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

平成 31 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 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」の事業報告書である。

目次

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 3
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 3
1.3.2 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備 3
2. 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－製作・施工技術に係る品質保証体系の整備－ 6
2.1 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 6
2.1.1 性能確認プログラムの構築に資する諸外国の先行検討動向の調査 6
2.1.2 施工プロセス管理手法の構築に資する海外実証研究動向の調査 31
2.2 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 41
2.2.1 地下環境における無線伝送技術の実証試験 42
2.2.2 地下環境における無線給電技術の実証試験 57
2.2.3 新たなセンサー技術に関する開発動向の調査 70
3. 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備－坑道シーリングの設計・評価技術の整備－ 88
3.1 シーリングシステム長期性能評価技術開発 88
3.1.1 背景・目的、研究アプローチ 88
3.1.2 実施内容 90
3.1.3 シーリングシステムの求める安全機能 90
3.1.4 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 96
3.1.5 シーリングシステムの長期性能に関わるシナリオおよび性能評価 112
3.1.6 まとめ 114
3.2 シーリングシステム設計評価技術開発 115
3.2.1 坑道シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査 115
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－ 135
4.1 膨潤挙動相互作用試験 135
4.1.1 概要 135
4.1.2 膨潤変形試験 137
4.1.3 膨潤挙動相互作用試験 142
4.1.4 まとめ 150
4.2 EDZ シーリング試験 151
4.2.1 概要 151
4.2.2 ベントナイト材料の室内試験 153
4.2.3 EDZ シーリング試験のための原位置調査 158
4.2.4 まとめ 172
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－ 175
5.1 小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験 175

5.1.1 瑞浪超深地層研究所における坑道一部埋め戻し試験の計画 175
5.1.2 小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験 191
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 299
5.2.1 課題設定の考え方及び目的 299
5.2.2 埋め戻し材の材料特性試験（室内試験） 301
5.2.3 埋め戻し材の浸潤特性試験（浸潤過程の予測のための室内試験） 314
5.2.4 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 319
5.2.5 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 330
5.2.6 埋め戻し材の施工プロセス管理方法に関する調査 347
5.2.7 まとめ 348
6. 結言 351
6.1 平成 30 年度の主な成果 351
6.2 おわりに 352

図目次

図 1.2-1　本事業の到達目標と進め方 2
図 2.1-1　本検討における性能確認プログラムのイメージ 6
図 2.1-2　処分場レイアウトと KBS-3 概念 7
図 2.1-3　KBS-3 処分概念 処分坑道の埋め戻し材設計の概念 10
図 2.1-4　Production Line Report における緩衝材の品質管理プロセスの例 12
図 2.1-5　処分場の概念図（左）、廃棄物パッケージの定置イメージ（右） 15
図 2.1-6　Cigeo の継続期間を構成する主要フェーズを示すダイヤグラム 16
図 2.1-7　処分場とキャニスタ定置の概念図 18
図 2.1-8　カナダにおける処分場の概念図 22
図 2.1-9　KBS-3V と KBS-3H の概念図（SKB, 2010b) 32
図 2.1-10　BAPT における埋め戻し、プラグ試験の概要 33
図 2.1-11　Prototype Repository プロジェクトの施設概要 34
図 2.1-12　Domplu 試験の概略図 35
図 2.1-13　Domplu 試験の試験位置および坑道寸法 36
図 2.1-14　掘削が完了した試験位置（測量中の状況） 36
図 2.1-15　プラグの切り欠き部分の掘削方法 37
図 2.1-16　掘削された切り欠き部のレーザースキャニングによる 3D 可視化 37
図 2.1-17　ベントナイトシールと埋戻しブロックでの計測位置 38
図 2.1-18　ベントナイトシール・埋め戻しブロックでの埋設計器 39
図 2.1-19　コンクリートドーム内のセンサーの配置 39
図 2.1-20　コンクリートプラグでの埋設計器 40
図 2.2-1　幌延 URL での無線伝送による計測位置 43
図 2.2-2　測定結果実績（A-A 断面） 44
図 2.2-3　測定結果実績（C-C 断面、D-D 断面） 45
図 2.2-4　冠水坑道内でのノイズレベルと信号強度と通信距離 47
図 2.2-5　伝送システムで利用する装置 48
図 2.2-6　現状の中継装置による伝送システム 49
図 2.2-7　中継装置に接続する大型アンテナのイメージ 50
図 2.2-8　大型アンテナを接続した中継装置による伝送システム 50
図 2.2-9　中継装置に長距離アンテナを接続したイメージ 52
図 2.2-10　長距離伝送装置を用いた伝送システム 52
図 2.2-11　長距離送信アンテナの例 52
図 2.2-12　ボアホール型受信器の設置イメージ 54
図 2.2-13　ボアホール型受信器を利用した伝送システム 54
図 2.2-14　ボアホール型受信器の例 55
図 2.2-15　実証試験における無線給電のイメージ 58
図 2.2-16　磁界共振結合のイメージ図 59
図 2.2-17　送電器一つと受電器一つの系 60
図 2.2-18　送受電器 1:1 における磁界結合の SS 方式の等価回路 60
図 2.2-19　試設計における送受電器の位置関係 62
図 2.2-20　送受電器 1:6 における等価回路 63
図 2.2-21　送受電器 1:6 の給電効率と負荷抵抗の関係 64

図 2.2-22　給電効率と送受電器間距離と受電器の数の関係 64
図 2.2-23　システムの試設計における送受電器の位置関係 66
図 2.2-24　受電器の負荷抵抗と給電効率の関係 68
図 2.2-25　受電器の負荷抵抗と受電電力の関係 68
図 2.2-26　光ファイバーセンサーの区分 78
図 3.1-1　処分場の設計フロー（NUMO、2018） 89
図 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 90
図 3.1-3　遅延に関わる安全機能 91
図 3.1-4　KBS-3 における処分システム安全性確保の概念 92
図 3.1-5　フィンランドにおける処分システムの構成要素 92
図 3.1-6　処分システムの構成要素と安全機能との対応 94
図 3.1-7　処分場に敷設されるシーリング構成要素 95
図 3.1-8　変動状態の核種移行解析における核種の流出経路のイメージ 113
図 3.1-9　変動状態（全シール機能喪失）における線量の時間変化と最大線量・最大線量検出結果 114
図 3.2-1　シーリングシステム構成要素の設置イメージ 119
図 3.2-2　処分場設計全体フロー 120
図 3.2-3　構成要素への安全機能の展開例 121
図 3.2-4　埋め戻し材の充填イメージ 123
図 3.2-5　プラグの施工イメージ 123
図 3.2-6　ピンホール拡大シナリオにおける核種移行径路 125
図 3.2-7　フィンランドにおける水理地質構造 126
図 3.2-8　KBS-3V 処分概念 127
図 3.2-9　シーリング構成要素のイメージ図 128
図 3.2-10　セーフティケースで表現されるシーリングを含む処分場設計の全体像 129
図 3.2-11　階層化された要件への展開例（処分坑道埋め戻し材の例） 130
図 3.2-12　設計仕様（L5）として展開される処分坑道埋め戻し材の初期状態 130
図 3.2-13　シーリングシステムのイメージ図 132
図 3.2-14　EDZ を介した核種移行径路イメージ 132
図 3.2-15　EDZ 発生割合 133
図 4.1-1　人工バリア性能確認試験における緩衝材膨出センサーによる計測 136
図 4.1-2　BACLO における解析検討 136
図 4.1-3　KBS-3V 概略構成図 137
図 4.1-4　Äspö HRL における the Buffer swelling test 137
図 4.1-5　粒径加積曲線 139
図 4.1-6　緩衝材の膨潤変形試験装置の概略図 140
図 4.1-7　膨潤変形試験準備状況 140
図 4.1-8　膨潤変形試験における膨潤率（緩衝材） 141
図 4.1-9　膨潤変形試験における注水履歴（緩衝材） 141
図 4.1-10　膨潤変形試験における膨潤率（埋め戻し材） 142
図 4.1-11　緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用 143
図 4.1-12　ケイ砂充填完了状況 144
図 4.1-13　人工バリア性能確認試験のレイアウト図 145

図 4.1-14　膨潤挙動小規模実験の装置構成図 146
図 4.1-15　人工バリア性能確認試験における上載荷重 147
図 4.1-16　小規模模型の作成手順 148
図 4.1-17　膨潤挙動小規模試験　装置準備状況 149
図 4.1-18　膨潤挙動小規模試験_変位量および注水量 150
図 4.2-1　スイス・モンテリ地下研究所における EZ-A 試験の様子 152
図 4.2-2　EDZ シーリング試験概念図 153
図 4.2-3　ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係 154
図 4.2-4　クニゲル V1 を加圧圧縮成型したペレット 154
図 4.2-5　粒径加積曲線 155
図 4.2-6　膨潤状況確認試験 156
図 4.2-7　膨潤状況確認試験実施状況 157
図 4.2-8　幌延深地層研究センター地下施設と原位置試験場所 159
図 4.2-9　試験坑道 3 ボーリング位置平面図 159
図 4.2-10　パイロット孔掘削前の試験坑道 3 160
図 4.2-11　EDZ-1 孔ボーリングコア試料の写真 162
図 4.2-12　EDZ-2 孔ボーリングコア試料の写真 162
図 4.2-13　パイロット孔断面図 163
図 4.2-14　EDZ-1 孔　孔壁展開画像 164
図 4.2-15　EDZ-2 孔　孔壁展開画像 165
図 4.2-16　透水試験設置状況図 166
図 4.2-17　透水試験結果 167
図 4.2-18　ウォータージェット切削試験実施状況（1/2） 169
図 4.2-19　使用した供試体の試験前の状況 170
図 4.2-20　使用した供試体の試験後の状況 171
図 4.2-21　切削面の状況 171
図 5.1-1　ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係 179
図 5.1-2　瑞浪超深地層研究所内深度 500 m 研究アクセス南坑道のうち設備横坑付近平面図 182
図 5.1-3　計画検討時に実施した室内予備試験における締固め試験結果 183
図 5.1-4　施工ステップ 185
図 5.1-5　RI 密度試験の実施位置 186
図 5.1-6　試料採取の実施位置 187
図 5.1-7　スルーフォーム 187
図 5.1-8　水圧計・土圧計・水分計の設置位置例 189
図 5.1-9　試験坑道の排水流量、ベントナイト濃度計測の概要 190
図 5.1-10　水位計と採水装置および側溝の位置のイメージ（埋め戻し材流出量計測） 190
図 5.1-11　瑞浪超深地層研究所内深度 500 m 研究アクセス南坑道のうち設備横坑付近平面図（再掲） 192
図 5.1-12　坑道一部埋め戻し試験の全体計画と実績（赤線） 193
図 5.1-13　使用材料の様子 195
図 5.1-14　各材料の粒径加積曲線 196
図 5.1-15　埋め戻し材 A、埋め戻し材 B の締固め曲線 196
図 5.1-16　透水試験の状況 198

図 5.1-17　透水係数と経過時間の関係 198
図 5.1-18　吹付けロボット、吹付け機（アリバ 285)、コンプレッサの様子 199
図 5.1-19　地上における予備試験（その１）吹付け試験状況 200
図 5.1-20　地上における予備試験（その１）吹付け後の埋め戻し材品質確認結果 201
図 5.1-21　地上における予備試験（その１）吹付け前の埋め戻し材の状態 202
図 5.1-22　地上における予備試験（その１）吹付け機への材料投入状況 202
図 5.1-23　吹付け機（アリバ 285）の１噴射あたりの量 202
図 5.1-24　吹付け機（ニードガン 2000）の１噴射あたりの量 203
図 5.1-25　地上における予備試験（その２）設備配置 204
図 5.1-26　地上における予備試験（その２）設備配置の様子 204
図 5.1-27　吹付けロボットの様子 204
図 5.1-28　地上における予備試験（その２）吹付け試験状況（設定含水比 14 %） 205
図 5.1-29　地上における予備試験（その２）吹付け後の状況（設定含水比 14 %） 205
図 5.1-30　地上における予備試験（その２）吹付け後の埋め戻し材品質確認結果 207
図 5.1-31　地上における予備試験（その２）吹付け後の状況（設定含水比 18 %） 209
図 5.1-32　地上における予備試験（その２）解砕機による埋め戻し材のほぐし状況 210
図 5.1-33　地上における予備試験（その２）解砕機によりほぐされた埋め戻し材の状況 210
図 5.1-34　研究アクセス南坑道レイアウト 211
図 5.1-35　設備横坑の様子（吹付け施工試験前） 211
図 5.1-36　吹付け施工の品質管理・確認項目一覧 212
図 5.1-37　使用したアイリッヒミキサー 213
図 5.1-38　埋め戻し材の製造フロー 214
図 5.1-39　瑞浪超深地層研究所内換気立坑スカフォード断面図（赤枠が開口部分） 215
図 5.1-40　使用した主要機材一覧（1/2） 215
図 5.1-41　主要機械の立坑搬入検討図 217
図 5.1-42　今回の吹付け施工試験フロー 218
図 5.1-43　設備横坑の設備移設後の様子 219
図 5.1-44　吹付けの各セクション 219
図 5.1-45　吹付け圧力の管理 220
図 5.1-46　ノズルと吹付け面との距離管理 220
図 5.1-47　吹付け作業フロー 221
図 5.1-48　埋め戻し材の重量計測 221
図 5.1-49　フォークリフトによる運搬 221
図 5.1-50　解砕機への投入 221
図 5.1-51　ベルトコンベアによる運搬 221
図 5.1-52　吹付け機への投入 222
図 5.1-53　埋め戻し材吹付け 222
図 5.1-54　はね返り材回収の様子 222
図 5.1-55　はね返り材回収後の養生 222
図 5.1-56　吹付け開始前（左）および吹付け後（右）の状況（セクション１） 224
図 5.1-57　湧水発生箇所付近の様子 224
図 5.1-58　変更後のマテリアルホースの様子 225
図 5.1-59　吹付け（左）および吹付け後（右）の状況（セクション２） 225

図 5.1-60　吹付け（左）および吹付け後（右）の状況（セクション３）.....225
図 5.1-61　吹付け（左）および吹付け後（右）の状況（セクション４）.....226
図 5.1-62　吹付け（左）および吹付け後（右）の状況（セクション５）.....226
図 5.1-63　吹付け（左）および吹付け後（右）の状況（セクション６）.....227
図 5.1-64　人力吹付けによる土留め壁背面の吹付けの様子（セクション６）.....227
図 5.1-65　吹付け（左）および吹付け後（右）の状況（セクション７）.....228
図 5.1-66　吹付け（左）および吹付け後（右）の状況（セクション８）.....228
図 5.1-67　吹付け面の整形（左）とベントナイト充填の様子（右）.....228
図 5.1-68　土留め壁の組立検査（地上）（左）吸出し防止材（SN-100×100）（右）.....229
図 5.1-69　支保工搬入の様子（左）と側溝切り出し後の様子（右）.....230
図 5.1-70　ケミカルアンカー打設（左）と支保工建て込み（右）の様子.....230
図 5.1-71　土留め壁取り付け（左）および吸出し防止材設置後の様子（右）.....230
図 5.1-72　土留め壁・支保工設置計画図.....231
図 5.1-73　試料採取の様子.....234
図 5.1-74　含水比測定の様子.....234
図 5.1-75　吹付け後の品質確認試料の採取箇所.....241
図 5.1-76　吹付け後の試料採取の様子.....241
図 5.1-77　湿潤密度試験の様子.....241
図 5.1-78　試料採取箇所詳細（セクション１）.....242
図 5.1-79　試料採取箇所詳細（セクション２）.....242
図 5.1-80　試料採取箇所詳細（セクション３）.....243
図 5.1-81　試料採取箇所詳細（セクション４）.....243
図 5.1-82　試料採取箇所詳細（セクション５）.....244
図 5.1-83　試料採取箇所詳細（セクション６）.....244
図 5.1-84　試料採取箇所詳細（セクション７）.....245
図 5.1-85　試料採取箇所詳細（セクション８）.....245
図 5.1-86　試料採取箇所詳細（全セクション）.....246
図 5.1-87　埋め戻し材の密度への影響調査の様子.....248
図 5.1-88　埋め戻し試験と室内試験の含水比・乾燥密度の比較（セクション１）.....249
図 5.1-89　埋め戻し試験と室内試験の含水比・乾燥密度の比較（セクション２）.....249
図 5.1-90　埋め戻し試験と室内試験の含水比・乾燥密度の比較（セクション３）.....249
図 5.1-91　埋め戻し試験と室内試験の含水比・乾燥密度の比較（セクション４）.....250
図 5.1-92　埋め戻し試験と室内試験の含水比・乾燥密度の比較（セクション５）.....250
図 5.1-93　埋め戻し試験と室内試験の含水比・乾燥密度の比較（セクション６）.....250
図 5.1-94　埋め戻し試験と室内試験の含水比・乾燥密度の比較（セクション７）.....251
図 5.1-95　埋め戻し試験と室内試験の含水比・乾燥密度の比較（セクション８）.....251
図 5.1-96　3 次元コンター図の作成概念図.....252
図 5.1-97　2 次元コンター図の作成概念図.....252
図 5.1-98　含水比の 2 次元コンター図（左：断面図、右：縦断図）.....252
図 5.1-99　設備横坑切羽の地質状況.....253
図 5.1-100　有効粘土密度の 2 次元コンター図（左：断面図、右：縦断図）.....253
図 5.1-101　FARO 社製 Focus3D S120.....254
図 5.1-102　出来形計測の範囲.....255

図 5.1-103　計測で得られる点群密度のイメージ 256
図 5.1-104　平面ターゲット 256
図 5.1-105　球状ターゲット 256
図 5.1-106　3D スキャナとターゲットの設置位置 257
図 5.1-107　出来形計測・品質確認フロー 258
図 5.1-108　3D スキャナによる計測の様子 258
図 5.1-109　断面法による体積計算のイメージ（１） 259
図 5.1-110　断面法による体積計算のイメージ（２） 259
図 5.1-111　**セクション１の出来形** 260
図 5.1-112　**セクション２の出来形** 260
図 5.1-113　セクション３の出来形 260
図 5.1-114　**セクション４の出来形** 260
図 5.1-115　セクション５の出来形 261
図 5.1-116　セクション６の出来形 261
図 5.1-117　セクション７の出来形 261
図 5.1-118　セクション８の出来形 261
図 5.1-119　3D スキャナと試料採取による有効粘土密度の比較 262
図 5.1-120　3D スキャナによる密度推定と試料採取による密度測定の違いの影響 262
図 5.1-121　3D スキャナによる有効粘土密度とロス率の関係 263
図 5.1-122　試料採取による有効粘土密度とロス率の関係 263
図 5.1-123　モニタリングの品質管理・確認項目一覧 264
図 5.1-124　土圧計 4800 シリーズ 265
図 5.1-125　間隙水圧計 4500 シリーズ 265
図 5.1-126　試験対象センサー 266
図 5.1-127　耐衝撃試験における土壌水分計の設置状況模式図 266
図 5.1-128　耐圧試験装置模式図 266
図 5.1-129　耐衝撃試験結果 267
図 5.1-130　EC-5　耐圧試験①の結果（耐衝撃試験で使用） 268
図 5.1-131　WD-3　耐圧試験①の結果（耐衝撃試験で使用） 268
図 5.1-132　TDT　耐圧試験①の結果（耐衝撃試験で使用） 268
図 5.1-133　EC-5　耐圧試験②の結果（耐衝撃試験で未使用） 268
図 5.1-134　WD-3　耐圧試験②の結果（耐衝撃試験で未使用） 268
図 5.1-135　TDT　耐圧試験②の結果（耐衝撃試験で未使用） 268
図 5.1-136　EC-5　連続加圧による耐圧試験結果 269
図 5.1-137　土壌水分計 EC-5（アイネクス社ホームページより） 269
図 5.1-138　水位計 CSTS-ATM/N（クリマテック社ホームページより） 270
図 5.1-139　吹付け施工の手順（セクション）と計測機器設置位置 271
図 5.1-140　底盤に設置した土圧計に対する載荷試験の実施概要 272
図 5.1-141　E-6、E-11 の載荷試験結果 272
図 5.1-142　水圧計作動確認の模式図 273
図 5.1-143　水圧計の作動確認結果の例（H-1） 273
図 5.1-144　土壌水分計のキャリブレーション状況 274
図 5.1-145　検量線の例（M-1 の例） 274

図 5.1-146　埋め戻し試験領域内における土圧計・水圧計・土壌水分計の設置位置 275
図 5.1-147　吹付け施工のセクションとセンサー設置順序 276
図 5.1-148　水圧計の設置状況 277
図 5.1-149　土壌水分計の設置状況 277
図 5.1-150　土圧計の設置法 277
図 5.1-151　土圧計の設置状況 278
図 5.1-152　ケーブルコリドーの配置模式図 278
図 5.1-153　ケーブルコリドーの詳細図 279
図 5.1-154　ケーブル埋設状況 279
図 5.1-155　ケーブルの土留め壁貫通状況 280
図 5.1-156　ケーブル貫通位置 280
図 5.1-157　計測システムの配置（断面図） 281
図 5.1-158　計測システムの配置（平面図） 281
図 5.1-159　計測システムの配置（俯瞰図） 281
図 5.1-160　土留め壁内部の排水構造と集水の仕組み 281
図 5.1-161　構成機器など 282
図 5.1-162　フロートスイッチによるポンプ作動の概念図 283
図 5.1-163　ベントナイト（クニゲル Ｖ１）の吸光度検量線 284
図 5.1-164　**計測システムの配線** 284
図 5.1-165　ハンディータイプのデータ収録機器 285
図 5.1-166　土圧計の配置模式図 286
図 5.1-167　土圧の計測結果 286
図 5.1-168　2 次元コンター図の作成断面位置 287
図 5.1-169　土圧の経時変化（左から 11 月下旬、12 月中旬、1 月下旬） 287
図 5.1-170　水圧計の配置概念図 288
図 5.1-171　水圧の計測結果 288
図 5.1-172　水圧の経時変化（左から 11 月下旬、12 月中旬、1 月下旬） 289
図 5.1-173　土壌水分計の配置概念図 290
図 5.1-174　土壌水分の計測結果 290
図 5.1-175　土壌水分の経時変化（左から 11 月下旬、12 月中旬、1 月下旬） 291
図 5.1-176　設備横坑切羽地点の地質状況（赤枠が湧水箇所） 291
図 5.1-177　有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係（降水系地下水、海水系地下水） 293
図 5.1-178　総湧水量とベントナイト濃度 294
図 5.1-179　設備横坑直近での地下水水圧モニタリング結果（12MI33 号孔） 294
図 5.1-180　総湧水量とベントナイト（クニゲル V1）流出量の関係 295
図 5.1-181　国内外のベントナイト流出量（エロージョン質量）測定結果 298
図 5.1-182　総湧水量とベントナイト（クニゲル V1）流出量の関係（再掲） 298
図 5.2-1　段階的なサイト選定プロセス 300
図 5.2-2　研究開発の進め方 300
図 5.2-3　使用した模擬掘削土（上：砕石、下：砕砂） 303
図 5.2-4　ケイ砂 6 号を用いた場合のベントナイト種類、締固めエネルギーの影響 307
図 5.2-5　玄武岩（砕石砕砂)、砂岩（砕砂）を用いた場合のベントナイト種類の影響 308
図 5.2-6　玄武岩（砕砂)、砂岩（砕石）を用いた場合の締固めエネルギーの影響 308

図 5.2-7　ベントナイト混合率の異なる締固め曲線 309
図 5.2-8　ベントナイト混合率と最大乾燥密度の関係 309
図 5.2-9　模擬掘削土に火成岩類およびケイ砂を用いた場合の締固め曲線 310
図 5.2-10　模擬掘削土に堆積岩類およびケイ砂を用いた場合の締固め曲線 310
図 5.2-11　模擬掘削土の砕砂のみと砕石・砕砂混合の締固め曲線 311
図 5.2-12　模擬掘削土の土粒子密度とベントナイト混合土の最大乾燥密度の関係 311
図 5.2-13　膨潤圧の経時変化（締固めエネルギー毎） 313
図 5.2-14　乾燥密度と膨潤圧の関係 313
図 5.2-15　乾燥密度と透水係数の関係 314
図 5.2-16　定常透気試験の試験装置の概略図 316
図 5.2-17　VG モデルによる水分特性曲線（飽和度－水分ポテンシャル関係） 317
図 5.2-18　VG モデルによる水分特性曲線（体積含水率－水分ポテンシャル関係） 318
図 5.2-19　埋め戻し材料の飽和度と浸透率の関係 319
図 5.2-20　試験ピット構造図 320
図 5.2-21　試験ピットの状況 321
図 5.2-22　施工試験の流れ 321
図 5.2-23　試験に使用した転圧機械 322
図 5.2-24　レベル測量の実施点 323
図 5.2-25　試験状況 323
図 5.2-26　クニゲル V1 とケイ砂 6 号の転圧機械と締固め度の関係 324
図 5.2-27　クニボンド RW とケイ砂 6 号の転圧機械と締固め度の関係 324
図 5.2-28　異なる模擬掘削土の転圧機械と締固め度の関係 325
図 5.2-29　ケイ砂の試験ケースにおける密度測定結果 326
図 5.2-30　玄武岩、砂岩の試験ケースにおける密度測定結果 327
図 5.2-31　各試験ケースの施工後の締固め度 327
図 5.2-32　乾燥密度と透水係数の関係 329
図 5.2-33　有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係 329
図 5.2-34　小規模施工試験と室内試験の透水係数の比較（ケイ砂） 329
図 5.2-35　小規模施工試験と室内試験の透水係数の比較（玄武岩、砂岩） 330
図 5.2-36　小型吹付け箱の構造図と試験状況 331
図 5.2-37　施工試験の流れおよび概要図 331
図 5.2-38　施工後のサンプリング方法 333
図 5.2-39　シリコーンオイル法の概要 333
図 5.2-40　ベントナイト混合率とリバウンド率の関係 338
図 5.2-41　フレッシュ材含水比とリバウンド率の関係（クニゲル V1） 339
図 5.2-42　フレッシュ材含水比とリバウンド率の関係（クニボンド RW） 339
図 5.2-43　フレッシュ材とリバウンド材の粒度試験結果（クニゲル V1） 340
図 5.2-44　フレッシュ材とリバウンド材の粒度試験結果（クニボンド RW） 341
図 5.2-45　含水比と乾燥密度の関係（左：Na 型ベントナイト、Ca 型ベントナイト） 342
図 5.2-46　材料供給量と乾燥密度の関係 343
図 5.2-47　3D スキャナによる密度計測 344
図 5.2-48　パラフィン法による密度計測 344
図 5.2-49　含水比と乾燥密度の関係（3D スキャナ） 345

図 5.2-50　含水比と乾燥密度の関係（パラフィン法）..... 346
図 5.2-51　透水係数の経時変化..... 347

表目次

表 2.1-1　スウェーデンの地層処分に関する基本情報 7
表 2.1-2　プログラム策定の考え方 9
表 2.1-3　フィンランドの地層処分に関する基本情報 10
表 2.1-4　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連するプロセス 13
表 2.1-5　計測機器、ケーブルおよびセンサーの課題（人工バリアの実証試験） 14
表 2.1-6　フランスの地層処分における基本情報 15
表 2.1-7　性能確認プログラムに対する規制要件、考え方 16
表 2.1-8　スイスの地層処分に関する基本情報 18
表 2.1-9　スイスの規制機関文書における整理結果（その 1） 19
表 2.1-10　スイスの規制機関文書における整理結果（その 2） 20
表 2.1-11　HLW 処分場に関する地下特性調査施設で実施される可能性のある試験プログラム 21
表 2.1-12　カナダの地層処分に関する基本情報 22
表 2.1-13　カナダの規制機関文書における整理結果 23
表 2.1-14　モニタリングパラメータのリスト 25
表 2.1-15　潜在的な実験的、実証的および定期的なモニタリングプログラムの例 26
表 2.1-16　DOPAS プロジェクトにより行われた議論および得られた知見 27
表 2.1-17　MoDeRn および Modern2020 プロジェクトの概要 28
表 2.1-18　調査対象国の品質保証／性能確認プログラムに関する考え方の整理 30
表 2.1-19　プラグに用いるコンクリートの配合（B200） 38
表 2.2-1　瑞浪超深地層研究所レイアウトおよび計測条件 46
表 2.2-2　装置の基本的な仕様 47
表 2.2-3　小型送信器の計測・通信条件（水平坑道） 48
表 2.2-4　無線伝送システムの検討結果一覧 56
表 2.2-5　給電方式の分類 58
表 2.2-6　課題と研究開発項目 59
表 2.2-7　試設計における送受電器のコイルサイズ 61
表 2.2-8　送受電器の位置関係と受電器の個数 61
表 2.2-9　試設計における送受電器のパラメータ（300 kHz 時） 62
表 2.2-10　試設計における送受電器の位置関係と相互インダクタンス 62
表 2.2-11　給電効率と送受電器間距離と受電器の数の関係 64
表 2.2-12　試設計における送受電器のコイルサイズ 66
表 2.2-13　送受電器間距離 66
表 2.2-14　試設計における送受電器のパラメータ（300 kHz 時） 67
表 2.2-15　試設計における送受電器の位置関係と相互インダクタンス 67
表 2.2-16　二次調査の対象文献 71
表 2.2-17　代表的なパラメータと測定方法（1/2）（IAEA, 2001） 72
表 2.2-18　処分場モニタリングとして調査されている計測技術（MoDeRn,2013） 74
表 2.2-19　主な計測項目と計測技術 75
表 2.2-20　光ファイバーを用いたセンサーの例 78
表 2.2-21　その他のセンシング技術の例 81
表 2.2-22　光ファイバーセンサー技術の技術成熟度（TRL） 83

表 3.1-1　KBS-3V における処分システム構成要素の安全機能 93
表 3.1-2　シーリングシステムに求める安全機能の整理 96
表 3.1-3　埋め戻し材に関わるプロセステーブル 98
表 3.1-4　埋め戻し材における「不飽和条件下の吸水・輸送」プロセスと変数の関連性 99
表 3.1-5　埋め戻し（Tunnel Backfill）の長期性能に対して重要と考えられるプロセスと処分場の特性との関連性 101
表 3.1-6　埋め戻し（Tunnel Backfill）における処分場の長期性能に対して重要となる FEP 間の関連性（緑色のセル内の数字は表 3.1-5 のプロセスに対応） 102
表 3.1-7　埋め戻し（Tunnel Backfill）－母岩間の相互作用マトリクス 102
表 3.1-8　シーリングシステムの安全機能に影響を及ぼすと考えらえるプロセスと状態変数の関係 103
表 3.1-9　熱に関わるプロセス－変数の関係 104
表 3.1-10　水理に関わるプロセス－変数の関係（1/5） 104
表 3.1-11　水理に関わるプロセス－変数の関係（2/5） 105
表 3.1-12　水理に関わるプロセス－変数の関係（3/5） 105
表 3.1-13　水理に関わるプロセス－変数の関係（4/5） 105
表 3.1-14　水理に関わるプロセス－変数の関係（5/5） 106
表 3.1-15　力学に関するプロセス－変数の関係（1/3） 106
表 3.1-16　力学に関するプロセス－変数の関係（2/3） 107
表 3.1-17　力学に関するプロセス－変数の関係（3/3） 107
表 3.1-18　化学に関するプロセス－変数の関係（1/7） 107
表 3.1-19　化学に関するプロセス－変数の関係（2/7） 108
表 3.1-20　化学に関するプロセス－変数の関係（3/7） 108
表 3.1-21　化学に関するプロセス－変数の関係（4/7） 108
表 3.1-22　化学に関するプロセス－変数の関係（5/7） 109
表 3.1-23　化学に関するプロセス－変数の関係（6/7） 109
表 3.1-24　化学に関するプロセス－変数の関係（7/7） 110
表 3.1-25　放射性核種の移行に関するプロセス－変数の関係（1/5） 110
表 3.1-26　放射性核種の移行に関するプロセス－変数の関係（2/5） 111
表 3.1-27　放射性核種の移行に関するプロセス－変数の関係（3/5） 111
表 3.1-28　放射性核種の移行に関するプロセス－変数の関係（4/5） 112
表 3.1-29　放射性核種の移行に関するプロセス－変数の関係（5/5） 112
表 3.2-1　スウェーデンにおける処分概念の基本情報 116
表 3.2-2　スウェーデンにおけるシーリングシステムの構成要素 117
表 3.2-3　スウェーデンのシーリングシステム構成要素に求められるバリア機能 118
表 3.2-4　埋め戻し材のレファレンス設計 121
表 3.2-5　プラグのレファレンス設計 122
表 3.2-6　閉鎖材のレファレンス設計 122
表 3.2-7　シーリングに関する性能評価の評価項目 124
表 3.2-8　フィンランドにおける処分概念の基本情報 126
表 3.2-9　シーリングシステムのシステム構成要素 127
表 3.2-10　最初の評価期間 1 を対象とした性能評価項目 131
表 4.1-1　膨潤変形試験用材料仕様 138

表 4.1-2　膨潤変形試験用材料の分析一覧 138
表 4.1-3　X 線回折分析による検出鉱物 138
表 4.1-4　上載荷重の設定値 140
表 4.1-5　空隙充填試験装置仕様 143
表 4.1-6　膨潤挙動小規模試験における供試体仕様 146
表 4.1-7　膨潤挙動小規模試験装置仕様 147
表 4.2-1　EDZ シーリング試験における粘土止水壁の候補材料 154
表 4.2-2　模擬地下水の化学組成 155
表 4.2-3　ボーリング孔の座標および標高 159
表 4.2-4　パイロット孔掘削に使用した主要資機材 160
表 4.2-5　パイロット孔掘削実績 161
表 4.2-6　EDZ-1 孔コア観察結果 161
表 4.2-7　EDZ-2 孔コア観察 162
表 4.2-8　試験結果一覧表 168
表 4.2-9　主要装置の仕様 169
表 4.2-10　試験結果一覧表 171
表 5.1-1　坑道一部埋め戻し試験の実施機関、試験名および試験環境 176
表 5.1-2　坑道シーリングの構成要素に期待する機能と役割 176
表 5.1-3　埋め戻し材の設計 177
表 5.1-4　埋め戻し材・止水プラグの技術要件（基本的なバリア性能の確保） 177
表 5.1-5　埋め戻し材、止水プラグの長期健全性の維持に関する技術要件 177
表 5.1-6　候補母岩の特徴および類型化 178
表 5.1-7　坑道一部埋め戻し試験の目的 178
表 5.1-8　国内外の坑道一部埋め戻し試験および参考となる試験の品質確認項目と計測法 180
表 5.1-9　坑道一部埋め戻し試験における施工中の品質確認項目および品質確認手法の概念 181
表 5.1-10　室内予備試験に供した埋め戻し材の構成材料の一覧 182
表 5.1-11　室内予備試験の基礎物性 182
表 5.1-12　締固め方法 183
表 5.1-13　埋め戻し材の必要数量 184
表 5.1-14　吹付け機の仕様例 185
表 5.1-15　施工中の品質確認に係る計測 186
表 5.1-16　施工中の品質確認として実施する計測（計測機器、計測頻度、計測位置） 186
表 5.1-17　埋め戻し材の施工後品質確認項目、品質確認手法およびセンサー設置個数 188
表 5.1-18　吹付け工 1 ステップにおけるサイクルタイムの推定 191
表 5.1-19　坑道一部埋め戻し試験における品質確認項目および品質確認手法 194
表 5.1-20　使用材料一覧 195
表 5.1-21　各材料の含水比試験、土粒子の密度試験、粒度試験の結果 195
表 5.1-22　締固め条件 196
表 5.1-23　埋め戻し材 A と埋め戻し材 B の最大乾燥密度、最適含水比、有効粘土密度 197
表 5.1-24　透水試験用供試体の諸物性 197
表 5.1-25　透水試験の供試体作製方法 198
表 5.1-26　透水試験の結果 198
表 5.1-27　地上における予備試験（その 1）に供した埋め戻し材の構成材料の一覧 199

表 5.1-28　地上における予備試験（その１）　使用機械一覧 199
表 5.1-29　地上における予備試験（その１）吹付け前の含水比測定結果 200
表 5.1-30　地上における予備試験（その１）吹付け後の埋め戻し材品質 200
表 5.1-31　地上における予備試験（その１）サイクルタイム（1 袋 428 kg あたり） 201
表 5.1-32　地上における予備試験（その２）に供した埋め戻し材の構成材料の一覧 203
表 5.1-33　地上における予備試験（その２）の試験条件 203
表 5.1-34　地上における予備試験（その２）使用機械一覧 204
表 5.1-35　地上における予備試験（その２）吹付け前の含水比測定結果 205
表 5.1-36　地上における予備試験（その２）吹付け後の埋め戻し材に関する測定結果 206
表 5.1-37　地上における予備試験（その２）サイクルタイム（設定含水比 14 %） 207
表 5.1-38　地上における予備試験（その２）サイクルタイム（設定含水比 16 %） 208
表 5.1-39　地上における予備試験（その２）サイクルタイム（設定含水比 18 %） 208
表 5.1-40　地上における予備試験（その２）はね返り率およびロス率 208
表 5.1-41　地上における予備試験（その２）の施工時間あたり材料投入重量 209
表 5.1-42　坑道一部埋め戻し試験における材料仕様 210
表 5.1-43　坑道一部埋め戻し試験における坑内の使用機械の設定 211
表 5.1-44　埋め戻し材の仕様 213
表 5.1-45　使用機械、練り混ぜ条件 213
表 5.1-46　使用機械一覧 215
表 5.1-47　サイクルタイムと吹付け重量の集計結果（人力埋め戻し作業は除く） 231
表 5.1-48　各セクションの施工速度と吹付け速度一覧 232
表 5.1-49　各セクションのロス率一覧 233
表 5.1-50　吹付け前の含水比試験の結果（セクション１） 234
表 5.1-51　吹付け前の含水比試験の結果（セクション２） 235
表 5.1-52　吹付け前の含水比試験の結果（セクション３） 236
表 5.1-53　吹付け前の含水比試験の結果（セクション４） 237
表 5.1-54　吹付け前の含水比試験の結果（セクション５） 238
表 5.1-55　吹付け前の含水比試験の結果（セクション６） 239
表 5.1-56　吹付け前の含水比試験の結果（セクション７） 240
表 5.1-57　吹付け前の含水比試験の結果（セクション８） 240
表 5.1-58　各セクションの有効粘土密度一覧 247
表 5.1-59　湿潤密度試験による密度の比較 248
表 5.1-60　側溝部分の品質確認結果 254
表 5.1-61　Focus3D S120 の仕様 254
表 5.1-62　本吹付け施工試験で使用したモニタリング用センサー類 265
表 5.1-63　耐衝撃試験と耐圧試験結果の整理 269
表 5.1-64　土壌水分計の諸元 269
表 5.1-65　水位計の諸元 270
表 5.1-66　土圧計のセンサー番号 270
表 5.1-67　水圧計のセンサー番号 270
表 5.1-68　土壌水分計のセンサー番号 271
表 5.1-69　天盤および側壁に設置した土圧計に対する押圧試験の結果 271
表 5.1-70　底盤に設置した土圧計に対する載荷試験の結果 272

表 5.1-71　土壌水分計のキャリブレーション結果 274
表 5.1-72　設置機器一覧 281
表 5.1-73　計測システムの電源一覧 284
表 5.1-74　吹付け後の埋め戻し材の飽和度 291
表 5.1-75　土圧計設置地点における膨潤圧の算出結果 292
表 5.1-76　ベントナイト（クニゲル V1）流出量の算出結果 295
表 5.2-1　埋め戻し材の設計要件と指標 301
表 5.2-2　埋め戻し材の評価項目 301
表 5.2-3　埋め戻し材の仕様 301
表 5.2-4　試験に使用した材料 302
表 5.2-5　使用した材料の試験項目 304
表 5.2-6　試験に使用したベントナイトの基本物性 304
表 5.2-7　試験に使用した模擬掘削土の基本物性 304
表 5.2-8　模擬掘削土にケイ砂を用いた際の最大乾燥密度と最適含水比 305
表 5.2-9　模擬掘削土に火成岩類および堆積岩類を用いた際の最大乾燥密度と最適含水比 306
表 5.2-10　膨潤試験のケース 312
表 5.2-11　各混合土の水分特性曲線における VG モデルのパラメータ 318
表 5.2-12　試験ケースおよび品質管理試験数量 322
表 5.2-13　サンプリング試料を用いた含水比、乾燥密度および透水試験結果 328
表 5.2-14　試験ケース 332
表 5.2-15　品質管理項目および施工後取得データ 332
表 5.2-16　施工性評価結果（クニゲル V1）（1/2） 334
表 5.2-17　施工評価結果（クニボンド RW）（1/2） 336
表 5.2-18　湿潤密度、含水比および乾燥密度 342
表 5.2-19　透水試験ケース 346

1. 緒言

1.1 本事業の背景と目的

本事業は、平成 30 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ー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。

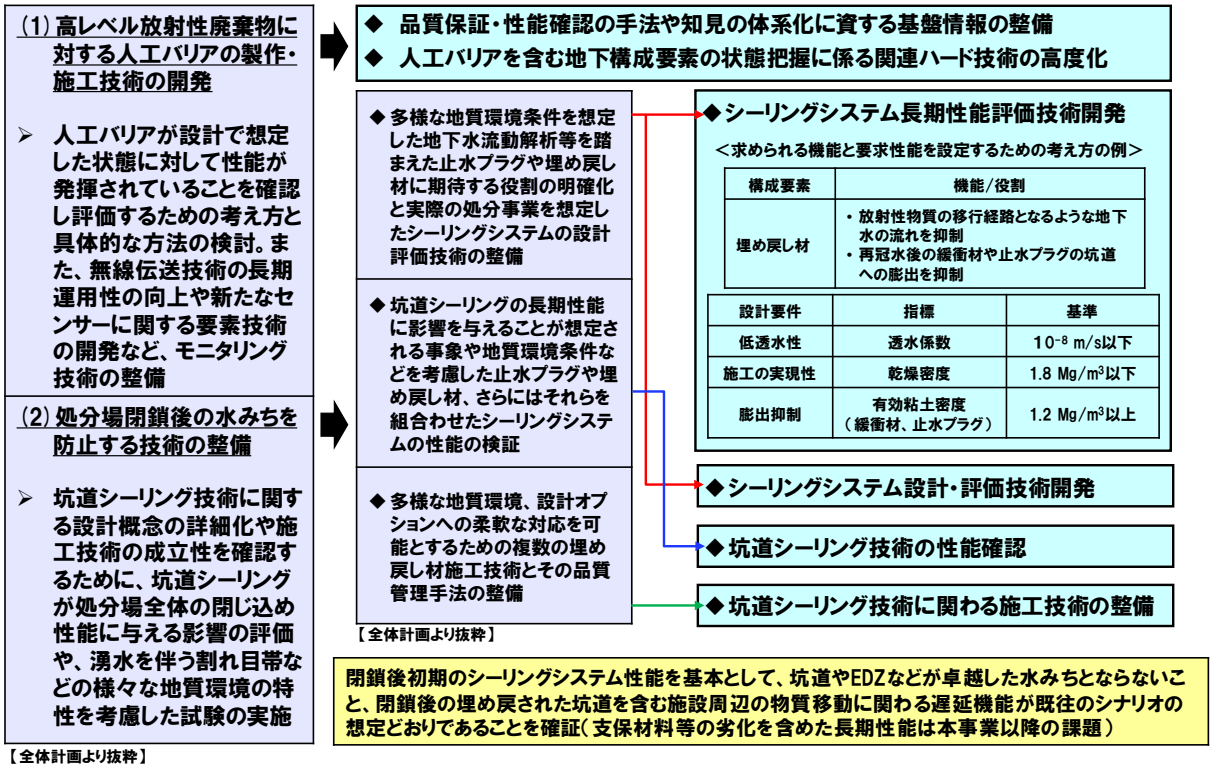


図 1.2-1　本事業の到達目標と進め方

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工バリアの製作・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 30 年度は、モニタリングや品質保証、さらにこれらを包含した処分システムの性能確認に係る取り組みの体系化に資する技術情報の整備に向けた計画を具体化するとともに、国際共同研究（Modern2020; Developments and Demonstration of monitoring strategies and technologies for geological disposal）への参画および諸外国の先行的な検討動向などの調査により、品質保証体系や原位置状態把握に係る関連ハード技術に関する情報収集ならびに無線伝送技術および無線給電技術の処分環境下での適用性試験などにより技術の高度化を進める。

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、我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 30 年度は、我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・整理する。

(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。

平成 30 年度は、シーリング技術の性能確認に関する計画検討を行うとともに、緩衝材、埋め戻し材および止水プラグの力学的相互作用や、止水プラグによる掘削影響領域中の地下水移行抑制効果を把握するため、膨潤挙動相互作用試験および EDZ シーリング試験に着手する。

(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 30 年度は、施工技術の整備に向けた試験計画などの具体化を行うとともに、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 500 m 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、特性データや施工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する。

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 における人工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 における人工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.

2.　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
－製作・施工技術に係る品質保証体系の整備－

2.1 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

2.1.1　性能確認プログラムの構築に資する諸外国の先行検討動向の調査

人工バリアや他の地下構成要素に対する品質管理やモニタリングを包含する品質保証体系として、「性能確認プログラム」と称される体系的な取り組みが国際的に共有されつつある（図 2.1-1）。本調査では、そのような取り組みについて、国際機関や国際共同研究における検討動向や諸外国の関連プログラムの策定事例などの調査を行い、我が国に適用可能な性能確認プログラムの構築に資する技術情報として整理する。

本年度の調査では、主要国（スウェーデン、フィンランド、フランス、スイス、カナダ）を対象として、各国の安全規制等の法規制制度での要求事項や事業者の取り組みについて、以下の観点から調査した。

・基本情報
・性能確認プログラムに対する規制要件、考え方、全体取組み
・プログラム策定の戦略・体系
・方法論
・性能確認プログラムの実践に向けて現時点で認識されている課題

また、これらの取り組みに関連する国際共同研究（MoDeRn、Modern2020、DOPAS）についての調査も実施し、研究の目的ならびに実施内容や成果など、最新の研究開発動向の整理を行った。

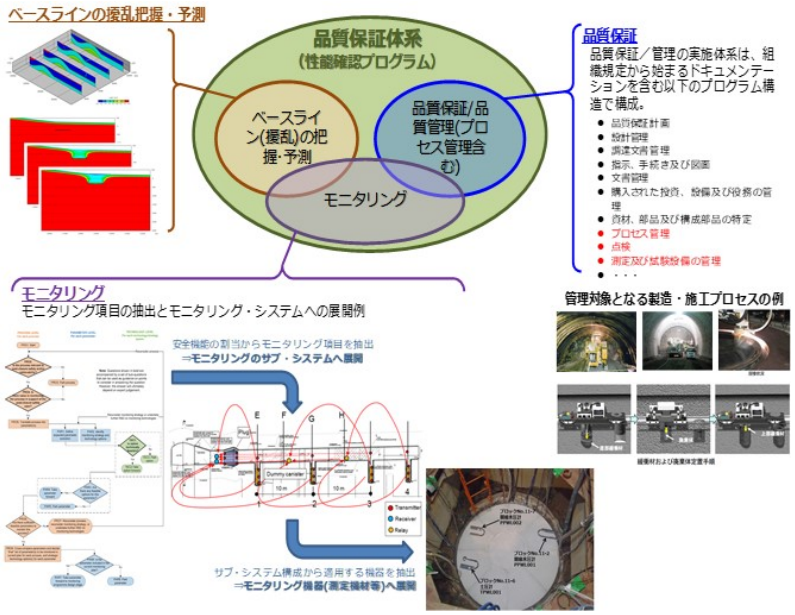


図 2.1-1　本検討における性能確認プログラムのイメージ

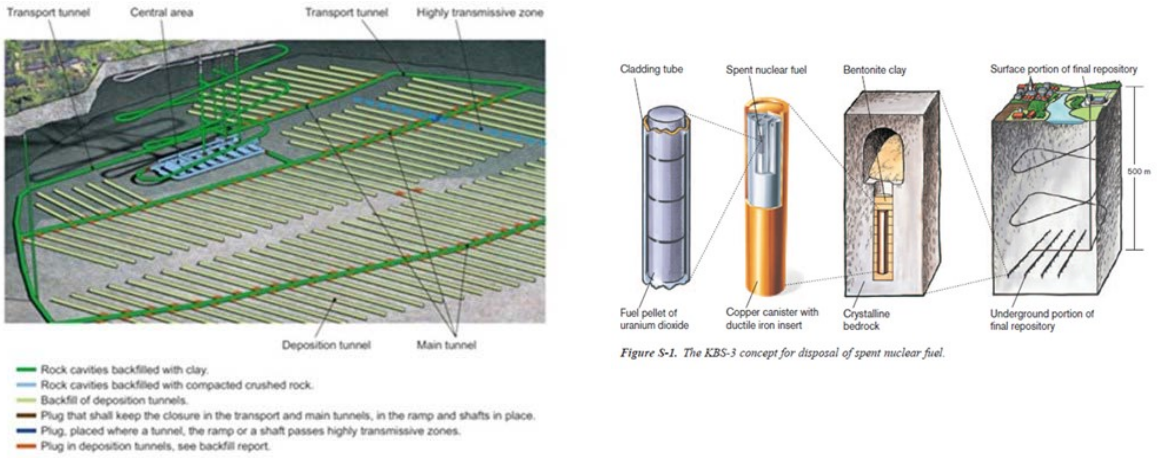
(1) スウェーデンにおける取組状況

1) 基本情報

スウェーデンにおける処分概念等の基本情報を表 2.1-1 に、処分場のレイアウトおよび地層処分の概念図を図 2.1-2 に示す。スウェーデンの候補サイトとしてフォルスマルク（Forsmark、岩種：結晶質岩）が選定されており、処分対象廃棄物の使用済燃料はキャニスタ（外側：銅製／内側：鋳鉄製）に封入し、その周囲を緩衝材（ベントナイト粘土）で取り囲んで、力学的および化学的に安定した岩盤内に定置される（KBS-3 概念）。

表 2.1-1　スウェーデンの地層処分に関する基本情報

項目		スウェーデンにおける処分事業の概要
処分サイト	候補サイト地域	Forsmark
	候補岩種	結晶質岩
	処分深度（計画）	約 500 m
事業計画	現況	SKB は Forsmark における安全評価書「SR-Site」を 2011 年に SSM に提出
	処分開始予定	2029 年
	操業期間	処分場操業（約 40 年間）：2030 年から試験操業としてキャニスタを年間 25～50 本のペースで処分を開始。その後徐々に処分ペースを増加し、通常操業（年間 150～160 本を処分）へ移行する計画。
地下研究施設		エスポ岩盤研究所（オスカーシャム）
処分対象廃棄物		使用済燃料
処分概念		KBS-3 概念： ・使用済燃料をキャニスタ（外側：銅製／内側：鋳鉄製）に封入し、その周囲を緩衝材（ベントナイト粘土）で取り囲んで、力学的および化学的に安定した岩盤内に定置 ・複数の人工バリアと天然バリアを組み合わせた多重バリアシステムにより、放射性廃棄物を長期に隔離し、隔離ができなくなった場合でも処分場からの放射性核種の放出を遅延 ※SKB は縦置き方式を主とて技術開発を実施してきたが、フィンランドと共同で横置き方式の実現可能性も検討中



(a) 処分場レイアウト　　(b) KBS-3 概念

図 2.1-2　処分場レイアウトと KBS-3 概念
（SKB, 2010a;2011）

2) 性能確認プログラムに対する規制要件、考え方、全体取組み

スウェーデンの規制機関である放射線安全機関（SSM）が発行する文書のうち、品質保証や性能確認に関連する文書は以下に記載されている。

○ SSM: The Swedish Radiation Safety Authority's regulations concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste, SSMFS 2008:21, (2008).

○ SSM: Technical Note, Review of Performance Confirmation Programs and Potential Roles in SSM's Current Review of SKB's License Application – Main Review Phase, 2014:40, (2014).

これらの文書では、バリアおよびその機能について次のように述べられている。

- 安全報告書で予測されたもの以外に閉鎖後の安全性を低下させる不具合が、処分場の建設中または操業監視中に見出された場合には、そのことを遅滞なく放射線安全機関に報告しなければならない。そのような不具合の疑いが生じた場合、または将来そのような不具合が生じる可能性がある場合にも適用される。
- 処分された廃棄物のモニタリング、廃棄物を処分場から容易に回収するための措置、処分場への侵入を困難にするための措置については、それらの措置が安全性に与える影響を分析し、放射線安全機関に報告しなければならない。
- 安全評価では、放射線安全機関の規則（SSMFS, 2008）第4章第1条の規定以外に、閉鎖後の放射性物質の散逸をもたらす可能性がある特性、事象、プロセスを網羅しなければならず、その評価は処分場の建設前、操業前および閉鎖前に行われなければならない。
- 安全報告書には、放射線安全機関の規則（SSMFS, 2008）第4章第2条の規定以外に、この規則の付属書1に示される閉鎖後の期間についての情報が含まれなければならない。

3) プログラム策定の戦略・体系

実施主体である SKB が立地・建設許可申請書とともに提出した安全評価書（SR-Site）では、処分場閉鎖後のモニタリングについての検討はされていない（SSMFS, 2008）。処分場閉鎖後のモニタリングについての法的要件は存在しないため、処分場の閉鎖後の安全性は保守およびモニタリングを必要とせず、操業段階における品質保証によってその機能が履行されるべきとされている。SKB のモニタリング戦略は現在でも開発が進められているが、表 2.1-2 に示すように最終的に定置された人工バリアシステムのモニタリングは、バリア機能を損なう可能性があるとの理由から、現時点では計画されていない。

表 2.1-2　プログラム策定の考え方

人工バリアの品質に関する考え方	（SKB, 2011）には、次の記載がある。 ・処分場の人工構造物の仕様を詳細化し、所定の仕様を満足する構築物の品質を保証し製造する技術を立証し、安全評価で用いる初期状態の品質保証が、処分場の閉鎖までに母岩のベースラインに関するモニタリング、処分場建設、および操業によっての周囲の環境に与える影響をモニタリングなどの実施により可能となった。 （SKB,2010a）には、ISO 9000:2005 に基づき、次の記載がある。 ・品質管理（QC）は、品質要件を満足することに焦点が当てられる。 ・一方、品質保証（QA）は、将来的に品質要件が満足することの証明に焦点が当てられる。
人工バリアの性能確認モニタリングに関する考え方	（SKB, 2011）には、次の記載がある。 ・最終的に処分された廃棄体の人工バリア（キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材）のモニタリングは、計器類やセンサーにつながるケーブルによって、人工バリアの安全機能が損なわれる可能性があるため、予定していない。

4)　性能確認プログラム策定の方法論

SKB の SR-Site では、ベースライン（地下施設の建設前の擾乱のない時点における地下環境の状態）を把握するためのモニタリング、処分場建設の影響に関するモニタリング、処分場建設・操業に関する管理プログラムの策定についての検討が行われている（SKB, 2011）。

SKB で計画されているモニタリングの概要を以下に示す。

○ベースラインの把握に関するモニタリング

目的：処分場の開発によって新たに生じた変化を識別したうえで、処分場環境における自然の時間的、空間的な変動と人為的な変動を区別できるようにするための基準を定義する

○処分場建設の影響に関するモニタリング

目的：処分場の建設および操業による環境影響を調査する

○処分場建設・操業に関する管理プログラム

目的：建設作業および操業に関連する設計要領（design premises）およびその他の要件が確実に満たされているようにする

5)　性能確認プログラムの実践に向けて現時点で認識されている課題

SKB では長期安全性を担保する人工バリアを設計、製造するために、エスポ岩盤研究所での実規模試験の実施や ISO 規格（ISO9000：2005）に順守した品質マネジメントを行う意図が窺える。これらに関する技術的課題について、エスポ岩盤研究所での実規模試験（DOPAS プロジェクト）をとおして、次のような事項が処分坑道プラグに関する将来の課題として示されている。

- 最大圧力10 MPaに至る負荷実験
- コンクリートドームが岩壁から離れるか否かによるコンクリートドームの応力に関する更なる調査
- 材料試験より自己収縮が小さくなった原因、生コンクリートの特性に対する適切な目標値の設定
- 低pHコンクリートの更なる開発として、フォルスマルクで入手できる骨材および将来利用可能な添加剤
- 低pHグラウト材に関する組成
- 新しい素材の閉鎖後安全性の評価
- プラグを通った漏えいを測定し、プロトタイプシステムを改良
- 掘削方法のフォルスマルクでの実証

(2) フィンランドにおける取組状況

1) 基本情報

フィンランドにおける処分概念等の基本情報を表 2.1-3 に示す。フィンランドの候補サイトとしてオルキルオト（Olkiluoto、岩種：結晶質岩）が選定されており、処分概念はスウェーデンと同様であり、処分対象廃棄物の使用済燃料はキャニスタ（外側：銅製／内側：鋳鉄製）に封入し、その周囲を緩衝材（ベントナイト粘土）で取り囲んで、力学的および化学的に安定した岩盤内に定置する（KBS-3 概念）。また KBS-3 処分概念図を図 2.1-3 に示す。

表 2.1-3　フィンランドの地層処分に関する基本情報

項目		フィンランドにおける処分事業の概要
処分サイト	候補サイト地域	Olkiluoto（エウラヨキ自治体）
	候補岩種	結晶質岩
	処分深度（計画）	約 400～450 m
事業計画	現況	処分場建設中（2016 年 12 月～）
	処分開始予定	2020 年代初め頃
	操業期間	約 90 年間
地下研究施設		地下特性調査施設（ONKALO）、（2004 年から建設開始）
処分対象廃棄物		使用済燃料（最大 6,500 t）
処分概念		KBS-3 概念： ・使用済燃料をキャニスタ（外側：銅製／内側：鋳鉄製）に封入し、その周囲を緩衝材（ベントナイト粘土）で取り囲んで、力学的および化学的に安定した岩盤内に定置 ・複数の人工バリアと天然バリアを組み合わせた多重バリアシステムにより、放射性廃棄物を長期に隔離し、隔離ができなくなった場合でも処分場からの放射性核種の放出を遅延 ※POSIVA は縦置き方式を主とて技術開発を実施してきたが、スウェーデンと共同で横置き方式の実現可能性も検討中

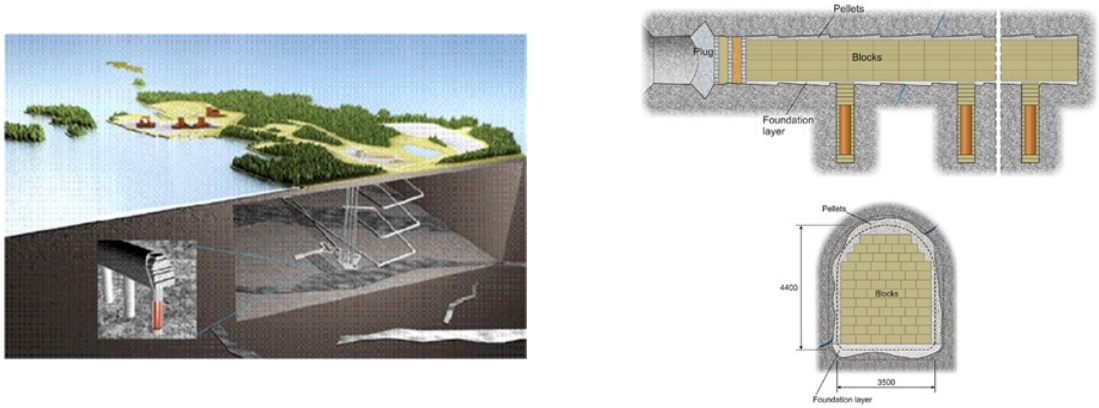


図 2.1-3　KBS-3 処分概念 処分坑道の埋め戻し材設計の概念
（POSIVA, 2012a；2012b；2013）

2) 性能確認プログラムに対する規制要件、考え方、全体取組み

フィンランドの規制機関（STUK）の文書（STUK, 2013）では、以下に示すように、人工バリアの定義や役割が明記されている。同文書には、人工バリアの性能要件や設計要件に関して、その設定の考え方は示されているが、具体的な要件にまでは言及はなく、これらは事業者が提案することとなる。

- 処分施設の建設および操業期間中に、処分施設としての岩盤および掘削場所の適切性、母岩の安全性に関わる特性やバリアの性能に関する補足的情報を得るために、少なくとも以下を含む調査、試験の実施およびモニタリングプログラムを策定しなければならない。
  - 掘削が予定されている岩盤の特性評価
  - 定置領域周辺の岩盤の岩盤応力、移動および変形に関するモニタリング
  - 定置領域周辺の岩盤に関する水理地質学的なモニタリング
  - 地下水化学に関するモニタリング
  - 人工バリアの挙動に関するモニタリング
- 長期の放射線防護要件への適合性、処分方法、サイトの適格性は、セーフティケースによって立証されなければならない。
- 処分施設に関する予備的および最終安全評価報告書には、処分施設で実行される調査、モニタリングおよび管理プログラムおよび長期セーフティケースに関する総括を記載する必要がある。
- 許認可保持者は、操業許認可に別段の規定がある場合を除き、廃棄物の処分に関する定期安全レビューを少なくとも15年ごとに1回実施しなければならない。
- 後で処分施設の一部分とすることを意図した地下研究施設が、建設許認可の発給に先立って当該処分地に建設される場合、STUKは、処分施設の建設に関わる過程と同じ過程に従って適切と考える範囲で、この研究施設の設計と建設の監視を実施する。この建設には、建設期間中の品質マネジメントに関する報告書が必要となる。
- 岩盤の空洞および構造物の使用を開始する際の検査では、STUKは品質管理記録が検査され、承認されていることを確認する。
- 処分施設を恒久的に閉鎖する前提条件は、STUKが下記を含む閉鎖計画を承認することである。
  - 施設の閉鎖の実施の技術的内容の記述
  - セーフティケースの更新（特に、調査、試験およびモニタリングプログラムの結果を考慮に入れたもの）
  - 実施される場合には、閉鎖後に行う可能性のあるモニタリング措置の計画、および禁止事項のある制限範囲に関する提案

3) プログラム策定の戦略・体系

実施主体である POSIVA では、当面の建設段階への適用を念頭においたモニタリングプログラムを策定しており（POSIVA, 2012c）、操業期間に適用されるモニタリングプログラムは現在開発中である。建設段階のモニタリングプログラム開発の経験を踏まえ、操業期間に適用するモニタリングプログラムが処分場の操業許可申請の提出前に提示される予定である。POSIVA による人工バリアの品質保証および性能確認に関する考え方は以下のとおりである。

- 人工バリアの品質管理に関する考え方は、構成要素毎に、セーフティケース付属文書であるProduction Line Report（例えば、POSIVA, 2012dなど）に記載されている。例えば、緩衝材については、材料調達などの生産ラインにおける試験や検査に係る次のような基本的

な考え方を示している。

- 生産ラインのあらゆる段階で検査を実施する
- 検査方法や回数は今後設定される
- 検査方法は他の産業分野を参考にする

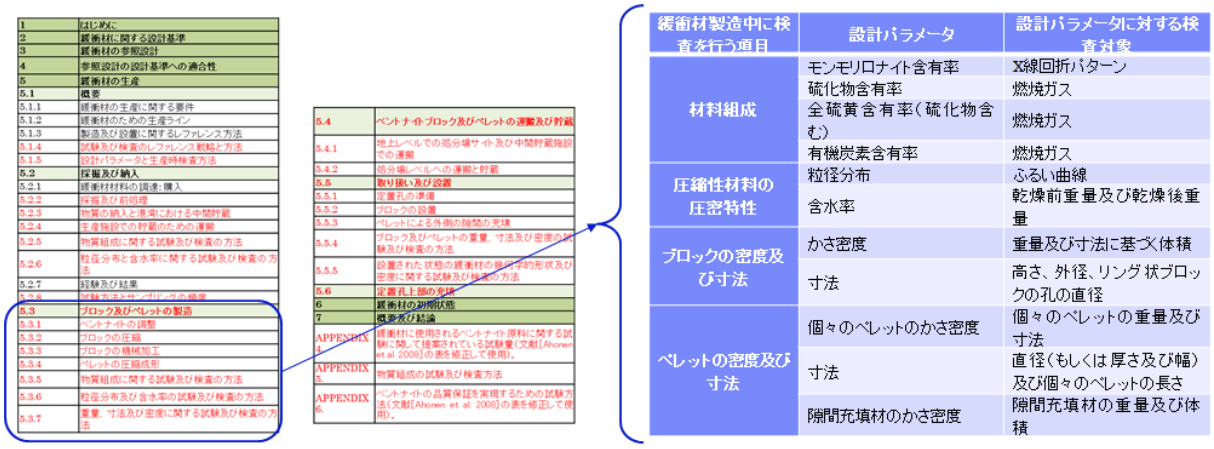
● STUKの規制ガイダンス（STUK, 2013）では、建設・操業段階における、調査、試験、モニタリングプログラムの実行を規定しており、その中に人工バリア挙動に関するモニタリングが含まれている。

- POSIVAのYJH-2018（POSIVA,2018）では、人工バリアのモニタリングについて「操業期間中の人工バリアの挙動に関する情報を供給するように設計」され、「期待、予測された挙動を確認するため、人工バリアの性能をモニタリング」するものとされている。また、人工バリア性能のモニタリングについては、国際共同研究Modern2020において、設計案が示され、現在、ONKALOにおいて実証試験（FISST ; Full Scale In-Situ System Test）が行われている。
- 上記を経て、処分場の操業許可申請時にモニタリングプログラムが提示される。
- モニタリングの対象項目は、要件管理システム（VAHA）とリンクしている。（POSIVA,2013、2012e）

4) 性能確認プログラム策定の方法論

(a) 製造･施工プロセス管理手法について

製造･施工プロセス管理の考え方は人工バリア要素ごとに、生産ライン報告書（Production Line Report, POSIVA ,2012d など）に記載されており、人工バリアの製作・施工の各段階で品質確保のための試験および検査を行うこととなっている。その例として、緩衝材に関する生産ライン報告書（POSIVA, 2012d）における品質管理プロセスを図 2.1-4 に示す。図中の左側はベントナイト鉱山での掘削から緩衝材の定置に至るまでの工程であり、赤字で示したプロセスが品質確保のための試験および検査を実施する項目である。右側に示した表は、緩衝材製造時の設計パラメータが設計要件に適合していることを確認するための検査項目である。



緩衝材製造中に検査を行う項目	設計パラメータ	設計パラメータに対する検査対象
材料組成	モンモリロナイト含有率	X線回折パターン
	硫化物含有率	燃焼ガス
	全硫黄含有率（硫化物含む）	燃焼ガス
	有機炭素含有率	燃焼ガス
圧縮性材料の圧密特性	粒径分布	ふるい曲線
	含水率	乾燥前重量及び乾燥後重量
ブロックの密度及び寸法	かさ密度	重量及び寸法に基づく体積
	寸法	高さ、外径、リング状ブロックの孔の直径
ペレットの密度及び寸法	個々のペレットのかさ密度	個々のペレットの重量及び寸法
	寸法	直径（もしくは厚さ及び幅）及び個々のペレットの長さ
	隙間充填材のかさ密度	隙間充填材の重量及び体積

図 2.1-4 Production Line Report における緩衝材の品質管理プロセスの例
（POSIVA, 2012d）

(b)　原位置におけるモニタリング対象項目の選定

POSIVA では、プログラムの開発段階ではあるものの、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選定が進められている（表 2.1-4）（POSIVA, 2012c）。表中に記載のあるプロセスの全てに原位置でのモニタリングが必要とはされておらず、表右端の棄却理由により原位置でのモニタリングの対象から除外される項目もある。除外理由の例を以下に示す。

- 規則的 : 例えば使用済核燃料の放射性崩壊のように、規則性があり、原位置モニタリングをせずとも挙動が予想できるもの。
- 間接測定：例えば使用済燃料からの熱伝播は、処分システムの他の構成要素の温度変化に影響するものであるが、原理的に間接的にモニタリングすることができるもの。
- 実験室 : 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。

表 2.1-4 のうち、除外されなかった以下のプロセスが、原位置でのモニタリングの対象となる。

- キャニスタ：熱移動
- キャニスタ：変形
- 緩衝材と埋め戻し材：熱移動
- 緩衝材と埋め戻し材：水の流入と膨潤
- 追加的構成要素（プラグ、シールなど）：物理的劣化

表 2.1-4　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連するプロセス

分類	プロセス番号		プロセス名	モニタリング分野	棄却理由
人工バリアの変化に関するプロセス	使用済み燃料				
	3.2.1		放射性壊変		規則的
	3.2.2		熱生成		規則的
	3.2.3		熱移動		間接測定
	3.2.4		燃料ペレットの構造変化		実験室
	3.2.5		残留水の放射化（キャニスタ内）		実験室
	3.2.6		間隙水の放射化		実験室
	3.2.7		燃料被覆管及びその他金属材料の腐食		キャニスタ破損
	3.2.8		燃料集合体の変質と溶解		実験室
	3.2.9		インベントリの不安定区分の放出		キャニスタ破損
	3.2.10		ヘリウムガスの生成		規則的
	キャニスタ				
	4.2.1		放射線の減衰		規則的
	4.2.2		熱移動	人工バリア	
	4.2.3		変形	人工バリア	
	4.2.4		キャニスタの熱膨張		規則的
	4.2.5		鋼製オーバーパックの腐食		実験室
	4.2.6		鋳鉄製インサートの腐食		キャニスタ破損
	4.2.7		応力腐食割れ		実験室
	緩衝材と埋め戻し材				
	5.2.1	6.2.1	熱移動	人工バリア/岩盤力学	
	5.2.2	6.2.2	水の流入と膨潤	人工バリア/水理学	
	5.2.3	6.2.3	パイピングとエロージョン		実験室
	5.2.4	6.2.4	化学的エロージョン		実験室
	5.2.5	-	間隙水の放射化		実験室
	5.2.6	6.2.5	モンモリロナイトの変質		実験室
	5.2.7	6.2.6	随伴鉱物の変質		実験室
	5.2.8	6.2.7	微生物活動		実験室
	-	6.2.8	凍結と解凍		氷河期
	追加的構成要素（プラグ、シール等）				
	7.2.1		化学的劣化		実験室
	7.2.2		物理的劣化	人工バリア	
	7.2.3		凍結と解凍		氷河期

5) 性能確認プログラムの実践に向けて現時点で認識されている課題

POSIVA Working Report（POSIVA, 2015）において、人工バリア実証試験（緩衝材を対象とした 40 %縮小試験）より得られた教訓として、技術的な課題が示されている。同レポートは、設計、試験準備およびモニタリングから得られた教訓と、解体、サンプリングおよび実験室での分析から得られた教訓の双方が示されている。人工バリア実証試験の設計、試験準備およびモニタリングから得られた教訓は、以下の四つの観点に分けて整理されている。

- 試験場所および岩盤環境
- 計測機器、ケーブルおよびセンサー
- 試験用加熱システムおよび模擬キャニスタ
- ソフトウェア、コミュニケーションおよびデータ移送

上記課題のうち、一例として、「計測機器、ケーブルおよびセンサー」に関する課題を抜粋して表 2.1-5 に示す。

表 2.1-5　計測機器、ケーブルおよびセンサーの課題（人工バリアの実証試験）

問題の原因	結果	重大性
ケーブル束の内側に沿った水の移動/漏洩	機器設置用キャビネット内および装置への水によるダメージ	高：影響する性能全体の試験、データ喪失
ガルバニック腐食に対する隔離が行われていない全圧センサー	故障したセンサーが引き起こす電源へのダメージおよびだのセンサーへのダメージ	高：影響する性能全体の試験、データ喪失
製造者による不正確なセンサー防護レベルの記載	選択された設置方法による圧力センサーの故障	高：影響する性能全体の試験、データ喪失
設置に使用するチューブの寸法が設計へ正確に一致せず	母岩表面の小さな溝への設置の困難性	中：作業時間、労働力の追加
設置に使用するチューブの設置スケジュールの欠陥	設置に使用するチューブの短縮の必要性。これによる水密性の問題の可能性。	高：影響する性能全体の試験、データ喪失
シーリング・コンパウンドとケーブルの接触部分の水密性の欠如	全圧計におけるショートの可能性	高：影響する性能全体の試験、データ喪失
ヒーター設計の変更による、過剰に多数のケーブルの中央防護チューブへの設置	熱抵抗体（heating resistors）導入後のより困難なメンテナンス作業	中：作業時間、労働力の追加
加熱キャニスタ表面への温度センサー固定の不具合	温度制御の不正確さによる過熱とシステムへの熱パルス	高：影響する性能全体の試験、データ喪失
湿度センサーの設置スケジュールの欠陥	Vaisala 社製センサーの寸法と構造による設計変更	中：作業時間、労働力の追加
人工的加水システムによる水の分布の遅れと不均一性	膨潤圧の不均一な増加により、チューブとノズルが自動補正できるよう設計できない	小：追加的準備の必要

(3) フランスにおける取組状況

1) 基本情報

フランスの処分概念等に関する基本情報を表 2.1-6 に示す。また、処分場の概念図および廃棄物パッケージの定置イメージを図 2.1-5 に示す。フランスの処分対象廃棄物はガラス固化体であり、地下 500m の粘土層内に処分施設を建設する。処分場の設置許可申請は 2019 年に予定されている。

表 2.1-6　フランスの地層処分における基本情報

項目	フランスのける処分事業の概要
候補岩種 処分深度（計画）	堆積岩 約 400～450m
地下研究施設	ビュール地下研究所
処分対象廃棄物	使用済燃料、ガラス固化体
事業進捗状況	○　1991 年;放射性廃棄物管理研究法（可逆性のある地層処分方法）の制定 ○　2000 年;ビュール地下研究所建設開始 ○　2010 年;地下施設展開区域（ZIRA、約 30 km^2）の決定 ○　2019 年;処分場の設置許可申請予定（2030 年頃処分開始予定）
処分概念	ビュール地下研究所で調査している粘土層での処分概念では、地下 500m の粘土層内に処分坑道を建設し、多重バリアシステムによって廃棄物を隔離する。 ● 廃棄物パッケージ（放射性廃棄物とそれを収容するキャニスタなどにより構成） ● 人工構築物（処分孔および立坑の密封、横坑の埋め戻しなどに使用する構成要素） ● 母岩（サイトの地質学的環境特性）
処分場構成要素	○　廃棄物パッケージ ○　セル（粘土層内に水平上又はわずかな傾斜で掘削された球形型若しくは卵型の地下掘削部分） ● スリーブ（セルの内側に設置される、廃棄体容器・緩衝体・閉鎖プラグ・遮蔽壁を収納する鋼製の管） ● 充填材（スリーブの外側と掘削された粘土岩の間を充填するために用いられる材料） ● ZFC（掘削影響領域） ● ZFD（ZFC 外側の掘削による未損傷領域） ● 閉鎖プラグ ● 埋め戻し材 ● シール材（立坑シール材、斜坑シール材、横坑シール材）

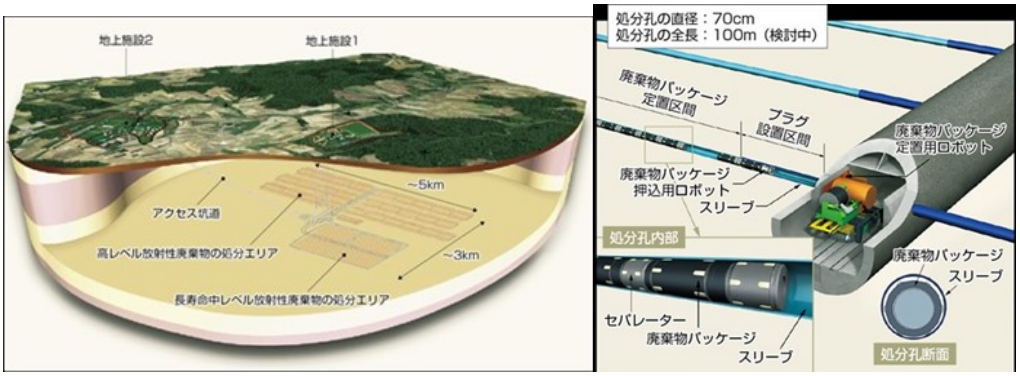


図 2.1-5　処分場の概念図（左）、廃棄物パッケージの定置イメージ（右）

2)　性能確認プログラムに対する規制要件、考え方、全体取組み

地層処分に関する規制文書（ASN, 2008）から性能確認に関する内容を抽出して表 2.1-7 に示す。

表 2.1-7　性能確認プログラムに対する規制要件、考え方

目的	・操業段階における施設の安全性への寄与 ・処分施設およ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、およびこの変遷の原因となる主要現象を追跡調査すること ・施設の管理、操業および可逆性のために必要な要素をもたらす
時期 （計画／実施）	・実施の必要性は、処分システムの設計時から考慮すべきである。 ・施設・モニタリングプログラムは、処分用構造物の建設期間中および施設の閉鎖時点まで実施（場合によっては閉鎖後も実施する項目の可能性を示唆）
場所	・地下研究所での調査の目標は、実証によって構造物設置の工業的実現可能性を示す、こととされている。
内容	・安全機能に寄与するとみなされる処分システムの構成要素のそれぞれ（オーバーパック、人工構築物、母岩）、並びに、その全体性能の安全性にとって有利な特性の確認。
方法	・使用される手段は、処分の安全性レベルを低下させるものであってはならない。

3)　プログラム策定の戦略・体系

実施主体である ANDRA が Cigeo（Centre industriel de stockage géologique、フランスにおける処分プロジェクトの名称）と称されるプロジェクトに関して示されている処分場開発段階を図 2.1-6 に示す。Cigeo の継続期間は下記の三つのフェーズに分けられる。

【初期設計および初期建設フェーズ】

初期の建設フェーズでモニタリングの対象となるパラメータは、建設許認可の申請が行われるまでには確定する予定であり、現時点では確定されていない。

【操業フェーズ（この中にはパイロット操業フェーズも含まれる）】

操業フェーズおよび通常操業期間にわたって実施されるモニタリングプログラムの対象は、構造物の設計および挙動に関するパラメータが含まれる。

- カロボ - オックスフォーディアン層の重要な諸特性に関するもの
- 閉鎖後安全評価のインプットとなるもの（例えば透水性や力学的な挙動）
- 処分場に隣接する特性に関する検証は、今後、パイロット操業フェーズに実施されるモニタリングプログラムに統合される。

【閉鎖後フェーズ】

閉鎖後モニタリングの正確な目的および継続期間は、現時点では決定していない。

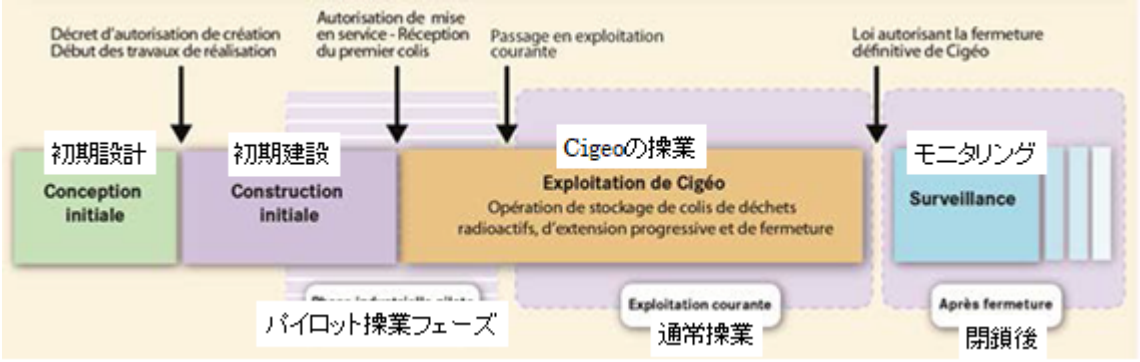


図 2.1-6　Cigeo の継続期間を構成する主要フェーズを示すダイヤグラム
（ANDRA, 2016a；2016b）

4) 方法論

(a)製造･施工プロセス管理手法

調査結果として、品質管理や性能確認に関する具体的な方法論に関する情報は把握できていない。但し、地下構成要素に関する不確実性（および対応策）として、以下のような事項が認識されており（ANDRA, 2016b）、将来の品質管理や性能確認では、これらの事項の発生の有無などが把握できる方法（或いは、そのような事象が発生しないような製造・施工プロセス管理）が具体化されることが想定される。

- HLWセルのスリーブの外側の充填材（現時点での知見や対策）
  - これまでの試験と技術的知識に基づき、HLWスリーブの外表面に使用される充填材物質は酸性過渡状態の緩衝に有効であると考えられている。
  - 充填材物質に著しい不均一性が見られる状況は、HLWセル内の全ての処分容器が早期にその耐漏えい性を失う「What-if」シナリオによってカバーされている。
- 横坑埋戻し材（現段階での知見や対策）
  - 粘土埋め戻し材に関して現時点で利用可能な知識と、掘削された粘土岩盤に関してこれまでに入手されたデータにより、埋め戻し材を横坑の空間全体を充填し、横坑周囲の損傷を受けた粘土岩領域の連続的な等価多孔質媒体として充填することが可能となっている。
  - 保守的な設定にするため、移行特性も化学的な保持特性も割り当てられていない。
- シール材（現段階での知見や対策）
  - 操業経験のフィードバック、特に実験および地上の実証施設で得られたフィードバックに基づき、建設作業に起因するシール材の機能不全が発生する見込みは著しく低いと考えられる。
  - したがってこの状況は「What-if」シナリオで取り扱われ、このシナリオにより、(i) 指定外物質を設置した後に、あるいは予想外の進展の結果として、粘土コアの膨潤機能が失われるケースと、(ii) 膨潤粘土/粘土岩境界面の何らかの欠陥が生じたケースの2ケースがカバーされる。

5) 性能確認プログラム実践に向けて現時点で認識されている課題

ANDRA の Cigeo では、設備仕様（例えば、バリア材質）は今後決定されるため、品質保証の明確な方策は今後検討される。一方、モニタリングに関しては、パイロット操業期間を対象とした原位置でのモニタリング方法について検討が進められている。

(4) スイスにおける取組状況

1) 基本情報

スイスにおける処分概念等の基本情報を表 2.1-8 に示す。また、処分場とキャニスタの定置の概念図を図 2.1-7 に示す。スイスの候補サイトは堆積岩（オパリナス粘土）であり、処分対象廃棄物は使用済燃料およびガラス固化体である。処分対象廃棄物である使用済燃料やガラス固化体はキャニスタ（炭素鋼）に封入され、坑道内のベントナイトブロック製の台座の上に横置きで定置し、周りの空間は粒状化したベントナイトで充填される。

表 2.1-8　スイスの地層処分に関する基本情報

項目		スイスにおける処分事業の概要
処分サイト	候補岩種	堆積岩「オパリナス粘土」
	処分深度（計画）	深さ 400～900 m
事業進捗状況		● 2000 年;EKRA（放射性廃棄物の処分概念に関する専門家グループ）が「監視付き長期地層処分」概念を提案 ● 2005 年;「監視付き長期地層処分」の方針が法律で明確化 ● 2011 年;三つの地質学的候補エリアを連邦政府が承認し、サイト選定の第 1 段階終了 ● 2018 年;連邦評議会は、ジュラ東部、チューリッヒ北東部、北部レゲレンをサイト選定第 3 段階に進む候補とした ● 2060 年頃;処分開始予定
処分対象廃棄物		使用済燃料（8,995 m^3）、ガラス固化体（398 m^3）
処分概念		● 監視付き長期地層処分概念（monitored geological disposal） ● SF、HLW、L/ILW を併置 ● 主施設、試験区域、パイロット施設、ニアフィールド・環境モニタリングプログラムのための坑道も含めた各システムコンポーネントを連絡するための坑道システムで構成される。 ● 使用済燃料またはガラス固化体をキャニスタ（炭素鋼）に封入し、坑道内のベントナイトブロック製の台座の上に横置きで定置して、周りの空間は粒状化したベントナイトで埋め戻す ● スイス北部の地下に分布する堆積岩「オパリナス粘土」を母岩とする地層（深さ 400～900 m）の場所に設置することを検討している。オパリナス粘土は、約 1 億 8,000 万年前のジュラ紀に形成された堆積岩の一種。 ● スイスでは「監視付き長期地層処分」概念に基づく処分場で処分する方針で、このため、地下には、高レベル放射性廃棄物の処分エリア、長寿命中レベル放射性廃棄物の処分エリアに加えて、パイロット施設が設けられる。
処分場構成要素		①キャニスタ　②埋め戻し材　③中間シール材 ※坑道には鋼製支保の使用を想定。

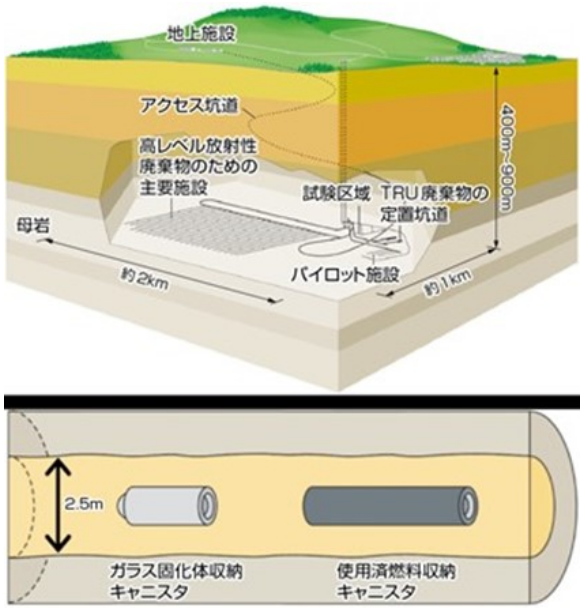


図 2.1-7　処分場とキャニスタ定置の概念図

2) 性能確認プログラムに対する規制要件、考え方、全体取組み

スイスの品質保証に関する規制文書（ENSI, 2009）から規制要件抽出し、「品質保証プログラムに関する要件」および「ニアフィールド構成要素に対する法規制要件」を表 2.1-9 に、「モニタリングを含む性能確認に関する要件」を表 2.1-10 にそれぞれ整理した。

表 2.1-9　スイスの規制機関文書における整理結果（その 1）

整理項目		記載内容
品質保証プログラムに関する要件		● 地層処分場の設計、作業に関して、国際的に受け入れられている基準に対応した品質マネジメント計画を作成し、適用するとともに、その実施に関する文書化しなければならない。 ● 人工バリアおよび天然バリアの機能並びにロバスト性に関する記述。バリアシステムの放射能閉じ込め能力は、計算によって評価すべきである。
ニアフィールド構成要素に対する法規制要件	人工バリア	● 放射性核種の閉じ込めに寄与する地層処分場の人工的な構成部分
	設計時の要件	● 発熱性廃棄物から生じる熱による影響に加えて、人工バリアと天然バリアの間の相互作用に留意 ● 人工バリアを含む処分場施設の設計に当たっては、廃棄物や天然バリアとの物理的および化学的な相互作用に留意
	施工時の要件	● 埋め戻し、シーリングのいずれも長期安全要件の遵守を要求 ● 廃棄物の定置直後に埋め戻し、シーリングを実施
		● 地下施設の建設は、水の侵入を可能な限り防止できる方法によって実施し、水の侵入を防止できない場合には、操業安全性および長期安全性の確保のため、操業段階での措置、また必要に応じて建設技術面での措置を計画すること
	性能確認（実証）	● 埋め戻し材の充填や空洞および坑道のシール方法は、試験区域での実証を求めている

表 2.1-10　スイスの規制機関文書における整理結果（その 2）

整理項目		記載内容
モニタリングを含む性能確認に関する要件	目的	● 「監視」とは、長期間にわたって連続的または定期的に繰り返してある特性について観察すること、あるいはある特性値の測定を継続すること、あるいはそのような観察および測定活動全体。 ● 「安全性の実証」とは、操業段階期間中における施設の通常操業および事故影響に関する体系的且つ包括的な分析
	時期（計画／実施）	● 地層処分場の操業段階には、定置作業、モニタリング期間および閉鎖が含まれる。 ● 地下構造物は、処分場の閉鎖まで、維持管理し、地下構造物の安定性を監視
	場所	● 地層処分場には、主処分施設、パイロット施設、試験区域が含まれる（原子力令第 64 条）。 ● パイロット施設とは、独立した、主施設から分離した地層処分場の部分であって、廃棄物、埋め戻し材および母岩の挙動がモニタリング期間の終了までモニタされるものをいう。 ● 「試験区域」とは、セーフティケースの裏付けを得るために母岩または人工バリアの安全性に関係する特性に関する詳細な調査を実行し、安全性に関係する技術を試験し、その機能・能力を実証するために用いられる、地層処分場の独立した部分。 ● パイロット施設では、モニタリング期間が終わるまで、廃棄物、埋め戻し材および母岩の挙動を監視しなければならない。 ● パイロット施設に定置される廃棄体には、主施設のインベントリを代表するものが選択される。
	内容	● 地下構造物の安定性を監視しなければならない。 ● パイロット施設での監視の際は、閉鎖を考慮に入れて、セーフティケースの裏付けを目的としたデータを収集しなければならない（原子力令第 66 条第 1 項） ● 地下サイト特性調査の延長として、地層処分場の地下構造物の周囲を取り囲む地質学的環境を、その閉鎖時まで監視しなければならない。この監視には、とりわけ水文地質学的な特性、水の組成、安全性に関連する母岩パラメータおよび空洞部分の形状を含まなければならない。 ● パイロット施設の監視プログラムでは、次に挙げる情報が入手できるよう、パイロット施設およびその地質学的な周辺環境の変遷を考慮に入れなければならない。 a) パイロット施設とその地質学的な周辺環境における安全性に関連する状態およびプロセスについての情報。 b) 想定を超えた変遷が生じた場合に、その早期認識に関する情報。 c) バリアシステムの機能に関する情報。 d) セーフティケースの裏付けとなる情報。
	方法	● 地層処分場の監視および維持管理を容易に行えるようにするために、あるいは廃棄物の回収のために準備措置を講じる場合、その準備措置が処分場の受動的安全性を損なうものであってはならない（原子力令第 11 条第 2 項第 c 号）。 ● パイロット施設は、原子力令第 66 条第 3 項に基づいて設計し、監視のために必要な計器類を設置しなければならない。 ● 監視は、受動的な安全バリアを損なうものであってはならない。 ● 監視プログラムは、定期的にその適格性の検証を実施しなければならない。

3)　プログラム策定の戦略・体系

スイスでは、処分場に関する地上および地下における信頼性の高いモニタリングを実現するために、処分場モニタリング概念の開発（場合によっては、詳細な方法および手法を開発）を行っている（NAGRA, 2016）。開発すべき最初のモニタリング概念には以下が包含される。

- 初期状態に関するモニタリング（ベースライン・モニタリング）
- 地下特性調査施設へのアクセス坑道や施設建設期間中のモニタリング
- パイロット施設に関するモニタリング

今後 NAGRA で予定される試験プログラムを表 2.1-11 に示す。

表 2.1-11　HLW 処分場に関する地下特性調査施設で実施される可能性のある試験プログラム

期間	説明	この時間枠における実験プログラム
2032－2037 年	地下特性調査施設の建設開始。探査立坑から始められる。	● 岩盤特性調査プログラムの開始
2035 年－	サービスエリアおよび施設の建設と最初の実験の開始。	● 関連性の高い母岩特性とこれらの特性の空間的なばらつきに関する特性調査の拡大 ● 閉鎖後安全性の観点から行われる性能確認。その例としてガス移送能力試験、自己シール性負荷試験、拡散試験などが挙げられる。 ● モニタリング
2038－2048 年	施設の建設完了と処分場建設許可（提出は 2045 年の予定）のための試験の第 2 シリーズの開始。	● 関連性の高い母岩特性とこれらの特性の空間的なばらつきに関する特性調査の拡大 ● 坑道/空洞の建設(坑道掘削(MB: Mine-By))および支保の確認 ● 閉鎖後安全性の観点からの性能確認：自己シール性負荷試験：MB、ヒーター試験 ● シーリング構成要素の性能確認 ● シール建設の実現可能性の実証 ● モニタリング
2044－2059 年	実験の継続と、新規実証実験の実施。処分場操業許可（提出は 2056 年の予定）を想定した形で行われる。	● 定置および回収の実証 ● モニタリング ● 操業安全性の観点から行われる緊急措置の試験 ● 上述した実験を継続および/又は完了させること

4)　方法論

(a)建設、操業段階の原位置モニタリング方法

モニタリング活動は、モニタリング期間を通じて地上から実施される（例えば、環境コンパートメントにおける放射性核種濃度の測定､ボーリング調査における状態変数の連続的な測定、など)。さらに地下のパイロット施設では、代表的な量・質の廃棄物を埋設した場合の埋め戻し材および周辺母岩が示す挙動に関するモニタリングが､モニタリング期間終了まで実施される。また、閉鎖を念頭に置いた閉鎖後の安全性を確認・実証するためのデータが収集される。

ベースライン・モニタリングは、詳細サイト調査とともに開始され、建設活動（坑道、立坑の建設）が始まる前に集中的に実施される。ピエゾメータと長期的なモニタリング・システムを備えた深層ボーリング孔ネットワークが展開され、指定された時間間隔で、水源および/または地下水から採取された水サンプルの分析が行われる。また規制当局の指示に従い、気象学的測定と放射線測定プログラムが実施される。

(b)製造･施工プロセス管理手法

材料調達、製造、施工の各プロセスに対して適切な品質保証や検査を実施する。

5)　性能確認プログラム実践に向けて現時点で認識されている課題

本調査対象においては関連する情報はみられなかった。

(5) カナダにおける取組状況

1) 基本情報

カナダの処分概念等の基本情報を表 2.1-12 に示す。また、処分場の概念図を図 2.1-8 に示す。カナダの候補サイトはまだ特定されていないが、カナダ楯状地の結晶質岩、もしくはオルドビスの堆積岩であり、処分対象廃棄物は CANDU 炉からの使用済燃料である。使用済燃料は、耐食性のある処分容器に封入され、定置区画まで搬送された後、垂直または水平の処分孔内に定置されベントナイトにより埋め戻される。カナダの放射性廃棄物に関する長期管理アプローチは、適応性のある段階的管理（APM：Adaptive Phased Management）と呼ばれている。

表 2.1-12　カナダの地層処分に関する基本情報

項目	カナダにおける処分事業の概要
候補岩種 処分深度（計画）	カナダ盾状地の結晶質岩もしくはオルドビス紀の堆積岩が考えられている
	約 500 m
地下研究施設	2010 年閉鎖
処分対象廃棄物	使用済燃料（CANDU 炉から、約 520 万体）
事業進捗状況	● サイト選定中（2023 年までに最も好ましい 1 地点を選定する予定） ● 2043 年操業開始を目指す
処分概念	処分実施主体であるカナダ核燃料廃棄物管理機関（NWMO）は、処分場の候補岩種・処分深度・処分場の規模などの具体的な処分場設計を決定していないが、2010 年 5 月に公表したサイト選定プロセスの最終案を示した報告書『連携して進む：カナダの使用済燃料の地層処分場選定プロセス』では、地層処分場を約 500 m の深さの場所に設置することを想定している。使用済燃料は、処分場で耐食性のある処分容器に封入される。容器は定置区画まで搬送された後、岩盤に掘削された垂直または水平の処分孔内に定置され、ベントナイトにより埋め戻される。
処分場構成要素	UFC（使用済燃料コンテナ）、緩衝材（バッファボックス）、埋め戻し材（ベントナイト）、遮断壁（低熱高性能コンクリート(LHHP プラグ)、閉鎖材（グラウト、アスファルト、ギャップフィル）

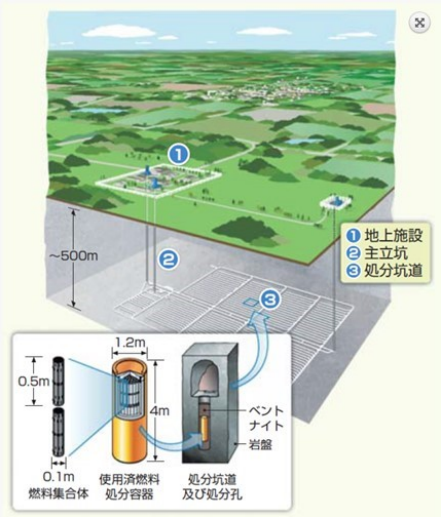


図 2.1-8　カナダにおける処分場の概念図

2) 性能確認プログラムに対する規制要件、考え方、全体取組み

カナダの地層処分に関する品質保証については、下記文書を対象とした調査を行った。

・ CNSC: Assessing the Long Term Safety of Radioactive Waste Management, Regulatory

document REGDOC-2.11-1, Volume II, (2018).（CNSC, 2018）

CNSC（2018）より、カナダの規制要件について、「品質保証プログラムに関する要件」、「ニアフィールド構成要素に対する法規制要件」、「モニタリングを含む性能確認に関する要件」の三つの視点から整理して表 2.1-13 にまとめた。

表 2.1-13　カナダの規制機関文書における整理結果

整理項目		記載内容
品質保証プログラムに関する要件		● システムがその完全性と確実性を維持できることを実証すべきである。これは、多重の人工バリアの適切な設計、または好ましいサイト特性、あるいはその両方によって達成される。セーフティケースでは、システムの全体の頑健性に寄与する構成要素の相互的な役割を説明すべきである。 ● システム記述においては、サイト特性と廃棄物管理システム設計のどちらも記述すべきである。廃棄物管理システムおよびその構成要素が機能する様式は、安全性と環境の防護がどのように達成されることになるかの明瞭な理解を提供するのに十分な詳細度で記述されるべきである。そのシステム記述は、管理される廃棄物の種類、および採用される管理システム（即ち、工学的な閉じ込めバリアと自然隔離バリアを組み合わせて使用する地表または地中における処分または貯蔵）の記述も含むべきである。 ● 許認可ライフサイクルの初期においては、廃棄物管理システムについて、その性能を予測するのに十分な詳細度で記述するために、設計仕様書、廃棄物受入基準、汎用または標準データ、および仮定に依存することが必要なことがある。 ● 施設の開発の後期では、施工完了時の情報と操業データを、評価目的に合わせてシステムモデルを改良するために使用すべきである。
ニアフィールド構成要素に対する法規制要件	人工バリア	○ 下記が含まれるとされている（但し、地層処分以外の形態も含まれている）。 ● 廃棄物コンテナ ● 緩衝材 ● 埋め戻し材 ● ライナ ● カバー ● reactive barriers ● 閉じ込め構造物（containment structures） ● 透過性境界（pervious surrounds）など
	人工バリアの機能	● 人工バリアを含む多重バリアに基づき、頑健性を有する設計によって、廃棄物の閉じ込めが達成される。
	設計時の要件	● すべての適用要件を満足するように最適化すべき ● 長期安全性が確保されることを保証する一定の裕度をもって規制限度以下となるようにすべき
モニタリングを含む性能確認に関する要件		モニタリング（特に閉鎖前）に関する記載はみられない。

3)　プログラム策定の戦略・体系

品質保証／品質管理手順は、データの完全性と正確性を確保するために、モニタリングプログラムを開発して実施される。収集された情報に対して高い信頼性を確保するためのプログラムには、特に以下の手段が含まれる。

- 試料の採取、保存、保管、取扱い、および出荷、そして原位置でのサンプリングのための標準的な手順の厳格な遵守
- トラベルブランクとフィールドブランクおよび重複サンプルの提出を含む、フィールド品

質管理プログラム

- 実験室での分析のための品質管理プログラムの実施
- 関心のある分野（潜在的影響を含む）を特定するための分析結果のタイムリーなレビュー

4) 方法論

(a) 製造、施工プロセス管理手法

APM セーフティケースプロジェクト品質計画（PQP: Project Quality Plan）は、堆積岩における使用済燃料の処分場概念設計および閉鎖後安全評価に対して適用される。この APM セーフティケース PQP は、ISO 9001:2008 を満たしている。

品質管理プログラムは、堆積岩プロジェクトにおける使用済燃料処分場概念設計および閉鎖後安全性評価の準備を担当する全ての組織単位に適用される。このプログラムは、以下のプロセスにより実行される。

- 有資格者による質の高い、効果的な方法で活動が実施されていることを保証するための管理と責任を規定する管理文書から成る管理システム
- 管理システムを実行し、従うための個々の説明責任
- プロジェクトのスコープ、作業の内訳、責任、およびコントロールを明らかにする特定のAPMセーフティケースのプロジェクト実施計画
- 継続的な改善プロセスによるプログラム要素の評価と強化

(b) 建設、操業段階の原位置モニタリング方法

建設段階、操業段階においては長期テスト、長期モニタリング、および長期実証実験が実施される。それぞれの実施内容は以下の通りである。

- 長期テスト：長期拡散など
- 長期モニタリング： 水圧、温度、地下水化学、岩盤の変形/変位
- 長期実証試験：加熱された（空の）使用済燃料コンテナ（UFC：Used Fuel Container）とベントナイトシーリングシステムの実地性能、アクティブなUFCの定置と長期評価、専用機器によるUFC/バッファボックスの修復、立坑および坑道シールの性能

モニタリングパラメータは、リスクベースでの処分場変遷シナリオを考慮して、ランク付けされ、次にそれらのシナリオに関連する FEP が調査される。モニタリングされるパラメータのリスト（NWMO, 2012）を表 2.1-14 に示す。

表 2.1-14　モニタリングパラメータのリスト

パラメータ	媒体/場所	測定方法/※コメント
温度	キャニスタ表面	リモートセンシング方法とモデリング、デモンストレーション施設で監視することはより実用的 ※容器表面温度は腐食プロセスに影響を及ぼし、人工バリア性能に影響を与える可能性がある
温度	人工バリア	リモートセンシング方法、しかしデモンストレーション施設で監視することはより実用的 ※容器表面に近い温度は、長期的なバッファー性能にとって重要
飽和度（saturation）	人工バリア	従来のプローブと従来の技術とワイヤレス読み出し技術を組み合わせて測定 ※飽和レベルは全圧と容器の腐食様式の両方を決定する
全圧力（total pressure）	人工バリア	ワイヤレス出力読み出し機能付き全圧セル ※飽和時の全圧が人工バリア性能を決定する
飽和度	処分坑道 (placement room)	緩衝材について前に示したように測定することができる。 この場合、電源と信号伝送ケーブルを使用することができる ※モニタリング期間延長の重要なパラメータ
温度	ニアフィールド岩盤	リモートセンシング方法 ※リポジトリ全体の岩石温度は、その進化を評価し、モデル予測を確認するために重要
応力分布	ニアフィールド岩盤	計装ボアホール内の応力セル ※応力変化は、トンネルの安定性とリポジトリのパフォーマンスにおける重要な要素となる
バルクヘッドの変形（隔壁変位）	処分坑道 コンクリートバルクヘッド	伸縮計またはレーザースキャニングシステムを使用してモニターすることができる ※preclosure 中は重要
水圧	貯留層と隣接する岩体を通る特定の断面	リポジトリ内と周辺テストボアホールネットワーク内の両方におけるピエゾメータネットワーク（レポジトリ＝処分場） ※地下水流動体制の変化を監視
温度	隣接する岩体とファーフィールド	サーミスタまたは熱電対 ※岩石温度は、地球圏の進化を評価し、他の測定パラメータの温度補正にも重要
機械的ストレス	処分場全体および隣接する岩体	リポジトリ内と周辺テストボアホール内のセンサーネットワーク
微少地震活動	処分場全体および隣接する岩体	ジオフォンネットワーク ※地球圏と人工バリアの進化の監視におけるいくつかの応用
飽和度	処分坑道 ベントナイトクレイシール	異なる種類のプローブを使用して直接測定した場合、無線読み取りが必要になる場合があります ※シールが予測どおりに機能することを確認する完全飽和は、岩石の透水性に応じてさまざまな時間スケールで達成される
全圧力	処分坑道 クレーシール	ピエゾメータと関連データロガー ※密閉粘土シールの最終的な合計圧力がシールの有効性を決定する
変位	処分坑道 バルクヘッド	位置センサー ※シールの完全性を確認するのに役立つ
水圧	処分場に隣接する岩体内	処分場の周辺岩体に設けられたボーリング孔内のセンサーネットワークによる長期間モニタリング ※水圧プロファイルは地下水流動体制の構成を確認するのに役立つ

短期および長期の安全性のために実施される潜在的な実験的、実証的および定期的なモニタリングプログラムの例（抜粋）を表 2.1-15 に示す。

表 2.1-15　潜在的な実験的、実証的および定期的なモニタリングプログラムの例
（NWMO, 2016）

プログラム	場所	期間（Duration)
岩盤特性		
・掘削時の地質マッピング、・熱特性テスト、・原位置の岩盤応力状態の測定 ・変位モニタリング（地下開口部）、・地震モニタリング ・地球物理学的モニタリング	立坑、試験坑道（test rooms)、周辺坑道	イニシャル全体 建設（いくつかのテストは操業中も継続）
岩盤力学試験		
・3D モデリングをサポートするための 3 次元応力実験 ・大規模強度試験（剥離およびスケーリング） ・時間と温度に依存する挙動を決定するためのクリープ試験 ・地下空間での EDZ 実験	試験坑道、周辺坑道	トンネル掘削中および初期の建設および操業中
水文地質学実験		
・岩盤および破砕帯のパッカー水圧試験（検出された場合） ・検出された破砕帯における水力干渉およびトレーサ輸送実験 ・水圧のモニタリング	試験坑道や周辺坑道からのボーリング孔	初期の建設と操業を通して
地球化学実験		
・長期拡散、・放射性核種の保持、・微生物実験 ・地下水化学のモニタリング、・マトリックス間隙水による地球化学	試験坑道や周辺坑道からのボーリング孔	初期の建設と操業を通して数年
掘削および採掘工学		
・EDZ を最小限に抑えるために削孔と発破のテクニックを最適化する ・配置スペースの最適なジオメトリ/レイアウト、・長期の岩盤支保性能 ・隔壁性能（LHHP コンクリートとベントナイト隔壁シールとの相互作用を含む）、・床と壁（掘削面）の平滑化実験、・グラウト実験	試験坑道	初期の建設の最初数年間に重点的に
定置および回収装置のデモンストレーション		
・放射線遮蔽およびベントナイトシーリングシステム ・特殊機器を使用した UFC /バッファボックスの配置 ・専用機器を使用した UFC /バッファボックスの回収 UFC：Used-fuel Container、UFC buffer box:FUC 周りの矩形状の buffer box	試験坑道	初期の建設と操業を通して
長期の本格的なデモンストレーション		
・計装および監視機器 ・長期腐食試験、・加熱された（空の）UFC、ベントナイトシーリングシステムおよび近距離の岩石および地下水の性能、・UFC の配置と長期評価 ・専用機器による UFC /バッファボックスの回収、・立坑、坑道、試験坑道シール	試験坑道	初期の建設と操業を通して

5) 性能確認プログラム実践に向けて現時点で認識されている課題

現時点において、モニタリングに関する懸念事項として、下記が挙げられている（NWMO, 2016）。

- モニタリング用のボアホール或いは他のモニタリング活動によって、予期しない有害な影響を及ぼす可能性がある。（例えば、ボアホールの存在が忘れられた場合、放射性物質移行ができる新しい経路が生成される可能性など。）
- 制度的管理の喪失や変化などの理由によりモニタリング期間が延長され、最終閉鎖の決定ができなくなる可能性がある。
- 信頼できないモニタリングの結果が、不適切な行動につながる可能性がある。

(6) 共同研究（DOPAS、MoDeRn、Modern2020）

1) DOPAS プロジェクト

DOPAS プロジェクトは、“プラグおよびシールのフルスケール実証（full-scale Demonstration Of Plugs And Seals）”の略称であり、EURATOM（欧州原子力共同体 : European Atomic Energy Community's）による第 7 次フレームワークプログラムの一環として、2012 年～2016 年に実施された欧州国際共同研究である。

DOPAS プロジェクトでは、まず参加各国で計画されている処分プログラムにおける概念設計で想定されているプラグおよびシール数の調査や各国ニーズなどを踏まえ、各国のプラグおよびシールに期待する機能や概念設計を実証するための試験が実施された。DOPAS プロジェクトにおいて、プラグおよびシール材のモニタリングが実施され、プラグおよびシール材性能の予測モデルに基づき、一例として温度、全圧および間隙圧、歪みおよび変位、相対湿度および水分のモニタリングデータの必要性が示唆された。

一連の検討を踏まえ、プロジェクトを通じて行われた議論および得られた知見は、表 2.1-16 の通りとされている。

表 2.1-16　DOPAS プロジェクトにより行われた議論および得られた知見

項目	プロジェクトにより行われた議論および得られた知見など
プラグおよびシールのモニタリング	・プラグおよびシールの性能に関する適切なモニタリング技術の有無 ・プラグおよびシールのモニタリングに関する課題の抽出
プラグおよびシールの性能	・プラグおよびシールの性能に関する詳細要件に対する実証方法
プラグおよびシールの設計とそれらの機能の遵守	・現行のプラグおよびシールの設計が、包括的かつ安全性の観点での機能を満足するための考慮すべき事項 ・安全評価およびセーフティケースに対するプラグおよびシールの概念設計並びに設計基準との関連性
プラグおよびシール建設およびフルスケール実証におけるプロジェクト管理	・プラグおよびシールの施工管理、フルスケール試験および処分場操業に関して得られた知見
プラグおよびシールに関する知見の普及と統合	・DOPAS プロジェクトに関する普及活動の実施 ・DOPAS プロジェクトで採用されたアプローチの今後の適用
プラグおよびシールに関する技術レベルの把握と残された課題	・設計以前のプラグおよびシールの試験を含む更なる開発の必要性

2) MoDeRn、Modern2020

MoDeRn および Modern2020 の調査結果から、地層処分におけるモニタリングの思想や手法、各国の取組状況などをまとめた。表 2.1-17 に MoDeRn および Modern2020 プロジェクトの概要を示す。

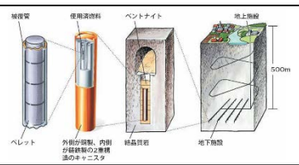
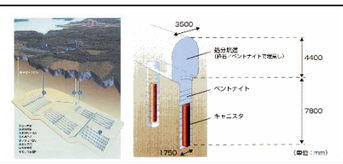
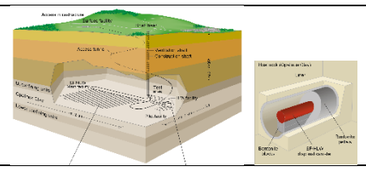
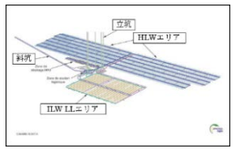
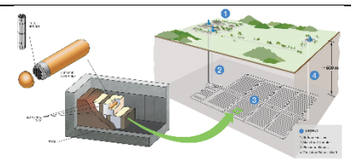
表 2.1-17 MoDeRn および Modern2020 プロジェクトの概要

項目	MoDeRn （MoDeRn, 2013；2014）	Modern2020 （MODERN2020, 2017a；2017b；2018）
プロジェクトの目的	○各国の具体的な処分場モニタリングプログラムの開発を支援するための基準点を提供するために、処分場モニタリングに関するアプローチ、技術およびステークホルダの見解に関する共同体としての理解を構築し、文書化すること。 ● モニタリングの目的および戦略の考察並びに処分場モニタリングプログラムの設計および実施に関するガイダンスの策定 ● 処分場をモニターする能力を強化する革新的なモニタリング技術の開発および実証 ● ケーススタディの実施 ● 地層処分におけるモニタリングの役割についての公衆ステークホルダの見解の理解向上 ○処分場のモニタリング、特にニアフィールドのモニタリングに焦点を合わせた。	○個々の国のプログラムの要件を考慮に入れて、有効かつ効率的な処分場操業モニタリングプログラムを策定・実施するための手段を提供すること ○意思決定の支援のためおよび閉鎖後セーフティケースに対する信頼醸成の強化のために、（定置後短期間のプロセスのモニタリングによる処分場現況の検証を含めて）操業期間における処分場および処分場ニアフィールドのモニタリングを行うことに主な焦点を置く。
プロジェクトの結論	○地層処分の段階的実施におけるモニタリングの役割に関する理解を深めるために、特にWMO に対して、彼らのモニタリングプログラムの開発並びにそうしたプログラムが全体的処分プロセスの一環としてどのように実施および利用され得るかの理解に役立つ可能性のある事例、ガイダンスおよび勧告を提供する目的が、以下に示す活動を通して達成された。 ● モニタリングプログラムの開発および実施のためのジェネリックな構造化アプローチを提供する“MoDeRn モニタリング・ワークフロー”、並びに、さまざまな背景状況（コンテクスト）においてモニタリングをどのように実施できるかに関する説明および事例を提供する“MoDeRn リファレンス・フレームワーク”の開発 ● モニタリング技術に関する理解の向上および研究・技術的開発（RTD）の実施、WMO にとって利用可能なモニタリング技術の範囲の拡大、並びに、これらの技術の適用可能範囲の評価 ● 特定のプログラム目標に対処するためにどのようにして統合的な処分場モニタリングプログラムを開発できるのかを示す、例証的なモニタリングプログラムの記述 ● 処分場モニタリングプログラムの枠内でのステークホルダの潜在的役割の評価、および、処分場モニタリングに関するステークホルダの見解が各国の処分場モニタリングプログラムの開発に及ぼす影響の検討	○Modern2020 プロジェクトにおいて、2019 年 3 月までに完成された報告書における主な結論は以下の通り。 ● モニタリングは、信頼醸成を目的とするその他の方法と共に、閉鎖後セーフティケースに組み込まれるべきである。 ● 全ての事柄をモニタリングするべきだというわけではない。パイロット施設、代表的なモニタリング場所、特別なモニタリング・セルなどのアプローチが可能である。 ● モニタリングによってバリア機能が損なわれるべきではない。例としては、バリア内にセンサーを設置せず品質管理に依存することや、地中無線を使用したモニタリングなどが挙げられる。 ● 公衆ステークホルダや規制組織との関与は、モニタリング計画の開発期間全体にわたり、反復的に行われるべきである。 ● モニタリングは「傲慢から謙虚へ」移行するためのツールとみなすことができる。様々な知識ベースや関心を持つ多様なステークホルダを巻き込んだ思慮深い議論が、適切なバランスを見つけるために役立つ。科学者が全てを知っているわけではないため、謙虚な技術が求められる。 ● モニタリング機器の信頼性および適格性の確認については、次に示すプロセスが検討されている。すなわち、i）構成機器の選定、ii）ラボ施設での適格性確認、iii）モックアップ施設での適格性確認、iv)サイト内での適格性確認である。 ● 適格性確認手続きには、ロバスト性試験、エイジング試験および現場試験が含まれる。

(7) まとめ

前項までに調査した諸外国の調査結果を要約し、表 2.1-18 に示す。

表 2.1-18　調査対象国の品質保証／性能確認プログラムに関する考え方の整理

項目		スウェーデン	フィンランド	スイス	フランス	カナダ
基本情報	地質環境	結晶岩質	結晶質岩	オパリナス粘土	堆積岩（粘土）	結晶質岩
	処分概念					
	人工バリア構成	キャニスタ／緩衝材／埋戻材／閉鎖材	キャニスタ／緩衝材／埋戻材／閉鎖材	キャニスタ／緩衝材（ベントナイトブロック・ベントナイト埋戻し材）／シール材（中間・最終）	キャニスタ/緩衝体/閉鎖プラグ/充填材/埋戻材/シール材	廃棄物コンテナ／緩衝材／埋め戻し材（ベントナイト）／遮断壁（低熱高性能コンクリート(LHHP プラグ）／密封材（グラウト、アスファルト、ギャップフィル）
性能確認プログラムに対する規制要件、考え方、全体取組み	品質保証	(SSMFS, 2008)第 1 条の注釈によれば、処分場の許可保有者は、(SSMFS,2008)の規定に基づいた品質保証、安全レビュー、安全プログラム、および定期安全審査の要件を満たすために講じられる措置が、閉鎖後安全性に関しても十分であることを確実にすべきであるとされている。	STUK の規制ガイダンス(STUK, 2013)で、キャニスタの定置およびそれら周囲の緩衝材の設置、定置領域の埋戻しが許容できる方法で行われることを確実にするために、品質管理文書をレビューする旨を規定している。	(ENSI, 2009)によれば、地層処分場の設計、作業に関して、国際的に受け入れられている基準に対応した品質マネジメント計画を作成し、適用するとともに、その実施に関する文書化しなければならないとされている。また、人工バリアおよび天然バリアの機能並びにロバスト性に関する記述。バリアシステムの放射能閉じ込め能力は、計算によって評価すべきである。	(ASN, 2008)の安全指針により、人工構造物の設計および品質は、処分の安全性の基礎となるため、これらの要素が基本目標に合致していることの確認を必要とされている。それらの確認方法としては放射線影響および化学的影響の評価を要求している。	地層処分システムがその完全性と確実性を維持できることを実証することが要求されている。
	性能確認	(SSMFS,2008)第 8 条およびその注釈より、廃棄体などに対するモニタリングなどの措置は、それらの措置が安全性に与える影響を解析し、措置が処分場の安全性に少しまたは無視できるほどの影響しかないこと、あるいは措置が講じられなかった場合に比べ、措置が安全性の改善をもたらすことを示すこととされている。	STUK の規制ガイダンス(STUK, 2013)で、建設・操業段階における、調査、試験、モニタリングプログラムの実行を規定しており、その中に人工バリア挙動に関するモニタリングが含まれている。	(ENSI, 2009)§5.2.3 では、埋め戻し材の充填や空洞および坑道のシール方法は、試験区域での実証を求めている。 地層処分場には、主処分施設、パイロット施設、試験区域が含まれ（原子力令第 64 条）、パイロット施設では、モニタリング期間が終わるまで、廃棄物、埋め戻し材および母岩の挙動を監視しなければならない。パイロット施設での監視の際は、閉鎖を考慮に入れて、セーフティケースの裏付けを目的としたデータを収集しなければならない（原子力令第 66 条第 1 項）。	(ASN,2008)の安全指針により、モニタリングは操業段階における施設の安全性への寄与、および処分施設およ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およびこの変遷の原因となる主要現象を追跡調査することを目的としている。加えて、それらの現象が予期されていたものであり、管理下に置かれ続けているものを示すことができなければならないとされている。	モニタリング（特に閉鎖前）に関する記載はみられない。
プログラム策定の戦略	基本的な考え方	最終的に処分された廃棄体の人工バリア（キャニスタ、緩衝材、埋戻材）のモニタリングは、人工バリアの安全機能を損なう為、予定していない	初期段階で求められる要件を満たしているかを検査により確認。 その後の変遷をモニタリングにより確認。 実処分場のモニタリング実施については検討中。	三つのモニタリング概念を開発 ・初期状態のベースライン、モニタリング ・地下特性調査施設へのアクセス坑道や施設自体の建設期間中のモニタリング ・パイロット施設のモニタリング計画	ANDRA においては、パイロット段階を設定し、能動的なモニタリングを実施する予定ではあるが、詳細は今後検討される。	適応性のある段階的管理(APM: Adaptive Phased Management)アプローチを実施。深地層処分場における使用済核燃料のモニタリングは、APM の一つの重要な特徴であり、以下の機能を持つ。 ・処分場の長期的な安全性能を確認すること ・将来の決定に必要な情報を提供すること

2.1.2　施工プロセス管理手法の構築に資する海外実証研究動向の調査

前節に示した性能確認プログラムでは、構築する処分システムの品質管理や品質保証の取り組みの一部として、地下処分施設の原位置とは異なる場所でのモニタリングや地上や地下研究施設等での事前の施工プロセスの確認や認証といった補完的な取り組みが想定されている。

ここでは、製造･施工プロセス管理手法（事前の認証方法を含む）の具体化に資する技術情報の整備に向けて、諸外国における先行的な取り組みの事例、或いはそれに類似する地下施設での実証的な研究開発の取り組みの動向を調査した。以下に、本年度の調査の対象としたスウェーデンについて、同国の処分概念（特に本事業が着目するシーリングシステムの設計）等の基本情報を整理したうえで、これまでに実施された実規模の実証試験等に関する情報を整理する。

(1) SKB の処分概念

KBS-3V と称される処分概念は、結晶質母岩中に鋳鉄製インサートを有する銅製処分容器(canister)に収納された使用済燃料を処分するための建設許可の申請において、SKB によって提案されている。閉鎖後の安全原則(The post-closure safety principles)は、深部で安定した地質環境を選択し、人工バリア（処分容器、緩衝材(buffer)、埋め戻し(backfill)、閉鎖(closure)）と岩盤(host rock)で構成される多重バリアシステムを採用することによる放射性廃棄物の隔離と封じ込めに基づいている。処分場はストックホルムから北へ 100 キロほど離れた Östhammar 自治体の Forsmark サイトが選ばれ、良好な結晶質の岩で処分深度は地表から 470 m の深さである。SKB では、図 2.1-9 に示すように竪置き方式の KBS-3V と横置き方式の KBS-3V が検討されており、その詳細は文献（SKB, 2010b）にまとめられている。

KBS-3 では、処分容器による放射性核種の物理的封じ込めに高い信頼が置かれているのに対して、緩衝材および処分坑道の埋め戻しの重要な機能は処分容器を保護することにある。また、処分坑道のプラグの主な役割は、埋め戻された処分坑道を他のエリアでの操業から隔離することにあり、頑丈なドーム型のコンクリート製プラグを使用することで達成されるとしている。処分容器は水平方向の処分坑道の下の、事前に圧縮されたベントナイト緩衝材ブロックを含む、垂直方向の大口径の処分孔に配置され、処分坑道をベントナイトブロックとペレットで埋め戻し、処分坑道のプラグで閉じられる。

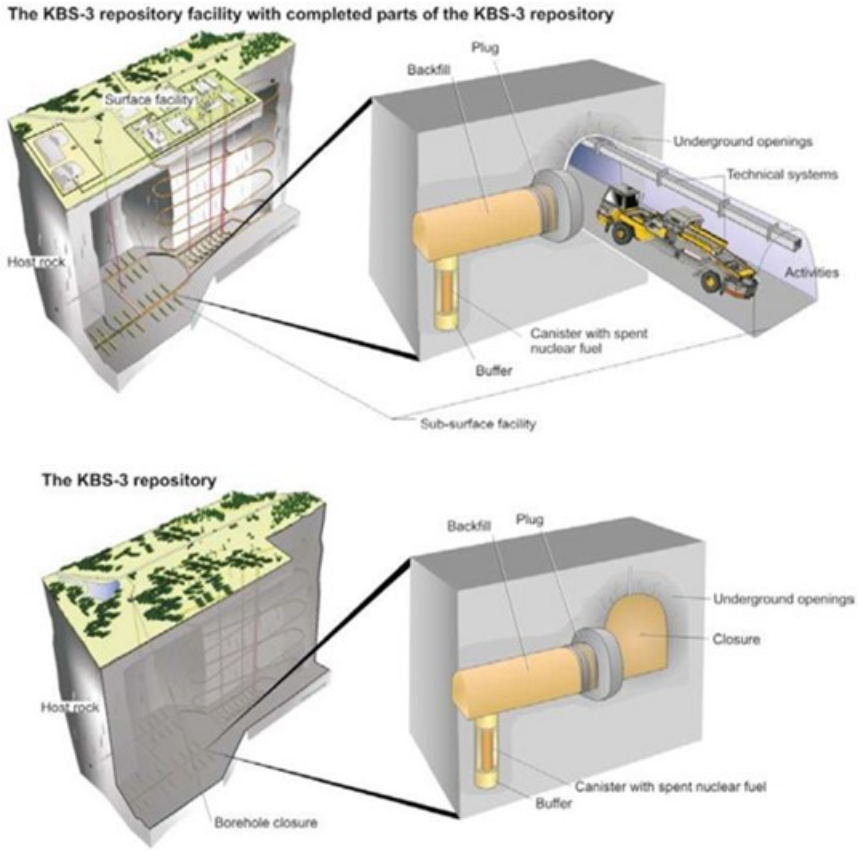


図 2.1-9　KBS-3V と KBS-3H の概念図（SKB, 2010b)

(2) シーリングのシステム構成（埋め戻しとプラグ）

1) 埋め戻し（backfill）

埋め戻しの主な要件は、処分坑道内の水の流れ（移流輸送）を制限することである。埋め戻し内の移流物質移動を制限する必要性は、主に地下水の潜在的に有害な物質から緩衝材と処分容器を保護する必要性と処分容器内の放射性核種の封じ込めが破られた場合の放射性核種放出を遅らせる必要性から生じる。放射性核種は緩衝材を通して移動するとした場合、透水係数の目標値 K ＜ 10^{-10} m/s は、埋め戻しを通る移流輸送を制限することを保証する限界である。動水勾配が小さいと推定される場合には、0.1 MPa の膨潤圧力目標を処分坑道内のすべての点で満足させる必要があり、閉鎖後の一般的な条件下でのパイピング（piping channels）の自己シール能力および処分場の飽和を保証する。これらの目標は、閉鎖終了後および飽和状態の処分場に適用され、最初は不均質な埋め戻しにおいてこれらの値に達するために、埋め戻しのための技術的設計要件として 1 MPa の平均膨潤圧が設定されている。

2) プラグ（plugs）

処分坑道のプラグの機能は操業上の活動に関連しているため、プラグシステムの設計耐用年数は 100 年に設定されている。プラグの機能は以下の通りである。

- 埋め戻しを処分坑道に閉じ込める。
- 埋め戻しの飽和をサポートする。
- ベントナイトイン緩衝材および埋め戻し材の有害な浸食を引き起こす可能性がある水流に対するバリアを提供する。

・　処分坑道および処分坑道からの空気および蒸気の輸送に対する障壁を設ける。

(3) これまでに実施された実規模試験

エスポ岩盤研究所（Aspö HRL）で実施された実規模試験は埋め戻しおよびプラグの開発にとって重要であり、SKB では Dumplu 試験より以前に二つの実規模試験が行われている。

1) Backfill and plug test (BAPT)

Backfill and Plug Test は、Aspö HRL（Äspö Hard Rock Laboratory）で 1999 年に開始された実規模試験（図 2.1-10）であり、主な目的は次のとおりである。

- 発破掘削されたトンネルの埋め戻しのための異なる材料と締固め技術の開発と試験
- 発破掘削されたトンネル内で埋め戻しの機能と周囲の岩石との相互作用をテストする
- トンネルプラグを築くための技術を開発し、機能をテストする。

試験は三つの試験領域に分けられ、内側部分は砕石と 30%ベントナイトの混合物を含む埋め戻しで埋められた領域、外側部分は砕石の埋め戻しで埋められた（ベントナイトを含まない）領域、プラグ部分は厚さ 3 m のプラグである。

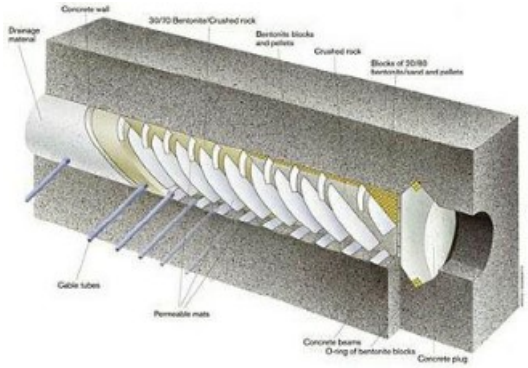


図 2.1-10　BAPT における埋め戻し、プラグ試験の概要
(Gunnarsson et al. 2001a)

2) Prototype repository プロジェクト.

Aspö HRL では、2001 年－2003 年にスウェーデンの核廃棄物処理の概念（KBS-3V）の本格的なテストが開始され、二つのセクションで構成された Prototype Repository プロジェクトが行われた（図 2.1-11）。セクション I（内部側）は、四つの実物大の処分孔、電気ヒーターを備えた銅製処分容器、ブロックとペレットからなるベントナイト緩衝材、そしてコンクリートプラグで閉鎖されたベントナイトと砕石の混合物で埋め尽くされた処分坑道からなる。セクション II（プラグ側）は、埋め戻した処分坑道セクションを備えた二つの実物大処分孔からなり、端部はコンクリート製プラグである。外側部分は解体されているが、内側部分はまだ実験中である。

Prototype Repository の二つのギャラリー（Section I、Section II）はそれぞれプラグで閉じられ、右側には鉄筋コンクリート製ドームプラグの断面とコンクリート梁の擁壁がある。

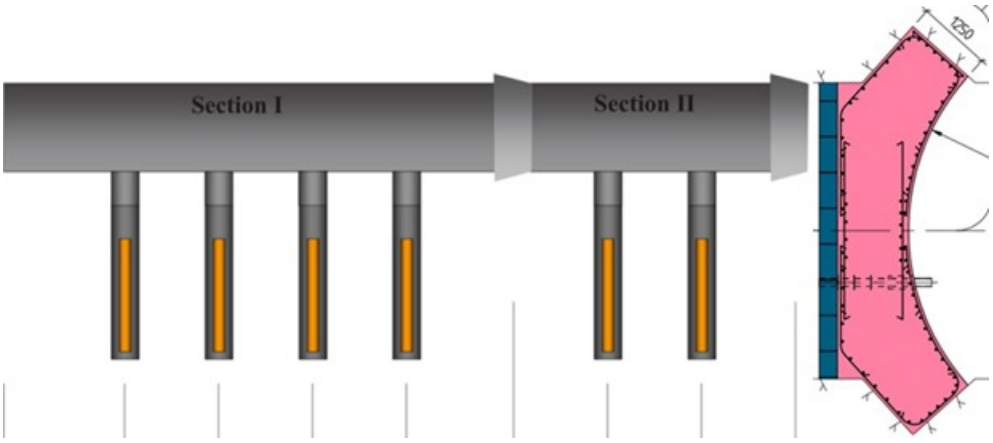


図 2.1-11　Prototype Repository プロジェクトの施設概要
（Svemar et al, 2016）

(4) Domplu プロジェクト

1) 概要と目的

DOPAS（The Full-Scale Demonstration Of Plugs And Seals）プロジェクトは、Euratom Seventh Framework によって共同出資された欧州委員会（EC）の作業プログラムで、プロジェクトは 2012 年 9 月から 2016 年 8 月の間に実施され、SKB は ÄspöHRL で Domplu 試験に参加した。

Domplu 試験は、SKB の処分場設計における処分坑道プラグのリファレンスとしての実規模試験で、処分坑道プラグの性能における不確実性を、およびプラグの初期状態（すなわち、プラグまたはシールのすべての構成要素が構築されたときのプラグの状態）における不確実性を減少させることを目的としている（Grahm et al., 2015 ; Malm, 2014）。処分坑道プラグの設計基準の強化に加えて、Domplu 試験に関連した特定の目標を以下に示す。

- リファレンスデザインの詳細を確定する
- プラグ施工の実現可能性を実証する
- 建設方法に関する要件を検証する。
- 実際の条件下でプラグが意図したとおりに機能することを実証する（参照設計全圧 7MPa まで）
- 漏れ測定のための方法を開発し、それを使用してプラグを横切る漏れ速度を決定する
- 操業中の試験と品質管理を改善する

実規模試験に用いるプラグシステムの概略構造を図 2.1-12 に示す。

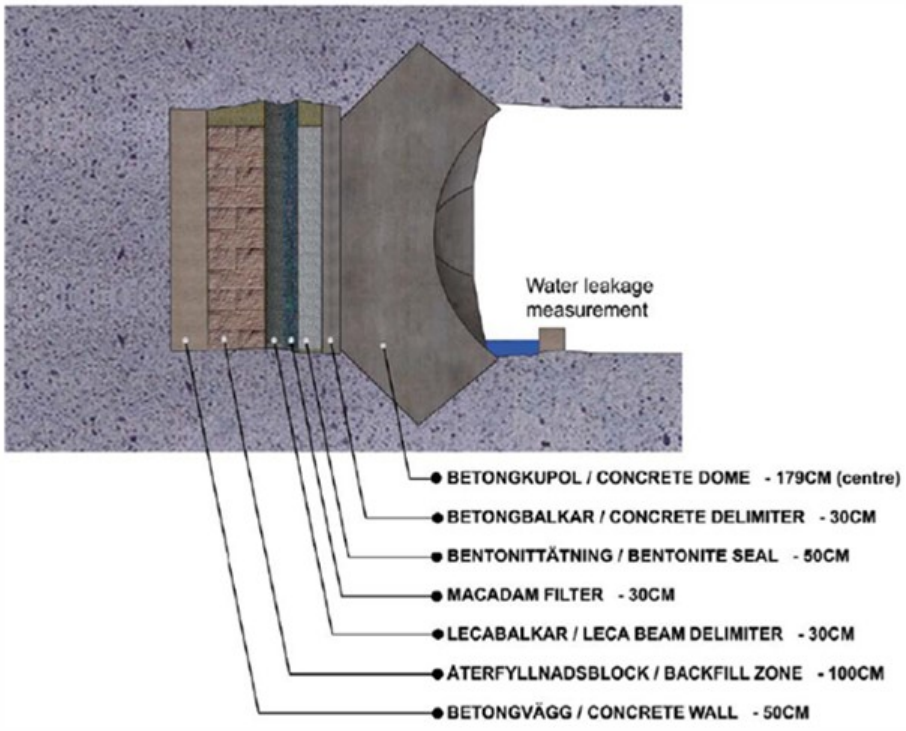


図 2.1-12　Domplu 試験の概略図

2)　試験場所および掘削方法

Domplu 試験は、Äspö HRL の深度 450 m の坑道内で行われた。坑道のレイアウトと試験場の位置を図 2.1-13 に示す。図中に主応力方向と水を含む構造物の主方向が示されている。

実験場所の掘削は発破掘削によって行われている。図 2.1-14 に掘削後の試験位置の状況と高度寸法を示すが、発破孔の跡がきれいに残っている。また、プラグの切り欠き部はワイヤーソーで掘削されている（図 2.1-15 参照）。坑道の試験位置の坑道壁面および切り欠き部を坑道内から 3D スキャナーで撮影し、3D 可視化画像を図 2.1-16 に示す。同図は坑道の外側からみたように加工されている。

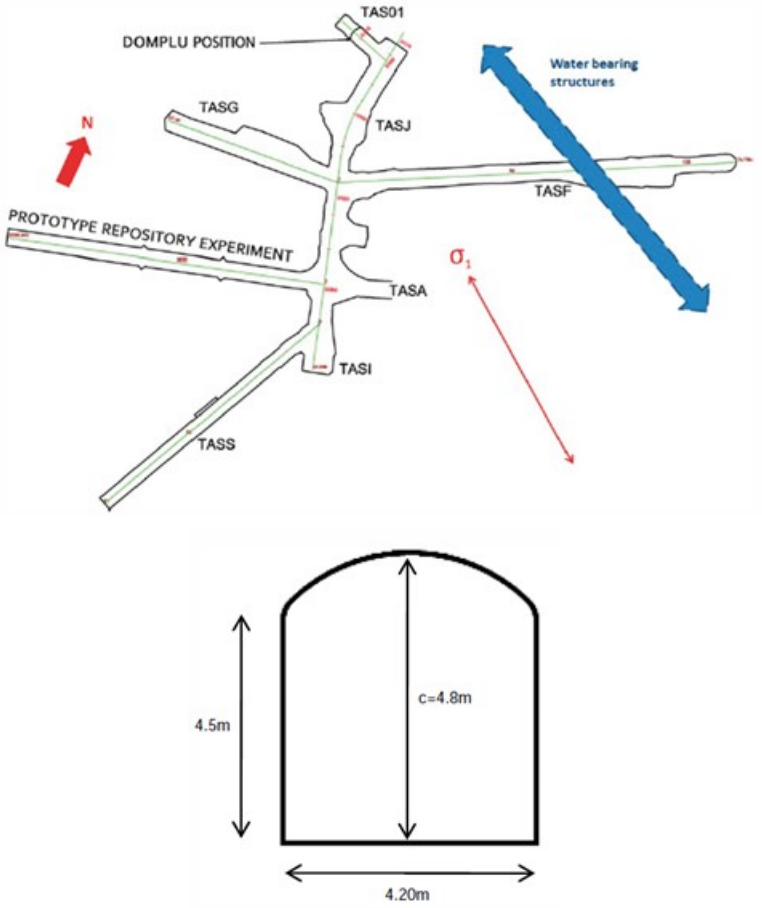
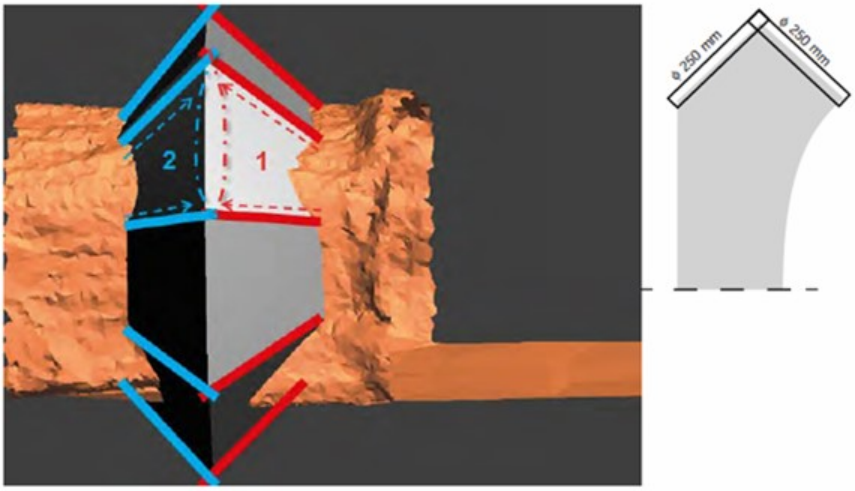


図 2.1-13　Domplu 試験の試験位置および坑道寸法

図 2.1-14　掘削が完了した試験位置（測量中の状況）



（Φ250mm のガイド孔を削孔後、2 孔の間をワイヤーソーで切削する）

図 2.1-15　プラグの切り欠き部分の掘削方法

図 2.1-16　掘削された切り欠き部のレーザースキャニングによる 3D 可視化

3)　プラグの構築

Domplu でのプラグと SKB のリファレンスケースとの主な違いは、SKB ではドーム構造に非強化コンクリート（鉄筋の無い低 pH コンクリート）を使用するが、Domplu では強化コンクリート（鉄筋のある低 pH コンクリート）を使用していることである。

Domplu の実規模試験の結果は、Grahm et al (2015)によって詳細に報告されている。主な結果の一つとして、ドームプラグシステムを構築することが実現可能であることが実証された。これには、物流や平行作業の手配などの実用的な側面の検証が含まれており、設計要件を満たす低 pH コンクリート（B200）で非強化コンクリートドームプラグを構築することが可能であることも示された。水和時にコンクリートドームに誘発される応力を低減し、接触注入後に熱的なプレストレスを引き起こすために、高度な冷却方式が使用されている。表 2.1-19 にプラグに用いたコンクリートの配合（B200）を示す。

表 2.1-19　プラグに用いるコンクリートの配合（B200）

Constituent	Amount (kg/m³)
CEM I 42.5 MH/SR/LA	120
Silica fume (densified)	80
Water	165
Limestone filler L25	369
Sand 0–8 mm (65 % of aggregates)	1037
Gravel 8–16 mm (35 % of aggregates)	558
Glenium 51	6.38
Water/cement	1.375
Water/binder	0.825
Water/powder	0.29

4)　計測方法

(a)　埋め戻し

計測は土圧（全応力）、相対湿度、間隙水圧、変位、変位および温度計測が行われた。図 2.1-17 に埋め戻し材での計器配置を示す。また、埋設した計器を図 2.1-18 に示すが、一般技術として用いられている方法が利用されている。

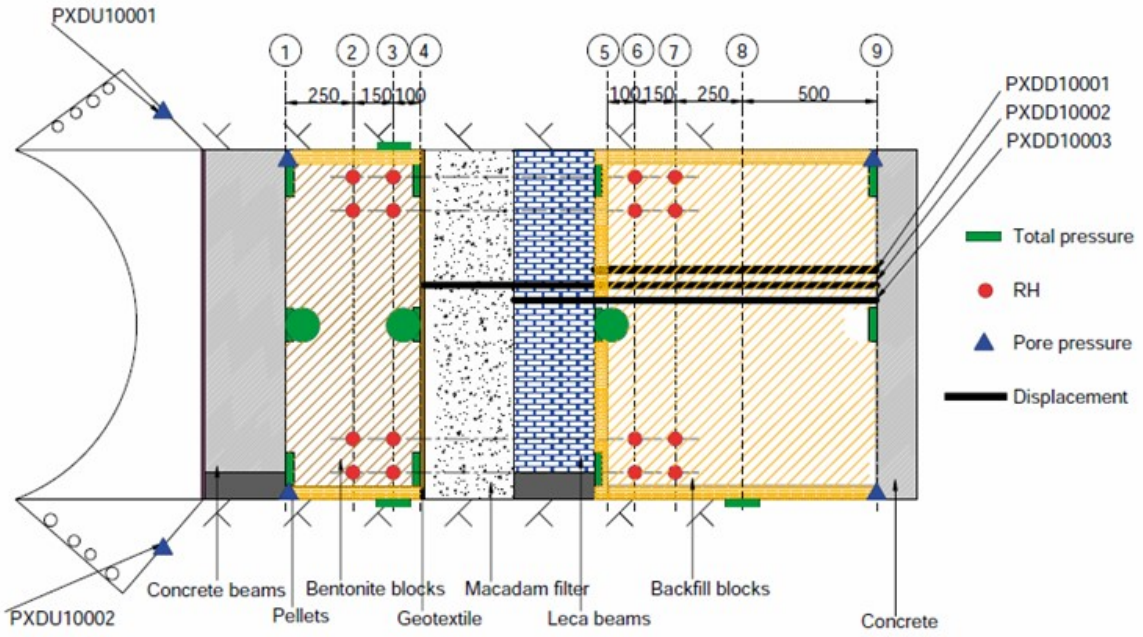
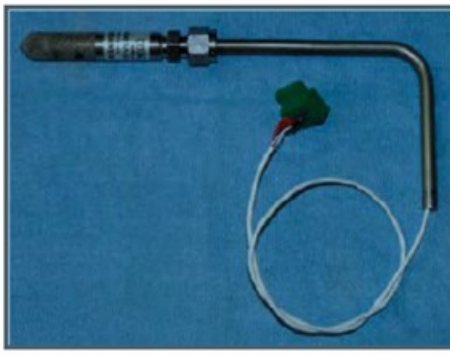


図 2.1-17　ベントナイトシールと埋戻しブロックでの計測位置

(a) 土圧計(Geokon 4800-1x-10 MPa)

(b) 間隙水圧計(Geokon 4500SH-3-10 MPa)



(c) 相対湿度計(Aitemin SHT75 V3)

(d) 変位計(Geokon 4435-1X-50)

図 2.1-18　ベントナイトシール・埋め戻しブロックでの埋設計器

(b)　プラグ

プラグ内外での計測では、ひずみ計（温度測定付き）、継ぎ目計および変位計が設置されている。図 2.1-19 にプラグでの計器配置を示す。また、計器を図 2.1-20 に示すが、プラグでも一般的な技術として用いられている方法が利用されている。

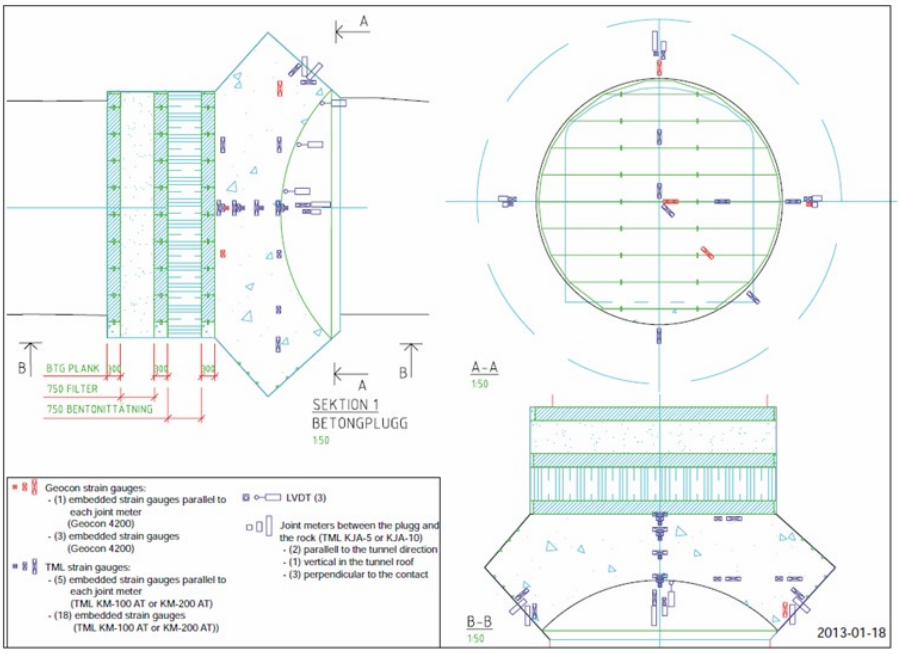


図 2.1-19　コンクリートドーム内のセンサーの配置

(a) 温度・ひずみ計(TML KM-100AT)

(b) 温度・ひずみ計 (Geokon 4200)

(c) 継ぎ目計(TML KJA-10A)

(d) 変位計 (HBM LVDT WA-10)

図 2.1-20　コンクリートプラグでの埋設計器

(c)　試験結果

試験中、部分的に岩のき裂やセンサーの配線を通じた水の漏出に関連した問題があり、当初の計画ではプラグを 7 MPa（70 bar）に加圧する予定であったが、4 MPa（40 bar）での水圧の操作上の限界とし、コンクリートドームへの圧力は 6 ヶ月以上 4 MPa に維持した。2014 年 9 月末までに、プラグを通過する水圧ヘッドが 4 MPa になったときにプラグを通過して測定された漏れ量は 44 ml/分（毎時 2.6 L に相当）で、測定された漏れ率は明らかに時間とともに減少した。

プロジェクトの次の段階は 2015 年から 2018 年にかけて行われた。この段階では、3 年間 4MPa の一定の水圧荷重、すなわちプラグの深さにおけるほぼ最大の水圧をかけたときのプラグの挙動を評価した。 プラグの気密性を測定したところ、漏れ跡がさらに減少し、1 時間あたり 1～2 リットルの間で変動した（17～33 ml /分）。その後、水を排出し、気密試験を行ってプラグの気密性を評価した。 フィルタをヘリウムで満たし、そしてガス圧を連続的に記録しそしてプラグの下流の漏れを追跡するために探知器を使用した。この試験からの結果により、プラグが気密性の要件を満たしていることを示していると判断されている。

最後の実地試験は、高圧荷重中のコンクリートドームの機械的耐荷力を試験することを目的とした強度試験であった。強度試験では、水圧を一時的に 8.1 MPa に上げた（加えて、コンクリートドームに対して 1.9 MPa までの膨張圧力があった）。 その結果、コンクリートドームは予想通りの挙動を示し、非線形挙動が発生したが、コンクリートドーム内に大きなひび割れや損傷をもたらすことはなかった。

Domplu 試験が実施された ÄspöHRL の岩石条件は、使用済燃料の処分場である Forsmark に見られるほど良くはないが、同程度の過負荷圧力で結晶質岩石の同じ深さで実施され、処分坑道プラグのシステム設計段階は成功した。Domplu 試験は、処分坑道プラグの SKB 基準概念設計に密接に基づいており、 現在の SKB 参照設計と Dumplu 設計は、SKB の将来参照設計として導入される予定の新材料の性能をテストすることを目的としたいくつかの修正を除いてほぼ同じになっている。

プラグ取り付けの実現可能性について、土木工事は一般的に成功しているが、いくつかの課題点も得られている。ワイヤーソーイングによる岩盤切削は実現可能であり、滑らかな表面をもた

らしたが、いくつかのカットに対して平面性において望ましくない凸凹を生じ、岩盤応力がÄspöHRL よりもさらに高くなる Forsmark サイトでの確認が必要である。このほか、試験設備方法、プラグの型枠、コンクリートドームの打設、クーリングやコンタクトグラウトなどの項目について試験成果が検討されている。工法の要件の検証では、コンクリートドームについては、低 pH コンクリートミックス B200 による無筋コンクリートを使用することが可能であることが示された。コンクリートドームは補強材がないため、ひび割れを防ぐために、水和による熱による温度上昇を抑える（クーリング）、コンクリートドームを岩から解放する（切削面の平滑化など）、コンタクトグラウトの前にコンクリートと岩の間に隙間を作るなどが工夫された。

ブラグ挙動のモニタリングでは、コンクリートドームに設置されたほとんど全てのセンサーが機能し、キャストから数時間後から、キャスト後約 3 ヶ月に発生したコンクリートドームのグラウト接触点までの挙動を捉えたている。しかし、その後、いくつかのセンサーが故障し、水圧の上昇による故障と考えられている。また、シール、フィルタや埋め戻しのモニタリングでは、水圧を 4MPa に上昇させる間に、予想に即した応答が観察された。

2019 年にドームプラグは解体されており、分析結果などは Malm and Enzell（Malm et al., 2018）により報告されている。

(5) まとめ

モニタリングや品質保証に係る取組を包含した包括的な性能確認プログラムの観点から、主要国（スウェーデン、フィンランド、フランス、スイス、カナダ）における先行的な検討や性能確認プログラムに準じたプログラムの策定に係る動向、および国際共同研究における検討動向を調査した。品質保証については、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。

2.2 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

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一つとして、「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）」を挙げている。つま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。従来の計測手法では、センサーと計測器を通信ケーブルで接続して計測を行うが、センサーと計測器の接続を無線で行う無線伝送技術は通信ケーブルを使用しないため、埋め戻されたバリア等の安全性を損なわずにモニタリングが可能であり、加えて、ケーブル敷設という作業がなくなるためケーブル断線のリスクの回避、労働時間の短縮、作業員の被ばく線量の低減に寄与できることが考えられる。これらの利点を考慮して、平成 21 年度から平成 29 年度において無線伝送の要素技術に関する検討を行った（原環センター、 2010；2011；2012；2013；2014；2015；2016；2017；2018）。

また、原位置計測に用いる計測器やセンサー類の稼働には電力が必要であり、上述した無線伝送技術であっても同様に計測および通信のための電力が必要となる。そのため、電源ケーブルを用いないで電源を供給する方法についても、磁界共振結合方式による無線給電技術を対象として、これまでに実験室レベルでの基礎検討が進められてきた（原環センター、2015；2016；2017；2018）。

他方、例えば光ファイバーをセンサーとして用いる計測では、原位置の計測部に電源を必要とせず、光ファイバーの軸方向の分布的な計測が可能な計測技術であり、近年、その活用の範囲が

広がっている。

本節では、平成 30 年度に実施した、地下環境における無線伝送技術の実証試験、地下環境における無線給電技術の高度化、および光ファイバーセンサーを主体とした新たなセンサー技術に関する開発動向等の調査について報告する。

2.2.1 地下環境における無線伝送技術の実証試験

無線伝送技術の実証では、平成 26 年に原子力機構幌延深地層研究センターの地下研究施設（以下、「幌延 URL」という。）において実施している人工バリア性能確認試験と東濃地科学センターの地下研究施設（以下、「瑞浪 URL」という。）において実施された再冠水試験（平成 29 年終了）を対象に無線伝送システムを設置して原位置での実証試験を行った（原環センター、2014）。このように、地層処分場で利用可能な無線伝送技術については、平成 21 年度より検討が進められ、これまでに個別要素試験や原位置での技術実証が進められてきた。

本年度は、これまでに開発・実証された要素技術について整理を行うとともに、幌延 URL における無線伝送技術の実証試験を継続した。さらに、前者の要素技術に関する整理を踏まえ（それらを基礎として）、地下坑道から地上までの無線伝送システムの具体化に向けて、瑞浪 URL の（深度 500 m）を例題として、システム設計の具体化に関する検討を行った。

(1) 地層処分における無線伝送技術の利用および既往の開発成果

地層処分場で利用可能な地中無線伝送技術の開発は、平成 21 年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発において開始した。まず、作動トランス式センサーおよび振動弦型ひずみセンサーによる計測値を無線送信する小型送信器（耐圧性 10 MPa）、それを受信するボアホール型受信アンテナを開発した（原環センター、2010；2011；2012）。

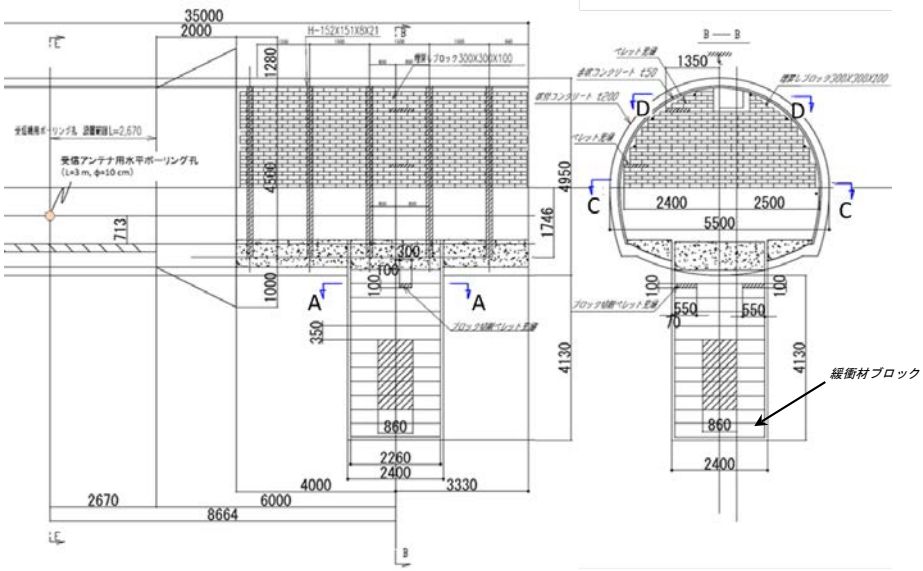
続いて、開発した小型送信器、ボアホール型受信器を幌延 URL での人工バリア性能確認試験、瑞浪 URL での再冠水試験に適用し、長期計測を開始した（原環センター, 2015）。

これと並行して、無線伝送距離を延ばすための中継装置を開発し、通信系統を複数系統構築することにより無線伝送による計測の冗長化を図った（原環センター、2014；2016）。一方、長距離の無線通信に関して、長距離アンテナを試作し、平成 25 年度の幌延 URL での試験（原環センター、2014）、フランス・トゥルミールでの試験（原環センター、2017）が実施されている。

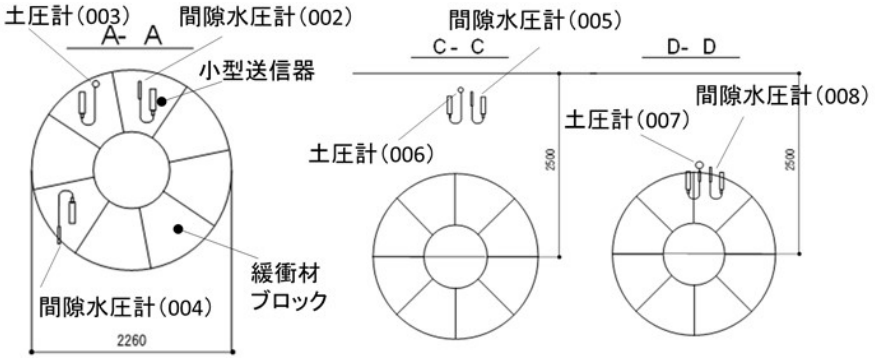
(2) 幌延 URL における無線伝送技術の継続実証

平成 26 年度から、幌延深地層研究センターの地下調査坑道にて、地下環境での無線伝送試験を実施している。計測には小型送信器を接続した間隙水圧計（4 台）と土圧計（3 台）を用い、間隙水圧緩衝材ブロックに 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）、計 7 台設置している。計測位置を図 2.2-1 に示す。装置を設置する緩衝材ブロックには事前に切吹き加工を行い、設置後に装置周辺の空隙部をベントナイト混合土で充填した。埋め戻し材ブロックに設置した装置周辺の空隙部は、装置設置後に埋め戻し材を用いて充填している。

間隙水圧、土圧の計測は 1 日 2 回（0 時、12 時）の間隔で実施し、小型送信器内でデータを保存するとともに、毎週火曜日に保存した計測データを受信装置に無線通信で外部に伝送して、記録した。このとき伝送するデータ量は過去 4 週間分のデータとした。



（全体図）

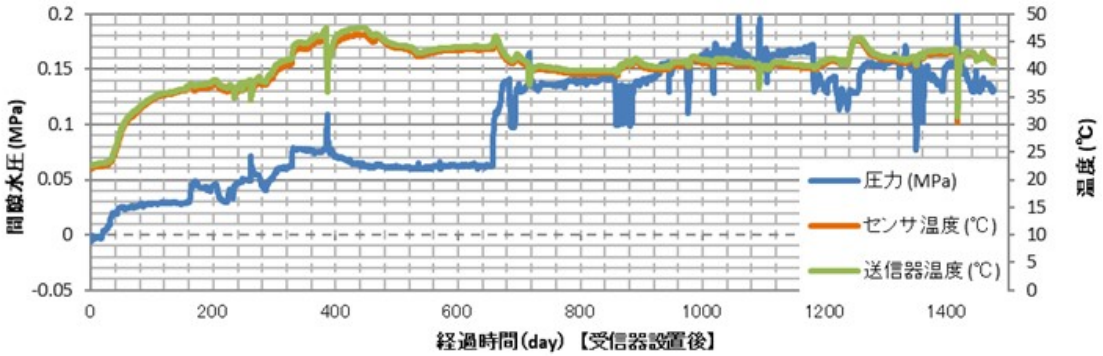


（A-A 断面）　　（C-C 断面および D-D 断面）

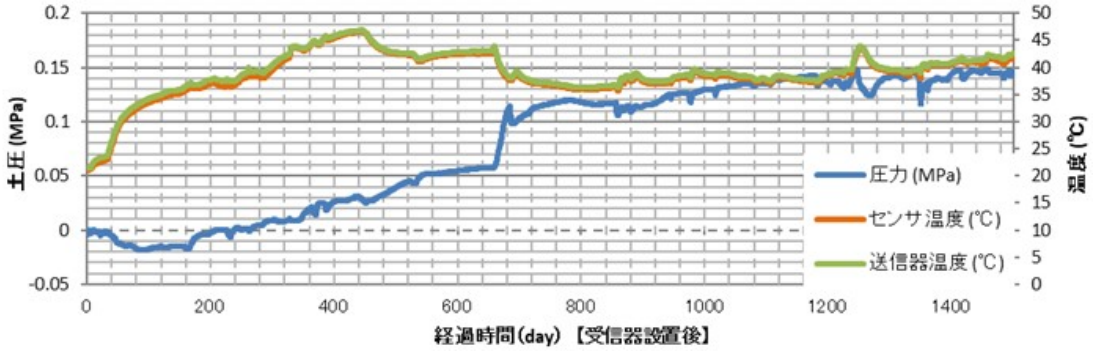
図 2.2-1　幌延 URL での無線伝送による計測位置

平成 26 年 12 月 16 日から平成 31 年 3 月 4 日時点までの約 51 ヶ月間の各センサーの計測値の経時変化のうち、A-A 断面の測定結果を図 2.2-2、C-C および D-D 断面の測定結果を図 2.2-3 に示す。図から、全てのセンサーにおいて継続的にデータが取得できていること、また生データファイルでは、各センサーにおいて、所定の頻度（2 回/日）で計測が行われていることが確認できた。

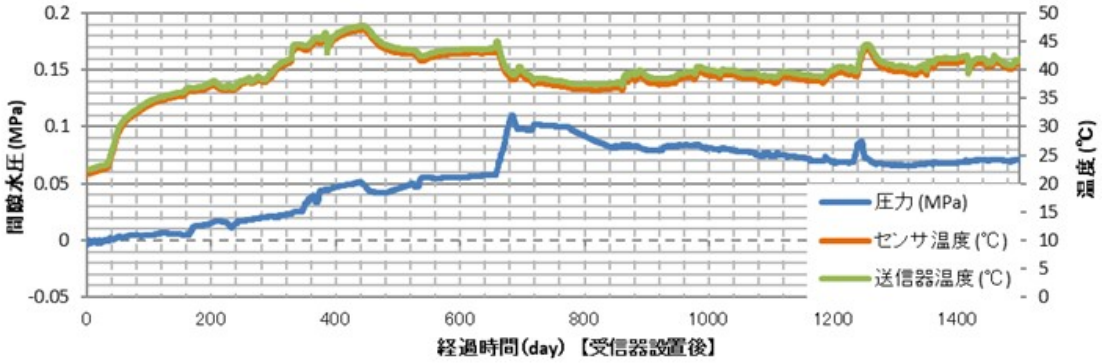
一方で、過去に坑内のノイズレベル上昇に伴うと考えられる通信障害が度々発生した。しかしながら、本システムでは、毎週の定期通信で過去 4 週分のデータを重複して通信しているため、通信障害によるデータ欠損が一時的に生じても、4 週以内に受信ができれば欠損データは自動的に補完される。現在までにデータ欠損はなく、データを重複させた通信を実施する対応策は効果があると考えられる。



(a) 測定 002 局（間隙水圧）【幌延 URL】

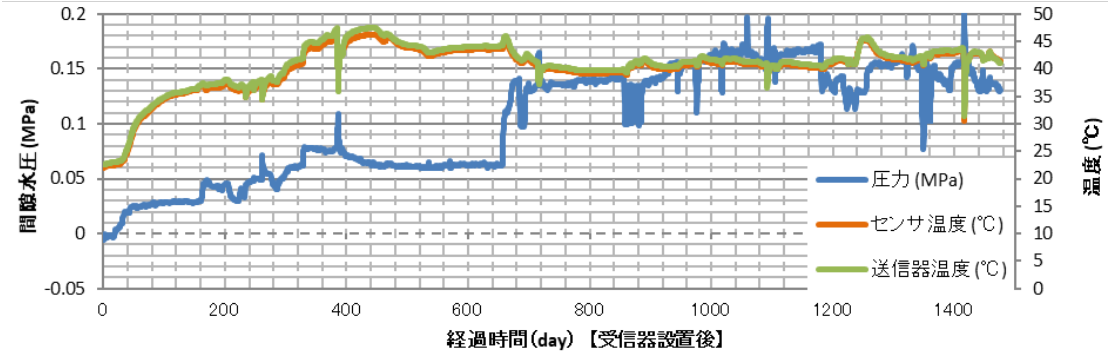


(b) 測定 003 局（土圧）【幌延 URL】

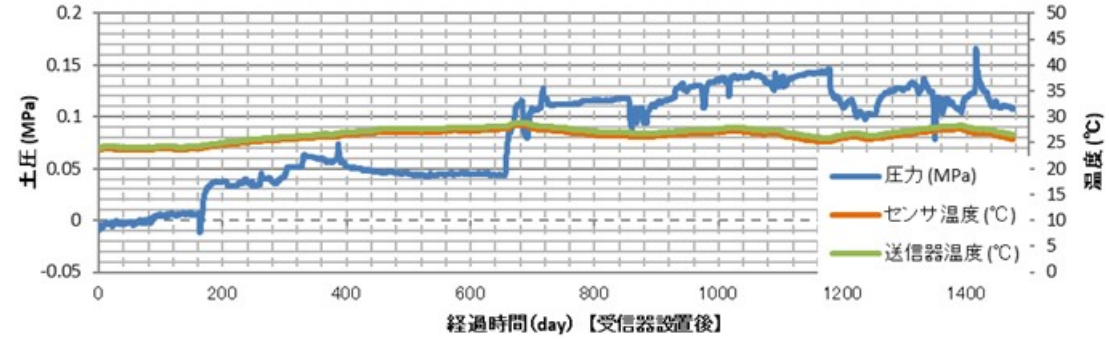


(c) 測定 004 局（間隙水圧）【幌延 URL】

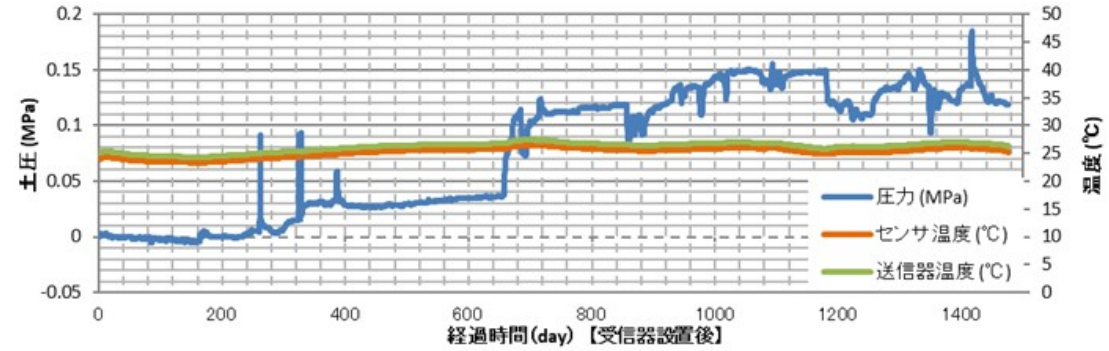
図 2.2-2　測定結果実績（A-A 断面）



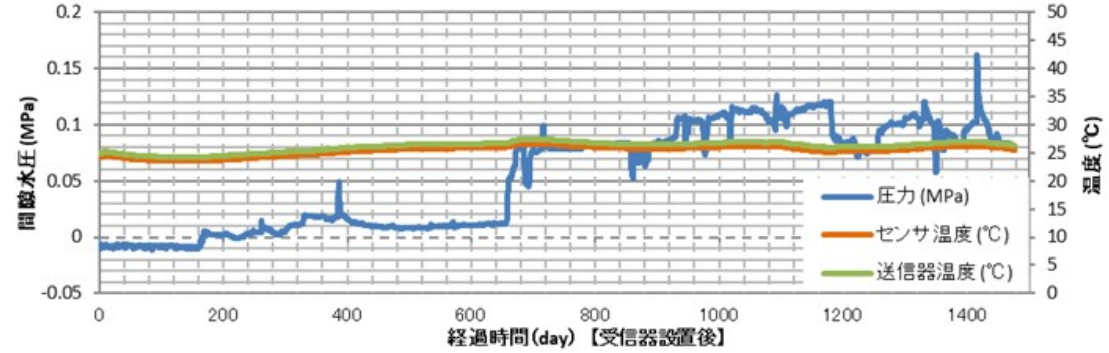
(a) 測定 005 局（間隙水圧）【幌延 URL】



(b) 測定 006 局（間隙水圧）【幌延 URL】



(c) 測定 007 局（土圧）【幌延 URL】



(d) 測定 008 局（間隙水圧）【幌延 URL】

図 2.2-3　測定結果実績（C-C 断面、D-D 断面）

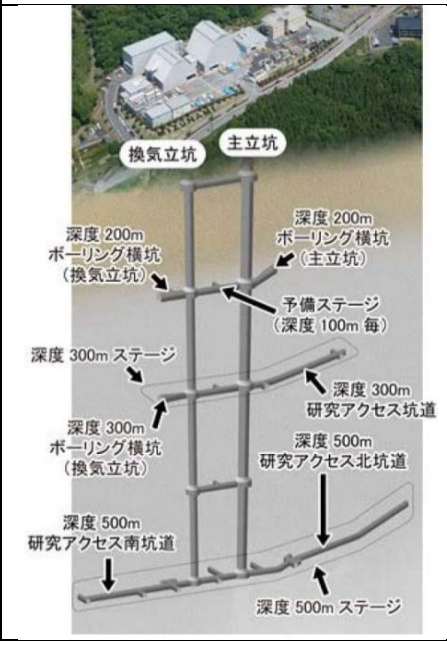
(3) 瑞浪 URL を例題とした無線伝送システムの具体化

1) 無線伝送システムの検討対象とケース

長距離での無線伝送システムを具体化するにあたっては、瑞浪 URL を例題として検討を行った。瑞浪 URL は深度 500m におよぶ立坑と深度 500m 地点に研究アクセス坑道（以下、「水平坑道」という）を有しており、深度 500m 坑道の計測地点から計測結果を地表に地中無線にて 5 年程度伝送することを想定した。瑞浪 URL のレイアウトおよび坑道などの概略寸法、ならびに無線伝送の検討条件を表 2.2-1 に示す。無線伝送システムの検討は深度 500m ステージから地表に至る 4 種類の伝送経路を想定し、以下の 4 ケースとした。

ケース 1（現状の中継装置を利用）
　　既往研究で開発した小型送信装置、中継装置を利用する場合
ケース 2（中継装置の改良/大型アンテナの接続）
　　既往研究で開発した小型送信装置、中継装置に大型の送信アンテナを接続して伝送距離を向上させる場合
ケース 3（長距離伝送）
　　既往研究で開発した小型送信装置、長距離アンテナを用いる場合
ケース 4（ボアホール型受信器を利用した伝送）
　　伝送経路を立坑ではなく、ボーリング孔に設置した装置による経路を利用する場合

表 2.2-1　瑞浪超深地層研究所レイアウトおよび計測条件

項目		寸法・条件	坑道レイアウト
坑道の概略寸法	立坑形状	円形	
	立坑中心間距離	40 m	
	主立坑内径	6.5 m	
	換気立坑内径	4.5 m	
	立坑延長	500 m	
	冠水坑道（深度 500 m 北坑道切羽−プラグ間距離）	40 m	
	プラグ−主立坑間距離	120 m	
計測条件	立坑内の状態	全域埋め戻し（材料は砂を想定）	
	支保工の有無	立坑、水平孔ともに残置	
	電源	坑内での外部電源の供給なし	
	計測期間	5 年間程度を想定	

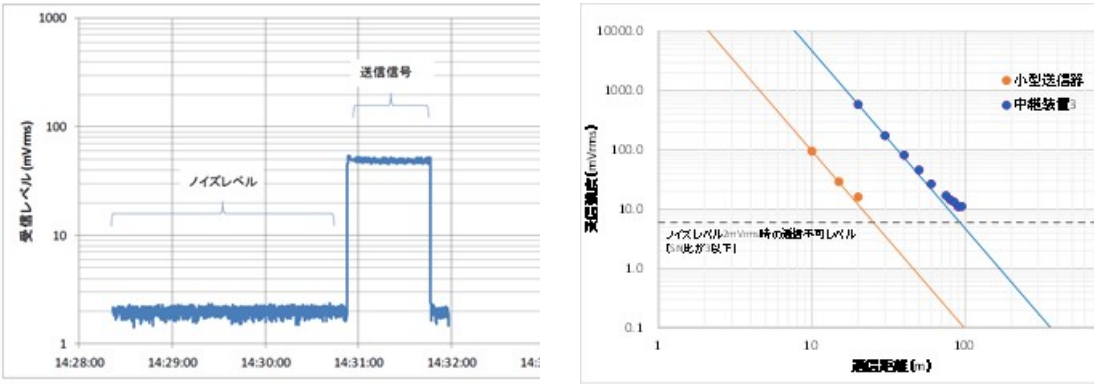
2) 各ケースで共通する装置の仕様、基本設定

検討に際し、各ケースに共通する事項として、小型送信器・中継装置の通信距離などの基本的な仕様を整理する。通信距離は坑道内のノイズレベルの状況に左右される。平成 26 年度に実施した瑞浪 URL の深度 500m の水平坑道におけるノイズの測定結果を図 2.2-4 に示す（坑道内のノイズレベルは 2 mVr ms 程度であった）。一方、小型送信器と中継装置の受信強度の減衰は図

2.2-4 のとおりであり、坑道内のノイズレベルと比較すると、小型送信器の通信距離は 20m 程度、中継装置の通信距離は 80m 程度と推定することができる。ただし、実運用の際は事前に坑道内のノイズ状況を調べておく必要がある。装置の基本的な仕様を表 2.2-2 に示す。

計測は深度 500m の水平坑道の計測地点に 5 台の小型送信器を設置し、各小型送信器では外部接続のセンサー（例えば間隙水圧計や土圧計）1 台に加え、内部に温度計および内蔵電池電圧計を備えることを想定した。そして、週 2 回の計測を行い、その結果を 1 週間に 1 度、無線伝送で地表に送信するものとした。また、地表部は各種施設によるノイズレベルが高いことが想定されるため、地表よりボーリングを行い孔内に受信アンテナを配置している。計測条件・通信条件を表 2.2-3 に示す。

各ケースでは、システムとしての信頼性、技術的な実現性、導入に必要な費用について検討した。ここで信頼性とは、ある期間においてシステムや機械が正常に稼働している確率のことであり、中継装置 1 台の 10 年間の信頼性はメーカー調べで r＝0.774（原環センター、2016）である。このような信頼性を有する装置が伝送経路のように直列に繋がったシステムでは、システムの信頼性は各装置の信頼性のべき乗で表される。たとえば、中継装置が 1 台の場合には信頼性は R＝0.774 であるが、3 台の中継装置で中継すると R＝0.774×0.774×0.774＝0.464 となり、伝送システム全体の信頼性は低下する。そのため、多段多系統という考え方（原環センター, 2017）で、中継装置の系統を複数にすることにより、伝送システム全体の信頼性を向上させることができる。



(a) ノイズレベル　　(b) 信号強度と通信距離

図 2.2-4　冠水坑道内でのノイズレベルと信号強度と通信距離

表 2.2-2　装置の基本的な仕様

項目	値	備考
耐圧性	5 MPa	水深 500 m 相当
計測期間	5 年間	-
通信距離（小型送信器）	20 m	図 2.3.1-4 より
通信距離（中継装置）	80 m	図 2.3.1-4 より

表 2.2-3　小型送信器の計測・通信条件（水平坑道）

項目	値	備考
計測センサーの台数	5 台	-
計測内容	間隙水圧もしくは全圧 1ch 小型送信器の内部温度 1ch 電池電圧 1ch	計測センサーは、冠水坑道先端付近に設置
計測間隔	2 回／週	月曜日 0:00、木曜日 0:00
通信間隔	1 回／週	送信器ごとに時刻を設定
通信データ量	3 週間分／回	・幌延 URL 実証試験の条件と同程度に設定 ・過去 2 週間分も重複して通信

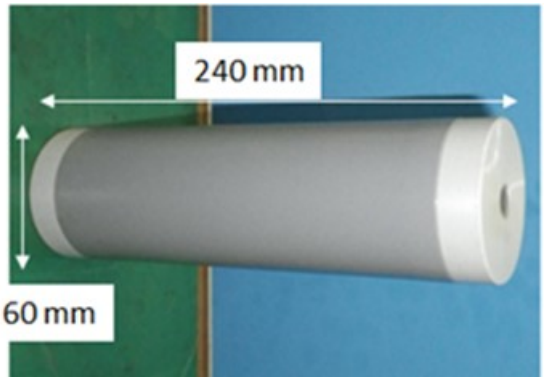
3)　ケース 1（中継装置を用いた伝送システム）

既往研究で開発した小型送信装置、中継装置を利用する場合について検討した。

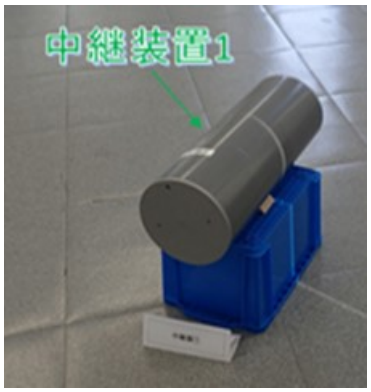
(a)　検討条件

平成 29 年度までに開発した小型送信器、中継装置を使用し、中継装置の仕様は、表 2.2-3 と同じとした。坑道寸法と通信距離をもとに、中継装置により地表までデータを伝送させる場合を検討した。水平坑道の計測位置に配置した小型送信器のデータを中継するために、計測位置より 20m 地点に中継装置を、以後、水平坑道、立坑、地表までのルートで中継装置を配置する。ここで、水平坑道から主立坑に通信経路が 90 度曲がる地点においては、中継装置の指向性の関係から通信可能距離が短くなることを考慮して中継装置の配置間隔を短くしている。また、地表は各種施設によるノイズレベルが高いことが想定されるので、地表よりボーリングを行い孔内に受信アンテナを配置することを想定している。

平成 29 年度までに開発した小型送信器、中継装置を図 2.2-5 に、中継装置による伝送システムの概要を図 2.2-6 に示す。小型送信器から地表までに 9 段（水平坑道内で 3 段、立坑で 6 段）の中継装置が必要となる。



(a) 小型送信器（原環センター, 2015）



(b) 中継装置（原環センター,2017）

図 2.2-5　伝送システムで利用する装置

装置名	設置位置	
受信器	地表	地表
受振アンテナ	地表からのボーリング孔 深さ20m	
中継装置1	主立坑　深さ80m	立坑
中継装置2	主立坑　深さ160m	
中継装置3	主立坑　深さ240m	
中継装置4	主立坑　深さ320m	
中継装置5	主立坑　深さ400m	
中継装置6	主立坑　深さ480m	
中継装置7	水平坑道　主立坑より10m	水平坑道
中継装置8	水平坑道　主立坑より80m	
中継装置9	水平坑道　主立坑より140m	
小型送信器	水平坑道　計測位置	

図 2.2-6　現状の中継装置による伝送システム

(b)　信頼性

中継装置が 9 段になるため、システム全体としての信頼性（今回の場合、5 年間でシステムや機械が正常に稼働している確率）は低下することが予想される。そのため、中継装置を 3 系統程度に多系統化することが望ましい。

(c)　実現性

伝送システムに利用する小型送信器、中継装置および受信器は、既に要素技術として開発されている。しかし、中継装置を 9 段という多段で用いた実証例がないため、動作確認を行う必要がある。また、坑道や立坑内での中継装置の設置方法などにも検討が必要である。

今回の検討では中継装置の運用可能期間は 1 系統で運用した場合の机上計算から算定したが、多段多系統の場合の運用可能期間については、実証などを行い確認しておく必要がある。

(d)　開発コスト

現状の中継装置を用いた場合、1 系統では中継段数が 9 段必要となり、2 系統を構築する場合は 18 台の中継装置が必要になる。

4)　ケース 2（中継装置の改良（大型アンテナの接続））

(a)　検討条件

平成 29 年度までに開発した中継装置に大型の送信アンテナを接続して通信させる。その際の通信可能距離は現状の 2 倍（通信可能距離 160m）と仮定し、その他の条件は現状の中継装置を利用した場合と同様とする。大型の送信アンテナのイメージを図 2.2-7 に示すが、長距離の無線通信を想定した大きな電力を必要とする長距離アンテナ（原環センター, 2014）ではなく、小電力で通信距離を伸ばそうとするものである。この大型アンテナを接続した中継装置による伝送システムの概要を図 2.2-8 に示す。

ここで、水平坑道から立坑に通信経路が 90 度曲がる地点においては、送信アンテナの指向性により通信可能距離が短くなることを考慮して、通信距離を短めに試算した。また、受信アンテナは現状の中継装置を利用する場合と同様に、地表よりボーリングを行い、孔内に受信アンテナを配置することを想定している。

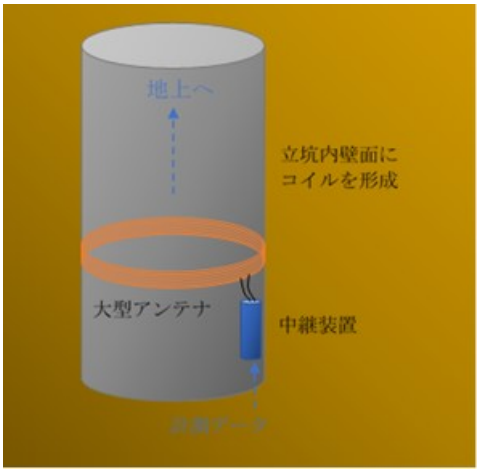


図 2.2-7　中継装置に接続する大型アンテナのイメージ

装置名	設置位置	
受信器	地表	地表
受振アンテナ	地表からのボーリング孔 深さ20m	
中継装置1	主立坑　深さ160m	立坑
中継装置2	主立坑　深さ320m	
中継装置3	主立坑　深さ480m	
中継装置4	水平坑道　主立坑より20m	水平坑道
中継装置5	水平坑道　主立坑より140m	
小型送信器	水平坑道　計測位置	

図 2.2-8　大型アンテナを接続した中継装置による伝送システム

(b)　信頼性

中継装置改良により大型アンテナを接続した場合、アンテナの大型化に伴いアンテナ構成部品が増え、また出力向上により必要電源容量が増えることから電源関連の部品点数が増えるため、1 台当たりの信頼性が低下することが考えられる。しかしながら、アンテナの大型化に伴い、地表にデータを到達させるための中継に必要な段数が少なくなることから、信頼性向上に大きく寄

与するため、結果的に現状の中継装置を利用する場合に比べて信頼性は向上すると考えられる。

(c) 実現性

立坑においては、立坑内壁に直接コイルを巻くことで送信アンテナを形成する技術、水平坑道においては大型の空芯コイルを開発し、これを坑道軸方向にアンテナ軸を合わせて設置する技術を開発する。また、データ送信アンテナを大型化させた場合、微弱となる信号の送受信には用いることができなくなるため､データ指令受信アンテナと送信アンテナとを別に設ける必要があり、中継装置用受信アンテナの開発と中継装置内にアンテナ切り替え装置の実装が必要となる。

課題として、全体の信頼性向上のための複数系統化が難しいことがあげられる。一つの立坑内に 2 系統以上の経路を構成することが可能か、また主立坑と換気立坑でそれぞれ系統を設けた場合に、機器故障時の対応として隣の立坑に経路を変更できるか、すなわち中継装置の信号を隣の立坑に伝送することが可能かどうかを検証する必要がある。

(d) 開発コスト

従来の中継装置は 9 段の中継が必要であるが、アンテナの大型化に伴い通信可能距離が 2 倍以上になれば中継段数は半分以下になる。電源の強化を含めても現状の中継装置 2 台分にはならないと思われる。

5) ケース 3：長距離伝送装置を用いた伝送システム

地層処分事業における処分坑道は数百 m から 1 km 程度の延長となることが想定されるため、長距離伝送が可能なシステムについて検討した。

(a) 検討条件

水平坑道の計測位置から主立坑まで中継装置による伝送し、立坑深度 490m の内壁面にアンテナ形成して地表に伝送する。なお、トゥルミヌールの試験結果（原環センター、2018）を参考とする。小型送信器のデータを中継するために、切羽より 20m 地点に 1 段目の中継装置を配置し、以後、3 段目の中継装置まではケース 1 と同条件とする。3 段目の中継装置に長距離アンテナを接続し、受信アンテナまで長距離通信を行う。中継装置に長距離アンテナを接続したイメージを図 2.2-9 に示す。この場合、送信距離を長くするための電力が必要となり、中継装置内の電源以外に電源が必要と考えられる。長距離伝送装置（長距離アンテナ）を用いた伝送システムの概要を図 2.2-10 に示す。長距離アンテナの例を図 2.2-11 に示す。

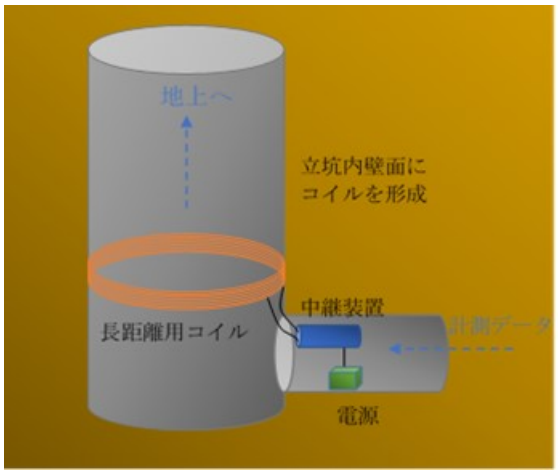


図 2.2-9　中継装置に長距離アンテナを接続したイメージ

装置名	設置位置	
受信器	地表	地表
受振アンテナ	地表からのボーリング孔 深さ20m	
長距離アンテナ	主立坑　深さ480m	立坑
中継装置1	水平坑道　主立坑より10m	水平坑道
中継装置2	水平坑道　主立坑より80m	
中継装置3	水平坑道　主立坑より140m	
小型送信器	水平坑道　計測位置	

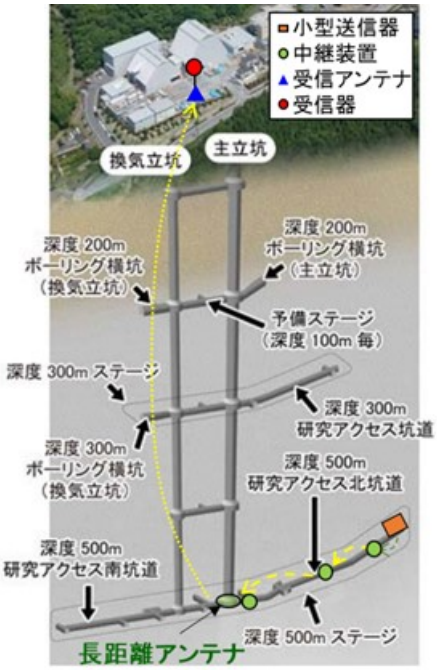


図 2.2-10　長距離伝送装置を用いた伝送システム

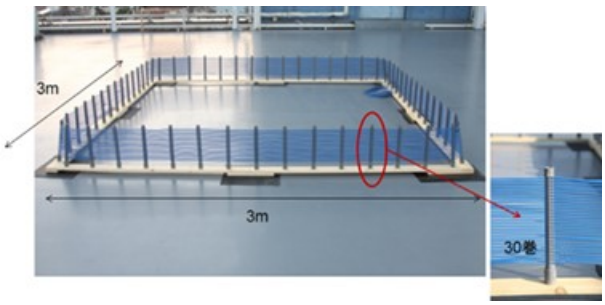


図 2.2-11　長距離送信アンテナの例
（原環センター, 2014）

(b) 信頼性

トゥルミヌールの試験結果より試算した必要送信時電力は現状の中継装置の 82 倍であり、この大出力に耐えられる部品を選定して高出力送信回路を開発する必要がある。中継装置そのものの信頼性は従来のものと大きく変わらないと思われるが、大型アンテナと高出力送信回路、および大容量電源を構成する部品点数の増加と部品そのものにかかる負荷の増大から伝送装置全体の信頼性は低下する。しかしながら、本長距離伝送装置の場合は、中継の段数を極端に減らすことが可能になるため、経路上の中継に伴うシステムの全体の信頼性はかなり優位になると思われ、1 系統当りの信頼性は現状の中継装置を用いた場合より向上するものと考える。

伝送路系統を複数化する場合を考えると、主立坑と換気立坑でそれぞれに系統を設けた場合、立坑底部に配置した長距離伝送装置は直接受信アンテナにデータを伝送するため、主立坑の信号を換気立坑に送るなどの立坑間の通信を必要としない。よって、2 系統までの冗長化であれば実現可能と思われる。系統をさらに増加させるためには、同一立坑内に 2 系統以上の系統を設ける必要があるため、一つの立坑内に複数の長距離伝送装置を近傍に配置しても問題ないか確認する必要がある。

(c) 実現性

幌延 URL で実施した長距離実験では構造部材が通信距離増大の方向に影響したことが、更にトゥルミヌール実験でも、それらの影響によって受信強度が低下したことが確認されている。そのため、簡易的な大型アンテナを立坑底部に仮設し、立坑部での通信状況や必要受信レベルなどの確認が必要である。

トゥルミヌール実験で使用した送信アンテナ面積は約 9 m^2（3 m×3 m）であるが、瑞浪 URL の主立坑の内径φ6.5m では、内壁にアンテナを構築した場合の面積は約 33.18 m^2 であり、アンテナが大きくなる。アンテナの出力は面積に比例するため、大電流出力時の発熱（放熱できない）や電池個体差の吸収回路（逆流防止）にかかわる具体的検討など、長距離伝送用アンテナの開発が必要である。

(d) 開発コスト

電源容量の総量は、中継装置 9 台分を合わせた容量よりはるかに多い 32 倍の容量が必要となる。仮に現状の中継装置の 4 倍の電源容量を一つのケースに収めた場合、8 台のケースが必要となる。分割された耐圧電源ケース、大型アンテナ、高出力送信回路など 1 台当たりの装置に要するコストは大きくなると想定される。

6) ケース 4（ボアホール型受信器を用いた伝送システム）

立坑が使えない場合を想定したケースで、ボーリング孔にボアホール型受信器を設置してデータを伝送する場合について検討する。

(a) 検討条件

ボアホール型受信器の設置イメージを図 2.2-12 に示す。ボアホール型受信アンテナにデータを伝送する中継装置は、坑道の外側に伝送装置を配置することにより、支保の影響を減らすことができる。瑞浪 URL の深度 200m ボーリング横坑、深度 300m 研究アクセス横坑を利用して、ボアホール型受信器を設置する。受信アンテナ-中継装置間距離を 80m と仮定し、ボーリング孔内はベントナイトペレットなどで埋め戻す。伝送システムの概要およびボアホール型受信機の例を図 2.2-13、図 2.2-14 に示す。

図 2.2-12　ボアホール型受信器の設置イメージ

装置名	設置位置	
受信器	地表	地表
受振アンテナ1	地表からのボーリング孔 深さ20m	
中継装置1	深度200mボーリング横坑	ボーリング孔
受信アンテナ2	深度200mボーリング横坑 からのボーリング孔深さ80m	
中継装置2	深度300m研究アクセス坑道	
受信アンテナ3	深度300m研究アクセス坑道 からのボーリング孔深さ120m	
中継装置3	水平坑道　主立坑より10m	水平坑道
中継装置4	水平坑道　主立坑より80m	
中継装置5	水平坑道　主立坑より140m	
小型送信器	水平坑道　計測位置	

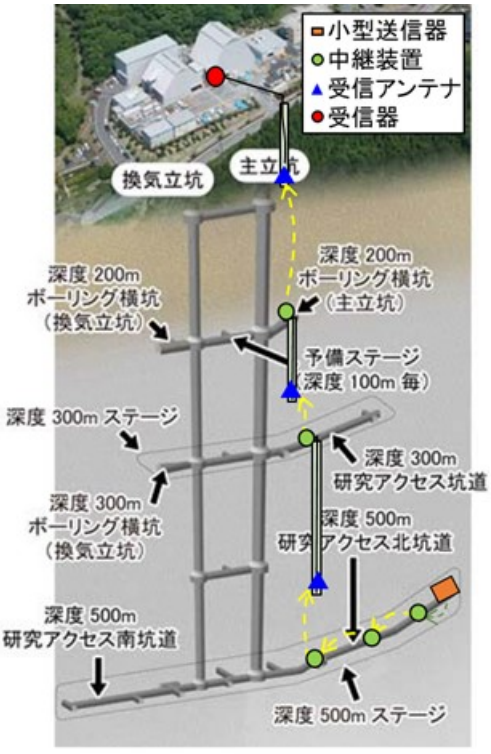


図 2.2-13　ボアホール型受信器を利用した伝送システム

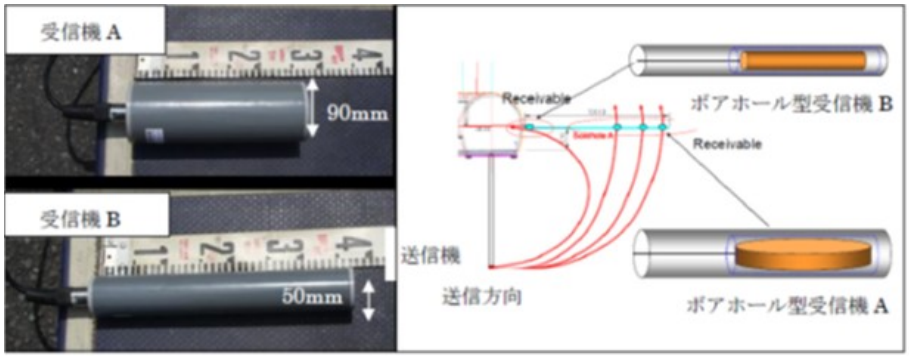


図 2.2-14　ボアホール型受信器の例

(b)　信頼性

現状では、一つのボーリング孔には一つの受信器しか設置できないため、1 系統となることから、複数の中継装置でつなぐシステム全体の信頼性は低い。ただし、中継段数が少ないシステム構成となるため、系統数を増やせば信頼性は向上する。

(c)　実現性

中継装置には、受信した測定データを受信器側の中継器に送信するために、データ受信用アンテナとデータ送信用アンテナが必要になる。また、受信器からの経路変更指令などの指令を受信し、測点側の中継装置に中継するために、指令受信アンテナと指令送信アンテナが必要になる。現行システムでは、これらのアンテナは共用となっている。そのため、ボーリング坑内配置用のアンテナの開発が必要である。

(d)　開発コスト

ボーリング孔内配置用のデータ受信アンテナと指令送信アンテナの開発費が新たに発生する。

7)　検討結果の比較

ケース 1 からケース 4 の各ケースにおける信頼性、開発要素およびコストなどについての検討結果を表 2.2-4 に整理した。信頼性、開発要素およびコストについて総合的に判断した結果、瑞浪 URL を例題とした長距離での無線伝送システムに適したケースは、ケース 2 の中継装置の改良型（大型アンテナの接続）であると考えられる。

無線伝送システムの信頼性については、これまでの適用事例から中継段数に依存することがわかっている。すなわち、中継装置の改良により、アンテナを大型化することで伝送距離を伸ばして中継段数を少なくすることが信頼性の向上に大きく寄与すると考えられる。また、実現性については、アンテナの大型化が主になるが、現状のシステムを活用することができるため複雑なシステム系などの開発は必要ないと考えられる。コストに関しても、他のケースと比べて比較的安価に導入することができる。

他のケースにおいては、ケース 1 の中継装置による伝送（現状の中継装置利用）の場合、既存のシステムを利用するため、開発要素の少なさから実現性については利点があるが、中継段数が多くなることによる信頼性の低下やコストの増加が懸念事項となる。ケース 3 の長距離伝送やケース 4 のボアホール型受信器を利用した伝送の場合、中継段数が少ないことによる信頼性の高さについては有利であるといえるが、新規開発要素が大きく、実現性やコストの面で不利になると評価できる。

表 2.2-4　無線伝送システムの検討結果一覧

	ケース 1 現状の中継装置利用	ケース 2 中継装置の改良（大型アンテナの接続）	ケース 3 長距離伝送	ケース 4 ボアホール型受信器を利用した伝送
中継段数（）内は立坑部	9 段（6 段）	5 段（3 段）	3 段（1 段）	4 段（2 段）
信頼性	【△】 ・3 系統以上なら【○】	【○】 ※事前の検証試験が必要	【○】 ※事前の検証試験が必要	【△】 →2 系統以上で【◎】
実現性	【◎】 ・多段中継の実証 ・中継装置の設置方法の検討	【○】 ・大型アンテナの開発 ・アンテナの大型化に伴う電源の強化 ・中継装置用受信アンテナおよびアンテナ切り替え装置の開発	【△】 ・伝送経路上の減衰要素である立坑構造部材の影響検証 ・深度 500 m の水圧に耐えられる大容量電源の開発 ・大容量電源の長期運用性の検討 ・長距離伝送用アンテナの開発 ・必要受信レベルの検証	【△】 ・ボーリング孔内配置用のアンテナの開発 ・中継装置の系統数増加のための検討
開発コスト	【○】 ・新規開発要素は少ないが、機器台数が多いのでコスト大	【◎】 ・中継段数が少なく、大容量電源の大型開発要素もないため、コスト面での優位性が有り	【△】 ・大容量電源、長距離伝送用アンテナの開発費が高額	【○】 ・ボーリング孔内配置用のアンテナ開発費が発生
備考	・信頼性を上げるには3系統以上必要 ・中継段数の多さに起因するシステムの複雑性が懸念	・信頼性、コストの面で他ケースより優位 ・実現性に関しても大規模な開発要素は含まれない ・欠点として、さらなる信頼性向上のための複数系統化が難しいことがある	・最大の課題である電源に関して解決できれば、信頼性の高い案	・中継段数が少ないバランス型 ・下位の中継装置との通信を考えた場合、ボーリング孔は鉛直ボーリングが望ましい
総評【◎○△】	【○】	【◎】	【△】	【△】

8) まとめ

地中無線による長距離通信の実現性を検討するため、瑞浪 URL を事例に、深度 500m 坑道から地上までの地中無線伝送システムについて、中継装置を用いた伝送、中継装置に大型アンテナを接続した伝送、長距離伝送およびボアホール型受信器を利用した伝送の 4 ケースについて具体的なシステム構成を検討し、各ケースの中継段数、利点・欠点、開発要素の有無、コストについて整理した。

中継装置を用いた伝送については、開発要素が少ないという利点があるものの、中継段数が多くなるため、システム全体が複雑化し、コストも増大するという欠点がある。長距離伝送は、大容量電源の確保が最大の課題となるが、瑞浪 URL の坑内電源設備を利用するなど、電源の問題がクリアできれば実現性が高いと考えられる。ボアホール型受信器を利用した伝送は、立坑を利用できない場合の案であるが、ボーリング孔が必要、システム全体の信頼性が低いなどの欠点がある。

2.2.2 地下環境における無線給電技術の実証試験

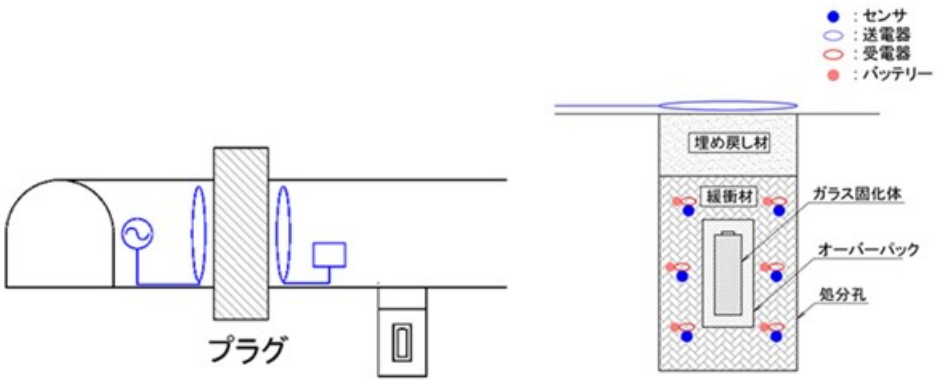
地下構成要素の状態を長期間に渡って把握することが要求された場合に、人工バリアの状態を乱すことなく測定機器に電力を供給できるような技術が望まれる。ここでは、これまでに取り組まれた磁界共振結合方式を対象とした給電技術の実用技術としての見通しを得るための要素試験などの開発成果を踏まえ、無線給電技術の実用化を念頭に置いた高度化開発に向けた技術課題について検討した。

(1) 地層処分における無線給電技術の利用方法および既往の開発成果

1) 地層処分で想定される無線給電技術の利用方法

精密調査段階の後半に実施される地下調査施設などでの実証試験では、建設・操業・閉鎖に関する技術の実用性を確認することが計画されている（NUMO, 2018）。これらの実証試験では、模擬廃棄体を用いた人工バリアの定置、更に処分坑道の埋め戻しやプラグの設置など、人工バリアを含む様々な地下構成要素に対する施工性や短期的或いは長期的な挙動を確認・評価するための試験を実施することが考えられる。これらの地下構成要素の挙動を確認するためには、各種の測定機器が必要であり、現時点における機器への電力供給には、一般的に電源ケーブルまたは電池が必要となる。実証試験では、例えば埋め戻された後の坑内や抗内の地下構成要素の状態を把握する際には、できる限り擾乱を与えずに、それらの挙動を把握することが望ましく、場の擾乱を助長する可能性のある電源ケーブルの設置や、原位置の物理的形状の変更を余儀なくするような大型の電池等の設置は、試験環境として（将来の実処分環境として）望ましい状況ではない。

上記の懸念を踏まえれば、無線給電技術には図 2.2-15 に例示するような活用形態が期待される。無線給電技術を適用することができれば、実証試験対象の構造物、或いは将来の処分場の地下構成要素に与える擾乱を小さくして、長期的な人工バリアなどの挙動を把握できる可能性がある。ただし、コイルを通して受け渡すことができる電力の効率（給電効率）は、二つのコイルに挟まれた伝送媒体の影響を受けることとなる。更に、図 2.2-15 に例示するような活用形態の実用性を考える際には、間に存在する媒体の存在（同図の例では、プラグ、緩衝材、埋め戻し材になど）に伴う給電効率の低下を考慮する必要がある。



（プラグ）　　（模擬処分孔）

図 2.2-15　実証試験における無線給電のイメージ

2)　無線給電技術（磁界共振結合方式）

無線給電技術には電磁界を利用する方法や電磁波を利用する方法があるが、本検討では地層処分に適する方法として磁界共振結合方式を採用する（原環センター、2014）。表 2.2-5 に無線による給電方式の分類を示す。

磁界共振結合方式の無線給電は、電気回路の共振を利用するため図 2.2-16 のように電源の周波数、送電器の共振周波数、受電器の共振周波数と三つの周波数を一致させる必要がある。送受電器（共振器）は、コイルとコンデンサで構成され、共振周波数は式 2.2-1 で示される。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad \text{式 2.2-1}$$

ここで、fは共振周波数、Lはコイルの自己インダクタンス、Cはコンデンサのキャパシンタンスである。

磁界共振結合方式や電磁誘導方式の磁界を用いた無線給電では、送電器のコイルに交流を流すことにより磁束を発生させ、受電器のコイルでそれを受け取ることで、電力を送受電している。ここで、受電電力（W）／送電電力（W）＝給電効率（%）として示す。

表 2.2-5　給電方式の分類
（赤枠は本検討対象）

給電方式	電磁界（近傍界）				電磁波（遠方界）
	磁界		電界		光、電波
原理など	電磁誘導（電界結合）	磁界共振結合（磁界共鳴）	電界結合	電界共振結合	レーザー マイクロ波

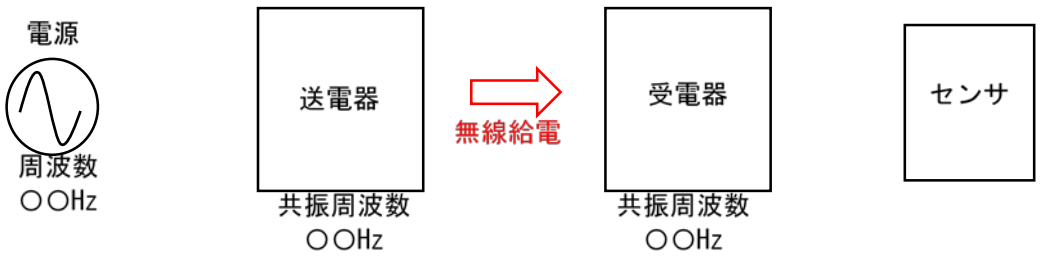


図 2.2-16　磁界共振結合のイメージ図

3)　既往の開発成果

平成 25 年度から平成 29 年度において無線給電の基礎技術に関する検討を行った（原環センター、2014；2015；2016；2017；2018）。まず、モニタリングの無線化手法の調査を行い、その調査を踏まえて長期間のモニタリングが無線で行えるように電源部の無線化に向けた無線給電の検討を始めた。その検討では、電磁界を利用した無線給電方式うち、室内試験の結果により磁界共振結合方式の無線給電を選定した。そして、伝送媒体の給電効率に対する影響評価、コイル設計を抽出して検討を進めてきた。伝送媒体の影響評価としては、緩衝材や埋め戻し材の材料であるベントナイトの影響評価を行い、力学プラグの構成材料である鉄筋およびコンクリート、また、地下水（淡水、塩水）の影響評価を行った。コイル設計としては、理論的なコイルの概念設計とスケール則の検討を行い、無線給電設備の施工時に発生するコイルの位置ずれの影響評価を行った。また、簡易な系における複数コイルを用いた設計を実施した。

4)　原位置実証に向けた課題点

これまでの技術開発は、磁界共振結合方式の選定、伝送媒体の影響評価、アンテナ設計論と段階的に実施されている。しかし、この技術開発の成果は、小規模な室内試験を伴う机上検討である。そこで次の段階として、原位置実証を伴う検討が必要である。この検討に向けた取り組みを行うために、課題を整理して表 2.2-6 のようにまとめ、5 つの課題を抽出した。このうち、複雑な系を想定した設計の検討、モニタリング機器で必要な電力を供給する無線給電システム設計手法の検討を実施する。

表 2.2-6　課題と研究開発項目

課題	課題に対する研究開発項目
伝送媒体による給電効率の影響を低減させること。	媒体影響を低減するための検討
処分孔で、無線給電を利用するために、複数のコイルを用いた（複雑な系における）試設計を行うこと。	複雑な系（処分孔内での利用）を想定した設計の検討
モニタリング機器で必要な電力を効率的に供給するために負荷抵抗と給電効率および受電電力の関係を考慮した無線給電システムの検討を行うこと。	モニタリング機器で必要な電力を供給する無線給電システム設計方法の検討
パッケージングの方法論を検討すること。	パッケージング方法の検討
共振周波数のずれの影響を評価すること。	共振度合と給電効率の関係検討

(2) 複雑な系を想定した設計の検討

1) 目的

既往の検討では、図 2.2-17 に示す送電器一つと受電器一つ（送受電器 1:1）で構成される系あるいは送電器一つと受電器二つ（送受電器 1:2）で構成される送受電器の合計が三つの単純な系における無線給電技術の検討を実施してきた（原環センター、2018）。しかし、模擬処分孔では緩衝材内の複数の受電器に対して、それぞれ無線給電を行うことを想定している。そこで、送電器一つと受電器多数（送受電器 1： 多）のような複雑な系を想定し、無線給電の設計方法に関する検討を行う。

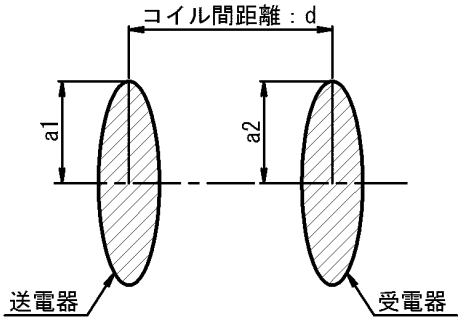
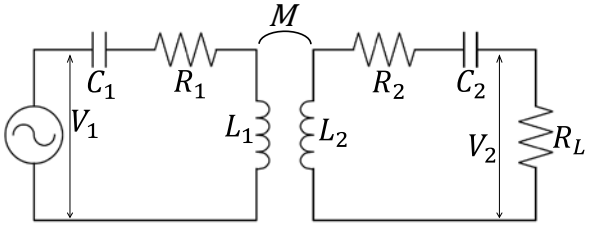


図 2.2-17　送電器一つと受電器一つの系

2) 複雑な系の設計の考え方

複雑な系における無線給電の設計方法を検討するために、単純な系である送受電器 1:1 における磁界共振結合の SS 方式（Serial-Serial：インダクタンスとコンデンサが直列で接続されている）の設計を参考にして複雑な系の設計を検討する。図 2.2-17 に示した送受電器 1:1 で SS 方式である磁界共振結合の等価回路は図 2.2-18 のように示すことができる（原環センター, 2016）。また、給電効率ηは式 2.2-2 で表され、ωは角周波数、R_Lは受電器の負荷抵抗、R_1は受電器におけるコイルの内部抵抗、R_2は受電器におけるコイルの内部抵抗、Mは相互インダクタンス、kは結合係数、Qは、ある周波数fにおける送受電器のコイルの性能を表す指標を示している。

$$\eta = \frac{(\omega M)^2 R_L}{(R_L + R_2)[R_1 R_L + R_1 R_2 + (\omega M)^2]} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k\sqrt{Q_1 Q_2}}} \qquad \text{式 2.2-2}$$



V：電圧、C：コンデンサのキャパシタンス、
R：抵抗、L：ある周波数における自己インダクタンス

図 2.2-18　送受電器 1:1 における磁界結合の SS 方式の等価回路

上述は送受電器 1:1 に関する設計についての説明であるが、送受電器 1:多のような複雑な系の設計においても、等価回路を示し回路方程式を用いれば給電効率を解析できると考えられる。複雑な系の設計でも対応出来る手順を以下に示す。この考え方を用いることで複雑な系における給電効率を解析することが可能となり、その評価を行うことで設計の検討ができる。

【複雑な系のシステム設計手順】

A) 送受電器のサイズや位置関係を設定する
B) 送受電器のコイルの事故インダクタンスや相互インダクタンスなどを、試験や解析により示す
C) 磁界共振結合の無線給電における等価回路を考える
D) 等価回路を回路方程式で示し、給電効率を解析する
E) 送受電器のサイズや位置関係と給電効率の位置関係を評価

3) 複雑な系における試設計

複雑な系の試設計を前述の設計手順を用いて行った。試設計は、既往の検討で製作した送受電器の規格を設計条件とすることで、製作した送受電器のパラメータ（自己インダクタンスや内部抵抗）を利用した。

(a) 送受電器のサイズや位置関係などを設定する

試設計で設定した送受電器のコイルサイズを表 2.2-7 に示す。送受電器間は表 2.2-8 に示すように送電コイル直径（370 mm）を基準として、185 mm、370 mm、555 mm、740 mm の 4 つの間隔で変化させ、また、受電器は同じ仕様のものを設定して 2-6 個と数量を変化させた。図 2.2-19 に試設計における送受電器の位置関係を示す。なお、直径 370 mm のコイルは既往の検討時に利用したものと同じである。

表 2.2-7　試設計における送受電器のコイルサイズ

送電器のコイル直径(mm)	370
受電器のコイル直径(mm)	125（送電コイル直径の 1/3 倍）

表 2.2-8　送受電器の位置関係と受電器の個数

送受電器間距離(mm)	185（送電コイル直径の 1/2 倍） 370（送電コイル直径と同じ値） 555（送電コイル直径の 3/2 倍） 740（送電コイル直径の 2 倍）
受電器の数量	2～6

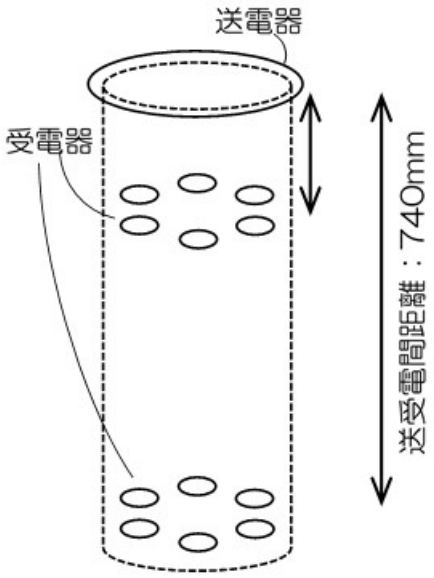


図 2.2-19　試設計における送受電器の位置関係

(b) 送受電器のコイルの自己インダクタンスや相互インダクタンスなどを試験や解析により示す

試設計において設定した送受電器の 300 kHz におけるパラメータを表 2.2-9 に示す。送受電器の軸が同軸として、送受電器間距離における相互インダクタンスを解析した結果を表 2.2-10 に示す。

表 2.2-9　試設計における送受電器のパラメータ（300 kHz 時）

送電器のコイルの自己インダクタンス(uH)	500
送電器のコイルの内部抵抗(ohm)	3.4
受電器のコイルの自己インダクタンス(uH)	110
受電器のコイルの内部抵抗(ohm)	0.9

表 2.2-10　試設計における送受電器の位置関係と相互インダクタンス

送受電器間距離(mm)	相互インダクタンス(uH)
185	14.26
370	3.63
555	1.30
740	0.59

(c)　磁界共振結合の無線給電における等価回路を考える

送電器が一つ、受電器が 6 つの場合における等価回路を図 2.2-20 に示す。送電器と受電器 1～6 はそれぞれが結合している。図において、結合を線で示しており、M_{ij}は相互インダクタンス

である。それぞれの結合について回路方程式で示す際には、送電器を 1、受電器 1～6 をそれぞれ 2～7 として i と j の値とした。R_Lは受電器に接続される負荷抵抗を意味している。

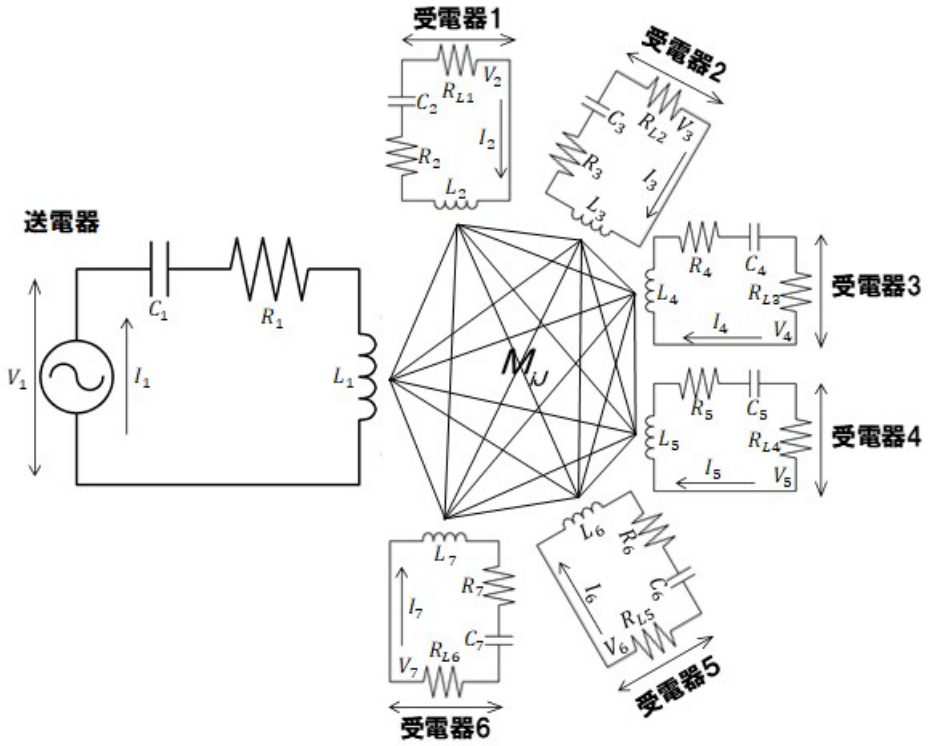
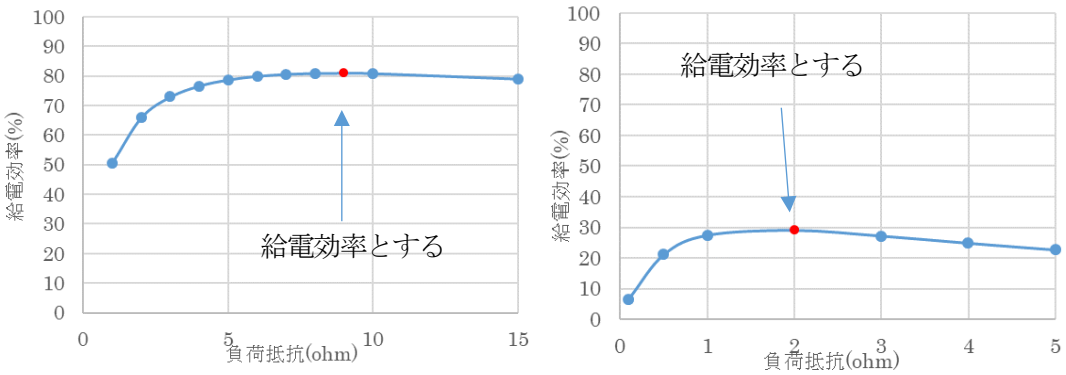


図 2.2-20　送受電器 1:6 における等価回路

(d)　等価回路を回路方程式で示し給電効率を解析する

図 2.2-20 に示した送電器:受電器＝1:6 における等価回路を回路方程式で表し、給電効率η_{total}を求めた。

受電効率は、同じ設定条件でも受電器に設置される負荷R_Lによって上に凸型に変化する。その事例を図 2.2-21 に示す。給電効率は受電器に設置される負荷を変化させて計算し、給電効率が最大となる値を採用した。送受電器間距離 185 mm、370 mm、555 mm、740 mm における給電効率と受電器の数の関係を表 2.2-11 および図 2.2-22 に示す。



（送受電器間距離 370 mm）　　（送受電器間距離 750 mm）

図 2.2-21　送受電器 1:6 の給電効率と負荷抵抗の関係

表 2.2-11　給電効率と送受電器間距離と受電器の数の関係

給電効率(%)		送電器と受電器の距離（mm）			
		185	370	555	740
受電器数	2	91	69	37	14
	3	93	74	44	19
	4	94	77	49	23
	5	94	79	53	26
	6	98	81	56	29

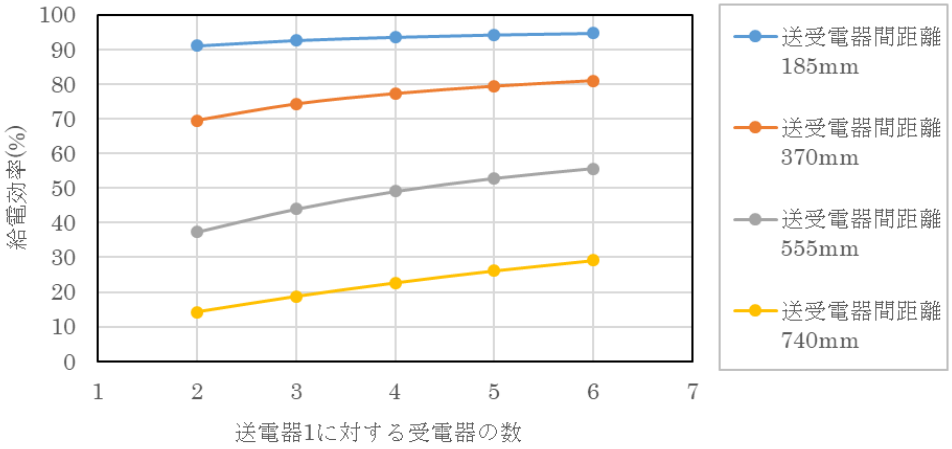


図 2.2-22　給電効率と送受電器間距離と受電器の数の関係

(e)　送受電器のサイズや位置関係と給電効率の関係性を評価

(a)～(d)の項目で行った試設計の結果、複雑な系の設計手順を用いて、給電効率を解析することが可能であることを示した。また、試設計で利用した送受電器のサイズと位置関係における給電効率が分かった。このことより、今回示した設計手順を用いることで送受電器のサイズと位置関係および給電効率の評価が可能であるといえる。

(3) 磁界共振結合方式を利用した無線給電システムの設計方法の検討

1) 目的

前述の検討では、受電器に接続した負荷抵抗に応じて給電効率が変化するため、負荷抵抗を変化させて最大となる給電効率を求め、その値を給電効率の結果とした。一方で、磁界共振結合の無線給電は、磁気により回路が結合しているため、この負荷抵抗が変化することにより、受け取ることが可能な電力値（受電電力）も変化する。

モニタリング機器に必要な電力を無線給電により供給するためには、「給電効率」、「受電電力」、「受電器の負荷抵抗」の関係を考慮して、システム設計の検討を行う必要がある。そこで、上記三つの関係を整理してシステム設計の考え方を検討する。

2) システムの設計手順

送受電器 1:1 で SS 方式である磁界共振結合の等価回路は、前述の図 2.2-17 のように示すことができ、給電効率ηは式 2.2-2 で表される。また、受電器に接続される負荷抵抗（例えば、モニタリング機器）で受け取ることができる電力P（受電電力）は式 2.2-3 で表される。ここに、ωは角周波数、R_Lは受電器の負荷抵抗、R_1は受電器におけるコイルの内部抵抗、R_2は受電器におけるコイルの内部抵抗、Mは相互インダクタンス、V_1は送電器に接続する電源の電圧を示している。

$$P = \frac{(\omega M)^2 R_L}{(R_1 R_L + R_1 R_2 + (\omega M)^2)^2} {V_1}^2 \qquad \text{式 2.2-3}$$

式 2.2-3 より、受電器の負荷抵抗で受電電力は変化する。また、式 2.2-2 より、受電器の負荷抵抗で給電効率も変化する。このように、受電器の負荷抵抗により、給電効率と受電電力の両方が変化することが分かる。そのため、この関係を考えて受電器の負荷抵抗を設定する必要がある。

また、上記の関係を考慮するときに、踏まえるべき考え方を下記に整理した。

- 給電効率（=受電電力/送電電力）が低いと損失が大きいため、受電器の負荷抵抗を可変して最大となる給電効率を検討する方が望ましいと考えられる。
- 送電器に接続する電源の電圧V_1を上げると受電電力は上昇する。そのため、受電器に接続した負荷抵抗（例えば、モニタリング機器）において必要な電力が得られないときは、電源の電圧V_1を上げることが考えられる。
- 電源の電圧を上げると受電電力は増加するが、それに伴い等価回路上の電流値も増加してコイルの内部抵抗における銅損が増加する。
- 交流における低圧の最大値である600 Vが電源の最大電圧と考えられる。

上記を考慮して、複雑な系のシステム設計手順を、「給電効率」、「受電電力」、「受電器の負荷抵抗」の関係を考慮したシステムの設計手順に改良する。このシステムの設計手順を利用すれば、必要な電力を効率よく得ることが可能な無線給電システムの検討が可能になると考えられる。

【「給電効率」、「受電電力」、「受電器の負荷抵抗」の関係を考慮したシステムの設計手順】

A) 送受電器のサイズや位置関係を設定する

B) 送受電器のコイルの自己インダクタンスや相互インダクタンスなどを、試験や解析により示す

C) 等価回路を示し、「給電効率」、「受電電力」、「受電器の負荷抵抗」の関係を解析する

D) 「給電効率」、「受電電力」、「受電器の負荷抵抗」の関係性を考慮して、必要な電力を効率

よく得ることが可能な受電器の負荷抵抗等価回路を回路方程式で示し、給電効率を解析する

E) 送受電器のサイズや位置関係と「給電効率」および「受電電力」を評価

3) システムの試設計

前述の「給電効率」、「受電電力」、「受電器の負荷抵抗」の関係を考慮したシステムの設計手順に沿って試設計を行う。試設計は、複雑な系における試設計と同様に、既往の検討で製作した送受電器の規格を設計条件とすることで、製作した送受電器のパラメータ（自己インダクタンスや内部抵抗）を利用した。

(a) 送受電器のサイズや位置関係などを設定する

送受電器のコイルサイズを表 2.2-12 に示す。送受電器間距離（表 2.2-13）は 185 mm、370 mm、555 mm、740 mm と 4 つの間隔で変化させた。また、受電器は同じ仕様のものを設定した。図 2.2-23 に試設計における送受電器の位置関係を示す。

表 2.2-12　試設計における送受電器のコイルサイズ

送電器のコイル直径(mm)	370
受電器のコイル直径(mm)	370

表 2.2-13　送受電器間距離

送受電器間距離(mm)	185（送電コイル直径の 1/2 倍） 370（送電コイル直径と同じ値） 555（送電コイル直径の 3/2 倍） 740（送電コイル直径の 2 倍）

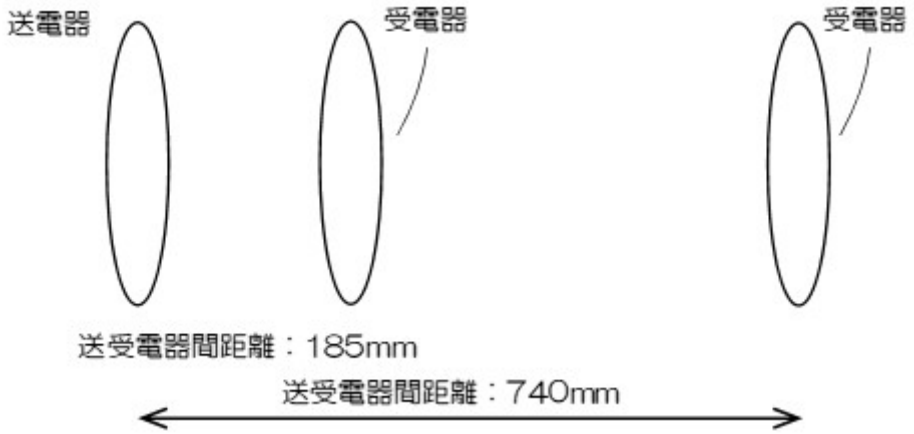


図 2.2-23　システムの試設計における送受電器の位置関係

(b) 送受電器のコイルの自己インダクタンスや相互インダクタンスなどを、試験や解析により示す。

試設計において設定した送受電器の 300 kHz におけるパラメータを表 2.2-14 に示す。送受電器の軸が同軸上かつ表 2.2-13 の送受電器間距離における相互インダクタンスを解析した結果を表 2.2-15 に示す。

表 2.2-14　試設計における送受電器のパラメータ（300 kHz 時）

送電器のコイルの自己インダクタンス(uH)	500
送電器のコイルの内部抵抗(ohm)	3.4
受電器のコイルの自己インダクタンス(uH)	500
受電器のコイルの内部抵抗(ohm)	3.4

表 2.2-15　試設計における送受電器の位置関係と相互インダクタンス

送受電器間距離(mm)	相互インダクタンス(uH)
185	91.4
370	26.2
555	10.2
740	4.9

(c) 等価回路を示し「給電効率」、「受電電力」、「受電器の負荷抵抗」の関係性を解析する

表 2.2-14 と表 2.2-15 で示したパラメータを用いて、受電器に設置される負荷抵抗を 0～300 ohm と可変させ、電源の電圧を 100 V とした時における給電効率と受電電力を解析した。給電効率と負荷抵抗の関係を図 2.2-24 に示す。送受電器間距離が長くなると給電効率が低下していき、負荷抵抗が変化することによる給電効率のピークが明確になる。これは、送受電器間距離が長くなるほど設計の裕度が少なくなってくることを意味している。また、受電電力と負荷抵抗の関係を図 2.2-25 に示す。図より、送受電器間距離が長くなると、受電電力が最大となる負荷抵抗値が小さくなる。

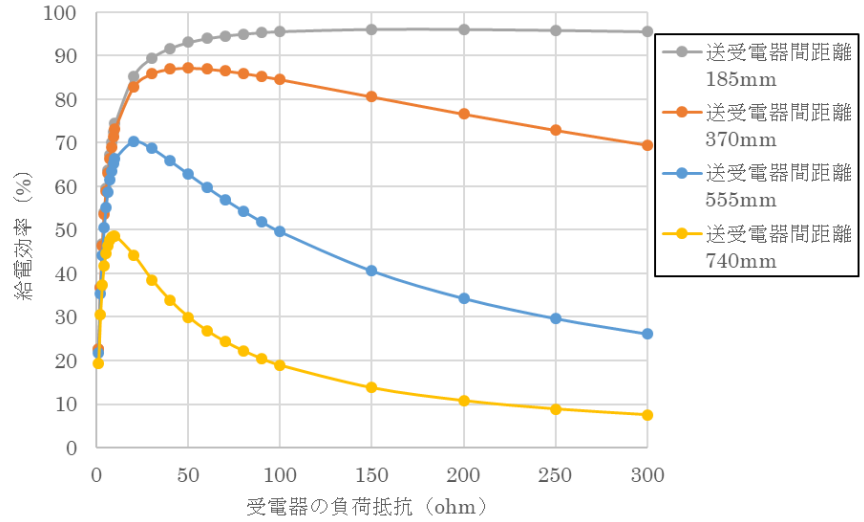


図 2.2-24　受電器の負荷抵抗と給電効率の関係

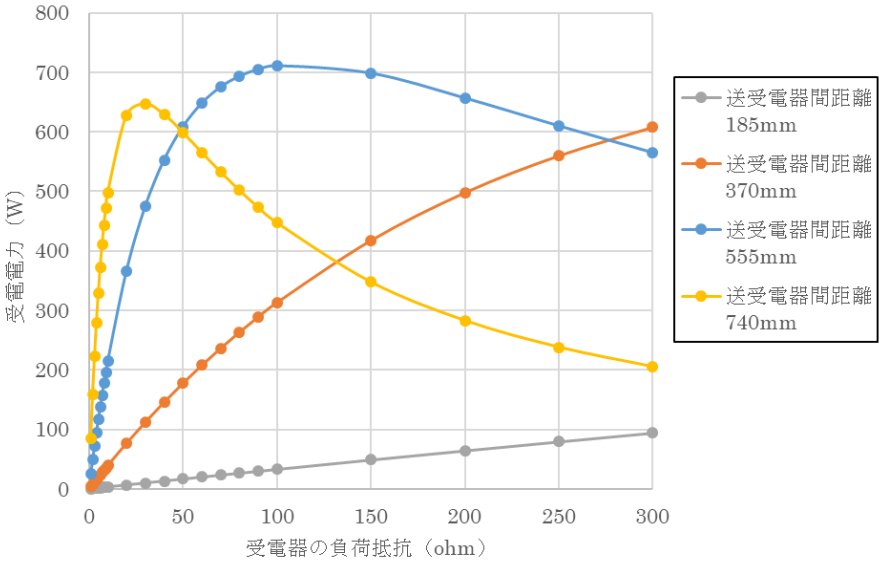


図 2.2-25　受電器の負荷抵抗と受電電力の関係

(d)　「給電効率」、「受電電力」、「受電器の負荷抵抗」の関係性を考慮して、必要な電力を効率よく得ることが可能な受電器の負荷抵抗値を設定する

各送受電器間距離において、多くの電力を効率よく受電器で得られる負荷抵抗値を上記(c)で設定した 0～300 ohm の範囲で検討した。

a)送受電器間距離 185mm

受電器の負荷抵抗と給電効率の関係より、負荷抵抗 100～300 ohm の間において給電効率は 95 %と最も高い値を示す。そのため給電効率のみを考慮するなら、この間の負荷抵抗値を利用すればよい。一方、受電器の負荷抵抗と受電電力の関係より、負荷抵抗値 300 ohm において、受電電力は 94 W で最大となる。そのため、高い給電電力かつ受電電力が高い負荷抵抗値は 300 ohm

を設定する必要がある。

b)送受電器間距離 370mm

受電器の負荷抵抗と給電効率の関係より、負荷抵抗 50～60 ohm の間において給電効率は 87 %と最も高い値を示す。そのため給電効率のみを考慮するなら、この間の負荷抵抗値を利用すればよい。一方、受電器の負荷抵抗と受電電力の関係より、負荷抵抗値 50～60 ohm において、受電電力は 178～208 W となる。負荷抵抗の受電電力が 200 W 以下でよい場合は、負荷抵抗 50～60 ohm の設定が最適と考えられる。しかし、負荷抵抗の受電電力が 200 W 以上の必要な場合は、負荷抵抗を増加させて、受電電力を高くする必要がある。この時、負荷抵抗が増加したことで、給電効率が低下するため、給電効率を犠牲にして受電電力を増加させるかの判断が必要となる。

c)送受電器間距離 555mm

受電器の負荷抵抗と給電効率の関係より、負荷抵抗 20 ohm において給電効率は 70 %最も高い値を示す。そのため給電効率のみを考慮するなら、この負荷抵抗値を利用すればよい。一方、受電器の負荷抵抗と受電電力の関係より、負荷抵抗値 20 ohm において、受電電力は 366 W となる。負荷抵抗の受電電力が 366 W 以下でよい場合は、負荷抵抗 20 ohm の設定が最適と考えられる。しかし、負荷抵抗の受電電力が 366 W 以上の必要な場合は、負荷抵抗を増加させて受電電力を高くする必要がある。受電電力は、負荷抵抗 100 ohm の時、710 W で最大となる。負荷抵抗 100 ohm の時の給電効率は 50 %であるため、最大の給電効率から 20 %） の低下が発生することになる。よって、この点を考慮して設計を行う必要がある。

d)送受電器間距離 740mm

受電器の負荷抵抗と給電効率の関係より、負荷抵抗 10 ohm において給電効率は 49%と最も高い値を示す。そのため給電効率のみを考慮するなら、この負荷抵抗値を利用すればよい。一方、受電器の負荷抵抗と受電電力の関係より、負荷抵抗値 10 ohm において、受電電力は 498 W となる。負荷抵抗の受電電力が 498 W 以下でよい場合は、負荷抵抗 10 ohm の設定が最適と考えられる。しかし、負荷抵抗の受電電力が 498 W 以上の必要な場合は、負荷抵抗を増加させて、受電電力を高くする必要がある。受電電力は、負荷抵抗 30 ohm の時、647 W で最大となる。負荷抵抗 30 ohm の時の給電効率は 36 %であるため、最大の給電効率から 13 %の低下が発生することになる。よって、この点を考慮して設計を行う必要がある。

a)～d)で検討したことから、下記が分かった。

送受電器間距離が長くなると、

- 給電効率が最大値となる負荷抵抗値の幅が狭くなる。
- 負荷抵抗値における最大受電電力が山なりで明確になる。
- 給電効率が最大となる負荷抵抗値、および受電電力が最大となる負荷抵抗値の差が小さくなる。

(e) 送受電器のサイズや位置関係と「給電効率」および「受電電力」を評価する

前述(a)～(d)の項目で行った試設計の結果、「給電効率」・「受電電力」・「受電器の負荷抵抗」の関係を考慮したシステムの設計手順を用いて、給電効率・受電電力・受電器の負荷抵抗における関係性を解析することが可能であることを示せた。また、給電効率・受電電力・受電器の負荷抵抗の関係性を考慮した場合の給電効率・受電電力の設定方法についても示せた。これらの結果か

ら、試設計で利用した送受電器のサイズと位置関係における、給電効率と受電電力の関係性が分かった。このことより、システムの設計手順を用いることで送受電器のサイズと位置関係および給電効率と受電電力の評価が可能となったといえる。

(4) まとめ

本検討では、これまでの開発成果を基にして、無線給電技術の実証試験を行うための技術課題を抽出し、「複雑な系を想定した設計の検討」、「磁界共振結合方式による無線給電システムの設計方法の検討」の二つを実施した。

「複雑な系を想定した設計の検討」では、緩衝材内に複数のセンサーを設置して、その各センサーにそれぞれ無線給電を行うことを想定し、単純な系の設計手順から複雑な系の設計手順を検討して、無線給電の設計方法を示した。また、検討した設計手順を用いて試設計を行った。その結果、複雑な系の設計手順を用いて給電効率を解析することが可能であることが示せた。また、試設計で利用した送受電器のサイズと位置関係における給電効率が分かった。このことより、検討した複雑な系の設計手順を用いることで、送受電器のサイズと位置関係および給電効率の評価が可能になったといえる。

「磁界共振結合方式による無線給電システムの設計方法の検討」では、上記の検討結果を踏まえ、モニタリング機器に必要な電力を無線給電により供給するために、「給電効率」・「受電電力」・「受電器の負荷抵抗」の関係を考慮したシステムの設計手順を検討した。また、検討した設計手順を用いて試設計を行った。検討の結果、検討して示したシステム設計手順を用いて給電効率と受電電力の関係性を解析することが可能であることが示せた。また、給電効率・受電電力・受電器の負荷抵抗の関係性を考慮した場合の給電効率・受電電力の設定方法についても示せた。

さらに、受電電力を増加する方法として、電源電圧を上昇することを示した。このように、給電効率が低い場合においても電源電圧を上昇させることで、送電器に設置したセンサーを稼働させることが可能と考えらえる。

2.2.3 新たなセンサー技術に関する開発動向の調査

(1) 調査方法

新たなセンサー技術に関する調査は、原子力施設の安全原則、安全指針などを刊行している国際原子力機関 IAEA に加え、フィンランド、スウェーデン、米国およびフランスなどの処分事業が進んでいる諸外国の規制当局、実施主体の文献を対象とした。また、放射性廃棄物処分施設のモニタリングに関する国際共同研究である MoDeRn プロジェクトなどの成果を調査対象とした。さらに、現在検討が進められている中深度処分に対する規制要求にモニタリングに関するものが含まれており、地層処分におけるモニタリングの参考になると考えられることから、中深度処分に対する規制関連の文書を調査対象に含めた。

モニタリングに関する国内外の動向調査方法は、一次調査、二次調査の二段階で実施した。一次調査では、モニタリングの計測技術、制約条件、新しいセンサー技術など記載があるか否かに着目して調査文献スクリーニングし、二次調査ではスクリーニングにより残った文献を対象に詳細な調査を実施した。二次調査の対象文献を表 2.2-16 に示す。

表 2.2-16　二次調査の対象文献

No	著者（機関名）	発行年	文献名
1	IAEA	2001	Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste, IAEA-TECDOC-1208
2	原子力規制庁	2017	炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について（改定案）
3	MoDeRn	2013	Case-Studies, Final Report
4	MoDeRn	2013	State of Art Report on Monitoring Technology
5	ANDRA	2005	Dossier 2005 Architecture and management of a geological repository
6	ANDRA	2017	France's State of the Art Distributed Optical Fiber Sensors Qualified for the Monitoring of the French Underground Repository for High Level and Intermediate Level Long Lived Radioactive Wastes
7	ANDRA	2006	フランスの放射性廃棄物地層処分場における無線モニタリング概念の構築（高村ほか、原子力バックエンド研究、Vol.12 No.1-2 Page.11-20）
8	原環センター	2004	地層処分にかかわるモニタリングの研究ー位置付および技術的可能性ー、RWMC-TRJ-04003
9	原環センター	2010	閉鎖時の意思決定における地層処分モニタリングのあり方に関する検討（須山ほか、原子力バックエンド研究、Vol.17 No.2 Page.71-83）
10	原環センター	2018	平成 29 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

(2) モニタリングに関する国内外の動向調査のまとめ

1) モニタリングの計測技術

IAEA（IAEA, 2001）では地層処分におけるモニタリングの代表的なパラメータと測定方法にについて、表 2.2-17 のように整理している。モニタリングの目的としては、処分場構造物の劣化、廃棄体パッケージおよび緩衝材の挙動、ニアフィールドの化学的相互作用、地圏の変化、環境データベースの蓄積および保障措置におよんでおり、代表的測定方法の例を挙げているが、各計測技術についての具体的な記述は見られなかった。

表 2.2-17　代表的なパラメータと測定方法（1/2）（IAEA, 2001）

カテゴリ／ モニタリングの目的	代表的パラメータ	計測位置又は データ入手方法	代表的測定方法
処分場構造物の劣化 処分場構造物／開口部の構造的安定性のモニタリング	岩盤の温度 開口部の変形 (方向および口径、伝播速度) 処分場付近の岩盤の応力変化 水の浸透速度 岩盤支持物の状態 処分場の温度、湿度 埋め戻しおよび密閉材料の再飽和	処分場から開けたボーリング孔からのアクセスを含む処分場内部のモニタリング。現場で設置される、データ送信のための無線信号または地電流（earth current）による装置の使用を含む。 埋め戻した開口部の原位置/遠隔モニタリング	熱電対など 変位検出器 ひずみ／圧力（load）センサー 体積測定 ひずみ／圧力（load）測定 多様な手法 圧力センサー、湿分検出器、地球物理学的手法 (地震波伝播)
廃棄物パッケージおよび緩衝材の挙動 定置した廃棄物パッケージの状況／干渉材の状況のモニタリング	ひずみ、腐食電流 パッケージの温度、パッケージ付近の湿度 排水の放射能 処分場の空気中の廃棄物から発生するガス 緩衝材の再飽和／膨張圧	廃棄物パッケージの原位置／遠隔モニタリング パッケージ付近の環境の原位置／遠隔モニタリング 処分場の廃液の放射能モニタリング 処分場の空気中の放射能およびその他のガスのモニタリング パッケージ付近の環境の原位置／遠隔モニタリング	ひずみ計、電流計 多くの手法がある ガンマ検出など多様 ガスアナライザ 圧力センサー、湿分検出器

表 2.2-17　代表的なパラメータと測定方法（2/2）（IAEA, 2001）

カテゴリ／ モニタリングの目的	代表的パラメータ	計測位置又は データ入手方法	代表的測定方法
ニアフィールドの化学的相互作用	処分場の温度、湿度	処分場のモニタリングの範囲内	温度、湿度 (例：電気伝導率)、圧力
埋め戻しおよび密閉の化学的状態／人工バリアの挙動／コンクリート構造物の健全性／ニアフィールドの環境の変化/坑道壁の表面特性／処分場の再飽和挙動	処分場の地表での鉱物、化学および生物学的変化	処分場内部での定期的サンプリング	多様な分析方法
	排水停止時 (すなわち密閉後) のニアフィールドの水分含有量、圧力、化学の変化	処分場内部からの定期的サンプリングまたは継続的測定	サンプリングまたは継続的測定に基づく多様な手法
地圏の変化 周囲の地圏の変化／人工バリアと岩盤地下水系統の相互作用／アルカリプルームの影響	地下水の圧力および経路の変化	新規または既存のボーリング孔からのアクセス	飽和区域でのピエゾメータなどの圧力監視装置、不飽和区域でのテンシオメータ
	pH、Eh、溶解性蒸発残留物、放射能、微生物活動など地下水化学の変化	同上	多様な手法：ボーリング孔のサンプリング、ガンマ線検出
	岩盤中の重要構造物の力学的挙動の変化	同上	電気機械ゲージ、アコースティックエミッションモニタ
	鉱物学の変化	同上	サンプリング
	熱領域	同上	ボーリング孔の記録
	応力領域	同上、遠隔（remote）技術 (微小音測定、microseismic)	ひずみ／圧力（load）センサー、微小音測定（microseismic）
	地震のモニタリングおよび地震動への応答	処分場内部、地表およびボーリング孔	地震計
環境データベースの蓄積	気象学、水文学など	地表でのモニタリング	多様な手法
保障措置（Safeguards, 発掘などによる核物質の不正な移動）	人工バリアの攪乱	処分場内部および/または地表から	サイト検査 航空写真 衛星調査

一方、MoDeRn（MoDeRn, 2013）では地層処分場モニタリングとして適用可能と考えられる現行の計測技術について、既往の研究を基に、適用事例、適用限界、長期安定性や今後の研究開発の方向性などについて調査されている。そのうち、“処分場モニタリング”として挙げられている計測項目と計測技術を整理したものを表 2.2-18 に示す。文献内では、“地表モニタリング”や“リモートモニタリング”が挙げられているが、操業中ならびに閉鎖直後への適用に適している“処分場モニタリング”と“ボーリング孔モニタリング”が中心に紹介されている。

表 2.2-18　処分場モニタリングとして調査されている計測技術（MoDeRn,2013）

計測項目	計測技術	適用事例（適用国）	備考
温度	熱電対 測温抵抗体（RTD） サーミスタ	Grimsel Test Site（スイス）、Mont Terri Laboratory（スイス）、Äspö Hard Rock Laboratory（スウェーデン）、Bure Research Laboratory（フランス）	
機械的圧力	ひずみゲージ 圧電素子 静電容量型 振動弦 光学式	Grimsel Test Site（スイス）、Äspö Hard Rock Laboratory（スウェーデン）、Mont Terri Underground Rock Laboratory（スイス）	
含水比・湿度	中性子 誘電型 表面張力計	Grimsel Test Site（スイス）、Mont Terri Laboratory（スイス）	
水圧	ピエゾ抵抗型 振動弦 ひずみゲージ LVDT（差動変圧型） 光ファイバー型	Äspö Hard Rock Laboratory（スウェーデン）、Grimsel Test Site（スイス）	
放射線	放射線検出器 シンチレーション検出器 半導体型検出器	HADES underground research facility（ベルギー）	
変位	誘導型 容量型 振動弦型 傾斜計型	Grimsel Test Site（スイス）、Äspö Hard Rock Laboratory（スウェーデン）	
変形	伸縮計 ひずみゲージ 振動弦 光ファイバー型 セオドライト	ONKALO（フィンランド）、Meuse/Haute Marne laboratory（フランス）、Olkiluoto VLJ-repository（フィンランド）、Loviisa VLJ-repository（フィンランド）、Operating waste repository (SFR) in Sweden（スウェーデン）、Interim storage facility for all spent fuel CLAB in Sweden（スウェーデン）、Grimsel Test Site（スイス）	
ガス濃度	ガスクロマトグラフィー 非分散型赤外線分析計	Grimsel Test Site（スイス）、Mont Terri Laboratory（スイス）	
ガス圧力		Grimsel Test Site（スイス）、Mont Terri Laboratory（スイス）	
pH/Eh	ガラス電極 光学式	HADES underground research facility（ベルギー）	
コロイド粒子	トレーサー	Grimsel Test Site（スイス）	

調査結果から、主な計測項目とそれらを計測するための計測技術を整理して表 2.2-19 に示す。なお、計測項目や計測技術を例示しているのみの文献は除外した。これを見ると、センサーについては、ひずみゲージ式のセンサー、振動弦を用いたセンサーなどに加えて、幅広い計測項目に対して光ファイバーセンサーが用いられていることが分かる。

表 2.2-19　主な計測項目と計測技術

計測項目	計測技術	備　考
温度	光ファイバーセンサー 熱電対 測温抵抗体 サーミスタ	温度は無線通信によるデータ伝送が検討されている
湿度	スマートセル	
応力	ひずみゲージ	
ひずみ	振動弦センサー 光ファイバーセンサー	
変位	伸縮計 ひずみゲージ 振動弦センサー 光ファイバーセンサー	変位は無線通信によるデータ伝送が検討されている
含水量	マイクロ波センサー TDR センサー 電気探査トモグラフィ	
圧力	ひずみゲージ 圧力計 光ファイバーセンサー	圧力は無線通信によるデータ伝送が検討されている
間隙水圧	間隙水圧計 振動弦式間隙水圧計	間隙水圧は無線通信によるデータ伝送が検討されている
金属腐食	超音波技術	
放射線	放射線検出器 シンチレーション検出器 半導体型検出器 光ファイバーセンサー	
pH	光ファイバーセンサー イオン選択電極 pH 計	
水素検知	光ファイバーセンサー	
コンクリートのひび割れ	光ファイバーセンサー 画像解析	

2)　モニタリングの制約条件

モニタリングの制約条件については、モニタリングを実施する際の制約条件と、モニタリング機器に求められる耐久性などの要求性能に関する制約条件の記述がみられる。モニタリングの実施に際しての制約条件について言及した文献は複数あるが、IAEA が指摘している「モニタリングプロセスから発生する不利益」を生じさせないことが基本となっている。

IAEA（IAEA, 2001）が指摘している「モニタリングプロセスから発生する不利益」は以下のとおりである。

- モニタリングを行う要員が受ける放射線量
- モニタリング計画が完了されるまでに人工バリアを設置することが遅れた場合に発生する処分場の構成材料の劣化
- モニタリング機器を設置することにより、人工バリア中または坑道の周辺における放射性核種の移行経路が形成されるリスクが増加する可能性
- モニタリングを実施するために処分場へのアクセスが開放されたままになり、人間侵入の可能性あるいは自然または大量集水などによる悪影響の可能性の増大
- 処分場のその他機能への影響

特に、モニタリング機器や通信ケーブルにより、放射性核種の移行経路が形成されることに対しては、事後の工学的対策が困難であるため、各国とも重要な位置付けとしている。

3) モニタリング機器が置かれる環境条件

モニタリング機器が曝される環境条件に対する耐用性について、複数の文献（高村ほか、2006、原環センター、2004 など）で示されている。モニタリング機器が置かれる環境条件には、温度、湿度、圧力、放射線や水質（炭水/塩水）などがあり、地質環境や埋設深度、埋設する廃棄物の種類によって変動するため、モニタリング機器の検討を行う際には、環境条件を改めて整理する必要がある。

モニタリング機器が耐えるべき環境条件に加え、モニタリング機器に求められる性能についても、複数の文献に示されており、以下に列挙する。このうち、モニタリング機器の欠陥や誤ったデータの検知は、モニタリング機器・装置ばかりでなく、クロスチェックができるモニタリングの計画や評価方法などソフト面での対策も必要と考えられる。

- 長期間にわたり、原位置でメンテナンス不要で信頼性のあるモニタリングを実施できる（機器の耐久性と電力供給、計測精度）
- 非常に緩慢な挙動の情報を得ることができる
- モニタリング機器の欠陥や誤ったデータを検知できる
- モニタリング機器そのものが計測パラメータに影響を与えない（あるいは影響が既知である）
- モニタリング機器の設置・撤去が容易である

4) 新たな計測技術

上述した計測技術のうち、光ファイバーセンサー技術に着目し、その動向を整理する。また、直接的な計測技術ではないが、無線伝送技術（無線通信技術と同義）によるデータ伝送について動向を整理する。

(a) 光ファイバーセンサー技術

光ファイバーセンサーは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行われている。ドイツでは光ファイバーセンサーによる温度計測が検討されている。また、フランス（MoDeRn, 2013 ; ANDRA, 2005）では、光ファイバーセンサーによる温度計測、ひずみ計測が検討されており、センサーの配置例が示されている。光ファイバーセンサーを用いたγ線分布計測も検討されているが、開発段階の技術である。また、フランスにおける研究（ANDRA, 2017）においては、光ファイバーセンサーを水素センサー、pH 計測に適用する検討が行われている。いずれも、光ファイバーや被覆に何らかの工夫を必要とするものであるが、具体的な仕様の例が示されている。

スイスにおいても、光ファイバーセンサーによって間隙水圧を分布計測することが試みられている（榊ら, 2017）。光ファイバーセンサーによる圧力分布計測は、近年研究が盛んになりつつある分野であり、今後益々研究開発が進められるものと推察される。

我が国においては、中深度処分を対象としたモニタリングの研究（原環センター, 2018）において、光ファイバーセンサーの適用性が検討されている。具体的には、地下環境において実規模大の模擬施設、坑道を用いたひずみと温度の分布の計測が実施されている。また、光ファイバーセンサーによる圧力分布計測に向けた室内試験が実施されている。圧力分布の計測は技術開発段階である。

(b) 無線伝送技術

無線伝送技術は、バリア材を貫通する通信ケーブルを不要とする技術として、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行われている。

フランスでは、廃棄体近傍でのモニタリングデータを人間がアクセス可能なサービス坑道まで無線伝送技術により伝送することが検討されており、その概念が示されている（ANDRA, 2005）。さらに、無線伝送装置の配置検討、通信性能を確認するための実験的検討が実施されている（高村ほか、2006）。

無線伝送装置は、フランスに加えて、ドイツ、フィンランドおよびスウェーデンにおける実証施設、地下研究施設において実験に供されている（MoDeRn, 2013b；原環センター, 2004）。また、Modern2020 では、無線伝送装置への電源供給について検討が行われており、無線伝送技術を活用したモニタリングの実行性が高まっていると考えられる。我が国においても、バリア性能に影響を与えることなく実施可能なモニタリングの手段として、無線伝送技術の検討が行われており、無線伝送装置を用いたモニタリングの概念が示されているとともに、装置の小型化が進められている（須山ほか、2010；原環センター, 2004）。

(3) 新たな技術の実用化レベルや開発動向の調査

1) 光ファイバーセンサーの原理と概要

長期耐久性などの特長を有する光ファイバーを利用した技術について整理し、最新の研究動向を含めて文献調査するとともに、地層処分のモニタリングに資すると考えられるその他のセンシング技術について文献を調査し、整理した。

光ファイバーセンサーは、光が持つ性質（反射、屈折、散乱、回折、偏光、干渉、共振、減衰）を利用して、角速度、温度、ひずみ、電流、放射線などの様々な物理量の計測に適用することができる。これらの光ファイバーセンサーは、その構成から、単に光ファイバーを信号経路として使用するタイプから、図 2.2-26 に示すように、光ファイバーのうちのあらかじめ加工された一部をセンサーとするタイプ、光ファイバーそのものをセンサーとして機能させるタイプなどに大別される（保立ほか、2012）。ここでは、変形やひずみなどの物理量を対象としたセンサーを主な対象とし、これらをポイント型・分布型に分けて記載する。代表的な光ファイバーセンサーの例を表 2.2-20 に示す。

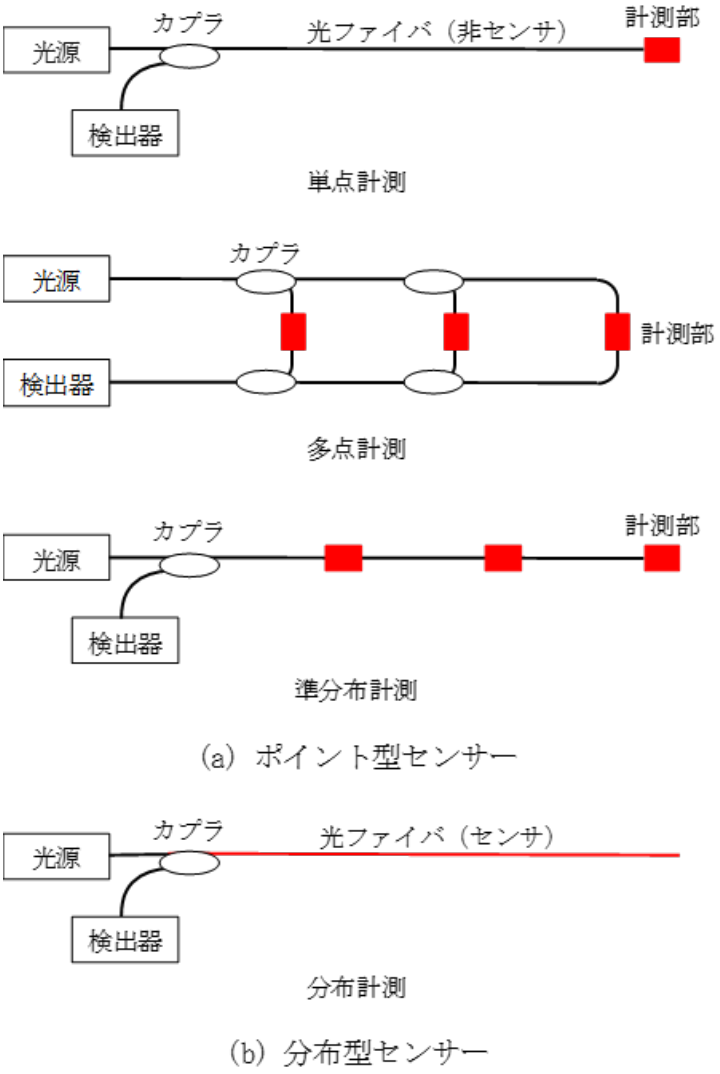


図 2.2-26　光ファイバーセンサーの区分

表 2.2-20　光ファイバーを用いたセンサーの例

区分	方式	原理	計測物理量の例
ポイント型センサー （単点計測）	ファブリーペローなど	共振	ひずみ 温度 放射線
ポイント型センサー （準分布計測）	FBG（Fiber Bragg Grating）など	反射	ひずみ 温度 放射線 水素 pH
分布型センサー	BOTDR（Brillouin Optical Time Domain Reflectmetry） BOTDA（Brillouin Optical Time Domain Analysis）など	散乱	ひずみ 温度 圧力 放射線 水素

なお、光ファイバーセンサーに関する一般的な特徴と留意点を以下に示す。

（特長）

- 細径・軽量、可とう性、高強度・耐久性・耐食性、
- パッシブな計測部（計測部に電源が不要）、耐電圧性・耐電磁誘導性
- 安全防爆性、遠隔計測

（留意点）

- 急峻な曲げに対して、破損する恐れがある。破損せずとも、光の透過損失量が大きくなり計測精度が悪くなる。
- 光ファイバー同士を繋げる場合には、専用機械で融着接続をする必要がある。
- 光ファイバー同士を繋げる場合には、その種類（シングルモードやマルチモードなど）やモードフィールド径（光の伝搬範囲）を揃える必要がある。

2) 光ファイバーセンサーに関する注目すべき研究

(a) 熱・ひずみ・応力などに関する調査

研究 1（ANDRA, 2017）：分布型センサーは、一本の光ファイバーで多点計測を実現できる特長を有し、ケーブル断面を小さくすることができる。バリア機能への影響を最低限に抑えられる点で、放射性廃棄物処分施設への適用が検討されている。

研究 2（MoDeRn, 2013b）：近年のモニタリング技術を概観するうえで最適な資料として取りまとめられている。

研究 3（Piccolo et al., 2018）：光ファイバーセンサーを放射性廃棄物処分施設へ適用する場合、光ファイバーの耐久性や光の減衰量が増えるなどの影響が懸念されている。ブリルアン散乱を利用した分布型光ファイバーセンサーの場合には、ブリルアン波形にも影響を与えることをあまり知られていない。また、規制側（IRSN）と実施側（ANDRA）の共著である。

研究 4、研究 5（榊ほか、2017、榊ほか、2018)）：分布型センサーのうち、温度センサーは長きにわたって研究が進められ、センサーの設置が比較的容易（ひずみセンサーと違って対象物との一体性を必要としない）なため、適用事例も多い。NAGRA も積極的に温度センサーに取り組んでいる。

(b) 放射線関係に関する調査

研究 1（Jia et al., 2018）：シンチレーションファイバーを用いた分布型の光ファイバー放射線センサーは、福島第一原子力発電所事故後の環境中のホットスポット探索装置などに適用され実用化が進んでいる。材質はプラスチック（有機物）である。無機シンチレーションファイバーの製作・評価のために、長寿命なシンチレーション材料として注目された。

研究 2（Esposito et al.,2018）：光ファイバーを用いた放射線センサーのうちシンチレータを用いない（光ファイバーが有感部となる）タイプの開発検討が進められている。文献では、異なる材質の光ファイバーに対して放射線照射特性を比較した結果を報告している。LPG（Long Period Grating）は、FBG の有感部がコア部のみであるのに対し、コア部とクラッド部の両方が有感部となるため、FBG よりも放射線照射に対する感度が高くなるセンサーとして期待されている。低線量域の光ファイバー放射線センサーの開発動向として注目される。

研究 3（Francesca et al.,2018）：シンチレータを用いないタイプの光ファイバー放射線センサーが大型加速器のトンネル内の放射線環境モニタリング用に開発されている。広域の放射線計測を行う技術として開発が進められており動向が注目される。

研究 4（Perez-Herrera et al.,2018）：シンチレータを用いないタイプの光ファイバー放射線センサーの照射後の特性の変化を比較し、新しい放射線センサーの可能性を検討する試みが行われ

ている。光リング共振器を構成した精密な比較が行われており放射線誘起損失のメカニズム解明に向けており注目されている。

研究 5（Gusarov et al.,2013）：光ファイバーの FBG や LPG に対する放射線照射影響が整理されており、感度の高い放射線センサーに適した方式に言及していたため注目された。

研究 6（Li Vecchi et al.,2018）：全長 200m の分布型光ファイバー放射線センサーを試用した実験結果の報告で、更に全長を伸ばしてモニタリングすると展望しており、動向が注目された。

研究 7（Gambhir et al.,2015）：感度の高い光ファイバー放射線センサーの候補として期待される TAP-LPG に関するレビュー文献で、低線量モニタリング用の光ファイバー放射線センサーの方式として動向が注目される。

研究 8（Ding et al.,2018）：OFDR 方式の分布型光ファイバーセンサーに関するレビュー文献である。先行する歪みや温度、振動などの計測と並んで、放射線計測が取り上げられている。

研究 9（Ito et al.,2014）：加速器施設の放射線モニタリングの他に、原子力発電所の放射線モニタリングへ光ファイバー放射線センサーを適用する検討も行われている。福島第一原子力発電所の廃炉に向けて原子炉圧力容器・格納容器内の放射線量を計測する方法に関する文献であり、光ファイバーの先端に小型のシンチレータを接合する放射線センサーの実現性が検討されている。放射線の計測範囲が非常に高い（kGy/h の桁）が、放射線耐性の高い材料の情報が集まる。

(c) その他技術に関する調査

研究 1（Chow et al., 2018）：化学成分を検知するための光ファイバーセンサーは、分光分析を用いるなど、特定の物質に反応する材料を併用するなど、これまで主にポイント型であった。最近、ブリルアン散乱を利用した新たな取り組みが散見されている。これが実現されれば、分布型の化学センサーの実現に大きく近づくと思われ、その取り組みの一つとして、ブリルアン散乱の研究で世界的に著名なスイス連邦工科大の Thévenaz のグループの研究が示されている。

研究 2（Handerek et al.,2018）：最近の分布型光ファイバーセンサーの大きな潮流として DAS（Distributed Acoustic Sensing）が挙げられる。既設の通信用光ファイバーを活用しながら、計測方式を改善することで振動分布をとらえようとする試みがなされている。一方で、光ファイバー側を改善することで、精度向上をねらったアプローチとして、計測器メーカ（FO Tech 社）と光ファイバメーカ（OFS 社）の取り組みが示されている。

研究 3（Ohanian et al.,2018）：米国 Luna 社は、NASA のスピンオフ企業で、航空宇宙分野への光ファイバーセンサー技術（主にポイント型）をこれまで牽引してきた分野のリーディングカンパニーと言える。最近、FBG アナライザーメーカーとして著名な MicronOptics 社を買収するなど積極的な姿勢を崩していない。彼らが新たなコンセプトとして、アナライザー部分をチップ化しようとする試みについて報告されている。

研究 4（Szostkiewicz et al.,2018）：棒状のものに沿って複数平行設置された分布型光ファイバーセンサーの計測結果から、棒の曲げ変形を算出し、形状センサーとして利用する試みがこれまで幾度となくなされてきた。主に、医療用途（カテーテルなど）を想定した試みであるが、ブリルアン散乱を利用した計測技術によれば、精度的に実現が困難であった。取り組みは、計測技術としてレイリー散乱を利用した高精度分布計測技術（φOTDR）と、光ファイバー内に既に複数のコアをもつマルチコアファイバーを利用してこれまでの課題を克服しようとする試みである。

(d) その他のセンシング技術

光ファイバー以外のセンシング技術から処分場のモニタリングへの適用可能性のある技術に着眼した。一覧を表 2.2-21 に示す。

表 2.2-21　その他のセンシング技術の例

項　目	モニタリング量	確認項目	着眼点
ガス検知	ガス濃度（ppm）	・空気中のガス濃度が規制値内であるか	・廃棄体や人工バリアからのガスの漏洩を検知する手段となる
無線伝送	ー	（封止空間内部のセンサーデータ伝送）	・閉鎖後の内部の状態を非破壊でモニタリングする際に必要
放射線	放射線（Gy/y）、放射能（Bq/g）	・放射線、放射能の漏洩が規制値内か ・可視化技術	・漏洩がないことを確認するために必要 ・閉鎖後の内部の状態を非破壊でモニタリングする際に必要
3D イメージスキャナ	変位（mm）	・面の変位が所定の範囲内か	構造物の異常を検知するため
MMS	変位（mm）	・面の変位が所定の範囲内か	構造物の異常を検知するため
近赤外線	元素濃度（ppm）	・構造表面の劣化に係る元素濃度が所定の範囲内か	構造物表面の劣化を推定するため

・ガス検知

廃棄体からは微量の水素ガスが放出されるため、地下埋設施設内の廃棄体周辺の水素ガス濃度が爆発限界を超えないことを長期間モニタリングすることが重要である。水素ガス検知のために、目的の空間(空気)中にレーザービームを照射しラマン光強度を検出するライダー装置を用いて、レーザービームに沿った水素濃度分布や水分濃度分布が計測された例がある(Anasthase Limery et al.,2017)。フランスの放射性廃棄物管理機関である ANDRA が研究に関与しており動向が注目される。

・無線伝送

ケーブルによってバリア機能を損なうことがない無線伝送技術は、放射性廃棄物処分施設への適用に最適な技術の一つで、手法や対象の異なる無線伝送について広く取りまとめられている。無線通信の実現にあたっては、長期にわたる電源確保が課題である。電池に代わる手段をとりまとめている。このため、Modern2020 では、電池に代わる手段をとりまとめている。

・放射線

研究 1（古田, 2018）：ニアフィールドでは主にベータ線とガンマ線がモニタリング対象になると考えられる。エネルギーの低いベータ線を計測する液体シンチレーション法を代替する固体のプラスチックシンチレータを用いた方法に関する提案で、ベータ線の原位置計測に繋がる要素技術として注目される。

研究 2（Bonneville et al., 2017）：貫通力の高い放射線である宇宙線ミューオンによる地中可視化（ラジオグラフィ）技術の開発が進んでいる。ボアホール内でミューオンを検出する研究に関する文献で米国のロスアラモス研究所が関与している点で注目される。

3)　まとめ

長期耐久性を有し、分布型計測が可能などの特長がある光ファイバーを利用した技術について整理し、最新の研究動向を含めて文献調査した。これまでに多くの方式（原理）を用いた光ファイバーセンサーによって、様々な物理量に適用されてきた。表 2.2-22 に、調査で確認された技術成熟度レベル（Technology Readiness Level; TRL）とともに示す。計測技術としては、ポイント型よりも分布型センサーの事例が多かった。これは、地層処分場への取り組みにあたっては、光

ファイバーの長期耐久性よりも、分布型計測ができる点が注目されているためである。一本の光ファイバーで全長にわたった多チャンネルでの計測が可能であり、バリア機能への影響低減が実現できることが期待されている。

地層処分場に対するモニタリングにあたっては、THMC（Thermal, Hydraulic, Mechanical and Chemical）の視点が重要である。その中で、ひずみ計測（Mechanical）や温度計測（Thermal）に対する実績は数多く、TRL も総じて高いが、化学計測（Chemical）への取り組みはこれからと言える。また、水（Hydraulic）に関する計測は、温度の変化（Thermal）、間隙水圧の計測（Mechanical）、溶けている化学物質の検知（Chemical）などでの代替が考えられているが、単一の物理量ではなく複数の物理量からモニタリングすることが一つの解決手段である。その点では、ブリルアン散乱とレイリー散乱によるハイブリッド計測によって二つの物理量を導出する方法は今後注目に値する。

また、計測方式そのものではなく、使用方法を改善することによって高度化を図るアプローチも期待される。例えば、文献（榊ら, 2017）、（榊ら, 2018）などのように、アクティブな加熱に対する温度変化をラマン散乱による温度計測で把握することで、熱伝導率の違う箇所として欠陥部を検知する方法である。

また、地層処分場のモニタリングに資すると考えられる以下のセンシング技術についての文献も調査した。こうした技術は他分野（航空宇宙、自動車、防衛など）において日進月歩であり、特にレーザー測量技術は無人航空機（UAV）に搭載して広範囲を無人計測する技術も実用化されており一層小型化され適用範囲が拡がると期待される。一方、無線伝送については、地層処分分野で期待される仕様（超長寿命、低消費電力、低頻度な伝送など）が特殊であることから、同分野における取組が欠かせない技術領域である。

- ガス検知：ライダーによるラマン散乱光分布をもとに、気中の水素と水蒸気濃度分布をセンシング。
- 無線伝送：低周波数帯域において、短距離（～30 m）・中距離（～100 m）・長距離（100 m～）における地中無線伝送技術を開発。センシング技術そのものではないが、バリア機能に影響を与えないデータ伝送手段として期待される。
- 放射線：放射線と物質の相互作用（電離、励起、感光など）を利用したセンシング。
- 3Dイメージスキャナ：回転するレーザー距離計によって対象表面の3次元座標値（点群データ）をセンシング。
- MMS（Mobile Mapping System）：3Dイメージスキャナに加えてカメラを搭載した移動体で、走行しながらトンネル覆工などの情報（3次元座標値、画像など）をセンシング。
- 近赤外線：物質固有の波長が吸収される特性を利用して、含有成分と濃度をセンシング。

表 2.2-22　光ファイバーセンサー技術の技術成熟度（TRL）

計測物理量	方式		TRL
ひずみ	ポイント型	ファブリーペロー	
	ポイント型	FBG	
	分布型	レイリー散乱	5
	分布型	ブリルアン散乱	5
温度	ポイント型	FBG	
	分布型	ブリルアン散乱	6
	分布型	ラマン散乱	6
圧力	ポイント型	ファブリーペロー	
	ポイント型	FBG	
	分布型	レイリー散乱	
放射線	ポイント型	FBG	
	分布型	レイリー散乱	3
	分布型	ブリルアン散乱	3
水素濃度	ポイント型	FBG	
	分布型	レイリー散乱	3
	分布型	ブリルアン散乱	3
pH	ポイント型	FBG	

TRL 3：Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof of concept　技術的な概念モデルが定量的に検討されている。

TRL 4：Component/subsystem validation in laboratory environment　技術要素としての実証モデルが実験室レベルで試験されている。

TRL 5：System/subsystem/component validation in relevant environment　技術要素としての実証モデルが、実際の使用環境に近い条件のもとで試験されている。

TRL 6：System/subsystem model or prototyping demonstration in a relevant end-to-end environment　システムとして実証モデルが試験されている。

参考文献

SKB（2010a）: Design and production of the KBS-3 repository, SKB TR-10-12
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
SSM（2014）: Technical Note Review of Performance Confirmation Programs and Potential Roles in SSM's Current Review of SKB's License Application – Main Review Phase, 2014:40
SKB (2010b) : Design production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels, SKB TR-10-16
POSIVA（2012a）: Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Design Basis 2012, POSIVA2012-03
POSIVA（2012b）: Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto -Description of the Disposal System 2012, POSIVA2012-05
STUK（2013）: Guide YVLD.5 (2013) DISPOSAL OF NUCLEAR WAST
POSIVA（2012c）: Monitoring at Olkiluoto – a Programme for the Period Before Repository Operation, POSIVA 2012-01
POSIVA（2012d）: Production Line Report Buffer Production Line 2012 Design, Production and Initial State of the Buffer, POSIVA 2012-17
POSIVA（2013）: Backfill Production Line 2012, Design, Production and Initial State of the Deposition Tunnel Backfill and Plug, POSIVA 2012-18
POSIVA（2012e）: Design, Production and Initial State of the Underground Disposal Facility Closure, POSIVA 2012-19,2012e
POSIVA (2018) : Olkiluodon ja Loviisan voimalaitosten ydinjätehuollon ohjelma vuosille 2019-2021
POSIVA（2015）: Designing Commissioning and Monitoring of 40% Scale bentonite buffer test, Working Report 2015-08, 2015
ASN（2008）: Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde
ANDRA（2016a）: Dossier d'option de sûreté – Partie après fermeture (DOS-AF)
ANDRA（2016b）: Dossier d'options de sûreté – Partie exploitation (DOS-Expl), 2016b
ENSI（2009）: Specific design principles for deep geological repositories and requirements for the safety case, ENSI-G03/e
NAGRA（2016）: The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland, Technical Report 16-02
CNSC (2018) : Assessing the Long Term Safety of Radioactive Waste Management, Regulatory document REGDOC-2.11-1, Volume II.
NWMO（2012）: Development of a Monitoring Program for a Deep Geological Repository for Used Nuclear Fuel, NWMO TR-2012-18
NWMO（2016）: Deep Geological Repository Conceptual Design Report Crystalline / Sedimentary Rock Environment, APM-REP-00440-0015 R001

MoDeRn（2013）: Monitoring Reference Framework report, MODERN DELIVERABLE (D-1.2), Final
MoDeRn（2014）: The MoDeRn Project Synthesis, MODERN DELIVERABLE (D-6.1)
MODERN2020（2017a）: Deliverable D2.1: Repository Monitoring Strategies and Screening Methodologies
MODERN2020（2017b）: Deliverable n°5.1 Monitoring the Underground: What role for repository monitoring in the governance of geological disposal for nuclear waste?
MODERN2020（2018）: Deliverable D3.6 Reliability and qualification of components Work Package 3, Task 6
Svemar C, Johannesson L-E, Grahm P, Svensson D, Kristensson O, Lönnqvist M, Nilsson U,（2016）: Prototype Repository. Opening and retrieval of outer section of Prototype Repository at Äspö Hard Rock Laboratory. Summary report. SKB TR-13-22, Svensk Kärnbränslehanterin AB
Grahm P, Malm R, Eriksson D（2015）: System design and full-scale testing of the Dome Plug for KBS-3V deposition tunnels. Main report. SKB TR-14-23, Svensk Kärnbränslehantering AB
Malm R and Enzell J（2018）: Full-scale test of the Dome Plug for KBS-3V deposition tunnels -Main project report. SKB TR-18-02. Svensk Kärnbränslehantering AB
ANDRA（2005）: Dossier 2005,Architecture and management of a geological repository
ANDRA（2017）: France's State of the Art Distributed Optical Fibre Sensors Qualified for the Monitoring of the French Underground Repository for High Level and Intermediate Level Long Lived RadioactiveWastes
Limery, A., Cezard, N., Fleury, D., Goular, D., Planchat, C., Bertrand, J. and Hauchecorne, A.（2017）: Raman lidar for hydrogen gas concentration monitoring and future radioactive waste management, In Optics Express 30636, Optical Society of America
Bonneville, S., Kouzes, R.T., Yamaoka, J., Rowe, C., Guardincerri, E., Durham, J.M., Morris, C.L., Poulson, D.C., Plaud-Ramos, K., Morley, D.J., Bacon, J.D., Bynes, J., Cercillieux, J., Ketter, C., Le, K., Mostafanezhad, I., Varner, G., Flygare and J., Lintereur, A.T.（2017）: A novel muon detector for borehole density tomography, Nuclea Instruments and Methods in Physics Research A 851.
Ito, C., Naito, H., Ohba, H., Saeki, M., Ito, K., Ishikawa, T., Nishimura, A., Wakaida, I. and Sekine, T.（2014）: Proceedings of the 22nd International Conference on Nuclear Engineering ICON22.
Chow, D. M., Yang, Z., Soto, M. A. and Thévenaz, L.（2018）: Distributed Acoustic Impedance Measurement Based On Forward Stimulated Brillouin Scattering, In Optical Fiber Sensors (p. TuC4), Optical Society of America.
Esposito, F., Stancalie, A., Ranjan, R., Negut, D., Campopiano, S., Sporea, D., and Iadicicc, A.（2018）: Gamma radiation effects on Long Period Gratings and transmitted power in different optical fibers: towards dosimetry applications, In Optical Fiber Sensors (p. TuE85), Optical Society of America.
Francesca, D.D, Vecchi, G.L., Kadi, Y., & Brugger, M.（2018）: Implimentation of Optical Fiber based Dosimetry at CERN, In Optical Fiber Sensors (p.WC1), Optical Society of America
権田貴紀、佐光裕哉、元谷卓、道木加絵、鳥井昭宏（2018）:「磁界共振結合型海水中非接触給電

における防水ケース内の空気層の効果と電力伝送の評価」，日本 AEM 学会誌, Vol. 26, No.1
Gusarov, A. and Hoeffgen, S.K.（2013）: Radiation Effects on Fiber Gratings, In IEEE Transaction on Nuclear Science
平松敏幸、黄孝亮、加藤昌、居村岳広、堀洋一（2015）：ワイヤレス給電における送電側による最大効率と受電側による所望受電電力の独立制御，電気学会論文誌 D, Vol. 135, No.8, pp. 847-854
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
Handerek, V. A., Karimi, M., Nkansah, A., Yau, A., Westbrook, P. S., Feder, K. S. & Simoff, D. A.,（2018）: Improved Optical Power Budget in Distributed Acoustic Sensing Using Enhanced Scattering Optical Fibre, In Optical Fiber Sensors (p. TuC5), Optical Society of America, 2018.
居村岳広（2014）: 磁界共振結合を用いた複数負荷への一括ワイヤレス給電に関する研究，電気学会論文誌 D , Vol. 134, No. 6 pp. 625-633
IAEA（2011）: Monitoring of geological repositories for high level radiooactive waste, IAEA - TECDOC-1208, 2001
原子力発電環境整備機構（2011）: 地層処分事業の安全確保（2010 年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－、2011 年 9 月.
Jia, M., Wen, J., Jiang, D., Guo, Q., Xiao, Z., Luo, W., Pang, F., Huang, S., Chen, Z. and Wang, T.（2018）: Ce-doped scintillationg fiber based yttrium aluminasilicate glass for radiation detection, Optical Fiber Sensors (p.TuE75), Optical Society of America.
Vecchi, G.L., Francesca, D.D., Ferraro, R., Danzeca, S., Stein, O., Kadi, Y. and Brugger, M.（2018）: Distributed Optical Fiber Radiation Sensing at CERN, 9th International Particle Accelerator Conference (p.2039).
MoDeRn（2013a）,Case-Studies, Final Report
MoDeRn（2013b）,State of Art Report on Monitoring Technology
Modern2020：WP3 - R&D on monitoring technologies
http://www.modern2020.eu/activities/wp3-rd-on-monitoring-technologies.html（参照：2019 年 3 月 28 日）
Gambhir, M. and Gupta, S.（2015）: Review of Turn around Point Long Period Fiber Gratings, In Jounal of Sensor Technology, 2015, 5, 81-89.
原子力規制庁（2017）：炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について（改定案）、第 27 回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム、参考資料 27-2-2、2017 年 11 月 2 日
Ohanian, O. J., Yakusheva, A. A., Kreger, S. T., Kominsky, D., Soller, B. J., Tran, M. & Bowers, J. E.（2018）: OFDR on Photonic Circuits: Fiber Optic Sensing Infrastructure and Applications, In Optical Fiber Sensors (p. WB1), Optical Society of America.
Piccolo, A., Delepine-Lesoille, S., Landolt, M., Osmond, M., Poirier, S., Planes, I. & Lecieux, Y.（2018）: Combined Radiation and Temperature Effects on Brillouin Scattering based Sensing with Ge-Doped Optical Fibers, In Optical Fiber Sensors (p. WF44), Optical Society of America.
Perez-Herrera, R.A., Stancalie, A., Cabezudo, P., Sporea, D., Negut, D., & Lopez-Amo, M.（2018）: Gamma Radiation Measurements using an Optical Fiber Laser, In Optical Fiber Sensors (p.WF37), Optical Society of America.
原子力環境整備促進・資金管理センター（2004）：地層処分にかかわるモニタリングの研究－位

置付及び技術的可能性ー、RWMC-TRJ-04003
原子力環境整備促進・資金管理センター（2010）：平成 21 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 3 分冊）ーモニタリング技術の開発ー、平成 22 年 3 月
原子力環境整備促進・資金管理センター（2011）：平成 22 年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 3 分冊）ーモニタリング技術の開発ー、平成 23 年 3 月
原子力環境整備促進・資金管理センター（2012）：平成 23 年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 3 分冊）ーモニタリング技術の開発ー、平成 24 年 3 月
原子力環境整備促進・資金管理センター（2013）：平成 24 年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 ーモニタリング技術の開発ー、平成 25 年 3 月
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（2015）：平成 26 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 27 年 3 月
原子力環境整備促進・資金管理センター（2016）：平成 27 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 28 年 3 月
原子力環境整備促進・資金管理センター（2017）：平成 28 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 29 年 3 月
原子力環境整備促進・資金管理センター（2018a）：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（2018b）：平成 29 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
須山康宏、田辺博三、江藤次郎、吉村公孝（2010）：閉鎖時の意思決定における地層処分モニタリングのあり方に関する検討、原子力バックエンド研究 Vol.17 No.2 Page.71-83、2010
榊利博, Berrak Firat-Lüthi, Tobias Vogt, 丹生屋純夫, 西村政展, 鵜山雅夫（2017）：光ファイバ熱伝導率計の計測範囲の実験的評価, 土木学会第 72 回年次学術講演会(平成 29 年 9 月), IV-058
榊利博, Berrak Firat-Lüthi, Tobias Vogt, 鵜山雅夫, 西村政展, 丹生屋純夫（2018）：加熱型光ファイバケーブルによる緩衝材未充填部の検出, 土木学会第 73 回年次学術講演会(平成 30 年 8 月), CS7-028.
Szostkiewicz, L., Yang, Z., Soto, M. A., Dominguez-Lopez, A., Pytel, A., Kolakowska, A. & Nasilowski, T.（2018）:High-Resolution Distributed Differential Curvature Measurement Based on Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry and Multi-Core Fiber, In Optical Fiber Sensors (p. WC4), Optical Society of America
高村尚、奥津一夫、Jean-Louis Gaussen、新保弘（2006）：フランスの放射性廃棄物地層処分場における無線モニタリング概念の構築、原子力バックエンド研究、Vol.12 No.1-2 Page.11-20
古田悦子（2018）：β線測定用蛍光素材の開発、Isotope News、2018 年 2 月号、No.755
Ding, Z., Wang, C., Liu, K., Jiang, J., Yang, D., Pan, G., Pu, Z. and Liu, T.（2018）: In Sensors 2018, 18, p1072

3. 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、我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、我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・整理する。

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）を施し、地層処分事業期間の長期にわたって放射性核種の閉じ込め機能を維持することが期待されている。また、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）や母岩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。一方で、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、本事業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りうること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、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。

具体的には、処分システムの長期安全性への影響を、シーリングシステムに設定される安全機能への影響と置き換え、これを軸とし、安全機能へ影響を与える因子・プロセスを、我が国のジェネリックな地質環境条件に基づき網羅的に整理した上で、シーリングシステムが卓越した移行経路となりうるシナリオを整理する。さらに、整理されたシナリオに基づき、安全機能に対しての影響（およびその幅）を評価する。最終的に、これらの影響評価から、シーリングシステムが卓越した移行経路となりうるシナリオの蓋然性を示した上で、シーリングシステムに求める安全機能を提示するとともに、設計要件を定める上での考え方の提示を行う。

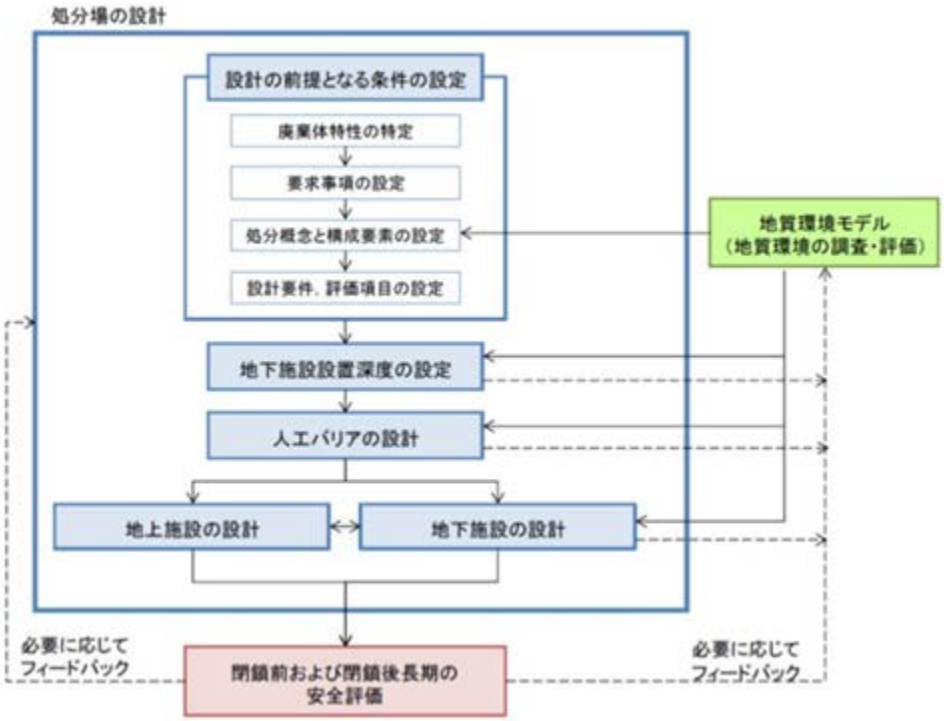


図 3.1-1　処分場の設計フロー（NUMO、2018）

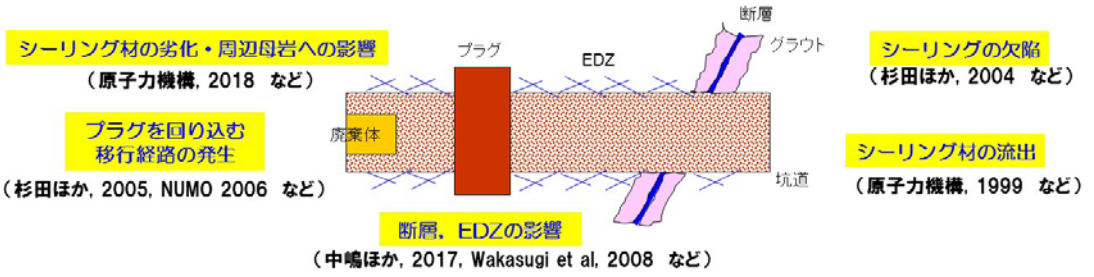


図 3.1-2　シーリングシステムが卓越した移行経路となりうる構造・要因

3.1.2　実施内容

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。なお 3.1.1 で示したように、本事業ではシーリングシステムが卓越した移行経路と成りうる場合を想定したシナリオに基づき、シナリオを構成する諸現象が地層処分システムの長期安全性に及ぼす影響度を把握することで、シーリングシステムの長期性能を評価することを目的の一つとしているため、このような評価に関する諸外国の事例調査も併せて実施した。

3.1.3　シーリングシステムの求める安全機能

スウェーデンの SR-Site においては、処分システムの構成要素として、キャニスタ、緩衝材、処分トンネル埋め戻し部（Deposition tunnel backfill）、母岩、生活圏が考えられており、各構成要素に対し、放射性核種の「閉じ込め」、「遅延」に関わる安全機能が設定されており、これら構成要素の安全機能が発揮されることにより、処分システムの安全性を確保されるものとしている（SKB, 2011）。このうち、処分トンネル埋め戻し部が卓越した移行経路となることを抑制することへの安全機能として、移流の制限（Limited advective transport）と収着性能（Sorb radionuclide）を設定している（図 3.1-3）。また、評価期間にわたり、これら安全機能が機能しているか否かを評価するために、定量的な指標（Safety function indicators）および基準（Safety function indicator criteria）が設定されている。一方、プラグ（コンクリートプラグ）には、閉鎖後、処分場が再冠水し埋め戻し材が十分に膨潤する期間（約 100 年）、プラグを介した水の移動を抑制することが求められている。このように、スウェーデンの SR-Site では、主に埋め戻し部が放射性物質の移行経路となりうることを想定した安全機能が設定されている。ただし、スウェーデンで採用されている KBS-3 の処分概念では、100 万年という評価期間の中で、使用済燃料または放射性物質をキャニスタ内に閉じ込めることを基本としており、埋め戻し材に求められている「遅延」に関わる安全機能は、キャニスタが損傷し、放射性核種が放出されることを想定した場合に求める安全機能である。

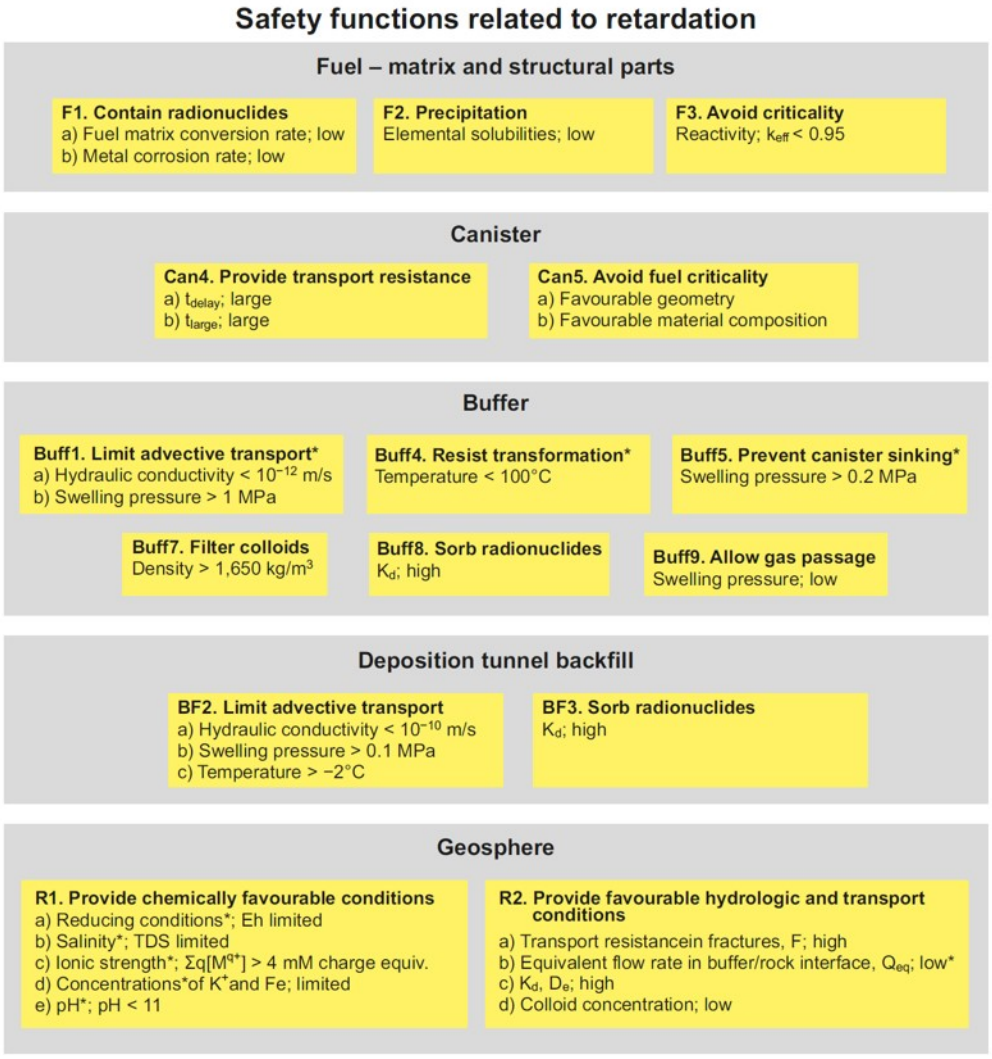


図 3.1-3　遅延に関わる安全機能
（SKB, 2011）

フィンランドにおいては、図 3.1-4 に示すような概念に基づき、処分システムの長期安全性を確保することとしている。スウェーデンと同様に、キャニスタ損傷時の放射性核種の遅延が二次的な安全機能と設定されており、図 3.1-5 に示す処分システムの構成要素（キャニスタ、緩衝材、処分トンネル埋め戻し材（Tunnel backfill）、母岩、閉鎖材（Closure））のうち処分トンネル埋め戻し部に対し、キャニスタ損傷時において放射性核種の放出を制限、遅延することを安全機能として設定している（表 3.1-1）。

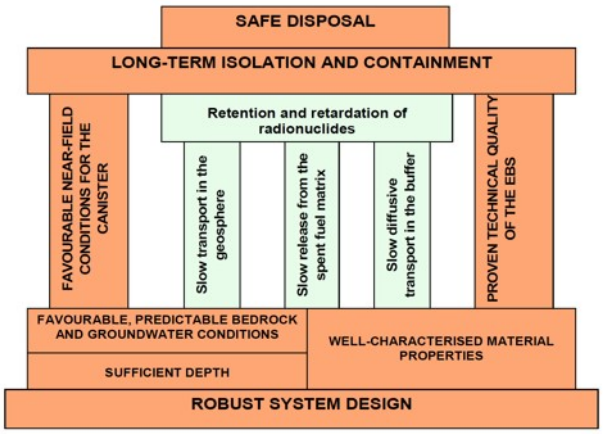


図 3.1-4　KBS-3 における処分システム安全性確保の概念
（オレンジ：一次的な安全性を確保するための特性、グリーン：二次的な安全性を確保するための特性）（POSIVA、2012a）

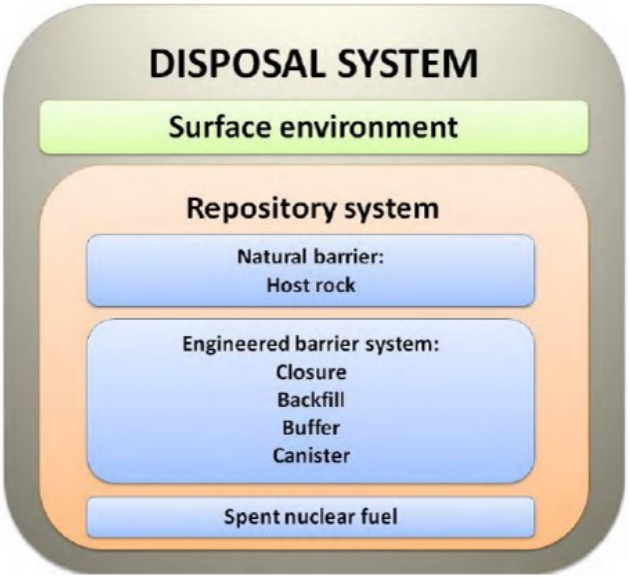


図 3.1-5　フィンランドにおける処分システムの構成要素
（POSIVA、2012a）

表 3.1-1　KBS-3V における処分システム構成要素の安全機能
（POSIVA、2012a）

Barrier	Safety functions
Canister	Ensure a prolonged period of containment of the spent nuclear fuel. This safety function rests first and foremost on the mechanical strength of the canister's cast iron insert and the corrosion resistance of the copper surrounding it.
Buffer	Contribute to mechanical, geochemical and hydrogeological conditions that are predictable and favourable to the canister. Protect canisters from external processes that could compromise the safety function of complete containment of the spent nuclear fuel and associated radionuclides. Limit and retard radionuclide releases in the event of canister failure.
Deposition tunnel backfill	Contribute to favourable and predictable mechanical, geochemical and hydrogeological conditions for the buffer and canisters. Limit and retard radionuclide releases in the possible event of canister failure. Contribute to the mechanical stability of the rock adjacent to the deposition tunnels.
Host rock	Isolate the spent nuclear fuel repository from the surface environment and normal habitats for humans, plants and animals and limit the possibility of human intrusion, and isolate the repository from changing conditions at the ground surface. Provide favourable and predictable mechanical, geochemical and hydrogeological conditions for the engineered barriers. Limit the transport and retard the migration of harmful substances that could be released from the repository.
Closure	Prevent the underground openings from compromising the long-term isolation of the repository from the surface environment and normal habitats for humans, plants and animals. Contribute to favourable and predictable geochemical and hydrogeological conditions for the other engineered barriers by preventing the formation of significant water conductive flow paths through the openings. Limit and retard inflow to and release of harmful substances from the repository.

フランスでは、図 3.1-6 に示すように、処分システムの構成要素と安全機能が、安全機能を求める時間軸とともに整理されている。フランスでは、B 廃棄物（長寿命中レベル放射性廃棄物）セル、C 廃棄物（高レベル放射性廃棄物）セルおよび使用済燃料セルが同一の処分深度に併設して処分されることが検討されており、シーリングシステムの構成要素も他の諸外国と性質が異なる。図 3.1-7 にシーリング構成要素の概略を示す。フランスでは、主たる安全機能を付与する構成要素（Main function of a component）と安全機能に貢献することを期待する構成要素（Contribution of a manufactured component to a function）に大別しており、構成要素間での相互補完により、全体の安全機能を確保する考えをもっている。すなわち単独の構成要素の安全機能が喪失したとしても、他の安全機能が発揮されることで、処分システムの安全性が確保でき得る場合においては、その安全機能の喪失は受け入れられる（ANDRA、2005）。シーリングシステムが卓越した移行経路となりうることを想定した安全機能として、主に立坑／斜坑、横坑の埋め戻し材や廃棄物セル内のシーリング構成要素に地下水の循環の低減（Oppose water circulation）が設定されている。ただし、図 3.1-6 に示すように、主たる安全機能を付与する構成要素は立坑／斜坑、横坑、モジュール間の接続部（Shaft and connecting drift seals）であることから、処分システムの安全性の確保に対して、相対的に主要坑道端部におけるシール機能が重要視されてい

るものと考えられる。

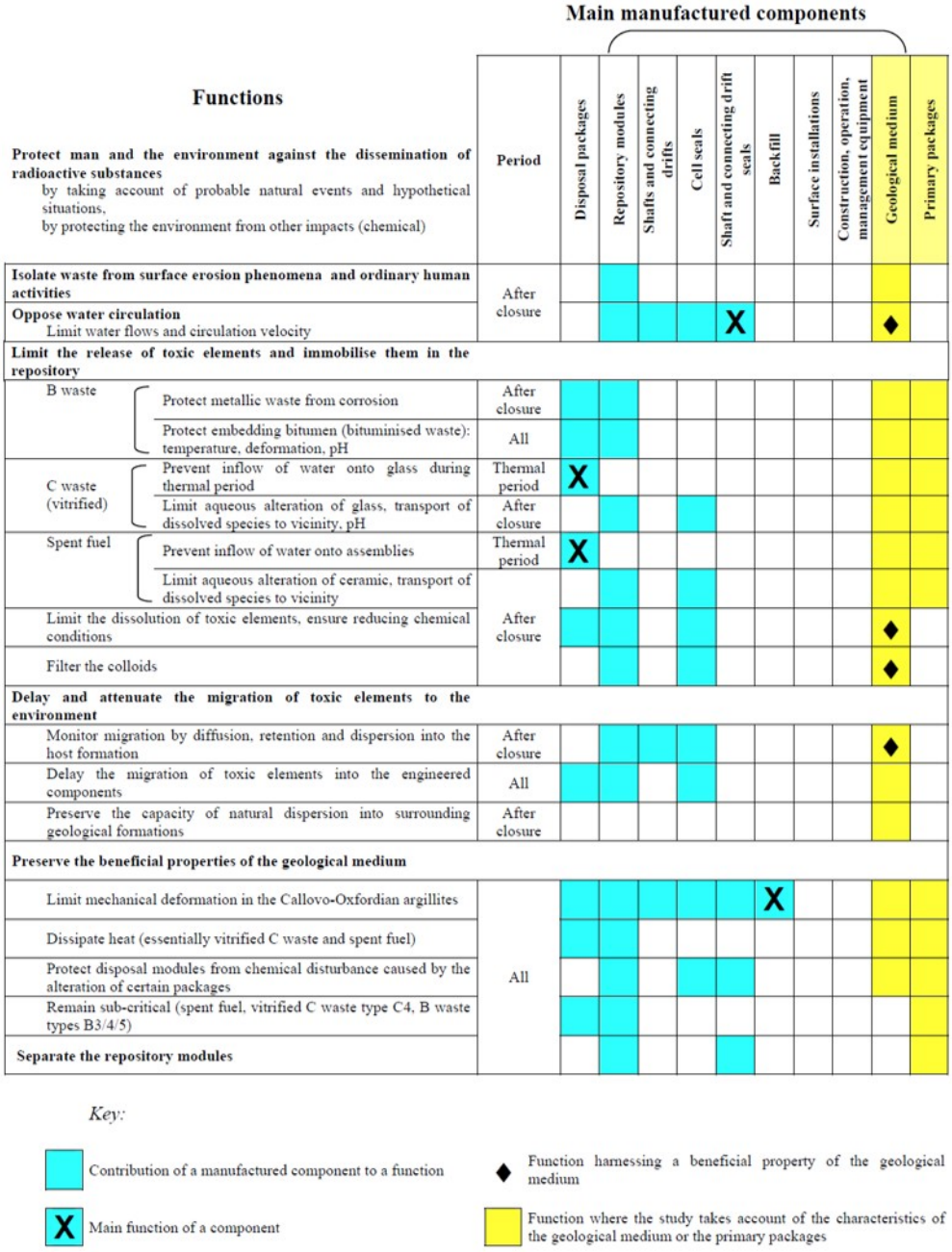


図 3.1-6　処分システムの構成要素と安全機能との対応
（ANDRA, 2005）

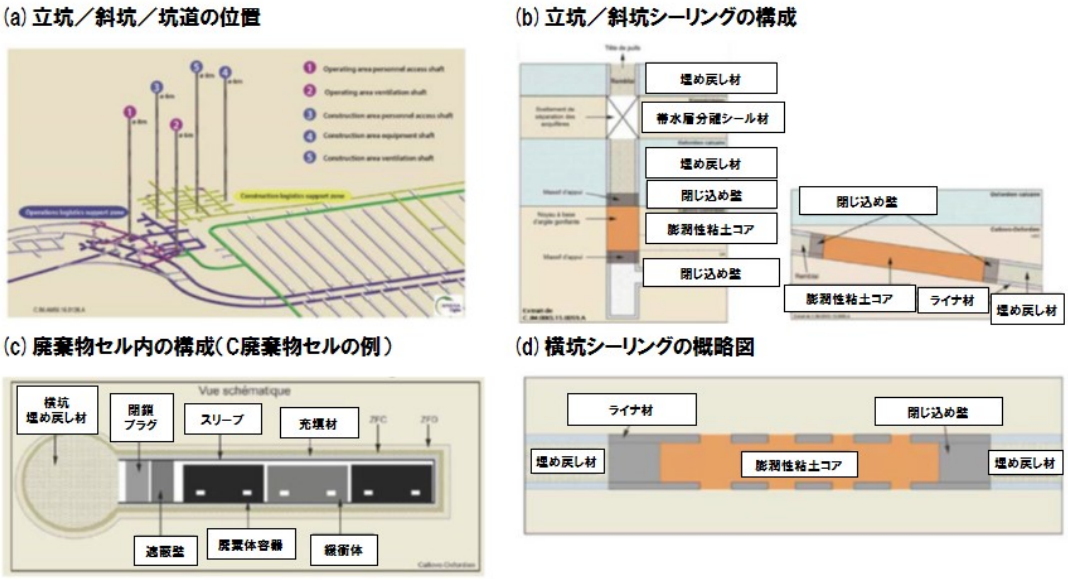


図 3.1-7　処分場に敷設されるシーリング構成要素
（ANDRA, 2016a, 2016b）

諸外国では主として処分坑道の埋め戻し部が卓越した移行経路とならないことを求めた安全機能が設定されているものの、スウェーデンやフィンランドでは、長期にわたり、放射性物質をキャニスタ内に閉じ込めることを基本としており、補完的な要素として、処分坑道の埋め戻し材に対し、放射性物質の放出の抑制や遅延といった安全機能が設定されていると考えられる。一方、フランスでは、廃棄物セル内への放射性物質の閉じ込めと主に立坑や斜坑と岩盤との水の循環を抑止することに重点を置き、関連するシーリングシステムにそれぞれ、安全機能を設定している。このように、処分概念や岩種などの諸条件に応じた、処分システムの安全確保の考え方が異なることで、処分システム構成要素にどのような安全機能を付与するかが決まるものと考えられるものの、シーリングシステムに対して要求する安全機能は、「地下水の移行抑制」および「遅延」に大別可能だと考えられる（表 3.1-2）。以上のことから、本検討では、シーリングシステムに対し、「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」の二つの安全機能を仮に設定し、検討を進めることとした。

表 3.1-2　シーリングシステムに求める安全機能の整理
（斜字は引用元の原文）

本事業で設定する安全機能	諸外国が設定する安全機能			
	スウェーデン	フィンランド	スイス	フランス+
シーリング部において移流を抑制すること	移流の抑制 *・Limit advective transport[1)]*		*シーリングシステムの構成要素に具体的な安全機能は設定されていない。*	移流の抑制 *・Preventing water circulation[3)]*
		放射性核種の放出制限 *・Limit and retard radionuclide release in the possible event of canister failure[2)]*		放射性核種の放出制限 *・Limit release of radionuclides and immobilize them in the repository[3)]*
シーリング部において遅延性能を有すること	遅延 *・Sorb radionuclide[1)]*	遅延 *・Limit and retard radionuclide release in the possible event of canister failure[2)]*		遅延 *・Delay and attenuate migration of radionuclides[3)]*

+フランスはC廃棄物セルにおけるシーリングシステムに求める安全機能を記載

1) SKB (2011), TR-11-01,
2) POSIVA (2012), 2012-09,
3) Andra Dossier 2005 Argile

3.1.4　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

シーリングシステムが持つ性能は、定置後長期にわたり、処分場周辺の THMC 状態の変化に起因して、変化しうるものと考えられる。例えば、海水準変動により塩淡境界の分布が変化することは地下水組成の変化をもたらし、結果的に放射性核種の種類に応じた収着分配係数に影響を及ぼす可能性がある。また、塩分濃度の変化によりシーリング材（ベントナイトやコンクリート）の劣化が生じ、シーリング部の空隙率・透水性の増大を引き起こした結果、主要な水みちとなりうることも考えられる。このように、地質環境条件の長期変遷に伴うシーリングシステムの安全機能への影響因子・プロセスは多様であるとともに、シーリングシステムが設置される場の条件の変化は、シーリングシステムが持つ遅延性能に影響を及ぼす。したがって、シーリングシステムの安全機能に影響を及ぼす因子・プロセスを整理するには、シーリングシステムが設置される場の地質環境条件を捉えた上で、影響し得る因子・プロセスを抽出するとともに、それらの因子・プロセスが安全機能に対し顕在化し得るものかを評価した上で整理する必要がある。しかし、我が国のように、処分場を建設する場が特定されていない状況においては、対象とする地質環境条件が膨大であるとともに、ある特定のプロセスに至る因子の組み合わせが多様になることを踏まえると、その一つ一つの因子・プロセスに対して顕在化の有無や程度を評価することは非常に困難である。したがって、平成 30 年度は、諸外国の事例を参考に、シーリングシステムの安全機能影響を及ぼす因子・プロセスを参考に、前項で設定した安全機能に影響を及ぼす可能性のある（影響度の大小は考慮しない）因子・プロセスを網羅的に抽出・整理を行った。整理にあたっては、スウェーデンやフィンランドにおける先行事例を参考にした。

スウェーデンの SR-site では、処分システムの長期安全性の評価を行う上で、その評価期間に応じ、処分システム構成要素に関わるプロセスの取扱いにについてプロセステーブルを活用して整理している（SKB、2010）。プロセステーブルの例として、キャニスタが健全な場合（intact canister）における埋め戻し材のプロセステーブルを示す（表 3.3）。これらのプロセステーブルに示された個々のプロセスついては、さらにキャニスタや緩衝材などの人工バリアや天然バリアの変数との関連付けがなされる。表 3.4 に一例として、埋め戻し材における BfT3（表 3.1-3 参照）に関する、変数との関連性を示す。なお、関連付ける変数としては以下の項目があげられている。

- 温度（Temperature）
- 水分量（Water content）
- ガス含有量（Gas content）
- 水理変数（Hydro-variables、 pressure and flows）
- 埋め戻し形状(Backfill geometry)
- 埋め戻し間隙形状（Backfill pore geometry）
- 応力状態（Stress state）
- 埋め戻し組成（Backfill composition）
- 埋め戻し間隙組成（Backfill pore water composition）
- 構造およびストレイ材（Structural and stray materials）

表 3.1-4 は上記の変数とプロセスの関連性に対し、「変数がプロセスに対して影響を及ぼすか？」、「プロセスが変数に対して影響を及ぼすか？」の問いに答える形式で整理され、安全評価モデルでの取り扱いに関しての記述がなされている。このような整理が、プラグなどに対しても行われている。

表 3.1-3　埋め戻し材に関わるプロセステーブル
（SKB、2010a を加筆修正）
緑：除外もしくは無関係のプロセス
赤：安全評価の際に定量化されるプロセス
オレンジ：特定の条件下で考慮されるプロセス

	再飽和／熱保有期間 Resaturation/"thermal" period	再飽和／熱保有期間後の長期 Long-term after saturation and "thermal" period	備考
BfT1. 熱輸送 (Heat transport)	簡易な仮定	簡易な仮定	
BfT2. 凍結 (Freezing)	永久凍土であることが条件なので無	埋め戻し材の温度が-2°Cを超える場合は無視 それ以外は検討	緩衝材に対する影響よりも大きい結果は少ない
BfT3. 不飽和条件に対する水の吸収・輸送 （Water uptake and transport for unsaturated conditions）	THMモデルにて考慮	関係なし	ベントナイトペレットはモデルに考慮される
BfT4. 飽和条件に対する水の輸送 (Water transport for saturated conditions)	不飽和条件下では無視 飽和条件下では天然バリアのモデルで考慮	天然バリアのモデルで考慮	永久凍土と氷河に対する化学的変化と質量再配分／喪失、変化および動水勾配の変化への影響を評価
BfT5. ガス輸送／溶解 （Gas transport/dissolution）	THMモデルにて考慮	ガスは溶解するため未考慮	閉じ込められた微宗の存在を飽和過程のモデリングで考慮
BfT6. パイピング／エロージョン (Piping/erosion)	経験則により定量的に推定	未考慮	BfT4.を参照
BfT7. 膨潤／質量再配分 (Swelling/Mass redistribution)	THMモデルにて考慮 （緩衝材／埋め戻し材の相互作用および坑道内での均質化を含む）	イオン交換、塩分濃度、変形に起因した侵食、凝集、クリープ、膨潤圧変化を総合的に評価	初期に設置した緩衝材および埋め戻し材の量と埋め戻し前のこれらの量との偏差を考慮
BfT8. 液状化 (Liquefaction)	関係なし	関係なし	緩衝材に対する影響よりも大きい結果は少ない
BfT9. 移流 (Advective transport of species)	飽和過程における溶存種の物質移動を単純に仮定	天然バリアのモデルで考慮 （埋め戻し材中にflow passがないケースを考慮）	BfT4.を参照
BfT10. 拡散 (Diffusive transport of species)	長期的な変化とほぼ同じ状態と成りうるため特別な評価はされない	Cモデルにて考慮	地下水組成の変化を考慮
BfT11. 収着 (Sorption (including ion-	長期的な変化とほぼ同じ状態と成りうるため特別な評価はされない	Cモデルにて考慮	
BfT12. 変質 （Alteration of impurities）	酸素の無機還元への効果をモデル化	Cモデルにて考慮	
BfT13. 溶存化学種の生成／反応 (Aqueous speciation and	長期的な変化とほぼ同じ状態と成りうるため特別な評価はされない	Cモデルにて考慮	
BfT14. 浸透圧 (Osmosis)	THMモデルにおける透水係数に考慮	経験的なデータと比較して評価	海水侵入を長期的に取り扱う
BfT15. モンモリロナイト変質 (Montmorillonaite	モデル解析により考慮	モデル解析により考慮	
BfT16. コロイド形成 (Colloid release)	全陽イオンが>4 mMの場合は無視 <4 mMの場合は考慮	全陽イオンが>4 mMの場合は無視 <4 mMの場合は考慮	埋め戻し際の喪失が計算される
BfT17. 放射線影響 (Radiation-induced	埋め戻し材中の線量率は非常に低いため無視	埋め戻し材中の線量率は非常に低いため無視	
BfT18. 微生物影響 (Microbial processes)	除外（酸素消費に対する影響は考慮されない）	マスバランスに応じて考慮	

表 3.1-4　埋め戻し材における「不飽和条件下の吸水・輸送」プロセスと変数の関連性
（SKB、2010a を修正・加筆）

変数 (Variables)	プロセスへの影響		変数への影響	
	影響があるか？ (Yes/No)	影響をどのように取り扱うか？ (How/Why not)	影響があるか？ (Yes/No)	影響をどのように取り扱うか？ (How/Why not)
温度 (Temperature)	Yes, 水の粘性と温度勾配による	モデルに考慮	Yes, 湿潤、乾燥が熱伝導率に影響	埋め戻し材中においてその影響が小さいため、無視
水分量 (Water content)	Yes, 水分保持曲線に影響	初期含水量が飽和計算の入力データとして与えられる。含水率を決定する飽和度と空隙率がモデル内の変数として考慮	Yes, 水分量の変化	飽和度と間隙率が計算される
ガス含有量 (Gas content)	Yes, 飽和度に含まれる	初期のガス含有量が飽和計算の入力データとして与えられる。含水率を決定する飽和度と空隙率がモデル内の変数と	Yes, ガス含有量の変化	飽和度と間隙率が計算される
水理定数 (Hydro-variables (pressure and flows))	Yes, 飽和プロセスの主要な変数	飽和計算に含まれる	Yes, 水理定数の変化	飽和計算に含まれる
埋め戻し形状 (Backfill geometry)	Yes, 湿潤した岩盤までの距離に依存	飽和計算の入力データとして与えられる	Yes, 埋め戻しブロックの膨潤を通じて影響	4.3.1 Swelling/mass redistributionを参照（SKB, TR-10-47）
埋め戻し間隙形状 (Backfill pore geometry)	Yes, 水と蒸気の輸送量に影響	材質データに含まれる	Yes, 飽和度への影響を通じて、間隙率が形状を決定	飽和度と間隙率が計算される
応力状態 (Stress state)	Yes, 水分保持曲線に影響	飽和計算に含まれる	Yes, 膨潤圧の変化	圧力とサクション圧が計算される
埋め戻し組成 (Backfill composition)	Yes, 水分保持曲線や他の特性と通じて影響され	飽和計算の入力データとして与えられる	No, 鉱物転換を通じない限り影響はない	飽和期間においては無関係
埋め戻し間隙組成 (Backfill pore water composition)	Yes, 水理特性に影響	飽和計算の入力データとして与えられる	Yes, 湿潤水が間隙組成に影響。また、温度勾配下における鉄の輸送も影響	4.4.4 Alterations backfill impruties参照（SKB, TR-10-47）
構造およびストレイ材 (Structural and stray materials)	No, 重要ではない	除外	No	

また、POSIVA においても、スウェーデンの SR-site と同様に、埋め戻し（Tunnel backfilling）の長期性能に対して重要と考えられるプロセスが多様であることを踏まえ、関連するプロセスと特徴（Features）との関連性に関して、いわゆる FEP（Feature Event Process）形式で整理されている。なお、FEP の整理を行う際、POSIVA では、埋め戻しの長期性能に関連するプロセスを「システムの長期変遷に関連するプロセス」と「放射性核種や他の物質の移動に関連するプロセス」に区分して整理を行っている。「システムの長期変遷に関連するプロセス」は

- 熱移動（Heat transfer）
- 吸水と膨潤（Water uptake and swelling）
- パイピングと浸食（Piping and erosion）
- 腐食（Chemical erosion）

- モンモリロナイト変質（Monmorillonite transformation）
- 随伴鉱物の変質（Alteration of accessory minerals）
- 微生物活動（Microbial activity）
- 凍結と融解（Freezing and thawing）

を挙げており、「放射性核種や他の物質の移動に関連するプロセス」は

- 溶解度と組成（Aqueous solubility and speciation）
- 沈殿と共沈（Precipitation and co-precipitation）
- 吸着（Sorption）
- 拡散（Diffusion）
- 移流（Advection）
- コロイド移行（Colloid transport）
- ガス移行（Gas transport）

を挙げている。これらのプロセスは、処分システムがもつ多様な特性によって影響を受けるとともに、これらの特性は、処分システム構成要素の設計要件や処分システムの長期変遷によって変化しうるものである。POSIVA では、埋め戻しの長期性能に関わる重要な特性として以下を挙げている。

- 核種インベントリ（Radionuclide inventory）
- 温度（Temperature）
- 膨潤圧（Swelling pressure）
- 埋め戻し形状（Backfill geometry）
- 水分量（Water content）
- 埋め戻し組成（Backfill composition）
- 間隙水組成（Porewater composition）
- ガス組成（Gas composition）

これらの諸特性が埋め戻しの長期的安全性に対して重要と考えられるプロセスへ与える影響の有無に関して、表 3.1-5 のように整理するとともに、表 3.1-6 に示す FEP マトリクスを用いて FEP 間の相互作用に関して整理を行っている。例えば、表 3.1-6 中の水色箇所については、6.2.2「水の吸収と膨潤（Water uptake and swelling）」は埋め戻しを介した 6.3.4「拡散（Diffusion）」へ直接影響を及ぼすことを意味している。また、「FEP description」と呼ばれる、各プロセスの説明書きが FEPs 毎に付されており、FEP の抽出根拠や、FEP 間の相互作用に関する記述が既存の知見を踏まえて整理されている。さらに、処分システムの構成要素の特性の変化が、他の構成要素の特性に影響を与えることも考えられ、そのような相互作用の関係を表 3.7 のようなマトリクスを用いて整理している（POSIVA、2012b）。

シーリングシステムの安全機能に影響を及ぼす因子・プロセスを網羅的に抽出する上では、上記で示したような、FEP を中心とした整理が有効であるとともに、シーリングシステムの相互補完的な観点から、その性能を評価する上では、フィンランドの事例のように、処分システム構成要素間の相互作用に関する整理も有効であると考えられる。これら諸外国における先行事例を踏まえ、平成 30 年度は、諸外国で整理された FEP リストやフィンランドにおける FEP description などを参照し、ますはシーリングシステムの状態とその安全機能に影響を及ぼす因子・プロセスを関連付けるための変数を設定した。次にこれらの変数と THMC（R：放射性核種に関わる現象）関連の諸現象（プロセス）を設定した上で、相互の関連性の有無をテーブルフォームによって整理を行った。なお、変数とプロセスの関係については、埋め戻し材およびプラグ（コンクリート、ベントナイト）に関わるものを中心とし、各シーリング材と母岩との相互作用も含めて整理を行

った。表 3.8 に整理したプロセスと状態変数の関係、表 3.1-9～表 3.1-29 に、プロセスと状態変数との関連性の記述を示す。

平成 30 年度においては、シーリングシステムに設定した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・整理を行ったが、これらの因子・プロセスが顕在化しうるかについては、我が国の地質環境条件を一定程度類型化（沿岸部、内陸といった場所や、堆積岩、深成岩などの岩種など）した上で、スクリーニングを行い、残された因子・プロセスについて定量的な評価を行うことが今後必要になると考えられる。

表 3.1-5　埋め戻し（Tunnel Backfill）の長期性能に対して重要と考えられるプロセスと処分場の特性との関連性
（POSIVA, 2012b を加筆修正）

Processes	Features							
	放射性核種インベントリ (Radionuclide inventory)	温度 (Temperature)	膨潤圧 (Swelling pressure)	埋め戻し形状 (Backfill geometry)	含水量 (Water content)	埋め戻し材組成 (Backfill composition)	間隙水組成 (Porewater composition)	ガス組成 (Gas composition)
システム変遷に関連するプロセス (Processes related to system evolution)								
6.2.1 熱伝達 (Heat transfer)		Y	Y	Y	Y	Y		
6.2.2 水の吸収と膨潤 (Water uptake and swelling)		Y	Y	Y	Y	Y	Y	
6.2.3 パイピング／エロージョン (Piping erosion)			Y	Y	Y	Y	Y	
6.2.4 化学浸食 (Chemical erosion)			Y	Y	Y	Y	Y	
6.2.5 モンモリロナイト変質 (Montmorillonite transformation)		Y	Y		Y	Y	Y	Y
6.2.6 随伴鉱物の変質 (Alteration of accessory minerals)		Y	Y		Y	Y	Y	Y
6.2.7 微生物活動 (Microbial activity)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
6.2.8 凍結／溶解 (Freezing and thawing)		Y		Y	Y	Y	Y	
放射性核種や他の物質の移動に関するプロセス (Processes related to the migration of radionuclides and other substances)								
6.3.1 水溶性とスペシエーション (Aqueous solubility and speciation)	Y	Y	Y		Y	Y	Y	Y
6.3.2 沈殿／共沈 (Precipitation and co-precipitation)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
6.3.3 収着 (Sorption)	Y	Y		Y	Y	Y	Y	
6.3.4 拡散 (Diffusion)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
6.3.5 移流 (Advection)	Y	Y	Y	Y	Y			
6.3.6 コロイド輸送 (Colloid transport)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
6.3.7 ガス輸送 (Gas transport)	Y	Y	Y	Y	Y		Y	Y

表 3.1-6　埋め戻し（Tunnel Backfill）における処分場の長期性能に対して重要となる FEP 間の関連性（緑色のセル内の数字は表 3.1-5 のプロセスに対応）
（POSIVA、2012b）

6.2.1	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x		x
x	6.2.2	x	x	x	x	x	x				x	x	x	x
	x	6.2.3									x	x	x	x
	x		6.2.4								x	x	x	x
	x			6.2.5	x			x	x	x	x	x	x	x
	x			x	6.2.6			x	x	x	x	x		
					x	6.2.7		x	x					
x	x						6.2.8				x	x	x	x
								6.3.1	x	x	x			
									6.3.2	x	x	x	x	
									x	6.3.3	x	x	x	
						x			x	x	6.3.4			x
		x	x			x						6.3.5	x	x
											x		6.3.6	
												x	x	6.3.7

表 3.1-7　埋め戻し（Tunnel Backfill）ー母岩間の相互作用マトリクス
（POSIVA, 2012b）

Tunnel backfill	*Deformation* *Gas transport* *Sorption*	*Colloid transport* *Diffusion* *Heat transfer* *GW flow*	
	Plug or seal		
Transport through auxiliary components		water	Transport through auxiliary components
		Colloid transport *Diffusion* *Heat transfer* *GW flow*	**Geo sphere**

表 3.1-8　シーリングシステムの安全機能に影響を及ぼすと考えらえるプロセスと状態変数の関係

	シーリング要素	埋め戻し材（処分孔）								埋め戻し材								プラグ（ベントナイト）								プラグ（コンクリート）								ベントナイト／母岩界面								コンクリート／母岩界面							
	状態変数 / プロセス	温度	間隙圧	飽和度	変位	応力	間隙水組成	ガス組成	固相組成	温度	間隙圧	飽和度	変位	応力	間隙水組成	ガス組成	固相組成	温度	間隙圧	飽和度	変位	応力	間隙水組成	ガス組成	固相組成	温度	間隙圧	飽和度	変位	応力	間隙水組成	ガス組成	固相組成	温度	間隙圧	飽和度	変位	応力	間隙水組成	ガス組成	固相組成	温度	間隙圧	飽和度	変位	応力	間隙水組成	ガス組成	固相組成
T 温度	熱移動	+	+	+					+	+	+	+					+	+	+	+					+	+	+	+					+	+		+					+		+					
H 水理	不飽和吸水・水分移動	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+		
	飽和水分移動	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+		
	密度流（熱・塩分）	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	ガス移行／溶解	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+								+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	パイピング／浸食		+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+		+																						
M 力学	膨潤・質量再配置	+	+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+		+									+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+		
	選択的経路形成		+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+		+		+	+	+	+			+		+	+	+	+			+		+	+	+	+				+	+	+	+		
	液状化		+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+		+		+	+	+	+			+																						
C 化学	吸着	+					+	+	+	+					+	+	+	+					+	+	+	+					+	+	+															
	変質	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+														
	沈殿・共沈	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	溶液組成	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	浸透圧	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+																						
	モンモリロナイト変質	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+																						
	コロイド形成		+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+
	微生物影響	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+		+	+	+	+			+		+																						
R 放射性核種の移行	移流	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	拡散	+			+	+	+		+	+			+	+	+		+	+			+	+	+		+	+	+	+			+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	随伴鉱物の変質	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+																						
	放射性核種の組成	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+									+	+	+			+	+	+	+	+		+	+
	揮発性核種移行	+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+		+									+	+	+	+	+		+		+	+	+	+		+	

+：シーリングシステムの安全機能に影響を及ぼすと考えられるプロセスと状態変数

表 3.1-9　熱に関わるプロセスー変数の関係

熱移動	
温度：	ガラス固化体上部と処分坑道床面間の温度勾配とシール材の熱伝導率によって熱伝導を生じさせる。シーリングシステムの構成要素中の地下水流速は十分に小さいため、固液間の温度差はほとんど生じない平衡熱交換過程と考えられる。
間隙圧：	温度変化によって間隙圧がわずかに変化する（SKB, 2010b）。これは流体物性（密度、粘性係数）の温度依存性、熱膨張との相互作用によるものと考えられる。
飽和度：	熱伝導率の飽和度依存性。再冠水時の飽和度変化は、埋め戻し、プラグ内の温度分布に影響を及ぼす（例えば、間隙内を水より熱伝導率の低い空気が占めるとバルクの熱伝導率が減少して温度変化を引き起こすなど）。
変位：	シーリング要素の膨潤、熱膨張は固相、流体相の構成割合を変化させバルクの熱伝導率へ影響を与える（POSIVA, 2012a）。
応力：	同上
間隙水組成：	ー
ガス組成：	ー
固相組成：	シーリング要素の構成鉱物、含有不純物はバルクの熱伝導率に影響を及ぼす。

表 3.1-10　水理に関わるプロセスー変数の関係（1/5）

不飽和吸水・水分移動	
温度：	水蒸気生成・移動（相対湿度の変化）、毛細管圧力に影響を及ぼす。流体物性（密度、粘性係数）の温度依存性により透水係数は増減する。
間隙圧：	相対浸透率、毛細管圧力の影響を受ける。操業時は換気による蒸発のため坑道沿いEDZ は部分的に不飽和領域を形成する（NAGRA, 2002）
飽和度：	同上。水蒸気生成・移動（diffusivity）へ影響を及ぼす（例えば、より不飽和の状態の方が、水蒸気生成が促進され、周囲との高い濃度（湿度）勾配により拡散移動が発生する）。
変位：	変形によって生じる間隙分布、密度分布の変化を介して透水係数、空隙率に影響を及ぼす。
応力：	同上。水分移動の不均質性は膨潤圧、質量再分配に影響を及ぼす。
間隙水組成：	掘削時に形成される亀裂表面ではパイライトなどが酸化し、ギプサム、水酸化鉄が生成する。亀裂の形成は、結晶質岩類、粘土質岩類の母岩タイプで異なると考えられる。ニアフィールド周辺岩盤から浸潤する地下水中の塩分濃度（イオン強度）はベントナイト粒子の膨潤を抑制（減少）し、透水係数の増加に影響を及ぼす。また、塩分濃度は蒸気圧に影響するため再冠水挙動に影響する。
ガス組成：	ー
固相組成：	構成鉱物の違いは間隙構造、膨潤圧、透水係数などに影響を及ぼす。

表 3.1-11　水理に関わるプロセス－変数の関係（2/5）

飽和水分移動	
温度：	流体物性（密度、粘性係数）の温度依存性により、透水係数に影響を及ぼす。
間隙圧：	定義により動水勾配を規定し、水分移動の駆動力となる。
飽和度：	－
変位：	変形によって生じる間隙分布、密度分布の変化を介して透水係数、空隙率に影響を及ぼす。
応力：	不均質な膨潤、圧縮応力の発生は、間隙、密度分布へ影響を及ぼす。
間隙水組成：	ニアフィールド周辺岩盤から浸潤する地下水中の塩分濃度はベントナイト粒子の膨潤を抑制し、透水係数の増加に影響を及ぼす。また、塩分濃度は蒸気圧に影響するため再冠水挙動に影響する。
ガス組成：	－
固相組成：	構成鉱物の違いは間隙構造、膨潤圧、透水係数などに影響を及ぼす。

表 3.1-12　水理に関わるプロセス－変数の関係（3/5）

密度流（熱、塩分）	
温度：	流体物性（密度、粘性係数）の温度依存性により、透水性に影響を及ぼす。温度勾配、透水係数によっては自然対流の発生に影響を及ぼす。
間隙圧：	定義により動水勾配を規定し、水分移動の駆動力となる
飽和度：	－
変位：	変形による間隙分布、密度分布の変化を介して透水係数、空隙率に影響を及ぼす。
応力：	不均質な膨潤、圧縮応力の発生は、間隙、密度分布へ影響を及ぼす。
間隙水組成：	ニアフィールド周辺岩盤から浸潤する地下水中の塩分濃度はベントナイト粒子の膨潤を抑制し、透水係数の増加に影響を及ぼす。塩分濃度差による自然対流の発生に影響を及ぼす。
ガス組成：	－
固相組成：	構成鉱物の違いは間隙構造、膨潤圧、透水係数などに影響を及ぼす。

表 3.1-13　水理に関わるプロセス－変数の関係（4/5）

ガス移行／溶解	
温度：	ガス相の体積変化を介してガス圧に影響を及ぼす。溶解度の温度依存性。
間隙圧：	嫌気的腐食によるガス発生（主に水素ガス）の影響を受ける。間隙圧に応じた溶解ガスおよび自由ガスの移行は、相対浸透率、毛細管圧力の影響を受ける。自由ガス発生の有無は、処分深度に応じた静水圧、応力状態の影響を受ける。
飽和度：	相対浸透率、毛細管圧力の影響を受ける（ガス相の透気性は飽和度に依存して変化する）。水蒸気生成・移動に影響する。
変位：	気液 2 相流状態の変位は間隙、密度分布の変化へ影響を及ぼす。
応力：	同上
間隙水組成：	溶解・遊離（気液相間の物質移動）の影響を受ける。
ガス組成：	不均質な膨潤、圧縮応力の発生は、間隙、密度分布へ影響を及ぼす。ガス種の溶解度に応じて移行形態が変化（溶存ガス、自由ガス）する。
固相組成：	構成鉱物の違いは間隙構造、膨潤圧、透水係数などに影響を及ぼす。

表 3.1-14　水理に関わるプロセス－変数の関係（5/5）

パイピング／浸食	
温度：	－
間隙圧：	動水勾配に応じた流量と浸食量は相間関係をもち、例えば、ベントナイト系材料の累積流量の増加に伴い浸食量は増加する。
飽和度：	飽和、均質化過程の完了前における飽和度変化は、膨潤圧を介してパイピング／侵食の発生、その後の自己シールへ影響を及ぼす。
変位：	膨潤・収縮変形はパイピング発生、自己シールに影響する。岩盤中の割れ目や材料界面の空隙とも関連し、パイピング／浸食発生の有無は母岩タイプによっても異なると考えられる。
応力：	膨潤圧はパイピング／侵食の発生有無に最も影響を及ぼす因子の一つである（例えば、間隙圧が静水圧と膨潤圧の和を超過した際に発生するなど）。
間隙水組成：	間隙水中の塩分濃度は膨潤圧変化を介して、パイピング／浸食に影響を及ぼす。
ガス組成：	－
固相組成：	ベントナイト、モンモリロナイト成分によって最大膨潤圧は異なり、パイピング／浸食に影響を及ぼす。

表 3.1-15　力学に関するプロセス－変数の関係（1/3）

膨潤・質量再配置	
温度：	熱応力との相互影響に関係する
間隙圧：	相対浸透率、毛細管圧力の影響を受ける。膨潤応力、熱応力との相互影響に関係する
飽和度：	同上。飽和度の増加に応じて膨潤圧は増加する。
変位：	変形による密度分布、間隙分布の変化を生じる。
応力：	坑道掘削、EBS 定置、閉鎖および再冠水の間の応力再配置のため、EDZ 内に微視的・巨視的亀裂を形成し、その後の定置・再冠水時には飽和・不飽和領域が共存して不均一な応力場となる。この亀裂の形成は、結晶質岩類、粘土質岩類の母岩タイプで異なると考えられる（例えば、オパリナス粘土の場合は、掘削時の亀裂形成は坑道径の 1.6 倍の約 2m の範囲で生じ、有効な均質化、EDZ の自己シール、トンネル収縮は 1～7%の膨潤によって達成されるとしている（NAGRA, 2002）。
間隙水組成：	間隙水中の塩分濃度は膨潤圧を制限し、透水性を増加させる。
ガス組成：	－
固相組成：	ベントナイト、モンモリロナイト成分によって最大膨潤圧は異なる。

表 3.1-16　力学に関するプロセスー変数の関係（2/3）

選択的経路形成	
温度：	ー
間隙圧：	腐食ガス発生などに伴う間隙圧の蓄積により生じる微視的および巨視的亀裂（Micro-fissuring/Macro fracturing）は流体の選択的経路となり、透水係数、空隙率に影響を及ぼす。選択的経路の発生の有無は、処分深度に応じた静水圧、膨潤圧の影響を受ける。発生ガスによる圧力勾配の変化は核種汚染水の押し出しを生じさせる。
飽和度：	飽和度に応じて発生する水圧、ガス圧を介して、選択的経路の発生に影響を及ぼす。
変位：	ガス破過は選択的経路を発生させ、その後の自己シールにより不均質な膨潤・収縮変位を生じさせる。
応力：	膨潤圧は間隙、密度分布を介して、選択的経路発生の閾値（破過圧）に影響を及ぼす。
間隙水組成：	間隙水の塩分濃度の影響を受ける透水係数は、不均質な膨潤圧を発生させ選択的経路発生の閾値（破過圧）に影響を及ぼす。
ガス組成：	ーベントナイト、モンモリロナイト成分によって最大膨潤圧は異なり、選択的経路発
固相組成：	生の閾値（破過圧）に影響を及ぼす。

表 3.1-17　力学に関するプロセスー変数の関係（3/3）

液状化	
温度：	ー
間隙圧：	地震による繰返し荷重載荷時の過剰間隙水圧の蓄積は有効応力の低下と液状化発生へ影響を及ぼす（サイクル機構, 1999）。
飽和度：	再冠水完了後の飽和状態を仮定する。
変位：	ベントナイト系材料の降伏条件に影響を及ぼす。
応力：	繰返し荷重載荷時の応力履歴は過剰間隙圧を蓄積させて有効応力の低下と液状化発生へ影響を及ぼす。
間隙水組成：	間隙水中の塩分濃度による透水性変化は、過剰間隙水圧の蓄積・消失に影響を及ぼす。
ガス組成：	ー
固相組成：	ベントナイト、モンモリロナイト成分の違いによって膨潤・収縮変形は異なる。

表 3.1-18　化学に関するプロセスー変数の関係（1/7）

吸着	
温度：	吸脱着に影響を及ぼすが、その効果は明らかでない（SKB, 2011）。分配係数の温度依存性。
間隙圧：	ー
飽和度：	吸着のアベイラビリティに影響する（例えば、飽和度に応じて異なると考えられる固液界面は相間移動に必要な面積として寄与する）。
変位：	ー
応力：	ー
間隙水組成：	溶液種に応じて吸着特性（例えば、分配係数）は異なる。
ガス組成：	ー
固相組成：	構成鉱物に応じて吸着特性（例えば、吸着サイト、交換容量など）は異なる。

表 3.1-19　化学に関するプロセス－変数の関係（2/7）

沈殿・共沈	
温度：	溶解度の温度依存性
間隙圧：	水分移動によって変化する間隙水組成を介して間接的に影響を及ぼす。
飽和度：	化学反応に必要な水分量として影響を及ぼす。二次鉱物の沈殿・再溶解による空隙率変化の影響を受ける。
変位：	変形による間隙分布、密度分布の変化は化学反応が生じる条件（アベイラビリティ）に影響を及ぼす
応力：	同上
間隙水組成：	溶解度制限を規定し、他の溶存元素は共沈（例えば、Ra-226 と Ba の共沈）、モンモリロナイト変質に影響を及ぼす。
ガス組成：	水、空気 2 相状態の場合には、間隙水の酸化還元状態に影響を及ぼす。
固相組成：	モンモリロナイトおよび二次鉱物は間隙水組成に影響を及ぼす（例えば、鉱物種に応じた固相－間隙水間の相互作用など）。

表 3.1-20　化学に関するプロセス－変数の関係（3/7）

溶液組成	
温度：	溶解度の温度依存性
間隙圧：	ポテンシャル勾配（移流による溶質フラックス）によって溶液組成を変化させる。
飽和度：	化学反応に必要な水分量として影響を及ぼす。二次鉱物の沈殿・再溶解による空隙率変化の影響を受ける。
変位：	変形による間隙分布、密度分布の変化は化学反応が生じる条件（アベイラビリティ）に影響を及ぼす（SKB, 2011）
応力：	同上
間隙水組成：	溶解度とスペシエーションを規定し、特に pH、Eh および錯体溶存種の影響を受ける。閉鎖時に埋め戻し、プラグなどの媒体中にトラップされた空気が不純物を溶解し間隙水組成を変化させる（NAGRA, 2002）
ガス組成：	水、空気 2 相状態の場合には、間隙水の酸化還元状態に影響を及ぼす。
固相組成：	モンモリロナイトおよび二次鉱物は間隙水組成に影響を及ぼす（例えば、鉱物種に応じた固相－間隙水間の相互作用など）。

表 3.1-21　化学に関するプロセス－変数の関係（4/7）

浸透圧	
温度：	浸透圧の温度依存性。
間隙圧：	塩分の影響による透水係数変化の影響を受ける。
飽和度：	同上
変位：	間隙水組成によって膨潤圧は増減する。
応力：	同上
間隙水組成：	Na^+、Cl^-などのカチオン濃度による電荷バランス、イオン交換の影響を受ける。
ガス組成：	－
固相組成：	モンモリロナイト含有量、層間距離はベントナイト－水相互作用に影響する。

表 3.1-22　化学に関するプロセス－変数の関係（5/7）

モンモリロナイト変質（イライト化、セメンテーションなど）	
温度：	反応速度、溶解度の温度依存性。埋め戻し、止水プラグ内の温度分布は、カオリナイト化、セメンテーション（シリカ溶脱）に影響を及ぼす。廃棄体定置方式などによってシーリング要素の温度とその影響は異なる。
間隙圧：	水分移動によって変化する間隙水組成を介して間接的に影響を及ぼす。二次鉱物の沈殿による間隙率変化の影響を受ける。
飽和度：	鉱物－水界面における化学反応へ影響を及ぼす。二次鉱物の沈殿による間隙率変化の影響を受ける。
変位：	変形による間隙分布、密度分布の変化は化学反応が生じる条件（アベイラビリティ）に影響を及ぼす（SKB, 2011）。
応力：	埋め戻し材含有鉱物の変質は膨潤圧に影響を及ぼす（非膨潤性鉱物への変質）
間隙水組成：	間隙水中の陽イオン成分（Ca^{2+}、 Na^{2+}、 K^{+}、 Fe^{2+}、 Fe^{3+}など）は埋め戻し材含有鉱物の変質に影響を及ぼす。
ガス組成：	ー
固相組成：	鉱物成分はベントナイト系材料中の鉱物・水界面反応に影響を及ぼす。セメント系材料の劣化によりモンモリロナイト、シリカ溶脱が生じ、二次鉱物の沈殿に影響を及ぼす。

表 3.1-23　化学に関するプロセス－変数の関係（6/7）

コロイド形成	
温度：	コロイド溶解度の温度依存性
間隙圧：	水分移動、膨潤変形を介して間接的に影響を及ぼす。
飽和度：	水分量の増加による膨潤圧変化を介してコロイドシール性に影響を及ぼす。
変位：	変形による間隙分布、密度分布の変化は化学反応が生じる条件（アベイラビリティ）に影響を及ぼす（SKB, 2011）。
応力：	膨潤圧はコロイドシール性に影響する（例えば、高い膨潤圧はより効果的にコロイドをろ過する）。
間隙水組成：	モンモリロナイト層間水のイオン価数、濃度が自由膨潤、ゾル形成に影響する。粘土鉱物、鉄酸化物、炭酸塩などの無機コロイドは比表面積が大きく、核種吸着に影響を及ぼす。
ガス組成：	ー
固相組成：	モンモリロナイト層間電荷の大きさと分布の影響を受ける。粘土鉱物から形成されるコロイド組成に影響する。

表 3.1-24　化学に関するプロセス－変数の関係（7/7）

微生物の影響	
温度：	微生物活性の温度依存性。
間隙圧：	発生するガス圧による水分移動の影響を受ける。応力状態の変化（膨潤圧の増加）により含水率が増加し、微生物活性へ影響を及ぼす。
飽和度：	水素、メタン、CO_2、O_2 ガスの生成・消費の影響を受ける。O_2 の消費は水分侵入速度に依存し、飽和度に影響を与える（NAGRA, 2002）。
変位：	微生物活性は膨潤による間隙形状と密度変化の影響を受ける。微生物活性は密度の増加に対して指数的に減少する（2000kg/m^3 以上ではゼロに近づく）（SKB, 2011, POSIVA, 2012b）。
応力：	同上
間隙水組成：	硫化物、ガス発生を介して影響を受ける。例えば、閉鎖時に埋め戻し、プラグなどの媒体中にトラップされた空気は微生物活性を変化させるが、酸素消費速度は結晶質岩におけるシールされた坑道内では 1 年以内と早い反応であるが、長期にわたる再冠水環境下のベントナイト中に対しては不確実である（NAGRA, 2002）。栄養塩濃度は微生物の活性に影響を及ぼす。
ガス組成：	メタン、水素などは微生物活性による生成・消費に影響する。
固相組成：	スメクタイト内の Fe(III)が消費され、膨潤圧の減少に影響を及ぼす。有機炭素含有量は微生物の活性に影響を及ぼす。

表 3.1-25　放射性核種の移行に関するプロセス－変数の関係（1/5）

移流	
温度：	熱膨張、流体物性（密度、粘性係数）に影響を及ぼす。温度勾配によって熱対流を引き起こす可能性がある。
間隙圧：	水相、ガス相のポテンシャル勾配となる。沈殿・再溶解の影響を受ける。
飽和度：	水相、ガス相の核種フラックス、移行経路へ影響を与える。
変位：	変形による密度、間隙分布の変化は地下水流速に影響を及ぼす。
応力：	同上。支配的な物質移行が拡散か移流かは膨潤応力の影響を受ける。
間隙水組成：	地球化学反応により核種フラックスに影響する。
ガス組成：	同上。
固相組成：	構成鉱物の違いは流体相－固相間の熱力学反応を介して核種フラックスへ影響を及ぼす。

表 3.1-26　放射性核種の移行に関するプロセスー変数の関係（2/5）

拡散	
温度：	自己拡散係数の温度依存性
間隙圧：	ー
飽和度：	ー
変位：	変形を伴う間隙形状は拡散経路に影響する。
応力：	同上。支配的な物質移行が拡散か移流かは膨潤応力の影響を受ける。
間隙水組成：	イオン強度、電荷を介して自己拡散係数へ影響を及ぼす。
ガス組成：	水、空気 2 相状態の場合には、それぞれの相における化学種毎の拡散移動が生じる最大膨潤圧に影響する。
固相組成：	ー

表 3.1-27　放射性核種の移行に関するプロセスー変数の関係（3/5）

随伴鉱物の変質	
温度：	硫酸塩の溶解・沈殿、炭酸塩鉱物、シリカの溶解・沈殿など、CO_2 平衡の反応速度、溶解度は温度の影響を受ける。温度勾配条件下では、石英、クリストバライト、非結晶 SiO_2 の溶解・沈殿を生じさせる。廃棄体定置方式などによっても温度とその影響は異なる。
間隙圧：	移流、拡散の水分移動による間隙水組成の変化の影響を及ぼす。
飽和度：	水分状態は変質反応へ影響を及ぼす（乾燥状態下では変質は生じない）。
変位：	変形による間隙分布、密度分布の変化は化学反応が生じる条件（アベイラビリティ）に影響を及ぼす。
応力：	埋め戻し材含有鉱物の変質は膨潤圧に影響を及ぼす（非膨潤性鉱物への変質）
間隙水組成：	全ての化学反応へ影響を及ぼす（例えば、鉱物ー水界面における相互作用など）。
ガス組成：	ガス相が存在すれば、pH などを介して化学反応に影響を及ぼす。
固相組成：	モンモリロナイト以外の随伴鉱物（長石、石英、クリストバライト、ギプサム、カルサイト、ドロマイト、シデライト、パイライト、有機不純物など）の構成成分は、全ての化学反応へ影響を及ぼす。

表 3.1-28　放射性核種の移行に関するプロセス－変数の関係（4/5）

放射性核種の組成	
温度：	核種溶解度の温度依存性
間隙圧：	ポテンシャル勾配（移流による核種フラックス）による移流は溶液組成に影響を及ぼす。
飽和度：	化学反応に必要な水分量として影響を及ぼす。二次鉱物の沈殿・再溶解による空隙率変化の影響を受ける。
変位：	変形による間隙分布、密度分布の変化は化学反応が生じる条件（アベイラビリティ）に影響を及ぼす。
応力：	－
間隙水組成：	溶解度とスペシエーションを規定し、特に pH、Eh および錯体溶存種の影響を受ける。
ガス組成：	水、空気 2 相状態の場合には、間隙水の酸化還元状態に影響を及ぼす。
固相組成：	モンモリロナイトおよび二次鉱物は間隙水組成に影響を及ぼす（例えば、鉱物種に応じた固相－間隙水間の相互作用など）。

表 3.1-29　放射性核種の移行に関するプロセス－変数の関係（5/5）

揮発性核種移行	
温度：	熱膨張、流体物性（密度、粘性係数）に影響を及ぼす。温度勾配によって熱対流を引き起こす可能性がある。
間隙圧：	ガス相のポテンシャル勾配により移行する。ガス圧は揮発性核種の溶解・遊離による相間移動に影響を及ぼす。
飽和度：	ガス相中の揮発性核種フラックス、移行経路へ影響を与える。
変位：	不均質な膨潤・圧縮変形はガス破過圧、移行経路の形成に影響を及ぼす。
応力：	同上。膨潤応力は静水圧と共にガス圧に抵抗する。
間隙水組成：	－
ガス組成：	分圧に応じた溶解・遊離の影響を受け、ガス移行形態（自由ガス、溶解ガス）を変化させる。
固相組成：	－

3.1.5　シーリングシステムの長期性能に関わるシナリオおよび性能評価

本事業では、我が国の地質環境条件を踏まえた上で、シーリングシステムの安全機能に影響を及ぼす因子・プロセスを整理し、シナリオ解析を通じてシーリングシステムが卓越した水みちとなりうるシナリオに基づき、長期的な性能を評価することを目的としている。ここでは、次年度以降に行うこのような長期性能評価に先立ち、シーリングシステムの安全機能の長期的な変遷を陽に考慮した、シナリオの設定やシナリオに基づく性能評価に関する諸外国の事例として、フランスの ANDRA の事例を調査した。

ANDRA では、安全評価におけるシナリオにおいて、リファレンス状態シーリングシステムの安全機能が喪失する状態（変動状態）を想定したシナリオを設定しており、その中で以下のシーリングシステム構成要素の欠陥を想定した解析ケースを設定している。

- 立坑のシール機能喪失
- 処分エリアのシール機能喪失

・　すべてのシール機能喪失
・　地上から地下へのアクセス坑道のシール機能を未考慮

各ケースともに、立坑からの流出経路と母岩からの流出経路の二つの流出経路を設定し、各流出経路の線量率をリファレンスケースの線量率との比較によって、シーリングシステムの機能喪失に対する安全評価への影響評価を行っている。図 3.1-8 に変動状態で想定する核種移行経路のイメージを示す。

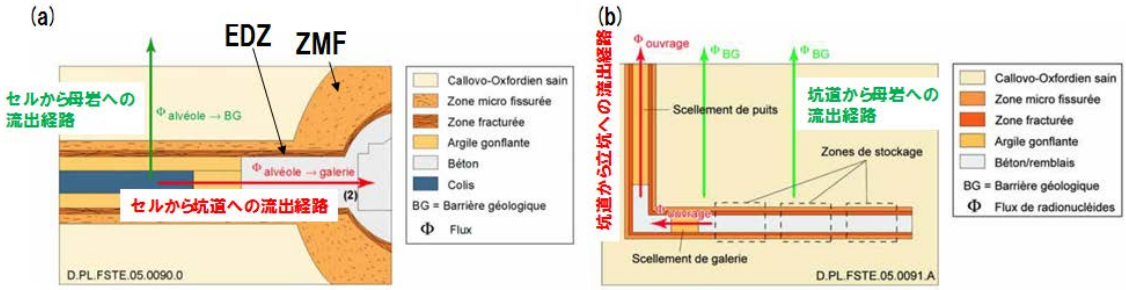


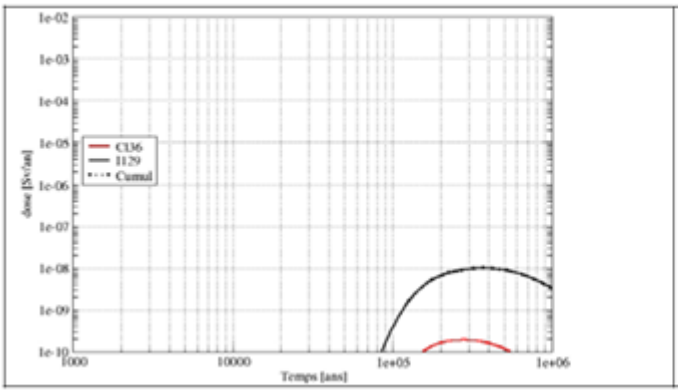
図 3.1-8　変動状態の核種移行解析における核種の流出経路のイメージ
（ANDRA, 2005 を修正加筆）
（（a）廃棄体セルからの核種移行経路、（b）立坑／坑道からの核種移行経路）

なお、変動状態の解析ケースにおいては、処分坑道および立坑に設置されるセルシール（図 3.1-8 参照）の欠陥は考慮されていないことに留意する必要がある。

これら 4 ケースの核種移行解析結果から、最も線量率が高かったのは、「すべてのシール機能喪失」のケースであったものの、その線量率はリファレンス状態とものと同程度であり、すべてのシール機能喪失の場合であっても、安全評価への影響は少ないと結論づけられている。この理由として、シール機能の喪失により、処分坑道や立坑への通過流量はリファレンス状態と比べ増加するものの、依然として、主要な核種移行経路は母岩であり（図 3.1-9）、母岩中の遅延性能が十分発揮されることから、シール機能が失われた場合においても、処分システムの長期の安全性を著しく損なうような影響はないことを挙げている。

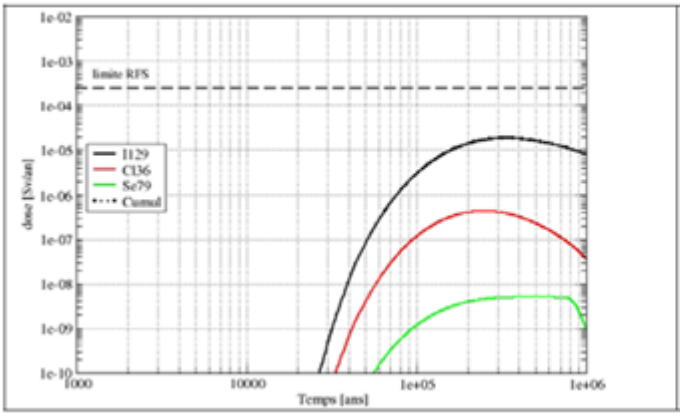
ANDRA の事例では、シーリング機能が喪失するという極端なケースを設定し、そのような状態が安全評価結果にどのような影響を及ぼすかという視点で評価を行っている。しかし、実際にはシーリングシステムの状態は時間とともに変化し、それに応じシーリングシステムの安全機能も変化するものであると考えらえる。すなわち、シーリングシステムの機能喪失は安全機能の観点からはもっとも不利な状態を想定したものであると考えられる。一方で、シーリングシステムの長期性能の考え方を提示することや、設計要件への反映を考慮した場合、ANDRA の事例のような機能喪失という状態のみを考慮するのではなく、その中間的な状態（例えば、シーリング部の部分的な欠陥など）に関しても、その状態に至る因子・プロセスの整理に基づき、シナリオ上考慮することにより、安全機能への影響の有無だけでなく、ある程度の幅を持たせた長期性能の考え方を提示することが可能であると考えらえる。

(a) 立坑からの流出



RN	DoseMax[Sv/an]	t(DoseMax)[an]
Cumul	9.9E-09	3.7E+05
I129	9.7E-09	3.7E+05
Cl36	1.9E-10	2.8E+05

(b) 母岩からの流出



RN	DoseMax[Sv/an]	t(DoseMax)[an]
Cumul	1.9E-05	3.3E+05
I129	1.8E-05	3.4E+05
Cl36	4.3E-07	2.5E+05
Se79	5.0E-09	4.7E+05

図 3.1-9　変動状態（全シール機能喪失）における線量の時間変化と最大線量・最大線量検出結果
（ANDRA, 2005）

3.1.6　まとめ

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。
以下に、平成 30 年度の主な成果と次年度以降の課題を示す。

- 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おり、本事業では、「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」を安全機能として仮に設定した。
- フランスのように個別のシーリングシステム構成要素に設定された安全機能が単独で機能喪失した場合においても、他の処分システム構成要素（他のシーリングシステム構成要素も含む）の安全機能が発揮されることにより、最終的に処分システムの安全性が確保される場合においては、この機能喪失は受け入れられるとの考え方もあることから、個別のシーリングシステムに設定された安全機能が喪失したことをもって、処分システムの長期安全性が失われるわけではなく、他のバリア機能の相互補完的な観点での評価

も重要であると考えられる。

- スウェーデンやフィンランドの事例を参考に、FEP リスト、FEP マトリクスを活用し、我が国の地質環境条件において、安全機能に影響を及ぼす可能性のある因子・プロセスにについて網羅的に整理を行った。ただし、整理した因子・プロセスは、地質環境条件や地質環境条件の組み合わせによって、安全機能への影響度は異なることから、我が国の地質環境条件を一定程度類型化（沿岸部、内陸といった場所や、堆積岩、深成岩などの岩種など）した上で、スクリーニングを行い、残された因子・プロセスについて定量的な評価を行うことが今後必要になると考えられる。
- ANDRA の事例のように、シーリングシステムの機能喪失を想定したシナリオに基づく線量評価の事例があるものの、機能喪失に至るプロセスを陽に取り入れた性能評価事例はなく、機能喪失という状態のみを考慮するのではなく、その中間的な状態（例えば、シーリング部の部分的な欠陥など）に関しても、その状態に至る因子・プロセスの整理に基づき、シナリオ上考慮することにより、安全機能への影響の有無だけでなく、ある程度の幅を持たせた長期性能の考え方を提示することが可能であると考えらえる。

3.2 シーリングシステム設計評価技術開発

3.2.1 坑道シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査

本章の冒頭で述べたように、わが国の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の整備に資するために、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した。

具体的には、主要国（スウェーデン、フィンランド、フランス、スイス、カナダ）を対象に、事業の節目に包括的な情報が取りまとめられたセーフティケース文書を主な調査対象として調査を行い（許認可申請段階における安全評価書や研究段階における研究成果報告書など、各国の事業進展に応じて調査対象文書は異なる）、次の観点から調査結果の整理を進めた。

① 処分場設計を含むセーフティケース開発の全体概要
② 要件管理に基づく処分場設計の方法論
③ 性能評価におけるシーリングシステムの取扱い
④ 安全評価におけるシーリングシステムの取扱い

ここでは、既に事業許可申請段階にあり（シーリングシステムに関する考え方ならびに要件や仕様が具体化されている）、更に地質環境や処分概念にわが国と類似性があるスウェーデンとフィンランドについて、それぞれの調査結果を以下に抜粋して整理する。他の 3 ヶ国を含めた調査対象 5 ヶ国の調査結果については、別途「付録 1」に整理しているので参照されたい。

(1) スウェーデンにおける取組事例

1) シーリングシステムの設計を含むセーフティケース開発の全体概要

① サイトの地質環境特性

スウェーデンでは、使用済燃料を深度 500 m 程度の結晶質岩中に処分する計画となっている。地層処分の実施主体である SKB は、処分場の建設予定地としてエストハンマル自治体のフォルスマルクを選定し、2011 年 3 月に処分場の立地・建設の許可申請書を放射線安全機関（SSM）に提出した。

地層処分の長期安全性の観点から留意すべきサイトの基本特性としては、①処分場深度におい

て透水性亀裂の存在頻度が低い、②スウェーデンの深部花崗岩の一般的な特性と同様に処分場深度は還元性環境、③地下水の塩分濃度（5,000～6,000 mg/L）がベントナイトを用いた緩衝材の安定性に有利、④数十万年周期の氷河サイクル（隆起・沈降に伴う岩盤応力、地下水流動、水理化学面での変化）が存在する、⑤金属や産業用鉱物の掘削可能性がない、ということが挙げられている（SKB, 2011）。

② 処分場構成

スウェーデンにおける処分概念の基本情報を表 3.2-1 に示す。スウェーデンの処分概念は KBS-3 概念と呼ばれている。使用済燃料はキャニスタに封入され、その周囲に緩衝材（ベントナイト粘土）を設置して、力学的、化学的に安定した岩盤内に定置される。キャニスタと緩衝材が定置された後、処分坑道を埋め戻してコンクリートプラグでシールされる。全ての廃棄体の設置が完了すると、他の坑道などの開口部が閉鎖材で埋め戻される。これらの複数の人工バリアと天然バリアを組み合わせた多重バリアシステムにより、放射性廃棄物は人の生活環境から長期的に隔離される。

表 3.2-1　スウェーデンにおける処分概念の基本情報

事業進捗状況	● 2001 年;政府が SKB 社のサイト調査候補地の選定結果を承認 ● 2009 年;フォルスマルクを処分場建設予定地に選定 ● 2011 年;立地・建設許可申請書を提出 ● 2030 年;処分開始予定
処分対象廃棄物	使用済燃料（12,000tU）
処分概念 （KBS-3V）	● 使用済燃料をキャニスタ（外側：銅製／内側：鋳鉄製）に封入し、その周囲を緩衝材（ベントナイト粘土）で取り囲んで、力学的及び化学的に安定した岩盤内に定置 ● 複数の人工バリアと天然バリアを組み合わせた多重バリアシステムにより、放射性廃棄物を長期に隔離し、隔離ができなくなった場合でも処分場からの放射性核種の放出を遅延 ※横置き方式（KBS-3H 概念）の実現可能性も検討中
処分場構成要素	①キャニスタ　②緩衝材　③埋め戻し材　④閉鎖材（※③④には各種プラグが含まれる） ※人工バリアではないが、「母岩」も安全機能が割り当てられた構成要素。 支保、ロックボルト、グラウトの使用を想定。

③ 安全規制要件とシーリングシステム構成

(a) 安全規制要件

安全規制要件（SSM, 2008）の規則では、シーリングシステムの機能について以下のように記載されている。

- 処分場の閉鎖後安全性は、受動的なバリアシステムにより維持されなければならない
- それぞれのバリアは、直接的または間接的にバリアシステムの他のバリアを保護することにより、放射性物質の閉じ込め、移行の抑制あるいは遅延に寄与する一つ又は複数の機能を有するものでなければならない

規制文章の中では、埋め戻し材に用いる材料及びそのバリア機能の例として以下が挙げられている。

埋め戻し材の材料の例：粘土、砂またはコンクリート

バリア機能の例：低透水性、溶存物質の低透過性、放射性物質の散逸防止に寄与する化学的性質、他のバリア機能を保護・維持する能力

また、処分場の設計及び建設については、以下のように記載されている。

- バリアシステムは、それらのバリアの閉鎖後の性能に影響を与える可能性がある特性、事象、プロセスに対して、耐久性がなければならない
- バリアシステムは、利用可能な最善技術を考慮して設計、建設されなければならない
- バリアシステムは、一つのバリアに個々の不具合が生じた場合に、可能な限りにおいて、必要な安全性が維持されるように複数のバリアを含むものでなければならない

(b) シーリングシステム構成（SKB, 2010a；2010b）

SKB では「シーリングシステム」の構成要素が明確に定義されていない。そのため、埋め戻し材、閉鎖材、プラグをシーリングシステムの構成要素として、それぞれの名称、定義、目的と機能を表 3.2-2 に整理した。また、埋め戻し材、閉鎖材、プラグに要求されるバリア機能（性能要件、設計要件、設計仕様等）を表 3.2-3 に示す。SKB では、処分坑道には埋め戻し材を充填し、処分坑道以外の坑道は閉鎖材で充填される。また、図 3.2-1 に示すように閉鎖材に用いる材料は粘土や破砕岩（圧縮）など、処分深度に応じて使い分けることが検討されている。

表 3.2-2　スウェーデンにおけるシーリングシステムの構成要素

エリア	構成要素の名称		定義	目的及びその機能
地表から処分深度まで	閉鎖材(closure)	トップシーリング	立坑及び斜坑の上部を充填し、閉鎖するために設置される物質	意図しない処分場への侵入を防ぎ、地下開口部を通じた地下水移行を制限する。
		トップシーリング下の斜坑及び立坑の閉鎖材	トップシーリング下部（深度 200m まで）を充填し、閉鎖するために設置される物質	
処分エリア深度		中央エリアの閉鎖材	中央エリアを充填し、閉鎖するために設置される物質	
		主坑道及び輸送坑道の閉鎖材	主坑道及び輸送坑道など処分坑道以外の坑道を充填し、閉鎖するために設置される物質	
		閉鎖材としてのプラグ (注：長期バリアとしての機能は期待していない)	力学又は水理学的、あるいは閉鎖材の設置に対する安全性のために設置される構造物	● 力学的な強度及び／又は水理面での制御機能を有する。 ● 安全かつ確実な閉鎖材の設置に寄与する。
	埋め戻し材(backfill)	埋め戻し材	処分坑道を充填するために設置される物質	● 緩衝材を定置位置に保持し多重バリアの原則を維持する。 ● 定置坑道を通じた地下水の流動を制限する。
		処分坑道プラグ (注：長期バリアとしての機能は期待していない)	処分坑道の末端に設置され、操業期間にわたり、処分坑道を閉鎖する構造物	主坑道の充填が終了し、飽和するまで処分坑道を閉鎖し、内部の埋め戻し材を所定の位置に保つと共に、水の流動を阻止する。

表 3.2-3　スウェーデンのシーリングシステム構成要素に求められるバリア機能

（SKB, 2010a；2010b）

構成要素	性能要件	設計要件	設計仕様
埋め戻し材（処分坑道）	● 処分坑道内の水の流動（移流移行）の制限	透水係数：$<10^{-10}$ m/s 膨潤圧：＞0.1 MPa	ベントナイト粘土の使用
	● 処分孔から上向きの緩衝材の膨潤／膨張の制限	密度：＞1,950 kg/m^3	
	● その他バリアのバリア機能を著しく損なわないこと	記載無し	
	● 想定される処分環境下での長期間耐久性の保持及びその他のバリア機能の維持	記載無し	
処分坑道プラグ	● 処分深度における静水圧と埋め戻し材の膨潤圧に耐えること（主坑道の充填完了まで）	埋め戻し材からの膨潤圧：5MPa	詳細は今後検討
	● プラグを介した水の流動の制限（隣接する主坑道が充填され、飽和状態となるまで）	今後検討	
	● 処分施設及び処分場環境下での耐久性の保持及び機能維持（主坑道の閉鎖材が飽和状態となるまで）	● 埋め戻し材からの膨潤圧：5MPa ● 燃料からの発熱によるコンクリートの熱膨張	
	● 他の人工バリア又は岩盤のバリア機能を著しく損なわないこと	● pH ≤ 11 ● 高流動化剤以外の有機物使用の禁止	
閉鎖材	● 処分場と地上との間の岩盤のバリア機能低減に影響する高透水性流路の形成防止	透水係数： $<10^{-8}$m/s（立坑、斜坑及びボーリング孔のみ。その他は制限なし）	詳細は今後検討
	● 他のバリアのバリア機能を著しく損なわないこと	pH < 11	
	● 埋め戻し材の膨潤/膨張、及び処分坑道からの膨出制限（主坑道の閉鎖材）	記載無し	
	● 隣接する地下開口部の閉鎖材を設置位置に留める機能維持	記載無し	
	● 処分場への意図的しない侵入の効果的な抑止（立坑、斜坑及びボーリング孔上部の閉鎖材）	記載無し	
	● 想定される処分環境下での長期間耐久性の保持及びバリア機能の維持	記載無し	
閉鎖材としてのプラグ	● 設置場所での静水圧に耐えること ● プラグを介した水の流動の制限（隣接する坑道、立孔、斜坑等が充填され、飽和状態となるまで） ● 耐久性の保持及び機能維持（地下開口部の閉鎖材が飽和状態となるまで） ● 他の人工バリア又は岩盤のバリア機能を著しく損なわないこと	記載無し	詳細は今後検討

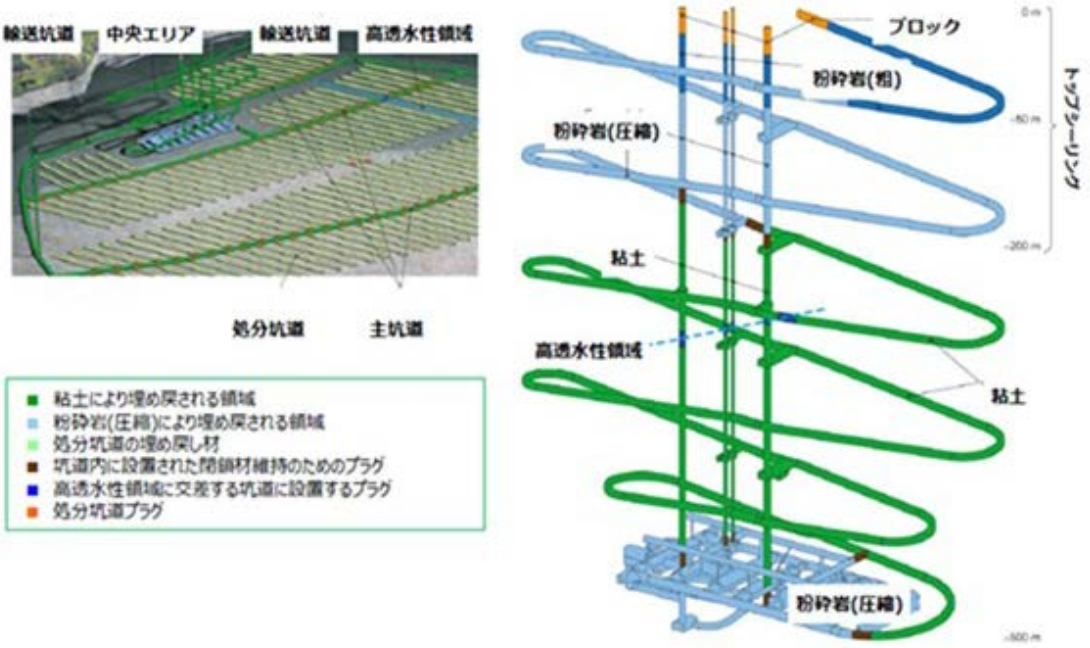


図 3.2-1　シーリングシステム構成要素の設置イメージ
（SKB, 2010a）

2)　要件管理に基づく処分場設計の方法論

①全体概要（方法論）

SKB の報告書では、処分場設計に関する方法論がフローなどで明示的に示されていない。そのため、SR-Site 報告書（SKB, 2010c）と埋め戻し材の Production Report（SKB, 2010b）に記載されている内容に基づいて、処分場設計の全体像を図 3.2-2 のように整理した。

処分場の設計では、最上位に処分場の安全性を評価する際に使用される総合的な規準として規制リスク基準があり､代表的な 1 人の個人についてのリスクが 10^{-6} を超えないこととされている。リスク基準値に対して、処分場の主要な安全機能として閉じ込め（一次安全機能）と遅延（二次安全機能）が設定されている。閉じ込めと遅延の安全機能から、キャニスタ、緩衝材、埋戻し材、母岩のそれぞれに対して下位の安全機能が割り当てられる。下位の安全機能を定量的に評価するために、安全機能指標が設定され、その制限値として安全機能指標基準が設定される。安全機能指標基準は、安全面での機能に関する定量的な制限値であり、処分場構成要素は評価期間を通じて制限値を満足する必要がある。そして、処分場構成要素にはバリア機能を設定して、設計パラメータと設計基準が設定される。

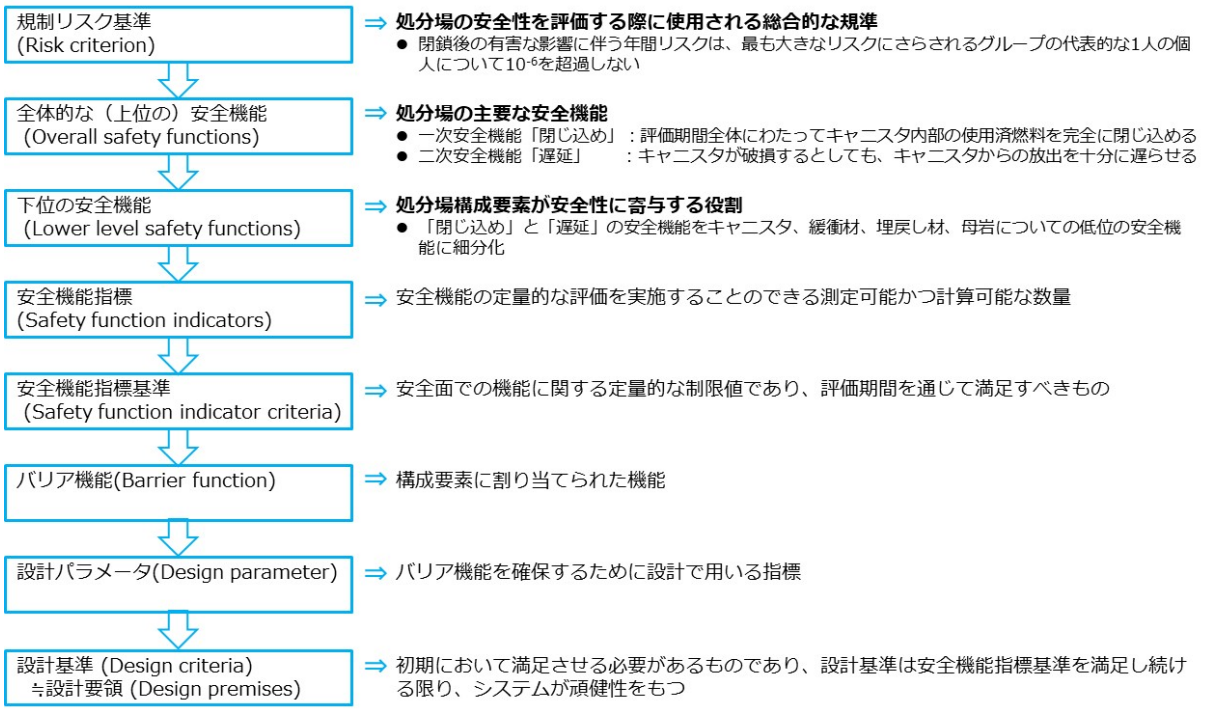
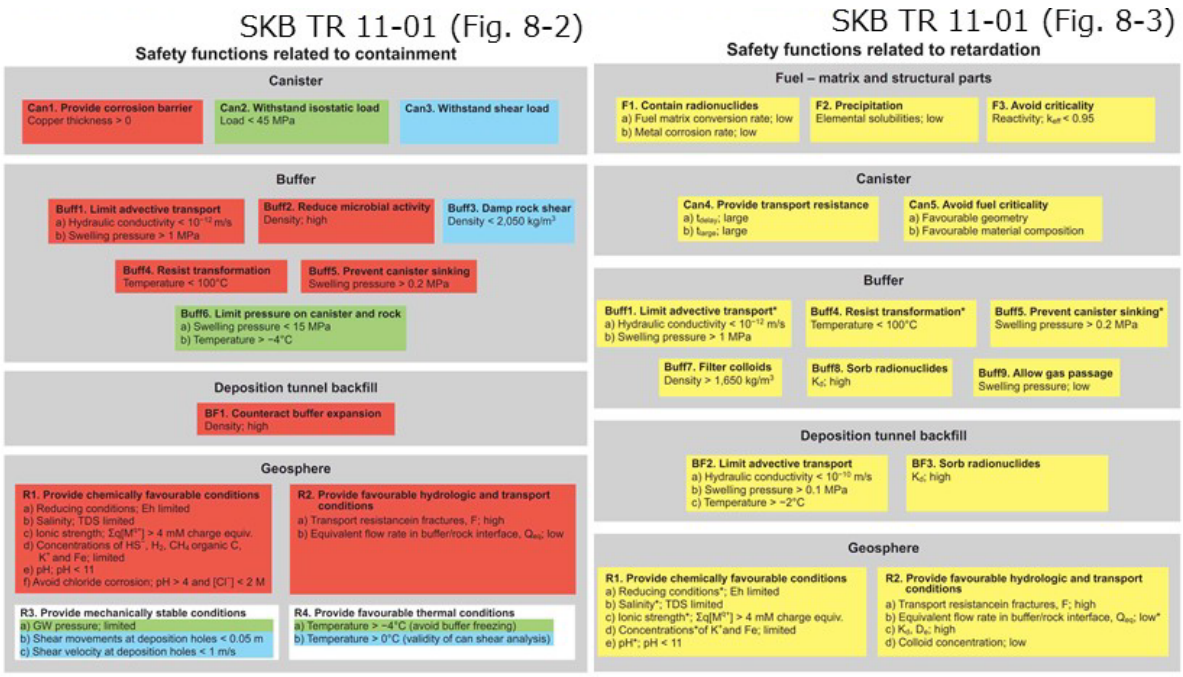


図 3.2-2　処分場設計全体フロー

②構成要素への要件の展開例

KBS-3 概念の第一の安全機能は、評価期間全体にわたり使用済燃料を銅製キャニスタ内に完全に閉じ込めることであり、SR-Site の場合、この期間は 100 万年に設定されている。たとえキャニスタに損傷が生じ、キャニスタから放射性核種の放出が生じた場合であっても、第二の安全機能によってこれが遅延されることになる。SKB における安全機能の展開例を図 3.2-3 に示す。各構成要素の閉じ込めに関する安全機能は、キャニスタの安全機能（閉じ込め）を直接的または間接的に支援するように設定されている。また、遅延に関する安全機能は、キャニスタに破損が生じた場合に核種の放出抑制及び遅延機能が維持されるように設定されている。



※閉じ込め/遅延に関連した安全機能（太字）、安全機能指標及び安全機能指標基準。
※定量的な基準を示せない場合、安全機能指標の好ましい値を示すために「高い」、「低い」及び「限定的」などの用語が使用されている。
※色彩の違いは、その機能がキャニスタの安全機能にどのように寄与しているかを表している：Can1（赤色）、Can2（緑色）、Can3（青色）。

図 3.2-3　構成要素への安全機能の展開例
（SKB, 2011）

③シーリングシステムに関するレファレンス設計

埋め戻し材、プラグ、閉鎖材のレファレンス設計仕様を表 3.2-4、表 3.2-5、表 3.2-6 にそれぞれ示す。また、埋め戻し材の充填とプラグの設置イメージを図 3.2-4、図 3.2-5 に示す。埋め戻し材は、ブロックを用いて施工し、ブロックと岩盤の隙間はペレットを充填することが検討されている。

表 3.2-4　埋め戻し材のレファレンス設計
（SKB, 2010b）

Design parameter	Nominal design	Accepted variation
Blocks		
Block part of blast round volume[1]	According to Figure 3-2	V_{blocks} ≥ 60%
Free space between blocks and tunnel walls	–	Free space ≥ 10 cm
Pellet filling in gap between blocks and tunnel walls		
Pellet part of blast round volume	The volume between the installed blocks and deposition tunnel walls	–
Bottom bed		
Thickness	10 cm from nominal tunnel floor	–
Inclination perpendicular to the tunnel axis	–	< 3 mm/tunnel width
Inclination along the tunnel axis	Inclination of nominal tunnel floor	–
Dry density compacted bed	> 1,200 kg/m³	–

[1] Including blocks in the upper part of the deposition hole and excluding slots between blocks.

注）埋め戻し材に使用されるベントナイト粘土は、IBECO-RWC-BF（ミロス島産）、アシャ（カッチ産）及びMX-80（ワイオミング産）が検討されており、設計仕様はIBECO-RWC-BF（ミロス島産）を想定した設計となっている。

表 3.2-5　プラグのレファレンス設計

処分坑道プラグ 構成部位	役割	材質
コンクリートプラグ (Concrete plug)	● 耐力学的変形 ● 他のプラグ構成部位の位置の維持	鉄筋コンクリート
コンクリートビーム (Concrete beams)	①コンクリートプラグ打設時のコンクリートとベントナイトの混合防止、及び水密性シールの位置の維持 ②フィルタの位置の維持 ③埋戻し材の位置の維持	鉄筋コンクリート
水密性シール (Watertight seal)	● コンクリートプラグ内又はコンクリートと岩盤表面との間の微小割れ目を介した漏出経路のシール ● プラグへの圧力勾配の吸収	ベントナイトブロック／ペレット
フィルタ(Filter)	● 養生完了前のコンクリートプラグへの水圧影響を防止・低減するため、埋め戻し材からの漏出水を集水し、排水管を通じて排出	砂又は砂利
排水管(Drainage)	● 養生完了前のコンクリートプラグへの水圧影響を防止のため、フィルタに集水された水を処分坑道外部に排水	鋼鉄（又は必要に応じてチタン製）
グラウチング管 (Grouting pipes)	● コンクリートプラグと岩盤との岩着及びプレストレス状態の維持	鋼鉄

表 3.2-6　閉鎖材のレファレンス設計

（SKB, 2010a）

施工場所	想定されている構成材料	備考（今後の課題等）
トップシーリング	最大粒径 200mm の砕石	施工深度は想定される永久凍土深度で決定
立坑／斜坑	● 粘土系物質 ● 高透水性領域は、砂又は粉砕岩	―
中央エリア	原位置で砕石を圧縮	必要な密度や透水性、圧縮率等の特定
主坑道及び輸送坑道	処分坑道埋め戻し材と同様に粘土系物質	―
試錐孔	● 頑健な密閉効果を要求される箇所：圧密ベントナイト ● 破砕体通過区間：コンクリートプラグ	―
閉鎖材としてのプラグ	現場の条件に依存するため、今後検討されるが、下記種類を想定 ● 異なる材質で充填された領域（例：砕石と粘土）の連結開口部を隔てるプラグ ● 立坑、斜坑及び坑道が高透水性領域を通過する場合に使用されるプラグ ● 中央エリアのような大規模な地下開口部に閉鎖材の設置する際のプラグ	―

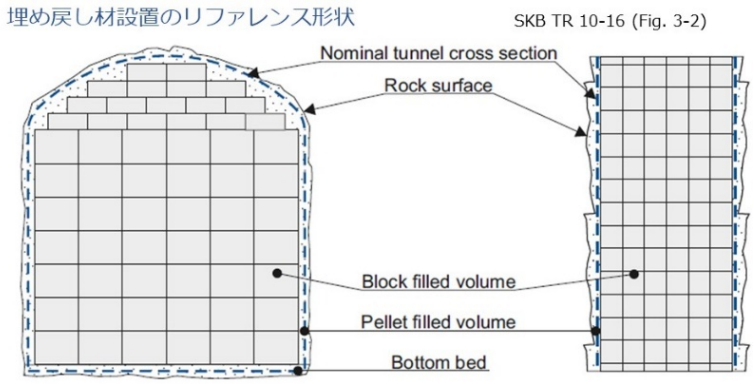


図 3.2-4　埋め戻し材の充填イメージ

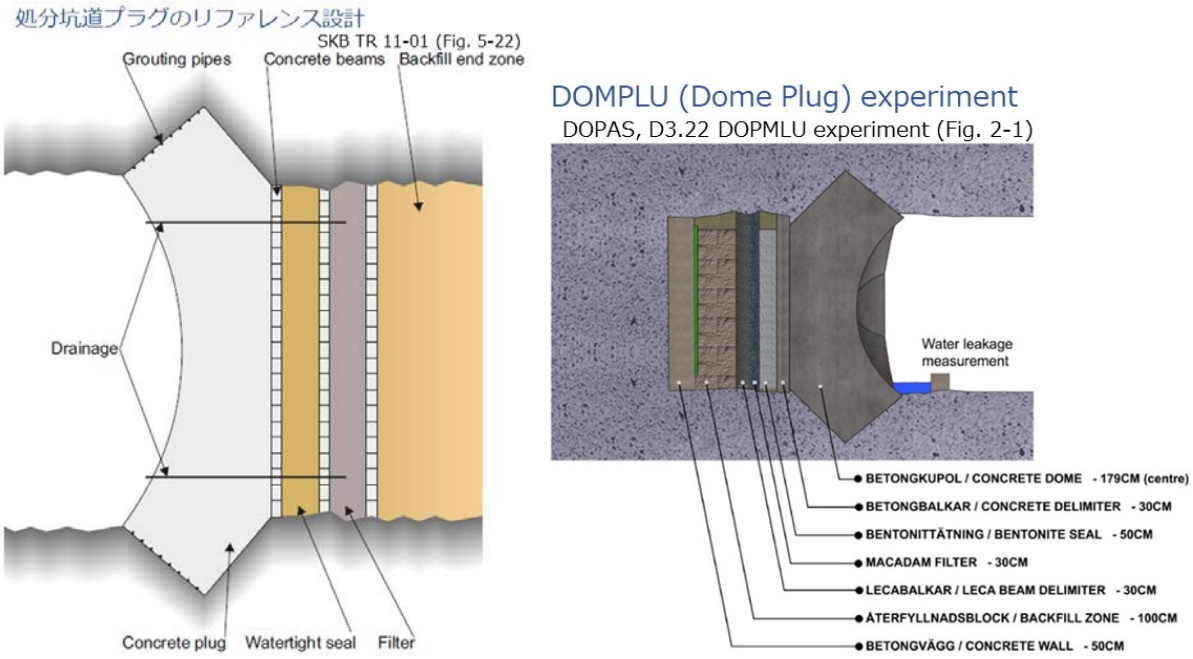


図 3.2-5　プラグの施工イメージ
（SKB, 2011）

3)　性能評価におけるシーリングシステムの取扱い

SKB では、性能評価に相当する用語として、「reference evolution」が使用されている。性能評価では、基本ケースと地球温暖化バリアントの 2 つのケースが扱われている。基本ケースでは、以下の期間についての性能評価が実施される。最初の 12 万年の氷期サイクルの間の外部条件は、前サイクルのウルム氷期と同様と仮定されており、その後の 100 万年間の評価期間全体の終わりまで、さらに 7 回のサイクルの反復が想定されている。

期間１：掘削・操業期
期間２：処分場閉鎖後の最初の 1,000 年間、及びレファレンス氷期サイクル当初の温暖期
期間３：氷期サイクル当初の残りの期間
期間４：氷期サイクルの２回目から、処分場閉鎖後 100 万年までの期間

地球温暖化バリアントのケースでは、最初の 12 万年の氷期サイクルに気候変動が考慮されており、外部条件は人為起源の温室効果ガスの排出による影響が想定されている。

SKB におけるシーリングに関する性能評価の評価項目を抽出し、上記の評価期間ごとに表 3.2-7 に整理した。評価期間 4 における評価結果の空欄は、評価対象期間 100 万年間までにおいて、透水係数が比較的高く、定置坑道と交差する亀裂により埋め戻し材の密度低下が生じたとしても、処分孔内で移流条件が成立するほどの規模の浸食を引き起こすことはないためとされている。この亀裂が破砕帯と接している箇所については、220 トンを上回る埋め戻し材が失われると評価されているが、これはキャニスタの密封性の観点からは重要ではないとされている（SKB, 2011）。

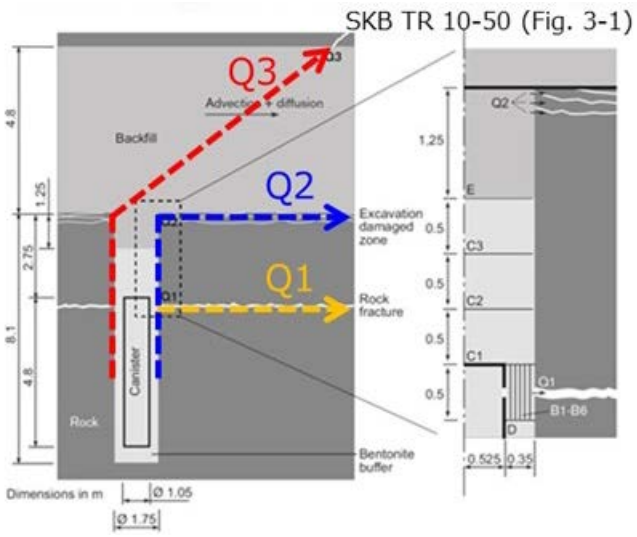
表 3.2-7　シーリングに関する性能評価の評価項目

評価期間	評価項目		
期間 1	● プラグの水飽和とそのシーリング能力 ● パイピングによる緩衝材の浸食	● 処分孔における緩衝材浸食量の推定 ● 浸食される定置坑道の埋め戻し材	● ベントナイト物質喪失後の均質化
期間 2	● 埋め戻し材の飽和 ● 乾燥岩石ケースにおける水分再分配 ● フォルスマルク・サイトにおける水理条件への適用 ● 埋め戻し材の均質化 ● 緩衝材の上方に向けた膨張 ● ベントナイト物質の喪失が起きた後の均質化 ● 緩衝材の喪失	● 埋め戻し材物質の喪失後の均質化 ● 移流条件が成立する可能性 ● 不飽和段階と高温期間 ● 塩分濃度の影響 ● コロイド化放出が起こり得る条件 ● 定置坑道埋め戻し材の浸食率 ● 埋め戻し材、さらには透水性亀裂と連結していない緩衝材における地球化学的な変遷	● 飽和期間 ● フォルスマルク・サイトにおける地球化学的な条件の適用 ● 定置坑道プラグのコンクリートの劣化 ● 坑道プラグ崩壊後の埋め戻し材の膨潤 ● 緩衝材及び埋め戻し材に対する浸透圧効果
期間 3	● 凍結 ● 地下水組成が変質した場合の緩衝材及び埋め戻し材の化学的変遷	● 緩衝材と埋め戻し材のコロイド化放出 ● 液状化	● 塩水が緩衝材及び埋め戻し材に及ぼす効果 ● 流動の増大による力学的な効果
期間 4	● 緩衝材の膨張の相殺		

4)　安全評価におけるシーリングシステムの取扱い

安全評価においては、処分坑道の埋め戻し材を介した核種移行シナリオが検討されている。SR-Site の核種移行シナリオとしては、キャニスタ破損シナリオと仮想的残余シナリオが設定されている。キャニスタ破損シナリオでは、腐食によるキャニスタ破損と地震によるせん断によって引き起こされるキャニスタ破損の 2 つのシナリオが設定されている。仮想的残余シナリオでは、地殻均衡荷重シナリオ（地殻均衡荷重によるキャニスタの破損）、ピンホール拡大シナリオ（キャニスタの貫通ピンホールの拡大による欠陥モード）、バリア損失シナリオ（さまざまなバリアが完全に失われると仮定した仮想ケース）が設定されている。

ニアフィールドにおける核種移行については、上記のシナリオのうち腐食によるキャニスタ破損シナリオでは、あらゆるニアフィールド構成要素が核種の保持機能を有さないと仮定した評価、ピンホール拡大シナリオを除く他のシナリオでは、核種が緩衝材（核種の保持機能を考慮）を移行後に処分孔界面から岩盤亀裂へ移行（図 3.2-6 の放出経路 Q1 に該当）する評価が行われているため、埋め戻し材を介した移行経路は想定されていない。



※図中の矢印は、シーリングシステムを介した核種移行（Q2 及び Q3）

図 3.2-6　ピンホール拡大シナリオにおける核種移行径路

（SKB, 2010c）

ピンホール拡大シナリオについては、放出経路 Q1 に加えて緩衝材及び埋め戻し材を介した拡散・移流を考慮した処分坑道底面の掘削影響領域（EDZ）（図 3.2-6 の放出経路 Q2 に該当）と処分坑道に交差する亀裂（図 3.2-6 の放出経路 Q3 に該当）への移行経路が考慮されている。このシナリオでは、緩衝材及び埋め戻し材での核種の収着が考慮されている。

また、閉鎖材を介した核種移行に関しては、対象となる立坑や斜坑、ボアホールの地下開口部が卓越した経路となることは想定されていない（SKB, 2010c）。これは、元来、閉鎖材により地下開口部が有効な水みちにならないように設計されていること、加えて、安全評価において、核種移行は岩盤又は岩盤亀裂中の移流移行が卓越しているためである。

EDZ における核種移行は、処分坑道周囲に生じる掘削影響領域について、その核種移行経路としての重要度は限定的であり、処分坑道周囲に生じる EDZ の重要度は、他の核種移行経路と比べて限定的であるとされている。EDZ に関して、基本掘削工法では、非常に悲観的な仮定をしない限り、移流条件下でのキャニスタ腐食の程度に影響は生じない（SKB, 2010c）。

(2) フィンランドにおける取組事例

1) 処分場設計を含むセーフティケース開発の全体概要

①フィンランドにおけるサイトの地質環境特性

フィランドでは、使用済燃料を深度 400～500 m の結晶質岩中に処分する計画となっている。地層処分の実施主体である POSIVA は、処分場の建設地としてエウラヨキ自治体のオルキルオトを選定した。

フィンランドにおける水理地質構造のイメージを図 3.2-7 に示す。地層処分の長期安全性の観点から留意すべきサイトの基本特性としては、①変形帯や破砕帯が存在する（水理学的な活動水準が高い）、②比較的高い地下深部の岩石応力（坑道安定性への影響）、③深部地下水の塩分濃度が高い、④約 12 万年周期の氷河サイクル（隆起・沈降に伴う岩盤応力、地下水流動、水理化学面での変化）、ということが挙げられている。

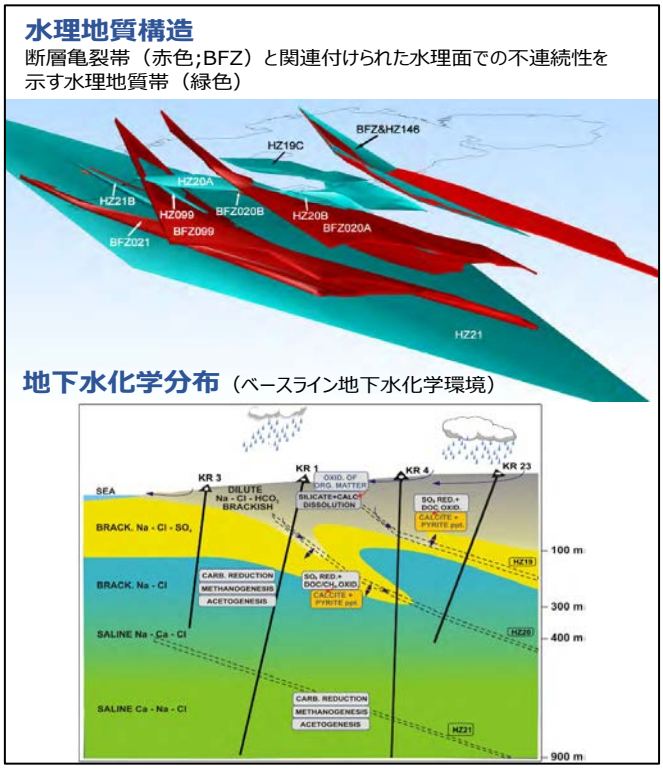


図 3.2-7　フィンランドにおける水理地質構造
（POSIVA, 2012）

②処分場構成

フィンランドにおける処分概念の基本情報及び処分場のイメージを表 3.2-8、図 3.2-8 にそれぞれ示す。フィンランドでは、SKB が開発した KBS-3 概念が採用されている。使用済燃料はキャニスタに封入され、緩衝材、埋戻し材、地層からなる多重バリアシステムにより、長期間にわたり環境から放射性廃棄物が隔離される。

表 3.2-8　フィンランドにおける処分概念の基本情報

事業進捗状況	● 2001 年;候補サイトを原則決定（2004 年;精密調査施設建設開始） ● 2013 年;建設許可申請 ● 2015 年;建設許可発給（2016 年;処分場建設開始） ● 2020 年代初め;処分開始（操業期間は約 90 年）
処分対象廃棄物	使用済燃料（6,500tU）
処分概念 （KBS-3V）	● 使用済燃料をキャニスタ（外側：銅製／内側：鋳鉄製）に封入し、その周囲を緩衝材（ベントナイト粘土）で取り囲んで、力学的及び化学的に安定した岩盤内に定置 ● 複数の人工バリアと天然バリアを組み合わせた多重バリアシステムにより、放射性廃棄物を長期に隔離し、隔離ができなくなった場合でも処分場からの放射性核種の放出を遅延 ※スウェーデンと共同で横置き方式（KBS-3H 概念）の実現可能性も検討中
処分場構成要素	①キャニスタ　②緩衝材　③埋め戻し材　④閉鎖材（※③④には各種プラグが含まれる） ※人工バリアではないが、「母岩」も安全機能が割り当てられた構成要素。支保工の施工は想定されていないが、ロックボルトやグラウトの使用を想定。

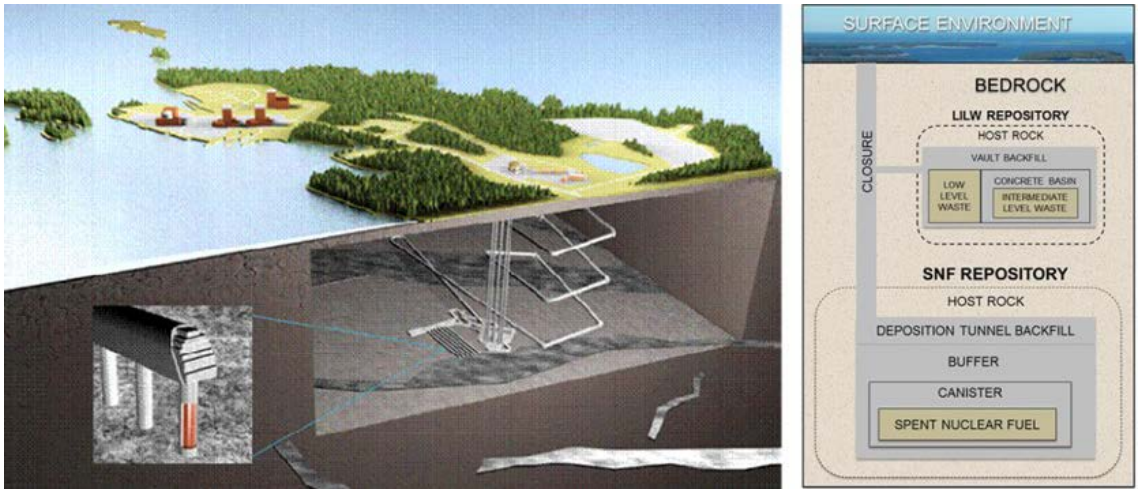


図 3.2-8　KBS-3V 処分概念
（POSIVA, 2017）

③安全規制要件とシーリングシステム構成

STUK 規制指針（STUK, 2015）では、埋め戻し材及び閉鎖材は人工バリアの一部と定義されている。考慮すべき安全機能としては、他の人工バリアの機能維持、掘削坑道を介した放射性物質の移行制限が要求されている。また、母岩の望ましい長期特性の維持のための坑道の建設・操業・閉鎖に係る要件としては、定置坑道が処分活動やモニタリング等に不都合にならない限り迅速に埋め戻して閉鎖することが要求されている。フィンランドにおけるシーリングシステムの構成要素を表 3.2-9 に、シーリング構成要素のイメージ図を図 3.2-9 に示す。

表 3.2-9　シーリングシステムのシステム構成要素
（POSIVA, 2013；2012b）

区画分類	構造物名称		定義
地表から処分深度までの区画	閉鎖材 (Closure)	閉鎖埋め戻し材	○ アクセス坑道及び立坑の埋め戻し･閉鎖のために設置される構造物 （巨れき、破砕岩、粘土及びそれらの混合物を深度によって使い分け）
		プラグ	○ 隔離のための構造物 ○ 力学プラグ、水理プラグ、人間侵入防止プラグ
処分深度の区画【主に処分坑道】	閉鎖材 (Closure)	閉鎖埋め戻し材	● 処分坑道以外の空洞の埋め戻しのための構造物 （破砕岩や粘土）
		プラグ	● 隔離のための構造物 ● 力学プラグ、水理プラグ
	埋め戻し材 (Backfill)	処分坑道埋め戻し材	● 処分坑道の埋め戻しのための構造物 （底盤および粘土系材料のブロックとペレットより構成）
		処分坑道プラグ	● 処分坑道を力学的､水理的な隔離のために処分坑道端部に設置される構造物 （鉄筋･低 pH コンクリート製のコンクリートドーム及びコンクリートビーム、砂又は砂利より成るフィルタ、粘土製の水密性シールより構成）

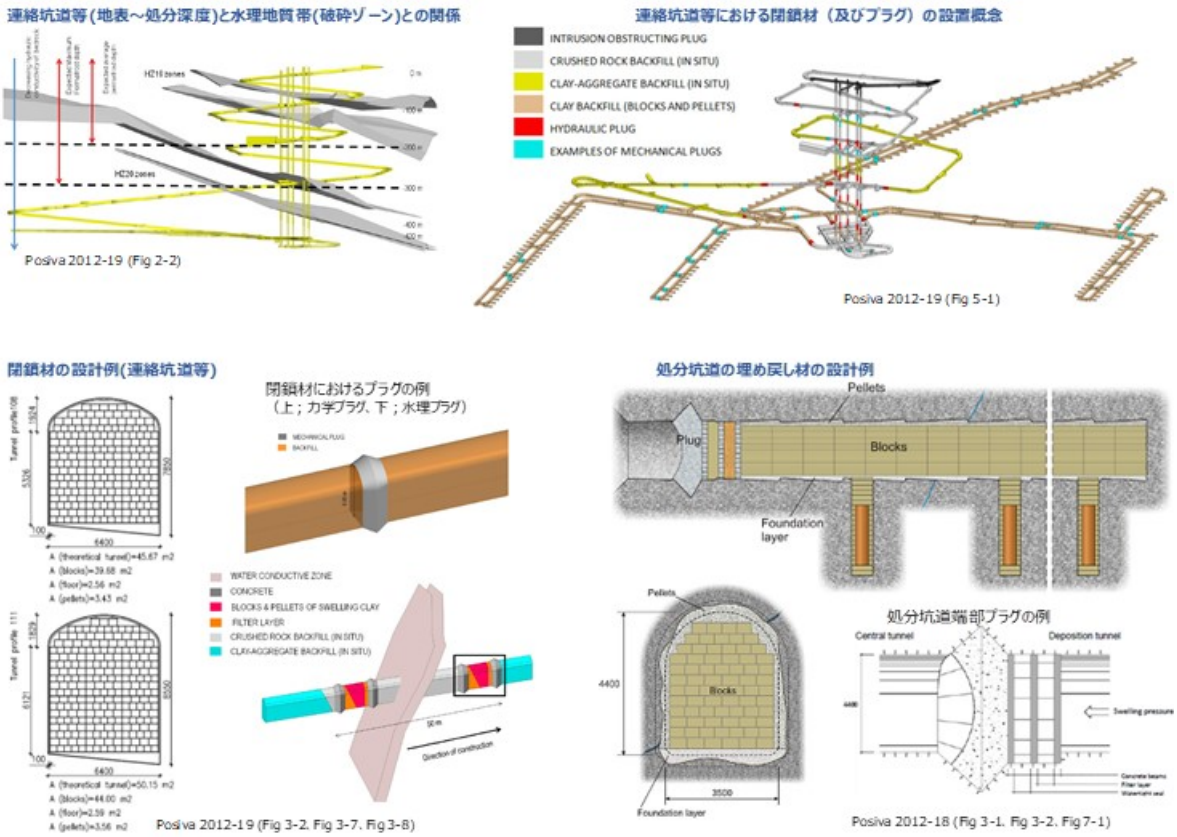


図 3.2-9　シーリング構成要素のイメージ図

2)　要件管理に基づく処分場設計の方法論

①全体概要（方法論）

POSIVA における処分場の設計方法の概要を図 3.2-10 に示す。図 3.2-10 では、最上位の法規制要件（ステークホルダ要件；L1）を含めて、5 段階に階層化されて要件が展開されている。長期安全原則（L2）では、安全確保の考え方として、閉じ込め、隔離、移行遅延といった安全機能が提示されている。性能要件（L3）では、処分システムに要求される安全レベルを実現するために、長期的に満たされるべき性能目標が設定される。設計要件（L4）では、L3 で設定した性能目標に対して、将来予想される負荷に耐えるために満たすべき要件が設定される。設計要件までは定性的な要件が設定されており、設計仕様（L5）では L4 を満たすための定量的な値や情報が提示されている。

これらの要件設定を通した設計基準（レファレンス設計）の開発、処分場システムの性能評価、放射性核種の放出につながるシナリオの作成及び安全評価が、相互に連携した反復的開発プロセスの中で実施される。

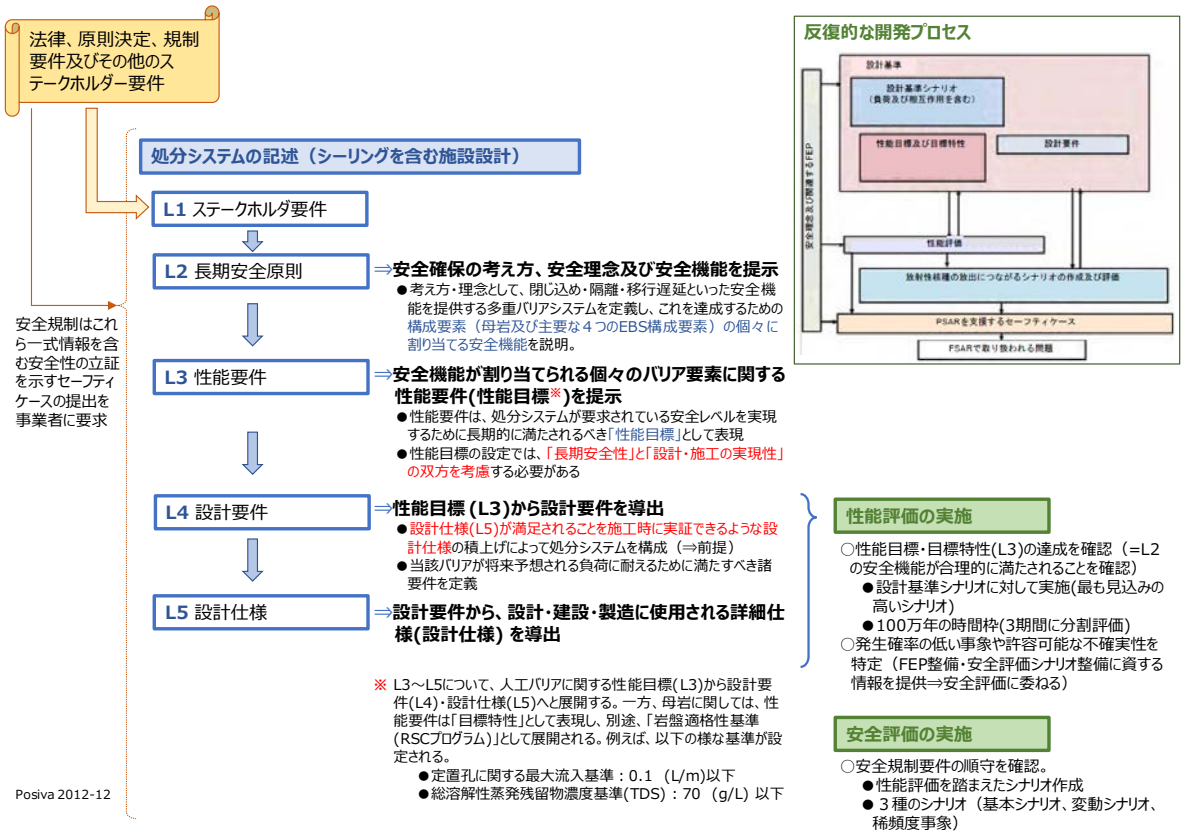


図 3.2-10　セーフティケースで表現されるシーリングを含む処分場設計の全体像

②シーリングシステムに関する要件の展開例（POSIVA, ; 2012b）

シーリングシステムに関する要件について、埋め戻し材を例として要件の展開例を図 3.2-11 に示す。埋め戻し材に関する性能要件（L3）は、埋め戻し材自身の性能に関する性能目標と他の構成要素の機能発揮を支援するための性能目標の 2 つの観点から設定されている。設計要件（L4）の設定では、要件設定の根拠及び性能発揮において予想される負荷についても整理されている。設計仕様（L5）の設定では、埋め戻し材のサブシステム要素毎（ブロック、ペレット、底板）に、材料特性や具体的な材料製造～原位置施工の手順を整理し、その実現性の見通しが得られている。（POSIVA, 2012）。その上で、製作・施工が実現できる範囲の中で、施工仕様を初期状態として定めている。設計仕様（L5）として展開される処分坑道の埋め戻し材の初期状態を図 3.2-12 に示す。

L2 長期安全原則
（安全機能）

埋め戻し(処分坑道)

- 緩衝材及びキャニスタにとって良好かつ予測の比較的容易な力学的、地球化学及び水理地質学的な条件に寄与する。
- 起こり得るキャニスタ破損事象の発生後に、放射性核種放出を制限し、遅延させる。
- 定置坑道に隣接する岩石の力学的な安定性に寄与する。

L3 性能要件
（性能目標）

埋め戻し(処分坑道)

- **L3-BAC-5**
  別途指定されていない限り、埋め戻し材及びプラグは、偶発的な逸脱を除き、処分場に予想される条件において、**数十万年間の期間にわたり**、以下に列記する性能目標を満たすものとする。
- **L3-BAC-8**
  埋め戻し材は、定置坑道沿いの移流による流動を制限するものとする。
- **L3-BAC-9**
  プラグは、処分場の操業段階にわたり、定置坑道を水理学的に隔離するものとする。
- **L3-BAC-13**
  埋め戻し材及びプラグの化学的組成は、緩衝材、キャニスタまたは基盤岩の性能を危険にさらすことのないものとする。
- **L3-BAC-16**
  埋め戻し材は、緩衝材を所定の位置に保つものとする。
- **L3-BAC-17**
  埋め戻し材は、定置坑道の力学的安定性に寄与するものとする。
- **L3-BAC-18**
  プラグは、操業フェーズにわたり、埋め戻し材を所定の位置に保つものとする。
- **L3-BAC-19**
  埋め戻し材は、定置孔内でのキャニスタの持ち上げ（リフティング）現象の防止に寄与するものとする。

Posiva 2012-12、Posiva 2012-18

L4 設計要件

埋め戻し(処分坑道)

(定義)

- 埋め戻し材の主成分は、天然膨潤性粘土で構成しなければならない。プラグは、良好な水理的隔離能力を備え、長期的に大規模な体積変化を起こさない物質で構成しなければならない。

(性能)

- **L4-BAC-28 自己シーリングと自己修復**
  埋め戻し材は、設置後の自己シーリングや、何らかの水理学的及び力学的擾乱の発生後の自己修復が可能となるよう設計しなければならない。

(水理・移行特性)

- **L4-BAC-5 透水係数**
  埋め戻し材は、飽和後に埋め戻された坑道の全断面における透水係数が1×10^{-10} m/s以下となるよう設計しなければならない。
- **L4-BAC-6 プラグの供用寿命**
  プラグは、少なくとも中央坑道が閉鎖されるまで、水理的隔離能力を維持するように設計しなければならない。

(力学特性)

- **L4-BAC-13 プラグの膨潤圧及び水圧に対する耐性** [～割愛～]
- **L4-BAC-14 プラグが埋め戻し機能を維持する能力** [～割愛～]
- **L4-BAC-29 母岩との接触**
  初期状態において、埋め戻し材は母岩と良好に接触していなくてはならない。

(化学特性)

- **L4-BAC-18 有害物質含有量の制限** [～割愛～]

(他の要素のサポート)

- **L4-BAC-30 緩衝材を所定の位置に保つための･･･** [～割愛～]

L5 設計仕様

性能特性（埋め戻し材）

(モンモリロナイト含有量)

- 30-38%（Friedland clay blocks）
- 75-90%（Foundation layer and Pellets）

(乾燥密度 [dry density])

- 1990-2070 kg/m³（Friedland clay blocks ）
- 1150-1350 kg/m³（Foundation layer）
- 900-1100 kg/m³（Pellet）

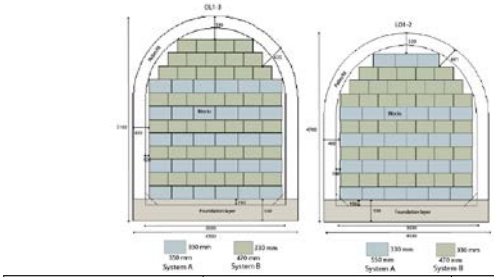
(ジオメトリ)

- The backfill blocks shall have following dimensions: 550 x 470 x 330 mm. The manufacturing tolerance shall be -1 mm / +2 mm.
- The block filling degree (from the theoretical/nominal cross-section) shall be >80%.
- The gap width between the blocks and the theoretical tunnel wall/roof shall be 100 mm. The pellet fill shall fill the remaining open gap between the blocks and rock.
- The thickness of the foundation bed shall be maximum +150 mm above the theoretical floor layer. Considering excavation tolerance of +400 mm, the maximum thickness of the foundation layer is 550 mm.

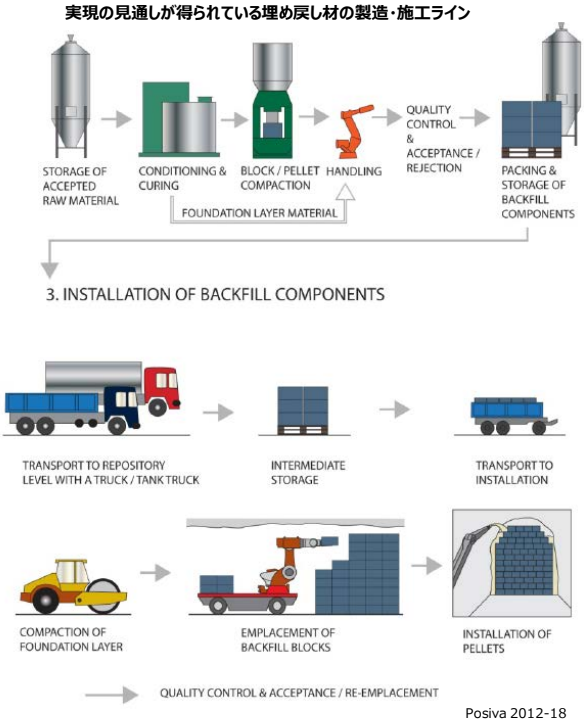
化学特性（埋め戻し）

- The organics content in the backfill shall be lower than 1 wt-%.
- The total sulphur content in the backfill shall be less than 1 wt-%, with sulphides making, at most, half of this.

図 3.2-11　階層化された要件への展開例（処分坑道埋め戻し材の例）



構成要素	材料				備考
埋め戻しブロック	Friedland粘土、ドイツ				セクション3.2.2を参照
基層	ベントナイト顆粒、ギリシャのMilos				セクション3.2.1を参照
ペレット	ベントナイトペレット、ギリシャのMilos				セクション3.2.3を参照
構成要素の乾燥密度		**最小**	**平均**	**最大**	**備考**
埋め戻しブロック	kg/m^3	1990	**2030**	2070	(±40 kg/m^3)
基層	kg/m^3	1150	**1250**	1350	(±100 kg/m^3)
ペレット	kg/m^3	900	**1000**	1100	(±100 kg/m^3)
含水率		**最小**	**平均**	**最大**	**備考**
埋め戻しブロック	%	8.5	**9.0**	9.5	(±0.5%)
基層	%	18.0	**19.5.0**	21.0	(±1.5%)
ペレット	%	17.5	**27.5**	37.5	(±10%)
モンモリロナイト含有率		**最小**	**平均**	**最大**	**備考**
埋め戻しブロック	%	30	**34**	38	誤差 ±2% 可能性のある変動 28-40%
基層	%	75	**80**	90	誤差を含む
ペレット	%	75	**80**	90	誤差を含む
EMDD					
埋め戻しブロック	kg/m^3	1150	**1332**	1497	
基層	kg/m^3	962	**1099**	1227	
ペレット	kg/m^3	734	**862**	1031	



Posiva 2012-18

図 3.2-12　設計仕様（L5）として展開される処分坑道埋め戻し材の初期状態

3) 性能評価におけるシーリングシステムの取扱い（POSIVA, 2012c）

POSIVA の性能評価は、設計基準シナリオ（将来の状況が合理的に見込まれる変遷の道筋）に対して、以下の 3 つの期間に分けて実施される。

評価期間 1：掘削及び操業から処分施設の閉鎖まで（数十年から最大で約 100 年まで）

評価期間 2：閉鎖後から 1 万年まで

評価期間 3：1 万年後以降の長期（8 回の氷期サイクルが想定される 100 万年まで）

これらの評価期間を対象とした性能評価により、性能目標（L3）が達成されることを確認するとともに、発生確率の低い事象や許容可能な不確実性を特定し、FEP や安全評価シナリオの整備に資する情報が提供される。この中で、シーリングシステム（とくに埋め戻し材）は、自身の機能に関連する直接的な評価項目に加えて、坑内湧水環境の評価など他の構成要素の機能に関連する評価でも間接的に扱われる。性能評価における評価項目は、評価期間に応じて表 3.2-10 に示すように、評価期間 1 では埋め戻し材のパイピング・浸食など、評価期間 2 では飽和プロセスなど、評価期間 3 では埋め戻し材の間隙水化学と塩分濃度の変遷などが設定されている。

評価期間 3 におけるシーリングシステムに関する性能評価の結果としては、次の氷期サイクル（10 万年を超える期間）に予想される様々な条件の変遷のもとでも、EBS 及び母岩の特性は、性能目標及び目標特性が順守でき、100 万年というタイムフレームにおいてさえ、構成要素のほとんどはその性能目標を満たす状態が維持されるという結論が得られている。

表 3.2-10　最初の評価期間 1 を対象とした性能評価項目

最初の評価期間 1（掘削及び操業から処分施設の閉鎖まで）を対象とした性能評価における評価項目

大分類	評価期間 1 を対象とした性能評価における評価項目
地圏の水理学及び地球化学面での変遷	● 地下水流動環境（坑内湧水）　※EDZの特性・生成挙動含む ● 地下水化学環境（ニアフィールド領域の地下水組成、塩分濃度、pH、酸化還元状態、溶存する鉄・硫化物、微生物影響、セメント系材料からのコロイド放出）
熱環境の変遷	●ニアフィールド領域の熱環境の変遷（緩衝材の熱制約）
岩盤の力学的な変遷	※ 岩盤の損傷は目標特性(L3)の直接の評価・検討項目になっていないが、上記の水理・化学面の変遷の評価に資するものとして、以下が評価項目として挙げられている。 ● 熱負荷に伴うニアフィールド岩盤内部の局所的損傷（スポーリング、亀裂の再活性化等に伴うEDZなど） ● クリープ
緩衝材と**埋め戻し材**の力学及び水理学面での変遷	● 緩衝材及び埋め戻し材のパイピング・侵食（緩衝材及び埋め戻し材の喪失量、パイピングの影響を受ける処分孔の数、侵食水量、侵食水中の固形分）
緩衝材と**埋め戻し材**の地球化学的変遷	● 酸素の消費とpHの変遷 ● コロイドの生成 ● ニアフィールドにおけるセメント系浸出液の影響（セメント系材料の浸出、岩盤中での浸出液の移行、セメント系浸出液と粘土(モンモリロナイト)の相互作用、他のシーリング材の浸出(シリカゾル)閉鎖材に関する力学的、水理学的及び地球化学的変遷
閉鎖材に関する力学的、水理学的及び地球化学的変遷	● 操業期間中の閉鎖埋め戻し材の変遷 ● 操業期間中のプラグのコンクリート構成要素の変遷（一般的なコンクリート構造物の耐久性、設置後100～200年間におけるHZ20水理地質帯より上部の標準コンクリートの変遷、設置後100～200年間におけるHZ20水理地質帯より下部の低pHコンクリートの変遷）
キャニスタの腐食	（割愛）
臨界	（割愛）

性能評価の各対象期間における評価項目の違い（大分類「緩衝材と埋め戻し材の力学及び水理学面での変遷」の例）

大分類	評価期間 1（～閉鎖まで）	評価期間 2（～10,000年）	評価期間3(～100万年)
緩衝材と**埋め戻し材**の力学及び水理学面での変遷	● 緩衝材及び埋め戻し材のパイピング・侵食（緩衝材及び埋め戻し材の喪失量、パイピングの影響を受ける処分孔の数、侵食水量、侵食水中の固形分、	● 飽和プロセス（再冠水プロセス） ● 膨潤および均質化プロセス ● 埋め戻し材への緩衝材の膨出（浸潤プロセス中及び浸潤後）	●緩衝材及び埋め戻し材の間隙水化学と塩分(塩度)の変遷 ●アルカリ性の浸出液が緩衝液と埋め戻し材に及ぼす影響 ● モンモリロナイトの長期安定性 ● 緩衝材へのキャニスタ腐食生成物の影響 ● 微生物プロセスと有機物の影響

4)　安全評価におけるシーリングシステムの取扱い

安全評価では、性能評価の結果を受けて埋め戻し材、閉鎖材、プラグの機能は損なわれないことを前提に評価が行われている。シーリングシステムを介した処分坑道を直結する短絡経路シナリオは、安全評価における変動シナリオや希頻度事象（What if ケース）でも扱われていない。

POSIVA におけるシーリングシステムのイメージ図を図 3.2-13 に示す。安全評価では、図 3.2-14 に示すように核種移行経路として透水性亀裂を通る経路（F 経路）、EDZ を通る経路（DZ 経路）、埋め戻し材を通り処分坑道の岩盤を通る経路（TDZ 経路）が想定されている。EDZ の発生割合は、図 3.2-15 に示すように複数の条件に対して設定されている。

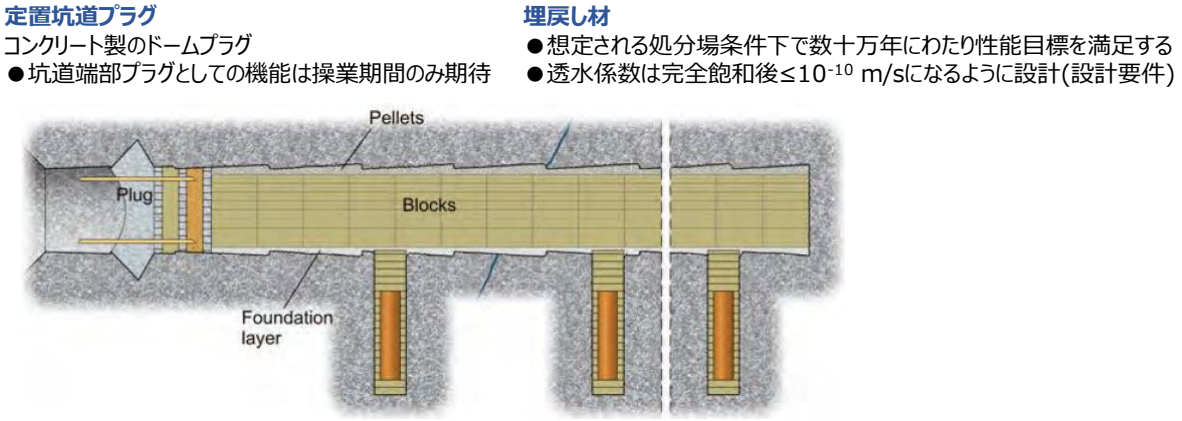


図 3.2-13　シーリングシステムのイメージ図

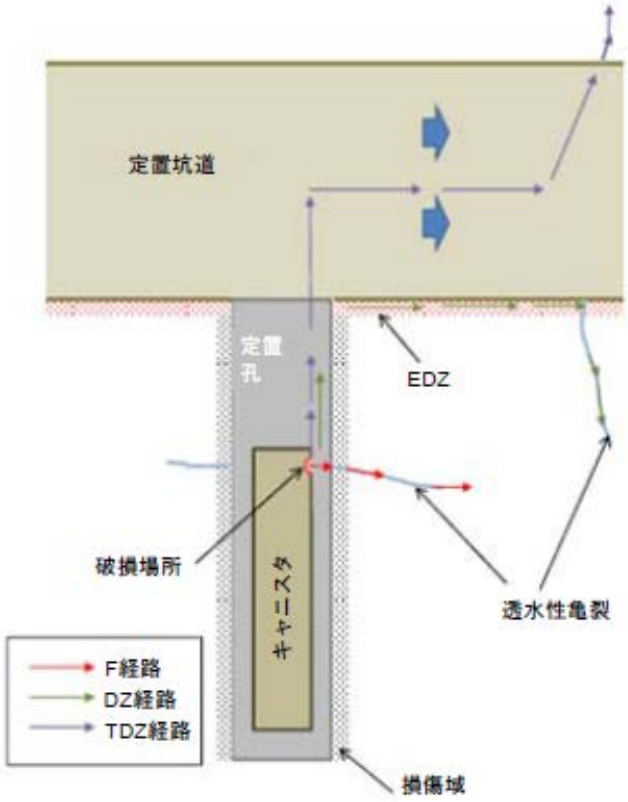


図 3.2-14　EDZ を介した核種移行径路イメージ

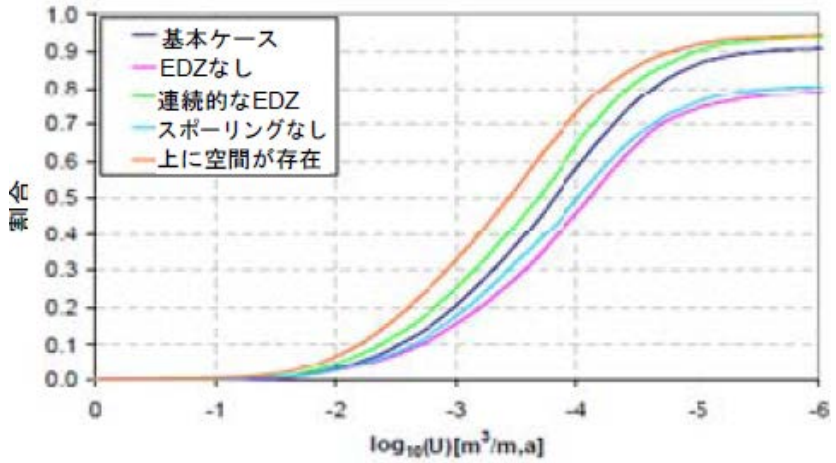


図 3.2-15　EDZ 発生割合

参考文献

原子力発電環境整備機構（2018）：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－（レビュー版）.

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、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.

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.

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.

SKB (2011)：Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark、Main report of the SR-Site project、 Vol.1、 TR-11-01.

POSIVA (2012a)：Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto –Assessment of Radionuclide Release Scenarios for the Repository System 2012、 POSIVA 2012-09.

SKB (2010a)：Buffer, Backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site、TR-10-47.

POSIVA (2012b)：Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto-Featrues、Events and Processes 2012-、 POSIVA 2012-07.

SKB (2010b)：FEP report for the safety assessment SR-Site、 TR-10-51.

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.

SKB（2010c）：Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition

tunnels, SKB TR-10-16.
SKB（2010d）Design, production and initial state of the closure, SKB TR-10-17.
SKB（2010e）: Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-50.
POSIVA（2012a）: Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto-Synthesis 2012, 2012-12.
POSIVA（2017）: Safety Case Plan for the Operating Licence Application, 2017-2.
STUK（2015）: GUIDE YVL D.5 DISPOSAL OF NUCLEAR WASTE, 2015.
POSIVA（2013）: Backfill Production Line 2012, Design, Production and Initial State of the Deposition Tunnel Backfill and Plug, 2012-18.
POSIVA（2012b）Design, Production and Initial State of the Underground Disposal Facility Closure, 2012-19.
POSIVA（2012c）: Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Performance Assessment 2012, 2012-04.
原子力環境整備促進・資金管理センター（2018）: 諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について.

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、処分場は適切に閉鎖されることが求められる。処分場の閉鎖に際しては、埋め戻し材やプラグ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ことで処分場の安全性向上を図る。本事業においては、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。

平成 30 年度においては、具体的に、

- 緩衝材と埋め戻し材の力学的な相互作用を考慮した膨潤挙動の評価手法の開発（膨潤挙動相互作用試験）
- 粘土系材料を用いた EDZ の地下水移行経路の遮断機能の評価（EDZ シーリング試験）

の二つの試験について着手した。

4.1 膨潤挙動相互作用試験

4.1.1 概要

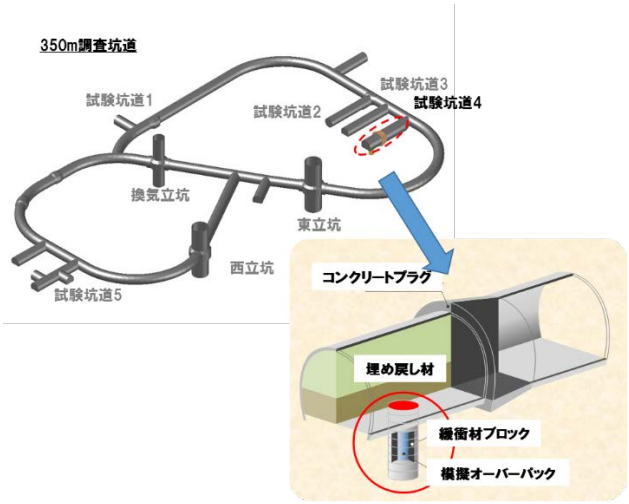
処分坑道竪置き方式の場合には、緩衝材の定置後に処分坑道は埋め戻し材を充填することで埋め戻される。処分坑道の埋め戻しが適切になされない場合には、地下水の浸潤により緩衝材が膨潤することにより処分坑道へ膨出することが想定されている。緩衝材が処分坑道へと膨出すると、緩衝材の乾燥密度が低下し、透水性の増大や膨潤圧の低下といった緩衝材のバリア性能に影響を及ぼすことが考えられる。そのため、埋め戻し材には緩衝材の膨出を抑制する役割が求められる。第 2 次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構、1999）では、処分孔竪置き方式における処分坑道について緩衝材および埋め戻し材の膨出量を解析的に評価している。幌延深地層研究センターでは地下施設の深度 350m 調査坑道において、原寸大規模の原位置試験である人工バリア性能確認試験が実施されている。図 4.1-1 に示すように人工バリア性能確認試験では、緩衝材と埋め戻し材の境界面に緩衝材膨出センサーを設置し、緩衝材の埋め戻し材に対する膨出量の把握を試みている（原子力機構、2016、2017、2018）。

国外においては、スウェーデンのスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社(Svensk Kärnbränslehantering AB：以下、SKB)とフィンランドの POSIVA 社による深地層処分埋め戻し閉鎖技術に関するプロジェクト（BACLO）において、図 4.1-2 に示すように処分孔竪置き方式を模擬した人工バリアの膨潤挙動の解析的評価を実施している（Börgesson、2009）。BACLO で対象としているモデルでは、処分孔には緩衝材ブロックを設置し、坑道は埋め戻し材ブロックとペレットで埋め戻す。解析では、緩衝材と埋め戻し材のそれぞれについて飽和状態および乾燥状態を仮定したケース分けを行い、その中でも①飽和緩衝材－乾燥埋め戻し材および②飽和緩衝材－飽和埋め戻し材の 2 ケースに着目した解析を実施している。

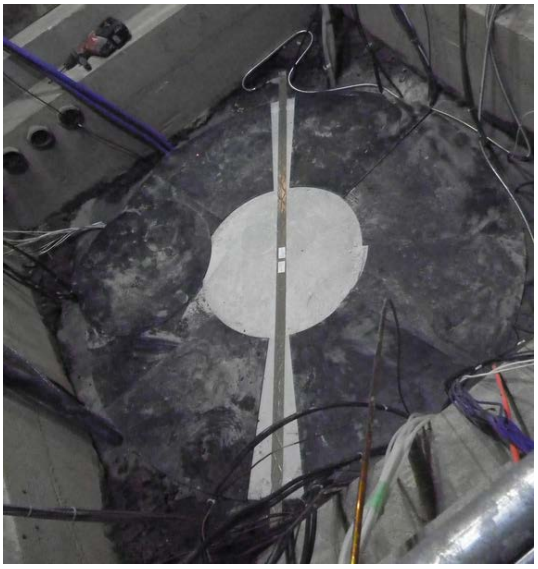
また、SKB では、スウェーデンおよびフィンランドにおいて検討されている KBS-3V と呼ばれる処分概念（図 4.1-3）を対象とした緩衝材の膨潤に対する埋め戻し材の挙動を把握するために図 4.1-4 に示す実規模原位置試験（the Buffer swelling test；以下、BST）を Äspö HRL にて実施している（Sanden et al.、2017）。BST では、模擬処分孔の底部に設置した油圧ジャッキにより緩衝材ブロックを持ち上げることで、緩衝材の処分孔から坑道への膨出挙動を模擬している。

本膨潤挙動相互作用試験においては、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ことを目的とした。そこで平成 30 年度は、まず、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、処分坑道竪置き方式における緩衝材と埋め戻し材の境界面での膨出挙動を把握するために、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した。また、人工バリア性能確認試験を模擬した室内試験に着手し、原位置試験の状況を室内で再現するに際の課題点を抽出した。



(a) 人工バリア性能確認試験実施箇所



(b) 緩衝材膨出センサー設置状況
（原子力機構、2016）

図 4.1-1　人工バリア性能確認試験における緩衝材膨出センサーによる計測

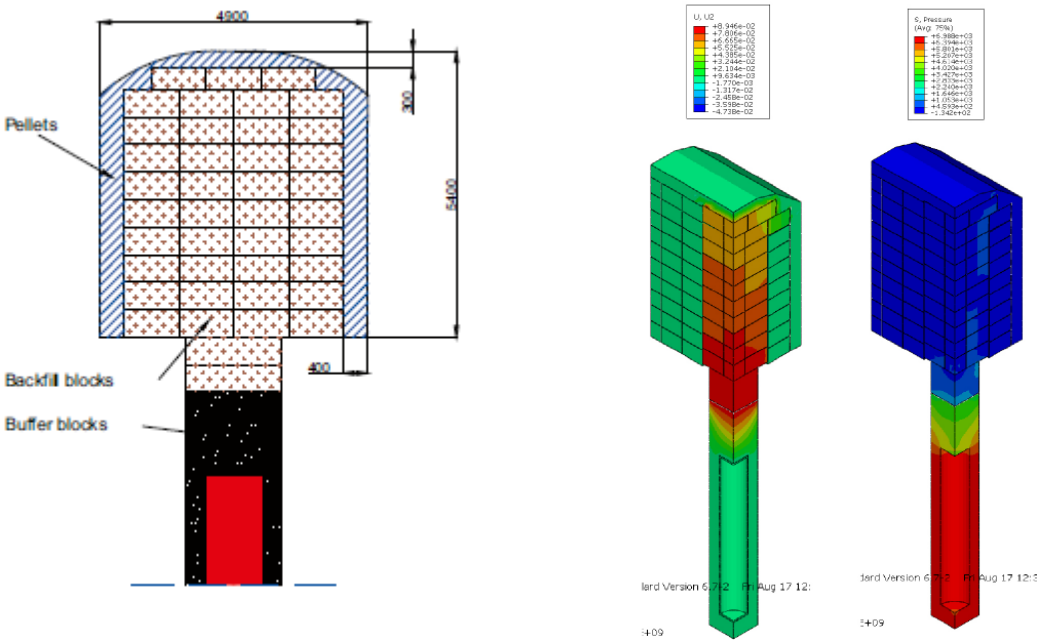


図 4.1-2　BACLO における解析検討
（Börgesson, 2009）

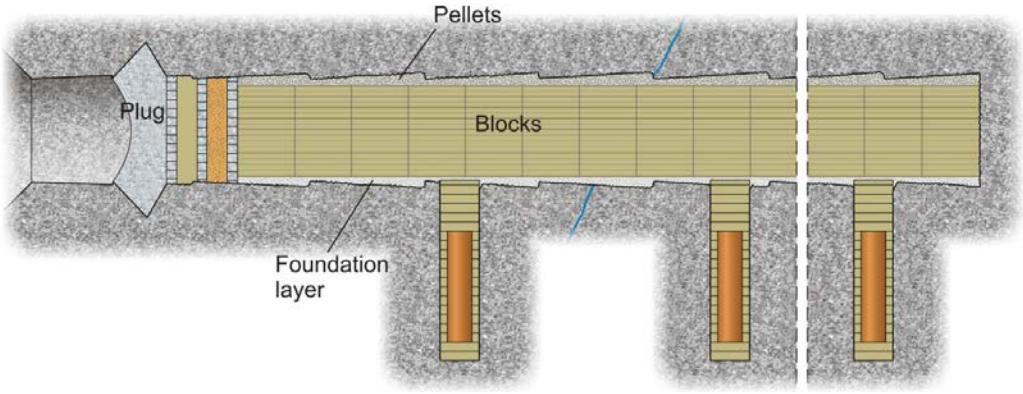
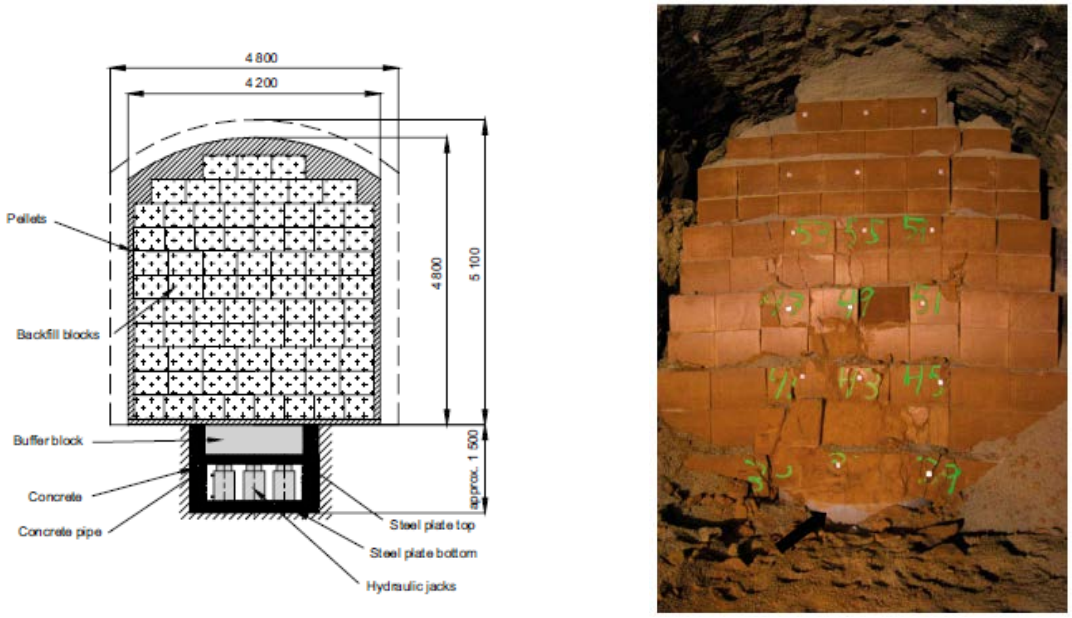


図 4.1-3　KBS-3V 概略構成図
（Keto *et al*. 2013）



(a) the Buffer swelling test 概要図　　(b) the Buffer swelling test における埋め戻し材の状況

図 4.1-4　Äspö HRL における the Buffer swelling test
（Sanden *et al*. 2017）

4.1.2　膨潤変形試験

膨潤変形試験は、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を目的として、一定の上載荷重を作用させた状態での膨潤変形量の測定を実施した。試験では、緩衝材および埋め戻し材ともに幌延深地層研究センターの地下施設深度 350 m 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試験用供試体の仕様を表 4.2-1 に示す。緩衝材の仕様は、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 1.80Mg/m^3、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。埋め戻し材の仕様は、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/m^3、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。

膨潤変形試験に先立ち、本試験に使用したクニゲル V1、3 号ケイ砂および 5 号ケイ砂の土質物性の分析を実施した。クニゲル V1 では、表 4.1-2 に示すとおり、土粒子密度、粒度分布、コンシステンシー特性、メチレンブルー吸着量、陽イオン交換容量、鉱物組成および膨潤力について分析を実施した。3 号および 5 号ケイ砂については、土粒子密度および粒度分布について分析を実施した。

クニゲル V1 の分析結果については、表 4.1-2 に示す。また、鉱物組成については表 4.1-3 に示す。表 4.1-3 は同定された結晶性鉱物および化合物についてその量比を示しており、量比は各鉱物における X 線の回折強度の最大値を用いて、多量（>5000 cps；◎）、中量（2,500～5,000 cps；○）、少量（500～2,500 cps；△）、微量（250～500 cps；＋）およびきわめて微量（<250 cps；±）という基準で分類した。クニゲル V1 の粒度分布については、ケイ砂の分析結果とあわせて図 4.1-5 の粒径加積曲線に示した。ケイ砂の土粒子密度は、3 号ケイ砂が 2.637 Mg/m^3、5 号ケイ砂が 2.639 Mg/m^3 であった。

表 4.1-1　膨潤変形試験用材料仕様

供試体仕様		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：ズリ＝40：60
材料	ベントナイト	クニゲル V1	クニゲル V1
	ケイ砂	3 号：5 号＝1：1	
	掘削ズリ		最大粒径　20 mm
初期含水比 (%)		10.5	35.0
初期乾燥密度 (Mg/m^3)		1.80	1.20
有効ベントナイト密度 (Mg/m^3)		1.58	0.65

表 4.1-2　膨潤変形試験用材料の分析一覧

測定項目		クニゲル V1	試験方法
土粒子密度 (Mg/m^3)		2.734	土粒子の密度分布（JIS　A1202）
粒度分布		図 4.1-5	土の粒度試験
コンシステンシー特性	液性限界 (%)	327.3	土の液性限界・塑性限界試験（JIS A 1205）
	塑性限界 (%)	38.9	
	塑性指数	288.4	
メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)		91	メチレンブルー吸着試験（JBAS-107-91）
陽イオン交換容量 (cmol$_c$/kg)		73.1	陽イオン交換容量測定（JBAS-0261-2009）
鉱物組成		表 4.1-3	X 線回折分析
膨潤力 (ml/2g)		20	膨潤力試験 （JBAS-104-77）

表 4.1-3　X 線回折分析による検出鉱物

検出鉱物					
石英	斜長石	斜プチロル沸石	スメクタイト	方解石	黄鉄鉱
◎	＋	±	○	＋	±

多量：◎、中量：○、少量：△、微量：＋、きわめて微量：±

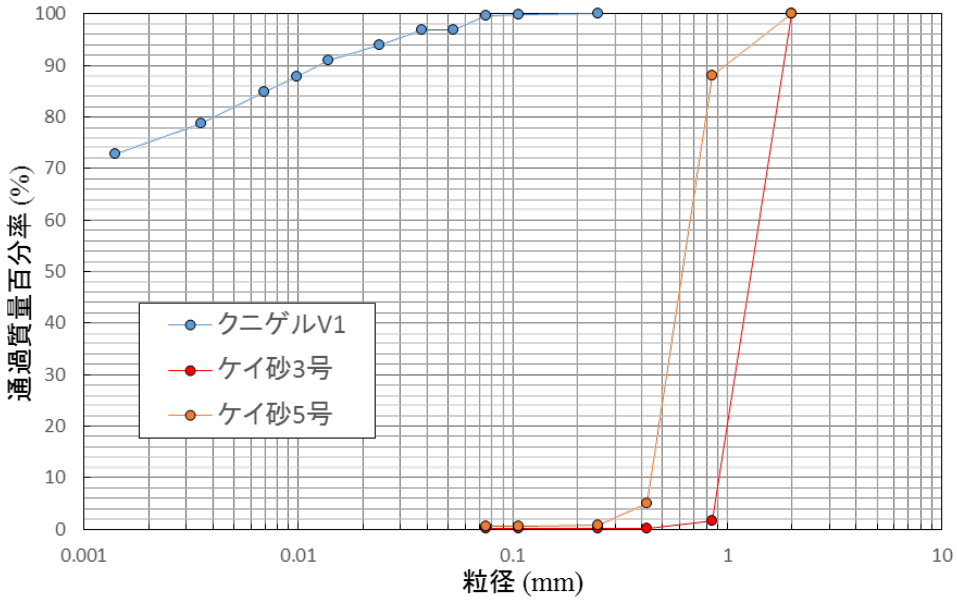


図 4.1-5　粒径加積曲線

図 4.1-6 に緩衝材の膨潤変形試験装置の概要図を図 4.1-7 に膨潤変形試験の準備状況を示す。試験では、供試体を圧密リング内に設置することで側方への膨潤を拘束し、供試体上部に設置した載荷板を介して上載荷重を作用させた。緩衝材については圧密試験機を利用して上載荷重を載荷し、埋め戻し材についてはベロフラムシリンダを用いた上載荷重の制御を実施した。上載荷重は試験装置上部に設置したロードセルにより計測した。供試体への注水は、供試体底部よりポーラスメタルを介しての 1 次元注水により実施した。注水にはイオン交換水を用いた。注水飽和に伴う膨潤変形量は外部変位計を用いて測定した。緩衝材、埋め戻し材ともに表 4.1-4 に示すように、上載荷重を①基本膨潤圧(Case-1)、②基本膨潤圧の 1/2 倍(Case-2)、③基本膨潤圧の 1/4 倍(Case-3)、④基本膨潤圧の 1/8 倍(Case-4)の 4 種類を設定した。本年度は、緩衝材において Case-2 と Case-4 について試験を実施し、埋め戻し材においては Case-2、Case-3、Case-4 について試験を実施した。

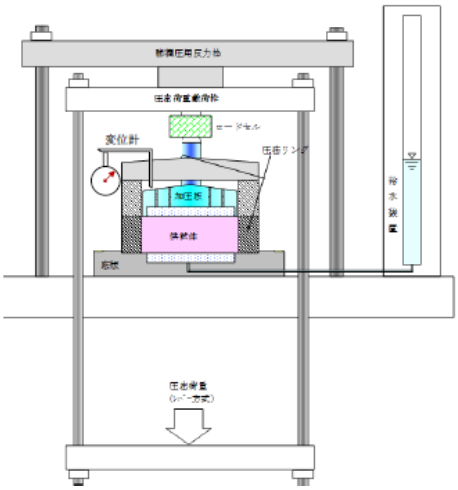


図 4.1-6　緩衝材の膨潤変形試験装置の概略図

(a) 緩衝材供試体の準備状況

(b) 緩衝材の膨潤変形試験の外観

図 4.1-7　膨潤変形試験準備状況

表 4.1-4　上載荷重の設定値

	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
上載荷重	基本膨潤圧	基本膨潤圧の 1/2 倍	基本膨潤圧の 1/4 倍	基本膨潤圧の 1/8 倍
緩衝材 設定値 (MPa)	1.000	0.500	0.250	0.125
埋め戻し材 設定値 (MPa)	0.200	0.100	0.050	0.025

緩衝材の膨潤変形試験の注水量と膨潤変形量の経過時間推移について図 4.1-8 および図 4.1-9 に示す。図中、青線が Case-2、赤線が Case-4 を示す。図 4.1-8 では横軸に注水開始からの経過日数を示し、縦軸には膨潤量を供試体の初期高さで除して百分率で表した膨潤率を示す。図 4.1-9 に示す注水量は引き続き上昇傾向を示しているが、膨潤量は注水開始 5 日以降から概ね収束傾向を示し始めており、注水開始 37 日段階の膨潤量は Case-2 では 0.68 mm、Case-4 では 2.60 mm であり、膨潤率では Case-2 で 26 %、Case-4 で 7 %となった。

つづいて、図 4.1-10 に埋め戻し材の膨潤変形量の経過時間推移を示す。図 4.1-10 においても横軸に注水からの経過日数を縦軸に膨潤率を示す。Case2、Case3 ではほぼ同程度の推移傾向を示し、Case4 のみ、大きな膨潤量推移傾向を示している。それぞれのケースにおいて、注水開始 40 日の段階の膨潤量は Case2 では 0.03 mm であったに対し、Case3 では 0.06 mm で 2 倍、Case4 では 0.28 mm と 9 倍の膨潤量であり、膨潤率で表すとそれぞれ、0.09 %、0.17 %、0.8 %となった。緩衝材と埋め戻し材ともに、上載荷重の大きさに応じた膨潤量であることが確認できた。

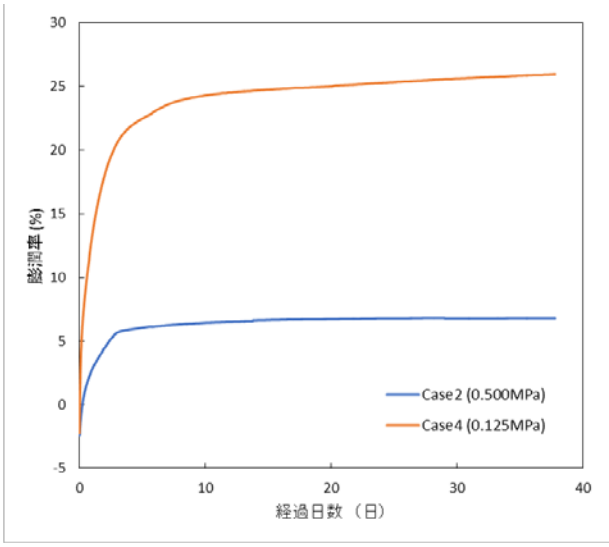


図 4.1-8　膨潤変形試験における膨潤率（緩衝材）

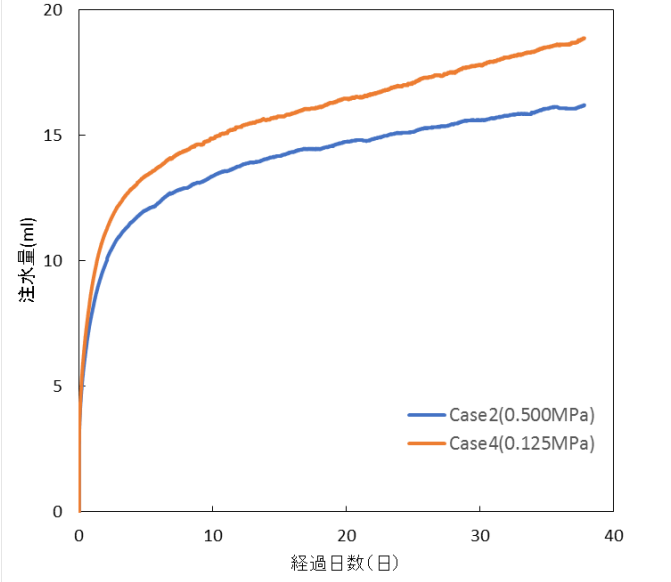


図 4.1-9　膨潤変形試験における注水履歴（緩衝材）

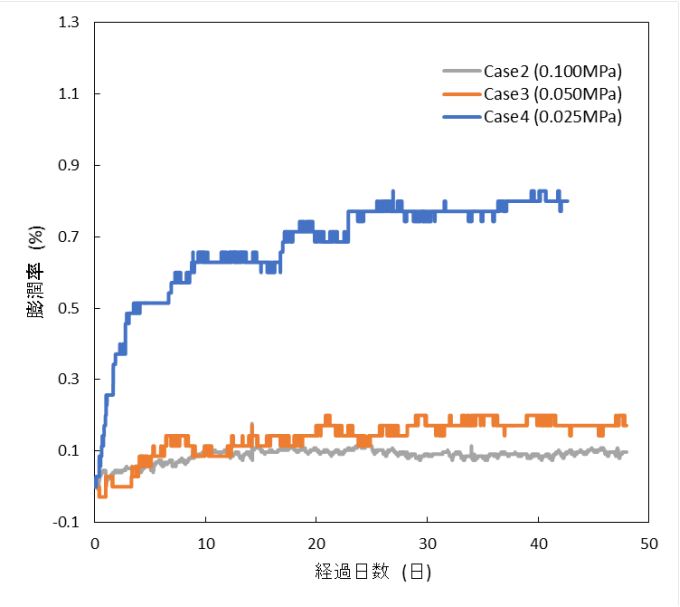


図 4.1-10　膨潤変形試験における膨潤率（埋め戻し材）

4.1.3　膨潤挙動相互作用試験

(1) 概要

処分孔竪置き方式における埋め戻し材に対する緩衝材の膨出挙動を再現するために人工バリア性能確認試験をモデルとした室内試験の実施を計画した。人工バリア性能確認試験においては、試験坑道底盤に対して鉛直下向きに掘削した処分孔に緩衝材および模擬オーバーパックを設置し、試験坑道を幌延の掘削ズリとベントナイトを混合した埋め戻し材によって埋め戻した。緩衝材の処分孔への定置後の再冠水挙動を模擬するために、緩衝材と処分孔の間にケイ砂層を設け、そのケイ砂層を通じて地下水が注水可能な機構を設置した。人工バリア性能確認試験における緩衝材の膨出挙動に関わる要素を表した模式図を図 4.1-11 に示す。ケイ砂層より注水された地下水は緩衝材の底部および外周側から浸潤し、緩衝材は埋め戻し材側へと膨潤する。埋め戻し材は、緩衝材の上方への膨潤を埋め戻し材の自重と剛性により抑制する。すなわち、緩衝材と埋め戻し材の境界面においては、緩衝材の膨潤圧と処分孔直上の埋め戻し材の自重が作用している。図 4.1-11 に示すように地下水が緩衝材外周から浸潤する場合には、緩衝材の外周部から膨潤が始まり、緩衝材と埋め戻し材の境界面においては膨出形状は複雑になると想定される。

室内試験においては、この緩衝材と埋め戻し材の境界面における膨潤挙動を把握するために、図 4.1-11 に示す緩衝材と埋め戻し材の構造を再現することとした。室内試験では、緩衝材と埋め戻し材の供試体を処分孔に見立てた鋼製モールド内に設置する。緩衝材への浸潤挙動は、容器底部にポーラスメタルを設置するとともに緩衝材の外周にケイ砂の充填層を設けることにより、緩衝材外周から注水される状況を再現することとした。

そこで、本年度は縮小模型装置においてケイ砂層が想定の通りに設置できるかを確認する試験（膨潤挙動確認試験）を実施するとともに緩衝材に通水した際に想定した膨潤挙動を示すかどうかを確認した。

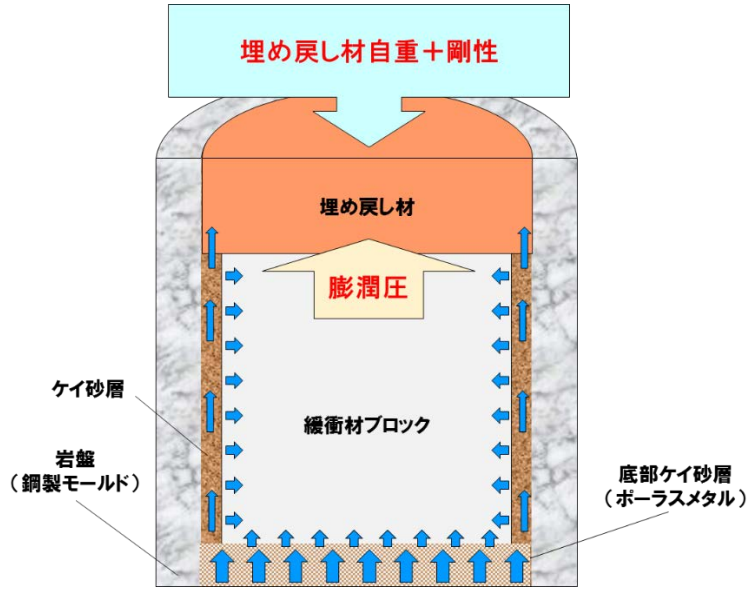


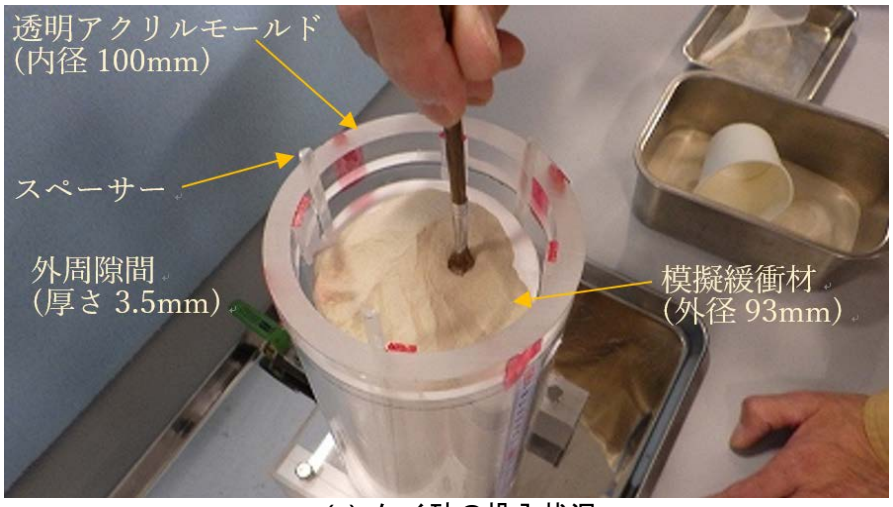
図 4.1-11　緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用

(2) 空隙充填試験

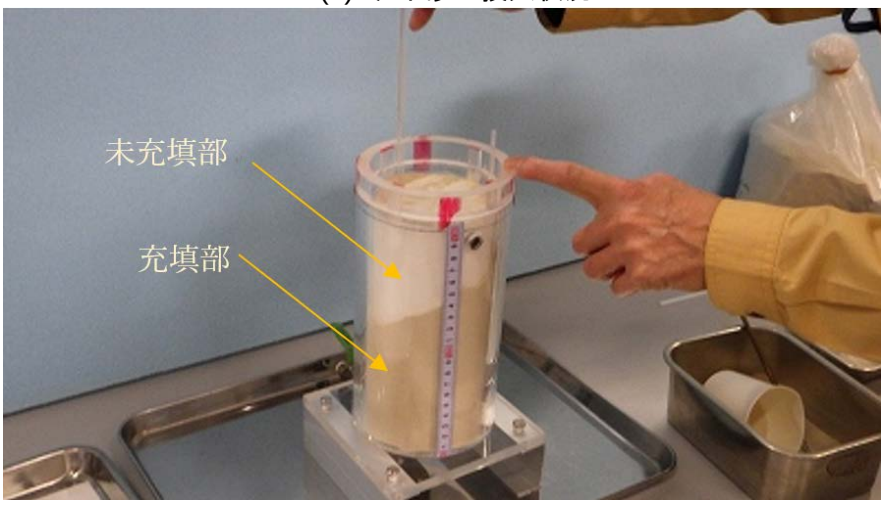
前述したように、人工バリア性能確認試験においては、試験孔への均等な注水を行うために、試験孔の底部および緩衝材と岩盤の隙間にケイ砂を充填している。ケイ砂の充填には 4 号ケイ砂を用いており、充填した厚さ 70 mm である。小型模型装置においては、人工バリア性能確認試験のレイアウトを 1/20 程度に縮小したスケールで設計した。この場合、小型模型装置の緩衝材と試験容器の隙間のケイ砂層の厚さは 3.5 mm と非常に狭くなる。このような狭隘な隙間へのケイ砂の充填作業ではその施工性が悪いだけでなく、人工バリア性能確認試験で用いられた 4 号ケイ砂のような比較的大きな粒径では隙間を密に充填できないことが想定された。そこで、ケイ砂材料のなかでも細粒品質となる 8 号ケイ砂を用いて狭隘隙間におけるケイ砂充填性を確認するための空隙充填試験を行った。試験では、試験容器内に外周空隙が 3.5 mm の厚さとなるようにダミー供試体を設置し、その供試体の外周空隙に乾燥させたケイ砂を試験容器上部より投入することで充填性の確認を行った。表 4.1-5 に試験に用いた装置の仕様を示す。試験容器には、空隙の充填状況が目視で確認できるように、内径 100 mm の透明アクリルモールドを使用した。このアクリルモールド内に外径 93 mm の石こう製の模擬緩衝材を設置し厚さ 3.5 mm の空隙を設けた。ケイ砂の充填は、模擬供試体の上面に乾燥したケイ砂を投入し、小型ハケで外周の空隙に流し込む方法で実施した。ケイ砂の充填状況を図 4.1-12 に示す。充填の進行に合わせて試験容器に軽く振動を与えて空隙の発生を抑えながら所定高さまで充填した。その結果、厚さ 3.5 mm の供試体外周部に空隙を残すことなくケイ砂が充填できることを確認した。

表 4.1-5　空隙充填試験装置仕様

項目	詳細
モールド	内径 100 mm×高さ 200 mm 透明アクリル製
模擬緩衝材	内径 93 mm×高さ 200 mm 石こう製
外周部間隙	3.5 mm
充填材料	ケイ砂 8 号



(a) ケイ砂の投入状況



(b) ケイ砂充填途中経過

(c) 充填完了

図 4.1-12　ケイ砂充填完了状況

(3) 膨潤挙動小規模試験

図 4.1-13 に示すように、人工バリア性能確認試験では直径 2.4 m、高さ 4.2 m の処分孔に緩衝材を設置している。緩衝材は直径 2.26 m、高さ 4.2 m であり、緩衝材と処分孔の隙間には厚さ 70 mm のケイ砂充填層を設けてある。処分孔内の緩衝材上部から坑道底盤までおよび坑道は埋め戻し材を用いて埋め戻した。埋め戻し材は幌延の地下施設深度 330 m～340 m の稚内層を掘削した際に発生した掘削ズリをクニゲル V1 と混ぜ合わせることで製作した。掘削ズリは粒径が 20mm 以下となるようにふるい分けを行い、クニゲル V1 と掘削ズリの重量比が 40：60 となるように混合した。坑道の下半分および処分孔内の緩衝材上部から坑道の底盤までを転圧による締固めで埋め戻し、上半分はブロックを積み上げることにより埋め戻している。このとき、転圧締固めによる埋め戻し材は乾燥密度 1.2 Mg/m³、初期含水比 33～39 %、埋め戻し材ブロックは乾燥密度 1.4 Mg/m³、初期含水比 30 %とした。

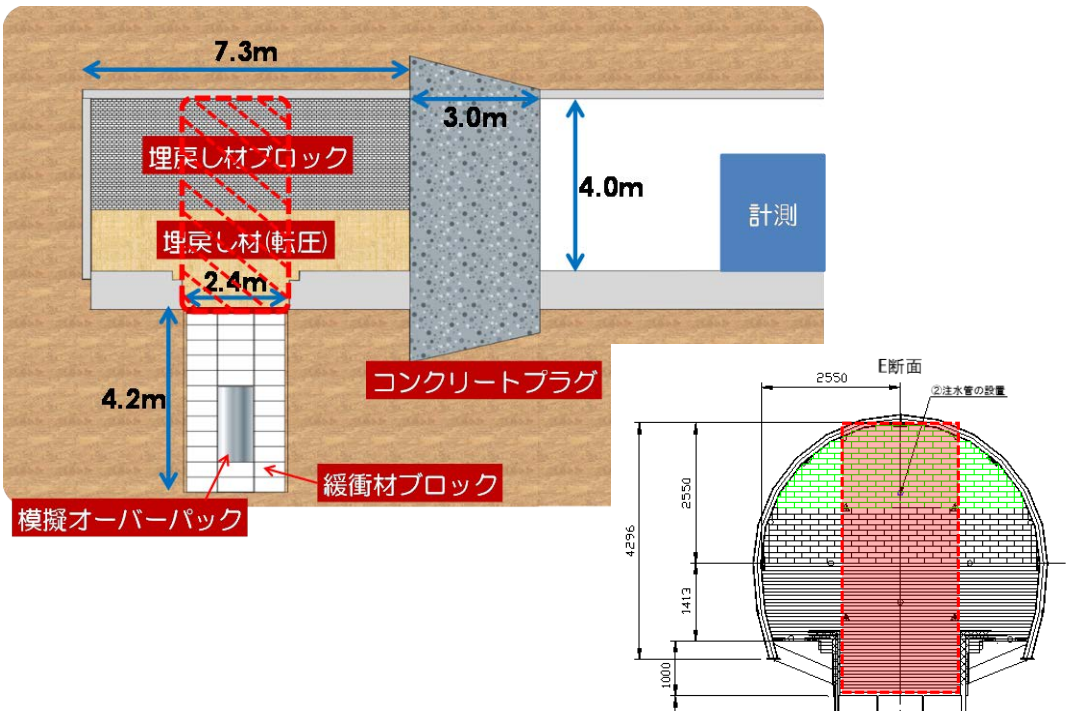


図 4.1-13　人工バリア性能確認試験のレイアウト図

上に示した人工バリア性能確認試験の構成を参考に処分孔竪置き方式における緩衝材と埋め戻し材を模擬した室内試験として膨潤挙動小規模試験を実施した。この膨潤挙動小規模試験においては、図 4.1-11 に示す緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用で整理した緩衝材の底部および外周部からの注水により緩衝材が埋め戻し材側へと膨潤する挙動が室内試験装置において再現できるかを確認することを目的とした。

表 4.1-6 に膨潤挙動小規模試験における緩衝材と埋め戻し材の材料仕様を示す。また、図 4.1-14 に膨潤挙動小規模試験で準備した試験装置を、表 4.1-7 に試験装置の仕様を示す。緩衝材供試体にはクニゲル V1 とケイ砂を重量比で 70：30 に混ぜ合わせた混合土を用いることとし、仕様を含水比 10.5 %、乾燥密度 1.8 Mg/m³、高さ 174 mm、直径 93 mm とした。埋め戻し材は人工バリア性能確認試験と同じ材料構成として、仕様を含水比 35.0 %、直径 100 mm、高さ 87 mm とした。この埋め戻し材供試体は緩衝材と境界面に位置する転圧締固めによる埋め戻し材に相当すると考え乾燥密度を 1.2M g/m³ とした。

試験容器には、内径 100 mm、高さ 300 mm の鋼製モールドを用いた。この鋼製モールド内に、緩衝材と埋め戻し材の供試体を設置した。緩衝材と試験容器の隙間にはケイ砂を充填し、厚さ 3.5 mm のケイ砂層を作製した。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に均等に水が浸潤する構造とした。試験容器の上部には外部変位計を設置し、供試体の上方への膨出量の計測を行うこととした。外部変位計の計測範囲は 50 mm であり、その計測精度は 0.01 mm である。また、緩衝材と埋め戻し材の境界面にはリン青銅版を設置した。緩衝材は水の浸潤により外周部から膨潤し始める。そのため、緩衝材と埋め戻し材の境界面は外側が盛り上がった形状をすると想定される。リン青銅板は、比較的柔らかく緩衝材の膨潤に合わせて変形するため、供試体の解体時に緩衝材と埋め戻し材の境界面の変形挙動が把握できることを期待して設置した。

表 4.1-6　膨潤挙動小規模試験における供試体仕様

		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：ズリ＝40：60
材料	ベントナイト	クニゲル V1	クニゲル V1
	ケイ砂	3 号：5 号＝1：1	
	掘削ズリ		最大粒径　20 mm
初期含水比 (%)		10.5	35.0
初期乾燥密度 (Mg/m^3)		1.80	1.20
有効ベントナイト密度 (Mg/m^3)		1.58	0.65
供試体高さ (mm)		174	87
供試体直径 (mm)		93	100

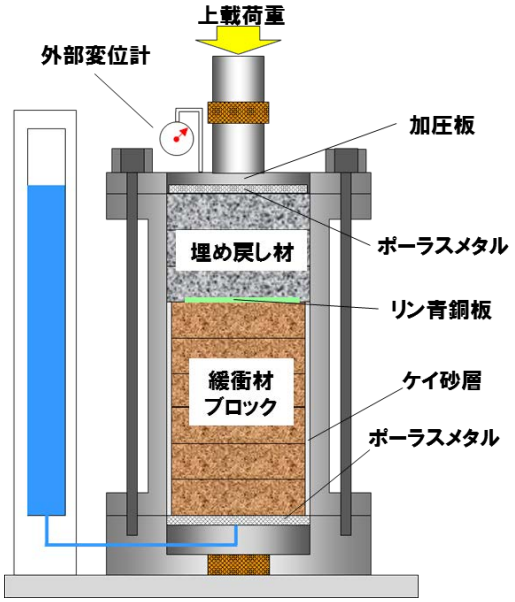


図 4.1-14　膨潤挙動小規模実験の装置構成図

表 4.1-7　膨潤挙動小規模試験装置仕様

項目	仕様	備考
試験容器	内径 100mm 高さ 300mm	SUS304 圧力給水対応
給水装置	二重管式給水装置	
ポーラスメタル		試験装置頂部に 1 体 試験装置底部に 1 体
外部変位計	測定範囲：0～50mm 測定精度：0.01mm	載荷板上部で変位測定

図 4.1-11 で示したように埋め戻し材は自重と剛性により緩衝材の膨潤を抑制すると考えられる。膨潤挙動小規模試験においては、転圧締固めによる埋め戻し材に相当する乾燥密度 1.2 Mg/m^3 の埋め戻し材供試体を緩衝材の上部に設置することで剛性の条件を再現した。埋め戻し材の自重の条件については、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分に相当する荷重を埋め戻し材供試体の上方から上載荷重として作用させることとした。試験装置の上部に設置した加圧板を介してベロフラムシリンダにより埋め戻し材の自重相当の上載荷重を制御した。上載荷重は、人工バリア性能確認試験における緩衝材にかかる荷重を図 4.1-13 中の赤網部分に示す処分孔直上の埋め戻し材の自重よるものとし、図 4.1-15 のように載荷重量を換算した。図 4.1-13 より、転圧締固めによる埋め戻し材の領域は直径 2.400 m、高さ 2.413 m であるので、乾燥密度 1.200 Mg/m^3、含水比 30 %であることをからその重量は約 17t となる。一方、埋め戻し材ブロックによる領域は直径 2.400 m、高さ 2.250 m であるので、乾燥密度 1.400 Mg/m^3、含水比 30 %であることをからその重量は約 18t となる。これより、人工バリア性能確認試験では約 35t の重量の埋め戻し材が緩衝材の直上に位置している。緩衝材の断面の面積は 4.010 m^2 であるので、緩衝材に掛かる埋め戻し材の荷重としては 0.886 kgf/m^2 となる。

図 4.1-15　人工バリア性能確認試験における上載荷重

膨潤挙動小規模試験における供試体の作製手順を図 4.1-16 に装置の準備状況を図 4.1-17 に示す。緩衝材ブロックを設置してから埋め戻し材を締め固めた場合には、先に設置した緩衝材ブロックに圧密の影響がでる可能性があったため、図 4.1-16 に示すように試験容器である鋼製モールド内に先に埋め戻し材を締固めた後に、別に作製した緩衝材ブロックを設置し、最後に試験容器を天地返しすることとした。膨潤挙動小規模試験における試験装置の実際の準備手順を以下に示す。

① 埋め戻し材の締固め

a. クニゲル V1 と掘削ズリを重量比で 40：60 となるように混合

b. 含水比を 35 %に調整
c. 内径 100 mm の鋼製モールドにスペーサを設置し、作製後の埋め戻し材の高さが 87 mm となるように 3 層に分けて締固める
d. 埋め戻し材上にリン青銅板を設置

② 緩衝材ブロック作製
a. ケイ砂は 3 号と 5 号が重量比で 1:1 となるように混合
b. クニゲル V1 と混合ケイ砂を重量比で 70：30 となるように混合
c. 含水比を 10.5 %に調整
d. 内径 93 mm の二つ割モールドを用いて高さ 174 mm の緩衝材ブロックを作製

③ 緩衝材の設置
a. 二つ割モールドから緩衝材ブロックを脱型
b. 鋼製モールド内の埋め戻し材層の上に緩衝材ブロックを設置
c. 緩衝材ブロック外周に 3.5 mm の隙間を確保

④ ケイ砂充填
a. 緩衝材ブロック上面に 8 号ケイ砂を投入し、小型ハケを用いて外周隙間に充填
b. ケイ砂の重量計測により密度を確認

⑤ 小規模模型完成
a. 鋼製モールドを天地返し、モールド底盤設置

⑥ 試験計測準備
a. スペーサを除去し、上部載荷板を設置
b. ベロフラムシリンダにて上載荷重載荷
c. 外部変位計設置
d. 注水
e. 計測（時間、注水量、変位計）

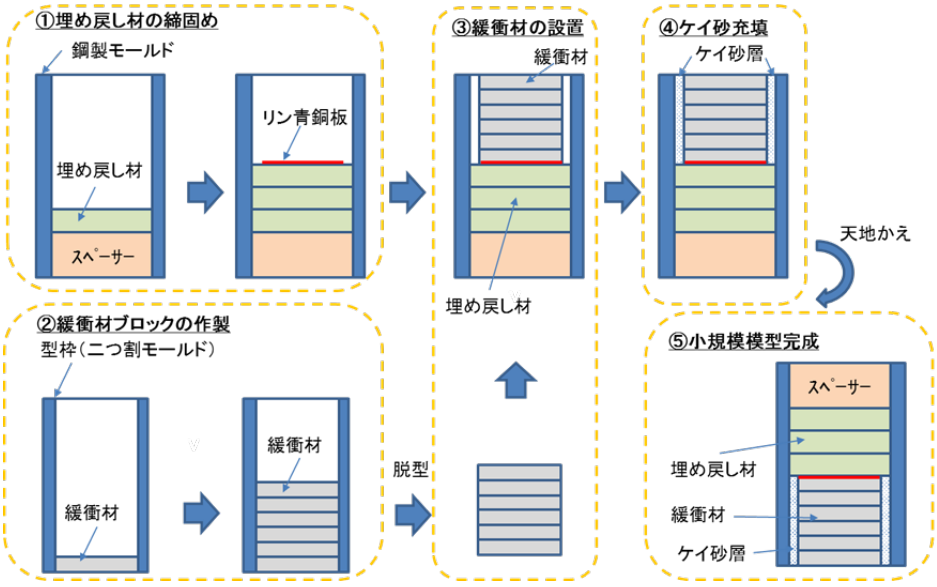


図 4.1-16　小規模模型の作成手順

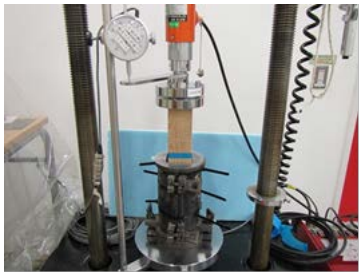
(a)　埋め戻し材材料

(b)　埋め戻し材含水比調整

(c)　鋼製モールド

(d)　埋め戻し材締固め

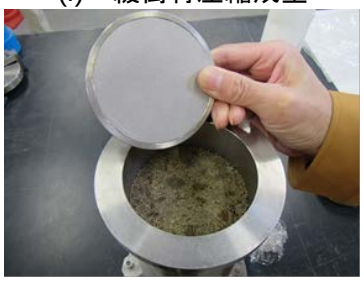
(e)　埋め戻し材供試体



(f)　緩衝材圧縮成型

(g)　モールド脱型

(h)　ケイ砂充填



(i)　上部載荷板の設置

(j)　試験装置準備完了状況

図 4.1-17　膨潤挙動小規模試験　装置準備状況

膨潤挙動小規模試験における注水量と変位量の経時変化を図 4.1-18 に示す。試験では、漏水することなく緩衝材に注水ができていることを確認した。注水量の増加に伴い変位量も増加しており、試験開始後 15 日を超えた時点で変位量は約 17 mm となっている。これは高さ 174 mm の緩衝材供試体に対する膨潤率で約 10 %相当となる。これより、想定した緩衝材の膨潤挙動が再現できていると判断した。

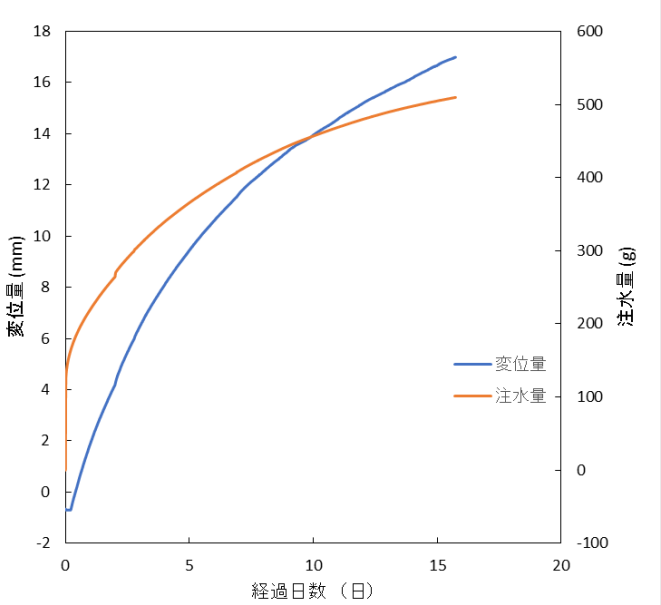


図 4.1-18　膨潤挙動小規模試験_変位量および注水量

4.1.4　まとめ

膨潤挙動相互作用試験においては、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ことを目的としており、平成 30 年度においては、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、人工バリア性能確認試験を模擬した膨潤挙動小規模試験に着手し、緩衝材の埋め戻し材に対する膨潤挙動を確認するとともに室内試験において再現するに際の課題点を抽出した。以下に、平成 30 年度の成果と今後の試験計画および課題をまとめる。

(1) 膨潤変形試験

人工バリア性能確認試験と同様の仕様の緩衝材と埋め戻し材に対して膨潤変形挙動に関する基本的なデータの取得を目的として、一定の上載荷重を作用させた状態での膨潤変形量を測定する膨潤変形試験を実施した。作用させる上載荷重は緩衝材と埋め戻し材のそれぞれで 4 ケース設定し、平成 30 年度では、緩衝材で 2 ケース、埋め戻し材で 3 ケースを実施した。

緩衝材の試験では、0.500 MPa の上載荷重で 0.68 mm、0.125 MPa の上載荷重で 2.60 mm であり、膨潤率で示すとそれぞれ、26 %と 7 %となった。また、埋め戻し材では、0.100 MPa、0.050 MPa、0.025 MPa の上載荷重に対して膨潤量はそれぞれ 0.03 mm、0.06 mm、0.28 mm となり、膨潤率で表すとそれぞれ、0.09 %、0.17 %、0.8 %となった。緩衝材と埋め戻し材ともに上載荷重の大きさに応じた膨潤量であることが確認できた。今後は、残る上載荷重のケースでの膨潤変形試験を実施するとともに膨潤圧試験を実施し、緩衝材と埋め戻し材の膨潤圧を把握する。

(2) 膨潤挙動小規模試験

人工バリア性能確認試験を事例に処分坑道竪置き方式における緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用を考慮した膨潤挙動について整理を行った。緩衝材の底部および外周からの水の浸潤に伴い緩衝材は外周部から順に埋め戻し材側へと膨潤する。埋め戻し材は、緩衝材の上方への膨潤を埋め戻し材の自重と剛性により抑制する。すなわち、緩衝材と埋め戻し材の境界面においては、

緩衝材の膨潤圧と処分孔直上の埋め戻し材の自重が作用している。

上記で整理した想定される緩衝材の膨潤挙動が再現できるかを確認するための膨潤挙動小規模試験を実施するとともに、室内試験にて再現する際の課題点の抽出を行った。

実規模スケールでの原位置試験をスケールダウンして室内試験で模擬するにあたって、ケイ砂を通じた緩衝材への水の浸潤挙動を再現する上で、1/20 に縮小した厚さ 3.5 mm のケイ砂層を作製することが課題となった。空隙充填試験により、細粒品質となる 8 号ケイ砂を用いることで狭隘空間においても空隙を残さずにケイ砂を充填することができることを確認した。

また、膨潤挙動小規模試験により、ケイ砂層を通じた緩衝材への注水が漏水なく可能であることを確認するとともに、試験開始後 15 日を超えた時点で変位量が約 17 mm に達しており、想定した緩衝材の膨潤挙動が再現できていることを確認した。今後は、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把握のために、試験終了後の解体・分析手法について整理するとともに、試験中の膨潤変形挙動を捉えるための評価手法を整備する。

4.2 EDZ シーリング試験

4.2.1 概要

坑道周辺の EDZ においては割れ目の発達に伴い透水性が増大し地下水の移行経路になることが想定されている。この EDZ のシーリングについては、国内外においてこれまで止水プラグを設置する考え方が示されており、例えば、低透水性材料であるベントナイト系材料を用いた止水プラグを岩盤側に切り込んだ形で設置することで坑道に沿った地下水の移行経路を分断するという考え方が提示されている（杉田ほか、2005）。

止水プラグを含むシーリング技術の技術開発目標として、処分場概念の構築時における制約条件を決定するために、想定されるサイト環境条件に応じたシーリング技術の性能を提示できることが挙げられており、種々のサイト環境条件に対するシーリング技術の性能を評価できるだけのデータセットを体系化することが求められている。具体的には、結晶質岩や堆積岩といった個々の環境条件に対するシーリング技術の性能評価や水みちや EDZ の程度に応じたプラグの性能評価などを把握することが必要とされている（戸井田ほか、2005）。

止水プラグの具体的な止水性能の評価を実施した事例として、核燃料サイクル開発機構（現・原子力機構）とカナダ原子力公社（AECL）の共同研究において、AECL の地下研究施設を用いて堆積岩を対象とした原位置実規模でのトンネルシーリング性能確認試験を実施しており、Na 型ベントナイトを用いた粘土プラグの止水性能に関するデータを取得するとともにその性能の評価手法の開発を実施している（戸井田ほか、2005）。また、スイスのモンテリ地下研究所における EZ-A 試験では、EDZ を横切るように掘削した溝をベントナイトと砂の混合材料を高密度に圧縮したブロックにより埋め戻す試験を実施しており、試験では施工した溝とベントナイトブロックの EDZ の遮断性能を評価している（Bossart *et al.*, 2008）。図 4.2-1 に EZ-A 試験における、溝の施工とベントナイトブロックの施工時の様子を示す。EZ-A 試験においては、ドイツの連邦地球科学・天然資源研究所（BGR）のチェーンソーを用いた工法により深さ 2m、幅 20cm の溝の施工を実施している。

このように、止水プラグに要求される自己充填性や低透水性などの基本的な性能については、地下研究施設を用いた原位置試験により把握されてきているが、サイト環境条件に応じたシーリング技術の性能を提示するという観点においては、実際の地下環境の影響を考慮して EDZ における地下水移行経路の遮断機能を評価するためのデータがいまだ十分に得られていないと考えられる。

そこで、地下環境の影響を考慮した EDZ における地下水移行経路の遮断機能をより明確化するため、堆積岩かつ海水系地下水である幌延の地下環境を事例とした 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 4.2-2 に示すように、坑道の底盤に鉛直下方向に溝（スリット）を施工し、ベントナイト材料を充填した粘土止水壁より区切られた試験領域を設定し、水理試験などを実施することにより粘土止水壁の透水性能を評価することを計画している。

平成 30 年度においては、原位置での EDZ シーリング試験に先立ち、粘土止水壁として施工するベントナイト材料を選定するのための室内試験に着手するとともに、原位置試験の実施場所選定をするために幌延の地下施設における EDZ の状況調査およびスリット掘削工法の検討を実施した。

(a) EDZ を横切る溝の施工　　(b) ベントナイトブロックによる埋め戻し

図 4.2-1　スイス・モンテリ地下研究所における EZ-A 試験の様子

（Bossart *et al*., 2008）

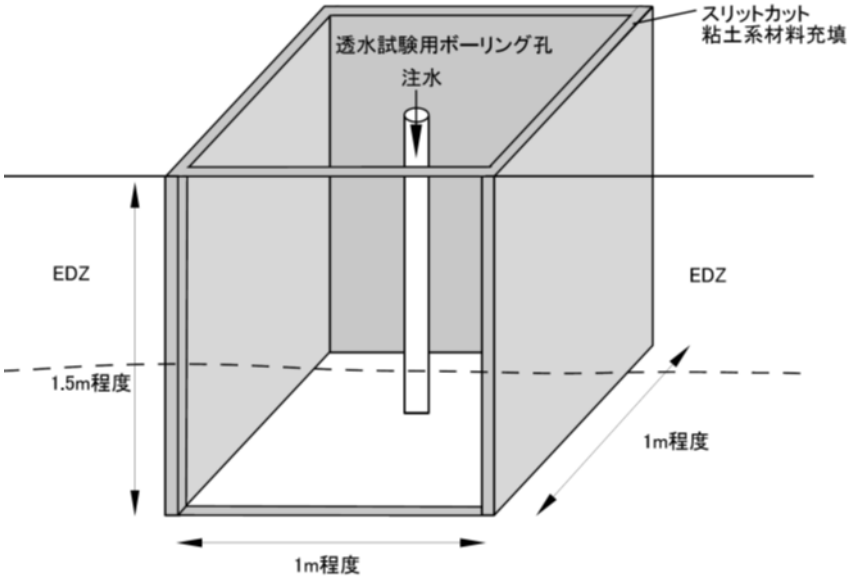


図 4.2-2　EDZ シーリング試験概念図

4.2.2　ベントナイト材料の室内試験

(3) 概要

EDZ シーリング試験においては、岩盤に EDZ よりも深くスリットを切削し、ベントナイト材料を充填した粘土止水壁により地下水の移行経路を遮断する。この粘土止水壁の透水性は、幌延の地下施設深度 350 m の健岩部の透水係数である 10^{-10} m/s 以下となることを施工目標とする。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。粘土止水壁の材料の仕様は、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乾燥密度とした。幌延の地下水の塩分濃度は 0.21 mol/l（菊池ほか、2005）と報告されており、図 4.2-3 を参照するとベントナイトの有効粘土密度で 1.20 Mg/m^3 とすれば、幌延の地下水の塩分濃度においても 10^{-11} m/s の透水係数を達成できると考えた。本試験においては、粘土止水壁にはベントナイトを単体で使用することとし、その材料としては、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 を候補とした。候補材料の概要について表 4.2-1 に示す。クニゲル V1 は国内の地層処分に関する研究においてよく用いられる材料であり、本試験においては、クニゲル V1 を加圧圧縮成型したのちに粉砕してペレット状に加工しての利用を検討している。ペレットの粒径は最大で約 20 mm とした。クニゲル V1 を圧縮成型したペレットについて図 4.2-4 に示す。一方で、クニゲル GX は現場施工用として開発された粒状のベントナイト（伊藤ほか、2007）であり、ここでは、ベントナイトの原鉱石を粗砕して 10 mm 以上の粒径品を取り除いた製品を用いた。この 2 種類の材料について、粘土止水壁としての透水性能を達成できるかを確認するための室内試験を実施した。本年度実施した室内試験の内容を以下に示す。

- 粒度試験
- 膨潤状況確認試験

上記の室内試験においては実際の地下環境を模擬するために、幌延の地下水組成を模擬した模擬地下水を作製し試験に用いた。模擬地下水の組成は、深度 350 m の地点において採水・分析した地下水の化学組成データを参考に再現して作成した。試験に使用した模擬地下水の化学組成を表 4.2-2 に示す。

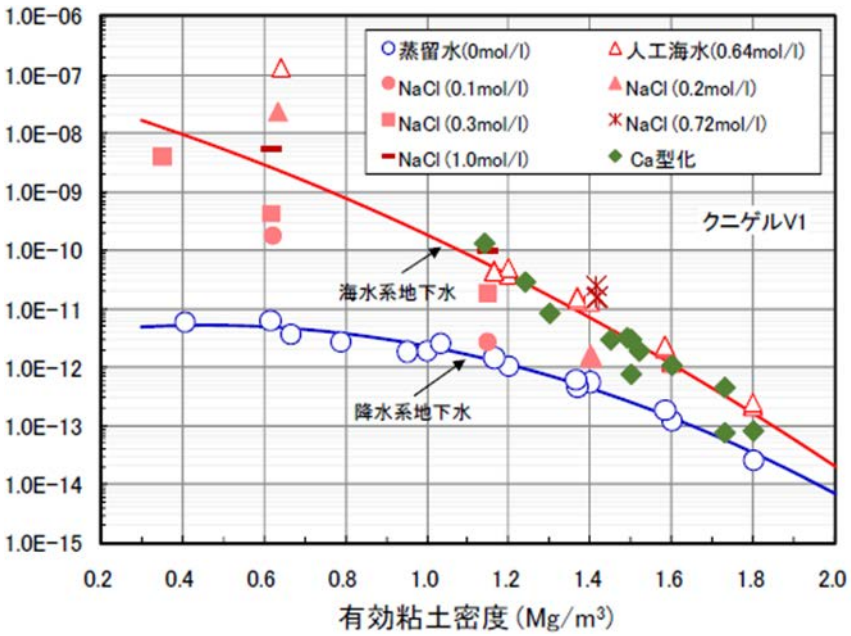


図 4.2-3　ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係
（NUMO Web ページより）

表 4.2-1　EDZ シーリング試験における粘土止水壁の候補材料

材料名	仕様／概要	特徴
クニゲル V1	ナトリウム型ベントナイト クニミネ工業製	・　国内の地層処分分野における使用実績多数 ・　原鉱石を粉砕、精製して粒度調整した製品
クニゲル GX	ナトリウム型ベントナイト クニミネ工業製	・　原鉱石を粗砕し、粒径が 10 mm 以上のものを除いた製品 ・　精製は行っていない
ペレット	上記クニゲル V1 を圧縮成型したのちに粉砕して作製 成分はクニゲル V1 と同一	・　一旦、加圧圧縮成型してから粉砕するため、クニゲル GX よりも高密度に作製可 ・　最大粒径は約 20 mm

(a) 試験に使用するペレット　　(b) 粉砕前の圧縮成型品

図 4.2-4　クニゲル V1 を加圧圧縮成型したペレット

表 4.2-2　模擬地下水の化学組成

	mol/dm^3	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Li^+	Cl^-	SO_4^{2-}	TIC
$NaHCO_3$	4.83E-02	4.83E-02							4.83E-02
Na_2SO_4	1.53E-06	3.06E-06						1.53E-06	
KCl	1.66E-03		1.66E-03				1.66E-03		
$CaCl_2$	1.97E-03			1.97E-03			3.94E-03		
$MgCl_2 \cdot 6H_20$	2.22E-03				2.22E-03		4.44E-03		
LiCl	1.25E-03					1.25E-03	1.25E-03		
NaCl	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
想定値	mg/L	3400	65	79	54	8.7	4200	0.15	580

(4) 粒度試験

粘土止水壁施工の際には、坑道の底盤に掘削したスリットにベントナイト系材料を充填するが、充填する材料の粒径分布によっては目標とする乾燥密度を達成のしやすさが異なると考えられる。人工物であるクニゲル V1 ペレットおよび原鉱石を粗砕したクニゲル GX の粒径分布は十分に明らかでないことから粒度試験を実施した。試験は土の粒度試験方法（JIS A 1204）に従って実施した。粒径加積曲線を図 4.2-5 に示す。クニゲル GX は、原鉱石粗砕品から 10 mm 以下の粒径品を選別した製品であるが、粒度試験の結果より 9.5 mm 以上 20 mm 以下の粒径が 6.1 %含まれていることが確認された。また、0.075 mm 以下の細粒分は 12.9 %であり広い粒径分布を持つことが確認できる。一方、クニゲル V1 のペレットは、4.75 mm 以上 9.5 mm 以下の粒径が 95.4 %を占めており、ほぼ単一粒径とみなすことができる結果であった。一般的に空間を充填する際には、単一粒径の粒子を充填する場合よりも広い粒径分布を持つ粒子を充填する場合において充填率が高くなるため、今回のようにスリットに充填する場合においても、クニゲル GX のほうがクニゲル V1 のペレットよりも高密度を達成しやすい材料であること考えられる。

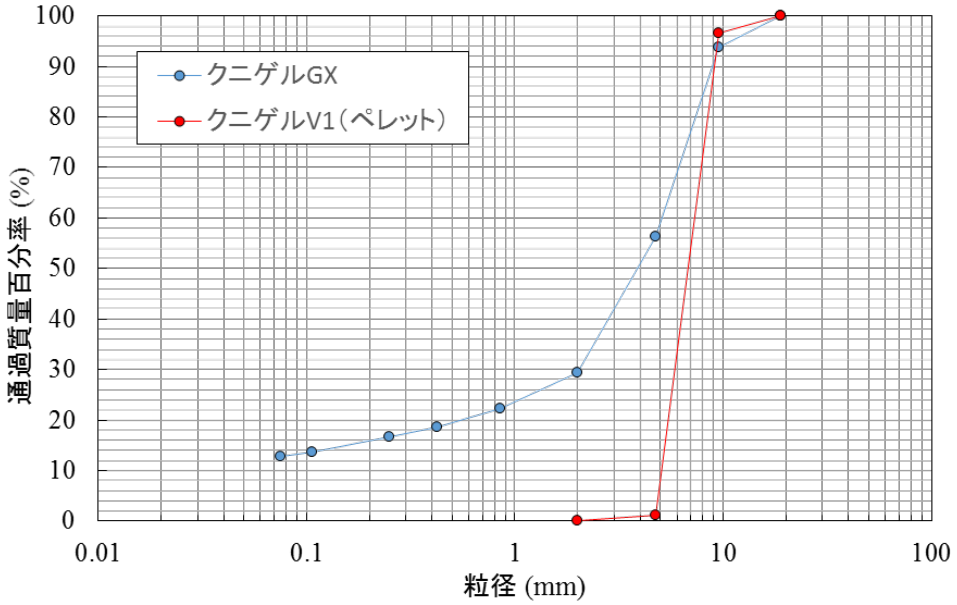


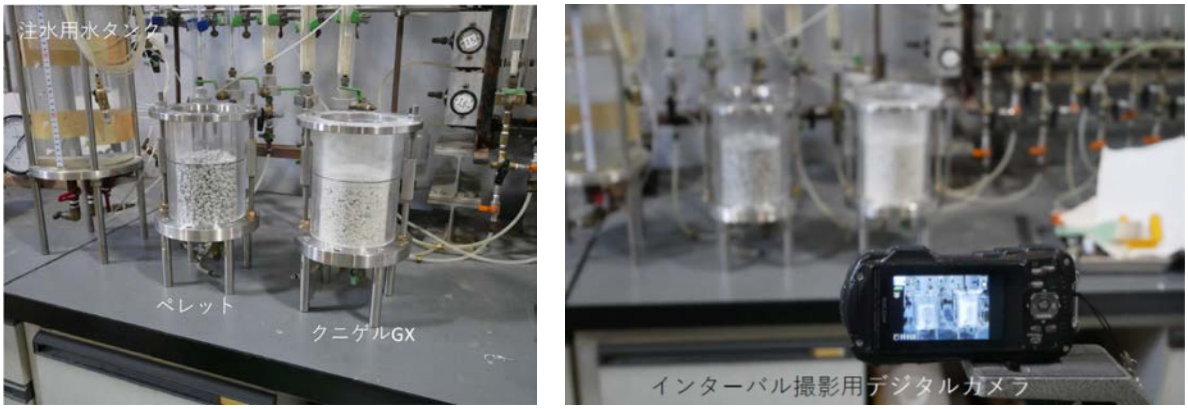
図 4.2-5　粒径加積曲線

(5) 膨潤状況確認試験

スリットにペレットやクニゲル GX のような粒子状のベントナイト系材料を充填した際には、その粒径分布に応じて隙間が生じるが、地下水の浸潤に伴うベントナイトの飽和膨潤により、その隙間は閉塞すると考えられる。充填したベントナイトが粘土止水壁として地下水の移行経路を確実に遮断するためには、充填時に存在した隙間が閉塞されて水みちにならないことが重要となる。本試験では、スリットを模擬した試験容器にベントナイト系材料を投入し、注水飽和させた際のベントナイトの膨潤状況を観察することにより、それぞれの材料の持つ膨潤特性を把握することを目的とする。試験では、直径 10 cm、高さ 10 cm の円筒形の透明な試験容器にクニゲル V1 およびクニゲル GX を投入し供試体を作製し、供試体を注水飽和した時の膨潤状況を観察した。材料の組み合わせは以下の 4 種類とし、それぞれ乾燥密度 1.20 Mg/m^3 になるように供試体を作製した。

- ペレットのみ
- クニゲル GX のみ
- ペレット＋クニゲル GX（重量比 7：3）
- クニゲル V1 の粉体に加水して突き固め充填

試験は模擬地下水を用いて実施し、試験容器底部から注水した。原位置試験においては、粘土止水壁の施工後にはベントナイトの膨出を防ぐために最終的にはスリット上部を閉鎖するが、粘土止水壁の充填直後にはスリット上部が開放された状態にあると考えられることから、本試験においても試験容器上部を開放した状態とした。膨潤状況確認試験の実施状況について図 4.2-6 に示す。それぞれの供試体において初期の高さを試験容器に記録した。注水開始と同時にビデオおよびカメラにより膨潤状況を記録した。通水後 20 分間まではビデオ映像による連続撮影を実施した。また、通水後 3 時間までは 10 分間隔で写真撮影を実施し、その後 1 週間が経過するまで 1 時間間隔で写真撮影を行った。試験では、それぞれの供試体において、充填した供試体の隙間の有無やその大きさ、模擬地下水の浸潤の様子および膨潤の様子などについて目視による観察を実施した。



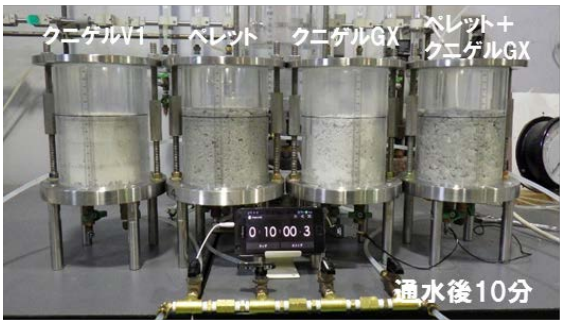
(a) 供試体充填状況　　(b) 撮影状況

図 4.2-6 膨潤状況確認試験

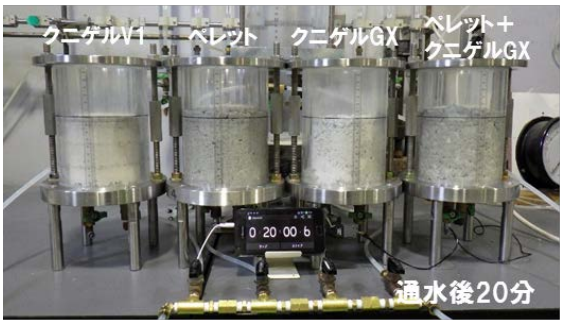
模擬地下水を注水した際の各供試体の膨潤状況を図 4.2-7 に示す。まず、試験開始時における各供試体の充填状況を見てみると、クニゲル V1 の粉体を突き固めて充填した供試体（以下、粉体供試体）はほとんど隙間がなく密に充填されていることがわかる。一方で、ペレットとペレット＋クニゲル GX の供試体においては、目視で明確に視認できる程度に空隙が存在していることが

確認できる。クニゲル GX の供試体は、ペレットを含む供試体ほどではないものの空隙が存在しており材料の粒度に応じた空隙分布の粗密が生じていた。粒度試験の結果で得られたように、単一粒径とみなすことのできるペレットでは空隙が目立ち、広い粒度分布を持つクニゲル GX では空隙が少なくなっていることが確認された。

(a)　試験開始時



(b)　通水 10 分後



(c)　通水 20 分後

(d)　通水 30 分後

(e)　通水 1 時間後

(f)　通水 2 時間後

(g)　通水 1 日後

(h)　通水 1 週間後

図 4.2-7　膨潤状況確認試験実施状況

注水を開始すると、粉体供試体では水と接触した部分が即座に膨潤することにより即座に透水性が低下してほとんど水の浸潤が認められず、通水後 30 分経過した時点においても試験容器底

部から数 mm 程度、1 日経過後においても底部から 1 cm 以下の浸潤であった。ペレットおよびペレット＋クニゲル GX では、通水開始後に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ことが確認された。また、通水 10 分後には開放されている試験容器上部へ膨潤している様子が確認できる。通水 30 分後には、膨潤により空隙が埋まることで通水量がほぼ 0 となったことを確認した。その後も時間の経過とともに、試験容器上部への膨潤が進んでいることが確認できる。クニゲル GX の供試体では、通水後に空隙部分を選択的に水が浸潤していく様子が観察された。通水 30 分後には、膨潤により空隙が埋まることで通水量がほぼ 0 となった。通水後 1 日の時点において、水の浸潤量は 1 cm 以下であったが、試験容器上部へと膨潤していることが確認された。通水 1 週間後の時点における、試験容器上部への膨出量の大きさは、ペレット≧ペレット＋クニゲル GX＞クニゲル GX となった。この結果より、狭所空間に充填したベントナイト材料は、地下水環境下で充填初期に空隙が存在する場合においても、水の浸潤に伴う膨潤によって空隙を閉塞することを確認した。また、スリットの上部のように開放された空間が存在する場合には、開放部へ向かって膨潤していくことから粘土止水壁を施工する際には、スリット上部を適切に閉鎖し粘土止水壁の密度低下を防ぐことが重要であることを確認した。

4.2.3 EDZ シーリング試験のための原位置調査

(1) 概要

EDZシーリング試験において、地下水の移行経路を遮断するための粘土止水壁は坑道周辺に広がるEDZの領域よりも深い深度まで施工することが必要となる。そのため、試験を実施する予定の場所においてEDZがどの程度の深さまで広がっているのかあらかじめ把握しておくことが重要である。そこで、原位置試験に先立ちEDZシーリング試験の実施を予定している幌延の地下施設深度350 mの試験坑道3において、底盤に2本のパイロット孔を掘削し試験場所のEDZの状況を確認するための調査を実施した。EDZの状況調査では、パイロット孔掘削の際に回収したコアの観察およびボアホールテレビ（BTV）にパイロット孔の孔壁の観察を実施し、試験坑道3の底盤下の岩盤の状況およびEDZの割れ目の状況を確認した。また、パイロット孔2孔において透水試験を実施し、粘土止水壁を設置する前の試験坑道3の底盤下の透水性を確認した。EDZシーリング試験では、図 4.2-2に示すように、坑道底盤にスリットを切削し粘土材料を充填した粘土止水壁で区切った試験領域を設定し、試験領域内に掘削したボーリング孔を用いた透水試験を実施することで実際の地下環境に施工した粘土止水壁の透水性能の評価することを検討している。粘土止水壁を施工する際のスリットの切削方法の一つとして候補に挙げられるウォータージェット工法の稚内層の切削に対する適用性の可否を判断するために幌延の地下施設深度350 mで採取した岩石コアを用いたウォータージェット切削試験を実施した。

(2) パイロット孔掘削

幌延深地層研究センター350 m 水平坑道の試験坑道 3 の底盤にパイロット孔を 2 本掘削した。パイロット孔の位置の選定の条件は、他の調査研究の作業と干渉しない位置ならびに路盤コンクリートの表面に亀裂がない位置とし、試験坑道 3 の奥側を選定した。各孔口の座標および標高を表 4.2-3 に示す。また、試験坑道 3 の場所およびパイロット孔の場所を図 4.2-8 および図 4.2-9 に示す。パイロット孔掘削前の試験坑道 3 の様子を図 4.2-10 に示す。

表 4.2-3　ボーリング孔の座標および標高

坑番	坑口標高	X 座標	Y 座標
EDZ-1	-349.058 m	116180.391	-30688.286
EDZ-2	-349.053 m	116181.964	-30685.191

（世界測地系に基づく平面直角座標系（第 12 系）での座標）

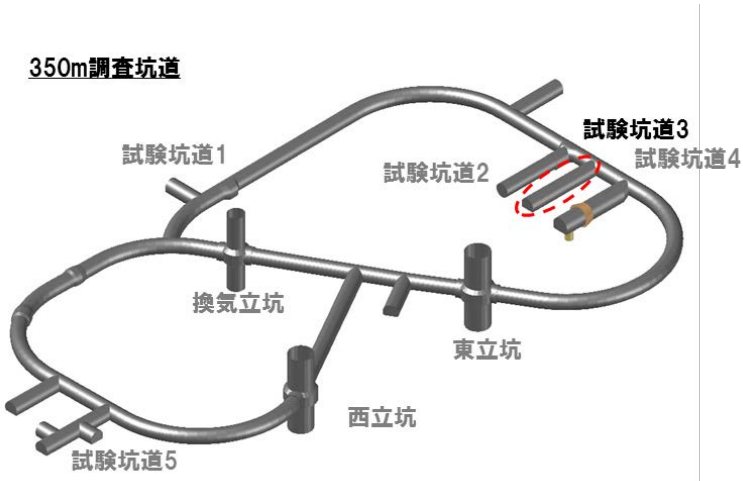


図 4.2-8　幌延深地層研究センター地下施設と原位置試験場所

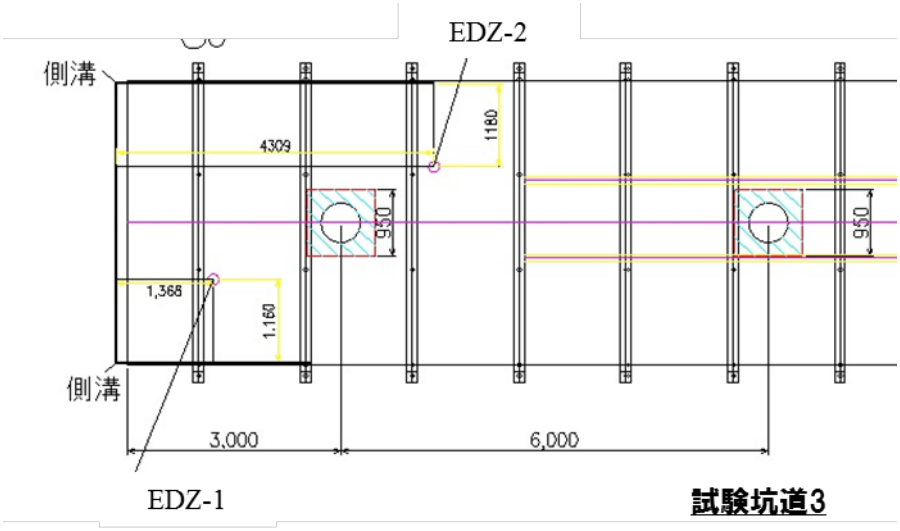


図 4.2-9　試験坑道 3 ボーリング位置平面図

図 4.2-10　パイロット孔掘削前の試験坑道 3

以下に EDZ 調査のためのパイロット孔 2 孔（EDZ-1、EDZ-2）の仕様、掘削実績およびコア観察の結果を示す。

5)　パイロット孔掘削仕様

試験坑道 3 の所定場所に EDZ-1 孔および EDZ-2 孔の合計 2 本のボーリング孔を掘削した。掘削機械の仕様を表 4.2-4 に示す。パイロット孔の掘削径は直径 76 mm とした。ただし、後にパイロット孔を用いた単孔式透水試験を実施することを計画していることから、透水試験の際にパッカーを設置することが必要になり、試験坑道 3 底盤の路盤コンクリート部に口元ケーシングを設置することとした。口元ケーシング設置のために路盤コンクリート部に関しては直径 105 mm で掘削した。口元ケーシングには、呼径 90A（外径 102 mm、内径 93 mm）の鋼管ケーシングを用いた。ケーシングとコンクリート路盤の隙間にはセメントを流し込み完全にシールすることとした。パイロット孔の掘削長は、透水試験の際にダブルパッカーを設置して試験区間を設定することを考慮して 3m とした。パイロット孔を 1 m 掘削するごとにコアの回収を実施した。

表 4.2-4　パイロット孔掘削に使用した主要資機材

仕様機械	形式	仕様
試錐機	THS-5（鉱研工業）	最大巻き上げ能力 1.8 t（シングル）
試錐機原動機	特注防爆型	15 kW モータ
試錐ポンプ	NAS-3（東亜利根）	最大と出量 130 L/min
ポンプ原動機	特注防爆型	7.5 kW モータ
ダイアモンドビット	HQ および 76 mm	HQ はリーマ付属

6)　パイロット孔掘削実績

パイロット孔の掘削実績を表 4.2-5 に示す。各パイロット孔における掘削実績を以下に示す。

・ EDZ-1 孔

路盤コンクリート部の 0.00～0.35 m までを外周に肉盛りした外径 105 mm の HQ ビットでコアリングを行い、路盤コンクリートのコアを回収した。全長約 90 cm の 90A 鋼管ケーシングを深度 0.35 m に挿入後、路盤コンクリートとケーシング間に手練りの流動性の低いセ

メントを流し込んでシールした。セメント硬化後、0.35 m 以深の掘削を行い、その後 3.23 m で掘削を終了した。掘削中ズリ区間から若干の孔壁の崩壊物の落下がみられたが、その後崩壊はみられなくなった。逸水や湧水は認められなかった。

・ EDZ-2 孔

路盤コンクリート部の 0.00～0.40 m までを外周に肉盛りした外径 105 mm の HQ ビットでコアリングを行い、路盤コンクリートのコアを回収した。全長約 90 cm の 90A 鋼管ケーシングを深度 0.40 m に挿入後、路盤コンクリートとケーシング間に手練りの流動性の低いセメントを流し込んでシールした。セメント硬化後、0.40 m 以深の掘削を行い、その後 3.80m で掘削を終了した。掘削中ズリ区間から多量の孔壁の崩壊物の落下がみられたが、掘削終了後、崩壊はみられなくなった。逸水や湧水は認められなかった。

掘削を終了し孔内洗浄した直後の水位は、EDZ-1 孔が路盤コンクリート下約 8 cm、EDZ-2 孔が路盤コンクリート下約 9 cm であった。

表 4.2-5　パイロット孔掘削実績

孔番	予定掘削長(m)	掘削長実績 (m)	仕様
EDZ-1	3.00	3.23	コンクリート路盤部：ϕ105mm
EDZ-2		3.80	コンクリート路盤以深：ϕ76mm

7)　ボーリングコア観察

パイロット孔の掘削時に回収したコアの観察を行い、EDZ の広がりについて調査するとともに試験坑道 3 の底盤下の岩盤の状態を調査した。コア観察では下記の項目について実施した。

- 孔名，深度，記載者名，岩石名，岩盤等級区分，記載日
- RQD，コア回収率，岩盤等級区分，岩相，コア写真
- 割れ目本数，割れ目番号，割れ目タイプ，傾斜角度，割れ目面の特徴
- 断層岩，成因，色調，硬さ、その他記載

EDZ-1 孔のコア観察の結果を表 4.2-6 に、ボーリングコア写真を図 4.2-11 に示す。コア観察の結果より、路盤コンクリートの下には、坑道を掘削した際に生じたズリが敷き均された層があり、そのズリ層の下から岩盤が続いていることが確認された。路盤コンクリートの厚さは 35cm、ズリ層の厚さは 10 cm であり、岩盤は 0.45 mabh 以深に続いている。0.45～0.85mabh の区間には割れ目が多く観察され、この区間を EDZ と判定した。0.85 mabh 以深のコアの割れ目については、ディスキング割れ目およびコア取り出し時に発生したものと判断し、この区間は健岩部が広がっていると判定した。

表 4.2-6　EDZ-1 孔コア観察結果

EDZ-1 孔：掘削長 3.23m	
路盤コンクリート（ケーシング区間）	0.00～0.35 mabh
ズリ	0.35～0.45 mabh
EDZ 区間	0.45～0.85 mabh
健岩部	0.85～3.23 mabh

図 4.2-11　EDZ-1 孔ボーリングコア試料の写真

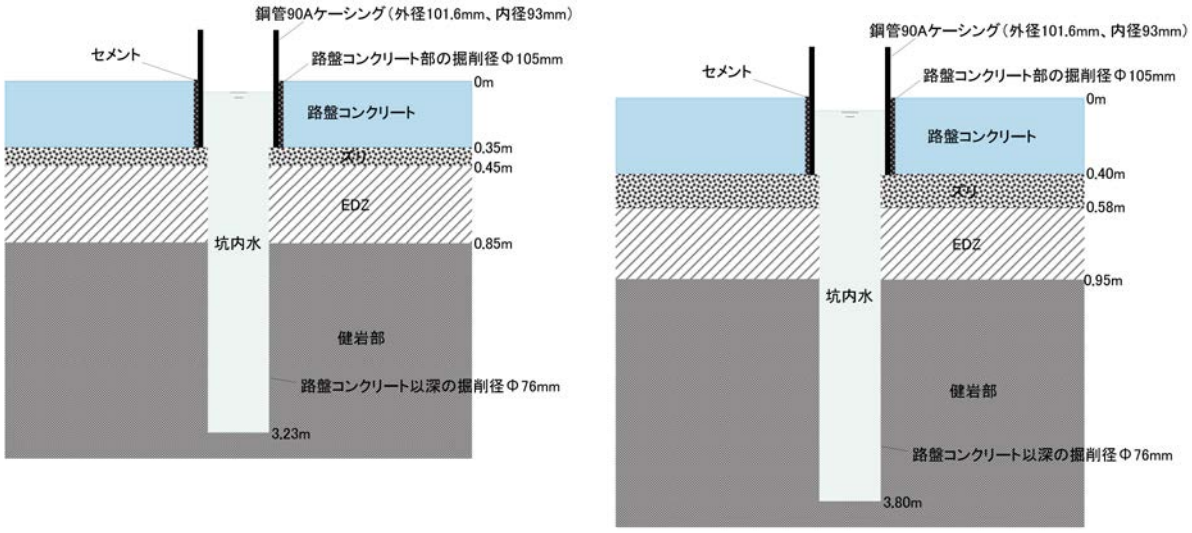
EDZ-2 孔のコア観察の結果を表 4.2-7 に、ボーリングコア写真を図 4.2-12 に示す。EDZ-2 孔においても路盤コンクリートの下には、坑道を掘削した際に生じたズリが敷き均された層があり、そのズリ層の下から岩盤が続いていることが確認された。路盤コンクリートの厚さは 40cm、ズリ層の厚さは 18cm であり、岩盤は 0.58 mabh 以深に続いている。0.58～0.95 mabh の区間は割れ目が多く観察され、この区間を EDZ と判定した。0.95 mabh 以深のコアの割れ目については、ディスキング割れ目およびコア取り出し時に発生したものと判断し、この区間は健岩部が広がっていると判定した。

表 4.2-7　EDZ-2 孔コア観察

EDZ-2 孔：掘削長 3.83m	
路盤コンクリート（ケーシング区間）	0.00～0.45 mabh
ズリ	0.45～0.58 mabh
EDZ 区間	0.58～0.95 mabh
健岩部	0.95～3.23 mabh

図 4.2-12　EDZ-2 孔ボーリングコア試料の写真

以上のパイロット孔の掘削実績およびコア観察の結果を反映させたパイロット孔断面図を図 4.2-13 に示す。



(a)　EDZ-1 孔　　(b)　EDZ-2 孔

図 4.2-13　パイロット孔断面図

(3) BTV 観察

ボーリング掘削後の孔壁や亀裂の状況を把握するために、BTV 観察を実施した。BTV は（株）レアックス社製の BIP-5 型で，直径 50 mm のプローブ内に円錐鏡、照明、CCD カメラ、磁気方位センサーなどが内蔵されており、撮影した孔壁画像および方位の情報はウィンチケーブルを通じて地上部のシステムコントロールユニットに送信され、リアルタイムで定方位のデジタル展開画像に変換・記録され、モニタ上にカメラの生画像とともに映し出される。このため孔壁の亀裂や孔内の状況がリアルタイムで把握できる。室内作業では、取得した定方位の展開画像上で、亀裂などの不連続面や初生構造などの抽出を行い、その幅や走向傾斜を求めることができる。今回の画像精度は周方向が 0.33 mm(720 画素）、深度方向が 0.5 mm である。亀裂の開口性は 1 mm 以上のものについて判定を行った。

EDZ-1 孔と EDZ-2 孔の孔壁展開画像を図 4.2-14 および図 4.2-15 に示す。路盤コンクリート区間は、パイロット孔掘削で説明したようにケーシングが設置されており孔壁展開画像上においても確認できる。路盤コンクリート下にあるズリ層は、EDZ-1 孔では孔径がやや拡大している。掘削時に多量の崩落物が確認された EDZ-2 孔においてはズリ層の孔径の拡大が著しいことが確認された。岩盤部において画像上でヘ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。EDZ-1 孔では、コア観察にて EDZ 区間と判定した 0.45～0.85 mabh の領域にヘアークラックが確認された。これらのヘアークラックは坑道掘削時の掘削により生じた割れ目であると判断した。また、コア観察では健岩部と判定した 0.85 mabh 以深の領域においても孔壁展開画像上ではヘアークラックと判定された面が確認された。これらの面についてはコアを再確認し、割れ目ではなく潜在的な弱面であると判断した。EDZ-2 孔においては、コア観察にて EDZ 区間と判定した 0.58～0.95 mabh の領域にヘアークラックが確認された。これらのヘアークラックについても EDZ-1 孔と同様に坑道掘削時の掘削により生じた割れ目であると判断した。また、EDZ-2 孔においても健岩部と判断した領域にヘアークラックが判定されたが、こちらもコアの再確認を行い潜在的な弱面であると判断した。BTV 観察の結果、EDZ-1 孔と EDZ-2 孔の 2 孔ともに、岩盤部に開口性の亀裂や孔壁の剥落はみられなかった。以上のことより、BTV 観察の結果とコア観察の結果は整合的であり、最終的に試験坑道 3 の底盤下の構造を図 4.2-13 に示すように判断した。

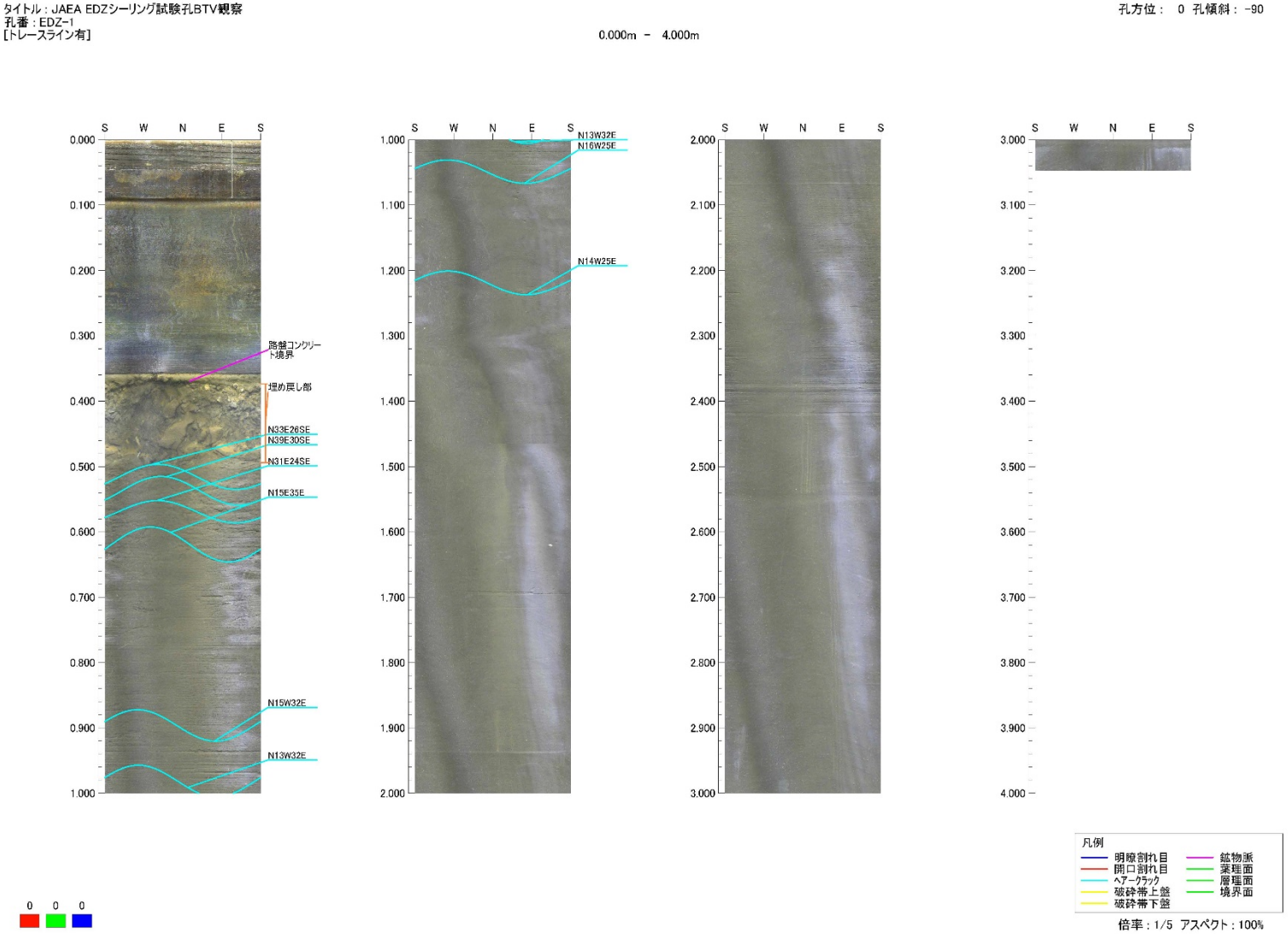


図 4.2-14　EDZ-1 孔　孔壁展開画像

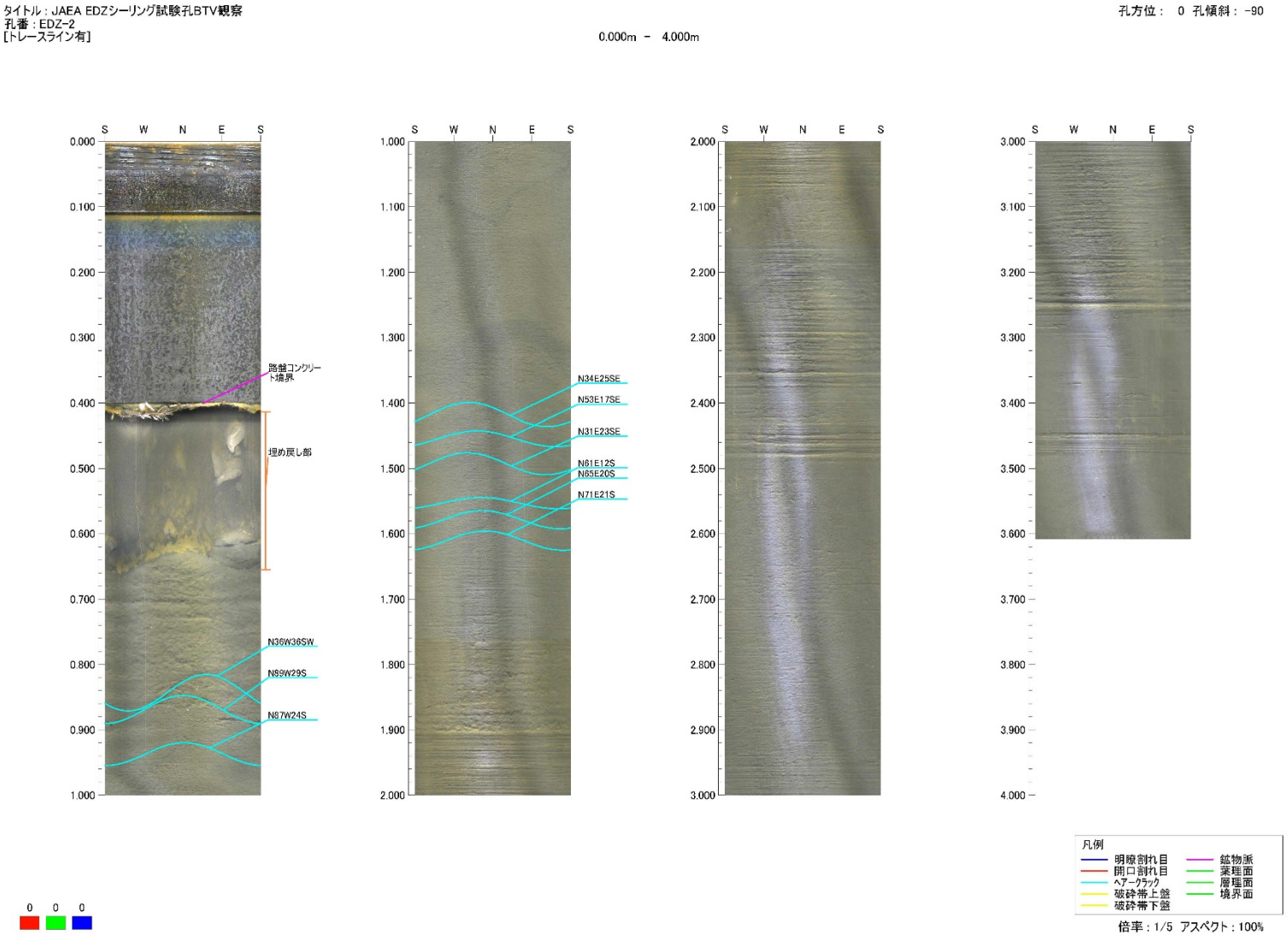


図 4.2-15　EDZ-2 孔　孔壁展開画像

(4) 原位置透水試験

試験坑道 3 の底盤下の透水性を確認するためパイロット孔 2 孔について単孔式透水試験を実施した。透水試験の試験区間は、前述のコア観察および BTV 観察の結果より、パッカーの設置が可能な場所を選定した。EDZ-1 孔と EDZ-2 孔ともに上部パッカーは鋼管ケーシングに設置し、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を EDZ-1 孔で 0.20 mabh、EDZ-2 孔で 0.30 mabh とし、下部パッカーの上端の位置を EDZ-1 孔で 2.10 mabh、EDZ-2 孔で 2.20 mabh として、2 孔ともに試験区間を 1.90 m とした。この試験区間には、路盤コンクリート下のズリ層と EDZ の両方を含んでいることから定流量透水試験を実施し、注水過程における水圧変化の計測値より透水係数を算出した。透水試験機材は、ダブルパッカー、ロッド（一部ストレーナ）、注水ポンプ（モーノポンプ）、流量計・データ変換装置・流量表示記録装置、圧力センサー・圧力データ記録装置、パッカー加圧ポンプ・アナログ圧力計、水タンクなどで構成される。設置状況を図 4.2-16 に示す。透水試験は、各孔 1 回の計画で設定注水流量を 8 L/min として EDZ-1 孔から開始した。EDZ-1 孔の 1 回目の試験では、注水開始後の水圧変化が不安定であったため、EDZ-2 孔の透水試験を実施後、EDZ-1 孔で再試験（2 回目）を実施した。

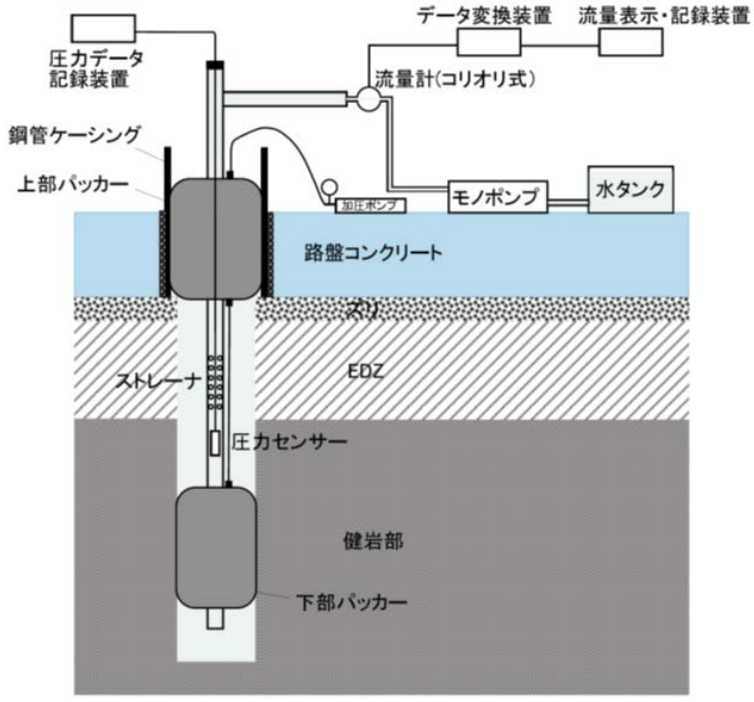
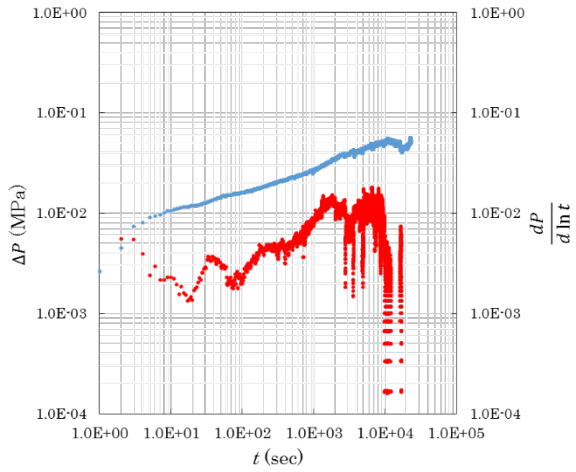


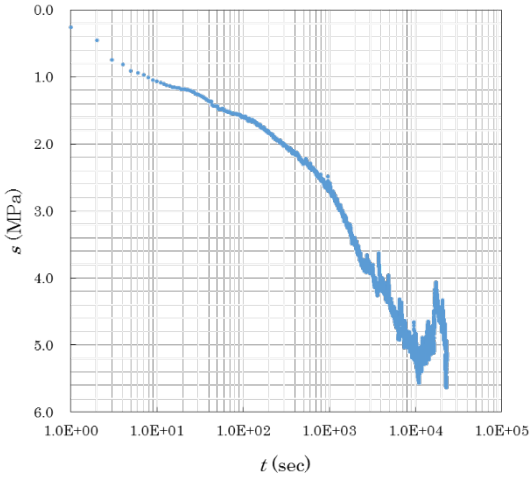
図 4.2-16　透水試験設置状況図

Cooper-Jacob 法（Cooper *et al.*, 1946）を用いて得られた透水試験の結果を図 4.2-17 および表 4.2-8 に示す。注水過程における透水係数は、EDZ-1 孔において 1 回目 $K=1.21\times10^{-5}$ m/s、2 回目 4.08×10^{-5} m/s、EDZ-2 孔において $K=7.04\times10^{-5}$ m/s が得られた。

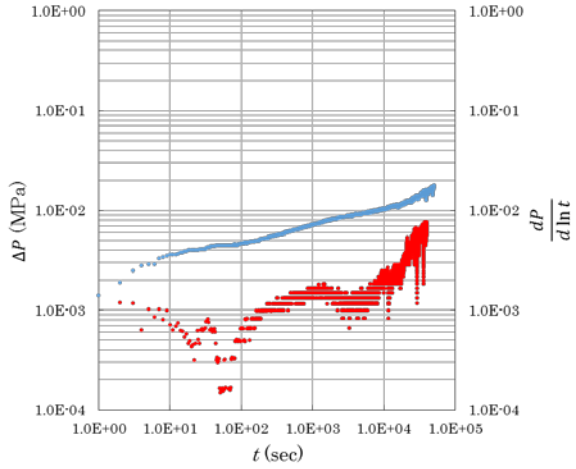
EDZ-1 孔の注水過程の試験結果において、2 回目の試験で得られた透水係数は 1 回目の試験結果に対して 3 倍程度大きく得られている。これは、試験時の注水により、ズリ層内に含まれる細粒分が洗浄されて透水性が大きくなったものと推測される。今回得られた 2 孔のズリと EDZ 部分の透水係数は、$K=1.21\times10^{-5}$ m/s～7.04×10^{-5} m/s であり、10^{-5} m/s オーダーの範囲であった。これは試験坑道 3 の側壁近傍で得られた EDZ の透水係数（青柳ほか、2016, 2017）より 1 オーダー程度大きい値であり、ほぼズリ部分の透水性に相当するものと推定される。



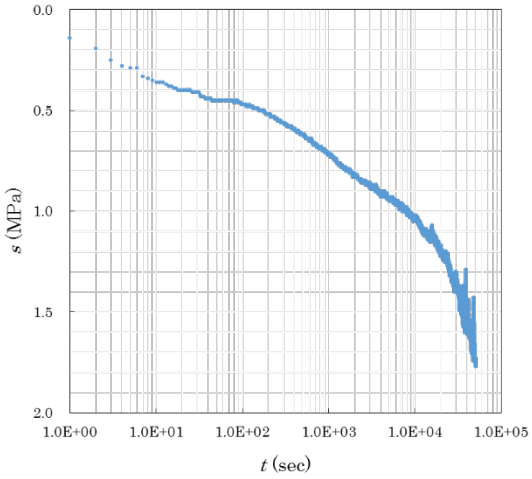
(a)　EDZ-1 孔（1 回目）Derivative plot



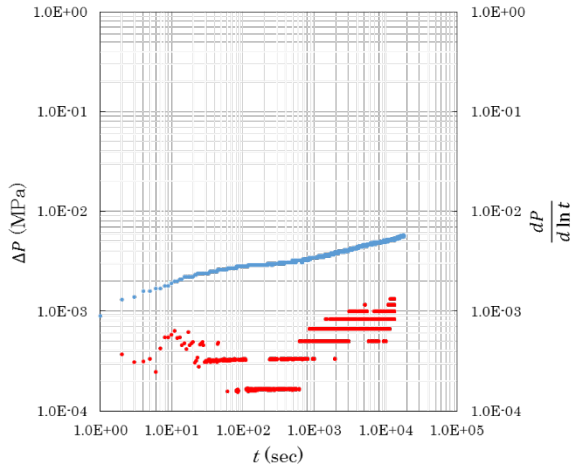
(b)　EDZ-1 孔（1 回目）Cooper - Jacob



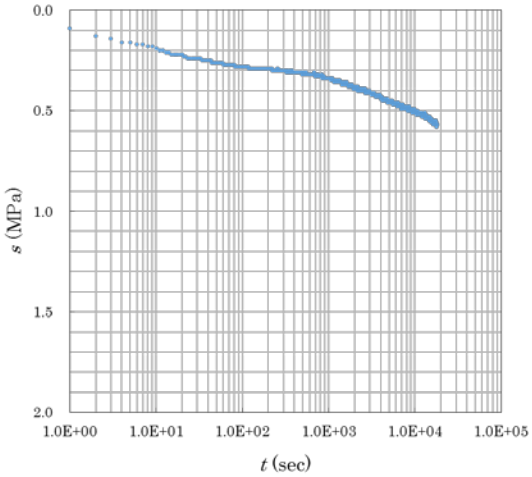
(c)　EDZ-1 孔（2 回目）Derivative plot



(d)　EDZ-1 孔（2 回目）Cooper - Jacob



(e)　EDZ-2 孔 Derivative plot



(f)　EDZ-2 孔 Cooper - Jacob

図 4.2-17　透水試験結果

表 4.2-8　試験結果一覧表

試験名	試験対象深度 (mabh)	区間長 L (m)	平均流量 Q (m^3/s)	透水量係数 T (m^2/s)	透水係数 K (m/s)
EDZ-1孔　1回目	0.200 - 2.100	1.90	1.35E-04	2.30E-05	1.21E-05
EDZ-1孔　2回目	0.200 - 2.100	1.90	1.32E-04	7.76E-05	4.08E-05
EDZ-2孔	0.300 - 2.200	1.90	1.31E-04	1.34E-04	7.04E-05

(5) 岩石コアを使用したウォータージェット切削試験

幌延深地層研究センター350 m の試験坑道 3 で実施予定の EDZ シーリング試験においては、坑道底盤下の岩盤に幅 10 cm 程度、深さ 1.5 m 程度のスリットを切削しベントナイト材料を充填することで止水壁を施工することを計画している。このスリットの切削方法としてウォータージェット工法、ラインドリリング工法およびダイヤモンドカッター工法が考えられる。本年度の EDZ 調査の結果、試験坑道 3 の底盤の下には EDZ 領域が深さ 95 cm まで確認されており、粘土止水壁を EDZ よりも深く施工することを考えた場合には、ダイヤモンドカッター工法によるスリット掘削は困難であると考えられる。そのため、本年度は残る二つの施工方法のうちウォータージェット工法によるスリット切削の可否の判断に向け、幌延の地下施設深度 350 m で採取された稚内層の岩石コアを使用したウォータージェットによる切削試験を実施した。切削試験では下記に示す項目について着目した。

- ウォータージェット工法による稚内層岩盤の切断の可否
  - ウォータージェットによる単純な岩石切削の可否を判断する
  - ただし、切削できる場合においても切削速度が 10 cm/秒を目安としてそれよりも遅い場合は不可と判断する
- 目的の幅を有するスリット切削の可否
  - ウォータージェットにより 10 cm 幅のスリットが切削できるか判断する
  - 10 cm よりも小さな径の穴加工を繰り返して 10 cm 幅のスリットを施工するのではなく、一度に 10 cm 幅の切削ができることを判断条件とする
- 切削能力の確認
  - 上記の項目においてスリット切削が可能な切削条件が見込まれた場合には、切削能力確認試験を実施し設定した切削条件における時間当たりの切削能力を評価する

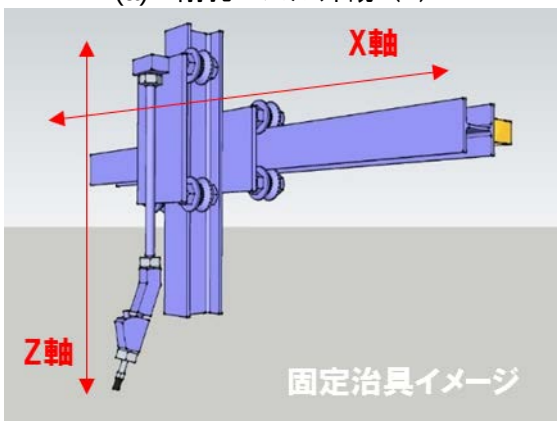
切削試験において使用した主要装置は、ウォータージェットポンプ、ウォータージェットランス、ウォータージェットランス固定冶具、遠隔操作盤、切削用ノズル、防音・防散シートである。これらの装置の写真を図 4.2-18 に、主要装置の仕様を表 4.2-9 に示す。切削試験に用いた削孔用ノズルは、ノズル先端に二つの穴を有し、それぞれの穴から水を噴出する。切削の際にはノズルが水を噴出しながら回転することで円錐状のジェットを形成し、切削の切り口は円形となる。この時、ノズルと切削対象物の間の距離を変えることで切削する穴の直径を調節することが可能である。ノズルはウォータージェットランスと呼ばれる器具の先端に装着しウォータージェットランス固定治具によりノズルが鉛直下方向に向くように固定した。固定治具には X 軸と Z 軸に駆動可能な移動ステージが備えられており遠隔操作により切削時の位置制御が可能である。本切削試験においては、ウォータージェットポンプによる噴射圧を 200 MPa として実施した。

表 4.2-9　主要装置の仕様

ノズル	・ 切削用ノズル ・ 噴出孔 2 か所
ウォータージェットポンプ	・ 噴射圧 200MPa
ウォータジェットランス治具	・ X 軸・Z 軸の 2 軸駆動

(a)　削孔ノズル外観（1）

(b)　削孔ノズル外観（2）



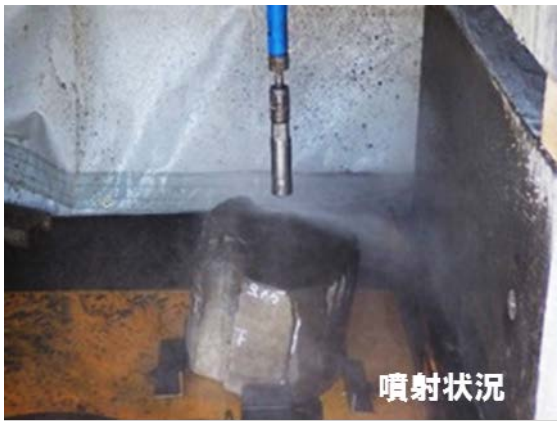
(c)　固定治具イメージ

(d)　ウォータージェットランス固定治具

(e)　ウォータージェットポンプ

(f)　切削試験実施状況

図 4.2-18　ウォータージェット切削試験実施状況（1/2）



(g)　ウォータージェット噴射状況（1）

(h)　ウォータージェット噴射状況（2)

図 4.2-18　ウォータージェット切削試験実施状況（2/2）

幌延の地下施設深度 350 m にて採集した稚内層の岩石コアを試験供試体とした。図 4.2-19 に、使用した供試体の写真を示す。切削試験は、X 軸方向（水平方向）に移動させ幅 10 cm のスリットを切削する場合と Z 軸方向（垂直方向）に移動させ深さ方向に直径 10 cm の穴を切削する場合の二つのパターンについて実施した供試体 No.1 と No.2 については、水平方向と垂直方向の両方の切削試験を実施し、供試体 No.3 については水平方向の切削試験のみを実施した。切削試験では、切削後の供試体の状態観察を行い、切断面の状態や切り口の寸法などを測定した。また、切削開始から終了までの時間を測定し、時間当たりの切削能力を評価した。

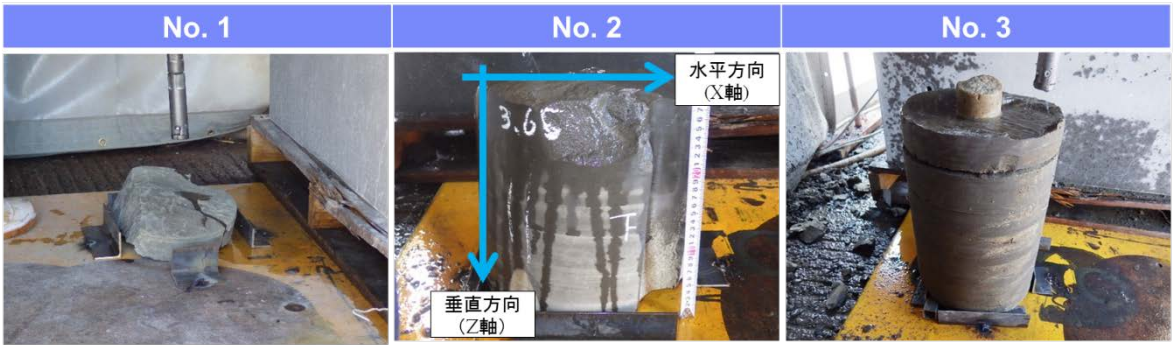


図 4.2-19　使用した供試体の試験前の状況

切削試験の試験結果を表 4.2-10 に示す。また、切削試験後の各供試体の状況を図 4.2-20 に示す。切削の際には、ウォータージェットの噴射の勢いで供試体の端の一部がはじけ飛ぶ様子が確認されたものの、いずれの供試体の場合においても稚内層の岩石が切削可能であることを確認した。また、切削速度に関しても目安としていた 10 cm/分（0.17 cm/秒）以上の 0.70 cm/秒の速度での切削が可能であることを確認した。供試体 No.2 の結果より、水平方向にノズルを移動させることによって幅 10 cm 程度のスリットが切削可能であることを確認した。また、供試体 No.3 の結果より垂直方向にノズルを移動させることにより、直径 10 cm 程度の穴を深さ方向に切削することが可能であることを確認した。以上のことより、幌延の地下施設深度 350m の岩盤に対して粘土止水壁を施工するためのスリットを切削する能力をウォータージェット工法が有していることを確認した。一方で、図 4.2-21 に示すように切削面が細かな波を打ち平滑な平面にはならない、ノズルからの距離が離れるに従って切削面が荒くなり岩盤が細かく剥がれるといった傾向

がみられた。また、ノズルの位置と切削深度の関係については明確に把握することができず、スリット切削の際の深度管理が困難であり、別途深度計測が必要となる。

表 4.2-10　試験結果一覧表

試料	切削方向	切削時間	距離	速度
No.1	垂直	17 秒	15 cm	0.88 cm/秒
	水平	18 秒	5 cm	0.28 cm/秒
No.2	垂直	30 秒	20 cm	0.67 cm/秒
	水平	27 秒	20 cm	0.74 cm/秒
No.3	垂直	61 秒	43 cm	0.70 cm/秒

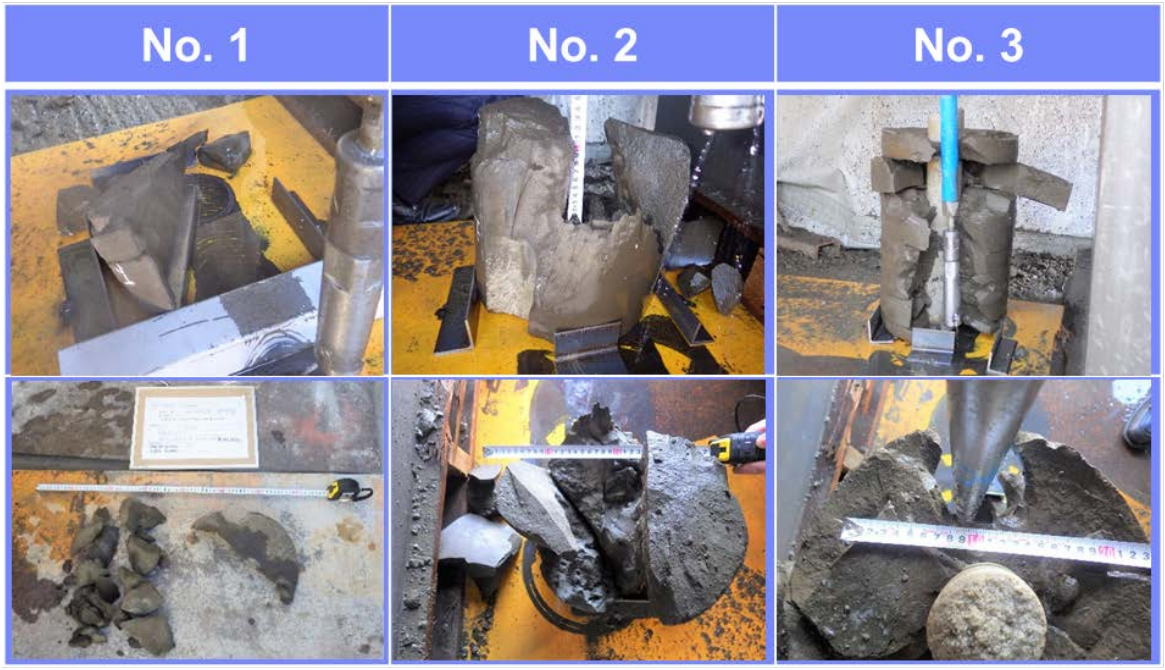


図 4.2-20　使用した供試体の試験後の状況

(a)　切削片の断面　　(b)　切削断面

図 4.2-21　切削面の状況

4.2.4　まとめ

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の実施を計画しており、平成 30 年度においては、粘土止水壁として施工するベントナイト系材料の室内試験に着手するとともに、原位置試験の実施予定場所である幌延の地下施設深度 350m の試験坑道 3 において EDZ の状況調査と透水性の確認を実施した。以下に、平成 30 年度の成果と今後の試験計画および課題をまとめる。

(1) ベントナイト材料の室内試験

EDZ シーリング試験においては、粘土止水壁として充填するベントナイト系材料として粒状ベントナイトの利用を検討しており、クニゲル V1 を加圧圧縮成型した後に粉砕したペレットとクニゲル GX の二つを候補材料とした。地下環境に粘土止水壁として施工する際の施工性を評価するために粒度試験と膨潤状況確認試験を実施した。

粒度試験の結果、クニゲル V1 のペレットは、4.75 mm 以上 9.5 mm 以下の粒径が 95.4 %を占めており、ほぼ単一粒径とみなせることが確認できた。一方で、クニゲル GX には 9.5 mm 以上 20 mm 以下の粒径が 6.1 %、0.075 mm 以下の細粒分は 12.9 %が含まれており広い粒径分布を持つことを確認した。これらのことより、スリットに充填する場合、クニゲル GX のほうがクニゲル V1 のペレットよりも高密度に施工しやすい材料であると考えられる。

膨潤挙動確認試験では、各種材料を充填して作製した供試体の空隙の有無やその大きさ、水の浸潤の様子および供試体の膨潤の様子について観察を実施した。供試体の空隙については、ほぼ単一粒径となるペレットにおいて目視で視認できるほど空隙が目立った。クニゲル GX については、広い粒径分布を持つため細粒分が粒径の大きい粒子の間に入り込むことにより空隙が少なくなっていた。供試体に水を通水すると、ペレットとクニゲル GX ともに空隙を選択的に浸潤していく様子が確認された。ペレットでは、空隙が大きく通水開始から数分で供試体上端まで水が達したのに対して、クニゲル GX では通水後 1 日の時点において、水の浸潤量は 1 cm 以下であった。また、どちらの供試体においても、通水 30 分後には、膨潤により空隙が埋まることで通水量がほぼ 0 となった。本試験は、試験容器上部を開放して実施しておりペレットとクニゲル GX ともに試験容器上部へと膨潤していることが確認された。試験容器上部への膨出量の大きさは、ペレット＞クニゲル GX であった。これらのことにより、施工初期に空隙を有する場合においても膨潤により空隙が閉塞される明らかとなった。また、粘土止水壁として施工する際には、スリットからの膨出を防ぐ手段が必要なことが確認された。

EDZ シーリング試験に向けて、今後は、ペレットとクニゲル GX が地下水環境下において透水係数の目標値である 10^{-11} m/s を確保できる乾燥密度で施工することが可能か室内試験にて検証することが必要となる。また、粘土止水壁として施工した際に発生する膨潤圧について把握する必要がある。これらの検討を行い実際に粘土止水壁として施工する材料の選定を行う。

(2) EDZ シーリング試験のための原位置調査

EDZ シーリング試験を実施するにあたり、試験の実施予定場所である幌延の地下施設深度 350 m の試験坑道 3 において、EDZ の状況を把握することを目的として、試験坑道 3 の底盤にパイロット孔を掘削し、コア観察と BTV 観察を実施した。また、掘削したパイロット孔を利用して単孔透水試験を実施し、試験坑道 3 の底盤下の場の透水性を確認した。さらに、粘土止水壁を施工するために掘削するスリットの施工方法について、ウォータージェット工法の適用性を判断するため基礎データ取得を目的として、幌延の地下深度 350 m に分布する稚内層の岩石コアを用いた

ウォータージェット切削試験を実施した。

コア観察と BTV 観察により、試験坑道 3 の路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敷き均されていることが確認された。また、EDZ は最大で路盤コンクリートから 0.95 m の深さまで続いており、それよりも深い岩盤については構造性の割れ目が存在せず健岩部であることが確認された。

透水試験では、ズリ層と EDZ を含む区間を試験区間と設定し試験を実施した。その結果、試験坑道 3 の底盤下の透水係数は 10^{-5} m/s オーダーの範囲であった。これは試験坑道 3 の側壁近傍において測定された EDZ の透水係数より 1 オーダー程度大きい値であり、ほぼズリ部分の透水性に相当するものと推定される。

ウォータージェット切削試験では、稚内層の岩盤がウォータージェットにより切削可能であり、0.70 cm/秒の切削速度を達成できることを確認した。また、幅 10 cm のスリットが切削可能であること、深さ方向に直径 10 cm の穴を切削可能であることも確認された。一方で、切削面が細かな波を打ち平滑な平面にはならない、ノズルからの距離が離れるに従って切削面が荒くなり岩盤が細かく剥がれるといった特徴が明らかとなった。また、スリットを切削する際には深度管理が難しいという施工の観点での課題が明らかとなった。

EDZ シーリング試験では、図 4.2-2 に示すように、試験坑道 3 の底盤に鉛直下方向に幅 10 cm、深さ 1.5 m 程度の溝（スリット）を施工し、ベントナイト材料を充填した粘土止水壁より区切られた 1 m 四方程度の試験領域を設定し、水理試験などを実施することにより粘土止水壁の透水性能を評価する。

参考文献

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.

日本原子力研究開発機構（2016）：平成 27 年度　地層処分技術調査等事業　処分システム評価確証技術開発報告書　平成 28 年 3 月.

日本原子力研究開発機構（2017）：平成 28 年度　地層処分技術調査等事業　処分システム評価確証技術開発報告書　平成 29 年 3 月.

日本原子力研究開発機構（2018）：平成 29 年度　地層処分技術調査等事業　処分システム評価確証技術開発報告書　平成 30 年 3 月.

Börgesson L, Hernelind J, (2009): Mechanical interaction buffer/backfill. Finite element calculations of the upward swelling of the buffer against both dry and saturated backfill. SKB R-09-42, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB).

Sandén T, Börgesson L, Nilsson U and Dueck A, (2017): Full scale buffer swelling test at dry backfill conditions in Äspö HRL. In situ test and related laboratory tests. SKB TR-16-07, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB).

Keto P (ed), Hassan Md M, Karttunen P, Kiviranta L, Kumpulainen S, Korkiala-Tanttu L, Koskinen V, Jalonen T, Koho P and Sievänen U. (2013): Backfill Production Line 2012. Design, production and intial state of the deposition tunnel backfill and plug. POSIVA 2012-18, POSIVA Oy, Finland.

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.

戸井田克、笹倉剛、渥美博行、升元一彦、田中俊行、須山泰宏、小林一三（2005）：シーリング性能挙動に関する評価研究、JNC-TJ8400 2004-023.

Bossart, P. and Thury, M. (2008): Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and results, Rep. Swiss Geol. Surv. 3.

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.

伊藤弘志、千々松正和、村上利一（2007）：ベントナイト層の現場施工用材料の開発、土木学会第 62 回年次学術講演会、pp. 160 – 161.

原子力発電環境整備機構：NUMO セーフティケースに関する外部専門家ワークショップ資料, https://www.numo.or.jp/topics/safetycase_setsumei4.pdf, 2016, 97p.（参照：2019 年 2 月 1 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.

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など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、工学規模試験など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、以下の二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。

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

地層処分事業で想定される深度 300 m 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）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・定置方法である竪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。本施工試験は、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実施した。

なお、本施工試験は、原子力機構が平成 29 年度に実施した瑞浪超深地層研究所の研究坑道を利用した場合の坑道一部埋め戻し試験に関する計画（戸栗ほか、2019）をベースとして実施したことから、最初に計画検討の概要を述べ、次に平成 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」の成果について概説する。

5.1.1　瑞浪超深地層研究所における坑道一部埋め戻し試験の計画

本計画検討は、我が国のジェネリックな地質環境を念頭に置き、研究開発という視点での坑道一部埋め戻し試験の試験概念を構築した上で、その概念に基づき瑞浪超深地層研究所の深度 300 m より深い研究坑道を利用する場合の試験計画検討を実施したものである。本検討は、大きく分けて以下のステップで実施した。

- 坑道一部埋め戻し試験の概念の提示
- 提示した概念に基づく試験計画の策定

計画検討結果の詳細は、JAEA-Technology として公開されている（戸栗ほか、2019）ため、ここではその概要を述べることとする。

(1) 坑道一部埋め戻し試験の概念の提示

我が国におけるジェネリックな地質環境を念頭に置き、坑道一部埋め戻し試験の概念を提示するため、はじめに国内外の同種の事例に関する詳細な文献調査を実施した。調査対象とした国内

外における先行研究事例を表 5.1-1 に示す。調査対象は、主に竪置き方式での坑道埋め戻し試験であるが、ジェネリックな地質環境を対象とするため、堆積岩系の岩盤を対象に実施されている横置き方式の試験も加えた。この調査の結果、埋め戻しに対する要求性能については、地層処分事業が先行している諸外国、主にスウェーデン、フィンランドの試験を調査した結果、

- 移流抑制
- 材料間の化学的安定性
- 緩衝材位置の保持
- キャニスタの浮き上がり防止
- 処分坑道の坑道安定性

といった指標が抽出された。また、要求性能を満たすことを確認するための指標としては、共通して以下の項目が挙げられている。

- 透水係数
- 膨潤圧

表 5.1-1　坑道一部埋め戻し試験の実施機関、試験名および試験環境

実施機関		試験名		試験地	地質	試験坑道			実施時期	
国名	機関	略称	名称			坑道スケール	処分概念	坑道幅	開始	終了
スウェーデン	SKB	-	Prototype Repository Experiment	Äspö	結晶質岩	フルスケール	縦置き	4 m	2010	2011
フィンランド	Posiva	BACEKO Ⅱ	BACkfilling in EKOkem-project Ⅱ	Äspö	模擬坑道	1/4スケール	縦置き	3 m	2010	2011
スイス	NAGRA	FE	Full-Scale Emplacement experiment	Mont Terri	堆積岩	フルスケール	横置き	3 m	2014	present
フランス	ANDRA	-	Backfilling Demonstrator	Bure	模擬坑道	小規模スケール	横置き	4 m	2004	-
ベルギー	SCK・CEN	-	PRACLAY experiment	HADES	粘土	小規模スケール	横置き	1.9 m	2008	present
日本	JAEA	GREET	再冠水試験(ピット埋め戻し試験)	瑞浪	結晶質岩	冠水坑道床盤	縦置き	3×2×1m 4×3×1m	2012	present
		-	緩衝材流出試験	幌延	堆積岩	バッファー	縦置き	-	2013	present

一方、我が国では、地層処分事業の実施主体である NUMO が、我が国のジェネリックな地質環境、坑道シーリングの構成要素に期待する機能と役割、坑道シーリングの構成要素のうち、埋め戻し材やプラグの設計における設計要件、確認方法、指標、基準についてそれぞれ表 5.1-2～表 5.1-5 のような形で整理している。

表 5.1-2　坑道シーリングの構成要素に期待する機能と役割

構成要素	機能/役割
埋め戻し材	・放射性物質の移行経路となるような地下水の流れを抑制する。 ・再冠水後の緩衝材や止水プラグ（粘土プラグ）の坑道への膨出を抑制する。
力学プラグ	・処分坑道において埋め戻しの完了していない空間側への埋め戻し材の膨出を抑制する。
止水プラグ	・埋め戻し材との組み合わせで閉鎖後のアクセス坑道およびその周辺が放射性物質の移行経路になることを防ぐ

表 5.1-3　埋め戻し材の設計

設計要件	確認方法	指標	基準
低透水性	坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないように、埋め戻し材の密度を設定する。	透水係数	1.0×10^{-8} m/s 以下
施工の実現性	坑道内での埋め戻し施工が可能な密度であることを確認する。	乾燥密度	1.8 Mg/m^3 以下
評価項目	確認方法	指標	基準
膨出抑制	再冠水後の緩衝材および止水プラグの膨出を抑制し、これらの有効粘土密度が仕様成立範囲に収まることを、埋め戻し材仕様に対して確認する。	有効粘土密度（緩衝材、止水プラグ）	1.2 Mg/m^3 以上

表 5.1-4　埋め戻し材・止水プラグの技術要件（基本的なバリア性能の確保）

安全機能		技術要件	技術要件の説明	設計項目
放射性物質の移行抑制	アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制	低透水性	地下水の流れを抑制すること	埋め戻し材の設計（材料設計） 止水プラグの設計（材料設計、配置設計）

表 5.1-5　埋め戻し材、止水プラグの長期健全性の維持に関する技術要件

技術要件	技術要件の説明	設計項目
施工時の隙間の充填（自己シール性）	施工時の隙間を充填するよう膨潤性を有すること	埋め戻し材の設計（材料設計、形状・厚さの設計） 止水プラグの設計（材料設計、配置設計）
残置物、材料間の相互作用の影響の低減	コンクリートなどの残置物や材料間の相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	埋め戻し材の設計（材料設計、形状・厚さの設計） 止水プラグ、力学プラグの設計（材料設計、配置設計）

坑道埋め戻しへの上記要求性能（あるいは埋め戻し材が保持すべき機能、要件）を、前述の国内外の既往事例の調査結果と比較すると、これらはほぼ共通している。これは、放射性物質の移行抑制など、処分場に構築される人工的なバリアシステムが有すべき安全機能（特に閉鎖後長期の安全機能）が共通するためと考えられる。

一方、「坑道安定性」については、スウェーデン、フィンランドなど、いくつかの国において、要求性能（あるいは本調査において要求性能に準ずる用語に分類した、Performance targets、Design requirements、requirement など）としての記載があるため、フィンランド（POSIVA 社）を対象に、「坑道安定性」を挙げている理由についてさらに調査を加えた。その結果、坑道埋め戻しへの性能目標値として膨潤圧 0.2 MPa を設定しているものの、その根拠は複合的であり、坑道の力学的安定性のほか、埋め戻し材と岩盤との密着によるパイピングの影響の防止、核種の移行抑制などとの関係を挙げている。地層処分のための坑道は、建設期間や操業期間中には安定性が損なわれないように設計するため、支保部材と周辺岩盤により数十年の力学的安定性は確保されるものと考えら、また、坑道がアクセス可能な状態であれば、それらの性能を維持できるよう管理することも可能である。しかし、埋め戻し終了後は、支保部材の劣化という力学的安定性に対する負の要素、埋め戻し材による支持（膨潤圧や力学的な支持能力）という正の要素、ならびに周辺岩盤の強度などを考慮した上で、坑道の力学的安定性の必要性を議論する必要がある。

今回検討した計画は、後述する坑道の一部埋め戻し試験の期間が短期であり、かつ瑞浪超深地層研究所の利用、すなわち結晶質岩盤を対象とすることを前提としたため、埋め戻し後に既設の

支保部材や周辺岩盤の劣化などにより坑道の安定性が損なわれる可能性は小さいと判断したため、要求性能として坑道安定性は設定しないものとした。一方で、品質管理の一環として、埋め戻し材の膨潤圧（土圧）は計測し、坑道安定性の検討に資する情報も取得する計画とした。

以上の検討を踏まえ、今回実施すべき坑道一部埋め戻し試験の概念を提示した。まず、NUMOは、「NUMO セーフティケースに関する外部専門家ワークショップ」（NUMO、2016）の中で、「候補母岩の特徴および類型化」として地層処分における地質環境条件として重要な情報である透水係数を下表のように設定している（表 5.1-6）。

表 5.1-6　候補母岩の特徴および類型化

時代	新第三紀	先新第三紀	新第三紀・先新第三紀	新第三紀・先新第三期	
岩種	堆積岩類	堆積岩類	火山岩類	深成岩類	変成岩類
透水係数（m/s）	3×10^{-7}	5×10^{-7}	2×10^{-7}	5×10^{-8}	9×10^{-7}

現時点では、地層処分事業における検討もサイトジェネリックな観点で進められていること、原子力機構が、岐阜県瑞浪市に建設した瑞浪超深地層研究所において進めている研究開発で対象とする土岐花崗岩は、表 5.1-6 と比較すると深成岩類に区分できること、要求性能としては設定した「低透水性（坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないこと）」を確認すること目標設定として適切と考えられるなどの理由により、本施工試験では、類型化された母岩の透水係数（10^{-8} m/s オーダー）以下の透水性を満足する埋め戻し材の使用とその施工性などを確認することとした。施工方法については、研究開発の視点から、国内外の先行例において適用例がほとんどない、小断面の坑道に対する吹付け工法の成立性に関する知見の拡充を目標とした。また、要求性能として挙げないものの、我が国の地質環境における埋め戻し後の埋め戻し材の状態変化（埋め戻し材への地下水の浸潤に伴う状態変化）や、回収可能性維持の観点から地下深部へのアクセスを維持することに伴う埋め戻し材の流出現象に関する知見の拡充も重要となる。

以上を整理し設定した、原子力機構の瑞浪超深地層研究所を利用した場合の坑道一部埋め戻し試験の目的を表 5.1-7 にまとめるとともに、より具体的な試験概念提示のための検討結果を以降に述べる。

表 5.1-7　坑道一部埋め戻し試験の目的

対象	時期	試験目的	条件
埋め戻し材料設定	・施工前	・低透水性（周辺岩盤相当）を満足する材料の設定および確認	・深成岩を対象とした条件
施工方法	・施工前 ・施工中	・低透水性を満足する密度の確認 ・吹付け工法の成立性に関する知見の拡充	・小断面坑道を対象とした条件
埋め戻し材の基本特性	・施工後（計測期間）	・浸潤過程の確認 ・膨潤圧、水圧変化の確認 ・湧水量と埋め戻し材の流出量の関係確認	・埋め戻し材前面を排水構造とした条件 ・埋め戻し材前面の「土留め壁」は設計荷重を満たす条件
	・モニタリング後	・密度、含水比、飽和度の確認 ・埋め戻し材流出状況（特に境界面）の確認	

8)　埋め戻し材の仕様

前述の通り、埋め戻し材は、類型化された地質環境で設定されている透水係数 1.0×10^{-8} m/s 以下の「低透水性」を満足することを目標とする。図 5.1-1 は、ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係が示されたものである（NUMO、2016）が、同図から、処分場の地下水成分として

海水系地下水・降水系地下水いずれを想定した場合にも、透水係数が 1.0×10^{-8} m/s 以下となるベントナイトの有効粘土密度は、0.4 Mg/m^3 以上となるため、本施工試験における埋め戻し材の仕様についてはこれを具体的な目標値とした。また、具体的な埋め戻し材（ベントナイト混合土）の配合は、「第 2 次取りまとめ」を参考にベントナイト混合率 15 wt%を設定した。これは、ベントナイトの混合率を変化させて実施した締固め試験の結果、ベントナイト混合率 15 wt%で最大の乾燥密度が得られたことによる。

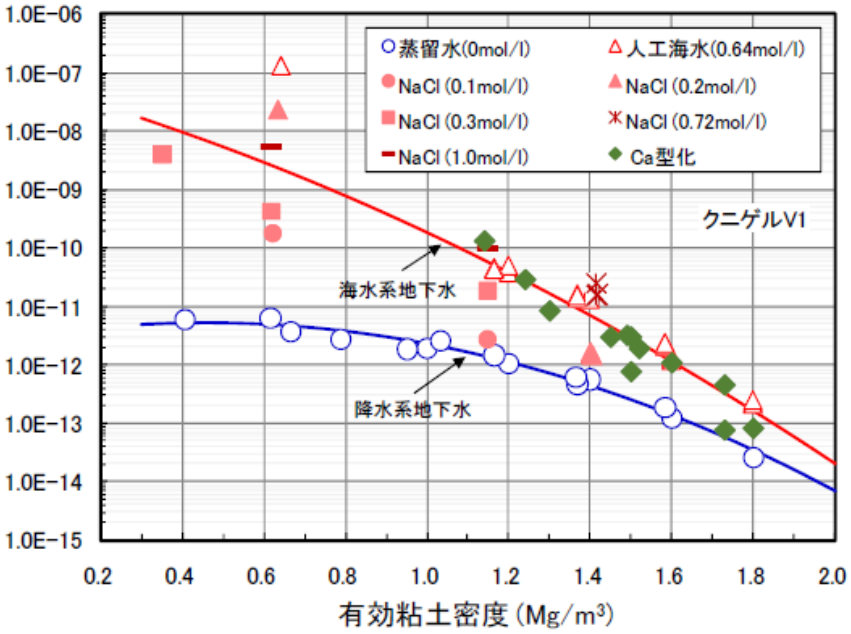


図 5.1-1　ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係
（NUMO、2016）

9)　埋め戻し材の施工方法

前述の通り、今回の埋め戻し材の施工方法は、国内外において事例が少ない吹付け工法とする。また、埋め戻し材料の粒径に着目した室内予備試験の結果、埋め戻し材の最大乾燥密度の増加が確認でき、求められる埋め戻し材の透水性に応じ、室内予備試験で使用した材料と同等の材料を用いることを前提として施工品質を設定することが可能と判断した。

室内締固め試験結果（最大乾燥密度）と吹付け機械により施工した埋め戻し材の乾燥密度から、吹付け機械による埋め戻し材の締固めエネルギーを推察し、締固めエネルギーに応じた埋め戻し材の含水比設定と管理をおこなうことで、吹付け工法の成立性に関する知見が拡充できる。なお、室内予備試験における締固め試験結果から、締固めエネルギーが低下した場合に最適含水比が大きくなる傾向が得られたため、埋め戻し材の含水比設定は注意が必要となる。

10) 品質確認項目・品質確認手法

前述の諸外国で実施されている坑道一部埋め戻し試験、ならびに我が国における埋め戻し試験および参考となるその他試験の品質確認項目と品質確認手法（計測法）、計測の目的を表 5.1-8 に示す。

同表に挙げた品質確認項目の目的と実績を整理すると、水分や土圧、密度や含水比は、ほとんどの試験で確認されている。水圧は、大深度下で行われた埋め戻し試験では計測されているが、地上の模擬坑道で行われた試験では計測されていない。温度は、キャニスタの発熱を模擬したヒ

ーターが設置された試験においては計測されている。その他の品質確認項目に関しては、試験目的（例えば埋め戻し材の流出状況の確認）に応じた計測が実施されている。

表 5.1-8　国内外の坑道一部埋め戻し試験および参考となる試験の品質確認項目と計測法

項目	計測法	スウェーデン SKB Prototype Repository Experiment 竪置き	フィンランド Posiva BACEKOⅡ 竪置き	スイス NAGRA FE Experiment 横置き	フランス ANDRA Backfilling Demonstrator 横置き	ベルギー EIG EURIDICE PRACLAY Experiment 竪置き	日本 JAEA　瑞浪） ボーリングピット埋め戻し試験（再冠水試験） 竪置き	日本 JAEA　幌延） 緩衝材流出試験 竪置き	着目点	計測の目的
水圧	水圧計	○	-	○	-	○	○	-	浸潤	浸潤に伴う水圧の把握
水分	水分計	○	-	○	-	○	○	-	浸潤	浸潤過程の把握 埋め戻し材の品質管理
	電気抵抗	○	○	-	-	-	-	-		
土圧	土圧計	○	○	○	-	○	○	-	膨潤	浸潤に伴う膨潤圧の把握
変位	変位計	-	○	○	-	○	-	-	膨潤	膨潤に伴う埋め戻し材の変位の把握
温度	温度計	○	-	○	-	○	-	-	温度	ヒーター設置による温度上昇過程の把握
熱伝導度	熱伝導度計	-	-	○	-	○	-	-	温度	埋め戻し材の品質管理
密度	試料採取	○	-	○	○	-	○	-	品質	埋め戻し材の品質管理
	RI密度試験	○	-	-	-	-	-	-		
含水比	試料採取	-	○	-	○	-	○	-	品質	埋め戻し材の品質管理
物理探査	レーダー・音響	-	-	○	-	-	-	-	品質	埋め戻し材の品質管理
物性	コーン貫入試験	-	-	○	-	-	-	-	品質	埋め戻し材の品質管理
引張強度	光ファイバー	-	-	○	-	-	-	-	品質	埋め戻し材の品質管理
歪み	歪みゲージ	-	-	-	-	○	-	-	品質	埋め戻し材の品質管理
空隙	内視鏡	-	-	-	○	-	-	-	品質	埋め戻し材の沈降現象の把握
圧密	平板載荷試験	-	-	-	○	-	-	-	品質	埋め戻し材の品質管理
排水量	水位計	-	○	-	-	-	-	-	湧水	埋め戻し材内からの排水量の把握
浸食経路	赤外線カメラ	-	○	-	-	-	-	-	流出	埋め戻し材内に形成された浸食経路の把握
ベントナイト流出量	試料採取	-	○	-	-	-	-	○	流出	埋め戻し材内から流出したベントナイト量の把握
ガス構成	ガス検知器	-	-	○	-	-	-	-	生成物	浸潤・膨潤に伴うガス量・組成変化の把握
金属腐食	金属腐食評価	-	-	○	-	-	-	-	生成物	浸潤に伴う金属腐食程度の把握

この結果に基づき、本検討における坑道一部埋め戻し試験の目的（表 5.1-7）を達成するための品質確認項目を整理すると、大深度の坑道におけるベントナイト混合土の膨潤圧の把握のためには、水圧・土圧の確認が必要となる。また膨潤に至る準備段階となる浸潤過程の把握のためには水分変化の確認も必須の項目となる。温度については、今回の試験計画ではキャニスタを模擬したヒーターは設置せず、温度変化はほぼないと考えられるため品質確認項目としない。埋め戻し材の流出量については、他試験では実績が少ないものの、今回の試験計画では土止め壁は排水構造としており、試験坑道から外部への埋め戻し材の流出程度を把握できる可能性があることから、品質確認項目として表 5.1-9 のように設定した。

表 5.1-9　坑道一部埋め戻し試験における施工中の品質確認項目および品質確認手法の概念

項目	計測法	計測時期	計測の目的
		施工中	
水圧	水圧計	ー	・浸潤に伴う水圧変化の把握
土圧	土圧計	ー	・浸潤に伴う膨潤圧変化の把握
水分	水分計	ー	・浸潤過程の把握 ・埋め戻し材の品質確認
	試料採取	○	
密度・含水比	RI 現場密度試験	○	・埋め戻し材の品質確認
	試料採取	○	・埋め戻し材の品質確認
埋め戻し材 流出量	流量	（○）	・埋め戻し材の品質確認
	吸光度	（○）	

（○）湧水量や作業状況に応じて設定

(2) 検討した坑道一部埋め戻し試験の概念に基づく瑞浪超深地層研究所の研究坑道を活用した試験計画

試験計画の検討では、本施工試験の目的を最も合理的・効率的に達成しうる試験場所として、原子力機構が所有する瑞浪超深地層研究所の研究坑道の活用を前提とした。一方で、平成 30 年度からの原位置試験の開始を前提とすると、同研究所で試験を行う場合は最長で 2 ヵ年以内と考えることが現実的であると判断した。さらに、瑞浪超深地層研究所では多種多様な調査試験が各深度レベルで行われており、それらに影響を与えず、かつ地層処分事業への成果の反映を考慮した場合には、深度 300 m より深い場所に位置し、僅かな作業で本試験に供することができる坑道を利用する必要があった。

上記を勘案し、瑞浪超深地層研究所を活用する場合の実施場所は、図 5.1-2 に示す瑞浪超深地層研究所深度 500 m 研究アクセス南坑道から掘削した設備横坑（全長約 10 m）とした。また、瑞浪超深地層研究所深度 500 m 研究アクセス南坑道は、設備横坑奥においても幾つかの調査研究が実施されており、試験終了後には資材搬入などのための通行に支障がないよう、本試験で実施する調査試験用の機材は全て設備横坑内に設置する必要があったため、本計画検討では、埋め戻し領域の長さは設備横坑の奥側最大 6 m とし、残り 4 m で後述する施工後の計測に必要な機材を設置し試験を進めることを前提とした。また、具体的な試験計画の策定にあたっては、周辺岩盤や坑内環境、資機材に関しも考慮する必要があり、それらの条件として以下を挙げている。

- 日本は変動帯に位置し、瑞浪超深地層研究所の深度 500 m においてもヨーロッパ北部の結晶質岩などと比較すると岩盤内の亀裂の発達が著しい。巨視的スケールで見た場合の岩盤の透水係数は高く、既往の透水試験平均は概ね 10^{-8} m/s オーダーである。
- 実施場所とした試験坑道（横坑）の天端および側壁は吹付けコンクリート、床盤はコンクリートが施工されている。
- 試験坑道の周辺は長距離にわたる坑道が施工されており、かつプレグラウトおよびポストグラウトを数度にわたり施工したため、試験坑道の周辺岩盤は初期的な水理条件とは異なることが予想される。
- 周辺岩盤内の水圧は 3.0～4.0 MPa である。ただし、今回の試験で施工する土留め壁は排水を前提としているため、埋め戻し材内部の水圧はこれほど高くはならないと想定している。
- 試験坑道の湧水は、掘削時の壁面観察結果によれば滲出程度、または滴水（0.1 L/min）程度である。
- 地上から地下への資機材の搬入には、換気立坑を用いる。換気立坑における資機材の運搬は、

吊荷重 11.68 t の巻き上げ機を用いるため、この吊荷重を超える資機材の運搬はできない。

・ 換気立坑の最深部にはスカフォードが常設されており、資機材の運搬はこのベルマウス部を通過する。そのため、ベルマウス部の直径（1.90 m）を超える資機材の運搬はできない。

これらの条件も踏まえ、具体的に検討した試験計画を以降に述べる。

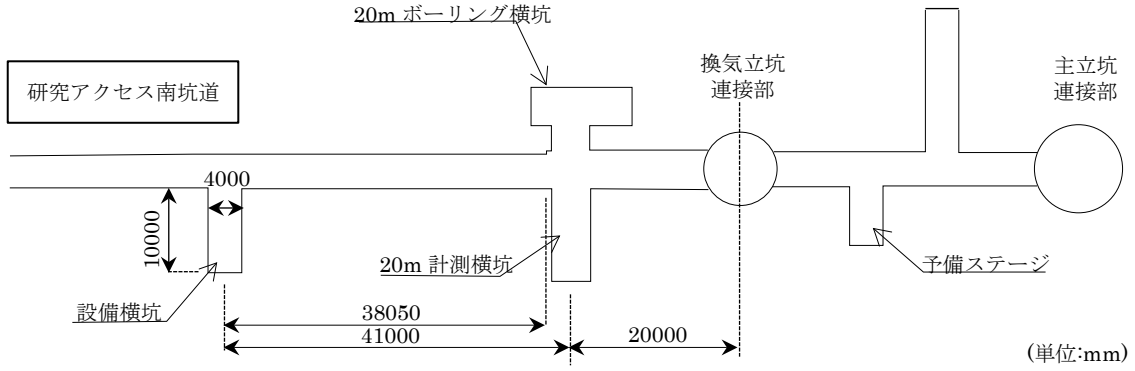


図 5.1-2　瑞浪超深地層研究所内深度 500 m 研究アクセス南坑道のうち設備横坑付近平面図

1)　埋め戻し材の仕様

本計画検討時には、前出の通り、埋め戻し材のベントナイト配合率を、既往の埋め戻し試験と同様 15wt%とした上で、混合した材料に対して、含水比測定、密度測定、粒度測定および締固め試験を実施した。表 5.1-10 に使用した材料を示す。

表 5.1-10　室内予備試験に供した埋め戻し材の構成材料の一覧

名称	構成材料	配合[%]	仕様	備考
ベントナイト混合土	ベントナイト	15	クニゲル V1	クニミネ工業社製
	砂	35	コンクリート用砂	花崗岩を原料
	砕石	50	コンクリート用砕石（2005）	花崗岩を原料

各材料の購入時（混合土は混合後）の基礎物性を表 5.1-11 に示す。なお、含水比と土粒子密度は 3 供試体の平均値を示している。

表 5.1-11　室内予備試験の基礎物性

種類	含水比 [%]	土粒子密度 [Mg/m^3]	粒度							
			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
クニゲル V1	6.5	2.767	0.0	0.0	23.1	76.9	0.075	-	0.00167	-
砂	4.1	2.681	8.4	86.5	3.0	2.1	4.75	0.123	0.859	6.98
砕石	0.4	2.686	100.0	0.0	0.0	0.0	26.5	5.90	11.9	2.02
混合土	2.5	2.690	55.3	29.9	6.2	6.2	26.5	0.00740	7.72	1040

締固め試験は A-c 法で実施した。また、締固めエネルギーの違いによる最適含水比と最大乾燥密度の傾向を取得するため、突固め回数を変化させて 1Ec、0.6Ec、0.4Ec の締固め曲線を取得した。1Ec、0.6Ec、0.4Ec の最適含水比と最大乾燥密度を以下に、締固め方法を表 5.1-12 に、締固め試験結果を図 5.1-3 に示す。

・1Ec　：最適含水比 11.6%、最大乾燥密度 1.933 Mg/m³（締固め曲線からの推定）
・0.6Ec：最適含水比 12.5%、最大乾燥密度 1.855 Mg/m³（締固め曲線からの推定）
・0.4Ec：最適含水比 14.8%、最大乾燥密度 1.799 Mg/m³（締固め曲線からの推定）

表 5.1-12　締固め方法

モールド寸法	内径 10.00cm、高さ 12.73cm
ランマー重量	2.5kg
落下高さ	30cm
突固め層数	3 層
突固め回数	1Ec=25 回/層、0.6Ec=15 回/層、0.4Ec=10 回/層

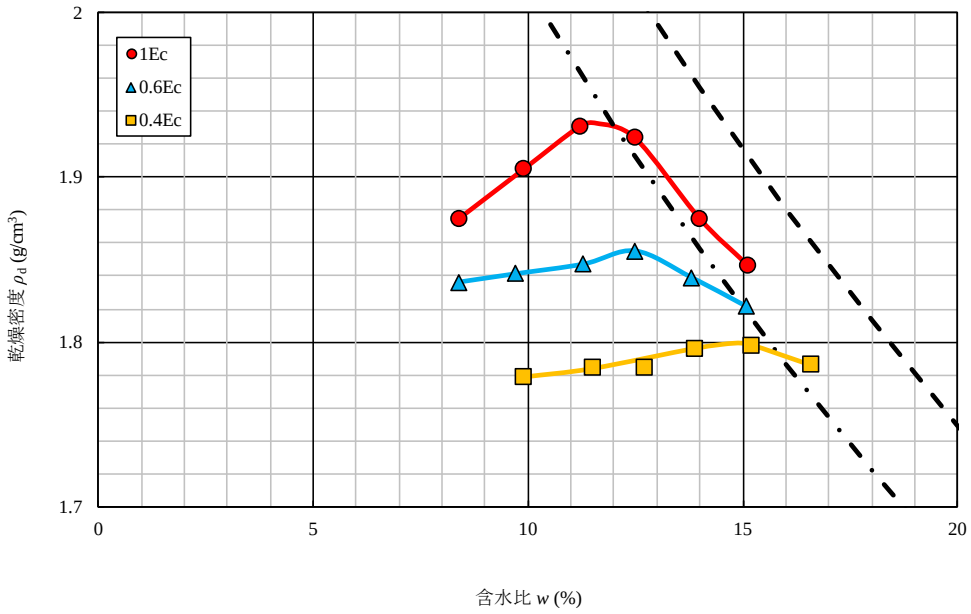


図 5.1-3　計画検討時に実施した室内予備試験における締固め試験結果

含水比測定結果をもとに、ベントナイト混合土の乾燥重量比を計算すると、ベントナイト（クニゲル V1）：砂：砕石=14.4：34.5：51.1 である。また、有効粘土密度を下式（原子力機構、緩衝材基本特性データベース）により算出した結果を以下に示す。

$$\rho_e = \frac{\rho_d(100-R_s)}{\left(100-\frac{\rho_d R_s}{\rho_s}\right)} \qquad \text{式 5.1-1}$$

ここで、ρ_e は有効粘土密度（Mg/m³）、ρ_d は乾燥密度（Mg/m³）、R_s は砂の乾燥質量での混合率、ρ_s は砂の土粒子密度で、R_s と ρ_s は砂と砕石の乾燥重量平均により求めた。

・1Ec　：有効粘土密度 0.727 Mg/m³（最適含水比、最大乾燥密度から算出）
・0.6Ec：有効粘土密度 0.656 Mg/m³（最適含水比、最大乾燥密度から算出）
・0.4Ec：有効粘土密度 0.609 Mg/m³（最適含水比、最大乾燥密度から算出）

図 5.1-3 から、砕石のような粒径幅の広い材料を用いることで、埋め戻し材の最大乾燥密度の増加が見込める結果が得られ、現場施工における締固めエネルギーが 0.4Ec 相当になった場合にも、埋め戻された材料の乾燥密度は 1.78～1.80 Mg/m³、有効粘土密度は 0.6 Mg/m³ 程度を見込めることが示唆された。以上の検討結果を踏まえ、最終的には、計画時の材料仕様は以下のように設定した。

・埋め戻し材の有効粘土密度：0.4 Mg/m³ 以上（海水系地下水を想定した場合にも、透水係数が 1.0×10^{-8} m/s 以下となる有効粘土密度）。ただし、事前に透水特性を確認する。
・ベントナイト混合率　　：15 wt%
・ベントナイト以外の材料　：コンクリート用砂（花崗岩）35 wt%
　　コンクリート用砕石（2005 砕石、花崗岩）50 wt%

上記仕様に対して、計画検討における埋め戻し材は、室内予備試験の結果も踏まえ、乾燥密度 1.8 Mg/m³（有効粘土密度 0.6 Mg/m³）、含水比 13.7 %（0.4Ec と 0.6Ec における最適含水比の平均値を採用）で計画することとした。これに基づき、実施工において必要な埋め戻し材重量を計算すると表 5.1-13 のとおりとなった。

表 5.1-13　埋め戻し材の必要数量

項目	数量	備考
坑道断面積	11.5 m^2	
坑道長（施工区間）	6.0 m	
設計体積	68.9 m^3	
設計重量（乾燥重量）	124.0 t	乾燥密度 1.8 Mg/m^3 として
設計重量（湿潤重量）	141.0 t	含水比 13.7 %として
必要重量	176.3 t	リバウンド率 25 %として

2)　施工方法

前述のとおり、埋め戻し材の施工方法は坑道全断面に渡って吹付け工法とすることとした。吹付け工法には、乾燥した吹付け材料に対してノズル先端付近で加水して吹付ける乾式吹付けと、あらかじめ加水調整した材料を吹付ける湿式吹付けがあるが、今回の坑道一部埋め戻し試験では埋め戻し材の含水比が品質確認上の重要な指標となるため、あらかじめ材料を混錬し含水比調整した材料を吹付け機に投入する湿式吹付けを採用することとした。

3)　施工機械・使用設備

吹付け機は、その吐出能力が吹付け施工時の締固めエネルギーに直接影響するため、より吐出能力の高い機械が望まれる。しかし、深度 500 m の設備横坑の使用を前提としているため、資機材の搬入は換気立坑ベルマウス部を通じて行うことから、直径 1.9 m を超えるサイズのものが搬入できない。また、吹付け機ホッパーの投入口が地上から 2 m を超えるものも、研究坑道の大きさの制約から使用が困難である。

表 5.1-14 に、地下坑道での施工あるいは地下空洞型処分施設施工試験における実績で示されている、吹付け機の例とその仕様を示す。なお、上述の通り換気立坑ベルマウス部の空間的制約（直径 1.9 m）から、表 5.1-14 の 3 機種の例のうち S4C-1T は搬入が困難であると判断できる。これ以外に吹付けに必要な機材としてコンプレッサも同様に検討した。

表 5.1-14　吹付け機の仕様例

	ニードガン 2000	Aliva-267	S4C-1T
メーカー	AGC プライブリコ	Sika	三和産業
必要電力	220V　7.5kW	380-480V　10kW	原動機、11kW
ノズル径（mm）	63.5	65	詳細不明
最大骨材粒径（mm）	15	20	詳細不明
所要空気圧（MPa）	0.74	0.7	0.88
吐出量（m^3/h）	20	16.0	最小で 10
寸法 W×D×H（mm）	990×1,845×1,175	935×2,110×1,330	1,500×3,400×2,850
重量（kg）	1,200	1,500	2,400
備考	地下空洞型処分施設施工試験、上部緩衝材隅角部の吹付け施工で使用実績ただし用いた材料の配合、粒径は異なる。	一般の水平坑道における吹付けに多数の使用実績	地下空洞型処分施設施工試験、上部埋め戻し材の吹付け施工で改良機の使用実績

4)　施工手順

本試験施工では、埋め戻された領域における様々な計測を行うことから、それらの計測機器の設置も考慮し、施工を 12 のステップに分けて実施する計画とした。各ステップでは施工後の品質確認を目的とした計測機器を設置するほか、施工中の品質確認方法の確立を目的とした計測もおこなう。また、ステップ 9 では土留め壁を設け、埋め戻し材の流出を押しとどめる。各ステップの模式図を図 5.1-4 に示す。

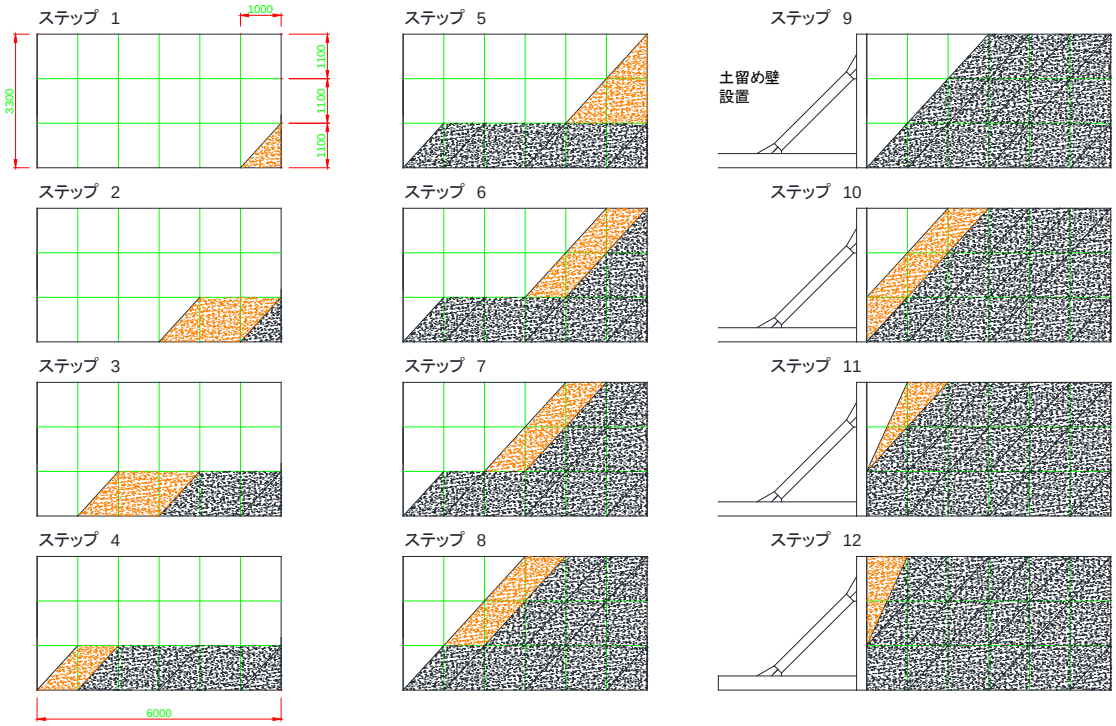


図 5.1-4　施工ステップ

5)　施工した埋め戻し材の品質確認手法

瑞浪超深地層研究所の深度 500 m 冠水坑道でおこなわれたボーリングピット埋め戻し試験に

おいては、砂置換法による現場密度測定試験によって施工中の品質確認をおこなっている。余裕深度処分のための地下空洞型処分施設施工試験における上部埋め戻し材施工確認試験においては、シンウォールサンプラーを用いたサンプリングによる含水比測定、湿潤密度測定に加えて、吹付け前後に 3D スキャナ測定あるいは写真測量によって 3 次元データを取得し、差分による吹付け厚の測定をおこなっている。また、SKB による Prototype Repository では、密度計測の項目として試料採取と RI 計器を用いた密度試験を挙げている。

今回の坑道一部埋め戻し試験においては、吹付け施工を適用する場合の品質管理手法の確立を目的として、表 5.1-15 および表 5.1-16 に挙げる 3 点を施工中の計測項目として計画した。盛土などにおける密度管理として一般的に実施される砂置換法は、吹付けによる施工という点から水平面を確保することが難しいため、今回の試験における実施項目の候補から除外した。RI 測定および試料採取による各種計測の計画を図 5.1-5 および図 5.1-6 に示す。計測位置は、互いの結果のクロスチェックを行いつつ、埋め戻し領域内の 3 次元的な密度分布などを把握できるよう配慮した。

表 5.1-15　施工中の品質確認に係る計測

計測方法	測定内容
3D スキャナによる 3 次元計測	・出来形測定 ・乾燥密度の計算
RI 密度試験	・密度測定 ・水分量測定
試料採取	・含水比測定 ・密度測定（パラフィン法）

表 5.1-16　施工中の品質確認として実施する計測（計測機器、計測頻度、計測位置）

計測方法	使用機器	計測頻度	計測位置
3D スキャナによる 3 次元計測	3D スキャナ	試験開始前および ステップごと	土留め壁設置位置付近に スキャナ設置
RI 密度試験	RI 計器	ステップごと	図 5.1-5 参照
試料採取	サンプラー	ステップごと	図 5.1-6 参照

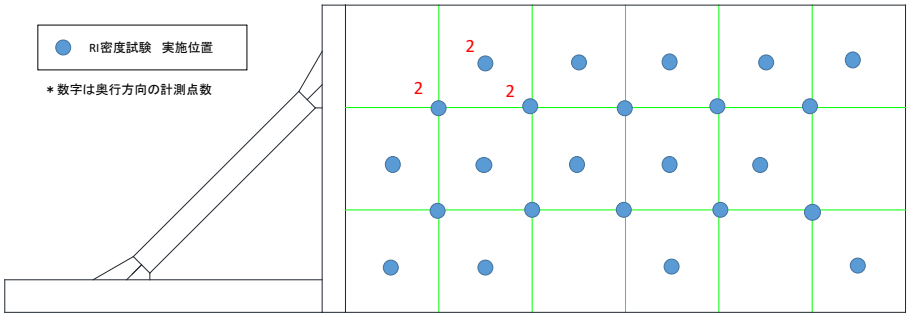
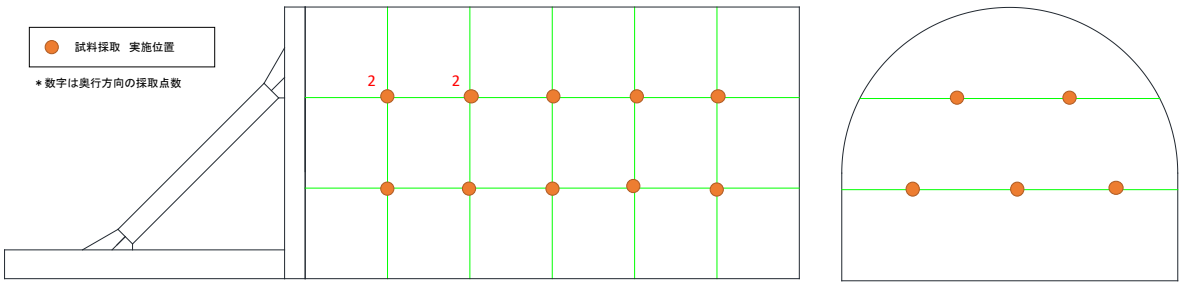


図 5.1-5　RI 密度試験の実施位置



注）　左：側面位置図、右：断面位置図

図 5.1-6　試料採取の実施位置

6)　土留め壁の検討

土留め壁背面に水圧がかかるようにした場合、付近の水圧モニタリングなどの結果から、試験対象領域付近では最大 3.5 MPa 程度の水圧が作用する可能性があり、その荷重までを合理的に支えるためには、同深度レベルで実施している再冠水試験のために構築した止水壁のような構造物が必要となる。2 ヵ年程度の試験期間でそのような構造物の構築を含んだ計画は現実的ではないことから、本計画における土留め壁は、埋め戻し材の密度保持を目的に設置することとし、土留め壁からの排水を許容し水圧は作用させないことを前提として設計した。

それぞれの荷重値設定の根拠などの詳細は割愛するが、ここでは実際埋め戻された状態を目視で観察できるようにした事例が非常に少ないことから、地層処分に関する理解情勢の観点で、スルーフォーム（図 5.1-7）と呼ばれるコンクリート打設時の型枠として用いられる半透明素材を土留め壁の材料として採用する計画とした。

図 5.1-7　スルーフォーム

7)　埋め戻し材の施工後品質の検討

施工後の調査試験に関しても、前述した国内外で実施された既往の試験事例などの調査結果を参考に、表 5.1-17 に示すデータを定常的に取得し、品質保証に対するモニタリングの有用性についても検討することとした。

さらに、埋め戻し試験領域に作用する動水勾配は、現状最も大きくなっていると推測されることと、実際の地層処分の事業においても坑道の埋め戻し後は完全に処分場が閉塞されるまで埋め戻し試験と同様の状況が継続することを考慮し、本試験で用いる埋め戻し材中のベントナイト流出量の計測も計画に加えた。

表 5.1-17　埋め戻し材の施工後品質確認項目、品質確認手法およびセンサー設置個数

項目	計測法	計測時期 施工後 （計測期間） 約 2 年間	センサー 設置個数	計測の目的
水圧	水圧計	○	15	・浸潤に伴う水圧変化の把握
土圧	土圧計	○	14	・浸潤に伴う膨潤圧変化の把握
水分	水分計	○	25	・浸潤過程の把握 ・埋め戻し材の品質確認
埋め戻し材 流出量	流量	○	1	・埋め戻し材の品質確認
	吸光度	○	1	・埋め戻し材の品質確認

モニタリング用センサーの設置位置については、以下の事項を考慮した。

- 試験坑道内へは、地下水は主に坑道の天端、側壁および切羽面から浸入すると考えられる。このため、埋め戻し材の周縁部から中心部に向かって、地下水による埋め戻し材の浸潤が進行する。浸潤した箇所から埋め戻し材の膨潤が開始し、膨潤も埋め戻し材の周縁部から中心部に向かって進行すると想定する。
- 一方、試験坑道内へ流入する地下水は、壁面の吹付けコンクリートと埋め戻し材の境界あるいは埋め戻し材内を通過し、重力により試験坑道の床盤に集まる傾向も持つと考えられる。この場合、試験坑道内の上部では不飽和かつ下部では飽和の傾向となり、鉛直方向の水分分布の差異が発生する可能性がある。

上記の現象の進行過程を経時的に把握するため、センサー配置は下記の考え方に基づき計画した。

- 浸潤過程を観測するため、水分計は埋め戻し材内の平面上に設置する。鉛直方向で水分分布差異が発生する可能性を考え、設置平面は試験坑道内の上下 2 面とする。
- 埋め戻し材の膨潤過程と膨潤圧を観測するため、土圧計を天端、側壁、床盤に設置する。
- 浸潤に伴う水圧の上昇と、土圧の結果と合わせて埋め戻し材の膨潤圧を算出するため、水圧計を土圧計に近接するよう設置する。また、埋め戻し材内の中心部にも設置する。
- 土留め壁外側の坑道脇の側溝に流量計および採水装置を設置し、湧水量の計測および埋め戻し材の流出量計測を行う。

図 5.1-8 に上記の考え方に基づく土圧計・水圧計・水分計の設置位置の例を示す。

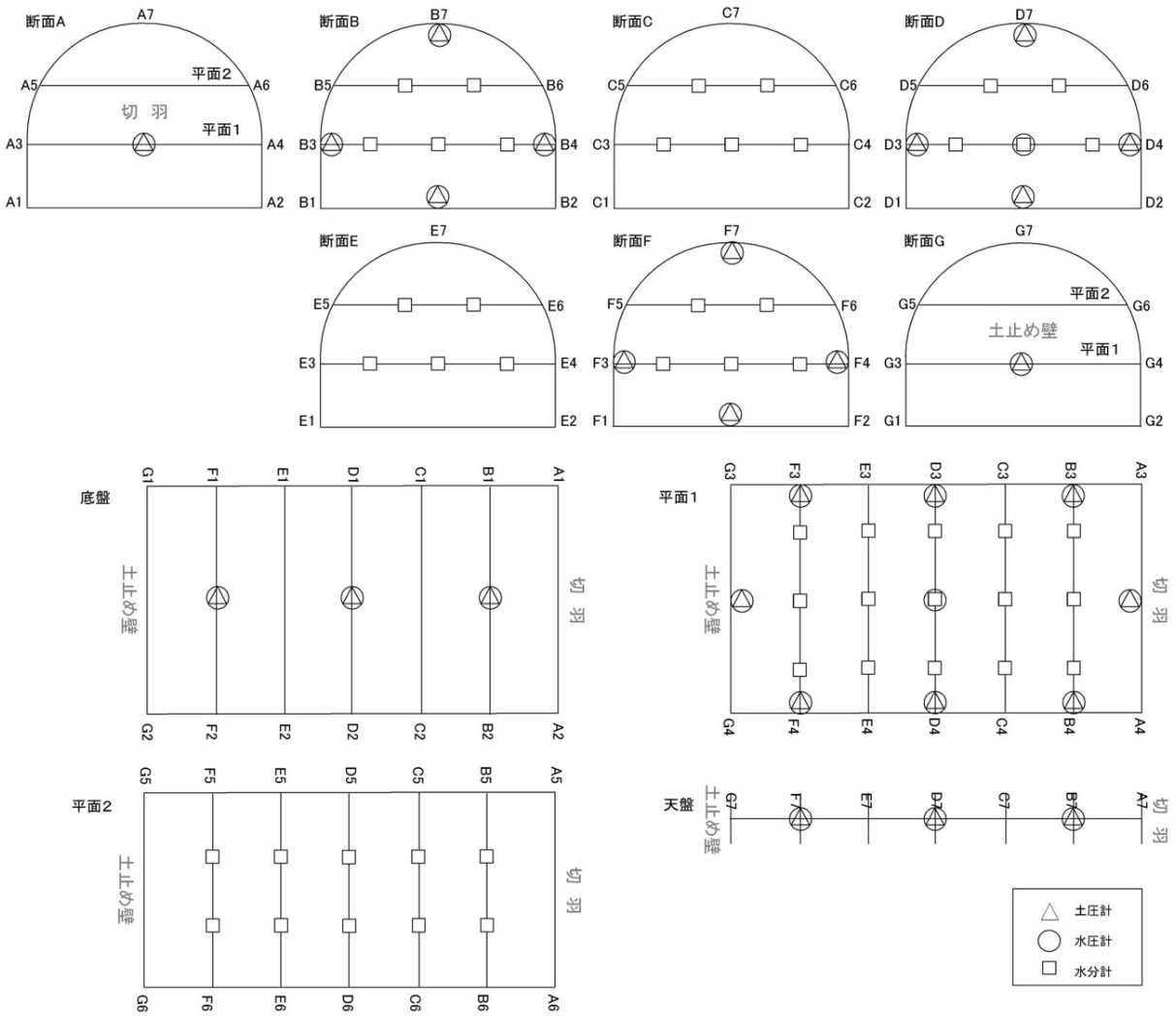


図 5.1-8　水圧計・土圧計・水分計の設置位置例

なお、具体的なモニタリング用計測機器の選定は、試験対象領域の地質環境条件や実際の施工で想定される状況を考慮し、以下の点に留意することとした。

- 試験坑道の周辺岩盤内における地下水圧を考慮し、それに対して耐圧性能を持った機器を選定する。
- 水圧計の計測対象は、試験坑道内の飽和に伴い発生する水圧であり、計測結果がベントナイトの膨潤圧と混同してはならない。このため、センサー受感部への埋め戻し材の接触を避ける必要があり、先端に多孔質フィルタを備え受感部への固体の接触を防ぐ間隙水圧計を用いる。
- 計測される土圧と水圧の差が 10^{-2} MPa オーダーの僅差となる可能性があるため、本試験では間隙水圧計・土圧計ともに高い計測精度をもつ製品を選定する。
- 水分計は、センサーの構成材質・内部構造・ケーブル接続部分の構造などの堅牢性に着目し、選定する。また、選定した水分センサーを実際に試験坑道に設置する前に、可能な限り吹付け強度相当への耐衝撃性能、ならびに 4 MPa 程度の耐圧性能を確認する。

埋め戻し材からのベントナイトの流出量測定は、試験を行う設備横坑埋め戻し領域からの排水流量と排水中のベントナイト濃度を計測する計画とした。排水流量・ベントナイト濃度計測の概要を図 5.1-9 に、図 5.1-10 に水位計と採水装置および側溝の位置のイメージを示す。

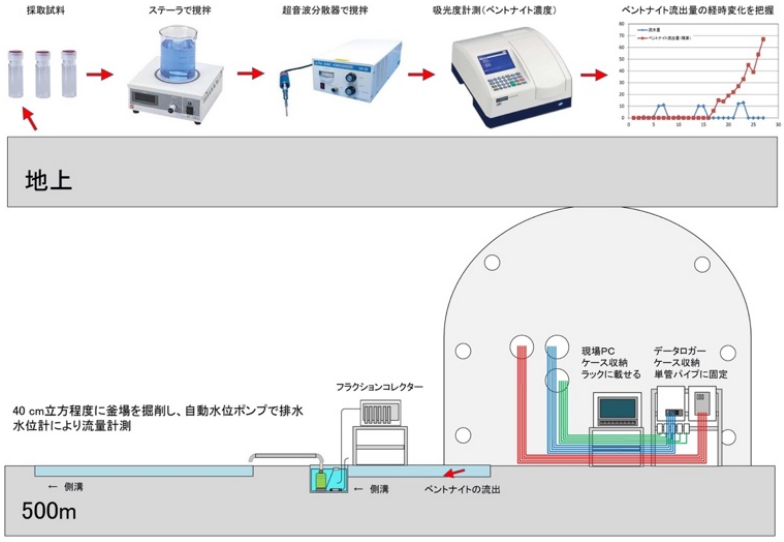


図 5.1-9　試験坑道の排水流量、ベントナイト濃度計測の概要

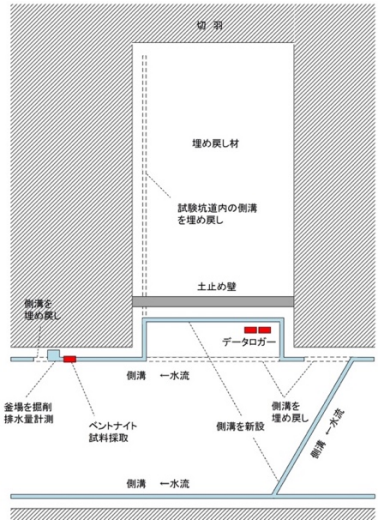


図 5.1-10　水位計と採水装置および側溝の位置のイメージ（埋め戻し材流出量計測）

8)　試験実施工程

これまでに述べた吹付け施工試験の実施内容に基づき、試験実施に要する日数を、下記の仮定を元に検討した（表 5.1-18）。

- 坑道内での一日の作業時間は、地下 500 m までの移動や準備を考慮し、6 時間とする。
- 地下空洞型処分施設施工試験における吹付け施工試験実績では、毎時約 2.0 t（平成 25 年は毎時 1.909 t、平成 26 年度は毎時 2.280 t）であったことから、吹付け速度は毎時 1.5 t を仮定する。
- ステップ毎のサイクルタイムは、モニタリング用センサー設置などの品質管理計測も考慮する。
- 土留め壁設置には 2 日を仮定する。
- 計測工における計測機器の設置および養生は、1 日につき 2.5 個を仮定する。

表 5.1-18　吹付け工１ステップにおけるサイクルタイムの推定

	項目	単位当たりの作業時間(min)	数量	単位	作業時間(min)	備考
吹付け工	（１ステップ）					
	埋め戻し材投入	10.0	26	袋	260.0	フレコンバック1袋につき0.5t
	吹付け	40.0	12.8	t	512.7	数量は施工量の全体(t)/11(ステップ) 吹付け速度は1.5t/hourとして計算
	リバウンド除去	20.0	1	個	20.0	
	RI密度試験	5.0	9	点	45.0	ステップごとの実施数の最大値
	試料採取	10.0	6	点	60.0	ステップごとの実施数の最大値
	3Dスキャナー計測	20.0	1	回	20.0	
				計(min)	917.7	
				計(hour)	15.3	
				計(day)	3.0	実作業時間を６時間とする。

ここで、吹付け速度は吹付け作業のみの速度であり、施工速度は材料を供給機に投入してから吹き終わるまでの時間（ホースが閉塞した際の処理時間などを含む）をもとにした速度を示す。この施工サイクルに基づき､計画時に設定した研究坑道における全断面吹付け施工試験の工程は、実働日数を各ステップ 3 日、モニタリング用センサーの設置などの日数を 2 日として、11 ステップの繰り返し作業とした。この結果、現場における実働日数は、約 65 日（土日含まず）必要と考えられた。

5.1.2　小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験

前節で示した計画検討の成果を踏まえ、平成 30 年度に瑞浪超深地層研究所の研究坑道を活用した吹付けによる埋め戻し材の施工試験を実施した。本施工試験の目的は、我が国の結晶質岩を対象とした埋め戻し技術オプションの整備の一環として、原子力機構殿の超深地層研究所研究坑道の一部を利用し、全断面吹付け施工の適用性などを実証的に検討することである。また、施工試験では、材料選定のための室内試験、実際の施工性などの確認を主目的とする地上での予備試験、研究坑道における吹付けによる施工試験を実施した。以下に得られた結果の概要を述べる。

(1) 実施場所

実施場所は、前節で示したように本施工試験の目的を最も合理的・効率的に達成しうる場所として、瑞浪超深地層研究所の深度 500 m に位置する設備横坑とした（図 5.1-11)。

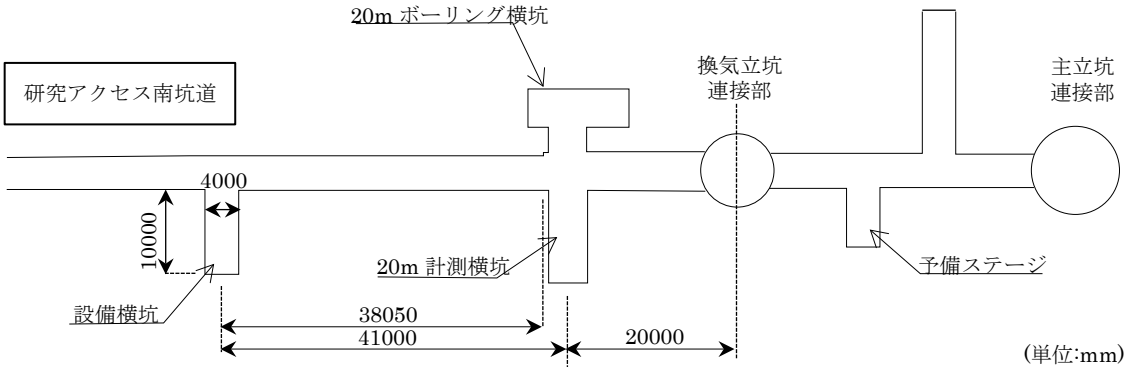


図 5.1-11　瑞浪超深地層研究所内深度 500 m 研究アクセス南坑道のうち設備横坑付近平面図（再掲）

(2) 施工試験の全体計画と実績

図 5.1-12 に施工試験開始時に設定した全体計画と実績（赤線）を示す。前節で示した計画検討では、設備横坑の奥側 6 m を埋め戻し領域とすることを条件としていたが、本事業の契約が平成 30 年 6 月であり、それ以降に施工試験の契約業務に数ヶ月を要する見込みとなったこと、前節で検討した計画では 6 m の施工試験の実施には実働 65 日程度（土日含まず）を要すると想定され、これまで瑞浪超深地層研究所では事例のない施工試験であることによる作業工程の不確実性も考慮した場合、前節の計画をそのまま実施して受託研究の契約納期（平成 31 年 3 月 31 日）までに施工試験を終了し所期の成果を上げることが困難と判断し、埋め戻し領域の長さを 4 m に短縮し実施することとした。

また、実際の作業開始は平成 30 年 10 月 18 日となり、工期が非常に厳しくなったことから、地上での予備試験と室内試験は、必要な情報を現場の施工計画に反映しつつ、現場施工試験の工程を可能な限り確保する観点で、両者並行して進めることで全体工程を最短化し試験を実施した。

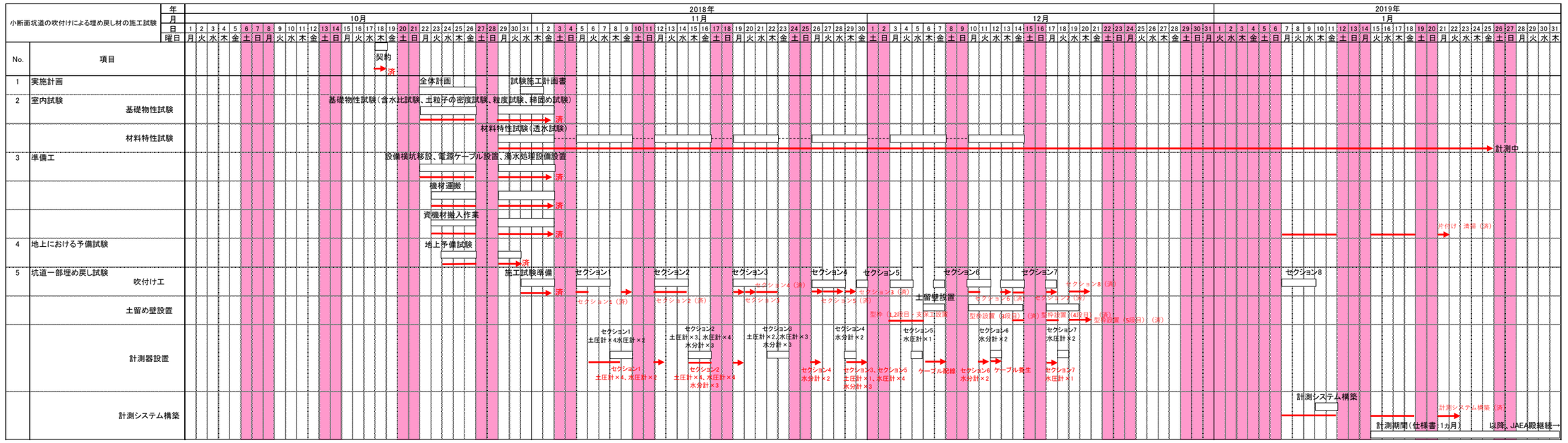


図 5.1-12　坑道一部埋め戻し試験の全体計画と実績（赤線）

(3) 施工試験の条件設定

前節で述べた計画検討の成果を踏まえ、以下の条件は先に述べた計画と同一とした。

1) 埋め戻し材の仕様

埋め戻し材の仕様は、NUMO が示す候補母岩（深成岩）の透水係数を参照し、透水係数 1.0×10^{-8} m/s 以下の「低透水性」を満足することとし、埋め戻し材の配合は、「第 2 次取りまとめ」（核燃料サイクル開発機構、1999）を参考にベントナイト混合率 15 wt%を設定した。

2) 埋め戻し材の施工方法

埋め戻し材の施工は、全段面を吹付け施工で行う。

3) 品質管理項目・品質確認手法

本試験では、表 5.1-19 に示した計測を行い、品質確認を実施することとした。具体的には、施工中は埋め戻し材の品質確認として試料採取による含水比試験と湿潤密度試験をおこなう。また、施行中・施工後に浸潤過程や浸潤に伴う膨潤圧、水圧を計測するため土圧計、水圧計、水分土壌計を用いたモニタリングをおこなうとともに、埋め戻し材からのベントナイトの流出を計測し、品質（低透水性）への影響を調査することとした。

なお、計画時に検討した RI 密度計測については、正確な値を得るための校正作業や吹付け面の平滑化が必要であることから、工期的な制約条件が厳しい本施工試験では実施しないこととした。

表 5.1-19　坑道一部埋め戻し試験における品質確認項目および品質確認手法

項目	計測法	設置個数	計測時期		計測の目的
			施工中	施工後（計測期間）約 2 年間	
水圧	水圧計	12 個	－	○	・浸潤に伴う水圧変化の把握
土圧	土圧計	10 個	－	○	・浸潤に伴う膨潤圧変化の把握
水分	水分計	10 個	－	○	・浸潤過程の把握
密度・含水比	試料採取	40 箇所※	○	－	・埋め戻し材の品質確認
埋め戻し材流出量	流量	1 箇所	－	○	・埋め戻し材の品質確認
	吸光度	1 箇所	－	○	

※ここでは当初設定した数量を記載。実際は、試料採取と測定は現地の状況に合わせて増加させている。

(4) 室内試験

使用材料の違いによる締固め特性を確認するため、ベントナイト、砂、砕石による埋め戻し材 A とベントナイト、砂による埋め戻し材 B を使用した室内試験を実施した。ベントナイト混合率はどちらも 15 wt%とした。使用材料に関する情報を表 5.1-20、図 5.1-13 に示す。

表 5.1-20　使用材料一覧

名称	構成材料	配合(wt%)※1	仕様	備考
埋め戻し材 A	ベントナイト A	15	クニゲル V1	クニミネ工業（株）
	砂 A※2	35	コンクリート用砂	花崗岩を原料
	砕石※2	50	コンクリート用砕石（2005）	花崗岩を原料
埋め戻し材 B	ベントナイト B	15	クニゲル V1	クニミネ工業（株）
	砂 B※3	85	コンクリート用砂	洗い砂

※1　埋め戻し材 A は湿潤重量比、埋め戻し材 B は乾燥重量比とした
※2　奈良県吉野郡産、※3　宮城県黒川郡産

コンクリート用砂　　コンクリート用砕石　　クニゲル V1

図 5.1-13　使用材料の様子

表 5.1-21 に各試料の含水比試験（JIS A 1203）、土粒子の密度試験（JIS A 1202）、粒度試験（JIS A 1204）の結果を、図 5.1-14 に粒径加積曲線を示す。ベントナイト A とベントナイト B はともにクニゲル V1 であるが、粒度特性が若干異なっており、ロットの違いの影響と考えられる。埋め戻し材 A は砕石を加えたことにより、粒度分布が均一化されるという特徴がみられる。

また、ベントナイトとそれ以外の材料の粒径分布は 0.1 mm を境とすることが確認され、試料採取時にも粒径分布の測定を行うことで、埋め戻し材中のベントナイト含有量を間接的に推定できる可能性があることも示唆された。

表 5.1-21　各材料の含水比試験、土粒子の密度試験、粒度試験の結果

種類	含水比 (%)	土粒子密度 (Mg/m^3)	粒度※ 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 A	6.5	2.767	0.0	0.0	23.1	76.9	0.075	-	0.00167	-
砂 A	4.1	2.681	8.4	86.5	3.0	2.1	4.75	0.123	0.859	6.98
砕石	0.4	2.686	100.0	0.0	0.0	0.0	26.5	5.90	11.9	2.02
埋め戻し材 A	2.5	2.690	55.3	29.9	6.2	6.2	26.5	0.00740	7.72	1040
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

※　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

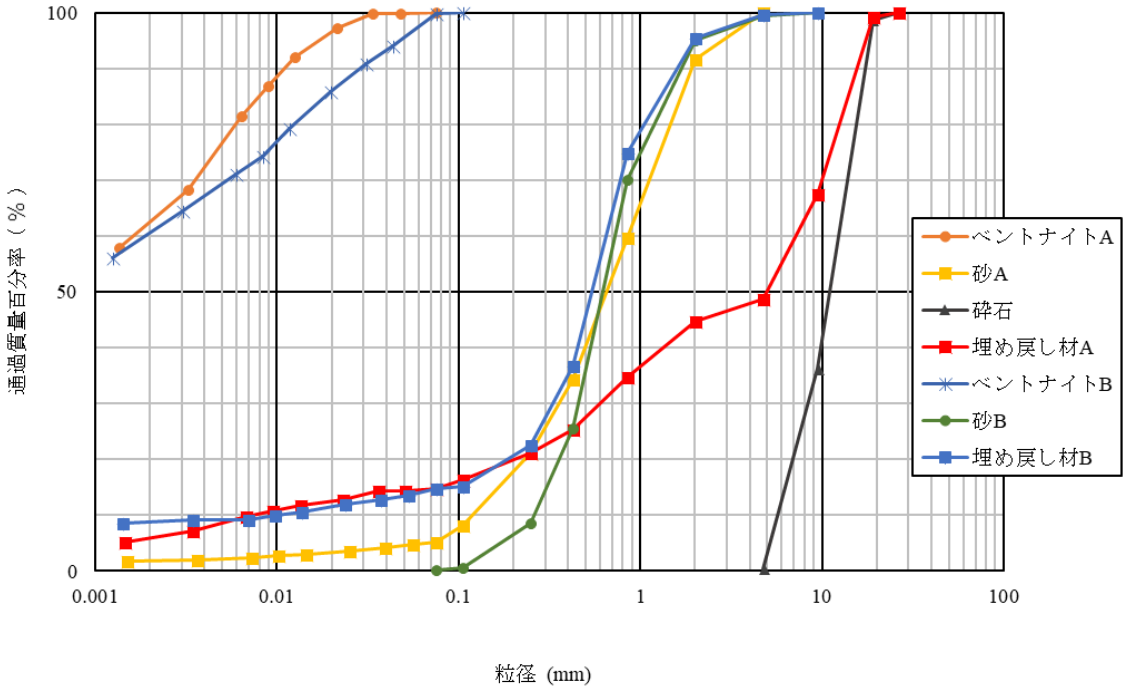


図 5.1-14　各材料の粒径加積曲線

表 5.1-22 に示す締固め試験では、締固めエネルギーの違いによる最適含水比と最大乾燥密度の傾向を取得するため、突固め回数を変化させることで 1Ec、0.6Ec、0.4Ec における締固め曲線を取得した。図 5.1-15 に埋め戻し材 A、埋め戻し材 B の締固め曲線を示す。埋め戻し材 A は、砕石を含むことにより、埋め戻し材 B と比較して締固め易い材料であることがわかる。

表 5.1-22　締固め条件

試験方法	A-c 法
モールド寸法	内径 10.00 cm、高さ 12.73 cm
ランマー重量	2.5 kg
落下高さ	30 cm
突固め層数	3 層
突固め回数	1Ec = 25 回／層、0.6Ec = 15 回／層、0.4Ec = 10 回／層

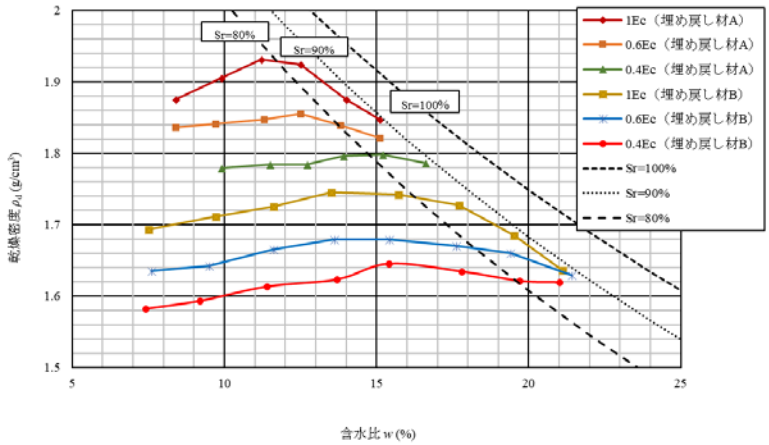


図 5.1-15　埋め戻し材 A、埋め戻し材 B の締固め曲線

表 5.1-23 に締固め試験で得られた埋め戻し材Aと埋め戻し材Bの最大乾燥密度､最適含水比、有効粘土密度を示す。有効粘土密度は前出の式 5.1-1 により算出した。ここで、式 5.1-1 中の ρ_e は有効粘土密度（Mg/m³）、ρ_d は乾燥密度（Mg/m³）、R_s は砂の乾燥質量での混合率、ρ_s は砂の土粒子密度である。R_s と ρ_s は砂と砕石の乾燥重量平均により算出した。この結果から、締固めエネルギーが 0.4Ec の場合においても有効粘土密度は、埋め戻し材 A で 0.609 Mg/m³、埋め戻し材 B で 0.519 Mg/m³ であり、計画検討時に設定した 0.4 Mg/m³ を上回っていることから、本施工試験における埋め戻し材の仕様を満足していることが確認した。

なお、既往の研究（原環センター、2015）における吹付け工法の施工実績では、締固め試験によって得られた最大乾燥密度約 1.81 Mg/m³ に対して、現場施工時の締固め度の平均値は 94 %程度であったことが確認されている。したがって、吹付け工法で施工した場合、吹付け後の密度は室内での締固め試験によって得られる最大乾燥密度より低くなることが想定された。

表 5.1-23　埋め戻し材 A と埋め戻し材 B の最大乾燥密度、最適含水比、有効粘土密度

試験条件	埋め戻し材 A			埋め戻し材 B		
	1Ec	0.6Ec	0.4Ec	1Ec	0.6Ec	0.4Ec
最大乾燥密度 (Mg/m³)	1.933	1.855	1.799	1.747	1.681	1.648
最適含水比 (%)	11.6	12.5	14.8	14.2	14.5	15.9
有効粘土密度 (Mg/m³)	0.727	0.656	0.609	0.589	0.542	0.519

また、後述する地上での予備試験の結果として、最終的には、埋め戻し材 B を今回の施工試験で用いることとしたため、その材料が所定の低透水性を確保できていることを確認するための透水試験も実施した。透水試験用供試体の諸物性を表 5.1-24 に、作成方法を表 5.1-25 に、透水試験装置と試験状況を図 5.1-16 に示す。

供試体は炭酸ガスを注入しながら作製し、下部から上部に向かって通水した。試験用水はイオン交換水を使用した。図 5.1-17 に透水係数と経過時間の関係を示す。計測時点での推定飽和度は 81.2 %であった期間を考慮して不飽和の状態で試験は終了した。

表 5.1-26 に透水試験の結果を示す。透水係数は 4.2×10^{-11} m/s となり、図 5.1-1 に示される降水系地下水における本試験相当の有効粘土密度の結果と比較すると少し高い値を示しているが、供試体は不飽和（Sr＝83 %）であり、供試体上部からの通水も確認されていないことから、飽和度が 100 %に至る過程で透水係数も既往の研究と同程度まで低下すると考えられる。

表 5.1-24　透水試験用供試体の諸物性

ベントナイトの土粒子の密度(Mg/m³)	2.759
砂の土粒子の密度(Mg/m³)　[ρ_s]	2.674
埋め戻し材 B の乾燥密度(Mg/m³)　[ρ_d]	1.681
砂の乾燥質量での混合率(wt%)　[R_s]	85
有効粘土密度（Mg/m³）　[ρ_e]	0.542

表 5.1-25　透水試験の供試体作製方法

モールド寸法	内径 10.00 cm、高さ 12.73 cm
ランマー質量	2.5 kg
落下高さ	30 cm
突固め層数	3 層
突固め回数	0.6Ec = 15 回/層
通水方向	下→上

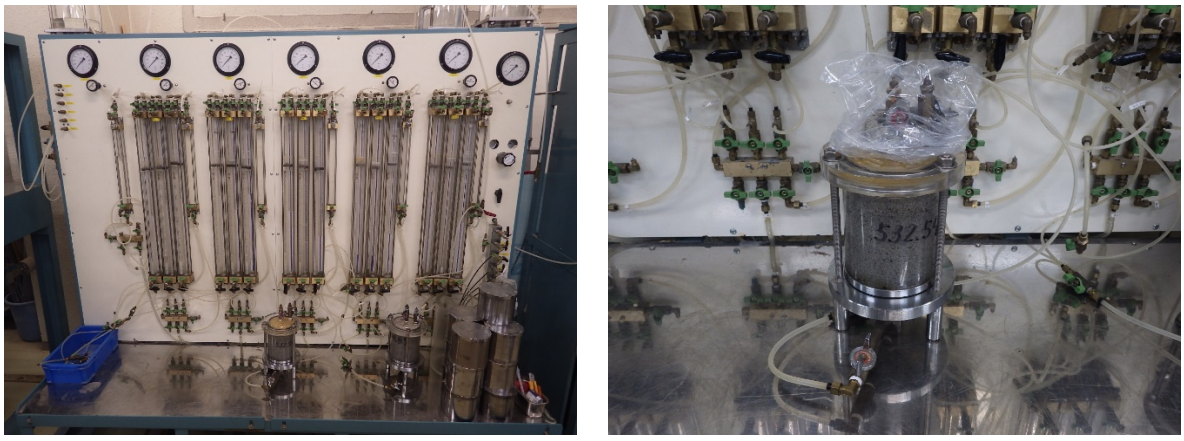


図 5.1-16　透水試験の状況

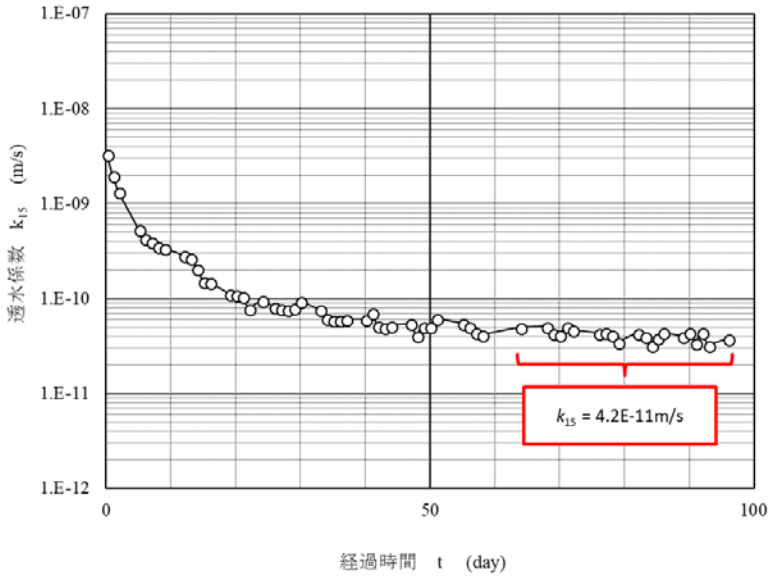


図 5.1-17　透水係数と経過時間の関係

表 5.1-26　透水試験の結果

	埋め戻し材 B
含水比（上部）(%)	15.7
含水比（下部）(%)	20.8
飽和度(%)	83.0
透水係数 K_{15}(m/s)	4.2×10^{-11}※

※ 63.9～95.9 day の値から透水係数を求めた

(5) 地上における予備試験

地上における予備試験は、(4)において示した埋め戻し材料が、研究坑道内の実際の吹付け施工試験に適用可能かどうかの検討を行うことと（地上における予備試験（その１））、最終的に使用する埋め戻し材を用いる場合の吹付け施工時のパラメータ設定を行うこと（地上における予備試験（その２））を主目的として実施した。以下にそれぞれの結果について述べる。

1) 地上における予備試験（その１）

締め固め試験で良好な結果が得られた埋め戻し材 A について、計画検討結果も参考に、実際の吹付け施工を想定した実機を用いた予備試験を実施した。表 5.1-27、表 5.1-28 および図 5.1-18 に使用材料と使用機械を示す。

表 5.1-27　地上における予備試験（その１）に供した埋め戻し材の構成材料の一覧

名称	構成材料	配合※ (wt%)	仕様	備考	含水比
埋め戻し材	ベントナイト	15	クニゲル V1	クニミネ工業（株）	13.7±2%
	砂	35	コンクリート用砂	花崗岩を原料（奈良県吉野郡産）	
	砕石	50	コンクリート用砕石（2005）	花崗岩を原料（奈良県吉野郡産）	

※予備試験（その１）では湿潤重量比とした。

表 5.1-28　地上における予備試験（その１）　使用機械一覧

品名	数量	仕様・容量
吹付けロボット	1 台	
吹付け機（アリバ 285）	1 台	
フォークリフト	1 台	
電動モータ式コンプレッサ	2 台	13.9 m^3/min
レシーバータンク※	1 台	2.0 m^3

図 5.1-18　吹付けロボット、吹付け機（アリバ 285）、コンプレッサの様子

本予備試験は、「中空の円筒容器」（内寸法：φ2,260 mm，L=1,825 mm）を横倒しにして吹付けに使用した。なお、事前に円筒容器の下側（容器直径の約 1/4）は埋め戻し材にて埋め戻し平滑に整形した後、吹付けをおこなっている。図 5.1-19 に吹付け試験状況を示す。

吹付け前の品質確認として含水比測定をおこなった。表 5.1-29 に吹付け前の含水比測定の結果を示す。埋め戻し材は 1 袋あたり約 500 kg に袋詰めしており、三つの袋（A、B、C）に対し各 3 点の含水比試料を採取した。結果を表に示すが、含水比は 14±1 %の範囲内で調整ができて

いることを確認し、本埋め戻し材を使用して地上における予備試験（その１）を実施した。

表 5.1-30 に示す吹付け後の埋め戻し材の含水比と乾燥密度を、前述の計画策定時に実施した室内予備試験の締固め試験結果に重ねて表示すると図 5.1-20 のようになる。なお、密度測定はパラフィン法を用いた。吹付け後の埋め戻し材は、概ね室内締固め試験結果の 0.4Ec の曲線上に位置し、計画検討時の想定とほぼ一致した。また、吹付け後の埋め戻し材の密度測定結果を式 5.1-1 により有効粘土密度に換算すると、0.571～0.611 Mg/m³ となり、吹付け後の埋め戻し材についても 0.4Mg/m³ を上回っていることを確認した。

ここで、式 5.1-1 中の ρ_e は有効粘土密度（Mg/m³）、ρ_d は乾燥密度（Mg/m³）、R_s は砂の乾燥質量での混合率（85.882%）、ρ_s は砂の土粒子密度（2.684 Mg/m³）で、R_s と ρ_s は砂と砕石の乾燥重量平均により求めた。

図 5.1-19　地上における予備試験（その１）吹付け試験状況

表 5.1-29　地上における予備試験（その１）吹付け前の含水比測定結果

試料名	容器 No.	含水比 W (%)	ave. w (%)
A-13.7-A※	b-1	13.472	13.78
	b-2	14.553	
	b-3	13.321	
A-13.7-B※	b-4	13.134	13.48
	b-5	14.226	
	b-6	13.088	
A-13.7-C※	c-1	13.598	13.42
	c-2	13.388	
	c-3	13.263	

※試料名は、吹付け機（A：アリバ）、設定含水比（13.7 %）、袋名称（A、B、C）の順で記載

表 5.1-30　地上における予備試験（その１）吹付け後の埋め戻し材品質

		供試体質量	パラフィン塗布後質量	水中吊皿質量	水中供試体+吊皿質量	水温	水温Tにおける水の密度	パラフィンの密度	体積	湿潤密度	湿潤密度平均	容器+試料重量(湿潤)	容器+試料重量(乾燥)	容器重量	含水比	含水比平均	乾燥密度	乾燥密度平均	有効粘土密度換算
試料番号	No.	m	m1	m2	m3	T	ρw	ρp	V	ρt	ρt avr.	ma	mb	mc	w	avr. w	ρd	ρd avr.	ρe
		g	g	g	g	℃	g/cm3	g/cm3	cm3	g/cm3	g/cm3	g	g	g			g/cm3	g/cm3	Mg/m3
A-13.7-A	1	149.54	182.95	58.43	126.83	13	0.9994	0.93	78.69	1.9003	1.975	185.43	173.83	76.97	11.98%	12.03%	1.6963	1.763	0.571
	2	360.17	385.82	58.31	241.71	21	0.9980	0.93	175.25	2.0552		199.08	185.26	77.17	12.79%		1.8346		
	3	305.23	327.08	59.18	208.21	21	0.9980	0.93	154.91	1.9703		192.66	181.36	81.51	11.32%		1.7588		
A-13.7-B	1	333.77	364.17	57.07	224.29	13	0.9994	0.93	164.38	2.0305	2.025	251.73	229.87	81.66	14.75%	13.31%	1.7920	1.787	0.589
	2	347.38	379.61	58.61	233.26	13	0.9994	0.93	170.43	2.0383		227.26	211.88	81.66	11.81%		1.7989		
	3	242.13	265.55	58.62	178.40	13	0.9994	0.93	120.67	2.0065		213.22	197.65	81.21	13.37%		1.7708		
A-13.7-C	1	497.00	527.26	58.64	315.68	13	0.9994	0.93	237.84	2.0896	2.066	183.16	169.99	81.50	14.88%	13.90%	1.8346	1.814	0.611
	2	428.24	449.79	58.62	275.89	13	0.9994	0.93	209.49	2.0442		202.13	188.05	81.25	13.18%		1.7948		
	3	417.11	436.06	58.64	272.51	13	0.9994	0.93	201.95	2.0654		229.38	211.64	81.52	13.63%		1.8134		

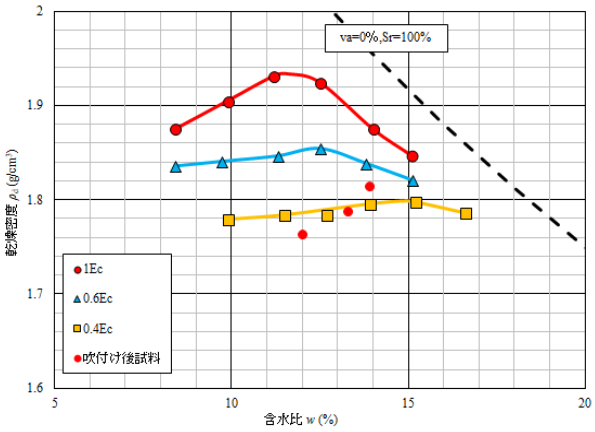


図 5.1-20　地上における予備試験（その１）吹付け後の埋め戻し材品質確認結果

吹付け施工の施工性は、本予備試験では「サイクルタイム」で評価することとした。これは、当初「はね返り率」や「ロス率」も加えた評価を考えたが、吹付けによる材料のはね返りが想定以上に遠くまで飛散し、はね返り重量を正確に計量できなかったためである。表 5.1-31 に試験中に取得したサイクルタイムを示す。1 袋 428 kg を吹付けるのに 63 分を要し、かつ正味の吹付け時間は 13 分しかなく、本試験の埋め戻し材料および使用機械については施工性の観点から改善が求められる結果となった。

表 5.1-31　地上における予備試験（その１）サイクルタイム（1 袋 428 kg あたり）

No.	項目	所要時間(min)	備考
1	バッチ（袋）計量／材料投入	8	
2	吹付け	1	
3	材料投入	4	
4	吹付け	1	
5	材料投入	4	
6	吹付け	1	
7	材料投入	3	
8	吹付け	1	
9	清掃	4	
10	材料投入	3	
11	吹付け	1	
12	材料投入	3	
13	吹付け	1	
14	材料投入	2	
15	吹付け	1	
16	材料投入	4	
17	吹付け	1	
18	清掃	4	
19	材料投入	3	
20	吹付け	1	
21	材料投入	3	
22	吹付け	2	
23	材料投入	2	
24	吹付け	2	
25	清掃	3	
合計		63	
正味吹付け時間		13	

これらの試験結果をまとめると、吹付け後の埋め戻し材の密度は、有効粘土密度換算で 0.571～0.611 Mg/m³ となり、試験計画時の設定密度(0.4 Mg/m³)に比べ高い密度が得られた一方、施工性の観点からは改善が必要な結果となった。

図 5.1-21 に吹付け前の埋め戻し材の状態を、図 5.1-22 に吹付け機への材料投入状況を示す。両図でわかるように、材料を練り混ぜ後、試験場まで運搬する間、埋め戻し材は圧密により大きな塊状となり、吹付け機への投入が困難となった。本予備試験では、この塊状の埋め戻し材を人力でほぐし、吹付け機への投入をおこなったため、サイクルに材料投入作業が必要となり、吹付け施工能力が低下する結果となった。全体工程に余裕のない本施工試験ではこの問題点を解決する必要があり、以下に示すような対策を取ることとして、その効果を地上における予備試験（その２）で確認することとした。

①埋め戻し材の混合材料の改善

埋め戻し材の混合材料として砕石をやめ、砂のみとする。この対策により、仮に材料練り混ぜ後、試験場まで運搬する間に埋め戻し材が圧密により大きな塊状となっても、ほぐしやすい材料となる。

②使用機械の改善

塊状の埋め戻し材をほぐすため、使用機械に解砕機を追加する。また、吹付け機は圧縮空気による１噴射あたりの吹付け量（図 5.1-23、図 5.1-24 の赤枠部）が少ない機械を選定し、ホース内での目詰まりを抑制する。

図 5.1-21　地上における予備試験（その１）
吹付け前の埋め戻し材の状態

図 5.1-22　地上における予備試験（その１）
吹付け機への材料投入状況

図 5.1-23　吹付け機（アリバ 285）の１噴射あたりの量

図 5.1-24　吹付け機（ニードガン 2000）の 1 噴射あたりの量

2)　地上における予備試験（その２）

本予備試験は、1)の予備試験（その１）で得られた対策を反映して実施した。すなわち、埋め戻し材としては、室内試験での埋め戻し材 B（ベントナイト（クニゲル V1）と砂の混合材料（ベントナイト混合率 15 wt%））を用いた。埋め戻し材の構成材料の一覧を表 5.1-32 に示す。

この埋め戻し材を用いた吹付け施工の施工性および吹付け後の品質に対する含水比の影響を確認するため、埋め戻し材の含水比を 3 段階変化させて吹付け試験を実施した。具体的には、吹付け機による締固めエネルギーは 0.4～0.6Ec 程度と想定し、中央値として埋め戻し材 B（ベントナイト+砂）の締固め曲線（図 5.1-15）における 0.4Ec の最適含水比（16 %）を設定した上で、その他の二つは、埋め戻し材の加水混合時の誤差を考慮し、±2 %とした。表 5.1-33 に試験条件を示す。

表 5.1-32　地上における予備試験（その２）に供した埋め戻し材の構成材料の一覧

名称	構成材料	配合※ (wt%)	仕様	備考	含水比
埋め戻し材	ベントナイト	15	クニゲル V1	クニミネ工業（株）	表 5.1-30
	砂	85	コンクリート用砂	洗い砂 宮城県黒川郡産	

※予備試験（２）では乾燥重量比とした

表 5.1-33　地上における予備試験（その２）の試験条件

試験ケース名	含水比 (%)	設定条件
N-14	14	中央値-2 %
N-16	16	中央値：締固め試験 0.4Ec の最適含水比相当
N-18	18	中央値+2 %

表 5.1-34 に使用機械一覧を示す。これについても 1)の予備試験結果に基づく対策を反映し、解砕機を追加、吹付け機にニードガンを選定したほか、本試験となる研究坑道内での吹付け施工試験も想定して油圧ショベル（埋め戻し材の積込み用）、ベルトコンベア（埋め戻し材の吹付け機への投入用）を編成した。図 5.1-25、図 5.1-26 に地上における予備試験（その２）設備配置の様子を示す。また、図 5.1-27 に吹付けロボットの様子を示す。

表 5.1-34　地上における予備試験（その２）使用機械一覧

品名	数量	仕様・容量
吹付けロボット	1 台	
吹付機（ニードガン 2000）	1 台	
可変速式ベルトコンベア	1 台	L=5.0 m
積込用油圧ショベル	1 台	0.07 m^3 級
解砕機	1 台	ホッパー容量 0.2 m^3
キャリアダンプ	1 台	フォークリフト、ベッセルの代用
電動モータ式コンプレッサ	2 台	13.9 m^3/min
レシーバータンク	1 台	2.0 m^3
テレスコピック クローラクレーン	1 台	カニクレーンの代用

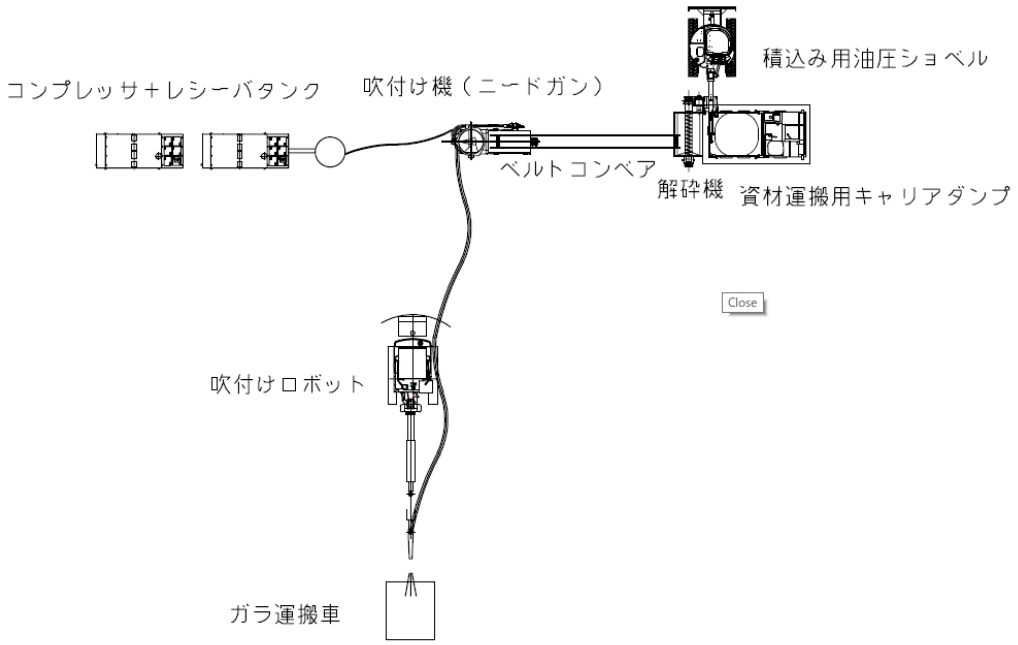


図 5.1-25　地上における予備試験（その２）設備配置

図 5.1-26　地上における予備試験（その２）設備配置の様子

図 5.1-27　吹付けロボットの様子

吹付け前の品質管理として、使用する埋め戻し材の含水比測定をおこなった。表 5.1-35 に吹付け前の含水比測定の結果を示す。型枠 1 個につき袋詰めの埋め戻し材を 1 袋吹付けし、型枠 2 個から 3 箇所（A、B、C）試料採取をおこなった。表 5.1-35 の試料名は、「吹付け後埋め戻し材の品質確認結果」と対比できるように便宜上、N-14-A、B としているが同じ袋の試料である。

含水比測定の結果、1)の予備試験（その１）と同様に、調整した試料は、表 5.1-33 に示した 3 段階の設定含水比の±1%の範囲内で調整ができていることを確認し、本埋め戻し材を使用して吹付け試験を実施した。

表 5.1-35　地上における予備試験（その２）吹付け前の含水比測定結果

試料名	容器 No.	W (%)	ave. W (%)
N-14-A、B	B-4	14.964	14.92
	B-5	14.843	
	B-6	14.950	
N-14-C	C-1	14.510	14.75
	C-2	14.934	
	C-3	14.810	
N-16-A、B	B-4	15.090	15.13
	B-5	15.164	
	B-6	15.136	
N-16-C	F-1	15.369	15.34
	F-2	15.291	
	F-3	15.349	
N-18-A、B	G-4	18.469	18.55
	G-5	18.366	
	G-6	18.803	
N-18-C	G-1	17.940	17.84
	G-2	17.867	
	G-3	17.699	

試料名は、吹付け機（N：ニードガン）、設定含水比（14％、16％、18％）、型枠からの試料採取位置（A、B、C）の順で記載

本予備試験では、吹付けする型枠として「ガラ運搬車」（内寸法：W=610 mm，H=1,190 mm，L=50 mm）を使用し、1 含水比当たり型枠 2 個に吹付けをおこなった。設定含水比 14%での吹付け試験状況を図 5.1-28 に、図 5.1-29 に吹付け後の状況（型枠 1 個分）を示す。

図 5.1-28　地上における予備試験（その２）吹付け試験状況（設定含水比 14 %）

図 5.1-29　地上における予備試験（その２）吹付け後の状況（設定含水比 14 %）

吹付け後の埋め戻し材の含水比、乾燥密度などの測定結果を表 5.1-36 に、室内試験時に得られた締固め曲線（図 5.1-15）に重ねて表示すると図 5.1-30 のようになる。なお、密度測定はパラフィン法を用いた。

吹付け後の埋め戻し材は、設定含水比 14 %および 16 %のケースでは、埋め戻し材 B の締固め試験結果の 0.4Ec～0.6Ec の曲線上に位置するのに対し、設定含水比 18 %のケースでは、締固め試験結果の 0.4Ec の曲線を大きく下回る結果となった。また、吹付け後の埋め戻し材の密度測定結果をこれまで同様式 5.1-1 で有効粘土密度に換算すると、以下の値となった。

・N-14（設定含水比 14 %のケース）：0.519～0.543 Mg/m^3

・N-16（設定含水比 16 %のケース）：0.493～0.553 Mg/m^3

・N-18（設定含水比 18 %のケース）：0.459～0.473 Mg/m^3

ここで、式 5.1-1 の ρ_e は有効粘土密度（Mg/m^3）、ρ_d は乾燥密度（Mg/m^3）、R_s は砂の乾燥質量での混合率（85%）、ρ_s は砂の土粒子密度（2.674 Mg/m^3）である。

表 5.1-36　地上における予備試験（その２）吹付け後の埋め戻し材に関する測定結果

			供試体質量	パラフィン塗布後質量	水中吊皿質量	水中供試体+吊皿質量	水温	水温Tにおける水の密度	パラフィンの密度	体積	湿潤密度	湿潤密度平均	容器+試料重量(湿潤)	容器+試料重量(乾燥)	容器重量	含水比	含水比平均	乾燥密度	乾燥密度平均	有効粘土密度換算
試料番号		No.	m	m1	m2	m3	T	ρw	ρp	V	ρt	ρt avr.	ma	mb	mc	w	avr. w	ρd	ρd avr.	ρe
			g	g	g	g	℃	g/cm3	g/cm3	cm3	g/cm3	g/cm3	g	g	g			g/cm3	g/cm3	Mg/m3
N-14-	A	1	826.31	870.17	58.87	459.95	25	0.9970	0.93	423.34	1.9519	1.945	258.81	240.65	125.27	15.74%	15.55%	1.6892	1.683	0.543
		2	538.45	568.28	58.87	320.60	25	0.9970	0.93	275.40	1.9552		261.08	242.72	125.22	15.63%		1.6920		
		3	796.38	836.86	58.87	440.29	25	0.9970	0.93	413.28	1.9270		280.11	259.95	128.10	15.29%		1.6676		
	B	1	570.02	605.56	59.84	331.48	26	0.9968	0.93	296.78	1.9207	1.939	230.64	209.95	77.33	15.60%	15.52%	1.6626	1.678	0.540
		2	705.99	740.05	59.89	401.98	26	0.9968	0.93	362.61	1.9469		265.05	239.91	77.13	15.44%		1.6853		
		3	663.74	689.49	59.88	382.25	26	0.9968	0.93	340.61	1.9487		264.57	239.39	77.16	15.52%		1.6868		
	C	1	500.62	526.79	59.88	302.14	26	0.9968	0.93	257.30	1.9456	1.889	239.03	218.03	76.52	14.84%	14.66%	1.6969	1.648	0.519
		2	418.06	439.77	59.87	249.16	26	0.9968	0.93	227.94	1.8341		244.23	223.00	77.35	14.58%		1.5996		
		3	956.04	988.28	59.85	508.80	26	0.9968	0.93	506.39	1.8879		224.64	205.81	76.51	14.56%		1.6466		
N-16-	A	1	721.60	753.90	57.97	410.61	28	0.9962	0.93	368.06	1.9606	1.961	226.86	206.51	77.34	15.75%	15.58%	1.6963	1.697	0.553
		2	346.34	365.33	57.99	226.91	28	0.9962	0.93	176.74	1.9596		223.36	203.84	77.12	15.40%		1.6955		
		3	436.16	460.97	58.02	271.10	28	0.9962	0.93	222.16	1.9633		221.42	201.97	77.12	15.58%		1.6987		
	B	1	465.05	498.00	58.57	283.48	25	0.9970	0.93	238.48	1.9500	1.943	235.60	214.42	76.51	15.36%	15.46%	1.6889	1.683	0.543
		2	660.68	699.81	58.57	377.08	25	0.9970	0.93	340.37	1.9411		226.87	206.71	77.34	15.58%		1.6811		
		3	632.98	675.73	58.56	363.03	25	0.9970	0.93	326.41	1.9392		245.49	222.88	76.51	15.45%		1.6795		
	C	1	682.42	718.52	58.89	364.85	22	0.9978	0.93	374.65	1.8215	1.866	287.79	266.32	130.55	15.81%	16.13%	1.5684	1.607	0.493
		2	687.39	726.67	58.89	387.50	22	0.9978	0.93	356.70	1.9271		249.34	228.70	100.79	16.14%		1.6594		
		3	401.76	427.15	58.91	242.12	22	0.9978	0.93	217.18	1.8499		292.05	265.03	100.80	16.45%		1.5929		
N-18-	A	1	522.37	537.48	59.64	299.06	26	0.9968	0.93	282.77	1.8473	1.863	279.45	246.82	79.09	19.45%	19.96%	1.5399	1.553	0.460
		2	304.85	316.34	59.67	200.91	26	0.9968	0.93	163.31	1.8667		268.22	234.96	79.01	21.33%		1.5561		
		3	346.89	360.12	59.66	221.32	26	0.9968	0.93	184.87	1.8764		268.31	237.80	78.14	19.11%		1.5641		
	B	1	842.03	888.39	59.79	448.39	25	0.9970	0.93	451.44	1.8652	1.882	230.98	205.88	77.69	19.58%	19.57%	1.5600	1.574	0.473
		2	480.16	504.17	59.77	283.82	25	0.9970	0.93	255.15	1.8819		212.10	190.20	76.70	19.30%		1.5739		
		3	428.39	452.66	59.77	261.56	25	0.9970	0.93	225.53	1.8995		254.03	224.85	77.65	19.82%		1.5887		
	C	1	837.54	873.27	60.18	453.88	25	0.9970	0.93	442.59	1.8923	1.887	244.22	214.98	79.34	21.56%	21.58%	1.5565	1.552	0.459
		2	558.92	581.68	60.13	317.93	25	0.9970	0.93	300.38	1.8607		226.56	199.96	78.87	21.97%		1.5304		
		3	527.94	549.86	60.15	310.61	25	0.9970	0.93	276.73	1.9078		239.04	210.95	78.54	21.21%		1.5692		

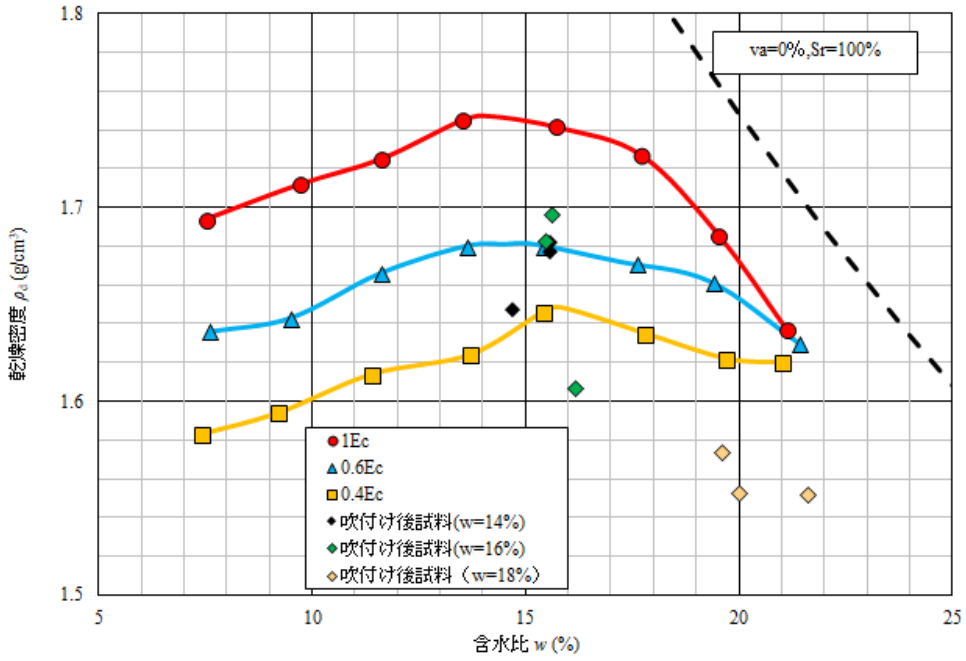


図 5.1-30　地上における予備試験（その２）吹付け後の埋め戻し材品質確認結果

吹付け施工の施工性については、1)と同様吹付け施工の「サイクルタイム」を評価するとともに、「ロス率」も合わせて算出・評価することとした。表 5.1-37～表 5.1-39 に試験中に取得したサイクルタイムを示す。表中の正味吹付け重量は、埋め戻し材が吹付けられた型枠を吊荷重計で計量した後、型枠の重さを引いた重さである。

なお、本試験での吹付けを想定して予備試験を実施したが、ベルトコンベアの速度調整などは試験中に試行錯誤しており、これらがサイクルタイムに含まれることや正味吹付け重量は 1 t 程度であり連続吹付けができていないことを注記しておく。

表 5.1-40 にはね返り率およびロス率の算出結果を示す。なお、「はね返り率」、「ロス率」の定義は、以下に示す通りである。ロス率は、「はね返り重量」のほか解砕機や吹付け機、ホースなどに付着した材料ロスを含む。

設定含水比 14 %のケースは、はね返り率が他のケースと比較してやや大きい結果となったが、ロス率はもっとも小さい結果が得られた。

- はね返り率（%）＝（はね返り重量／材料投入重量）×100
- ロス率=材料投入重量／正味吹付け重量

表 5.1-37　地上における予備試験（その２）サイクルタイム（設定含水比 14 %）

No.	項目	所要時間 (min)	備考
1	バッチ（袋）計量 ／材料投入	15	
2	吹付け	19	
3	材料投入	5	
4	吹付け	10	
5	清掃	13	
合計		62	
正味吹付け時間		29	
正味吹付け重量：951.0 kg　⇒　施工速度：920.3 kg/h 正味吹付け時間：29 min　⇒　吹付け速度：1967.6 kg/h			

表 5.1-38　地上における予備試験（その２）サイクルタイム（設定含水比 16 %）

No.	項目	所要時間 (min)	備考
1	バッチ（袋）計量 ／材料投入	15	
2	吹付け	10	
3	清掃	20	
4	吹付け	7	
5	材料投入	5	
6	吹付け	14	
7	清掃	8	
合計		79	
正味吹付け時間		31	
正味吹付け重量：858.5 kg　⇒　施工速度：652.0 kg/h 正味吹付け時間：31 min　⇒　吹付け速度：1661.6 kg/h			

表 5.1-39　地上における予備試験（その２）サイクルタイム（設定含水比 18 %）

No.	項目	所要時間 (min)	備考
1	バッチ（袋）計量 ／材料投入	15	
2	吹付け	6	
3	材料投入	5	
4	吹付け	14	
5	清掃	13	
合計		53	
正味吹付け時間		20	
正味吹付け重量：820.5 kg　⇒　施工速度：928.9 kg/h 正味吹付け時間：20 min　⇒　吹付け速度：2461.5 kg/h			

表 5.1-40　地上における予備試験（その２）はね返り率およびロス率

試験ケース名	材料投入 重量	はね返り 重量	はね返り率	吹付け材 ＋型枠	型枠	正味 吹付け重量	ロス率
	kg	kg	%	kg	kg	kg	ー
N−14	606.95	93.05	11.3%	635.0	154.5	480.5	1.287
	617.45	44.90		620.5	150.0	470.5	
N−16	600.95	39.20	7.2%	529.5	154.5	375.0	1.445
	639.45	49.60		642.5	159.0	483.5	
N−18	340.45	64.15	10.8%	343.5	150.0	193.5	1.364
	778.45	56.40		781.5	154.5	627.0	

これまでの予備試験結果をまとめると、2)の地上における予備試験（その２）では、地上における予備試験（その１）の改善点を反映し、埋め戻し材に使用する材料の変更、および使用機械の追加・再選定を実施した結果、吹付け後の埋め戻し材の密度は、有効粘土密度換算で 0.459～0.553 Mg/m^3 で、(1)の結果（0.571～0.611 Mg/m^3）に比べて低い値となったものの、計画時に想定した埋め戻し材の仕様（有効粘土密度 0.4 Mg/m^3 以上）を満足することを確認した。

また、吹付け後の埋め戻し材は、設定含水比 14 %および 16 %のケースでは、埋め戻し材 B の締固め試験結果の 0.4Ec～0.6Ec の曲線上に位置するのに対し、設定含水比 18 %のケースでは、締固め試験結果の 0.4Ec の曲線を下回る結果となった。特に、2)で使用した機械類を用いた場合、

設定含水比 18 %のケースでは埋め戻し材の含水比が高いことが影響して、ノズルから塊状で埋め戻し材が吹付けられる状況が確認された（図 5.1-31）。このことから、設定含水比 18 %のケースの乾燥密度が低いのは、塊状になった埋め戻し材が増加して不均質な吹付け状況となり、他のケースと比べて吹付け面において十分な締固めエネルギーが伝達しなかったことが原因と想定された。また、塊状で吹付けられたベントナイト混合土の試料採取をおこなったところ、微小な間隙が確認され。この間隙も密度低下に影響しているものと考えられた。

以上から、埋め戻し材 B、すなわちベントナイトと砂のみで作成した埋め戻し材（ベントナイト混合率 15%）については、設定含水比 14 %と 16 %で計画時の想定仕様を満足しつつ相対的に高い施工品質が得られると判断した。

図 5.1-31　地上における予備試験（その２）吹付け後の状況（設定含水比 18 %）

さらに、2)の予備試験について、施工性を比較・評価した。厳密には、施工時間あたりの正味吹付け重量で評価する必要があるが、1)の予備試験において正味吹付け重量を測定できなかったため、ここでは「施工時間あたりの材料投入重量」で評価することとした。表 5.1-41 に算定結果を示す。

表 5.1-41　地上における予備試験（その２）の施工時間あたり材料投入重量

ケース（試料名）	使用材料、設定含水比	材料投入重量 (kg)	施工時間 (min)	施工時間あたりの材料投入重量 (kg/h)	試験区分
A-13.7-B	ベントナイト+砂+砕石 w=13.7 %	428	63	407.6	予備試験（その１）
N-14-A~C	ベントナイト+砂 w=14 %	1,224	62	1184.5	予備試験（その２）
N-16-A~C	ベントナイト+砂 w=16 %	1,240	79	941.8	予備試験（その２）
N-18-A~C	ベントナイト+砂 w=18 %	1,119	53	1266.8	予備試験（その２）

「施工時間あたりの材料投入重量」には材料ロスが考慮されていないものの、本予備試験は 1)の予備試験に比べ、2～3 倍の施工能力が期待できる結果となった。施工能力の改善要因としては、埋め戻し材の混合材料から砕石を除いたことと使用機械に解砕機を追加したことにより、塊状の

埋め戻し材を容易にほぐすことができ、吹付け機に投入できたこと（図 5.1-32、図 5.1-33）、圧縮空気による 1 噴射あたりの吹付け量が少ない吹付け機（ニードガン）を選定したことにより、ホース内での目詰まりを抑制できたことが挙げられる。

図 5.1-32　地上における予備試験（その２）
解砕機による埋め戻し材のほぐし状況

図 5.1-33　地上における予備試験（その２）
解砕機によりほぐされた埋め戻し材の状況

また、本予備試験における吹付け施工の施工性に対する含水比の影響を、「サイクルタイム」と「ロス率」で評価した結果、設定含水比 14％、18％のケースで 1 時間あたり 1ｔ程度の正味吹付け量が確保できることが確認できたが、ベルトコンベアの速度調整など試験中に試行錯誤しており、これらがサイクルタイムに含まれること、正味吹付け量が 1ｔ程度であり連続吹付けができていないなどの理由により厳密な評価には至らなかった。一方、「ロス率」は、設定含水比 14％のケースでもっとも小さい結果が得られた。これは、他のケースと比べて含水比が低く、解砕機や吹付け機、ホース内の付着量が抑制されたことが原因として考えられた。

以上、「サイクルタイム」と「ロス率」による施工性評価結果では、予備試験（その２）で用いた三つの異なる含水比の埋め戻し材のうち、設定含水比 14 %がもっとも施工性が高くなると判断した。

以上に述べた、地上における予備試験（その１）および（その２）の結果を受け、瑞浪超深地層研究所研究坑道内で実施する吹付け施工試験については、埋め戻し材の構成材料を予備試験（その２）で用いたものとし、設定含水比は高い乾燥密度が得られ、施工性確認において高い施工能力およびロス率が小さい 14％を基準となる品質管理値とすることとした。なお、実際に使用する埋め戻し材の含水比の調整範囲については、練り混ぜにおける誤差を考慮し、±2%の幅を持たせている。

使用機械については、予備試験（その２）において施工性（施工能力）の改善効果が得られた機械を主体に編成し、さらに水平坑道や立坑の空間的制約、供給可能な電力量などを考慮して設定することとした。最終的な材料仕様と使用機械類を表 5.1-42、表 5.1-43 に示す。

表 5.1-42　坑道一部埋め戻し試験における材料仕様

名称	構成材料	配合 (wt%)	仕様	備考	含水比
埋め戻し材	ベントナイト	15	クニゲル V1	クニミネ工業（株）	14±2%
	砂	85	コンクリート用砂	洗い砂 宮城県黒川郡産	

表 5.1-43　坑道一部埋め戻し試験における坑内の使用機械の設定

品名	数量	仕様・容量
吹付けロボット	1 台	空間的制約を考慮して大きさを設定
吹付機（ニードガン 2000）	1 台	予備試験結果よりニードガンを選定
可変速式ベルトコンベア	1 台	空間的制約を考慮して長さを設定
積込用油圧ショベル	1 台	空間的制約を考慮して大きさを設定
解砕機	1 台	ホッパー容量 0.2 m^3
フォークリフト	1 台	空間的制約を考慮して大きさを設定
コンプレッサ	1 台以上	13.9 m^3/min 相当が得られるもの 供給可能な電力量を考慮して、電動・エンジン式と台数を設定
レシーバータンク	1 台	2.0 m^3
カニクレーン	1 台	空間的制約を考慮して大きさを設定
水中ポンプ	1 台以上	坑内の湧水量を考慮して能力と台数を設定
送風機	1 台以上	坑内環境を考慮して能力と台数を設定
集塵機	1 台以上	坑内環境を考慮して能力と台数を設定
ベッセル	2 台	1.0 m^3

(6) 瑞浪超深地層研究所の研究坑道を活用した吹付け施工試験

研究坑道を活用した本試験は、前述の理由により、瑞浪超深地層研究所内の深度 500 m 研究アクセス南坑道のうち設備横坑で実施した。埋め戻しの対象範囲は、坑道切羽面から 4 m の範囲とした（赤のハッチ部）。図 5.1-34 に研究アクセス南坑道レイアウトを、図 5.1-35 に吹付け施工試験前の設備横坑の様子を示す。

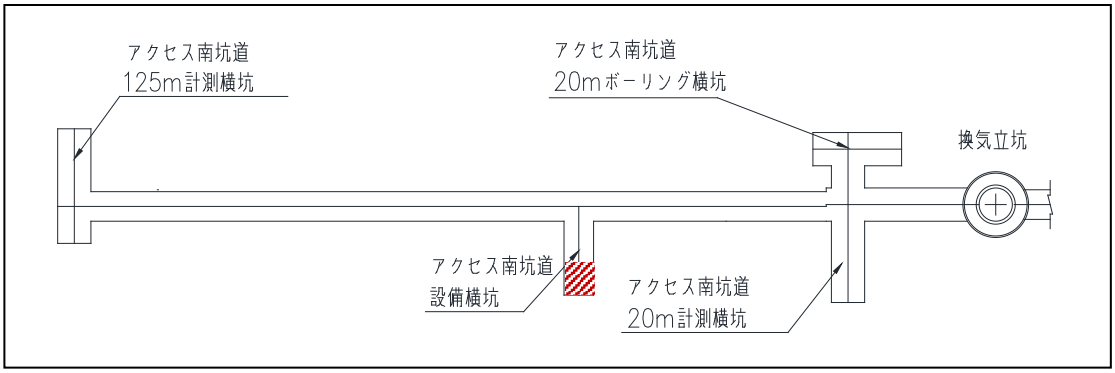


図 5.1-34　研究アクセス南坑道レイアウト

図 5.1-35　設備横坑の様子（吹付け施工試験前）

なお、本試験は、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を主目的として実施することから、先に述べてきた室内試験ならびに地上での予備試験結果を踏まえ、試験中の吹付け施工の品質管理項目を図 5.1-36 に示すように設定した上で、全断面吹付け施工試験を実施した。

吹付け施工の品質管理・確認項目

【品質・地上】吹付け前の含水比管理
→地上部で簡易含水比測定（赤外線水分計）を行い、設定範囲を外れた埋め戻し材は地上にて除外する。
また、別途で炉乾燥法による測定も行う。
■ 含水比測定頻度
①簡易含水比（赤外線水分計）
1含水比／袋
②炉乾燥法
3含水比／袋　→平均含水比で評価
■ 含水比設定値
地上試験にもとづき、14±2%

【品質・地下】材料の重量確認
→フレコンバック詰め埋め戻し材と空袋の重量を計測し、重量の差から材料の重量確認を行う。
■ 吹付け前の材料の重量確認頻度
1回／袋

【品質・地下】吹付け圧力（空気）および吹付け距離管理
→吹付け機の空気圧力を管理する。
→吹付け前にノズルと吹付け面の距離を測定する。
■ 吹付け圧力と吹付け距離の設定値
圧力：0.5MPa以上（地上試験にもとづく目安）
距離：0.8～1.5m（地上試験にもとづく目安）

【品質・地下】はね返り材の重量確認
→フレコンバッグ詰めはね返り材と空袋の重量を計測し、重量の差からはね返り材の重量確認を行う。
■ はね返り材の重量確認頻度
1回／日

【品質・地下】吹付け後の密度確認
→各セクションの吹付け終了後、１セクション内で５箇所以上試料を採取し、パラフィン法により密度を測定する。
■ 吹付け後の密度確認頻度
5箇所以上／1セクション　（3密度／箇所　平均密度で評価）
※特殊箇所（側溝）
1箇所／延長1m　（3密度／箇所　平均密度で評価）
■ 吹付け後の密度設定値
地上試験にもとづき、有効粘土密度0.4Mg/m^{3}以上

図 5.1-36　吹付け施工の品質管理・確認項目一覧

1)　使用材料について

前出の地上における予備試験の結果より設定した、坑道一部埋め戻し試験における埋め戻し材の仕様を表 5.1-44 に示す。先に述べたように、含水比の設定範囲は、加水混合時の誤差を考慮し、±2%とした。

表 5.1-44　埋め戻し材の仕様

名称	構成材料	配合※ (wt%)	仕様	備考	含水比
埋め戻し材	ベントナイト	15	クニゲル V1	クニミネ工業（株）	14±2%
	砂	85	コンクリート用砂	洗い砂	

※　乾燥重量比で算出

埋め戻し材は、クニミネ工業左沢工場内で製造したものを使用した。表 5.1-45 に使用機械と練り混ぜ条件を示す。図 5.1-37 に使用したアイリッヒミキサーを、図 5.1-38 に埋め戻し材の製造フローを示す。加水は、制御盤にて 1 分あたりの水量を決定し、アイリッヒ内部と繋がるラインにて自動でおこなった。加水練り混ぜ後に設定した含水比の範囲（14±2 %）を外れた場合は、処分した。製造後はフレコンバッグに 1 袋 500 kg 目安で包装し、倉庫内に保管した。

表 5.1-45　使用機械、練り混ぜ条件

使用機械	アイリッヒミキサーMixer typeD（水平型ミキサー）DEV22　容量 2250 L
混り混ぜ条件	パン※1 回転数：8.3 R/M※2 スター※3 回転数：43.5 R/M アジテーター※4 回転数：660 R/M 空練り時間：1 分 加水時間：約 3 分 40 秒 混練時間：3 分

※1　容器、※2　回転数/分、※3　鋤型の回転アーム、※4　ミキシング部位

図 5.1-37　使用したアイリッヒミキサー

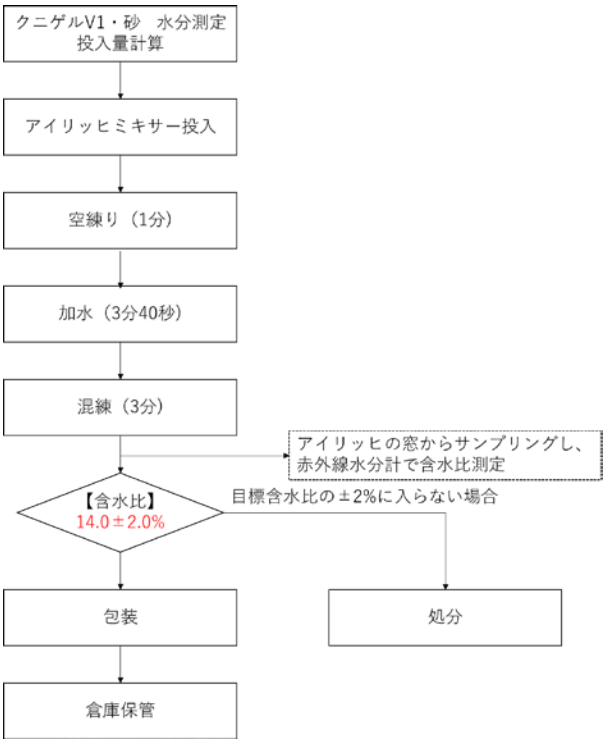


図 5.1-38　埋め戻し材の製造フロー

2)　使用機械

使用機械は、地上における予備試験（その２）において施工性（施工能力）の改善効果が得られた機械で編成することとし、さらに水平坑道や立坑の空間的制約、供給可能な電力量などを考慮して選定した。表 5.1-46 に使用機械一覧を示す。資機材の搬入出は、瑞浪超深地層研究所の換気立坑のキブルを利用するため、以下の条件を満足するものとした。

- 換気立坑巻上機の吊り荷重は 11.68 t であり、搬入出する資機材の重量はそれ以下であること。
- 使用機材の大きさは、唯一の搬入経路となる換気立坑スカフォードの開口部の直径（1.90m：図 5.1-39 参照）を超えないこと。
- 燃料系機材は、機材からの油漏れによる坑内排水の汚染を防ぐため油抜き状態で搬入し、坑内設置後に燃料を補充する。

表 5.1-46　使用機械一覧

品名	型式	台数（台）	備考
吹付けロボット	Y-20	1	ベースマシン 1.5 t クラス
吹付け機	needGun2000	1	
可変速式ベルトコンベア	MC35SP1-5M	1	5 m
積込用油圧ショベル	Vio17	1	0.06 m^3
解砕機	NSHM-02	1	0.2 m^3
バッテリー式フォークリフト	3FBL9	1	0.9 t
電動モータ式コンプレッサ	MPS-22VP-2	1	※追加手配
電動モータ式コンプレッサ	SMS15SD	1	※追加手配
エンジンコンプレッサ	PDS185SC-5C5	4	
レシーバータンク	ST1200C-90	1	2.0 m^3
カニクレーン	MC285C-2	1	2.9 t 吊
水中ポンプ	LPS1.4S	2	
送風機	SF500-10B-3.7RR	2	
集じん機	EJD5	2	
ベッセル	—	2	1.0 m^3

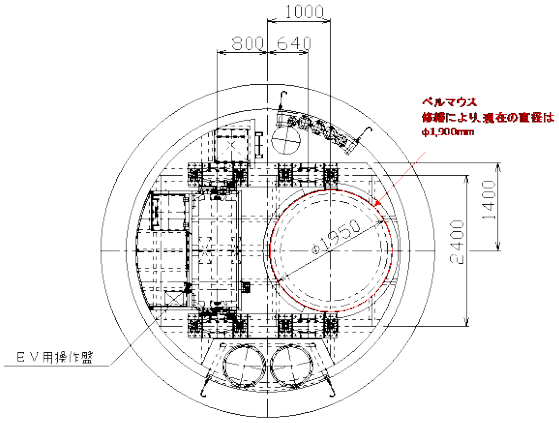


図 5.1-39　瑞浪超深地層研究所内換気立坑スカフォード断面図（赤枠が開口部分）

図 5.1-40 に使用した主要機械類を、図 5.1-41 に主要機械の換気立坑スカフォード開口部を通過させる際の搬入状況を示す。空間的な制約から、使用機材の搬入出には細心の注意を要することとなった。

(a) 吹付けロボット（Y-20）

(b) 吹付け機（ニードガン 2000）

図 5.1-40　使用した主要機材一覧（1/2）

(c) 可変速式ベルトコンベア（MC35SP1-5M）

(d) 積込用油圧ショベル（Vio17）

(e) 解砕機（NSHM-02）

(f) バッテリー式フォークリフト（3FBL9）

(g) エンジンコンプレッサ（PDS185SC-5C5）

(h) 電動モータ式コンプレッサ
（MPS-22VP-2）

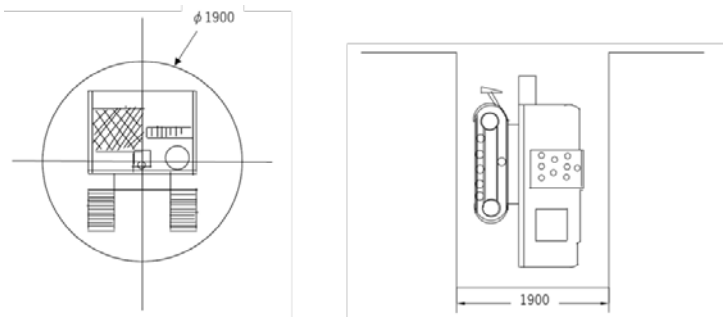
(i) 電動モータ式コンプレッサ（SMS15SD）

(j) レシーバータンク（ST1200C-90）

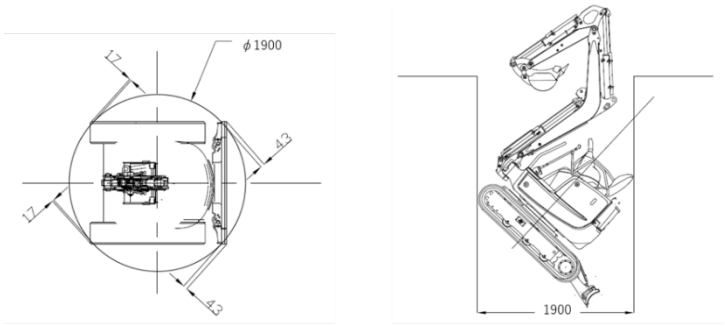
(k) かにクレーン（MC285C-2）

(l) ベッセル

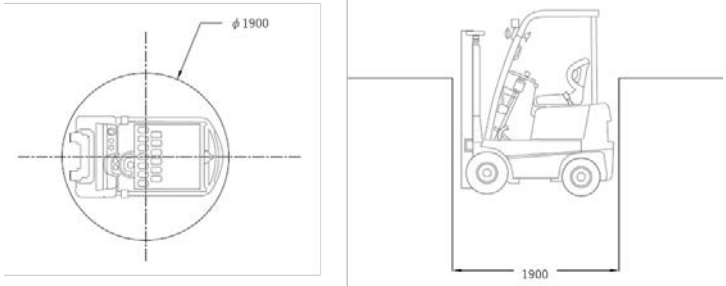
図 5.1-40　使用した主要機材一覧（2/2）



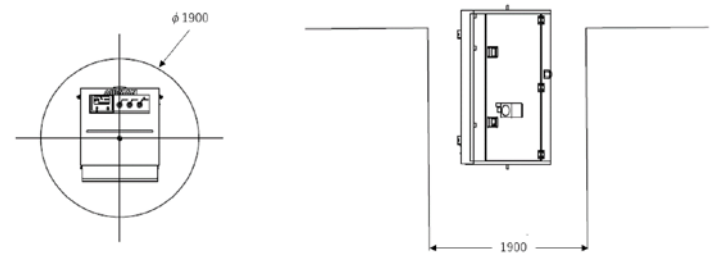
吹付けロボット



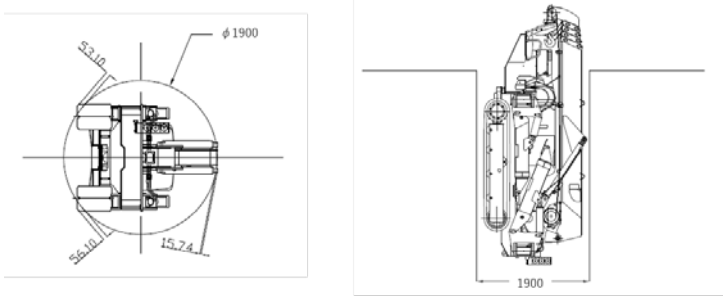
バックホウ



フォークリフト



エンジンコンプレッサ



カニクレーン

図 5.1-41　主要機械の立坑搬入検討図

図 5.1-42 に最終的に設定した研究坑道内での吹付け施工試験フローを示す。実際の現場作業はほぼこのフローに従って実施した。

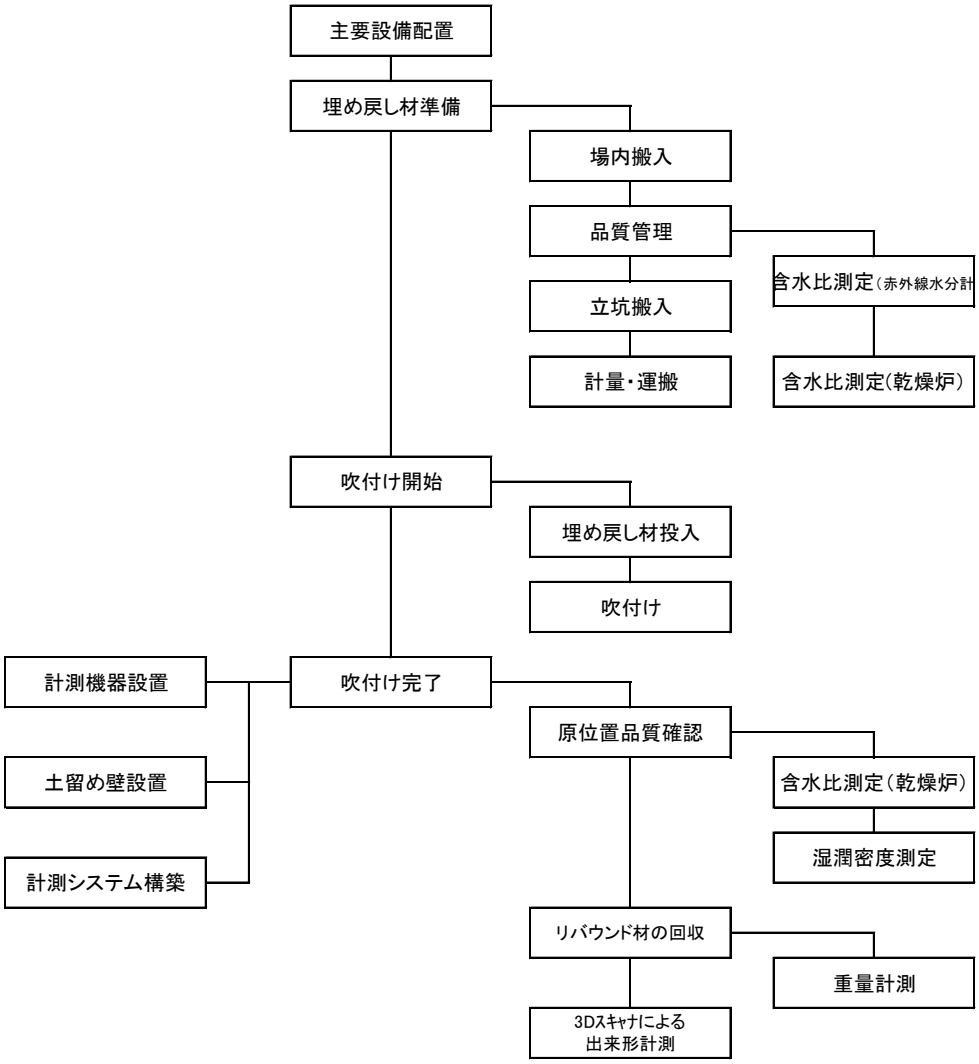


図 5.1-42　今回の吹付け施工試験フロー

3)　吹付け試験のための準備工

坑道一部埋め戻し試験の実施にあたり、まず、設備横坑内の設備（給水・給気用配管、照明、スプリンクラー、分電盤、環境測定器など）の移設をおこなった。設備横坑内の給水・給気用配管、照明、スプリンクラーは撤去し、分電盤と環境測定器は設備横坑坑口付近に移設した。図 5.1-43 に設備横坑の設備移設後の様子を示す。

なお、研究坑道の安全確保などのため、一部の移設・撤去設備は、吹付け試験終了後に復旧させている。

図 5.1-43　設備横坑の設備移設後の様子

4)　吹付け施工試験の品質管理

①吹付け施工試験の進め方

吹付け施工試験は、計測器設置の観点から 8 セクションに分けて実施した。図 5.1-44 に吹付け施工の区割りとなるセクション分割を示す。

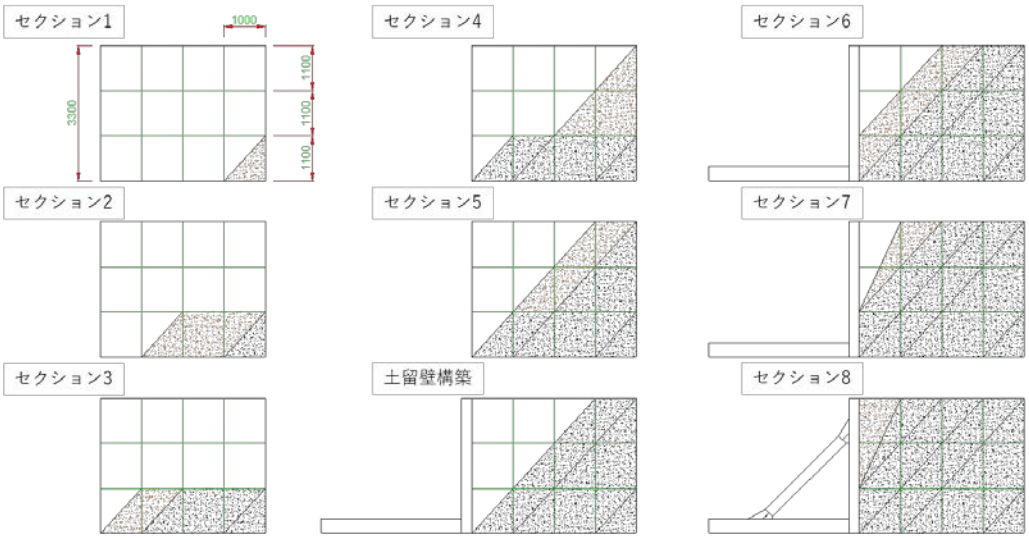


図 5.1-44　吹付けの各セクション

②吹付け圧力および吹付けノズルと吹付け面との距離

埋め戻し材の施工方法として吹付けを採用する場合は、これまで述べてきたように埋め戻し材の締め固めエネルギーを一定以上確保する必要があり、そのためには吹付け時の吐出圧力や吹付け面までの距離が重要な品質管理項目となる。本試験では、地上での予備試験（その 2）の結果を踏まえ、吹付け圧力を 0.50 MPa～0.82 MPa の範囲で管理した。図 5.1-45 に吹付け圧力の管理の様子を示す。吹付け圧力が 0.50 MPa を下回る場合は、吹付け作業を一時中断しコンプレッサおよびレシーバータンクからのエアの供給確認と吹付けノズルの交換を行った。また、ノズルと吹付け面との距離は、1000 mm～1500 mm の範囲で管理し、吹付け面に対してできるだけ垂

直になるように吹付けをおこなった。図 5.1-46 にノズルと吹付け面との距離管理の様子を示す。

図 5.1-45　吹付け圧力の管理

図 5.1-46　ノズルと吹付け面との距離管理

③吹付け作業

図 5.1-47 に吹付け作業のフローを、図 5.1-48～図 5.1-55 に吹付け作業の様子を示す。カニクレーンに取り付けた吊りばかりにてフレコンバッグに袋詰された埋め戻し材の重量を計測後（図 5.1-48）、袋下部をカッターにより開封し埋め戻し材をベッセル内に移した。ベッセルはフォークリフトにて解砕機まで運搬し（図 5.1-49）、積込用油圧ショベルにて埋め戻し材を解砕機に投入した（図 5.1-50）。解砕機にて団粒化した埋め戻し材をほぐした後、解砕機下部の排出ゲートを開きベルトコンベアで運搬、吹付け機に投入した（図 5.1-51、図 5.1-52）。ほぐしが不十分な場合、マテリアルホースや吹付けノズル詰まりの原因となるため、ベルトコンベア運搬時に取り除き、再び解砕機に投入した。コンプレッサから吹付け機にエアを圧送し、吹付けロボットによりノズル操作をおこなうことで埋め戻し材の吹付けをおこなった（図 5.1-53）。吹付け終了後、はね返った埋め戻し材は密度低下の原因となるため、スコップなどでフレコンバッグに回収し、カニクレーンにて重量を計測した。吹付け後は吹付け面の乾燥を防ぐためシートで養生をした（図 5.1-54、図 5.1-55）。

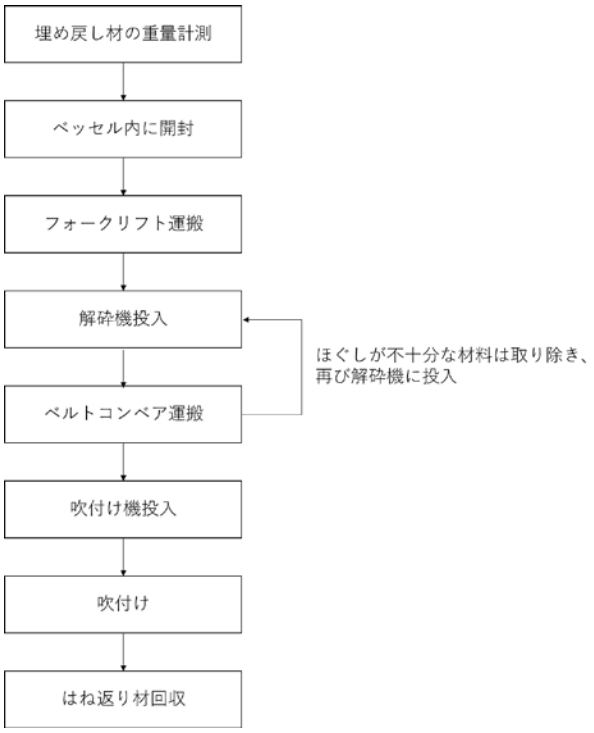


図 5.1-47　吹付け作業フロー

図 5.1-48　埋め戻し材の重量計測

図 5.1-49　フォークリフトによる運搬

図 5.1-50　解砕機への投入

図 5.1-51　ベルトコンベアによる運搬

図 5.1-52　吹付け機への投入

図 5.1-53　埋め戻し材吹付け

図 5.1-54　はね返り材回収の様子

図 5.1-55　はね返り材回収後の養生

5)　研究坑道内の環境維持および安全のために実施した付帯作業について

本試験では、瑞浪超深地層研究所の研究坑道を活用することとしたため、それによって生じる研究坑道内の環境維持ならびに既設設備（特に排水処理プラント）への影響、研究坑道内での他の調査試験への影響がないように配慮する必要が生じた。これらに伴い実施した付帯作業は、大きく主要設備の配置変更、ベントナイトを含む排水の大量発生を抑制する対策、安全通路確保のための資材の設置場所の確保がある。以下、それらについて概要を紹介する。

①主要設備の配置変更

埋め戻し試験（セクション１）の開始に伴い、設備横坑付近に配置したエンジンコンプレッサ 3 台、集じん機 2 台を稼働させたところ、中央監視室監視の一酸化炭素濃度および酸素濃度が連絡基準値に達したため作業を中止し、坑内の主要設備の配置変更および換気設備の見直しをおこなった。具体的には、設備横坑付近に配置していたエンジンコンプレッサは、換気立坑下に移動させ、エンジンコンプレッサからの排気ガスは浄化装置を通した後、連接部の排気ダクトで排気した。また、坑内環境の悪化によりコンプレッサからの吐出量が十分に確保できなかったため、当初指定された電力量の制限について増加承諾を得て、電動モータ式コンプレッサ（22 kW×1 台、15 kW×1 台）を吹付け施工試験場所である設備横坑付近に追加で配置した。

このほか、埋め戻し試験時の埋め戻し材運搬時間によるロスを減らすため、カニクレーンは換気立坑下から 20 m ボーリング横坑前に移設した。

換気立坑下には、エンジンコンプレッサ 4 台（1 台予備）と排気ガス浄化装置（オクトパス）2 台を設置した。エンジンコンプレッサへの給油によるオイル漏れを防ぐため、シートおよびオイルマットで養生をした。また、立坑下はカラーコーンで区画し、立入禁止措置をした。設備横

坑には吹付けロボット、集じん機の吸引ホースを設置した。吹付けロボット走行箇所はプラスチック敷板で養生し、床盤コンクリートの損傷を防ぐ措置を講じた。

また、坑内で吹付け作業をおこなう際には、吹付けに伴う粉じん対策として電動ファン付き防じんマスクと保護メガネの着用を義務付けた。また、エンジンコンプレッサなどの使用による一酸化炭素濃度の上昇と酸素濃度の低下対策として、作業員にはポータブル環境測定器を携帯させるとともに、1 時間おきに予備ステージ、計測横坑、設備横坑、125 m 計測横坑の一酸化炭素濃度と酸素濃度を別途の環境測定器を用いて測定、管理した。

②ベントナイトを含む排水の大量発生を抑制する対策

吹付け機材の洗いで発生する濁水による排水ポンプの目詰まりを防ぐため、20 m ボーリング横坑には、濁水発生時用の水槽 3 基とノッチタンクを設置した。アクセス南坑道には、フレコンバッグの開封に伴う埋め戻し材の側溝部分への流出を防ぐため、カニクレーンによる揚重作業付近はシートで養生した。また、底盤コンクリートの損傷および運搬時の埋め戻し材の側溝部分への流出を防ぐため、吹付け機材設置箇所はプラスチック敷板で養生した。また、側溝への濁水の流出防止対策として設備横坑前の側溝の切り回しをおこない、側溝にはフィルタ材を設置した。なお、吹付け機材はブラシやホウキを用いて水を極力使用しない清掃方法とした。

③研究坑道内での他の調査試験への影響がないように配慮する対策

アクセス南坑道内の資機材は片側に寄せ、1.5 m 程度の安全通路を確保した。20 m 計測横坑（図 5.1-34）には、埋め戻し試験で使用する埋め戻し材を仮置きした。埋め戻し材は、パレット上に 2 段積みし、狭い研究坑道においてできる限りスペースを確保できるようにした。また、安全通路を確保しつつ作業性を確保するため、埋め戻し試験で使用する埋め戻し材、カニクレーン、フォークリフト、ベッセル、レシーバータンク、バックホウ、解砕機、ベルトコンベア、吹付け機、電動モータ式コンプレッサ、集じん機、送風機を南アクセス坑道内の全長 100 m 程度に渡り設置した。

6) 吹付け施工試験結果

①吹付け試験（セクション１）

図 5.1-56 に吹付け開始前と吹付け後の状況を示す。設備横坑内の吹付け試験箇所には一部湧水の発生がみられ、それに伴い埋め戻し材の変状が観察された（図 5.1-57）。

セクション１では、坑内環境の悪化に伴うコンプレッサの吐出量不足により吹付け圧力の低下やホースおよびノズルの閉塞による目詰まりが多く発生した。そこで、セクション２より電動モータ式コンプレッサの追加とマテリアルホースの長さ変更をおこない、施工能力の改善を試みた。

図 5.1-56　吹付け開始前（左）および吹付け後（右）の状況（セクション１）

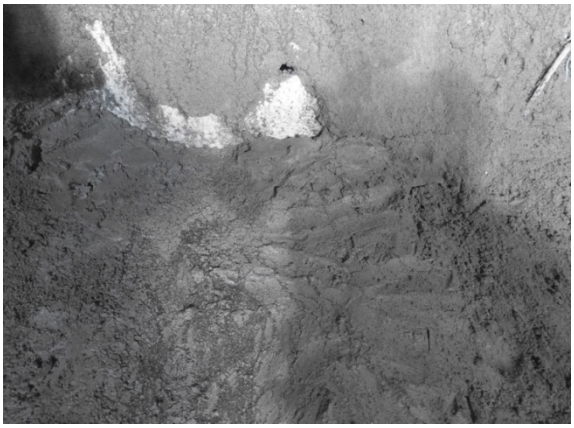


図 5.1-57　湧水発生箇所付近の様子

②吹付け試験（セクション２）

セクション２では、施工能力の改善のため、電動モータ式コンプレッサ 2 台を追加（詳細は 5)を参照）するとともに、マテリアルホースの長さを変更した。マテリアルホースは継目部分での目詰まりを防ぐため、ホース長を伸ばし一本化した。図 5.1-58 にマテリアルホースの様子を示す。

図 5.1-59 に埋め戻し試験の状況と吹付け後の状況を示す。側溝内は、坑道壁面からの湧水が集水し、埋め戻し材の密度低下につながることが懸念されたため、吹付け前に側溝内に堆積した軟らかい埋め戻し材を入念に除去した。また、セクション１で見られた、吹付け後の湧水の浸潤による埋め戻し材の密度低下を防ぐため、湧水発生箇所をはじめに吹付けてからセクション２の吹付けを開始した。

図 5.1-58　変更後のマテリアルホースの様子

図 5.1-59　吹付け（左）および吹付け後（右）の状況（セクション２）

③吹付け試験（セクション３）

セクション３は、セクション４とセクション５にて天端付近の吹付けをする際のノズルと吹付け面との距離を確保するため、セクション３－①、セクション４、セクション５、セクション３－②の順番で吹付けをおこなった。図 5.1-60 吹付け試験の状況と吹付け後の状況を示す。側溝内は、セクション２と同様に、湧水の浸潤により軟らかくなった埋め戻し材を吹付け前に入念に除去した。

図 5.1-60　吹付け（左）および吹付け後（右）の状況（セクション３）

④吹付け試験（セクション４）

セクション４では、吹付けロボットをセクション３－①の吹付け面まで移動させて吹付けをおこなった。図 5.1-61 に埋め戻し試験の状況と吹付け後の状況を示す。天端付近の吹付けをおこなう際は、吹付けロボットのアームを天端付近まで伸ばし、吹付けノズルと吹付け面の距離を確保した。

図 5.1-61　吹付け（左）および吹付け後（右）の状況（セクション４）

⑤吹付け試験（セクション５）

図 5.1-62 に埋め戻し試験の状況と吹付け後の状況を示す。セクション４と同様に、湧水の発生がみられた壁面付近では、吹付け前に浸潤により軟らかくなった埋め戻し材を取り除いた。

図 5.1-62　吹付け（左）および吹付け後（右）の状況（セクション５）

⑥吹付け試験（セクション６）

セクション６では、土留め壁 2 段分の背面から坑道天端に向けて吹付けをおこなった。土留め壁背面は、吹付けロボットを使用した場合、吹付けノズルの角度が吹付け面に対して垂直に向かないため、人力吹付けをおこなった。図 5.1-63 に埋め戻し試験の状況と吹付け後の状況を示す。人力吹付けの際は、作業者の安全確保のため、吹付けノズルをレバーブロックで支保工（縦材）に固定し、角度を調整して吹付けをおこなった。図 5.1-64 に人力吹付けによる土留め壁背面の吹付けの様子を示す。土留め壁背面の吹付け終了後、土留め壁の貫通孔に計測器の配線を通す作業をおこない、貫通後は配線が損傷しないように人力で埋め戻しをおこなった。土留め壁背面の埋め戻し終了後は、支保工の間から吹付けロボットにて天端付近の吹付けをおこなった。

図 5.1-63　吹付け（左）および吹付け後（右）の状況（セクション６）

図 5.1-64　人力吹付けによる土留め壁背面の吹付けの様子（セクション６）

⑦吹付け試験（セクション７）

セクション７では、吹付け面の安定のため、吹付けをおこなう範囲を当初の計画（図 5.1-44）から変更し、3 段目の型枠設置後に吹付けをおこなった。図 5.1-65 に吹付け試験の状況と吹付け後の状況を示す。また、支保工（斜材）の設置に伴い吹付けロボットによる吹付け作業が困難になったため、吹付け方法を吹付けロボットから人力に切り替えた。吹付け作業は仮設足場の上でおこない、吹付けノズルはセクション６と同様に支保工（縦材）に固定した。

図 5.1-65　吹付け（左）および吹付け後（右）の状況（セクション７）

⑧吹付け試験（セクション８）

セクション８では、中央上部の型枠を除き、片側ずつ型枠を設置して吹付けをおこなった。また、中央上部の吹付け面は型枠が設置できるように整形した。型枠設置後の整形に伴う微小な空隙部分には粉末状のベントナイト（クニゲル V1）を型枠の上から充填した。図 5.1-66 に埋め戻し試験と終了後の状況を、図 5.1-67 に吹付け面の整形とベントナイト充填の様子を示す。埋め戻し試験終了後、計測システムの構築を行った。

図 5.1-66　吹付け（左）および吹付け後（右）の状況（セクション８）

図 5.1-67　吹付け面の整形（左）とベントナイト充填の様子（右）

⑥土留め壁設置

セクション３終了から、土留め壁（＋支保工）の設置をおこなった。土留め壁は排水構造とし、埋め戻し材の浸潤過程を目視で確認できるスルーフォームを採用した。ただし、計測センサーケーブルを貫通させるため、スルーフォームの一部をステンレスフォームとした。また、土留め壁と坑道壁面の吹付けコンクリートとの境界部から埋め戻し材が膨出するのを防ぐため、吸出し防止材を使用した。

a）主要構成材料

土留め壁は、吹付けコンクリート面との隙間が極力小さくなるよう事前に坑道形状を計測してから製作し、吹付けコンクリート面から-2.0 cm で製作した。図 5.1-68 に土留め壁組立後検査の様子を示す。吸出し防止材は、型枠とコンクリート吹付け面との境界部を補間する厚さがあり、かつ重量が軽く柔軟性のある SN-100×100 を使用した。

図 5.1-68　土留め壁の組立検査（地上）（左）吸出し防止材（SN-100×100）（右）

b）土留め壁設置準備工

・材料搬入

換気立坑のキブルにて土留め壁構成部材を順次搬入した。

・墨出し・側溝切り出し

支保工およびケミカルアンカー打設位置の墨出しをおこなった。また、埋め戻し後の湧水量とベントナイト流出量を計測するため、排水用の側溝の切り出しを行った。

・ケミカルアンカー打設

支保工設置位置の墨出し後、ケミカルアンカーの打設を行った。

・土留め壁設置

ケミカルアンカー打設後、支保工建込み、土留め壁取り付けを行った。土留め壁および支保工の建て込みは、吹付け施工の進捗に合わせて実施した。

・支保工建込み

ケミカルアンカー打設後、カニクレーンにて支保工（鉛直材、水平材）の建込みを行った。支保工（斜材）は、埋め戻し材の施工試験の妨げとなるため、セクション６の吹付け終了後に、建込みをおこなった。

・土留め壁取り付け

支保工建込み後、土留め壁の取り付けをおこなった。土留め壁同士はボルトで固定し、支保工と土留め壁はフレーム押さえ座金で固定した。各土留め壁間にはゴムシートを敷き、気密性を高めた。下から２段目以降の土留め壁は、セクションの進行に合わせて設置をおこなった。

・吸出し防止材設置

型枠取り付け後、吸出し防止材を設置した。吸出し防止材は坑道壁面に沿って設置し、アンカ

ーボルトで固定した。

図 5.1-68～図 5.1-71 に土留め壁設置に関わる各作業の様子を、図 5.1-72 に支保工設置計画図を示す。

図 5.1-69　支保工搬入の様子（左）と側溝切り出し後の様子（右）

図 5.1-70　ケミカルアンカー打設（左）と支保工建て込み（右）の様子

図 5.1-71　土留め壁取り付け（左）および吸出し防止材設置後の様子（右）

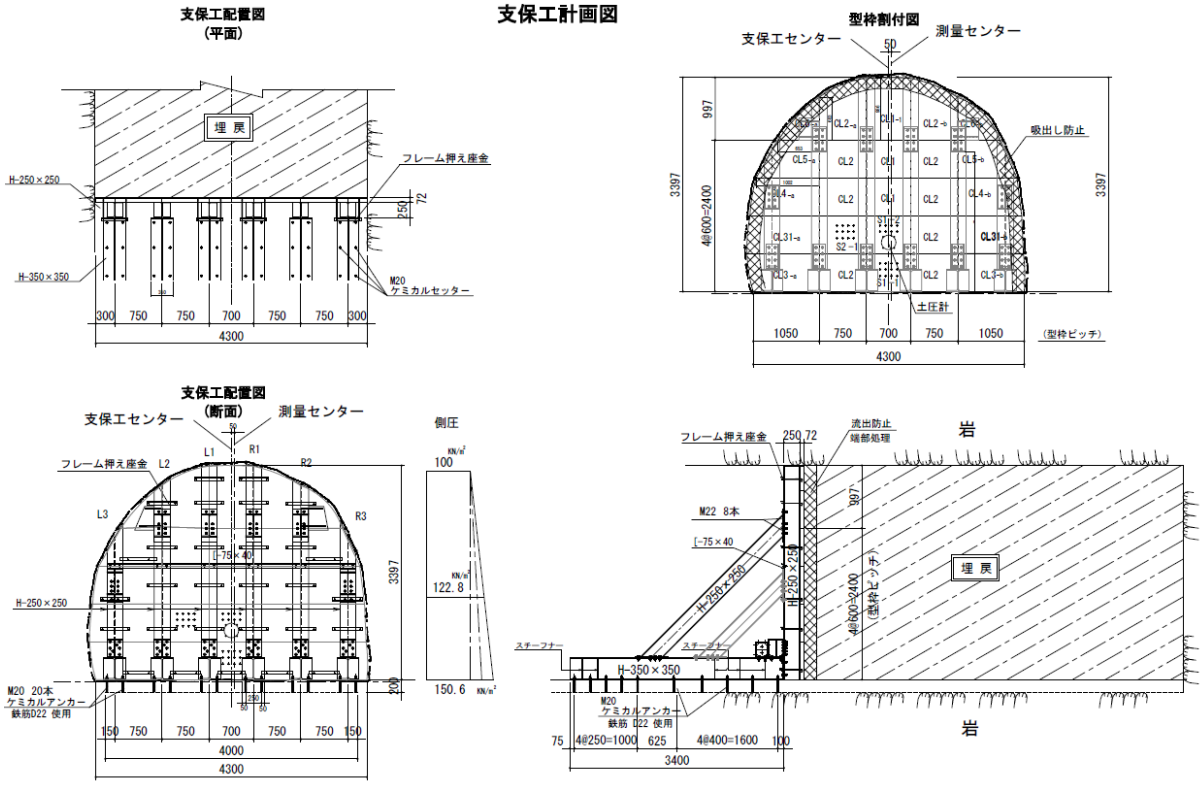


図 5.1-72　土留め壁・支保工設置計画図

7)　吹付け施工中のサイクルタイムとロス率

表 5.1-47 に試験中に取得したサイクルタイムと吹付け重量（材料投入重量、正味吹付け重量など）の集計結果を示す。なお、各セクションのサイクルタイムは付録「サイクルタイム」に掲載した。セクション６の埋め戻し作業の一部で、土留め壁に設置した貫通孔に計測器の配線を通す作業をおこない、その後配線を埋め戻す作業を人力で実施したが、サイクルタイムと吹付け重量の集計結果では、この人力埋め戻しの作業は除外した。また、表中の正味吹付け重量は、吹付け前の埋め戻し材の重量（材料投入重量）から、吹付け後のはね返り重量とロス重量（機械やホースに付着した材料の重量）を引いた重さである。

表 5.1-47　サイクルタイムと吹付け重量の集計結果（人力埋め戻し作業は除く）

セクション	施工時間 (min)	うち吹付け時間 (min)	材料投入重量 (kg)	はね返り重量 +ロス重量 (kg)	正味吹付け重量 (kg)
1	630	331	6334.7	161.7	6173.0
2	1301	612	15214.0	1524.3	13689.7
3	453	289	9470.8	1162.8	8308.1
4	1595	887	23972.8	1578.4	22394.4
5	693	508	16047.4	2504.8	13542.6
6	947	499	18073.6	1754.1	16319.5
7	618	287	11834.8	2719.0	9115.8
8	535	181	6996.5	1981.3	5015.3

表 5.1-48 にサイクルタイムなどの集計結果に基づき算出した、施工性評価のために必要な「施工速度」および「吹付け速度」を示す。本表には、比較のため「地上における予備試験（その２）」の結果も併記した。なお、「施工速度」は吹付け施工試験に要した施工時間（具体的には、吹付け

段取り、段取り替え、吹付け、一時中断、片づけなどの時間）から算出した速度で、「吹付け速度」は施工時間のうち吹付け時間のみを抽出して算出した速度を表す。

表 5.1-48　各セクションの施工速度と吹付け速度一覧

	正味吹付け重量 (kg)	施工速度 (kg/h)	吹付け速度 (kg/h)
地上における予備試験（その２）（設定含水比 14 %のケース）	951.0	920.3	1967.6
セクション１	6173.0	587.9	1119.0
セクション２	13689.7	631.3	1342.1
セクション３	8308.1	1100.4	1724.9
セクション４	22394.4	842.4	1514.8
セクション５	13542.6	1172.5	1599.5
セクション６	16319.5	1034.0	1962.3
セクション７	9115.8	885.0	1905.7
セクション８	5015.3	837.8	1662.5

表 5.1-48 から、セクション１、２は、地上における予備試験（その２）と比較して、施工速度、吹付け速度ともに低い値となった。これは、作業員の施工試験に対する慣れ（地上での予備試験と坑内での施工試験で作業員が異なる）に加えて、坑内作業に対する制約（空間的制約や電気容量の制限など）が要因として挙げられる。特に、セクション１では、エンジンコンプレッサ設置箇所の都合により坑内環境の悪化がみられたため、作業の一時中断を余儀なくされ、十分な吐出量が確保できなかった。このため、セクション２以降では、エンジンコンプレッサの設置個所を改善し、また当初指定された電力量の制限について増加承諾を得て、電動モータ式コンプレッサを追加した。これらの設備変更が施工速度、吹付け速度の変遷に表れている。

セクション３は、上記の設備変更および作業員の施工試験に対する慣れにより、施工速度、吹付け速度が大きく改善された一方、セクション４、５では吹付け速度が低下した。これは、吹付け位置の影響が大きい。セクション４、５は、図 5.1-44 に示したとおり、坑道の天端付近の埋め戻しであり、マテリアルホースと吹付けノズルを吹付けロボットアームの稼働範囲内で最大限上昇させた後、吹付けノズルを斜め上向きにして吹付け作業を実施している。このため、吹付けに際するエネルギーロスが増加、吹付けノズル付近で埋め戻し材の目詰まりが発生し、セクション４では施工速度、吹付け速度ともに低下した。セクション５では、吹付けロボットと吹付け面との距離が短くなったため、吹付け速度は若干改善された。また、目詰まりしたノズルの整備作業が定常化し、作業時間が短縮できたため、施工速度については大きく改善される結果となった。

セクション６、７、８は、土留め壁の支保工および型枠が設置された状態で吹付け作業を実施したセクションである。また、型枠背面は吹付けロボットによる吹付け作業が困難であったため、人力吹付けをおこなった。この三つのセクションについては、土留め壁設置と吹付け位置が施工速度や吹付け速度に影響を与えた。まず、施工速度に着目すると、セクション５と比較して、セクションが進むにつれて施工速度の低下傾向が見られる。これは、土留め壁の支保工が設置された状態で吹付け作業を実施しているため、吹付けノズルの移動（段取り替え）に時間を要し、この一時中断時間が影響している。次に、吹付け速度に着目すると、セクション５と比較してセクション６で吹付け速度の改善がみられたものの、その後セクションが進むにつれて吹付け速度の低下傾向が見られる。これは、前述セクション３とセクション４、５の比較と同様に、吹付け位置の影響が大きい。セクション６は下段～上段の埋め戻し、セクション７は中段～上段の埋め戻し、セクション８は上段の埋め戻しであり、吹付け位置によるエネルギーロスにより吹付け速度

が低下したものと考えられる。

表 5.1-49 に施工性評価のために必要な「ロス率」の算出結果を示す。ロス率には、「はね返り重量」のほか解砕機や吹付け機、ホースなどに付着した材料ロスを含んでおり、以下の考え方で算定している。

ロス率　= 材料投入重量／正味吹付け重量

セクション１は、前述の施工速度、吹付け速度の結果の整理で述べたとおり、コンプレッサからの吐出量が十分に確保できなかった。また、マテリアルホースの長さ、継手が影響し、吹付けノズルやマテリアルホース内で目詰まりが発生した。吹付け作業では、目詰まりした埋め戻し材が団粒化した状態で吹付けられている状況が確認されており、セクション１では、この埋め戻し材の団粒化によってロス率が小さくなったと考えられる。

セクション２、３では、コンプレッサやマテリアルホースの改善により、連続的な吹付け作業が実施できたため、その分はね返りによるロスが相対的に増加したものと考えられる。

セクション４、５は、前述の通り坑道の天端付近の埋め戻しであり、特にセクション４では吹付け位置が遠くかつ高いことが影響し、吹付けに際するエネルギーロスが増加、吹付けノズル付近で埋め戻し材の目詰まりが発生し、セクション１と同様に団粒化した埋め戻し材が吹付けられている状況が確認された。このため、結果的にはね返りは少なくロス率の減少につながったと考えられる。セクション５は他のセクションと比べて比較的ロス率が大きい結果となったが、現地での吹付け状況や前述の吹付け速度と合わせて考察すると、吹付けノズル付近での目詰まり、団粒化した状態での吹付け状況が大きく改善された様子は見られなかった。一方、セクション５の埋め戻しは、終始斜面上を吹付ける形状であったことから、埋め戻し材が既埋め戻し箇所にうまく付着せず、ロス率が増加したものと考えられる。

セクション６、７、８は、土留め壁の支保工および型枠が設置された状態で吹付け作業を実施したセクションである。特にセクション６は、型枠背面の吹付けをおこなった際のはね返った埋め戻し材の回収（リバウンド材の回収）が困難であったため、ロス率が減少する結果となった。セクション７、セクション８は、型枠を設置しながら吹付け作業を実施したため、型枠背面を吹付けする場面が存在したものの、型枠背面の埋め戻し体積がセクション６と比較して比較的小さく、その影響（はね返った埋め戻し材が回収できず堆積する影響）は小さかった。

表 5.1-49　各セクションのロス率一覧

	材料投入重量 (kg)	正味吹付け重量 (kg)	ロス率
地上における予備試験（その２）（設定含水比 14 %のケース）	1224.4	951.0	1.287
セクション１	6334.7	6173.0	1.026
セクション２	15214.0	13689.7	1.111
セクション３	9470.8	8308.1	1.140
セクション４	23972.8	22394.4	1.070
セクション５	16047.4	13542.6	1.185
セクション６	18073.6	16319.5	1.107
セクション７	11834.8	9115.8	1.298
セクション８	6996.5	5015.3	1.395

8)　吹付け試験中の品質管理結果について

①吹付け前の品質管理

吹付け前の埋め戻し材の品質管理として、赤外線水分計と乾燥炉による 2 種類の含水比測定を行った。図 5.1-73 に試料採取の様子を、図 5.1-74 に含水比試験の様子を示す。採取した試料は含水比が変化しないように密閉可能な袋に保管し、順次含水比の測定をおこなった。赤外線水分計による測定結果が設定した範囲（14±２％）を外れた場合は、坑内への搬入を見送り、コンクリートプラントの内の地上仮置き場に仮置きした。その後、乾燥炉による測定結果が設定した範囲内の場合は坑内へ搬入し、外れた場合は処分した。

表 5.1-50～表 5.1-57 に各セクションの吹付け前の含水比測定の結果を示す。含水比測定の結果、設定した範囲を外れたものは合計 4 袋確認されたが、概ね設定した範囲内で含水比調整がされていることを確認した。

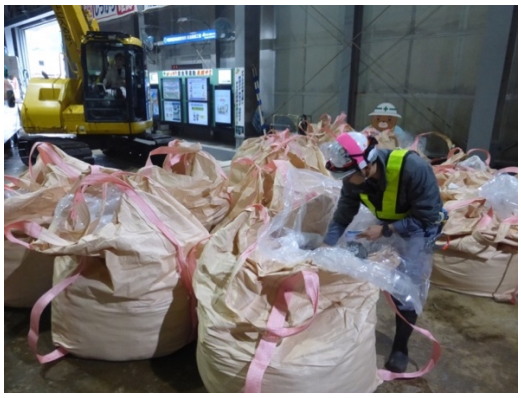


図 5.1-73　試料採取の様子

図 5.1-74　含水比測定の様子

表 5.1-50　吹付け前の含水比試験の結果（セクション１）

セクション１	含水比（炉乾燥法）(%)				赤外線水分計 (%)
No.	w-1	w-2	w-3	ave. W	w
Oct017	14.095	13.933	13.730	13.92	13.78
Oct018	13.755	13.894	13.841	13.83	13.71
Oct025	15.071	15.049	14.647	14.92	14.42
Oct026	14.405	14.317	14.369	14.36	14.13
Oct042	16.042	15.211	14.718	15.32	14.90
Oct062	14.263	14.331	14.222	14.27	14.09
Oct063	15.313	15.166	15.317	15.27	15.02
Oct065	13.652	13.641	13.626	13.64	13.44
Oct089	13.327	13.806	13.460	13.53	13.37
Oct095	14.117	14.155	14.116	14.13	13.78
Oct113	13.613	13.501	13.453	13.52	13.64

表 5.1-51　吹付け前の含水比試験の結果（セクション２）

セクション２	含水比（炉乾燥法）(%)				赤外線水分計 (%)
No.	w-1	w-2	w-3	ave. W	w
Oct021	14.853	15.061	15.145	15.02	14.96
Oct022	15.049	14.980	15.120	15.05	15.06
Oct031	14.007	13.954	13.859	13.94	13.92
Oct051	14.215	14.160	14.103	14.16	13.92
Oct052	15.283	15.180	15.140	15.20	16.09
Oct071	14.232	14.135	14.160	14.18	14.09
Oct076	13.891	14.028	14.050	13.99	13.92
Oct083	13.507	13.666	13.793	13.66	13.01
Oct084	13.770	13.796	13.661	13.74	13.82
Oct090	13.278	13.317	13.305	13.30	13.49
Oct091	13.781	13.728	13.659	13.72	13.88
Oct093	14.002	15.129	13.455	14.20	14.64
Oct094	13.465	13.612	13.535	13.54	13.33
Oct096	14.174	14.253	14.016	14.15	13.96
Oct097	14.061	13.715	13.564	13.78	14.18
Oct099	14.468	14.423	14.485	14.46	13.97
Oct101	13.422	13.580	13.437	13.48	13.38
Oct102	13.579	13.514	13.552	13.55	13.13
Oct105	14.096	13.906	14.207	14.07	14.00
Oct107	13.698	13.880	13.227	13.60	14.46
Oct114	13.784	13.700	13.694	13.73	13.61
Oct116	14.407	14.289	14.412	14.37	14.21
Oct120	14.631	14.090	14.402	14.37	14.32
Oct121	14.193	14.100	14.097	14.13	13.99
Oct122	15.947	16.055	15.373	15.79	15.54
Oct125	14.136	14.310	13.963	14.14	14.40

表 5.1-52　吹付け前の含水比試験の結果（セクション３）

セクション３	含水比（炉乾燥法）(%)				赤外線水分計 (%)
No.	w-1	w-2	w-3	ave. W	w
Oct058	14.371	14.296	14.246	14.30	13.92
Oct061	14.206	14.208	14.273	14.23	14.06
Oct073	14.739	14.930	14.273	14.65	14.76
Oct074	14.807	14.503	14.574	14.63	14.81
Oct082	14.136	14.195	14.395	14.24	14.48
Oct087	13.540	13.582	13.559	13.56	13.22
Oct088	13.960	13.957	13.958	13.96	13.64
Oct104	13.621	13.463	13.483	13.52	13.38
Oct119	13.839	13.753	13.629	13.74	13.58
セクション４、セクション５					
Oct011	14.986	14.745	14.625	14.79	14.57
Oct028	13.882	13.894	13.792	13.86	13.58
Oct030	15.162	15.311	15.074	15.18	14.89
Nov106	14.656	14.769	14.700	14.71	14.38
Nov109	14.885	15.040	15.005	14.98	15.46
Nov115	15.001	15.027	15.017	15.02	14.78
Nov118	15.547	15.482	15.714	15.58	14.82
Nov122	15.150	15.219	15.138	15.17	14.85

表 5.1-53　吹付け前の含水比試験の結果（セクション４）

セクション４	含水比（炉乾燥法）(%)				赤外線水分計 (%)
No.	w-1	w-2	w-3	ave. W	w
Oct005	14.231	14.603	14.237	14.36	13.96
Oct007	13.505	13.656	13.531	13.56	13.58
Oct014	13.724	13.781	13.788	13.76	13.65
Oct015	13.522	13.570	13.383	13.49	13.62
Oct027	14.145	13.971	14.151	14.09	14.34
Oct032	14.631	15.031	14.888	14.85	14.57
Oct037	14.446	14.473	14.599	14.51	14.84
Oct041	15.294	15.882	15.340	15.51	15.46
Oct050	15.083	14.591	14.644	14.77	14.46
Oct053	14.589	14.447	14.585	14.54	14.56
Oct054	15.266	15.987	15.241	15.50	14.86
Oct055	14.485	13.601	14.122	14.07	14.32
Oct057	14.308	14.092	14.110	14.17	14.10
Oct059	14.462	14.124	14.060	14.22	14.18
Oct060	14.384	14.357	14.358	14.37	14.44
Oct064	15.389	15.607	15.469	15.49	15.47
Oct066	13.776	13.729	13.714	13.74	13.91
Oct072	14.399	14.338	14.413	14.38	13.75
Oct075	13.922	13.929	14.061	13.97	13.49
Oct081	13.781	14.014	14.431	14.08	13.84
Oct085	13.692	13.706	13.806	13.73	13.33
Oct086	13.421	13.735	13.474	13.54	13.25
Oct092	13.812	13.742	13.582	13.71	13.70
Oct098	14.288	14.196	14.239	14.24	13.84
Oct100	14.668	14.626	15.002	14.77	14.19
Oct103	13.544	13.429	13.523	13.50	13.25
Oct106	13.851	13.933	13.913	13.90	13.90
Oct108	13.319	13.472	13.355	13.38	13.26
Oct109	14.259	14.220	14.118	14.20	14.00
Oct110	14.159	14.111	14.253	14.17	13.96
Oct111	14.249	14.378	14.133	14.25	14.34
Oct112	15.223	14.791	15.069	15.03	15.13
Oct115	14.428	14.730	15.112	14.76	14.16
Oct117	13.982	13.703	13.756	13.81	14.08
Oct118	13.171	13.227	13.107	13.17	13.46
Oct123	13.591	13.564	13.790	13.65	13.52
Oct124	14.164	14.245	14.225	14.21	13.65
Oct126	15.441	15.508	14.752	15.23	14.81
Oct127	14.971	14.933	14.915	14.94	14.93
Oct128	15.236	15.178	15.292	15.24	15.22
Nov020	13.942	14.092	14.001	14.01	14.06

表 5.1-54　吹付け前の含水比試験の結果（セクション５）

セクション５	含水比（炉乾燥法）(%)				赤外線水分計 (%)
No.	w-1	w-2	w-3	ave. W	w
Oct003	14.929	14.969	14.897	14.93	14.65
Oct004	14.971	15.013	14.884	14.96	14.82
Oct008	13.550	13.623	13.650	13.61	13.91
Oct009	14.342	14.630	14.829	14.60	14.22
Oct012	14.817	14.817	14.820	14.82	14.81
Oct013	14.333	14.251	14.301	14.29	13.43
Oct019	14.469	14.111	13.965	14.18	14.00
Oct023	14.384	14.553	14.570	14.50	14.32
Oct024	14.420	14.403	14.397	14.41	14.69
Oct033	14.928	14.838	14.838	14.87	15.15
Oct034	15.286	14.919	14.831	15.01	15.18
Oct035	15.417	15.480	15.372	15.42	15.11
Oct038	14.674	14.774	14.472	14.64	14.34
Oct039	13.869	13.888	13.902	13.89	13.65
Oct040	13.997	13.922	14.164	14.03	13.65
Oct043	14.374	14.355	14.396	14.38	14.18
Oct044	14.485	14.638	14.631	14.58	14.23
Oct047	13.997	14.076	13.961	14.01	14.21
Oct048	14.672	14.602	14.643	14.64	14.35
Oct056	14.657	14.637	15.492	14.93	14.14
Oct067	14.078	13.963	14.251	14.10	13.58
Oct068	13.936	13.586	13.627	13.72	13.88
Oct069	14.088	14.236	14.141	14.15	14.27
Oct070	14.342	15.221	14.830	14.80	14.10
Oct077	13.643	13.744	13.756	13.71	13.49
Oct078	13.693	13.442	13.590	13.57	13.35
Oct079	13.689	13.536	13.641	13.62	13.51
Oct080	14.495	14.401	14.127	14.34	14.04

表 5.1-55　吹付け前の含水比試験の結果（セクション６）

セクション６	含水比（炉乾燥法）(%)				赤外線水分計(%)
No.	w-1	w-2	w-3	ave. W	w
Oct006	13.992	14.150	14.064	14.07	13.73
Oct010	14.025	14.056	14.062	14.05	14.21
Oct016	13.519	13.494	13.588	13.53	13.05
Oct029	14.662	14.634	14.623	14.64	14.78
Oct036	16.009	15.754	15.607	15.79	15.59
Oct045	14.640	14.598	14.299	14.51	14.51
Oct049	13.638	13.737	13.669	13.68	13.51
Nov017	14.413	14.429	14.452	14.43	14.46
Nov065	13.977	14.113	14.098	14.06	14.17
Nov071	14.829	14.754	14.690	14.76	14.34
Nov072	15.030	14.935	14.756	14.91	14.74
Nov075	14.698	14.693	14.700	14.70	14.73
Nov086	14.797	14.800	14.559	14.72	14.36
Nov089	14.595	14.697	14.691	14.66	14.46
Nov090	14.864	14.778	14.747	14.80	14.74
Nov091	14.701	14.495	14.567	14.59	14.26
Nov092	14.931	14.892	14.592	14.81	14.59
Nov093	14.928	14.879	14.896	14.90	14.93
Nov095	14.771	14.844	14.922	14.85	14.72
Nov099	15.464	15.379	15.199	15.35	15.29
Nov102	14.673	14.523	14.625	14.61	14.44
Nov105	15.314	15.257	15.293	15.29	15.34
Nov107	14.828	14.761	14.790	14.79	14.44
Nov108	14.700	14.665	14.627	14.66	15.02
Nov110	14.875	15.158	15.080	15.04	14.97
Nov111	15.243	15.145	15.247	15.21	15.06
Nov112	15.150	15.219	15.138	15.17	14.85
Nov113	15.058	14.955	14.816	14.94	14.96
Nov114	14.829	14.744	14.700	14.76	14.50
Nov116	15.161	15.239	15.271	15.22	15.37
Nov117	15.466	15.562	15.385	15.47	15.43
Nov119	14.057	14.231	14.117	14.13	13.95
Nov120	14.185	14.195	14.258	14.21	13.95
Nov121	14.993	15.181	15.136	15.10	14.89

表 5.1-56　吹付け前の含水比試験の結果（セクション７）

セクション７	含水比（炉乾燥法）(%)				赤外線水分計 (%)
No.	w-1	w-2	w-3	ave. W	w
Oct020	14.068	14.036	14.129	14.08	13.97
Nov069	14.726	14.620	14.612	14.65	14.64
Nov070	14.787	14.554	14.626	14.66	14.22
Nov085	14.769	14.781	14.865	14.80	14.82
Nov088	14.656	14.582	14.621	14.62	14.89
Nov097	15.028	15.000	15.198	15.08	15.30
Nov098	15.110	15.021	14.968	15.03	15.14
Nov100	15.331	15.511	15.298	15.38	15.47
Nov103	14.684	14.613	14.658	14.65	14.63
Nov104	14.870	14.775	14.729	14.79	14.51
Nov123	13.574	13.612	13.640	13.61	13.53
Nov124	13.867	13.657	13.902	13.81	13.68
Nov125	14.914	14.875	14.879	14.89	15.07
Nov126	15.020	15.177	15.013	15.07	14.98

表 5.1-57　吹付け前の含水比試験の結果（セクション８）

セクション８	含水比（炉乾燥法）(%)				赤外線水分計 (%)
No.	w-1	w-2	w-3	ave. W	w
Nov063	14.385	14.438	14.466	14.43	14.61
Nov064	14.611	14.587	14.549	14.58	14.36
Nov066	14.070	13.997	14.047	14.04	13.86
Nov067	14.548	14.518	14.492	14.52	14.65
Nov073	14.800	14.790	14.749	14.78	14.71
Nov074	14.874	14.713	14.805	14.80	14.76
Nov076	14.758	14.722	14.716	14.73	14.61
Nov077	14.448	14.500	14.448	14.47	14.78
Nov078	14.330	14.385	14.411	14.38	14.46
Nov081	14.584	14.531	14.545	14.55	14.44
Nov082	15.143	14.799	14.634	14.86	14.68
Nov101	14.354	14.420	14.277	14.35	14.42

②吹付け後の埋め戻し材の品質確認

a) 吹付け後の試料採取

各セクションの吹付け終了後、乱さないように採取した試料を用いて、含水比測定と湿潤密度試験（パラフィン法）を実施した。図 5.1-75 に品質確認試料の採取箇所を示す。試料は、金属製のパテナイフとハンマーを使用して乱さないように採取し、ラップフィルムと密閉可能な袋で養生後、コンテナボックスに入れてキブルにて地上に搬出した。また、試料を採取する際に埋め戻し材の上に乗る時は、ベニヤ合板を敷き直接人が乗ることによる埋め戻し材の密度への影響を小さくした。図 5.1-76 に吹付け後の品質確認試料採取の様子を、図 5.1-77 に湿潤密度試験（パラフィン法）の様子を示す。

図 5.1-78～図 5.1-85 に各セクションの詳細な試料採取箇所を示す。品質確認試料の採取箇所は、埋め戻し領域全域の 3 次元的な密度分布評価の信頼性を上げるため、計画時の 40 箇所から 50 箇所に変更し、埋め戻し箇所全体からバランスよく採取するようにした（図 5.1-86、そのうち側溝部分 3 箇所）。

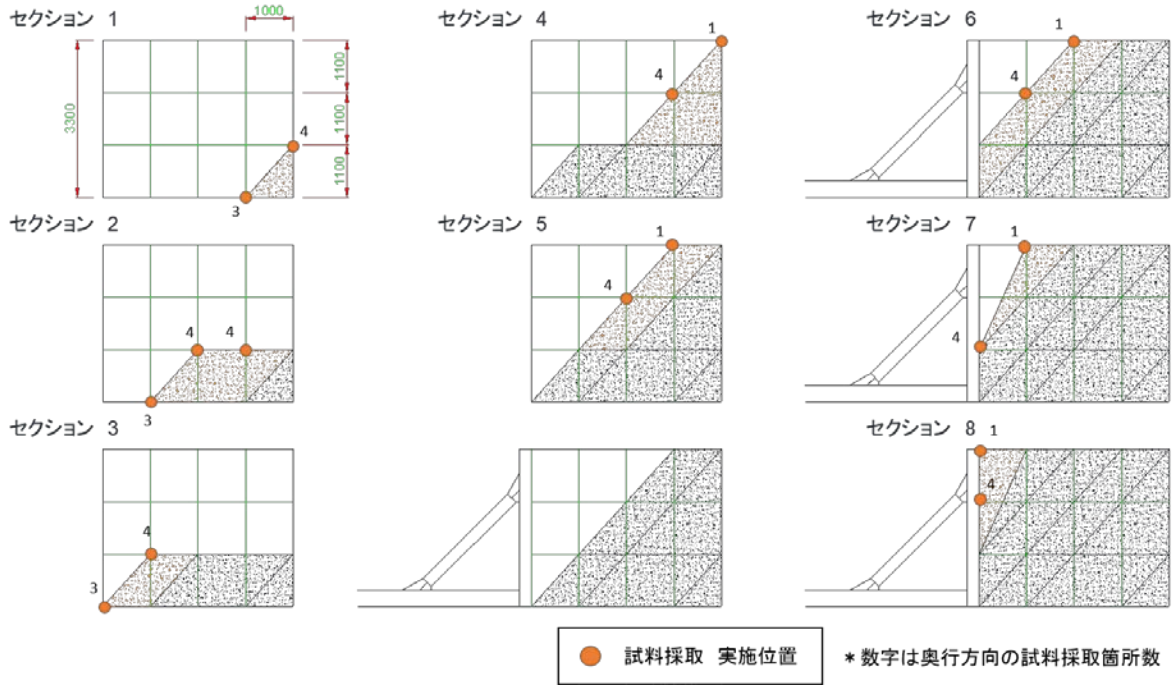


図 5.1-75　吹付け後の品質確認試料の採取箇所

図 5.1-76　吹付け後の試料採取の様子

図 5.1-77　湿潤密度試験の様子

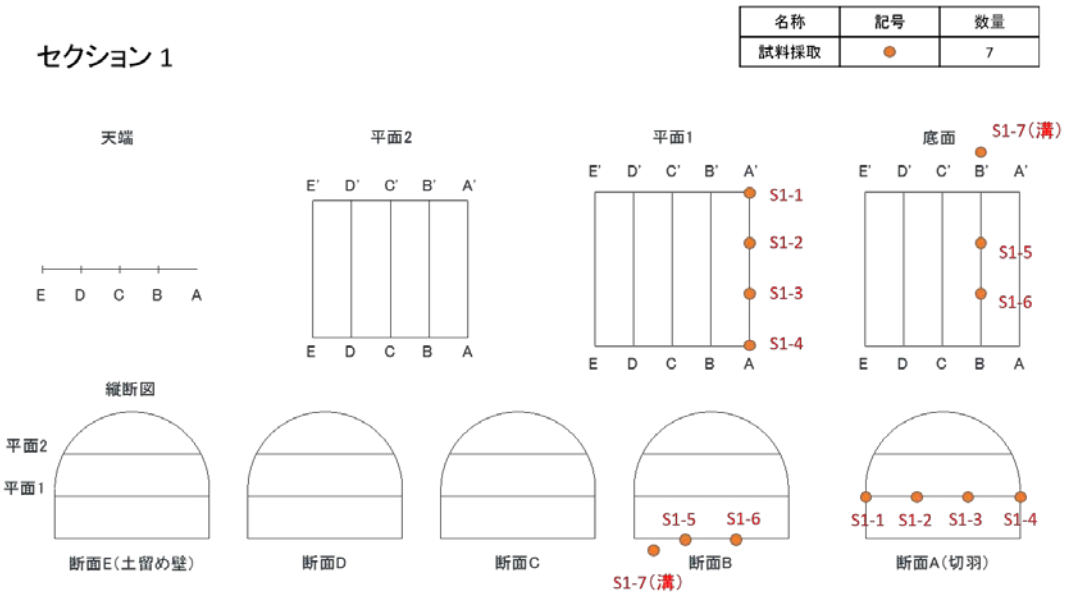


図 5.1-78　試料採取箇所詳細（セクション１）

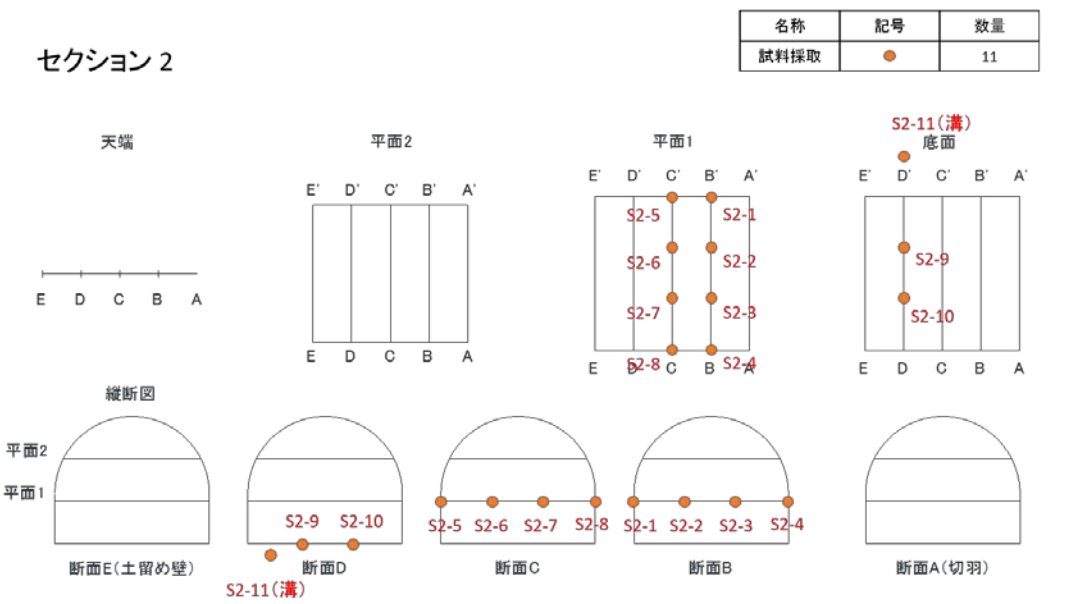


図 5.1-79　試料採取箇所詳細（セクション２）

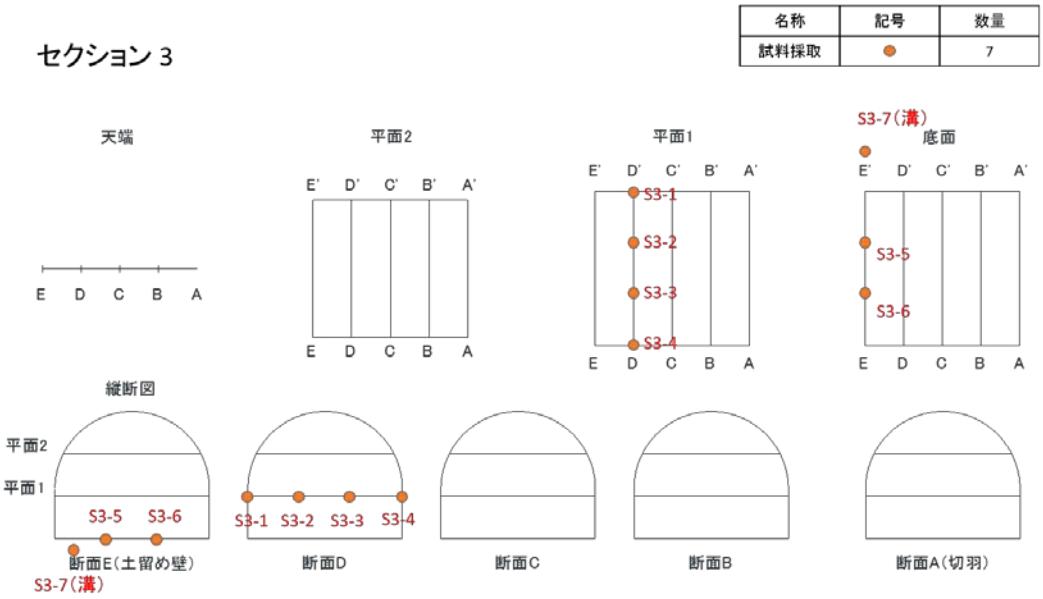


図 5.1-80　試料採取箇所詳細（セクション３）

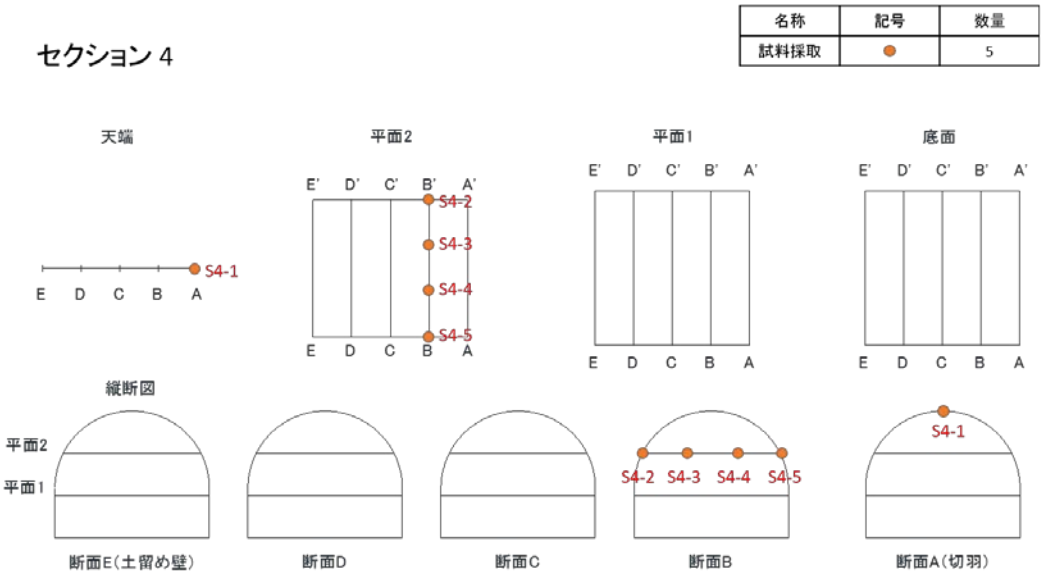


図 5.1-81　試料採取箇所詳細（セクション４）

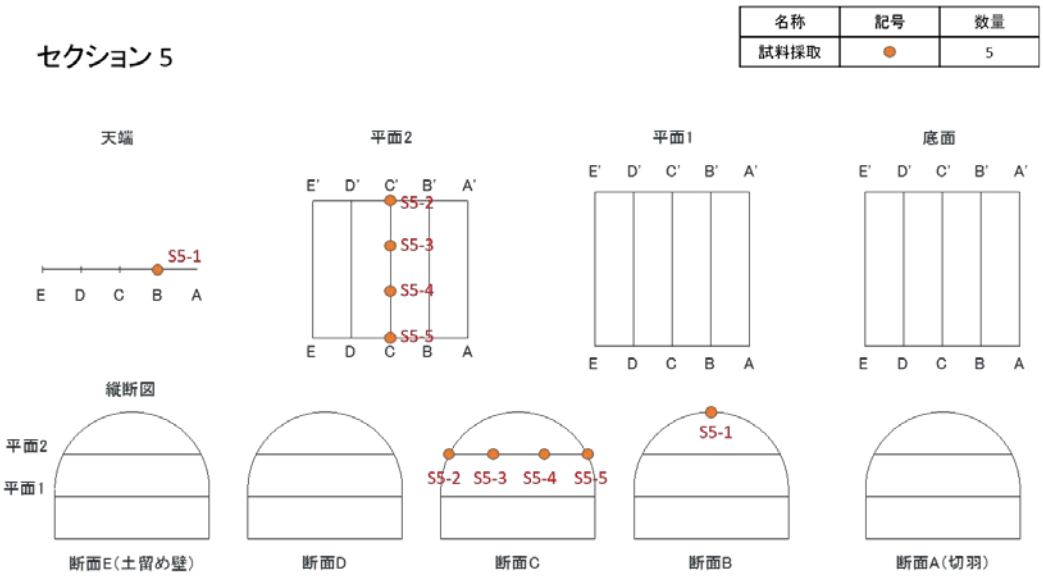


図 5.1-82　試料採取箇所詳細（セクション５）

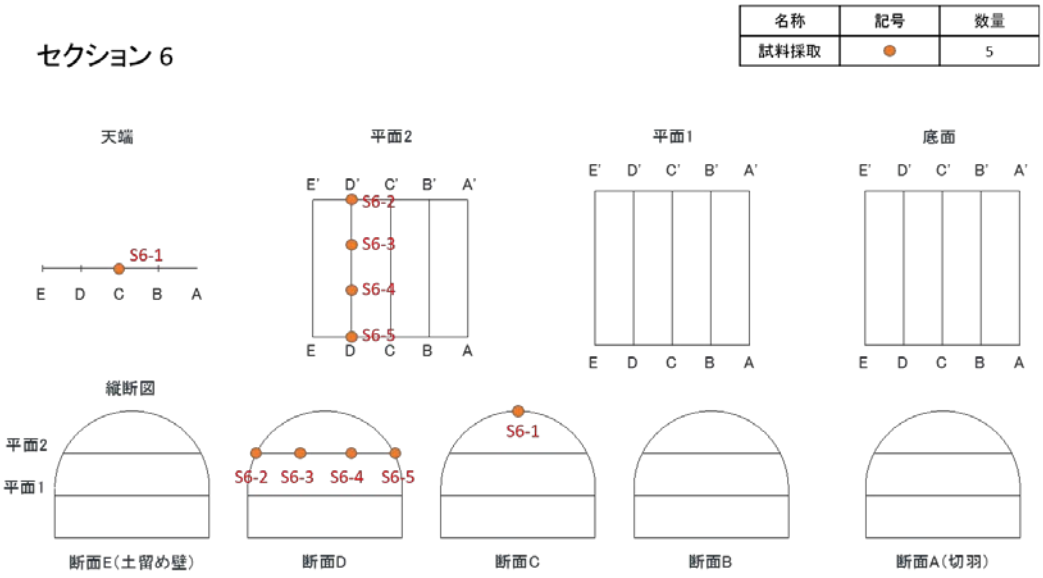


図 5.1-83　試料採取箇所詳細（セクション６）

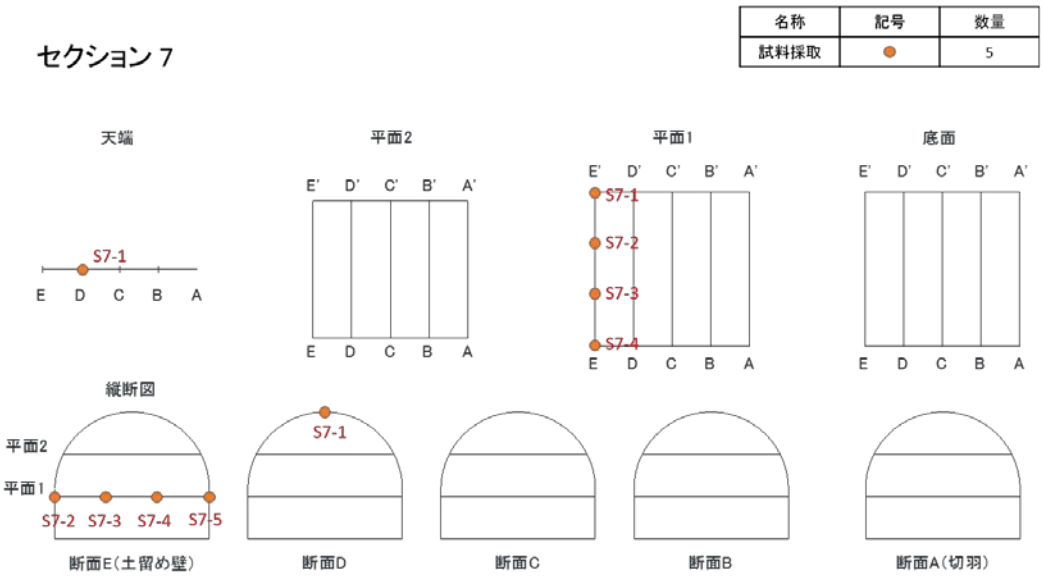


図 5.1-84　試料採取箇所詳細（セクション７）

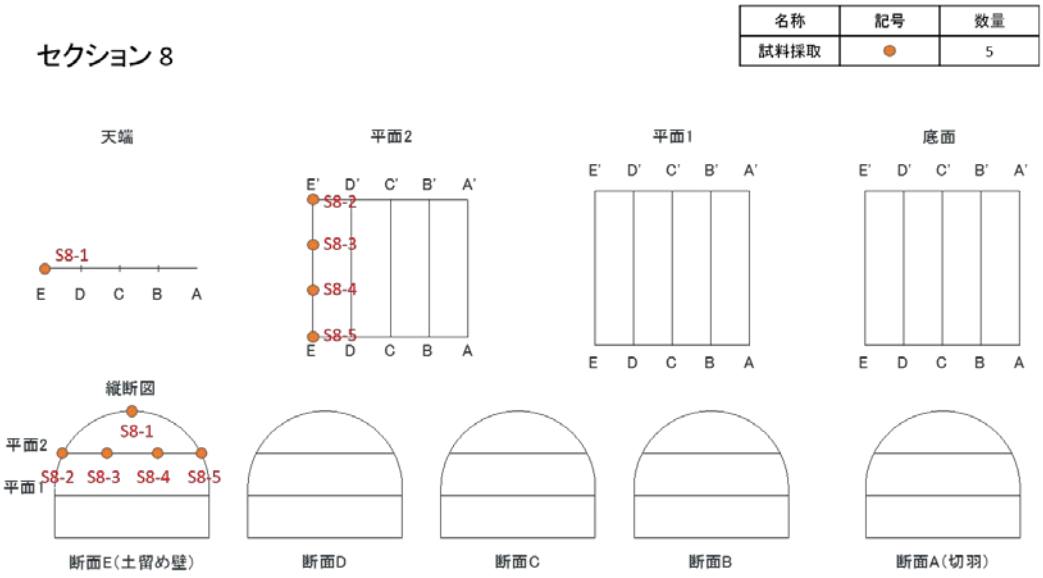


図 5.1-85　試料採取箇所詳細（セクション８）

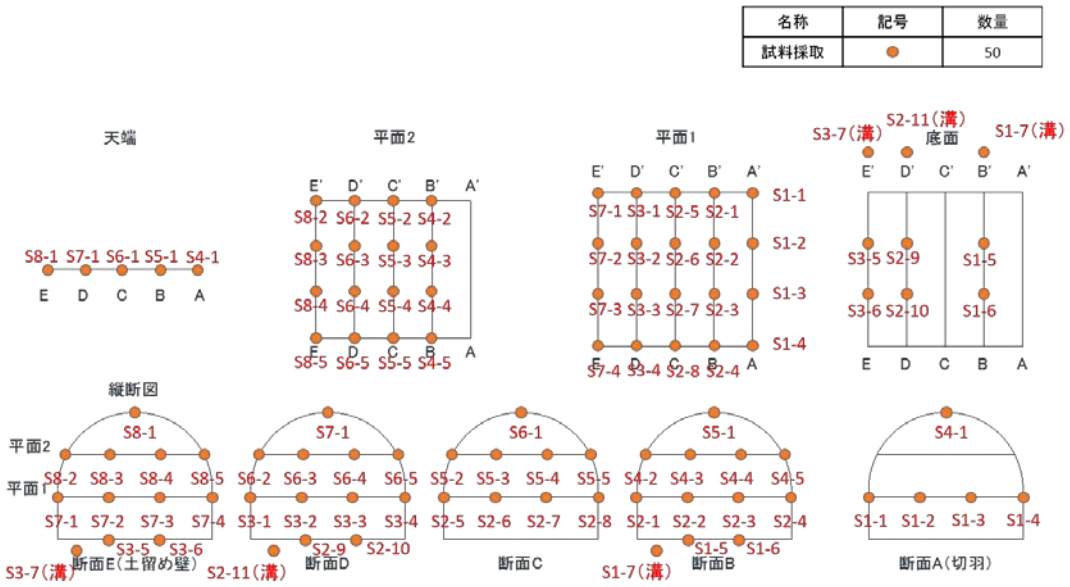


図 5.1-86　試料採取箇所詳細（全セクション）

b) 吹付け後に採取した試料の測定結果

表 5.1-58 に、試料採取後の土質試験結果に基づき算定した各セクションの有効粘土密度を示す。なお、算定はこれまでの整理と同様、式 5.1-1 を用いている。

セクション１は、地上における予備試験（その２）における N-14（設定含水比 14 %のケース）と比較して、有効粘土密度が低い値となった。これは、作業員の施工試験に対する慣れに加えて、坑内作業に対する制約が要因として挙げられる。セクション１では、エンジンコンプレッサ設置箇所の都合により坑内環境の悪化がみられたため、作業の一時中断を余儀なくされ、結果的に十分な吐出量を確保できなかったため、有効粘土密度は試料採取箇所全体で低くなった。しかし、平均で 0.455 Mg/m^3 であり当初の設定仕様を満足していることは確認した。

セクション２では、エンジンコンプレッサの設置箇所を改善し、また当初指定された電力量の制限について増加承諾を得て、電動モータ式コンプレッサを 2 台追加した。そのため、十分な吐出量を確保できたことにより「地上における予備試験（その２）」における N-14 と同程度の平均で 0.524 Mg/m^3 となった。また、吹付け後の埋め戻し材の含水比が吹付け前と同程度であることから、湧水が発生している坑道壁面から離れたことにより湧水の浸潤の影響が小さくなったと考えられる。

セクション３は、設備変更および作業員の施工試験に対する慣れにより、有効粘土密度は「地上における予備試験（その２）」における N-14 より高く、平均で 0.563Mg/m3 となった。

セクション４は、坑道の天端付近の埋め戻しであり、マテリアルホースと吹付けノズルを吹付けロボットアームの稼働範囲内で最大限上昇させた後、吹付けノズルを斜め上向きにして吹付け作業を実施している。このため、吹付けに際するエネルギーロスが増加し吹付けノズル付近で埋め戻し材の目詰まりが発生し、一部では団粒化した状態での吹付けとなった。そのため、セクション４の中でも天端付近で試料採取した「セクション 4-1」は他の採取箇所と比較して有効粘土密度が低い値となったと考えられるが、平均で 0.474 Mg/m^3 であり仕様を満足していることを確認した。

セクション５は、吹付けロボットと吹付け面との距離が短くなったため、吹付け作業が容易になったことに加え、作業員の天端付近の吹付けに対する慣れによりセクション４と比較して有効粘土密度は高くなったと考えられ、平均で 0.518 Mg/m^3 となった。

セクション６は、土留め壁の支保工および型枠が設置されたことにより、型枠背面は人力吹付け、天端付近は支保工の間から吹付けロボットにて吹付けをおこなった。天端付近の吹付けでは、支保工が無い状態と比較して吹付けが困難であったことにより吹付け後の有効粘土密度が低い値になったと考えられるが、平均で 0.506 Mg/m^3 であり仕様を満足していることを確認した。

セクション７、８は、土留め壁支保工の斜材の設置により吹付けロボットによる吹付け作業が困難であったため、人力吹付けをおこなった。型枠に計測器の配線をした「セクション 7-3」は手で埋め戻しをおこなったため、特に有効粘土密度が低い値になったと考えられるが、セクション７は平均で 0.510 Mg/m^3、セクション８は平均で 0.490 Mg/m^3 であり仕様を満足していることを確認した。

表 5.1-58　各セクションの有効粘土密度一覧

名称		有効粘土密度(Mg/m^3)	
		試料採取	Ave.
セクション1	セクション1-1	0.424	0.445
	セクション1-2	0.445	
	セクション1-3	0.487	
	セクション1-4	0.444	
	セクション1-5	0.421	
	セクション1-6	0.446	
セクション2	セクション2-1	0.445	0.524
	セクション2-2	0.542	
	セクション2-3	0.483	
	セクション2-4	0.508	
	セクション2-5	0.516	
	セクション2-6	0.574	
	セクション2-7	0.532	
	セクション2-8	0.549	
	セクション2-9	0.516	
	セクション2-10	0.571	
セクション3	セクション3-1	0.603	0.563
	セクション3-2	0.532	
	セクション3-3	0.525	
	セクション3-4	0.594	
	セクション3-5	0.571	
	セクション3-6	0.553	
セクション4	セクション4-1	0.420	0.474
	セクション4-2	0.482	
	セクション4-3	0.498	
	セクション4-4	0.499	
	セクション4-5	0.472	
セクション5	セクション5-1	0.521	0.518
	セクション5-2	0.530	
	セクション5-3	0.481	
	セクション5-4	0.514	
	セクション5-5	0.543	
セクション6	セクション6-1	0.550	0.506
	セクション6-2	0.535	
	セクション6-3	0.503	
	セクション6-4	0.513	
	セクション6-5	0.431	
セクション7	セクション7-1	0.529	0.510
	セクション7-2	0.528	
	セクション7-3	0.412	
	セクション7-4	0.537	
	セクション7-5	0.543	
セクション8	セクション8-1	0.511	0.490
	セクション8-2	0.460	
	セクション8-3	0.497	
	セクション8-4	0.463	
	セクション8-5	0.519	

なお、品質確認試料の採取や計測器の設置作業は、埋め戻し材上にベニヤ合板を敷いておこなった。このため、ベニヤ合板を敷いた埋め戻し材の上に人が乗ることによる埋め戻し材の密度への影響を調査した。図 5.1-87 に密度への影響調査の様子を示す。埋め戻し材の上に人が乗った箇所と乗っていない箇所を試料採取し、湿潤密度試験（パラフィン法）によって密度を求めた。表 5.1-59 に湿潤密度試験による密度の比較を示す。同表より、人が乗っていない箇所と人が乗った箇所の密度は大きく変わらないことから、本試験においては、試料採取自体が、埋め戻し材の密度測定結果へ与える影響は小さかったと考えられる。

図 5.1-87　埋め戻し材の密度への影響調査の様子

表 5.1-59　湿潤密度試験による密度の比較

	湿潤密度 (Mg/m^3)	含水比 (wt%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	飽和度 (%)	有効粘土密度 (Mg/m^3)
人が乗っていない箇所	1.913	14.26	1.675	63.34	0.534
人が乗った箇所	1.931	14.54	1.686	65.81	0.542

9)　室内試験との比較による埋め戻し領域の施工品質に関する検討

吹付け後の埋め戻し材の含水比、乾燥密度を、前出の埋め戻し材 B（ベントナイト+砂）の締固め曲線に重ねて表示すると図 5.1-88～図 5.1-95 のようになる。なお、図中には吹付け前の設定含水比（14±2 %）を併記した。

全般的な傾向としては、吹付け後の埋め戻し材の含水比は、埋め戻し前の設定含水比（14±2 %）の範囲内に概ね収まっており、乾燥密度は、室内締固め試験における締固めエネルギーが 0.4Ec～0.6Ec に相当する範囲となった。ここで、0.4Ec の曲線を下回るケースを、坑内環境に対する制約を除き（セクション１）、吹付け状況から考察すると、セクション１、４、６、８のように吹付け条件が変化する時（上向き吹付け、型枠背面）や側溝、壁面付近の吹付けの時に密度が低くなる傾向がみられる。

一方で、0.6Ec の曲線を上回るケースを吹付け状況から考察するとセクション２、３、５、７のように吹付け条件が前セクションと同じ時や吹付けノズルの角度が水平あるいは斜め下方向で吹付けをおこなっている時に密度が高くなる傾向がみられる。したがって、吹付け後の密度に与える要因としては、作業員の経験による吹付けノズルと吹付け面との距離・位置の微調整や、吹付け角度の影響が大きいと考えられる。

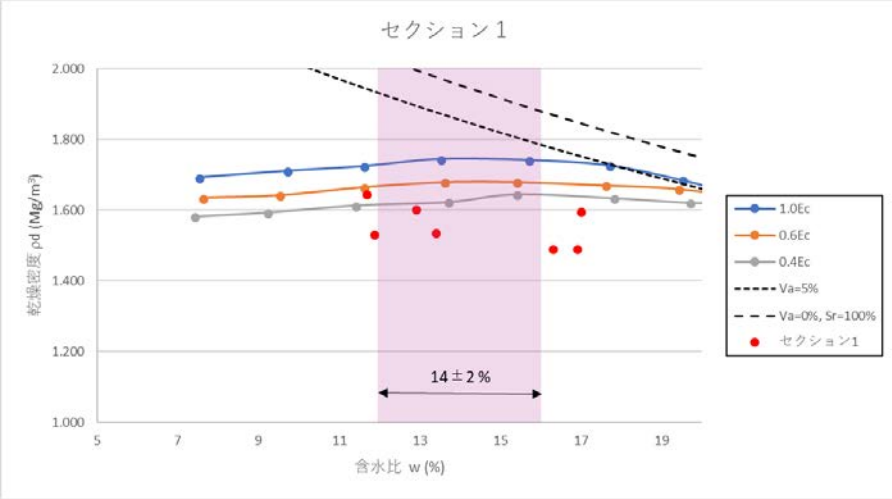


図 5.1-88　埋め戻し試験と室内試験の含水比・乾燥密度の比較（セクション１）

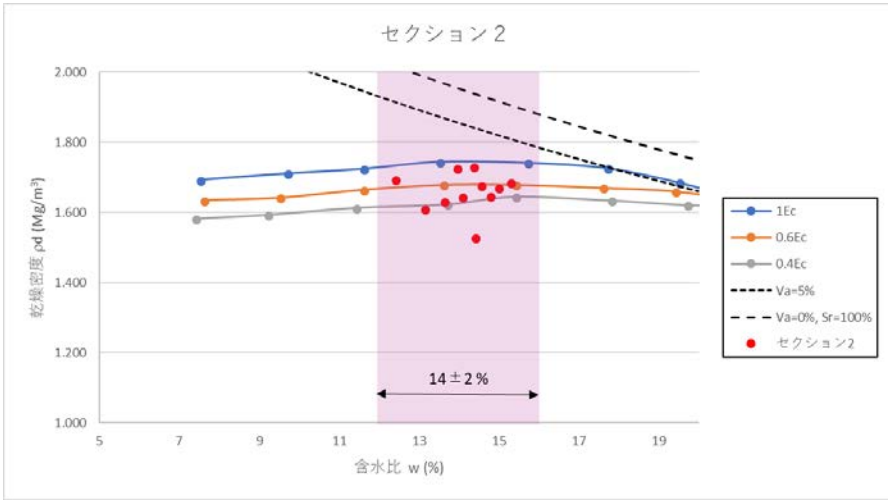


図 5.1-89　埋め戻し試験と室内試験の含水比・乾燥密度の比較（セクション２）

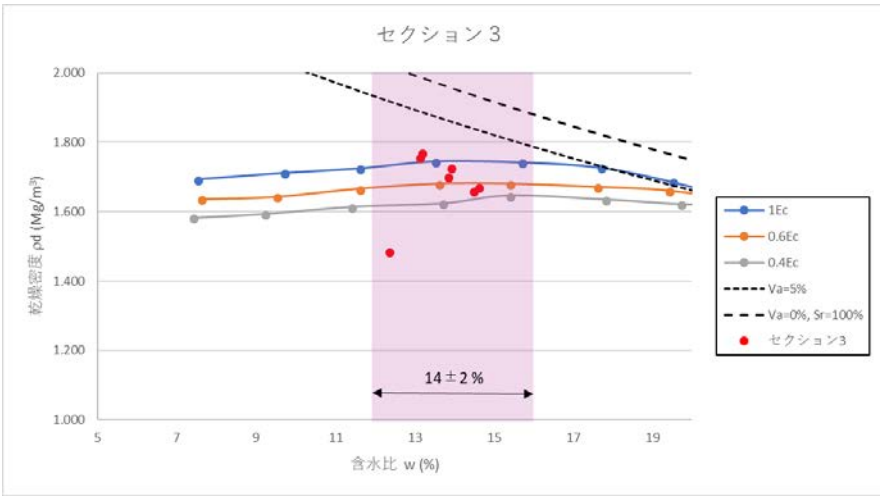


図 5.1-90　埋め戻し試験と室内試験の含水比・乾燥密度の比較（セクション３）

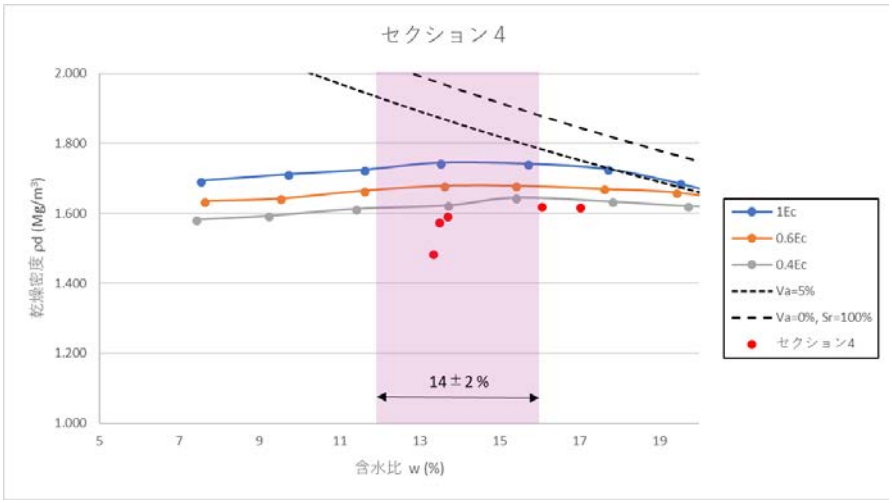


図 5.1-91　埋め戻し試験と室内試験の含水比・乾燥密度の比較（セクション４）

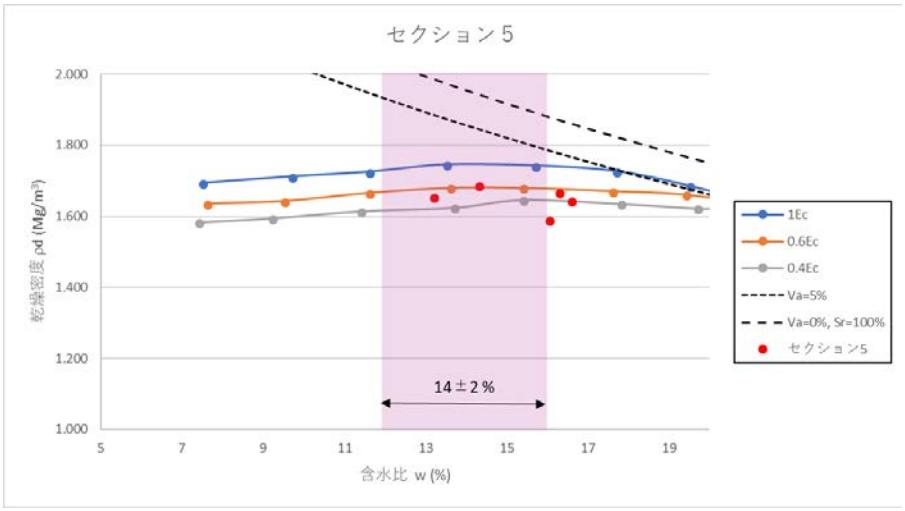


図 5.1-92　埋め戻し試験と室内試験の含水比・乾燥密度の比較（セクション５）

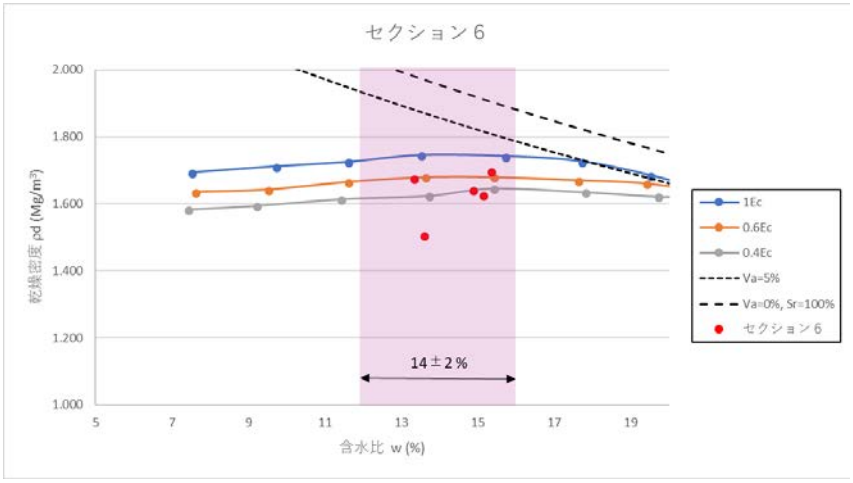


図 5.1-93　埋め戻し試験と室内試験の含水比・乾燥密度の比較（セクション６）

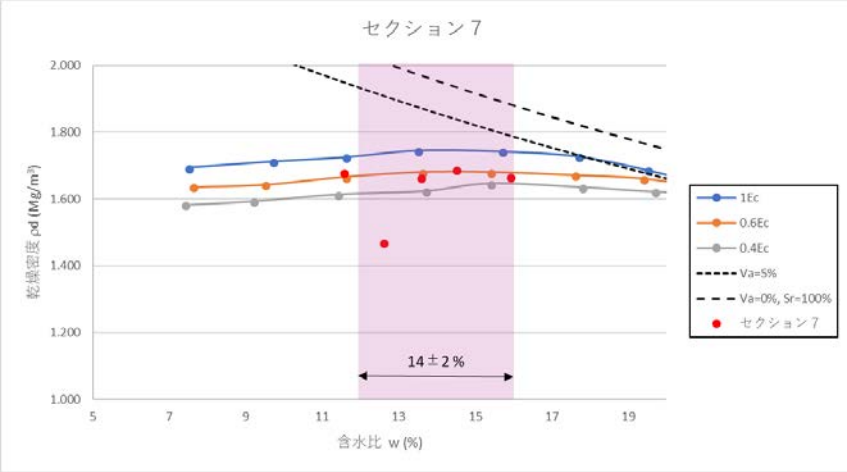


図 5.1-94　埋め戻し試験と室内試験の含水比・乾燥密度の比較（セクション７）

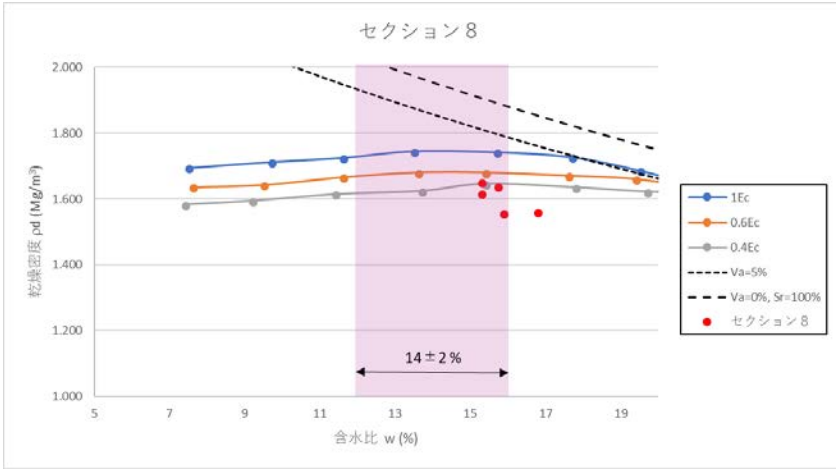


図 5.1-95　埋め戻し試験と室内試験の含水比・乾燥密度の比較（セクション８）

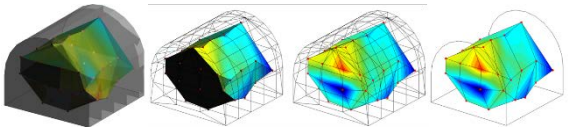
埋め戻し領域内の 3 次元的な密度分布を推定するため、試料採取位置の座標を指定しソリッドモデルを作成後、試料採取による計測値を入力することで 3 次元コンター図を作成した。なお、坑道境界付近での埋め戻し材の密度などのパラメータの推定はできないため、試料採取箇所に囲まれたエリア内でのみコンター図を作成している。

図 5.1-96 に 3 次元コンター図の作成概念図を示す。3 次元コンター図では、埋め戻し領域内部の含水比や有効粘土密度を明瞭に確認できないため、図 5.1-97 のように可視化する断面を選択し 2 次元コンター図によって比較をおこなった。ここで、2 次元コンター断面図は、a-a 断面（中心から手前に 1500mm）、b-b 断面（中心）、c-c 断面（中心から奥に 1500mm）とした。縦断図は A-A 断面（中心から左に 1500mm）、B-B 断面（中心）、C-C 断面（中心から右に 1500mm）とした。

図 5.1-98 に、選択した各断面における含水比の 2 次元コンター図を示す。これらの図より、含水比は、設備横坑の切羽側かつ左側で高い傾向がみられる。これは、図 5.1-99 に示すように、坑道湧水の発生箇所が切羽側かつ左側に集中しており、吹付け後の埋め戻し材に湧水が浸潤したことで含水比が高くなったと考えられる。

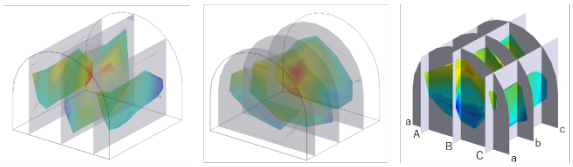
図 5.1-100 には、有効粘土密度の 2 次元コンター図を示す。同図より、有効粘土密度は、切羽

側で低い傾向がみられる。切羽付近の吹付けは、セクション１、セクション６であり、セクション１では、コンプレッサの吐出量不足により密度が低下したと考えられる。一方で、セクション６では、上向きの吹付けによるエネルギーロスによって密度が低下したと考えられる。



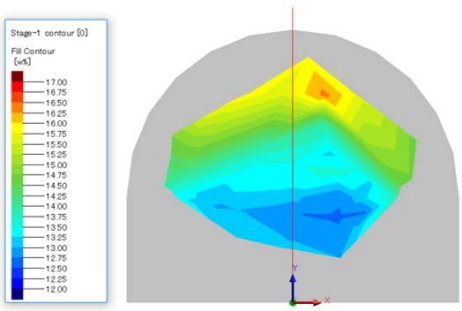
＊図中のコンター図はイメージ

図 5.1-96　3 次元コンター図の作成概念図

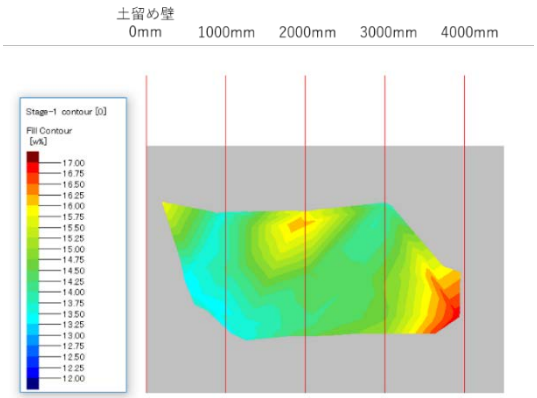


＊図中のコンター図はイメージ

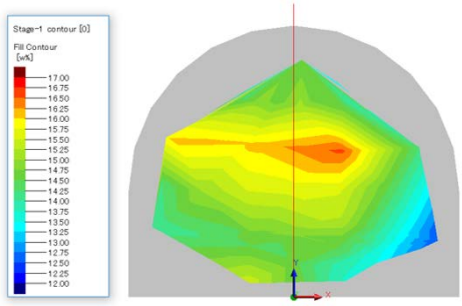
図 5.1-97　2 次元コンター図の作成概念図



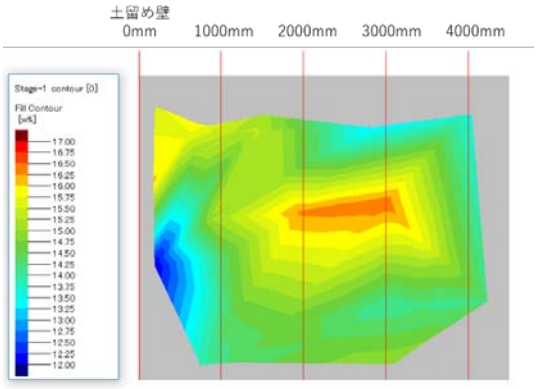
a-a 断面



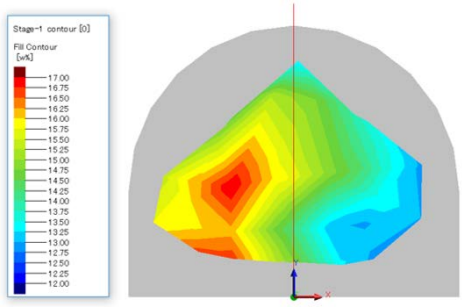
A-A 断面



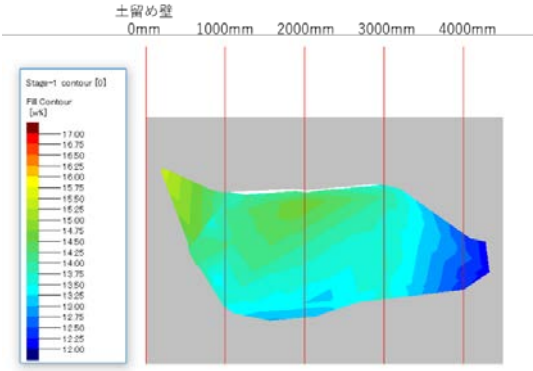
b-b 断面



B-B 断面



c-c 断面



C-C 断面

図 5.1-98　含水比の 2 次元コンター図（左：断面図、右：縦断図）

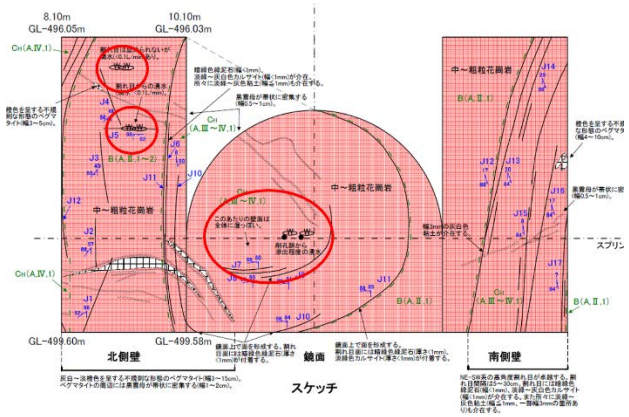
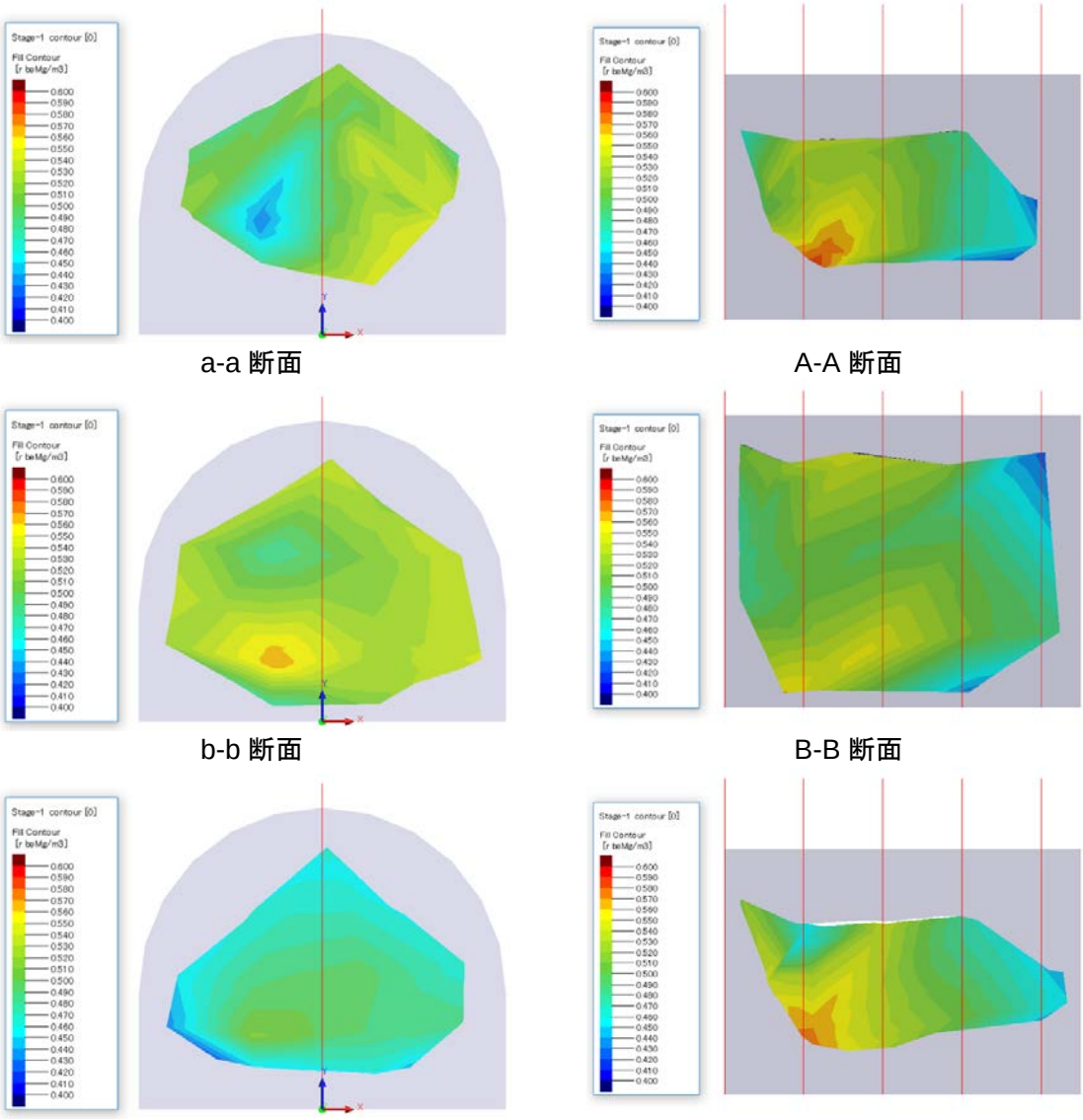


図 5.1-99　設備横坑切羽の地質状況



a-a 断面　　A-A 断面

b-b 断面　　B-B 断面

c-c 断面　　C-C 断面

図 5.1-100　有効粘土密度の 2 次元コンター図（左：断面図、右：縦断図）

10) 側溝の存在が埋め戻し材の密度へ及ぼす影響

坑道一部埋め戻し試験では、設備横坑内側溝は事前にコンクリートなどで埋め戻しをおこなわず、吹付け施工によって埋め戻しをおこなった。側溝部分の試料はセクション１、２、３で３箇所採取した。表 5.1-60 に側溝部分の品質確認結果を示す。側溝部分の有効粘土密度は側溝以外と比較して低い値となった。セクション１では、壁面からの湧水によって吹付け後の含水比が高くなっており、密度へ影響していることが考えられる。セクション２、３では、埋め戻し試験開始前に湧水によって柔らかくなった埋め戻し材を入念に除去してから埋め戻し試験をおこなったため、セクション１に比べて密度が高くなったと考えられる。

表 5.1-60　側溝部分の品質確認結果

No.	湿潤密度 ave. (Mg/m^3)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/m^3)	飽和度 (%)	有効粘土密度 (Mg/m^3)
S1-7	1.614	17.01	1.379	48.27	0.367
S2-7	1.922	14.98	1.672	66.30	0.532
S3-7	1.670	12.34	1.487	41.12	0.421

11) 3D スキャナの出来形計測と品質確認への適用性評価

吹付け作業終了後、3D スキャナを用いて設備横坑壁面および吹付け面を計測し、吹付け後の出来形計測とその結果に基づく埋め戻し材の品質管理手法としての適用性を検討した。以下に、3D スキャナの計測手法とデータ処理手法を示す。

①計測手法

a) 使用機器

出来形計測では、FARO 社製 Focus3D S120 を使用した。図 5.1-101 に FARO 社製 Focus3D S120 を示す。表 5.1-61 に Focus3D S120 の仕様を示す。

図 5.1-101　FARO 社製 Focus3D S120

表 5.1-61　Focus3D S120 の仕様

明瞭識別距離	153.49 m(503.58fr)
測定範囲	0.6 m～120 m
測定速度(点/秒)	122,000 / 244,000 / 488,000 / 976,000
測定誤差	±2 mm

b) 計測範囲

計測範囲は設備横坑（約 10 m）のうち褄部から約 4 m である。図 5.1-102 に出来形計測の範囲を示す。

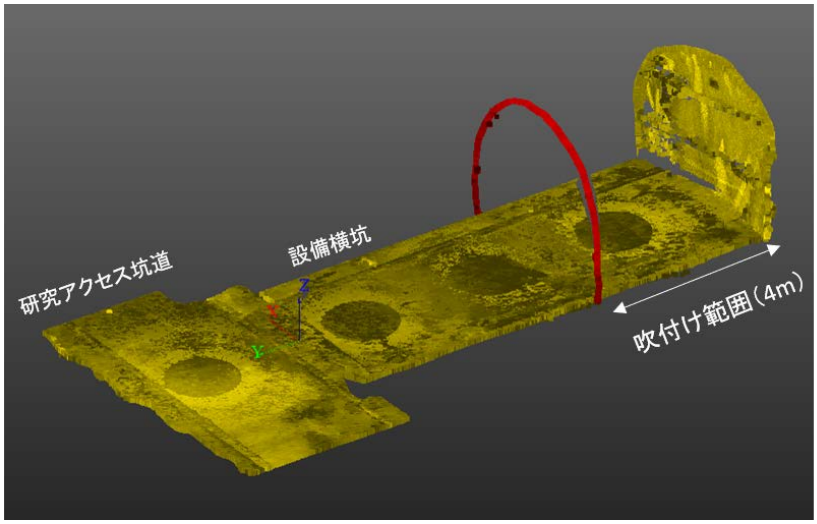


図 5.1-102　出来形計測の範囲

c) 点群密度と計測時間

点群密度は、使用する機械の仕様と設定により調整が可能であるが、最終的に体積を計算する際の精度に影響する。点群密度が高いほど精度よく体積の算出が可能であるが、そのぶん計測時間は長くなり、またデータ量は大きくなるため、データ処理に要する時間も長くなる。最も密となるよう設定して計測をおこなった場合の点群密度は、スキャナから 10 m 離れた位置で最大 1.6 mm ピッチとなる。しかしこの場合、1 回の計測時間は 60 分以上となり、かつデータ量も膨大となることから、本施工試験では現実的ではなかった。このため、今回の計測では、スキャナから 10 m 離れた位置で 6.4 mm ピッチとなるように点群密度を設定した。この場合、1 回の計測時間は約 9～10 分程度となり、施工サイクルの中で十分考慮できる範囲となった。この時、吹付け範囲の奥行き 4.0 m に対して埋め戻し終了位置の 1 m 手前から計測した場合、手前側は約 0.64 mm ピッチの点群、奥側は約 2.56 mm ピッチの点群となり、吹付け体積の計算でも十分な精度を得られると判断した。図 5.1-103 に、計測で得られる点群密度のイメージを示す。

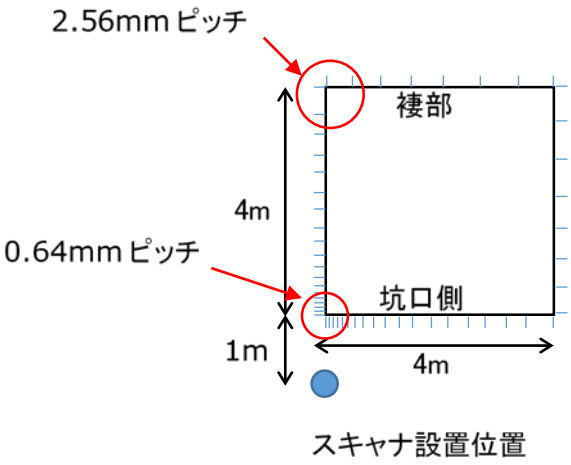


図 5.1-103　計測で得られる点群密度のイメージ
（四角形から伸びる青線が点の位置。1 箇所から計測した場合）

d) ターゲット（基準点）

3D スキャナによる計測は 1 日の吹付け作業終了のたびに計器を設置しておこなった。したがって、各計測間における座標系の統一を図るため、試験期間中はターゲットを使用した。使用したターゲットは平面ターゲット 4 枚と、球状ターゲット 4 個である。図 5.1-104 に平面ターゲットを、図 5.1-105 に球状ターゲットを示す。

図 5.1-104　平面ターゲット
（チェッカーボード）

図 5.1-105　球状ターゲット
（基準球：発泡スチロール球を加工、φ 150mm）

e) 3D スキャナとターゲットの設置位置

図 5.1-106 に 3D スキャナとターゲットの設置位置を示す。3D スキャナは原点から 1.5 m 付近に設置した。土留め壁設置後は支保工の影による影響を極力抑えるため、3D スキャナの設置位置を支保工に近づけて 2 か所以上から計測をおこなった。平面ターゲットと球状ターゲットは 3D スキャナから見て吹付けロボットなどの影にならず、機械などとの接触により変形・移動が生じない位置に設置した。平面ターゲットはアンカーボルトで壁面に固定し、球状ターゲットは、壁面と球体に取り付けたアンカーボルトによって計測をするたびに設置した。

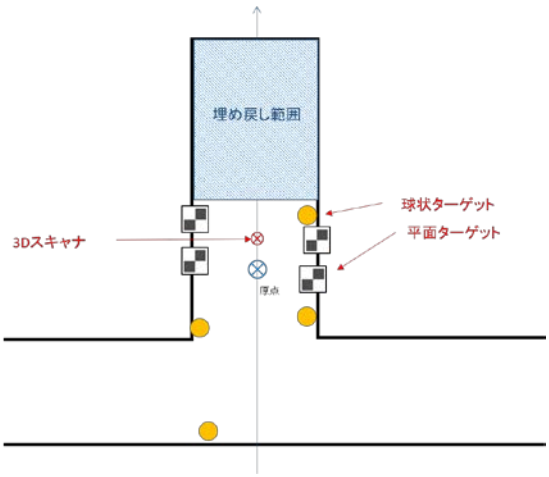


図 5.1-106　3D スキャナとターゲットの設置位置

f) 出来形計測・品質確認フロー

図 5.1-107 に出来形計測・品質確認フローを、図 5.1-108 に 3D スキャナによる計測の様子を示す。3D スキャナによる計測は、当初各セクションの吹き付け施工終了後のみ実施する予定であったが、正確な試料最終位置や壁面からの微量な湧水に伴う状態変化などによる影響についてのデータ取得という観点から、1 日の作業終了毎に実施する形に変更した。吹付け作業終了後、はね返り材を回収した後（試料採取前）におこなった。3D スキャナによって取得した点群データから吹付け試験の出来形を、断面法により吹付け体積を計算した。また、吹付け体積と正味吹付け重量から湿潤密度を、試料採取による吹付け後の含水比測定結果から乾燥密度と有効粘土密度を算出した。以下に正味吹付け重量の定義を示す。

正味吹付け重量 ＝ 材料投入重量－（はね返り重量＋ロス重量）

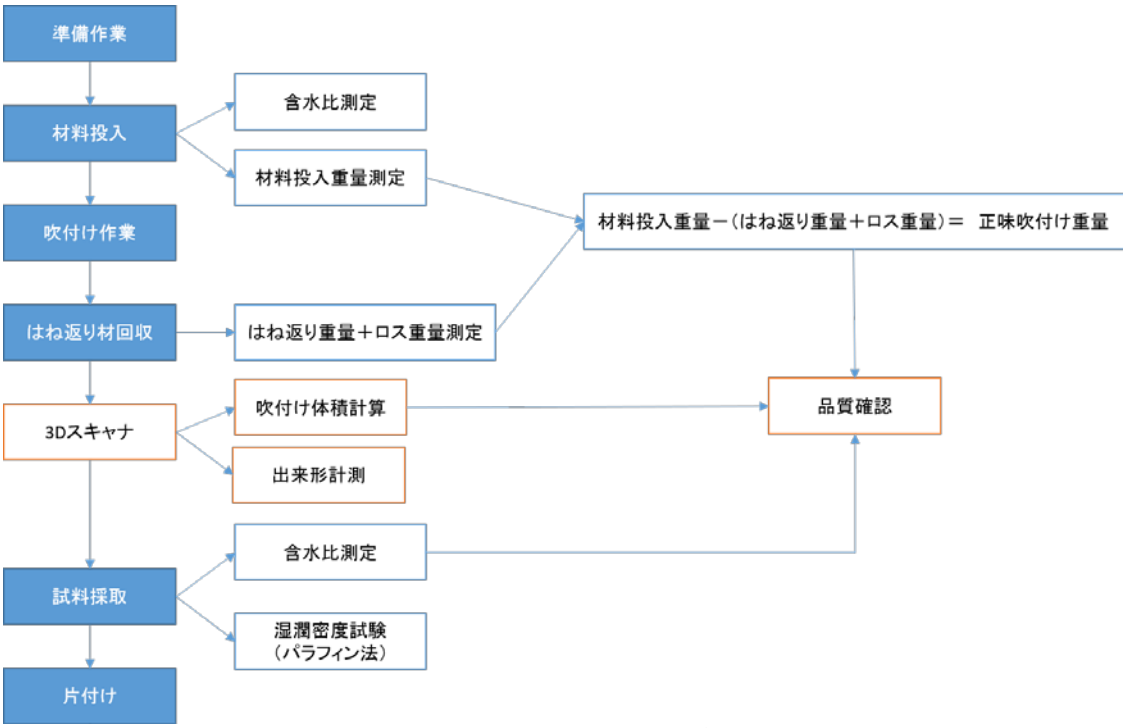


図 5.1-107　出来形計測・品質確認フロー

図 5.1-108　3D スキャナによる計測の様子

g) データ処理

点群取得後の体積計算には平均断面法を用いた。図 5.1-109、図 5.1-110 に断面法による体積計算のイメージを示す。奥行方向 10 mm ずつで点群を分割し、この断面の面積を計算した。断面の面積×厚み（10 mm）の合計を体積として算出した。断面の面積計算手法は、断面を円形近似した際の中心から一定角度（1 度）ずつ分割し、中に含まれる点群の中心からの距離を平均して代表点とし、代表点を結んだ多角形の面積を断面の面積とした。

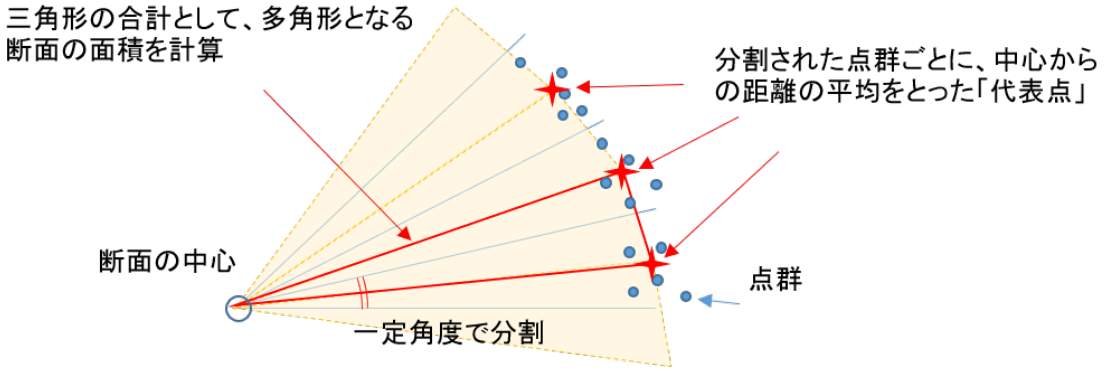


図 5.1-109　断面法による体積計算のイメージ（１）

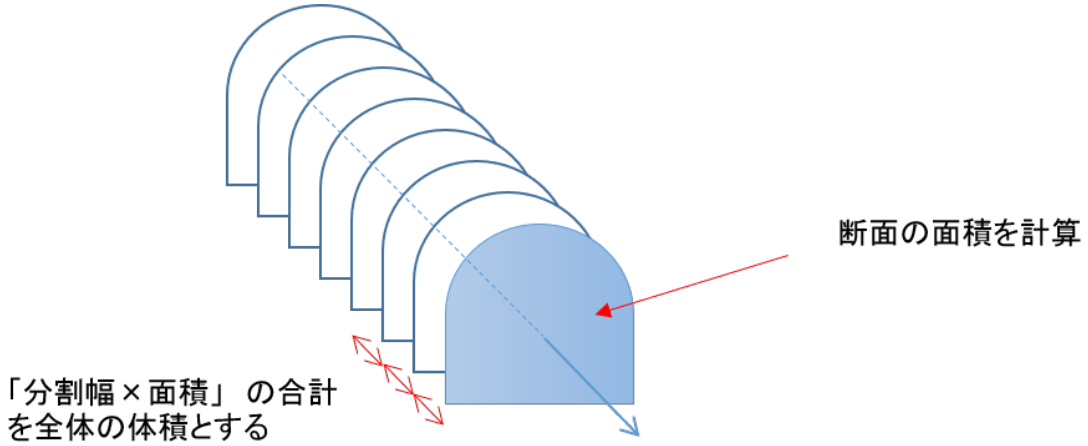
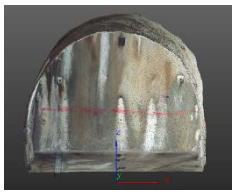


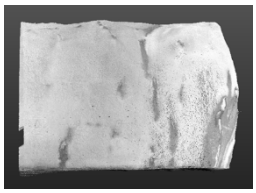
図 5.1-110　断面法による体積計算のイメージ（２）

(h) 出来形計測の結果

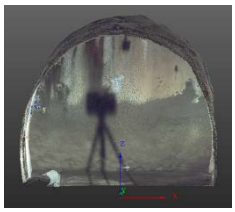
図 5.1-111～図 5.1-118 に 3D スキャナによる出来形計測の結果を示す。ここでは計測結果を断面図、縦断図、俯瞰図で示した。ただし、3D スキャナによる計測は吹付け作業をした日ごとに実施したが、ここでは出来形として各セクション間の結果を示した。3D スキャナによる出来形は、カラーデジタル再生された点群データで構成されているため、デジタルカメラ画像のように実際の状態にきわめて近いかたちで表現されている。また、坑道壁面や吹付け後の起伏も表現できており、各セクションの吹付け面の変化の様子を確認することができる。セクション６以降では、土留め壁の設置に伴い 3D スキャナによるレーザー照射の際の障害物ができたことから、計測点を増やし障害物の影となる箇所を極力減らした。ただし、ここでの影とは障害物後方となるため計測出来ない箇所を示しており、セクション１、６、７、８でみられる影とは異なる。



吹付け前　断面図



吹付け前　縦断図



断面図

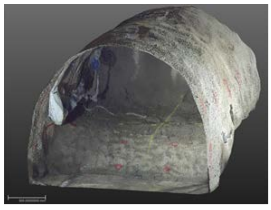
縦断図

俯瞰図

図 5.1-111　セクション１の出来形

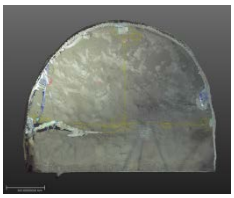
断面図

縦断図

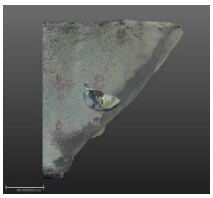


俯瞰図

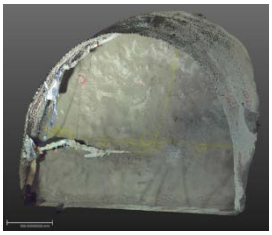
図 5.1-112　セクション２の出来形



断面図



縦断図

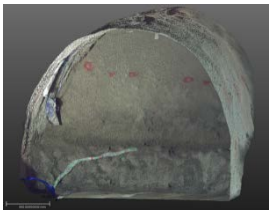


俯瞰図

図 5.1-113　セクション３の出来形

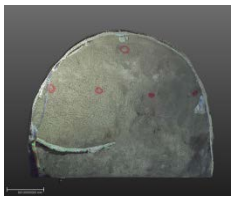
断面図

縦断図



俯瞰図

図 5.1-114　セクション４の出来形


断面図

縦断図

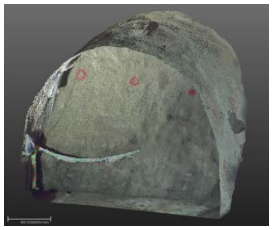
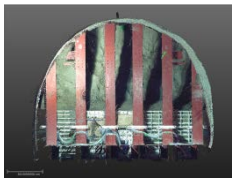

俯瞰図

図 5.1-115　セクション５の出来形


断面図

縦断図

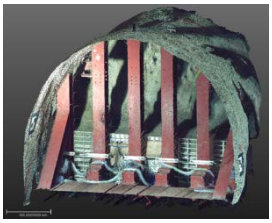
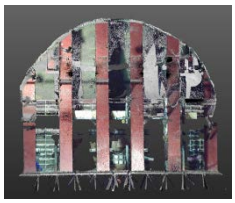
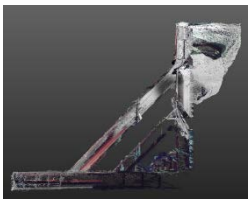

俯瞰図

図 5.1-116　セクション６の出来形


断面図


縦断図

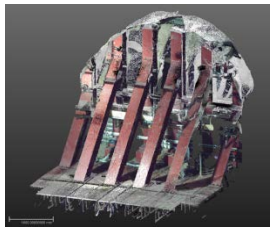
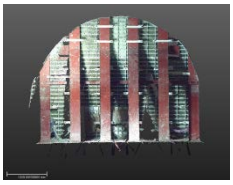

俯瞰図

図 5.1-117　セクション７の出来形


断面図

縦断図

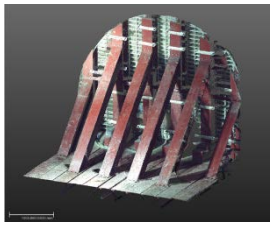

俯瞰図

図 5.1-118　セクション８の出来形

i) 埋め戻し材の品質管理の観点から見た 3D スキャナによる出来形計測の適用性評価

図 5.1-119 に 3D スキャナと試料採取による有効粘土密度の比較結果を示す。セクション１～６では 3D スキャナによる有効粘土密度は試料採取による結果より低い傾向がみられた。また、試料採取により得られた有効粘土密度は、0.05～0.1Mg/m3 程度のバラツキがあり、今回適用した吹き付け施工法では埋め戻し領域内の材料の密度分布にこの程度の不均質性は発生することが推定される。本埋め戻し試験では、はね返り材の除去および回収は１日の終わり、または各セクションの完了後に実施している。また、試料採取ははね返り材を除去した後に実施している。すなわち、3D スキャナによる計測では、セクション施工中のはね返り材が十分に除去されていない埋め戻し材も含めて体積が取得されており、試料採取の密度に比べて全体的に密度が低い傾向がみられたと考えられる（図 5.1-120）。

セクション７、８は土留め壁近くの吹付けで、かつ障害物が多かったため、3D スキャナによる体積評価は数回の計測の複合解析で行っており誤差も相対的に大きくなった可能性があること、施工途中であってもはね返り材を除去しやすい環境であったこと、また埋め戻し試験の終盤であり意識的にはね返り材を除去した経緯もあり、3D スキャナによる体積計算で算出した密度が高くなったことが考えられる。

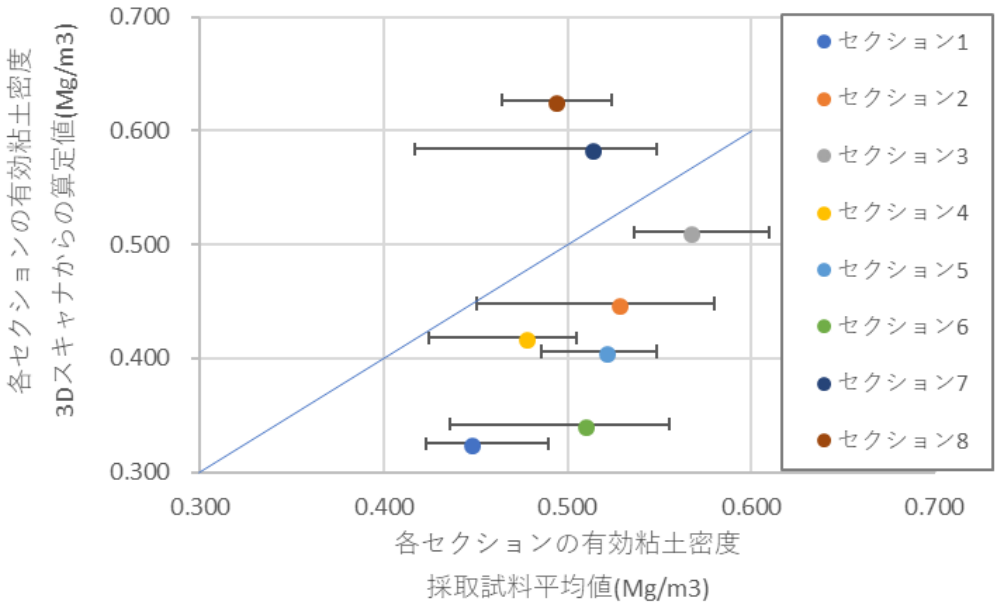


図 5.1-119　3D スキャナと試料採取による有効粘土密度の比較
（エラーバーは、試料採取から評価した同一セクションにおける有効粘土密度のバラツキの範囲を示す）

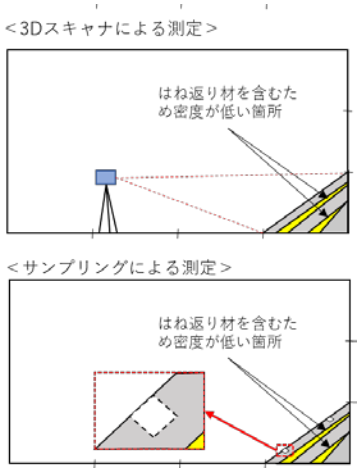


図 5.1-120　3D スキャナによる密度推定と試料採取による密度測定の違いの影響

図 5.1-121 に 3D スキャナによる有効粘土密度とロス率の関係を、図 5.1-122 に試料採取による有効粘土密度とロス率の関係を示す。3D スキャナと試料採取による有効粘土密度はともにロス率の増加に伴って高くなる傾向がみられ、吹付け施工による有効粘土密度とロス率には相関性があると考えられる。

ロス率が小さい場合は、はね返り材の回収が困難な状況であったことや吹付けノズル付近での目詰まりによって、団粒化した状態での吹付けがなされため吹付け後の密度が低くなったと考えられる。一方で、ロス率が大きい場合は、吹付け勾配が大きくはね返り材の回収が容易であったことや吹付けによるエネルギーが吹付け面に伝達し、密度が高くなったと考えられる。

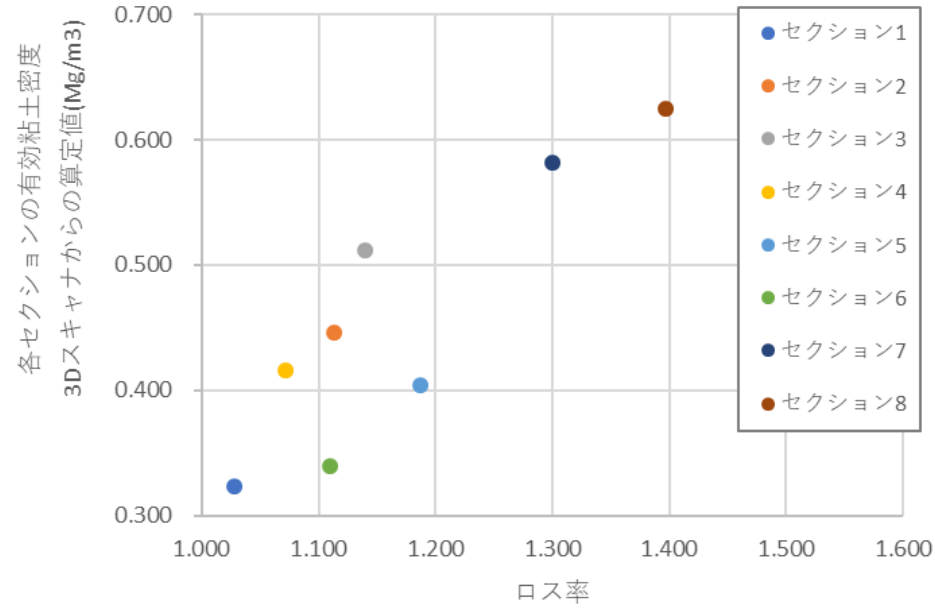


図 5.1-121　3D スキャナによる有効粘土密度とロス率の関係

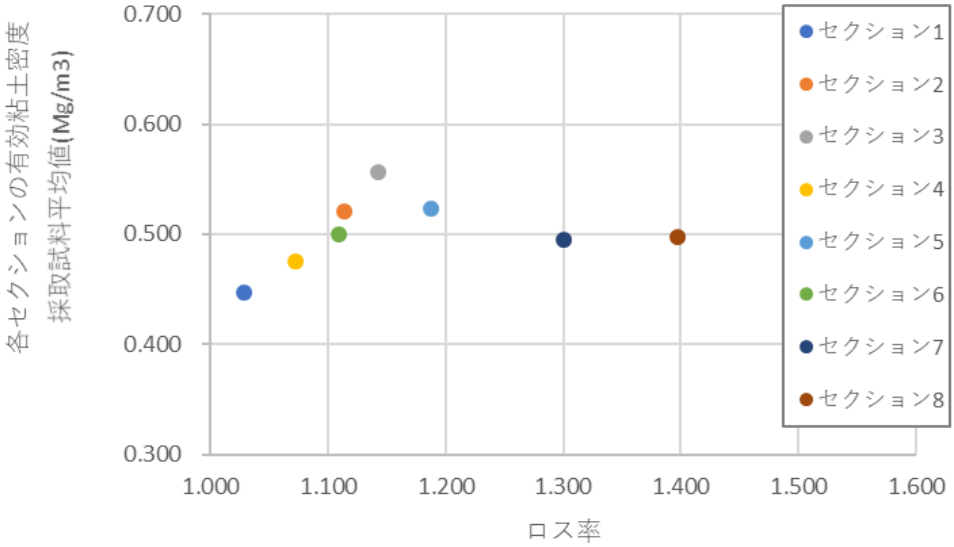


図 5.1-122　試料採取による有効粘土密度とロス率の関係

以上の結果から、3D スキャナによる密度計測は試料採取によるものと比較してやや小さい値を示す傾向がみられるが、両者には相関性がみられるといえる。前述したように、3D スキャナによる計測では、施工途中のはね返り材が十分に除去されていない埋め戻し材も含めて、セクション全体の平均的な密度が算定されているのに対し、試料採取による密度計測ははね返り材は含まれていない試料にて実施しているという違いがあり、そのため前者が低めの値を示していると考えられる。

両者の差を小さくするためには、施工途中においても、はね返り材を可能な限り入念に除去する必要があるものの、10 分程度の計測である体積の平均的な密度を算定できること、試料採取に伴う危険性なども生じないことなどの大きな利点も有しており、実際の地層処分事業で想定されるような長大なトンネル群の埋め戻しに関する品質管理の観点では、3D スキャナによる計測も加えることで合理的・効率的な品質管理が期待できると考えられる。

12) 施工中・施工後のモニタリング

5.1.1 に述べた計画に基づき、本埋め戻し試験におけるモニタリング項目などを設定した。図 5.1-123 にモニタリングの品質管理・確認項目一覧を示すとともに、各計測の詳細について述べる。

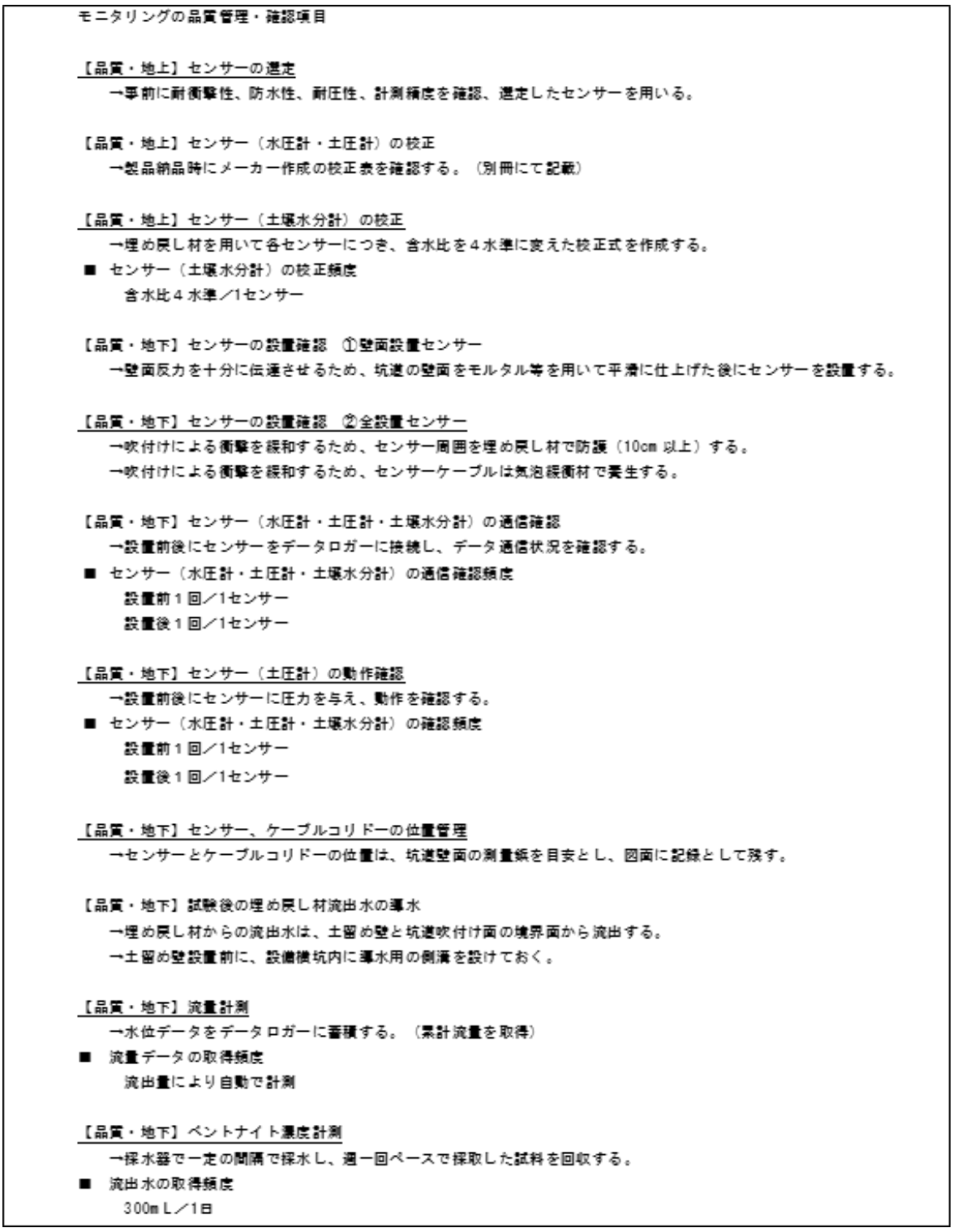


図 5.1-123 モニタリングの品質管理・確認項目一覧

①使用計測機器

a) 計測機器の選定

計画検討で示した通り、センサーについては、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、計測期間などを考慮し、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。

- センサー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。
- センサー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、センサー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。
- データロガーなどの計測システムは、メンテナンスを容易にするなどの理由により、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。
- 落雷などの瞬停なども発生することから、データ欠損を防ぐため、データロガーなど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ーを表 5.1-62 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、高い分解能と計測精度をもつものを選定した（図 5.1-124 および図 5.1-125）。土壌水分計については、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。

ベントナイトの流出量の計測については、既往の計測実績の調査から吸光分析法を設定した。ただし、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。

表 5.1-62　本吹付け施工試験で使用したモニタリング用センサー類

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	土止め壁外部の側溝
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	

製造	Geokon
製品名	4810-5MPa
形式	振動弦型
計測対象	土圧
計測レンジ	0～5 MPa
分解能	±0.025% F.S.
精度	±0.1% F.S.
直線性	<0.5% F.S.
大きさ	Φ230×12mm
重量	4.8 kg
材質	ステンレス

図 5.1-124　土圧計 4800 シリーズ
（Geokon 社ホームページより）

製造	Geokon
製品名	4500SH-5MPa
形式	振動弦型
計測対象	水圧
計測レンジ	0～5 MPa
分解能	±0.025% F.S.
精度	±0.1% F.S.
直線性	<0.5% F.S.
大きさ	Φ25.4×194mm
重量	0.44 kg
材質	ステンレス

図 5.1-125　間隙水圧計 4500 シリーズ
（Geokon 社ホームページより）

b) 土壌水分計

b)-1 土壌水分計の種類と既往の研究事例における不具合の原因

土壌水分計については、市販されているほとんどのセンサーは耐圧性能を保証していない。原子力機構が実施した再冠水試験のボーリングピット埋め戻し試験において使用されたEC-5 センサー（旧 Decagon 社製）は、事前の耐圧試験により 4 MPa 圧力下での作動を確認していたが、現場での実証実験では、飽和以降は満足な測定結果が得られなかった。その原因として、製品の組み立て精度や、設置時に無理な荷重がかかったことによる破損、および破損による長期間における耐圧性能の欠如などが考えられた（髙安ほか、2017）。

そこで、土壌水分計の選定にあたっては、センサーの構成材質・内部構造・ケーブル接続部分の構造などの堅牢性に着目した。また、土壌水分センサー設置前に吹付け圧力相当の耐衝撃性能、ならびに 4 MPa 程度の耐圧性能を確認した。耐衝撃性、耐圧性の確認は、構造や素材から堅固と考えられる土壌水分センサーEC-5（フォーク型）、WD-3（円盤型）、TDT（U 字型）の 3 製品で実施した。図 5.1-126 に土壌水分センサーEC-5、WD-3、TDT を示す。

（a）EC-5　　（b）WD-3　　（c）TDT

図 5.1-126　試験対象センサー

b)-2 土壌水分計の耐衝撃試験および耐圧試験

耐衝撃性試験は、吹付け圧力に準じた衝撃を土壌水分計に与え、データの経時変化を確認した。その際、実際の吹付け時を想定し、計測センサーの設置箇所を 10 cm 程度埋め戻し材で盛土をして保護した。図 5.1-127 に土壌水分計の設置状況を示す。

耐圧試験は、深度 500 m で想定される水圧に対する防水性および耐圧性の有無を確認するため、図 5.1-128 のような試験用水槽に土壌水分計を投入して最大 4 MPa の圧力下でデータの経時変化を確認した。

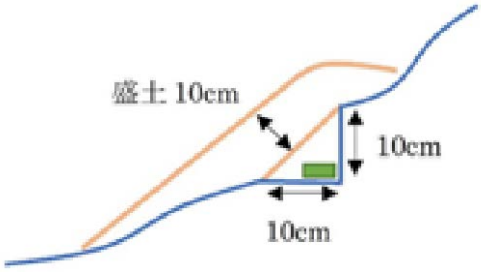


図 5.1-127　耐衝撃試験における土壌水分計の設置状況模式図

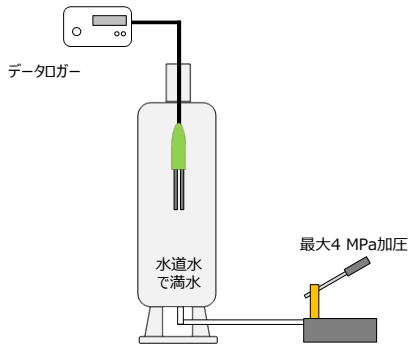


図 5.1-128　耐圧試験装置模式図

耐衝撃試験の結果を図 5.1-129 に示す。耐衝撃性を確認した製品はすべて安定した計測値を示した。したがって、計測センサーを埋め戻し材で盛土して保護することで、いずれの製品を採用しても施工過程で生じる衝撃への耐性をもつことが明らかとなった。

耐圧試験は、耐衝撃試験で使用した個体（耐圧試験①）と未使用の個体（耐圧試験②）の合計 6 個について、最大 4 MPa の水圧下に置き耐圧性および防水性を確認した。図 5.1-130～図 5.1-135 に耐圧試験の結果を示す。耐圧試験①では、EC-5 以外は、計測値の損失が生じ満足な結果を得られなかった。WD-3 は試験中にケーブルを通って漏水し、その後水圧が低下した。TDT は 2MPa 後半から取得値に乱れが生じており、センサーに何らかの異常があったことが推測された。耐圧試験②では、WD-3 は耐圧試験①と同様に試験中にケーブルから水の漏水が認められ、センサー本体とケーブル接続部の耐圧性が高くない製品と判断した。TDT は、耐圧試験①のような異常は認められなかったことから耐圧性はあると考えられるが、耐衝撃性が高くない製品と判断した。

これらの結果から、計測データの安定していた EC-5 を用い、4 MPa の圧力環境下で 2 日間にわたる連続耐圧試験を実施したところ、安定した計測結果となった。図 5.1-136 に連続加圧による耐圧性試験の結果を示す。

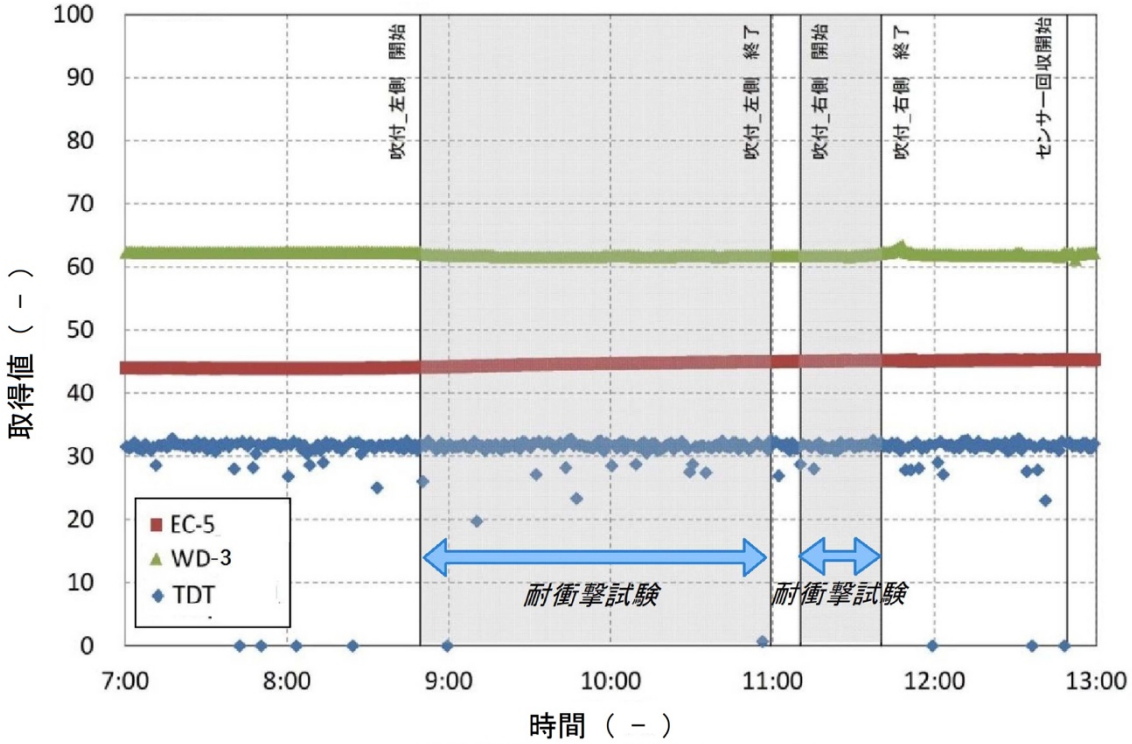


図 5.1-129　耐衝撃試験結果

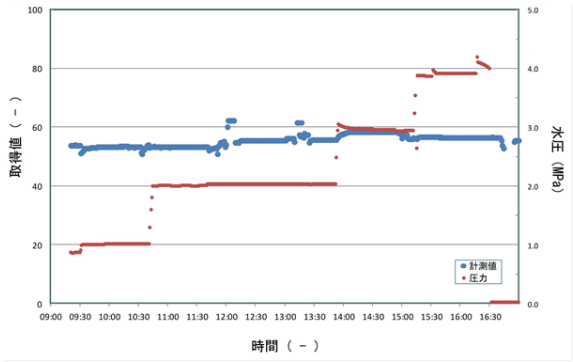


図 5.1-130　EC-5　耐圧試験①の結果（耐衝撃試験で使用）

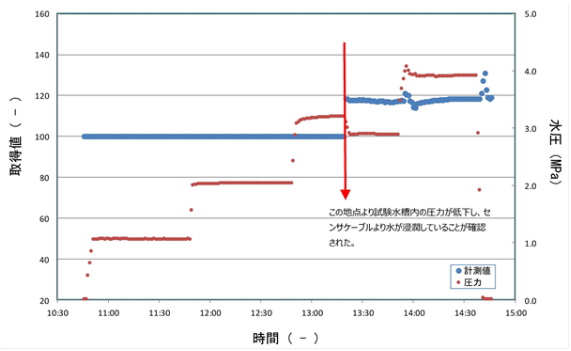


図 5.1-131　WD-3　耐圧試験①の結果（耐衝撃試験で使用）

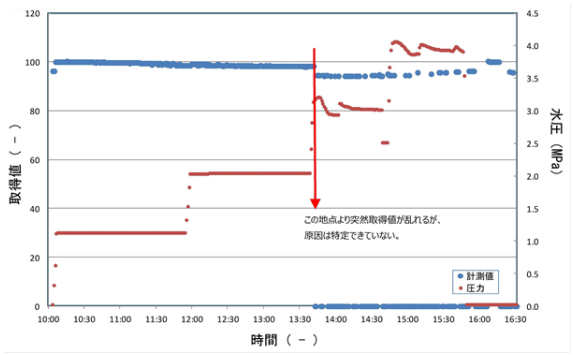


図 5.1-132　TDT　耐圧試験①の結果（耐衝撃試験で使用）

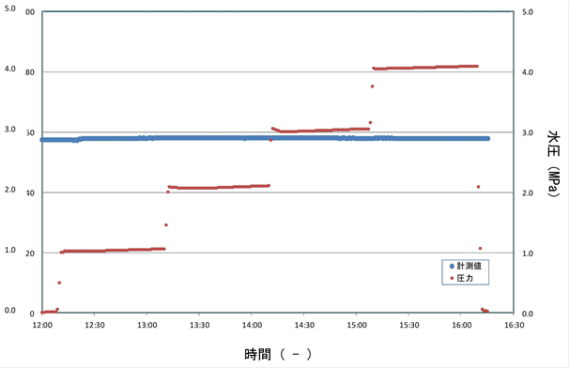


図 5.1-133　EC-5　耐圧試験②の結果（耐衝撃試験で未使用）

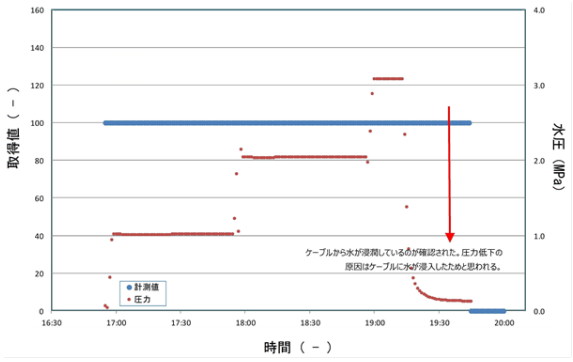


図 5.1-134　WD-3　耐圧試験②の結果（耐衝撃試験で未使用）

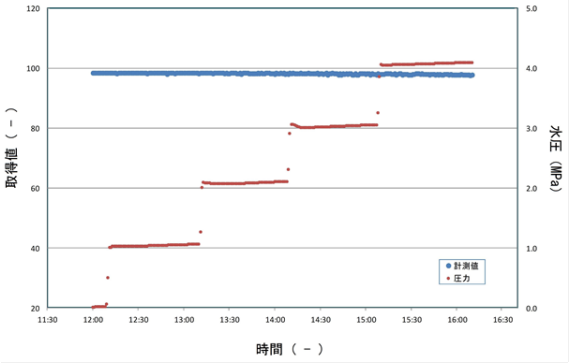


図 5.1-135　TDT　耐圧試験②の結果（耐衝撃試験で未使用）

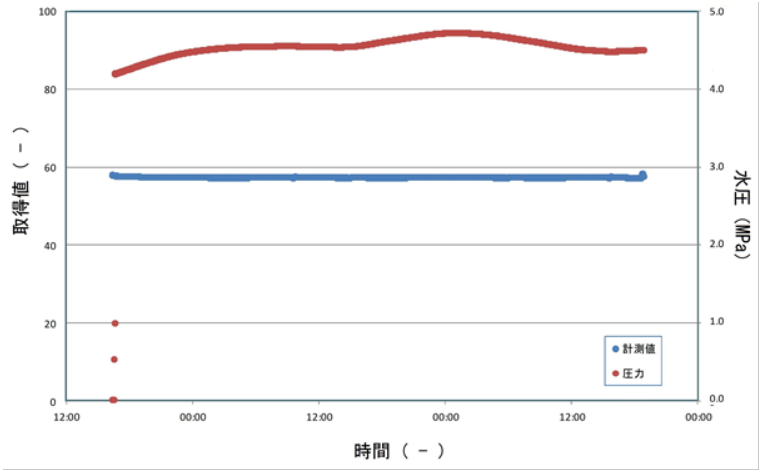


図 5.1-136　EC-5　連続加圧による耐圧試験結果

以上、土壌水分計 3 製品に対して実施した耐衝撃試験および耐圧試験の結果を表 5.1-63 にまとめる。この結果から、耐衝撃性、耐圧性および防水性がもっとも高いと判断された EC-5 を本施工試験における土壌水分計として採用した。表 5.1-64 と図 5.1-137 に土壌水分計 EC-5 の仕様と写真を示す。

表 5.1-63　耐衝撃試験と耐圧試験結果の整理

試験項目		センサ製品名		
		EC-5	WD-3	TDT
耐衝撃試験	試験状況	計測値に異常なし	計測値に異常なし	計測値に異常なし
	判定	○	○	○
耐圧試験（1）	試験状況	計測値にバラツキが認められるが概ね安定している	ケーブルから通水	計測値に異常が認められた
	判定	○	×	×
耐圧試験（2）	試験状況	計測値にバラツキが認められるが概ね安定している	ケーブルから通水	計測値に異常なし
	判定	○	×	○
総合判定	試験状況	センサ固有の計測値のバラツキに留意する必要がある	防水性に何らかの加工が必要である	計測値に異常が認められ、原因を特定する必要がある
	判定	○	×	△

耐圧試験(1)：耐衝撃試験で使用した個体
耐圧試験(2)：耐衝撃試験で未使用の個体

表 5.1-64　土壌水分計の諸元

製造	METER
製品名	EC-5
形式	静電容量法
計測対象	体積含水率
計測レンジ	0～100 %
分解能	0.002m^3/m^3(0.2%VWC)
精度	±3% F.S.
直線性	–
大きさ	89×18×7mm
重量	–
材質	樹脂製

図 5.1-137　土壌水分計 EC-5（アイネクス社ホームページより）

c) 水位計

本施工試験では、土留め壁から設備横坑道坑口に設置されている排水側溝に堰を 2 箇所設け、堰間の水位が一定量以上となったときにスイッチが自動的に作動してポンプにより堰間から排水できるシステムを構築し、その過程の水位変化を積算することで経時的な流量を求めることとした。なお、ポンプ作動による水位差は最大 10 cm 程度と小さいため、計測レンジが小さい水位計を選定した。表 5.1-65 に水位計の仕様を、図 5.1-138 に使用した水位計を示す。

表 5.1-65　水位計の諸元

製造	KOSHIN
製品名	CSTS-ATM/N-I-30M
形式	振動弦型
計測対象	水圧
計測レンジ	0～1.0 m
分解能	-
精度	±0.25% F.S.
直線性	<0.5% F.S.
大きさ	Φ24×108mm
重量	0.15 kg
材質	ステンレス/チタン

図 5.1-138　水位計 CSTS-ATM/N（クリマテック社ホームページより）

最終的に設置した各センサーのセンサー番号を表 5.1-66～表 5.1-68 に、吹付け施工のセクションとセンサー配置の関係を図 5.1-139 に示す。図 5.1-139 の配置は、計画検討時の留意点を考慮し。以下の考え方で設定している。

- 土圧計は埋め戻し材の膨潤過程とともに土圧と微小な膨潤圧を観測するため、反力が取れるよう天端、側壁、床盤に設置する。
- 水圧計は浸潤に伴う間隙水圧の発生と、土圧の結果と合わせて埋め戻し材の膨潤圧を算出するため、土圧計に近接するよう設置する。
- 土壌水分計は浸潤過程を観測するため、埋め戻し材中に設置する。また、鉛直方向で水分量の分布に差異が発生する可能性を考慮して、設置平面は設備横坑内の上下 2 面とする。
- 水位計および採水器は土留め壁外側の側溝に設置し、湧水の流量計測および埋め戻し材中のベントナイト流出量を計測する。

表 5.1-66　土圧計のセンサー番号

センサ種	製品名	センサ番号	シリアル番号	セクション
土圧計	GEOKON 4810 -5MPa	E-1	1808187	1
		E-2	1808189	1
		E-3	1835463	2
		E-4		
		E-5	1835464	2
		E-6	1835459	1
		E-7	1835460	1
		E-8	1835469	3
		E-9		
		E-10	1835462	3
		E-11	1835461	2
		E-12	1835465	7

表 5.1-67　水圧計のセンサー番号

センサ種	製品名	センサ番号	シリアル番号	セクション
水圧計	GEOKON 4500SH -5MPa	H-1	1831303	1
		H-2	1828858	5
		H-3	1831305	2
		H-4	1831306	2
		H-5	1831307	2
		H-6	1831304	1
		H-7	1828854	7
		H-8	1828855	3
		H-9	1828856	3
		H-10	1828860	3
		H-11	1831308	2
		H-12	1828861	7

表 5.1-68　土壌水分計のセンサー番号

センサ種	製品名	センサ番号	シリアル番号	セクション
土壌水分計	METER EC-5	M-1	-	4
		M-2	-	4
		M-3	-	2
		M-4	-	2
		M-5	-	2
		M-6	-	6
		M-7	-	6
		M-8	-	3
		M-9	-	3
		M-10	-	3

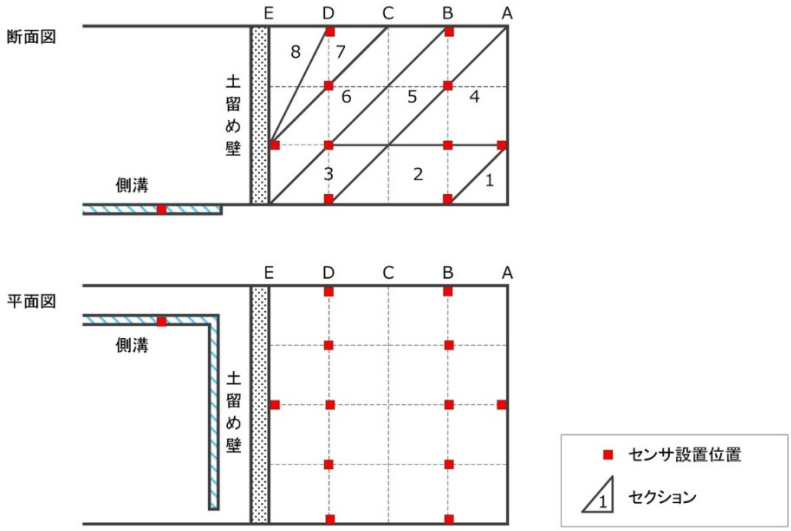


図 5.1-139　吹付け施工の手順（セクション）と計測機器設置位置

d)各センサーのキャリブレーション結果

d)-1 土圧計

土圧計の動作確認として、側壁および天盤に設置した 8 個は、人力による押圧により動作確認をした。設備横坑の床盤に設置した 2 個（E-6、E-11）は、センサー設置後に重機を反力としてジャッキによる載荷試験を実施した。

表 5.1-69 に天盤および側壁に設置した土圧計の押圧試験の結果を、図 5.1-140 に底盤に設置した土圧計の載荷試験の概要を、表 5.1-70、図 5.1-141 に底盤に設置した土圧計の載荷試験の結果をそれぞれ示す。押圧による動作確認と載荷試験の結果、土圧計 10 個について正常に作動していることを確認した。

表 5.1-69　天盤および側壁に設置した土圧計に対する押圧試験の結果

センサ名	シリアル番号	実施日	設置状況	断面名	設置後	押圧後	差	試験結果
E-1	1808187	11/7	側壁	A	8938.327	8933.384	4.943	良好
E-2	1808189	11/7	天盤	B	8744.369	8741.127	3.242	良好
E-3	1835463	11/15	側壁	B	9106.335	9102.800	3.535	良好
E-5	1835464	11/15	側壁	B	9245.930	9241.948	3.982	良好
E-7	1835460	11/9	天盤	D	9005.553	9000.220	5.333	良好
E-8	1835469	11/19	側壁	D	8955.239	8951.714	3.525	良好
E-10	1835462	11/16	側壁	D	9246.111	9242.319	3.792	良好
E-12	1835465	12/7	側壁	E	8933.301	8929.419	3.882	良好

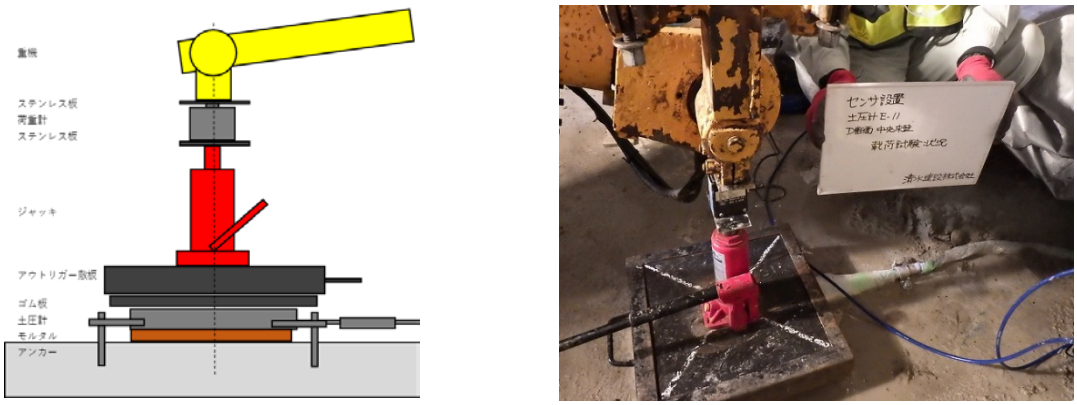
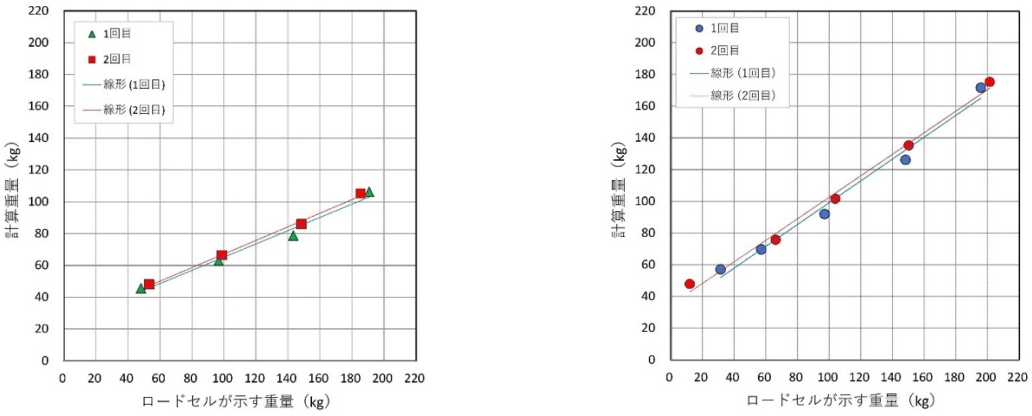


図 5.1-140　底盤に設置した土圧計に対する載荷試験の実施概要

表 5.1-70　底盤に設置した土圧計に対する載荷試験の結果

センサ名	シリアル番号	実施日	No.	ロードセル 表示値 kg	土圧計 計算重量 kg
E-6	1835459	11月9日	1回目	48.1	45.7
				96.7	63.0
				143.3	78.6
				190.7	106.3
			2回目	53.3	47.9
				98.8	66.4
				148.5	85.9
				185.5	105.2
E-11	1835461	11月16日	1回目	31.5	57.1
				57.2	69.6
				97.2	91.9
				148.3	126.0
				195.9	171.6
			2回目	12.0	47.8
				66.3	75.8
				104.0	101.6
				150.4	135.3
				201.5	175.2



(a) E-6　　(b) E-11

図 5.1-141　E-6、E-11 の載荷試験結果

d)-2 水圧計

水圧計の製造元 Geokon 社が製品のキャリブレーションを出荷前に行っており、付録に Geokon 社によるキャリブレーション結果を示す。試験坑道内に設置した水圧計から得られる取得値（生値）に対して、Geokon 社によるキャリブレーション結果を適用して水圧を求めた。

水圧計の作動確認として、試験用水槽に水圧計を投入して最大 4 MPa の水圧下にてデータを取得し、製造元が掲示するキャリブレーション表の記載値と照らし合わせ、取得値の妥当性を評価した。図 5.1-142 に水圧計作動確認の模式図を示す。製造元が掲示するキャリブレーション表の記載値と、室内での試験用水槽を用いた取得値の結果例を図 5.1-143 に示す。水圧計 12 個のいずれのセンサーにおいても、製造元のキャリブレーション表とほぼ同値を示し、正常に作動していることを確認した。

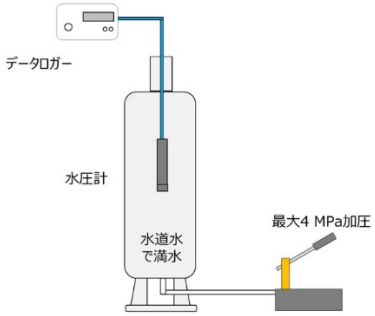


図 5.1-142　水圧計作動確認の模式図

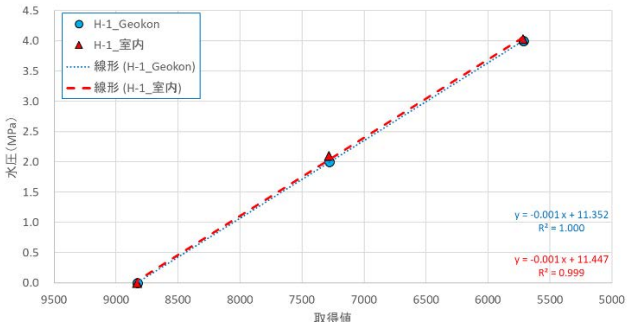


図 5.1-143　水圧計の作動確認結果の例（H-1）

d)-3 土壌水分計

土壌水分計は、砂や黒ボクなどを対象としたキャリブレーション結果が公開されているが、本埋め戻し試験で使用した埋め戻し材（砂：クニゲル V1＝85：15 wt%）に対してそのまま適用することはできない。そこで、含水比を調整した埋め戻し材に土壌水分計を挿入してキャリブレーション値を取得した。含水比の調整は、初期状態を含めて 4 段階とした。以下にキャリブレーション手順を示す。

- 埋め戻し材 1,000mL に、それぞれ 0、25、50、75mL 加水する。
- 試料は、加水後にビニル袋内で揉みほぐし、試料全体に馴染むように一日養生する。
- 試料を容器に移し、EC-5 のセンサー本体を試料中に埋めて所定の乾燥密度となるように木片で締め固めた後の取得値を記録する。なお、EC-5 の計測範囲は、センサー本体の周囲 2cm 程度である。
- 土粒子の密度試験、含水比試験、湿潤密度試験の結果から各試料の飽和度を算出する。

図 5.1-144 に土壌水分計 EC-5 のキャリブレーションの実施状況を、図 5.1-145 にキャリブレーション結果例（検量線）を、表 5.1-71 にキャリブレーション結果一覧を示す。なお、キャリブレーション結果より、土壌水分計 10 個について正常に作動していることを確認した。

図 5.1-144　土壌水分計のキャリブレーション状況

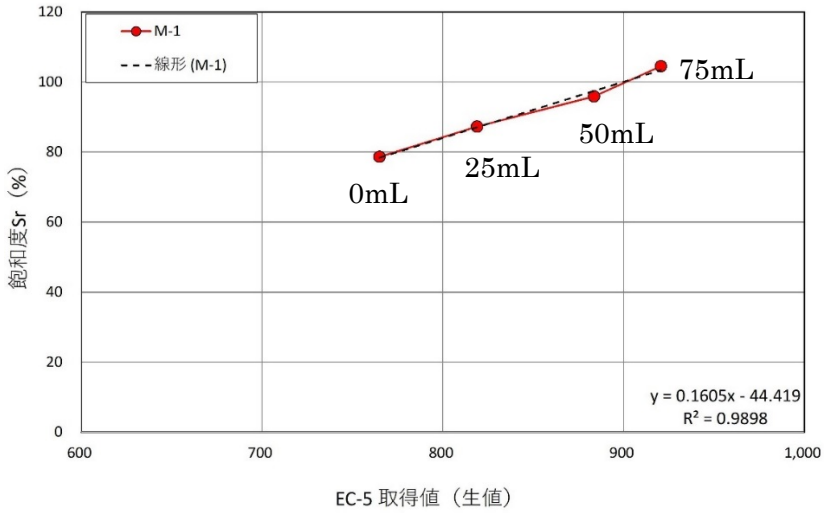


図 5.1-145　検量線の例（M-1 の例）

表 5.1-71　土壌水分計のキャリブレーション結果

センサ名	校正式 （y：飽和度，x：取得値）	飽和度100%となる生値
M-1	y = 0.1605x - 44.419	900
M-2	y = 0.1255x - 13.410	904
M-3	y = 0.1605x - 44.419	900
M-4	y = 0.1255x - 13.410	904
M-5	y = 0.1255x - 13.410	904
M-6	y = 0.1728x - 53.317	887
M-7	y = 0.1690x - 52.051	900
M-8	y = 0.1371x - 21.579	887
M-9	y = 0.1705x - 48.616	872
M-10	y = 0.1765x - 63.301	925

②計測センサー設置

埋め戻し過程において、埋め戻し材内に設置した計測機器類は、土圧計 10 個、水圧計 12 個、土壌水分計 10 個とそれらのケーブル合計 32 本である。流量計測で用いる水位計のみ土留め壁外に設置した。ケーブルは土留め壁の金属板を貫通させて土留め壁外に出し、計測システムに接続

した。

本施工試験においては、前節で述べた計画検討結果を踏まえ、以下のような現象が生じることを想定した。

- 試験坑道内へは、地下水は主に坑道の天端、側壁および切羽面から浸入する。
- このため、埋め戻し材の周縁部から中心部に向かって、地下水による埋め戻し材の浸潤が進行する。浸潤した箇所から埋め戻し材の膨潤が開始し、膨潤も埋め戻し材の周縁部から中心部に向かって進行するものと考えられる。
- 一方、試験坑道内へ流入する地下水は、壁面の吹付けコンクリートと埋め戻し材の境界あるいは埋め戻し材内を通過し、重力により試験坑道の床盤に集まる傾向も持つと考えられる。この場合、試験坑道内の上部では不飽和かつ下部では飽和の傾向となり、鉛直方向の水分分布の差異が発生する可能性がある。

これらの現象の進行過程を経時的に把握するため、各センサーは下記の考え方に基づき配置している。

- 土圧計は埋め戻し材の膨潤過程と膨潤圧を観測するため、反力が確実に取れる天端、側壁、床盤に設置した。
- 水圧計は浸潤に伴う水圧の上昇と、土圧の結果と合わせて埋め戻し材の膨潤圧を算出するため、土圧計に近接するよう設置した。その他、水圧計は断面の中心部にも設置した。
- 土壌水分計は浸潤過程を観測するため、埋め戻し材内の平面上に設置した。鉛直方向で水分分布差異が発生する可能性を考え、設置平面は試験坑道内の上下 2 面とした。
- 水位計および採水装置は土留め壁外側の坑道脇の側溝に設置し、排水量の計測および埋め戻し材の流出量計測を行った。

図 5.1-146 に埋め戻し試験領域内における土圧計・水圧計・土壌水分計の設置位置を、図 5.1-147 に試験坑道内におけるセクションとセンサー設置順序を示す。

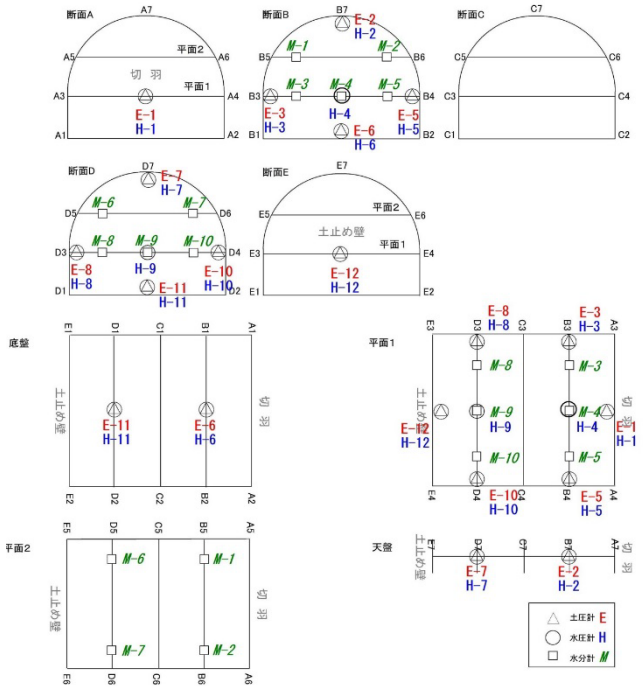


図 5.1-146　埋め戻し試験領域内における土圧計・水圧計・土壌水分計の設置位置

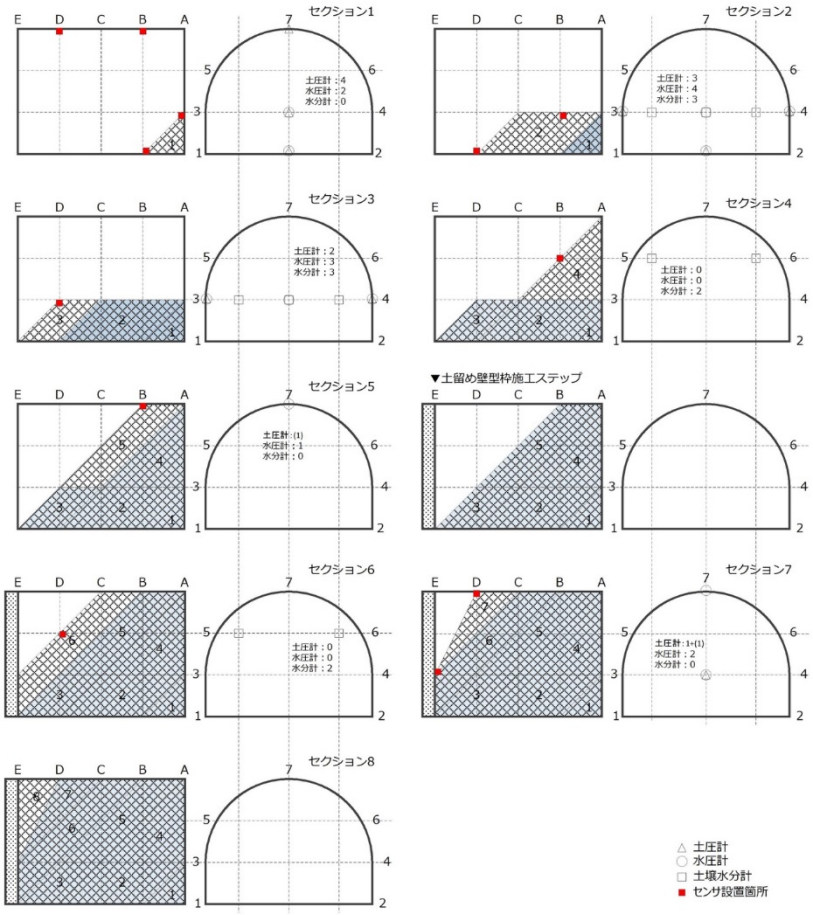


図 5.1-147　吹付け施工のセクションとセンサー設置順序

a）各センサーの設置作業

強力な吹付け荷重による破損を防ぐため、水圧計と土壌水分計については約 100 mm 程度の深さの溝を作ってセンサーを設置したのち、施工試験に用いた埋め戻し材にて覆土した上で木片を当ててゴムハンマーで締め固めた。この手法は、土壌水分計の耐衝撃試験（予備試験）において試行したセンサー設置法と同様である。水圧計および土壌水分計の設置向きは、いずれも水平とした。

なお、水圧計については、センサー本体の先端に取り付けられているフィルタがベントナイトにより目詰まりすることを防ぐため、市販のストッキングの中に 4 号ケイ砂とともに入れて通水性を確保する養生を行ってから埋設した。図 5.1-148 に水圧計の設置状況、図 5.1-149 に土壌水分計の設置状況を示す。

図 5.1-148　水圧計の設置状況

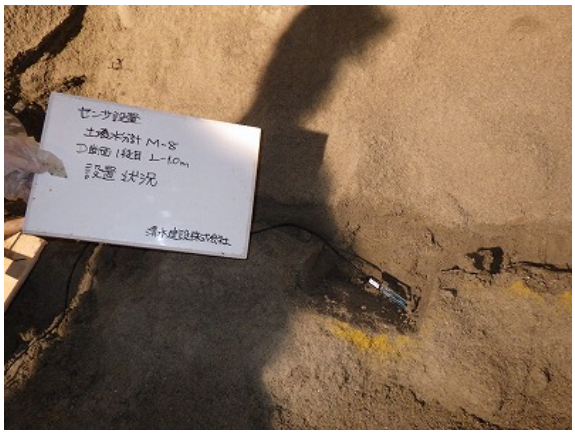


図 5.1-149　土壌水分計の設置状況

a)-1 土圧計

土圧計については、坑道壁・切羽・床盤にアンカーボルトを打ち込み、土圧計本体の 4 方に付けられているラグ孔に通してボルトで締め、確実に坑道壁面に固定した。この際、土圧計と坑道壁面の間に隙間が生じないよう、1 時間程度で固化する無収縮モルタルを厚さ 10～20 mm で充填した。また、坑道壁面の凸凹が大きい場合や、土圧計の感受面が壁面に平行とならない場合はハンマーピックで壁面を平滑化してから設置した。このような設置方法により、土圧計背面では確実に反力が取れるように留意している。

土圧計の一部であるトランスデューサはパイプストラップとアンカーボルトを用い坑道壁面に固定した上で、強力な吹付け荷重による破損を防ぐため、埋め戻し材でその周囲を厚さ約 100 mm 盛土し、木片を当ててゴムハンマーで締め固めた。なお、土留め壁面に設置した E-12 のみ、ケーブルを貫通させた金属板と土圧計のラグ孔をボルトナットで締め固めて設置した。

図 5.1-150 に土圧計の設置法を、図 5.1-151 に土圧計の設置状況を示す。

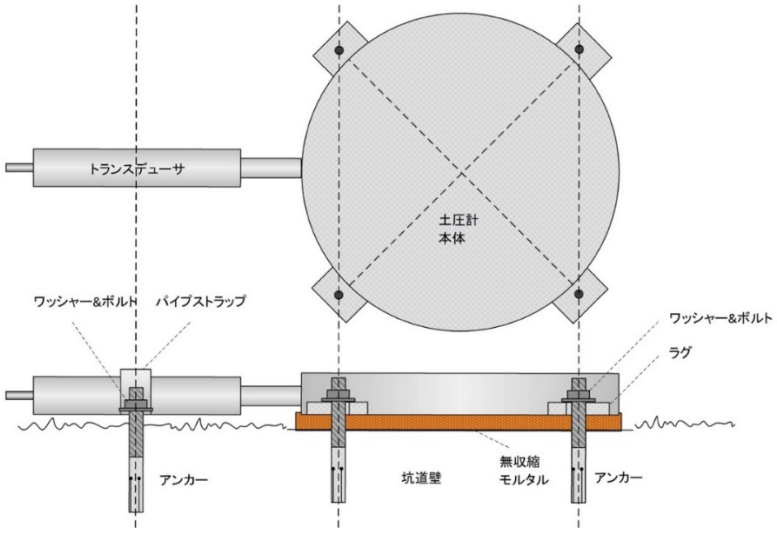
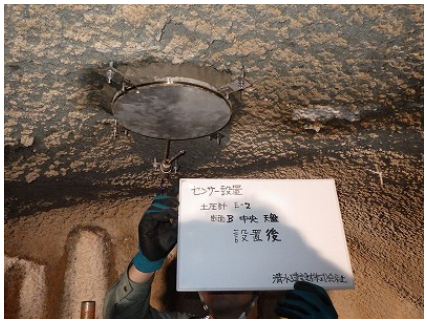


図 5.1-150　土圧計の設置法



（a）天盤

（b）底盤

（c）坑道側壁

（d）土留め壁（金属板への設置状況）

図 5.1-151　土圧計の設置状況

a)-2 ケーブル養生

今回の試験においても、試験後のオーバーコアリング実施の際に計測センサーやケーブルを意図せず破損しないよう、ケーブル配線部分を定めた（ケーブルコリドー）。図 5.1-152 にケーブルコリドーの概要図、図 5.1-153 に詳細図を、図 5.1-154 にケーブル埋設状況を示す。

実際には、吹付け斜面上に約 100 mm 掘削した溝にケーブルを這わせ、埋め戻し材で溝を締め固めた後、さらに埋め戻し材を厚さ約 100 mm 盛土し、木片を当ててゴムハンマーで締め固めた。この際、ケーブルを鋭角に屈曲しないよう注意した。

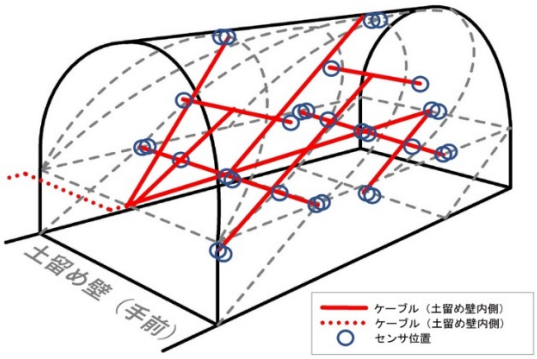


図 5.1-152　ケーブルコリドーの配置模式図

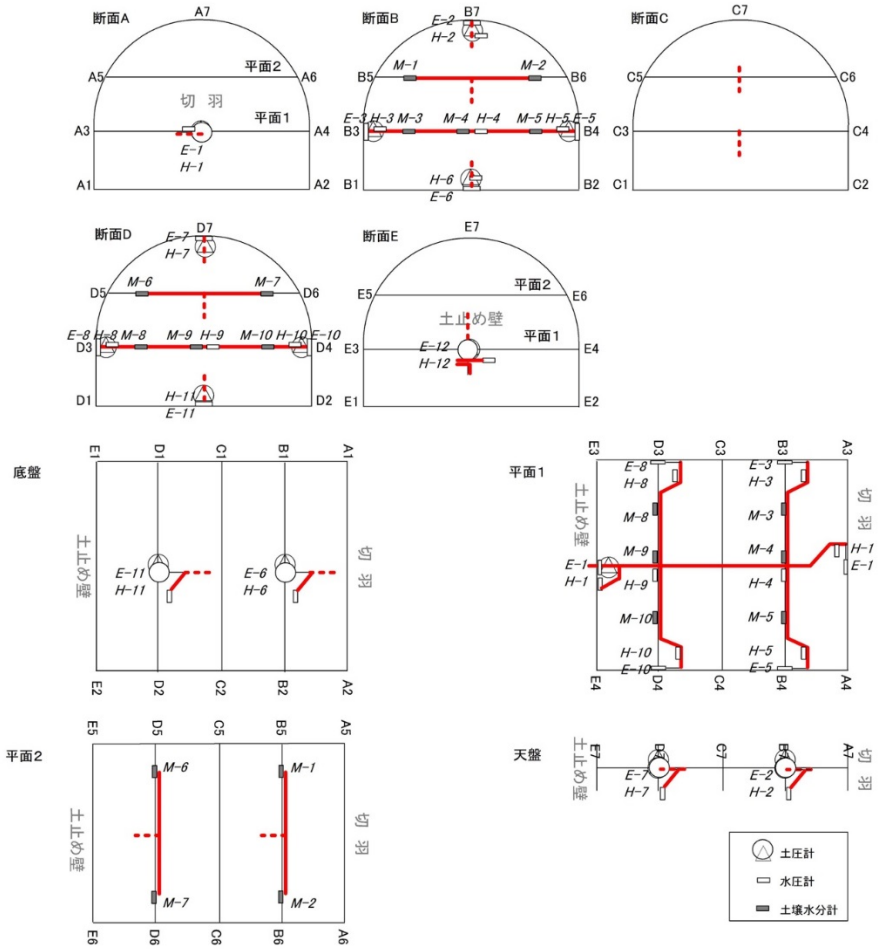


図 5.1-153　ケーブルコリドーの詳細図

図 5.1-154　ケーブル埋設状況

a)-3 ケーブルの土留め壁貫通

データロガーは土留め壁の外側に設置したため、ケーブルは土留め壁の金属板を貫通させた。貫通箇所には、スウェージロック製の貫通ニップルを使用し、O-リングを装着させてニップル周縁を止水しこの部分からの地下水の漏洩を防ぐ措置を行った。図 5.1-155 にケーブルの土留め壁貫通状況を、図 5.1-156 に貫通位置の詳細を示す。

（a）貫通ニップル　　（b）土留め壁（外側より）

図 5.1-155　ケーブルの土留め壁貫通状況

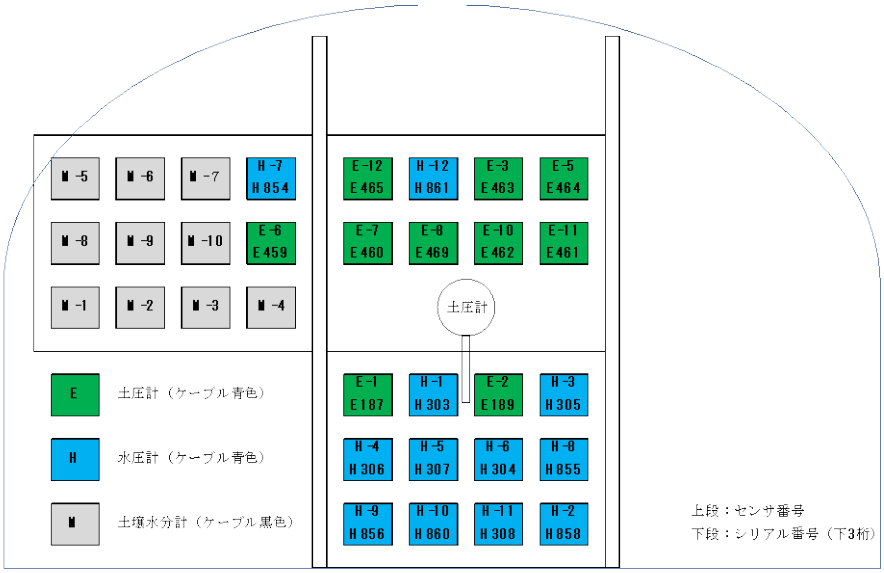


図 5.1-156　ケーブル貫通位置

b) 計測システム構築

試験坑道における吹付け施工およびセンサー設置、土留め壁の設置の完了後、計測システムを土留め壁外側に構築した。計測システムは、センサー類のデータの収録・表示に関する計測機器類、ならびに土留め壁内部から流出する地下水の流量の計測およびベントナイト濃度の計測に関する流量・採水機器から構成される。

表 5.1-72 に機器類の一覧を、計測システム設置状況の断面図、平面図、鳥瞰図および土留め壁内部からの排水と集水に関する模式図を図 5.1-157～図 5.1-160 に示す。また、構成機器などの写真を図 5.1-161 に示す。

データの収録・表示機器は、主にデータロガー、パソコン、液晶画面から構成される。試験坑道内に設置した土圧計、水圧計、土壌水分計ならびに試験坑道外の側溝内に設置した水位計のデータは、データロガーに収録され、パソコンを介して液晶画面に表示される。液晶画面脇に設置した USB ポートやマウスを使用して USB によりデータ回収を行う。

また、データの収録・表示機器は、データ欠損を防ぐため UPS（無停電電源装置）から給電するものとし、湿気を防ぐため専用ボックスに納入した。液晶画面ボックスは来客が見やすい位置となるよう、壁面の 1.3～1.7 m の高さに固定した。

表 5.1-72　設置機器一覧

機器名	製造	製品名	品番	サイズ（mm）	備考
データロガー	クリマテック㈱	マイクロロガー	CR6	ロガーボックスに収納	センサ5min毎計測
パソコン	EPSON	ノートパソコン	Endeavor NJ4100E-V	PC+UPSボックスに収納	
液晶	EPSON	液晶モニタ	LD1773	液晶ボックスに収納	
UPS	オムロン	無停電電源装置	BY50S	PC+UPSボックスに収納	-
ロガーボックス	日東工業	金属製キャビネット	R16-67	W600×H700×D160	-
PC+UPSボックス	日東工業	金属製キャビネット	R16-56	W500×H600×D160	-
液晶ボックス	日東工業	窓付き金属製キャビネット	W20-54A	W500×H400×D200	-
ポンプ	㈱鶴見製作所	スイープポンプ	LSP型	D265×H307	水位回復毎
フロートスイッチ	桜川ポンプ製作所	自動水位制御用フロートスイッチ	LS-012	D70×H250	
水位計	クリマテック㈱	水圧式水位センサー	CSTS-ATM/N-1	D24×H108	センサ5min毎計測
採水器	㈱エヌケーエス	ポータブル式ミニ自動採水器	LYSAM-MN	D400×H620	1回／1day
撹拌機	㈱アクアテック	撹拌機	C-MIX	D25×H300	常時

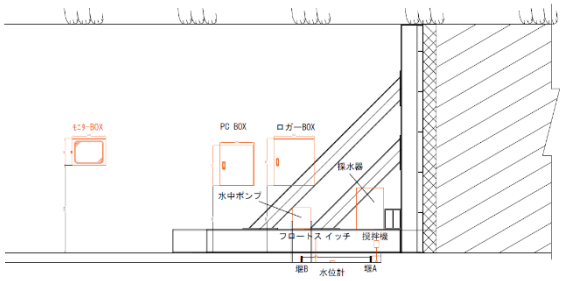


図 5.1-157　計測システムの配置（断面図）

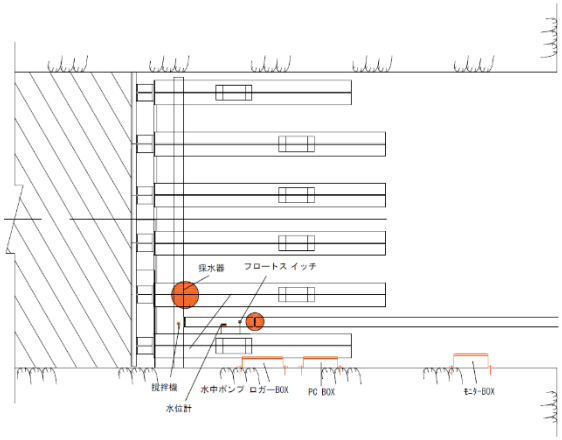


図 5.1-158　計測システムの配置（平面図）

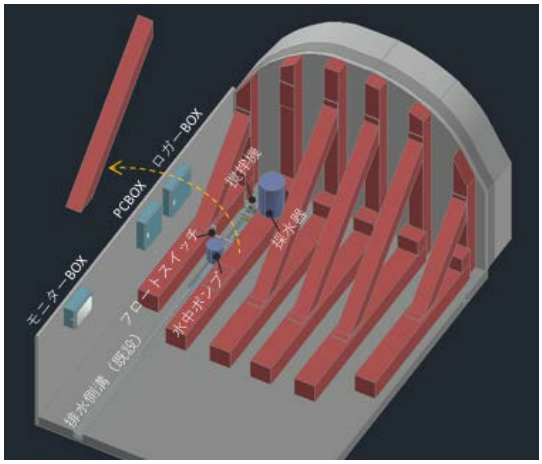


図 5.1-159　計測システムの配置
（俯瞰図）

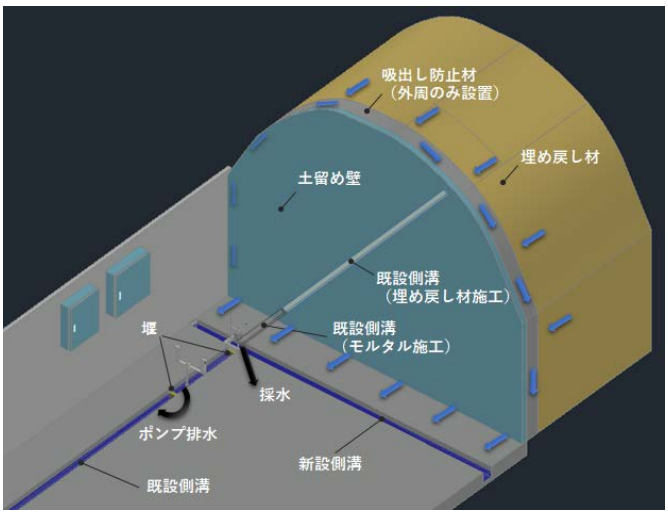
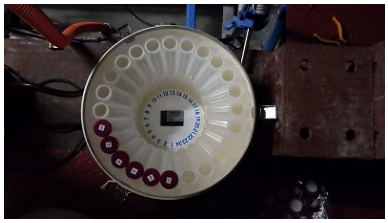
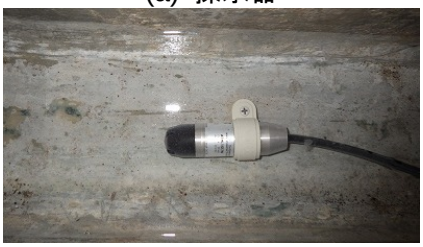


図 5.1-160　土留め壁内部の排水構造と集水の
仕組み

(a) 採水器

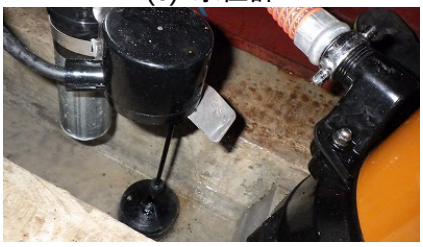


(b) 採水器の内部（採水ボトル）

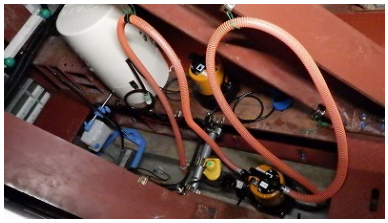


(c) 水位計

(d) 撹拌機



(e) フロートスイッチ

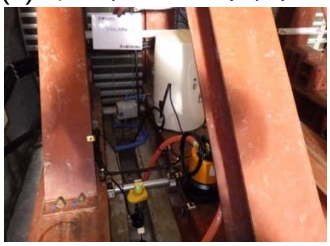


(f) ポンプ

(g) PC/UPS ボックス

(h) データロガーボックス

(i) 液晶画面



(j) 撹拌機、採水器、フロートスイッチ、ポンプの配置

(k) 計測システム全景

(l) フェンス囲み養生後

図 5.1-161　構成機器など

ベントナイト流出量計測用の流量計測機器は、ポンプ、フロートスイッチ、水位計から構成される。土留め壁前面に施工した側溝を用い、土留め壁内部から流出する地下水の流量計測を行う機器類を設置した。具体的には、側溝内に堰 2 箇所、フロートスイッチ、ポンプ採水口、水位計を設置し、上流（土留め壁側）から流入する地下水が一定水位となったときにフロートスイッチによりポンプが作動して汲み上げ、この水位変動を水位計により観測し、水位変動と経過時間により流量を求めるシステムとした。

堰は高さ 110 mm、幅 40 mm 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。側溝の大きさは概ね幅 145 mm、深さ 145 mm である。上流側から堰 A・堰 B と称する。ポンプの吸水口およびフロートスイッチを側溝 B に設置した。ポンプの電源コンセントは、フロートスイッチのコンセントを介して電源タップに接続した。ポンプ排水に伴い底面より高さ 30 mm 程度までの水位低下によりスイッチ OFF、底面より高さ 100 mm 程度までの水位回復によりスイッチ ON となるよう、フロートスイッチの高さを調節した。フロートスイッチ 1 回あたりの揚水量は、7.7L 程度である。水位計も側溝 B に樹脂製バンドを用いて底面に固定した。図 5.1-162 にフロートスイッチによるポンプ作動の概念図を示す。

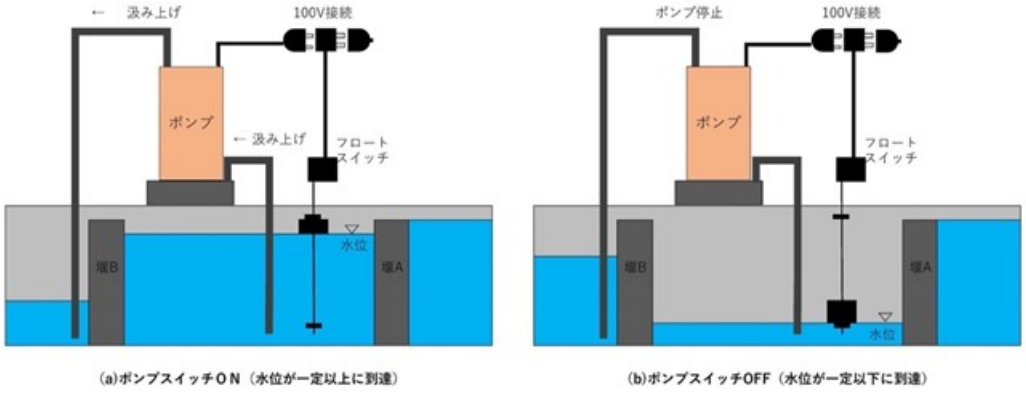


図 5.1-162　フロートスイッチによるポンプ作動の概念図

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。採水口（ホース先端）は、側溝 A における縦方向・横方向の交差箇所に設置した。常に定位置から採水できるよう、樹脂製バンドを用いて採水口を側溝の底面付近に固定し、採水器本体は支保上に設置した。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とした。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することを前提に、沈殿物も同時に吸引採取することとする。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する。

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る。空になった採水器専用の採水ボトルは現場地下水でよく洗浄し、採水器の元の番号位置に戻す。搬送用容器に入った試料を地上に運搬し、分析機関に搬送する。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 5.1-163 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。

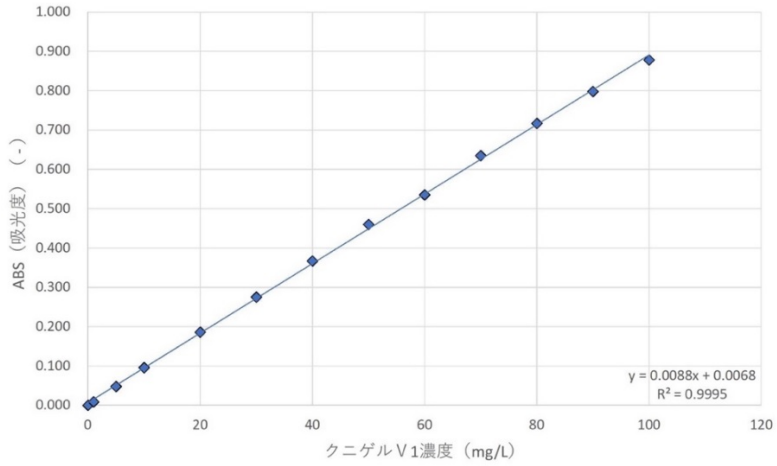


図 5.1-163　ベントナイト（クニゲルＶ１）の吸光度検量線

c) 配電

表 5.1-73 に計測システムの電源一覧、図 5.1-164 に配電盤から UPS あるいは電源タップまでの給電方法を示す。配電盤（200V）からケーブルを試験坑道の天盤に這わせて対面のダウントランスに給電した。ダウントランスで 200 V→100 V へ変換し、UPS および電源タップに給電した。

表 5.1-73　計測システムの電源一覧

機器	給電	消費電力（W）	備考
データロガー	UPS	6.7	
パソコン		53	
液晶画面		18	
ポンプ	電源タップ	480	
フロートスイッチ		-	ポンプの電源元
採水器		500	停電時もプログラムは継続する
撹拌機		60	

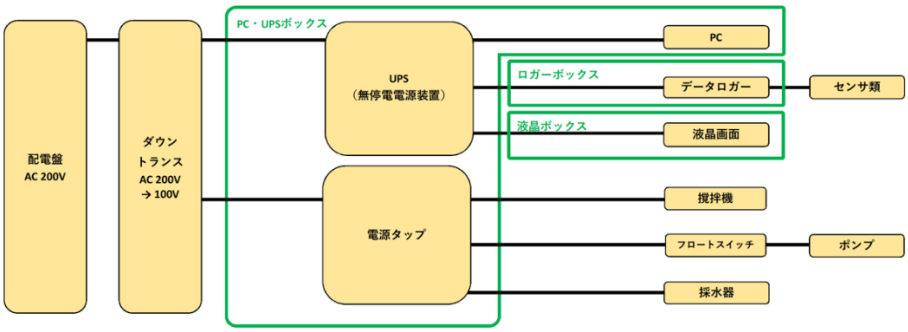


図 5.1-164　計測システムの配線

③計測結果

計測システムの構築およびデータロガー（マイクロロガーCR6）による連続的なデータ取得および集積は 2019 年 1 月 11 日から開始した。しかし、吹付け施工中のモニタリング機器類の導通確認のため、各々の計測センサーを設置してから数日以内を開始として、データを数週間間隔で取得していた。このスポットとしてのデータ回収は、ハンディータイプのデータ取得機器を用いて行った（図 5.1-165）。

（a）VW ANALYZER（土圧計・水圧計）
（Campbell Scientific 社パンフレットより）

（b）Pro Check（土壌水分計）
（METER 社取扱説明書より）

図 5.1-165　ハンディータイプのデータ収録機器

a）土圧計の計測結果

図 5.1-166 に土圧計の設置位置、図 5.1-167 に土圧の経時変化、図 5.1-168 と図 5.1-169 に計測結果に基づき作成した 2 次元コンター図を示す。3 次元コンター図は、計測センサー設置位置の座標を指定し、土圧計による計測値を入力することで作成したが、試料採取による 3 次元コンター図と同様に、埋め戻し領域内部の土圧を確認することができないことから、可視化する断面を選択し 2 次元コンター図によって土圧の経時的な比較をおこなった。縦断図は X-1 断面（中心から左に 2000mm）、X-3 断面（中心）、X-5 断面（中心から右に 2000mm）で比較をした。

E-2 および E-7 を除くすべての計測センサーについては、11 月～12 月の計測センサー設置以降、土圧の上昇が認められるが、1 月に入ると概ね横ばいとなる傾向を示した。なお、図中のプロットは直線で結んだが、前述したように 1 月 11 日以前は数週間間隔でデータを取得しているため、土圧は緩やかに上昇したと考えられる。

天盤に設置した E-2、E-7 は、おおよそ 0.00 MPa を示しており、埋め戻し材の鉛直方向への膨潤変位よりも飽和過程におけるサクションの減少に起因する自重沈下の影響が大きいため、土圧計感受面に十分に接触していない可能性が考えられる。側壁に設置した E-1、E-3、E-5、E-6、E-8、E-12 は、おおよそ 0.02~0.03 MPa を示した。床盤に設置した E-6、E-11 は、E-11 のみ土圧が著しく上昇しており、0.1 MPa 程度の値を示した。一方で、E-6 は側壁に設置した土圧計と同程度の値を示した。試料採取と 3D 計測による有効粘土密度の算出結果をみると、E-11 を設置したセクション 3 の有効粘土密度は E-6 を設置したセクション 2 よりも高い値を示していることから、吹付けによって土圧計感受面付近がより密に締め固められたことが影響していると考えられる。

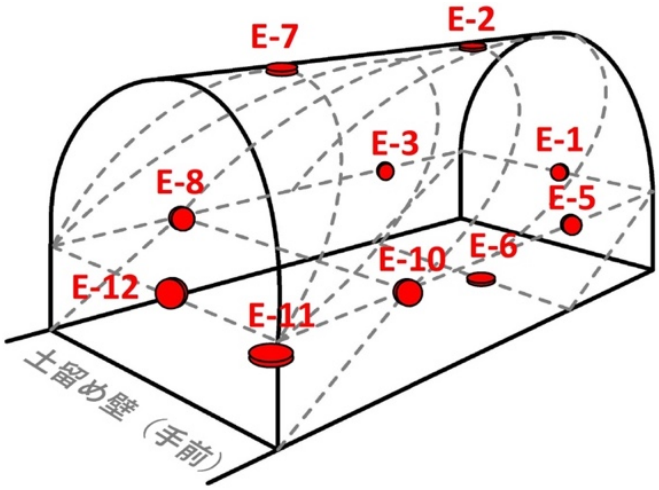


図 5.1-166　土圧計の配置模式図

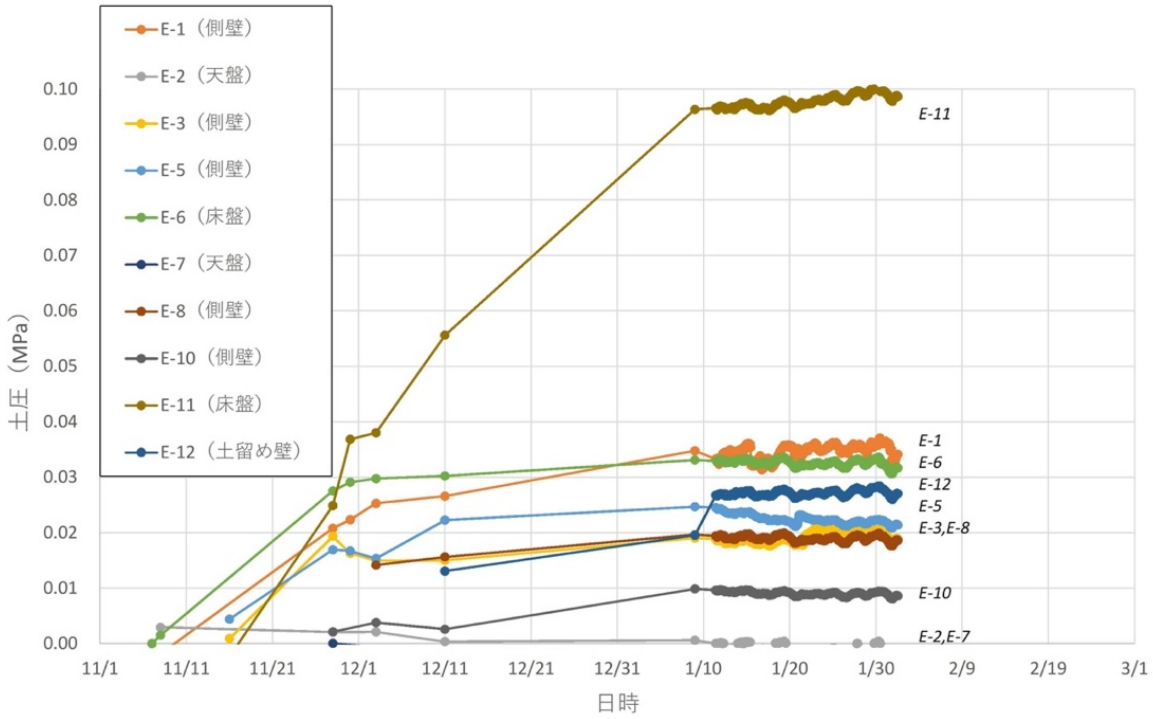


図 5.1-167　土圧の計測結果

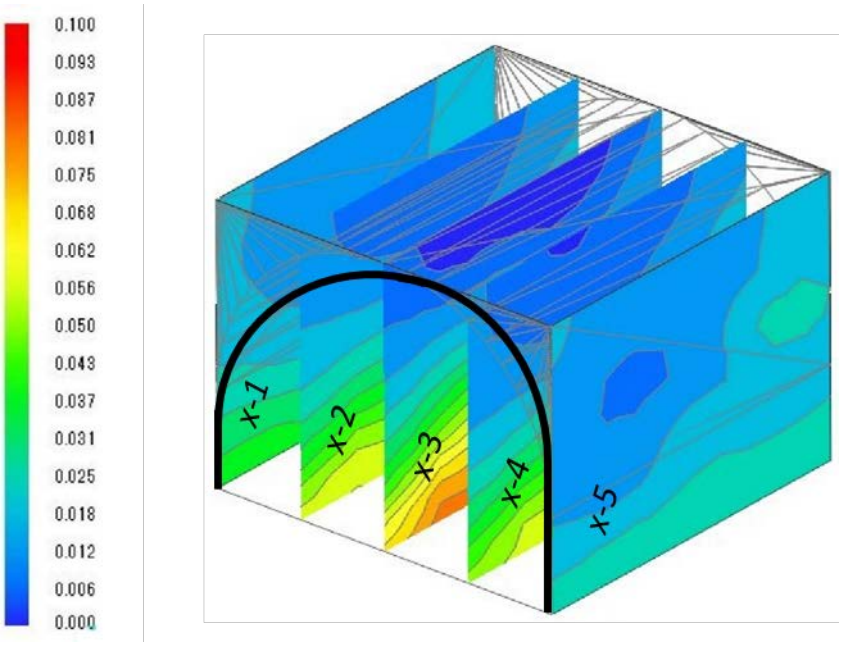


図 5.1-168　2 次元コンター図の作成断面位置

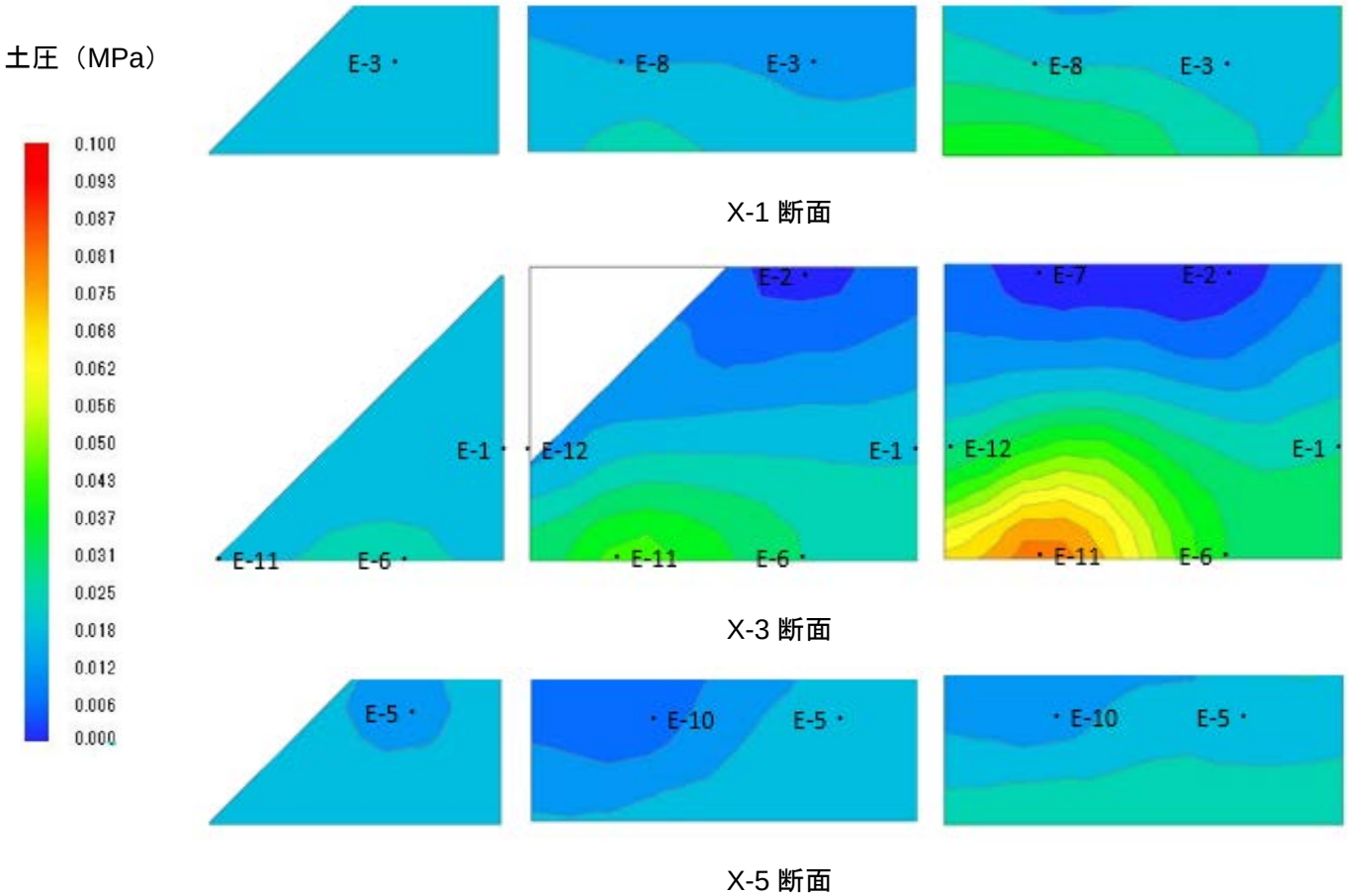


図 5.1-169　土圧の経時変化（左から 11 月下旬、12 月中旬、1 月下旬）

b) 水圧計による計測結果

水圧計の配置模式図を図 5.1-170 に、水圧の計測結果を図 5.1-171 と図 5.1-172 に示す。土圧と比較すると、合計 12 地点で観測している水圧については明瞭な上昇は確認されない。後述の土壌水分では合計 10 地点のうち 5 地点で飽和度 100%を示しているものの、水圧がいずれも 0 MPa に近い値を示していることから、埋め戻し領域からの排水を許容しているため、水分が飽和した地点であっても地下水は流出し水圧は解放されているものと思われる。H-11 のみ負圧が観測され、サクションによるものである可能性がある。今回設置した Geokon 社製の水圧計は、5.0 MPa（F.S）に対し精度±0.1%であり、0.005 MPa 相当である。

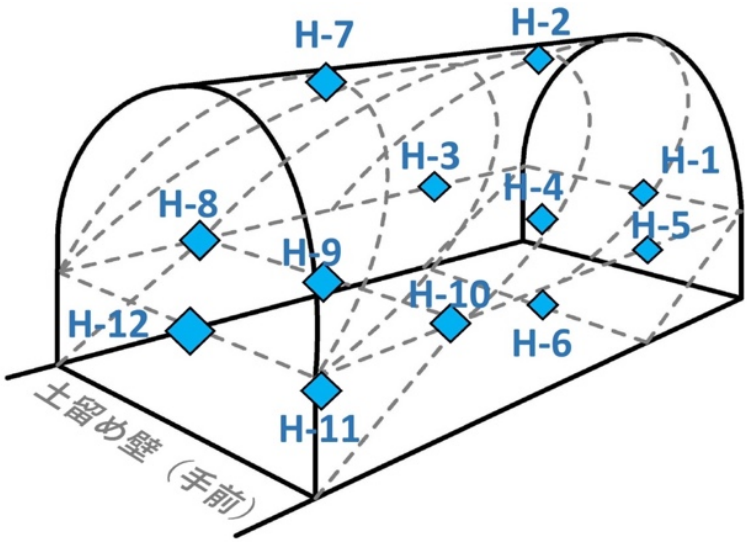


図 5.1-170　水圧計の配置概念図

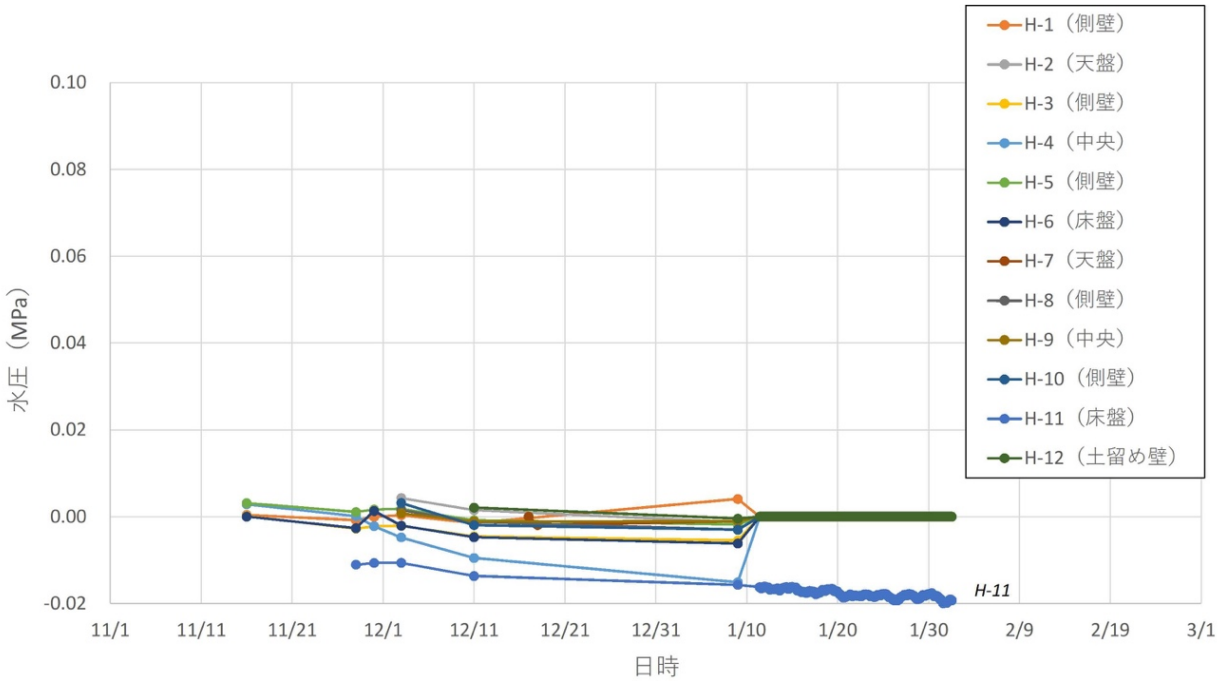


図 5.1-171　水圧の計測結果

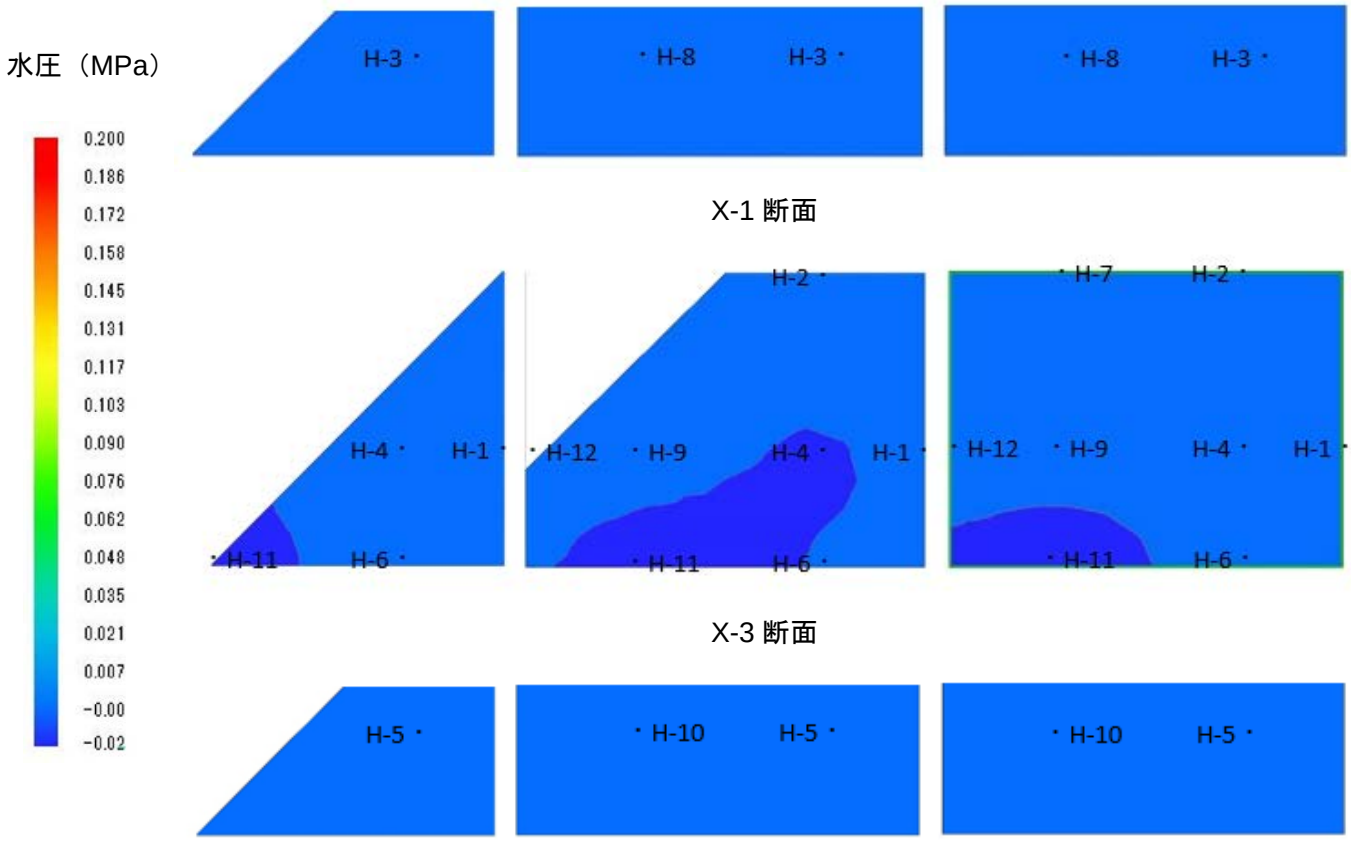


図 5.1-172　水圧の経時変化（左から 11 月下旬、12 月中旬、1 月下旬）

c) 土壌水分計による計測結果

土壌水分計の配置模式図を図 5.1-173 に、土壌水分の計測結果を図 5.1-174、図 5.1-175 に示す。試験坑道を土留め壁から切羽を向いた方向を基準に上下・左右・奥行の 3 方向に着目して整理した。

表 5.1-74 に示すように、吹付け時の埋め戻し材の飽和度は 47～65 %程度であったが、M-3、M-4、M-5 においては、設置の少なくとも 12 日後までに飽和度 100 %に達した。またデータはないものの、少なくとも M-1 は設置の 10 日後から、M-6 は設置の 1 ヶ月後から飽和度 100 %に達している。M-2、M-8、M-9、M-10 においては設置後に水分の上昇が確認できる。計測システムによるデータ取得が開始された 1 月 11 日時点では、土壌水分では合計 10 地点のうち 5 地点で飽和度 100 %を示した。これは、図 5.1-176 の設備横坑切羽面での地質観察時に見られている地下水の湧水の影響と考えられる。

以下、土壌水分計の計測結果に基づく地下水の浸潤過程について、図 5.1-175 に示すコンター図に基づき整理した。

＜上下方向＞

手前側の 5 センサーでは M-6、M-7（上段）＞M-8、M-9、M-10（下段）となっており、土壌水分は概ね上段で上昇が早い傾向をもつ。このため、手前側では坑道モルタル壁と接する周縁部から、埋め戻し材の浸潤が進行していた可能性が示唆される。一方、奥側では M-2 のみが飽和していない状態であり明瞭な傾向は確認できない。

＜左右方向＞

左右方向（左側＝中央＝右側）における土壌水分の上昇を比較すると、M-1 と M-2 では M-1（左側）＞M-10（右側）となり、M-6 と M-7 では M-6（左側）＞M-10（右側）となり、M-8 と M-9 と M-10 では M-8（左側）＞M-9（中央）＞M-10（右側）となっており、M-3 と M-4 と M-5 を除く横方向における土壌水分は概ね左側で上昇が早い傾向をもつ。吹付け施工中、施工済みの埋め戻し材内で地下水の浸潤が坑道左側で進行している可能性が示唆される。

＜奥行方向＞

M-1、M-3、M-4、M-5（奥側）＞M-6、M-8、M-9、M-10（手前側）となっており、M-2 と M-7 が逆転している点を除くと土壌水分は概ね奥側で上昇が早い傾向をもつ。吹付け施工中、施工済みの埋め戻し材内ではすでに浸潤が進行していた可能性が示唆される。

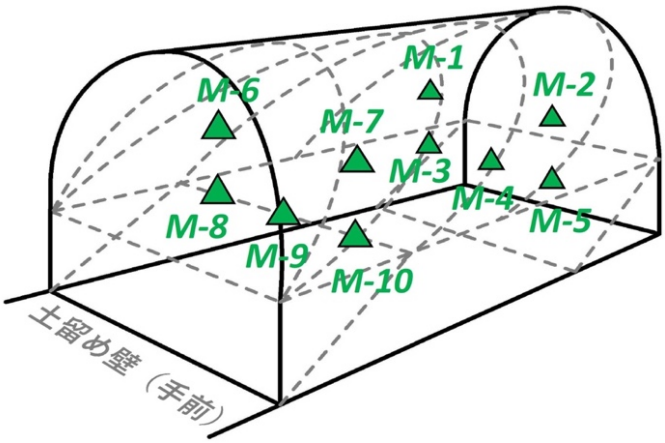


図 5.1-173　土壌水分計の配置概念図

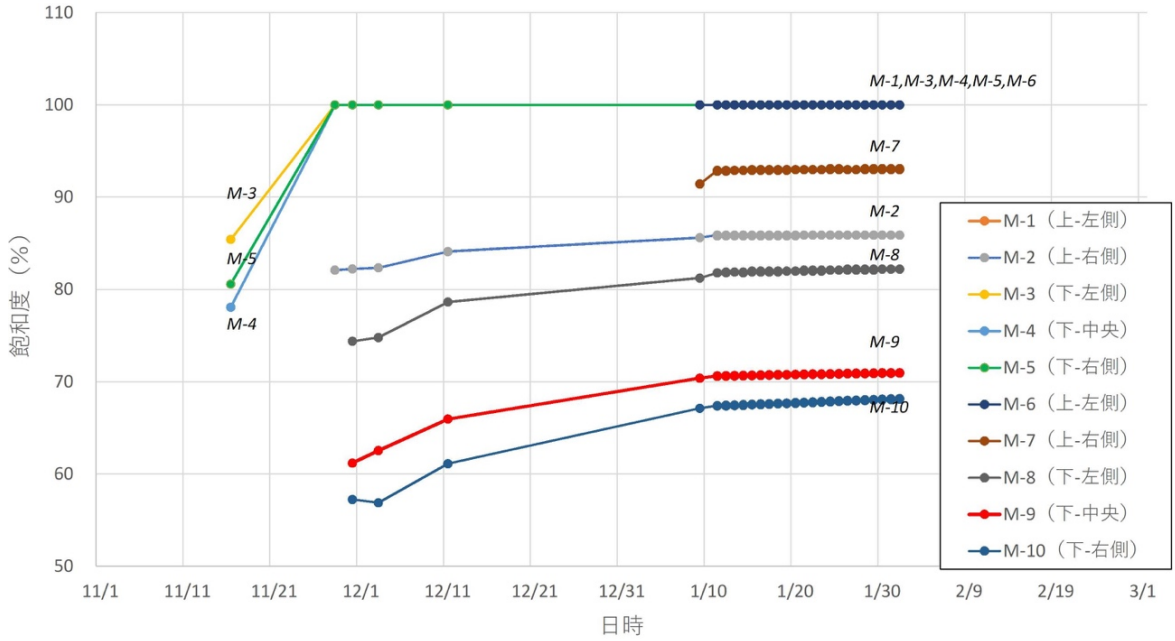


図 5.1-174　土壌水分の計測結果

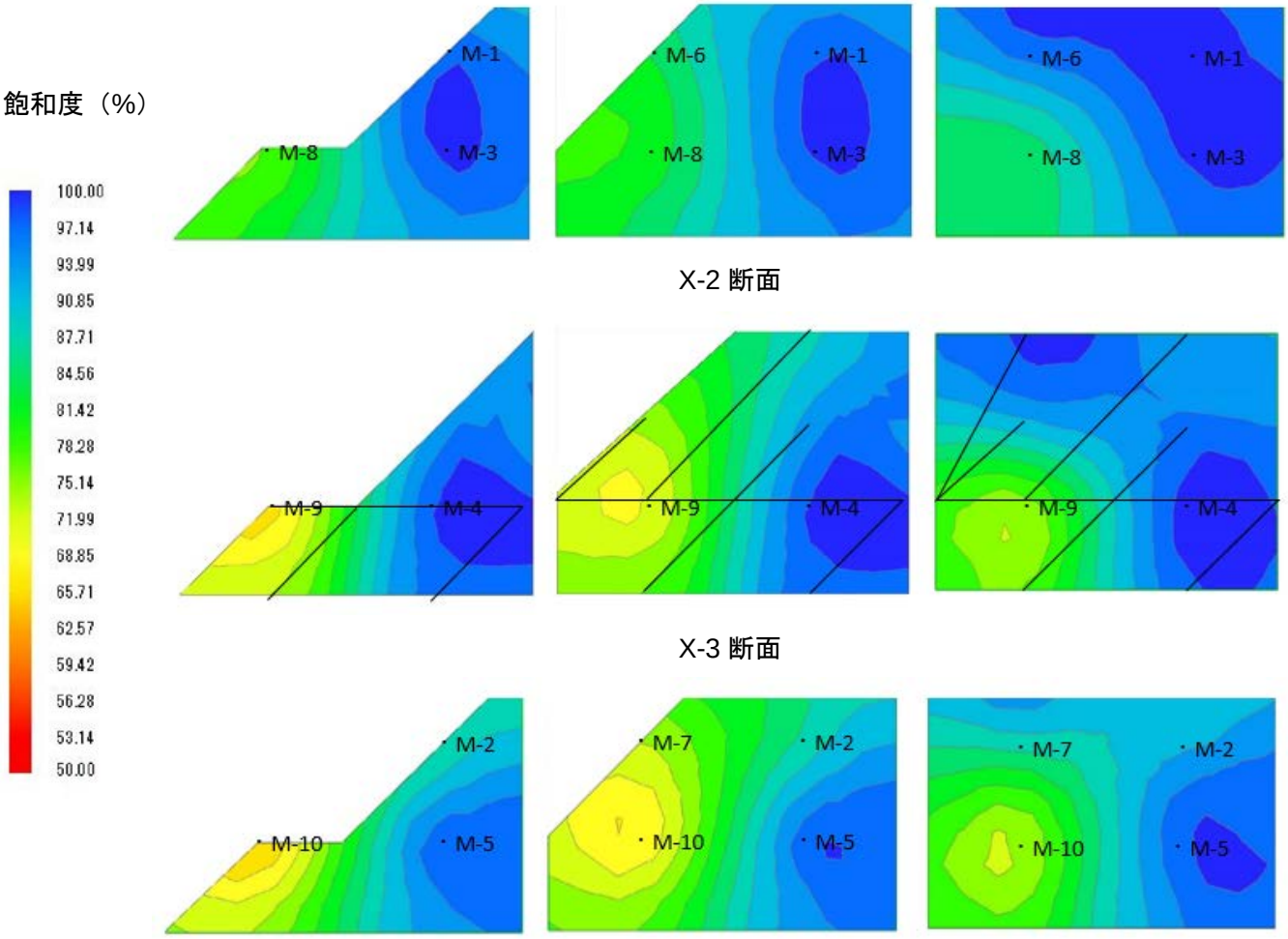


図 5.1-175　土壌水分の経時変化（左から 11 月下旬、12 月中旬、1 月下旬）
（X-3 断面にはケーブルコリドー（黒線）を併記）

表 5.1-74　吹付け後の埋め戻し材の飽和度

セクション	飽和度　Sr ave. (%)
セクション１	54.98
セクション２	61.30
セクション３	65.63
セクション４	47.31
セクション５	65.22
セクション６	60.25
セクション７	57.48
セクション８	62.97

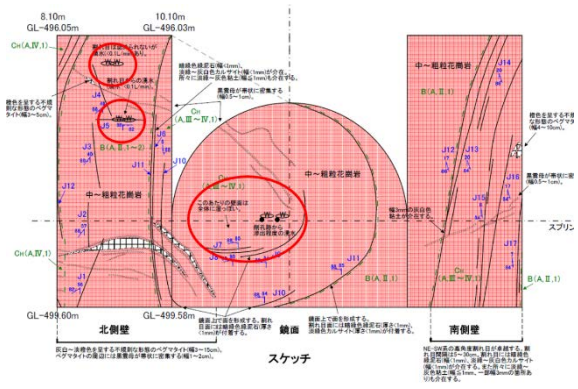


図 5.1-176　設備横坑切羽地点の地質状況（赤枠が湧水箇所）

d) 埋め戻し材の膨潤圧に関する検討

土壌水分計測の結果などから、簡単のために、埋め戻し材は飽和状態であり、かつ静止状態であると仮定すると、鉛直土圧（土の自重による鉛直方向の圧力）と水平土圧（土の自重による水平方向の圧力）は次式により算出できる。

$$\sigma_v = \gamma_{sat} \cdot z \qquad \text{式 5.1-2}$$

$$\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v = K_0 \cdot \gamma_{sat} \cdot z \qquad \text{式 5.1-3}$$

ここで、σ_v：鉛直土圧、σ_h：水平土圧、γ_{sat}：土の飽和単位体積重量、z：鉛直深さ、K_0：静止土圧係数≒0.5 である。

したがって、埋め戻し材による膨潤圧は、次式により算出できる。

膨潤圧(鉛直方向σ_h) = 土圧 − 水圧 − 鉛直土圧(土の自重による鉛直方向の圧力) **式 5.1-4**

膨潤圧(水平方向σ_v) = 土圧 − 水圧 − 水平土圧(土の自重による水平方向の圧力) **式 5.1-5**

表 5.1-75 に土圧計設置地点における膨潤圧の算出結果を示す。なお、算出に用いた飽和密度は全セクションの平均値とした。同表より、簡易的に計算された膨潤圧は全て負の値となり、現状ではすべての箇所について膨潤圧の発生はみられていないものと推測される。これは、発生している膨潤圧そのものが非常に小さいためと考えられる。

なお、図 5.1-177 に有効粘土密度と平衡膨潤応力（膨潤圧）の関係を示す（核燃料サイクル開発機構、2005）が、この結果から降水系地下水の場合の埋め戻し材の平衡膨潤（膨潤圧）を、次式により推定することができる。

$$\sigma = \exp(3.94{\rho_e}^3 - 13.71{\rho_e}^2 + 18.06\rho_e - 9.60) \qquad \text{式 5.1-6}$$

ここで、σ は平衡膨潤応力（MPa）、ρ_e は有効粘土密度（Mg/m³）である。この式から計算される $\rho_e = 0.4$ Mg/m³ のときの平均膨潤応力は、$\sigma = 0.013$ MPa となり、極めて小さく、上述の検討結果と調和的である。

表 5.1-75　土圧計設置地点における膨潤圧の算出結果

No.	E-1	E-2	E-3	E-5	E-6	E-7	E-8	E-10	E-11	E-12
土圧　（MPa）	0.03	0.00	0.02	0.02	0.03	0.00	0.02	0.01	0.10	0.03
水圧　（MPa）	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
鉛直土圧（鉛直方向の自重による圧力）（MPa）	-	-	-	-	0.31	-	-	-	0.31	-
水平土圧（水平方向の自重による圧力）（MPa）	0.05	-	0.05	0.05	-	-	0.05	0.05	-	0.05
鉛直深さ　（m）	1.10	0.00	1.10	1.10	3.30	0.00	1.10	1.10	3.30	1.10
膨潤圧　（MPa）	-0.02	0.00	-0.03	-0.03	-0.28	0.00	-0.03	-0.04	-0.21	-0.02

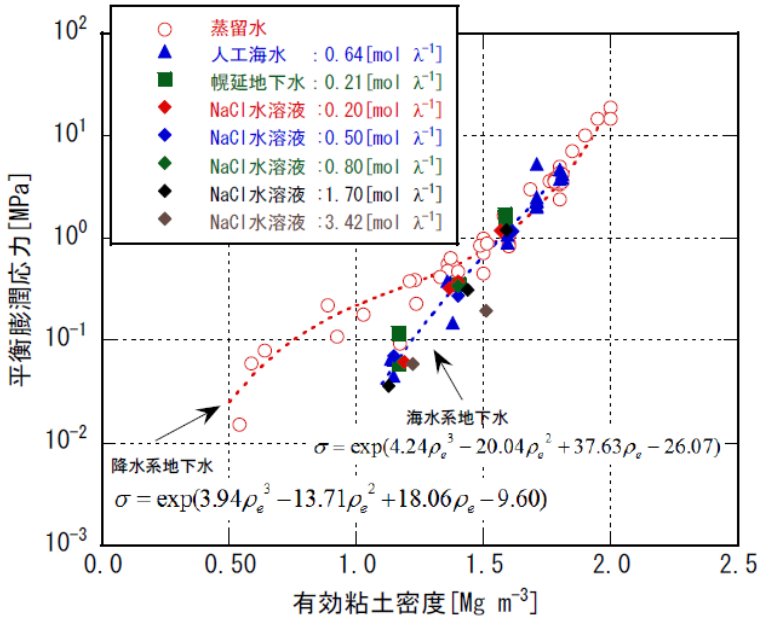


図 5.1-177　有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係（降水系地下水、海水系地下水）

e) 流量・ベントナイト流出量測定の結果

図 5.1-178 に総湧水量とベントナイト（クニゲル V1）濃度の経時変化を示す。また、表 5.1-76 には採水試料の吸光度と、検量線から算出したベントナイト濃度および 1 日あたりの湧水量を示す。

流量データのうち、ポンプの動作確認などを実施した期間はグラフ上で「ポンプの動作確認期間」と表示した。この期間にはポンプを停止した期間がある。動作確認後、ポンプが正常動作している期間（1/21~2/1 までの 12 日間）の流量加積は一定を示しており、直線傾きは y=136.69x（136.69 L/day）を示した。また、動作確認期間中のうち、ポンプが動作していた期間の直線傾きは y=140.00x（140.00 L/day、累積流量 192.5 L、ポンプ動作時間約 33 h）でほぼ同じ傾きを示した。「ポンプの同作確認期間中」のポンプ動作時間には多少の誤差を含むため、計測期間中の流量測定値は 136.69 L/day として以降の計算に用いる。

ポンプの動作確認期間を含む計測期間 21 日間（1/11~2/1）における総流量（水位計により計測）は、136.69 L/day×21 day = 2870.49 L であったと推測される。この間、採水器によって 1 日 1 回 300 mL ずつ採水していたため、採水分の 0.30 L/day×21 day = 6.30 L を加算すると、総流量は 2870.49 + 6.30= 2876.79 L となる。

ベントナイト（クニゲル V1）濃度は、採水 21 試料分（21 日分）を分析した。分光光度計を用いて吸光度を計測後、検量線によって算出したベントナイト濃度は、100 mg/L 以下で推移している。ただし、直近の 4 試料分（4 日分）については、最大 1100 mg/L 相当の高い値を示した。この 4 試料については、採水試料が淡赤褐色を呈していたことから、ベントナイト以外の何らかの物質（鉄の錆や目印のための赤色スプレーなど）が混入したことで吸光度が一時的に高く観測された可能性がある。

最終的なベントナイトの流出量は、流量とベントナイト濃度をかけて算出する。前述のとおり、1 日あたりの流量は採水分を加算すると、 136.99 L（136.69 L + 0.3 0L ≒ 0.1 L/min）となる。0.1 L/min の湧水量は、計画検討時の湧水量の値に等しく、図 5.1-179 に示す今回の施工試験実施場所直近で実施している水圧モニタリング観測結果にも吹付け施工による影響は見られない。これは、本施工試験では埋め戻し領域からの排水を許容していることと、埋め戻しの区間長が 4m

と非常に短いことによると考えられる。また、淡赤褐色となった 4 日分のデータを除いてベントナイトの流出量を算出すると、17 日間で 127.81 g のベントナイト（クニゲル V1）が流出したと考えられる。

なお、これまでのベントナイト流出量の測定結果より、総湧水量とベントナイトの流出量の関係は両対数グラフで表すと図 5.1-180 のようになっており、この結果からベントナイト流出量を y(g)、総湧水量を Q(g)とすると次式が得られる。

$$Y = 0.0015Q^{0.7809}$$

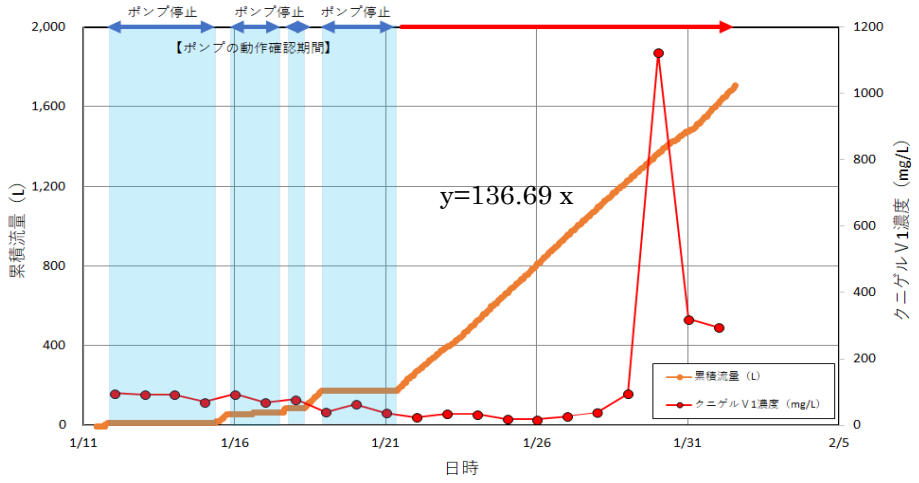


図 5.1-178　総湧水量とベントナイト濃度

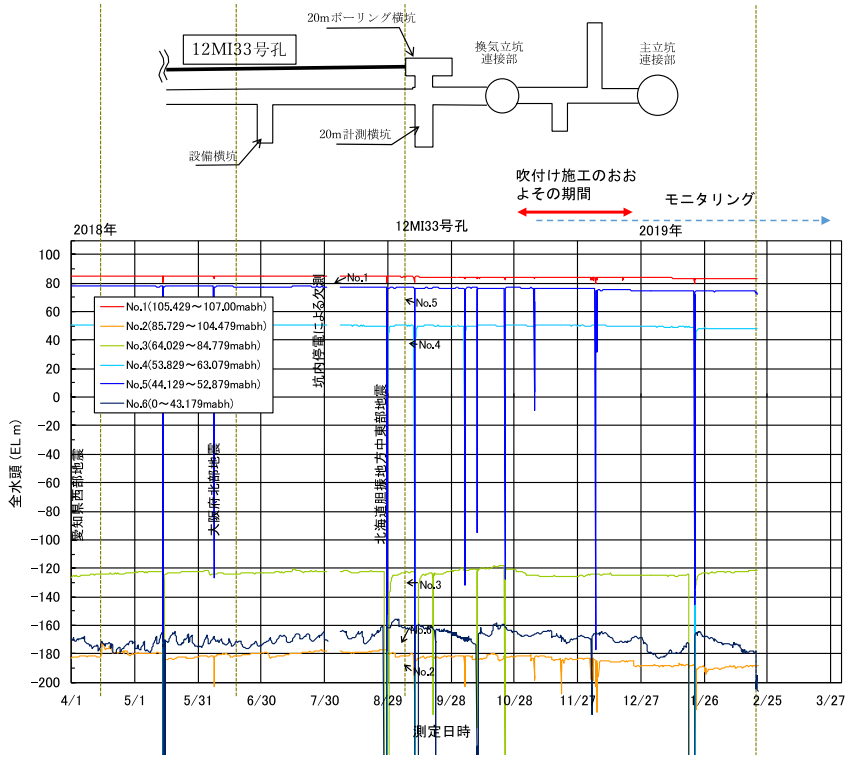


図 5.1-179　設備横坑直近での地下水水圧モニタリング結果（12MI33 号孔）

表 5.1-76　ベントナイト（クニゲル V1）流出量の算出結果

採水日	吸光度（abs）	クニゲル V1 濃度（mg/L）	流量（L/day）	クニゲル V1 流出量（g）
2019/1/12	0.8630	97	136.99	13.29
2019/1/13	0.8340	93	136.99	12.74
2019/1/14	0.8304	93	136.99	12.74
2019/1/15	0.6290	70	136.99	9.59
2019/1/16	0.8380	94	136.99	12.88
2019/1/17	0.6150	69	136.99	9.45
2019/1/18	0.7080	79	136.99	10.82
2019/1/19	0.3620	40	136.99	5.48
2019/1/20	0.5710	64	136.99	8.77
2019/1/21	0.3362	38	136.99	5.21
2019/1/22	0.2150	24	136.99	3.29
2019/1/23	0.3120	35	136.99	4.79
2019/1/24	0.3020	34	136.99	4.66
2019/1/25	0.1730	19	136.99	2.60
2019/1/26	0.1630	18	136.99	2.47
2019/1/27	0.2420	27	136.99	3.70
2019/1/28	0.3520	39	136.99	5.34
2019/1/29	0.8570	96	-	-
2019/1/30	10.0400	1123	-	-
2019/1/31	2.8600	320	-	-
2019/2/1	2.6300	294	-	-
合計				127.81

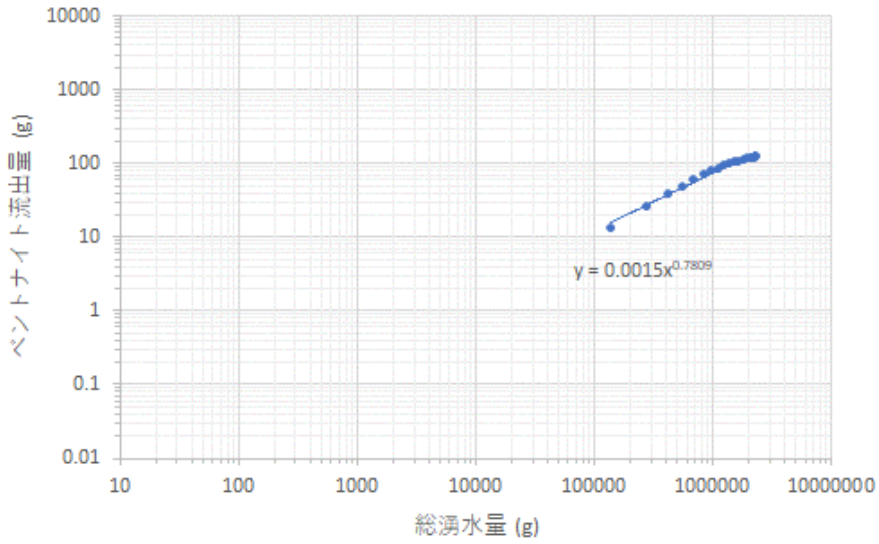


図 5.1-180　総湧水量とベントナイト（クニゲル V1）流出量の関係

(7) 小断面坑道の埋め戻しを対象とした全断面吹付け施工の適用性とその品質管理手法に関する検討

前節までに述べてきた計画検討、室内試験、地上における予備試験および瑞浪深地層研究所深度 500 m の研究坑道を活用した吹付け施工試験の結果を踏まえた、全断面吹付け施工の適用性とその品質管理手法について、検討結果を以下にまとめる。

1) 埋め戻し技術という観点からの全断面吹付け施工の適用性

本埋め戻し試験では、適用性の評価を「施工性」と「品質」の両面から行った。施工性の評価では、「施工速度」と「吹付け速度」などの実施工に直結するパラメータを算出するとともに、「品質」の評価指標としては「有効粘土密度」を用いた。なお、「施工速度」は吹付け施工試験に要した施工時間（具体的には、吹付け段取り、段取り替え、吹付け、一時中断、片づけなどの時間）から算出した速度で、「吹付け速度」は施工時間のうち吹付け時間のみを抽出して算出した速度である。また、有効粘土密度は単位体積あたりに含まれるベントナイト分の重量をそれ自身の体積で割ることにより得られる純粋なベントナイト分の密度であり、本施工試験ではジェネリックな結晶質岩系岩盤の透水性の値と同等の透水係数値を示す 0.4 Mg/m^3 を目標値として定めた。

「施工性」の観点から見ると、施工速度は、587.9～1172.5 kg/h となり、作業員の慣れによってノズルの整備作業などが定常化したことにより、セクションの進行に伴って改善がみられた一方、ノズルの移動（段取り替え）や目詰まりなどによって連続的な吹付けが困難であった場合は大きく施工速度が低下した。吹付け速度は、1119.0～1962.3 kg/h であり、セクション１におけるコンプレッサの吐出量の不足のほか、上向きにノズルを向けて吹付けをおこなった場合のエネルギーロスによって吹付け圧力が低下したことにより、吹付け速度が低下した。

地質環境や実際に使用できる場所の環境条件など様々な条件の違いがあり、国内外の他の場所での施工実績や適用工法（撒き出し・転圧、ブロック施工など）との比較は困難であるが、得られた施工速度・吹付け速度とも、制約条件のほとんどない地上での予備試験と比較し遜色ない結果であること、吹付けで課題となるロス率についても最も吹付け面とノズルの位置が近かったセクション８以外は地上での予備試験（その２）と同程度以下で収まっていること、また、施工した埋め戻し材の「品質」についても、全てのセクションにおいて計画時に設定した 0.4 Mg/m^3 を上回る値を得ることができ、少なくとも 10^{-8} m/s 相当の母岩に対する埋め戻しに求められる要求性能（母岩と同程度の透水性確保）を満たしうる事、試料採取により得られた有効粘土密度は、0.05～0.1 Mg/m^3 程度のバラツキがあり、今回適用した吹き付け施工法では埋め戻し領域内の材料の密度分布にこの程度の不均質性は発生することが推定されるものの、図 5.1-1 に示したベントナイトの有効粘土密度と透水性の関係からは、降水系地下水あるいは塩水系地下水のいずれの場合も透水係数は目標設定値とほぼ同等かもしくはそれより低くなることが示唆されることなどが実証的に確認された。これらのことから、今回適用した全断面吹付け工法は、地層処分事業における埋め戻し工法として実用に耐える工法の一つになり得ると評価できると考える。

一方、本埋め戻し試験で取得した様々なデータの分析結果から、作業員の慣れや吹付け条件（ノズルの位置、向き）、施工環境（換気環境や供給可能な電力量）が施工性や品質に大きな影響を与えることも確認された。特に、施工環境は、実際の地層処分場でも問題になる可能性があり、施設全体の設計時点で十分配慮する必要があると思われる。吹付け施工は、転圧締固めやベントナイトブロックによる施工方法と比較して、坑道側壁や天端付近などの狭隘な環境下での施工も比較的容易であると考えられるが、吹付け条件や環境によっては施工性や品質が低下することに注意が必要である。具体的には、本埋め戻し試験において見られたように、上向きにノズルを向けて吹付けをおこなった際の吹付け圧力低下が、施工した埋め戻し材の密度に大きく影響していると考えられる結果が得られたことから、少なくとも埋め戻し対象領域の高さ（今回の試験では 3 m）に対し、水平もしくは下向きで施工可能な吹付け機の使用、吹付けノズルの改良や十分な吐出量の確保など、吹付け面に対する吹付け圧力が低下しない対策が必要と考えられる。

このほか、本施工試験では、吹付け後に、天端付近に目視確認できるレベルの隙間が観察され、これは埋め戻し材の自重沈下と推定された。さらに、今回の試験領域のように、壁面から非常わずかな湧水が生じるだけのケースでも、埋め戻し材が最適含水比を超える水分量になると、結果

として施工した埋め戻し材の品質劣化を招く可能性があることも明らかになった。前者については、シーリングシステムの設計の段階で自重沈下による隙間の発生を最小限に抑えられるように埋め戻し材の密度設計を行った上で、膨潤による隙間閉塞を期待できるよう、天端付近の吹付け時にベントナイト配合率を高くした埋め戻し材を用いることが一つの対策になると思われる。後者については、本試験では、品質が低下した部分を除去した上で施工を継続する、あるいは品質低下を最小化するため湧水箇所を先に埋め戻してから施工を継続するなどの対応を取ったが、実際の地層処分事業では、埋め戻される領域が非常に広範囲であることから、少なくとも埋め戻し材を施工する必要がある坑道では壁面湧水を生じさせないような対策（裏面排水の設置による壁面からの漏水防止、ロックボルトを使用しない支保工の使用）を施設の設計・施工に組み入れることが望ましいと考える。

2) 適用した品質管理手法の有効性

本施工試験は、全断面吹付け施工を想定した場合の品質管理手法の構築に資する情報を得る事も目的の一つである。それについては、施工試験の計画検討、室内試験および地上での予備試験の結果を踏まえ、図 5.1-36 に掲げたような施工中の品質管理のための管理基準や計測項目を設定し、本試験を実施した。

その結果、前述したように、最終的に施工した埋め戻し材の密度は、当初目標値を上回っており、本試験で適用したな品質管理のための管理基準や計測項目は質・量とも適切であったと考えられる。一方で、3D スキャナによるバルクの密度計測は、最もコンベンショナルな試料採取と土質試験によって得られた値と比較し、やや小さくなる傾向がみられたが、これは、計測方法そのものの違い（パラフィン法と 3D スキャナ）よりも、密度測定のタイミングや対象範囲の違いが影響している可能性が高いと判断される。このような相違は生じるものの、3D スキャナによるバルクの密度計測結果と試料採取によって得られた密度測定結果は一定の相関性を有していると考えられること、10 分程度の計測で、ある体積の平均的な密度を算定できること、試料採取に伴う危険なども生じないなど大きな利点も有しており、実際の地層処分事業で想定されるような長大なトンネル群の埋め戻しに関する品質管理では、試料採取による品質管理と合わせ、図 5.1-119 で示したような関係を予め把握しておくことで、3D スキャナによる密度計測の併用は実際の地層処分事業における合理的・効率的な品質管理手法となることが期待される。

モニタリング技術とそれらの品質管理への有効性については、上記同様、図 5.1-123 に示したようにモニタリング項目毎に確認項目などを設定し、現在も計測を継続しているところであり、その結果も踏まえて評価する必要があると考える。これまでの結果では、土圧計および水圧計の測定結果を用いた簡易的な膨潤圧の算出結果より、現状埋め戻し後の膨潤圧はほとんど発生していないことが推定されるとともに、天端付近は前述のような隙間の影響で土圧自体が作用していない結果となっている。これは、埋め戻し材の鉛直方向への膨潤変位よりも飽和過程におけるサクションの減少に起因する自重沈下の影響が大きいためと考えられる。逆に言えば、天盤で土圧が観測されるようになった場合、埋め戻し材の自重と水圧の影響はないことから、それはほぼ膨潤圧とみなすことが可能と考えられる。土壌水分計の測定結果では、埋め戻し材中の水分移動は切羽左側から進行していることが確認された。これは設備横坑の湧水発生箇所は切羽から左側に集中していたことから、湧水発生箇所から水分移動が進行していることを示していると考えられ、施工試験前の地質環境の状態との整合性が見られているとともに当初の設置目的を達成できている結果も得られた。一方で、一部の土壌水分計は、設置直後から飽和度が高い傾向がみられ、これについては設置箇所が既に壁面からの湧水の影響を受けていた可能性が示唆された。

今後、土圧計や土壌水分計のモニタリングを継続することで、天盤部の膨潤過程や埋め戻し領

域全体の水分移動に関する知見が得られれば、これらのモニタリングの品質管理手法という観点での有効性をより正確に評価できること考えられる。

図 5.1-181 は、国内外の室内試験で取得されたベントナイト流出量の測定結果（原環センター、2016）である。本埋め戻し試験におけるベントナイト流出量の測定結果（図 5.1-182）と比較すると、材料の違い（MX80 とクニゲル V1）や実験規模の違い（室内試験と実規模原位置試験）に依らず、ほぼ同じ勾配であることが分かり興味深い。同じクニゲル V1 を使用した既往の室内試験の関係式と比較した場合、配合率や密度は異なる（既往の実験は、ケイ砂 30 wt%混合クニゲル V1、乾燥密度約 1.6 Mg/m^3）ものの、本埋め戻し試験と類似の関係式が得られていることも分かる。

このため、本埋め戻し試験の条件下（埋め戻し材、土留め壁（排水構造）、坑道の湧水量や使用部材）における、将来的なベントナイト流出量の予測を本試験で得られた関係式を使い簡易的に求めると、1 年後のベントナイト流出量は 1,543 g、10 年後は 9,314 g となる。このような結果は、実際の地層処分施設が回収可能性を保持する期間、埋め戻しが行われている領域でどの程度の変化を設計段階で見込む必要があるかの目安の情報を提供することができると考えられ、本計測データは今後のシーリング設計技術開発でも有用なものとなることが期待できる。

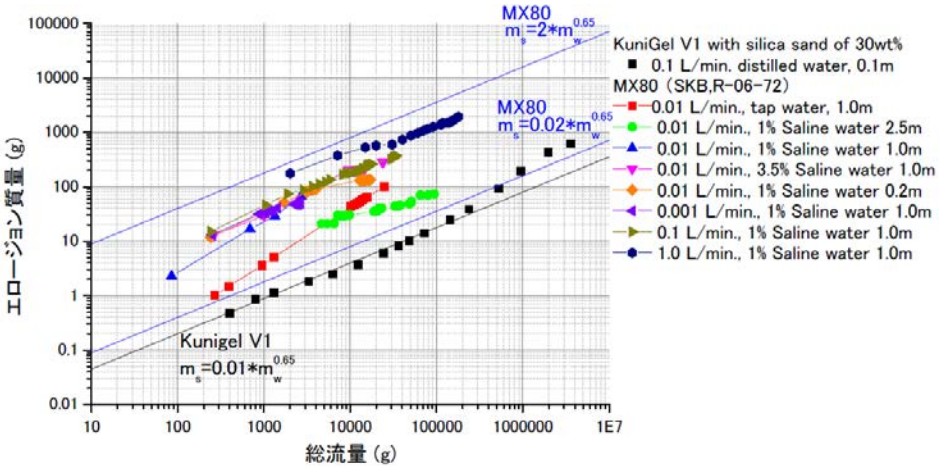


図 5.1-181　国内外のベントナイト流出量（エロージョン質量）測定結果（原環センター、2016）

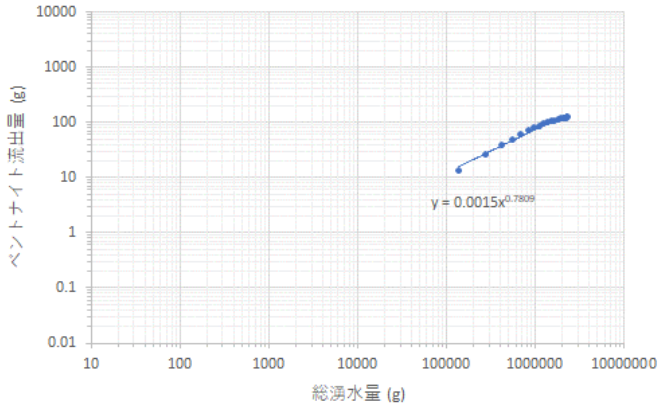


図 5.1-182　総湧水量とベントナイト（クニゲル V1）流出量の関係（再掲）

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 課題設定の考え方及び目的

(1) 研究開発の課題設定の考え方

地層処分サイトの選定プロセスの概略図を図 5.2-1 に示す。地層処分のサイト選定では、文献調査、概要調査、精密調査の 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（NUMO, 2018）。調査区域の絞り込みにあたっては、地質環境などの詳細化される情報に応じた処分場の設計および安全評価が繰り返され、処分場に必要とされる安全機能を有する処分場が構築可能なサイトが選定される。文献調査段階では、文献およびその他の資料を用いて推定されたサイトの地質環境特性に対して人工バリア仕様と処分施設概念を例示し、概略的な安全評価などにより概要調査地区の選定が行われる。文献調査は 2 年程度の期間で実施することが計画されている（経済産業省資源エネルギー庁・原子力発電環境整備機構, 2019）。

埋め戻し材の設計要件と指標、評価項目、仕様はそれぞれ表 5.2-1、表 5.2-2、表 5.2-3 のように示されている（NUMO、2018）。埋め戻し材には、掘削土を利用することが合理的であるとされているが、現段階では特定のサイトを持たないため、これらの仕様は、掘削土の物性をケイ砂で代用した場合の例であり、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ことが示されている（NUMO, 2018）。

掘削土の性状は岩種によって異なるため、複数の候補サイトがある場合には、埋め戻し材の設計仕様はそれぞれのサイトで異なる可能性がある。また、候補サイトの地質環境条件によっては、埋め戻し材への要求性能が変更されることも想定される。さらに、埋め戻し材の施工後の水みちの形成を抑制できる施工技術や施工プロセス管理方法は、施設設計の更新に対して柔軟に対応できることが必要となる。埋め戻し材には、安全機能として“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”が設定されている（NUMO, 2018）ことから、埋め戻し材と坑道の界面などに水みちが形成されずに、飽和して安定な状態になるまでの過程を予測することも重要となる。

したがって、以下の情報を整備しておくことでサイト選定プロセスに対して柔軟に対応できるようになると考えられる。

- ○多様な地質環境を対象とした施設設計に対して、柔軟に対応可能な埋め戻し材の材料特性データ
- ○坑道に隙間なく、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
- ○埋め戻し材が飽和して安定な状態になるまでの過程を確認するための解析方法

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特性を取得するための室内試験、施工後の埋め戻し材の品質やそのばらつきを把握するための小規模施工試験、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の坑道における実規模試験を実施し、これらの試験を効率的に組み合わせた取り組みが必要となる。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 5.2-2 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透水特性や強度特性などに関する試験を実施することで、多様な地質環境を対象とした施設設計に対して、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、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が参考になると考えられる。これらの施工管理方法を参考にしつつ、小規模施工試験後の埋め戻し材の品質評価などの結果に基づいて施工プロセス管理方法の案を構築する。次に、地上施設での実規模施工試験で施工プロセス管理方法（案）の適用性を確認し、必要に応じて施工試験後の品質評価の結果を施工プロセス管理方法（案）に反映する。また、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、地下施設で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。

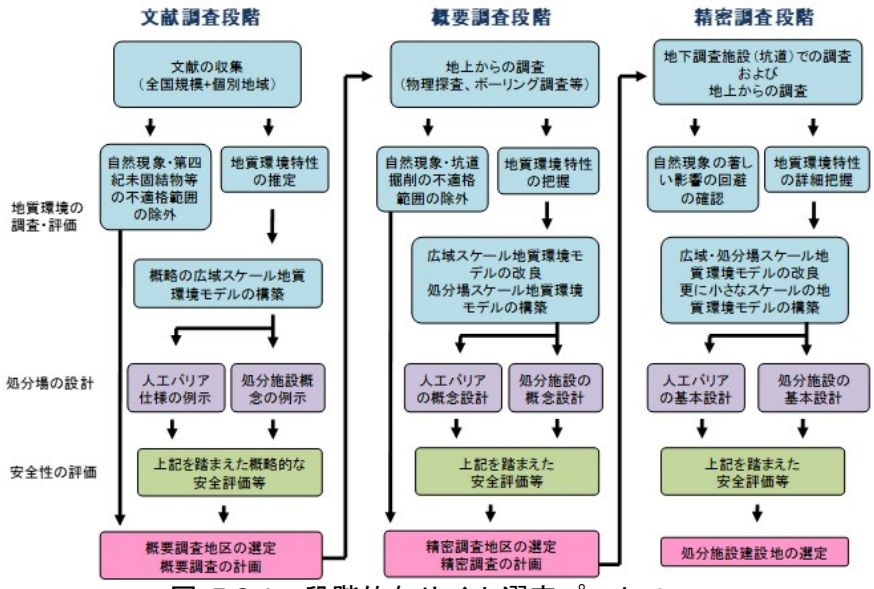


図 5.2-1　段階的なサイト選定プロセス
（NUMO、2018）

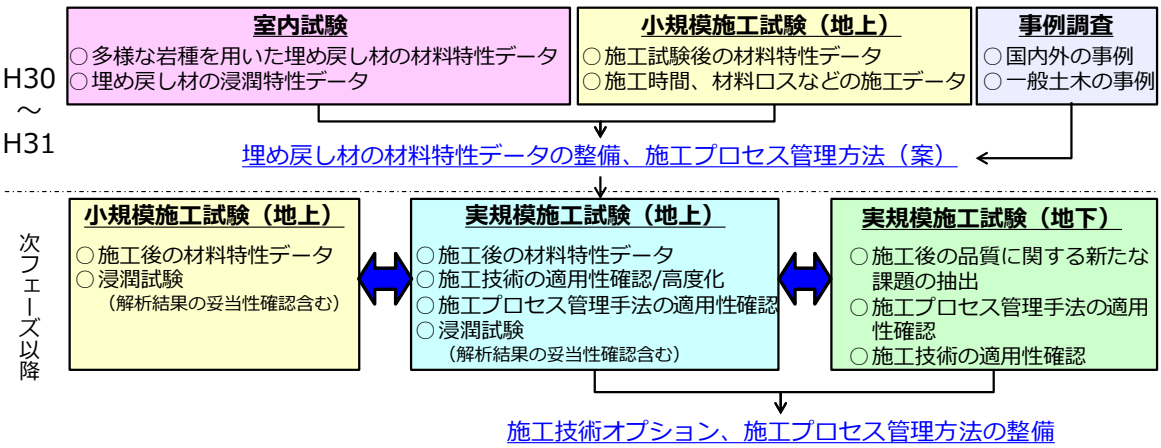


図 5.2-2　研究開発の進め方

表 5.2-1　埋め戻し材の設計要件と指標

構成要素	設計要件	指標	基準
埋め戻し材	低透水性	透水係数	母岩の平均的な透水係数の 10 倍以下
	製作施工性	乾燥密度	1.8 Mg/m^3

表 5.2-2　埋め戻し材の評価項目

評価項目	指標	基準
緩衝材および止水プラグの膨出抑制	緩衝材などの有効粘土密度	1.2 Mg/m^3 以上

表 5.2-3　埋め戻し材の仕様

施工方法	配合	乾燥密度	有効粘土密度	対象となる坑道
締固め工法	ベントナイト 15% 掘削土 85%	1.8 Mg/m^3	0.6 Mg/m^3	処分坑道（竪置き）、 連絡坑道、主要坑道、 アクセス斜坑、アクセス立坑
吹付工法	ベントナイト 50% 掘削土 50%	1.6 Mg/m^3	1.2 Mg/m^3	処分坑道（横置き・PEM）

(2) 目的

本事業は 2 年間で実施する計画のため、図 5.2-2 に示した次フェーズ以降の展開を踏まえて以下を目的として実施する。

○　室内要素試験によるデータの拡充を行い基盤情報として整備する。
○　撒き出し・転圧工法と吹付け工法について、小規模施工試験により施工後の品質評価を行い、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。
○　上記より施工プロセス管理方法（案）を構築する。

(3) 2 年間の研究開発計画

埋め戻し材に関する基盤情報を整備するためには、これまでに実施されてきた埋め戻し材の試験データを整理するとともに、ベントナイトの種類、含有率および模擬掘削土の岩種、粒径をパラメータとして、室内試験により締固め曲線、透水係数、膨潤圧などの試験データを取得する必要がある。とくに、既往の埋め戻し材の試験結果は、模擬掘削土をケイ砂で代用したものが多いため、模擬掘削土として火成岩類および堆積岩類の砕砂または砕石・砕砂を用いた試験データについても取得する。また、埋め戻し材への地下水の浸潤挙動を解析で予測するために必要な不飽和透水係数や透気係数などについてのデータも取得する。さらに、撒き出し・転圧工法と吹付け工法を対象として、施工機械や施工条件をパラメータとした小規模施工試験を実施し、施工後の埋め戻し材の密度、含水比、透水係数などのデータを取得する。施工試験時には、施工時間や材料ロスなどの施工技術の選定に資するデータも併せて取得する。施工プロセス管理方法については、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、小規模施工試験後の埋め戻し材の品質評価などの結果に基づいて施工プロセス管理方法の案を構築する。

5.2.2　埋め戻し材の材料特性試験（室内試験）

ベントナイトの種類（Na 型、Ca 型）、混合率、模擬掘削土の種類（火成岩、堆積岩など）、最大粒径、締固めエネルギーを材料パラメータとした室内試験を実施し、埋め戻し材の材料特性データを取得した結果を示す。また、材料パラメータが各材料特性に与える影響について評価する。

なお、2 年間で効率的に埋め戻し材の室内試験データを整備するために、本年度は締固め試験におけるデータを優先的に取得し、その他の室内試験に関してはケイ砂と Ca 型ベントナイトの埋め戻し材のデータを取得した。

(1) 使用材料および材料基本物性試験

試験に使用した材料を表 5.2-4 に示す。ベントナイトは Na 型のクニゲル V1 と Ca 型のクニボンド RW を用いた。模擬掘削土は、ケイ砂、火成岩類、堆積岩類の 3 種類を用いた。ケイ砂は 3 号ケイ砂および 6 号ケイ砂を用いた。火成岩類は、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た。堆積岩類は、砂岩、凝灰岩の砕石と砕砂、珪藻土、泥岩の 4 種類を用いた。各模擬掘削土の写真を図 5.2-3 に示す。

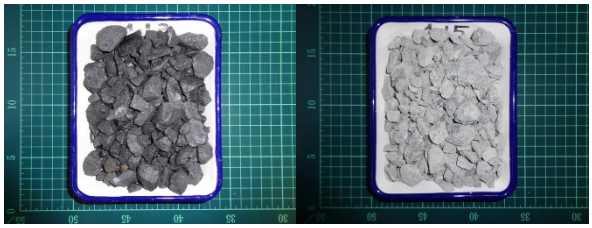
表 5.2-4　試験に使用した材料

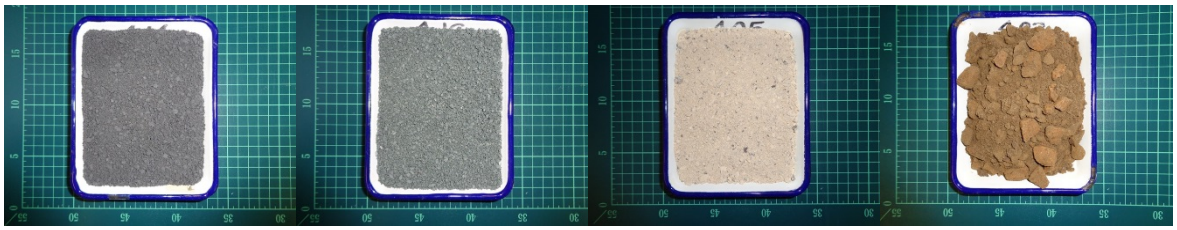
材料	種類		製品	
ベントナイト	Na 型		クニゲル V1	
	Ca 型		クニボンド RW	
模擬掘削土	ケイ砂		三河ケイ砂 3 号	
			三河ケイ砂 6 号	
	火成岩類	流紋岩	砕石 2005	砕砂
		安山岩	砕石 2005	ｽｸﾘｰﾆﾝｸﾞｽ
		玄武岩	砕石 2005	砕砂
		花崗岩	砕石 2005	砕砂
	堆積岩類	砂岩	砕石 2005	ｽｸﾘｰﾆﾝｸﾞｽ
		凝灰岩	砕石 2005	砕砂
		珪藻土	8mm 以下	
		泥岩	掘削ズリ	

※砕砂：5mm 以下

※ｽｸﾘｰﾆﾝｸﾞｽ：2.5mm 以下

流紋岩　　安山岩　　玄武岩　　花崗岩





砂岩　　凝灰岩　　珪藻土　　泥岩

図 5.2-3　使用した模擬掘削土（上：砕石、下：砕砂）

試験に使用した材料の試験項目を表 5.2-5 に、ベントナイトの基本物性を表 5.2-6 に、模擬掘削土の基本物性を表 5.2-7 に示す。

ベントナイトの基本物性についてみると、Ca 型のクニボンド RW は Na 型のクニゲル V1 と比べて、メチレンブルー吸着量が大きいため、モンモリロナイト含有率が高いと考えられるが、膨潤力はクニゲル V1 よりも小さい結果であった。

模擬掘削土の MBC の測定結果をみると、多くの模擬掘削土が 0 付近であるが、珪藻土および泥岩は若干の MBC の値を示した。これにより、珪藻土および泥岩には、モンモリロナイトであるかは不明ではあるが、吸着性の鉱物が含まれることが推察される。模擬掘削土の粒度試験の結果より、ケイ砂 3 号、ケイ砂 6 号は均等係数が小さく他の砕砂と比べて粒子径が揃っていること、細粒分含有率は珪藻土および泥岩で数値が高いことがわかる。また、模擬掘削土の密度および吸水率は、火成岩類、堆積岩類での大きな違いはないものの、珪藻土および泥岩において土粒子密度に対しての表乾密度と乾燥密度の値が小さく、吸水率が大きいことより、他の材料と比べて多孔質であることがわかる。

表 5.2-5　使用した材料の試験項目

試験項目	規格
メチレンブルー吸着量	「ベントナイト(粉状)のメチレンブルー吸着量測定方法」JBAS-107-91
膨潤力	「ベントナイト(粉状)の膨潤力測定方法」JBAS-104-77
含水比	「土の含水比試験方法」JIS A 1203
粒度	「土の粒度試験方法」JIS A 1204
土粒子密度	「土粒子の密度試験方法」JIS A 1202
密度、吸水率	「細骨材の密度及び吸水率試験方法」JIS A 1109
	「粗骨材の密度及び吸水率試験方法」JIS A 1110

表 5.2-6　試験に使用したベントナイトの基本物性

材料		MBC (mmol/100g)		膨潤力	含水比	土粒子密度
		測定値	成績書	(mL/2g)	(%)	(Mg/m^3)
ベントナイト	クニゲルV1	91	86	21.0	7.9	2.789
	クニボンドRW	110	112	7.0	10.4	2.652

表 5.2-7　試験に使用した模擬掘削土の基本物性

材料		MBC (mmol/100g)	含水比 (%)	粒度		土粒子密度 (Mg/m^3)	表乾密度 (Mg/m^3)	絶乾密度 (Mg/m^3)	吸水率 (%)
				均等係数	細粒分含有率				
ケイ砂	3号	－	0	1.7	0.3	2.658	－	－	－
	6号	－	0	2.0	1.2	2.654	－	－	－
流紋岩	砕石	0	0.5	2.2	0	2.652	2.62	2.59	0.95
	砕砂		3.7	5.2	0.1		2.56	2.50	2.50
安山岩	砕石	4	1.3	2.3	0.1	2.791	2.71	2.66	1.60
	砕砂		5.3	5.2	0.2		2.64	2.55	3.51
玄武岩	砕石	0	1.2	2.2	0.1	2.797	2.74	2.70	1.57
	砕砂		4.5	9.4	0.3		2.72	2.65	2.42
花崗岩	砕石	0	0.8	2.3	0	2.684	2.66	2.63	0.86
	砕砂		4.9	5.4	0.7		2.64	2.61	1.07
砂岩	砕石	0	1.1	2.1	0	2.688	2.66	2.64	0.52
	砕砂		3.8	7.6	0.9		2.58	2.52	2.51
凝灰岩	砕石	4	0.4	2.0	0.1	2.927	2.92	2.90	0.68
	砕砂		2.5	3.9	0.1		2.83	2.78	1.66
珪藻土		16	27.7	－	20.2	2.330	1.72	1.29	33.66
泥岩		26	32.9	－	13.2	2.516	1.80	1.34	33.50

(2) 締固め試験（最大乾燥密度と最適含水比の取得）

埋め戻し材の締固め特性（最大乾燥密度と最適含水比の関係）を把握するために、ベントナイトの種類、模擬掘削土の種類および最大粒径（粒度分布）、締固めエネルギーなどをパラメータとして締固め試験を実施した。締固め試験は、「突固めによる土の締固め試験（日本工業規格：JIS A 1210）」に基づいて実施した。締固めエネルギーは、1.0Ec（A 法）、2.0Ec（A 法で 1 層当たりの突き固め回数を 2 倍に設定）、4.5Ec（C 法）とした。また、試料の準備方法および使用方法の組合せは、c 法（湿潤法で非繰返し法）とした。締固め試験結果から得た最大乾燥密度と最適含水比について、模擬掘削土にケイ砂を用いた結果を表 5.2-8 に、模擬掘削土に火成岩類および堆積岩類を用いた結果を表 5.2-9 に示す。

表 5.2-8　模擬掘削土にケイ砂を用いた際の最大乾燥密度と最適含水比

ベントナイト		模擬掘削土	締固めエネルギー	締固め試験	
種類	混合率 (%)			最大乾燥密度 (Mg/m^3)	最適含水比 (%)
クニゲル V1（Na 型）	15	ケイ砂 3 号（三河産）	Ec	1.705	17.0
			2Ec	1.761	16.0
			4.5Ec	1.874	12.1
		ケイ砂 6 号（三河産）	Ec	1.691	18.5
			2Ec	1.746	17.2
			4.5Ec	1.811	14.8
			6Ec	1.847	13.5
	30		Ec	1.741	16.9
			2Ec	1.795	15.4
			4.5Ec	1.909	12.7
			6Ec	1.981	11.8
	5		4.5Ec	1.651	17.1
	50		4.5Ec	1.950	12.8
	5		6Ec	1.651	16.4
	50		6Ec	1.943	12.6
クニボンド RW（Ca 型）	15	ケイ砂 3 号（三河産）	Ec	1.743	17.6
			2Ec	1.779	16.8
			4.5Ec	1.856	13.3
		ケイ砂 6 号（三河産）	Ec	1.700	18.4
			2Ec	1.748	17.3
			4.5Ec	1.788	16.2
			6Ec	1.829	14.1
	30		Ec	1.547	23.8
			2Ec	1.607	21.6
			4.5Ec	1.731	18.5
			6Ec	1.809	15.3
	5		4.5Ec	1.623	17.1
	50		4.5Ec	1.637	18.9
	5		6Ec	1.635	16.7
	50		6Ec	1.647	19.8

表 5.2-9　模擬掘削土に火成岩類および堆積岩類を用いた際の最大乾燥密度と最適含水比

ベントナイト		模擬掘削土		締固めエネルギー	締固め試験	
種類	混合率 (%)				最大乾燥密度 (Mg/m^3)	最適含水比 (%)
クニゲル V1 (Na 型)	15	火成岩類	花崗岩(砕砂)	Ec	1.790	13.0
			花崗岩(砕石・砕砂)		1.975	10.3
			流紋岩(砕砂)		1.803	13.4
			流紋岩(砕石・砕砂)		1.924	10.8
			安山岩（砕砂）		1.902	12.7
			安山岩（砕石・砕砂）		1.977	11.3
			玄武岩（砕砂）		1.919	13.4
			玄武岩（砕石・砕砂）		1.910	13.7
		堆積岩類	砂岩（砕砂）		1.897	12.2
			砂岩（砕石・砕砂）		1.975	9.5
			凝灰岩（砕砂）		1.999	11.0
			凝灰岩（砕石・砕砂）		1.955	13.6
			珪藻土		1.059	46.2
			泥岩		1.203	38.6
		火成岩類	玄武岩（砕砂）	2Ec	2.007	10.7
		堆積岩類	砂岩（砕砂）		1.980	7.5
		火成岩類	玄武岩（砕砂）	4.5Ec	2.090	9.2
			玄武岩（砕石・砕砂）		2.175	8.0
		堆積岩類	砂岩（砕砂）		2.103	7.5
			珪藻土		1.169	38.0
	30	火成岩類	花崗岩(砕砂)	Ec	1.795	13.5
			花崗岩(砕石・砕砂)		1.841	10.5
			流紋岩(砕砂)		1.727	15.0
			流紋岩(砕石・砕砂)		1.825	13.6
			安山岩（砕砂）		1.756	15.5
			安山岩（砕石・砕砂）		1.847	13.8
			玄武岩（砕砂）		1.764	15.0
			玄武岩（砕石・砕砂）		1.839	12.2
		堆積岩類	砂岩（砕砂）		1.773	13.7
			砂岩（砕石・砕砂）		1.842	11.0
			凝灰岩（砕砂）		1.862	14.0
			凝灰岩（砕石・砕砂）		1.951	13.8
			珪藻土		1.082	43.7
		火成岩類	玄武岩（砕砂）	2Ec	1.910	13.0
		堆積岩類	砂岩（砕砂）		1.872	11.6
		火成岩類	玄武岩（砕砂）	4.5Ec	2.067	9.9
			玄武岩（砕石・砕砂）		2.116	9.5
		堆積岩類	砂岩（砕砂）		2.012	9.3
			珪藻土		1.227	32.0
クニボンド RW (Ca 型)	15	火成岩類	玄武岩（砕砂）	4.5Ec	2.010	11.7
			玄武岩（砕石・砕砂）		2.076	10.3
		堆積岩類	砂岩（砕砂）		1.977	11.2
			珪藻土		1.127	40.5
	30	火成岩類	玄武岩（砕砂）		1.826	16.0
			玄武岩（砕石・砕砂）		1.867	13.5
		堆積岩類	砂岩（砕砂）		1.695	13.0
			珪藻土		1.048	40.0

※砕石・砕砂の混合率は、砕石：砕砂＝6:4 とした。

1)　ベントナイトの種類が締固め特性に与える影響

模擬掘削土にケイ砂 6 号を用いた場合の締固め曲線（ベントナイト Na 型,Ca 型、締固めエネルギーEc,2Ec,4.5Ec、混合率 15%,30%）を図 5.2-4 に、模擬掘削土に玄武岩、砂岩を用いた場合の締固め曲線（ベントナイト Na 型,Ca 型、締固めエネルギー4.5Ec、混合率 15%,30%）を図 5.2-5 に示す。

ケイ砂 6 号、混合率 15%のケース（図 5.2-4 左図）では、締固めエネルギーにかかわらずベントナイトの種類（Na 型、Ca 型）の影響は小さい。しかし、ケイ砂 6 号、混合率 30%のケース（図 5.2-4 右図）では、全ての締固めエネルギーにおいて、ベントナイトの種類の影響が大きく、同じ混合率では Na 型に比べて Ca 型ベントナイトの場合の方が最大乾燥密度は小さく、最適含水比は高い。また、玄武岩、砂岩のケース（図 5.2-5）では、ケイ砂の場合と同様に、混合率 15%のケースにおいてもベントナイトの種類の影響（Na 型より Ca 型の方が最大乾燥密度は小さく、最適含水比は高い）が確認され、混合率 15%のケースに比べて混合率 30%のケースの方がその影響は大きい。

つまり、本試験の配合条件においては、同じベントナイト混合率の場合、Na 型ベントナイトに比べて Ca 型ベントナイトを用いた方が締固め性は悪く、その傾向は使用する模擬掘削土の種類、ベントナイト混合率の影響を受けると考えられる。

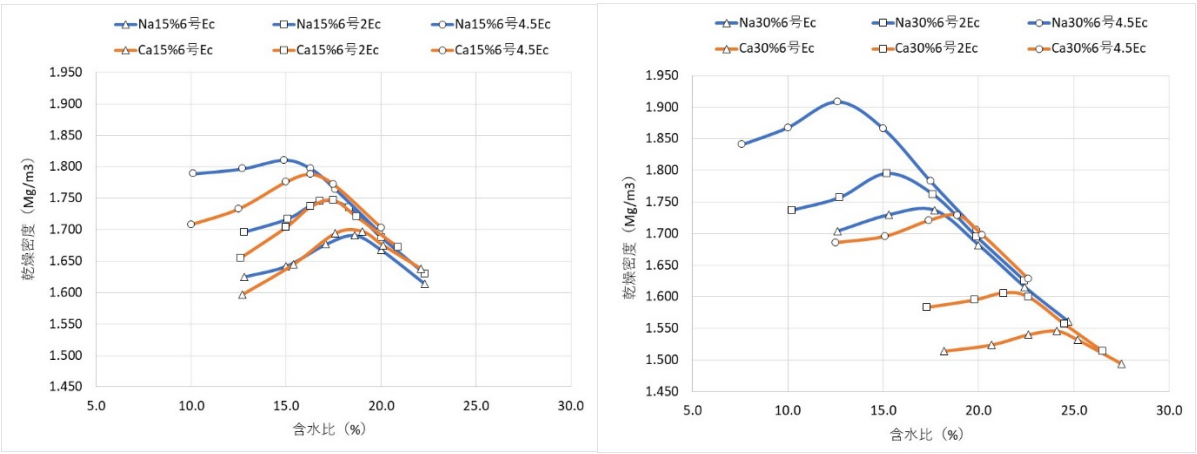


図 5.2-4　ケイ砂 6 号を用いた場合のベントナイト種類、締固めエネルギーの影響
（左：ベントナイト混合率 15%、右：ベントナイト混合率 30%）

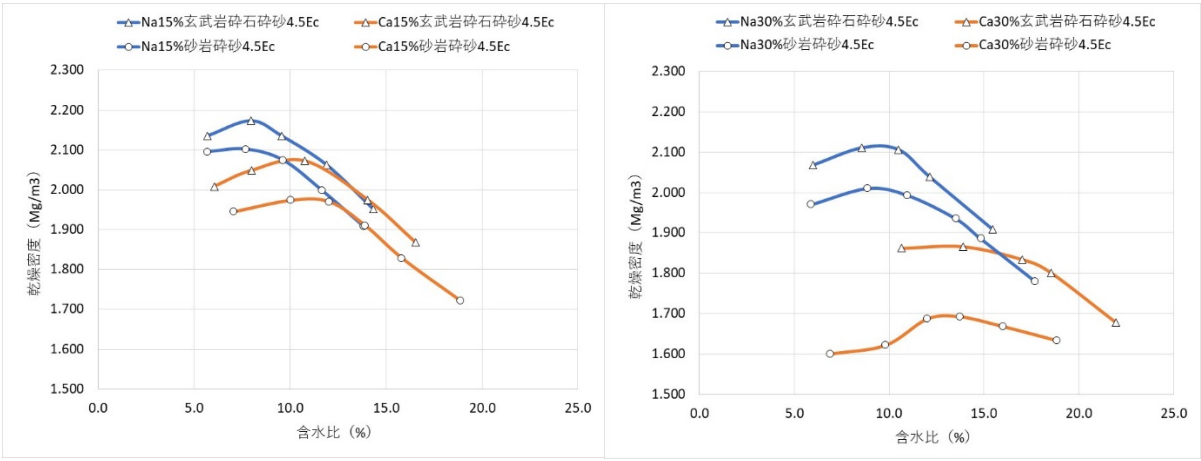


図 5.2-5　玄武岩（砕石砕砂）、砂岩（砕砂）を用いた場合のベントナイト種類の影響
（左：ベントナイト混合率 15%、右：ベントナイト混合率 30%）

2)　締固めエネルギーが締固め特性に与える影響

模擬掘削土に玄武岩砕砂、砂岩砕砂を用いた場合の締固めエネルギーの異なる締固め曲線（ベントナイト Na 型、混合率 15 %、30 %）を図 5.2-6 に示す。

図 5.2-4 に示した模擬掘削土にケイ砂を用いたケースと図 5.2-6 の結果より、ベントナイト混合率 15 %、30 %の場合は、締固めエネルギーが 1.0Ec、2.0Ec、4.5Ec と大きくなるに従い、得られる最大乾燥密度は大きくなり、最適含水比は低くなっている。また、本試験のケースでは、締固めエネルギーが締固め特性に与える影響に関して、ベントナイトおよび模擬掘削土の種類による影響は小さいが、ベントナイト混合率 15 %より 30 %の方が締固めエネルギーによる最大乾燥密度の増加割合が大きいことがわかる。

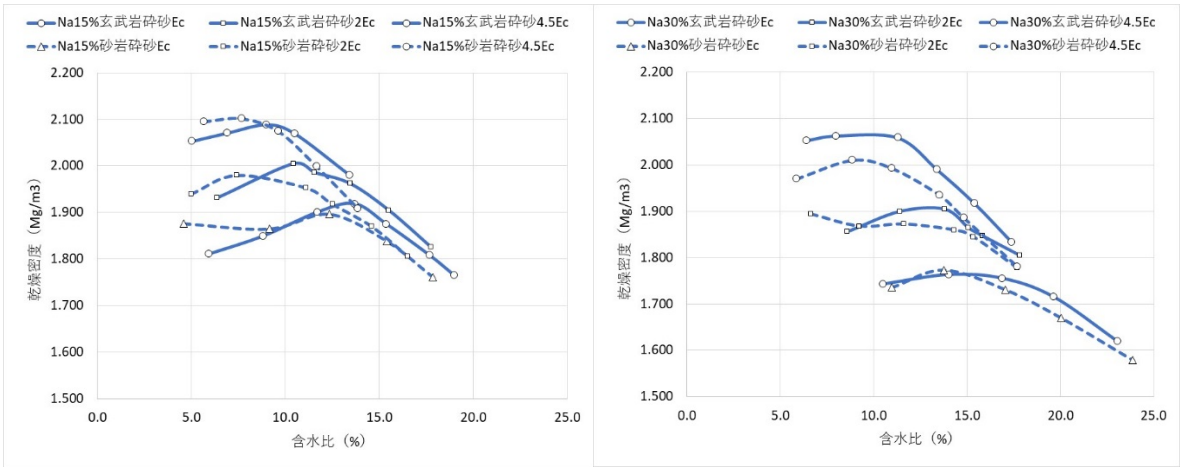


図 5.2-6　玄武岩（砕砂）、砂岩（砕石）を用いた場合の締固めエネルギーの影響
（左：ベントナイト混合率 15 %、右：ベントナイト混合率 30 %）

3)　ベントナイト混合率が締固め特性に与える影響

模擬掘削土にケイ砂を用いた場合（締固めエネルギー4.5Ec）について、異なるベントナイト混合率の締固め曲線を図 5.2-7 に、ベントナイト混合率と最大乾燥密度の関係について図 5.2-8 に

示す。

図 5.2-7 および図 5.2-8 より、Na 型のベントナイトではベントナイト混合率の増加に伴い、得られる最大乾燥密度も増加している。一方、Ca 型のベントナイトではベントナイト混合率 5 %から 15 %に増加した場合には、最大乾燥密度も増加しているが、ベントナイト混合率 15 %をピークに、ベントナイト混合率 30 %、50 %では最大乾燥密度が低下している。つまり、使用するベントナイトの種類により、締固め特性（最大乾燥密度）が最大となるベントナイト混合率は異なり、本試験条件においては、Na 型ベントナイトで混合率 5 0%、Ca 型ベントナイトで混合率 15 %の場合に最大乾燥密度が最も高くなることがわかった。

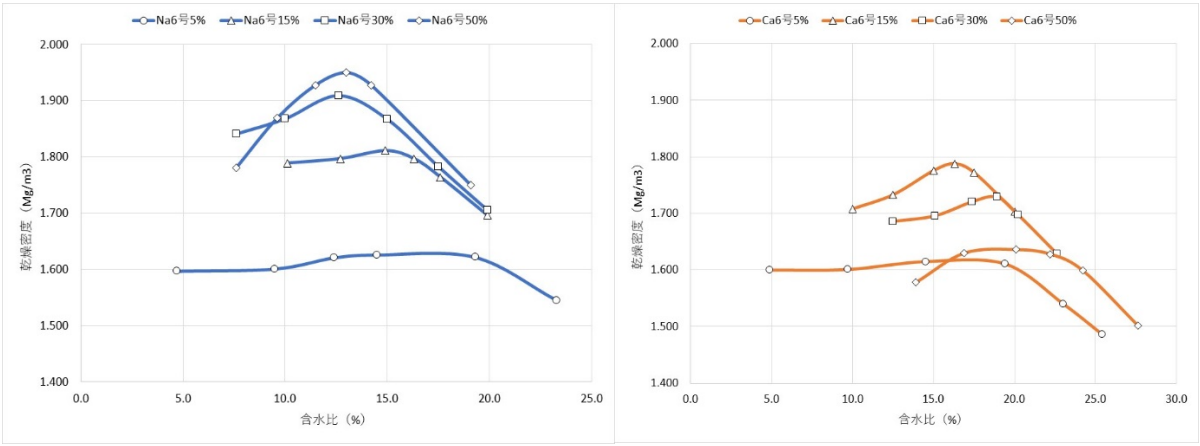


図 5.2-7　ベントナイト混合率の異なる締固め曲線
（模擬掘削土：ケイ砂 6 号、締固めエネルギー：4.5Ec、左：Na 型、右：Ca 型）

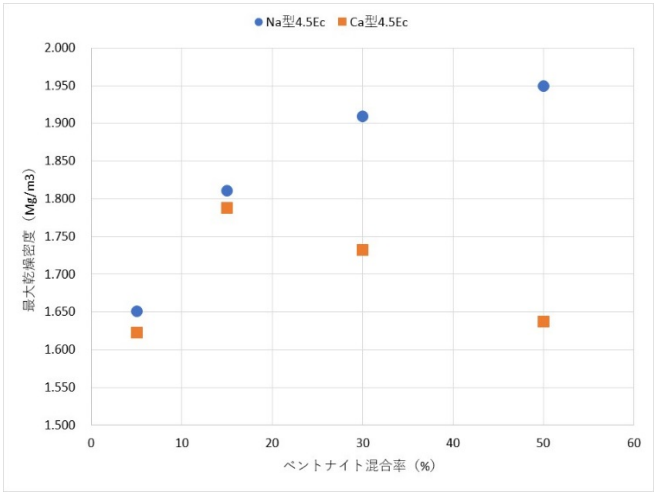


図 5.2-8　ベントナイト混合率と最大乾燥密度の関係
（模擬掘削土：ケイ砂 6 号、締固めエネルギー：4.5Ec）

4)　模擬掘削土の種類、粒度分布が締固め特性に与える影響

模擬掘削土に火成岩類およびケイ砂 6 号を用いた場合の締固め曲線を図 5.2-9 に、堆積岩類およびケイ砂 6 号を用いた場合の締固め曲線を図 5.2-10 に示す。なお、ベントナイトは Na 型、ベントナイト混合率は 15%、締固めエネルギーは 1Ec である。

図 5.2-9 より、本試験で使用した火成岩類を用いたケースでは全てケイ砂 6 号のケースよりも最大乾燥密度は高く、ベントナイト混合率 15%では 1.8~2.0g/cm^3 程度、ベントナイト混合率 30%では 1.7~1.9g/cm^3 程度であった。一方、図 5.2-10 の堆積岩類を用いたケースでは、ほとんどのケースでケイ砂 6 号のケースより、最大乾燥密度は高く、ベントナイト混合率 15%では 1.9~2.0g/cm^3 程度、ベントナイト混合率 30%では 1.8~2.0g/cm^3 程度であったものの、珪藻土および泥岩のケースでは、ケイ砂 6 号のケースより、最大乾燥密度は低く、1.0~1.2 g/cm^3 程度であった。

模擬掘削土（花崗岩、流紋岩、安山岩、玄武岩）のうち砕砂のみと砕石・砕砂混合の締固め曲線を図 5.2-11 に、模擬掘削土の土粒子密度と砕砂のみおよびケイ砂 6 号のケースの最大乾燥密度の関係を図 5.2-12 に示す

図 5.2-11 より、同じ岩種の同条件において、砕砂のみを使用したケースと砕石と砕砂を混合して使用したケースを比較すると、砕石と砕砂を混合したケースの方の最大乾燥密度が高いことがわかる。また、図 5.2-12 より、砕砂のみおよびケイ砂 6 号のケースでは、各岩種の土粒子密度とその材料を用いた混合土の最大乾燥密度に高い相関があることがわかる。つまり、本試験では異なる模擬掘削土が締固め特性に与える影響に関して、模擬掘削土の粒度分布および各岩種の土粒子密度の影響が大きいと考えられる。

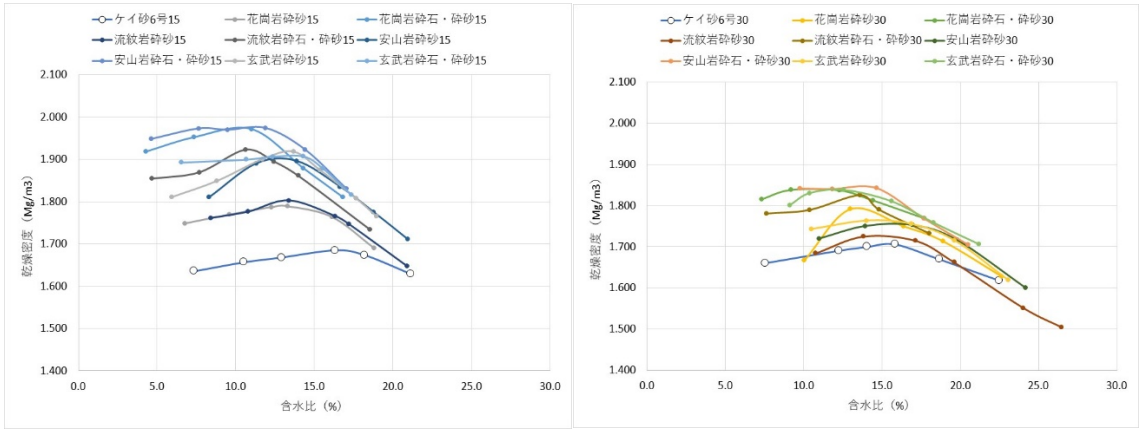


図 5.2-9　模擬掘削土に火成岩類およびケイ砂を用いた場合の締固め曲線
（左：ベントナイト混合率 15%、右：ベントナイト混合率 30%）

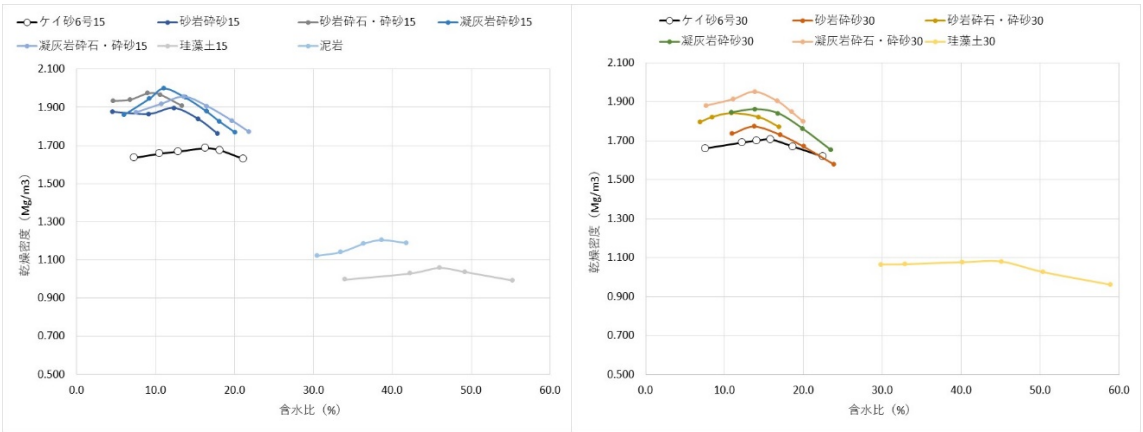


図 5.2-10　模擬掘削土に堆積岩類およびケイ砂を用いた場合の締固め曲線
（左：ベントナイト混合率 15%、右：ベントナイト混合率 30%）

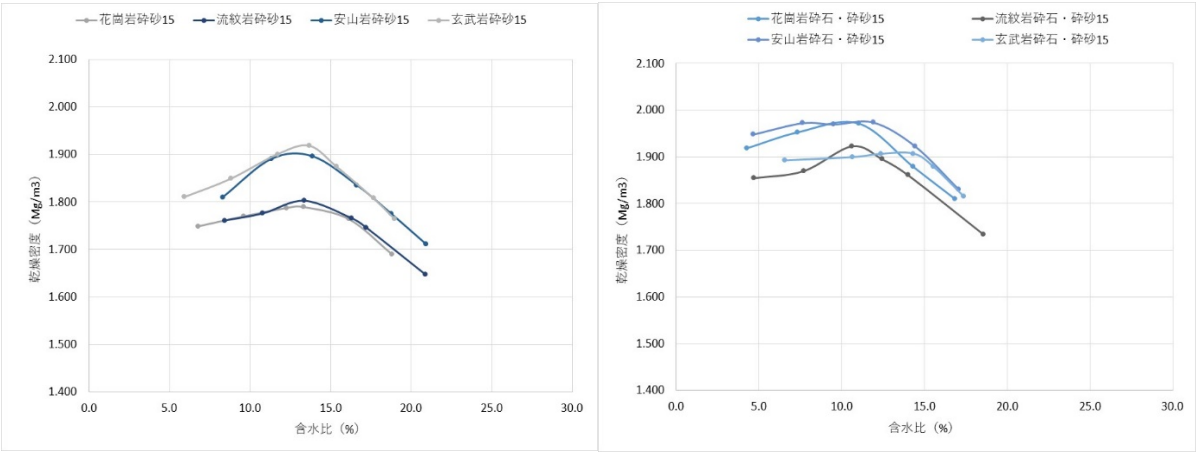


図 5.2-11　模擬掘削土の砕砂のみと砕石・砕砂混合の締固め曲線
（ベントナイト混合率 15%、左：砕砂のみ、右：砕石・砕砂混合）

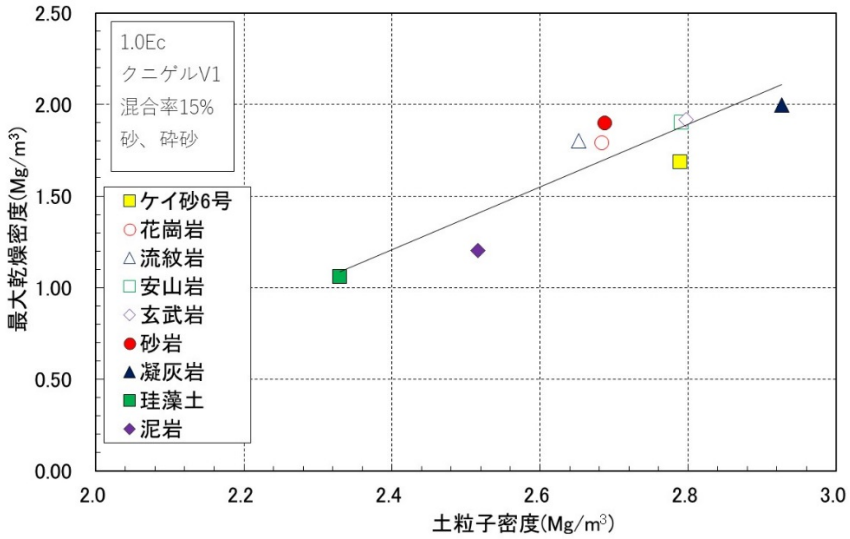


図 5.2-12　模擬掘削土の土粒子密度とベントナイト混合土の最大乾燥密度の関係
（Na 型ベントナイト、ベントナイト混合率 15%、締固めエネルギーEc、ケイ砂、砕砂のみ）

(3) 膨潤圧試験

1) 試験条件および供試体作成方法

膨潤試験のケースを表 5.2-10 に示す。ベントナイトはクニボンド RW を使用し、ベントナイト含有率は 15%と 30%とした。ベントナイト含有率 15%のケースでは、模擬掘削土として 3 号ケイ砂と 6 号ケイ砂を使用した。ベントナイト含有率 30%のケースでは 6 号ケイ砂のみとした。使用液種はイオン交換水とし、試験は恒温室（20～25℃）で行った。供試体寸法は、直径 60 mm ×高さ 20 mm とし、締固めエネルギー1.0Ec、2.0Ec、4.5Ec の最適含水比で作製した。

表 5.2-10　膨潤試験のケース

ベントナイト	ベントナイト混合率（%）	模擬掘削土 三河ケイ砂	締固めエネルギー	液種	ケース名
クニボンド RW	15	3 号	1Ec	イオン交換水	Ca15S3Ec10
			2Ec	イオン交換水	Ca15S3Ec20
			4.5Ec	イオン交換水	Ca15S3Ec45
		6 号	1Ec	イオン交換水	Ca15S6Ec10
			2Ec	イオン交換水	Ca15S6Ec20
			4.5Ec	イオン交換水	Ca15S6Ec45
	30	6 号	1Ec	イオン交換水	Ca30S6Ec10
			2Ec	イオン交換水	Ca30S6Ec20
			4.5Ec	イオン交換水	Ca30S6Ec45

2) 試験方法

膨潤圧試験は、以下の方法で実施した。

① 試料容器を載荷装置に移し、荷重計、変位計、給水量測定装置を接続する。
② 供試体の高さを拘束し供試体下部より給水を開始する。
③ 給水開始と同時に給水量、荷重、試験環境の温度、湿度を測定。
④ 膨潤圧が一定となるまで測定を継続する。

3) 試験結果

各ケースにおける異なる締固めエネルギーの膨潤圧の経時変化を図 5.2-13 に示す。ベントナイト混合率 15 %の場合は 3 号ケイ砂、6 号ケイ砂にかかわらず、ほとんど膨潤圧は発生せずに定常状態となった。また、ベントナイト混合率 30 %の場合は、締固めエネルギーの増加に伴い、発生する膨潤圧も高くなり、Ec では約 10 kPa、2Ec では約 25 kPa、4.5Ec では約 50 kPa となった。

乾燥密度と膨潤圧の関係を図 5.2-14 に示す。ベントナイト混合率 15 %の場合は、ほとんど膨潤圧が発生しなかったため、乾燥密度との関連性はみられないが、ベントナイト混合率 30%の場合は、乾燥密度と膨潤圧には相関関係があることがわかる。

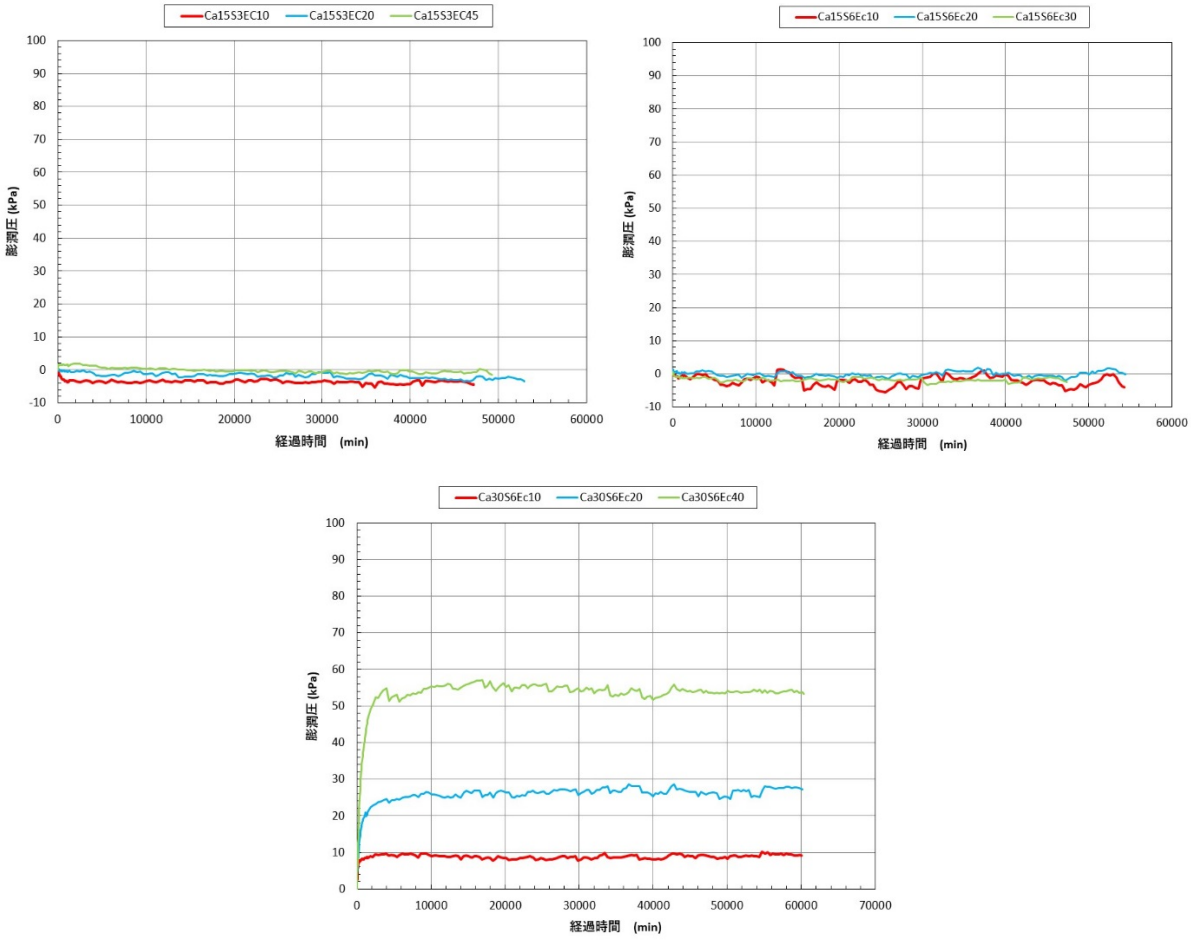


図 5.2-13　膨潤圧の経時変化（締固めエネルギー毎）
左上：混合率 15 %,3 号ケイ砂、右上：混合率 15 %,6 号ケイ砂、
下：混合率 30 %,6 号ケイ砂

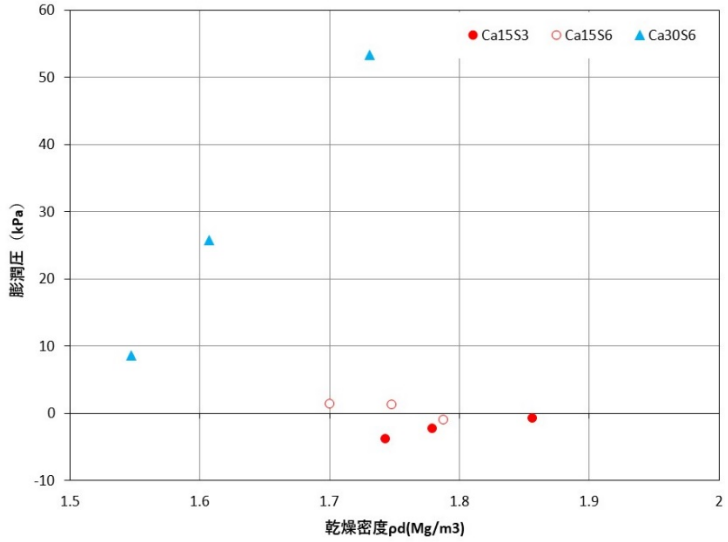


図 5.2-14　乾燥密度と膨潤圧の関係

(4) 透水試験

透水試験のケースは前述した膨潤試験のケース（表 5.2-10）と同じである。透水試験は、透水係数に応じて JIS A1218:2009「土の透水試験方法」、JGS 0312-2018「低透水性材料の透水試験方法」に準拠して実施した。乾燥密度と透水係数の関係を図 5.2-15 に示す。透水係数は Ca15S3＞Ca15S6＞Ca30S6 の順で小さくなっており、同じベントナイト混合率であればケイ砂の粒径が小さい方が、同じケイ砂 6 号であればベントナイト混合率の多い方の透水係数が小さい傾向がみられた。また、ケース毎にみると全てのケースで、乾燥密度の増加（締固めエネルギーの増加）に伴い、透水係数が小さくなる傾向がみられた。

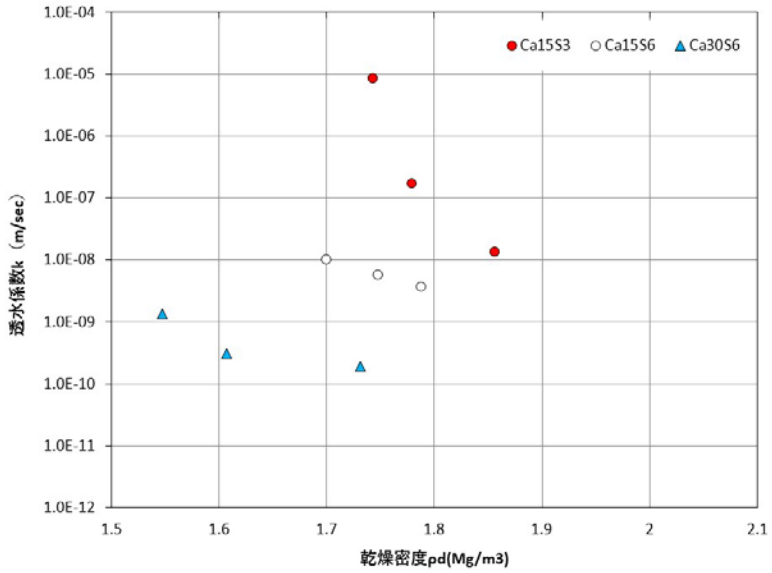


図 5.2-15　乾燥密度と透水係数の関係

5.2.3　埋め戻し材の浸潤特性試験（浸潤過程の予測のための室内試験）

坑道に施工された後の埋め戻し材中への地下水の浸潤挙動を予測するためには、水ポテンシャル、不飽和透気係数、不飽和透水係数が必要となる。そのため、今年度はベントナイト含有率 15 %以下で模擬掘削土をケイ砂 6 号とした場合の水分特性曲線と不飽和透気係数を取得した。

(1) 試験方法

1) 保水性試験

保水性試験は、地盤工学会基準「土の保水性試験方法」に準じて実施した。同基準には、間隙水の飽和度と水ポテンシャルとの関係を得るための試験方法として、水ポテンシャルの範囲に応じた複数の方法が定められている。これらの試験方法の中で、広い範囲の水ポテンシャルをカバーするために、蒸気圧法、サイクロメーター法および加圧板法を用いて試験を行った。供試体は、クニゲル V1 混合土（クニゲル V1：ケイ砂 6 号＝15：85）とクニボンド RW 混合土（クニボンド RW：ケイ砂 6 号＝15：85）とした。それぞれの試験手順を以下に示す。

① 蒸気圧法

a) 所定の土中水のポテンシャルに相当する塩の飽和溶液を準備し、デシケータ底に入れる。

溶液を常に飽和に保つため、溶液中に未溶解の結晶が残っている状態で使用する。

b) 試料をガラスシャーレに薄く広げるようにして入れ、デシケータの中に入れる。

c) デシケータに蓋をして密閉し、静置する。ガラスシャーレの蓋は外した状態で、デシケータ中へ試料と一緒に密閉する。

d) 吸湿を防ぐため、蓋をした状態でガラスシャーレをデシケータから取り出し、ガラスシャーレ全体の質量を測定する。試料の質量が一定になるまで繰り返す。一定になった時点で試験を終了する。恒温室の温度は(20±1)℃に保つ。試験終了後、試料の含水比を求める。

e) 含水比とポテンシャル値の関係から、水分特性曲線を描く。

② サイクロメーター法

冷却鏡法（WP4C）

a) サンプルホルダーの高さ1/2程度まで試料を入れ、サンプルチャンバーを閉じ測定を開始する。測定終了後、赤外線水分計へ試料を移し、含水比を測定する。サンプルチャンバーへの試料の投入量は約2gである。

b) 水分特性曲線を求めるため、試料の含水比を様々に調整し、測定を実施する。水ポテンシャルと出力電圧とのキャリブレーションカーブを用いて、得られた出力電圧から試料の土中水のポテンシャルを求める。

c) 含水比とポテンシャル値の関係から、水分特性曲線を描く。

露点法（PSΨPRO）

a) サンプルホルダーと試料の質量を計量する。同時に含水比測定用の試料を別途計量しておき、含水比を測定する。

b) サンプルホルダーに計量した試料を入れ、サンプルチャンバー内に密閉する。測定中に装置並びに装置周辺の温度環境が変動しない条件で試験を実施する。サンプルチャンバーへの試料の投入量は約0.1 gである。

c) サイクロメーターの測定を開始し、試料が水分平衡に達したら測定を終了する。水分特性曲線を求めるため、試料の含水比を様々に調整し、測定を実施する。

d) 水ポテンシャルと出力電圧とのキャリブレーションカーブを用いて、得られた出力電圧から試料の土中水のポテンシャルを求める。

e) 含水比とポテンシャル値の関係から、水分特性曲線を描く。

③ 加圧板法

a) ペデスタルにセットしたセラミックディスクを3日間程度脱気し、セラミックディスクを十分に飽和させる。

b) 試験容器のうち下部フランジを水浸させ、セラミックディスクを設置する。空気が入らないように脱気水の中で作業し、下部フランジの通水経路の空気を追い出す。

c) ゴム板にグリースを塗布しフランジに設置する。

d) 供試体の密度が高くない場合は、試験セルを下部フランジに固定し、試験セル内（セラミックディスク上）にて供試体を突き固めにより作製する。供試体の密度が高い場合は、下部フランジに組み込む前に、試験セル内で供試体を突き固めにより作製する。

e) 試験セルを下部フランジに固定する。ゴム板にグリースを塗布し、試験セルの上下にゴム板を設置する。バルブは開放し脱気水がセラミックディスクに常に供給できる状態にしておく。試験セルに蓋をする。

f) 供試体を水浸脱気し、飽和させる。

g) 試験装置の組み立て：水浸脱気終了後、蓋を取り、供試体上部に浮き出た水をふき取る。フランジ上部を設置し、試験容器を組み上げる。
h) 排水量測定用容器などの設置：電子天秤上に排水量測定用定水位容器を設置する。吸水量測定用二重管ビュレットも設置する。
i) 排水位置の調整：供試体の中心位置における土中水のポテンシャルがゼロになるように排水位置を調整した後、そのまま放置して余剰水分を十分に排水させる。
j) 試験容器と排水量測定用の定水位容器および吸水量測定用の二重管ビュレットを接続する。
k) レギュレータを通じて所定の土中水のポテンシャルに相当する圧力を負荷する。
l) 昇圧し水分平衡に達し排水が終了するまで、排水を続ける。終了後、排水質量を測定する。
m) 減圧し水分平衡に達し吸水が終了するまで、吸水を続ける。終了後、吸水量を測定する。
n) 飽和状態から目標の圧力まで、4～6程度のポテンシャル段階で排水過程と吸水過程を繰り返す。最終圧力段階終了後に供試体の質量および炉乾燥質量を測定し、水分特性曲線を描く。

2) 透気試験

定常透気試験は、試験体に一定の圧力でガスを透気させて透気流量を計測し、圧力と透気流量の関係から透気係数を求める試験である。透気流量は試験体の飽和度により異なるため、同じ乾燥密度で飽和度が異なる供試体に対して透気流量を計測し、不飽和透気係数、すなわち飽和度と透気係数の関係を求めた。

定常透気試験の試験装置の概略図を図 5.2-16 に示す。透気ガスには窒素ガスを用い、供試体セルの上流側および下流側の両方で、それぞれ圧力および透気流量を計測した。透気流量の測定には、上流側は質量流量計（マスフローメーター：MFM）を、下流側にはフロート式流量計（FFM）を用い、下流側の流量計と供試体セルの間には透気ガスに含まれる水分、すなわち供試体から供給される水分を除去するために除湿ユニットを配した。

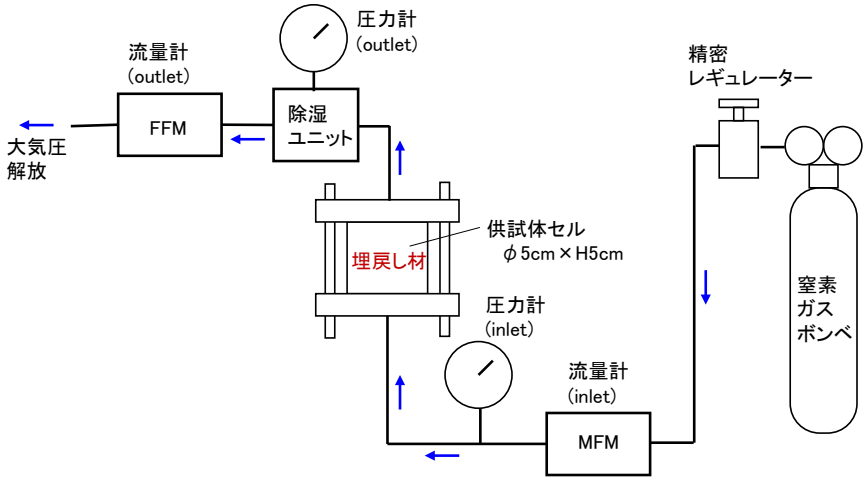


図 5.2-16 定常透気試験の試験装置の概略図

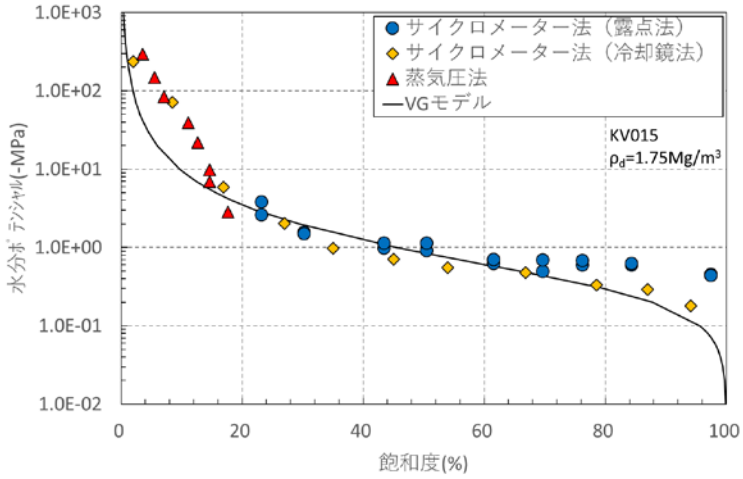
供試体は、ステンレス製セルに所定の密度の埋め戻し材を充填して、静的締固めにより作製した。セルの内寸法は直径 50 mm、高さ 50 mm である。供試体は、クニゲル V1 とクニボンド RW

でそれぞれ混合率 5 %と 15 %（ケイ砂 6 号を 95 %と 85 %混合）とした。供試体ごとに乾燥密度は異なり、それぞれの材料で同じ乾燥密度の飽和度が異なる供試体を作製した。飽和度は 10～90 %までの 10 %刻みとした。なお、設定飽和度から 4 種類の埋め戻し材の含水比を求めるための比重は、クニゲル V1、クニボンド RW、ケイ砂 6 号に対して、それぞれ 2.789、2.652、2.658 を用いた。

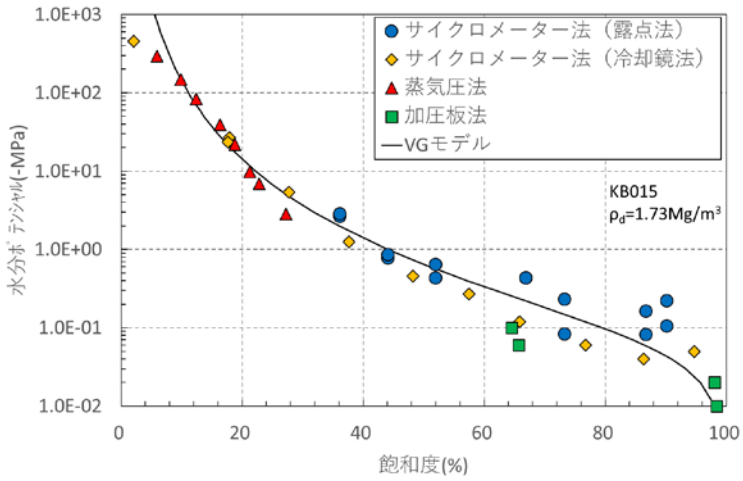
(2) 試験結果

1) 保水性試験

水分ポテンシャルの測定結果を図 5.2-17 および図 5.2-18 に示す。(a)はクニゲル V1 混合土（混合率 15 %）、(b)はクニボンド混合土（15 %）である。図 5.2-17 は飽和度と水分ポテンシャルの関係、図 5.2-18 は体積含水率と水分ポテンシャルの関係である。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）を用いた。VG モデルのパラメータを表 5.2-11 に示す。

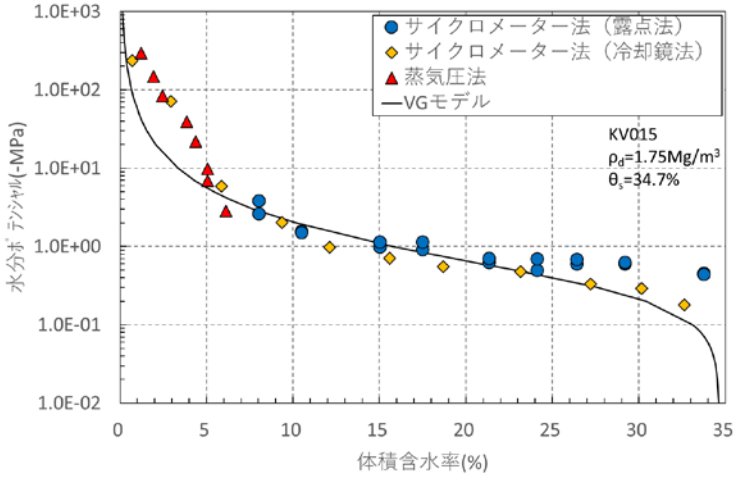


(a) クニゲル V1：ケイ砂 6 号＝15：85

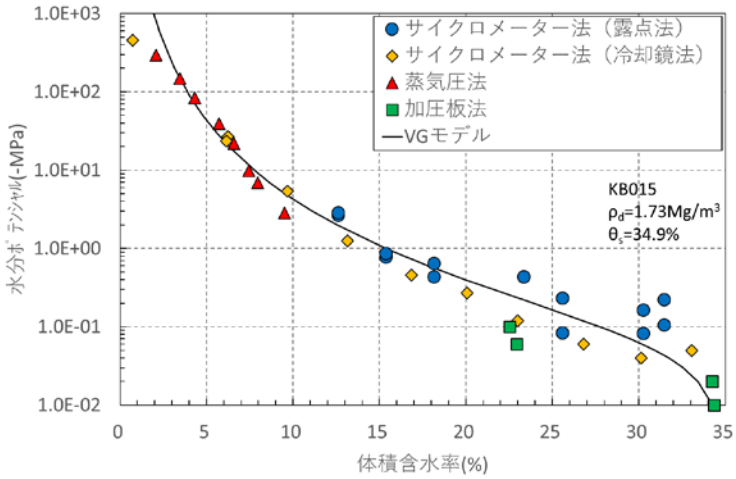


(b) クニボンド：ケイ砂 6 号＝15：85

図 5.2-17　VG モデルによる水分特性曲線（飽和度－水分ポテンシャル関係）



(a) クニゲル V1：ケイ砂 6 号＝15：85



(b) クニボンド：ケイ砂 6 号＝15：85

図 5.2-18　VG モデルによる水分特性曲線（体積含水率－水分ポテンシャル関係）

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha\varphi|^n)^{(1-1/n)}$$ 式 5.2-1

Se：有効飽和度(-)、θ：体積含水率(-)、θ_s：飽和体積含水率(-)、θ_r：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(-)

表 5.2-11　各混合土の水分特性曲線における VG モデルのパラメータ

パラメータ	材料	
	クニゲル V1 15 % ケイ砂 6 号 85 %	クニボン RW 15% ケイ砂 6 号 85 %
θ_s (-)	0.347	0.349
θ_r (-)	0.000	0.000
α (1/MPa)	2.8	15.0
n (-)	1.7	1.3

2)　透気試験

図 5.2-19 に飽和度と浸透率の関係を示す。飽和度の増加にともない浸透率は低下する傾向となった。ただし、ベントナイト含有率 15 %で飽和度が低い領域では、飽和度の増加にともない浸透率は増加した。また、ベントナイトが多く含まれている含有率 15 %のほうが、含有率 5 %よりも浸透率が小さくなった。含有率 15 %で比較すると、飽和度が 90 %のときを除いてクニボンドのほうが浸透率は小さかった。含有率 5 %の場合は、飽和度が小さい領域では、ベントナイトの違いによる浸透率の違いは見られなかった。ただし、飽和度が大きい領域では、配合率 15%と場合と同様に、クニゲル V1 のケースがクニボンドに比較して、浸透率が小さい結果となった。

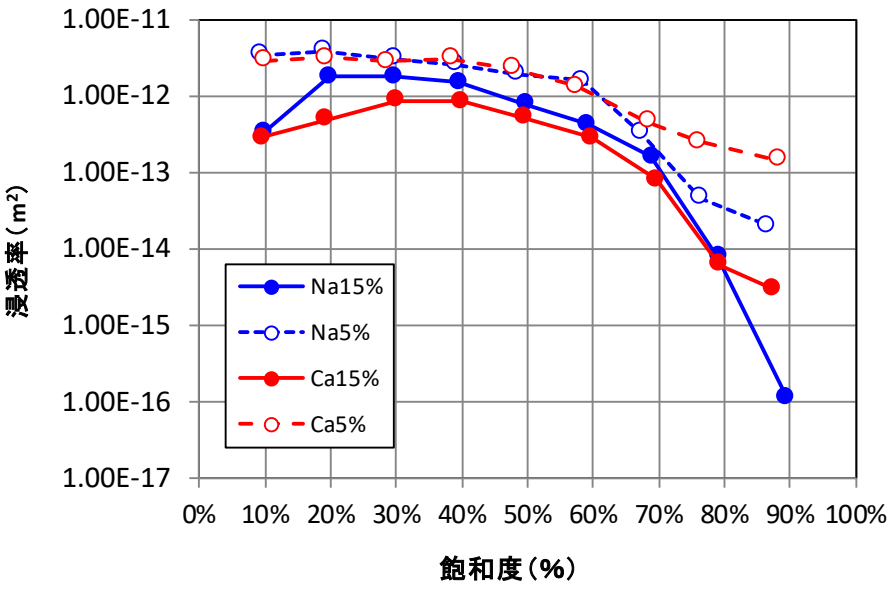


図 5.2-19　埋め戻し材料の飽和度と浸透率の関係

5.2.4　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の実施により、埋め戻し材の構成材料およ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、技術選択に資する施工データおよび施工後の物性データを取得することを目的とする。

(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 5.2-20 に示す試験ピット内の幅 1 m×長さ 4 m の区間を用いて施工試験を実施した。試験ピットの状況を図 5.2-21 に示す。

施工試験の流れを図 5.2-22 に、施工試験ケースおよび品質管理試験の数量を表 5.2-12 に示す。転圧機械はプレートコンパクタ（三笠産業：MVC-F60H）、バイブロコンパクタ（三笠産業：MVH-308DSC-PAS）、ハンドガイドローラ（三笠産業：MRH-601DS）および小型振動ローラ（安藤ハザマ：HC1500-1）を用いた。いずれも、対象とする地下坑道内で適用可能な機種である。各機械の写真を図 5.2-23 に示す。

撒き出し・転圧工法の場合、撒き出し厚さも仕上がり品質に大きく影響を与える。撒き出し厚さが施工品質（密度）に与える影響を確認するため、異なる高さで撒き出しを行った。なお、撒き出しに関しては、施工前の高さから平均値で所定の高さになるようにピット壁面に墨出しして

高さを管理した。材料を撒き出した後に、転圧エネルギーの低い転圧機械から順次、転圧を行ない、転圧後に各層の施工後の品質確認を行った。施工後の品質確認は、材料の撒き出し量と施工個所の高さのレベル測量により、施工密度を算出して行った。施工後の密度試験に関しては、撒き出し厚さが 100 mm の試験ケースではコアカッター法を 6 点実施し、撒き出し厚さが 200 mm の試験ケースではコアカッター法を 3 点、砂置換法を 6 点実施し、撒き出し厚さが 300 mm の試験ケースでは、全層を対象にしたコアカッター法の適用が困難であるため、コアカッター法に関しては層の上部部分を対象に 3 点、砂置換法を 6 点実施した。また、透水試験は各層 2 点ずつ実施した。施工高さの測定を行うレベル測量は、図 5.2-24 に示す 15 点で実施した。試験の状況を図 5.2-25 に示す。

なお、本試験ケースの設定により、以下に示す影響について比較・検討した。

I. ベントナイトの種類の影響比較
　　ケース A-1 とケース B-1 での比較
II. 模擬掘削土の種類の影響比較
　　ケース A-1、D-1、E-1 の比較
III. 模擬掘削土の粒径の影響比較
　　ケース C-1 と D-1 の比較
IV. 材料の初期含水比の比較
　　ケース B-1 と B-2 の比較

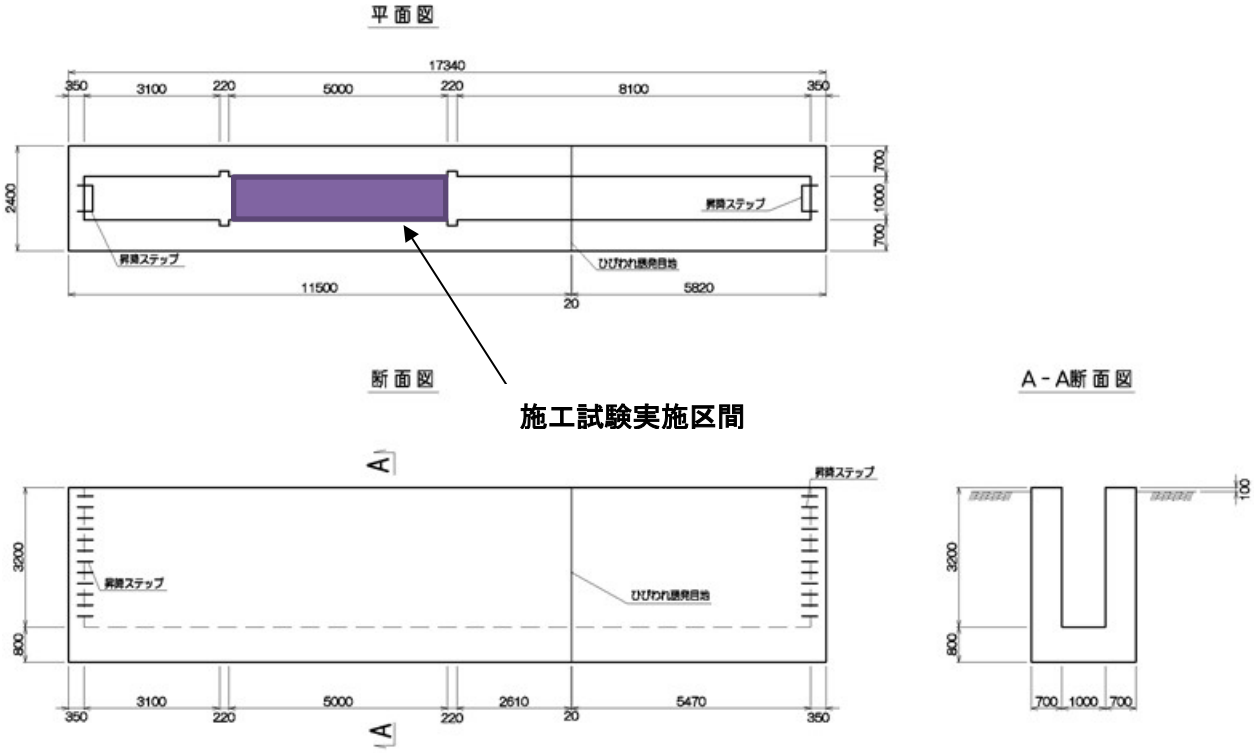


図 5.2-20　試験ピット構造図

図 5.2-21　試験ピットの状況

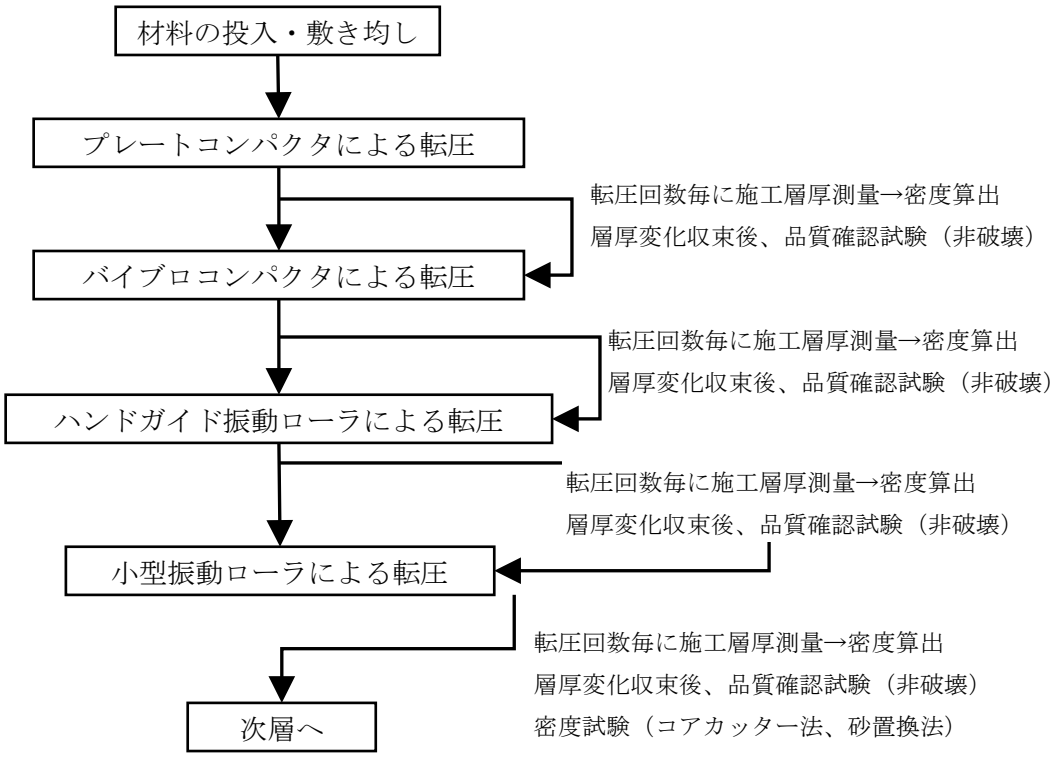


図 5.2-22　施工試験の流れ

表 5.2-12　試験ケースおよび品質管理試験数量

試験ケース	材料記号	ベントナイト (15%)	模擬掘削土 (85%)	設定含水比	撒き出し厚さ (mm)	非破壊試験	密度試験		透水試験サンプル
						各転圧機械	コアカッター法	砂置換法	
A-1-1	KV-S6-S-15	クニゲル V1	ケイ砂 6 号	ω_{opt}+1%	100	3	6	0	2
B-1-1	KB-S6-S-15	クニボンド RW	ケイ砂 6 号	ω_{opt}+1%	100	3	6	0	2
B-2-1	KB-S6-S-15	クニボンド RW	ケイ砂 6 号	ω_{opt}+4%	100	3	6	0	2
A-1-2	KV-S6-S-15	クニゲル V1	ケイ砂 6 号	ω_{opt}+1%	200	3	3	6	2
A-1-3	KV-S6-S-15	クニゲル V1	ケイ砂 6 号	ω_{opt}+1%	300	3	上：3	6	2
C-1-1	KV-BA-S-15	クニゲル V1	玄武岩：砕砂	ω_{opt}+1%	300	3	上：3	6	2
D-1-1	KVBA-G-15	クニゲル V1	玄武岩：砕石砕砂	ω_{opt}+1%	300	3	0	6	2
E-1-1	KV-SS-S-15	クニゲル V1	砂岩：砕砂	ω_{opt}+1%	300	3	上：3	6	2
B-1-2	KB-S6-S-15	クニボンド RW	ケイ砂 6 号	ω_{opt}+1%	200	3	3	6	2
B-1-3	KB-S6-S-15	クニボンド RW	ケイ砂 6 号	ω_{opt}+1%	300	3	上：3	6	2

プレートコンパクタ

バイブロコンパクタ

ハンドガイドローラ

小型振動ローラ

図 5.2-23　試験に使用した転圧機械

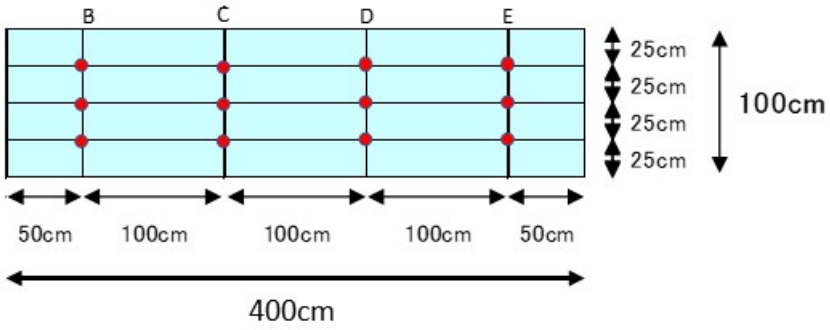


図 5.2-24　レベル測量の実施点

図 5.2-25　試験状況

(2) 試験結果

1) 施工データの取得（転圧機械、撒き出し厚さなど）

施工試験終了時の転圧機械と締固め度との関係について、クニゲル V1 とケイ砂のケースを図 5.2-26 に、クニボンド RW とケイ砂のケースを図 5.2-27 に、撒き出し厚さ 300 mm のケース（模擬掘削土の違いによる比較）を図 5.2-28 に示す。締固め度は室内締固め試験結果（4.5Ec）から算出した。施工機械が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、小型振動ローラと転圧能力が高くなるにつれて締固め度は大きくなっているのが確認できる。通常は、撒き出し厚さが厚くなるほど締固め性が悪くなり、達成できる密度は低くなるが、クニゲル V1 およびクニボンド RW とケイ砂を用いたケースにおける撒き出し厚さ 300 mm まででは、そのような傾向はみられなかった。また、異なる模擬掘削土の締固め度への大きな影響もなく、本試験で設定した配合および撒き出し厚さにおいては、材料の締固め度は転圧機械の選定による影響が最も大きいと判断できる。

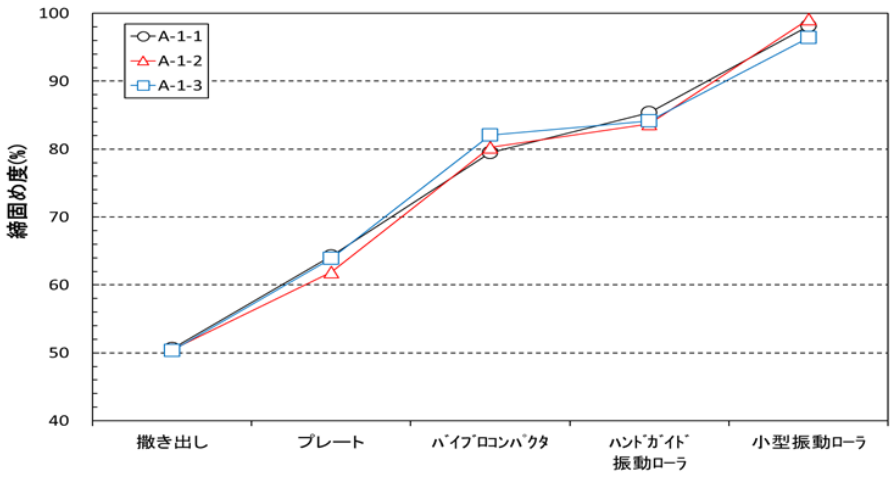


図 5.2-26　クニゲル V1 とケイ砂 6 号の転圧機械と締固め度の関係
（撒き出し厚さ 100, 200, 300 mm）

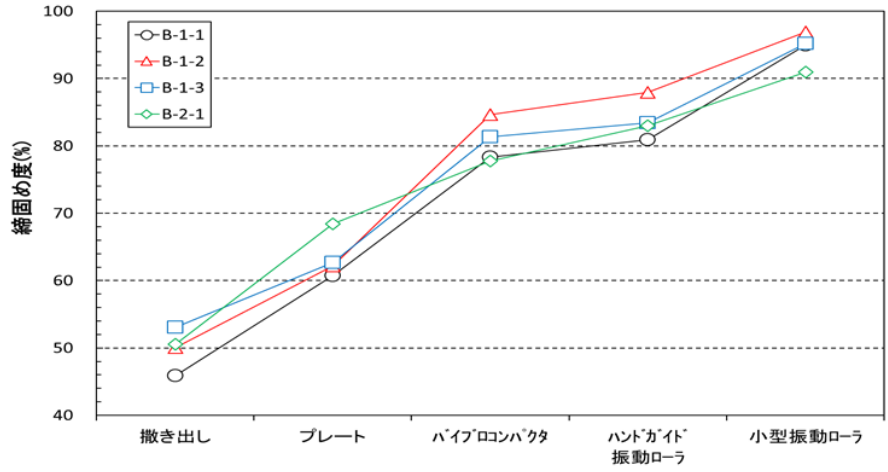


図 5.2-27　クニボンド RW とケイ砂 6 号の転圧機械と締固め度の関係
（撒き出し厚さ 100, 200, 300 mm）

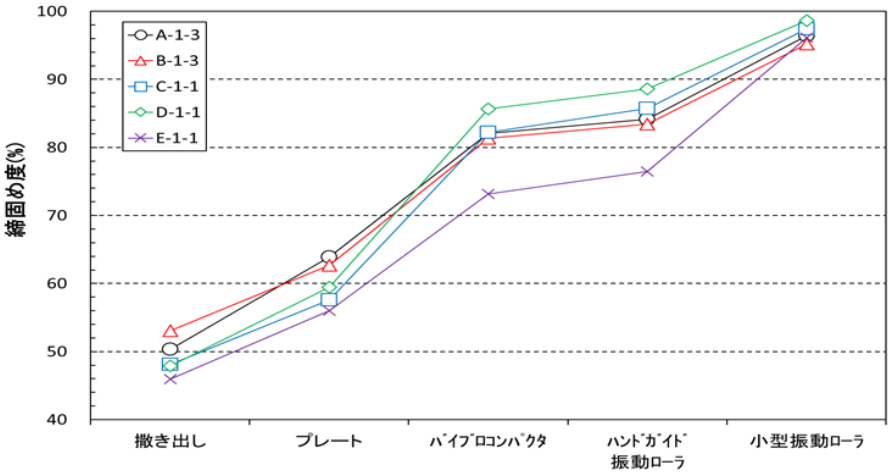


図 5.2-28　異なる模擬掘削土の転圧機械と締固め度の関係
（撒き出し厚さ 300 mm）

2)　埋め戻し材の品質確認

①　乾燥密度および含水比

小規模施工試験の密度測定の結果と室内締固め試験の結果について、模擬掘削土にケイ砂を用いたケースを図 5.2-29 に、模擬掘削土に玄武岩、砂岩を用いたケースを図 5.2-30 に示す。小規模施工試験後の乾燥密度の測定結果には多少のばらつきがみられるが、平均値は、全てのケースで締固め曲線の若干下側（締固め度 90 %以上）に位置していることが分かる。また、施工層全体で測定を行った撒き出し厚さ 200 mm のケースでコアカッター法と砂置換法を比較すると、両者に有意な差は無いことが分かる。一方、撒き出し厚さ 300 mm のケースで施工層の上部部分のみでコアカッター法により測定した密度と砂置換法により得られた密度を比較すると、コアカッター法の方が乾燥密度の測定値は大きくなっているケースが多かった。これは、施工層の上部部分の方が密度は高くなっていることを示唆する結果であるといえる。模擬掘削土に玄武岩、砂岩を用いたケースでは、玄武岩および砂岩の密度が高いことから、全体的にケイ砂のケースよりも密度が高くなった。また、玄武岩の砕石・砕砂と砕砂のみのケースを比べると、砕石・砕砂のケースの方の密度が高く、砕砂のみよりも粒径の大きい砕石を混合した方が締固め性能が高くなることが分かった。

各試験ケースの締固め度を図 5.2-31 に示す。設定含水比の高い B-2-1 のケースを除いて、締固め度 95 %以上を満足する結果となった。今回の試験条件においては、各種材料を用いても小型振動ローラを用いて施工することで、締固め度 95 %以上の密度を達成することが可能であることが分かった。

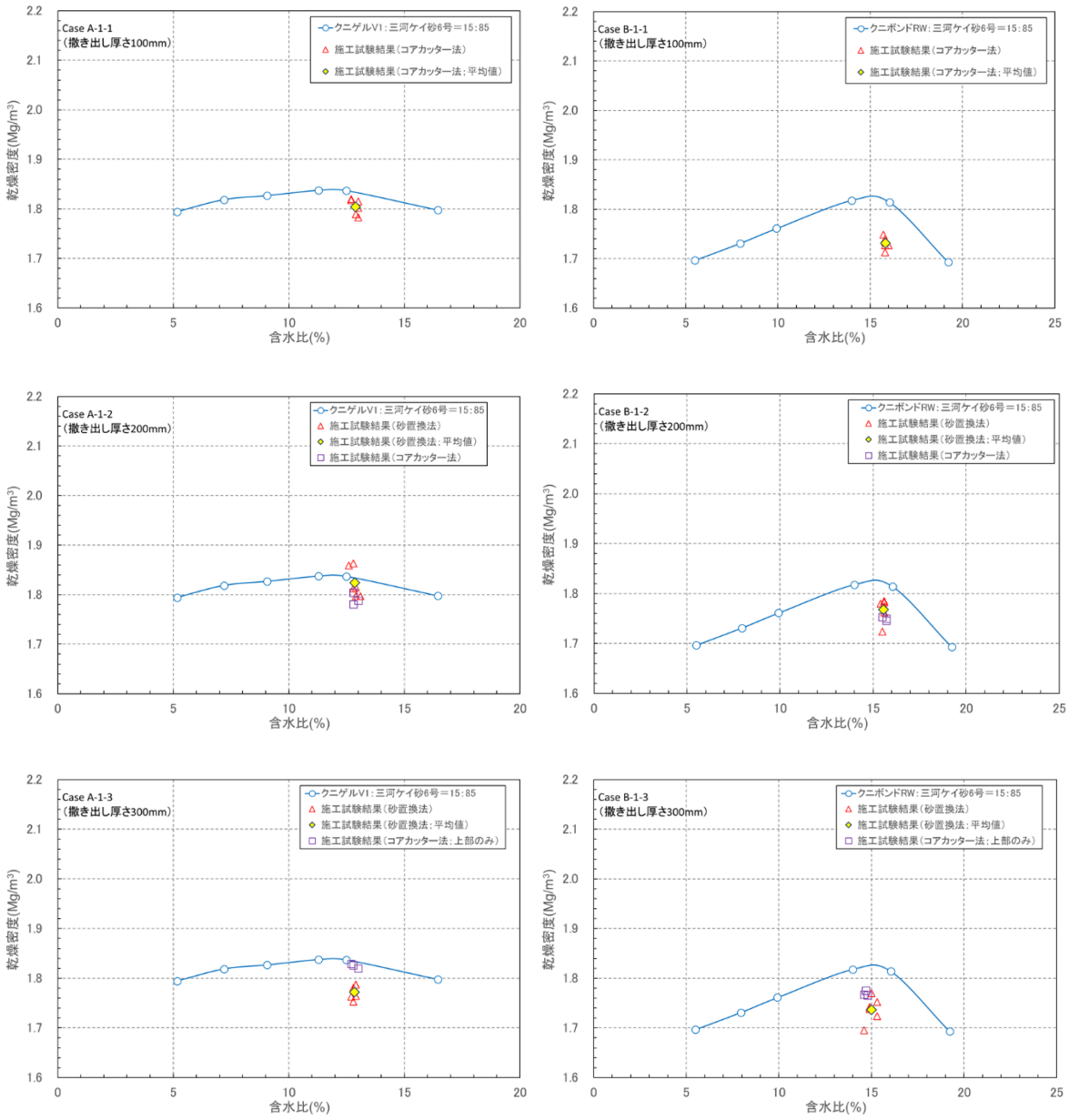


図 5.2-29　ケイ砂の試験ケースにおける密度測定結果

（左：クニゲル V1、右：クニボンド RW、上図より撒き出し厚さ 100,200,300 mm）

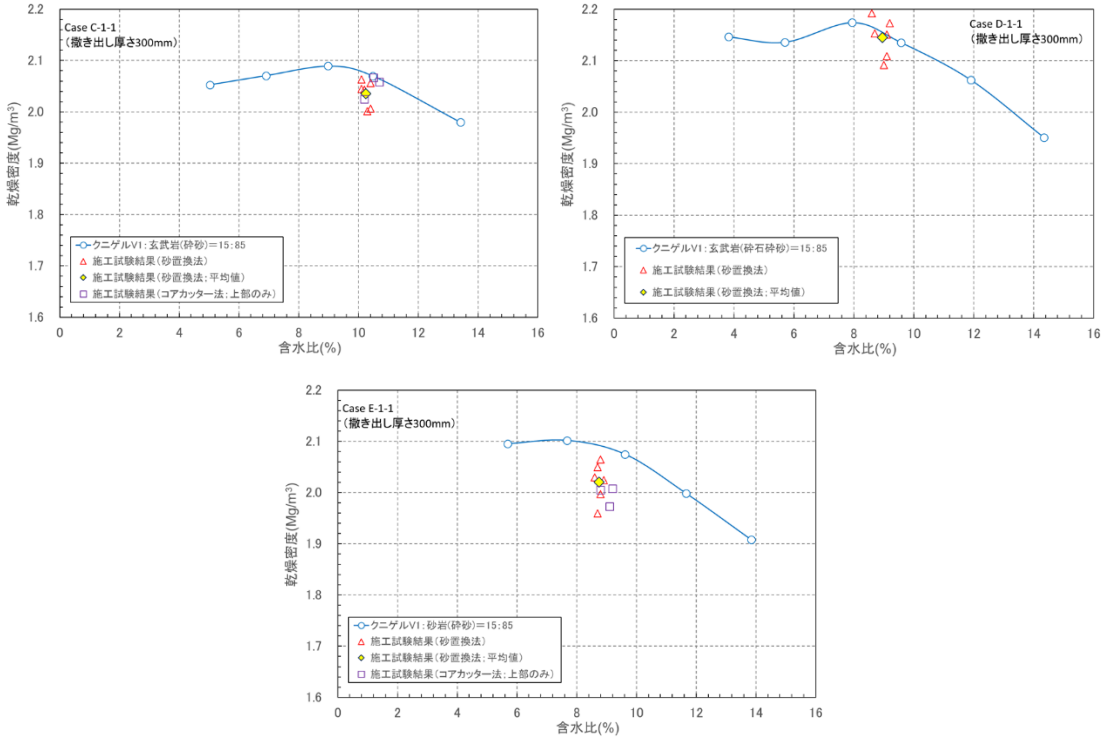


図 5.2-30　玄武岩、砂岩の試験ケースにおける密度測定結果
（ベントナイト：クニゲル V1、上：玄武岩、下：砂岩、撒き出し厚さ 300 mm）

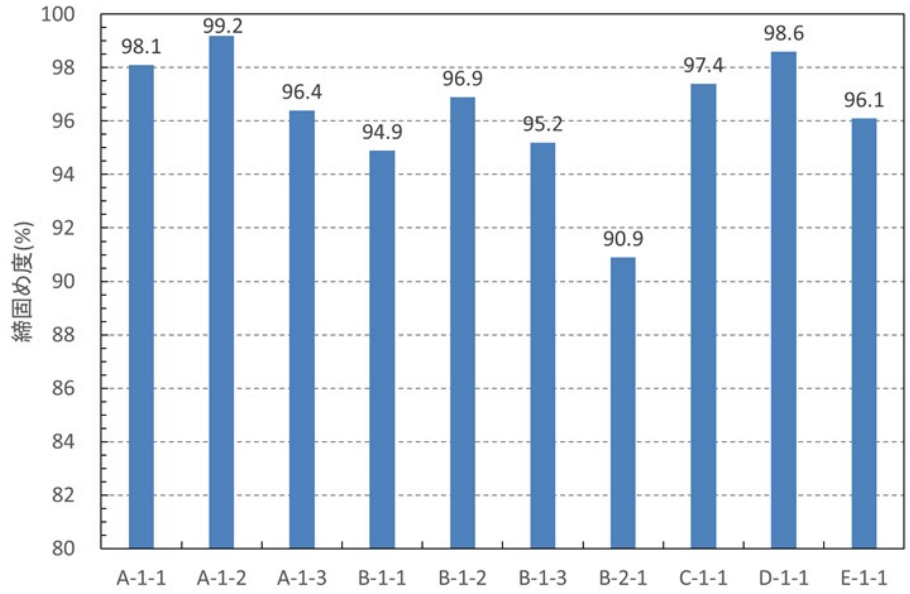


図 5.2-31　各試験ケースの施工後の締固め度

② 透水係数

施工後にサンプリングした供試体を用いて実施した含水比、乾燥密度および透水試験結果を表 5.2-13 に、乾燥密度と透水係数の関係を図 5.2-32 に、有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係を図 5.2-33 に示す。混合土のベントナイト混合率は設定値（15 %）とした。

クニゲル V1 混合土とクニボンド RW 混合土を比較すると、乾燥密度は同程度であるものの、透水係数の値はクニボンド RW の方が大きかった。また、クニゲル V1 混合土のケイ砂と玄武岩、砂岩の透水係数に大きな違いはみられなかった。

クニゲル V1 に比べてクニボンド RW の方がモンモリロナイト含有率は高いため、乾燥密度の値は同程度であるものの、有効モンモリロナイト密度の値は若干クニボンド RW 方が高い。しかしながら、クニボンド RW 混合土の透水係数の値はクニゲル V1 混合土の値に比べて大きな値となっている。

小規模施工試験と室内試験の透水係数について、ケイ砂を用いたケースの有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係を図 5.2-34 に、玄武岩、砂岩を用いたケースの有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係を図 5.2-35 に示す。クニゲル V1 混合土の場合、模擬掘削土がケイ砂 6 号、玄武岩、砂岩のいずれの場合も、室内成型の供試体と施工試験後に採取した供試体の透水係数に有意な差はみられなかった。一方、クニボンド RW 混合土の場合は、1 点を除いて全て施工試験後の供試体の透水係数の方が室内試験の透水係数より小さかった。室内試験では直接試料を透水セルに突き固めにより充填しているが、小規模施工試験の供試体は、サンプリングした試料をトリミングし、それを透水セルに設置しセルと供試体の間にエポキシを充填して試験試料としている。クニボンド RW 混合土の室内試験の透水係数が高い理由としては、膨潤性の低い Ca 型ベントナイトを用いた貧配合のベントナイト混合土の場合、透水セルと供試体との間にわずかなすき間が残り、そこが水みちになった可能性が考えられる。

表 5.2-13 サンプリング試料を用いた含水比、乾燥密度および透水試験結果

試験 ｹｰｽ名	ベントナイト	模擬掘削土	ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ 混合率(%)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	透水係数 (m/s)
A-1-1-1	クニゲル V1	ケイ砂 6 号	15	12.8	1.822	1.54E-11
A-1-2-1	クニゲル V1	ケイ砂 6 号	15	12.7	1.748	2.88E-11
A-1-3-1	クニゲル V1	ケイ砂 6 号	15	12.9	1.770	1.97E-11
B-1-1-1	クニボンド RW	ケイ砂 6 号	15	15.7	1.704	9.56E-10
B-1-2-1	クニボンド RW	ケイ砂 6 号	15	15.4	1.732	2.24E-10
B-1-3-1	クニボンド RW	ケイ砂 6 号	15	14.7	1.745	8.03E-10
B-2-1-1	クニボンド RW	ケイ砂 6 号	15	18.5	1.621	3.42E-08
C-1-1-1	クニゲル V1	玄武岩：砕砂	15	9.8	1.981	3.62E-11
D-1-1-1	クニゲル V1	玄武岩：砕石砕砂	15	9.5	1.937	3.51E-11
E-1-1-1	クニゲル V1	砂岩：砕砂	15	8.8	1.955	2.55E-11

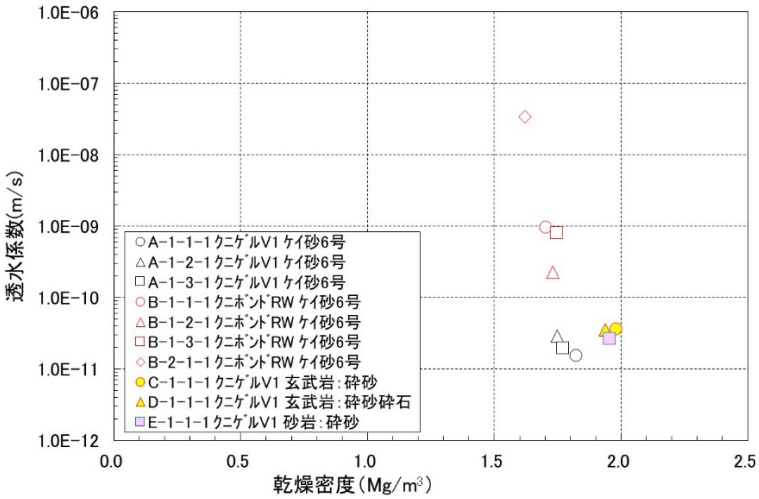


図 5.2-32　乾燥密度と透水係数の関係

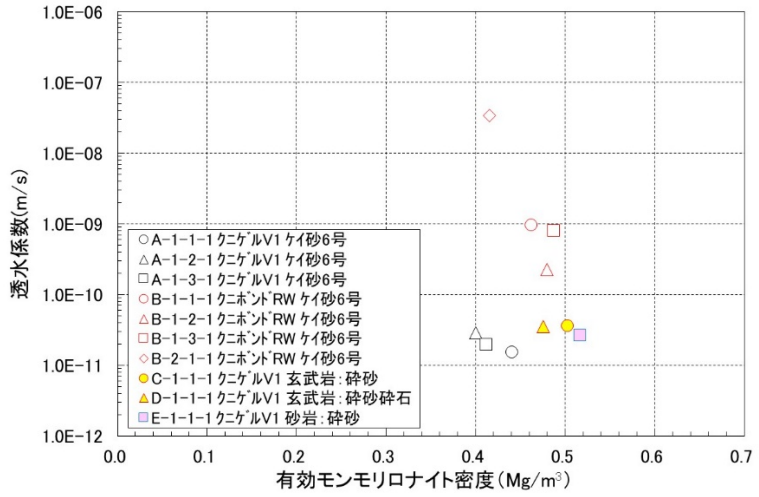


図 5.2-33　有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係

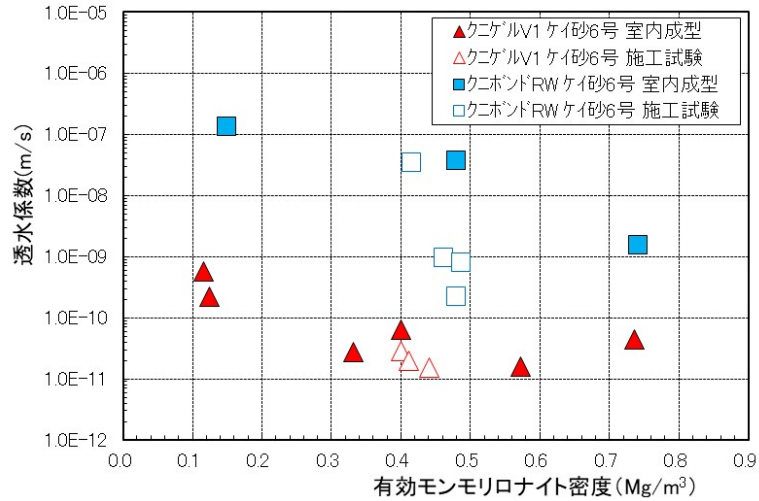


図 5.2-34　小規模施工試験と室内試験の透水係数の比較（ケイ砂）

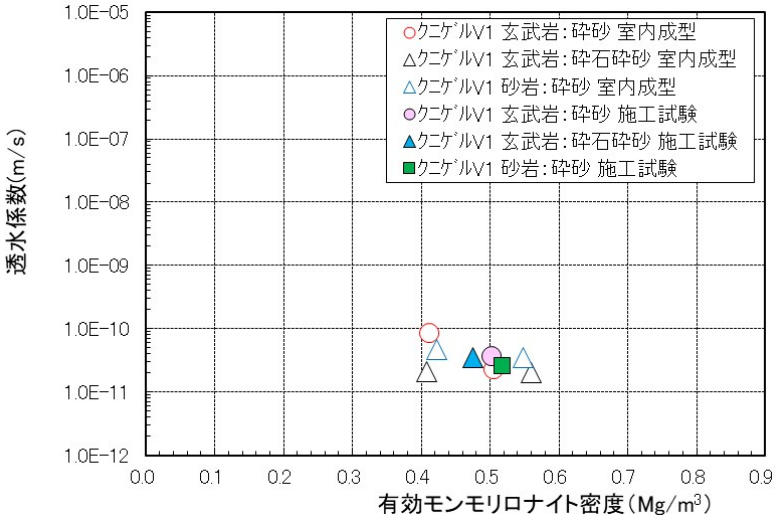


図 5.2-35　小規模施工試験と室内試験の透水係数の比較（玄武岩、砂岩）

5.2.5　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の実施により、埋め戻し材の構成材料およ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、技術選択に資する施工データおよび施工後の物性データを取得することを目的とする。

(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 5.2-36 に示す 50×50×20 cm 小型吹付け箱を使用し、吹付け施工試験を実施した。本試験の施工試験の流れおよび概要図を図 5.2-37 に示す。事前にバッチ式ミキサー（日本アイリッヒ㈱：RV12W 型）により混合およ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る。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 5.2-14 に、品質管理項目および施工後取得データを表 5.2-15 に、施工後のサンプリング方法を

図 5.2-38 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）を、模擬掘削土はケイ砂 6 号を用いた。ベントナイト混合率は、5、15、30、50 %とした。施工データ取得のためのパラメータとして、材料供給量を 7.5、10.0、12.5、15 kg/10 sec の 4 ケース、含水比を最適含水比（Wopt）、Wopt+1.5、Wopt+3.0 の 3 ケースとした。

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、3D スキャナによる計測を実施した。また、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。施工後のサンプリングは、

図 5.2-38 に示す 4 箇所より採取した。なお、本試験のシリコーンオイル法では図 5.2-39 に示すように、吹付け施工時にノズルを固定し、凸型に材料を構築した後、この部分を切り取り試験に使用した。この方法は、コア抜きのように、吹付けにより構築した埋め戻し材に貫通する損傷を与えずに湿潤密度を迅速に計測できる利点がある。

図 5.2-36　小型吹付け箱の構造図と試験状況

図 5.2-37　施工試験の流れおよび概要図

表 5.2-14　試験ケース

ベントナイト	ベントナイト混合率（%）	模擬掘削土	材料供給量 kg/10sec	含水比（%）	ケース名
Na 型 クニゲル V1	5	ケイ砂 6 号	7.5 10 12.5 15	w_{opt}	Na05W1
				w_{opt}+1.5	Na05W2
				w_{opt}+3.0	Na05W3
	15			w_{opt}	Na15W1
				w_{opt}+1.5	Na15W2
				w_{opt}+3.0	Na15W3
	30			w_{opt}	Na30W1
				w_{opt}+1.5	Na30W2
				w_{opt}+3.0	Na30W3
	50			w_{opt}	Na50W1
				w_{opt}+1.5	Na50W2
				w_{opt}+3.0	Na50W3
Ca 型 クニボンド RW	5			w_{opt}	Ca05W1
				w_{opt}+1.5	Ca05W2
				w_{opt}+3.0	Ca05W3
	15			w_{opt}	Ca15W1
				w_{opt}+1.5	Ca15W2
				w_{opt}+3.0	Ca15W3
	30			w_{opt}	Ca30W1
				w_{opt}+1.5	Ca30W2
				w_{opt}+3.0	Ca30W3
	50			w_{opt}	Ca50W1
				w_{opt}+1.5	Ca50W2
				w_{opt}+3.0	Ca50W3

表 5.2-15　品質管理項目および施工後取得データ

分類	材料	項目	確認方法	実施時期	実施場所	数量
品質管理 (施工時)	-	歩掛り計測	ストップウォッチ	施工時	現地	日常記録
	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	吊秤	施工時	現地	1 ケース毎
施工後取得データ	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
	難透水性覆土	透水試験	JGS0312-2018「低透水性材料の透水試験方法」	施工後	室内試験室	試験時の最大乾燥密度のケース
		密度試験	パラフィン法	施工後	室内試験室	1 ケース毎
			3D スキャナ	施工後	室内試験室	1 ケース毎

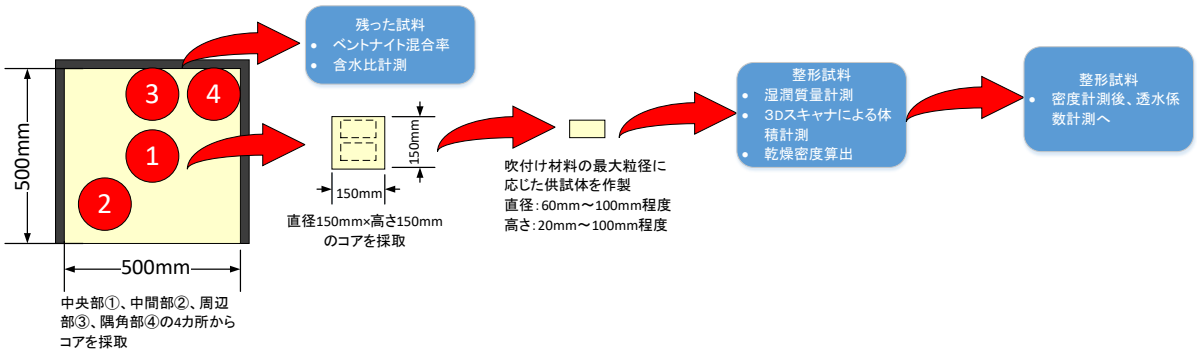


図 5.2-38　施工後のサンプリング方法

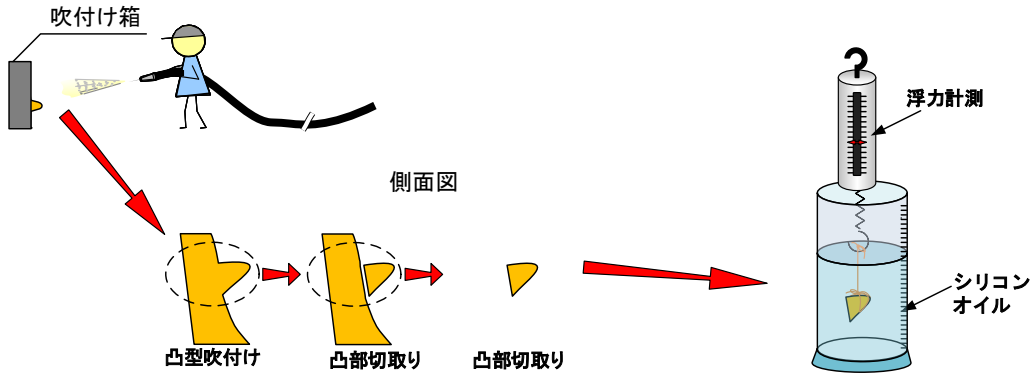


図 5.2-39　シリコーンオイル法の概要

(2)　試験結果

1)　施工データの取得（施工性評価、リバウンド率）

実施した試験ケースの施工性評価のうち、クニゲル V1 のケースを表 5.2-16 に、クニボンド RW のケースを表 5.2-17 に示す。表中の評価欄に記載している施工性とは、埋め戻し材の付着具合、施工の容易度を三段階で評価（吹き付け指揮者、ノズルマンが条件ごとに評価）した。また、表中に記載しているホース内付着物とは、ホース内に材料が付着・蓄積され、ある程度蓄積された材料が一気に吐出する現象である。表中には空欄箇所があり、グラニュレーター（GR）の機械の限界のために、設定していた材料供給量を満足できない、また試験中に GR から異音が発生したことによって実施できなかったケースを示している。さらに、Na50W2，Ca50W2 の条件はグラニュレーター（GR）から排出される造粒材料の粒径が大きくノズルが閉塞したため、ノズル径の大きい拡張ノズルを使用して施工を実施した。

クニゲル V1、クニボンド RW どちらのケースにおいても、ベントナイト混合率 5%、15%のケースではホースの閉塞やホース内の材料付着が多く、施工は困難であった。これは、ベントナイト混合率が低いために、埋め戻し材がホース内の圧送中に材料分離を起こしている可能性が考えられる。一方、施工性、閉塞状況ともに優れているのは、ベントナイトの種類によらず、ベントナイト混合率 30%の条件であり、クニゲル V1 では、全ての含水比、材料供給量のケースにおい

て良好であり、クニボンド RW では、Wopt、Wopt+1.5 の材料供給量 15 kg/10 sec を除いたケースで良好であった。ベントナイト混合率 50%のケースでは、材料の粘性の増加などを理由にグラニュレーターの負荷の増大や材料の団粒化がみられ、施工が困難であった。本試験において模擬掘削土に用いたケイ砂 6 号は前述したように粒子径が小さく揃っているため、吹付け材料としては不向きであると考えられる。但し、ベントナイト混合率 50%のケースのように、材料供給量の調整やノズルの変更などの対策により施工が可能になるケースも確認されており、施工パラメータや機械の調整により施工性が改善することも考えられる。

表 5.2-16　施工性評価結果（クニゲル V1）(1/2)

ケース名	目標材料供給量（kg/10sec）	グラニュレーター（GR）回転数（Hz）	実際の材料供給量（kg/10sec）	吹付け時間（sec）	評価	
					施工性	備考
Na05W1	7.5	19.6	7.25	76	×	閉塞・ホース内付着物多い
	10	30.8	10.24	77	×	閉塞・ホース内付着物多い
	12.5	35.8	13.46	76	×	閉塞・ホース内付着物多い
	15	41.8	15.32	57	×	閉塞・ホース内付着物多い
Na05W2	7.5	20.9	7.46	67	×	閉塞・ホース内付着物多い
	10	28.8	10.22	75	×	閉塞・ホース内付着物多い
	12.5	35.1	13.12	72	×	閉塞・ホース内付着物多い
	15	41.5	14.44	79	×	閉塞・ホース内付着物多い
Na05W3	7.5	21.6	7.94	94	×	閉塞・ホース内付着物多い
	10	28.8	10.56	63	×	閉塞・ホース内付着物多い
	12.5	34.0	12.76	69	×	閉塞・ホース内付着物多い
	15	39.4	15.04	75	×	閉塞・ホース内付着物多い
Na15W1	7.5	21.6	7.82	98	△	閉塞する手前
	10	28.8	9.74	92	△	閉塞する手前
	12.5	38.5	12.54	63	△	閉塞する手前
	15	41.5	13.36	67	△	閉塞する手前
Na15W2	7.5	26.8	7.70	122	○	閉塞無し、ホース内付着物多い
	10	30.7	9.14	102	○	閉塞無し、ホース内付着物多い
	12.5	41.8	11.94	91	○	閉塞無し、ホース内付着物多い
	15	NA	NA	NA	GR の回転数が上がらずに中止	
Na15W3	7.5	34.0	7.52	115	×	閉塞無し、吹き付け機に材料が詰まる
	10	42.9	9.58	69	×	閉塞無し、吹き付け機に材料が詰まる
	12.5	53.8	12.48	87	×	閉塞無し、吹き付け機に材料が詰まる
	15	60.0	14.00	NA	×	施工中止

表 5.2-16　施工性評価結果（クニゲル V1）（2/2）

ケース名	目標材料供給量（kg/10sec）	グラニュレーター（GR）回転数（Hz）	実際の材料供給量（kg/10sec）	吹付け時間（sec）	評価	
					施工性	備考
Na30W1	7.5	23.0	7.74	123	○	閉塞無し、施工性良好
	10	35.1	9.62	116	○	閉塞無し、施工性良好
	12.5	47.9	12.54	85	○	閉塞無し、施工性良好
	15	60.0	14.42	74	○	閉塞無し、施工性良好
Na30W2	7.5	31.0	7.36	134	○	閉塞無し、施工性良好
	10	41.3	9.56	89	○	閉塞無し、施工性良好
	12.5	53.6	13.08	80	○	閉塞無し、施工性良好
	15	60.0	14.64	79	○	閉塞無し、施工性良好
Na30W3	7.5	34.6	7.34	102	○	閉塞無し、施工性良好
	10	44.9	10.64	85	○	閉塞無し、施工性良好
	12.5	51.9	12.94	81	○	閉塞無し、施工性良好
	15	60.0	15.18	71	○	閉塞無し、施工性良好
Na50W1	7.5	19.8	7.14	198	×	閉塞頻度多い、混合土の塊が多い
	10	30.5	9.60	NA	施工中止	
	12.5	41.7	12.76	NA	施工中止	
	15	51.3	15.16	NA	施工中止	
Na50W2	7.5	29.2	7.44	147	○	閉塞頻度少ない、ノズルの変更
	10※	35.8	9.70	117	○	閉塞頻度少ない、ノズルの変更
	12.5※	44.9	11.72	98	○	閉塞頻度少ない、ノズルの変更
	15※	55.9	15.30	88	○	閉塞頻度少ない、ノズルの変更
Na50W3	7.5	34.0	8.06	141	△	閉塞頻度中、混合土の塊が多い
	10	41.2	9.76	104	△	閉塞頻度中、混合土の塊が多い
	12.5	50.0	12.78	83	△	閉塞頻度中、混合土の塊が多い
	15	60.0	14.74	78	△	閉塞頻度中、混合土の塊が多い

表 5.2-17　施工評価結果（クニボンド RW）（1/2）

ケース名	目標材料供給量（kg/10sec）	グラニュレーター（GR）回転数（Hz）	実際の材料供給量（kg/10sec）	吹付け時間（sec）	評価	
					施工性	備考
Ca05W1	7.5	30.8	7.10	127	△	閉塞・ホース内付着物多い
	10	41.3	9.80	114	×	閉塞・ホース内付着物多い
	12.5	51.7	12.38	105	×	閉塞・ホース内付着物多い
	15	60.0	14.96	73	×	閉塞・ホース内付着物多い
Ca05W2	7.5	27.6	8.10	92	×	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
	10	33.3	10.26	80	×	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
	12.5	39.4	12.44	81	×	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
	15	47.9	14.72	75	×	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
Ca05W3	7.5	25.7	8.00	136	×	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
	10	34.4	10.60	119	×	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
	12.5	40.0	12.74	81	×	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
	15	48.4	15.44	68	×	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
Ca15W1	7.5	31.7	7.32	123	△	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
	10	41.0	9.56	103	△	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
	12.5	53.3	12.08	84	△	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
	15	60.0	14.08	NA	施工中止	
Ca15W2	7.5	23.8	7.60	147	△	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
	10	31.6	9.58	102	△	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
	12.5	43.4	11.92	80	△	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
	15	55.8	14.28	65	△	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
Ca15W3	7.5	27.9	7.44	96	△	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
	10	37.2	9.26	65	△	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
	12.5	49.9	12.64	NA	△	閉塞頻度中、ホース内付着物多い
	15	60.0	15.00	NA	△	閉塞頻度中、ホース内付着物多い

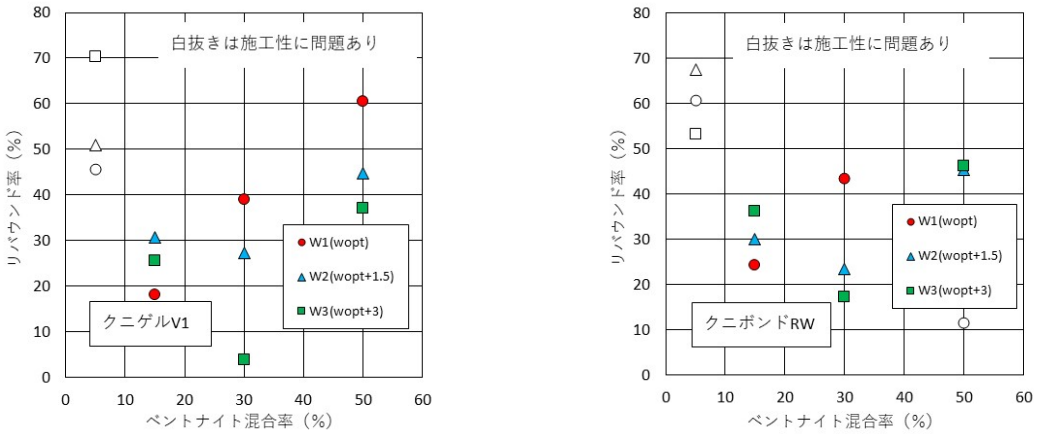
表 5.2-17　施工評価結果（クニボンド RW）（2/2）

ケース名	目標材料供給量（kg/10sec）	グラニュレーター（GR）回転数（Hz）	実際の材料供給量（kg/10sec）	吹付け時間（sec）	評価	
					施工性	備考
Ca30W1	7.5	27.1	7.92	146	○	閉塞無し、施工性良好
	10	41.3	9.78	90	○	閉塞無し、施工性良好
	12.5	60.0	12.5	78	○	閉塞無し、施工性良好
	15	NA	NA	NA	GR の回転数が上がらずに中止	
Ca30W2	7.5	39.1	7.20	109	○	閉塞無し、施工性良好
	10	46.4	9.64	86	○	閉塞無し、施工性良好
	12.5	60.0	12.60	70	○	閉塞無し、施工性良好
	15	NA	NA	NA	GR の回転数が上がらずに中止	
Ca30W3	7.5	30.2	7.82	104	○	閉塞無し、施工性良好
	10	37.9	9.68	97	○	閉塞無し、施工性良好
	12.5	49.9	11.98	74	○	閉塞無し、施工性良好
	15	60.0	14.76	67	○	閉塞無し、施工性良好
Ca50W1	7.5	9.0	4.68	65	GR の負荷大，GR から異音あり，施工中断	
	10	NA	NA	NA	GR の負荷大，GR から異音あり，施工未実施	
	12.5	NA	NA	NA	GR の負荷大，GR から異音あり，施工未実施	
	15	NA	NA	NA	GR の負荷大，GR から異音あり，施工未実施	
Ca50W2	7.5※※※ (5.0)	8.7	4.46	461	○	閉塞頻度少ない、ノズル・材料供給量の変更
	10※※※ (7.5)	13.7	7.86	343	○	閉塞頻度少ない、ノズル・材料供給量の変更
	12.5※※※ (10.0)	20.5	8.52	58	○	閉塞頻度少ない、ノズル・材料供給量の変更
	15	NA	NA	NA	GR の回転数が上がらずに中止	
Ca50W3	7.5※※ (5.0)	15.7	4.06	483	○	閉塞頻度少ない、材料供給量の変更
	10※※ (7.5)	21.1	7.38	160	○	閉塞頻度少ない、材料供給量の変更
	12.5※※ (10.0)	28.9	10.76	103	○	閉塞頻度少ない、材料供給量の変更
	15	NA	NA	NA	GR の回転数が上がらずに中止	

※ノズルの変更（通常ノズル→拡張ノズル）、※※材料供給量変更
※※※ノズル変更（通常ノズル→拡張ノズル）、材料供給量変更

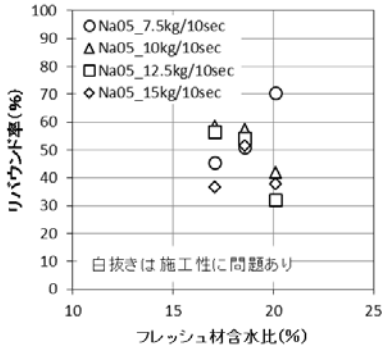
吹付け工法においては、リバウンド率およびリバウンド材の再利用が一つの課題として挙げられる。実施工において、フレッシュ材とリバウンド材の違いを明確に把握できれば、再度フレッシュ材と同等の配合に調整したうえで、リバウンド材を埋め戻し材として再利用することも検討できる。そこで、本試験では吹き付けにより生じるリバウンド材の再利用可否を検討するため、回収したリバウンド材の粒度試験を実施し、吹き付け前の材料からの粒度分布の変化を確認した。ベントナイト混合率とリバウンド率の関係を図 5.2-40 に、クニゲル V1 のフレッシュ材含水比とリバウンド率の関係を図 5.2-41 に、クニボンド RW のフレッシュ材含水比とリバウンド率の関係を図 5.2-42 に、示す。なお、本試験のリバウンド率は、吹付け機に投入した材料の質量と小型吹付け箱に作製した埋め戻し材の質量の比より算出した。

ベントナイトの種類にかかわらず、ベントナイト混合率 15 %、30 %において、リバウンド率が低い傾向がみられた。また、クニゲル V1 のケースについて、ベントナイト混合率 5 %、15 %のケースでは含水比とリバウンド率の関係に相関はみられないが、ベントナイト混合率 30 %、50 %のケースでは、含水比の増加に伴い、リバウンド率が減少する傾向がみられた。クニボンド RW のケースでは、ベントナイト混合率 30 %のケースのみ、含水比の増加に伴い、リバウンド率が減少する傾向がみられた。

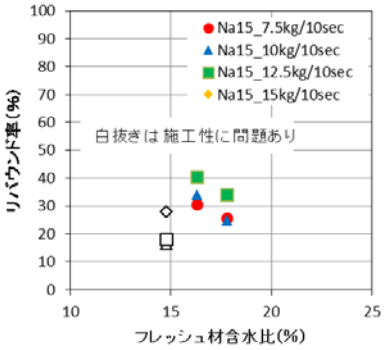


（a）クニゲル V1　　（b）クニボンド RW

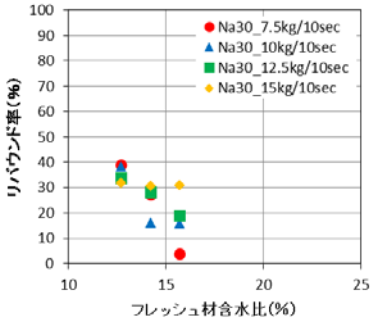
図 5.2-40　ベントナイト混合率とリバウンド率の関係



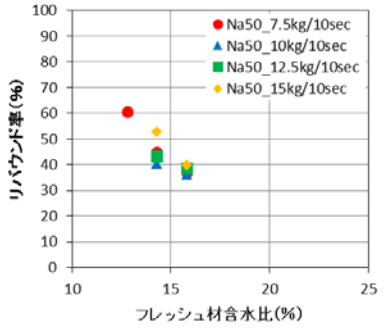
（a）ベントナイト混合率 5 %



（b）ベントナイト混合率 15 %

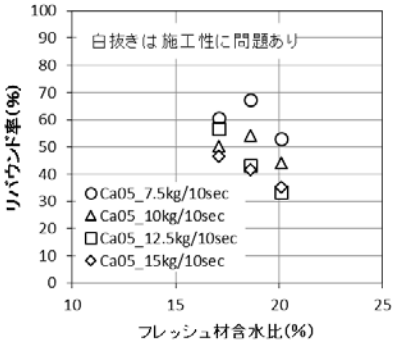


（c）ベントナイト混合率 30 %

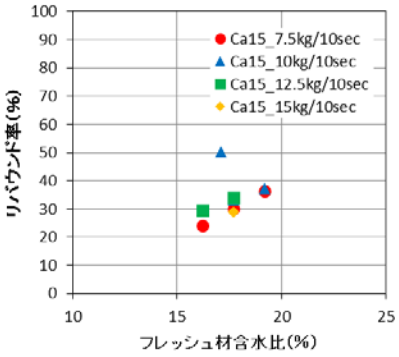


（d）ベントナイト混合率 50 %

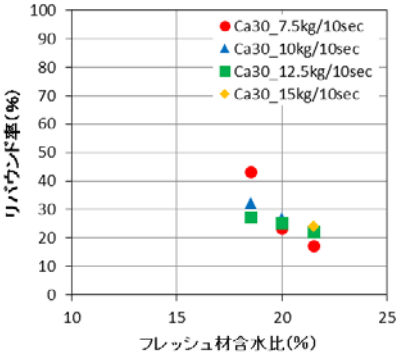
図 5.2-41　フレッシュ材含水比とリバウンド率の関係（クニゲル V1）



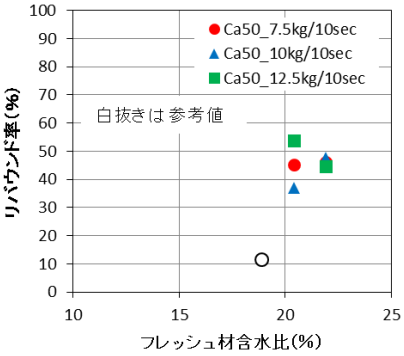
（a）ベントナイト混合率 5%



（b）ベントナイト混合率 15%



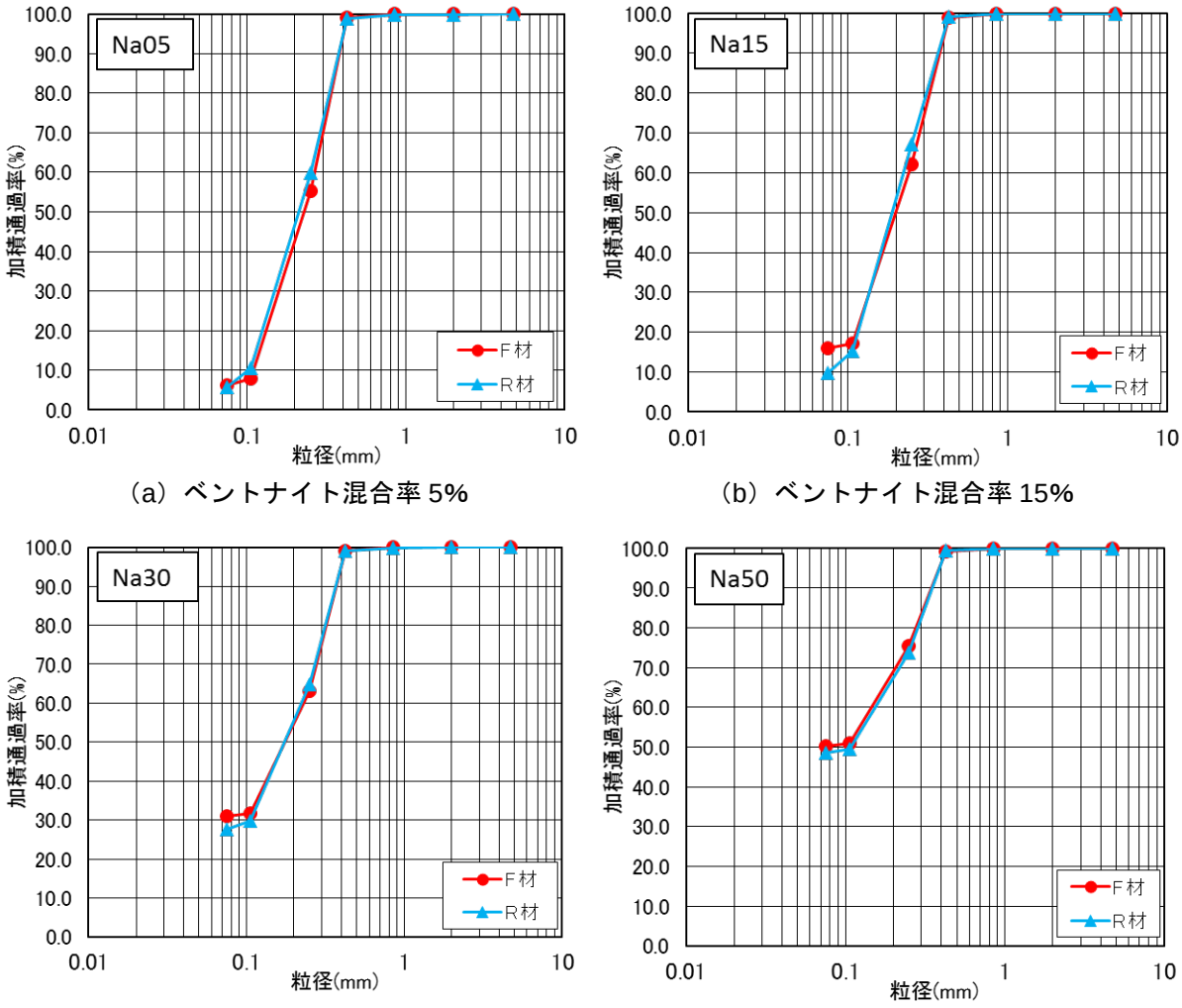
（c）ベントナイト混合率 30%



（d）ベントナイト混合率 50%

図 5.2-42　フレッシュ材含水比とリバウンド率の関係（クニボンド RW）

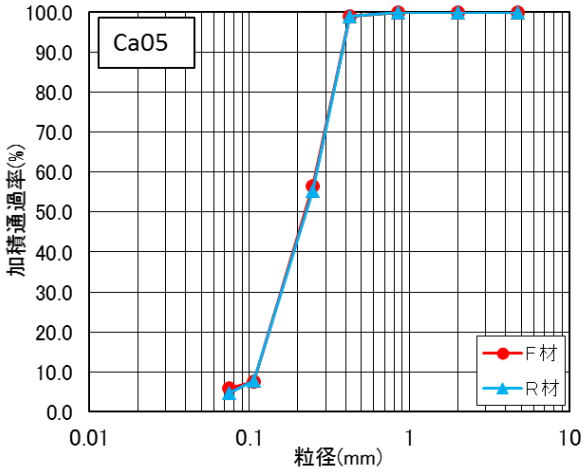
吹付け前の材料（F 材）とリバウンド材（R 材）の粒度試験結果のうち、クニゲル V1 のケースを図 5.2-43 に、クニボンド RW のケースを図 5.2-44 に示す。ベントナイトの種類、混合率にかかわらず、吹付け前の材料の粒度分布とリバウンド材の粒度分布の違いは小さく、リバウンド材を再利用できる可能性もあることがわかった。



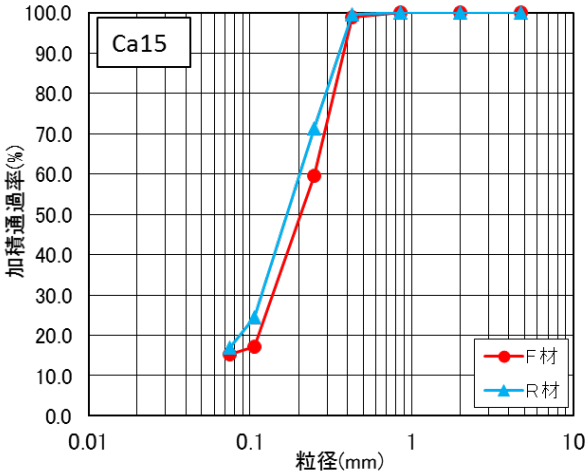
（a）ベントナイト混合率 5%　　（b）ベントナイト混合率 15%

（c）ベントナイト混合率 30%　　（d）ベントナイト混合率 50%

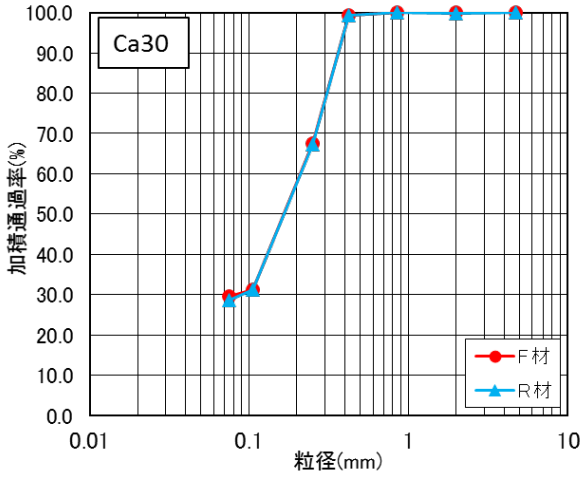
図 5.2-43　フレッシュ材とリバウンド材の粒度試験結果（クニゲル V1）



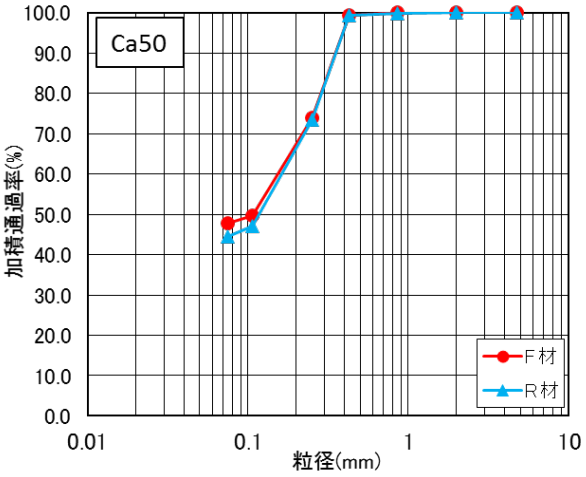
（a）ベントナイト混合率 5%



（b）ベントナイト混合率 15%



（c）ベントナイト混合率 30%



（d）ベントナイト混合率 50%

図 5.2-44　フレッシュ材とリバウンド材の粒度試験結果（クニボンド RW）

2)　埋め戻し材の品質確認

吹付け工法により構築した埋め戻し材の含水比、乾燥密度および透水試験の結果を以下に示す。但し、試験結果は前述の施工性試験の結果を考慮し、ベントナイト混合率 30%のケースとする。

① 乾燥密度および含水比

シリコーンオイル法より得られた湿潤密度、電子レンジ法および炉乾燥法より得られた含水比、それぞれから算出した乾燥密度を表 5.2-18 に、シリコーンオイル法および炉乾燥法より算出した含水比と乾燥密度の関係を図 5.2-45 に示す。図 5.2-46 には、同じ配合の室内締固め試験の結果（4.5Ec）も併せて示す。また、材料供給量と乾燥密度の関係を図 5.2-46 に示す。

電子レンジ法および炉乾燥法より得られた含水比は、全ての配合で 3 %以内の違いであるため、施工現場における速報値として、電子レンジ法を用いた品質管理は有効であると考えられる。図 5.2-45 より、吹付け工法による埋め戻し材の乾燥密度は施工条件により多少のばらつきはあるものの、全てのケースで締固め度 90%程度以上である。また、それぞれのケースの材料供給量と乾燥密度の関係をみると、材料供給量の増加に伴う乾燥密度の変動は小さく、本試験条件においては、材料供給量が最大の条件で施工が可能である。

表 5.2-18　湿潤密度、含水比および乾燥密度

ケース名	材料供給量 kg/10sec	湿潤密度 ρ_t（Mg/m^3）	含水比 w（%）		乾燥密度 ρ_d（Mg/m^3）	
			電子レンジ	炉乾燥	電子レンジ	炉乾燥
Na30W1	7.5	2.030	14.43	13.01	1.775	1.797
	10	2.038	13.52	12.96	1.795	1.804
	12.5	2.038	13.81	12.31	1.787	1.811
	15	2.065	13.62	12.60	1.817	1.834
Na30W2	7.5	2.012	14.52	13.35	1.757	1.775
	10	2.020	15.55	13.95	1.763	1.773
	12.5	2.005	14.45	13.83	1.751	1.761
	15	2.036	14.27	13.92	1.782	1.787
Na30W3	7.5	1.986	15.83	14.66	1.714	1.732
	10	1.995	15.85	15.35	1.722	1.730
	12.5	1.996	16.46	15.26	1.714	1.731
	15	2.001	15.89	15.41	1.727	1.734
Ca30W1	7.5	1.949	18.03	17.21	1.651	1.663
	10	1.973	18.52	17.41	1.664	1.680
	12.5	1.973	18.62	17.95	1.663	1.673
	15	NA	NA	NA	NA	NA
Ca30W2	7.5	1.922	19.65	17.68	1.606	1.633
	10	1.932	19.61	19.05	1.616	1.623
	12.5	1.945	19.86	18.94	1.623	1.636
	15	NA	NA	NA	NA	NA
Ca30W3	7.5	1.903	21.00	19.69	1.573	1.590
	10	1.902	21.36	20.71	1.567	1.575
	12.5	1.897	21.44	20.79	1.562	1.570
	15	1.894	21.78	21.07	1.556	1.565

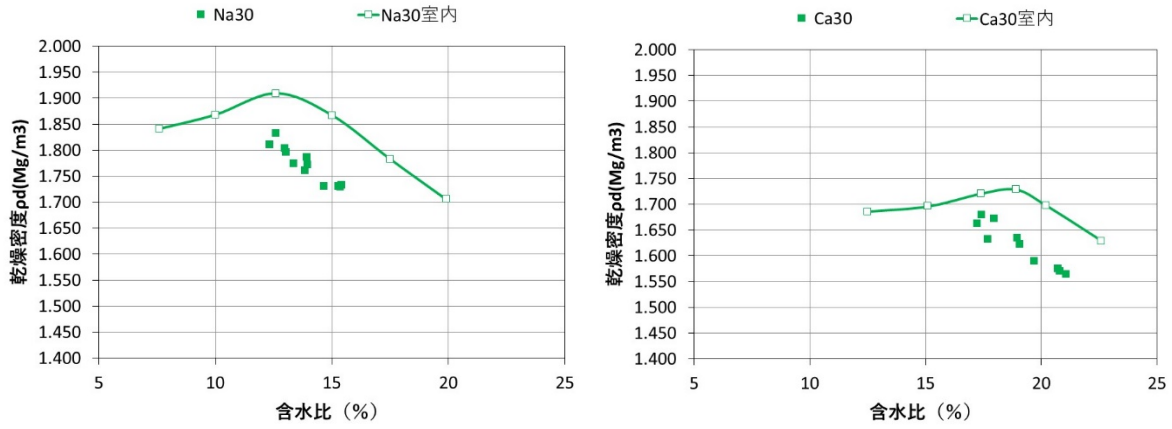


図 5.2-45　含水比と乾燥密度の関係（左：Na 型ベントナイト、Ca 型ベントナイト）

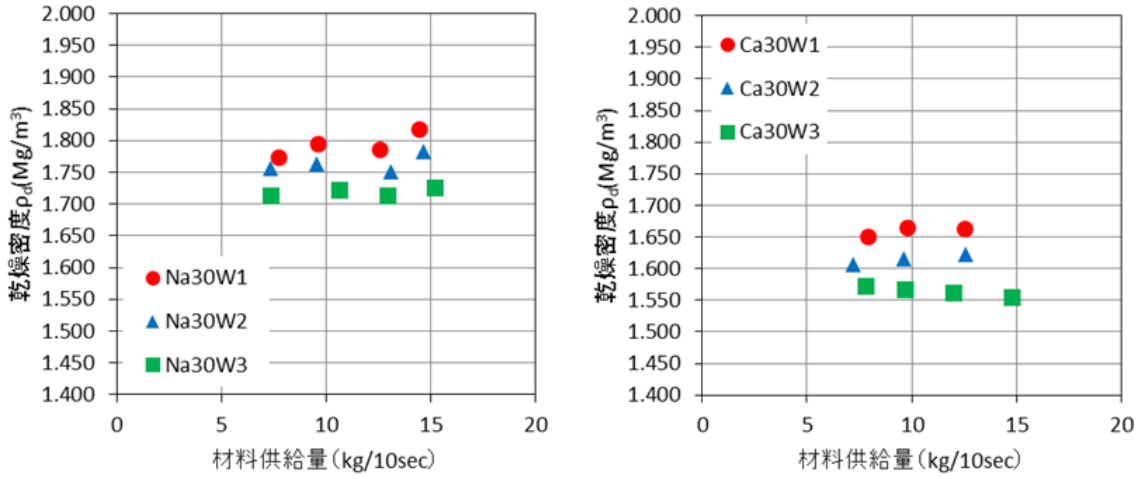
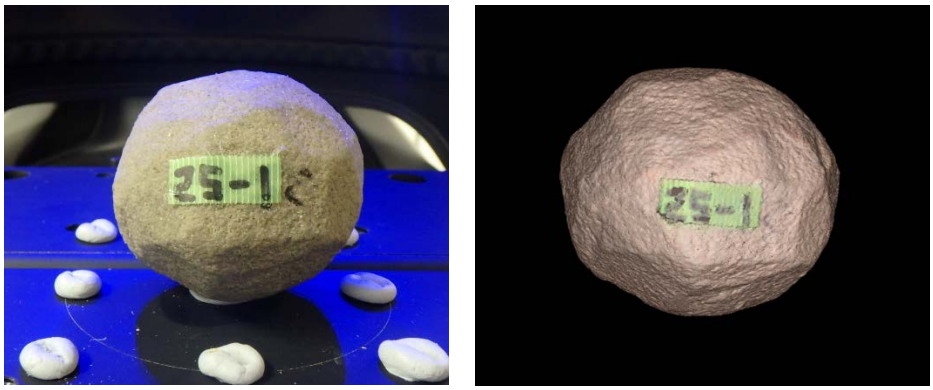


図 5.2-46　材料供給量と乾燥密度の関係
（左図：Na 型、右図：Ca 型）

吹付け工法では、吹き付けた際の圧縮空気の逃げ道がない箇所で乾燥密度が小さくなる傾向がある。吹付け試験では、吹付け箱の中に隅角部があるため、吹付け箇所の違いによって密度が異なる可能性がある。そこで、吹付け箱の中のサンプリング位置の違いによる品質のばらつきを検討した。本検討では、3D スキャナを使用して、供試体の重量、体積から湿潤密度 ρ_t、炉乾燥法から得られる含水比を用いて乾燥密度 ρ_d の算出を行った。図 5.2-47 に 3D スキャナで撮影した供試体の状況を示す。図が示すように 3D スキャナを用いることで供試体の細かい凹凸まで計測可能であり、高精度な体積の算出が可能である。また、同一試料を用いて、パラフィン法にて乾燥密度の算出も行った（図 5.2-48）。

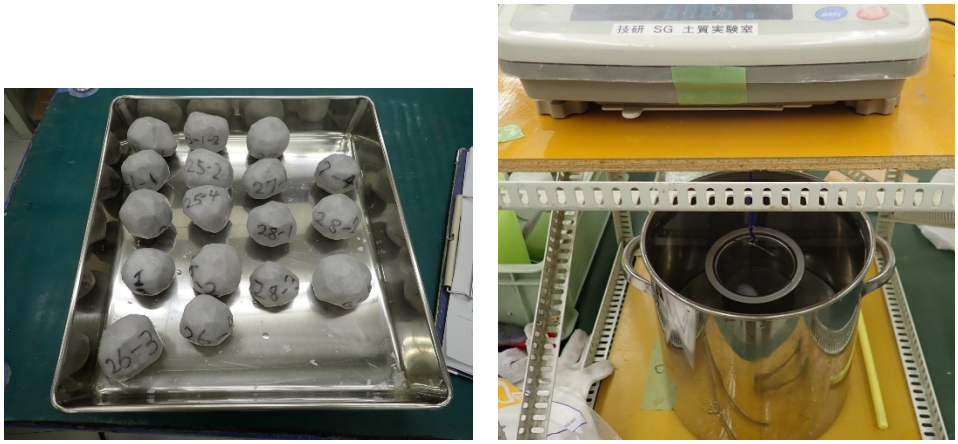
Na30W1 ケースにおける 3D スキャナで算出した乾燥密度を図 5.2-49 に、パラフィン法から算出された乾燥密度を図 5.2-50 に示す。なお、それぞれの試験結果には、前述したシリコーンオイル法と電子レンジ法による乾燥密度を併せて示す。

図 5.2-49、図 5.2-50 より、Na30W1 ケースにおいては、吹き付け箱内のサンプル位置の違いによる密度差は小さく、均一な施工ができていることがわかる。また、3D スキャナとパラフィン法による乾燥密度は概ね同様の結果を示し、シリコーンオイル法による乾燥密度よりも若干高い数値を示すことが確認された。つまり、シリコーンオイル法と電子レンジ法による乾燥密度の品質管理は、施工現場の安全側の速報値として有効に利用できる可能性がある。



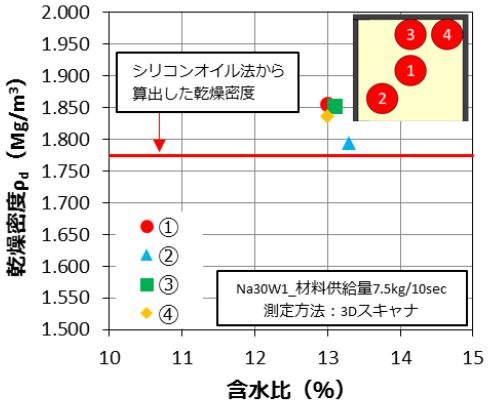
（a）撮影対象　　（b）スキャン結果

図 5.2-47　3D スキャナによる密度計測

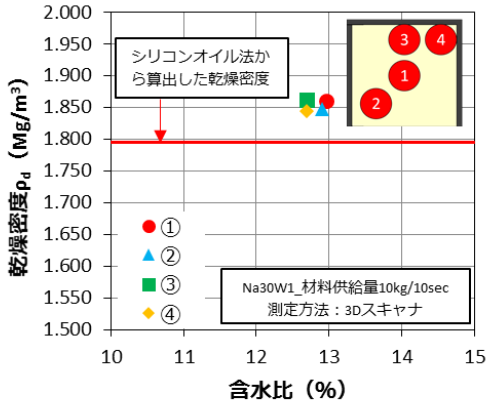


（a）パラフィン塗布後の供試体　　（b）測定中

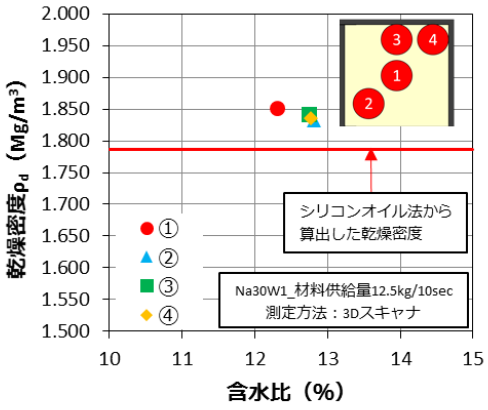
図 5.2-48　パラフィン法による密度計測



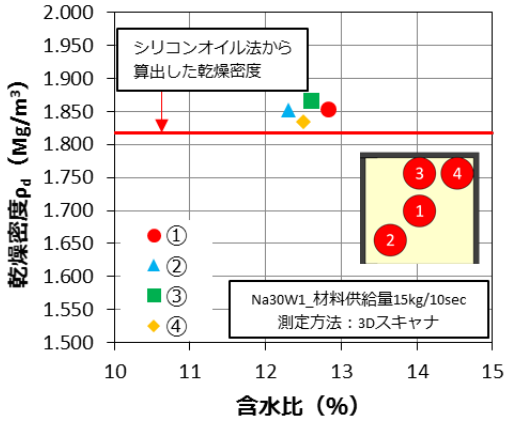
(a)材料供給量 7.5 kg/10sec



(b) 材料供給量 10 kg/10sec

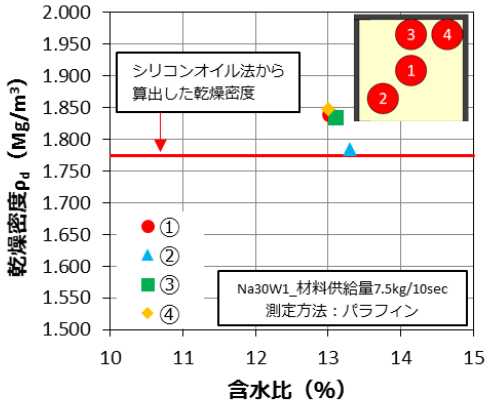


(c) 材料供給量 12.5 kg/10sec

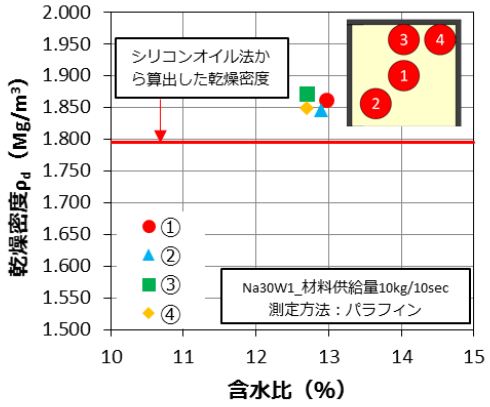


(d) 材料供給量 15 kg/10sec

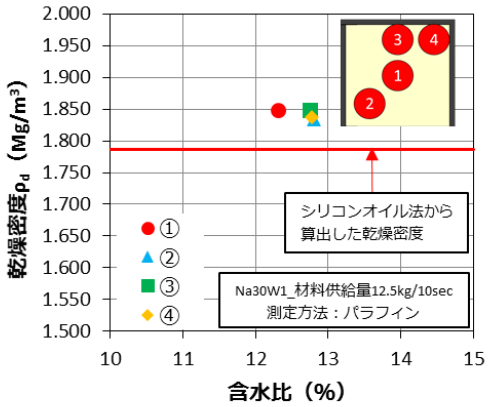
図 5.2-49　含水比と乾燥密度の関係（3D スキャナ）



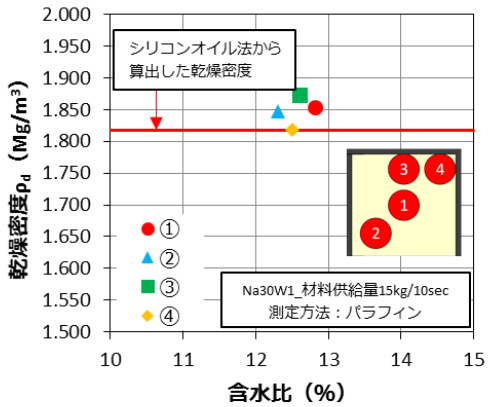
(a)材料供給量 7.5 kg/10sec



(b) 材料供給量 10 kg/10sec



(c) 材料供給量 12.5 kg/10sec



(d) 材料供給量 15 kg/10sec

図 5.2-50　含水比と乾燥密度の関係（パラフィン法）

② 透水係数

透水試験の試験ケースを表 5.2-19 に示す。透水試験は、クニゲル V1 およびクニボンド RW のベントナイト混合率 30%のケースにおいて、吹付け試験で得られた乾燥密度が最大となった施工条件のケースで実施した。

表 5.2-19　透水試験ケース

ケース名	乾燥密度 ρd（Mg/m³）
Na30W1（15.0 kg/10sec）	1.834
Ca30W1（10.0 kg/10sec）	1.680

透水試験の経時変化を図 5.2-51 に示す。透水係数は Na30W1 では 1×10^{-11} m/s 程度、Ca30W1 では 1×10^{-10} m/s 程度であり、同じベントナイト混合率においても、クニゲル V1 とクニボンド RW の透水係数には 1 オーダー程度の差がみられた。

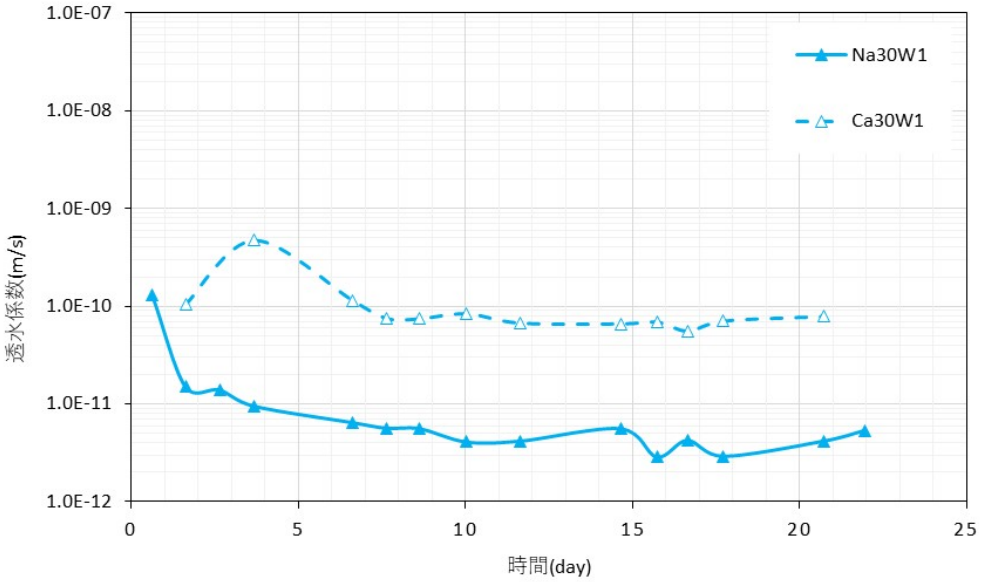


図 5.2-51　透水係数の経時変化

5.2.6　埋め戻し材の施工プロセス管理方法に関する調査

埋め戻し材の施工プロセス管理方法について検討するために、国内の一般土木構造物で実績がある施工管理方法および放射性廃棄物分野を対象とした施工管理方法について調査を行った。これらの調査結果と本事業で実施している埋め戻し材の小規模施工試験などの結果に基づいて、来年度に埋め戻し材の施工プロセス管理方法の案を構築する予定である。

一般土木構造物（盛土構造物）の品質管理においては、通常は締固め密度、含水比および透水係数といった性能指標を施工後に任意の点で測定する品質規定方式と、モデル施工を通じて適合性が確認された使用重機の選定や、転圧工法の場合には、撒き出し厚さと転圧回数などを規定して施工する工法規定方式とに分けることができる。

品質規定方式は、地層処分場の埋め戻しのような延長数百 km におよぶ大規模施工においては現場測定を多数かつ頻繁に行う必要があること、および、ある程度大きい単位、例えば 1,000 m^3 毎に 1 回、といった粗な計測によって広い空間の性能を保証することになるなど、現場施工が大規模になるほど適用が困難になる。処分場の埋め戻しにおける使用材料は比較的一定した品質になると考えられること、精密調査段階における地下調査施設での実証試験などの事前の施工試験が十分に行えること、材料の配合や含水比管理についての知見の蓄積が進んでいること、および延長数百 km 以上の大規模施工であることから、埋め戻しの施工においても工法規定方式の採用が有力な候補であると考えられる。

国内の土構造物施工管理に関する規格基準類（例えば、国土交通省：道路工事施工管理基準（案）、日本道路協会：道路土工盛土工指針など）では、R. P. Proctor が体系化した考え方（Proctor, 1933a；1933b；1933c；1933d）に基づいて作成されてきたものと考えられる（地盤工学会, 1991; 地盤工学会, 2012）。Proctor は、自身が土木技術者として携わった多くのアースダム建設工事における経験と知識に基づき、1933 年に土の締固め特性、締固め試験方法、現場での施工管理手法などに関する一連の論文を発表し、後の土構造物の施工管理全般に関する考え方を示した。

Proctor の施工管理の考え方は、構造物に要求される機能の設定から始まり、要求機能を達成するための土の工学的な性質の設定、さらにそれを達成するための室内試験や現場試験の実施と

管理基準の設定というように、構造物が果たすべき機能が確実に実現されることを第一の目標として考え方が構築されている。Proctor のアースダム建設時の施工管理の流れは以下のように整理できる（地盤工学会, 2012）。

①アースダムに要求される機能の設定
②締固めに要求される工学的性質の設定
③室内試験による現場締固めの再現（締固め試験）
④盛り立て時の停滞変形の検討（圧密試験）
⑤ダム完成後の湛水時の特性検討（透水試験、体積変化の確認：膨潤試験）
⑥施工管理基準（品質管理基準）の設定
⑦現場における転圧仕様の決定
⑧施工管理の実施

上記は、地層処分施設の埋め戻し材の施工プロセス管理方法を検討する上で参考になると考えられる。埋め戻し材の施工管理指標としては最終的に密度と含水比に集約されると考えられ、その指標を実現する品質管理方式としては事業規模などに応じて品質規定方式もしくは施工規定方式が選択されていくことになる。

5.2.7　まとめ

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、今後のサイト選定に伴い具体化される候補サイトの多様な地質環境への柔軟な対応を念頭に置いた課題設定を行い、ベントナイト、模擬掘削土の種類などをパラメータに設定した室内試験、埋め戻し材の浸潤過程の予測に必要なデータの取得、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、一般土木分野における施工管理方法の調査を実施した。

埋め戻し材の材料特性データを取得するための室内試験では、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した試験を実施し、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を幅広い条件で取得した。その結果、Na 型に比べて Ca 型ベントナイトの締固め性能および膨潤圧は低く、最適な混合率や締固めエネルギーによる影響にも違いがみられた。また、模擬掘削土に火成岩および堆積岩を用いたケースでは、土粒子密度および粒度分布の影響により、多くのケースでケイ砂 6 号のケースよりも、締固めにより得られる乾燥密度は大きくなった。但し、珪藻土や泥岩のように空隙の多い岩種のケースでは、得られる乾燥密度が極端に低い場合もみられた。また、模擬掘削土としてケイ砂 6 号を用いた保水性試験や透気試験を実施し、埋め戻し材への地下水の浸潤挙動の予測に必要な水分特性曲線や透気係数などのパラメータを取得した。

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では、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。その結果、撒き出し・転圧工法では模擬掘削土にケイ砂 6 号、玄武岩、砂岩を用いたいずれのケースにおいても施工性は良好であり、汎用の転圧機械を用いて締固め度 95 %以上を達成し、透水係数も室内試験と同等の数値が得られることがわかった。吹付け工法では模擬掘削土にケイ砂 6 号を用いた場合、ベントナイト混合率 30%のケースで施工性が最も良好であり、吹付け箱内での施工後の品質のばらつきやリバウンド率も小さかった。また、吹付け後の埋め戻し材は、締固め度 90 %以上の乾燥密度を達成し、透水係数も室内試験と同等の数値が得られることがわかった。但し、どちらの工法においても Na 型に比べて Ca 型ベントナイトのケースでは、施工後の埋め戻し材の乾燥密度は低く、透水係数は 1～2 オーダー程度高い結果となった。

上記の埋め戻し材に関する試験結果等を踏まえて、今後、埋め戻し材の施工プロセス管理方法について検討を行うために、一般土木分野を対象とした施工管理方法の調査を実施した。国内の土構造物施工管理に関する規格基準類は、R. P. Proctor が体系化した考え方に基づいて作成されており、これらの規格基準類は埋め戻し材の施工プロセス管理方法を構築する上での基礎になると考えられる。埋め戻し材の施工管理指標としては、最終的に密度と含水比に集約されると考えられ、次年度の試験結果等を踏まえて埋め戻し材の施工プロセス管理方法の具体化を進める。

参考文献

戸栗智仁、矢萩良二、沖原光信、竹内伸光、黒崎ひろみ、松井裕哉（2019）：瑞浪超深地層研究所における坑道一部埋め戻し試験の計画策定、JAEA Technology 2018-017（印刷中）

原子力発電環境整備機構（2016）：NUMO セーフティケースに関する外部専門家ワークショップ資料, https://www.numo.or.jp/topics/safetycase_setsumei4.pdf, 2016, 97p.（参照：2019 年 2 月 1 日）

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：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-pp323-327, V-pp63-68.

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報告書, 1-pp11-12, 3-pp1-167.

髙安健太郎、大貫賢二、川本康司、高山祐介、見掛信一郎、佐藤稔紀、尾上博則、竹内竜史（2017）：再冠水試験におけるボーリングピットの埋め戻し試験，JAEA-Technology 2017-011, 61p.

核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－－分冊 2 工学技術の開発－，JNC TN1400 2005-015, 2005, 2-pp32-35.

原子力環境整備促進・資金管理センター（2016）：平成 27 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 2 分冊）－人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材, 5-pp1-170.

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－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.

経済産業省資源エネルギー庁、原子力発電環境整備機構（2019）科学的特性マップに関する対話型全国説明会　説明資料.（2019 年 2 月 1 日更新）

Proctor, R. R.（1933a）: Fundamental Principles of Soil Compaction, Engineering News-Record, Vol.3, No.9, pp.245-248.

Proctor, R. R.（1933b）: Description Field and Laboratory Methods, Engineering News-Record, Vol.3, No.10, pp.286-289, 1933b.

Proctor, R. R.（1933c）: Feild and Laboratory Verification of Soil Suitability, Engineering News-Record, No.12, pp.348-351, 1933c.

Proctor, R. R.（1933d）: New Principles Applied to Actual Dam-Building, Engineering News-Record, Vol.3, No.13, pp.372-376, 1933d.

土質工学会（1991）：土質基礎工学ライブラリー　土の締固めと管理.

地盤工学会（2012）：地盤工学・実務シリーズ　土の締固め.

6. 結言

6.1 平成 30 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－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、モニタリングや品質保証に係る取組を包含した包括的な性能確認プログラムの観点から、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を調査した。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、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んだ。加えて、光ファイバーなどの新たなセンサー技術の開発動向を調査した。

無線伝送技術の実証では、幌延深地層研究センターにおける人工バリア性能確認試験の一環として実施している長期運用試験を継続するとともに、地下 500m から地表までの計測データの無線伝送システムの設計案に関する机上検討として、瑞浪超深地層研究所を例題に複数のシステム設計例を具体化し比較検討を行った。無線給電技術の高度化では、地下原位置での活用例（研究開発段階における活用例を含む）の一つとして処分孔内に配置する複数のモニタリング機器への無線給電を想定し、給電システムとしての設計方法（受電側のモニタリング機器が必要とする電力を供給するための設計方法）を検討し、設計案を例示した。

また、新たなセンサー技術の開発動向では、国内や諸外国での地層処分研究におけるセンサー技術の開発動向や計測状況を整理し、光ファイバーセンサーを中心とした 10 数件のセンサー技術を抽出した。

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、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、本事業において検討を進めるシーリングシステムの設計手法の整備の一環として同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。そのような整理を通して、本事業では、「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」をシーリングシステムに求める安全機能の基軸として設定し、安全機能に影響を及ぼす可能性のある、因子・プロセスを、THMC の観点から網羅的に整理した。以上の取組みを経て、今後シーリングシステムが卓越した移行経路と成り得るシナリオを設定する上での基礎的な情報としての整備を行った。

「シーリングシステム設計評価技術開発」として、高レベル放射性廃棄物の地層処分について既にサイト選定が終了し事業として進んでいる諸外国（フィンランド、スウェーデン）を中心として、スイス、フランス、カナダも加え、主に安全評価とシーリング設計との関係について、事業側のみならず安全規制側の動向も考慮した詳細な文献調査を実施した。その結果、諸外国における安全確保の考え方（セーフティーケース）、それに基づく処分システムの安全評価とそのシー

リングに求められる要件などについて整理ができ、我が国におけるシーリング設計技術の提示に向けた基盤情報としての整備を行った。

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」として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、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変形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における挙動の再現に向けて、人工バリア性能確認試験のレイアウトを模擬した緩衝材と埋め戻し材の小規模模型を用いた膨潤挙動小規模試験を実施した。その結果、小規模試験装置による試験において、緩衝材供試体への注水状況を再現できていることが確認でき、水の浸潤による緩衝材の膨潤挙動を確認することができた。

また、「EDZ シーリング試験」では、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ベントナイト系材料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することによって、幌延の地下環境条件におけるベントナイト系材料で構成する止水壁の地下水移行抑制機能を把握する予定である。本年度は、EDZ シーリング試験の実施に先立ち、粘土止水壁に用いるベントナイト系材料を選定するために、クニゲル GX とクニゲル V1 のペレットを対象とした膨潤挙動確認試験を実施し、ベントナイトを充填した際の空隙発生の有無や模擬地下水を通水した際の膨潤の状況の確認を行った。さらに、試験坑道 3 の底盤下の EDZ の拡がりや岩盤の状態に関する調査を実施するとともに透水試験により透水性の調査を行い、EDZ シーリング試験の実施予定場所の状況を把握した。

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、実際の処分事業で想定される深度 300 m 以深に位置する瑞浪超深地層研究所（結晶質岩）の深度 500 m 研究坑道の一部を活用し、国内外でほとんど事例のない坑道全断面の吹付け施工試験を実施した。その結果、同施工法を用い、今回設定した埋め戻し材の透水性（10^{-8} m/s）を満足する埋め戻しが実施できることを確認し、吹付け工法が実事業における施工法としても実用性を有することを実証的に示すとともに、その適用に際して必要な品質管理手法なども併せて提示した。

「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、今後のサイト選定に伴い具体化される候補サイトの多様な地質環境への柔軟な対応を念頭に置いて、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した。また、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を実施し、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。その結果、撒き出し・転圧工法では締固め度 95 %以上、吹付け工法では締固め度 90 %以上の乾燥密度を達成し、透水係数も室内試験と同等の数値が得られることがわかった。

6.2 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 30 年度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。