G2 | グラウト材 | V•R | - | 2019年7月 注入分 | |
| 1' | 2.00-2.30 | V | V•R | 真空飽和のため再成形 | |
| 2' | 5.00-5.30 | V | V•R | 真空飽和のため再成形 | |
| 3' | 10.00-10.30 | - | - | ノジュールの亀裂により成形不可 | |
| 4' | 15.00-15.30 | V | V•R | 真空飽和のため再成形 | |
| 5' | 20.00-20.30 | V | V•R | 2019年9月注入分 再成形 | |
| G3 | グラウト材 | V | V•R | 2019年9月注入分 再成形 | |
| G4 | グラウト材 | v | V·R | 真空飽和のため再成形 | |
| GROUT- | グラウト材 | V•R | - | コア挟在測定用 | |
| 10mm | ~ | | | | |
| GROUT- | グラウト材 | V•R | - | コア挟在測定用 | |
| 20mm | | | | | |
| GROUT- | グラウト材 | V•R | - | コア挟在測定用 | |
| 50mm | | | | | |

表 4.3-8 試供体の一覧表

※V:超音波速度測定 R:比抵抗測定

※コア挟在測定用のグラウト材は 2020 年 2 月 7 日に混合し、VU65 の塩ビ管に流し込んで 固結させた。水との混合比は、トモグラフィ測定日の工事記録を参考に重量比 C:W=1:4.9 とした

(1) コアの強制浸潤

超音波測定、比抵抗測定はまず採取された状態(自然状態)のものを成形し測定を実施した。 採取した瞬間から表面から水が蒸発していくため、試料は乾燥の影響を受けている。より原位置 の状態を再現するために、一部の試料を再度成形し、真空脱気により強制的に湿潤させた状態(飽 和状態)での試験も実施した。真空脱気の状況を図 4.3-34 に示す



図 4.3-34 コアの真空脱気の状況

(2) 超音波速度試験

測定は地盤工学会基準「パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法」(JGS1220-2009)に 準拠して実施した。超音波測定は発受振子で供試体を挟み、パルス発生器により発生した振動の 透過時間を読みとることで、弾性波速度を算出する方法である。P 波、S 波それぞれの実体波にあ わせた発受振子を使用する。試験の概念図を図 4.3-35 に示し、試験状況を図 4.3-36 に示し、使 用した資機材の一覧を表 4.3-9 に示す.







図 4.3-36 弾性波速度の試験状況

| 表 | 4.3-9 | 超音波測定使用資機材- | -覧 |
|----|-------------------|-------------|----|
| 1X | - .5-5 | 但日瓜瓜足区历县饭们 | 炅 |

| 機器名 | 製作所 | 仕様 | 数量 |
|---------------------------------|-----|--|----------------|
| 超音波速度 測定装置 SonicViewer 2i | ΟΥΟ | 成分:1成分 入力インピーダンス:1MQ 利得:1,2,5.10,20,50,100,200倍 周波数帯域:100kHz~1000kHz ローパスフィルター:カットオフ周波数Fc=200kHz,1000 kHz A/Dコンバータ:16bit サンプリングレート:100,200,500,1000,2000nsec メモリ長:1024,2048ワード 画面:10.1インチTFTカラーLCD(1920×1200) OS:Windows10 Professional 64bit 記録媒体:SSD128GB データフォーマット:専用フォーマット 電源:AC100~240V | 1台 |
| 振動子 | ΟΥΟ | 駆動電圧:600V 振動パルス幅:6µsec | P,S 波 各 2 個 |

1) ボーリングコアの速度試験

ボーリングコア試料(T-1 孔)の速度試験の結果を試験別(自然状態・飽和状態)に表 4.3-10 に示し、T-1 孔の速度検層結果と合わせて図 4.3-37 に示した。グラウト範囲に相当する深度-6m ~-14mの地山の弾性波速度は Vp=1890~2080m/s、Vs=820~1060m/s を示す。

| 試料番号 | 試験1(自然状態) | | 試験 2(自然状態) | | 試験 3(飽和状態) | |
|----------------------|-----------|---------|------------|---------|------------|---------|
| 採取深度(G.L | Vp | Vs km/s | Vp km/s | Vs km/s | Vp km/s | Vs km/s |
| m) | km/s | | | | | |
| コア 1 2.00~2.30m | 2.07 | 2.07 | 2.20 | 1.11 | 2.20 | 1.04 |
| コア 2 5.00~5.30m | 2.04 | 2.04 | 2.09 | 1.04 | 2.14 | 1.04 |
| コア 3 10.00~10.30m | 2.25 | 2.25 | | | _ | _ |
| コア 4 15.00~15.30m | 1.98 | 1.98 | 1.93 | 1.06 | 2.07 | 1.02 |
| コア 5 20.00~20.30m | 1.97 | 1.97 | 2.02 | 1.03 | 2.05 | 1.01 |

表 4.3-10 コアの弾性波速度一覧表

※コア試料は7月に採取、試験1はR18月、試験2、3はR2.2月に実施。



図 4.3-37 コアの弾性波速度図

2) グラウト材の速度試験

グラウト試料の弾性波速度の試験結果を表 4.3-11 と図 4.3-38 に示す。原位置状態に近い試験 3 (試料を再成型して飽和させた)のグラウト試料の弾性波速度は Vp=1650~1750 m/s、Vs= 600~700 m/s を示す。

| 試 料 番 号 | 試験 1(自然状態) | | | 試験 2(自然状態) | | | 試験 3(飽和状態) | | |
|------------|-------------|------|--------|------------|------|--------|------------|------|--------|
| | Vp | Vs | ρt | Vp | Vs | ρt | Vp | Vs | ρt |
| | km/s | km/s | kg/cm3 | km/s | km/s | kg/cm3 | km/s | km/s | kg/cm3 |
| G1 | 1.54 | 0.63 | 1.257 | _ | | | _ | _ | _ |
| G2 | 1.72 | 0.88 | 1.239 | _ | _ | _ | _ | _ | _ |
| G3 | _ | _ | _ | 1.27 | 0.58 | 1.149 | 1.66 | 0.57 | 1.242 |
| G4 | _ | — | _ | 1.5 | 0.73 | 1.144 | 1.78 | 0.71 | 1.267 |

表 4.3-11 グラウト材の弾性波速度一覧表

※G1、G2は7月の原位置グラウト材、G3,G4は原位置グラウト材を再形成して使用。



図 4.3-38 グラウト材の弾性波速度図

厚さが 10mm、20mm、50mmのグラウト試料の上部をコア試料 1 (飽和状態)、下部をコア 試料 2 (飽和状態)で挟んで速度試験を行った。模式図を図 4.3-39 に示し、試験結果を表 4.3-12 と図 4.3-40 に示す。グラウト試料が厚いほど弾性波速度が速い傾向を示している。20mmのグラ ウト試料は密度が他の試料に比べ低く測定値に影響している。
| ⇒+ | 試験3(飽和状態) | | | | | |
|-------------|-----------|---------|-----------|--|--|--|
| 武府 街 方 | Vp km/s | Vs km/s | Pt kg/cm3 | | | |
| GROUT-10 mm | 1.92 | 0.69 | 1.359 | | | |
| GROUT-20 mm | 1.84 | 0.6 | 1.289 | | | |
| GROUT-50 mm | 2.25 | 0.98 | 1.504 | | | |
| 1'+G10+2' | 2.14 | 0.88 | _ | | | |
| 1'+G20+2' | 2.04 | 0.99 | _ | | | |
| 1'G50+2' | 2.15 | 0.98 | _ | | | |

表 4.3-12 グラウト材とコアの比抵抗一覧表

グラウト供試体をコア1とコア2で挟んで試験



図 4.3-39 グラウト材+コアの模式図



図 4.3-40 グラウト材+コアの比抵抗図

(3) 比抵抗試験

岩石資料の比抵抗測定は規格化されていないため、千葉ほか(1993)を参考に電極には銅板を 使用し、電極間や試料との間には試験坑道4で採水した坑内水を浸み込ませたろ紙を挟んで測定 した。

試験の模式図を図 4.3-41 に示し、試験状況を図 4.3-42 に示し、使用した資機材の一覧を表 4.3-13 に示す。



図 4.3-41 比抵抗試験の模式図



図 4.3-42 比抵抗試験の状況

| 機器名 | 仕様 | 数量 |
|---------------------------------|--|----|
| 比抵抗探査装置 MCOHMMark-2 / OYO | 出力電圧:10 ~400V 出力電流:1mA~200mA 出力波形:矩形波 測定電位:最大 5V 分 解 能:1μV 入力インピーダンス:10MΩ | 1台 |
| 電極 | 銅板を加工 | 2枚 |
| その他 | 電極ケーブル、バッテリー | 1式 |

表 4.3-13 比抵抗試験使用資機材一覧

1) ボーリングコアの比抵抗試験

ボーリングコア試料(**T**·1 孔)の比抵抗測定結果を試験別(自然状態・飽和状態)に表 4.3-14 に示しボーリング孔の電気検層結果と合わせて図 4.3-43 に示す。

T-1 孔の電気検層結果とコア試料の比抵抗測定結果から、グラウト範囲に相当する深度-6m~ -14mの地山の比抵抗値は、S4-2 孔は 4.2~4.4 (ohm-m)を示し、**T-1** 孔は 5.1~5.7(ohm-m) を示す。原位置状態に近い試験 2 (再成型-飽和状態)のコア試料結果の比抵抗値の 3.1~4.0 (ohmm)よりも高い。**T-1** 孔の検層値が大きい深度-11m付近はノジュールの影響と考えられる。

| 計料悉号 | 試験 1(自 | 然状態) | 試験 3(飽和状態) | | | | |
|---|--------|-----------|------------|-----------|--|--|--|
| ₩111 × 10 × 10 × 10 × 10 × 10 × 10 × 10 | 比抵抗 | 密度 | 比抵抗 | 密度 | | | |
| | Ω·m | pt kg/cm3 | Ω·m | ρt kg/cm3 | | | |
| 1 (2.00~2.30) | 6.73 | 1.768 | 3.97 | 1.77 | | | |
| 2 (5.00~5.30) | 5.27 | 1.774 | 3.33 | 1.79 | | | |
| 3 (10.00~10.30) | 6.65 | 1.902 | - | - | | | |
| 4 (15.00~15.30) | 4.64 | 1.761 | 3.13 | 1.77 | | | |
| 5 (20.00~20.30) | 6.02 | 1.786 | 3.26 | 1.79 | | | |

表 4.3-14 ボーリングコアの比抵抗一覧表

※コア試料は7月に採取、試験1はR1.8月、試験2、3はR2.2月に実施。





2) ボーリングコアとグラウト材の比抵抗試験

ボーリングコア試料とグラウト試供体の室内試験結果を試験別(自然状態・飽和状態)に表 4.3-15 に示し、ボーリング孔の電気検層結果を合わせて図 4.3-44 に示す。グラウト試供体の比抵 抗測定試験のグラフから、原位置状態に近い試験 2(再成型-飽和状態)のコア試料の比抵抗値は 3~4(ohm-m)、グラウト試料の比抵抗値は 10(ohm-m)を示す。

| 試料番号 | 試験1(自然状態) | 試験 2(自然状態) | 試験 3(飽和状態) |
|------------|-----------|------------|------------|
| 1 | 6.73 | - | 3.97 |
| 2 | 5.27 | - | 3.33 |
| 3 | 6.65 | - | - |
| 4 | 4.64 | - | 3.13 |
| 5 | 6.02 | - | 3.26 |
| G1 | 3.28 | - | - |
| G2 | 5.16 | - | - |
| G3 | - | - | 9.57 |
| G4 | - | - | 10.96 |
| GROUT-10mm | - | 10.34 | - |
| GROUT-20mm | - | 7.17 | - |
| GROUT-50mm | - | 7.7 | - |
| 1'+G10+2' | - | - | 5.84 |
| 1'+G20+2' | | | 8.32 |
| 1'+G50+2' | - | - | 9.78 |

表 4.3-15 ボーリングコアとグラウト材の比抵抗一覧表



図 4.3-44 ボーリングコアとグラウト材の比抵抗図

3) ボーリングコアにグラウト材を挟んだ比抵抗試験

厚さが 10mm、20mm、50mmのグラウト試料の上部をコア試料 1 (飽和状態)、下部をコア 試料 2 (飽和状態) で挟んで比抵抗を測定した。模式図を図 4.3・45 に示し、試験結果を表 4.3・16 と図 4.3・46 に示す。グラウト試供体が厚いほど比抵抗値が高くなる傾向を示す。また、20mmの グラウト試料は他の資料に比べ密度が低く測定値に影響している。

| 衣 4.5-10 クノフト内とコノの比較 | 表 | 4.3-16 | グラウ | ト材とコ | アの比抵抗 |
|----------------------|---|--------|-----|------|-------|
|----------------------|---|--------|-----|------|-------|

<u>グラウト供試体をコア1とコア2で挟んで試験</u>

| 計料来中 | 比抵抗 | 密度 | 備去 |
|-------------------|-------|-----------|----------------|
| 西本社里 方 | Ω∙m | pt kg/cm3 | そう |
| GROUT-10mm | 10.34 | 1.359 | 試験 2 |
| GROUT-20mm | 7.17 | 1.289 | (自然状 |
| GROUT-50mm | 7.7 | 1.504 | 態) |
| 1'+GROUT(10mm)+2' | 5.84 | | =+ E\$ 0 |
| 1'+GROUT(20mm)+2' | 8.32 | | 試験 3 (約和状能) |
| 1'+GROUT(50mm)+2' | 9.78 | | |



図 4.3-45 グラウト材+コアの模式図



図 4.3-46 グラウト材+コアの比抵抗

4.3.11 掘削影響領域の連続性の調査手法

試験坑道および力学プラグ周囲の EDZ の連続性や経時変化を把握し、グラウトの効果を評価するため、弾性波トモグラフィの二次元および三次元解析ソフトウエアの解析断面を比較して図 4.3-47 に示す。

二次元断面は解析結果の同じ速度値を線で囲み、色の違うコンターにして表している。三次元 の断面は解析結果の速度値ごとに色の違うグリッドに変えて表している。これらを比較すると表 示の違いにより、二次元断面に比べ三次元断面は分解能が高い。



※解析モデルは、メッシュ 0.5m、インバージョン数 10回と同じ条件で解析した。 図 4.3-47 トモグラフィ断面の比較

2 孔の平行なボーリング孔を用いる二次元のトモグラフィ調査は対象範囲が限定されるが、三次元的にボーリング孔や受振、発振点を配置し三次元解析を行うことで坑道周囲の EDZ の連続 性や経時変化の把握に適用できる。三次元解析の例を図 4.3-48 に示す。



※上図の上段左から右へ、下段の左から右へは、速度の違い(速度の遅い範囲から速い範囲)を 良く表している。

図 4.3-48 三次元の解析例

4.3.12 まとめと今後の課題

本節では、試験坑道および力学プラグ周囲の EDZ の連続性や経時変化を把握し、グラウトの効果を評価するための非破壊調査(弾性波・比抵抗モグラフィ調査)を実施し、それらの適用性を 検討した。 その結果、地山(堆積岩)とグラウト範囲の物性値の違いを弾性波(Vp、Vs)トモグラフィ調 査、比抵抗値をトモグラフィ調査、弾性波検層、電気検層およびボーリングコア試料、グラウト 試料の室内試験により確認するとともに、S 波によるトモグラフィ調査の適用性を確認した。ま た、EDZの連続性の把握について適用可能な逆解析手法の適用性も確認した。

今後の課題としては、EDZ を含む地質環境条件に応じた物理探査手法の選定・検証方法、解 析手法の適用性および精度の検証、原位置試料の採取方法および試験方法の検証、要素試験の方 法の検証などが挙げられる。

参考文献

- 日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター(2019):平成 30 年度 高レ ベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発事業 地層処分施設閉鎖技術確証試験 報告書
- H. Komine and N. Ogata (1994): Experimental Study on Swelling Characteristics of Compacted Bentonite, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 3, No. 4, pp. 478-490.
- 棚井憲治,菊池広人,中村邦彦,田中幸久,廣永道彦(2010):ベントナイト系材料の標準的室内 試験法構築に向けての試験法の現状調査と試験による検討,JAEA-Research 2010-025
- Olivella, S., Gens, A., Carrera, J., and Alonso, E.E. (1996).: Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media, Engineering Computations, 13(7), 87-112.
- Alonso, E. E., Gens, A. and Josa, A.: A constitutive model for partially saturated soils, Géotechnique, 40(3) (1990).
- 菊池広人,棚井憲治(2005):幌延地下水を用いた緩衝材埋め戻し材の基本特性試験, JNC-TN8430 2004-005.
- A. Jenni, U. Mader U. and R. Fernndez (2014): Multi-component advective-diffusive transport experiment in MX-80 compacted bentonite: Method and results of 2nd phase of experiment and post mortem analysis"; NAB 14-22, Nagra.
- M. Bradbury, U. nerner, E. Curti, W. Hummel, G. Kosakowskia and T. Thoenen, (2012): The Long Term Geochemical Evolution of the Nearfield of the HLW Repository, NTB 12-01, Nagra.
- O. Karnland, S. Olddon and U. Nilsson, (2006): Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials, TR-06-30, SKB.
- 柴田真仁,坂本浩幸,佐藤努,(2011): "圧縮ベントナイトとセメント界面における相互作用の評価",日本原子力学会和文論文誌, Vol.10,No.2,pp91-104.
- M.J. Turrero and V. Cloet (2016): Concrete ageing, cncrete/bentonite and concrete/rock interaction analysis, NAB 16-18, Nagra.
- 入矢桂史郎, 久保博(2004):高アルカリと硝酸塩の影響を受けたベントナイトおよび岩石の水理 特性(III), 核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書, 大林組, JNC TJ8400 2005-002.
- S. Kumpulainen, L. Kiviranta, T. Carlsson, A. Muurinen, D. Svensson, H.Sakamoto, M. Yui, P. Wersin and D. Rosch (2010):Long-term alteration of bentonite in the presence of metallic iron, R-10-52, SKB.
- P. Wersin and F. Kober (2016).:FEBEX-DP, Metal corrosion and iron-bentonite interaction studies, NAB 16-16, nagra.

- 日本原子力研究開発機構:緩衝材基本特性データベース, https://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/, (参照: 2020 年 3 月 19 日)
- Cooper, H. H. and Jacob, C. E. (1946): A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, Transactions American Geophysical Union, 27, 526.
- 青柳 和平、石井 英一、中山 雅、藤田 朝雄(2016):幌延深地層研究センターの 350m 調査 坑道における人工バリア性能確認試験孔周辺の岩盤損傷の検討,日本材料学会第 65 期通常総 会・学術講演会論文集 pp.19-20.
- 青柳 和平、石井 英一、石田 毅 (2017):掘削損傷領域の破壊様式の検討,Journal of MMIJ, 133(2), pp.25-33.
- Jacob, C. J. and S. W. Lohman (1952): Nonsteady floe to a well of constant drawdown in an extensive aquifer, Trans. American geophysical Union, vol.33, no.4, pp.559-569.
- 土木学会 (2002): 2002 年版 コンクリート標準示方書 改定資料
- 千葉昭彦、熊田政弘(1993):岩石試料の比抵抗測定について、物理探査学会第88回学術講演会 論文集、48、P221-226
- 真田 祐幸、丹生屋 純夫、松井 裕哉、藤井 義明(2009): 堆積履歴が幌延地域に分布する珪質岩 の力学的特性や微視的構造変化に及ぼす影響、Journal of MMIJ、125 巻 10_11 号、p. 521-529

5. 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備-坑道シーリングに関わる施工技術の整備-

サイト選定のプロセスの進展に伴い具体化される地質環境や処分概念に応じてシーリングの構成材料や施工技術を適切に選定するには、材料バリエーションや施工技術オプションに応じた施工特性および再冠水に至る過渡期の状態変化ならびに施工手順や時間などにも留意し、多様な地質環境条件等を踏まえた施工技術オプションや品質管理・施工管理体系の具体化に資する基盤情報を整備するとともに、工学規模試験等を通じた施工方法の適用性を確認しておく必要がある。 これらを踏まえ、本研究項目では、以下の2つの技術開発を実施する。

・小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験

・埋め戻し材の特性を踏まえた施工オプションの整備

平成 30 年度は、施工技術の整備に関わる計画検討を行うとともに、小断面坑道の吹付けによる 埋め戻し材の施工試験を瑞浪超深地層研究所の深度 500m 研究アクセス坑道において実施し、施 工技術に関する品質管理・施工管理体系に関する基盤情報整備に着手する。また、埋め戻し材の 特性を踏まえた施工オプションの整備については、特性データや初期品質に関わるデータ取得に 向けて、室内要素試験を実施するとともに工学規模試験に着手した。

平成 31 年度は、上記試験で埋め戻し材を施工した領域を対象として事後調査を実施し、埋め戻 し材の物性の不均質性について詳細に調べるとともに、上記試験で設置した各種モニタリング装 置を用いたモニタリングを継続し、埋め戻し材の経時的な状態変化とモニタリングの品質管理手 法としての適用性について考察した。また、埋め戻し材の特性を踏まえた施工オプションの整備 については、平成 30 年度の成果に基づき、室内要素試験をおよび工学規模試験を実施した。以降、 それらの成果の概要について述べる。

5.1 小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験(事後調査)

地層処分事業で想定される深度 300m より深い地質環境で、核燃料サイクル機構(現 日本原 子力研究開発機構、以下、原子力機構と称す)の「第2次取りまとめ」で示されていたガラス固 化体の埋設・定置方法である縦置き方式を採用した場合は、アクセスのための処分坑道の埋め戻 しを行うこととなる。平成 30 年度に実施した小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験 は、このための施工方法のうち、国内外を通じて事例がほとんどない坑道全断面を対象とした吹 付け施工の適用性と同方法を用いる場合の品質管理手法の構築を主目的としており、吹付け施工 が将来の地層処分場の閉鎖時に適用可能な手法であることと同手法を適用する際の品質管理手法 について実証的に示した(原子力機構・原環センター、2019)。

以降では、平成 31 年度に実施した、施工した埋め戻し材の物性の不均質性に関する詳細調査 と、継続実施したモニタリングにより得られた成果について概説する。

5.1.1 埋め戻し領域からの埋め戻し材のサンプリングおよび室内物性試験

平成 30 年度に実施した埋め戻し施工試験の事後調査として、埋め戻し領域からの埋め戻し材 のサンプリングおよび室内物性試験を実施した。主たる目的は、埋め戻し領域内の物性分布をよ り詳細に確認し、昨年度提示した品質管理手法の有効性の検証と課題などを検討することである。 なお、計画検討時には、埋め戻し領域の透水性は原位置試験で確認することを想定していたが、 昨年度の埋め戻し試験時などでみられた含水比増加による埋め戻し材の変状や、埋め戻し領域の 不飽和状態を勘案し、できるだけ原位置の状態を乱さない試料を採取しそれを用いて室内透水試 験により透水性を確認することとした。以降、得られた成果の概要について述べる。

(1) サンプリング箇所

現地サンプリングは深度 500m 研究坑道「アクセス南坑道設備横坑」において、4 m×4 孔で実施した。図 5.1-1、図 5.1-2 および図 5.1-3 にサンプリング位置を示す。





図 5.1-1 サンプリング位置縦断面図

図 5.1-2 サンプリング位置正面図



図 5.1-3 サンプリング位置

(2) 資機材の搬入・配置

a)資機材搬入

サンプリングに必要な資機材は現地まで4tトラックで運搬し、研究アクセス南坑道(B工区) 立坑のキブルで搬入した。500m深度ではアクセス南坑道設備横坑まで台車で運搬した。表 5.1-1 に運搬した主な機材の一覧を示す。最大の寸法と重量を示す試錐機は、使用するキブル内に収ま るようことを事前に確認した。資機材搬入および試錐機設置の状況を図 5.1-4、図 5.1-5に示す。



図 5.1-4 資機材搬入状況



図 5.1-5 No.1 孔試錐機設置状況

| 資機材名称 | メーカー/型式 | 公称能力 および規格等 | 寸法(H×W×L) またはL(mm) | 重量/数量 |
|--------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 試錐機 | YBM-05 | 7.5kW | $1,930 \times 860 \times 1,380$ | 280 kgf/1 台 |
| φ40.5 mm ロッド | _ | _ | 2,000 1,000 500 | 8.4kg/2 本 4.2kg/2 本 2.1kg/2 本 |
| シンウォールサンプラー | — | φ 78mm | L=600 | 60本 |
| ダブルコアチューブ | _ | φ 116mm φ 86mm | L=1, 000 L=1, 000 | 47kg/1 本 25kg/1 本 |
| チェーンブロック | 象印 C21-1 | 1t | $148 \times 143 \times 310$ | 9.2kgf/1 個 |
| ディスクグラインダー | 日立工機 G18BYE | 100V 1.3kW | 445×74 砥石外径 180mm | 3.7kg/1 台 |
| ロータリーハンマードリル | BOSH GBH4-32DFR | 100V 0.9kW | 226×400 | 4.7kgf/1 台 |
| 投光器 | マキタ | 100V 0.2kW | $214 \times 261 \times 328$ | 2kgf/4 台 |
| 単管パイプ | _ | φ 48.6mm | 3,000 2,000 1,500 | 30 本 20 本 20 本 |
| 足場板 | 木材 | 幅 200mm 厚さ 36mm | 2,000 1,500 | 12 枚 8 枚 |
| スタンドファン | アクティオ | 100V 0.2kW | 1,440×80×88 | 8.1kg/2 台 |
| レバーブロック | LB008 (KITO) | 0.8t | $144 \times 119 \times 280$ | 5.7kgf / 2本 |

表 5.1-1 主要資機材一覧表

b)資機材の配置

「アクセス南坑道設備横坑」および「500 m 坑道」における資機材を図 5.1-6 および図 5.1-7 のように配置した。試錐機のベースは、下段サンプリング時にはアンカーボルトによってコンク リート床面に固定するとともに、レバーブロック等を用いて H 鋼(土留め工)に対して水平反力 をとった。作業区域はカラーコーンとコーンバーによって明示し、安全通路を坑道幅の半分程度 確保した。また、ロッドおよび資材は1箇所に整頓して保管した。



図 5.1-6 サンプリング資機材等設置平面図



図 5.1-7 資機材配置状況

c)給排水および配電

サンプリングおよびボーリング(拡孔)は無水で行ったため、給排水設備(ポンプ・ホース) は設置しなかった。試錐機のモーターを稼働させるために必要な電源は、図 5.1-8 に示す近傍の 分電盤より供給した。使用電力を表 5.1-2 に示す。



図 5.1-8 アクセス南坑道設備横坑の分電盤

| 表 | 表 5.1-2 サンプリング時の使用電力 | | | | | | | | |
|---------|----------------------|----|--------------|--|--|--|--|--|--|
| 種類 | 電圧(V) | 台数 | 消費電力 (kW) | | | | | | |
| 試錐機 | 三相 200V | 1 | 7.5 | | | | | | |
| 排水ポンプ | 単相 100V | 1 | 0.2 | | | | | | |
| スタンドファン | 単相 100V | 2 | 0.2 | | | | | | |
| 投光器 | 単相 100V | 4 | 0.8 | | | | | | |
| | 合計 | | 8.7 | | | | | | |

d) 土留め壁の切削

既に構築されている土留め鋼材を10cm程度電動カッターで切り取った(図 5.1-9)。切断時に は火花が飛散しないようブルーシートで防護した。鋼材切断後は φ86 mm ボーリングビットによ り土留め壁を切断した(図 5.1-10)。



図 5.1-9 サンプリング前の土留め壁の状況



(a) 鋼材切断作業



(b) 切断した鋼材



(c) 切削した土留め壁



(d) 土留め壁の切削

図 5.1-10 土留め壁の切削

(3) サンプリング

サンプリングに必要な作業は、図 5.1-11 に示すロータリー式機械ボーリングマシンによって行った。サンプリングおよび拡孔時の反力は、底部に打設したアンカーや土留め壁の H 鋼にチェー ンブロックやレバーブロックで固定することによって確保した。



図 5.1-11 ロータリー式ボーリングマシンの原理と概要(水平ボーリング)

a)サンプリング手法

サンプリング手法は、固定ピストン式シンウォールサンプラーによるエキステンションロッド 式を採用した(図 5.1-12)。サンプラーの押込みは、ボーリングマシンの油圧装置による方法を用 いた(図 5.1-13)。



図 5.1-12 固定ピストン式シンウォールサンプラーによる乱れの少ない試料採取



図 5.1-13 エキステンションロッド式サンプラーの押込み方法(鉛直孔の例)

b)サンプリング作業手順

サンプリングは以下の手順で実施した。

- 土留め壁を取り除き埋め戻し材が露出した箇所から、φ78 mm のサンプラーを水平に 50 cm 押し込み、サンプラーごと埋め戻し材を回収する。
- ②回収したサンプラーは、埋め戻し材の含水量が変化しないよう端部をラップでシールし、 坑内に一時保管する。
- ③ サンプリング後、 φ86 mm に拡孔する (この時、水を 200ml 程度使用)。
- ④ 上記①~③の作業を繰り返し、4m分の試料を採取する。
- ⑤1 孔ないし2 孔分のサンプラーが回収された時点でサンプラーを地上に搬出し、車両に て速やかに室内試験実施場所へ搬送する。

c)試料の取り扱い

図 5.1-14、図 5.1-15 にサンプリングの状況と回収したサンプルの例を示す。回収サンプラー を台車やクレーンおよび車両で運搬する際には試料をウレタン素材で梱包し、振動や衝撃の影響 を直接受けないように配慮した(図 5.1-16)。また、室内試験場所に搬入した試料は、搬入したも のから順次室内試験を行うこととした。



図 5.1-14 サンブリング状況 (No.2)

図 5.1-15 回収直後の試料 (No.4)

5.1-16 車両での試料搬送 (No.1,2)

(4) 土留め壁の復旧

サンプリングを終えた孔内の埋め戻し土を観察した結果、孔壁の孕み出しや湧水は認められず 安定していた。このため、監督員と協議の結果埋め戻し土は十分自立し、流出の恐れがないと判 断して、切り取った箇所の土留め壁の復旧は行わないこととした(図 5.1-17)



(a) No.1

(b) No.2
 (c) No.3
 図 5.1-17 サンプリング後の孔口状況

(d) No.4

(5) 室内土質試験

a)実施数量

現地で採取した混合土(ベントナイト15%、砂85%)を用い、以下の室内物性試験を実施した。 表 5.1-3 に実施数量を示すとともに、図 5.1-18 には実施箇所模式図と数量を示す。試験数量は、 施工試験時の最小のセクション厚(1 m 程度)に対し、十分な詳細度で結果が得られる数量とした。

| | 試験名称 | 数量 | 試験基準 | 実施理由 |
|-------|------------------|-----|--|---|
| | 密度測定 | 192 | 土の湿潤密度試験方法 (JGS 0191-2000) (JIS A1225:2000) | 3試料×16箇所×4孔 (1箇所当たり3試料の平均を取るため) |
| | 含水比測定 | 192 | 土の含水比試験方法 (JIS A 1203 : 2009) | 3試料×16箇所×4孔 (1 箇所当たり3 試料の平均を取るため) |
| 物 理 試 | 粒度試験 | 64 | 土の粒度試験方法 (JIS A 1204:2009) (JGS 0131-2009) | 16箇所×4孔 (ベントナイト流出計測で埋め戻し領域からの排水を 許容していることから、特にベントナイト量の不均質 性が生じている可能性があるため) |
| 験 | 細粒分含有率 測定 | 128 | 土の細粒分含有率試験方法 (JGS 0135-2009) (JIS A 1223:2009) | 32箇所×4孔 (ベントナイト分とみられる細粒分を調べることによ り、ベントナイトの混合率を詳細に把握するため) |
| | メチレンブル 一吸着量測定 | 64 | ベントナイト (粉末) のメ チレンブルー吸着量測定方 法 (JIS Z2451:2019) (JBAS-107-91) | 16箇所×4孔 (埋め戻し土に含まれるベントナイト混合率を細粒分 含有率測定と合わせて行うことで、ベントナイト量の 均一性をより詳細に把握する) |
| | 透水試験 | 16 | 低透水材料の透水試験方法 (JGS 0312-2018) | 4箇所×4孔 (密度の不均質性と透水係数の関係を把握することお よび埋め戻し領域全体が飽和に要する時間を見積もる ため) |

表 5.1-3 室内物性試験の数量一覧





室内土質試験を実施する場所に搬入した試料の状況を図 5.1-19 に示す。また、採取した試料の 深度および採取長を表 5.1-4 に一覧として示す。50 cm 長毎の採取深度に対して採取長が短いの は、サンプラーの押し込みにより試料が多少収縮していることによる。







(b) No.2



(d) No.4

図 5.1-19 搬入試料

| 71 友 | 反 津4∉ | 採取深度 | 採取長 |
|--------|---------|-----------|------|
| 北泊 | 武祔冶 | (m) | (cm) |
| | No.1-1 | 0.02~0.52 | 50.0 |
| | No.1-2 | 0.52~1.02 | 47.0 |
| | No.1-3 | 1.02~1.52 | 43.0 |
| No 1 | No.1-4 | 1.52~2.02 | 39.0 |
| INO. 1 | No.1-5 | 2.02~2.52 | 42.0 |
| | No.1-6 | 2.52~3.02 | 45.0 |
| | No.1-7 | 3.02~3.52 | 45.0 |
| | No.1-8 | 3.52~4.00 | 48.0 |
| | No.2-1 | 0.00~0.50 | 45.0 |
| | No.2-2 | 0.50~1.00 | 50.0 |
| | No.2-3 | 1.00~1.50 | 48.0 |
| No 2 | No.2-4 | 1.50~2.00 | 50.0 |
| IN0.2 | No.2-5 | 2.00~2.50 | 47.0 |
| | No.2-6 | 2.50~3.00 | 47.0 |
| | No.2-7 | 3.00~3.50 | 50.0 |
| | No.2-8 | 3.50~4.00 | 50.0 |
| | No.3-1 | 0.00~0.50 | 45.0 |
| | No.3-2 | 0.50~1.00 | 50.0 |
| | No.3-3 | 1.00~1.50 | 50.0 |
| No 2 | No.3-4 | 1.50~2.00 | 39.0 |
| N0.3 | No.3-5 | 2.00~2.50 | 50.0 |
| | No.3-6 | 2.50~3.00 | 43.0 |
| | No.3-7 | 3.00~3.50 | 40.0 |
| | No.3-8 | 3.50~4.00 | 50.0 |
| | No.4-1 | 0.00~0.50 | 50.0 |
| | No.4-2 | 0.50~1.00 | 50.0 |
| | No.4-3 | 1.00~1.50 | 49.0 |
| N- 4 | No.4-4 | 1.50~2.00 | 50.0 |
| No.4 | No.4-5 | 2.00~2.50 | 46.0 |
| | No.4-6 | 2.50~3.00 | 48.0 |
| | No.4-7 | 3.00~3.50 | 50.0 |
| | No.4-8 | 3.50~4.00 | 50.0 |

表 5.1-4 採取試料一覧

b)試験方法

試験方法は、JGS 基準、JIS 規格等で示された方法で実施しているが、以下に概説する。

① 密度測定

湿潤密度 *ρ*t は土全体の単位体積質量であり、自立する塊状の土を対象とし、その体積と質量を 測定して求めるものである。体積の求め方は二種類あり、1 つ目は円柱形に作成された供試体の 寸法をノギスで直接測定して体積を求めるノギス法、2 つ目は、供試体周辺にパラフィンを塗布 し、塗布前の質量と見かけの水中質量から体積を間接的に求めるパラフィン法がある。昨年度の 施工試験時での室内試験ではパラフィン法を用いたが、今回はノギス法を採用した。

ノギス法による土の湿潤密度試験では、まず供試体の質量m(g)と削りくずで含水比w(%)を測定する。次にノギスで供試体の平均直径D(cm)および高さH(cm)を求める。

【結果の整理】

湿潤密度 ρ_t は次式より求めることができる。

 $\rho_t = m/V$ ここに、m:供試体の質量(g) V:供試体の体積(cm³)

なお、体積 Иは次式により算出する。

V= m4・D・H ここに、D: 平均直径 (cm) H: 平均高さ (cm)

② 含水比測定

含水比測定は「土の含水比試験方法」(日本工業規格:JISA1203)に準拠して実施した。以下 に試験方法と含水比の計算方法を示す。

【試験方法】

- i) 容器の質量 mc(g)をはかる。
- ii) 試料を容器に入れ、全質量 *m_a*(g)をはかる。
- iii) 試料を容器ごと高温乾燥炉に入れ、110±5 ℃で一定質量になるまで炉乾燥する。
- iv) 炉乾燥試料を容器ごとデシケーターに移し、ほぼ室温になるまで冷ました後、全質量 *mb*(g) をはかる。
- 【計算方法】

含水比は次の式によって算出する。

$$\omega = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c}$$

ここで、
 ω : 含水比(%)
 m_a : 試料と容器の質量(g)
 m_b : 炉乾燥試料と容器の質量(g)

*m*_c : 容器の質量(g)

1 粒度試験

既往研究におけるベントナイト混合土の粒度試験においては、以下の3種類の方法が実施され比較されている。今回は、このうち「試験方法-2」で実施することとした。

| 試験方法 | 概要 | 留意点 |
|--------|--|---|
| 試験方法-1 | 水洗いをせず、自然状態(支給された状態)の まま炉乾燥した後に、ふるい分けを行う。その 際に、特別な作業は実施しない | 現状で最も自然な試験方法であるが、砂お よび礫粒子の表面へのベントナイトの付 着、およびベントナイト粒子同士の団粒化 があるため、全体として粗粒側にシフトす る傾向が強い |
| 試験方法-2 | 水洗いをせず、自然状態(支給された状態)の まま炉乾燥した後に、ふるい分けを行う。その 際に、各フルイ上の残留物に対して、できる限 り「付着物」のこそげ落としと団粒物の破砕を 行う | 元の状態に最も近い粒度分布となるが、試験時のバラツキ(試験毎、個人毎)が入る 危険性が高く、またベントナイトの礫をつ ぶしてしまう可能性がある |
| 試験方法-3 | 水洗いをせず、自然状態(支給された状態)の まま炉乾燥を行う。その後、「地盤材料試験の 方法と解説第8編特殊土第5章風化残積土」 (地盤工学会)に準拠し、試料をビニール袋に 入れ、1.5[m]の高さから30回落下させて解 きほぐし、付着物を落としてから、ふるい分け を行う | 試験方法-1の改善策として、より客観的な 誤差防止策として採用する |

表 5.1-5 粒度試験の方法

④ 細粒分含有率試験

細粒分含有率は、試験土の炉乾燥質量に対して 75 µm のフルイを通過した炉乾燥質量が占め る割合を百分率で表したものである。細粒土か粗粒土かの土質判別等に用いる。

【試験方法】

試料の乾燥質量 Msを測定し、大きめの容器に移して 2 時間以上水浸させる。水浸試料を十分 に攪拌し、9.5 mm、425 µm、75 µm ふるいを重ねたものに上澄み液を注ぐ。再度試料に水を加 え、上澄み液が無色透明になるまで同じ作業を繰り返す。各ふるいに残った試料と容器に残った 試料を炉乾燥し、乾燥重量 Mosを測定する。細粒分含有率 Fc は次式によって求める。

$$F_c = \frac{M_s - M_{os}}{M_s} \times 100$$

ここに、 *F_c*:細粒分含有率(%) *M_s*:試料の炉乾燥質量(g) *M_{os}*:ふるいに残った試料の炉乾燥質量(g)

⑤ メチレンブルー吸着量測定

今回、③の粒度試験とは別に、ベントナイト含有量を調べるためのメチレンブルー吸着量試験 も実施した。以下に本試験の方法とメチレンブルー吸着量の算定方法を示す。

【試験方法】

(1) 加える試料を 105~110 ℃で充分に乾燥した後、デシケーター中で放冷する。その 0.500±0.001gを正確に秤量し、2%ピロリン酸ナトリウム溶液 50 mlの入っている円錐ビー カーに加え、超音波分散機に 10 分間かける。超音波分散機がない場合には、時計皿で蓋をし て 10 分間穏やかに煮沸した後室温まで冷却する。ただし、本試験ではベントナイト量が少 ないため、試料は 0.500 g でなく 1.000 g とした。

- (2)予想される消費量の80%のメチレンブルー溶液を加え、2分間かき混ぜる。
- (3) コマゴメピペットを用いて液の1滴を濾紙上に置く。
- (4) 濃いブルーのスポットの周囲に明るいブルーのハローが観察されなければ、メチレンブルー 溶液を1ml ずつ加え、添加毎に 30 秒かき混ぜ、液の1 滴を濾紙上に置く。
- (5) 未乾燥試料の含水比 wを求める

$$w = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c}$$

ここに、

w:未乾燥試料の含水比

ma:未乾燥試料の入った平形はかり瓶の質量(g)

m_b:乾燥試料の入った平形はかり瓶の質量(g)

*m*_c: 平形はかり瓶の質量(g)

上式を用いて、次式により未乾燥試料の質量を乾燥試料の質量に換算する。

$$m_{dry} = \frac{m_{wet}}{1+w}$$

ここに、 *m_{wet}*:未乾燥試料の質量(g)

*m*_{drv}: 乾燥試料の質量(g)

(6) 上記(1)~(5)の操作を繰り返し、濃いブルーのスポットの周囲に明るいブルーのハローが観察されたならば、さらに2分間かき混ぜ、もう1度液の一滴を濾紙上に置く。もしハローが消失したなら、メチレンブルー溶液をさらに1ml加え同様の操作を繰り返す。2分間撹拌後でも1.5~2mm幅のハローが残存したなら、滴定の終点とする。

【計算方法】

追加の 2 分間攪拌後に初めて 1.5mm 以上の幅のハローが確認された時、次式による計算値を ベントナイト等 100g 当たりのメチレンブルー吸着量とする。小数点第二位を四捨五入し、測定値 とする。

$$Q_s = v_{MB}/m_{dry}$$

ここに、 $Q_s : スポット法によるベントナイトなど 100g$
当たりのメチレンブルー吸着量(mmol)
 $v_{MB} : ハロー幅 1.5mm の時の 0.01mol/L メチレンブルー溶液の合計添加量(mL) $m_{dry} : (5) で求めた乾燥試料の質量(g)$$

⑥ 透水試験

低透水材料を対象とする透水試験の手順と方法を以下に述べる。

【作業手順】

- a) 供試体を締固めて作製する場合には、JISA1201:2009に規定する方法によって得られ た試料を、よく混合して含水比が均一になったものを準備する。今回はサンプル試料を サンプラーから押し出して作製した。
- b) 試料の土粒子の密度 ρ_s (Mg/m³) を JIS A 1202 に規定する方法によって求める。
- c) 透水円筒の内径をはかり、断面積 A (mm²) を求める。
- d) 透水円筒を有孔板に固定し、フィルターを設置する。
- e) 試料をフィルターの上に規定の厚さに入れ、層状に締固める。
 - 注記1 JISA1210または静的締固めによってモールド内に締固めた試料を、そのまま 透水試験用供試体として使用することができる。
 - 注記2 2 層目以降の締固めでは、各層の間の密着をよくするために締固めた各層の上

面にへらなどで縦横に線を刻む。

- 注記3 試料の最大粒径の10 倍以上の直径および高さとすることを基本とする。ただし、粒径幅の広い試料に対しては、最大粒径の5 倍以上であれば許容してもよい。
- f) 締固め後の供試体の長さ L (mm)、質量 m (g) をはかり、試料の初期含水比 w₀ (%) を JISA 1202 に規定する方法によって求める。

【供試体作製手順】

供試体は採取サンプルから φ78 mm×50 mm の寸法で作成した。試験に際して、塩ビ製のモールド容器(内径 78 mm、厚さ 5.5 mm、高さ 50 mm)を別途作成し、容器と供試体の隙間にエポキシ樹脂を 3 回(1回/日)に分けて充填した。充填後は供試体が乾燥しないように、濡らしたウエスで容器を覆い固化させた。以下にその具体的手順を示す。

- 1) サンプラーからの試料を押し出す(図 5.1-20)。
- 2) 円柱形供試体の高さ調整と端面を成形する(図 5.1-21)。
- 3) 成形後、供試体の直径・高さ・重量を測定する(図 5.1-22)。
- 4)供試体とモールドの隙間にエポキシ樹脂系接着剤を充填する(図 5.1-23)。
- 5) 充填材固化後、供試体に透水試験用の上蓋と底盤を取付ける(図 5.1-24)。
- 6)供試体下部と測定管を接続する(図 5.1-25)。



図 5.1-20 サンプラーからの押出し







図 5.1-22 供試体の寸法・重量測定



図 5.1-23 供試体の作製・充填材注入



図 5.1-24 供試体組立て



図 5.1-25 測定管への接続

【試験方法】

透水係数は自然水頭差による変水位法にて測定した(図 5.1-26)。図 5.1-27 は、変水位法の概 念図である。以下試験手順を述べる。

- a) 透水円筒の流入側にビュレットを連結する。
- b) ビュレットの断面積 *a* (mm²) を求め、流出側の水面から測った高さ *h*₁ (mm) を設定 する。
- c) 時刻 f1における h1を記録してから、バルブを開いて時刻 f2における h2を記録する。
- d) 通水期間中は、水の蒸発を防ぐ対策を講じる。透水円筒からビュレットまでの連結を同 一にし、通水せずにビュレットの蒸発量を測定し、蒸発量から供給水量を補正する。
- e) b)から d)の操作を繰り返し、算出される透水係数の値がほぼ一定となったことを確認した後、3回以上の測定を行う。測定値の平均値からの変動が±50%におさまることでほぼ 一定とみなす。
- f) ビュレットと同条件で設置された水の水温 T(℃)をはかる。
- g) 試験後の供試体の含水比 Wf(%)を求める。

透水係数は次式により算出する。

$$k_{\rm T} = 2.303 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \times \frac{1}{1000}$$

における速水係数 (m/s)

ここで、*k_T*: *T*(℃)における透水係数 (m/s)

a:ビュレットの断面積 (mm²)
L:供試体の長さ (mm)
A:供試体の断面積 (mm²)
た:測定時間 (s)
h:時刻 れにおける水位差 (mm)
h₂:時刻 なにおける水位差 (mm)
2.303:対数の底の変換による係数
1/1000:単位を換算するための係数



図 5.1-26 透水係数測定



図 5.1-27 変水位法概念図

(6) 室内土質試験結果

本節では、昨年度の施工試験時に実施した室内試験結果との比較を交えつつ、今年度実施した室内試験結果の概要を述べる。

図 5.1-28 に前年度および今年度で室内土室試験を実施した試料の位置を示す。図 5.1-29~図 5.1-32 は、実際の各サンプリング試料の写真に、「物理試験」(湿潤密度試験、含水比試験、粒度

試験、細粒分含有率試験、メチレンブルー試験)と「透水試験」の供試体作成場所を併記したも のである。

図 5.1-28 昨年度の施工試験時の室内試験と今年度の詳細調査におけるサンプリング位置の比較



図 5.1-29 No.1 採取試料の室内試験位置



図 5.1-30 No.2 採取試料の室内試験位置







a)試験対象の材料

本試験の対象材料は、昨年度の施工試験において埋め戻し材として使用された材料、すなわち 表 5.1-6 に示す「ベントナイト B」(15%)および「砂 B」(85%)を混合した「埋め戻し材 B」 である。表 5.1-7 には施工試験時の設定目標値を示す。この数値を以降の検討の基準とした。

| | | | | | | | 粒度* | | | |
|-------------|----------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------------|----------------|------------------|-------------------|-------------------|----------|
| 種類 | 含水 比 (%) | 土粒子 密度 (Mg/m ³) | 礫分 (%) | 砂分 (%) | シル ト分 (%) | 粘土 分 (%) | 最大 粒径 (mm) | 10% 粒径 (mm) | 60% 粒径 (mm) | 均等 係数 |
| ベントナイト B | 8.7 | 2.759 | 0.0 | 0.2 | 30.4 | 69.4 | 0.106 | - | 0.0019 | - |
| 砂 B | 7.4 | 2.674 | 5.0 | 94.8 | 0 | .2 | 9.5 | 0.268 | 0.720 | 2.69 |
| 埋め戻し材 B | 7.6 | 2.688 | 4.6 | 80.6 | 5.7 | 9.1 | 9.5 | 0.0102 | 0.652 | 63.9 |

表 5.1-6 使用材料の物理的特性

※ 沈降分析では分散剤としてヘキサメタリン酸ナトリウム飽和溶液 10mL を使用

表 5.1-7 施工試験時の埋め戻し材の設定目標値

| 項目 | 目標設定値 |
|--------|------------------------|
| 含水比 | 12~16 % |
| 細粒分含有率 | 15 % |
| 有効粘土密度 | 0.40 Mg/m ³ |

b)乾燥密度·含水比

①全体(サンプリング孔位置:図 5.1-33)

乾燥密度および含水比の測定結果を統計的に整理したものを表 5.1-8 および図 5.1-34 に示した。全体では、乾燥密度は平均値 1.669 Mg/cm³、標準偏差 0.086 Mg/m³、含水比は平均値 14.4%、標準偏差 2.04%であった。図 5.1-34より、サンプリング孔による乾燥密度および含水比の顕著な偏向は見られないといえる。なお、表 5.1-9 は昨年度地上で予備試験として実施した締固め試験結果(w=14、16%)である。また、表 5.1-10 は昨年度吹付け後に採取した試料による室内試験結果である。

図 5.1-35 には、今回サンプリングした試料による含水比 - 乾燥密度の関係を、昨年度データ と重ね合わせて整理した。14±2%は、昨年度施工時に設定した含水比の目標値である。この図よ り、昨年度実施の試験結果は含水比が 14±2%に概ね収まっているが、サンプリング試料による 結果ではその範囲を超えるものが見られる。これらのうち含水比が 12%以下のものは乾燥密度 も小さくなっている(<1.60 Mg/m³)。



図 5.1-33 サンプリング孔位置図

表 5.1-8 乾燥密度と含水比の分布(全体)

| 乾燥密度 | $\left(Mg/m^{3} ight)$ | 含水比 (%) | | |
|-------------------|-------------------------|---------|------|--|
| 平均 <mark>値</mark> | 1.669 | 平均值 | 14.4 | |
| 中央 <mark>値</mark> | 1.674 | 中央値 | 14.3 | |
| 標準偏差 | 0.086 | 標準偏差 | 2.04 | |
| 変動係数 | 0.051 | 変動係数 | 0.14 | |
| 最大 <mark>値</mark> | 1.845 | 最大値 | 21.3 | |
| 最小值 | 1.445 | 最小値 | 8.5 | |
| 幅 | 0.400 | 幅 | 12.8 | |
| 標本数 | 192 | 標本数 | 192 | |

施工目標値 14±2%

50 80 平均 No.1 No.1 1.669 No.2 70 No.2 No.3 No.3 40 No.4 No.4 60 50 30 度数 变 40 20 30 20 10 10 0 0 1.6 1.7 1.8 10 1.3 1.4 1.5 1.9 2.0 8 6 乾燥密度(Mg/m³)



含水比(%)





図 5.1-35 含水比 - 乾燥密度関係(全体)

| 締固めエネルギ | 最適含水比 | 最大乾燥密度 | 有効粘土乾燥 | |
|---------|---------------|-----------------------------------|----------------------------------|--|
| $-E_c$ | $_{Wopt}$ (%) | $ ho_{dmax}$ (Mg/m ³) | 密度 ρ_e (Mg/m ³) | |
| 1.0 | 14.2 | 1.747 | 0.589 | |
| 0.6 | 14.5 | 1.681 | 0.542 | |
| 0.4 | 15.9 | 1.648 | 0.519 | |

表 5.1-9 昨年度の地上予備締固め試験結果 2)

| セクシ | 試料 | 湿潤密度 ρ_t | 含水比 wt | 乾燥密度 ρ_d | 飽和度 | 有効粘土密度 |
|-----|-------|----------------------|--------|----------------------|-----------|-----------------------|
| ョン | 番号 | (Mg/m ³) | (%) | (Mg/m ³) | S_r (%) | $ ho_e~({ m Mg/m^3})$ |
| | S1-1 | 1.746 | 16.89 | 1.493 | 57.17% | 0.426 |
| | S1-2 | 1.865 | 21.90 | 1.530 | 78.45% | 0.447 |
| 1 | S1-3 | 1.807 | 12.77 | 1.602 | 51.08% | 0.490 |
| | S1-4 | 1.711 | 11.89 | 1.529 | 42.51% | 0.446 |
| | S1-5 | 1 730 | 16.33 | 1.487 | 54 77% | 0.423 |
| | S1-6 | 1.738 | 13.43 | 1.532 | 48.23% | 0.448 |
| | S1-7 | 1.614 | 17.01 | 1.379 | 48.51% | 0.368 |
| | S2-1 | 1.751 | 14.39 | 1.530 | 51.52% | 0.447 |
| | S2-2 | 1.943 | 15.27 | 1.686 | 69.72% | 0.545 |
| | S2-3 | 1.823 | 13.13 | 1.612 | 53.30% | 0.496 |
| | S2-4 | 1.857 | 13.61 | 1.634 | 57.24% | 0.510 |
| | S2-5 | 1.879 | 14.07 | 1.647 | 60.38% | 0.518 |
| 2 | S2-6 | 1.979 | 14.36 | 1.731 | 70.49% | 0.577 |
| | S2-7 | 1.922 | 14.98 | 1.672 | 66.82% | 0.535 |
| | S2-8 | 1.906 | 12.39 | 1.696 | 57.43% | 0.552 |
| | S2-9 | 1.891 | 14.77 | 1.648 | 63.47% | 0.519 |
| | S2-10 | 1.967 | 13.93 | 1.727 | 67.92% | 0.574 |
| | S2-11 | 1.922 | 14.53 | 1.678 | 65.52% | 0.539 |
| | S3-1 | 2.003 | 13.16 | 1.770 | 68.90% | 0.607 |
| | S3-2 | 1.915 | 14.60 | 1.671 | 65.08% | 0.535 |
| | S3-3 | 1.902 | 14.46 | 1.661 | 63.48% | 0.528 |
| 3 | S3-4 | 1.988 | 13.11 | 1.758 | 67.31% | 0.597 |
| | S3-5 | 1.967 | 13.91 | 1.727 | 67.85% | 0.574 |
| | S3-6 | 1.938 | 13.83 | 1.702 | 64.83% | 0.556 |
| | S3-7 | 1.670 | 12.34 | 1.487 | 41.36% | 0.423 |
| | S4-1 | 1.683 | 13.31 | 1.486 | 44.50% | 0.422 |
| | S4-2 | 1.812 | 13.68 | 1.594 | 54.04% | 0.485 |
| 4 | S4-3 | 1.894 | 16.99 | 1.619 | 69.74% | 0.500 |
| | S4-4 | 1.881 | 16.04 | 1.621 | 66.07% | 0.502 |
| | S4-5 | 1.788 | 13.47 | 1.576 | 51.70% | 0.474 |
| | S5-1 | 1.873 | 13.19 | 1.655 | 57.29% | 0.524 |
| 5 | S5-2 | 1.940 | 16.27 | 1.669 | 72.21% | 0.533 |
| | S5-3 | 1.846 | 16.04 | 1.591 | 63.07% | 0.483 |
| | S5-4 | 1.918 | 16.58 | 1.645 | 70.90% | 0.517 |
| | S5-5 | 1.928 | 14.29 | 1.687 | 65.38% | 0.546 |
| 6 | S6-1 | 1.957 | 15.32 | 1.697 | 71.14% | 0.553 |
| | S6-2 | 1.900 | 13.31 | 1.676 | 59.82% | 0.538 |
| | S6-3 | 1.873 | 15.11 | 1.627 | 62.79% | 0.505 |
| | S6-4 | 1.886 | 14.86 | 1.642 | 63.26% | 0.515 |
| | S6-5 | 1.710 | 13.57 | 1.506 | 46.76% | 0.433 |
| 7 | S7-1 | 1.932 | 15.90 | 1.667 | 70.36% | 0.532 |
| | S7-2 | 1.892 | 13.56 | 1.666 | 59.95% | 0.531 |
| | S7-3 | 1.655 | 12.58 | 1.470 | 41.08% | 0.414 |
| | S7-4 | 1.873 | 11.55 | 1.679 | 52.10% | 0.540 |
| | S7-5 | 1.932 | 14.49 | 1.688 | 66.34% | 0.546 |
| 8 | S8-1 | 1.897 | 15.71 | 1.639 | 66.59% | 0.514 |
| | S8-2 | 1.803 | 15.86 | 1.556 | 59.04% | 0.462 |
| | S8-3 | 1.864 | 15.29 | 1.617 | 62.56% | 0.499 |
| | S8-4 | 1.824 | 16.78 | 1.562 | 63.02% | 0.465 |
| | S8-5 | 1.905 | 15.29 | 1.652 | 66.13% | 0.522 |

表 5.1-10 昨年度の吹付け後採取試料による室内試験結果
②サンプリング孔別

• No.1

No.1 における乾燥密度および含水比の統計的分布を表 5.1-11、図 5.1-37 に示す。乾燥密度 は平均値 1.634Mg/ cm³、標準偏差 0.080 Mg/m³、含水比は平均値 14.7%、標準偏差 2.79%であ った。この孔では、平均値および標準偏差ともに全体データによる値とほぼ同じとなっている。

図 5.1-38 は坑口からの深度による乾燥密度および含水比をまとめたものである。この図より、 No.1 ではセクション 3 と 4 の境界付近で乾燥密度と含水比が、セクション 2 の 2.5~3.0m で含 水比が相対的に低下していることが分かる。図 5.1-39 は、図 5.1-35 と同様昨年度得られた含水 比 - 乾燥密度関係に No.1 孔の結果をまとめたものである。含水比が相対的に低下しているのは、 この図において、左下のデータに相当する。



図 5.1-36 サンプリング孔位置図

表 5.1-11 No.1: 乾燥密度と含水比の分布

| 乾燥密度(Mg/m ³) | | 含水比(%) | |
|--------------------------|-------|--------|------|
| 平均 <mark>値</mark> | 1.634 | 平均值 | 14.7 |
| 中央值 | 1.642 | 中央値 | 14.4 |
| 標準偏差 | 0.080 | 標準偏差 | 2.79 |
| 変動係数 | 0.049 | 変動係数 | 0.19 |
| 最大 <mark>値</mark> | 1.753 | 最大値 | 21.3 |
| 最小值 | 1.445 | 最小値 | 8.5 |
| 幅 | 0.308 | 幅 | 12.8 |
| 標本数 | 48 | 標本数 | 48 |





図 5.1-39 No.1:含水比-乾燥密度関係

No.2 における乾燥密度および含水比の統計的分布を以下の表 5.1-12、図 5.1-41 に示す。乾燥密度は平均値 1.667 Mg/cm³、標準偏差 0.074 Mg/m³、含水比は平均値 13.9%、標準偏差 1.60%であった。乾燥密度および含水比ともに平均値では全体平均とあまり変わらない。ばらつきは全体の分布傾向よりも小さくなっている。

図 5.1-42 によれば、No.2 ではセクション 4、5 および 6 で乾燥密度が相対的に小さい (<1.6Mg/m³程度)。これらは図 5.1-43 で左下のデータに該当する。



図 5.1-40 サンプリング孔位置図

| 表 5.1-12 No.2: 乾燥密度と含水比の分布 | | | | |
|----------------------------|------------|------|------|--|
| 乾燥密度 | (Mg/m^3) | 含水比 | (%) | |
| 平均值 | 1.667 | 平均值 | 13.9 | |
| 中央値 | 1.667 | 中央値 | 13.6 | |
| 標準偏差 | 0.074 | 標準偏差 | 1.60 | |
| 変動係数 | 0.044 | 変動係数 | 0.12 | |
| 最大値 | 1.824 | 最大値 | 18.6 | |
| 最小値 | 1.548 | 最小値 | 11.6 | |
| 幅 | 0.276 | 幅 | 7.0 | |
| 標本数 | 48 | 標本数 | 48 | |









図 5.1-43 No.2:含水比 - -乾燥密度関係

No.3 における乾燥密度および含水比の統計的分布を表 5.1-13、図 5.1-45 に示す。乾燥密度 は平均値 1.699 Mg/cm³、標準偏差 0.083 Mg/m³、含水比は平均値 14.3 %、標準偏差 1.53%であ った。乾燥密度は全体の分布傾向とほぼ同じといえる。含水比は全体の分布傾向に比べてばらつ きが小さい。

図 5.1-46 より、No.3 ではセクション 6 と 7 の境界付近で乾燥密度が特に低下 (<1.50Mg/m³ 程度) しているのが分かる。図 5.1-47 では下方の3データに該当する。



図 5.1-44 サンプリング孔位置図

| 表 5.1-13 No.3: 乾燥密度と含水比の分布 | | | | |
|----------------------------|-------------------------|------|------|--|
| 乾燥密度 | $\left(Mg/m^{3} ight)$ | 含水比 | (%) | |
| 平均值 | 1.699 | 平均值 | 14.3 | |
| 中央値 | 1.712 | 中央値 | 14.4 | |
| 標準偏差 | 0.083 | 標準偏差 | 1.53 | |
| 変動係数 | 0.049 | 変動係数 | 0.11 | |
| 最大値 | 1.830 | 最大値 | 17.5 | |
| 最小值 | 1.465 | 最小値 | 11.8 | |
| 幅 | 0.365 | 幅 | 5.7 | |
| 標本数 | 48 | 標本数 | 48 | |

ᇣᄚᄚᇉᅀᆋᄔᅊᇬᄼᆂ









図 5.1-47 No.3:含水比-乾燥密度関係

· No.4

No.4 における乾燥密度および含水比の統計的分布を表 5.1-14、図 5.1-49 に示す。乾燥密度 は平均値 1.674 Mg/cm³、標準偏差 0.094 Mg/m³、含水比は平均値 14.7%、標準偏差 1.95%であ った。乾燥密度および含水比ともに全体の分布傾向とほぼ同じといえる。

図 5.1-50 より、No.4 ではセクション 4、5、6 の一部で乾燥密度が相対的に小さいことが分かる。図 5.1-51 ではこれらは下方のデータに該当する。



図 5.1-48 サンプリング孔位置図

| 表 5.1-14 No.4:乾燥密度と含水比の分布 | | | | |
|---------------------------|-------------------------|--------|--------------|--|
| 乾燥密度 | $\left(Mg/m^{3} ight)$ | 含水比(%) | | |
| 平均值 | 1.674 | 平均值 | 14.7 | |
| 中央値 | 1.680 | 中央値 | 14.6 | |
| 標準偏差 | 0.094 | 標準偏差 | 1.95 | |
| 変動係数 | 0.056 | 変動係数 | 0 .13 | |
| 最大値 | 1.845 | 最大値 | 20.8 | |
| 最小值 | 1.487 | 最小値 | 9.9 | |
| 幅 | 0.358 | 幅 | 10.9 | |
| 標本数 | 48 | 標本数 | 48 | |









図 5.1-51 No.4:含水比-乾燥密度関係

③セクション別(平成 30 年度の施工試験時室内試験結果との比較)

図 5.1.1-30 に、今年度実施した乾燥密度・含水比測定結果を昨年度の施工試験時に設定した セッション別にまとめ直したものを示す。図 5.1-52 (a) より、データ数はセクション4で最も 多く、セクション1、3、8 で少ないこと、図 5.1-52 (b) から、平均値は乾燥密度でセクショ ン8がやや大きく、セクション1、6 が相対的に小さいことがわかる。また、含水比はセクショ ン1 で顕著に大きい。標準偏差は、乾燥密度でセクション6、3、7、4 の順で大きく、セクショ ン2 で最も小さい。含水比ではセクション2、3、5 で、セクション6、7、8 で小さい。次頁以 降、セクション毎に詳細を述べる。



図 5.1-52 乾燥密度・含水比の分布(施工試験時のセクション別)

図 5.1-53に示すように、セクション1はNo.1のみで出現し、データは1つである(表 5.1-15)。 図 5.1-54 の含水比 - 乾燥密度関係では右側にプロットされ、昨年度の地上での予備試験におけ る吹付け後データに近い値となっている。



サンプリング孔縦断面図

図 5.1-53

表 5.1-15 Sec.1: 乾燥密度と含水比の分布

| 乾燥密度 | | 含水比 | |
|----------------------|---|-----|---|
| (Mg/m ³) | | (%) | |
| 1.602 | | 21 | 3 |
| 標本数 | 1 | 標本数 | |

 $14 \pm 2\%$ 2.00 ゼロ空隙曲線 $\rho_{s}=2.69 Mg/m^{3})$ 1.90 1.80 1.747 1.70 乾燥密度(Mg/m³) 1.68 648 1.60 (.) 1.50 1.40 サンプリング結果 1.30 △ 締固め曲線 1.0Ec ➡締固め曲線 0.6Ec 1.20 締固め曲線 0.4Ec • 昨年度地上予備(w=14%) 1.10 昨年度地上予備(w=16%) セクション1 14 5 昨年度吹付け後(Sec. 1.00 14.2 15 15.9 5 10 25 0 20 含水比(%)

図 5.1-54 Sec.1:含水比-乾燥密度関係

・セクション2

セクション2における乾燥密度と含水比の統計的分布を表 5.1-16 および図 5.1-56 にまとめ た。図 5.1-55 に示すように、このセクションは No.1 でのみ出現し、データ数は 23 とやや少な い。乾燥密度は平均値 1.649 Mg/m³、標準偏差 0.056 Mg/m³、含水比は平均値 15.2%、標準偏 差 3.13%であった。含水比の標準偏差は全体(2.04)に対するよりも大きい。図 5.1-57 の含水 比 - 乾燥密度関係から、含水比が 20%程度のデータがあることが影響しているとみられる。こ れらを含め、含水比は 14±2%の範囲外となっているものが多く見られる。



表 5.1-16 Sec.2: 乾燥密度と含水比の分布

| 乾燥 | 密度 | 含7 | K比 |
|------------|-------|------|------|
| (Mg/m^3) | | (%) | |
| 平均值 | 1.649 | 平均值 | 15.2 |
| 中央値 | 1.640 | 中央値 | 15.1 |
| 標準偏差 | 0.056 | 標準偏差 | 3.13 |
| 変動係数 | 0.034 | 変動係数 | 0.21 |
| 最大値 | 1.753 | 最大値 | 21.0 |
| 最小値 | 1.561 | 最小値 | 9.7 |
| 幅 | 0.192 | 幅 | 11.3 |
| 標本数 | 23 | 標本数 | 23 |







セクション3における乾燥密度と含水比の統計的分布を表 5.1-17 および図 5.1-59 にまとめ た。図 5.1-58 に示すように、当セクションは No.1 でのみ出現し、分布範囲はセクション2よ りも小さく 2m 程度であるため、データ数は 12 と少ない。乾燥密度は平均値 1.663 Mg/m³、標 準偏差 0.099 Mg/m³、含水比は平均値 13.6%、標準偏差 2.82%であった。乾燥密度、含水比と もに標準偏差は全体よりもやや大きい。これは図 5.1-60 において、左下に乾燥密度および含水 比が小さいデータが 2 つあることが影響しているとみられる。当セクションでは、含水比はデ ータの約半数(5/12)が 14±2%の範囲外となっている



図 5.1-58 サンプリング孔縦断面図

表 5.1-17 Sec.3: 乾燥密度と含水比の分布

| 乾燥密度 | | 含水比 | |
|----------------------|-------|-------------------|------|
| (Mg/m ³) | | (%) | |
| 平均值 | 1.663 | 平均值 | 13.6 |
| 中央 <mark>値</mark> | 1.701 | 中央值 | 14.4 |
| 標準偏差 | 0.099 | 標準偏差 | 2.82 |
| 変動係数 | 0.060 | 変動係数 | 0.21 |
| 最大值 | 1.750 | 最大值 | 16.6 |
| 最小 <mark>値</mark> | 1.464 | 最小 <mark>値</mark> | 8.5 |
| 幅 | 0.286 | 幅 | 8.1 |
| 標本数 | 12 | 標本数 | 12 |





図 5.1-60 Sec.3:含水比-乾燥密度関係

図 5.1-61 に示すように、当セクションは No.2、3 および 4 の最深部で出現する。データ数は 51 と最も多い。このセクションにおける乾燥密度と含水比の統計的分布を表 5.1-18 および図 5.1-62 にまとめた。乾燥密度は平均値 1.684 Mg/m³、標準偏差 0.080 Mg/m³、含水比は平均値 13.9%、標準偏差 1.47%であった。ここでは、含水比の標準偏差が全体(2.04)よりも小さく、ば らつきが比較的小さいのが特徴である。図 5.1-63 で見ると、含水比は 84 %(=43/51)が 14±2 %以 内にある。



表 5.1-18 Sec.4:乾燥密度と含水比の分布

| 乾燥 | 密度 | 含7 | k比 |
|------------|-------|-------------------|------|
| (Mg/m^3) | | (% | ⁄o) |
| 平均值 | 1.684 | 平均 <mark>値</mark> | 13.9 |
| 中央值 | 1.677 | 中央 <mark>値</mark> | 13.6 |
| 標準偏差 | 0.080 | 標準偏差 | 1.47 |
| 変動係数 | 0.048 | 変動係数 | 0.11 |
| 最大値 | 1.830 | 最大値 | 17.9 |
| 最小值 | 1.503 | 最小 <mark>値</mark> | 11.6 |
| 幅 | 0.327 | 幅 | 6.3 |
| 標本数 | 51 | 標本数 | 51 |

図 5.1-61 サンプリング孔縦断面図



図 5.1-63 Sec.4:含水比-乾燥密度関係

図 5.1-64 に示すように、当セクションは No.2、3 および 4 の中間部の幅 2m 範囲で出現する。 データ数は 38 である。このセクションにおける乾燥密度と含水比の統計的分布を表 5.1-19 およ び図 5.1-65 にまとめた。乾燥密度は平均値 1.671 Mg/m³、標準偏差 0.072 Mg/m³、含水比は平 均値 13.8%、標準偏差 1.94%であった。当セクションは、乾燥密度および含水比の平均値・標準 偏差はともに全体の傾向とあまり変わらないことから、埋め土全体を代表する物性といえる。図 5.1-66 によれば、当セクションでの含水比は約 80 %(=30/38) が 14±2 %以内にある。



表 5.1-19 Sec.5:乾燥密度と含水比の分布

| 乾燥密度 | | 含水比 | |
|----------------------|-------|------|-------------|
| (Mg/m ³) | | (9 | (0) |
| 平均值 | 1.671 | 平均值 | 13.8 |
| 中央値 | 1.672 | 中央値 | 13.3 |
| 標準偏差 | 0.072 | 標準偏差 | 1.94 |
| 変動係数 | 0.043 | 変動係数 | 0.14 |
| 最大値 | 1.784 | 最大値 | 20.8 |
| 最小値 | 1.502 | 最小值 | 9.9 |
| 幅 | 0.282 | 幅 | 10.9 |
| 標本数 | 38 | 標本数 | 38 |

図 5.1-64 サンプリング孔縦断面図





図 5.1-67 に示すように、当セクションは No.1、3 および 4 で出現する。No.2 のデータはない。 データ数は 35 である。このセクションにおける乾燥密度と含水比の統計的分布を表 5.1-20 およ び図 5.1-68 にまとめた。乾燥密度は平均値 1.634 Mg/m³、標準偏差 0.109 Mg/m³、含水比は平 均値 14.6%、標準偏差 1.27%であった。全体データに対し、標準偏差は乾燥密度では大きく、含 水比では小さくなっている。したがって、図 5.1-69 では縦軸方向にばらつきが大きい分布とな っている。なお、含水比は 80 %(28/35)が 14±2 %以内にある。



表 5.1-20 Sec.6:乾燥密度と含水比の分布

| 乾燥 | 密度 | 含7. | 大比 |
|------------|-------|-------------------|------|
| (Mg/m^3) | | (%) | |
| 平均值 | 1.634 | 平均 <mark>値</mark> | 14.6 |
| 中央値 | 1.644 | 中央 <mark>値</mark> | 14.4 |
| 標準偏差 | 0.109 | 標準偏差 | 1.27 |
| 変動係数 | 0.067 | 変動係数 | 0.09 |
| 最大値 | 1.811 | 最大値 | 16.9 |
| 最小值 | 1.445 | 最小值 | 11.8 |
| 幅 | 0.366 | 幅 | 5.1 |
| 標本数 | 35 | 標本数 | 35 |

図 5.1-67 サンプリング孔縦断面図



図 5.1-69 Sec.6:含水比-乾燥密度関係

図 5.1-70 に示すように、当セクションは No.2~4 の孔口近くに出現する。No.3 では1 データ のみで、総データ数は 20 である。乾燥密度と含水比の統計的分布を表 5.1-21 および図 5.1-71 にまとめた。乾燥密度は平均値 1.688 Mg/m³、標準偏差 0.095 Mg/m³、含水比は平均値 15.0 %、 標準偏差 1.60 %であった。当セクションでは全体データに対し、標準偏差が乾燥密度で大きく、 含水比で小さい傾向にある。データ数に違いはあるが、この傾向はセクション 6 と類似しており、 図 5.1-72 では縦軸方向にばらつきがやや大きい分布となっている。また、含水比は 65 %(=13/20) で 14±2 %以内にある。





表 5.1-21 Sec.7:乾燥密度と含水比の分布

| 乾燥 | 密度 | 含7. | 大比 |
|------------|-------|------|------|
| (Mg/m^3) | | (%) | |
| 平均值 | 1.688 | 平均值 | 15.0 |
| 中央値 | 1.698 | 中央値 | 15.3 |
| 標準偏差 | 0.095 | 標準偏差 | 1.60 |
| 変動係数 | 0.056 | 変動係数 | 0.11 |
| 最大値 | 1.839 | 最大値 | 17.5 |
| 最小値 | 1.508 | 最小値 | 12.2 |
| 幅 | 0.331 | 幅 | 5.3 |
| 標本数 | 20 | 標本数 | 20 |

 $14 \pm 2\%$

図 5.1-70 サンプリング孔縦断面図





図 5.1-72 Sec.7:含水比-乾燥密度関係

図 5.1-73 に示すように、当セクションは No.2~4 の最も孔口側に出現する。データ数は 12 で ある。表 5.1-22 および図 5.1-74 に示すように、乾燥密度は平均値 1.714 Mg/m³、標準偏差 0.058 Mg/m³、含水比は平均値 15.8%、標準偏差 1.43%であった。データ数は少ないが、当セクション では平均値が乾燥密度および含水比ともに全体よりも大きいのが特徴である。図 5.1-75 によれ ば含水比は 67%(=8/12)で 14±2%以内にある。



表 5.1-22 Sec.8:乾燥密度と含水比の分布

| 乾燥 | 密度 | 含7. | 大比 |
|----------------------|-------|-------------------|------|
| (Mg/m ³) | | (%) | |
| 平均值 | 1.714 | 平均 <mark>値</mark> | 15.8 |
| 中央值 | 1.700 | 中央 <mark>値</mark> | 15.3 |
| 標準偏差 | 0.058 | 標準偏差 | 1.43 |
| 変動係数 | 0.034 | 変動係数 | 0.09 |
| 最大値 | 1.845 | 最大值 | 18.6 |
| 最小値 | 1.625 | 最小值 | 14.3 |
| 幅 | 0.220 | 幅 | 4.3 |
| 標本数 | 12 | 標本数 | 12 |

図 5.1-73 サンプリング孔縦断面図



図 5.1-75 Sec.8:含水比-乾燥密度関係

c)粒度

• No.1

No.1 でサンプリングした試料は表 5.1-23 に示す位置で粒度試験を行った。図 5.1-76 には、 各試料の粒径加積曲線を示す。曲線の上下限をなしているのは 1-⑤および 1-⑨である。これらは セクション 3、6 およびセクション 2、3 の境界に近い位置に相当する。

| 学和地口 | 深度 | セクショ |
|-----------------|-------------|--------|
| 武 仲 留 万 | (m) | \sim |
| 1-① | 0.17 | |
| 1-2 | 0.30 | 6 |
| 1-3 | 0.62 | 0 |
| 1-④ | 0.72 | |
| <u>1-5</u> | <u>1.17</u> | |
| 1-6 | 1.32 | 2 |
| 1-⑦ | 1.40 | 5 |
| 1-⑧ | 1.82 | |
| <u>1-9</u> | <u>2.27</u> | |
| 1-10 | 2.57 | 2 |
| 1-11 | 2.72 | 2 |
| 1-12 | 2.87 | |
| 1-13 | 3.12 | |
| 1-14 | 3.37 | 2 |
| 1-15 | 3.72 | 2 |
| 1-16 | 3.82 | |

表 5.1-23 No.1: 粒度試験位置





No.2 孔でサンプリングした試料は、表 5.1-24 に示す位置で粒度試験を行った。図 5.1-77 に No.2 における粒径加積曲線を示す。

2-① (セクション 8) は他の曲線からやや離れている。2-⑤ (セクション 6) および⑬ (セクシ ョン 4) は曲線群の上限をなしている。2-⑤はセクション 5 との境界に比較的近い位置にある相 当する。

| ⇒4×1 平 日 | 深度 | セクショ |
|--------------|-------------|----------|
| 武科省方 二 | (m) | <u> </u> |
| <u>2-(1)</u> | <u>0.05</u> | 8 |
| 2-② | 0.20 | 7 |
| 2-③ | 0.63 | |
| 2-④ | 0.88 | 6 |
| <u>2-5</u> | <u>1.05</u> | 0 |
| 2-6 | 1.28 | |
| 2-⑦ | 1.68 | |
| 2-⑧ | 1.93 | 5 |
| 2-9 | 2.05 | |
| 2-10 | 2.35 | |
| 2-11) | 2.68 | |
| 2-12 | 2.93 | |
| <u>2-13</u> | <u>3.10</u> | 4 |
| 2-14 | 3.33 | |
| 2-15 | 3.63 | |
| 2-16 | 3.78 | |

表 5.1-24 No.2: 粒度試験位置





No.3 孔でサンプリングした試料は表 5.1-25 に示す位置で粒度試験を行った。図 5.1-78 には No.3 における粒径加積曲線を示す。ここでは、3-②(セクション7)が曲線群の上限をなしてい る。

| ⇒4-約1-42-日 | 深度 | セクショ |
|------------|-------------|--------|
| 武科奋方 | (m) | \sim |
| 3-① | 0.05 | 8 |
| <u>3-②</u> | <u>0.30</u> | 7 |
| 3-③ | 0.58 | |
| 3-④ | 0.88 | 6 |
| 3-5 | 1.08 | |
| 3-6 | 1.40 | |
| 3-⑦ | 1.60 | |
| 3-⑧ | 1.78 | 5 |
| 3-9 | 2.18 | |
| 3-10 | 2.25 | |
| 3-11 | 2.63 | |
| 3-12 | 2.85 | |
| 3-13 | 3.10 | 4 |
| 3-14 | 3.35 | 4 |
| 3-15 | 3.60 | |
| 3-16 | 3.85 | |

表 5.1-25 No.3: 粒度試験位置





No.4 孔でサンプリングした試料は表 5.1-26 に示す位置で粒度試験を行った。図 5.1-79 には No.4 における粒径加積曲線を示す。曲線の上限をなしているのは 4-⑨(セクション 5)で、採取 位置はセクション 5、6 の境界付近に近い。

| 討料釆号 | 深度 | セクショ |
|-------------|-------------|--------|
| 武科雷方 | (m) | \sim |
| 4- ① | 0.08 | o |
| 4-2 | 0.35 | 0 |
| 4- ③ | 0.55 | 7 |
| 4-④ | 0.75 | / |
| 4-5 | 1.13 | |
| 4- 6 | 1.33 | 6 |
| 4-⑦ | 1.68 | 0 |
| 4-⑧ | 1.78 | |
| <u>4-9</u> | <u>2.05</u> | |
| 4-10 | 2.38 | 5 |
| 4-11 | 2.63 | 5 |
| 4-12 | 2.75 | |
| 4-13 | 3.15 | |
| 4-14 | 3.28 | 4 |
| 4-15 | 3.73 | 4 |
| 4-16 | 3.90 | |

表 5.1-26 No.4: 粒度試験位置





d) 細粒分含有率,有効粘土密度

昨年度の埋め戻し材の仕様性能は、施工地点の岩盤の平均的な透水係数値である 1.0×10⁻⁸ m/s 以下(低透水性)と設定することとしていた(戸栗ほか、2018)。これは、図 5.1-80 に示される ベントナイトの有効粘土密度 peと透水係数の関係より、地下水が降水系あるいは海水系のいずれ の場合でも、透水係数が 1.0×10⁻⁸ m/s 以下となるために必要な埋め戻し土(ベントナイト)の pe は 0.4 Mg/m³以上となることから設定したものである。また、埋め戻し材のベントナイト混合率 (=本試験での細粒分含有率 Fe)は、昨年度の施工試験の中で最大乾燥密度が得られる 15%とし ていた。このため、本節では、今年度実施した室内試験結果から、以下の 2 つの観点で埋め戻し 土の仕様性能を検討する。

- 埋め戻し材のベントナイト混合率(=本試験での細粒分含有率 Fc)は、最大の乾燥密 度が得られる 15%に設定され吹き付け施工されている。
- 透水係数を 1.0×10⁻⁸ m/s 以下を確保するために必要な埋め戻し土の有効粘土密度は <u>*pe*</u>≧0.4 Mg/m³である。

なお、有効粘土密度*ρe*は次式で求められる。

$$\rho_e = \frac{\rho_d (100 - R_s)}{100 - \frac{\rho_d R_s}{\rho_s}}$$

ここに、 ρ_d:埋め戻し材 B の乾燥密度(Mg/m³) R_s:砂 B の乾燥質量での混合率(%) ρ_s:砂 B の土粒子密度(= 2.674 Mg/m³)



図 5.1-80 ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係 (NUMO, 2019)

① 全体 (サンプリング孔位置:図 5.1-81)

表 5.1-27 および図 5.1-82 は細粒分含有率試験結果と、それによって算定された有効粘土密度を全データについて統計的にまとめたものである。図 5.1.2-60 から細粒分含有率 F_c は正規分 布に近い分布をなしていることが分かる。有効粘土密度 ρ_e は中央値(0.726)よりもやや右側に 分布が偏っている。目標とすべき品質を $F_c \ge 15$ %および $\rho_e \ge 0.4$ Mg/m³とすると、概ねこれら 以上の値となっている。

次頁以降、細粒分含有率および有効粘土密度を、サンプリング孔別、セクション別にまとめた 結果について述べる。



図 5.1-81 サンプリング孔位置図

| 衣 3.1-2/ 袖杠刀 3 月半 6 月 刈 栢 上 密 度 (注 | 全体) | (全体 | . (| _密度 | 効粘土 | と有効 | `有率 | 分言 | 細粒 | 5.1-27 | 表 |
|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|--------|---|
|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|--------|---|

| 細粒分 | 含有率 | 有効粘 | 土密度 |
|-------------------|------|-------------------------|-------|
| Fc (%) | | $ ho_{e}~({ m Mg/m^3})$ | |
| 平均 <mark>値</mark> | 21.7 | 平均值 | 0.710 |
| 中央 <mark>値</mark> | 21.7 | 中央値 | 0.726 |
| 標準偏差 | 3.16 | 標準偏差 | 0.120 |
| 変動係数 | 0.15 | 変動係数 | 0.170 |
| 最大 <mark>値</mark> | 29.3 | 最大値 | 0.947 |
| 最小 <mark>値</mark> | 11.9 | 最小値 | 0.343 |
| 幅 | 17.4 | 幅 | 0.604 |
| 標本数 | 192 | 標本数 | 192 |



①サンプリング孔別

• No.1

サンプリング孔位置を図 5.1-83 に、表 5.1-28 および図 5.1-84 に細粒分含有率および有効粘 土密度の統計的分布を示す。No.1 では細粒分含有率および有効粘土密度ともに平均値が全体より も小さくなっている。

図 5.1-85 は水平深度と有効粘土密度 p_e ・細粒分含有率 F_e の関係をまとめたものである。図中 に示す横軸に平行な破線は、昨年度実施の締固め試験結果から算定された有効粘土密度(1.0 E_e 、 0.6 E_e 、0.4 E_e)の値である。赤と紫の実線は p_e および F_e (ベントナイト混合率)の要求性能を示 す。同図より、 p_e ではセクション3で2データが、 F_e ではセクション2および3で4データがこ れらを下回っているおり、これらのデータが平均値に影響していると考えられる。



図 5.1-83 サンプリング孔位置図

表 5.1-28 No.1:細粒分含有率と有効粘土密度

| 細粒分 | 含有率 | 有効粘 | 土密度 |
|---------|------|-----------------------|-------|
| F_c (| %) | $ ho_e~({ m Mg/m^3})$ | |
| 平均值 | 20.3 | 平均值 | 0.649 |
| 中央値 | 20.0 | 中央值 | 0.626 |
| 標準偏差 | 3.94 | 標準偏差 | 0.133 |
| 変動係数 | 0.19 | 変動係数 | 0.206 |
| 最大値 | 28.8 | 最大値 | 0.904 |
| 最小值 | 11.9 | 最小值 | 0.343 |
| 幅 | 16.9 | 幅 | 0.561 |
| 標本数 | 48 | 標本数 | 48 |





図 5.1-85 No.1:水平深度 - 有効粘土密度 · 細粒分含有率関係

図 5.1-86 にサンプリング孔位置を、表 5.1-29 および図 5.1-87 に細粒分含有率および有効粘 土密度の統計的分布を示す。No.2 における細粒分含有率および有効粘土密度は、全体の統計値に 対して大きな違いは見られない。

図 5.1-88 は水平深度によるこれら物性値の変化をまとめたものであるが、この図によれば、 全てのデータは $\rho_e \ge 0.40 \text{ Mg/m}^3$ 以上を満たしている。 F_e はセクション 7 で 1 データのみ 15%を 下回っている。



表 5.1-29 No.2:細粒分含有率と有効粘土密度

| 細粒分 | 含有率 | 有効粘 | 土密度 |
|-------------------|------|-----------------------|-------|
| Fc (%) | | $ ho_e~({ m Mg/m^3})$ | |
| 平均 <mark>値</mark> | 21.3 | 平均值 | 0.699 |
| 中央 <mark>値</mark> | 21.3 | 中央値 | 0.699 |
| 標準偏差 | 2.40 | 標準偏差 | 0.095 |
| 変動係数 | 0.11 | 変動係数 | 0.136 |
| 最大值 | 27.8 | 最大値 | 0.858 |
| 最小值 | 12.5 | 最小值 | 0.430 |
| 幅 | 15.3 | 幅 | 0.428 |
| 標本数 | 48 | 標本数 | 48 |



図 5.1-88 No.2:水平深度 - 有効粘土密度 · 細粒分含有率関係

図 5.1-89 にサンプリング孔位置を、表 5.1-30 および図 5.1-90 に細粒分含有率および有効粘 土密度の統計的分布を示す。No.3 では No.2 と同じく細粒分含有率および有効粘土密度は全体の 統計値に対して大きな違いは見られない。

水平深度に対してこれら物性値の変化をまとめた図 5.1-91 によれば、全てのデータで ρe≥0.40 Mg/m³および Fc≥15%を満たしていることが分かる。



細粒分含有率 有効粘土密度 F_{c} (%) $\rho_e \ (Mg/m^3)$ 平均値 平均値 22.30.752中央値 中央値 0.754 22.3標準偏差 2.82標準偏差 0.106 変動係数 0.13 変動係数 0.142 最大値 29.3最大値 0.947 最小值 16.0 最小値 0.437 13.3幅 幅 0.511標本数 48 標本数 48



表 5.1-30 No.3:細粒分含有率と有効粘土密度



図 5.1-91 No.3:水平深度 - 有効粘土密度 · 細粒分含有率関係

図 5.1-92 にサンプリング孔位置を、表 5.1-31 および図 5.1-93 に細粒分含有率および有効粘 土密度の統計的分布を示す。No.4 でも No.2、3 と同様、細粒分含有率および有効粘土密度は全 体分布に対して顕著な特徴はないといえる。

No.4 における水平深度と有効粘土密度・細粒分含有率の関係をまとめた図 5.1-94 によれば、 p_e は全て \geq 0.40 Mg/m³を満たしている。 F_e はセクション 5 で 1 データのみ 15 %を下回っている。



図 5.1-92 サンプリング孔位置図

表 5.1-31 No.4:細粒分含有率と有効粘土密度

| | 1-1-1-11 | | |
|---------|----------|-------------|--------------------|
| 細粒分 | 含有率 | 有効粘 | 土密度 |
| F_c (| %) | ρ_e (M | g/m ³) |
| 平均值 | 22.7 | 平均值 | 0.740 |
| 中央値 | 23.3 | 中央値 | 0.759 |
| 標準偏差 | 2.80 | 標準偏差 | 0.119 |
| 変動係数 | 0.12 | 変動係数 | 0.160 |
| 最大値 | 28.2 | 最大値 | 0.891 |
| 最小値 | 14.1 | 最小值 | 0.483 |
| 幅 | 14.1 | 幅 | 0.408 |
| 標本数 | 48 | 標本数 | 48 |



図 5.1-94 No.4:水平深度 - 有効粘土密度 · 細粒分含有率関係

②セクション別

図 5.1-95 (a) に全体データによるヒストグラムをセクション別に色分けしたものを、図 5.1-95 (b) には平均値に対する最大・最小値を示した図を示す。

図 5.1-95 (b) によれば、平均値では細粒分含有率はセクション8 で最も大きく、セクション 1 が顕著に小さい。これは有効粘土密度でも同様である。ばらつき(標準偏差)については、細 粒分含有率はセクション3、2、7 の順で大きく、セクション8 で最小である。有効粘土密度はセ クション3、7、2 の順で大きく、セクション8 で最小となっている。目標品質を F>15%および p=>0.4 Mg/m³とすると、セクション3、7 および5 でこれらを満足しないデータが含まれること になる。次頁以降に詳細を述べる。



図 5.1-96 に示す通り、当セクションのデータは No.1 孔の 1 つのみである。細粒分含有率および有効粘土密度は、全体平均(21.7%、0.71 Mg/m³)に対していずれも小さい値となっている(表 5.1.1-32)。



表 5.1-32 Sec.1:細粒分含有率と有効粘土密度

| 細粒分 | 含有率 | 有効粘土密度 | |
|---------|------|-------------------|--------------------|
| F_c (| (%) | ρ _e (M | g/m ³) |
| | 15.9 | | 0.513 |
| 標本数 | 1 | 標本数 | 1 |

図 5.1-96 サンプリング孔縦断図

・セクション2

当セクションにおける細粒分含有率および有効粘土密度の統計値を表 5.1-33 および図 5.1-98 に示す(サンプリング孔位置:図 5.1-97)。両物性値の平均値は全体に対してやや小さくなっている。データ数がやや少ないこともあり、ばらつきは大きくヒストグラムは正規分布から大きく外れている。当セクションでは既述のように、1 データのみが *F*<15%となっている(図 5.1-99)。



図 5.1-97 サンプリング孔縦断図

表 5.1-33 Sec.2:細粒分含有率と有効粘土密度

| 細粒分 | 含有率 | 有効粘 | 土密度 |
|-------------------|------|-----------------------|-------|
| Fc (%) | | $ ho_e~({ m Mg/m^3})$ | |
| 平均值 | 20.8 | 平均 <mark>値</mark> | 0.670 |
| 中央 <mark>値</mark> | 19.2 | 中央 <mark>値</mark> | 0.634 |
| 標準偏差 | 4.39 | 標準偏差 | 0.134 |
| 変動係数 | 0.21 | 変動係数 | 0.200 |
| 最大 <mark>値</mark> | 28.8 | 最大値 | 0.904 |
| 最小 <mark>値</mark> | 14.8 | 最小值 | 0.498 |
| 幅 | 14.0 | 幅 | 0.406 |
| 標本数 | 23 | 標本数 | 23 |



図 5.1-99 (再掲) No.1:水平深度 - 有効粘土密度・細粒分含有率関係

当セクションにおける細粒分含有率および有効粘土密度の統計値を以下の表 5.1-34 および図 5.1-101 に示す(サンプリング孔位置:図 5.1-100)。データ数が少ないこともあり、ヒストグラ ムは正規分布から大きく外れている。平均値では細粒分含有率および有効粘土密度ともに全体値 よりも小さくなっている。当セクションでは、既述のように一部のデータで $p_{e}<0.40$ Mg/m³、 $F_{e}<15$ %となっている(図 5.1-101)。



図 5.1-100 サンプリング孔縦断図

| 1-54 000 | .0. 464477 | 0.9 + C.9 | シュロートロング |
|----------|------------|--------------------------|--------------------|
| 細粒分 | 含有率 | 有効粘 | 土密度 |
| F_c (| %) | <i>ρ</i> _e (M | g/m ³) |
| 平均值 | 20.4 | 平均值 | 0.676 |
| 中央値 | 21.7 | 中央値 | 0.743 |
| 標準偏差 | 4.69 | 標準偏差 | 0.176 |
| 変動係数 | 0.23 | 変動係数 | 0.260 |
| 最大値 | 26.3 | 最大値 | 0.857 |
| 最小値 | 11.9 | 最小値 | 0.343 |
| 幅 | 14.4 | 幅 | 0.514 |
| 標本数 | 12 | 標本数 | 12 |

表 5.1-34 Sec.3:細粒分含有率と有効粘土密度


当セクションにおける細粒分含有率および有効粘土密度の統計値を表 5.1-35 および図 5.1-103 に示す(サンプリング孔位置:図 5.1-102)。細粒分含有率のヒストグラムは全体データ によるものより右側にやや移動し、平均値が1%程度大きくなっている。有効粘土密度は、全体 に対するものと大きな違いはない。前出の通り、このセクションでは全てのデータにおいて $p_e \ge 0.40 \text{ Mg/m}^3$ および $F_c \ge 15$ %を満たしている(図 5.1-104 参照)。



表 5.1-35 Sec.4:細粒分含有率と有効粘土密度

| 細粒分 | 含有率 | 有効粘土密度 | | |
|-------------------|------|-----------------------|-------|--|
| F_c (| %) | $ ho_e~({ m Mg/m^3})$ | | |
| 平均值 | 22.6 | 平均值 | 0.744 | |
| 中央值 | 22.0 | 中央値 | 0.734 | |
| 標準偏差 | 2.51 | 標準偏差 | 0.100 | |
| 変動係数 | 0.11 | 変動係数 | 0.134 | |
| 最大 <mark>値</mark> | 29.3 | 最大値 | 0.947 | |
| 最小 <mark>値</mark> | 17.8 | 最小值 | 0.531 | |
| 幅 | 11.5 | 幅 | 0.416 | |
| 標本数 | 51 | 標本数 | 51 | |





図 5.1-104 (再掲)水平深度 - 有効粘土密度·細粒分含有率関係

当セクションにおける細粒分含有率および有効粘土密度の統計値を以下の表 5.1-36 および図 5.1-106 に示す(サンプリング孔位置:図 5.1-105)。細粒分含有率の平均値は全体値に一致し、 ばらつきも小さい。有効粘土密度の平均値は全体値にほぼ同じである。標準偏差は全体値よりも やや小さいが、ヒストグラムは正規分布からやや外れている。

当セクションにおいて、細粒分含有率は1データのみ $F_e < 15\%$ となっている。有効粘土密度は 全てのデータで $\rho_e \ge 0.40 \text{ Mg/m}^3$ を満たしている(図 5.1-106)。



表 5.1-36 Sec.5:細粒分含有率と有効粘土密度

| 細粒分 | 含有率 | 有効粘土密度 | | |
|-------------------|------|-----------------------|-------|--|
| F_c (| %) | $ ho_e~({ m Mg/m^3})$ | | |
| 平均 <mark>値</mark> | 21.7 | 平均 <mark>値</mark> | 0.712 | |
| 中央 <mark>値</mark> | 21.1 | 中央 <mark>値</mark> | 0.726 | |
| 標準偏差 | 2.79 | 標準偏差 | 0.098 | |
| 変動係数 | 0.13 | 変動係数 | 0.137 | |
| 最大值 | 28.2 | 最大值 | 0.878 | |
| 最小 <mark>値</mark> | 14.1 | 最小 <mark>値</mark> | 0.483 | |
| 幅 | 14.1 | 幅 | 0.395 | |
| 標本数 | 38 | 標本数 | 38 | |



当セクションにおける細粒分含有率および有効粘土密度の統計値を以下の表 5.1-37 および図 5.1-108 に示す (サンプリング孔位置:図 5.1-107)。No.1、No.3 および No.4 孔の当該区間 (No.2 はデータなし)では、全てのデータで $F_c \ge 15$ %および $\rho_e \ge 0.40$ Mg/m³となっている (図 5.1-108)。



表 5.1-37 Sec.6:細粒分含有率と有効粘土密度

| 細粒分 | 含有率 | 有効粘土密度 | | |
|-------------------|------|-----------------------|-------|--|
| F_c (| (%) | $ ho_e~({ m Mg/m^3})$ | | |
| 平均值 | 21.1 | 平均 <mark>値</mark> | 0.670 | |
| 中央値 | 20.9 | 中央 <mark>値</mark> | 0.662 | |
| 標準偏差 | 2.45 | 標準偏差 | 0.113 | |
| 変動係数 | 0.12 | 変動係数 | 0.169 | |
| 最大值 | 25.6 | 最大値 | 0.888 | |
| 最小 <mark>値</mark> | 16.1 | 最小值 | 0.437 | |
| 幅 | 9.5 | 幅 | 0.452 | |
| 標本数 | 35 | 標本数 | 35 | |



当セクションにおける細粒分含有率および有効粘土密度の統計値を以下の表 5.1-38 および図 5.1-110 に示す (サンプリング孔位置:図 5.1-109)。No.2~4 孔の当該区間では、No.2 孔の1デ ータで F<15%となっている他は F>15%および pe>0.40 Mg/m³を満足している(図 5.1-110)。



表 5.1-38 Sec.7:細粒分含有率と有効粘土密度

| 細粒分 | 含有率 | 有効粘土密度 | | |
|-------------------|------|-------------------------|-------|--|
| F_c (| (%) | $ ho_{e}~({ m Mg/m^3})$ | | |
| 平均值 | 21.2 | 平均值 | 0.717 | |
| 中央値 | 22.2 | 中央值 | 0.746 | |
| 標準偏差 | 3.28 | 標準偏差 | 0.147 | |
| 変動係数 | 0.15 | 変動係数 | 0.205 | |
| 最大值 | 25.5 | 最大値 | 0.891 | |
| 最小 <mark>値</mark> | 12.5 | 最小值 | 0.430 | |
| 幅 | 13.0 | 幅 | 0.461 | |
| 標本数 | 20 | 標本数 | 20 | |

図 5.1-109 サンプリング孔縦断図



当セクションにおける細粒分含有率および有効粘土密度の統計値を以下の表 5.1-39 および図 5.1-112 に示す(サンプリング孔位置:図 5.1-111)。No.2~4 孔の当該区間では、全てのデータ で *Fc*≧15 %および *pe*≧0.40 Mg/m³となっている(図 5.1-112)。



表 5.1-39 Sec.8:細粒分含有率と有効粘土密度

| 細粒分 | 含有率 | 有効粘土密度 | | |
|-------------------|------|-----------------------|-------|--|
| F_c (| (%) | $ ho_e~({ m Mg/m^3})$ | | |
| 平均值 | 23.7 | 平均 <mark>値</mark> | 0.794 | |
| 中央値 | 22.9 | 中央 <mark>値</mark> | 0.810 | |
| 標準偏差 | 2.20 | 標準偏差 | 0.063 | |
| 変動係数 | 0.09 | 変動係数 | 0.079 | |
| 最大 <mark>値</mark> | 27.8 | 最大値 | 0.874 | |
| 最小 <mark>値</mark> | 21.6 | 最小值 | 0.677 | |
| 幅 | 6.2 | 幅 | 0.196 | |
| 標本数 | 12 | 標本数 | 12 | |



381

e) メチレンブルー吸着量

表 5.1-40 にメチレンブルー吸着量(MBC)測定結果をまとめる。密度試験、透水試験を実施 し、残った部分で測定を実施した。同表には各孔の測定位置も示している。測定に際しては、試 料を5g採取し、それを乾燥・粉砕し、その試料のうち1gを用いメチレンブルー吸着量の測定 を行った。通常の測定は0.5g程度で実施するが、ベントナイト混合率であり、混合率が15%程 度と低いため測定には1gを用いた。ベントナイト混合率の算出は、ベントナイト混合率の測定 値をベントナイトの測定値で除して求めるが、今回は、施工試験に使用したベントナイトが残っ ていないため、同等の品質のベントナイトを用意し、この測定値(80 mmol/100g)で除して求め た。表には、メチレンブルー吸着量の測定値と算出したベントナイト混合率の値も示している。

算出されたベントナイト混合率のヒストグラムを図 5.1-113 に示す。細粒分含有率の測定結果 (図 5.1-82)と比較すると、平均値は低く、幅も狭い。試料の量が少ないこと、粉砕過程が必要 なこと、等からこのような結果になるものと推察される。今回は、試料の残量が少なかったこと もあり、十分なデータが得られなかったが、実際には1地点の採取量(今回は 5g)を増して、粉 砕を行う必要もあると思われる。

図 5.1-114~図 5.1-117 にメチレンブルー吸着量によりベントナイト混合率を推定した結果を 細粒分含有率試験結果とともに示す。図からメチレンブルー吸着量による推定値は、細粒分含有 率試験結果の下限付近となっているが、水平深度により変化する傾向は整合していることが分か る。



図 5.1-113 メチレンブルー吸着量測定によるベントナイト混合率の測定結果

|--|

| 孔 No. | 試料 No. | 位置 (m) | MB値 (mmol/100g) | 混合率 (%) | 孔 No. | 試料 No | 位置 (m) | MB値 (mmol/100g) | 混合率 (%) |
|----------|-----------|------------|--------------------|------------|----------|----------|-----------|--------------------|------------|
| | 1-1 | 0.5m | 12 | 15.0 | | 3-1 | 0.05m | 11 | 13.8 |
| | 1-2 |]] | 12 | 15.0 | | 3-2 | 11 | 12 | 15.0 |
| | 1-3 | 0.7~0.8m | 13 | 16.3 | • | 3-3 | 0.80m | 15 | 18.8 |
| | 1-4 |]] | 12 | 15.0 | | 3-4 | 11 | 12 | 15.0 |
| | 1-5 | 1.88~1.91m | 15 | 18.8 | | 3-5 | 1.0m | 11 | 13.8 |
| | 1-6 | 11 | 13 | 16.3 | | 3-6 | 11 | 13 | 16.3 |
| | 1-7 | 11 | 14 | 17.5 | | 3-7 | 1.5m | 14 | 17.5 |
| 1 | 1-8 | 11 | 14 | 17.5 | 2 | 3-8 | 11 | 13 | 16.3 |
| | 1-9 | 2.12~2.20m | 14 | 17.5 | 3 | 3-9 | 2.4~2.5m | 17 | 21.3 |
| | 1-10 | 11 | 12 | 15.0 | | 3-10 | 11 | 14 | 17.5 |
| | 1-11 | 11 | 15 | 18.8 | | 3-11 | 2.5m | 16 | 20.0 |
| | 1-12 | 11 | 16 | 20.0 | | 3-12 | 11 | 16 | 20.0 |
| | 1-13 | 3.0m | 13 | 16.3 | | 3-13 | 3.9m | 13 | 16.3 |
| | 1-14 | 11 | 15 | 18.8 | | 3-14 | 11 | 13 | 16.3 |
| | 1-15 | 3.5m | 16 | 20.0 | | 3-15 | 11 | 12 | 15.0 |
| | 1-16 | 11 | 16 | 20.0 | | 3-16 | 11 | 14 | 17.5 |
| | 2-1 | 0.5m | 13 | 16.3 | | 4-1 | 0.4m | 13 | 16.3 |
| | 2-2 | 11 | 15 | 18.8 | | 4-2 | 11 | 14 | 17.5 |
| | 2-3 | 0.8m | 10 | 12.5 | | 4-3 | 0.9~1.0m | 14 | 17.5 |
| | 2-4 | 11 | 13 | 16.3 | | 4-4 | 11 | 14 | 17.5 |
| | 2-5 | 1.6m | 13 | 16.3 | | 4-5 | 1.0m~ | 14 | 17.5 |
| | 2-6 | 11 | 12 | 15.0 | | 4-6 | 11 | 16 | 20.0 |
| | 2-7 | 1.9m | 16 | 20.0 | | 4-7 | 1.5m | 11 | 13.8 |
| 2 | 2-8 | 11 | 13 | 16.3 | 4 | 4-8 | ,,, | 12 | 15.0 |
| | 2-9 | 2.0~3.0m | 12 | 15.0 | 4 | 4-9 | 2.5m | 16 | 20.0 |
| | 2-10 | 11 | 11 | 13.8 | | 4-10 | 11 | 12 | 15.0 |
| | 2-11 | 11 | 13 | 16.3 | | 4-11 | 2.9m | 14 | 17.5 |
| | 2-12 | 11 | 11 | 13.8 | | 4-12 | 11 | 12 | 15.0 |
| | 2-13 | 3.5m | 10 | 12.5 | | 4-13 | 3.4m | 15 | 18.8 |
| | 2-14 | 11 | 10 | 12.5 | | 4-14 | 11 | 15 | 18.8 |
| | 2-15 | 3.9m | 17 | 21.3 | | 4-15 | 3.8m | 16 | 20.0 |
| | 2-16 | 11 | 15 | 18.8 | | 4-16 | 11 | 16 | 20.0 |



図 5.1-114 No.1:メチレンブルー吸着量測定によるベントナイト混合率の推定



図 5.1-115 No.2:メチレンブルー吸着量測定によるベントナイト混合率の推定



図 5.1-116 No.3:メチレンブルー吸着量測定によるベントナイト混合率の推定



図 5.1-117 No.4:メチレンブルー吸着量測定によるベントナイト混合率の推定

f) 透水係数

今年度の透水試験結果を表 5.1-41 にまとめた。試験終了時の供試体飽和度は 100%である。表 5.1-42 は昨年度の試験結果であるが、今回の詳細調査で得られた透水係数は昨年度試験結果に近 い値となっている。

なお、透水試験にあたっては、同一深度の試料を用いて細粒分含有率を測定している。図 5.1-118~図 5.1-121 に、孔口からの水平深度と細粒分含有率 Fcおよびこれから算定される有効 粘土密度 peの関係を示す。図 5.1-118 における No.1 の乾燥密度は全体分布では上限値となって いるが、それ以外では前節までにまとめた Fcおよび peの分布範囲内にあることが確認できる。

| 孔 No. | 供試体 位置(m) | 乾燥密度 (Mg/m ³) | 含水比(%) | 細粒分 含有率 (%) | 有効粘土 密度 (Mg/m ³) | 有効粘土 湿潤密度 (Mg/m ³) | 透水係数 (m/s) |
|-------|--------------|------------------------------|--------|-------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------|
| | 0.46 | 1.574 | 14.9 | 20.3 | 0.602 | 1.044 | 8.05E-11 |
| | 1.70 | 1.682 | 16.3 | 23.3 | 0.757 | 1.287 | 6.40E-11 |
| No. 1 | 2.62 | 1.769 | 16.7 | 27.4 | 0.933 | 1.501 | 1.59E-11 |
| | 3.60 | 1.777 | 14.7 | 25.6 | 0.900 | 1.416 | 1.94E-11 |
| | 平均 | 1.701 | 15.7 | 24.2 | 0.798 | 1.312 | 4.50E-11 |
| | 0.34 | 1.650 | 15.0 | 20.0 | 0.652 | 1.140 | 5.17E-11 |
| | 1.37 | 1.680 | 14.2 | 20.2 | 0.681 | 1.159 | 5.61E-11 |
| No. 2 | 2.29 | 1.637 | 13.1 | 19.5 | 0.629 | 1.052 | 1.63E-10 |
| | 3.22 | 1.565 | 12.5 | 20.5 | 0.600 | 0.966 | 7.48E-11 |
| | 平均 | 1.633 | 13.7 | 20.1 | 0.640 | 1.079 | 8.64E-11 |
| | 0.24 | 1.598 | 12.3 | 18.9 | 0.586 | 0.967 | 7.82E-11 |
| | 1.27 | 1.768 | 15.1 | 22.2 | 0.808 | 1.358 | 3.47E-11 |
| No. 3 | 2.43 | 1.698 | 13.4 | 20.3 | 0.698 | 1.159 | 4.24E-11 |
| | 3.24 | 1.706 | 14.7 | 19.8 | 0.692 | 1.205 | 4.52E-11 |
| | 平均 | 1.693 | 13.9 | 20.3 | 0.696 | 1.172 | 5.01E-11 |
| | 0.87 | 1.755 | 16.3 | 24.9 | 0.862 | 1.426 | 2.47E-11 |
| No. 4 | 1.26 | 1.693 | 15.4 | 23.5 | 0.772 | 1.277 | 3.49E-11 |
| | 2.43 | 1.710 | 14.8 | 25.5 | 0.833 | 1.316 | 5.23E-11 |
| | 3.20 | 1.629 | 13.8 | 23.8 | 0.724 | 1.143 | 7.86E-11 |
| 1 1 | 平均 | 1.697 | 15.1 | 24.4 | 0.797 | 1.291 | 4.76E-11 |
| 全体 | 、平均 | 1.681 | 14.6 | 22.2 | 0.733 | 1.214 | 5.73E-11 |

表 5.1-41 透水試験結果(飽和度 100%)

表 5.1-42 昨年度の透水試験結果

| | 埋め戻し材 B |
|----------------------------|--------------------------|
| 含水比上部(%) | 15.7 |
| 含水比上部(%) | 20.8 |
| 飽和度 (%) | 83.0 |
| 透水係数 (m/s) | 4. 2×10^{-11} * |
| 乾燥密度(Mg/m ³) | 1. 681 |
| 有効粘土密度(Mg/m ³) | 0.542 |

※ 63.9~95.9 day から算出



図 5.1-118 No.1・No.2:水平深度 - 乾燥密度・含水比関係



図 5.1-119 No.3 · No.4: 水平深度 - 乾燥密度 · 含水比関係



図 5.1-120 No.1 · No.2: 水平深度 - 有効粘土密度 · 細粒分含有率関係



図 5.1-121 No.3 · No.4: 水平深度 - 有効粘土密度 · 細粒分含有率関係

・透水係数の変動

乾燥密度および有効粘土密度と透水係数の関係を、図 5.1-122 に示す。同図より乾燥密度が大 きくなる程透水係数は小さくなっていくのが分かる。有効粘土密度と透水係数の関係については、 図 5.1-123 に既往データとの比較を行ったものを示す。図 5.1-123(a)では海水系地下水と降水系 地下水の中間にあり、図 5.1-123(b)では同程度の有効粘土密度においてはやや大きい傾向にある ことが分かる。

図 5.1-124 には水平深度と透水係数の関係をサンプリング孔別(セクション別)に示す。この 図の2番目(No.2、3)において、セクション5のセクション4側境界で1.63×10⁻¹⁰m/s に低下 している(No.2データ)。この他のデータについては、深度やセクションによる偏向性は特に見 られない。



図 5.1-122 乾燥密度·有効粘土密度-透水係数関係





・透水係数の経時変化

図 5.1-125 および図 5.1-126 に透水係数の経時変化をまとめた。試験に要した期間は約 60 日 (1400~1500hr)である。透水係数および動水勾配は早い場合(No.3)では 25 日経過時に、遅 い場合(No.1、4)では 40 日経過後に定常状態となっている。



図 5.1-126 No.3,4: 透水係数・動水勾配の経時変化

(7) 昨年度設定した品質管理目標値に対する詳細検討

ここでは、今年度の室内試験結果に基づき、昨年度の吹付け施工時の設定目標値から外れるデ ータに着目して分析した。その結果を以下に述べる。

① 含水比

(a) 設定目標範囲外の試料

昨年度の吹付け施工では、適正な乾燥密度を得るために、施工前の埋め戻し材の含水比を 14±2%、すなわち12~16%とすることを目標値とした。施工後の本調査において、この設定範 囲外となったデータの分布を図 5.1-127 および図 5.1-128 に示した。表 5.1-43 にはそれらの含 水比データをまとめている。これらの図表より、設定範囲外のデータが多い傾向にあるのは以下 のような箇所である。

- ・ 土留め壁に近いセクション7、8の下半部(No.2、4)
- ・ 上下のセクション境界に近いセクション1、2、3上部(No.1)
- ・ 各セクション前後の境界付近
- ・ 水平方向に施工範囲が大きいセクション 2、4 の中間部 (No.1、2、3)

含水比が設定値よりも高い場合(>16%)には乾燥密度も高くなるため、透水性の観点からの 影響は小さい。しかし、設定値よりも小さい場合(<12%)には乾燥密度が小さくなり、透水性 に危険側の影響を与える可能性がある。このようなデータは、No.1 孔のセクション 2、3 に多 い。



3.0.1-127 日水比が改定日保範囲がの成料力



| ZI No | 討約 No | 孔口距離 | 乾燥密度 | 含水比 | ヤクション |
|--------|------------------------------------|-------|------------------|------|-------|
| 31 110 | #*\14 NO | (m) | $ ho_d (Mg/m^3)$ | w(%) | |
| | <u>(4</u>)-2 | 0.77 | 1.445 | 16.9 | 6 |
| | 5-1 | 1.07 | 1.464 | 9.5 | |
| | 5-2 | 1.12 | 1.478 | 8.5 | |
| | 5-3 | 1.17 | 1.607 | 10.3 | 3 |
| | ⑦-3 | 1.62 | 1.717 | 16.6 | |
| | 8-1 | 1.77 | 1.646 | 16.1 | |
| | 9-2 | 2.22 | 1.627 | 16.2 | |
| | 10-1 | 2.32 | 1.684 | 9.7 | |
| | 10-2 | 2.37 | 1.725 | 16.3 | |
| | 11-1 | 2.67 | 1.561 | 10.7 | |
| No. 1 | 11-2 | 2.72 | 1.588 | 11.3 | |
| | 12-1 | 2.82 | 1.626 | 11.8 | |
| | 12-2 | 2.87 | 1.615 | 11.6 | 9 |
| | 13-1 | 3.07 | 1.667 | 19.8 | 2 |
| | 13-2 | 3.12 | 1.627 | 20.0 | |
| | 13-3 | 3.17 | 1.653 | 20.2 | |
| | 14-1 | 3. 32 | 1.720 | 16.8 | |
| | <u>(14</u> -2 | 3. 37 | 1.705 | 16.9 | |
| | <u>(14</u> -3 | 3.42 | 1.733 | 17.1 | |
| | 16-2 | 3.87 | 1.591 | 21.0 | |
| | 16-3 | 3.92 | 1.602 | 21.3 | 1 |
| | 1-1 | 0.05 | 1.692 | 18.1 | |
| | 1-2 | 0.10 | 1.681 | 18.6 | 8 |
| No. 2 | <u>(1)-3</u> | 0.15 | 1.738 | 17.1 | |
| | (2)-3 | 0.40 | 1.692 | 17.1 | 7 |
| | 8-1 | 1.78 | 1.601 | 11.9 | 5 |
| | (15-1 | 3. 58 | 1.591 | 11.6 | 4 |
| | (2)-2 | 0.35 | 1.465 | 11.8 | 6 |
| | (4)-1 | 0.83 | 1.615 | 16.4 | |
| | 6-1 | 1.35 | 1.712 | 16.1 | _ |
| No. 3 | (7)-3 | 1.65 | 1.741 | 16.4 | 5 |
| | 10-2 | 2.30 | 1.784 | 11.8 | |
| | (13-3 | 3.15 | 1.748 | 17.0 | |
| | | 3.30 | 1.646 | 17.5 | 4 |
| | | 3.90 | 1.622 | 16.2 | 0 |
| | <u> </u> | 0.18 | 1.690 | 16.4 | 8 |
| | 3-1 | 0.55 | 1.709 | 16.2 | |
| | 3-2 | 0.60 | 1.720 | 17.0 | |
| | <u> </u> | 0.03 | 1.039 | 16.7 | 7 |
| | <u>4</u> -1 | 0.70 | 1.740 | 16.6 | |
| | (4) 2 (1)-3 | 0.75 | 1.773 | 16.0 | |
| | (1) (5) -1 | 1.08 | 1.783 | 16.1 | |
| No. 4 | 6-3 | 1.00 | 1.774 | 16.4 | 6 |
| | <u> </u> | 1. 13 | 1.670 | 16.5 | |
| | <u> </u> | 9 10 | 1.007 | 0.4 | |
| | (1)-2 | 2.10 | 1.001 | 20.8 | |
| | (12)-2 | 2.00 | 1.570 | 11 9 | 5 |
| | 12-3 | 2.00 | 1.630 | 16.2 | |
| | (13-2 | 3 10 | 1.625 | 17.9 | |
| | (15)-1 | 3. 63 | 1.692 | 11.9 | 4 |
| 1 | · · · | 0.00 | 1 | | |

表 5.1-43 含水比が設定目標範囲外のデータ(乾燥密度は参考値)

(b)昨年度含水比との比較

サンプリング孔別に昨年度の含水比との比較を図 5.1-129 および図 5.1-130 に示す。図 5.1-129 では、No.1 では深部 (3.0~3.5 m) で今年度の含水比が大きくなっている。No.2 では孔 口近く (0.0~0.7 m) で含水比の増加が見られる。No.3、4 においては両者に有意な差は見られ ない。

図 5.1-131 は埋め戻し施工試験前の設備横坑切羽(サンプリング孔最深部)の状況で、切羽左 側および側壁左上で湧水(滲み)がみられていた。また、図 5.1-132 および図 5.1-133 は平成 30 年度の土壌水分計による計測結果で、奥側で飽和度が相対的に高くなっている。No.1 の 3.0~3.5 m は土壌水分計の M-5 に近く、No.2 の 0.0~0.7 m は M-10 に近い。No.3 の最深部は図 5.1.1-109 における切羽湧水箇所に近い。

一方、図 5.1-130 に示すように、No.3 の 4 m 付近は含水比の増加は見られなかった。このことから、切羽湧水が埋め戻し材中に均等に浸透しながら、土留め壁側に向かって浸透してきている可能性は低いといえる。したがって、No.1 の 3.0~3.5 m および No.2 の 0.0~0.7 m に見られる含水比の増加は、切羽湧水の影響である可能性は低く、施工時の品質のばらつきの可能性もある。



図 5.1-129 昨年度埋め戻し材施工時の調査結果との比較(含水比: No.1, No.2)



図 5.1-130 昨年度埋め戻し材施工時の調査結果との比較(含水比: No.3, No.4)



図 5.1-131 設備横坑切羽の地質状況(原子力機構・原環センター、2019)



図 5.1-132 土壌水分計の計測結果(原子力機構・原環センター、2019)



コンター作成断面



図 5.1-133 土壌水分の経時変化(原子力機構・原環センター、2019)

2 粒度

図 5.1-134 に粒径加積曲線を再度示す。粒径分布が他と多少異なっているとみられる試料は 1-⑤、1-⑨、2-①、2-⑤、2-⑬、3-②および 4-⑨であり、それを表 5.1-44 にまとめた。また、これ らの採取深度を図 5.1-135 にプロットした。同図より、これらの試料はセクションの上下もしく は前後の境界に比較的近くおよびセクション4の中間部(2-⑬)に位置していることがわかる。



| No | 試料番号 | 深度(m) | セクション |
|----|------|-------|-------|
| 1 | 1-5 | 1.17 | 3 |
| 1 | 1-9 | 2.27 | 2 |
| | 2-① | 0.05 | 8 |
| 2 | 2-5 | 1.05 | 6 |
| | 2-13 | 3.1 | 4 |
| 3 | 3-2 | 0.3 | 7 |
| 4 | 4-9 | 2.05 | 5 |

表 5.1-44 平均的粒度分布と異なる試料



図 5.1-135 平均的粒度分布でない試料の分布

③ 細粒分含有率·有効粘土密度

細粒分含有率 (=ベントナイト混合率) が 15%より小さいもしくは有効粘土密度が 0.40 Mg/m³ より小さいデータを表 5.1-45 にまとめた。これらを図にしたものが、図 5.1-136 および図 5.1-137 である。これらの図表より、 F_c および ρ_e が設定目標範囲外となっているのは、セクショ ン 2、3の上部、セクション 5、6の境界部およびセクション 7の下部に位置していることがわか る。

また、表 5.1-46 および図 5.1-138 に細粒分含有率 *F*_cが 25 %以上となるものも抽出した。これより、*F*_c>25 %となっているのは、セクション前後・上下の境界部付近、セクション 7、8 およびセクション 4、6、8 の中間部付近である。

| 孔 No | 試料 No | 孔口距離 (m) | F _c <15 (%) | <i>Ре</i> (Mg/m ³) | セクション |
|-------|--------------|-------------|---------------------------|-----------------------------------|-------|
| | 5-1 | 1.07 | 13.6 | 0.378 | |
| N- 1 | 5-2 | 1.12 | 11.9 | 0.343 | 3 |
| NO. I | 5-3 | 1.17 | 14.5 | _ | |
| | 10-1 | 2.32 | 14.8 | _ | 2 |
| No. 2 | 2-2 | 0.25 | 12.5 | _ | 7 |
| No. 4 | (9 -2 | 2.10 | 14.1 | — | 5 |

表 5.1-45 F_c・ρ_eが目標設定値範囲外のデータ



図 5.1-136 細粒分含有率が設定範囲外の試料分布



| 孔 No | 試料 No | 孔口距離 (m) | $F_c \ge 25$ (%) | セクション |
|-------|---------------|-------------|------------------|-------|
| No. 1 | 7-3 | 1.62 | 26.3 | 3 |
| | 8-1 | 1.77 | 25.6 | |
| | 9-2 | 2.22 | 28.8 | |
| | 9-3 | 2.27 | 28.7 | 2 |
| | 10-2 | 2.37 | 28.1 | |
| | 14-2 | 3.37 | 25.7 | |
| No. 2 | 1-1 | 0.05 | 27.4 | 8 |
| | 1-2 | 0.10 | 27.8 | |
| No. 3 | ⑦-3 | 1.65 | 25.3 | 5 |
| | 8-1 | 1.73 | 26.8 | |
| | 10-2 | 2.63 | 25.2 | |
| | 13-2 | 3.10 | 25.3 | 4 |
| | 13-3 | 3.15 | 28.2 | |
| | 14-1 | 3.30 | 29.3 | |
| | 14-2 | 3.35 | 25.9 | |
| | 16-2 | 3.90 | 27.4 | |
| No. 4 | 1)-3 | 0.18 | 25.7 | 8 |
| | 3-2 | 0.60 | 25.5 | 7 |
| | 5-1 | 1.08 | 25.1 | |
| | 6-3 | 1.43 | 25.6 | 6 |
| | <u>8</u> -3 | 1.83 | 25.3 | |
| | 10-2 | 2.63 | 25.3 | |
| | <u>(1</u>)–3 | 2.68 | 28.2 | 5 |
| | 12-3 | 2.85 | 25.4 | |
| | 13-2 | 3.10 | 27.6 | |
| | 13-3 | 3.15 | 26.1 | 4 |
| | 15-2 | 3.73 | 25.2 | |
| | 15-3 | 3.78 | 25.3 | |

表 5.1-46 Fc≥25%となるデータ



④ 含水比と細粒分含有率の関係

含水比と細粒分含有率のばらつき(w>16 %、Fc≥15 %)の要因を考察するために、両者の関係を図 5.1-139 にまとめた。なお、No.1 のセクション 1、2 で湧水の影響と思われる 5 データ (細粒分含有率は低く含水比が高い)は削除している。この図より、含水比と細粒分含有率の相関性は高いことが分かる。



図 5.1-139 含水比と細粒分含有率の相関

⑤ 透水係数

透水係数は 1.0×10⁻⁸m/s 以下となることを目標値としている。図 5.1-140 に水平深度による透水係数の分布をまとめた。この図において No.2 孔のデータが相対的に高い値のものを含んでおり、これはセクション 5 のセクション 4 との境界付近にあるデータである。しかし、このデータを含め、全てにおいて透水係数は 1.0×10⁻⁸ m/s 以下を満たしている。



⑥メチレンブルー吸着量によるベントナイト含有率の推定

図 5.1-141 にメチレンブルー吸着量によるベントナイト混合率の推定結果を再度示す。メチ レンブルー吸着量による推定値は、細粒分含有率試験結果よりも小さくなる傾向にあるものの、 ベントナイト混合率が水平深度により変化する傾向は調和的であることが分かった。このため、 メチレンブルー吸着量はベントナイト混合率を把握する指標となり得るものと考える。



(8) 全断面吹付け施工における品質管理手法の検証

前節で実施した昨年度の「小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験」で設定した目標 値をはずれたデータの分析結果に基づき、昨年度提示した全断面吹き付け施工における品質管理 手法を検証した。評価は以下の観点で行った。

- 施工直後に評価した埋め戻し領域内の混合土の密度や含水比分布と室内物性試験結果の比較を通じた、施工における品質管理手法の有効性の再評価
- 前年度実施した室内透水試験結果と室内透水試験結果との比較を通じた、密度と透水係数のバラツキの関係評価と埋め戻し領域の飽和時間の推定
- 上記の結果に基づく、全断面吹き付け施工における留意点の検討

①品質管理手法の有効性の検証

a) 含水比による密度管理

2018 年度の施工では、含水比を最適な乾燥密度が得られるとされる 12±2%に維持することに よって密度を管理することとしたが、今回の 2019 年度における室内試験結果では、含水比は 8.5 ~21.3%の範囲で分布した(図 5.1-142)。

一方で、透水係数の要求性能は 1.0×10⁻⁸ m/s 以下と設定されたのに対し、透水試験では最大で も 1.63×10⁻¹⁰ m/s となった。これより、今回確認された含水比のばらつきは、透水性の要求性能 に抵触するには至らなかったと考える。言い換えれば、埋め戻し材の含水比を 12±2 %に維持し 施工することは、透水性能を保証する上で安全側の基準であったといえる。



b) 含水比管理による細粒分含有率・有効粘土密度

細粒分含有率 F_c および有効粘土密度 ρ_e は 15 %および 0.40 Mg/m³以上となることが求められ ているが、前節までの検討で、設定目標範囲外の値をしめす箇所が把握された。特に F_c が高い (>25%)箇所は図 5.1-143 に示す通りであり、 F_c が高い箇所では材料分離が生じていると推定 される。図 5.1-144 によれば、含水比 $w \ge F_c$ は相関性が高いことが分かった。したがって、w $\ge F_c$ がばらつく (w、 F_c が大) 要因としては、吹き付け時に砂分がリバウンドし、細粒分の相対 的な増加に伴い含水比も大きくなったことが考えられる。

図 5.1-145 より、含水比の平均値および最大・最小値が 14±2 %以内となる理想形に最も近いのはセクション6(標本数 35)でのデータである。このセクションの Feおよび peの分布を同図で見ると、最小値は 15%および 0.40 Mg/m³をクリアしながらも、大きく超えてはいない。細粒分含有率・有効粘土密度が多く混入することは使用するベントナイト量が増加することになり、コスト増大の要因となる。したがって、wを 14±2%に設定したことは、Feおよび peを適正な水準に保つ上で妥当な基準であったと判断される。





図 5.1-145 (再掲)細粒分含有率・有効粘土密度の平均値と最大・最小値

c) メチレンブルー吸着量による細粒分含有率の推定

メチレンブルー吸着量により細粒分含有率(=ベントナイト混合率)を推定した結果は、実際の 細粒分含有率よりもやや小さくなる(約5%)傾向にある。したがって、メチレンブルー吸着量 がベントナイト混合率の有効な推定値となるためには、両者を関連付ける補正が必要になると考 えられる。

なお、前節において、含水比が平成 30 年度の施工時の室内試験結果と比較して増加が見られ る箇所において、湧水箇所や土壌水分計による飽和度の経時変化から考察を行った結果、平成 31 (令和元)年度の含水比が増加しているのは埋め戻し前の空洞壁面から生じていた湧水の影響で ある可能性は低く、含水比のばらつきの範囲に収まるものであると考えられる。この結果は、水 圧計および土圧計の計測結果とは整合するため、数値解析的な検討により埋め戻し材中の飽和度 経時変化について試行的に検討した。その結果を以下に述べる。

d) 浸透流解析による推定

埋め戻し領域の飽和状態の変化を浸透流解析により推定した。解析対象は図 5.1-146 に示す坑 道内の土壌水分計 M-1~M-5 設置箇所を横断する 2 次元断面とした。地下水の侵入は領域の周囲 に水頭をかけることによって模擬した。埋め戻し材の不飽和浸透特性には van Genuchten モデ ルを適用し、Dtransu3D により計算した。パラメータは第 2 次取りまとめのデータを用い、表 5.1-47 のように設定した。解析ケースは表 5.1-48 に示す 4 通りとした。

土壌水分計を設置した場所における各ケースでの飽和度経時変化を図 5.1-147~図 5.1-150 に、
原位置のモニタリング結果を図 5.1-151 に示す。また、図 5.1-152 には解析領域内での Casel での飽和度分布の時間変化を示す。これらの図より、境界部から理想的に地下水の浸透が生じたい場合、全てのケースにおいて、M-1 と M-2、M-3 と M-5、M-4 の順で埋め戻し材中の飽和度が増加する速度が大きいのが分かる。また、境界での水頭を大きくした場合や透水係数を大きくした場合には飽和度の増加は速くなる。

本解析結果では、断面中心に近い M-4 において飽和度が 100 %となるのは Case1 では約 800 日、Case2、3 では 200~250 日程度である。Case4 では 720 日経過しても飽和度にほとんど変 化が見られない。図 5.1-151 に示す土壌水分計の測定結果では、設置後約 10 日で M-3、M-4、 M-5 の飽和度が 100 %に達しており、平成 30 年度の土圧計、水圧計データおよび平成 31 (令和 元)年度の解析結果と整合しない。この理由として、特定の湧水によって水みちが土壌水分計の 位置に形成されたこと等が考えられる。

| (核燃料サイクル開 | 発機構、1999) |
|------------|-------------------|
| 初期飽和度 (%) | 59.8 |
| 初期水頭 (m) | -70.1 |
| 間隙率 (%) | 39.6 |
| θs | 0.333 |
| θ_r | 0.000 |
| α (1/m) | 1.50E-04 |
| n | 3 |

表 5.1-47 解析パラメータ

表 5.1-48 解析ケース

| | 境界水頭 (m) | 透水係数 (m/s) |
|--------|----------|-------------------------|
| Case 1 | 0 | 6 72E 11×1 |
| Case 2 | 100 | 5.73E-11*** |
| Case 3 | 0 | 2.00E-10 ^{**2} |
| Case 4 | 0 | 1.00E-11 ^{₩3} |

※1 平成 31 年度試験の平均値

※2 平成 31 年度試験の最小値を丸めた値

※3 ※1, ※2 の中間値



412





図 5.1-148 Case 2: 飽和時間の推定



図 5.1-149 Case 3: 飽和時間の推定



図 5.1-150 Case 4: 飽和時間の推定



図 5.1-151 原位置でのモニタリング結果(土壌水分)



図 5.1-152 Case 1: 飽和度の時間変化分布図

e)まとめと今後の課題

平成 30 年度の施工では、含水比を最適な乾燥密度が得られるとされる 12±2%に維持すること によって密度を管理することとしたが、今回の平成 31 (令和元)年度における室内試験結果では、 含水比は 8.5~21.3%の範囲で分布した(図 5.1-142)。一方で、透水係数の要求性能は 1.0×10⁸ m/s以下と設定されたのに対し、透水試験では最大でも 1.63×10⁻¹⁰ m/s となった。言い換えれば、 含水比を 12±2%に維持するように施工することは、透水性能を保証する上で安全側の基準とな るといえる。細粒分含有率・有効粘土密度を大きくすることは、使用するベントナイト量が増加 することになり、コスト増大の要因となるため、wを 14±2%に設定したことは、Feおよび peを 適正な水準に保つ上でも妥当な基準といえる。透水試験では、透水係数のサンプリング孔やセク ションによる顕著な低下箇所は確認されず、昨年度施工では、ほぼ均一な透水性が確保されてい ることが推定される。

これらのことから、昨年度の施工試験で設定した初期含水比による管理は、埋め戻し施工によ り所期の性能を得る上で有効であったことが検証されると同時に、初期含水比の設定については 室内試験のみではなく地上での予備試験を経て決めることが重要であることも確認された。

なお、透水試験では、セクション4、5境界付近で10⁻¹⁰ m/s オーダーに低下するデータが1つ だけ確認された。これは、埋め戻し混合材料の品質低下がセクション境界付近で生じる可能性が あることを示唆するものである。透水係数のみならず、前節の詳細検討により吹き付け施工において埋め戻し混合材料の品質のばらつきが生じやすいと思われる箇所をまとめると、以下のような箇所となる。

① 土留め壁に近いセクション7、8の下半部(No.2、4)

② 上下のセクション境界に近いセクション 2、3 上部 (No.1)

③ 各セクション前後の境界付近

④ 水平方向に施工範囲が大きいセクション 2、4 の中間部 (No.1、2、3)

①は狭隘部での施工の難しさが、②、③はリバウンドにより材料分離が生じていることが要因 として挙げられる。④は③と同じ要因やノズルやホースの目詰まりによる施工の中断が生じたこ とが要因として考えられる。このため、より均質性の高い全断面吹き付け施工を実現する必要が ある場合は、以下の事項に留意することが肝要と考える。

【吹き付け角度】

リバウンドがなるべく生じないようノズルを吹付け面に直角に保つことは一般的な留意事項で あるが、天端付近では難しい。したがって、天端付近ではリバウンド材(砂分)を丁寧に除くこ とを前提として施工することが必要である。一般部ではノズル角度を一定となるよう固定すると ともに、吹き付け面は傾斜角がなるべく一定になるよう均等な吹付けを行う。

【器具の改良】

ノズルやホースの目詰まりによって施工が中断し、吹き付け面の含水比(乾燥)が変化してし まうことが考えられる。ベントナイトを含む混合土に対して流動性が確保されるようよう、特殊 な器具の開発が今後必要である。

【セクション境界および狭隘部の施工方法】

当該箇所における埋め戻し土の品質を確保するためには、これらの箇所でベントナイト混合率 を部分的に高めることが対策として挙げられる。また、こうした弱部で適切な品質で施工されて いるかを確認する事前施工試験やその施工試験における評価方法を計画することも必要と考える。

なお、今回の検討から、土壌水分計は土圧計、水圧計とは異なる挙動を示していると考えられ、 処分事業で用いられるベントナイト混合土を対象とした土壌水分計による水分計測に関しては、 キャリブレーションの方法も含めさらなる検討が必要であると考えられる。

5.1.2 施工中・施工後のモニタリング

平成 30 年度に実施した埋め戻し施工試験時に設置した各種測定機器を用い、埋め戻し領域の 土圧、水圧、土壌水分およびベントナイト流出量に関するモニタリングを継続実施した。実施期 間は、試験場所の使用期間の制約から、平成 30 年 1 月から令和元年 10 月末までの約 10 ヵ月程 度である。各種モニタリングで得られた結果の概要を述べる。

①計測機器

計測機器については、試験坑道の周辺岩盤内における地下水圧を考慮し、十分な耐圧性能を持った機器を選定することを前提とした。また、施工試験場所の地質環境条件、原位置における計 測環境、計測期間等を考慮し、埋め戻し材の施工後品質を確認するための計測では、以下の事項 を考慮することとした。

- ・ センサおよびケーブルが水圧+膨潤圧相当の耐圧性能をもつこと。
- センサおよびケーブルに計測期間2年間の耐用性があること。
- ・ 埋め戻し材の吹付け施工過程で、センサおよびケーブルの設置が迅速かつ確実におこなえること。
- 埋め戻し材の土留め壁外部での流出量の計測が可能であること。
- データロガー等の計測システムは、メンテナンスを容易にする等の理由により、土留め壁外に設置するため、ケーブルが土留め壁を貫通できるものであること。
- ・ 坑道天端からの湧水に対し計測システムが保護されていること。
- ・ 落雷等の瞬停なども発生することから、データ欠損を防ぐため、データロガー等の電源は無
 停電電源装置より給電され、瞬間停電への対策が講じられかつ自動的に復電されること。

上記を勘案し、最終的に選定したセンサを表 5.1-49 に示す。土圧計および水圧計については、 非常に小さいと想定された埋め戻し材の膨潤圧を捉えるために、高分解能と計測精度をもつもの を選定した。土壌水分計は、計画検討時に行った調査で、国内外で長期間の計測が困難であった との報告があったことを踏まえ、耐圧性や水密性、耐衝撃性についての事前検討をおこなった上 で機器を選定・設置した。これらの計測データは、図 5.1-153 に示すように埋め戻し領域外側に 設置したデータ集積用 PC 等で記録した。サンプリングピッチは5分毎とした。

ベントナイトの流出量の計測システムを図 5.1-154 に示す。このシステムで採取した地下水は、 既往の計測実績の調査から吸光分析法により分析した。また、埋め戻し領域からの地下水流出量 は、計画検討時の坑内環境調査の結果、試験候補地点の湧水量は微量であることがわかっていた ため、流量計での直接計測ではなく、ある程度の期間の平均流量を割り出すこととし、より単純 な水位計を用いた流量測定とした。

| 計測対象 | センサー名称 | 製造 | 製品名 | 設置個数 | 計測間隔 | 備考 |
|---------------|---------------|------------------------|--------------------|------|-------------------|--------------------|
| 土圧 | 水圧計 | Geokon | 4810-5MPa | 10 | 5min | 試験坑道の天盤、側壁及び床盤 |
| 水圧 | 土圧計 | Geokon | 4500SH-5MPa | 12 | 5min | 試験坑道の天盤、側壁、床盤及び中心部 |
| 水分 | 水分計 | METER | EC-5 | 10 | 5min | 試験坑道内の上下2面上 |
| 流量 | 水位計 | KOSHIN | CSTS-ATM/N-I-30M | 1 | 水槽内に一定水位 が溜まる毎 | ナルル時は如今創業 |
| ベントナイト 流出量 | 採水器, 分光光度計 | エヌケーエス 日立ハイテクテクノロジー | Lysam-MN U-5100 | 1 | 1week | エエの空外部の側海 |

表 5.1-49 本吹付け施工試験で使用したモニタリング用センサ類 (原子力機構・原環センター、2019)



図 5.1-153 計測システムの配置(俯瞰図)



図 5.1-154 土留め壁内部の排水構造と集水 の仕組み

側溝に設けた堰は高さ110mm、幅40mm程度の小規模なものとし、水中モルタルを用いて成 形した。また、土留め壁内部から流出し側溝に集められた地下水を一定間隔で採水できるよう、 自動採水器を設置した。なお、本測定では、採水器の採水口付近に撹拌機を設置し、側溝内にお けるベントナイトの沈殿を極力防ぐ対応をとっている。採水器は、1回の採水量を50~500 mL に調節できるが、採水ボトルを手で撹拌する効率性を考慮して、採水量は300 mLを基本とした。 採水器専用の採水ボトルの容積は500 mLで、最大24本内蔵することができる。前回採水した 残留物とのコンタミを防ぐため、採水直前に一度ホース内の残留物を吐出してから採水する機能 をもつ。採水は砂分も同時に採取しているが、一般に砂分は水中で撹拌しても数秒間で沈殿する。 このため、ベントナイトがよく撹拌されて溶液あるいは懸濁液の状態となった場合、粒度による 分類を行わなくてもベントナイトと砂の分類は可能である。この性質から、計測対象は採水試料 を撹拌した数秒後の沈殿物を含まない上澄みとした。

採水試料の回収の際には、採水器から試料が入った採水器専用の採水ボトルを取り出し、専用 蓋を閉め、沈殿物がなくなるまでよく撹拌する。撹拌後、蓋を開けて試料を沈殿物ごと別の搬送 用容器に移しかえ、搬送用容器に入った試料を地上に運搬し、分析機関に搬送した。搬送した採 水試料は、分光光度計で吸光度を計測することでベントナイト濃度を推定する。図 5.1-155 に本 施工試験で使用したベントナイト(クニゲル V1)の吸光度検量線を示す。

これらの流量とベントナイト濃度により、最終的には、一定期間内における土留め壁内部から のベントナイト流出量を算出する。後述する平成 31 年度に実施した採水・分析も、同じ埋め戻し 材に対して行ったことから、同一の分析機関で同じ検量線を用い濃度測定を実施した。



図 5.1-155 ベントナイト(クニゲルV1)の吸光度検量線 (原子力機構・原環センター、2019)

②計測結果

以降、平成 31 年度に実施したモニタリングの成果について概説する。グラフについては、23:55 時点の計測値を抽出し作成している。なお、モニタリングは平成 31 年度の 10 月 30 日をもって 終了した。

②-1 土圧計の計測結果(配置模式図:図 5.1-156)

図 5.1-157 に全計測期間のモニタリング結果を示す。測定結果の概要は以下のとおりである。 ・底盤部の E-11 地点と切羽部の E-1 地点は、変動しながら緩やかに上昇する傾向。一方、E-10

- 地点は緩やかに減少する傾向。それ以外は設置直後に上昇してからほぼ横ばいで推移する ・土留め壁に設置した E12 はほぼ同じ値で推移しており、埋め戻し材の状態変化で特段壁に圧力
- が作用している様子は見られない。
- ・天盤部の土圧計(E-2 と E-7) は、3 月中旬までは圧力が0であった。これは施工時に生じた隙間が原因と考えられる。それ以降振動しながらも、わずかに土圧が感知される状況(5/21 時点で、天端部の土圧計 E-7:0.0024MPa、E-2:0.0040MPa 程度の圧力)になったが、5 月下旬を境に土圧はほぼ0の値を示している。



図 5.1-156 土圧計の配置模式図



図 5.1-157 土圧の計測結果

②-2 水圧計による計測結果(配置模式図:図 5.1-158)

図 5.1-159 に全計測期間のモニタリング結果を示す。測定結果の概要は以下のとおりである。 なお、水圧計測データについては、平成 31 年度に校正係数の設定ミスが判明しそれを修正して 再整理した結果となっているため、平成 30 年度のグラフと異なることを付記しておく。

- ・定性的には最も切羽に近い H-1 とともに、H-3 および H-5 は正圧に転じており、切羽側から地 下水の浸潤が生じていることを示唆していると思われる
- ・上記以外の測定点は、計測開始からまもなく負圧を示しており、時間経過とともに変化が収束 するような傾向を示した。
- ・ただし、計測器の仕様から、分解能は 0.00125 MPa、精度は 0.05 MPa 程度と考えられるが、 すべての計測結果は精度以下の値となっており、測定値自体の信頼性は高くないと思われる



図 5.1-158 水圧計の配置概念図



図 5.1-159 水圧の計測結果

②-3 土壌水分計による計測結果(配置模式図:図 5.1-160)

図 5.1-161 に全計測期間のモニタリング結果を示す。測定結果の概要は以下のとおりである。

- ・天端側に設置した土壌水分計(M-1、M-2、M-6、M-7)は、設置直後から含水比 80%以上の値 を示し、それらの箇所はその状態を維持している。
- ・それ以外の埋め戻し材中の水分計も、5月ごろまで緩やかに上昇し、60%以上の含水比を示す。
- ・M4 地点の土壌水分計は、設置直後から 100%の値を示していたが、2月の後半に急激に値が 低下し、その後も不安定な挙動を示した。また、M3、M5 についても平成 31 年 9 月半ばに急 激に計測値が低下する挙動をしめした。これらは、計測器あるいはケーブルに不具合が発生し た可能性が高いと考えられる。



図 5.1-160 土壌水分計の配置概念図



図 5.1-161 土壌水分の計測結果

① モニタリング結果から推定される埋め戻し領域内の状態変化

図 5.1-157、図 5.1-159 および図 5.1-161 から、平成 31 年 1 月から 10 月の間の埋め戻し材 状態変化について考察した。考察にあたっては、特に岩盤境界部に設置していた土圧計測結果に 着目して行った。これは、天盤部は埋め戻し材の自重の影響がなく、外力として作用するのは膨 潤圧と水圧の 2 種類のみと考えられたためである。土圧計測結果に、土壌水分と水圧計測結果 をならべて比較したものを図 5.1-162 に示す。比較の結果から、定性的には、モニタリング期 間中の埋め戻し領域の状態は、以下の 2 つの期間で異なる様相を呈していることが考えられ た。

- ・期間1については、天盤部の2つの土圧計を含むすべての土圧計が時間経過とともに0以上 の値を示し、あるところで急激に低下する。この期間中は土壌水分も相対的には上昇傾向を しめし、水圧についても一部では正圧に上昇している。これは、埋め戻し材中への地下水の 浸潤により飽和度の増加とそれにともなう膨潤挙動の発生が推測されるが、岩盤壁面に作用 する圧がある大きさになるとどこかの変形等により急激に圧が下がるためと思われる。
- ・期間2については、水分上昇が概ね一定となり、土圧はスパイク上に上下降するような挙動、水圧については上昇が止まるような傾向をしめしている。これは、土圧計設置個所である埋め戻し領域境界部の地下水の浸潤状況が定常状態に達していることを示唆していると考えられる
- ・期間1と期間2のような異なる状況が観測されるのは、ベントナイト流出計測のために埋め 戻し材の流出を許容していることと、埋め戻し領域内の物性の不均一性によるものと推定



図 5.1-162 土圧変動の変化に着目した期間分け

この評価について、第2回委員会での外部専門家からのご意見を反映し、特に水圧変動と土圧 変動に着目した相関性を追加検討した結果を図 5.1-163~図 5.1-165 と表 5.1-50 に示す。この 検討では、5 分ピッチで測定していたデータを全て用いた。水圧計と土圧計は、埋め戻し領域境 界部のほぼ同じ位置にセットで配置したため、計測場所の違いによる影響は最小と考えられる。 なお、土壌水分計については、設置の困難さもあり、埋め戻し内部の水分変化に着目した計測点 配置になっていたため、土圧計測結果等との相関性の検討は行わなかった。以下、図 5.1-163~ 図 5.1-165 の比較に基づく土圧変動と水圧変動との関係について定性的に分析した結果を述べ る。

【切羽面・土留め壁部】

- ・切羽面では土圧変化への水圧変動の寄与は相対的に大きい。これは埋め戻しが最初に行われ ているためと考えられる。
- ・土留め壁部は逆に最後に埋め戻しが行われたため、モニタリング期間後半(③)で水圧変動 の寄与が相対的に高まったと考えられる

【側壁部】

・側壁部は切羽近くの E3 では初期から水圧変動の寄与が相対的に大きい。これは、埋め戻し 前の坑道内への湧水箇所に近接していたためと思われる。逆に E10 は最も遠い位置にあるた め、水圧変動の寄与はモニタリング期間中通じて低かったと思われる。

・E5、E8 については、③に入ってから水圧変動の寄与が相対的に大きくなっており、地下水の浸潤状況変化と対応しているものと考えられる

【底盤部】

・底盤部については、特に水圧変動との関係性は明確ではない。これは、排水を許容した試験 であることと、自重の影響が支配的であるによると考えられる。

【天盤部】

- ・天盤部については、①、②、③とも水圧変動以外の大きな変動がみられ、これは水圧以外の 外力要因である膨潤圧の寄与によるものと解釈される。
- ・切羽側の E2 については、初期に埋め戻しが行われたことと湧水箇所に近いこともあり期間 2 には入ってからは地下水でほぼ飽和状態になり水圧変動の寄与が大きくなったと考えられ る。一方、E7 については施工時に生じた隙間などもあり、地下水が流出しやすい経路がある ため、水圧がかかりにくい状況下にある可能性がある。

上記をまとめると、底盤部以外については、期間1と期間2では土圧変動の中の水圧変動の寄 与の割合には差があり、期間2については相対的に期間1よりも土圧変動に含まれる水圧変動の 寄与は大きいと考えられ、最初の考察である期間1と期間2の状態変化の状況と概ね対応してい ると考えられる。なお、図中赤枠で示した部分は、特に天盤部においては膨潤圧によるものと考 えられ、変化の幅は0.001 MPa オーダーであった。これは、予測した膨潤圧の値(0.015 MPa)に 比べ1オーダー小さかったが、膨潤圧を感知していることから岩盤との境界部付近においても埋 め戻し材中のベントナイトの膨潤が生じていること、それによって施工中・施工後に生じる可能 性がある隙間についても閉塞することが期待できることが示唆される。

なお、今回実施したモニタリングで、埋め戻し領域の状態を定性的に推察することはできたが、 一方で品質管理の観点から重要となる埋め戻し材に含まれるベントナイトの膨潤圧などの定量的 評価は困難であった。今後モニタリングを品質管理上も有効な手法とするためには、数値解析な どの検討を合わせて行うことや非常に小さい膨潤圧を精度よく計測できる手法、また多点で計測 可能な土壌水分測定法などが望まれる。

| | 10.1-00 | 上江及到これ | 山及到沙田庆的 | | 门加入 |
|-----------|--|---|---|--|---|
| 計測期間の区分 | ①全期間 (1/11=10/30) | ②期間1 (1/11=5/27) | ③期間2 (5/28-10/20) | 傾向性の比較とまとめ | 総合評価 |
| 工圧 | (1/11 10/00/ | (1) 11 (0) 21) | (0/20 10/00/ | | |
| 切羽面・土留め壁部 | ・E1.E12とも、水圧変動との相 関性はほとんどない | ・E1については、わすかではあるが水圧上昇に伴う土圧変動が認められる(相関係数は、0.24 ・0.84となった) ・E12については、同様に水圧変動との相関性はほとんどない | ・E1については、明瞭に水圧上 昇との相関性が認められる(相関 係数も0.24→0.58となった) ・E12についても、水圧上昇との 相関性が認められる | ・EIについては、①の場合は相関性がほどん どなかったが、②、③とも水圧変動に伴う相 関性は相対的に大きいと考えられる ・EI2については、①の場合、相関性はほど んどなかったが、②において水圧上昇との相 関性が認められた | ・切羽面では主上変化への水は変動の客与は相対 的に大きい。これは埋め戻しが最初に行われている ためと考えられる。 ・土留め壁部は逆に最後に埋め戻しが行われたた め、モニタリング期間後半(③)で水圧変動の寄与が 相対的に高まったと考えられる |
| 側壁部 | ・E3とE10は相対的に水圧変 動との相関性は高い ・E5, E8はほとんど相関性が 認められない | ・E3とE10は同様に相対的に水 圧変動との相関性は高い ・E5, E8は同様にほとんど相関 性が認められない | ・E3については、同様に水圧上 昇との高い相関性が認められる が、E10については相関性が低 い ・ほとんど相関性が認められな かったE5とBについても水圧上昇 との相関性が認められる。 | ・E3については、①、②、③とも水圧変動との 相関性は相対的に高い。E10については、③ において相関性が低くなっている。 ・5E58については、①、②ではまとんど無相 関であったが、③では水圧変動との相関が 認められる | ・・側壁部は切羽近(のE3では初期から水圧変動の寄与が招対的に大きい。これは、埋め戻し前の坑道内への湧水箇所に近接していたためと思われる。逆に E10は最も逃い位置にあるため、水圧変動の寄与は モニタリング期間中通じて低かったと思われる。 ・E5、E8Iこついては、③に入ってから水圧変動の寄与が招対的に大きくなっており、地下水の浸潤状況変 化と対応しているものと考えられる。 |
| 底盤部 | ・E6についてはわずかに水圧 変動との相関性が認められる ・E11についてはほとんど相関 性はない | ・①とは逆の傾向(E11には相関 性があり、E6はない)になってい る。 | ・E6についてはわずかに水圧変 動との相関性が認められる ・E11についてはほとんど相関性 はない | ・E6については①と③で、E11については逆 に②についてわずかな相関性が認められる 結果となり、傾向性は明確でない。 | ・底盤部については、特に水圧変動との関係性は明 確ではない。これは、排水を許容した試験であること と、自重の影響が支配的であるによると考えられる。 |
| 天盤部 | ・52. 57とも水圧変動以外と思 われる大きな土圧変動が認め られる | ・E2. F7とも水圧変動以外と思われる大きな土圧変動が認められる トれる大きな土圧変動が認められる ・E2.E7ともほとんど相関性は認められない | ・E2、E7とも水圧変動以外と思われる大きな土圧変動以外と思わえる。 ・E2については、水圧上見に伴う相関性が認められる ・E7については相関性は低い | ・E2.E7とも①、②、③のいずれにおいても水 圧変動以外と思われる大きな土圧変動が認 められる ・E7については、①、②、③いずれにおいても 相関性はほどんと認められないが、E2につい ては③で相関性が認められる。 | ・天盤部については、①。②、③とも水圧変動以外の 大きな変動がみられ、これは膨潤圧の寄与によるも のど解釈される ・切羽側のE2については、初期に埋め戻しが行われ たことと湯水間所に近いこともあり期間2には入って からは地下水でほぼ酸和状態になり水圧変動の寄 与が大きくなっと考えられる。一方、F1Cついては 施工時に生じた隙間などもあり、地下水が流出しや すい経路があるため、水圧がかかりにくい状況下に ある可能性がある。 |

表 5.1-50 土圧変動と水圧変動の相関に関する定性的な検討結果







図 5.1-164 土圧変動と水圧変動の相関(期間1のデータ)



図 5.1-165 土圧変動と水圧変動の相関(期間2のデータ)

① 流量・ベントナイト流出量測定結果

図 5.1-166 に水位変動の計測とそれから求められた総流量の経時変化を示す。図 5.1-166 (a) に示す平成 31 年度の 5 月までは、水位計測データおよびそこから算出した総流量の変化も安定 しており、線形的に増加していたが、7 月 21 日頃に発生した水中ポンプの故障とその復旧後につ いては、水位の変動幅が変化しているのと同時に、総流量も線形関係からはずれたデータとなっ ている。図 5.1-167 は、8 月 21 日に確認した地下水流出部の状況を示しているが、流出部の一部 に砂が堆積していた。ポンプの交換作業やこのような流出部における堆積物が、総流量が線形関 係からずれる要因となった可能性があるものの現時点では要因は明確でない。なお、水位変化の 傾向がかわる直前までのデータを利用して総流量の相関式を求めると y = 132.08x - 6E+06 (相 関係数 \mathbf{R}^2 = 0.9964) となり、5 月 19 日までのデータで求めた値で設定した 142 g/day との差は 10%以内と小さいことや、こちらの値が大きく安全側の評価になることから、以降の検討では 142 g/day を用い流量を積算した。



(c)総流量変化(平成 31 年 5 月 19 日まで)
 (d) 総流量変化(平成 31 年 10 月 30 日まで)
 図 5.1-166 水位と総流量の計測結果



図 5.1-167 土留め壁底盤部(地下水流出部)の状況観察結果(平成 31 年 8 月 21 日)

表 5.1-51 は、吸光光度計による分析結果と流量から換算したベントナイト流出量を示したものである。分析結果では、流出地下水中に含まれていたベントナイト(クニゲル V1)の濃度は、 7~220 mg/L の範囲で変動しているが、概ね数十 mg/L の値で推移している。

図 5.1-168 は、上記分析結果と埋め戻し領域からの流出地下水の総流量の計測結果を用いて、計 測期間中に埋め戻し領域から流出した累積のベントナイト量と総流量との関係を両対数グラフに プロットしたものである。両対数グラフ上では両者は良好な線形関係が認められることがわかる。 また、図 5.1-169 は、平成 30 年度の報告書でも示した同種の既往の研究成果と本計測結果を比較したものである。これをみると、ベントナイトの種類は異なるものの同様の線形関係が得られていること、今回用いたベントナイト(クニゲル V1)のスケールの異なる過去の計測結果ともほぼ同等の傾向を示し、両者は矛盾しないことが確認できた。

これらのことから、埋め戻し領域を流れる地下水の総流量を仮定することにより、この関係で 埋め戻し材中のベントナイト流出量を概算することが可能であり、将来の処分場閉鎖時の埋め戻 し材の設計仕様の検討に資する情報を提供することが期待される。

| | 測定 | 2結果 | | | 累積 |
|-----------|----------|--------------|-----------|----------|-------------|
| 採水日 | クニゲルV1濃度 | 流量 | クニゲルV1流出量 | 総流量 | クニゲルV1流出累積量 |
| | (mg/L) | (L/day) | (g) | (g) | (g) |
| 2019/1/12 | 97 | 142.32 | 13.81 | 142320 | 13.81 |
| 2019/1/13 | 93 | 142.32 | 13.24 | 284640 | 27.04 |
| 2019/1/14 | 93 | 142.32 | 13.24 | 426960 | 40.28 |
| 2019/1/15 | 70 | 142.32 | 9.96 | 569280 | 50.24 |
| 2019/1/16 | 94 | 142.32 | 13.38 | 711600 | 63.62 |
| 2019/1/17 | 69 | 142.32 | 9.82 | 853920 | 73.44 |
| 2019/1/18 | 79 | 142.32 | 11.24 | 996240 | 84.68 |
| 2019/1/19 | 40 | 142.32 | 5.69 | 1138560 | 90.37 |
| 2019/1/20 | 64 | 142.32 | 9.11 | 1280880 | 99.48 |
| 2019/1/21 | 38 | 142.32 | 5.41 | 1423200 | 104.89 |
| 2019/1/22 | 24 | 142.32 | 3.42 | 1565520 | 108.31 |
| 2019/1/23 | 35 | 142.32 | 4.98 | 1707840 | 113.29 |
| 2019/1/24 | 34 | 142.32 | 4.84 | 1850160 | 118.13 |
| 2019/1/25 | 19 | 142.32 | 2.70 | 1992480 | 120.83 |
| 2019/1/26 | 18 | 142.32 | 2.56 | 2134800 | 123.39 |
| 2019/1/27 | 27 | 142.32 | 3.84 | 2277120 | 127.23 |
| 2019/1/28 | 39 | 142.32 | 5.55 | 2419440 | 132.78 |
| 2019/1/29 | 96 | 142.32 | 13.66 | 2561760 | 146.45 |
| 2019/1/30 | 1123 | T N (| | | • |
| 2019/1/31 | 320 | 一 半成30年 | 度の検討で不採用 | としたデータ | × _ |
| 2019/2/1 | 294 | | | | |
| 2019/2/1 | 150 | 142.32 | 21.35 | 3842640 | 210.49 |
| 2019/2/8 | 150 | 142.32 | 21.35 | 4838880 | 359.93 |
| 2019/2/15 | 22 | 142.32 | 3.13 | 5835120 | 381.84 |
| 2019/2/22 | 20 | 142.32 | 2.85 | 6831360 | 401.77 |
| 2019/3/1 | 16 | 142.32 | 2.28 | 7827600 | 417.71 |
| 2019/3/8 | 190 | 142.32 | 27.04 | 8823840 | 606.99 |
| 2019/3/15 | 220 | 142.32 | 31.31 | 9820080 | 826.17 |
| 2019/3/22 | 85 | 142.32 | 12.10 | 10816320 | 910.85 |
| 2019/3/29 | 190 | 142.32 | 27.04 | 12808800 | 1100.13 |
| 2019/4/12 | 43 | 142.32 | 6.12 | 13805040 | 1185.81 |
| 2019/4/19 | 22 | 142.32 | 3.13 | 14801280 | 1207.73 |
| 2019/4/26 | 24 | 142.32 | 3.42 | 17790000 | 1231.64 |
| 2019/5/17 | 14 | 142.32 | 1.99 | 19782480 | 1273.48 |
| 2019/5/31 | 59 | 142.32 | 8.40 | 22771200 | 1391.04 |
| 2019/6/21 | 44 | 142.32 | 6.26 | 25759920 | 1522.54 |
| 2019/7/12 | 87 | 142.32 | 12.38 | 27752400 | 1782.56 |
| 2019/7/26 | 16 | 142.32 | 2.28 | 29744880 | 1814.44 |
| 2019/8/9 | 22 | 142.32 | 3.13 | 32733600 | 1858.27 |
| 2019/8/30 | 16 | 142.32 | 2.28 | 35722320 | 1906.09 |
| 2019/9/20 | 7 | 142.32 | 1.00 | 38711040 | 1927.01 |

表 5.1-51 ベントナイト流出量計測結果

*採取時間は、23:55 で統一



図 5.1-168 本試験でのベントナイト流出量計測結果から得られたベントナイトと地下水の総流 出量の関係



図 5.1-169 ベントナイトと地下水の総流出量の関係に関する既往の研究成果との比較

5.2 埋め戻し材の特性を踏まえた施工オプションの整備

5.2.1 課題設定の考え方および目的

地層処分のサイト選定では、3 段階の調査により調査区域を段階的に絞り込みながら処分場と しての適切性が判断される。これらの各調査段階で実施される処分場設計では、候補サイトに対 して安全機能を有する処分場が構築できることを示す必要がある。坑道の埋め戻し材については、 坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないことが設計要件の一つとして要求されており、埋 め戻し材の低透水性の指標として、透水係数に"母岩の平均的な透水係数の10倍以下"が現在の ジェネリックな段階において設定されている。合理性の観点から、埋め戻し材に掘削土を利用す ることが考えられており、例えば、竪置き・ブロック方式ではベントナイト15%、掘削土85%で 乾燥密度1.8 Mg/m³が埋め戻し材の仕様例として設定されている。ただし、処分サイトが決定し ていないジェネリックな現段階では、この埋め戻し材の仕様例は、掘削土の物性をケイ砂で代用 した場合の例であり、将来の候補サイトの掘削土の特性によって配合などの仕様は変わることに なる(NUMO, 2018)。

埋め戻し材に要求される透水係数は、候補サイトの地質環境条件及び地質環境条件に応じた処 分場の設計などによって異なるため、複数の候補サイトがある場合には、それぞれの地質環境や 設計に応じた埋め戻し材の仕様が設定される。また、多様な地質環境や処分場の設計オプション に対して柔軟かつ迅速に対応するためには、複数の施工技術とそれぞれの施工技術に応じた施工 管理方法を予め準備しておくことが効果的である。さらに、処分場の閉鎖後に埋め戻し材が期待 した性能を発揮することを示すためには、再冠水して飽和に至るまでの埋め戻し材の状態変化の 過程を予測評価することが重要となる。以上を踏まえると、段階的なサイト選定プロセスの各節 目において柔軟かつ迅速な対応を行うためには、次のような情報や技術を予め整備しておくこと が望まれる。

○多様な地質環境に応じた施設設計のバリエーションに対して、柔軟に対応可能な埋め戻し 材の材料特性データ

○坑道を埋め戻した後に水みちの発生を防止できる埋め戻し材の施工技術オプション

○埋め戻し材の施工プロセス管理方法

○埋め戻し材が飽和するまでの過程を予測評価するための方法

埋め戻し材の施工技術オプションとその施工プロセス管理方法を整備するためには、埋め戻し 材の基本的な材料データを取得するための室内試験、施工可能な配合や施工後の埋め戻し材の品 質及びそのばらつきを把握するための小規模施工試験、さらに実際の坑道スケールにおける施工 技術の適用性や施工後の品質などを確認するための地上試験施設での実規模施工試験、実際の地 下環境を想定した地下試験施設での実規模試験など、これらの試験を段階的に組み合わせで取り 組んでいくことで、効果的に施工技術オプション及び施工プロセス管理方法を整備することがで きる。埋め戻し材の施工技術オプションおよび施工プロセス管理方法を整備するための研究開発 の進め方を図 5.2-1 に示す。

室内試験では、埋め戻し材の幅広い範囲の配合を対象として締固め性や透水性などに関する試 験データを拡充することで、多様な地質環境を対象とした処分場施設設計に対して柔軟に対応可 能な埋め戻し材の材料特性データを整備することができる。また、複数の施工方法(技術)を念 頭においた小規模な施工試験によって、施工方法に応じて施工可能な掘削土の最大粒径などを把 握することができる。埋め戻し材の施工プロセス管理方法は、一般土木分野における施工管理方 法や国内外の放射性廃棄物処分分野における施工管理方法を参考にしつつ、地上試験施設での実 規模施工試験による埋め戻し材の品質評価などを通して施工プロセス管理方法の案を構築する。 そして、地下施設での実規模施工試験を実施して、施工プロセス管理方法(案)の適用性を確認 するとともに、地下施設の坑道を対象とした施工後の品質管理に関する課題を抽出する。得られ た課題については、地上施設での施工試験計画に反映して課題の解決方法について検討を行い、 再び地下施設での実規模施工試験を実施する。このような反復プロセスにより施工技術を高度化 して、最終的な施工プロセス管理方法が構築されると考えられる。

平成 30 年度及び平成 31 年度の2年間では、以下を目的とした。

- 【埋め戻し材の室内試験】
 - 多様な地質環境に応じた施設設計のバリエーションに対応可能な埋め戻し材の材料特性 データの拡充
 - 埋め戻し材の材料特性に影響を及ぼすパラメータの整理
 - 掘削土の利用時に必要な管理項目の提案
 - 埋め戻し材の水分特性曲線及び透気係数に関するデータ取得
- 【埋め戻し材の小規模施工試験】
 - 撒き出し・転圧工法及び吹付け工法に適した材料配合、施工パラメータ及び達成可能な乾 燥密度等の把握
- 【施工技術オプションの整備】
 - 撒き出し・転圧工法及び吹付け工法以外の施工技術による施工装置の概念設計
- 【実寸大模擬坑道の整備】
 - 実際の坑道スケールにおける施工技術の適用性や埋め戻し材施工後の品質などを確認で きる実寸大模擬坑道の整備



図 5.2-1 埋め戻し材に関する研究開発の進め方

5.2.2 埋め戻し材の材料特性データの整備

(1) 埋め戻し材の材料特性データの取得

包括的技術報告書では、3 種類の地質環境モデル(深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀 堆積岩類)を対象として処分場の設計が行われている。また、埋め戻し材には掘削土を利用する ことが考えられているため、処分場となるサイトの地質環境(岩種)が埋め戻し材の物性に影響 を及ぼす可能性がある。そこで、本事業では模擬掘削土として様々な岩種を用いた埋め戻し材の 物性データを取得するとともに、締固め性や透水性等に影響を及ぼす掘削土の特性について考察 を行った。

(2) 使用材料および使用材料の基本物性

試験に使用した材料を表 5.2-1 に示す。ベントナイトには、Na 型のクニゲル V1(以下、Na 型) と Ca 型のクニボンド RW(以下、Ca 型)の2 種類を使用した。模擬掘削土には、ケイ砂、 火成岩類、堆積岩類を用いた。ケイ砂にはケイ砂3号及びケイ砂6号を用いた。火成岩類には花 崗岩、流紋岩、安山岩、玄武岩の4種類の砕石と砕砂を用い、堆積岩類には砂岩及び凝灰岩の砕 石と砕砂、珪藻土、泥岩の4種類を用いた。試験に使用したベントナイトの基本物性を表 5.2-2 に、模擬掘削土の基本物性を表 5.2-3に示す。

| 2021 空の人の内の記録に区所のた時料 | | | | | | | |
|----------------------|---------|------|----------------|--|--|--|--|
| 材料 | | 種類 | 製品 | | | | |
| ベントナイト | | Na 型 | クニゲル V1 | | | | |
| | | Ca 型 | クニボンド RW | | | | |
| | | ケイ砂 | 三河ケイ砂3号 | | | | |
| | 7 1 419 | | 三河ケイ砂6号 | | | | |
| | | 流紋岩 | | | | | |
| | 火成岩類 | 安山岩 | 砕石 2005 | | | | |
| 措修提到于 | | 玄武岩 | 砕砂 | | | | |
| 医斑斑的 上 | | 花崗岩 | (砕砂は 5mm 以下および | | | | |
| | | 砂岩 | 2.5mm 以下) | | | | |
| | 推结巴稻 | 凝灰岩 | | | | | |
| | 堆積右規 | 珪藻土 | 8 mm 以下 | | | | |
| | | 泥岩 | 掘削ズリ | | | | |

表 5.2-1 埋め戻し材の試験に使用した材料

表 5.2-2 試験に使用したベントナイトの基本物性

| ベントナイト | MBC (mmol/100g) | | 膨潤力 | 含水比 | 土粒子密度 | 体田年産 |
|----------|-----------------|-----|---------|------|----------------------|------------|
| | 測定値 | 成績書 | (mL/2g) | (%) | (Mg/m ³) | 使用年度 |
| | 01 | 86 | 21.0 | 7.9 | 0.790 | 2018 |
| クニゲル V1 | 91 | | | | 2.789 | 2019(室内試験) |
| | 83 | 79 | 19.0 | 9.2 | 2.752 | 2019(転圧試験) |
| クニボンド RW | 110 | 110 | 7.0 | 10.4 | 0.650 | 2018 |
| | 110 | 112 | | | 2.052 | 2019(室内試験) |
| | 128 | 120 | 8.0 | 13.5 | 2.658 | 2019(転圧試験) |

| 材料 | | MBC | 含水比 | ; | 粒度 | 土粒子密度 | 表乾密度 | 絶乾密度 | 吸水率 |
|-------------|-----------------|------------------|------|----------|------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------|
| | | (minol/ 100g) | (%) | 均等 係数 | 細粒分 含有率 | (Mg/m ³) | (Mg/m ³) | (Mg/m ³) | (%) |
| ケイ取 | 3号 | _ | 0 | 1.7 | 0.3 | 2.658 | | - | _ |
| 7119 | <mark>6号</mark> | _ | 0 | 2.0 | 1.2 | 2.654 | _ | | Ι |
| 法处出 | 砕石 | 0 | 0.5 | 2.2 | 0 | 2.652 | 2.62 | 2.59 | 0.95 |
| 元 秋石 | 砕砂 | | 3.7 | 5.2 | 0.1 | | 2.56 | 2.50 | 2.50 |
| 中山出 | 砕石 | 1 | 1.3 | 2.3 | 0.1 | 2.791 | 2.71 | 2.66 | 1.60 |
| 女山右 | 砕砂 | 4 | 5.3 | 5.2 | 0.2 | | 2.64 | 2.55 | 3.51 |
| 大井出 | 砕石 | 0 | 1.2 | 2.2 | 0.1 | 2.797 | 2.74 | 2.70 | 1.57 |
| 幺氏石 | 砕砂 | | 4.5 | 9.4 | 0.3 | | 2.72 | 2.65 | 2.42 |
| ** | 砕石 | 0 | 0.8 | 2.3 | 0 | 0.004 | 2.66 | 2.63 | 0.86 |
| 化尚石 | 砕砂 | | 4.9 | 5.4 | 0.7 | 2.664 | 2.64 | 2.61 | 1.07 |
| 75、14 | 砕石 | 0 | 1.1 | 2.1 | 0 | 0.000 | 2.66 | 2.64 | 0.52 |
| 砂石 | 砕砂 | | 3.8 | 7.6 | 0.9 | 2.000 | 2.58 | 2.52 | 2.51 |
| 客市出 | 砕石 | 4 | 0.4 | 2.0 | 0.1 | 2.027 | 2.92 | 2.90 | 0.68 |
| 凝火石 | 砕砂 | | 2.5 | 3.9 | 0.1 | 2.927 | 2.83 | 2.78 | 1.66 |
| 珪藻 | ± | 16 | 27.7 | _ | 20.2 | 2.330 | 1.72 | 1.29 | 33.66 |
| 泥坑 | 告 | 26 | 32.9 | - | 13.2 | 2.516 | 1.80 | 1.34 | 33.50 |

表 5.2-3 試験に使用した模擬掘削土の基本物性

(3) 埋め戻し材の物性データの取得

ベントナイトの種類及び混合率、模擬掘削土の種類及び最大粒径が埋め戻し材の物性に及ぼす 影響を確認するために、室内試験により埋め戻し材の締固め特性(最大乾燥密度と最適含水比)、 透水係数、膨潤圧等のデータを取得した。埋め戻し材の室内試験ケースを表 5.2-4 に示す。ただ し、試験では表 5.2-4 に示した試験ケースの全ての組合せを実施したわけではなく、埋め戻し材 に及ぼす影響が確認できるように組合せを選択して実施した。また、模擬掘削土の砕石・砕砂に ついては、火成岩類では玄武岩、堆積岩類では泥岩を中心としてデータを取得した。取得した埋 め戻し材の物性データを付録 6 に示す。

| | 榄擬掘削 十 | | | ベントナ | イト | 締固め | 封殿市日 |
|---------|---------------|---------|-----|----------|-------------|--------------|------------|
| 楔揪 加刊 上 | | | | 種類 | 混合率(%) | エネルギー | 武帜項日 |
| ケイ 砂 | 3号、6号 | | | | | | |
| | | | 流紋岩 | Na 型 | Na 型 | | 柿固め試験 |
| | | 火成 | 安山岩 | クニゲル V1 | 5,15,30,50 | | (JISA1210) |
| | 最大粒径 | 岩類 | 玄武岩 | | | Ec,2Ec,4.5Ec | 透水試験 |
| | (20mm 以下) | | 花崗岩 | Ca 型 | Ca 型 | | (JISA1218) |
| 仰彻 | 20,10,5,2.5mm | 14-11-1 | 砂岩 | クニボンド RW | 15,30,40,50 | | (JGS0312) |
| | | 堆積 | 凝灰岩 | | | | 形间广码映 |
| | 1 | 石俎 | 泥岩 | 1 | | | |

表 5.2-4 埋め戻し材の物性データ取得のための試験ケース

(4) 貧配合ベントナイト混合土の物性データ(模擬掘削土:ケイ砂)

模擬掘削土にケイ砂を用いた埋め戻し材の物性データより、ベントナイトの種類、混合率及び 締固めエネルギーが埋め戻し材の物性データに与える影響について、締固め性、透水性、膨潤性 の観点から考察した。取得した物性データは付録6に記載した。

1) 締固め性(最大乾燥密度と有効モンモリロナイト密度)

Na 型及び Ca 型の埋め戻し材のベントナイト混合率と最大乾燥密度、有効モンモリロナイト密度(原子力機構, 2005)の関係を図 5.2-2 に示す。なお、模擬掘削土はケイ砂 6 号、締固めエネルギーは Ec、2Ec、4.5Ec である。

Na 型の埋め戻し材では、ベントナイト混合率が 30%までの範囲では混合率の増加に伴い最大 乾燥密度は増加するものの、ベントナイト混合率が 30%でピークをむかえ、50%では若干小さく なった。一方、Ca 型の埋め戻し材では、ベントナイト混合率の増加に伴い最大乾燥密度は小さく なった。Na 型の埋め戻し材と Ca 型の埋め戻し材の最大乾燥密度は、ベントナイト混合率 15% では同程度であったが、30%以上では Ca 型よりも Na 型の埋め戻し材の方が大きくなった。た だし、有効モンモリロナイト密度はベントナイト混合率 50%まで増加傾向にあり、Na 型と Ca 型 の埋め戻し材で大きな違いはないことがわかる。つまり、Na 型の埋め戻し材に比べて、Ca 型の 埋め戻し材は締固め性が悪く、最大乾燥密度は小さいが、表 5.2・2 に示したように MBC 値が Na 型より Ca 型の方が大きいため、埋め戻し材の有効モンモリロナイト密度は同等の値になってい る。また、Na 型の埋め戻し材、Ca 型の埋め戻し材ともに締固めエネルギーが大きくなると、最 大乾燥密度および有効モンモリロナイト密度は大きくなった。



図 5.2-2 ベントナイト混合率と最大乾燥密度、有効モンモリロナイト密度の関係

2) 透水性

Na 型及び Ca 型を用いた埋め戻し材のベントナイト混合率と透水係数の関係を図 5.2-3 に、 乾燥密度および有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係を図 5.2-4 に示す。なお、模擬掘削 土はケイ砂 6 号、締固めエネルギーは Ec、4.5Ec である。

Na 型と Ca 型の埋め戻し材の透水係数は、どちらもベントナイト混合率の増加に伴い、小さく なるものの、同じベントナイト混合率の場合、Na 型の埋め戻し材よりも Ca 型の埋め戻し材の方 が 1-2 オーダー程度大きかった。また、Na 型の埋め戻し材では、締固めエネルギーが Ec と 4.5Ec でも透水係数の値に大きな違いはなく、締固めエネルギーの影響が小さいことがわかる。 また、乾燥密度および有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係をみると、Na型とCa型を用いた埋め戻し材の透水係数は、どちらも乾燥密度よりも有効モンモリロナイト密度との相関が高いことがわかる。ただし、埋め戻し材の透水係数について有効モンモリロナイト密度で管理する場合、Na型の埋め戻し材とCa型の埋め戻し材では同じ管理値とはならないことに留意する必要がある。



図 5.2-3 ベントナイト混合率と透水係数の関係



図 5.2-4 乾燥密度と透水係数及び有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係

3) 膨潤性

Na 型及び Ca 型の埋め戻し材のベントナイト混合率と膨潤圧の関係を図 5.2-5 に、乾燥密度 及び有効モンモリロナイト密度と膨潤圧の関係を図 5.2-6 に示す。なお、模擬掘削土はケイ砂 6 号、締固めエネルギーは Ec、4.5Ec である。

Na 型の埋め戻し材の膨潤圧は最大で 200~270 kPa、Ca 型の埋め戻し材の膨潤圧は最大で 10~60 kPa 程度であり、同じベントナイト混合率の場合、膨潤圧は Ca 型よりも Na 型の埋め戻 し材の方が大きかった。また、Na 型と Ca 型の埋め戻し材ともに、膨潤圧と乾燥密度および有効 モンモリロナイト密度との相関は小さく、ベントナイト混合率 30%程度(有効モンモリロナイト

密度で 0.8 Mg/m³程度)で最大になり、混合率 50%では同等もしくは低下した。ベントナイト混 合率 30%程度で膨潤圧が最大になった原因については、今回の試験結果から明らかにすることは できなかった。現状では、埋め戻し材の性能として膨潤圧は要求されていないが、要求性能に膨 潤性が加わる場合には、追加の試験等により確認する必要がある。



図 5.2-5 ベントナイト混合率と膨潤圧の関係



図 5.2-6 乾燥密度と膨潤圧及び有効モンモリロナイト密度と膨潤圧の関係

(5) ベントナイト混合土の物性データに模擬掘削土が与える影響(模擬掘削土:砕石・砕砂)

模擬掘削土に砕石・砕砂(火成岩類、堆積岩類)を用いた埋め戻し材の物性データより、掘削 土が埋め戻し材の物性データに与える影響について、締固め性、透水性、膨潤性の観点から考察 した。

1) 締固め性(最大乾燥密度と最適含水比)

模擬掘削土に火成岩類および堆積岩類(砕石・砕砂)を用いた Na 型と Ca 型の埋め戻し材の 最適含水比と最大乾燥密度の関係を図 5.2-7 に、模擬掘削土に火成岩類および堆積岩類の砕砂を 用いた Na 型の埋め戻し材の透水係数を図 5.2-8 に示す。なお、ベントナイト混合率は 15%、締 固めエネルギーは Ec、模擬掘削土の火成岩類は花崗岩、流紋岩、安山岩、玄武岩の4種類、堆積 岩類は砂岩、凝灰岩、珪藻土、泥岩の4種類である。また、グラフには模擬掘削土にケイ砂6号 を用いた埋め戻し材の値も併せて示した。 模擬掘削土に火成岩類及び珪藻土と泥岩を除く堆積岩類を用いた埋め戻し材は、模擬掘削土に ケイ砂を用いた埋め戻し材と比べて、最適含水比は低く、最大乾燥密度は大きかった。また、透 水係数は、全ての岩種でケイ砂を用いた埋め戻し材の透水係数よりも大きく、とくに泥岩を用い た埋め戻し材については1×10⁵ m/s 程度の透水係数であった。

以上の結果を踏まえて、掘削土の埋め戻し材への影響を確認するための代表的な岩種として火 成岩類から玄武岩、堆積岩類から泥岩(一部、砂岩)を選択し、詳細な試験を実施した。



図 5.2-7 最適含水比と最大乾燥密度の関係



図 5.2-8 模擬掘削土の種類による透水係数(※砕砂(泥岩のみ砕石))

2) 締固め性(最大乾燥密度と有効モンモリロナイト密度)

模擬掘削土に玄武岩(最大粒径 2.5 mm、20 mm)、砂岩(最大粒径 2.5 mm、20 mm)、泥岩 (最大粒径 20 mm)を用いた埋め戻し材の締固め試験により得られた最大乾燥密度を図 5.2-9 に、 有効モンモリロナイト密度を図 5.2-10 に示す。なお、ベントナイトは Na 型と Ca 型とし、ベン トナイト混合率は Na 型が 15%、Ca 型が 30%、締固めエネルギーは 4.5Ec とした。また、グラフには模擬掘削土にケイ砂 6 号を用いた埋め戻し材の値も示した。

前述した結果と同様に、ケイ砂6号を用いた埋め戻し材と比べて、玄武岩および砂岩を用いた 埋め戻し材の最大乾燥密度及び有効モンモリロナイト密度は大きく、泥岩を用いた埋め戻し材の 最大乾燥密度及び有効モンモリロナイト密度は小さかった。泥岩を用いた埋め戻し材の締固め性 が悪い理由としては、泥岩の土粒子密度が小さく、吸水率が高い(表 5.2-3)ことが影響してい ると考えられる。また、模擬掘削土の最大粒径の違いに着目すると、最大粒径が2.5 mmの埋め 戻し材よりも、最大粒径が20 mmの埋め戻し材の方が最大乾燥密度及び有効モンモリロナイト 密度は大きくなる傾向がみられた。その傾向は Ca 型の埋め戻し材よりも Na 型の埋め戻し材の 方が顕著にみられた。



3) 透水性

模擬掘削土に玄武岩(最大粒径 2.5 mm、20 mm)、砂岩(最大粒径 2.5 mm、20 mm)、泥岩 (最大粒径 20 mm)を用いた埋め戻し材の透水係数を図 5.2-11 に示す。なお、ベントナイトは Na型と Ca型とし、ベンナイト混合率は Na型が 15%、Ca型が 30%であり、締固めエネルギー は 4.5Ec である。また、グラフには模擬掘削土にケイ砂 6 号を用いた埋め戻し材の値も示した。

玄武岩および砂岩を用いた埋め戻し材の透水係数は、ケイ砂6号を用いた埋め戻し材の透水係数と±1オーダー程度の差であった。図 5.2-10に示したように、玄武岩、砂岩を用いた埋め戻し 材は、ケイ砂を用いた埋め戻し材よりも乾燥密度および有効モンモリロナイト密度が高いものの 透水係数に大きな差は見られなかった。また、Na型の埋め戻し材では、模擬掘削土の最大粒径が 大きい方が乾燥密度、有効モンモリロナイト密度ともに高いにもかかわらず、透水係数は大きく なった。つまり、埋め戻し材に混合する掘削土として砕石・砕砂を用いる場合、透水係数の管理 値には、ケイ砂を用いた埋め戻し材の乾燥密度もしくは有効モンモリロナイト密度と同じ値を用 いることはできず、使用する掘削土を混合した埋め戻し材の有効モンモリロナイト密度と同じ値を用 いることはできず、使用する掘削土を混合した埋め戻し材の有効モンモリロナイト密度と透水係 数の関係を把握した上で、有効モンモリロナイト密度(または乾燥密度)により管理することが 適切と考えられる。この理由として、粒径の大きい掘削土を用いた際の埋め戻し材の間隙率や掘 削土同土の噛み合いの影響などが考えられるが、今回実施した試験の結果からはその原因を明ら かにすることはできなかった。埋め戻し材に混合する掘削土に粒径の大きい砕石などを使用する 場合には、透水試験などに用いる供試体数を増やすなどして、試験結果のばらつきも含めてその 影響範囲や原因について確認する必要がある。

一方、泥岩を用いた埋め戻し材の透水係数はケイ砂6号を用いた埋め戻し材の透水係数よりも 大きく、Na型の埋め戻し材で1×10⁻⁶~10⁻⁸ m/s、Ca型の埋め戻し材で1×10⁻⁸~10⁻⁹ m/s であっ た。図 5.2⁻¹⁰ より、泥岩を用いた埋め戻し材は締固め性が悪く、最大乾燥密度および有効モンモ リロナイト密度がケイ砂を用いた埋め戻し材よりも小さいため透水係数は大きくなったと考えら れる。



4) ベントナイト混合率と透水係数

模擬掘削土に玄武岩(最大粒径 2.5 mm (Na 型のみ))、泥岩(最大粒径 20 mm)を用いた埋 め戻し材のベントナイト混合率と透水係数の関係を図 5.2-12 に示す。なお、ベントナイトは Na 型と Ca 型、締固めエネルギーは 4.5Ec とした。また、グラフには模擬掘削土にケイ砂 6 号を用 いた埋め戻し材の値を示すとともに、Na 型のベントナイトの混合率 15%には玄武岩の最大粒径 20 mm、泥岩の最大粒径 2.5 mm を用いた埋め戻し材の数値を、Ca 型のベントナイトの混合率 30%には玄武岩の最大粒径 2.5 mm、20 mm を用いた埋め戻し材の値を示した。

Na 型の埋め戻し材については、玄武岩を用いた埋め戻し材の透水係数はベントナイト混合率の増加に伴い低下する傾向にあり、その傾向はケイ砂を用いた埋め戻し材と概ね一致していた。 また、泥岩を用いた埋め戻し材の透水係数は、ベントナイト混合率の増加に伴い低下するものの、 全てのベントナイト混合率でケイ砂を用いた埋め戻し材の透水係数よりも大きかった。さらに、 ケイ砂を用いた埋め戻し材の透水係数との差はベントナイト混合率が低い方が大きかった。つま り、埋め戻し材の透水係数は、ベントナイト混合率が低い方が掘削土の影響が表れやすいと考え られる。

Ca 型の埋め戻し材については、泥岩を用いた埋め戻し材の透水係数はベントナイト混合率の 増加に伴い低下しており、全てのベントナイト混合率においてケイ砂を用いた埋め戻し材の透水 係数よりも大きかった。ただし、ケイ砂を用いた埋め戻し材の透水係数との差は、Na 型の埋め戻 し材よりも小さかった。Ca 型の埋め戻し材の場合、掘削土の種類にかかわらず締固め性が悪く Na 型の埋め戻し材に比べて透水係数が高いため、透水係数に対する掘削土の影響が表れにくい と考えられる。



5) 砕石・砕砂の破砕の影響

前述したように、同じ締固めエネルギーで締固め試験を実施しても、ケイ砂及び玄武岩等を用いた埋め戻し材に比べて、泥岩を用いた埋め戻し材の最大乾燥密度及び有効モンモリロナイト密度は小さかった。泥岩は今回の試験で使用した他の岩種に比べて吸水率が高い(表 5.2-3)ことから空隙率も高く脆い材料である。そのため、泥岩を用いた埋め戻し材では、締固めのエネルギーが泥岩の破砕に使われるために、締固め性が悪くなった可能性が考えられる。そこで、泥岩を

用いた埋め戻し材の締固め試験の前後に粒度試験を実施し、締固め時の破砕の程度を確認した。 なお、比較として玄武岩を用いた埋め戻し材についても同様の試験を実施した。

締固め試験前後の粒度試験結果のうち Na 型の埋め戻し材の結果を図 5.2-13 に、Ca 型の埋め 戻し材の結果を図 5.2-14 に示す。なお、泥岩および玄武岩の最大粒径は 20 mm とし、ベンナイ ト混合率は Na 型の埋め戻し材が 15%、Ca 型の埋め戻し材が 30%であり、締固めエネルギーは 4.5Ec とした。

玄武岩を用いた埋め戻し材では、Na型及びCa型の埋め戻し材ともに締固め試験の前後で埋め 戻し材の粒度分布に大きな違いはなかった。一方、泥岩を用いた埋め戻し材では、Na型及びCa 型の埋め戻し材ともに、締固め試験前に比べて、締固め試験後は粒径が小さくなっており、締固 め時に泥岩の破砕が生じていることが確認された。よって、泥岩を用いた埋め戻し材の締固め性 が悪い理由の一つとして、締固め時のエネルギーの一部が泥岩の破砕に使用され、締固めに使わ れるエネルギーが減少していることが挙げられる。







6) 膨潤性

埋め戻し材には、緩衝材および止水プラグの膨出抑制が評価項目として設定されている (NUMO, 2018)。そこで、掘削土に玄武岩(最大粒径 2.5, 5, 10, 20 mm)、砂岩(最大粒径 2.5, 20 mm)を用いた埋め戻し材の膨潤圧試験を実施した。模擬掘削土の最大粒径、有効モンモリロ ナイトと膨潤圧の関係のうち、Na型の埋め戻し材の結果を図 5.2-15 に、Ca型の埋め戻し材の 結果を図 5.2-16 に示す。なお、ベンナイト混合率は Na型の埋め戻し材が 15%、Ca型の埋め戻 し材が 30%であり、締固めエネルギーは 4.5Ec とした。また、グラフには模擬掘削土にケイ砂 6 号を用いた埋め戻し材の値を示した。

Na型の埋め戻し材の膨潤圧については、ケイ砂を用いた埋め戻し材に比べて、玄武岩を用いた埋め戻し材の膨潤圧は小さく、砂岩を用いた埋め戻し材の膨潤圧は大きかった。玄武岩を用いた埋め戻し材と砂岩を用いた埋め戻し材では、有効モンモリロナイト密度に若干の違いはあるものの、図 5.2-11 に示したように、透水係数の差は小さかったが、砂岩を用いた埋め戻し材の膨潤 圧は2倍以上大きかった。また、玄武岩及び砂岩を用いた埋め戻し材では、模擬掘削土の最大粒 径が 20 mm の場合に有効モンモリロナイト密度は若干高くなるにもかかわらず、膨潤圧が小さ くなる傾向が確認された。ただし、この理由については今回の試験では明らかにすることができ なかった。また、この最大粒径が 20 mm の場合に埋め戻し材の膨潤圧が小さくなる傾向は、前 述した最大粒径が 20 mm の場合に埋め戻し材の透水係数が高くなる傾向と関連性がある可能性 も考えられる。

Ca型の埋め戻し材の膨潤圧については、ケイ砂を用いた埋め戻し材の膨潤圧に比べて、玄武岩 及び砂岩を用いた埋め戻し材は、模擬掘削土の最大粒径が2.5、5mmの場合には同程度であり、 最大粒径が10mm、20mmと大きくなるにつれて、膨潤圧が大きくなる傾向がみられた。Na型 の埋め戻し材の膨潤圧との傾向の違いは、Ca型の埋め戻し材ではベントナイト混合率が30%と 多いため、掘削土の違いが膨潤圧に及ぼす影響が表れにくかったと考えられる。









7) 掘削土利用時の管理指標

模擬掘削土にケイ砂6号、玄武岩(最大粒径2.5、20mm)、泥岩(最大粒径2.5、20mm)を 用いた埋め戻し材の乾燥密度および有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係のうち、Na型の埋め戻し材の結果を図 5.2-17 に、Ca型の埋め戻し材の結果を図 5.2-18 に示す。なお、締固 めエネルギーは4.5Ecとした。

模擬掘削土にケイ砂を用いた埋め戻し材と同様に、模擬掘削土に玄武岩、泥岩を用いた埋め戻し材においても、Na型、Ca型ともに乾燥密度と透水係数の関係よりも有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係の相関が高いことがわかる。

模擬掘削土にケイ砂、玄武岩、泥岩を用いた埋め戻し材の有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係を図 5.2-19 に示す。なお、玄武岩と泥岩の最大粒径は 2.5 mm、20 mm であり、ベントナイトは Na 型と Ca 型、ベントナイト混合率は 5~50%、締固めエネルギーは Ec、4.5Ec とした。

模擬掘削土の種類により透水係数に若干のばらつきはあるものの、Na型、Ca型の埋め戻し材 それぞれについて、有効モンモリロナイト密度が 0.3 Mg/m³よりも大きい範囲では、有効モンモ リロナイト密度と透水係数に概ね相関があることがわかる。掘削土を用いた埋め戻し材の透水係 数について品質管理をする場合、使用するベントナイトの種類(Na型、Ca型)により管理値が 異なることを考慮した上で、有効モンモリロナイト密度が管理指標の一つとして利用できると考 えられる。







(a) 乾燥密度と透水係数
 (b) 有効モンモリとナイト密度と透水係数
 図 5.2-18 乾燥密度および有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係(Ca型)
 (4.5Ec、ケイ砂・玄武岩・泥岩)



図 5.2-19 有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係 (ケイ砂・玄武岩・泥岩)

(6) 室内試験のまとめ

模擬掘削土として様々な岩種を用いた埋め戻し材の物性データを取得するとともに、締固め性 や透水性等に影響を及ぼす掘削土の要因について考察を行った。その結果、以下のことが明らか となった。また、掘削土に砕石・砕砂(玄武岩、泥岩)を用いた場合の埋め戻し材の管理指標(ケ イ砂6号を用いた埋め戻し材と比較)の考え方を示した関係図を図 5.2-20に示す。

① Na型とCa型の埋め戻し材の物性は大きく異なる。

(Ca型の埋め戻し材の方が締固め性は悪く、透水性は高い)

- ② 吸水率の高い岩種(例:泥岩)を用いた埋め戻し材の締固め性は低く、透水性は高い。
- ③ 最大粒径が20mmの掘削土を用いたNa型の埋め戻し材の透水係数は若干大きくなる。
- ④ ベントナイト混合率が高い場合には、掘削土の種類の影響が小さくなる。
- 5 埋め戻し材の透水係数は概ね有効モンモリロナイト密度で管理することができる。
- ⑥ 埋め戻し材の膨潤圧は、ベントナイト種類、掘削土の種類の影響が大きい。



図 5.2-20 掘削土(砕石・砕砂)利用時の埋め戻し材の管理指標の考え方 (ケイ砂を用いた埋め戻し材との比較)

5.2.3 埋め戻し材の小規模施工試験

(1) 撒き出し・転圧工法による施工データの取得および埋め戻し材の品質確認

撒き出し・転圧工法による小規模施工試験を通して、埋め戻し材の構成材料及び配合の組合せ に応じた最適な施工方法について検討し、施工技術の選定等に資する施工データおよび施工後の 物性データを取得した。併せて、施工性および施工後の品質に及ぼす可能性のあるベントナイト の種類(Na型、Ca型)や掘削土の粒径の影響等を確認した。

1) 試験条件および試験方法

(a)転圧施工

小規模施工試験では、予備転圧にプレートコンパクタを用い、本転圧ではハンドガイド振動ロ ーラーを用いた。前年度に実施した4種類の転圧機械を用いた予備試験では、達成可能な埋め戻 し材の密度はプレートコンパクタ、バイブロコンパクタ、ハンドガイド振動ローラー、小型振動 ローラーの順に高くなった(日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター、 2019)。最も高い密度が達成できる転圧機械は小型振動ローラーであったが、本年度の試験では 汎用性や運用性を考慮して、小型振動ローラーの次に達成密度の高いハンドガイド振動ローラー を用いることとした。

施工試験ケースを表 5.2-5 に示す。Na型ベントナイトを用いた Case A 及び Case B に関して は、斜め転圧の転圧機械を用いた施工試験も実施した。転圧施工における撒き出し厚さは 300 mm、 200 mm とし、斜め転圧施工に関しては 100 mm 程度の撒き出し厚さとした。また、Case A-Case C に関しては、各 5 層の施工を行い、Case D は 1 層のみの施工とした。

小規模施工試験では、施工後の品質評価が可能な幅1m、施工延長4m程度のピットで試験を 実施した。試験ピットの構造図及び外観を図 5.2-21 に示す。

施工試験の流れを図 5.2-22 (a)に示す。各材料を所定の撒き出し厚さで敷均した後に、転圧施 工を行う。材料をフレコンから直接、試験ピットに投入すると、フレコンから出た場所とそこか ら材料を前後に移動させた場所で初期のかさ密度に差が生じ、それが転圧後の密度にも影響する 可能性があるため、図 5.2-23 (a)に示すようにフレコンからベッセルに出し、そこからバックホ ウで図 5.2-23 (b)に示すように試験ピットに投入した。投入した材料は図 5.2-23 (c)のようにバ ックホウで均し、その後、図 5.2-23 (d)に示すように人力で所定の高さに敷均した。敷均しの高 さの管理は、事前に実施したレベル測量による墨出しにより行った。敷均し後、図 5.2-23 (e)に 示すようにプレートコンパクタによる予備転圧を行い、その後、図 5.2-23 (f)に示すようにハン ドガイド振動ローラーによる本転圧を行った。本転圧の転圧回数は、各材料1層目の施工の際に 2Pass 毎 (1往復毎) に図 5.2-23 (g)に示すレベル測量による層厚管理を行い、各材料での転圧回 数を設定した。2層目以降は、この転圧回数での転圧後のみにレベル測量を行った。

施工試験のイメージを図 5.2-22 (b)に示す。施工試験中は、1 層施工ごとに砂置換法による密 度試験を実施した。さらに、上層の施工に伴う下層の施工直後からの密度変化を確認するために、 5 層施工後、施工した層を上層から撤去して、撤去した層の下層の密度試験を実施した。施工試 験の各段階で取得するデータと各データの取得頻度を表 5.2-6 に示す。

| ケース | 埋め戻し材 種類 | 使用 ベントナイト | 材料 模擬掘削土 | 初期 含水比 | 撒き出し 厚さ (mm) | 施工層数 (転圧) | 施工 方法 |
|--------|-------------|--------------------|-------------------|----------------------|--------------------|--------------|----------|
| Case A | 埋め戻し材A | Na型:15% | 玄武岩 动石, 动砂粗目 | w _{opt} +1% | 300 200 | 3 2 | 転圧 |
| | | () =) / VI) | 14十7日 • 14千41少7出日 | | 100 | 1 | 斜め転圧 |
| | | Na型:15% | 玄武岩 砕砂細目 | w _{opt} +1% | 300 | 3 | 転圧 |
| Case B | 埋め戻し材 B | | | | 200 | 2 | |
| | | $(2 - 2) \neq (1)$ | | | 100 | 1 | 斜め転圧 |
| Casa C | 囲め豆し材で | Ca型:30% | 玄武岩 | (2) ↓ 10/ | 300 | 3 | 転圧 |
| Case C | 壁の戻し羽し | (クニボンド) | 砕石・砕砂粗目 | Wopt+1% | 200 | 2 | 平44/二 |
| Case D | 埋め戻し材 D | Ca型:30% (クニボンド) | 玄武岩 砕砂細目 | w _{opt} +1% | 300 | 1 | 転圧 |

表 5.2-5 転圧施工試験ケース
| 施工試験の 段階 | 取得するデータ | 測定方法あるいは規格・基準 | 測定頻度 | |
|---------------|-----------|-------------------|-----------------|--|
| | ベントナイト混合率 | JISA 1223(細粒分含有率) | 3 点/各材料 | |
| 材料製造後 | 含水比 | JIS A 1203 | 12 点/各材料 | |
| | 粒度分布 | JIS A 1204 | 1 点/各材料 | |
| | 投入量 | 材料の投入量 | 1 点/各層 | |
| | 転圧回数と施工層厚 | レベル測量 | 9 点/各転圧パス | |
| 撒き出し・ 転圧施工 | 施工速度 | 歩掛かり | 1回/各転圧パス | |
| | 乾燥密度 | JISA1214(砂置换法) | 3 点/各層(施工時、撤去時) | |
| | 含水比 | JIS A 1203 | 3 点/各層(施工時、撤去時) | |
| | 粒度分布 | JIS A 1204 | 1 点/各材料(施工時) | |
| | 透水係数 | JGS 0312-2018 | 2 点/各材料 | |
| 斜め転圧 | 乾燥密度 | JISA1214(砂置换法) | 3 点/各層(施工時、撤去時) | |
| 施工 | 含水比 | JIS A 1203 | 3 点/各層(施工時、撤去時) | |
| | 施工速度 | 歩掛かり | 1回/各材料 | |
| | リバウンド率 | | 1回/各材料 | |
| 吹付け施工 | 乾燥密度 | JISA1214(砂置换法) | 3 点/各材料 | |
| | 含水比 | JIS A 1203 | 3 点/各材料 | |
| | ベントナイト混合率 | JISA 1223(細粒分含有率) | 3 点/各材料 | |

表 5.2-6 施工試験で取得するデータ



(b) 試験ピットの外観 図 5.2-21 試験ピットの構造図及び外観



図 5.2-22 施工試験の概要(Case A の例)



(a) ベッセルを用いての材料投入



(b) 材料投入状況



(c) 敷均し状況(機械)



(d) 敷均し状況(人力)



(e) 予備転圧

(f) 本転圧



(g) レベル測量

図 5.2-23 施工試験状況

(b) 斜め転圧施工

バックホウに搭載可能なフラットプレートコンパクター(FPC)を用いて、ベントナイト混合 土の斜め転圧試験を行った。試験の状況を図 5.2-24に示す。試験では、図 5.2-24(a)の法面を利 用して斜め転圧を行い、施工性および施工後の品質を確認した。試験に使用する材料は、表 5.2-5 に示した Case A(クニゲル V1と砕石・砕砂の混合土)と Case B(クニゲル V1と砕砂の混合 土)とした。施工後の品質確認としては、Case A に関しては、ブロックサンプリングした試料を パラフィン法により密度の測定を行った。Case B に関しては、シンウォールサンプリングによる 密度測定を行った。撒き出し厚さは 100 mm 程度とした。



(a) FPC による斜め転圧施工 (b) 斜め転圧施工実施場所へ (c) FPC による斜め転圧実施 実施場所

の材料の投入状況 図 5.2-24 斜め転圧試験の状況

状況

2) 試験結果

(a) 施工後の各層の乾燥密度および締固め度

各層において測定した乾燥密度のうち、Case A(Na 型、砕石・砕砂 20 mm 以下)を図 5.2-25 に、Case B(Na型、砕砂 2.5 mm 以下)を図 5.2·26 に、Case C(Ca型、砕石・砕砂 20 mm 以 下)を図 5.2-27 に示す。なお、各グラフには同一の配合で実施した締固め試験(A法、C法)に より得られた最大乾燥密度を示した。また、各試験ケースの各層における締固め度(A法、C法) を図 5.2-28 に示す。

どの試験ケースにおいても、撒き出し厚さが 300 mm の 1-3 層目よりも、撒き出し厚さが 200 mm の 4、5 層目の方が乾燥密度および締固め度は大きく、転圧工法において、撒き出し厚さは 埋め戻し材の締固め性への影響が大きかった。

Case A と Case B を比べると、Case A の方が締固め度は大きく、撒き出し厚さ 300 mm と 200 mmの乾燥密度の差も大きかった。転圧工法では、埋め戻し材に使用する掘削土の最大粒径が大 きい方が締固め性は高く、また、撒き出し厚さの影響が大きいことがわかる。Case A と Case C を比べると、前述した室内試験の結果と同様に、模擬掘削土に同じ砕石・砕砂(玄武岩)を用い ても、ベントナイトの種類及び混合率の違いによって締固め性が異なることがわかる。

また、Case A では、1 層目、2 層目、3 層目と乾燥密度が小さくなる傾向がみられた。また、 5層施工後の1層目、2層目の乾燥密度は、施工後の乾燥密度よりも若干大きくなった。つまり、 Case A のように最大粒径の大きい掘削土を用いた埋め戻し材では、施工時には下層の締固め性 の影響を、施工後であっても下層は上層の施工の影響を受ける可能性があると考えられる。



図 5.2-25 各層の乾燥密度(Case A: Na 型 15%、砕石・砕砂 20 mm 以下) (各層 3 カ所の平均値)



(各層3カ所の平均値)



図 5.2-27 各層の乾燥密度(Case C: Ca 型 30%、砕石・砕砂 20 mm 以下) (各層 3 点の平均値)



(b) 層の上下における乾燥密度のばらつき

撒き出し厚さ 200 mm で施工した層の上下の密度を測定した結果のうち、Case A、Case B を 図 5.2-29 に、Case C、Case D を図 5.2-30 に示す。なお、各グラフには同一の配合で実施した 締固め試験(A 法、C 法)により得られた最大乾燥密度を示した。また、図に示した平均値は上下の層を一体として密度を測定した 3 カ所の平均値である。

全ての試験ケースにおいて、上下の層で密度が異なっており、平均値に対して層上部は密度が 大きく、層下部は密度が小さかった。つまり、撒き出し厚さ 200 mm では、転圧機械による締固 めエネルギーが層の下部まで十分に伝わっていないと考えられる。また、Case A と Case B を比 べると、層の上下の密度の違い、Case A の方が大きく、掘削土の最大粒径の影響がみられた。た だし、Case C と Case D においては、層の上下の密度に大きな違いはみられなかったため、ベン トナイトの種類や混合率により影響が生じると考えられる。



(a) Case A

(b) Cass B





図 5.2-30 層の上下の乾燥密度

(c) 透水係数

撒き出し・転圧工法では、埋め戻し材を水平に撒き出して転圧することを繰り返すため、施工 の層が水平に形成される。そのため、施工層に対する水平方向と鉛直方向の透水性を確認するた め、各試験ケースで採取した試料を通水方向が施工層の鉛直方向と水平方向になるように成形し て透水試験を実施した。各試験ケースにおける乾燥密度と透水係数の関係を図 5.2-31 に示す。 なお、グラフには同一の配合で室内試験により取得した透水試験の結果(締固め試験A法および C法。Case DのA法に関してはデータなし。)も併せて示した。

すべての試験ケースにおいて、鉛直方向と水平方向の透水係数に有意な差はみられなかった。 そのため、転圧工法における施工層に対する水平方向と鉛直方向の透水性の差は小さいといえる。

Case A と Case B についてみると、乾燥密度に違いはあるものの、透水係数はともに 1×10⁻¹⁰ m/s 程度であった。また、室内試験の結果と比較しても、透水係数は1オーダー大きい程度であ

った。Case C と Case D についてみると、乾燥密度の差は小さいものの、透水係数は最大粒径の 小さい Case D の方が Case C と比べて 1 オーダー程度大きかった。

Na 型の埋め戻し材では、掘削土の最大粒径が透水係数に及ぼす影響は小さく、現状の転圧施 工でも室内試験に近い透水性を確保することができる。一方、Ca型の埋め戻し材では、掘削土の 最大粒径が透水係数に及ぼす影響が大きく、低い透水性を確保するためにはベントナイト混合率 を増加させる、または、転圧機械の締固めエネルギーを増加させるなどが必要となる。



図 5.2-31 乾燥密度と透水係数の関係(室内試験と転圧工法の比較)

(d) 斜め転圧工法

斜め転圧工法によって施工した Case A および Case B の含水比と乾燥密度の関係を図 5.2-32 に示す。なお、グラフには前述した通常の転圧工法において撒き出し厚さ 300 mm、200 mm で 施工した際の結果と室内締固め試験(A 法、C 法)の結果を併せて示した。

斜め転圧工法による Case A および Case B の乾燥密度は、それぞれ平均値で 1.75 Mg/m³、1.55 Mg/m³であり、通常の転圧工法における撒き出し厚さ 300 mm の乾燥密度より大きく、撒き出し 厚さ 200 mm の乾燥密度より小さかった。

斜め転圧工法の撒き出し厚さは施工管理上 100 mm 程度としているものの、斜め転圧工法で も、転圧工法と同程度の乾燥密度で施工できることが確認された。ただし、斜め転圧工法による 実施工に向けては、以下のような課題があると考えられる。

○斜め転圧工法の実施工に向けた課題

- ・材料の敷均し方法および敷均し厚さの管理方法
- ・施工中の材料の崩れ防止方法
- ・坑道上部の施工方法
- ・施工速度



図 5.2-32 斜め転圧工法で施工した埋め戻し材の含水比と乾燥密度の関係

(2) 吹付け工法による施工データの取得および埋め戻し材の品質確認

吹付け工法による小規模施工試験を通して埋め戻し材の構成材料及び配合の組合せに応じた最 適な施工方法について検討し、施工技術の選定等に資する施工データおよび施工後の物性データ を取得した。併せて、施工性および施工後の品質に及ぼす可能性のあるベントナイトの種類(Na 型、Ca型)の影響や吹付け施工が可能な掘削土の最大粒径等を確認した。

1) 試験条件および試験方法

施工後の品質評価が可能な規模として、図 5.2-33 (a)に示す 500×500×200 mm の小型吹付け 箱を使用し、吹付け工法による小規模施工試験を実施した。小規模施工試験の流れ及び装置の概 要を図 5.2-34 に示す。

事前にバッチ式ミキサー(㈱北川鉄工所:WHQ-120)により混合及び含水比調整をした吹付け 材料を材料供給機(AGC プライブリコ㈱:グラニュレーター)のホッパー内に投入し、ベルトコ ンベアを介してローター式吹付け機(AGC プライブリコ㈱:ニードガン 2000)内に供給し、コ ンプレッサー(北越工業:PDS655SD)の圧縮空気により小型吹付け箱に吹き付けた。吹付け機 から小型吹付け箱までのホースは内径 50 mm、長さ 20 m であり、吹付けノズルは吹付け面より 1 m 程度の位置で保持した。

吹付け試験の試験ケースを表 5.2-7 に示す。ベントナイトは Na 型(クニゲル V1) と Ca 型 (クニボンド RW)、模擬掘削土は玄武岩(最大粒径:2.5、5、13 mm) と砂岩(最大粒径:2.5 mm)を用いた。ベントナイト混合率は、Na 型は 15%、Ca 型は 30%とした。施工データを取得 するためのパラメータとして、材料供給量は 7.5、10.0、12.5、15 kg/10sec の 4 ケース、含水比 は最適含水比(Wopt)、Wopt+1.5%、Wopt+3.0%の 3 ケースとした。クニゲル V1 と玄武岩(最 大粒径:2.5 mm)の混合土のケースの一部では、wopt-1.5%のケースも実施した。

試験時の品質管理項目及び施工試験後の取得データを表 5.2-8 に示す。施工後のサンプリング は図 5.2-35 に示すように、吹付け箱の中の 4 カ所から試料を採取して各種の測定を行った。密 度計測は、施工時にシリコーンオイル法、施工後にパラフィン法により実施した。シリコーンオ イル法では図 5.2-36 に示すように、吹付け施工時にノズルを固定し、凸型に材料を吹付けた後、 この部分を切り取り密度試験に使用した。この方法では、コア抜きのように、吹付けにより構築 した埋め戻し材を損傷させることなく湿潤密度を迅速に計測できる利点がある。含水比計測は施 工時に電子レンジ法、施工後に炉乾燥法により実施した。





(a) 吹付け箱の概略図

(b) 吹付け試験の状況

図 5.2-33 小型吹付け箱の概略図及び試験状況



図 5.2-34 小規模施工試験の流れ及び装置の概要図

| ベントナイト | 模擬 掘削土 | 最大粒径 (mm) | ベントナイト 含有率 (wt%) | 含水比 | 材料供給量 (kg/10sec) | ケース名 | | |
|--------|--------------|--------------|------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------------------|--|--|
| | | | | w _{opt} -1.5* | | Na15BS2.5wopt | | |
| | | 2.5 | | Wopt | | Na15BS2.5wopt+1.5 | | |
| | | | | wopt+1.5 | | Na15BS2.5wopt+3.0 | | |
| | 大 計 単 | | | Wopt | | Na15BS5w _{opt} | | |
| | 凶风石 | 5 | | w_{opt} +1.5 | | Na15BS5w _{opt} +1.5 | | |
| Na 型 | | | 15 | w _{opt} +3.0 | | Na15BS5wopt+3.0 | | |
| | | 13 | | Wopt | | Na15BS1305wopt | | |
| | | 15 | | wopt+1.5 | 7.5 | Na15BS1305wopt+1.5 | | |
| | | | | Wopt | | Na15SS2.5wopt | | |
| | 砂岩 | 2.5 | | w_{opt} +1.5 | | Na15SS2.5wopt+1.5 | | |
| | | | | $w_{opt}\!\!+\!\!3.0$ | | Na15SS2.5wopt+3.0 | | |
| | | | | Wopt | 12.5 | Ca30BS2.5wopt | | |
| | | 2.5 | | w_{opt} +1.5 | 15.0 | Ca30BS2.5wopt+1.5 | | |
| | | | | $w_{opt} + 3.0$ | 15.0 | Ca30BS2.5wopt+3.0 | | |
| | | | | Wopt | | Ca30BS5w _{opt} | | |
| | 玄武岩 | 5 | | wopt+1.5 | | Ca30BS5wopt+1.5 | | |
| Ca 刑 | | | 20 | w_{opt} +3.0 | | Ca30BS5wopt+3.0 | | |
| Ca 型 | | | | W _{opt} Ca30BS | Ca30BS1305wopt | | | |
| | | 13 | | wopt+1.5 | | Ca30BS1305wopt+1.5 | | |
| | | | | w_{opt} +3.0 | | Ca30BS1305w _{opt} +3.0 | | |
| | | | | Wopt | | Ca30SS2.5wopt | | |
| | 砂岩 | 2.5 | | wopt+1.5 | | Ca30SS2.5wopt+1.5 | | |
| | | | | wopt+3.0 | | Ca30SS2.5wopt+3.0 | | |

表 5.2-7 吹付け施工試験ケース

| 分類 | 材料 | 項目 | 確認方法 | 実施時期 | 実施場所 | 数量 |
|---------------------------------|--------|----------|---------------|------|-------|--------|
| | - | 歩掛り計測 | ストップウォッチ | 施工時 | 現地 | 日常記録 |
| 品質管理 (施工時) 取得データ (施工後) | 付着材 | 密度計測 | シリコーンオイル 法 | 施工時 | 現地 | 1ケース毎 |
| | | 含水比計測 | 電子レンジ法 | 施工時 | 現地 | 1 ケース毎 |
| | リバウンド材 | リバウンド率計測 | 電子秤 | 施工時 | 現地 | 1 ケース毎 |
| | 付着材 | 含水比 | 炉乾燥法 | 施工後 | 室内試験室 | 1 ケース毎 |
| | | 粒度試験 | - | 施工後 | 室内試験室 | 1 ケース毎 |
| | リバウンド材 | 粒度試験 | - | 施工後 | 室内試験室 | 1 ケース毎 |
| | | | | | | 試験時の |
| | ベントナイト | 法中部的 | | 佐丁汝 | 空内学校会 | 最大乾燥 |
| | | 迈小武映 | | 旭上仮 | 主门武驶主 | 密度のケ |
| | (此百工 | | | | | ース |
| | | 密度試験 | パラフィン法 | 施工後 | 室内試験室 | 1ケース毎 |

表 5.2-8 吹付け施工試験における品質管理項目







図 5.2-36 シリコーンオイル法の概要

2) 試験結果

(a) 施工パラメータの選定

表 5.2-7 に示した試験ケースについて、吹付け施工試験で施工性を確認し、それぞれの試験ケースにおける最適な施工パラメータを選定した。施工パラメータ選定のための施工性確認項目は、 材料供給機の供給状況、ホース内の付着量、ホース閉塞状況、リバウンド率、埋め戻し材の密度 により、総合的に判断した。選定した施工パラメータを表 5.2-9 に示す。最適な施工パラメータの傾向としては、Na型の埋め戻し材では、含水比は最適含水比もしくは湿潤側、材料供給量は多い設定が適しており、Ca型の埋め戻し材では、含水比は最適含水比よりも湿潤側、材料供給量は少ない設定が適していた。

| ベンパナノ」 | 描版 | 最大粒径 | 含水比 | 材料供給量 | |
|--------|------------------------|------|-----------------------|------------|--|
| ~~~~ | 犑 厥 '加刊 <u></u> | (mm) | (%) | (kg/10sec) | |
| | | 2.5 | Wopt | 12.5 | |
| Na 型 | 玄武岩 | 5.0 | w _{opt} +3.0 | 15.0 | |
| 15% | | 13 | Wopt | 7.5 | |
| | 砂岩 | 2.5 | wopt+1.5 | 15.0 | |
| | | 2.5 | w _{opt} +3.0 | 5.0 | |
| Ca 型 | 玄武岩 | 5 | wopt+3.0 | 5.0 | |
| 30% | | 13 | w _{opt} +3.0 | 7.5 | |
| | 砂岩 | 2.5 | w _{opt} +3.0 | 5.0 | |

表 5.2-9 選定した施エパラメータ

(b) 施工性(材料ロス率)

前年度に実施した吹付け施工試験において、材料供給機に投入した材料に対して、吹付け後の 埋め戻し材の量がロスする要因として、通常のリバウンドに加えて、ホース内に材料が付着・蓄 積される量の割合(以下、ホース内付着率)も大きいことがわかった(日本原子力研究開発機構・ 原子力環境整備促進・資金管理センター, 2019)。そこで本年度は、ホース内付着率とリバウンド 率を合わせた材料ロス率として整理することにより施工性の良否の判断に資する情報として整理 することとした。前述で選定した試験ケースの材料ロス率を図 5.2-37 に示す。

Na 型の埋め戻し材の材料ロス率は、掘削土の最大粒径が 2.5 mm、5 mm のケースの場合は 20~30%、最大粒径が 13 mm のケースの場合は 50~60%であり、Ca 型の埋め戻し材の材料ロス 率は、掘削土の最大粒径が 2.5 mm、5 mm のケースの場合は 30~40%、最大粒径が 13 mm のケースの場合は 60~70%であった。Na 型、Ca 型の埋め戻し材ともに、掘削土の最大粒径が 13 mm のケースの場合には、材料ロス率が急激に高くなっており、実施工での使用は現実的ではないと 考えられる。よって、今回の試験ケースにおいて施工性が確保できるのは、掘削土の最大粒径が 5 mm 以下であると評価した。

また、掘削土の最大粒径が 2.5 mm と 5 mm のケースのホース内付着率とリバウンド率をみる と、掘削土の最大粒径が大きい 5 mm のケースの方が 2.5 mm のケースよりもホース内付着率が 少なかった。これは、掘削土の最大粒径の大きい方が吹付け時にホース内に付着した材料を描き 落とすためと考えられる。ただし、最大粒径が大きいとリバウンド率が多くなる。なお、玄武岩 と砂岩で比較すると、最大粒径が 2.5 mm のケースのみではあるものの、材料ロス率に対して岩 種による大きな影響はみられなかった。





(c) リバウンド材の物性

吹付け工法においては、施工前の材料とリバウンド材の物性を把握し、リバウンド材の材料調 整や含水比調整を実施することができれば吹付け材料として再利用することが可能である。そこ で、吹付け試験前の材料とリバウンド材の粒度試験を実施した。模擬掘削土に玄武岩(最大粒径 2.5、5 mm)を用いた埋め戻し材の粒度試験結果のうち、Na型を図 5.2-38 に、Ca型を図 5.2-39 に示す。

Na 型の埋め戻し材についてみると、玄武岩の最大粒径が 2.5 mm の埋め戻し材は試験前の材料とリバウンド材の粒度分布の変化量は小さかった。一方、玄武岩の最大粒径が 5 mm の埋め戻し材は試験前の材料と比べて、リバウンド材の細粒分が少なくなった。つまり、吹付けにより埋め戻し材のうちの粒径の小さい成分が吹付け箱に付着し、粒径の大きい礫や砂が選択的にリバウンドしていることがわかる。

Ca型の埋め戻し材についてみると、玄武岩の最大粒径にかかわらず、リバウンド材の細粒分が 少なくなっており、粒径の大きい礫や砂が選択的にリバウンドしていることがわかる。また、Ca 型の埋め戻し材は、Na型の埋め戻し材よりもベントナイト混合率を高く設定したため、埋め戻 し材に占める掘削土(礫・砂)の割合が低いものの、材料分離の割合は大きかったことから、吹 付け時に材料分離が生じ易いことがわかる。



(d) 乾燥密度

吹付け試験後の埋め戻し材の密度測定は、シリコーンオイル法とパラフィン法を用いた。シリ コーンオイル法の試料は、各試験ケースでの吹付け試験の最後に凸型に吹付けた部分を用いた。 パラフィン法の試料は、吹付け箱の4ヵ所(中心、下部半開放、上部中央、上部隅)から採取し た。模擬掘削土に玄武岩(最大粒径2.5、5mm)を用いた試験ケースのシリコーンオイル法とパ ラフィン法により算出した乾燥密度を図 5.2-40 に示す。なお、グラフには同一材料を用いた室 内試験(4.5Ec)の結果を併せて示した。

吹付け試験による埋め戻し材の乾燥密度は、Na 型及び Ca 型の埋め戻し材ともに、室内試験 (4.5Ec) に対して締固め度は 85%~95%であった。シリコーンオイル法とパラフィン法による乾 燥密度は、Na 型及び Ca 型の埋め戻し材のどちらもシリコーンオイル法の方が小さかった。その ため、シリコーンオイル法から算出した乾燥密度を安全側の数値と捉えれば、現場で迅速に密度 を計測する簡易測定法としてシリコーンオイル法が使用できると考えられる。吹付け箱の 4 ヵ所 から採取してパラフィン法により算出した埋め戻し材試料の乾燥密度をみると、Na 型及び Ca 型 の埋め戻し材ともに多少のばらつきはあるものの、吹付け箱内の乾燥密度のばらつきは小さいた め、実際の坑道の施工を考えた場合、坑道の上部や壁際の施工においても施工位置が施工品質(乾







(e) 透水係数

模擬掘削土に玄武岩(最大粒径 2.5、5 mm)を用いた試験ケースにおける乾燥密度と透水係数の関係を図 5.2-41 に示す。なお、グラフには室内試験で取得した同一配合の透水試験の結果(締固め試験 C 法)を示した。

Na 型及び Ca 型の埋め戻し材の透水係数に対して模擬掘削土の最大粒径の影響は小さかった。 Na 型の埋め戻し材の透水係数は 1.0×10⁻¹⁰ m/s 程度であり、室内透水試験結果(C法)と比べ て1オーダー程度高かった。Ca 型の埋め戻し材の透水係数は、1.0×10⁻⁹ m/s 程度であり、室内 透水試験結果(C法)と同程度であった。Na 型及び Ca 型の埋め戻し材ともに、室内透水試験の 供試体に比べて乾燥密度が小さかったにもかかわらず、透水係数の差は1オーダー程度と比較的 小さかった。その原因としては、前述したように吹付け時に礫や砂が選択的にリバウンドしたこ とにより、吹付け前の材料に比べて吹き付けられた埋め戻し材のベントナイト混合率が高くなっ たためと考えられる。



図 5.2-41 玄武岩を用いた埋め戻し材の乾燥密度と透水係数の関係

(3) 小規模施工試験のまとめ

撒き出し・転圧工法および吹付け工法の小規模施工試験を実施し、埋め戻し材の構成材料及び 配合の組合せに応じた最適な施工方法について検討するとともに、施工技術の選定等に資する施 エデータおよび施工後の物性データを取得した。また、施工性および施工後の品質に及ぼすベン トナイトの種類(Na型、Ca型)の影響や掘削土の粒径の影響等を確認した。本試験により明ら かになったことを表 5.2-10 に示す。

| | 撒き出し・転圧工法 | 吹付け工法 |
|-----------------|---|---|
| 使用可能な掘削土 | 掘削土の種類、粒径等にかかわらず施工す ることが可能 | 掘削土の最大粒径 5 mm 以下 (最大粒径が大きいと材料ロス率が高い) |
| 施工後品質 (透水係数) | Na型:1×10⁻¹⁰ m/s 程度 (締固め試験(A,C法)より1オーダー程 度高い) Ca型:1×10⁻⁶~10⁻⁸ m/s 程度 (締固め試験(A法)程度) | Na型:1×10⁻¹⁰ m/s 程度 (締固め試験(A,C法)より1オーダー程 度高い) Ca型:1×10⁻⁹ m/s 程度 (締固め試験(C法)程度) |
| 施工時の留意点 | ・埋め戻し材の物性(乾燥密度)のばらつ きが大きい ⇒撒き出し厚さによる影響が大きい ⇒層毎および層内でのばらつきがある | ・施工性に対する使用材料の制限がある (材料ロス率や材料分離が大きくなる) ⇒掘削土の粒径が大きい場合 ⇒Ca型ベントナイトの場合 |

表 5.2-10 小規模施工試験のまとめ

5.2.4 埋め戻し材の施工概念の検討

(1) 実寸大坑道の埋め戻しを想定した施工試験の概念検討(撒き出し転圧工法、吹付け工法)

深成岩類及び先新第三紀堆積岩類における地層処分場の主要坑道(原子力発電環境整備機構, 2018)の長さ5.5mの範囲を対象として、埋め戻し材を施工する際の概念検討を実施した。対象 とする主要坑道の形状を図 5.2-42 に示す。

前述した小規模施工試験の結果より、撒き出し・転圧工法は利用する掘削土に関する制約は少 ないものの乾燥密度などの施工品質にばらつきが多く、坑道のような場所では施工機械の形状な どから施工範囲が制限される。また、吹付け工法は、使用できる掘削土の最大粒径には制限があ るものの、坑道のような場所において施工範囲の制約は少ない。そこで、できる限りの範囲を撒 き出し・転圧工法により施工し、施工が困難な箇所には吹付け工法を適用する施工方法について 施工手順等の概念検討を行った。



図 5.2-42 概念検討で対象とする坑道(主要坑道の例)

転圧機械が坑道の側面から 50 mm の距離まで施工可能と仮定すると、それぞれの機械での施 工可能高さは図 5.2-43 に示す通りとなる。図 5.2-43 (a)が小型振動ローラー、(b)がハンドガイ ド振動ローラー、(c)がバイブロコンパクタによる施工可能高さとなる。それぞれの施工機械の底 板からの施工可能高さは、小型振動ローラーが 2,128 mm、ハンドガイド振動ローラーが 2,190 mm、バイブロコンパクタが 2,510 mm となる。バイブロコンパクタが最も高い位置まで施工す ることが可能となるが、それでも坑道高さの半分程度である。吹付け施工において、狭隘な箇所 も施工できる機構、すなわち、吹付けノズルを狭隘な場所で保持する機構を新たに製作すれば、 坑道側面を吹付け施工により鉛直に立ち上げ、残った坑道の中央部分を転圧施工することにより、 さらに高くまで転圧することは可能であるが、現時点では施工の実現性を確認できていない。そ こで、図 5.2-43 に示す施工可能高さまで転圧施工を行い、残りの坑道上部を吹付けにより施工 することが、現時点では現実的である。実際に、地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験において は、転圧工法と吹付け工法を組み合わせて上部埋め戻し材の施工が行われた(原子力環境整備促 進・資金管理センター、2015)。

上記に基づく施工試験案を図 5.2-44 に示す。転圧施工における1層当りの仕上がり厚さを100 mm とし、施工手前部はそのまま法面を1:2 程度の勾配で施工すると仮定した。転圧施工の高 さは2m程度とし、残りの上部を吹付け施工により埋め戻す。吹付け面の勾配は2:1 程度とし ている。図 5.2-44 の施工例に基づくと、転圧施工部分の体積は55 m³程度、吹付け施工部分の 体積は75 m³程度となる。転圧施工に関して、1日2層を実施すると1日の施工量は5.5m³/日と なり、計10日程度を施工に要することになる。吹付け施工に関しては、前年度の本事業の成果 「小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験」(日本原子力研究開発機構・原子力環境整備 促進・資金管理センター,2019)を参考に、1日の施工量を3m³(1日の施工時間を6時間と仮定)とすると、計25日程度を施工に要することになり、転圧施工と合わせて、計35日程度の施工日数となる。ただし、この施工日数は上記の仮定に基づくものであり、複数の施工装置の使用や施工装置の高度化などにより施工日数をある程度短縮することが可能である。



図 5.2-43 転圧機械による施工可能高さ







(b) 転圧施工; 20 層(2,000mm)



図 5.2-44 模擬坑道を用いた施工試験の例

(2) 転圧工法および吹付け工法以外の施工技術オプションの概念設計

撒き出し・転圧工法及び吹き付け工法以外の施工技術オプションを整備するために、2 種類の 施工方法以外の既存の埋め戻し材の施工技術を調査するとともに、新たな施工技術オプションの 抽出を目的とした検討を行った。また、それらの技術オプションに対して、坑道の断面形状や環 境条件を考慮した施工装置の概念設計(機構、形状、概略寸法等の設定)を実施した。

1) 代替施工技術オプションの選定

a. 埋め戻しに関する施工技術の調査

埋め戻し材の代替施工技術オプションを選定するために、放射性廃棄物処分分野における埋め 戻しの施工技術及びその他の分野における類似の知見や研究成果に関する文献を調査した。施工 技術の調査は、以下の分野を対象とした。

○放射性廃棄物地層処分の埋め戻しを対象とした試験

○放射性廃棄物地層処分の埋め戻しを対象とした技術検討

○土木及び鉱山等の他分野における埋め戻し工事の計画・記録

これらのうち、特に通常の吹付け工法及び撒き出し・転圧工法以外の施工技術を扱っているもの を調査対象とした。また、参考として、ブロック施工および横締固め工法についても一部の代表 的な文献を調査した。調査対象とした文献リストの一覧は付録6に示すとおりである。

- 調査対象文献から、埋め戻し材の施工技術について整理すると以下のようになる。
- ・既存の吹付け、撒き出し・転圧及びブロック積み技術を除く、地層処分分野における実証試 験では、スクリューフィーダーの開発に関する取り組みが最も多くなされている。
- ・狭隘部へのベントナイトペレットの充填には、エアブローを使用した例が複数ある。
- ・PEM 周囲の充填および転圧埋め戻し後の坑道との隙間への充填が流動体により実施された 例がある。
- ・唯一の土木工事による坑道埋め戻しには、流動体による充填が採用されている。
- ・比較的新しい埋め戻し技術として、実績のあるエアブロー工法、自由落下+振動締固め工法 及び吹付け工法の改良技術としてのベルトショット工法がある。

この結果、施工技術オプションとして比較評価の対象とする埋め戻し技術(輸送技術を含む) は次の通りとする。

- ・吹付け工法
- ・撒き出し・転圧工法
- ・撒き出し・横転圧工法
- ・ブロック積み工法
- ・スクリューフィーダー工法
- 流動体充填工法
- ・自由落下+振動締固め工法
- ・エアブロー工法
- ・ベルトショット工法

なお、吹付け工法および撒き出し・転圧工法(横転圧工法含む)は、他の施工法を評価するための比較対象として評価を行う。

b. 代替施工技術オプションの選定のための評価指標の検討

調査した施工技術オプションの選定に用いるための評価指標として、以下の7項目を設定した。

- 埋め戻し材料および製造
 現時点では、地層処分の埋め戻しに適用される材料は確定していないことから、現段
 階における施工技術の検討においては、幅広く適用性を評価する必要があるため
- 施工時の物理的制約

施工に必要な設備機器及びその稼働範囲ならびに埋め戻し材の品質確保のために必要な空間など、地下坑道内での施工を考慮した場合には物理的な制約があるため

③ 施工時の環境

各施工法による地下坑道における埋め戻し作業に対して、坑道内環境及び施工環境が 施工後の品質に影響を及ぼす可能性があるため

- ④ 施工品質および品質管理
 各施工法により、施工時に要求される密度の達成可能性、施工品質の均質性、品質管理の容易性が異なるため
- 施工速度
 埋め戻し材の施工の工期に影響するため
- ⑥ 組み合わせによる有効性
 単一の施工法では坑道全体の埋め戻しができない場合があるため
- ⑦ コストアップ・ダウン要因コストは施工法の選定における判断指標の一つとなるため

c. 代替施工技術オプションの選定

上述の評価指標ごとに各施工技術の優劣について定性的な評価を行い、埋め戻し材の代替施工 技術オプションを抽出した。各評価指標に対して施工技術を評価した結果を付録6に示す。表中 のコストについては、不利な条件をコストアップ要因(表中では"UP")、有利な条件をコストダ ウン要因(表中では"DOWN")、どちらでもない標準的な要因(表中では"-")に分類して記 載した。撒き出し・転圧工法と吹付け工法については、参考として表中に加えた。

付録6に示した結果から、スクリューフィーダー方式と自由落下+振動締固め工法が有望な代 替施工技術オプションとして評価した。ただし、自由落下+振動締固め工法については、坑道天 端付近の充填性が材料と工法に依存し、他の工法と組み合わせる必要性が生じる可能性が高いこ と、振動による締固め効果が材料(流動性の低い材料に対しては効果が低い)と施工速度(材料 投入量と締固め時間との関係で決定する)に依存すると考えられる。一方で、スクリューフィー ダー方式は、掘削土の最大粒径への幅広い対応、単一の工法で坑道全断面の埋め戻しが可能、施 工速度の速さなどの利点を有した施工方法である。そのため、スクリューフィーダー方式を代替 施工技術オプションとして選定して、装置の概念設計を進めることとした。

2) スクリューフィーダー工法による施工装置の概念設計

a. 埋め戻し材の暫定仕様設定

既存の施工技術の調査結果から、施工装置の概念設計の対象とする施工技術オプションとして スクリューフィーダー方式を選定した。一方で、調査結果のうちスクリューフィーダー方式によ るベントナイト系材料の充填試験は、緩衝材の施工を目的としたものがほとんどで、唯一の埋め 戻し材(PEM 方式における隙間充填材)への適用事例においても充填材にはベントナイトペレ ットが用いられた(原子力環境整備促進・資金管理センター, 2019)。

このように、埋め戻し材の施工技術としてのスクリューフィーダー方式の適用を目的とした既 往検討の実績が非常に限定的であるため、埋め戻し材に求められる仕様(本業務では透水係数で 1×10⁻⁹ m/s 以下)を満足することが見込まれる材料の仕様を暫定的に設定することとした。ス クリューフィーダー方式における埋め戻し材の仕様としては、撒き出し・転圧工法や吹付け工法 を対象とした試験の条件との整合を図るものとし、ベントナイト(クニゲル V1+GX: 原鉱石)と 模擬掘削土(砕石・砕砂)の混合土を想定することとした。ベントナイト混合率は15%とし、砕 石・砕砂の最大粒径は小規模施工試験の試験条件にも設定した 20 mm とした。なお、埋め戻し 材の粒度分布は、暫定的に粒子を最密充填にするための粒度分布曲線であるフラー・トンプソン 曲線(Fuller, W.B. and Thompson, SE., 1907)の最大粒径 20±5mm の場合にしたがうものとし て設定した。本来、埋め戻し材の含水比も施工効率に影響を与えるが、スクリューフィーダー方 式における適切な実績データがないため、暫定的に自然含水比で検討を進めることとした。 以上により暫定的に設定した埋め戻し材の仕様を表 5.2-11 に示す。

| | | X | • • • • | | | |
|------------------|------------|-------------|---------|-----|-------------------------|--------------------|
| 施工方法 | | 配合 | | 含水比 | 乾燥密度 | 有効粘土密度 |
| スクリューフィーダー 工注 | ベント ナイト | クニゲル V1+GX | 15% | 自然 | $1.2 \mathrm{Mg/m^{3}}$ | $0.28~{ m Mg/m^3}$ |
| | 掘削土 | 砕石 2005・砕砂* | 85% | 百八儿 | | |

表 5.2-11 埋め戻し材の暫定仕様

b. 個別充填機構に関する検討

○埋め戻し材の搬送量の設定

施工装置に必要な埋め戻し材の搬送量(材料供給量)は、対象とする坑道の埋め戻し工程によって設定される。施工装置の個別充填機構の検討に先立ち、施工装置の仕様(装置に具備すべき 埋め戻し材の搬送量等)を算定する。

埋め戻しの対象は、深成岩類及び先新第三紀堆積岩類における高レベル放射性廃棄物処分場の 主要坑道とした。主要坑道の総掘削量は33万m³(パネル型、竪置き・ブロック方式)と見積も られている(原子力発電環境整備機構,2018)ため、埋め戻し材の必要量は掘削土量と同量と仮 定した。また、現時点では主要坑道の埋め戻しのスケジュールは設定されていないため、ここで は、処分費用の試算のために設定された処分スケジュール(案)の解体・閉鎖段階の10年(経済 産業省資源エネルギー庁,2004)を参考として、その内の5年間を主要坑道の埋め戻し期間と仮 設定した。

上記の仮定に基づき施工装置に必要な埋め戻し材の搬送量を算出した。

埋め戻し実作業日数

5(年)×52(週/年)×5(日/週、週当たり作業日数)≒1,300日

1日当たり埋め戻し量

330,000 (m³) ÷1,300 (∃) ≒ 250 m³/∃

1日当たり施工能力(施工装置の稼働率を60%と仮定)

 $250 \text{ m}^3 / \exists \div 0.6 \ \doteqdot \ 420 \text{ m}^3 / \exists$

充填施工能力(実労働時間8時間/日)

 $420 \text{ m}^3 \div 8 \text{hr} \approx 52 \text{m}^3 / \text{h}$

坑道埋め戻し延長

 $52 \text{ m}^3 / \text{h} \div 26 \text{ m}^2 = 2.0 \text{ m} / \text{h}$

上記の算定結果を施工装置に求められる基本仕様とし、まずは埋め戻し工程を施工装置1台で 賄うものとして、充填装置に関する検討を行う。

○充填装置単体供給量の設定

今回対象とする埋め戻し材料のように、塊を含む材料を送る場合は、その塊の直径に応じて必要なスクリューの最小径は、経験によりおおよそ次のように決まる。表 5.2-12 は、参考例(イシバシ, 2019)を基にフィーダー用として径を 1/2 とし、混合率 50%として推定したものである。 ベントナイトと砕石・砕砂混合土の混合率を 0.15:0.85、砕石 2005 と砕砂の混合率を 6:4 とすると、ベントナイト: 砕石 2005: 砕砂の混合率は 0.15:0.51:0.34 となる。この表より、想定され るスクリュー径(おおむね 200mm 以上)においては、ベントナイトおよび砕砂はスクリュー径の決定に影響しない程度に細かい成分と考えられる。ここでは砕石 2005 の混合率 51%を指標としてスクリュー径を決定することとして、最大径 20 mm の混入率 51%の砕石を送るためには、同表よりスクリュー径が 300 mm 程度必要なことがわかる。

| フカリー | 最大塊径[mm] | | | | | | | |
|------------------------|----------|---------|----------|--|--|--|--|--|
| ^{ヘクリュー} 侄[mm] | 混入率 25% | 混入率 50% | 混入率 100% | | | | | |
| 150 | 10 | 8 | 6 | | | | | |
| 200 | 19 | 15 | 10 | | | | | |
| 250 | 19 | 15 | 10 | | | | | |
| 300 | 25 | 20 | 12.5 | | | | | |
| 350 | 32.5 | 25 | 16 | | | | | |
| 400 | 37.5 | 30 | 19 | | | | | |
| 450 | 37.5 | 32 | 25 | | | | | |
| 500 | 45 | 35 | 25 | | | | | |

表 5.2-12 スクリュー径と最大塊径の関係 (イシバシ、2019を基に作成)

スクリューフィーダーの時間当たりの単体供給可能量は次の式で計算される。

$$\mathbf{q} = 60\boldsymbol{\emptyset} \cdot \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{N}$$

q:単体供給量[m³/h] D:スクリュー外径[m] d:スクリューシャフト外径[m] a:スクリューピッチ[m] Ø:充填効率[-] N:回転数[rpm]

このうち、充填効率φは試験により設定することが望ましいとされているが、ここでは経験的に用いられる数値として ϕ =0.9 と仮定した。また、スクリューピッチについても同様に、最終的には試験で確認すべきであるが、ここでは基本設計を実施する際の標準的な仮定としてスクリュー径と同等として a= 300 mm とした。シャフト外径は、構造設計による確認が必要であるが、ここでは経験的に d= 100 mm と仮定する。先の検討から D= 0.3 m であるので、上式からスクリューフィーダー1 本あたりの搬送量は、回転数 Nをパラメータとして、q= 0.938 Nm³/h となった。

充填装置全体の必要充填量は $Q = 52.0 \text{ m}^3/\text{h}$ であるから、スクリュー本数を n本とすると、次の関係が成立する。

 $Q = 0.938 \cdot N \cdot n > 52.0 \text{m}^3/\text{h}$

スクリュー本数は、次の2要素を満たす必要がある。

- ① 単体供給量から導かれる全体必要充填数量
- ② 坑道断面積および断面形状から、できるだけ均等な埋め戻しを施工することができる配置から導かれる数量

上記②については、後述するように坑道全体をカバーする配置から12本程度が適切と考えた。

したがって、上式で本数 n = 12 とした場合、回転数は N = 4.62 rpm (設計は 5.0 rpm とする) となる。

粒径の比較的大きい物質を搬送する際の最大回転数は、スクリュー径 ϕ = 600 mm のスクリュ ーフィーダーの場合(スクリューコンベヤの場合の 1/2)25 rpm、 ϕ = 100 mm で 35 rpm とさ れている(イシバシ, 2019)ので、本設計ケース ϕ = 300 mm の場合は上限がおおよそ 30 rpm 程度と考えられることから、ここで設定する回転数 N= 5.0 rpm は十分に小さい値であり、将来 の高回転化の仕様変更にも十分に対応できる。

c. 全体充填機構に関する検討

充填装置(スクリュー)の配置は、できるだけ均質な充填が可能な配置とすることが望ましい。 フィーダーから供給される埋め戻し混合土は、基本的には自由落下でスクリューから排出される。 排出された埋め戻し材は、特別な措置を講じなければ材料の自然崩壊角で斜面を構成する。

まず、上方の坑道天端付近については、埋め戻し材の沈下等により空隙が残留することが懸念 されることから、スクリューから排出された埋め戻し材により坑道天端が十分に充填されるよう に、スクリューを配置する必要がある。この観点から、坑道天端形状に合わせて天端に近い位置 にある程度の本数を配置することが望ましい。

次に、上方から下方への落下高さが大きくなるほど、粒径の大きい材料が分離する可能性が高 くなり、均質性の観点から望ましくない状況となる。また、天端付近のスクリューから排出され た埋め戻し材が下方へ落下してしまうことにより、天端付近における空隙残留のリスクが高まる。 そのため、坑道下方には天端からの埋め戻し材の落下を引き起こさないような十分な量を天端付 近に先行して供給する必要がある。

これらの要求を満たすための配置の要点をまとめると次のようになる。

・下方には、比較的高密度にスクリューを配置

・天端付近は、坑道天端に近い位置に、天端の形状に合わせて配置

・埋め戻し材の自然崩壊角(ここでは仮に 30 度とする)に沿ってスクリューの先端を配置 坑道断面に適合させたスクリューの配置図を図 5.2-45 に示す。

充填装置は、12本のスクリューフィーダーと埋め戻し材を蓄積するタンクとの組み合わせによ る、比較的単純な装置となる。スクリューフィーダーによる充填では、スクリューの「押し込み」 による大幅な充填密度の向上は見込まないが、壁面・床面の様々な凹凸周囲への充填をより確実 にするために、押し込みによる残留空隙への埋め戻し材の充填を期待する。そのための押し込み 力はスクリューの回転による埋め戻し材の送り込みにより得ることとし、そのスクリューからの 反力は充填装置全体で確保する。具体的には自走式台車のブレーキ力を適切に制御しながら埋め 戻し・後退をおこなうことで、「押し込み力」を維持する。



図 5.2-45 充填装置 (スクリュー)の断面配置

d. 施工装置の全体構成

上記の検討に基づき概念設計を実施したスクリューフィーダー方式による埋め戻し材の施工状況のイメージを図 5.2-46 に示す。施工装置全体の概念図及びイメージは付録 6 に示した。施工装置は、スクリュー、タンク及び走行装置で構成される充填装置、充填装置に埋め戻し材を供給する供給装置、供給装置に埋め戻し材を運搬する運搬台車で構成される。供給装置および運搬台車の無動力台車は、重量を支える車輪と装置を積載するための台枠のみで構成される。装置の主な諸元は表 5.2-13 に示す通りである。

本施工装置により、主要坑道の全断面の埋め戻しが可能であると考えられる。ただし、概念設 計の段階で設定した幾つかの仮定について、要素試験や実証試験により施工条件の見直しや施工 後の埋め戻し材の品質などの確認行い、その結果を装置設計に反映する必要がある。

| 装置名称 | 諸元 | | 備考 |
|------|----------|----------|----------------------|
| | 全長 | 約 25.2 m | |
| | | 約 20.7 m | 運搬台車別 |
| 施工装置 | 高さ | 約 4.8 m | |
| | スクリューフィー | 14.2 m | タンク内含む最長 |
| | ダー長さ | 9.6 m | タンク内含む最短 |
| 去博壮罢 | 重量 | 約 141 t | タンク、スクリューフィーダー、抑止板など |
| 儿埧衣胆 | 消費電力 | 2.2 kw | スクリューフィーダー1 本あたり |
| 充填装置 | 重量 | 約 15 t | |
| 走行台車 | 消費電力 | 88 kw | スクリューコンベヤ1本あたり |
| 卅齡准罢 | 重量 | 約 32 t | バッファータンク、スクリューコンベヤなど |
| 供和衣匪 | 消費電力 | 11 kw | |
| 運搬台車 | 重量 | 約7t | |

表 5.2-13 スクリューフィーダー方式の施工装置の主な諸元



図 5.2-46 スクリューフィーダー方式による埋め戻し材の施工状況のイメージ

(3) まとめ

撒き出し・転圧工法及び吹き付け工法の2種の施工方法以外の新たな埋め戻し材の施工技術オ プションを整備することを目的として、スクリューフィーダー工法の施工装置の概念設計を実施 した。得られた主な結果を以下に示す。

- 処分施設の主要坑道の埋め戻しに適用可能と考えられる施工法を調査し、撤出し転圧工法 及び吹付け工法以外の工法の比較検討により、優位と考えられる工法としてスクリューフ ィーダー工法を選定した。本工法は、海外では複数の大型実証試験、国内においても実証試 験の経験があり、それらの知見を活用できる。
- 既往の地層処分の埋め戻しおよび緩衝材に関する研究成果を参考に、要求透水係数を満足 するために埋め戻し材が達成すべき乾燥密度を設定した。
- 地下における施工環境、既往の地層処分施設の設計および処分事業のスケジュールの検討 例を参考に、施工装置への要求性能を設定し、概念設計を実施した。

今後、スクリューフィーダー方式の施工装置の開発のためには、要素試験により本工法に適用 可能な埋め戻し材の配合の確認や段階的な機能確認試験等が必要である。

5.2.5 実寸大模擬坑道の整備

撒き出し・転圧工法及び吹付け工法による埋め戻し材の小規模施工試験では、施工可能な材料 の配合に関するデータ及び施工後の乾燥密度のばらつきなどのデータを取得するとともに、主要 坑道を対象とした施工概念について検討を行った。一方で、実際の坑道での埋め戻し材の施工を 考えた場合、施工後に埋め戻し材の自重沈下により坑道の天端に隙間が発生する可能性がある。 また、とくに撒き出し・転圧工法では、坑道と埋め戻し材の境界面では締固めのエネルギーが伝 わりにくく、埋め戻し材の目標密度に到達しない可能性がある。これらの事象を把握するために は、実寸大の施工試験を実施する必要があるが、地下研究施設の坑道を対象とした場合には、坑 道界面の埋め戻し材の状態や坑道天端の隙間を把握することは難しい。地上施設の模擬坑道であ れば、環境条件が制御可能であり、模擬坑道自体に計測用の窓を設けるなどの工夫によりこれら の事象を把握することができる。そのため、埋め戻し材の施工試験を実施するための実寸大の模 擬坑道を整備した。

(1) 実寸大模擬坑道の基本仕様

実寸大模擬坑道は、地層処分場において検討されている深成岩類及び先新第三紀堆積岩類の主 要坑道(原子力発電環境整備機構, 2018)を対象とし、模擬坑道の内空は主要坑道の断面形状と 同じとした。主要坑道の断面形状を図 5.2-47 に示す。

実寸大模擬坑道は鉄筋コンクリート製とした。埋め戻し材の施工試験では、妻壁から5m程度 の範囲を埋め戻すことを想定しているため、施工機械の大きさを考慮して模擬坑道の延長は18 m(坑道部:12m、アプローチ部:6m)とした。模擬坑道の片端には妻壁を設け、埋め戻し施 工試験時に発生する土圧等に耐える構造とし、試験の土圧及び坑道の変形量を測定するための土 圧計(4台)及び鉄筋計(8台)を坑道の躯体内に設置した。また、埋め戻し施工試験後における 埋め戻し材と坑道内側の境界の施工状況を把握するために、坑道の頂部に鉛直方向に9カ所、側 壁左右それぞれ水平方向に6カ所の計測孔をφ400mmで設けることとした。





(2) 実寸大模擬坑道の設計

- 1) 設計条件
- (a) 許容応力度

許容支持力度は、模擬坑道内部に土砂が無い状態の放置期間を長期と設定し、土砂を充填す る期間は比較的短いことから、短期と設定した。各許容応力度は、以下に示す通りとした。

 ○コンクリート(σ_{ck} = 24 N/mm²)
 許容曲げ圧縮応力度: 8.0 N/mm²
 許容せん断応力度: 0.23 N/mm²
 ※許容せん断応力度には"道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編"に示されている補正係数 を乗じる。 ○鉄筋(SD345)

許容引張応力度:180 N/mm²

※短期許容応力度は、上記の値の1.5倍とする。

(b) 荷重条件

- ○材料の単位体積重量
 - コンクリート(土間コンクリート): 23.0 kN/m³
 - 鉄筋コンクリート:24.5 kN/m³
 - 埋め戻し材:24.0 kN/m³
- 〇土圧
 - 土圧は静止土圧とする。
 - $P_0 = K_0 \times \gamma \times h$
 - Po:後輪片側の荷重強度(kN)
 - K₀:静止土圧係数 (= 0.5)
 - γ: 埋め戻し材の単位体積重量(kN/m³)(ベントナイト系材料 2.40×9.80)
 - *h*:深さ (m)
- ○活荷重

底版上には T-25(総重量 25 t、荷重配分:前輪片側 10%、後輪片側 40%)の後輪荷重を 考慮する。

P=100 kN

P:後輪片側の荷重強度(kN)

- ※活荷重には衝撃係数 i=0.3 を考慮する。
- (c) 地盤条件

底版支持地盤の定数は、平板載荷試験より以下に示す通りとする。 極限支持力 $q_a = 336.0 \text{ kN/m}^2$ 許容支持力 長期 $q_a = q_a/F_s = 336.0/3 = 112.0 \text{ kN/m}^2$ 短期 $q_a = q_a/F_s = 336.0/2 = 168.0 \text{ kN/m}^2$ 変形係数 $E_o = 7022 \text{ kN/m}^2$

- (d) 準拠基準
 - ・道路土工模擬坑道工指針(平成 21 年度版) 平成 22 年 3 月(社) 日本道路協会
 - ・道路橋示方書・同解説IV下部構造編 平成24年3月(社)日本道路協会
- (e) 設計結果

上記の設計条件および荷重条件等に基づき実寸大模擬坑道の設計を実施した。各施工ブロックにおける応力度照査結果を表 5.2-14 および表 5.2-15 に示す。また、実寸大模擬坑道の構造 図を図 5.2-48 および図 5.2-49 に示す。

| | | | 1X J.Z- | TH DET | 99 P D D | | 加瓦黑瓦帕 | 1不見 | | |
|------------------|-------------|------------------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|---|----|
| 部枝 | ł | 配筋 | 荷重 条件 | σ _c N/mm ² | σ _{ca} N/mm² | σ_{s} N/mm ² | σ _{sa} N/mm² | au N/mm ² | τ _a N/mm ² | 判定 |
| | | D16@125 | 長期 中空 | 2.2 | 8.0 | 82.5 | 180.0 | 0.097 | 0.339 | ОК |
| 頂肋 | 反 | D16@125 | 短期 中実 | 4.7 | 12.0 | 195.3 | 270.0 | 0.191 | 0.508 | ОК |
| ト側鉄筋 | D16@125 | 短期 中空 T-25 | 1.4 | 12.0 | 50.6 | 270.0 | 0.072 | 0.515 | ок | |
| | | D16@125 | 長期 中空 | 3.3 | 8.0 | 78.4 | 180.0 | 0.018 | 0.393 | ОК |
| 側壁 | 辛 4- 45- | D16@125 | 短期 中実 | 5.8 | 12.0 | 173.8 | 270.0 | 0.254 | 0.546 | ОК |
| 2下1則步 | 大月力 | D16@125 | 短期 中空 T-25 | 1.5 | 12.0 | 25.0 | 270.0 | 0.012 | 0.641 | ОК |
| edge (1) pri | | D16@125 | 長期 中空 | 4.6 | 8.0 | 146.6 | 180.0 | 0.407 せん断袖 D130 σ₅=32.6≦ | 0.379 甫強鉄筋 @250 180.0= <i>o</i> sa | ОК |
| 下側銷 | x 失筋 | D16@125 | 短期 中実 | 1.4 | 12.0 | 87.8 | 270.0 | 0.407 | 0.564 | ОК |
| | | D16@125 | 短期 中空 T-25 | 1.2 | 12.0 | 41.6 | 270.0 | 0.407 | 0.564 | ОК |
| | | D19@125 | 長期 中空 | 4.7 | 8.0 | 137.0 | 180.0 | 0.000 | 0.386 | ОК |
| 底版 | 反 | D19@125 | 短期 中実 | 5.4 | 12.0 | 185.4 | 270.0 | 0.000 | 0.585 | ОК |
| · 上側鉄筋 | ~ нл | D19@125 | 短期 中空 T-25 | 1.7 | 12.0 | 51.3 | 270.0 | 0.000 | 0.576 | ОК |
| 妻壁 | 端 部 | D16@250 | 短期 | 3.1 | 12.0 | 166.2 | 270.0 | 0.202 | 0.416 | ОК |
| 小平 鉄筋 | 中央 | D16@250 | 短期 | 1.0 | 12.0 | 55.3 | 270.0 | 0.000 | 0.416 | ОК |
| 妻壁 | 端 部 | D16@125 | 短期 | 2.9 | 12.0 | 107.5 | 270.0 | 0.268 | 0.508 | ОК |
| <u></u> 野臣 鉄筋 | 中 央 | D16@250 | 短期 | 1.0 | 12.0 | 55.3 | 270.0 | 0.000 | 0.416 | ОК |

表 5.2-14 BL1 および BL2 の応力度照査結果一覧

地盤支持力の照査結果(BL1 および BL2)

長期最大地盤反力 $R_{vmax} = 59.4 \text{ kN/m}^2 \leq q_a = 112.0 \text{ kN/m}^2 \cdot \cdot \cdot \text{OK}$ 短期最大地盤反力 $R_{vmax} = 154.0 \text{ kN/m}^2 \leq q_a = 112.0 \text{ kN/m}^2 \cdot \cdot \cdot \text{OK}$

| | 表 | 5.2-15 | BL3 の応力度照査結果- | ·覧 |
|--|---|--------|---------------|----|
|--|---|--------|---------------|----|

| | | - | - | | | | - | | |
|------------|---------|----------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|----|
| 部材 | 配筋 | 荷重 条件 | σ _c N/mm ² | σ _{ca} N/mm² | σ_{s} N/mm ² | σ _{sa} N/mm² | au N/mm ² | τ _a N/mm² | 判定 |
| 底版 下側鉄筋 | D22@125 | 短期 | 6.3 | 12.0 | 154.7 | 270.0 | 0.349 | 0.632 | ОК |

地盤支持力の照査結果 (BL3)

長期最大地盤反力 R_{vmax} = 96.2 kN/m² $\leq q_a = 168.0$ kN/m²・・・OK











コンクリート : σck=24%/mm2 鉄鉄 : SD345

図 5.2-48 模擬坑道構造図①



(3) 実寸大模擬坑道の施工

実寸大模擬坑道の施工後の外観を図 5.2-50 に示す。施工後の外観検査では、模擬坑道全体に ついて、あばたやジャンカ等の不良部分が無いことを確認した。また、模擬坑道上部へ昇るため の昇降設備、安全手摺、排水溝、サンプリング用の検査孔などが設計通りに設置されていること を確認した。出来形検査では、模擬坑道の内空の高さ、幅、延長についてそれぞれ許容値の範囲 内であることを確認した。



(a) 全景

(b) 内部

図 5.2-50 実寸大模擬坑道の外観

5.2.6 埋め戻し材の浸潤挙動の予測

(1) 埋め戻し材の浸潤挙動に関するデータ取得

1) 試験材料および試験項目

試験材料と試験項目を表 5.2-16 に示す。表中の「○」は前年度に実施したケース、「◎」は本 年度に実施したケースを表している。本年度は、Na型ベントナイトの混合率 15%を用いた加圧 板法による保水性試験と浸潤試験、Na型ベントナイトの混合率 30%を用いた定常透気試験、Ca 型ベントナイトの混合率 30%を用いた加圧板法及びサイクロメーター法による保水性試験、浸潤 試験ならびに定常透気試験を実施した。

| | 蒸留水 | | | | | | | | |
|---------------|-----------|-----|-----|-----|------|------|----|--|--|
| 試験項目 | | | ベント | ナイト | Ca 型 | ベントナ | イト | | |
| | 5% | 15% | 30% | 5% | 15% | 30% | | | |
| 締固め試験 | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 但水灶封除 | 加圧板法 | — | 0 | — | | 0 | 0 | | |
| (水分特性曲線) | サイクロメーター法 | — | 0 | — | | 0 | 0 | | |
| | 蒸気圧法 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 浸潤試験(不飽和透水係数) | | 0 | 0 | — | 0 | 0 | 0 | | |
| 透気試験 | 定常試験 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| (透気係数) | 非定常試験 | — | 0 | — | | — | _ | | |

表 5.2-16 試験材料と試験項目

○:前年度実施済み、◎:本年度実施、-:未実施

2) 供試体および試験方法

供試体の仕様を表 5.2-17 に示す。これは、前年度に実施した締固め試験の結果から、設定含水 比を最適含水比(wopt)、設定乾燥密度を最大乾燥密度の 95%の密度($\rho_{dmax} \times 95\%$)として決定し たものであり、前年度の供試体仕様と同一である。

試験方法とその概要を表 5.2-18 に示す。

| ベントナイト | 模擬 掘削土 | ベントナイト 混合率 | 締固め試験結果 | | 供試体仕様 | |
|-------------|-----------|---------------|---------|------------|-------|------------|
| | | | 最適含水比 | 最大乾燥密度 | 含水比 | 乾燥密度 |
| | | | (%) | (Mg/m^3) | (%) | (Mg/m^3) |
| クニゲル V1 | ケイ砂 | 5 | 14.3 | 1.673 | 14.3 | 1.59 |
| | | 15 | 12.0 | 1.839 | 12.0 | 1.75 |
| | | 30 | 11.5 | 1.958 | 11.5 | 1.86 |
| クニボンド RW | 6号 | 5 | 14.1 | 1.662 | 14.1 | 1.58 |
| | | 15 | 15.0 | 1.824 | 15.0 | 1.73 |
| | | 30 | 16.0 | 1.765 | 16.0 | 1.68 |

表 5.2-17 各混合土の締固め試験結果と室内試験の供試体仕様

| h | ーギンバ | 0 7 | 5 | 14.1 | 1.002 | 14.1 | 1.00 | |
|----------------------|---------|--|---------------------------------------|--------------------------|--|---|--------------------------------|--|
| | | 15 | 15.0 | 1.824 | 15.0 | 1.73 | | |
| KW | | 30 | 16.0 | 1.765 | 16.0 | 1.68 | | |
| 表 5.2-18 試験方法及びその概要 | | | | | | | | |
| 測定項目は、試験方法及び概要には構成者で | | | | | | | 備考 | |
| 水分特性曲線 | | 「土の保水性試験方法(JGS 0151-2009)」の うち、加圧板法、サイクロメーター法及び蒸気 圧法に準拠 ・加圧板法では、一旦飽和した後に排水過程 と吸水過程の試験を実施 | | | ・基準化された試験 方法に準拠 | | | |
| 不飽和特性データ | | | 定常法 ・ 飽和度の異な | る供試体で透 | 気試験を実施 | ・試験てい ・直接、 ・直接、 ・ ・ ご ご に 説 不可 | 法が基準化 いない 気係数を測 和度では試 | |
| | 不飽和透気係数 | 非定常法(逆解 ・ 飽和透水係数 線を用いる ・ 試験結果を二 ことで不飽和 | 斤を要する) 、不飽和透水値 相流解析コー 透気係数を取 | 系数、水分特性曲 ドで逆解析する 得 | ・試さ高の ・試わり ・試わり ・試わり ・試わり ・試わり ・試わり ・試わり ・試わり ・試わり ・ ・<td>法が基準化 いない 度側の不飽 係数の測定 長時間を要</td> | 法が基準化 いない 度側の不飽 係数の測定 長時間を要 | | |

(2) 試験結果

1) 水分特性曲線

Na型ベントナイト混合土(混合率15%)の飽和度と水分ポテンシャルの関係を図 5.2-51に示 す。サイクロメーター法および蒸気圧法に関しては、乾燥密度を1.75 Mg/m³として含水比の値 から飽和度を算出してプロットした。図から、飽和度が高い範囲では、サイクロメーター法、蒸 気圧法の測定値と加圧板法の測定値で値が異なっている。これは、サイクロメーター法、蒸気圧 法の測定値は化学ポテンシャル(=マトリックポテンシャル+浸透(オスモティック)ポテンシ ャル)であり、加圧板法の測定値はマトリックポテンシャルのみであることに起因していると考 えられる。ただし、浸潤に寄与するポテンシャルが、どのポテンシャルなのかは不明であり、含

する

水領域によって異なるポテンシャルが浸潤に寄与していることも考えられる。そこで、ここでは、 水分特性曲線の関数としては、式 5.2-1 に示す van Genuchten モデル (VG モデル) を用いるこ ととし、VG モデルのパラメータを設定した。例えば、図 5.2-51 に示す VG モデルのパラメータ は表 5.2-19 に示す通りである。なお、今回の加圧板法による測定結果は、排水過程での測定結果 である。通常、水分特性曲線にはヒステリシスがあり、排水過程時より浸潤過程時の方が低水分 ポテンシャル側に曲線は位置するため、浸潤過程の水分特性曲線は、VG モデル(3)の曲線より、 さらにグラフの下側に位置することも考えられる。

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(1 + \left|\alpha\phi\right|^n\right)^{(1-1/n)}$$

式 5.2-1

Se:有効飽和度(-) *θ*:体積含水率(-) *θ*:飽和体積含水率(-) *θ*:残留体積含水率(-) *φ*:水分ポテンシャル(MPa) *α*:VGモデルのパラメータ(1/MPa) *n*:VGモデルのパラメータ(-)

Ca型ベントナイト混合土(混合率 30%)の水分ポテンシャルの測定結果を図 5.2-52 に示す。 Na型ベントナイト混合土と同様に飽和度の高い部分では、サイクロメーター法、蒸気圧法での 測定値と加圧板法の測定値に差が生じた。したがって、Na型ベントナイト混合土と同様に、浸 潤解析に用いる水分特性曲線の曲線(VGモデル)として、図 5.2-52 に示す 3 種類を設定した。 図に示す VGモデルのパラメータは表 5.2-20 に示す通りである。

| パラメータ | VG モデル(1) | VG モデル(2) | VG モデル(3) |
|------------------|-----------|-----------|-----------|
| θ_s (-) | 0.347 | 0.347 | 0.347 |
| θ_r (-) | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| α (1/MPa) | 2.8 | 10.0 | 10.0 |
| n (-) | 1.7 | 1.4 | 1.7 |

表 5.2-19 水分特性曲線における VG モデルのパラメータ (クニゲル V1:15%)


(a) 飽和度-水分ポテンシャル関係











(b)体積含水率-水分ポテンシャル関係
 図 5.2-52 VGモデルによる水分特性曲線(KB030)
 (クニボンド:ケイ砂6号=30:70)

| パラメータ | (1) | (2) | (3) |
|------------------|-------|-------|-------|
| $\theta_{s}(-)$ | 0.368 | 0.368 | 0.368 |
| $\theta_r(-)$ | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| α (1/MPa) | 2.0 | 25.0 | 25.0 |
| n (-) | 1.3 | 1.2 | 1.3 |

表 5.2-20 水分特性曲線における VG モデルのパラメータ(クニボンド RW: 30%)

2) 透気係数

透気試験の結果から得られた埋め戻し材の飽和度と浸透率の関係を図 5.2-53 に示す。図には、 Na型(混合率 30%)と Ca型(混合率 30%)に加えて、前年度の透気試験の結果を併せて示し た。Na型及び Ca型ともに、ベントナイト混合率が増加すると浸透率が小さくなった。また、ベ ントナイト混合率が同じ場合は、Na型及び Ca型ともに同程度の浸透率曲線となることが確認 できた。



図 5.2-53 6種類の埋戻し材の飽和度と浸透率の関係

5.2.7 まとめ

(1) 埋め戻し材の材料特性データの整備

模擬掘削土として様々な岩種を用いた埋め戻し材の物性データを取得するとともに、締固め性 や透水性等に影響を及ぼす掘削土の要因について考察を行った。その結果、火成岩類及び珪藻土 と泥岩を除く堆積岩類では、透水性に及ぼす岩種の影響は小さく、珪藻土と泥岩などの吸水率の 高い岩種を用いた埋め戻し材は締固め性が悪く、透水性は高いことがわかった。また、Na型(混 合率 15%)及び Ca型(混合率 30%)では、最大粒径が 20 mmの掘削土を用いる場合には、埋 め戻し材の透水係数が若干大きくなる傾向が見られた。さらに、埋め戻し材の透水係数は概ね有 効モンモリロナイト密度で管理することができることがわかった。

(2) 埋め戻し材の小規模施工試験

撒き出し・転圧工法および吹付け工法の小規模施工試験を実施し、埋め戻し材の構成材料及び 配合の組合せに応じた最適な施工方法について検討するとともに、施工技術の選定等に資する施 エデータおよび施工後の物性データを取得した。また、施工性および施工後の品質に及ぼすベン トナイトの種類(Na型、Ca型)の影響や掘削土の粒径の影響等を確認した。その結果、転圧工 法では、掘削土の種類及び最大粒径にかかわらず施工が可能であり、吹付け工法では掘削土の最 大粒径は5mm程度であった。また、今回の試験条件では、Na型の埋め戻し材では転圧工法及 び吹付け工法ともに1×10⁻¹⁰ m/s 程度の透水係数が確保できる施工が可能であった。

(3) 埋め戻し材の施工概念の検討

撤き出し・転圧工法及び吹き付け工法の2種の施工方法以外の新たな埋め戻し材の施工技術オ プションを整備することを目的として、スクリューフィーダー工法の施工装置の概念設計を実施 し、地下における施工環境、既往の地層処分施設の設計および処分事業のスケジュールの検討例 を参考に、施工装置への要求性能を設定し、施工装置の構成や概略寸法などを示した。

(4) 埋め戻し材の浸潤挙動の予測

埋め戻し材への地下水の浸潤挙動を予測するための解析に必要な不飽和特性データを取得す るために、Na型及びCa型の埋め戻し材(ベントナイト混合率5%-30%)を対象として保水性 試験、透気試験により水分特性曲線と透気係数を取得した。 参考文献

- 日本原子力研究開発機構(2005): TRU 廃棄物処分技術検討書 第2次廃棄物処分研究開発取り まとめ.
- 日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター(2019): 平成 30 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発事業 地層処分施設閉鎖技術確証試験 報告書.
- 原子力発電環境整備機構(2016): https://www.numo.or.jp/topics/safetycase_setsumei4.pdf. (参 照: 2019 年 2 月 1 日)
- 核燃料サイクル開発機構(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 -地層処分研究開発第2次取りまとめ- 分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, IV-338.
- 原子力発電環境整備機構(2018):包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の実現ー 適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築-レビュー版, NUMO-TR-18-03.
- Fuller, W.B. and Thompson, SE.(1907) : The Laws of Proportioning Concrete, Trans. ASCE, Vol. 59, pp.67-143.
- 株式会社イシバシ HP (スクリューフィーダー.JP)、2019.

https://www.screwfeeder.jp/technique/414

- 経済産業省資源エネルギー庁(2004):高レベル放射性廃棄物処分費用の見積もりについて,新計 画策定会議技術検討小委員会(第3回)資料第1号,2004.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター(2015):平成 26 年度管理型処分技術調査等事業地下空 洞型処分施設閉鎖技術確証試験平成 19 年度~平成 26 年度の取りまとめ報告書.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター(2019):平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処 分に関する技術開発事業,可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発報告書(第2分冊).

6.1 平成 31 年度の主な成果

本事業において得られた主な成果を、以下に記述する。

2章「高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発ー製作・施工技術に 係る品質保証体系の整備-」では、「品質保証・性能確認の手法や知見の体系化に資する基盤情報 の整備」として、品質保証、モニタリング、性能確認など、処分事業におけるそれらの意味合い や関連性など、取組の全体像を整理するため、平成 30年からの継続として主要国(スウェーデ ン、フィンランド、フランス、スイスやカナダ)における先行的な検討や策定に係る動向、およ び国際共同研究における検討動向の最新情報を調査した。この結果に基づき、得られた調査結果 を、性能確認プログラムに対する規制要件、プログラム策定に向けた戦略、プログラムの体系や 方法論ならびに実践に向けての課題などの観点から整理し、我が国におけるプログラムの策定に 資する基盤情報として取りまとめた。

また、「地下構成要素の状態把握に係る関連ハード技術の高度化」としては、無線伝送技術およ び無線給電技術に関する技術実証や技術の高度化に取り組むとともに、光ファイバによる密度計 測や圧力計測への応用について基礎的な検討を実施した。また、これまで検討してきた技術の応 用として、実際の地下研究施設(瑞浪)を事例に、閉鎖後までを念頭においたモニタリングシス テムを例示的に示した。

3、4、5章では、「処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備」について、それぞれ「坑道シーリングの設計・評価技術の整備」、「坑道シーリング技術の性能確認」および「坑道シーリング に係わる施工技術の整備」を実施した結果について述べた。

3章「処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備」のうち、「坑道シーリングの設計・評価技術の整備」では、「シーリングシステム長期性能評価技術開発」として、平成30年度の事業成果に基づき、NUMO包括的技術報告書におけるジェネリックな地質環境を事例とし、シナリオ解析や地下水流動解析、物質移行解析を通じ、シーリングシステムの劣化・変質が安全機能におよぼす影響を評価した。また、これらの評価結果に基づき、シーリングシステムに求められる要件の具体化を図った。また、「シーリングシステム設計評価技術開発」としては、特に止水プラグに着目した感度解析を実施し、主に処分場の安全性評価の観点から設計上留意すべき点や今後の課題を抽出・整理した。さらに、平成30年の成果やNUMO包括的技術報告書で新たに提示された事業者側が想定する地下施設の設計フローをベースとして、閉鎖システムに関連する箇所に対しこれまでの本事業の成果を踏まえた更新を行った。

4章「処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備」のうち、「坑道シーリング技術の性能確認」 では、「膨潤挙動相互作用試験」、「EDZ シーリング試験」および「掘削影響領域の連続性等に関 する調査」を実施した。「膨潤挙動相互作用試験」としては、緩衝材と埋め戻し材との力学的相互 作用を踏まえた緩衝材の膨出挙動の評価手法を整備するために、平成 30 年度に引き続き、緩衝 材と埋め戻し材それぞれの膨潤特性を把握するために膨潤基礎試験を実施しデータの取得を行 った。また、幌延深地層研究センターの地下施設深度 350 m にて実施している人工バリア性能確 認試験を事例として、実規模試験の 1/20 スケールの緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模 型試験を実施し、水の浸潤による緩衝材、埋め戻し材の膨潤挙動とそれらの相互作用に関する現 象を確認した。

「EDZ シーリング試験」では、平成 30 年度の成果を踏まえ、幌延深地層研究センターの地下施設深度 350 m の試験坑道 3 において EDZ などの地下水の移行経路を遮断するようにペレット (クニゲル V1 を加圧圧縮成形し粉砕、粒径 20 mm 以下に調整したもの)を充填した粘土止水壁 を施工し、その止水壁の透水性能を評価した。その結果、EDZ を分断するようにスリットを掘削 し、ベントナイト止水壁を構築することにより、堆積岩かつ塩水系地下水環境下においてもベン トナイト系材料を用いることにより EDZ を含む岩盤の透水性を十分低下させることができるこ とを確認した。

「掘削影響領域の連続性等に関する調査」は、新たに平成31年度(令和元年度)実施したもの であり、実際の処分場設計や安全性評価に重要となるEDZの広がりや連続性、またセメントの 長期影響評価などに資するデータとしてポストグラウトが行われた領域を対象に非破壊調査(弾 性波や比抵抗を用いた物理探査)を実施し、幌延のような堆積軟岩を対象としてこれらを把握・ 評価する観点からの調査技術の適用性や課題等についてとりまとめた。

5章では「処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備」のうち、「坑道シーリングに関わる施 工技術の整備」について検討を実施した。

「小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験」としては、深度 300 m よりも深い坑道を 利用して実施した平成 30 年度の埋め戻し施工試験において設置した各種モニタリング機器によ る計測を継続するとともに、埋め戻しエリアから埋め戻し材を採取し詳細な室内試験を実施し、 その結果の分析に基づき昨年度成果として提示した吹付けによる埋め戻しのための品質管理手 法を検証した。その結果、昨年度提示した品質管理手法は吹付けによる埋め戻しに対して有効で あることが検証され、処分場の埋め戻しにおける1つの施工オプションを整備できた。

「埋め戻し材の特性を踏まえた施工オプションの整備」では、平成30年度からの継続として、 ベントナイトの種類(Na型、Ca型)と混合率、模擬掘削土の種類と粒径および締固めエネルギ ーをパラメータに設定した室内試験を実施し、締固め曲線(最大乾燥密度、最適含水比)、透水係 数ならびに膨潤圧など、埋め戻し材に関する材料特性データを幅広く取得するとともに、撒き出 し・転圧工法と吹付け工法を対象とした小規模施工試験も継続し施工に係るデータや施工後の埋 め戻し材の物性に係るデータを取得した。また、NAGRA等で実証試験に用いられているスクリ ューフィーダー方式による埋め戻しを念頭においた機器等の概念設計を実施した。

6.2 本事業の主な成果

本事業は2ヵ年事業として進めて来たものであるため、事業としての成果についても取りまと めた。その結果を以下に示す。

事業目標と実施内容

本事業は図 6.2-1 に示すような目標設定に基づき、研究開発項目を設定して進めて来た。設定 した目標は、以下の通りであった。

(1) 高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発

人工バリアが設計で想定した状態に対して性能が発揮されていることを確認し評価するため の具体的な方法の検討、また無線伝送技術の長期運用性の向上や新たなセンサに関する要素技術 の開発など、モニタリング技術の整備

(2)処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備

坑道シーリング技術に関する設計概念の詳細化や施工技術の成立性を確認するために、坑道シ ーリングが処分場全体の閉じ込め性能に与える影響の評価や。湧水を伴う割れ目帯など様々な地 質環境の特性を考慮した試験の実施



図 6.2-1 本技術開発事業の全体目標とそれを踏まえた個別研究課題の設定

これらの事業目標に対し、実施した研究開発項目毎の 2 ヵ年の事業成果を総括したものを表 6.2-1 から表 6.2-8 にしめす。事業目標に対する成果という意味では以下のようにまとめること ができる。

- (1) 高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発
- 施設最終閉鎖の判断に資する取組との位置付けで、品質保証、モニタリング、性能確認の関係・位置付け・プログラム具体化の考え方を整理。
- モニタリング技術として、処分環境下での耐性、長期運用性から光ファイバセンサの有望
 性を確認するとともに、無線伝送に関連する要素技術の整備や一部その実証を実施。
- (2) 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備
- ・ 坑道シーリングが処分場全体の閉じ込め性能に与える影響の評価については、国際的な研 究開発動向を踏まえつつ、網羅的なシナリオ解析およびその結果に基づく物質移動解析な どを実施し、長期的な影響因子の影響度などについて概括的に検討
- 処分場構成要素の一つである止水プラグについて、その設計の観点からの留意点を抽出・
 整理
- 処分場の構成要素である埋め戻し材や緩衝材に関する水分侵入時の膨潤特性や、それらの 力学的相互作用に関する基礎的データを取得
- ・ 止水プラグに代わりうる水みち防止技術として、深度 300m より深い坑道において EDZ を 対象としたベントナイト止水壁の適用性を原位置試験により実証的に提示。合わせて幌延 のような堆積軟岩を対象とした EDZ などの広がりや範囲を効率的に把握するための非破 壊調査技術の適用性についても原位置試験により検討。
- ・ 水みちを防止する技術のオプションとして、深度 300m より深い坑道において吹付けによ る埋め戻し施工を実施し、それを適用する際の品質管理手法も含め実証的に整備
- 水みちを防止する技術のオプションとして、種類の異なる岩石やベントナイトなどを用いた埋め戻し材の性能に関する室内試験を実施し、データベースとして網羅的に整備するとともに、一部については地上における工学規模試験により実施工への適用性や課題について整理。

(なお、これらの成果については、外部専門家による審議を受け、概ね所期の目標を達成してい ると評価されている(平成 31 年度第 3 回委員会)。)

一方、先に示した更新した設計フローと、本事業成果との関係を示したものが図 6.2-2 である。 これまで示してきた個別の研究開発課題に関する成果は、いずれも実際に処分事業を進めて行く 上での各事業段階(文献調査段階、概要調査段階、精密調査段階)において事業を進める上での 基盤的情報となりえるものと考える。

なお、本事業では、力学プラグについては特に研究開発の対象とはしなかったが、これは止水 プラグに比べ要求性能の観点からの困難さが現時点では相対的に低いと判断したためである。ま た、2ヵ年という事業期間から、図 6.2-2 に示したプラグや他の構成要素の長期変遷にかかわる 研究開発もスコープから外したものの、閉鎖システムの性質上、設計・施工段階で安全裕度を見 込んだシステムにするためには重要な課題であり、次フェーズ以降の研究開発で注力すべき課題 と考える。

表 6.2-1 2 ヵ年の事業成果の総括:品質保証および性能評価の手法や知見の体系化に資する基盤情報の整備、処分場構成要素の状態把握に関わる関連ハード技術の整備

| 2か年の目標 | 2か年の実施項目 | 2か年の成果 | 今後の課題 | | |
|--|---|---|---|--|--|
| 1)品質保証及び性能 | 1)品質保証及び性能確認の手法や知見の体系化に資する基盤情報の整備 | | | | |
| 人工パリアと他の地 下構成要素を対象と した品質保証体系 の全体枠組みを構 築し、わが国に適用 するための課題を抽 出する | ○品質保証体系の全体枠組みの構築 ○わが国における品質保証プログラム及び性能確認プログラムの具体化に向けた課題の抽出 | ○施設最終閉鎖の判断に資する取組との位置付けで 品質保証、モニタリング、性能確認の関係・位置付 け・プログラム具体化の考え方を整理 施工品質を確保する「品質保証プログラム」 ●状態変遷を把握する「生能確認プログラム」 ○2つのプログラムの具体化・研究開発の進め方を分析・整理 ●品質保証プログラムは、北欧の先行事例が参考 となる ●性能確認プログラムの2つの開発方向性 ・原位置での計測を主体 ・模擬環境での事前の実験や実証等を主体 | 品質保証プログラム 処分概念が類似する北欧の事 例を参考に、わが国における製 造施エプロセス管理手法を整 備(施工法の違いに留意) 性能確認プログラム 性能評価に必要な入力情報の 調査、取得すべきデータの抽出 抽出された取得データは、事前 の試験等で取得できるか、原位 置で取得すべきか区別する | | |
| 2) 処分場構成要素の | 状態把握に係る関連ハード | 技術の高度化 | | | |
| 地中無線関連の共 通基盤技術や新た なセンサに関する技 術の要素試験等に よる技術開発を進め、 地下構成要素の状 態把握に係る関連 ハード技術を高度化 する | ○新たなセンサー技術に 関する開発動向の調 査 | ○処分環境下での耐性、長期運用性から光ファイ バーセンサーの有望性を確認 埋め戻し材等の乾燥密度及び膨潤圧の測定 に向けた研究開発事例がある | ●センサー技術 ●埋め戻し材を例として、乾燥密度や圧力の測定への適用性を確認する要素試験が必要 | | |
| | ○地下環境における無 線伝送技術の実証 | ○幌延URLの人エバリア性能確認試験に設置して いる無線伝送装置の長期運用を継続(5年間にわ たるデータ送信の実績)○地下500mから地上までの無線伝送システムの構 成を具体化(設計) | ○無線伝送技術 ●長期運用性の向上 ○無線給電技術 | | |
| | ○地下環境における無 線給電技術の高度化 | ○無線給電装置の概念設計方法を構築し、要素試 験装置を用いた給電効率等の測定により設計方 注の平当性を確認 | 方法 | | |

| 2か年の目標 | 2か年の実施項目 | 2か年の成果 | 今後の課題 |
|--|--|--|---|
| シーリングシステム が劣化・変質した際 に処分システムの閉 じ込め性能に及ぼす 影響が高いシナリオ を抽出するとともに、 ケーススタディを通 じたその影響度の評価 | <u>シーリングシステム長期</u> 性能に関する文献調査 | ・シーリングシステムの構成要素は各国ともに異なる ものの、求める安全機能は「移流の抑制」、「遅延性 能」であることを確認 ・シーリングシステムの劣化シナリオを想定した安全 評価事例はあるものの、劣化・変質による機能低下 に至る具体的なプロセスをシナリオとして想定してい るわけではなく、what if シナリオとして取り扱ってい ることを確認 | ○変動シナリオにおける劣化・変質プロセスの確証 ・理め戻し材を想定した化学ー水理、 化学ーカ学連成解析により、ひび割 れ等の間隙における2次鉱物の生成 による変質層の形成有無の評価 ・理め戻し材ーコンクリート支保の相 互作用に関する反応輸送解析等を基本とした現象理解 ・低アルカリセメントによる埋め戻し材 とのセメント影響評価 ○ボウタイ分析に基づく予防/対処 パリアの効果の検証 ・ジオテキスタイルが卓越した移行経 路となる可能性に関する解析評価 ・地表水、(酸化性地下水)の地下深部 への流入を回避するための防護策 (パイパス式抗道の設置)の効果検証 ・処分パネルに対する流動方向が処 分パネルに対し直交方向である場合 における施設劣化・変質の影響評価 |
| | <u>シーリングシステムの安</u> 全機能を軸としたシナリ オ解析 | ・安全機能を基軸とした影響モードの検討とFEPに 基づく劣化プロセスの検討を複合させることにより、 各シーリングシステムの劣化プロセスを網羅的に整理が可能 ・比較検証を行うための基本シナリオに加え、シーリングシステムの機能劣化を想定した性能評価上重要なシナリオとして、3つの変動シナリオを抽出 | |
| | <u>シーリングシステムの影</u> 響評価 | ・埋め戻し材、止水プラグおよびコンクリート支保等の劣化が坑道が卓越した移行経路となりうることに及ぼす影響は小さい可能性を示唆 ・一方で、変動シナリオ(施工不良)を想定する場合、他のシナリオに比べ、核種が劣化した坑道を移行する割合が相対的に高くなる可能性を示唆 | |
| | <u>シーリングシステムに求</u> められる要件の具体化 | シーリングシステムの個々の性能(透水性等)よりも、 処分場の選定/設計や施工時のシーリングシステ ムの品質管理等の対策を講じることが、坑道が卓越 した移行経路となりうることを回避する上では有効で ある可能性を示唆 | ・アクセス坑道の上流側集中配置により坑道が地表への短絡経路となる可能性の回避策の検討および効果の確認 |

表 6.2-2 2ヵ年の事業成果の総括:シーリングシステム長期性能評価技術

表 6.2-3 2ヵ年の事業成果の総括:シーリングシステム設計評価技術開発

| 2か年の目標 | 2か年の実施項目 | 2か年の成果 | 今後の課題 |
|--|--|--|---|
| 「坑道シーリングの 設計・評価技術の整 備」におけるシーリン グシステム長期性能 評価技術開発、「坑 道シーリング技術の | 既に処分サイトが選定され建設許認可申請を行っている諸外国の先行事例(フィンランド、スウェーテン)や国際共同研究事例に関する文献調査 | ・処分場を構成するシーリングシステムとシーリングの目的や要求性能に関する情報を整理(平成30年度)。具体的には、得られた情報に基づき、各国における閉鎖システムの構成要素(プラグ、埋め戻し材など)に関する要求性能等の考え方等を整理(主にH30年度)。 | ・閉鎖システム(埋め戻し材、ブラグな ど)の長期的な変化は本事業の対象 外であったため、それらの影響を加 味した設計フローの更新・高度化が 必要 ・EDZの連結性は止水プラグの要求 性能に大きな影響を与えるため、今 後はその施工方法の実証などが必 要 |
| 性能確認)及び1坑 道シーリング技術に 関わる施士技術の 整備」の成果を体系 的に基理・統合し、 ジェネリックな観点 坊ら多様な地質環 境において適用可 能なシーリングシス テム設計運価技術 | 上記の結果や「坑道シー リング技術の性能確認」 等に基づきシーリングシ ステムの要求性能の整 理や解析等を行い、設計 方法や評価方法などを含 めた既存の設計フローな どの更新・高度化 | ・上記の結果を踏まえ、止水プラグの設計の観点か らジェネリックな地質環境(具体的にはNUMO包括 的技術報告書で示されているもの)を対象に、止水 プラグやEDZの幾何学的特性(位置、厚さ、形状な ど)を変化させた感度解析を実施し、均質な媒体中 での物質移動の遅延に影響が相対的に大きいのは プラグ周りのEDZの連結性とプラグの形状であり、 施工位置のフレキシビリティーの観点も加えると短 形形状が望ましいことを確認(令和元年度) | |
| の提示 | | ・NUMO包括的技術報告書に示された閉鎖システム を含む地下施設設計フローをベースに、本事業での 研究成果を踏まえ、成果の体系化・統合化のための 基盤として活用可能な更新した設計フローを提示 (令和元年度) | |

| 2か年の目標 | 2か年の実施項目 | 2か年の成果 | 今後の課題 |
|---|---|---|--|
| 緩衝材と埋め戻し 材の力学的相互作 用を踏まえた設 計・評価手法を整 備するために必要 となる検証データ の取得および緩 すの脱出挙動の把 握 | <u>緩衝材の膨潤挙動に対</u> する化学的な事象の抽 <u>出・整理</u> | ・塩水の影響により、ベントナイトの膨潤性は低下する。ただし、粘土密度にもよるが、ある程度の膨潤性は維持される。塩水影響以外にも、母岩間隙水の特性(たとえば石灰分の有無)は、ベントナイトの膨潤性に大きく影響する可能性がある。 ・セメント間隙水の強アルカリは、ベントナイト鉱物の溶解を生じさせて、膨潤性を著しく損なう可能性がある。 ・鉄の腐食物は、長期的にはベントナイト中に移行するが、膨潤性への影響は小さいことが予想される。 | ○試験条件が膨潤特性に及ぼす 影響の評価 ・供試体の縦横比や上載荷重な どの試験条件が膨潤変形率や 膨潤圧の測定値へ与える影響 を把握し、縮尺模型試験の結果を検証するデータとして反映 ○側面土圧と変形量の評価 ・緩衝材の浸潤挙動の検証や局所的な領域の変形量に関する データの取得を実施し、飽和 の進展により発生する土圧と 変形量の関係を定量的に評価 ○縮尺模型試験の結果の評価 ・縮尺模型試験を継続実施し、 埋め戻し材の緩衝材膨出抑制 機能を検証 ○化学的影響を考慮した力学的 |
| | 緩衝材および埋め戻し 材の膨潤挙動に関する 基礎データの取得 | ・ 緩衝材と埋め戻し材膨潤変形挙動に関する 基礎データ(膨潤変形率、膨潤圧)の取得 ・ 緩衝材ついては、供試体の縦横比が大きく なるにつれて膨潤変形率は小さくなる傾向 がみられ、膨潤圧は大きくなる傾向がみら れることを確認 ・ 埋め戻し材については、ベントナイトの混 合比率が緩衝材に比べて低く、ほとんど膨 潤変形をしないことを確認 | |
| | 人工バリア性能確認試 験を事例とした縮尺模 型試験による緩衝材の 膨出挙動の把握 | 縮尺模型側面の土圧測定により緩衝材の上部の土圧が下部に比べて低く、膨潤による変位が生じていることが示唆 緩衝材側面からの水の浸潤に伴い、緩衝材と埋め戻し材の境界面では緩衝材の中心部に比べて外周部の膨潤変形が大きいことを確認 | 相互作用下における緩衝材の膨 出挙動の把握 ・幌延の地下水と同等の組成の 水を用いた膨潤基礎試験およ び縮尺模型試験の実施 |

表 6.2-4 2ヵ年の事業成果の総括:膨潤挙動相互作用試験

表 6.2-5 2 ヵ年の事業成果の総括: EDZ シーリング試験

| 2か年の目標 | 2か年の実施項目 | 2か年の成果 | 今後の課題 |
|---|---------------------------------|---|---|
| 堆積岩かつ塩水系 地下水環境下での ベントナイト系材 料のEDZにおける 地下水移行抑制機 能の評価 | ベントナイト系材料の 選定のための室内試験 | ベントナイト系材料の乾燥密度を1.2 Mg/m³とすることでその透水係数を塩水系地下水環境下においても原位置岩盤健岩部の透水係数(10⁻¹⁰ m/sオーダー)よりも小さくすることができることを確認 クニゲルV1の締固め施工やペレットの充填、クニゲルUGXの充填など形態や材料が異なる場合でも1.2 Mg/m³の乾燥密度を達成できることを確認 | 〇止水プラグの施工方法 ・止水プラグ設置のために岩盤 に切り欠きを設ける際に、新 たなEDZが形成されない施工 方法の検討 ・坑道の天端部、側壁部へのベ ントナイト系材料の施工方法 (例えば、吹付け施工や締固 め等)の検討 |
| | <u>EDZシーリング原位置</u> <u>試験</u> | 原位置環境下において幅10cmのスリットに 対して、クニゲルV1のペレットを充填する 際に投入量と投入の厚さを管理することで 乾燥密度1.2Mg/m³のベントナイトの止水壁 を施工 EDZの透水性(透水係数10⁻⁶ m/sのオー ダー)が止水壁を施工することで10⁻⁹ m/sの オーダーまで改善することを透水試験によ り確認 | ○止水プラグの施工に適したベ ントナイト系材料の形態 ・施工方法に適したベントナイ ト系材料の材料仕様(ベント ナイトの配合割合、乾燥密度 等)の検討 ○止水壁の透水性の評価方法の 開発 ・止水プラグの透水係数と周辺 領域の透水係数の関係の把握 品質管理の観点から施工した プラグの透水係数の確認方法 の検討 |

| 目標 | 実施項目 | 成果 | 今後の課題 |
|--|---------------------------|---|--|
| 試験坑道およびカ 学プラグ周囲のEDZ の連続性や経時変 化を把握し、グラウト の効果を評価 | <u>弾性波・比抵抗モグラフィ</u> 調査 | ・地山(堆積岩)とグラウト範囲の物性値の違いを弾 性波(Vp, Vs)トモグラフィ調査、比抵抗値をトモグラ フィ調査、弾性波検層、電気検層およびボーリングコ ア試料、グラウト試料の室内試験により確認した。 ・S波によるトモグラフィ調査の適用性を確認した。 ・EDZの連続性の把握について解析ツールの適用 性を確認した。 | ○物理探査技術の適用性 ・地質環境条件により適用する物理 探査手法を検証 ・解析手法の適用性および精度の検 証 ・原位置試料の採取方法および試験 方法の検証 ・要素試験の方法の検証 ・EDZの連続性や経時変化を把握す るための調査手法、解析手法の検証 |

表 6.2-6 2ヵ年の事業成果の総括:掘削影響領域の連続性等に関する調査

表 6.2-7 2ヵ年の事業成果の総括:小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験

| 2か年の目標 | 2か年の実施項目 | 2か年の成果 | 今後の課題 |
|--|---|---|---|
| 原子力機構が有す る地下研究施設(瑞 浪)に事例がほとんど ない小断面坑道の 吹付けによる埋め戻 し材の施工法を適用 する上での品質管 理・施工管理体系に 関する基盤情報を整 備 | H29年度に原子力機構で 検討していた瑞浪超深地 層研究所内での坑道埋 め戻し試験計画をベース として、H30年度に実際 の地下深部における小 断面坑道の全断面吹付 けによる埋め戻し材施工 試験を実施するとともに、 令和元年度に施工後の 詳細調査により施工時に 提示した品質管理手法 の有効性を検証 | ・最終処分法で定められている深度300mより深い 場所での処分の実施を考慮し、瑞浪超深地層研究 所の深度500m研究坑道の一部を活用し、原位置施 工試験を実施(平成30年度)。 ・その際、国内外で事例がほとんどない全断面吹付 け施工に関する品質管理手法を検討、提示し施工 試験に適用(平成30年度) ・施工中の品質確認に関する調査結果等から施工 時の埋め戻し材の品質は当初設定した有効粘土密 度0.4Mg/m³以上(透水性にしてバックグラウンドの 岩盤の10-8m/sとう同等以下)を確認(平成30年度)。 ・施工後の詳細調査においても、施工された埋め戻し材の品質は概ね平成30年度の結果と同等である ことを埋め戻し材の透水性も含め確認し、平成30年 度適用した全断面吹付けにおける品質管理手法の 有効性を検証(令和元年度) ⇒深度300m以深の地質環境において埋め戻し材 の全断面吹付けが可能であることをその品質管理 手法とともに実証的に示し、処分事業における一つ の施工オブションを提示。 | ・モニタリングについては、埋め戻し 材の状態変化の観測には有効である と考えられるが、品質管理手法として 用いる場合は定量的な評価が可能な 精度が必要(機器の精度、キャリブ レーション方法など) ・吹付け施工においてより均質性の 高い埋め戻しを行うためには、施工 方法の検討や施工機械の改良が必 要。 |

表 6.2-8 2ヵ年の事業成果の総括:埋め戻し材の特性を踏まえた施工オプションの整備

| 2か年の目標 | 2か年の実施項目 | 2か年の成果 | 今後の課題 |
|--|---------------------------------------|--|--|
| 埋め戻し材の材料 物性データを整備す るとともに、材料物 性に影響を及ぼす パラメータを整理す る。また、転圧工法 及び吹付け工法に よる施工データと施 工後品質管理上の 留意点等を抽出する。 道 盤 累 | <u>埋め戻し材の材料特性</u> データの取得 | ○掘削土利用を想定した埋め戻し材の材料物性 データ(締固め曲線、膨潤圧、透水係数等)を 取得 ○埋め戻し材の物性に大きく影響を及ぼす要因 を整理(ベントイト種類、混合率、岩種、最大 粒径等) ○掘削土の最大粒径が20mm以下ならば、透水 係数は、概ね有効モンモリロナイト密度で管理 できる | ○施工後の乾燥密度のばらつきの合否判 定のためのデータ取得(例えば、施工 によるばらつきを考慮した低い乾燥密 度での透水係数の取得等) ○埋め戻し材の施工プロセス管理方法の 構築に向けて、実施工上の制約を考慮 した実寸大施工試験を実施し、坑道界 面の施工性、天端の隙間の発生程度 (自重沈下に起因)、施工後埋め戻し材 の物性のばらつき等を確認する。 ○施工後の品質(隙間や乾燥密度等)を 測定するための計測技術の開発 ○施工技術オブションを整備するための 要素試験(スクリューフィーダ工法、ブ ロック工法で達成できる乾燥密度の確 認等) ○埋め戻し材の性能確認に資する計測技 術の開発、浸潤解析の妥当性確認等 |
| | 小規模施工試験による 施工データ及び施工後 の品質データの取得 | ○転圧工法と吹付け工法を対象とし、埋め戻し材の配合に応じた施工パラメータ(撒き出し厚さ、材料供給量等)を取得 ○各工法で達成可能な材料物性データ(乾燥密度、透水係数等)を取得 ○埋め戻し材を施工する際の、各工法における特色、留意点を整理 | |
| | 施工技術オプションの 整備(本資料では割愛) | ○処分及び他の分野の埋め戻しに関する施工技 術を調査し、適用可能な材料、施工速度、コス ト等の観点からスクリューフィーダ方式を選定 し、施工装置の概念設計を実施 | |



図 6.2-2 既往の設計フローを最新の知見および本事業の成果を踏まえ更新した設計フローと本 公募事業成果との関係

6.3 おわりに

本報告書は、経済産業省資源エネルギー庁から日本原子力研究開発機構および原子力環境整備 促進・資金管理センターが受託を受け、地層処分施設閉鎖技術の高度化や基盤情報の整備を目的 として実施した技術開発の、平成 31 年度の成果と事業期間 2 ヵ年の成果を取りまとめたもので ある。本事業の成果が、地層処分施設の閉鎖技術の信頼性向上に資するとともに、地層処分が信 頼に足るものとして社会に受け入れられる一助となることを期待している。